

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Kriterien und deren experimentelle Bereitstellung  
zur Einschätzung der Eignung von Hochdruck-  
löschverfahren für den mobilen Feuerwehreinsatz

# 128

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

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

Arbeitskreis V

Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 128

**Kriterien und deren experimentelle Bereitstellung  
zur Einschätzung der Eignung von Hochdruck-  
löschverfahren für den mobilen Feuerwehreinsatz**

von

Dr. rer. nat. Horst Starke

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

November 2001

## BERICHTS-KENNBLATT

|   |  |   |                    |
|---|--|---|--------------------|
| Nummer des Berichtes:   | Titel des Berichtes  | ISSN:   |                    |
| 128   | Kriterien und deren experimentelle<br>Bereitstellung zur Einschätzung der<br>Eignung von Hochdrucklöschverfahren<br>für den mobilen Feuerwehreinsatz | 1170-0060   |                    |
| Autoren:  |  | durchführende Institution:  |                    |
| Dr. rer. nat. Horst Starke  |  | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt<br>Biederitzer Straße 5<br>D-39175 Heyrothsberge<br>Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski                     |                    |
| Nummer des Auftrages:   |  | auftraggebende Institution:   |                    |
| 30 (1/2000)H  |  | Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der<br>Bundesländer, Arbeitskreis V –<br>Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten,<br>Katastrophenschutz und zivile Verteidigung |                    |
| Datum des Berichtes:  |  |   |                    |
| November 2001   |  |   |                    |
| Seitenzahl:   | Bilder:  | Tabellen:   | Literaturverweise: |
| 161   | 113  | 10  | 84                 |
| Kurzfassung:  |  |   |                    |
| <p>Im Forschungsvorhaben wurden verschiedene Sprühstrahlen untersucht, die durch mobile Hochdrucklöschtechnik erzeugt wurden. Bei den Versuchen wurde nur das Löschmittel Wasser ohne Löschmittelzusätze verwendet.</p> <p>Nach der Diskussion der Löschwirkung des Wassers wurden Gründe für die Verringerung des Löschmitteleinsatzes genannt, die auch zur Entwicklung der Hochdrucklöschtechnik für den Bereich der mobilen Brandbekämpfung führten. Einige in der Praxis eingesetzte Verfahren und technische Parameter wurden zusammengestellt.</p> <p>Im Versuchsprogramm wurden 7 Sprühstrahlen berücksichtigt. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Brand- und Löschversuche auf dem Automatic Fire Fighter (AFF)</li> <li>◆ Sprühversuche auf dem AFF</li> <li>◆ Sprühstrahlvermessung mit dem PDA</li> <li>◆ Messung der Massenstromdichte</li> </ul> <p>Die Versuchsplätze können für weitere Versuchsserien genutzt werden. Der aktuelle Stand der Versuchsaufbauten ist in Anlagen beschrieben.</p> <p>Die Versuchsergebnisse wurden mit Hilfe von Grafiken ausgewertet. Schlussfolgerungen wurden sowohl aus Literaturlauswertungen als auch unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse gezogen.</p> |  |   |                    |
| Schlagwörter:   |  |   |                    |
| <p>Ausbildung, Brandversuche, Einsatztaktik, Hochdrucklöschtechnik, Hochdrucklöschverfahren, Holzkrippen, Löschversuche, Massenstromdichte, Mobile Brandbekämpfung, Temperaturmessung, Tropfendurchmesser-Verteilung, Wärmestrahlung, Wasserdampf, Phasen-Doppler-Anemometer</p>  |  |   |                    |

## INHALTSVERZEICHNIS

|         |  |    |
|---------|--|----|
|         | VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK .....                             | 1  |
| 1       | EINLEITUNG .....   | 4  |
| 2       | HOCHDRUCKLÖSCHVERFAHREN IM FEUERWEHREINSATZ .....                          | 7  |
| 2.1     | Löschen mit Wasser .....   | 7  |
| 2.2     | Mobile Hochdrucklöschverfahren .....                                       | 11 |
| 2.3     | Strahlrohre .....  | 16 |
| 3       | VERSUCHSPROGRAMM UND –DURCHFÜHRUNG .....                                   | 17 |
| 3.1     | Auswahl der Sprühstrahlen .....  | 17 |
| 3.2     | Festlegen der Brandobjekte .....   | 19 |
| 3.3     | Versuchsplätze und Versuchsprogramm .....                                  | 29 |
| 3.4     | Datenstruktur .....  | 30 |
| 4       | AUSWERTUNG DER VERSUCHE FÜR DIE EINZELNEN VERSUCHSPLÄTZE .....             | 32 |
| 4.1     | Auswertung der Brand- und Löschversuche auf dem AFF .....                  | 32 |
| 4.1.1   | Holzkippenbrandversuche .....  | 32 |
| 4.1.1.1 | Messstellen und Versuchsdurchführung .....                                 | 32 |
| 4.1.1.2 | Ausgewählte Temperaturverläufe bei Holzkippenbrandversuchen .....          | 34 |
| 4.1.1.3 | Versuchsergebnisse bei hin- und herbewegter Holzkippe .....                | 38 |
| 4.1.1.4 | Versuchsergebnisse bei stehender Holzkippe .....                           | 44 |
| 4.1.2   | Polypropylenbrandversuche .....  | 48 |
| 4.1.3   | Schlussfolgerungen aus den Brandversuchen .....                            | 54 |
| 4.2     | Sprühversuche auf dem AFF .....  | 54 |
| 4.3     | PDA-Messungen im Nasslabor .....   | 57 |
| 4.4     | Ermittlung der Volumenstromdichte im Nasslabor .....                       | 69 |
| 5       | KOMPLEXE AUSWERTUNGEN .....  | 78 |
| 5.1     | Löschergebnisse in Abhängigkeit vom wirksamen Löschwasservolumenstrom .    | 78 |
| 5.2     | Löschergebnisse in Abhängigkeit von den Sprühstrahlgeschwindigkeiten ..... | 84 |
| 6       | BEWERTUNG DES MOBILEN HOCHDRUCKLÖSCHENS .....                              | 89 |
| 6.1     | Aspekte der Beschaffung und dem Einsatz von Löschtechnik .....             | 89 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 6.2 | Einsatzbedingungen bei Bränden .....                            | 91  |
| 6.3 | Kriterien für den Einsatz mobiler Hochdrucklöschtechnik .....   | 93  |
| 6.4 | Beispiele zum Einsatz von mobilen Hochdrucklöschverfahren ..... | 95  |
| 6.5 | Ergänzende Bemerkungen .....                                    | 96  |
| 7   | ZUSAMMENFASSUNG .....   | 98  |
|     | LITERATUR .....   | 100 |

## ANHÄNGE

|   |  |     |
|---|--|-----|
| A | Skizzen zu den Versuchsaufbauten .....                 | 111 |
| B | Verwendete Messverfahren und -technik .....            | 117 |
| C | Sprühstrahlvermessung im Nasslabor des IdF LSA .....   | 126 |
| D | Versuchsstand: automatic fire fighter – AFF .....      | 139 |
| E | Zur statistischen Beschreibung von Sprühstrahlen ..... | 144 |

## VERZEICHNIS DER BILDER

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Prinzip der Wasserzerstäubung beim Impulslöschverfahren .....   | 13 |
| 2.2 | Löschversuch zum Sprenglöschverfahren vor Zündung .....   | 14 |
| 2.3 | Löschversuch unmittelbar nach Zündung .....   | 14 |
| 2.4 | Erzeugung eines Abgas-Aerosols bei mobiler Wassereinbringung .....  | 15 |
| 3.1 | Messstellen bei den Holzkrippenabbrandversuchen am Beispiel des<br>Brandobjektes 8A .....   | 20 |
| 3.2 | Massekurven für die Holzkrippen 13A, 21A und 8A bei Brandversuchen .....  | 21 |
| 3.3 | Regressionsgerade für die Massenkurve beim Brandversuch BV01 .....  | 23 |
| 3.4 | Messstellen bei den Polypropylenabbrandversuchen bei der Brandwanne mit<br>1500 mm Durchmesser .....  | 24 |
| 3.5 | Massekurven bei Polypropylenbrandversuchen .....  | 25 |
| 3.6 | An den Radiometern $R_1$ , $R_2$ und $R_3$ gemessene Wärmestrahlungen für die<br>Holzkrippenbrände 8A, 13A und 21A .....  | 27 |
| 3.7 | An den Radiometern $R_1$ , $R_2$ und $R_3$ gemessene Wärmestrahlungen für die<br>Polypropylenbrände mit den Brandwannendurchmessern 1200 mm, 1500 mm<br>und 1750 mm ..... | 28 |
| 3.8 | Struktur der Datenbasis [Starke et al. 98] .....  | 31 |
| 4.1 | Aufbau des Brandobjektes am Beispiel der Holzkrippe 8A .....  | 33 |
| 4.2 | Temperaturmessstellen am Beispiel der Holzkrippe 8A .....   | 33 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.3  | Temperaturkurven für den Brandversuch BV23 .....  | 35 |
| 4.4  | Temperaturkurven für den Brandversuch BV24 .....  | 36 |
| 4.5  | Holzkrippe nach Abschluss des Versuches BV23 .....  | 37 |
| 4.6  | Holzkrippe nach Abschluss des Versuches BV24 .....  | 37 |
| 4.7  | Temperaturen an der Messstelle $T_2$ bei den Versuchen BV03, BV23 und BV24                  | 37 |
| 4.8  | Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPAT025S bei rotierender Holzkrippe ..... | 40 |
| 4.9  | Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPMX040S bei rotierender Holzkrippe ..... | 41 |
| 4.10 | Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPPF030S bei rotierender Holzkrippe ..... | 41 |
| 4.11 | Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPQF025S bei rotierender Holzkrippe ..... | 42 |
| 4.12 | Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl SPCP115V bei rotierender Holzkrippe ..... | 42 |
| 4.13 | Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl SPCP120S bei rotierender Holzkrippe ..... | 43 |
| 4.14 | Löschergebnisse für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe .....                  | 44 |
| 4.15 | Holzkrippe nach Abschluss des Brandversuches BV47 .....                                     | 44 |
| 4.16 | Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPAT025S bei stehender Holzkrippe .....   | 45 |
| 4.17 | Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPMX040S bei stehender Holzkrippe .....   | 45 |
| 4.18 | Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPPF030S bei stehender Holzkrippe .....   | 46 |
| 4.19 | Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPQF025S bei stehender Holzkrippe .....   | 46 |
| 4.20 | Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl SPCP115V bei stehender Holzkrippe .....   | 47 |
| 4.21 | Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl SPCP120S bei stehender Holzkrippe .....   | 47 |
| 4.22 | Eindringtiefen für die Löschversuche bei stehender Holzkrippe .....                         | 48 |
| 4.23 | Polypropylenbrandversuch mit der Wanne 34B .....  | 49 |
| 4.24 | Löschphasen für den Sprühstrahl PPAT025S bei Polypropylenbränden .....                      | 50 |
| 4.25 | Löschphasen für den Sprühstrahl PPMX040S bei Polypropylenbränden .....                      | 51 |
| 4.26 | Löschphasen für den Sprühstrahl PPPF030S bei Polypropylenbränden .....                      | 51 |
| 4.27 | Löschphasen für den Sprühstrahl PPQF025S bei Polypropylenbränden .....                      | 52 |
| 4.28 | Löschphasen für den Sprühstrahl SPCP115V bei Polypropylenbränden .....                      | 52 |
| 4.29 | Löschphasen für den Sprühstrahl SPCP120S bei Polypropylenbränden .....                      | 53 |
| 4.30 | Sprühversuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe 8A .....                                  | 55 |
| 4.31 | Sprühversuche bei feststehender Holzkrippe 8A .....   | 56 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.32 | Sprühversuche für das Polypropylenbrandobjekt mit der Brandwanne 34B .....                           | 56 |
| 4.33 | Sprühversuche für das Polypropylenbrandobjekt mit der Brandwanne 1Q .....                            | 57 |
| 4.34 | Mittlere Tropfendurchmesser entlang der horizontalen Fläche beim Sprühstrahl<br>PPAT025S .....       | 59 |
| 4.35 | Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl<br>PPAT025S .....         | 60 |
| 4.36 | Geschwindigkeitskomponenten im Sprühstrahl .....   | 61 |
| 4.37 | Mittlere Tropfengeschwindigkeiten entlang der horizontalen Fläche beim<br>Sprühstrahl PPAT025S ..... | 61 |
| 4.38 | Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim<br>Sprühstrahl PPAT025S .....   | 62 |
| 4.39 | Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl<br>PPMX040S .....         | 63 |
| 4.40 | Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim<br>Sprühstrahl PPMX040S .....   | 63 |
| 4.41 | Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl<br>PPPF030S .....         | 64 |
| 4.42 | Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim<br>Sprühstrahl PPPF030S .....   | 64 |
| 4.43 | Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl<br>PPQF025S .....         | 65 |
| 4.44 | Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim<br>Sprühstrahl PPQF025S .....   | 65 |
| 4.45 | Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl<br>SPCP115V .....         | 66 |
| 4.46 | Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim<br>Sprühstrahl SPCP115V .....   | 66 |
| 4.47 | Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl<br>SPCP120S .....         | 67 |
| 4.48 | Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim<br>Sprühstrahl SPCP120S .....   | 67 |
| 4.49 | Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPAT025S in der Messebene<br>$z = 150\text{ cm}$ .....        | 70 |
| 4.50 | Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPFC025S in der Messebene<br>$z = 150\text{ cm}$ .....        | 71 |
| 4.51 | Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPMX040S in der Messebene<br>$z = 150\text{ cm}$ .....        | 72 |
| 4.52 | Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPPF030S in der Messebene<br>$z = 150\text{ cm}$ .....        | 73 |
| 4.53 | Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPQF025S in der Messebene<br>$z = 150\text{ cm}$ .....        | 74 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.54 | Volumenstromdichte für den Sprühstrahl SPCP115V in der Messebene<br><i>z</i> = 150 <i>cm</i> .....  | 75 |
| 4.55 | Volumenstromdichte für den Sprühstrahl SPCP120S in der Messebene<br><i>z</i> = 150 <i>cm</i> .....  | 76 |
| 5.1  | Löschergebnisse für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe in<br>Abhängigkeit vom wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen<br>Sprühstrahlen .....    | 79 |
| 5.2  | Löschergebnisse und wirksame Löschwasservolumenströme für die Versuche<br>bei hin- und herbewegter Holzkrippe .....   | 80 |
| 5.3  | Eindringtiefen für die Versuche bei stehender Holzkrippe in Abhängigkeit vom<br>wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen Sprühstrahlen .....                   | 81 |
| 5.4  | Eindringtiefen und wirksame Löschwasservolumenströme für die Versuche bei<br>stehender Holzkrippe .....   | 81 |
| 5.5  | Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 34B in Abhängigkeit vom<br>wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen Sprühstrahlen .....                               | 82 |
| 5.6  | Löschzeiten und wirksame Löschwasservolumenströme beim<br>Polypropylenbrandobjekt 34B .....   | 82 |
| 5.7  | Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 1Q in Abhängigkeit vom<br>wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen Sprühstrahlen .....                                | 83 |
| 5.8  | Löschzeiten und wirksame Löschwasservolumenströme beim<br>Polypropylenbrandobjekt 1Q .....  | 83 |
| 5.9  | Löschergebnisse für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe in<br>Abhängigkeit von der mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen<br>Sprühstrahlen ..... | 85 |
| 5.10 | Löschergebnisse und mittlere Tropfengeschwindigkeiten für die Versuche bei<br>hin- und herbewegter Holzkrippe .....   | 85 |
| 5.11 | Eindringtiefen für die Versuche bei stehender Holzkrippe in Abhängigkeit von<br>der mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen Sprühstrahlen .....                | 86 |
| 5.12 | Eindringtiefen und mittlere Tropfengeschwindigkeiten für die Versuche bei<br>stehender Holzkrippe .....   | 86 |
| 5.13 | Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 34B in Abhängigkeit von der<br>mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen Sprühstrahlen .....                            | 87 |
| 5.14 | Löschzeiten und mittlere Tropfengeschwindigkeiten beim<br>Polypropylenbrandobjekt 34B .....   | 87 |
| 5.15 | Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 1Q in Abhängigkeit von der<br>mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen Sprühstrahlen .....                             | 88 |
| 5.16 | Löschzeiten und mittlere Tropfengeschwindigkeiten beim<br>Polypropylenbrandobjekt 1Q .....  | 88 |
| 6.1  | Bei Beschaffungen zu berücksichtigende Faktoren [de Vries 01] .....   | 90 |



## VERZEICHNIS DER TABELLEN

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Betriebsparameter ausgewählter Hochdrucklöschleinheiten .....   | 13 |
| 3.1 | Im Vorhaben berücksichtigte Sprühstrahlen .....   | 19 |
| 3.2 | Heizwerte für Kiefernholz .....   | 24 |
| 3.3 | Abbrandraten und Wärmeströme ausgewählter Brandobjekte .....  | 31 |
| 4.1 | Beschreibung der fünf charakteristischen Löschphasen bei Holzkrippenbränden                                 | 38 |
| 4.2 | Kriterien zur Bewertung des Löschergebnisses auf der Basis der verbrannten<br>Bereiche der Holzkrippe ..... | 39 |
| 4.3 | Beschreibung der 3 charakteristischen Löschphasen bei Polypropylenbränden ..                                | 49 |
| 4.4 | Zusammengefasste Ergebnisse der PDA-Messungen für jede Messebene .....                                      | 68 |
| 4.5 | Zusammengefasste Ergebnisse der PDA-Messungen .....   | 69 |

## VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>  |
|------------------|---|
| AFF              | - Automatic Fire Fighter  |
| AFKzV            | - Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung des AK V der IMK |
| AK               | - Arbeitskreis  |
| DIN              | - Deutsches Institut für Normung e. V.  |
| EN               | - Europäische Norm  |
| HDL              | - Hochdrucklöschleinheit  |
| HDWN             | - Höchstdruckwassernebelssystem   |
| IdF LSA          | - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt   |
| IMK              | - Innenministerkonferenz  |
| Kfz              | - Kraftfahrzeug   |
| KTLF             | - Kleintanklöschfahrzeug  |
| LRF              | - Löschrettungsfahrzeug   |
| PDA              | - Phasen-Doppler-Anemometer   |
| PKW              | - Personenkraftwagen  |
| RTW              | - Rettungswagen   |
| TWB              | - Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der vfdb  |
| UHPS             | - Ultra High Pressure System  |
| vfdb             | - Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V.                                     |

| <b>Symbol</b> | <b>Bedeutung<sup>1</sup></b>   |
|---------------|--|
| $A$           | - Fläche bzw. Oberfläche   |
| $d$           | - Tropfendurchmesser in $\mu m$                                      |
| $D$           | - Zufallsgröße des Tropfendurchmessers in $\mu m$                    |
| $D_{ab}$      | - Punktschätzfunktion für den Tropfendurchmesser der Ordnung $a + b$ |
| $D(X)$        | - Standardabweichung der Zufallsgröße $X$                            |
| $D^2(X)$      | - Varianz bzw. Dispersion der Zufallsgröße $X$                       |
| $E(X)$        | - Erwartungswert der Zufallsgröße $X$                                |
| $E_L$         | - spezifische (Lösch-)Energie in $kJ/l$                              |
| $ET$          | - Eindringtiefe, mittlere Zahl der nicht verbrannten Querhölzer      |

---

<sup>1</sup> Nach Bedarf wurden auch andere Maßeinheiten gleicher Dimension verwendet, z. B.  $\mu m$ ,  $mm$ ,  $cm$ , ... für die Längeneinheit  $m$  usw. Dies geht stets aus dem Zusammenhang eindeutig hervor.

| <b>Symbol</b> | <b>Bedeutung</b>  |
|---------------|---|
| $f_X, f_X(t)$ | - Dichtefunktion der Zufallsgröße $X$   |
| $F_X, F_X(t)$ | - Verteilungsfunktion der Zufallsgröße $X$                                    |
| $g(t)$        | - Funktion in Abhängigkeit von $t$  |
| $H$           | - Heizwert $J/g$ oder $kJ/m^3$  |
| $I$           | - Strahlungsintensität  |
| $I_m, I_{Ab}$ | - Massenstrom, Abbrandrate in oder $kg/s$                                     |
| $I_V$         | - Volumenstrom in $l/s$   |
| $I_W$         | - Wärmestrom in $J/s$ oder $W$  |
| $j_m$         | - Massenstromdichte in $kg/(s \cdot m^2)$                                     |
| $j_V$         | - Volumenstromdichte in $l/(s \cdot m^2)$                                     |
| $j_W$         | - Wärmestromdichte in $J/(s \cdot cm^2)$ oder $W/cm^2$                        |
| $m, m(t)$     | - Masse (auch als Funktion der Zeit) in $kg$                                  |
| $m_k$         | - gewöhnliches Moment $k$ -ter Ordnung  |
| $\hat{m}_k$   | - Punktschätzwert für das gewöhnliche Moment $k$ -ter Ordnung                 |
| $\hat{M}_k$   | - Punktschätzfunktion für das gewöhnliche Moment $k$ -ter Ordnung             |
| $n$           | - ganzzahliger Index<br>- Stichprobenumfang                                   |
| $p$           | - Druck in $N \cdot m^{-2}$ , $Pa$ oder $bar$                                 |
| $P(...)$      | - Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses  |
| $r$           | - Radius  |
| $s$           | - Schätzwert für die Standardabweichung                                       |
| $S$           | - Schätzfunktion für die Standardabweichung<br>- Summenwert, dimensionslos    |
| $s^2$         | - Schätzwert für die Varianz  |
| $S^2$         | - Schätzfunktion für die Varianz  |
| $t$           | - Zeit in $s$<br>- reellwertiger Parameter in Dichte- und Verteilungsfunktion |
| $Tr$          | - Index für Tropfen   |
| $V$           | - Volumen   |
| $\bar{x}$     | - Schätzwert für den Erwartungswert   |

| <b>Symbol</b>                        | <b>Bedeutung</b>   |
|--------------------------------------|--|
| $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$   | - konkrete Stichprobe der Zufallsgröße $X$ vom Umfang $n$      |
| $X$                                  | - Zufallsgröße   |
| $\bar{X}$                            | - Schätzfunktion für den Erwartungswert                        |
| $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$   | - mathematische Stichprobe der Zufallsgröße $X$ vom Umfang $n$ |
| $z$                                  | - Entfernung in $cm$   |
| $\mu_k$                              | - zentrales Moment $k$ -ter Ordnung einer Zufallsgröße         |
| $\bar{\mu}_k$                        | - Punktschätzwert für das zentrale Moment $k$ -ter Ordnung     |
| $\hat{N}_k$                          | - Punktschätzung für das zentrale Moment $k$ -ter Ordnung      |
| $\hat{g}(x_1, x_2, \dots, x_n)$      | - Punktschätzwert auf der Basis einer konkreten Stichprobe     |
| $\hat{\Theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ | - Punktschätzfunktion für den Parameter $\Theta$               |

### Weitere Bezeichnungen

Nach Bedarf werden  $i$ ,  $k$  und  $l$  als Indizes verwendet.

Bilder, Tabellen und Formeln sind in jedem Kapitel mit 1 beginnend fortlaufend nummeriert. Dieser Nummer wird stets die Kapitelnummer, gefolgt von einem Punkt, vorangestellt. Die Anhänge sind mit großen Buchstaben mit A beginnend bezeichnet. Die Kapitel-, Abschnitts-, Bild- und Tabellenbezeichnungen sowie die Formeln der Anhänge beginnen stets mit diesem Buchstaben.

## 1 EINLEITUNG

Hochdrucklöschverfahren sind in der mobilen Brandbekämpfung nicht neu, jedoch hat sich deren Vielfalt in den letzten Jahren wesentlich vergrößert. Neben der seit langem bekannten 40 *bar* Technik in der Form der Schnellangriffseinrichtungen sind es vor allem auch Verfahren, die darauf hinzielen, die eingesetzte Löschwassermenge noch weiter wesentlich zu reduzieren.

In Anbetracht der Vielfalt der angebotenen mobilen Hochdrucklöschverfahren ist es schwierig, diese zu bewerten und deren Leistungsvermögen einzuschätzen. Sie sind auch nicht unumstritten, da bei unsachgemäßer Anwendung auch kritische Situationen für die Feuerwehreinsatzkräfte entstehen können. Die Grenzen der Anwendbarkeit sind ohne gründliche Einsatzerfahrung nicht leicht erkennbar bzw. auch nicht ausreichend angegeben. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung werden produktunabhängige Kriterien begründet, die aus der Sicht der Brandbekämpfung durch die Feuerwehren an Hochdrucklöschverfahren zu stellen sind.

Der Begriff des Hochdrucks ist nicht verbindlich definiert. Im Bereich der stationären Löschanlagen spricht man meist bis 16 *bar* von Normaldruck, von 16 *bar* bis 40 *bar* von Mitteldruck und bei darüber liegenden Werten von Hochdruck [Schremmer 97]. Bei der mobilen Löschtechnik hat sich keine einheitliche Terminologie durchgesetzt. Hinzu kommt, dass sich der Löschwasserdruck am Strahlrohr, bedingt durch die beim aktuellen Einsatz gerade eingesetzten Schlauchleitungen und die örtlichen Bedingungen, wesentlich vom Druck an der Pumpe unterscheiden kann. Der Pumpendruck allein hat dann nur eine begrenzte Aussagefähigkeit. Bei den Feuerwehren wurde der Begriff vor allem in Verbindung mit den Schnellangriffseinrichtungen geprägt. Diese arbeiten bei Pumpendrücken bis zu 40 *bar*, wobei der Druck am Strahlrohr oft nur wenig über 20 *bar* liegt. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen werden mobile Hochdrucklöschverfahren betrachtet, bei denen der Druck unmittelbar an der Löschmittelauswurfvorrichtung mindestens 20 *bar* beträgt.

Im 2. Kapitel werden zunächst einige Hintergründe aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht genannt, die zur Entwicklung der Hochdrucktechnik führten und auch für deren Einsatz sprechen. Für einige typische mobile Hochdrucklöschverfahren werden Parameter genannt.

Im Vordergrund der Untersuchungen stehen Sprühstrahlen, die durch Hochdruckstrahlrohre bzw. Verfahren erzeugt werden, die bei deutschen Feuerwehren im Einsatz sind, wobei es natürlich nicht möglich war, alle zu berücksichtigen. Ebenso musste sich im Versuchsprogramm auf wenige Brandobjekte beschränkt werden. Die Auswahl der Parameter für die Löschtechnik sowie die Festlegung der Brandobjekte werden im Kapitel 3 behandelt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass als Löschmittel nur Wasser berücksichtigt wurde. Löschsäume und andere Löschmittelzusätze wurden bei den Versuchen nicht betrachtet, da dies den Rahmen der zur Verfügung stehenden Mittel gesprengt hätte.

Die Versuche wurden auf verschiedenen Versuchsständen durchgeführt. Das waren insbesondere:

- ◆ Brand- und Sprühversuche auf dem Automatic Fire Fighter (AFF) und
- ◆ Bestimmung der Tropfengrößen und –geschwindigkeiten sowie der Massenstromdichte im Nasslabor des Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt (IdF LSA).

Im 4. Kapitel werden die gemessenen Größen für die einzelnen Sprühstrahlen für jeden Versuchsstand ausgewertet. Im 5. Kapitel werden ausgewählte komplexe Auswertungen vorgenommen, die Messergebnisse verschiedener Versuchsplätze miteinander verknüpfen.

Um die Lesbarkeit des Berichtes zu erleichtern, wurden einige zum Teil bereits in früheren Berichten (vgl. [Starke et al. 96, Starke et al. 98]) enthaltene Sachverhalte in den Anhängen mit aktuellem Stand zusammengestellt. Das betrifft unter anderem auch die inzwischen weiterentwickelten Versuchsstände zur Sprühstrahlvermessung.

An dieser Stelle möchte sich der Autor für die konstruktive Unterstützung und fachliche Diskussion zum Thema bei den Mitarbeitern des IdF LSA und bei Herrn Prof. Dr. Grabski bedanken. Besonderer Dank gilt

- ◆ Frau Dr. Richter für die Erarbeitung der Literaturrecherche [Hochdrucklöschen 01],
- ◆ Herrn Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke für die messtechnische Realisierung, die Messwerterfassung und Bereitstellung,
- ◆ Frau Sakowski für die Bild- und Videoaufzeichnungen sowie
- ◆ den Forschungsfacharbeitern Herrn Hartmann und Herrn Kulawik für den Versuchsaufbau und die Durchführung der Experimente.

Der Autor bedankt sich beim AFKzV sowie beim TWB der vfdB für die Unterstützung bei der Bearbeitung dieses IMK-Themas. Dank gilt auch dem Arbeitskreis Technik der Deutschen Feuerwehren, dem Referat 5 der vfdB, der Berufsfeuerwehr Magdeburg sowie der Brand- und Katastrophenschutzschule Heyrothsberge, die dem Autor während der Arbeitskreissitzungen bzw. in kleinen Diskussionsrunden die Möglichkeit boten, die Thematik sowie die Zielsetzung zu diskutieren. Abschließend dankt der Autor für die korrekte und ordnungsgemäße verwaltungsseitige Abwicklung des Vorhabens.

## 2 HOCHDRUCKLÖSCHVERFAHREN IM FEUERWEHREINSATZ

Zunächst wird auf die Löschwirkung des Wassers eingegangen und Gründe für die Anwendung hoher Drücke genannt. Die Frage nach einer optimalen Tropfengröße wird behandelt und es wird auf Probleme beim Hochdrucklöschen hingewiesen. Im zweiten Abschnitt werden einige Parameter von auf dem Markt erhältlichen Hochdrucklöschleinheiten zusammengestellt. Zum Abschluss dieses Kapitels werden einige Hinweise zu Strahlrohren gemacht.

### 2.1 Löschen mit Wasser

Über das Löschen mit Wasser wurde bereits sehr viel publiziert. Es ist nach wie vor das wichtigste Löschmittel. Es ist umweltverträglich, vielseitig einsetzbar, vergleichsweise kostengünstig, verhältnismäßig gut verfügbar und nicht gesundheitsschädigend. Dennoch werden aus verschiedenen Gründen viele Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur verbesserten Applikation des Löschmittels Wasser durchgeführt. An dieser Stelle sei auf die umfangreiche Arbeit von [Grant et al. 00] verwiesen, in der das Löschen mit Wasser behandelt wird und auch Fragen der mobilen Brandbekämpfung berücksichtigt werden. In der Publikation ist ein umfangreiches Literaturverzeichnis enthalten.

Grundsätzlich wird beim Löschen versucht, das Wasser als ein Zwei-Phasen-System anzuwenden, bei dem das Wasser in Form von Tropfen (das Dispersum) in dem Dispersionsmittel Luft (dem Dispersens) verteilt ist. Im Anhang C wird detailliert auf die Begriffsbildung und die Klassifizierung der Sprühstrahlen eingegangen. Für diese Zwei-Phasen-Systeme wird eine Vielzahl unterschiedlicher Bezeichnungen verwendet. Bei stationären Löschanlagen werden von [Schremmer 97] die Strahlarten Wasseraerosol ( $\leq 10 \mu m$ ), Wassernebel ( $10 \mu m$  bis  $100 \mu m$ ), Wassersprühnebel ( $100 \mu m$  bis  $400 \mu m$ ), Sprühwasser ( $400 \mu m$  bis  $1000 \mu m$ ) und Grobsprühwasser ( $1000 \mu m$  bis  $6000 \mu m$ ) definiert. Weitere Bezeichnungen sind bei [Starke et al. 96] zusammengestellt. Zunehmend wird jedoch bei einem mittleren Tropfendurchmesser unter  $100 \mu m$  von Wassernebel und bei größeren Werten von Sprühstrahlen gesprochen. Diese Unterscheidung wird auch im Bericht verwendet. Da viele Aussagen, insbesondere die Vermessung der Zwei-Phasen-Systeme und die statistische



Auswertung der Messergebnisse betreffend, für beide Strahlarten gelten, wird oft nur von Sprühstrahlen gesprochen.

Wichtige Mechanismen beim Löschen mit Wasser bei einem Feuerwehreinsatz sind (vgl. [Grant et al. 00]):

- ◆ das Kühlen der Flamme
- ◆ das Kühlen des Brandstoffes
- ◆ die Inertisierung der Atmosphäre durch die Produktion von Wasserdampf.

Für die Feuerwehreinsatzkräfte sind wegen der Minderung der Einsatzbelastung und des Schutzes der Einsatzkräfte vor Wärmestrahlung weiter wichtig:

- ◆ Wassertropfen absorbieren Wärmestrahlung
- ◆ Teile des Sprühstrahls können als Schutzschild (Mannschild) eingesetzt werden.

Es gibt weitere Löscheffekte, wie z. B. der Inhibitionseffekt, der „Schild“-Effekt<sup>1</sup> oder der Ausblaseffekt, die beim Objektschutz mit stationären Löschanlagen durchaus eine Rolle spielen und wirkungsvoll ausgenutzt werden können (vgl. [Starke et al. 99]).

Auf den Kühleffekt soll im Folgenden näher eingegangen werden, da er der Hauptlöscheffekt beim Feuerwehreinsatz ist. Wasser kann beim Verdampfen eine große Wärmemenge aus der Umgebung aufnehmen. Um ein Liter Wasser mit einer Temperatur von 10 °C zu verdampfen, ist insgesamt die Energie  $E_L = 2634 \text{ kJ/l}$  erforderlich, die auch als spezifische (Lösch-) Energie bezeichnet wird.

Der Kühleffekt kann beim Löschvorgang auf verschiedene Weisen beeinflusst werden.

Zunächst werden die Volumenstromdichte  $j_V$  (in  $l/(s \cdot m^2)$ ) bzw. die Massenstromdichte  $j_m$

---

<sup>1</sup> Hier ist der Effekt gemeint, dass sehr feine Wassertropfen die Wärmestrahlung absorbieren und auch reflektieren. Es wird somit auch die Wärmestrahlung auf den Brandstoff der Umgebung gemindert, was das Entstehen brennbarer Gase reduziert.

(in  $kg/(s \cdot m^2)$ ) des auf die Brandoberfläche ausgebrachten Wassers betrachtet. Da die Dichte des Wassers nahe bei Eins liegt, entsprechen in diesem Fall beide Größen zahlenmäßig einander. Diese Dichten sind lokale Größen. Es ist bekannt, dass durch Erhöhung der Volumenstromdichte die Löschzeit verkürzt werden kann. Die Verkürzung der Löschzeit bedeutet dann jedoch nicht zwangsläufig, dass auch weniger Löschmittel eingesetzt wird. Ein höherer Löschmitteleinsatz zieht unter Umständen höhere Löschwasserschäden nach sich bzw. er stellt kompliziertere Anforderungen an die Löschwasserrückhaltung und -entsorgung.

Eine andere Möglichkeit, den Kühleffekt besser auszunutzen, besteht in folgender Überlegung. Für die Kühlwirkung des Wassers ist nicht allein die Größe der aufgenommenen Wärmemenge von Bedeutung, vielmehr ist auch die Zeitspanne entscheidend, in der die Wärme aufgenommen werden kann. Denn je größer die abgeführte Wärme je Zeiteinheit ist, desto größer ist der Löscheffekt.

Die Wärmeübertragung ist an eine Austauschfläche gebunden, die über die Oberflächen der einzelnen Wassertropfen gebildet wird. Die zur Verfügung stehende Austauschfläche beziehungsweise die Oberfläche der Wassertropfen begrenzt die pro Zeiteinheit an das Wasser übertragbare Wärmemenge. Eine Maximierung wird also dann erreicht, wenn das Löschwasser mit einer möglichst großen Oberfläche mit dem Brandherd in Kontakt kommt, wobei eine spezifische Oberflächenvergrößerung dadurch erreicht werden kann, dass der Tropfendurchmesser verkleinert wird. Bild C1.2 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Anzahl und der Oberfläche aller Tropfen bei der Zerstäubung von einem Liter Wasser in Abhängigkeit vom Tropfendurchmesser. Es wurde hierbei angenommen, dass ein monodisperses Spray erzeugt wird, d. h. alle Tropfen sind gleich groß. Kann der Tropfendurchmesser zum Beispiel auf  $1/3$  verkleinert werden, so vergrößert sich die Oberfläche auf das 9fache. Hier gibt es jedoch auch Grenzen. Es können effektiv nicht beliebig kleine Tropfen erzeugt werden, da der dazu erforderliche Energieaufwand stark ansteigt. Dieser feine Wassernebel müsste dann auch noch zum Brand transportiert und dort möglichst gleichmäßig in einer auch löschwirksamen Konzentration verteilt werden.

Welcher Tropfendurchmesser ist nun für das Löschen optimal? Die Fragestellung sei durch eine einfache Betrachtung verdeutlicht. Soll die Flamme gekühlt werden, so ist anzustreben, dass ein feiner Wassernebel mit einer großen Oberfläche in den Bereich der Flamme transportiert wird. Dieser kann schnell eine große Wärmemenge aufgrund der Verdampfung

aufnehmen, was zum Löschen führt. Ist es wichtig, den Brandstoff zu kühlen, so können große Tropfen den Flammenbereich besser durchdringen. Feine Wasserdampf werden durch die Flammenkonvektion oder durch ungünstige Ventilationsbedingungen im Brandraum auf dem Weg zur Brandstoffoberfläche stark behindert. Ist das Brandszenarium nicht bekannt, so ist aus dieser Betrachtung heraus ein Sprühstrahl mit einem breiten Tropfenspektrum sinnvoll.

Insbesondere bei der mobilen Anwendung von Wasserdampf ist zu bedenken, dass diese im Freien durch den Wind abgelenkt und somit auch nicht oder nur begrenzt wirksam werden können. Auch aus diesem Grund ist die Anwendbarkeit von Wasserdampf außerhalb geschlossener Räume eingeschränkt. Beim Objektschutz jedoch können Wasserdampf bei definierten Ventilations- und Raumbedingungen und bekannter Brandlast in stationären Wasserdampflöschanlagen in vielen Fällen sehr effektiv eingesetzt werden ([Whigus et al. 95, Mawhinney et al. 96, Bill et al. 97, Bürgel et al. 99, Morita et al. 99, Starke et al. 99a, Grabski et al. 01, Starke et al. 01]). Derartige Szenarien sind zum Beispiel bei Bränden flüssiger Kohlenwasserstoffe gegeben. Wasserdampf spielen auch beim Halon-Ersatz eine wichtige Rolle ([Mawhinney 93, Covelli 93]).

Obwohl das Löschmittel Wasser bezogen auf das Brandszenarium häufig ausreichend verfügbar ist, besteht die Forderung, den Brand mit einer möglichst kleinen Wassermenge zu löschen. Dazu gehören:

- ◆ Brandschäden sind zu minimieren
- ◆ Löschwasserschäden sind soweit wie möglich zu reduzieren
- ◆ Löschwasserrückhaltung und -entsorgung sind teuer
- ◆ Löschwasser ist nicht überall schnell und in ausreichender Menge verfügbar.

Um diesen Forderungen zu genügen, muss das Wasser sehr effektiv und löschwirksam eingesetzt werden. Eine Möglichkeit dazu ist prinzipiell auch eine Druckerhöhung an der Löschmittelauswurfvorrichtung. Bei entsprechend konstruierten Strahlrohren können u. a. folgende Faktoren positiv beeinflusst werden:

- ◆ Hohe Drücke erhöhen die Wurfweite des Sprühstrahls. Kleine Wassermengen können zielgerichteter zum Brandherd transportiert werden.
- ◆ Auch bei kleinen mittleren Tropfendurchmessern können die Tropfen die Oberfläche des Brandgutes besser erreichen. Der negativen Wirkung von störenden Luftströmungen wird entgegengewirkt.
- ◆ Das Wasser kann in kleinere Tropfen verteilt werden, was eine Vergrößerung der Oberfläche bewirkt.

Diesen positiven Faktoren sind u. a. aus folgenden Gründen Grenzen gesetzt:

- ◆ Eine Druckerhöhung erfordert eine höhere Leistung der verwendeten Pumpe. Diese ist jedoch nach oben begrenzt.
- ◆ Kleine Tropfen zum Brandherd zu transportieren, reicht allein noch nicht aus. Sie müssen auch in einer löschwirksamen Konzentration vorliegen.

Hieraus folgt unmittelbar, dass bei größeren Bränden ein erfolgreicher Einsatz nicht zu erwarten ist.

## **2.2 Mobile Hochdrucklöschverfahren**

Im Folgenden wird exemplarisch auf mobile Hochdrucklöschtechnik eingegangen und einige Betriebsparameter angegeben. In Anbetracht der Produktvielfalt ist Vollständigkeit ohnehin nicht möglich. Die Kostenfragen werden hierbei ebenfalls außer acht gelassen, da im Rahmen dieser Arbeit Löscheigenschaften und Einsatzmöglichkeiten zu betrachten sind. Auf Gesichtspunkte, die bei Beschaffungen zu beachten sind, wird am Schluss des Berichtes eingegangen.

### ***Schnellangriffseinrichtungen***

Meist sind im Zusammenhang mit mobilen Hochdrucklöschverfahren die Schnellangriffseinrichtungen gemeint. Diese kamen seit Mitte vorigen Jahrhunderts verstärkt zum Einsatz, d. h. Hochdruck ist auch im mobilen Einsatz lange bekannt. Die technischen Ausführungen und die Leistungsparameter sind unterschiedlich. Bei diesen Einrichtungen ist

der Schlauch fest mit der Pumpe und einem (Pistolen-)Strahlrohr verbunden und auf einer Haspel aufgewickelt. Es werden formstabile Druckschläuche konstanter Länge verwendet.

Häufig kommen Druckschläuche S 28 mit 30 m und S 25 mit 50 m Länge zum Einsatz (s. [Lexikon 01]). Es werden aber auch S 32 mit 30 m, S 25 mit 60 m und S 19 mit 80 m verwendet (s. [Kubiza 88]). Der Nennförderstrom für die Hochdruckteile (Pumpen) sollte bei 40 bar mindestens 250 l/min betragen (vgl. [DIN EN 1028, Teil 1]). Es werden auch Aggregate mit einer Leistung von 400 l/min angeboten (s. [Rosenbauer 00]). In Abhängigkeit von den verwendeten Druckschläuchen (Oberfläche, Durchmesser, Länge) treten zum Teil erhebliche Druckverluste auf, so dass am Strahlrohr oft nur Drücke unter 30 bar anliegen, was auch eine erhebliche Reduzierung des Volumenstromes bedeutet. Zur Anwendung kommen meist Pistolenstrahlrohre, die häufig auch als Hohlstrahlrohre ausgeführt sind. In der Regel steht beim Einsatz der Schnellangriffseinrichtungen immer ein Volumenstrom von deutlich mehr als 100 l/min zur Verfügung.

In den letzten Jahren kommen in diesem Pumpendruckbereich auch auf Kleinlöschfahrzeugen Schnellangriffseinrichtungen zum Einsatz, die aber nicht mehr die Parameter der [DIN EN 1028, Teil 1] erfüllen. Ein Beispiel hierfür ist ein KTLF (s. [Schmitz 95]), das 750 l Wasser mitführt und dessen Hochdruckteil bei 20 bar 75 l/min fördert.

Ein anderes Unternehmen bietet eine separate Löscheinheit an (s. [Jöhstadt 97]). Sie verfügt über einen 61 l Tank und eine Pumpe, deren Volumenstrom bei 32 bar 28 l/min beträgt.

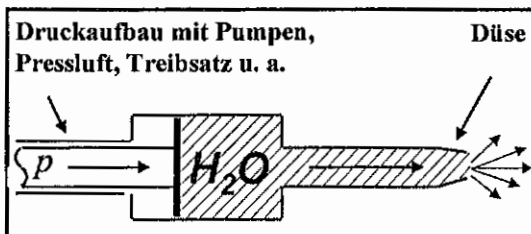
### ***Hochdrucklöscheinheiten***

Diese Löschsyste (vgl. z. B. [Minimax 94, Rosenbauer 00, Callies 00, Müller 96]) arbeiten mit sehr hohen Drücken und wesentlich geringeren Volumenströmen. Durch den Einsatz zum Teil technisch sehr ausgefeilter Löschmittelauswurfvorrichtungen werden feine Wassernebel erzeugt. Sie dienen vor allem dazu, das wenige mitgeführte Wasser sehr schnell und sehr effektiv einzusetzen. Die Namensgebung für diese Klasse von Löscheinheiten ist sehr unterschiedlich. Es gibt Hochdrucklöscheinheiten (HDL), Ultra High Pressure Systems (UHPS), Höchstdruckwassernebelsysteme (HDWN) u. a. In der Tabelle 1 sind einige ausgewählte Betriebsparameterkombinationen zusammengestellt. Einige Geräte verfügen über Möglichkeiten der Druckregelung, was auch andere Betriebsparameter erlaubt.

**Tabelle 2.1:** Betriebsparameter ausgewählter Hochdrucklöschscheinheiten

|            | Wassertank <sup>2</sup><br>in <i>l</i> | Betriebsdruck<br>in <i>bar</i> | Volumenstrom<br>in <i>l/min</i> |
|------------|--|--------------------------------|---------------------------------|
| Variante 1 | 100                                    | 250                            | 24                              |
| Variante 2 | 200/300                                | 100                            | 38                              |
| Variante 3 | 100                                    | 120                            | 25                              |
| Variante 4 | 100                                    | 220                            | 16                              |

### Impulslöschscheinheiten



**Bild 2.1:** Prinzip der Wasserzerstäubung beim Impulslöschverfahren

Der Löschmittelvolumenstrom ( $I_V$  in *l/min*) bzw. die Volumenstromdichte hängen indirekt proportional von der Zeit ab, d. h. wird ein bestimmtes Löschmittelvolumen in einem kürzeren Zeitintervall ausgebracht, so hat sich der Volumenstrom erhöht. Von diesem Sachverhalt gehen die Impulslöschverfahren aus. Hier wird eine vergleichsweise kleine

Löschmittelmenge in Bruchteilen einer Sekunde verteilt, wodurch ein großer Volumenstrom realisiert wird. Bild 2.1 zeigt die prinzipielle Realisierung des Verfahrens. Das Aggregat besteht aus zwei Kammern. In der zunächst abgeschlossenen Kammer erfolgt ein Druckaufbau, wobei dies mit Pressluftflaschen, Pumpen oder sogar Treibsätzen möglich ist. Auf einer Seite befindet sich die Rückseite eines arretierten Kolbens. In die zweite Kammer wird Wasser gefüllt, das an einer Seite durch eine Düse austreten kann. Wird die Arretierung des Kolbens gelöst oder der Treibsatz gezündet, so wird der Kolben stark beschleunigt, was eine impulsartige Ausbringung des Wassers bewirkt.

<sup>2</sup> Die Tanks können beim Betrieb laufend nachgefüllt werden bzw. der Anschluss einer anderen Wasserquelle (z. B. Hydrant) ist meist möglich.

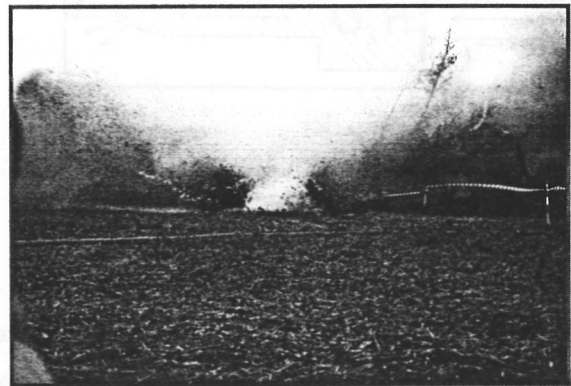
Es gibt verschiedene Ausbaustufen dieses Verfahrens (s. [IFEX 01]). Sie beginnen bei Impulspistolen, die durch eine Person eingesetzt werden und mit jedem „Schuss“ ca. 1 l Wasser freisetzen. Je nachdem, ob das Wasser getragen oder auf einem Rollgestell befördert wird, stehen 13 l bis 50 l Wasser zur Verfügung. Größere Kanonen können bei der Montage auf Fahrzeugen (z. B. 12 l je Schuss) oder an Hubschraubern (z. B. 18 l je Schuss) zum Einsatz kommen. Standardmäßig werden sie jeweils mit zwei Kanonen bestückt.

### ***Sprenglöschverfahren***

Der Ansatzpunkt ist auch hier die extrem schnelle Ausbringung des Löschwassers. Einen Prototyp gibt es schon seit fast 300 Jahren [Röfer 95, Röfer 01]. Damals wurde ein Fass mit Wasser gefüllt, in der Mitte ein kg Pulver platziert und eine Zündschnur nach außen geführt. Dieses Fass wurde in den Brandraum gerollt und explodierte. Über Demonstrationen dieser „Greylschen Feuerlöschbombe“ wird in mehreren Quellen berichtet.



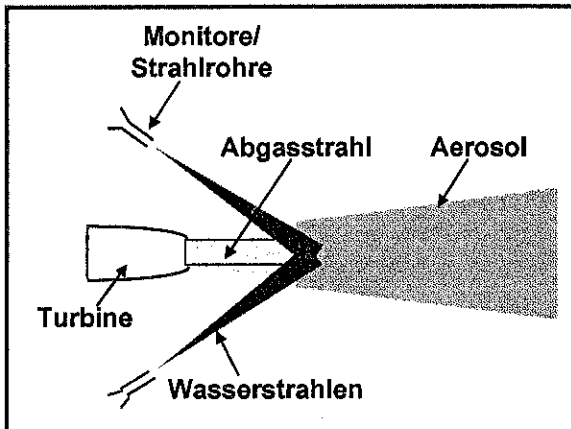
**Bild 2.2:** Löschversuch zum Sprenglöschverfahren vor Zündung



**Bild 2.3:** Löschversuch unmittelbar nach Zündung

Eine moderne Modifikation dieses Gedankens ist das 2RS-Sprenglöschverfahren. Bei diesem Verfahren wird in einen Plastschlauch eine Sprengschnur gezogen. Nach der Zündung des mit Wasser gefüllten Schlauches wird das Wasser in einem großen Volumen verteilt (s. Bilder 2.2 und 2.3). Es kann bei der Bekämpfung von Poolbränden, Waldbränden u. a. zum Einsatz kommen [Anonym 95, Grabski et al. 95]. Im Rahmen dieses Berichtes wird auf Sprenglöschverfahren nicht weiter eingegangen.

## Aerosollöschverfahren



**Bild 2.4:** Erzeugung eines Abgas-Aerosols bei mobiler Wassereinbringung

Auf diese Verfahren sei ebenfalls nur hingewiesen. Der modernste, bekannteste Vertreter dieses Verfahrens ist der Turbolöcher, dessen Einsatzmöglichkeiten zur Brandbekämpfung, zur Zwangsbelüftung u. a. bei [Haselhorst 98, Grabski et al. 00] dargestellt sind. In den Abgasstrahl einer Flugzeugturbine wird Wasser gespritzt. Nach dem Prinzip einer offenen Zweistoffdüse kann ein Abgas-Aerosol großer Dimension erzeugt werden.

Die Ausdehnung kann je nach Größe der Turbine und der eingesetzten Wassermenge bis zu 150 m in der Länge, 40-60 m hoch und 20-40 m breit sein. Im Bild 2.4 ist die Wassereinbringung mittels mobiler Monitore dargestellt [Pleiß et al. 93]. Beim Turbolöcher sind leistungsfähige Hohlstrahlrohre in Turbinennähe stationär montiert.

Eine Reihe von Herstellern versuchen dieses Verfahren auf der Basis von Ventilatoren umzusetzen. Die erreichte Leistungsfähigkeit ist aber wesentlich geringer (vgl. z. B. [BIG 99, POLY 00, ZUMRO 99]).

## Kleinlöschgeräte

Zunehmend werden tragbare oder auf kleinen Rollgestellen montierte Feuerlöscher angeboten, die mit hohen Drücken arbeiten. Bei Betriebsdrücken von 25 bar bis 35 bar werden je nach Variante 6 l bis 50 l Löschmittel ausgebracht [HNE 01, AUER 98]. Auch diese Geräte werden im Rahmen dieses Berichtes nicht weiter behandelt, da sie aus der Sicht der mobilen Brandbekämpfung im Bereich der Feuerwehren keine vordergründige Rolle spielen.



## 2.3 Strahlrohre

Die technische Ausführung der verwendeten Strahlrohre und deren Betriebsparameter ist sehr vielfältig. Eine vollständige Übersicht ist an dieser Stelle weder gewollt noch möglich. Die Vielfalt der verschiedenen Typen wird u. a. bei [Vrtal 96, Cronwright et al. 99] deutlich.

Die meisten beim Hochdrucklöschern verwendeten Strahlrohre verfügen über einen festen Handgriff. Das Öffnen und Schließen erfolgt meist über einen Kugelhahn, der mit einem Bügel oder Schalthebel betätigt wird. Zur Regulierung des Volumenstroms und des Wasserstrahls (Vollstrahl, Öffnungswinkel bei Sprühstrahlen, Wasserschutzschild, ...) werden unterschiedliche, um die Strahlrohrachse drehbare Schaltelemente benutzt. Häufig kommt die Form eines Pistolenstrahlrohrs zur Anwendung. Auch beim Hochdrucklöschern werden zunehmend Hohlstrahlrohre angeboten. Auf den Aufbau von Hohlstrahlrohren geht u. a. auch [de Vries 00, de Vries 00a] ein.

### **3 VERSUCHSPROGRAMM UND -DURCHFÜHRUNG**

#### **3.1 Auswahl der Sprühstrahlen**

Vor der Festlegung des Versuchsprogramms und der damit verbundenen Brandobjekte wurde in verschiedenen Gremien die Problemstellung beraten und um Stellungnahmen gebeten. Die Gesprächspartner waren:

- ◆ Fachausschuss Technik der Deutschen Feuerwehren,
- ◆ Referat 5 „Brandbekämpfung“ des TWB der vfdb,
- ◆ Berufsfeuerwehr Magdeburg und Brandschutz- und Katastrophenschutzschule Heyrothsberge.

Folgende Fragestellungen standen im Mittelpunkt:

- ◆ Welche Hochdrucklöschverfahren werden eingesetzt und wie sind die Einsatzerfahrungen?
- ◆ Welche Anforderungen sollte ein Hochdrucklöschverfahren mindestens erfüllen, d. h. welche Brandobjekte müssen gelöscht werden können und wie groß sollte der Volumenstrom mindestens sein?

Eine einheitliche Auffassung zur mobilen Hochdrucktechnik gibt es in Feuerwehrcreisen nicht. Sie reicht von strikter Ablehnung bis hin zu positiver Einschätzung. Die Gründe sind dabei unterschiedlich. Folgende Sachverhalte werden genannt:

- ◆ Kleinere Brandszenarien (Wohnungsbrände, Laubenbrände, Kfz-Brände, Dachstuhlbrände, ...) lassen sich mit Schnellangriffseinrichtungen gut bekämpfen. Der Löschwasserverbrauch kann sehr gering gehalten werden.

- ◆ Probleme ergeben sich bei der Bekämpfung insbesondere größerer Glutbrände (Holzstapel, Strohballen, Kohlebrände, ...).
- ◆ Da moderne Strahlrohre auch im Normaldruckbereich die Abnahme geringer Löschwasserraten erlauben, man bei Bedarf schnell mehr Wasser zur Verfügung hat und die Angriffsschläuche nach Bedarf verlängert werden können, wird von vielen Feuerwehren auf den Einsatz mobiler Hochdrucktechnik verzichtet.

Der Einsatz der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung unterscheidet sich wesentlich von der Anwendung stationärer Löschanlagen. Auf einen Punkt sei an dieser Stelle besonders hingewiesen. Stationäre Löschanlagen können an die konkrete Situation angepasst werden. Setzt man eine funktionierende rechtzeitige Branderkennung voraus, so werden sie vor allem in der Phase der frühen Brandentwicklung aktiv. Mit wenig Wasser kann dann wirkungsvoll gearbeitet werden.

Bei der mobilen Brandbekämpfung vergeht jedoch von der Branderkennung bis zum Wirksamwerden der Feuerwehr zwangsläufig mehr Zeit. Die Brände sind dann schon in fortgeschrittenen Stadien. Die Situation ist oft auch nicht sofort überschaubar. Ist der Brand mit starker Rauchentwicklung verbunden, so kann in vielen Fällen nicht eingeschätzt werden, was und wie viel brennt. Die örtlichen Gegebenheiten sind ebenfalls oft nicht im Detail bekannt. Aus diesem Grund können auch Parameter aus dem Bereich der stationären Brandbekämpfung nicht auf die mobile übertragen werden. Das bedeutet, dass es aus der Sicht der Einsatztaktik sicher nicht ratsam ist, in dem eben beschriebenen Szenarium mit einem kleinen Löschmittelansatz die Brandbekämpfung aufzunehmen.

Die Untersuchungen dieses Vorhabens haben zum Ziel, diese Grenze weiter aufzuklären. Es wurden Sprühstrahlen mit kleinen Volumenströmen ausgewählt, um insbesondere kritische Grenzen begründen zu können. Bei deutlich größeren Volumenströmen wird die Anwendbarkeit auch nicht in Abrede gestellt. Es wurden die in Tabelle 3.1 angegebenen Sprühstrahlen bei den Versuchen eingesetzt.

**Tabelle 3.1:** Im Vorhaben berücksichtigte Sprühstrahlen

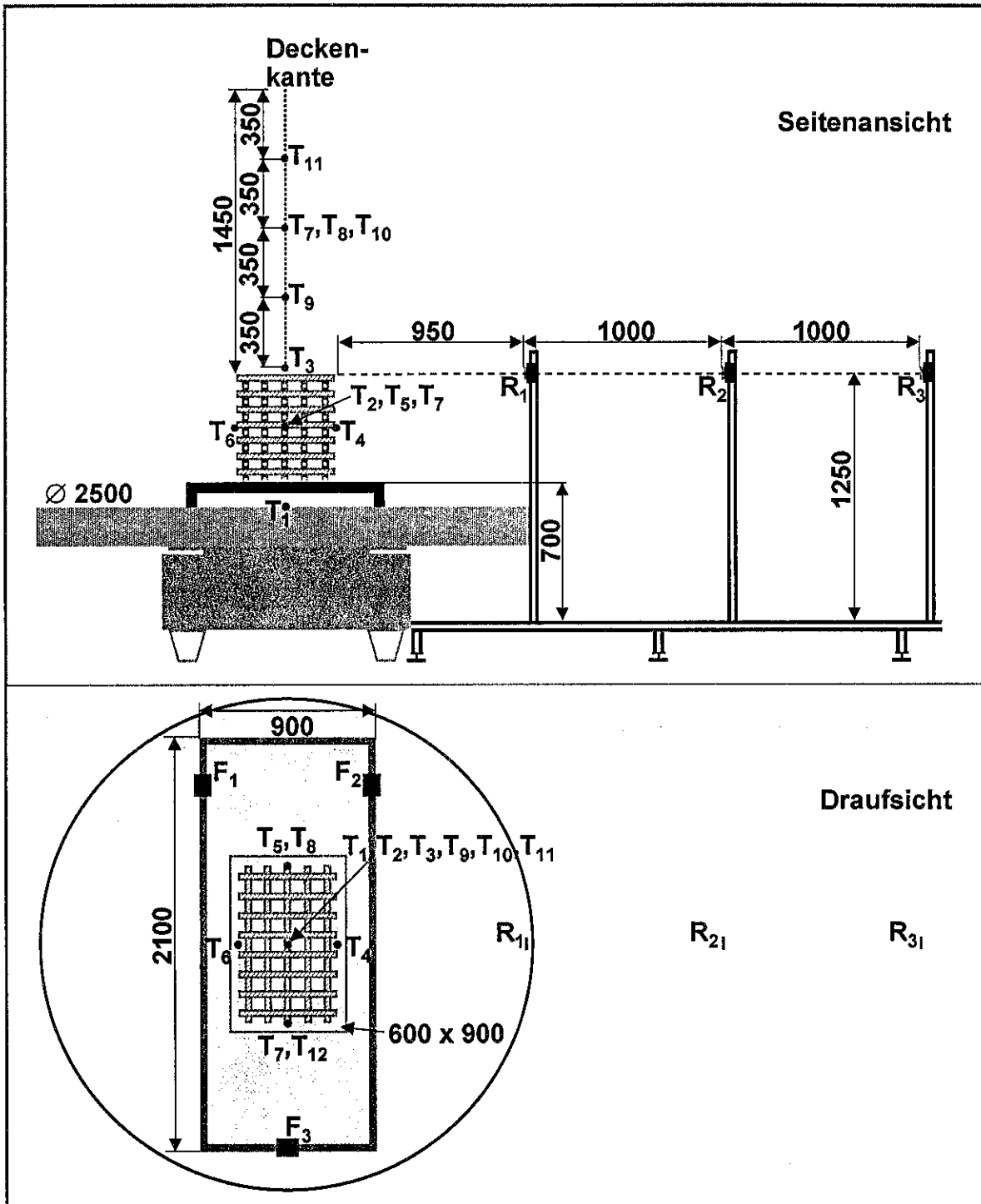
| Nr. | Bezeichnung | Druck am Strahlrohr<br>in <i>bar</i> | Volumenstrom<br>in <i>l/min</i> |
|-----|-------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1   | PPAT025S    | 25                                   | 80                              |
| 2   | PPFC025S    | 25                                   | 148                             |
| 3   | PPMX040S    | 40                                   | 11                              |
| 4   | PPPF030S    | 30                                   | 24                              |
| 5   | PPQF025S    | 25                                   | 42                              |
| 6   | SPCP115V    | 115                                  | 25                              |
| 7   | SPCP120S    | 120                                  | 20                              |

### 3.2 Festlegen der Brandobjekte

Eine wesentliche Grundforderung jeder wissenschaftlichen Versuchsauswertung ist die Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse. Das impliziert auch die Forderung, dass das Brandobjekt beliebig oft mit gleichen Eigenschaften wieder aufgebaut werden kann.

Die Wahl der Brandobjekte gestaltete sich als schwierig, da sich aus der Befragung heraus kein typischer Brand ableiten lässt, was auch nicht zu erwarten war. Bei Feuerwehreinsätzen gibt es eben nicht den „Brand“ schlechthin, der dann auch noch reproduzierbar sein soll. Selbst ein schon sehr „spezieller“ Brand, wie z. B. ein Zimmerbrand, kann nur schwer reproduzierbar gestaltet werden, da eine nahezu gleiche Möblierung nicht beliebig häufig zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wurde bei festen glutbildenden Bränden auf Holzkrippenbrände entsprechend der [DIN EN 3, Teil 1] zurückgegriffen. Diese werden z. B. auch zur Untersuchung der Wirksamkeit von Sprinkleranlagen verwendet (vgl. [Harvie et al. 99]). Für feste schmelzende Stoffe wurden Brände mit Polypropylengranulat betrachtet.

Dennoch ist es natürlich wichtig, einen Bezug zu anderen Bränden herzustellen. Aus diesem Grund wurden einige Vorversuche durchgeführt, die zur Ermittlung der Brandleistungen dienten. Dabei wurde der gleiche Versuchsaufbau wie bei den Löschversuchen verwendet. Diese Vorversuche werden im Folgenden kurz erläutert.



**Bild 3.1:** Messstellen bei den Holzrippenabbrandversuchen am Beispiel des Brandobjektes 8A

Die Versuche wurden im Brandkanal des IdF LSA (vgl. Bild A1) durchgeführt. Die Lage des Versuchsplatzes im Brandkanal zeigt Bild A2. Es wurden bei drei verschiedenen Holzrippen (8A, 13A und 21A) Abbrandversuche durchgeführt. Bild A3 zeigt die Struktur der Holzrippen am Beispiel der Krippe 13A.

Im Bild 3.1 ist der Aufbau der Versuche zur Ermittlung der Brandleistung für die Holzkrippenbrandobjekte dargestellt. Die verwendete Sensorik sowie deren Messprinzip sind dem Anhang B zu entnehmen. Mit  $T_1$  bis  $T_{11}$  sind Temperatur- und mit  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  Wärmestrahlungsmessstellen bezeichnet.  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_3$  sind Kraftmessdosen, aus deren Messwerten die Abbrandraten bestimmt werden.

Zunächst werden die Abbrandraten für Holzkrippenbrände betrachtet. Bild 3.2 zeigt die aufgenommenen Massekurven für die Holzkrippen 13A (Brandversuch BV01), 21A (BV02) und 8A (BV03), wobei das Gewicht des Gestells, auf das die Holzkrippen gestapelt wurden, mit eingeht.

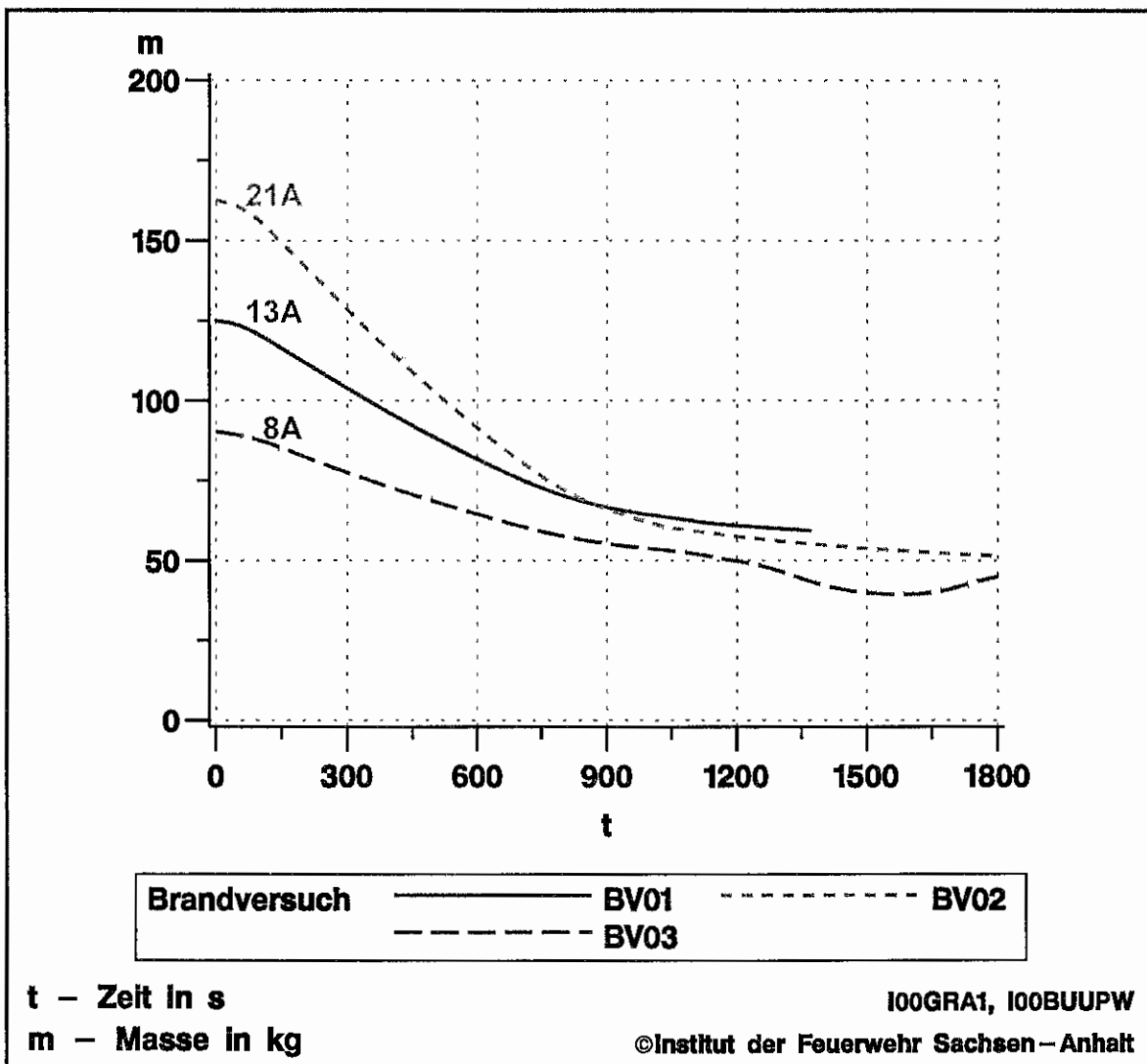


Bild 3.2: Massekurven für die Holzkrippen 13A, 21A und 8A bei Brandversuchen

Die Brandversuche wurden nach Vorgabe der [DIN EN 3, Teil 1] durchgeführt. Das Zündmittel war nach ca. 2 *min* verbrannt. Im Bild 3.2 ist zu sehen, dass bei allen drei Versuchen während der sich nach wenigen Minuten einstellenden Vollbrandphase über eine längere Zeitspanne die Masse  $m(t)$  nahezu linear verläuft. Für die Abbrandrate

$$I_{Ab}(t) = -\frac{dm(t)}{dt} \quad (3.1)$$

bedeutet dies, dass sie in diesem Bereich gut durch eine Konstante beschrieben werden kann. Da bei der Verbrennung ein Masseverlust eintritt, ist die Ableitung stets negativ. Die Abbrandrate wird im Folgenden jedoch als positive Größe angenommen, weshalb das negative Vorzeichen in der Gleichung (3.1) erforderlich ist. Diese konstante Rate wurde zur Bestimmung des den Brand charakterisierenden Wärmestroms

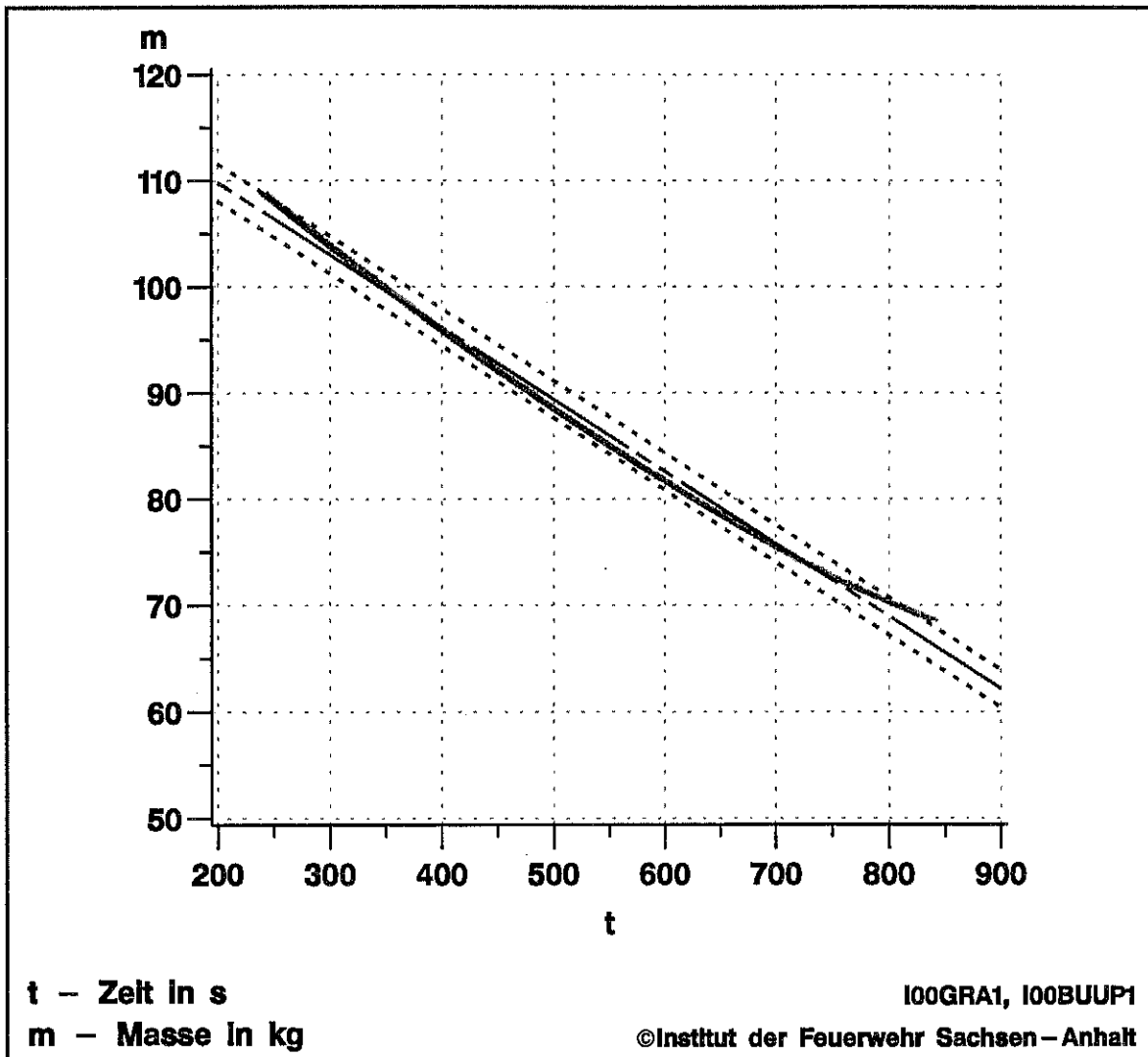
$$I_w = H * I_{Ab} \quad (3.2)$$

verwendet.  $H$  ist in der Gleichung (3.2) der Heizwert. Die Abbrandrate wurde mittels linearer Regression geschätzt. Die lineare Regressionsgleichung hat in diesem Fall die Form

$$m(t) = \int_0^t -I_{Ab} dt = m_0 - I_{Ab} * t \quad (3.3)$$

Ausgehend von den Messwerten des Zeitintervalls von 240 *s* bis 840 *s* wurden die Abbrandraten geschätzt. Die Grafiken sowie die statistischen Auswertungen wurden mit dem Programmsystem [SAS 00] berechnet.

Bild 3.3 zeigt das Ergebnis der Regressionsschätzung für den Brandversuch BV01, d. h. die Holzkrippe 13A. Die Messwerte sind im Bild durch die graue Kurve dargestellt. Die mittlere rote gestrichelte Gerade (kurz-kurz-lang) ist die Regressionsgerade. Die äußeren gestrichelten Geraden (kurz-kurz) markieren zu jedem Zeitpunkt das Konfidenzintervall für den Massewert. Das Konfidenzniveau wurde mit 0.95 gewählt (s. [Beyer et al. 95]). Das Konfidenzintervall für den Mittelwert ist bedeutend schmaler. Die Konfidenzgrenzen stimmen optisch fast mit der Regressionsgerade überein, weshalb auf diese Darstellung verzichtet wurde. Somit ist es für die Phase des Vollbrandes sinnvoll, die derart ermittelte Abbrandrate für die weiteren Berechnungen zu Grunde zu legen.



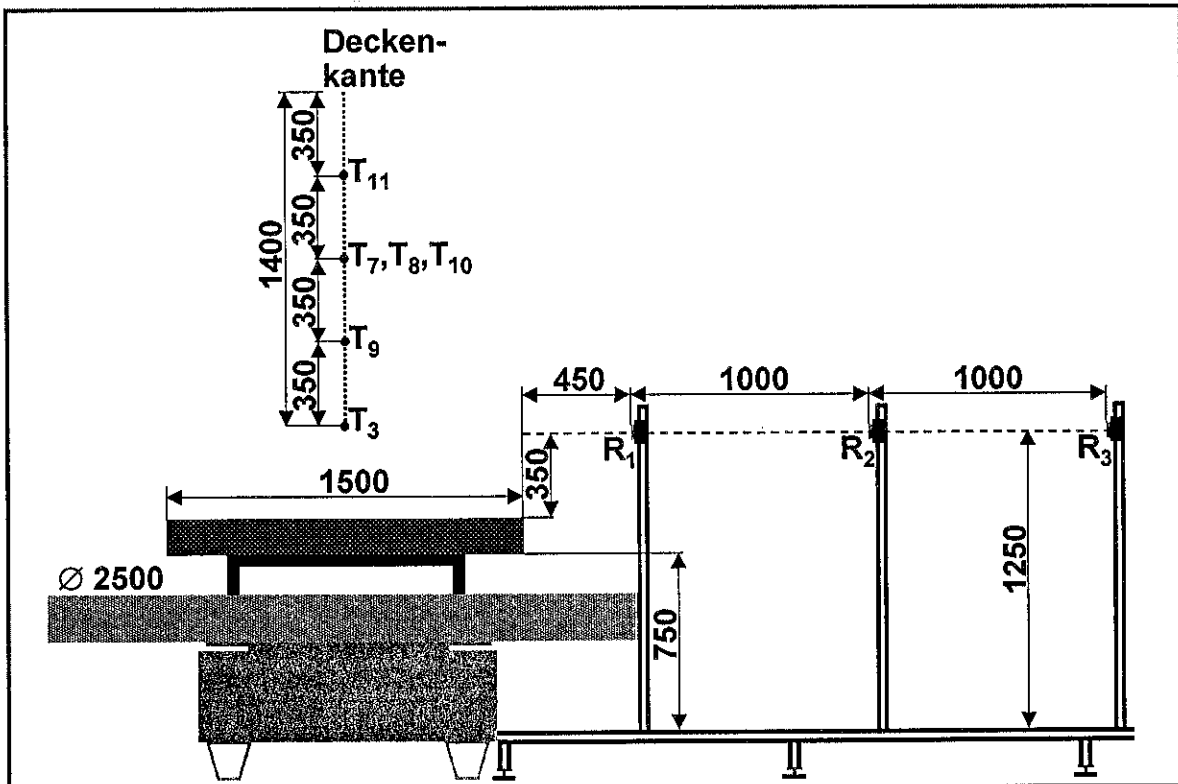
**Bild 3.3:** Regressionsgerade für die Massenkurve beim Brandversuch BV01

Die erforderlichen Heizwerte wurden nach DIN mit einem Verbrennungskalorimeter bestimmt (S. [HC10 94, DIN 51900, Teil 1]). Dazu wurden für die Holzkrippenbrandobjekte drei Holzproben gemäß Tabelle 3.2 berücksichtigt. Da in dem verwendeten Holzmaterial der Anteil des normalen Holzes überwog und das Holz in der Regel gut erhalten war, wurde ein Mittelwert gebildet mit 90 % normalem Holz und 10 % Astmaterial. Der berechnete Wert ergab sich als **19215 J/g**. Dieser Wert stimmt gut mit dem bei [Pleiß 98] angegebenen Wert von 20 000 J/g überein. Zum Teil wesentlich kleinere Werte werden in Abhängigkeit von der Holzart und Feuchte bei [Hähnel et al. 77, Stiebeler et al. 72] angegeben.



**Tabelle 3.2:** Heizwerte für Kiefernholz

| Material   | Einwaage<br>in g | Temperatur-<br>differenz $\Delta t$<br>in K | Heizwert<br>in J/g |
|--|------------------|---|--------------------|
| Kiefernholz für Normholzstapel,<br>normal                  | 0,3160           | 0,6271                                      | 18534,22           |
|  | 0,2589           | 0,5072                                      | 18296,66           |
| Kiefernholz für Normholzstapel, aus<br>Astmaterial         | 0,2882           | 0,8408                                      | 27247,29           |
|  | 0,4297           | 1,1882                                      | 25825,50           |
|  | 0,2556           | 0,7126                                      | 26038,11           |
| Kiefernholz für Normholzstapel,<br>verschimmeltes Material | 0,2442           | 0,4736                                      | 18113,01           |
|  | 0,3209           | 0,6227                                      | 18123,15           |
| <b>Mittelwerte</b>   |                  |   |                    |
| Kiefernholz für Normholzstapel,<br>normal                  |                  |   | 18420              |
| Kiefernholz für Normholzstapel, aus<br>Astmaterial         |                  |   | 26370              |
| Kiefernholz für Normholzstapel,<br>verschimmeltes Material |                  |   | 18120              |



**Bild 3.4:** Messstellen bei den Polypropylenabbrandversuchen bei der Brandwanne mit 1500 mm Durchmesser

In analoger Weise wurden die Brandversuche zur Bestimmung des Wärmestroms von Polypropylenbränden durchgeführt. Bild 3.4 zeigt den Versuchsaufbau. Es wurden bei den Versuchen runde Brandwannen verwendet. Im Bild 3.5 sind die Massenkurven für die Brandversuche BV04 (Wannendurchmesser,  $\varnothing$  1500 mm), BV05 ( $\varnothing$  1200 mm, Brandobjekt 34B nach [DIN EN 3, Teil 1]) und BV06 ( $\varnothing$  1750 mm) zu sehen.

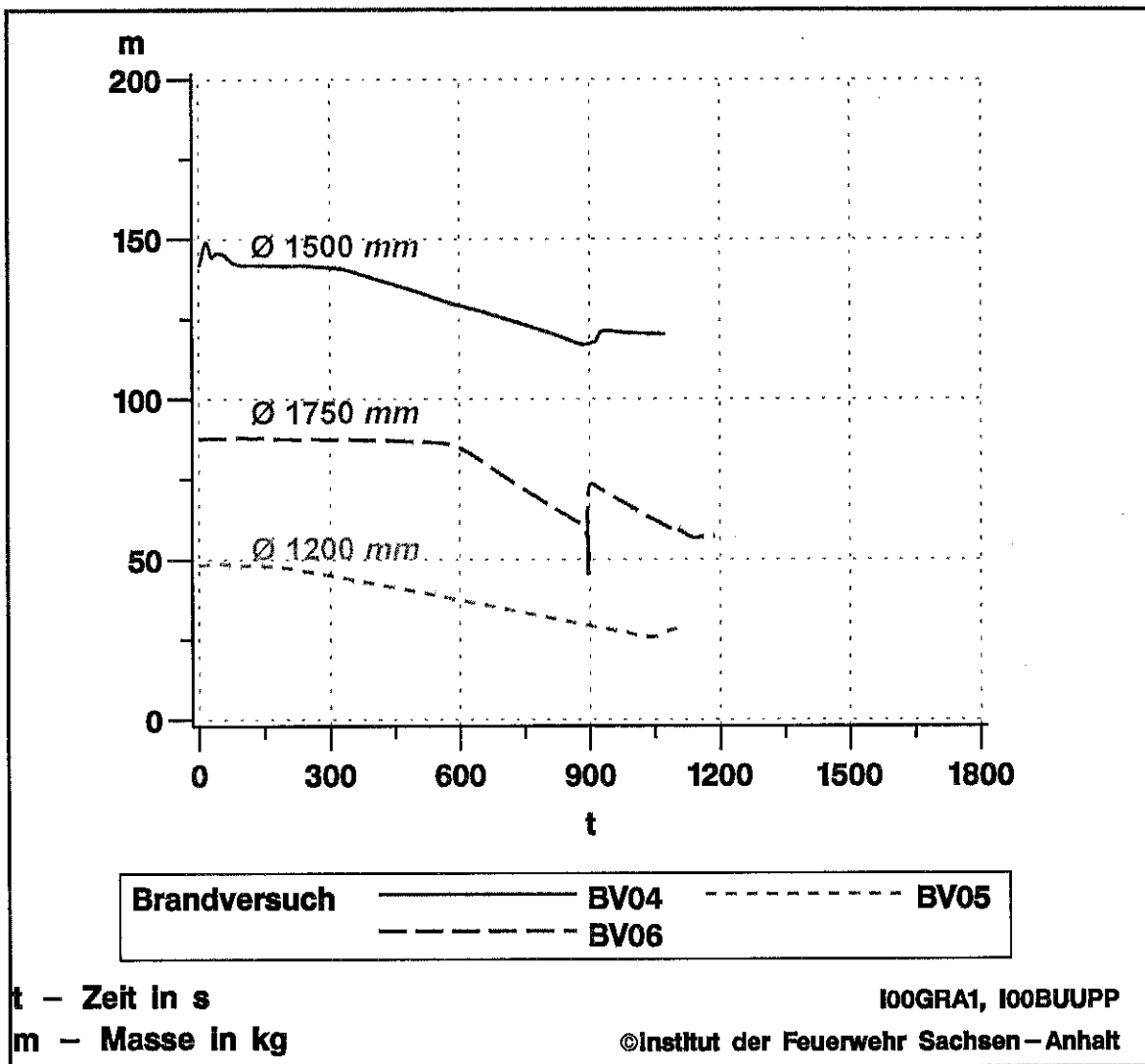


Bild 3.5: Massekurven bei Polypropylenbrandversuchen

Die Brandobjekte wurden mittels Propangasbrenner gezündet. Das Schmelzen der oberen Schicht des Polypropylengranulats dauerten einige Minuten. Für die Schätzung der Abbrandrate wurde in diesem Fall das Zeitintervall von 600 s bis 900 s gewählt. Beim Brandversuch BV06 fiel ein größerer Betonbrocken in die Brandwanne, was die Unstetigkeit in der Massenkurve begründet.

Die Heizwertbestimmung lieferte für das Polypropylen den Wert **46460 J/g**. Im Vergleich hierzu gibt [Babrauskas 92] einen Wert 43 200 J/g an.

Die Ergebnisse für die Abbrandraten und die resultierenden Wärmeströme sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

**Tabelle 3.3:** Abbrandraten und Wärmeströme ausgewählter Brandobjekte

| <b>Brandobjekt</b>                               | <b>Abbrandrate <math>I_{Ab}</math></b><br>in kg/s | <b>Wärmestrom <math>I_W</math></b><br>in MW |
|--|---|---|
| Holzkrippe 8 A                                   | 0.040   | 0.77  |
| Holzkrippe 13 A                                  | 0.068   | 1.31  |
| Holzkrippe 21 A                                  | 0.114   | 2.19  |
| runde Brandwanne, Ø 1200 mm, 1.13 m <sup>2</sup> | 0.027   | 1.25  |
| runde Brandwanne, Ø 1500 mm, 1.77 m <sup>2</sup> | 0.044   | 2.04  |
| runde Brandwanne, Ø 1750 mm, 2.41 m <sup>2</sup> | 0.087   | 4.04  |

Bei den Bränden BV01 bis BV06 wurde auch die Wärmestrahlung in drei verschiedenen Entfernungen gemessen. Bei den Holzkruppenbränden BV01 bis BV03 waren die Radiometer in Höhe der Oberkante der Krippe in den Entfernungen 950 mm (Radiometer R<sub>1</sub>), 1950 mm (R<sub>2</sub>) und 2950 mm (R<sub>2</sub>) positioniert (s. Bild 3.1). Im Bild 3.6 sind die Messergebnisse für die drei Brände grafisch dargestellt. Die Maximalwerte der Wärmestrahlung werden nach ca. 12 min erreicht. In knapp 1 m Entfernung liegt das Maximum bei der Holzkrippe 8A bei ca. 1.3 W/cm<sup>2</sup>, bei 13A sind es etwas weniger als 2 W/cm<sup>2</sup> und bei der Krippe 21A über 2.5 W/cm<sup>2</sup>. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Wärmestrahlung wie bekannt schnell ab.

Bild 3.2 zeigt den Versuchsaufbau bei den Polypropylenbrandversuchen. Die Radiometer waren hier ca. 450 mm oberhalb der Brandwannenkante in den Entfernungen 450 mm, 1450 mm und 2450 mm angeordnet. Der direkte Vergleich der Kurven mit den Holzkruppenbränden ist nicht zulässig, da die Abstände der Radiometer zu den Brandobjekten unterschiedlich groß sind. Bei der großen Brandwanne wurden in knapp einem halben Meter Entfernung Werte von über 6 W/cm<sup>2</sup> gemessen.

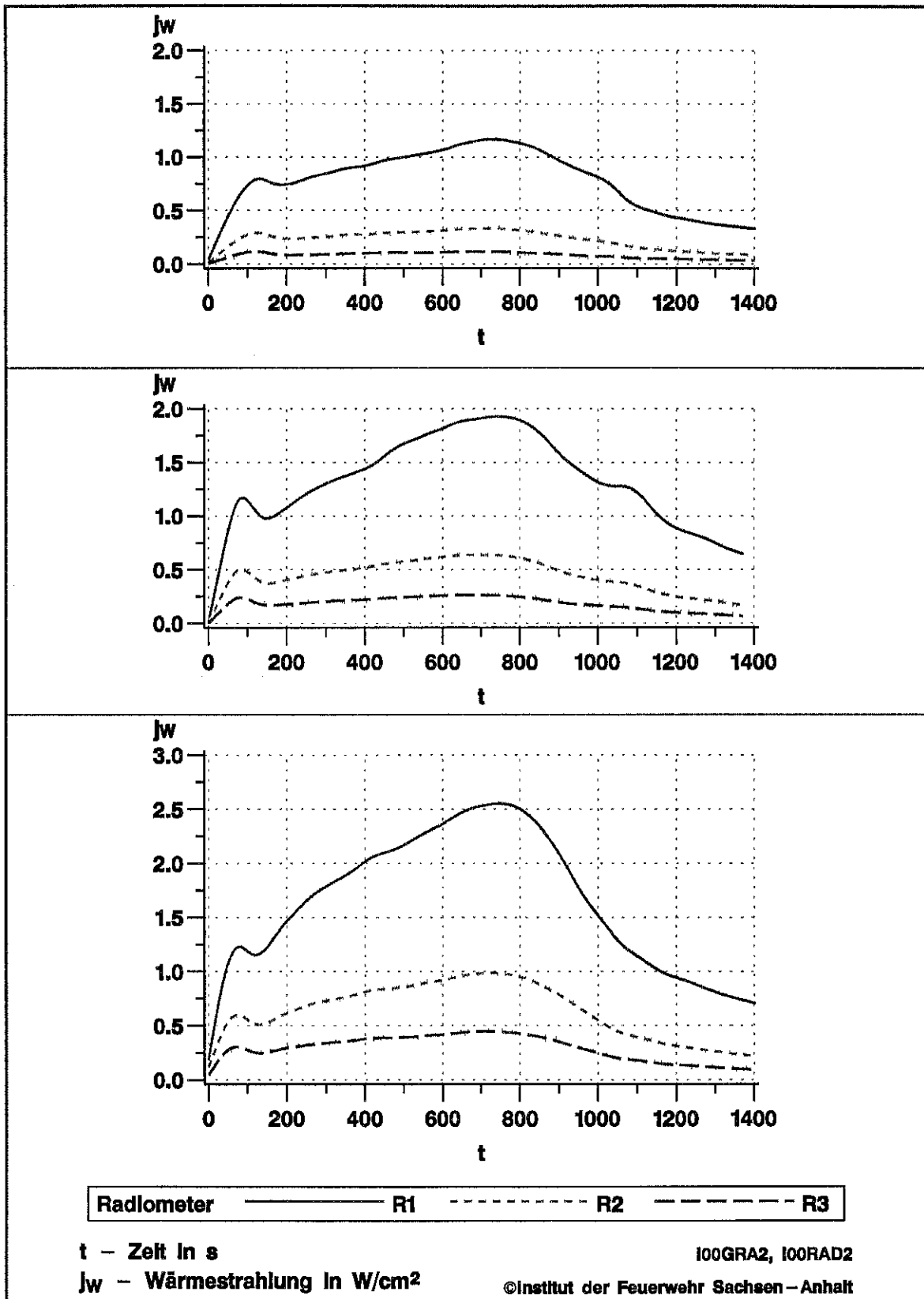
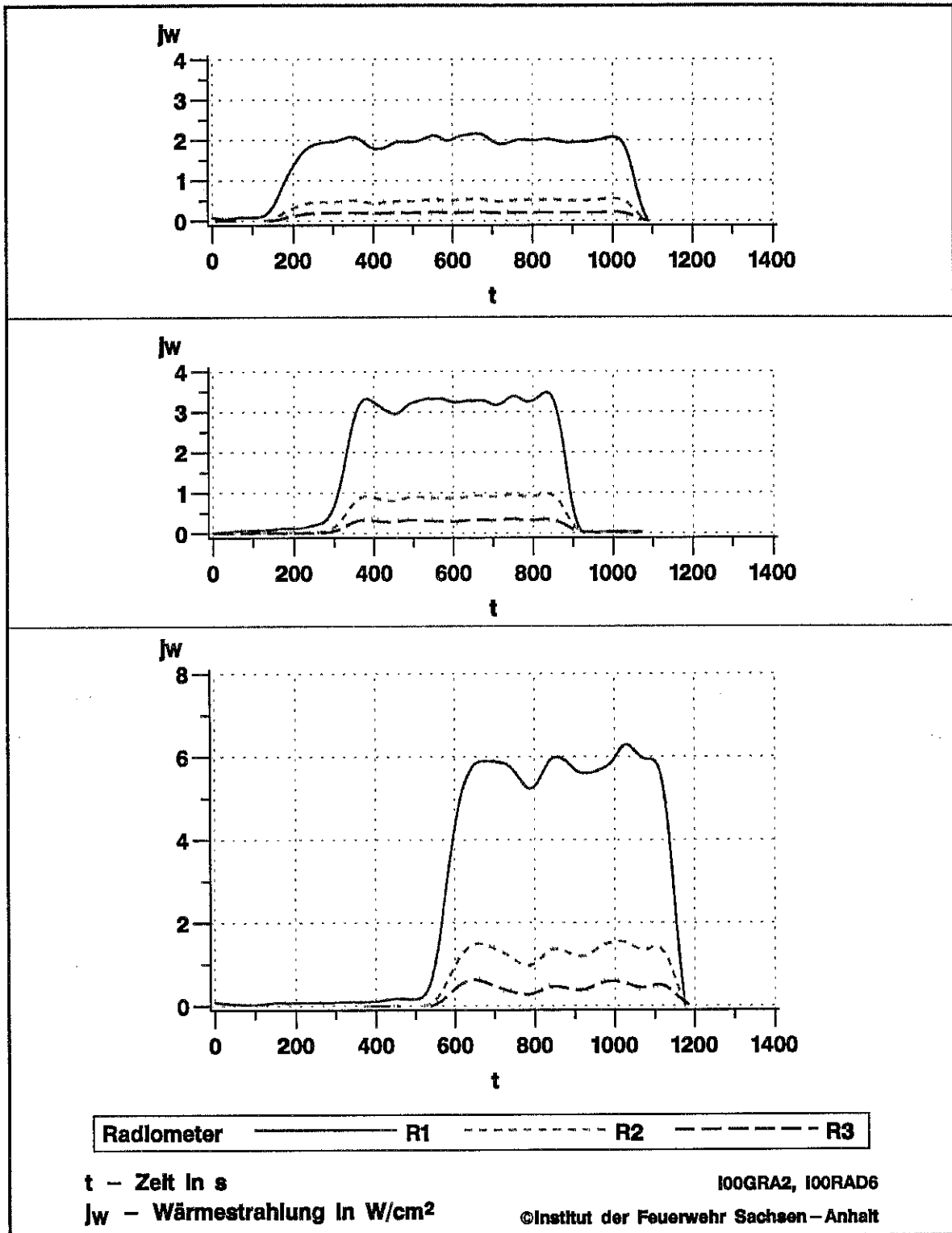


Bild 3.6: An den Radiometern R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> und R<sub>3</sub> gemessene Wärmestrahlungen für die Holzkrippenbrände 8A, 13A und 21A



**Bild 3.7:** An den Radiometern  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  gemessene Wärmestrahlungen für die Polypropylenbrände mit den Brandwandendurchmessern 1200 mm, 1500 mm und 1750 mm

Auf die Darstellung der Temperaturwerte wird an dieser Stelle verzichtet. Ausgewählte Temperaturkurven sind im Abschnitt 4.1 bei der Auswertung der Brandversuche dargestellt.

### 3.3 Versuchsplätze und Versuchsprogramm

Bei der Bearbeitung von zwei durch die Innenministerkonferenz vergebenen Forschungsvorhaben zur Untersuchung der Löschwirkung von fein verteiltem Wasser wurden Versuchsplätze zur Vermessung von Sprühstrahlen und zur Durchführung reproduzierbarer Brandversuche aufgebaut und Versuchsserien durchgeführt. Diese Aufbauten wurden inzwischen weiterentwickelt und auch bei anderen Vorhaben eingesetzt. Insbesondere handelt es sich um den Aufbau zur Vermessung von Sprühstrahlen mit einem Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) [Starke et al. 96] und den Automatic-Fire-Fighter (AFF) [Starke et al. 98]. Die aktualisierten Beschreibungen der Versuchsplätze sind in den Anhängen C und D enthalten. Der in diesem Vorhaben gewählte Aufbau des AFF sowie die Abmaße des Brandkanals des IdF LSA sind den Bildern A1 und A2 zu entnehmen.

Folgende Inhalte wurden im Versuchsprogramm für die ausgewählten Sprühstrahlen berücksichtigt:

- ◆ Es wurden Tropfengrößen und –geschwindigkeiten mit dem PDA im Nasslabor des IdF LSA gemessen.
- ◆ Die Massenstromdichten wurden im Nasslabor bestimmt.
- ◆ Mit dem AFF wurden im Brandkanal des IdF LSA Brand- und Sprühversuche durchgeführt. Dabei wurde für jeden Brandversuch das tatsächlich auf das Brandobjekt auftreffende Wasser mit einem korrespondierenden Sprühversuch ermittelt.

Bei den in [Starke et al. 98] beschriebenen Brandversuchen wurden alle mit dem AFF durchgeführten Brandversuche zweimal durchgeführt. Die Auswertungen zeigten, dass der AFF eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gestattet. Aus diesem Grund wurde auf die Wiederholung der Versuche verzichtet, um eine größere Zahl von Sprühstrahlen berücksichtigen zu können.

Die Sprühstrahlen der Tabelle 3.1 wurden so ausgewählt, dass sie sowohl unterschiedliche Volumenströme, Massenstromdichten und Wurfweiten hatten. Das bedeutet jedoch auch, dass es nicht sinnvoll ist, alle Versuche mit allen betrachteten Parametern für jeden Sprühstrahl durchzuführen. Zeigt zum Beispiel ein Sprühstrahl bei einer Entfernung von 450 *cm* kaum noch eine Löschwirkung, so wurde auf den Versuch bei 600 *cm* verzichtet.

Folgende Versuchsparameter wurden variiert:

- ◆ Es wurden die in der Tabelle 3.1 angegebenen Sprühstrahlen berücksichtigt.
- ◆ Als Brandobjekte wurden verschiedene Holzkrippen und Polypropylen-Granulat gewählt.
- ◆ Die Brandobjekte wurden auf dem Drehteller des AFF gedreht bzw. nicht gedreht.
- ◆ Die Entfernung zu den Brandobjekten wurde variiert.

Insgesamt wurden nach den 6 Vorversuchen 61 weitere Brandversuche sowie die Sprühversuche durchgeführt.

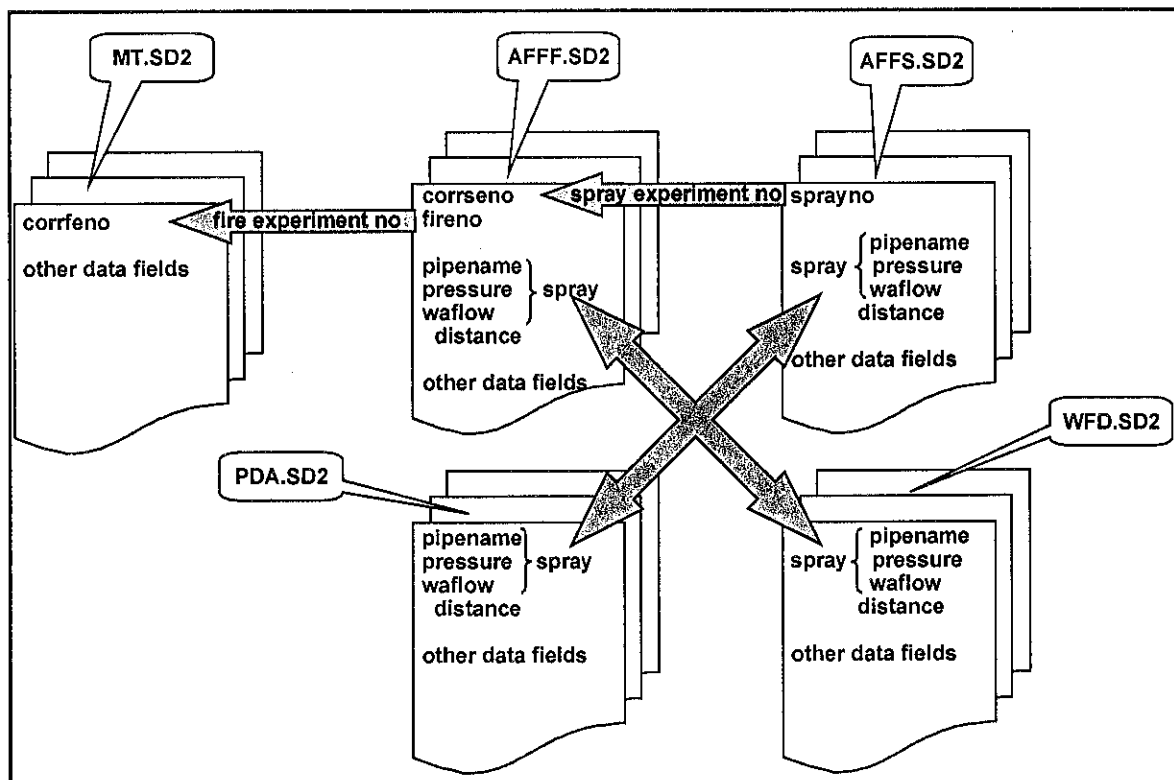
### **3.4 Datenstruktur**

Die Bearbeitung und Aufbereitung der bei Brandversuchen anfallenden umfangreichen Messdaten erfordern den Einsatz moderner Computer und leistungsfähiger Datenbanksysteme. Dies sichert die spätere Verfügbarkeit der Daten für weitere Auswertungen. Dazu ist es jedoch erforderlich, eine Datenstruktur festzulegen, in der die einzelnen Versuchsgrößen mit Hilfe von Datenfelder definiert sind. Bei der Definition werden Maßeinheiten, Wertebereiche usw. festgelegt. Mehrere Datenfelder werden logisch in Datensätzen und mehrere Datensätze wiederum Dateien zusammengefasst. Die Gesamtheit der betrachteten Dateien bildet dann die Datenbasis. Eine umfangreiche Struktur für Branddaten wird z. B. in [NISTIR 6088] beschrieben. Die eigentliche Abspeicherung der Daten sowie die Organisation und Verarbeitung übernimmt das Datenbankbetriebssystem. In modernen Systemen sind eine Vielzahl von Auswertemöglichkeiten integriert. Am IdF LSA wird das SAS-Datenbanksystem verwendet. Es unterstützt auch die Programmierung von Grafiken unterschiedlichster Gestalt.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde zur Datenablage im Wesentlichen die bereits bei [Starke et al. 98] definierte Datenstruktur verwendet. Auf detaillierte Erläuterungen sei an dieser Stelle verzichtet, da sie für das Verständnis und die Interpretation der Ergebnisse nicht erforderlich ist. Tabelle 3.4 enthält eine Übersicht der verwendeten Dateien. Die konkrete Beschreibung der Inhalte kann der oben genannten Literaturstelle entnommen werden. Bild 3.8 zeigt die Struktur der Datenbasis in der Übersicht.

**Tabelle 3.4:** Datenbankdateien zur Ablage der Versuchsaufbauten, der Versuchsdurchführung und der Messergebnisse

|          |   |
|----------|---|
| AFFF.SD2 | In dieser Datei sind die Parameter und die Messergebnisse der Brandversuche abgelegt. Zur Beschreibung eines Brandversuches wurden insgesamt 55 Datenfelder eingeführt. |
| AFFS.SD2 | Die Datei enthält die Informationen zu korrespondierenden Sprühversuchen Es wurden 37 Datenfelder eingeführt.   |
| PDA.SD2  | Hier sind die Ergebnisse PDA-Messungen abgelegt.  |
| WFD.SD2  | Die Daten der Massenstromdichtemessungen (water flow density) sind hier enthalten.  |
| MT.SD2   | Hier sind die bei den Brandversuchen mit der Vielstellenmesstechnik aufgenommenen Daten zur Temperatur, Wärmestrahlung, Druck, Volumenstrom und Kraft gespeichert.      |



**Bild 3.8:** Struktur der Datenbasis [Starke et al. 98]



## **4 AUSWERTUNG DER VERSUCHE FÜR DIE EINZELNEN VERSUCHSPLÄTZE**

In diesem Kapitel werden die Auswertungen für die einzelnen Versuchsplätze vorgenommen. Dabei wird auch auf die Versuchsdurchführung eingegangen und die erfassten Messgrößen erläutert. Die Auswertungen erfolgen vorwiegend in Form verschiedener grafischer Darstellungen.

Im Abschnitt 4.1 werden die Brandversuche auf dem AFF betrachtet. Für jeden Brandversuch wurde vor und während der Versuchsdurchführung ein Formblatt ausgefüllt (vgl. Bild A4), das wesentliche Versuchsparameter enthält. Die Beschreibung des AFF enthält Anlage C. Den bei der hier betrachteten Versuchsserie gewählten Aufbau im Brandkanal des IdF LSA zeigen die Bilder A1 und A2. Zunächst werden für ausgewählte Brandversuche Temperaturkurven dargestellt. Der Schwerpunkt der Auswertungen liegt jedoch bei der Darstellung der Löschergebnisse. Die Auswertung erfolgt getrennt für die Holzkrippen- und die Polypropylenbrandversuche .

Die Auswertung der Sprühversuche auf dem AFF schließt sich an.

Die letzten beiden Abschnitte sind der Auswertung der Messungen im Nasslabor des IdF LSA gewidmet. Das betrifft die Sprühstrahlvermessung mit dem PDA und die Ergebnisse zur Ermittlung der Massenstromdichte der Sprühstrahlen.

### **4.1 Auswertung der Brand- und Löschversuche auf dem AFF**

#### **4.1.1 Holzkrippenbrandversuche**

##### **4.1.1.1 Messstellen und Versuchsdurchführung**

Die Anordnung der Holzkrippen bei den Löschversuchen zeigt Bild 4.1. Bei allen Versuchen wurden die Holzkrippen in der Ausgangslage parallel zur Sprührichtung aufgebaut. Die der Löschdüse zugewandte schmale Seite der Krippe ist die Vorderseite des Brandobjektes.

Entsprechend wird als „Entfernung des Brandobjektes“ der Abstand von seiner Vorderkante zur Mündung der Löschdüse in dieser Ausgangslage bezeichnet. Wird die Holzkippe gedreht, so ändert sich diese Distanz geringfügig.

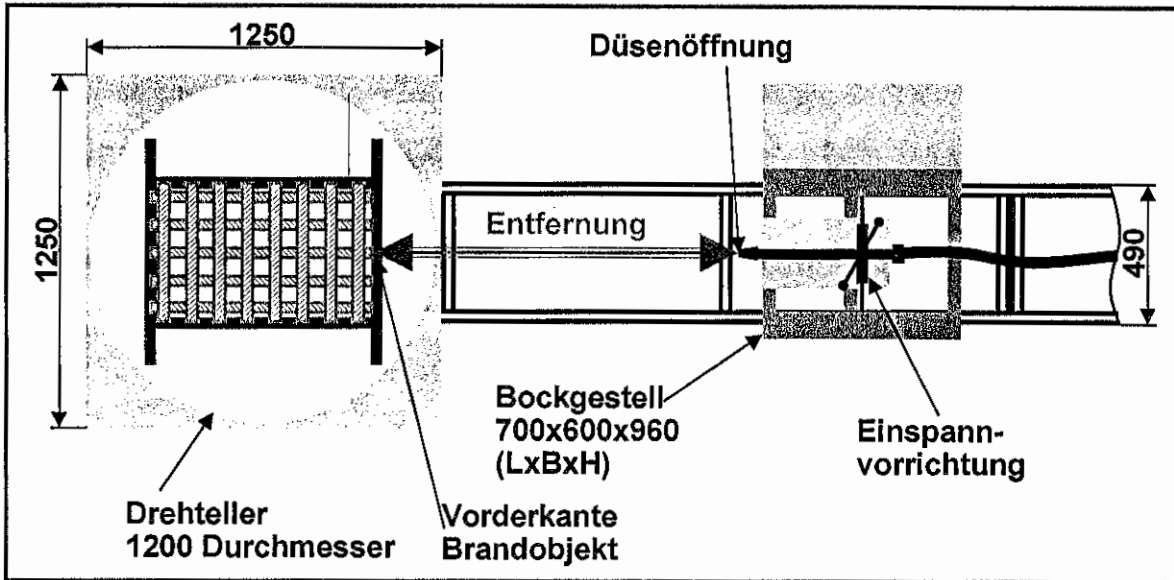


Bild 4.1: Aufbau des Brandobjektes am Beispiel der Holzkippe 8A

Die Bezeichnung der Temperaturmessstellen ist Bild 4.2 zu entnehmen. Die Messstellen  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  und  $T_6$  sind stets in der Mitte der langen Seite der Holzkippe angeordnet.

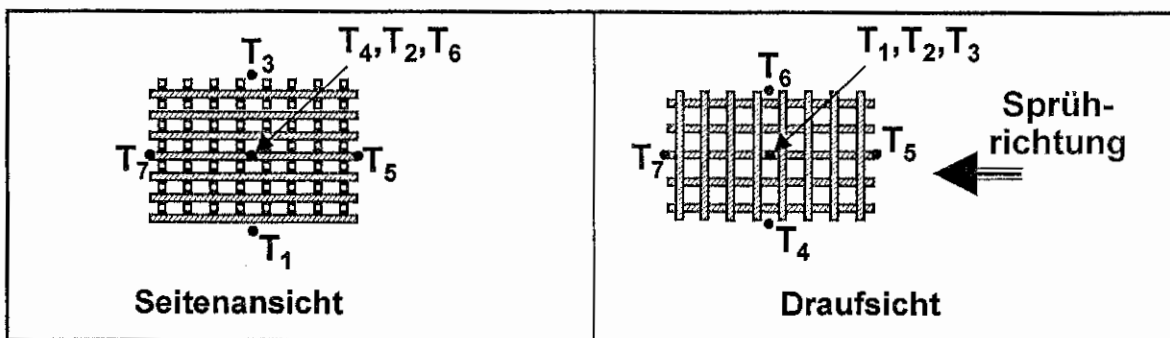


Bild 4.2: Temperaturmessstellen am Beispiel der Holzkippe 8A

Die Brandversuche wurden mit folgenden Betriebsbedingungen des AFF durchgeführt:

- ◆ Die Einspannvorrichtung wurde so auf- und abwärts geschwenkt, dass das Zentrum des Sprühstrahls im oberen Umkehrpunkt die obere Kante der Holzkippe und im unteren

Umkehrpunkt die untere Kante erfasste. Diese Einstellung wurde für jeden Sprühstrahl neu vorgenommen und gespeichert, so dass sie stets reproduziert werden kann.

- ◆ Es wurden die Sprühstrahlen und die Entfernung variiert.
- ◆ Die Krippe wurde entweder im Vollkreis hin- und hergedreht oder sie blieb unverändert in dem im Bild 4.1 dargestellten Aufbau stehen.
- ◆ Dem Löschwasservolumenstrom entsprechend wurden bei den nicht gedrehten Holzkrippen unterschiedliche Größen verwendet.

#### 4.1.1.2 Ausgewählte Temperaturverläufe bei Holzkrippenbrandversuchen

In den Bildern 4.3 und 4.4 sind die Temperaturverläufe für die Brandversuche BV23 und BV24 dargestellt. Das Brandobjekt war eine Holzkrippe 8A und es wurde aus 150 cm Entfernung mit dem Sprühstrahl SPCP120S (vgl. Tabelle 3.1) gelöscht. Beim Brandversuch BV23 wurde die Holzkrippe auf dem Drehteller gedreht und beim zweiten nicht.

Bei allen Lösversuchen wurde die Zeitachse so verschoben, dass der Zeitpunkt der Zündung in den Nullpunkt gelegt wurde. Bei der Datenaufbereitung wurde hierzu die Temperaturmessstelle  $T_{01}$  verwendet, die unmittelbar unter dem Brandobjekt über der Mitte der Zündwanne angebracht war. Beim erstmaligen Überschreiten der Temperatur von 50 °C an diesem Messpunkt wurde  $t = 0$  gesetzt. Nach ca. 120 s fällt bei  $T_{01}$  die Temperatur stark ab. Die Ursache hierfür ist, dass das Zündmittel verbrannt war. Die von unten zuströmende Umgebungsluft führt zur Abkühlung der Messstelle.

Beim Brandversuch BV23 wurde die Krippe auf dem Drehteller gedreht. Dies führt in diesem Fall dazu, dass die Temperaturen der an den Außenseiten der Krippe angebrachten Messstellen  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$  und  $T_7$  schnell abfallen. Die Temperatur bei  $T_2$  im Innern und bei  $T_3$  oberhalb der Krippe sinken erst nach ca. 2 min auf das äußere Niveau.

Bild 4.4 zeigt den Unterschied, wenn die Krippe nicht gedreht wird. Sofort mit Lösbeginn sinkt die Temperatur bei  $T_5$  an der Vorderseite der Krippe. An den anderen Seiten fallen die Temperaturen nur langsam. Da der Sprühstrahl fast senkrecht auf die Vorderseite des Brandobjektes trifft, strömt dieser direkt in diese hinein. Die Messstelle  $T_2$  wird noch gut

durch diese Strömung erfasst, was zu einer raschen Abkühlung an diesem Punkt führt. Es kommt aber zu einer starken Verwirbelung des Sprühstrahls in der Umgebung, so dass Flammen auch seitlich aus der Holzkrippe schlagen. Dies bedingt die langsame Abkühlung des äußeren Bereiches.

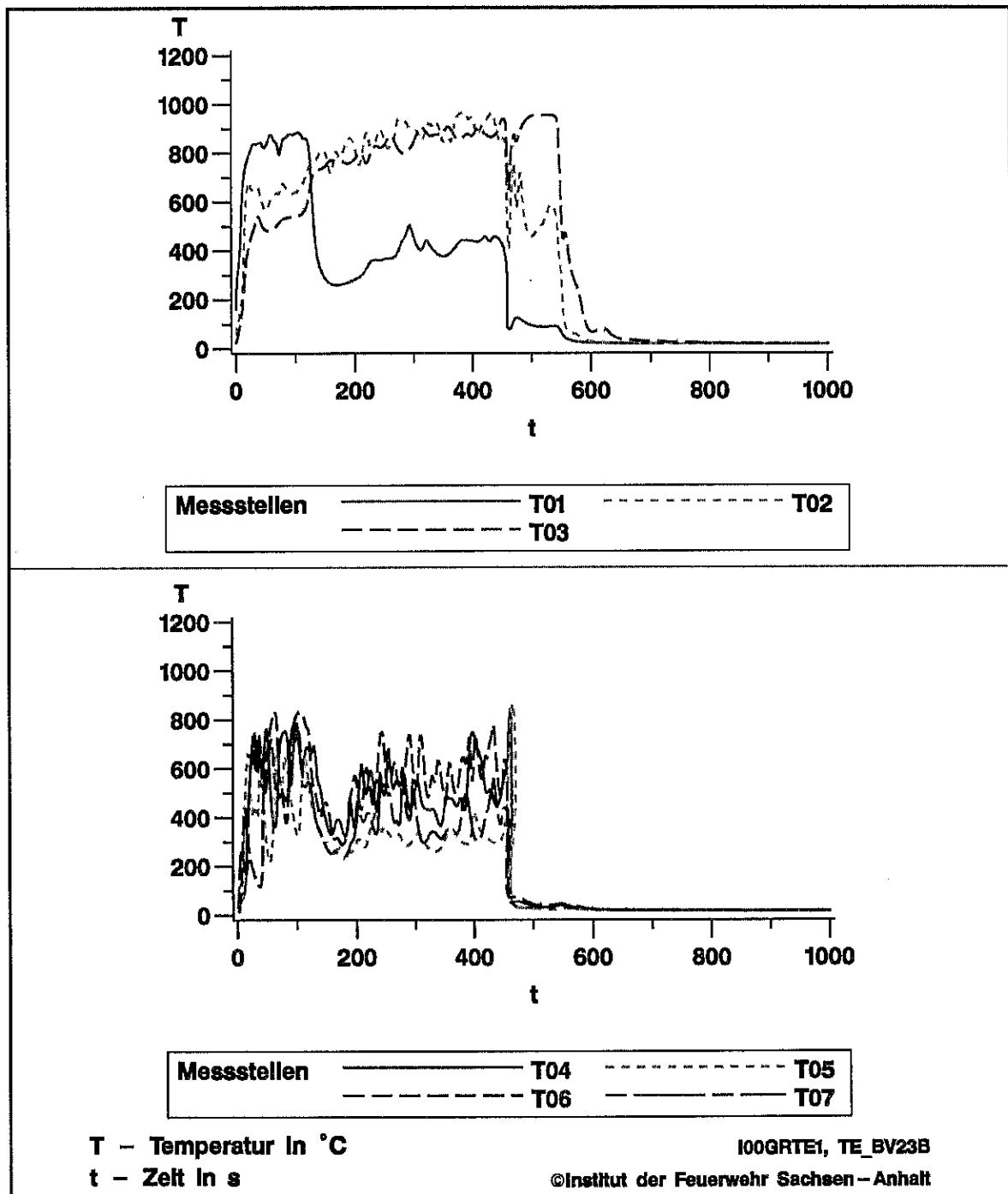


Bild 4.3: Temperaturkurven für den Brandversuch BV23

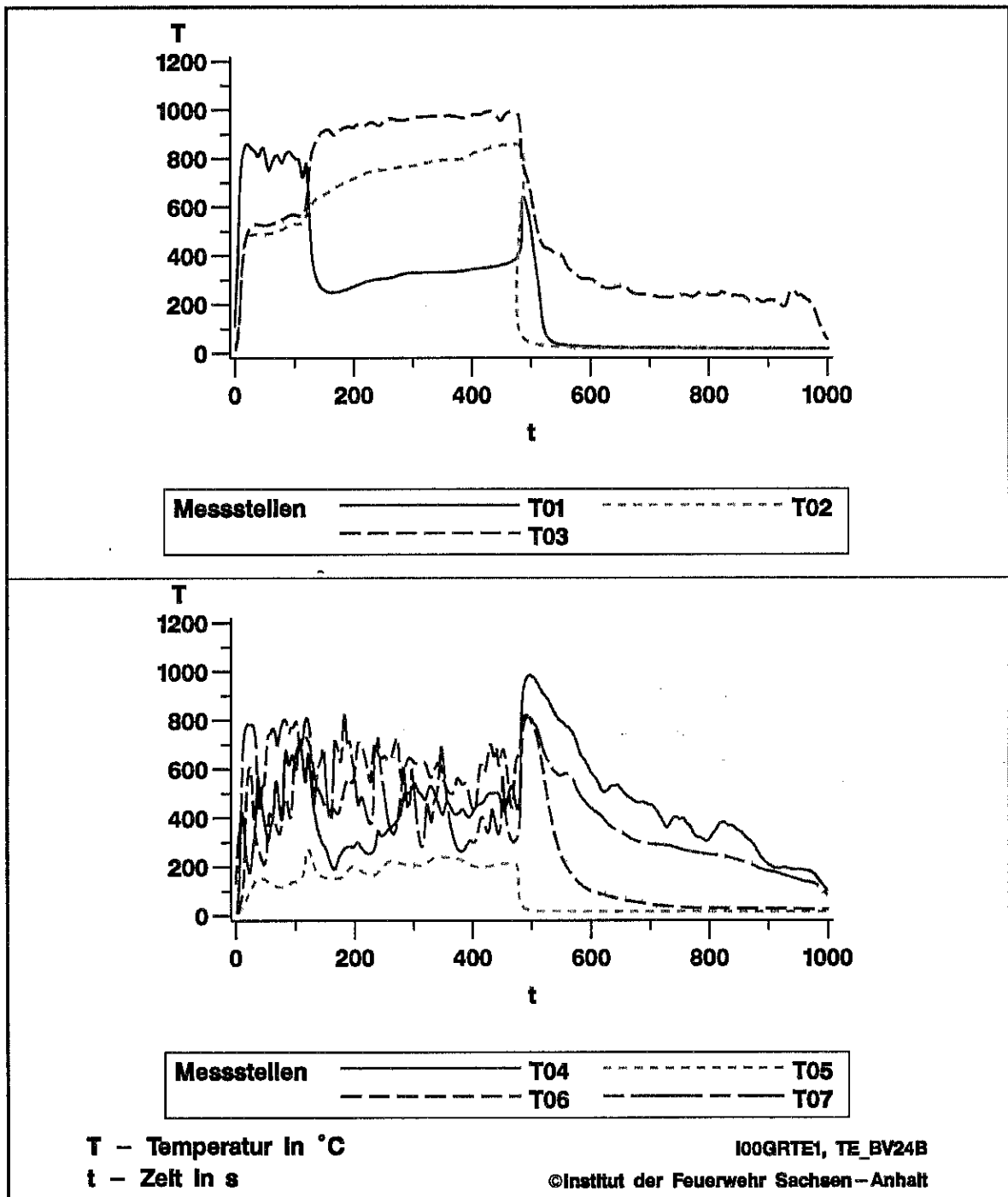
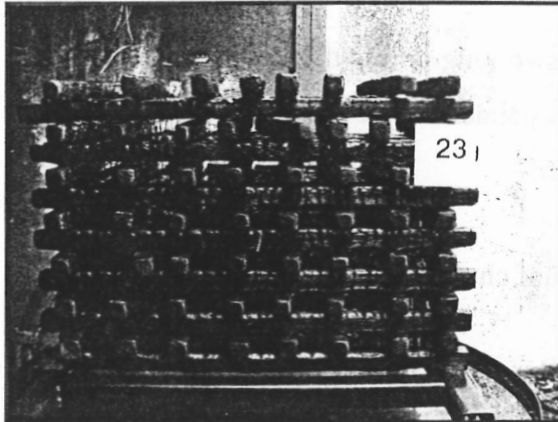


Bild 4.4: Temperaturkurven für den Brandversuch BV24

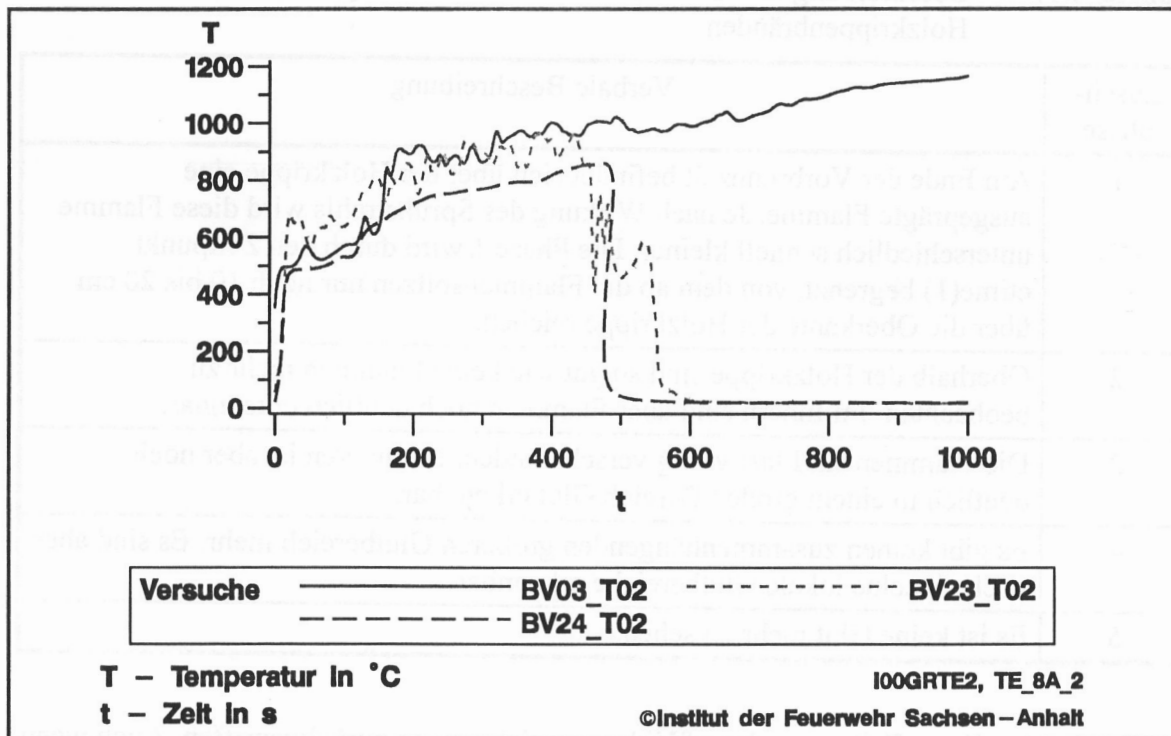
Insgesamt ist das Löschergebnis beim Brandversuch BV24 wesentlich schlechter, was den Bildern 4.5 und 4.6 zu entnehmen ist. Die Bewertung des Löschergebnisses allein mit der im Punkt T<sub>2</sub> gemessenen Temperatur kann zu einer Fehleinschätzung führen. Es sind auch die gegebenen Strömungsverhältnisse mit zu berücksichtigen. Hier sind insbesondere Videoaufnahmen von großem Nutzen.



**Bild 4.5:** Holzkrippe nach Abschluss des Versuches BV23



**Bild 4.6:** Holzkrippe nach Abschluss des Versuches BV24



**Bild 4.7:** Temperaturen an der Messstelle T<sub>2</sub> bei den Versuchen BV03, BV23 und BV24

Im Bild 4.7 wurde zusätzlich zu den eben betrachteten Brandversuchen BV23 und BV24 die Temperatur der Messstelle T<sub>2</sub> für den Abbrandversuch BV03 hinzugenommen. Bei diesem Versuch wurden keine Löschmaßnahmen durchgeführt.

#### 4.1.1.3 Versuchsergebnisse bei hin- und herbewegter Holzkrippe

Analog zu der bei [Starke et al. 98] gewählten Auswertung erfolgt auch hier zunächst eine visuelle Bewertung des Löschvorgangs und des Zustandes der Holzkrippe nach Beendigung des Löschens. Die berücksichtigten Merkmale sind:

- ◆ Die Beschreibung des Flammenbildes durch fünf charakteristische Zeiten, die in Tabelle 4.1 zusammengestellt sind.
- ◆ Der Zustand der Holzkrippe nach dem Brandversuch durch Beschreibung der verbrannten Bereiche.

**Tabelle 4.1:** Beschreibung der fünf charakteristischen Löschphasen bei Holzkrippenbränden

| Lösch-phase | Verbale Beschreibung  |
|-------------|---|
| 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 $t_{time(1)}$ begrenzt, von dem ab die Flammenspitzen nur noch 10 bis 20 cm über die Oberkante der Holzkrippe reichen. |
| 2           | Oberhalb der Holzkrippe sind so gut wie keine Flammen mehr zu beobachten. Im Innern sind aber Flammen noch deutlich erkennbar.  |
| 3           | Die Flammen sind fast völlig verschwunden. Im Inneren ist aber noch deutlich in einem großen Bereich Glut erkennbar.  |
| 4           | Es gibt keinen zusammenhängenden größeren Glutbereich mehr. Es sind aber noch einzelne lokale Glutbereiche erkennbar.   |
| 5           | Es ist keine Glut mehr zu sehen.  |

Zur Festlegung dieser Zeiten wurde auf Videoaufzeichnungen zurückgegriffen. Auch wenn die Bewertung vom Betrachter abhängt, ergeben sich jedoch brauchbare Aussagen, insbesondere, wenn für verschiedene Entfernungen bei gleichem Sprühstrahl die grafischen Bilder verglichen werden.

Zur Beschreibung des Zustandes der Holzkrippe wurde das im Bild A5 dargestellte Erfassungsblatt eingesetzt. In dieses wurden unmittelbar nach den Versuchen die Bereiche der betreffenden Schicht eingezeichnet, in denen die Hölzer vollständig verbrannt bzw. herausgebrochen waren. Dabei wurde für jeweils zwei übereinanderliegende Schichten ein

gemeinsamer Bereich gewählt. Nur bei deutlichen Abweichungen erfolgte die Auswertung für jede Schicht.

Für die Auswertung wurde für hin- und herbewegte Holzkrippen der folgende einfache Algorithmus verwendet:

- ◆ Für jede Schicht wurde ausgezählt, wie viel Kreuzungspunkte von Hölzern verbrannt waren. Hier sind bei der Holzkrippe 8A für eine Schicht die Werte von Null bis 40 möglich. Die 40 ergibt sich aus der maximalen Zahl von  $8 \cdot 5$  Kreuzungspunkten in einer Schicht. Ist die Schicht vollständig erhalten, so ist die Null zu wählen.
- ◆ Mit  $S$  wird nun die Summe aller verbrannten Kreuzungspunkte der 14 Schichten der Holzkrippe bezeichnet. In Abhängigkeit von diesem Summenwert wurden 6 verschiedene Löschergebnisse definiert, die der Tabelle 4.2 zu entnehmen sind.

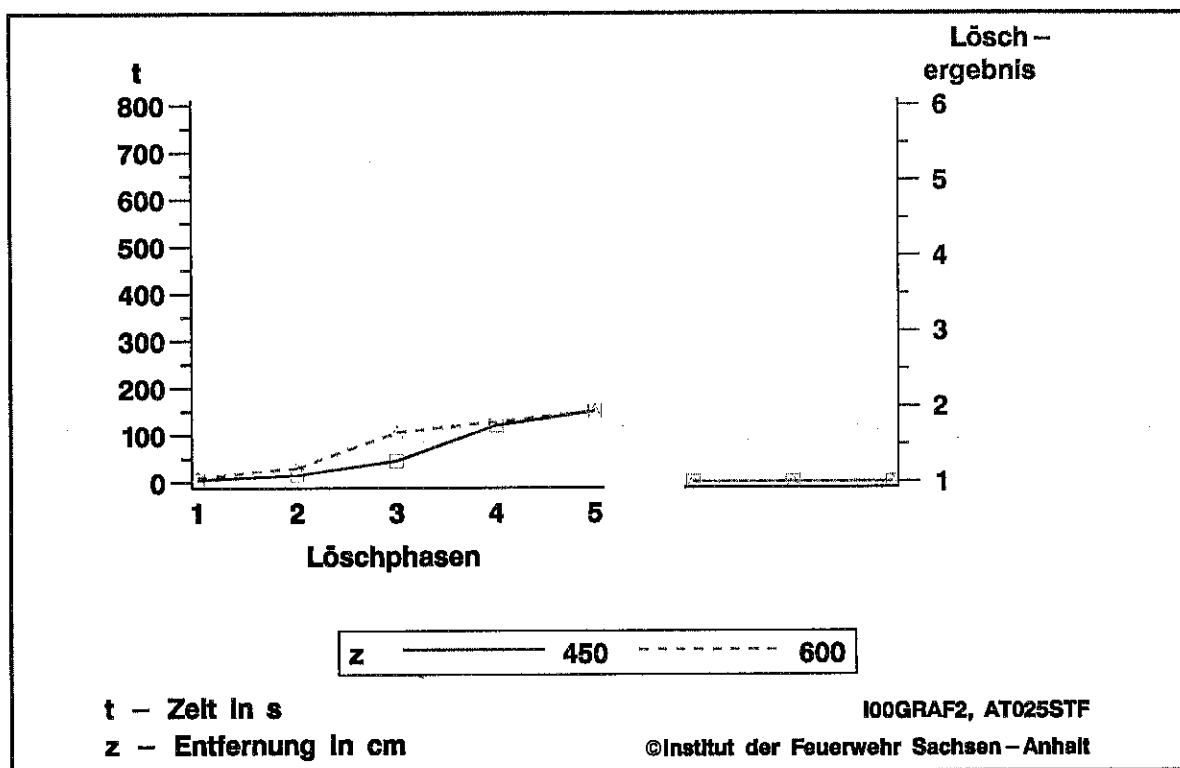
**Tabelle 4.2:** Kriterien zur Bewertung des Löschergebnisses auf der Basis der verbrannten Bereiche der Holzkrippe

| Lösch-<br>ergebnis | Summenwert $S$     | Bemerkungen  |
|--------------------|--------------------|--|
| 1                  | $S = 0$            | Die Holzkrippe ist in ihrer Struktur vollständig erhalten.   |
| 2                  | $0 < S \leq 50$    | Der äußere Bereich ist erhalten. Es wird zusätzlich gefordert, dass in den oberen Schichten 13 und 14 die Struktur nahezu vollständig ist. |
| 3                  | $50 < S \leq 100$  |  |
| 4                  | $100 < S \leq 150$ |  |
| 5                  | $150 < S \leq 250$ |  |
| 6                  | $S > 250$          | Die „6“ wird auch immer dann vergeben, wenn Teile des äußeren Bereiches der Holzkrippe zusammengebrochen sind.                             |

Die charakteristischen Löschzeiten sowie das Löschergebnis sind in den folgenden Grafiken für jeden Sprühstrahl dargestellt. Der linke Teil der Grafik enthält die Löschphasen. Auf der Abszisse sind die möglichen Werte von 1 bis 5 abgetragen. Die Ordinate enthält die den Löschphasen entsprechenden Zeiten. Diese Werte wurden durch Strecken verbunden, wodurch für jeden Brandversuch mit unterschiedlicher Entfernung ein Polygonzug entsteht. Der Legende kann entnommen werden, welcher Linientyp die jeweils gewählte Entfernung



darstellt. Zusätzlich sind die Messwerte durch kleine Symbole (Quadrate, Dreiecke, Kreise) markiert. Fehlt ein solches Symbol, so wurde für diese Löschphase kein Wert angegeben. Auf der rechten Seite der Grafik ist das Löschergebnis gezeichnet. Auf der Ordinate sind die Werte 1 bis 6 berücksichtigt. Der Sprühstrahl PPAT025S führt vergleichsweise viel Wasser mit sich. Dementsprechend kommt es auch bei einer Entfernung von 6 m noch zu einem sehr guten Löschergebnis. Auf die Löschversuche mit kürzerer Entfernung, d. h. unter 4.5 m, wurde aus diesem Grund auch verzichtet.



**Bild 4.8:** Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPAT025S bei rotierender Holzkrippe

Im Bild 4.9 sind die Ergebnisse für den Sprühstrahl PPMX040S dargestellt. Dieser Sprühstrahl führt nur wenig Wasser mit sich. Schon bei einer Entfernung von 3 m ist das Löschergebnis nicht mehr befriedigend. Aus diesem Grund wurde auf den Löschversuch bei 6 m verzichtet. Die Bilder 4.10 bis 4.13 zeigen die Ergebnisse für die Sprühstrahlen PPPF030S, PPQF025S, SPCP115V und SPCP120S.

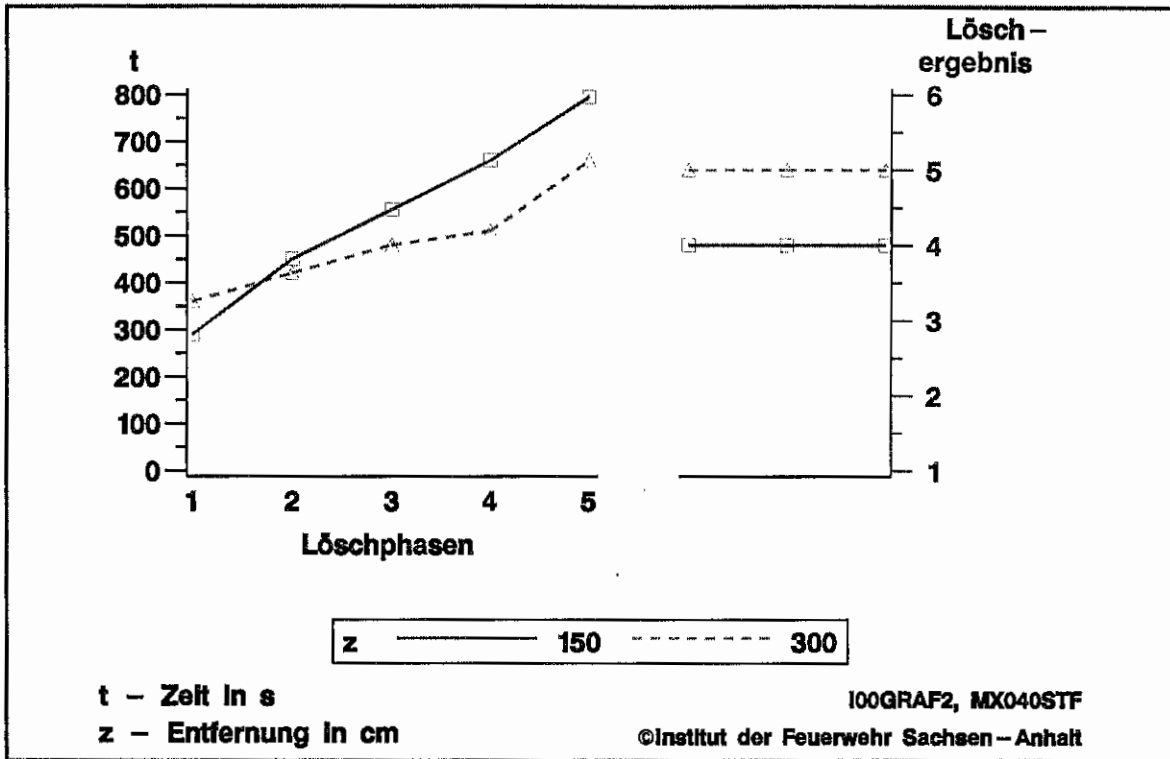


Bild 4.9: Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPMX040S bei rotierender Holzkrippe

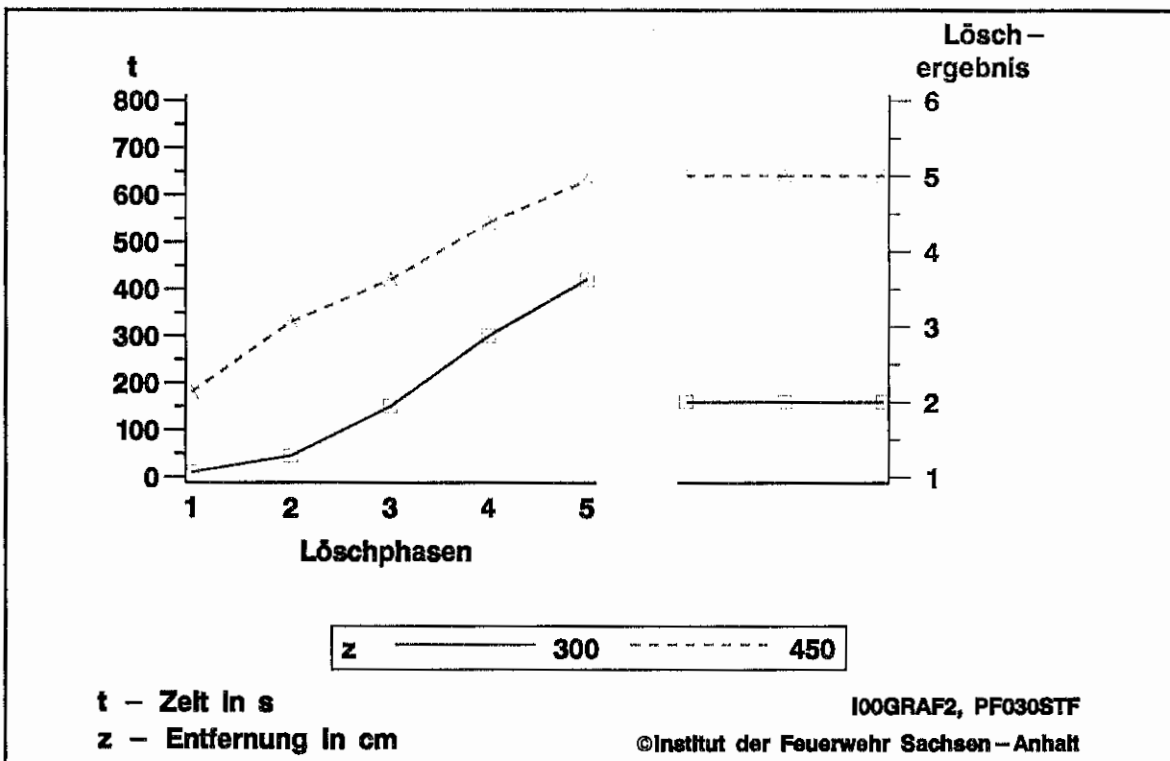


Bild 4.10: Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPPF030S bei rotierender Holzkrippe

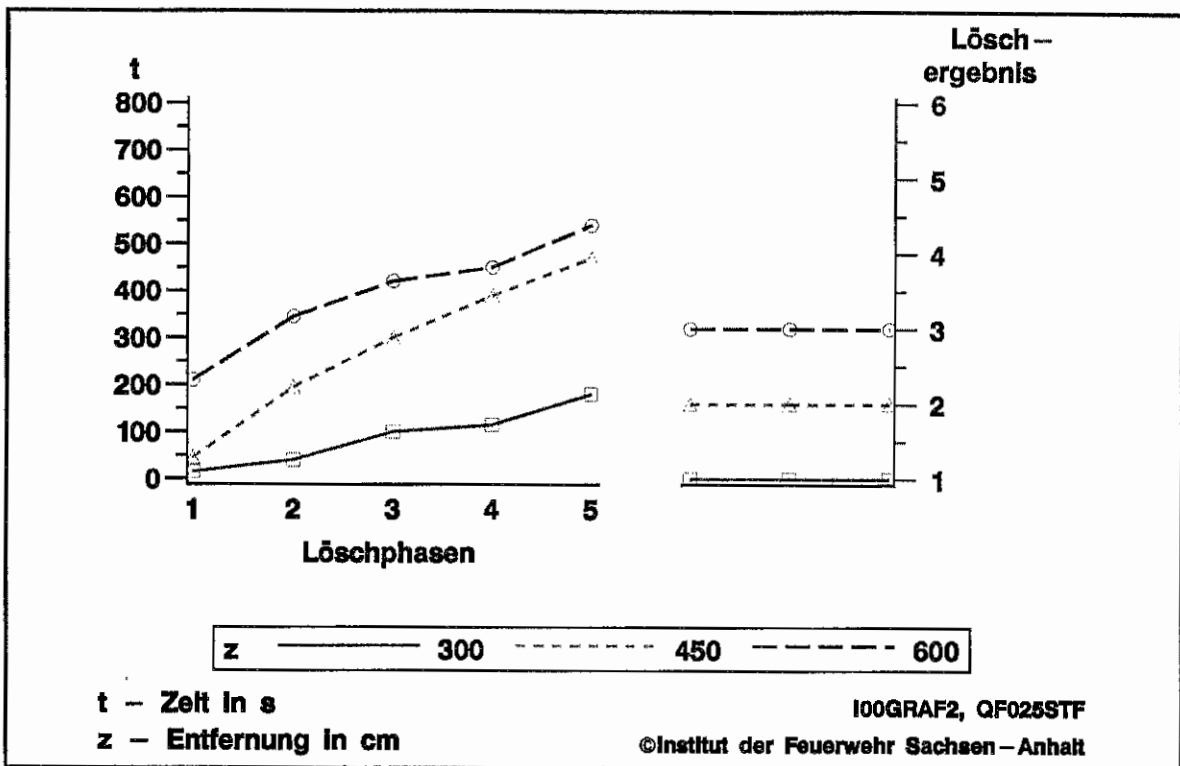


Bild 4.11: Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl PPQF025S bei rotierender Holzkrippe

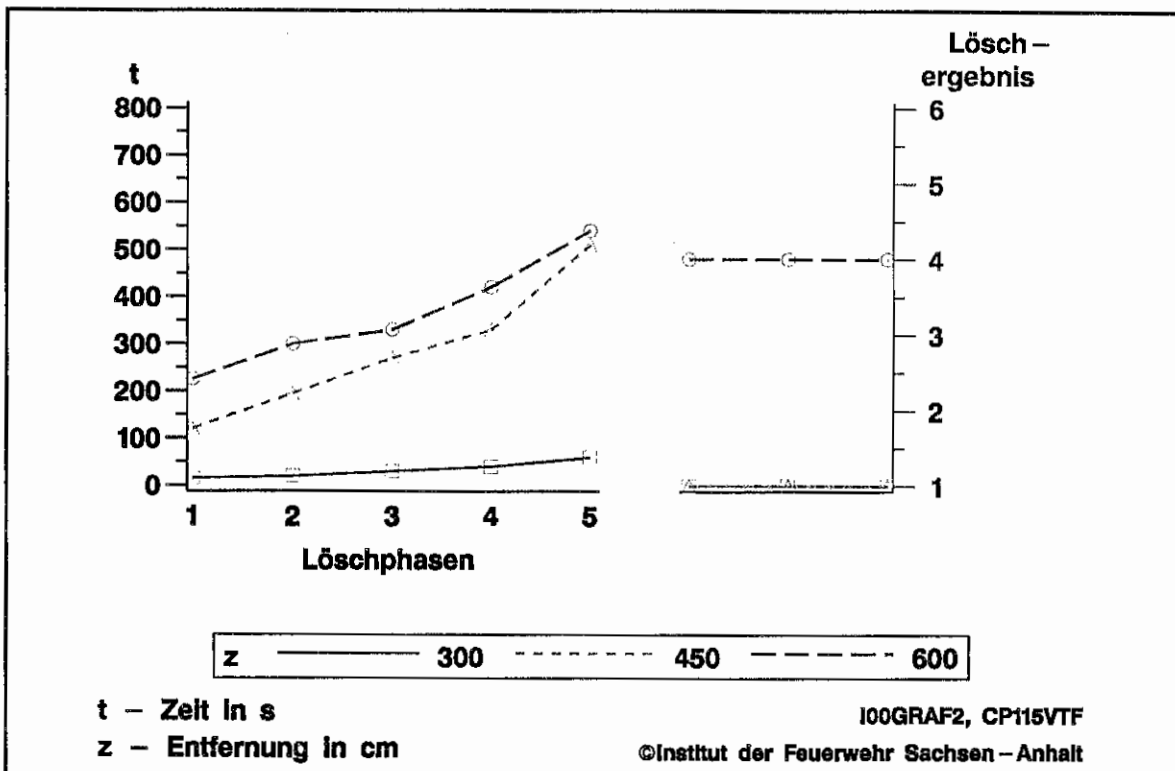


Bild 4.12: Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl SPCP115V bei rotierender Holzkrippe

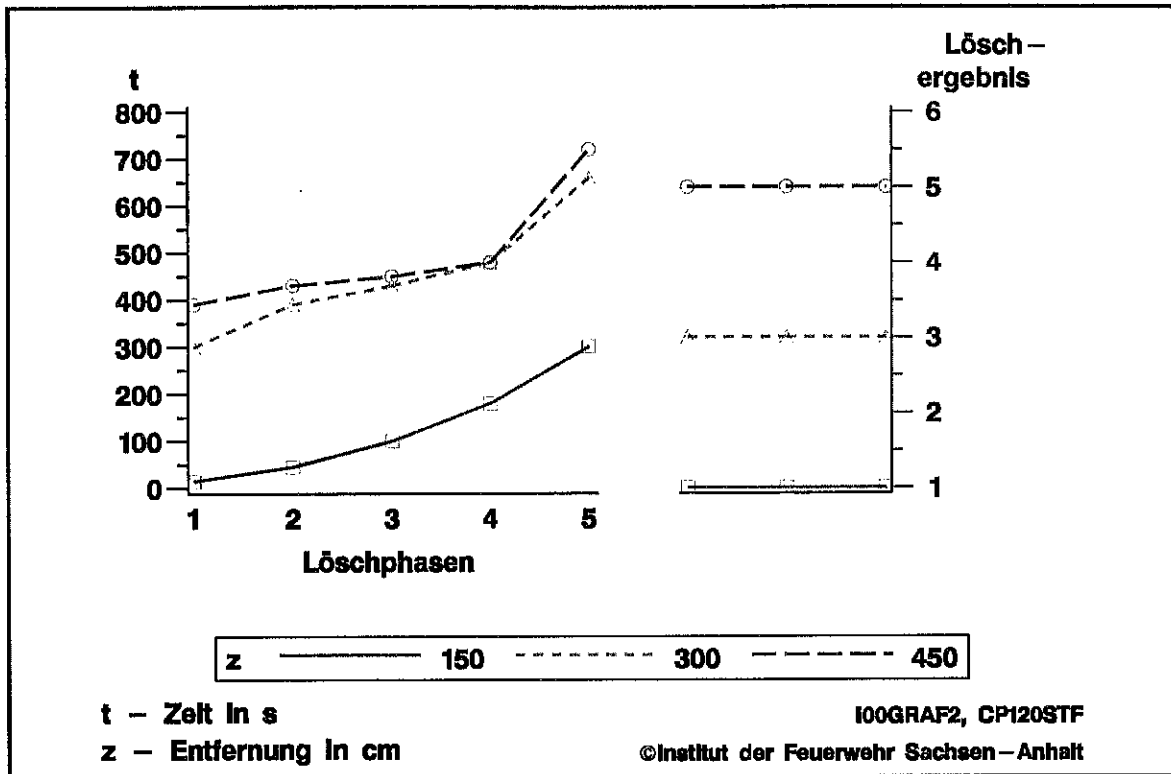


Bild 4.13: Löschphasen und Löschergebnis für den Sprühstrahl SPCP120S bei rotierender Holzkrippe

Betrachtet man die Bilder, so wird mit zunehmender Entfernung das Löschergebnis schlechter. Dies trifft auch für den Sprühstrahl PPMX040S zu. Die kürzere Zeit bis zum Erreichen der 5. Löschphase bei der Entfernung von 3 m ist dadurch zu erklären, dass der Brand im Zentrum der Krippe nur wenig beeinflusst wurde. Dies führte dazu, dass dieser Bereich nach kürzerer Zeit aus der Krippe herausbrach und die Glut in die zum Teil mit Wasser gefüllte Zündwanne fiel.

Im Bild 4.14 sind die Löschergebnisse für alle Sprühstrahlen und die verschiedenen Entfernungen zusammengestellt. Es wurde hier eine sogenannte Blasen-Grafik verwendet. Im Bild 4.14 entspricht eine größere Blase auch einem besseren Löschergebnis. Zusätzlich wurde über jede Blase der entsprechende Wert geschrieben. Die Sprühstrahlen sind mit steigendem Löschwasservolumenstrom (vgl. Tabelle 3.1) auf der Abszisse angeordnet.

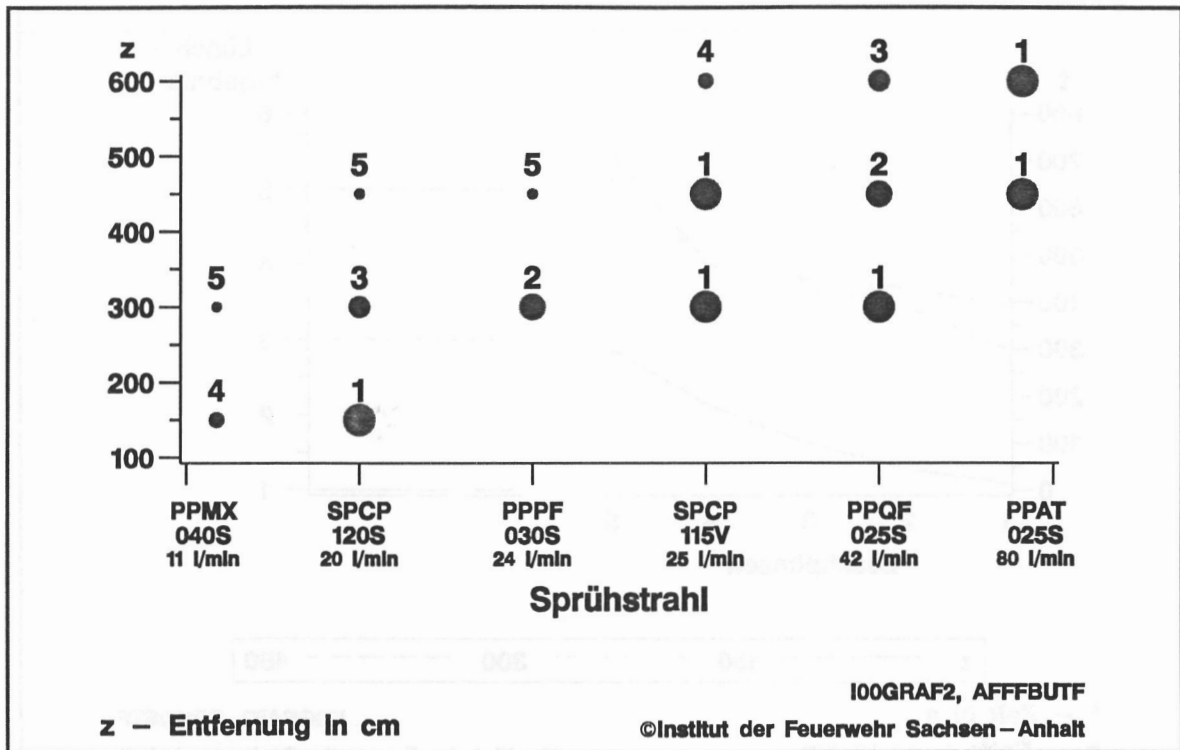


Bild 4.14: Löschergebnisse für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe

#### 4.1.1.4 Versuchsergebnisse bei stehender Holzkrippe

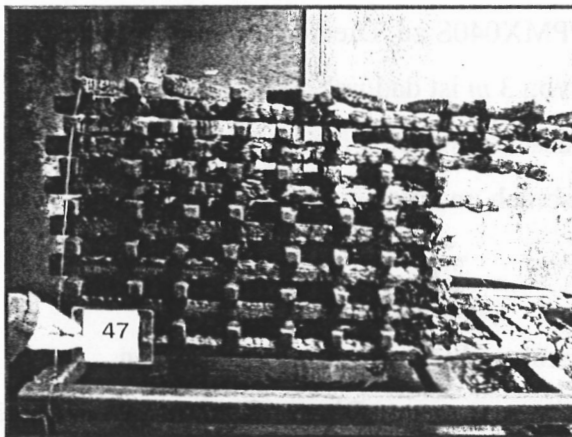


Bild 4.15: Holzkrippe nach Abschluss des Brandversuches BV47

Bei der Bewertung des Löschergebnisses für stehende Holzkrippen wurde eine andere Größe herangezogen. Bild 4.15 zeigt ein typisches Versuchsergebnis. Da das Brandobjekt nicht rotierte, brannte der hintere Teil der Krippe relativ gerade ab. Es wurde für jede Schicht die Zahl der nicht verbrannten Querhölzer bestimmt. Bei dem im Bild 4.15 zu sehenden Rest einer Holzkrippe 13A waren es im Schnitt 8 Querhölzer. Als Kriterium für die

Löschwirksamkeit eines Sprühstrahls wurde nun die mittlere Zahl der nicht verbrannten Querhölzer bzgl. aller 14 Schichten der Holzkrippe gewählt. Das auf diese Weise definierte Löschergebnis wird als Eindringtiefe *ET* bezeichnet. Diese Zahl wurde in den folgenden Bildern an Stelle des in Tabelle 4.2 eingeführten Löschergebnisses für die hin- und

herbewegten Holzkrippen verwendet. Die Bilder 4.16 bis 4.21 zeigen die Versuchsergebnisse für die verschiedenen Sprühstrahlen.

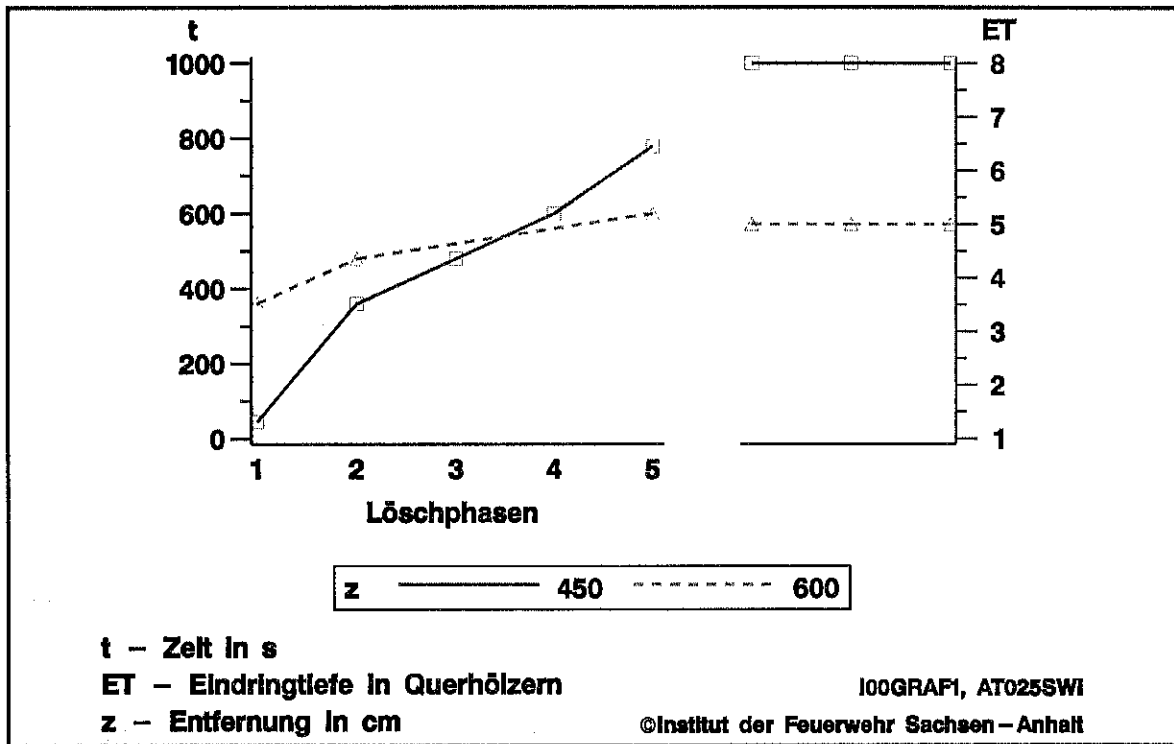


Bild 4.16: Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPAT025S bei stehender Holzkrippe

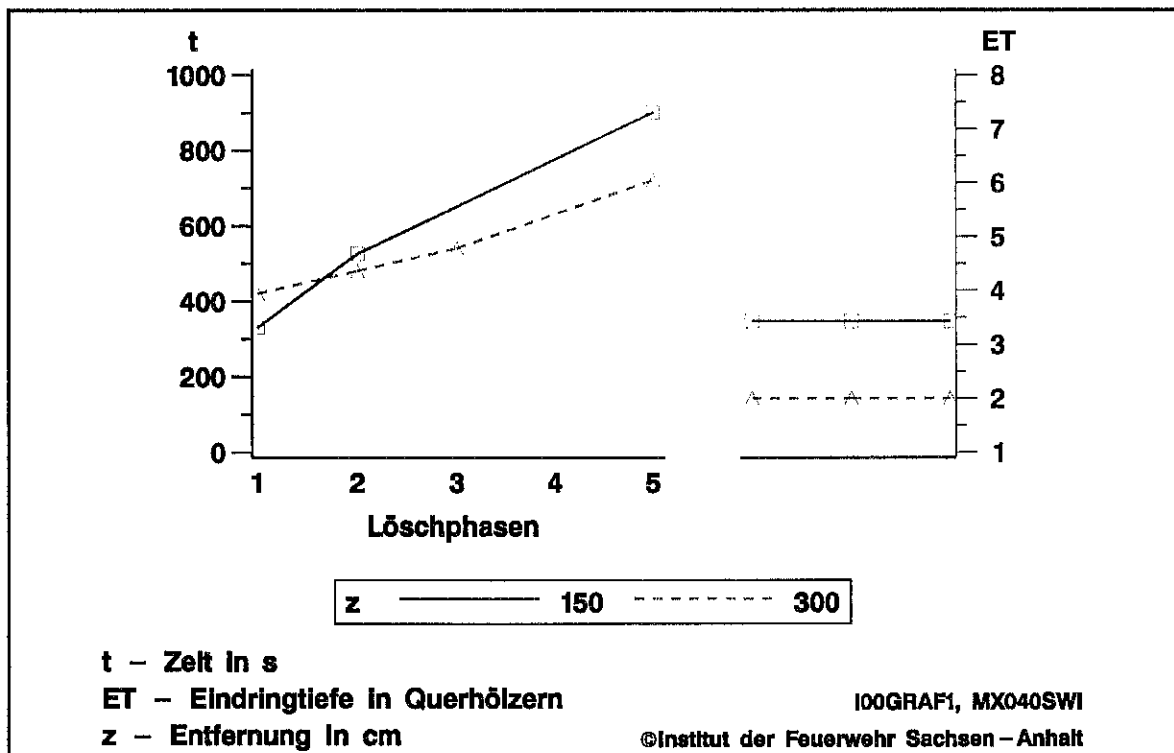


Bild 4.17: Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPMX040S bei stehender Holzkrippe

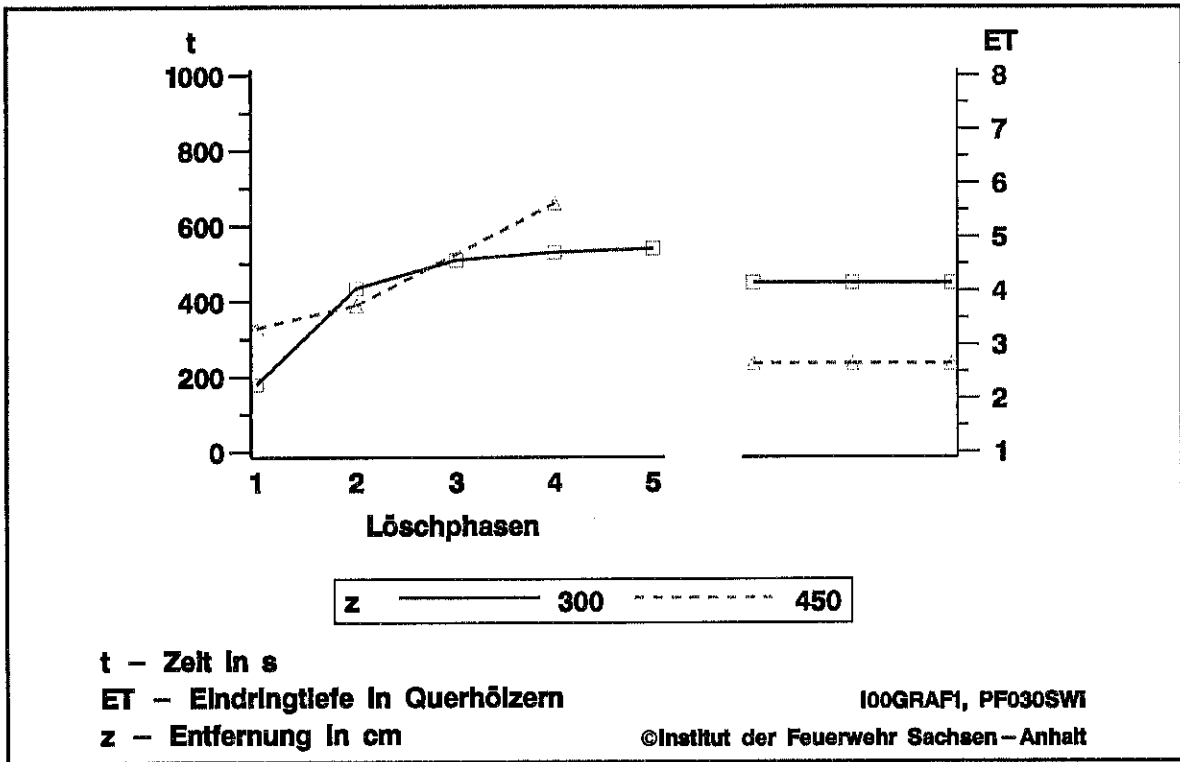


Bild 4.18: Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPPF030S bei stehender Holzkrippe

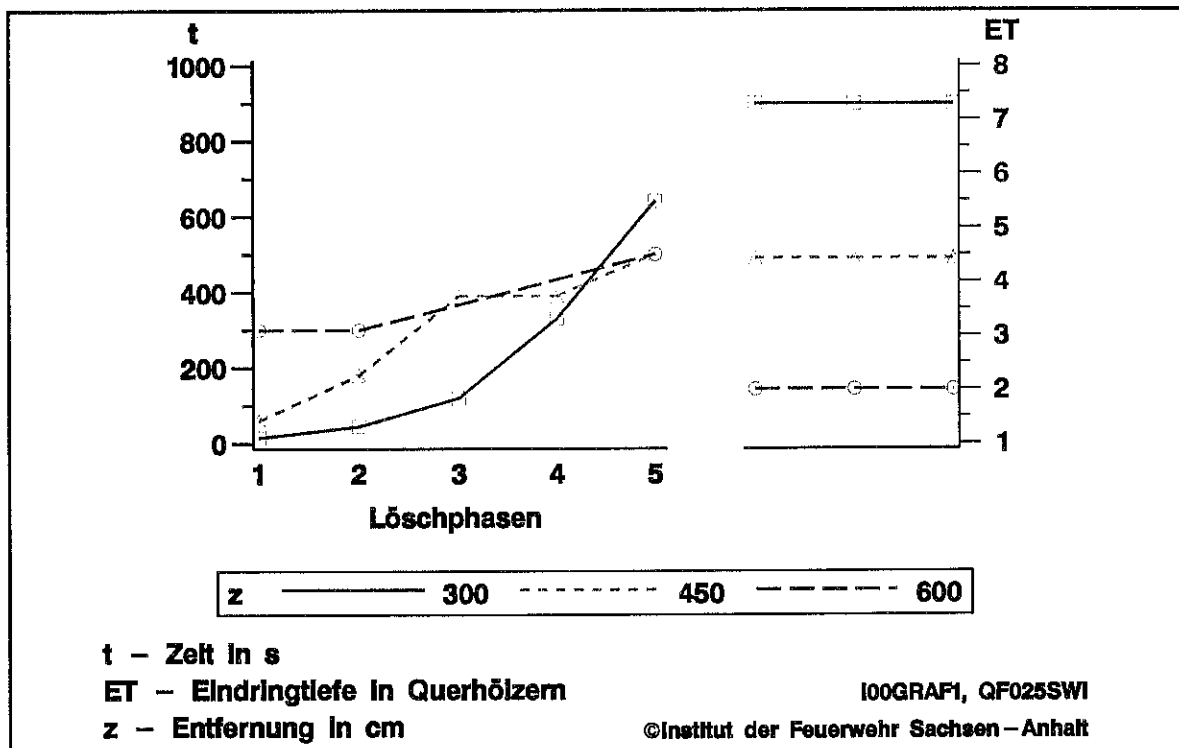


Bild 4.19: Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl PPQF025S bei stehender Holzkrippe

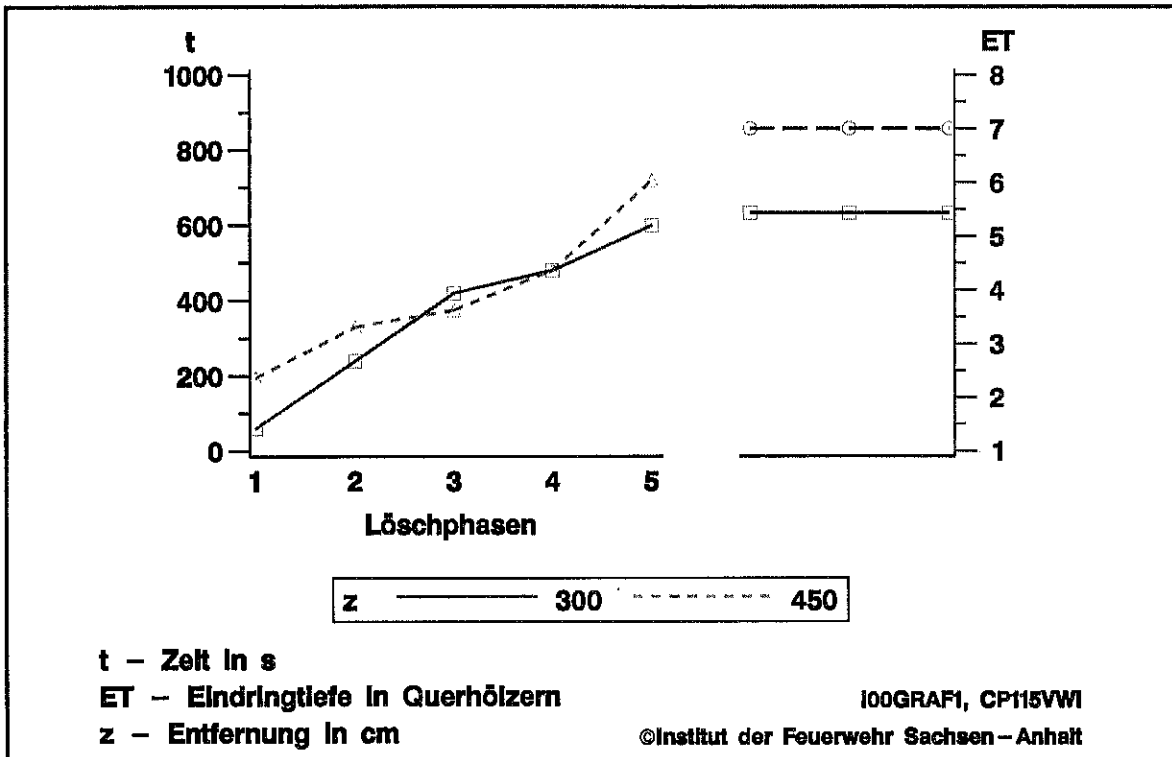


Bild 4.20: Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl SPCP115V bei stehender Holzkruppe

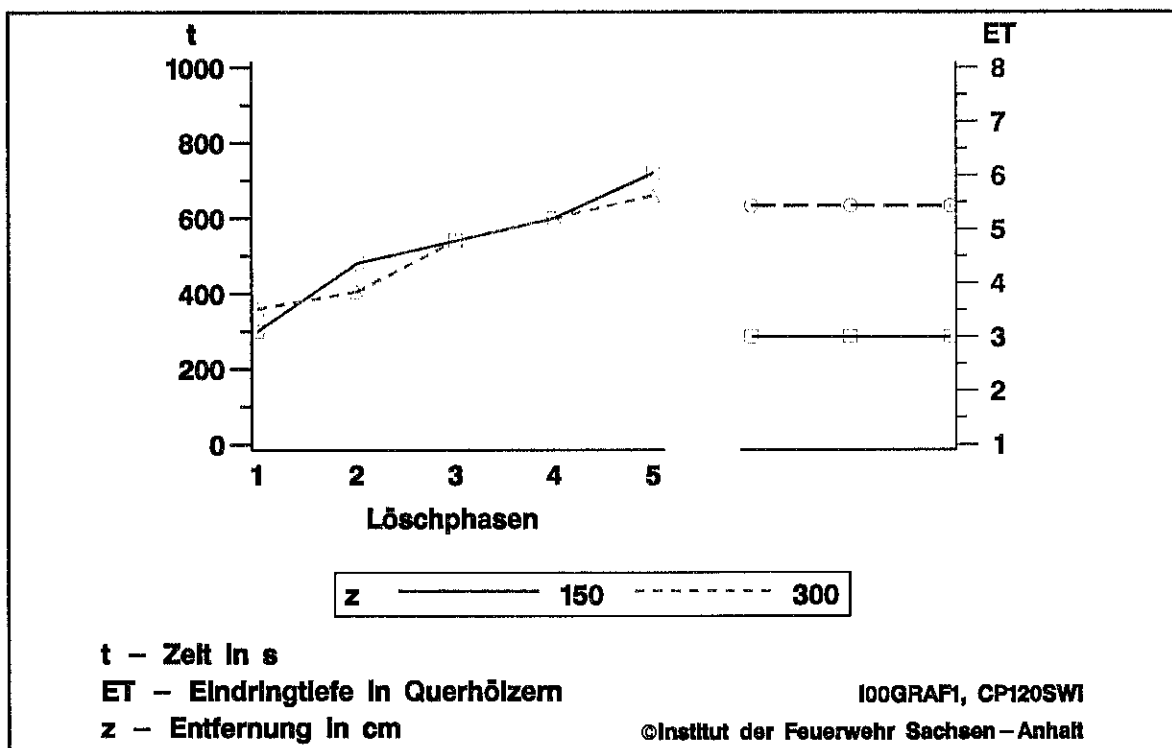
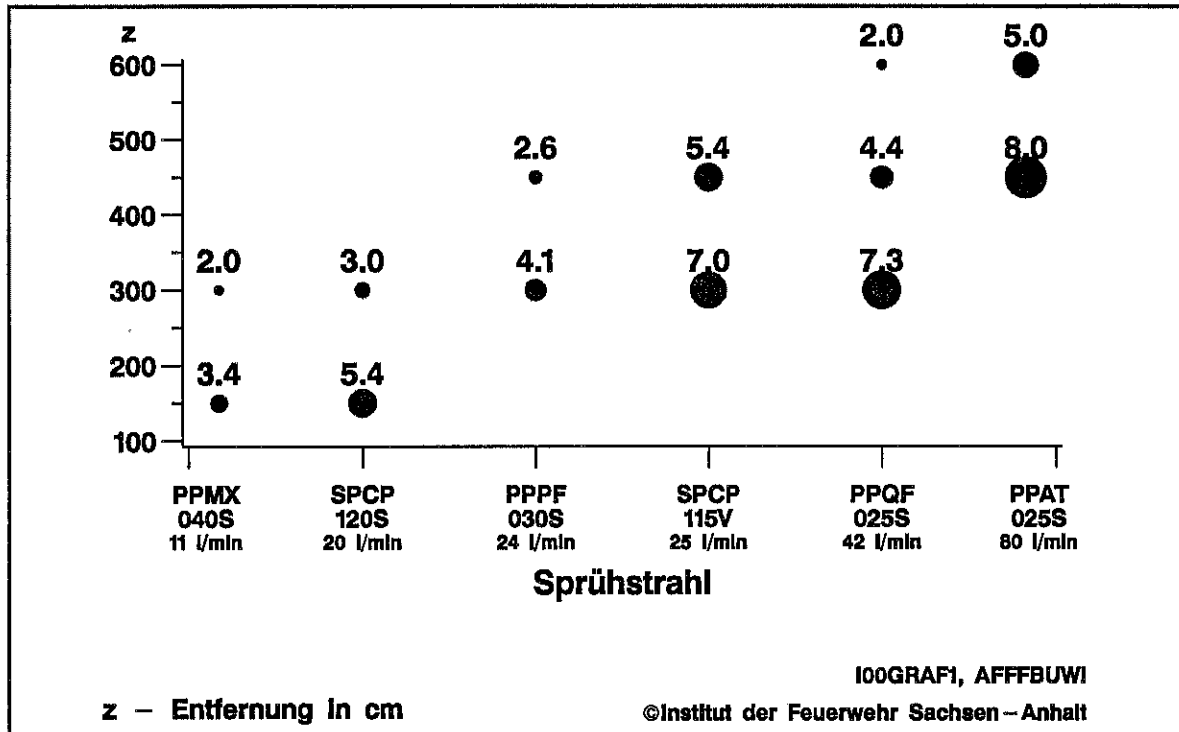


Bild 4.21: Löschphasen und Eindringtiefe für den Sprühstrahl SPCP120S bei stehender Holzkruppe



Die langen Zeiten bis zum Erreichen der Löschphase 5 (keine Glut mehr sichtbar) auch bei den größeren Sprühstrahlen sind darin begründet, dass der hintere Teil der Holzkrippe im Sprühschatten liegt. Bild 4.22 zeigt die Blasen-Grafik für alle Versuche. Das Koordinatensystem wurde wie im Bild 4.14 gewählt. Größere Blasen entsprechen auch einer größeren Eindringtiefe.



**Bild 4.22:** Eindringtiefen für die Löschversuche bei stehender Holzkrippe

#### 4.1.2 Polypropylenbrandversuche

Bei den Brandversuchen mit Polypropylengranulat wurden zwei verschiedene Brandwannen verwendet. Die erste Wanne ist quadratisch mit einer Fläche von  $1 \text{ m}^2$ , die im Folgenden mit 1Q abgekürzt wird. Die Seitenhöhe der Wanne beträgt  $100 \text{ mm}$ . Das zweite Brandobjekt ist die Brandwanne 34B nach [DIN EN 3, Teil 1]. Die Wanne hat die Grundfläche von  $1.07 \text{ m}^2$ , was einem Innendurchmesser von ca.  $1200 \text{ mm}$  entspricht, und eine Randhöhe von  $150 \text{ mm}$ . Bei den Löschversuchen wurden über der Wannenn mitte 3 Thermoelemente angebracht und die Temperaturverläufe aufgezeichnet. Sie dienen zum Feststellen des Beginns der Zündung und der Löschmaßnahmen. Es wird an dieser Stelle auf deren Auswertung verzichtet.



**Bild 4.23:** Polypropylenbrandversuch mit der Wanne 34B

Der Versuchsaufbau ist analog zu dem der Holzkrippenbrandversuche (s. Bilder A2 und 4.1). Auf das Gestell für die Krippen wurde die verwendete Brandwanne gestellt. Durch diese Versuchsanordnung wurde erreicht, dass die Sprühstrahlen die Wannen nahezu horizontal anströmen.

Gezündet wurde das Polypropylengranulat mit einem Gasbrenner. Bild 4.23 zeigt das Zünden des Brandobjektes. Bis zum Schmelzen der Brandoberfläche und der

vollständigen Brandentwicklung vergingen mehrere Minuten. War der Brand voll entwickelt, so wurde nach weiteren 2 *min* mit dem Löschen begonnen.

In Analogie zu den Krippenbrandversuchen wurden 3 Löschphasen betrachtet, die in der Tabelle 4.3 genannt sind.

**Tabelle 4.3:** Beschreibung der 3 charakteristischen Löschphasen bei Polypropylenbränden

| Löschphase | Verbale Beschreibung  |
|------------|---|
| 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 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. |
| 2          | Das Polypropylen brennt nur noch an dem Teil des Randes der Brandwanne, der aufgrund der fast horizontalen Strömung des Sprühstrahls einen Sprühschatten bildet.  |
| 3          | Das Feuer ist vollständig abgelöscht. Dieser Zeitpunkt lässt sich anhand der Videoaufzeichnungen sehr genau bestimmen und ist vom Betrachter unabhängig.  |

Eine Bewertung der Brandobjekte bei den Polypropylenbrandversuchen erübrigt sich, da die Oberfläche des brennenden flüssigen Polypropylens erstarrt und sich über die ganze Brandwanne erstreckt.

Die Bilder 4.24 bis 4.29 stellen die Löschphasen bei den Polypropylenbrandversuchen für die quadratische Brandwanne 1Q und die runde 34B dar. Jeder Linienart ist genau eine Entfernung und eine Brandwanne zugeordnet, die in den Legenden bezeichnet sind.

Berücksichtigt man, dass bei beiden Brandwannen die Grundflächen nahezu gleich groß sind und sie sich nur in der Form und um 50 mm in der Randhöhe unterscheiden, so sind die zum Teil erheblichen Unterschiede in den Löschzeiten bei gleichem Sprühstrahl und gleicher Entfernung doch beachtlich. Einige zusammenfassende Bemerkungen folgen im Anschluss an die sechs Bilder.

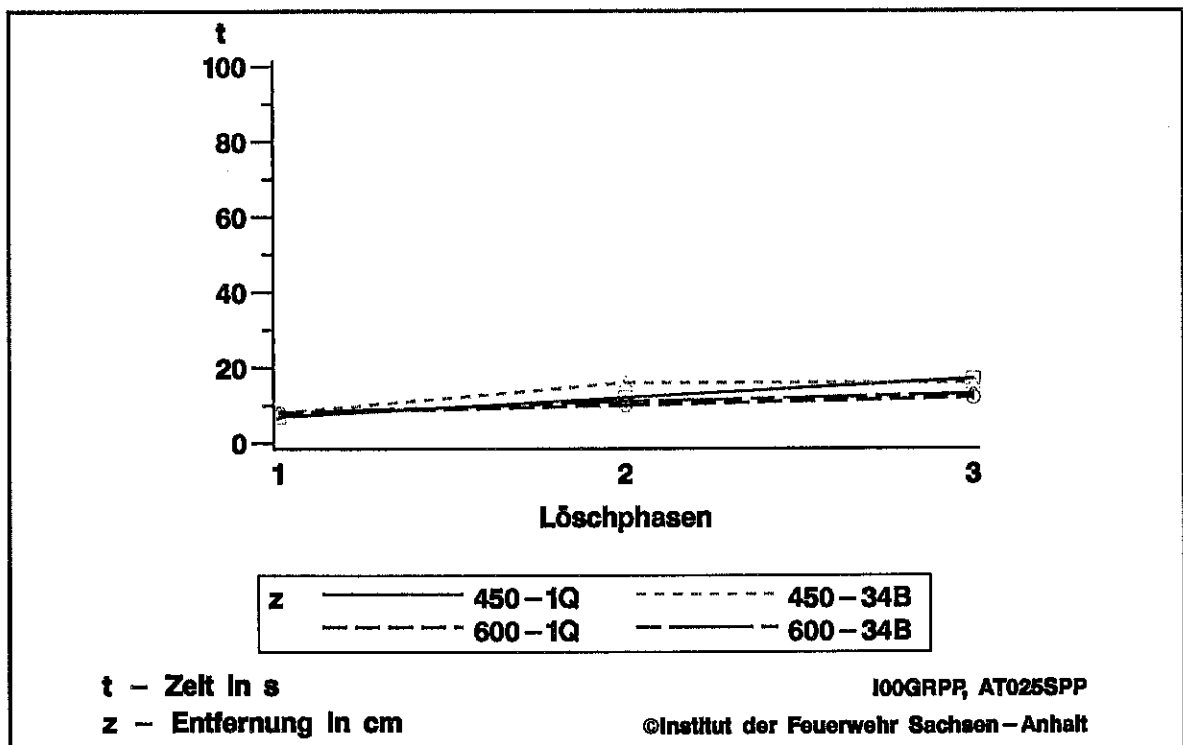


Bild 4.24: Löschphasen für den Sprühstrahl PPAT025S bei Polypropylenbränden

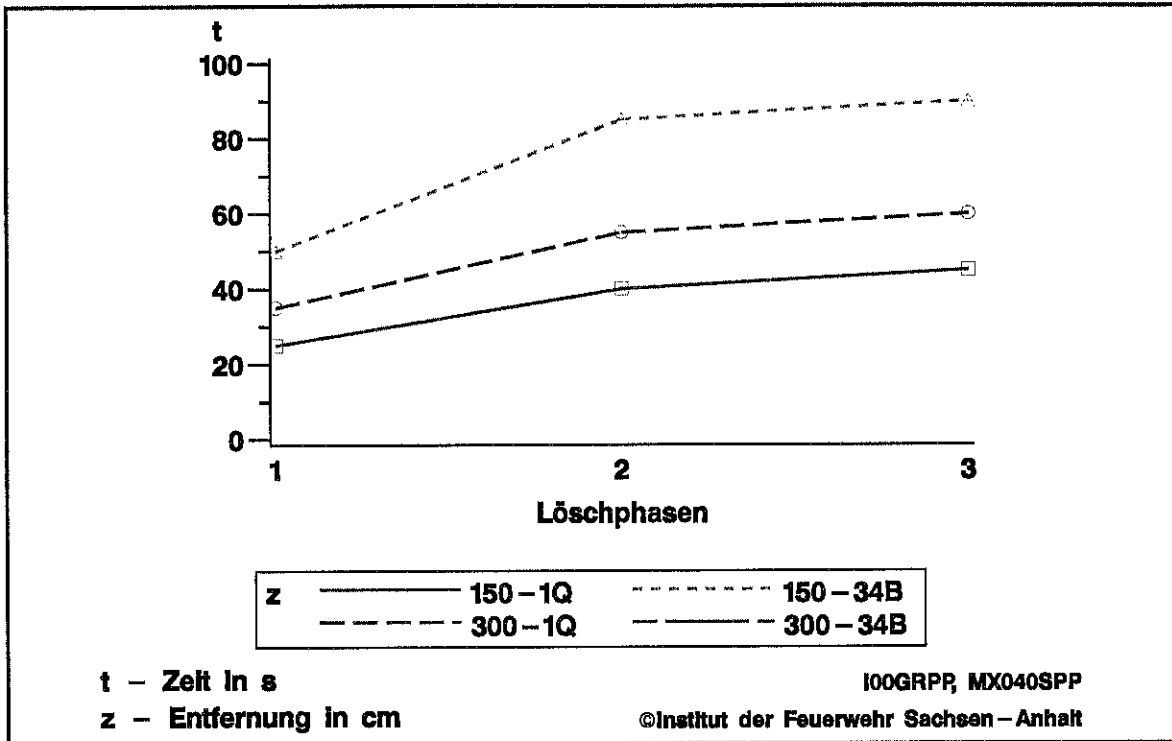


Bild 4.25: Löschphasen für den Sprühstrahl PPMX040S bei Polypropylenbränden

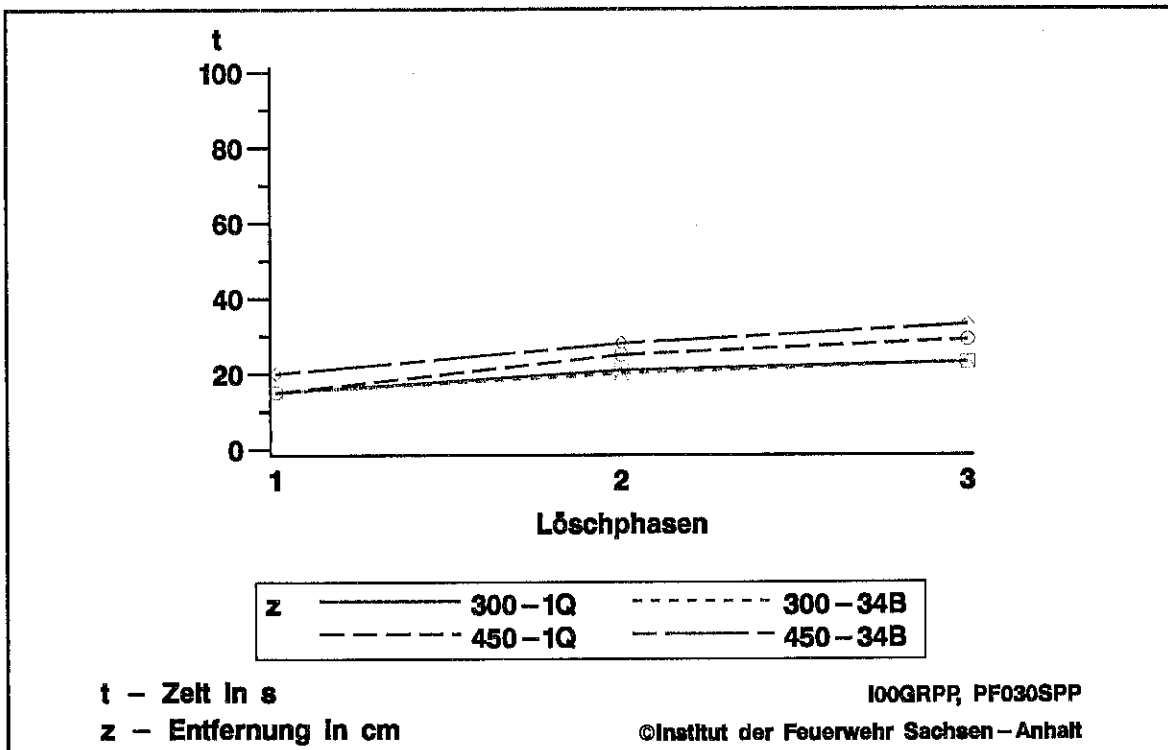


Bild 4.26: Löschphasen für den Sprühstrahl PPPF030S bei Polypropylenbränden

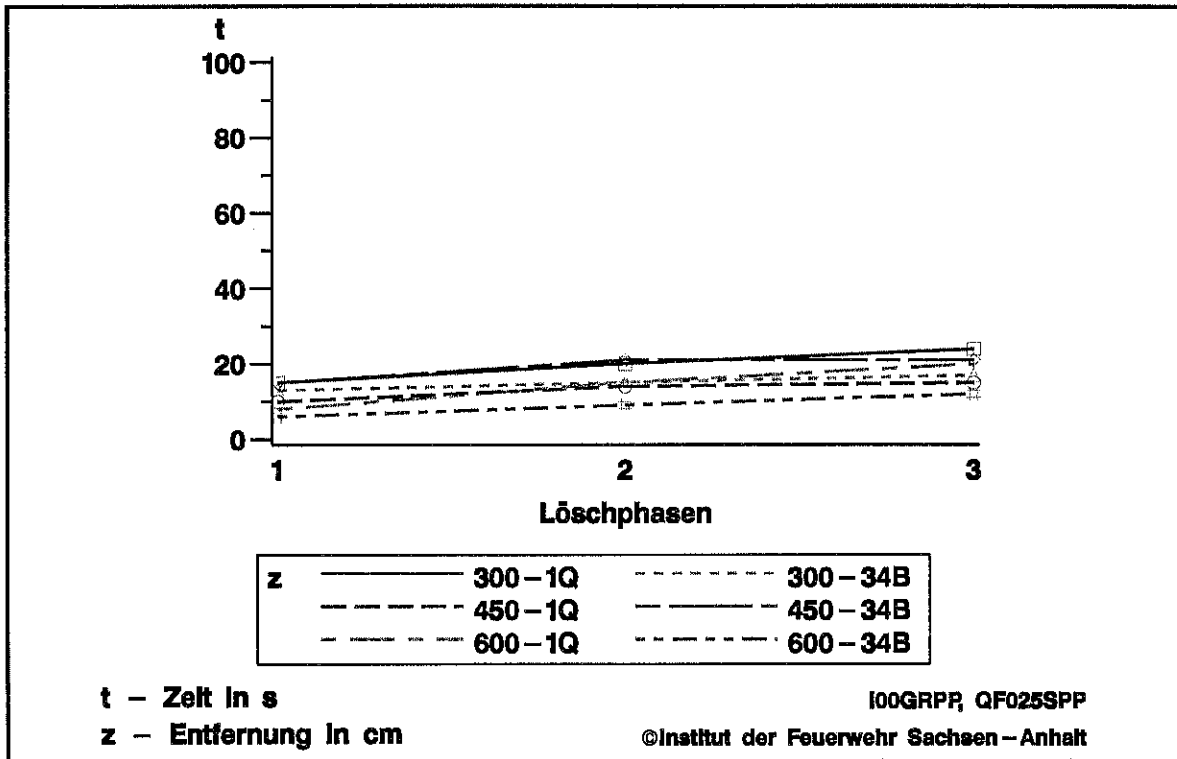


Bild 4.27: Löschphasen für den Sprühstrahl PPQF025S bei Polypropylenbränden

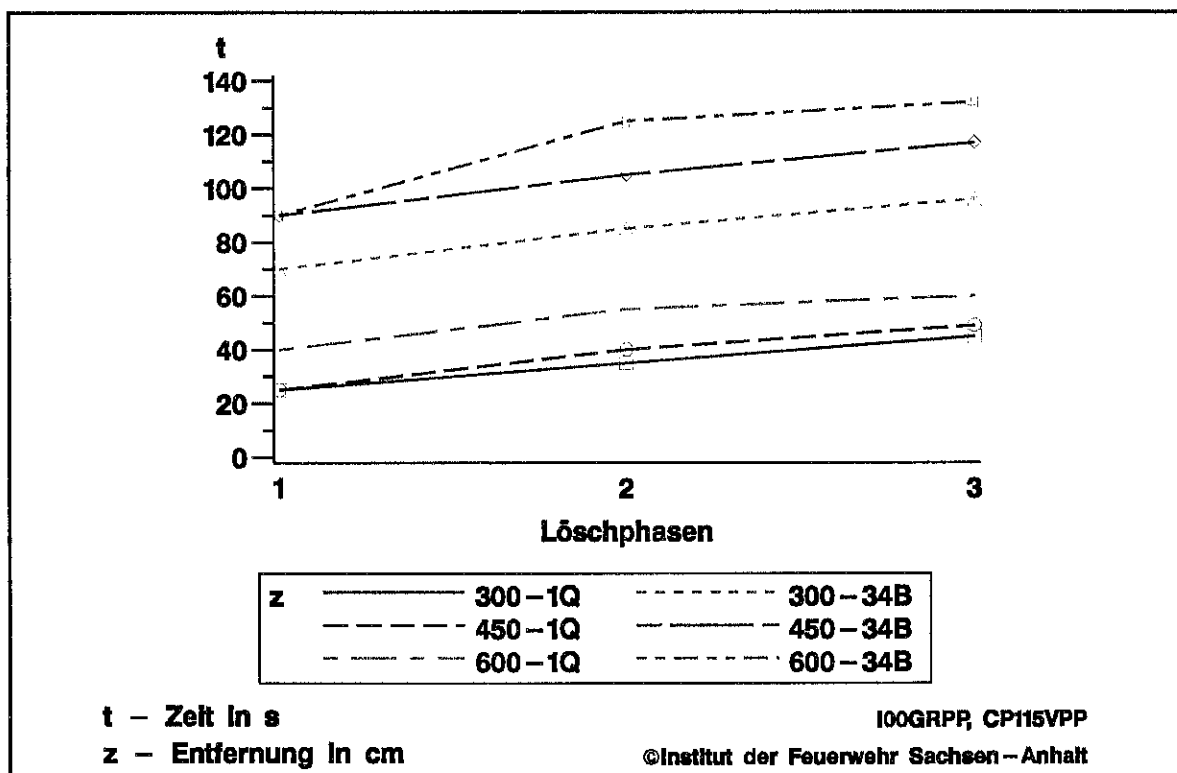


Bild 4.28: Löschphasen für den Sprühstrahl SPCP115V bei Polypropylenbränden

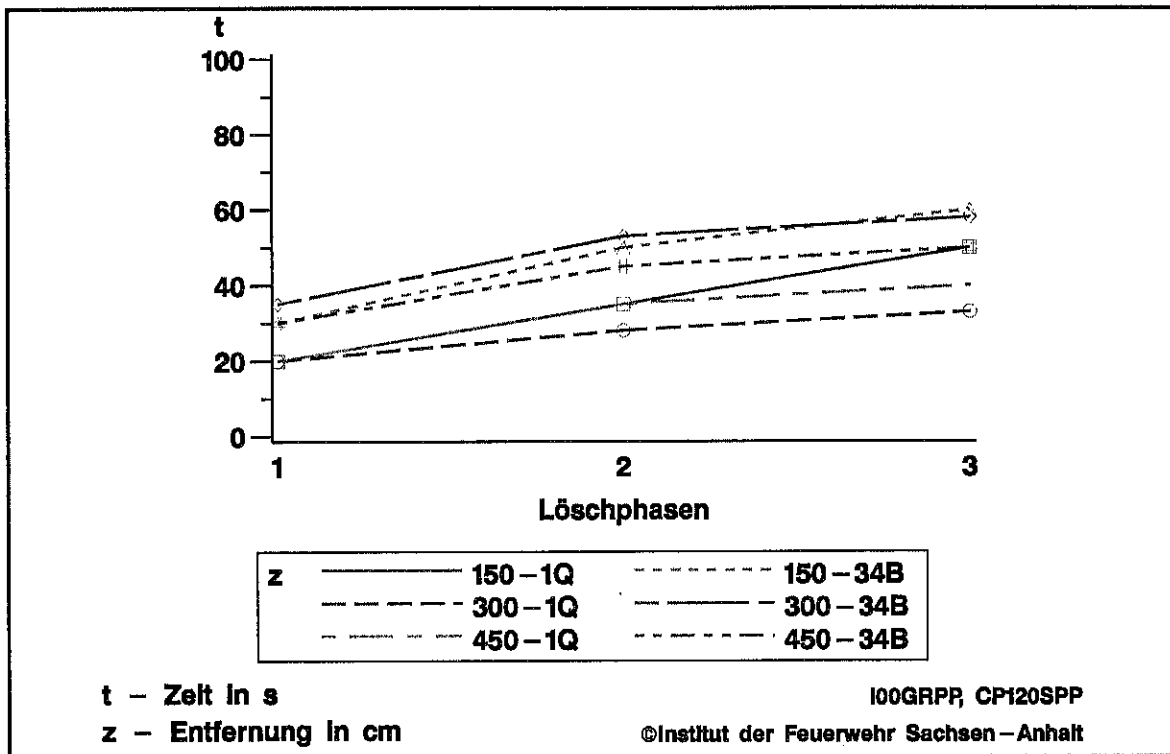


Bild 4.29: Löschphasen für den Sprühstrahl SPCP120S bei Polypropylenbränden

Für die Polypropylenbrandversuche kann festgehalten werden:

- ◆ Im Bild 4.25 fehlt für den Sprühstrahl PPMX040S (11 l/min) die Darstellung für das Brandobjekt 34B bei der Entfernung von 300 cm. Der Versuch wurde nach mehreren Minuten abgebrochen, weil keine Löschwirkung zu erkennen war.
- ◆ Bei den Sprühstrahlen PPAT025S (80 l/min) und PPQF025S (42 l/min) sind alle Löscheziten sehr kurz. Es kann hier nicht von signifikanten Unterschieden zwischen den Löscheziten für die beiden Brandobjekte gesprochen werden.
- ◆ Bei den Sprühstrahlen PPMX040S (11 l/min), SPCP115V (25 l/min) und SPCP120S (20 l/min) sind die Löscheziten für die runde Wanne um zum Teil ein Vielfaches schlechter.
- ◆ Obwohl der Volumenstrom beim Sprühstrahl PPPF030S (24 l/min) in gleicher Größenordnung wie bei SPCP115V und SPCP120S liegt, sind die Unterschiede bei PPPF025S nicht signifikant.

Weitere Schlussfolgerungen sind dem folgenden Abschnitt zu entnehmen.

#### **4.1.3 Schlussfolgerungen aus den Brandversuchen**

Zum Löschen der betrachteten Brandobjekte wurden Sprühstrahlen mit einem Gesamtvolumenstrom von 11 *l/min* bis maximal 80 *l/min* verwendet.

- ◆ Es hat sich bestätigt, dass mit zunehmender Entfernung vom Brandobjekt das Löschergebnis sich wesentlich verschlechtert. Schon bei Entfernungen von 300 *cm* oder 450 *cm* ist die Verwendung einiger Sprühstrahlen (vgl. Bilder 4.14 und 4.22) nicht mehr geeignet.
- ◆ Schon geringe Abweichungen in der Lage des Brandobjektes können das Löschergebnis ganz wesentlich beeinflussen. Bei den Polypropylenbrandversuchen bewirkten ein um 50 *mm* höherer Wannenrand und die Änderung der Form der Grundfläche (Quadrat zu Kreis) eine erhebliche Veränderung des Löschergebnisses.
- ◆ Der Gesamtvolumenstrom ist als alleiniges Kriterium zur Bewertung der Löschwirkung nicht geeignet.

Aus diesem Grund wurden weitere Versuche und Messungen durchgeführt, um den Sprühstrahl zu charakterisieren, die in den nächsten Abschnitten für jeden Sprühstrahl dargestellt werden. Zusammenfassende Auswertungen erfolgen im Kapitel 5.

#### **4.2 Sprühversuche auf dem AFF**

Zu jedem Brandversuch wurde ein korrespondierender Sprühversuch durchgeführt. Dabei wurde der AFF mit gleichen Betriebsparametern betrieben und auch die Einstellung der Sprühstrahlen nicht verändert. Über einen Zeitraum von mehreren Minuten wurde das auf das Brandobjekt auftreffende Wasser aufgefangen. Bei den Holzkrippen ist das die Löschwassermenge, die sich in der Wanne 34B unter dem Brandobjekt (vgl. Bild 4.1) ansammelte. Es wurden die Holzkrippe und die Brandwanne vor und nach dem Sprühversuch gewogen. Die Massendifferenz entspricht nach Normierung dem aufgefangenen

Löschwassermassenstrom. Da die Dichte des Wassers nahe bei Eins liegt, stimmt dieser Wert mit dem wirksamen Löschwasservolumenstrom hinreichend gut überein.

Die Ergebnisse werden auch hier in einer Blasengrafik dargestellt, die analog zu Bild 4.14 aufgebaut ist. Über den Blasen ist der ermittelte wirksame Löschwasservolumenstrom in *l/min* eingetragen. Der Gesamtvolumenstrom ist für jeden Sprühstrahl noch einmal unter der Sprühstrahlbezeichnung angegeben. Für die bewegten Holzrippen nimmt mit Ausnahme des Sprühstrahls PPQF025S bei allen Sprühstrahlen mit zunehmender Entfernung der aufgefangene Volumenstrom ab. Der Sprühstrahl PPQF025S ist sehr unsymmetrisch. Darüber hinaus hat man beim Betrachten schon den Eindruck, dass die Massenstromdichte im Sprühstrahl stark schwankt. Er bleibt in seiner Struktur auch während des Versuches nicht konstant.

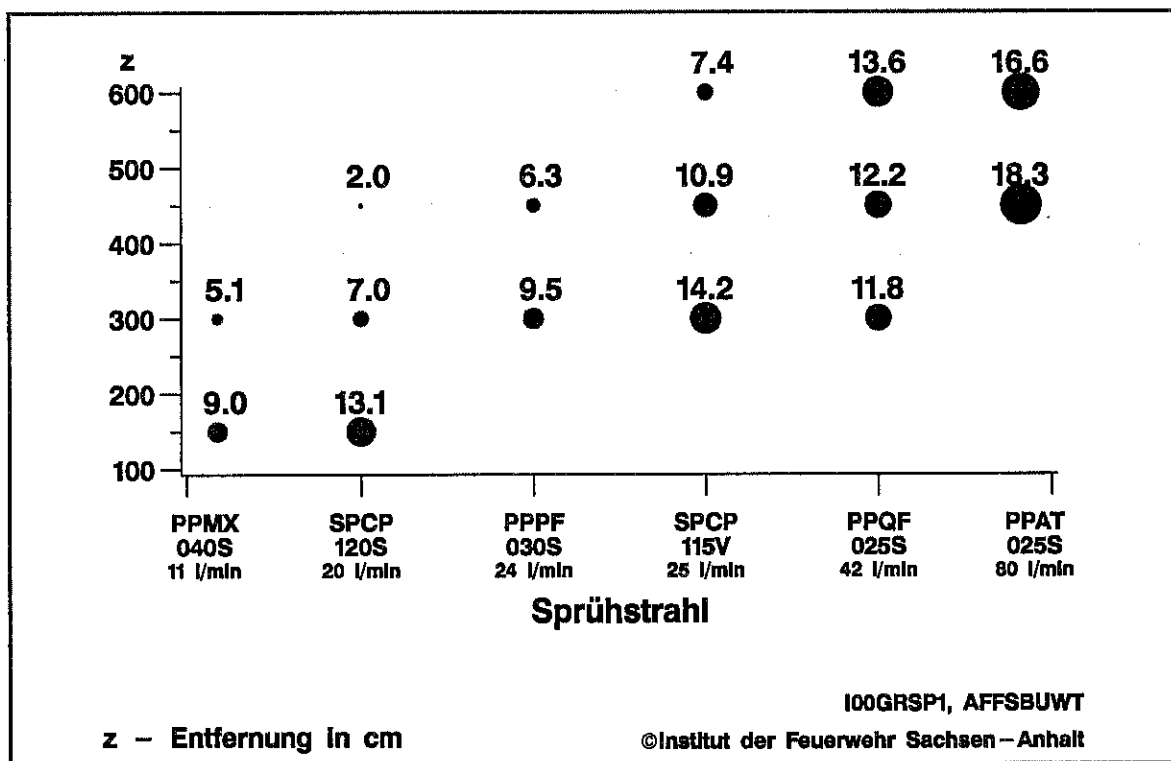


Bild 4.30: Sprühversuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe 8A

Die Ergebnisse bei den feststehenden Krippen sind in der Grafik 4.31 abgebildet.



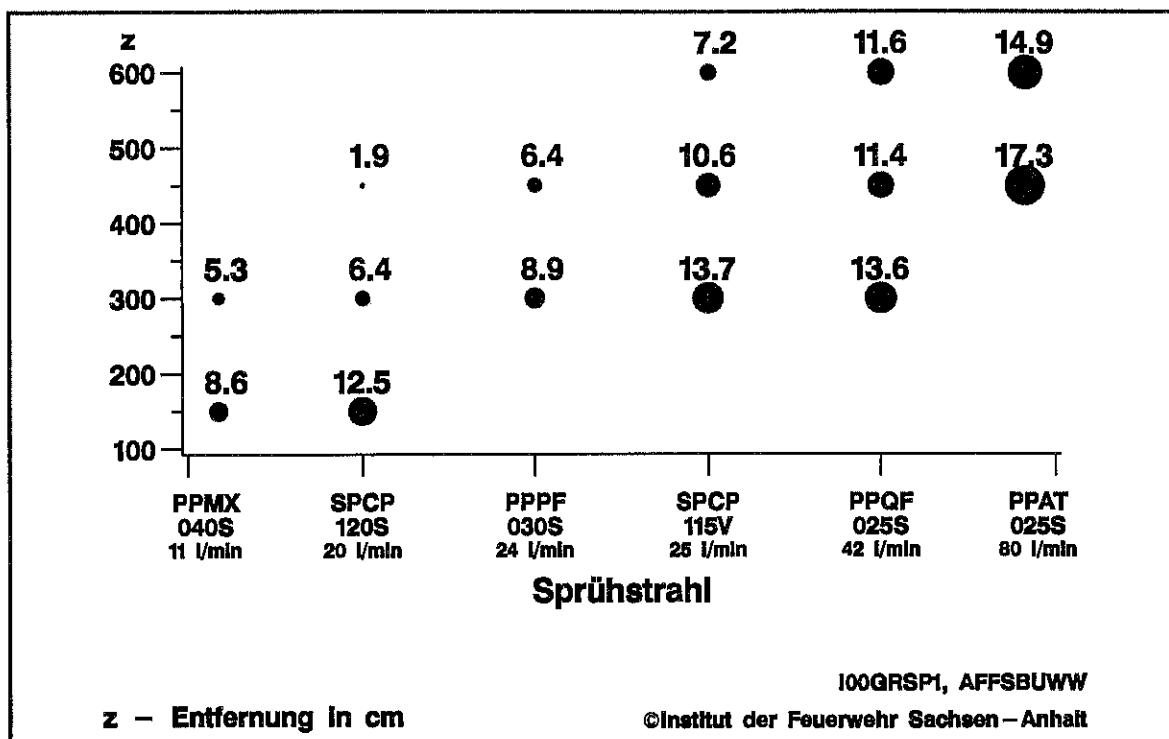


Bild 4.31: Sprühversuche bei feststehender Holzkrippe 8A

Bei den Polypropylenbrandobjekten wurde das in den Brandwannen 34B und 1Q aufgefangene Löschwasser ermittelt. Die Ergebnisse zeigen die Bilder 4.32 und 4.33.

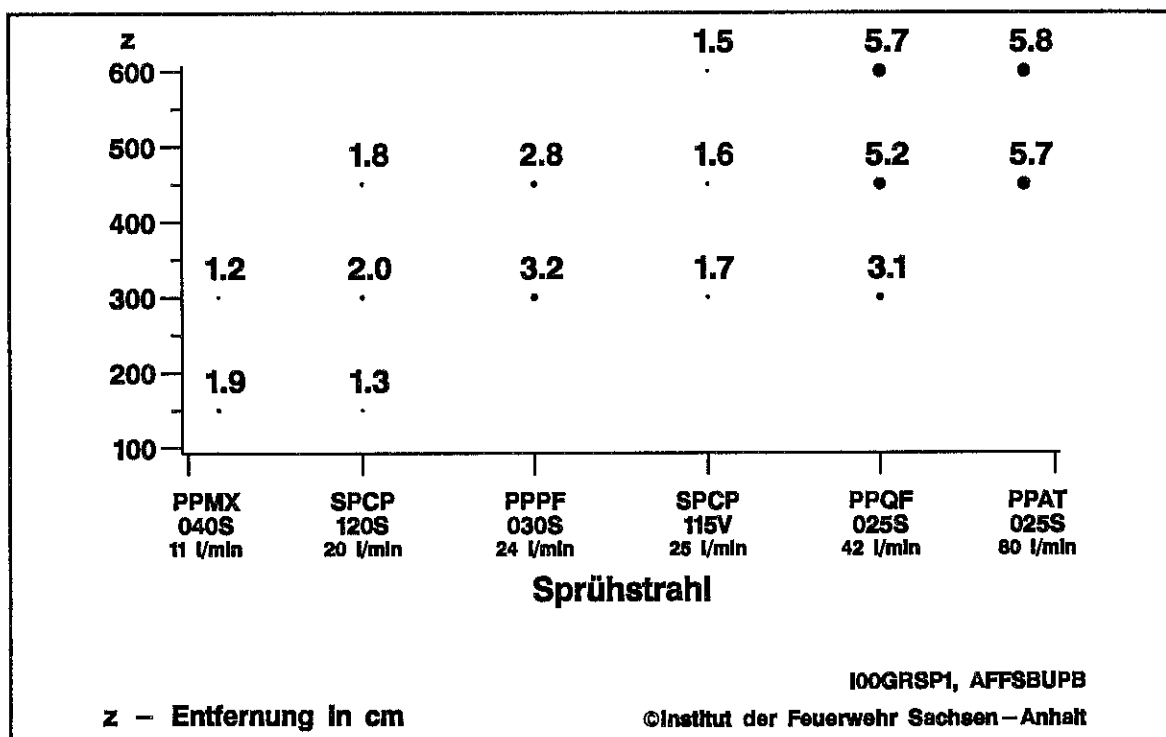


Bild 4.32: Sprühversuche für das Polypropylenbrandobjekt mit der Brandwanne 34B

Zunächst fällt auf, dass mit zunehmender Entfernung im Vergleich zu den Holzkrippen die aufgefangene Wassermenge prozentual nicht so stark abnimmt. Sie bleibt nahezu konstant oder steigt in einigen Fällen sogar an. Da der Sprühstrahl die Brandwannen fast horizontal anströmt, trifft nur ein kleiner Teil direkt in die Wannen.

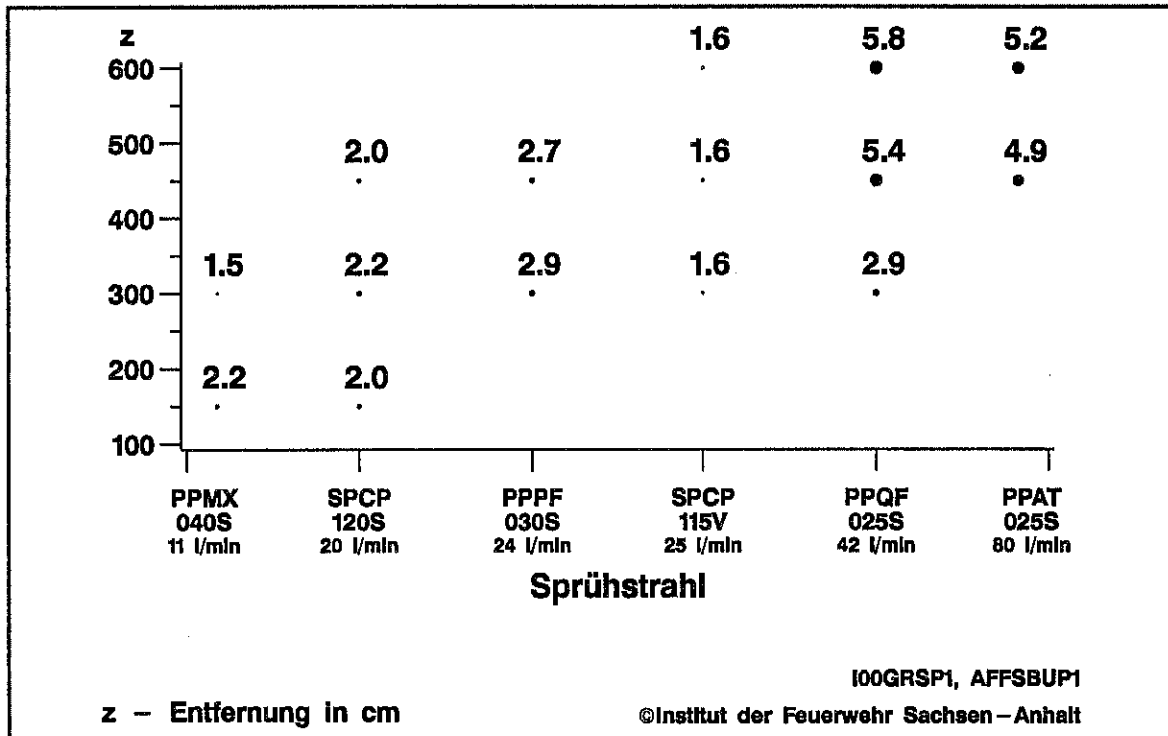


Bild 4.33: Sprühversuche für das Polypropylenbrandobjekt mit der Brandwanne 1Q

### 4.3 PDA-Messungen im Nasslabor

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu den Messungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten dargestellt, die mit einem Phasen-Doppler-Anemometer im Nasslabor des IdF LSA durchgeführt wurden. Der Versuchsstand und das Messprinzip sind im Anhang C kurz dargestellt.

Bei den Tropfendurchmessern werden je nach Untersuchungsziel verschiedene Schätzungen verwendet. Eine allgemeine Schätzfunktion ist im Anhang E mit der Formel (E4.6) gegeben. In der Tabelle E4.1 sind verschiedene Schätzungen mit einem Hinweis auf die Anwendungsmöglichkeiten zusammengestellt. Da es im Rahmen dieses Forschungsberichtes auf den Vergleich der verschiedenen Sprühstrahlen ankommt, wird für die folgenden Betrachtungen die Tropfendurchmesserschätzung  $D_{10}$ , d. h. der Längendurchmesser,

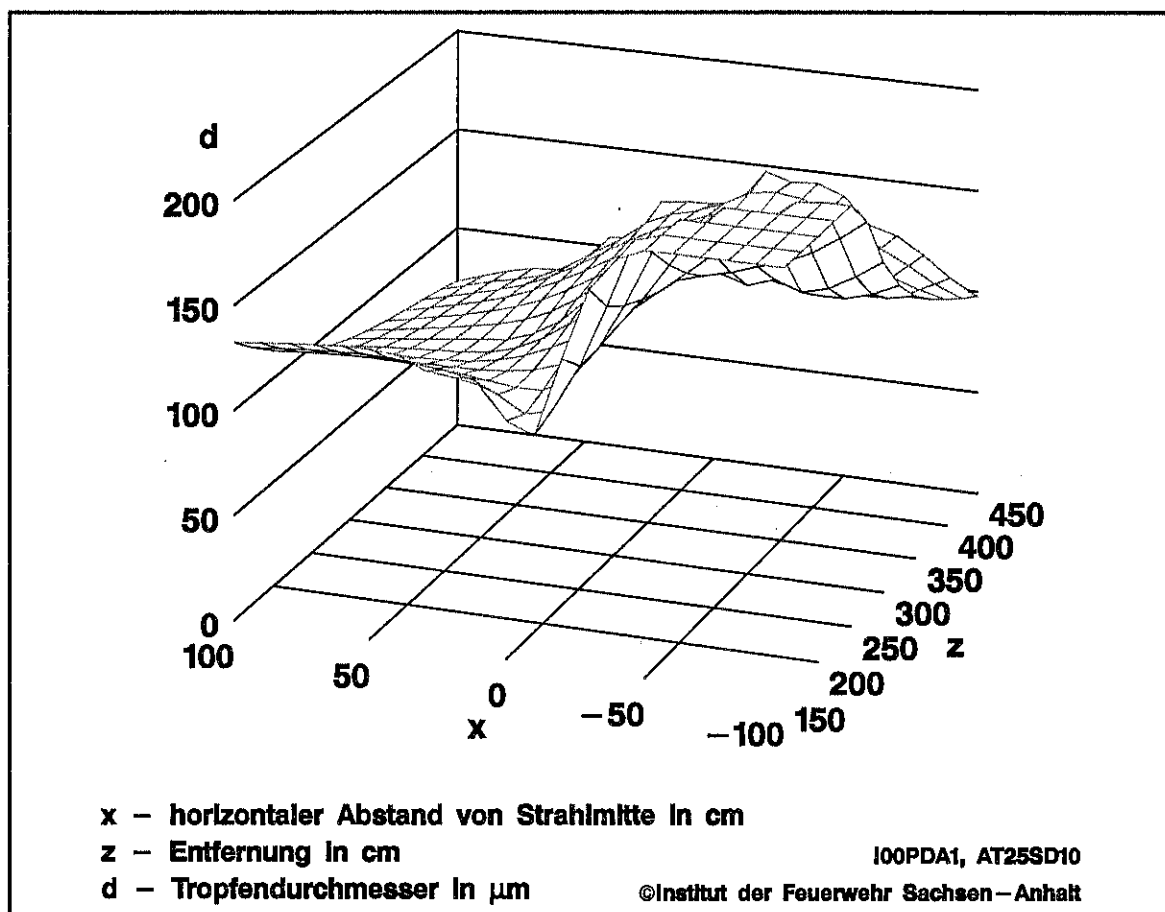
verwendet. Da andere Schätzungen hier nicht betrachtet werden, wird als Symbol für die Durchmesserwerte nur kurz  $d$  verwendet. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass insbesondere der Sauter-Durchmesser  $D_{32}$  und der Volumendurchmesser  $D_{30}$  ebenfalls sehr häufig verwendet werden. Im Anhang E ist begründet, dass sich diese Werte erheblich voneinander unterscheiden können. Ferner wurden die Messwerte einer „probe volume correction“ unterzogen (vgl. Abschnitt C2.2 des Anhangs C). Beim Vergleich mit anderen veröffentlichten Ergebnissen muss vorher unbedingt geklärt werden, welche Messverfahren und welche Schätzungen bei der Messwertauswertung verwendet wurden.

Die Messungen erfolgten in verschiedenen Messebenen. Wie im Anhang C, Abschnitt C3.2, beschrieben, steht die Messebene senkrecht auf der durch die Strahlrohrmitte verlaufenden Sprühstrahlachse. Der Abstand von der Strahlrohrmündung ist die  $z$ -Koordinate. Die Messungen erfolgten bei allen Sprühstrahlen in drei verschiedenen Messebenen, und zwar für die Entfernungen  $z=150\text{ cm}$ ,  $z=300\text{ cm}$  und  $z=450\text{ cm}$ . Die Punkte der Messebene werden durch die horizontale  $x$ -Koordinate und durch die vertikale  $y$ -Koordinate beschrieben. Der Ursprung wurde so gewählt, dass die Mitte der Strahlrohrmündung die Koordinate  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  hat. In den Messebenen selbst wurde entlang der  $x$ -Achse gemessen, d. h. für  $y = 0$ . In Abhängigkeit von der Sprühstrahlbreite in der betrachteten Messebene wurden die Messpunkte in  $5\text{ cm}$  oder  $10\text{ cm}$  Abstand gewählt. Dabei wurde soweit an den Rand des Sprühstrahls gegangen, solange ein notwendiges Tropfenaufkommen vorhanden war. Bei den Sprühstrahlen lag die maximale Breite bei ca.  $2\text{ m}$ .

Auf Grund der Gravitation fielen einige Sprühstrahlen bei größeren Entfernungen deutlich nach unten ab. Die horizontale Messachse wurde dann tiefer gewählt, so dass sie durch die Sprühstrahlmitte verlief. Die Messpunkte liegen somit alle auf einer Fläche, die durch die Sprühstrahlmitte verläuft, wobei sie in  $z$ -Richtung etwas nach unten gekrümmt ist. Bei der Auswertung wurde die  $y$ -Koordinate nicht explizit berücksichtigt.

Am Beispiel des Sprühstrahls PPAT025S werden vier verschiedene grafische Darstellungen eingeführt und erläutert. Im Bild 4.34 wurde eine 3D-Grafik gewählt. Die Grundfläche ist die  $(x, z)$ -Ebene.  $z$  nimmt Werte von  $150\text{ cm}$  bis  $450\text{ cm}$  an. Auf der  $x$ -Achse wurden entsprechend der maximalen Sprühstrahlbreite Werte von  $-100\text{ cm}$  bis  $+100\text{ cm}$  zugelassen ( $x = 0$  ist die Sprühstrahlmitte!). Auf der senkrechten Achse sind die gemessenen

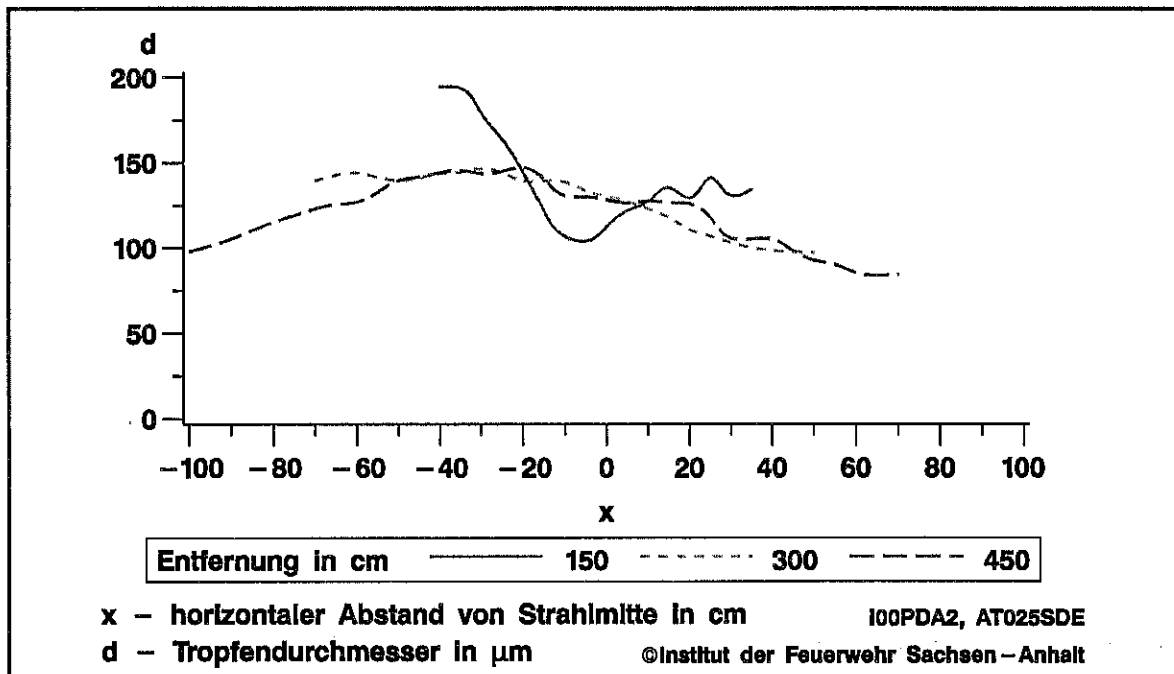
Tropfendurchmesser abgetragen. Um die Messwerte besser grafisch darzustellen, wurde mittels SPLINE-Interpolation eine Fläche berechnet, die nahe bei den mittleren Tropfendurchmessern liegt, die für die Messpunkte ermittelten wurden. Das Ergebnis ist für den Sprühstrahl PPAT025S die im Bild dargestellte gekrümmte Fläche. Für völlig monodisperse Sprühstrahlen würde sich im Grenzfall eine zur  $(x, z)$ -Ebene parallele Ebene ergeben. Der Sprühstrahl PPAT025S hat ein vergleichsweise breites Tropfenspektrum, ist also polydispers.



**Bild 4.34:** Mittlere Tropfendurchmesser entlang der horizontalen Fläche beim Sprühstrahl PPAT025S

Eine andere Darstellung zeigt Bild 4.35. Im Bild sind für jede Entfernung  $z$  die mittleren Tropfendurchmesser abgetragen. Die Interpolation zwischen den Messwerten erfolgte hier nur zwischen der kleinsten und größten  $x$ -Koordinate der jeweiligen Messebene. Rechts und links dieser Werte war das Tropfenaufkommen so gering, dass keine PDA-Messung mehr erfolgte. Die Breite der Kurven vermittelt somit gleichzeitig eine Abschätzung der Sprühstrahlbreite der entsprechenden Messebene. Die Legende im Bild ordnet jedem

Linientyp die Entfernung  $z$  zu. Bei der Entfernung  $z = 150 \text{ cm}$  werden für negative  $x$ -Werte zunehmend größere Tropfen gemessen. Da bei den anderen zwei Messebenen diese Unterschiede nicht mehr so ausgeprägt sind, deutet es darauf hin, dass der Zerfall noch nicht abgeschlossen ist.



**Bild 4.35:** Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPAT025S

Im vorliegenden Fall wird deutlich, dass die Randbereiche der 3D-Grafik nicht überbewertet werden dürfen. Da im Bild 4.34 über den ganzen  $(x, z)$ -Bereich interpoliert wird, führt aufgrund des starken Anstiegs des mittleren Durchmessers für negative  $x$  bei  $z = 150 \text{ cm}$  die Extrapolation für  $x < -40 \text{ cm}$  zu zu großen Werten. Deutlich wird das im Bild daran, dass die vordere Ecke der sonst gekrümmten Fläche ( $x = -100 \text{ cm}$ ,  $z = 150 \text{ cm}$ ) eben ist. Die extrapolierten Durchmesserwerte liegen also über  $200 \mu\text{m}$ . Im Folgenden wird sich auf den zweiten Grafiktyp beschränkt.

Die analogen Grafiken werden zur Darstellung der mittleren Geschwindigkeiten gewählt. Bild 4.37 zeigt die 3D-Darstellung und Bild 4.38 die drei Kurven für die Messebenen.

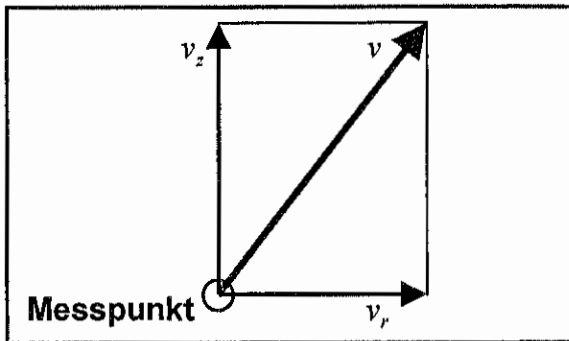


Bild 4.36: Geschwindigkeitskomponenten im Sprühstrahl

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass mit dem verwendeten PDA nur die Geschwindigkeitskomponente  $v_z$  in  $z$ -Richtung gemessen wird. Im äußeren Bereich des Sprühstrahls gewinnt die radiale Komponente  $v_r$  an Bedeutung.

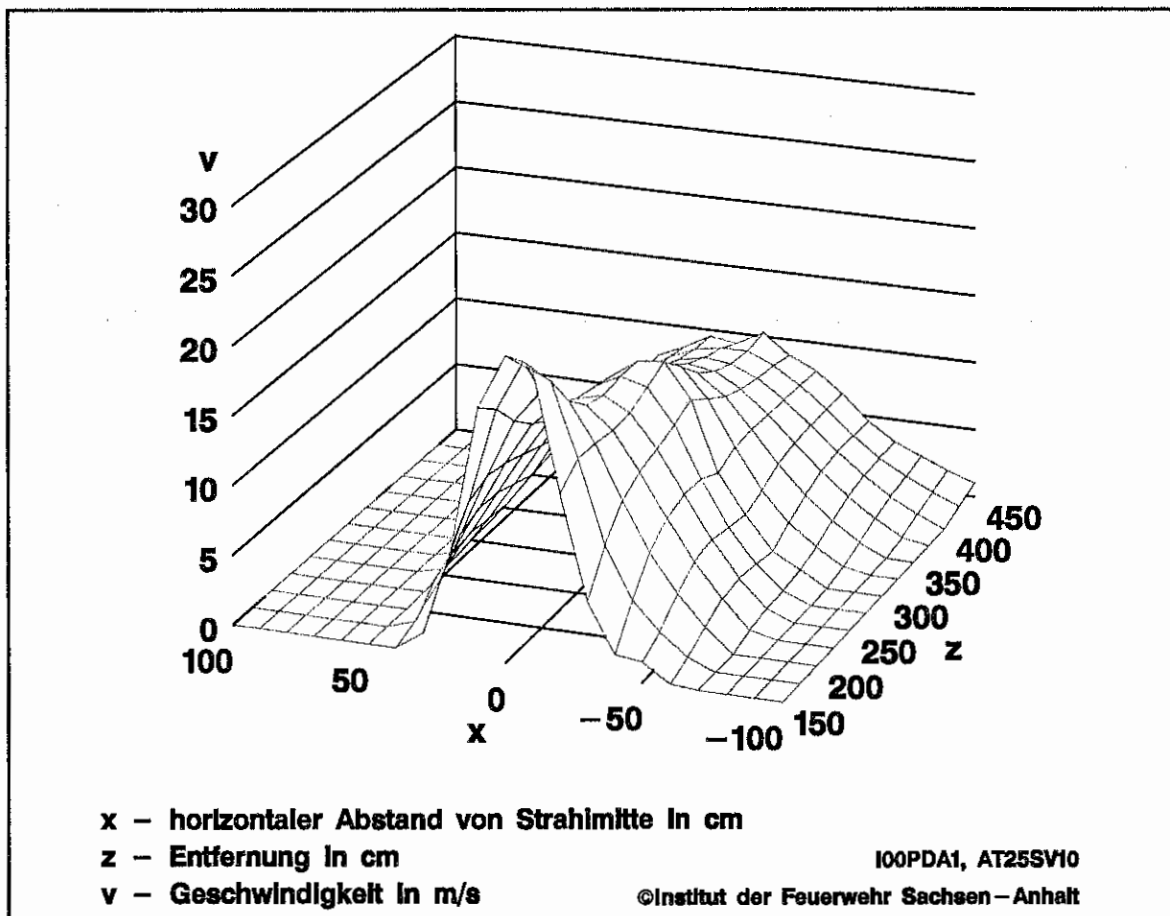
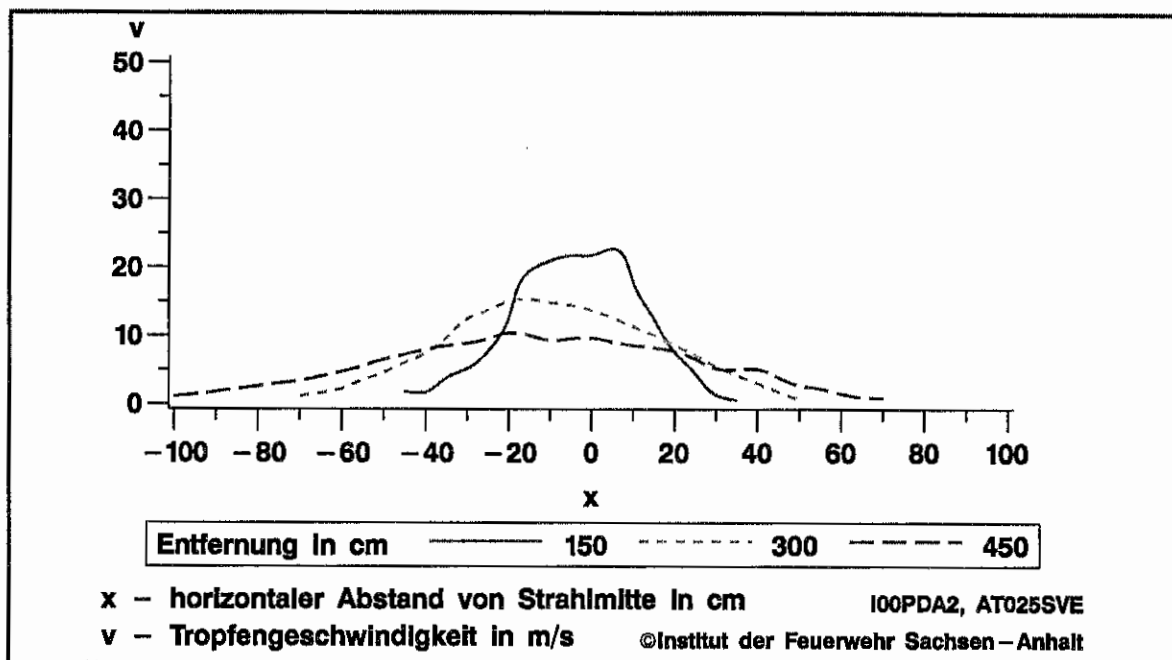


Bild 4.37: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten entlang der horizontalen Fläche beim Sprühstrahl PPAT025S

In beiden Darstellungen ist gut zu erkennen, dass mit zunehmender Entfernung vom Strahlrohr die Geschwindigkeitskomponente  $v_z$  abnimmt.



**Bild 4.38:** Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPAT025S

Auf den folgenden Seiten sind für die Sprühstrahlen PPMX040S, PPPF030S, PPQF025S, SPCP115V und SPCP120S die mittleren Tropfendurchmesser und –geschwindigkeiten für die drei Messebenen zusammengestellt.

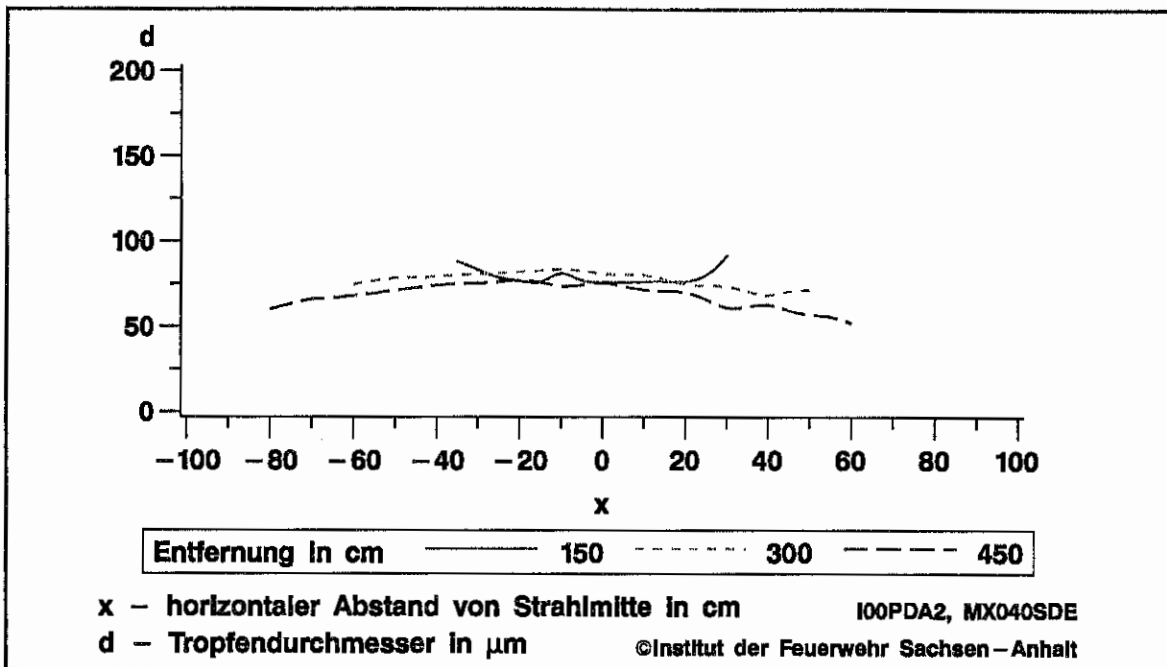


Bild 4.39: Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPMX040S

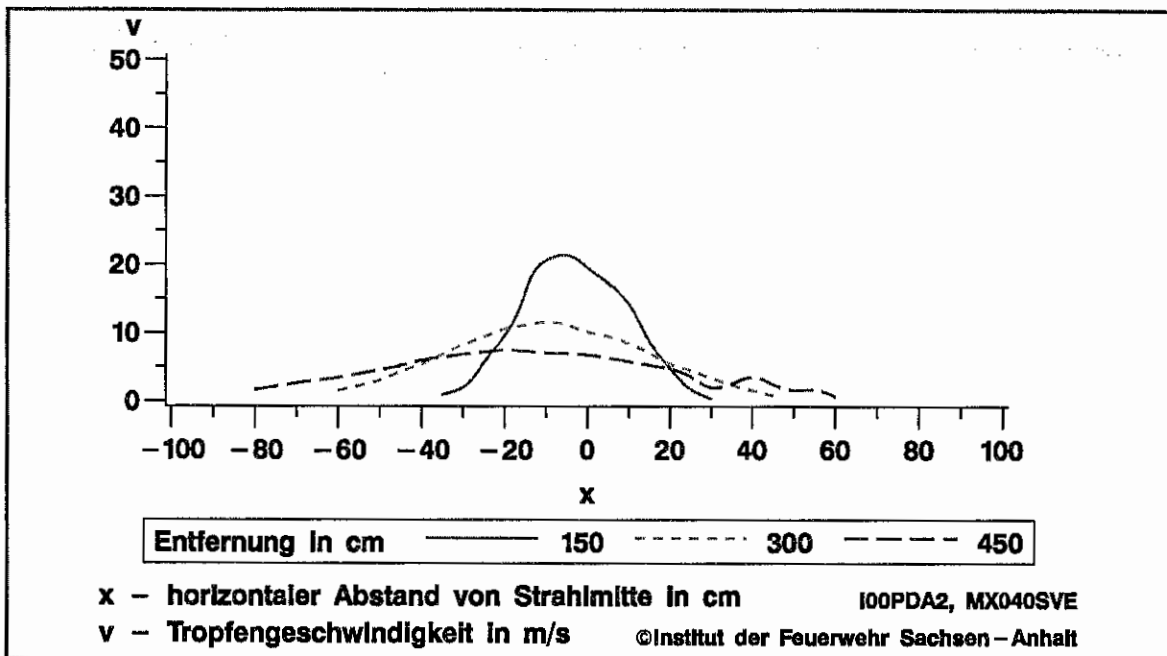


Bild 4.40: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPMX040S



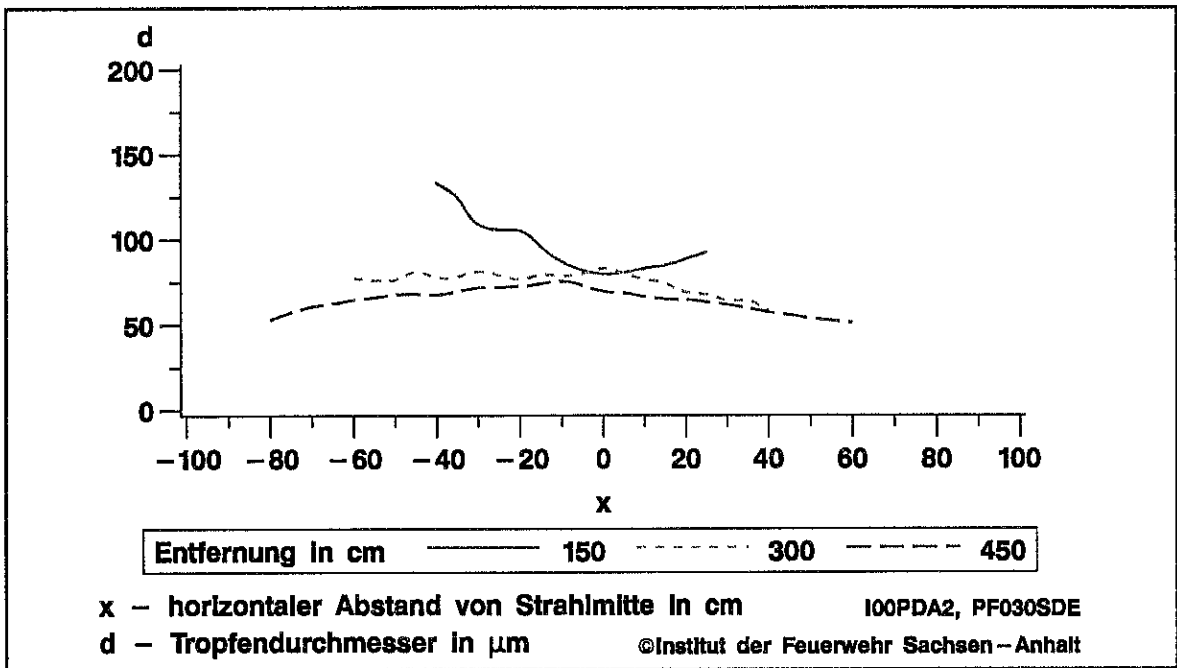


Bild 4.41: Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPPF030S

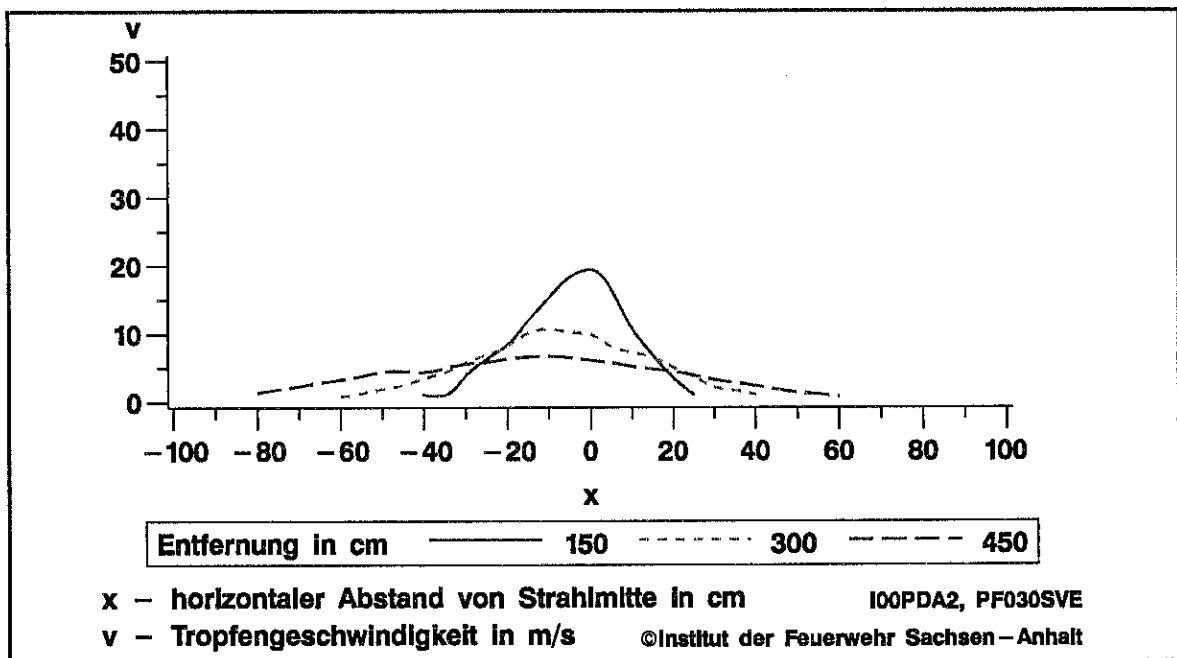


Bild 4.42: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPPF030S

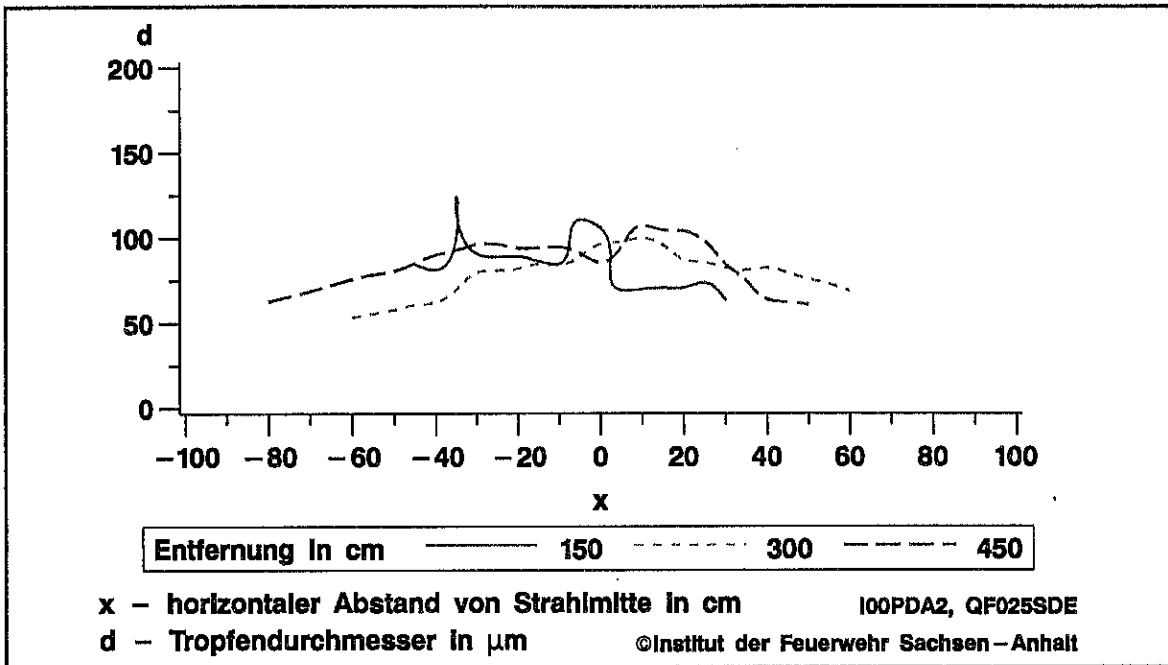


Bild 4.43: Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPQF025S

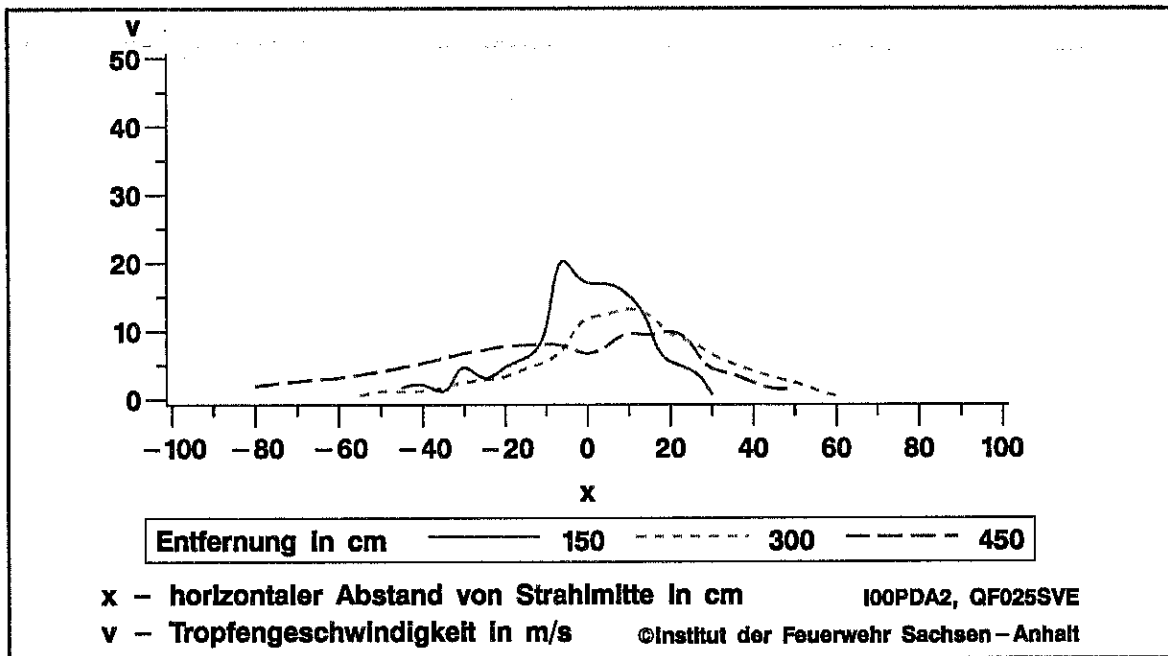


Bild 4.44: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl PPQF025S

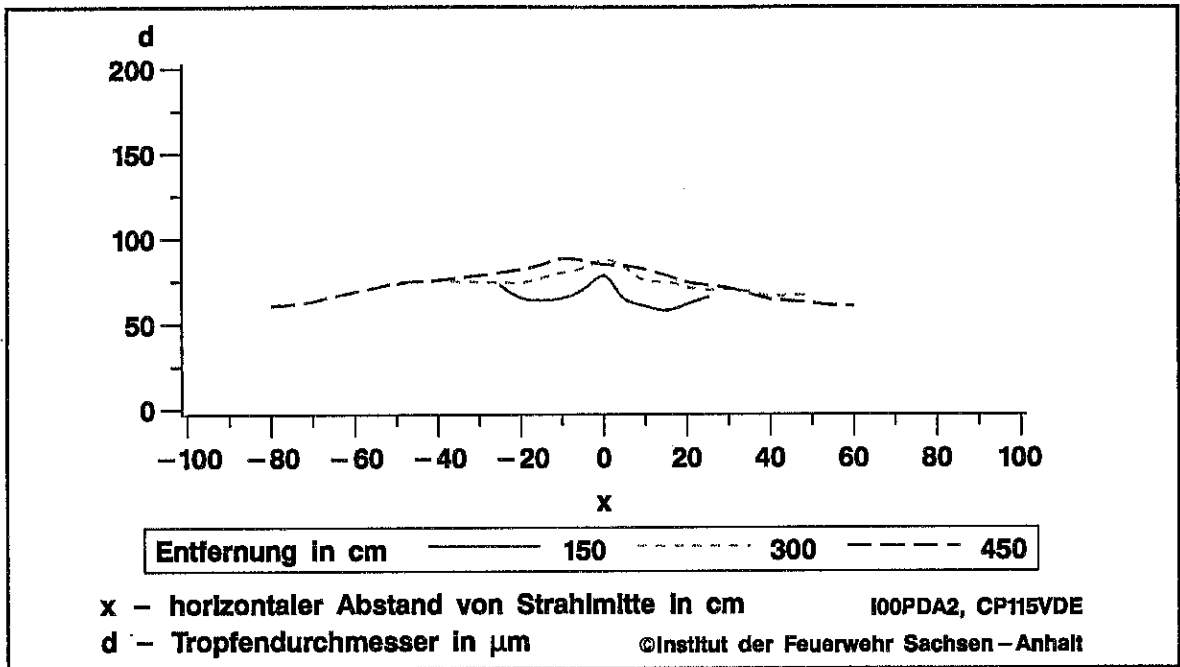


Bild 4.45: Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl SPCP115V

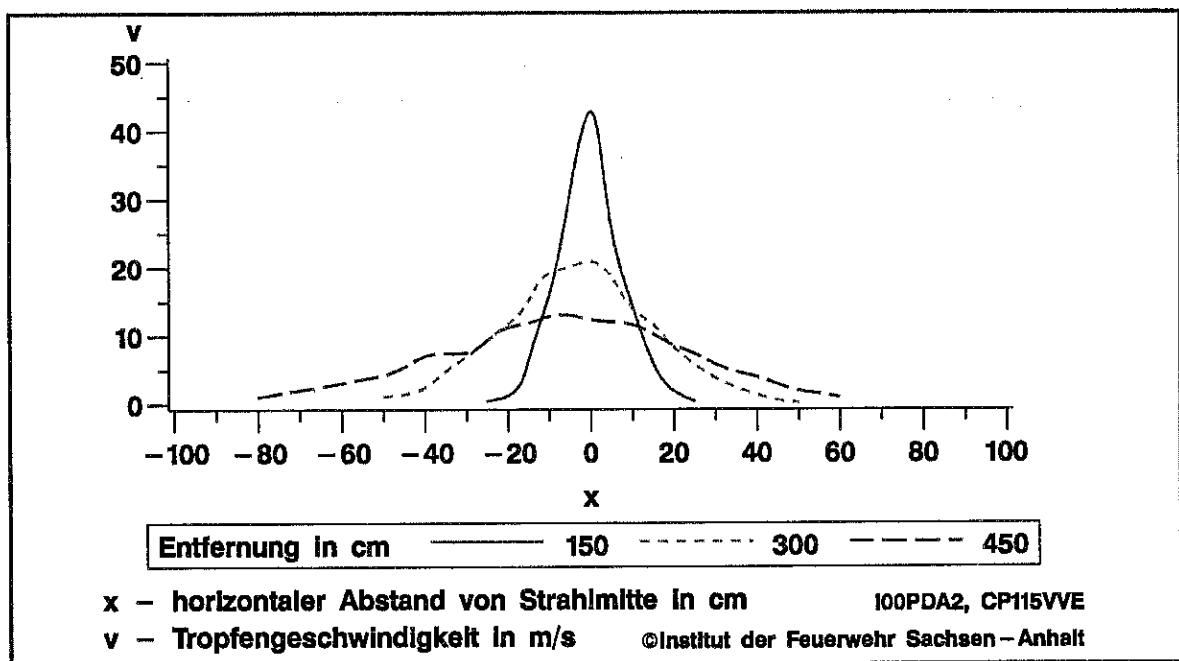


Bild 4.46: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl SPCP115V

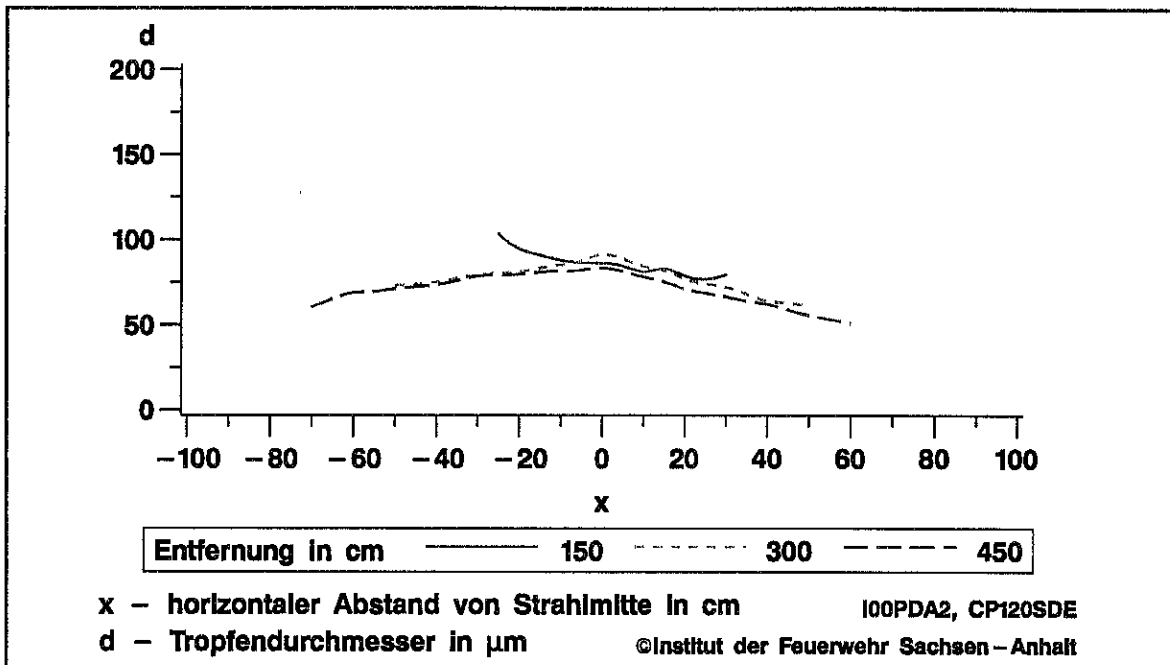


Bild 4.47: Mittlere Tropfendurchmesser für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl SPCP120S

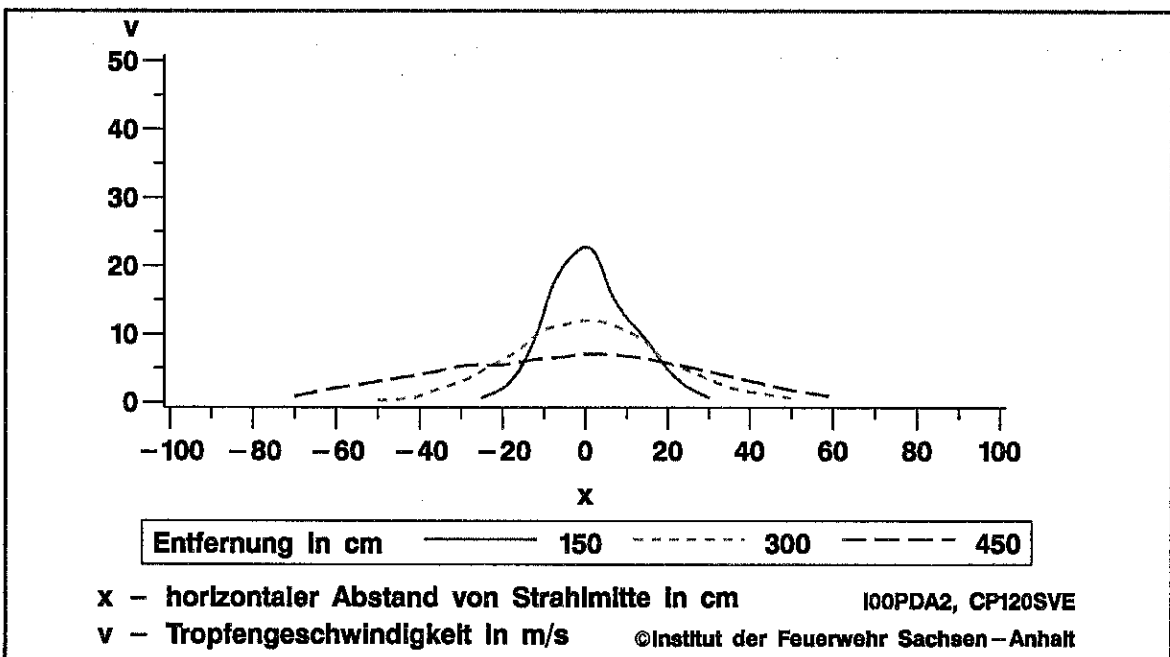


Bild 4.48: Mittlere Tropfengeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen beim Sprühstrahl SPCP120S

In der Tabelle 4.4 wurden die PDA-Messwerte für mehrere Messpunkte der gleichen Messebene zusammengefasst. Bei den Werten für den mittleren Durchmesser wurden alle Messpunkte berücksichtigt. Zusätzlich ist in der 4. Spalte noch der Schätzwert für die

Standardabweichung angegeben. Sie ist ein Maß dafür, wie stark die gemessenen Durchmesserwerte um den in der 3. Spalte angegebenen Mittelwert streuen. Je kleiner die Streuung ist, um so mehr nähert man sich einem monodispersen Sprühstrahl.

**Tabelle 4.4:** Zusammengefasste Ergebnisse der PDA-Messungen für jede Messebene

| <b>Sprühstrahl</b> | <b>Entfernung<br/><i>z</i> in <i>cm</i></b> | <b>mittlerer<br/>Durchmesser<br/><i>d</i> in <i>cm</i></b> | <b>Standard-<br/>abweichung<br/><i>s</i> in <i>cm</i></b> | <b>Mittlere<br/>Geschwindigkeit<br/><math>\bar{v}</math> in <i>m/s</i></b> |
|--------------------|---|--|---|--|
| PPAT025S           | 150   | 142.5  | 157.8   | 21.0   |
|                    | 300   | 128.8  | 151.6   | 13.3   |
|                    | 450   | 123.4  | 153.9   | 9.2  |
| PPFC025S           | 150   | 110.0  | 121.2   | 16.5   |
|                    | 300   | 104.6  | 120.9   | 7.7  |
|                    | 450   | 97.5   | 116.0   | 5.2  |
| PPMX040S           | 150   | 79.3   | 87.1  | 18.5   |
|                    | 300   | 78.0   | 91.5  | 10.1   |
|                    | 450   | 68.1   | 84.6  | 6.5  |
| PPPF030S           | 150   | 97.8   | 110.1   | 16.0   |
|                    | 300   | 75.2   | 92.5  | 9.2  |
|                    | 450   | 65.8   | 83.6  | 6.0  |
| PPQF025S           | 150   | 84.3   | 96.4  | 16.1   |
|                    | 300   | 83.6   | 99.5  | 10.2   |
|                    | 450   | 87.8   | 107.2   | 8.0  |
| SPCP115V           | 150   | 65.3   | 70.6  | 25.9   |
|                    | 300   | 74.8   | 84.9  | 18.5   |
|                    | 450   | 74.5   | 88.1  | 12.3   |
| SPCP120S           | 150   | 86.1   | 95.8  | 18.3   |
|                    | 300   | 78.6   | 93.8  | 11.2   |
|                    | 450   | 72.4   | 90.4  | 6.7  |

Es ist zu vermuten, dass die Strömungsverhältnisse im Sprühstrahl einen Einfluss auf die Löscheigenschaften haben. Dies wird im Kapitel 5 noch näher betrachtet. Von besonderem Interesse ist die Strömungsgeschwindigkeit im Zentrum des Sprühstrahls. Aus diesem Grunde wurden alle gemessenen Geschwindigkeitswerte für die Messpunkte in der jeweils betrachteten Messebene, die nicht mehr als 10 *cm* von der Strahlmitte abweichen, gemittelt (d. h.  $z = const, -10 \leq x \leq +10$ ). Die resultierenden Werte sind in der letzten Spalte der

Tabelle 4.4 als mittlere Geschwindigkeit angegeben. In der Tabelle 4.5 sind alle Messwerte für den Sprühstrahl zusammengefasst. Für die mittlere Geschwindigkeit ist dies nicht mehr sinnvoll.

**Tabelle 4.5:** Zusammengefasste Ergebnisse der PDA-Messungen

| <b>Sprühstrahl</b> | <b>mittlerer Durchmesser <math>d</math> in cm</b> | <b>Standardabweichung <math>s</math> in cm</b> |
|--------------------|---|--|
| PPAT025S           | 133.1   | 155.0  |
| PPFC025S           | 105.2   | 120.0  |
| PPMX040S           | 75.3  | 87.5   |
| PPPF030S           | 80.3  | 96.1   |
| PPQF025S           | 84.9  | 99.6   |
| SPCP115V           | 70.9  | 80.2   |
| SPCP120S           | 79.8  | 93.6   |

Bei allen Sprühstrahlen nimmt die mittlere Geschwindigkeit im Zentrum mit zunehmender Entfernung deutlich ab. Die letzten fünf Sprühstrahlen der Tabelle 4.5 sind nach der im Anhang C eingeführten Begriffsbildung in den Bereich der Wassernebel einzuordnen. Der zweite PPFC025S liegt im Grenzbereich.

#### 4.4 Ermittlung der Volumenstromdichte im Nasslabor

Das Messprinzip ist im Anhang C kurz erläutert. Um einen Vergleich der Sprühstrahlen zu ermöglichen, wurde in der Messebene  $z = 150 \text{ cm}$  ein quadratisches Gitter von Messpunkten mit gleichen Abständen von  $5 \text{ cm}$  oder  $10 \text{ cm}$  in Abhängigkeit von der Ausdehnung des Strahls gewählt. Auch hier wurde das Gitter außen durch die Messpunkte begrenzt, in denen das Tropfenauftreten erstmals so gering war, dass keine Volumenstromdichte mehr gemessen werden konnte. Die Ebene  $z = 150 \text{ cm}$  wurde auch zur Kalibrierung der Sonde verwendet.

Zur Darstellung der gemessenen Werte der Volumenstromdichte wurde analog zu den Darstellungen 4.34 und 4.37 für die Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten eine 3D-Grafik gewählt. Im oberen Teil der Bilder sind die Höhenlinien der Volumenstromdichte dargestellt. Benachbarte Linien entsprechen der Differenz von  $0.1 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ . In allen Darstellungen wurden die Koordinatenachsen gleich gewählt, um einen unmittelbaren Vergleich zwischen der räumlichen Ausdehnung der Sprühstrahlen zu ermöglichen.

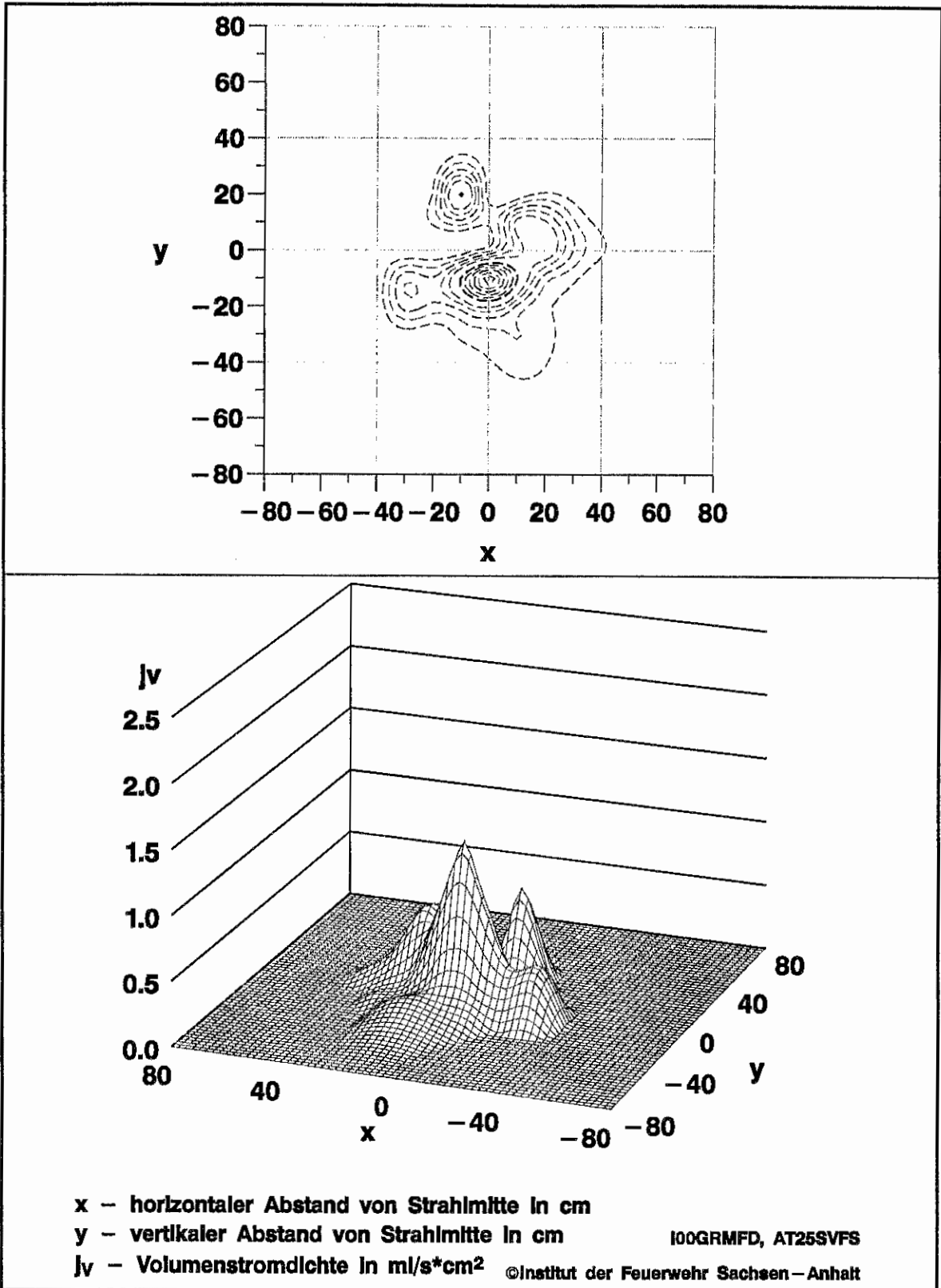
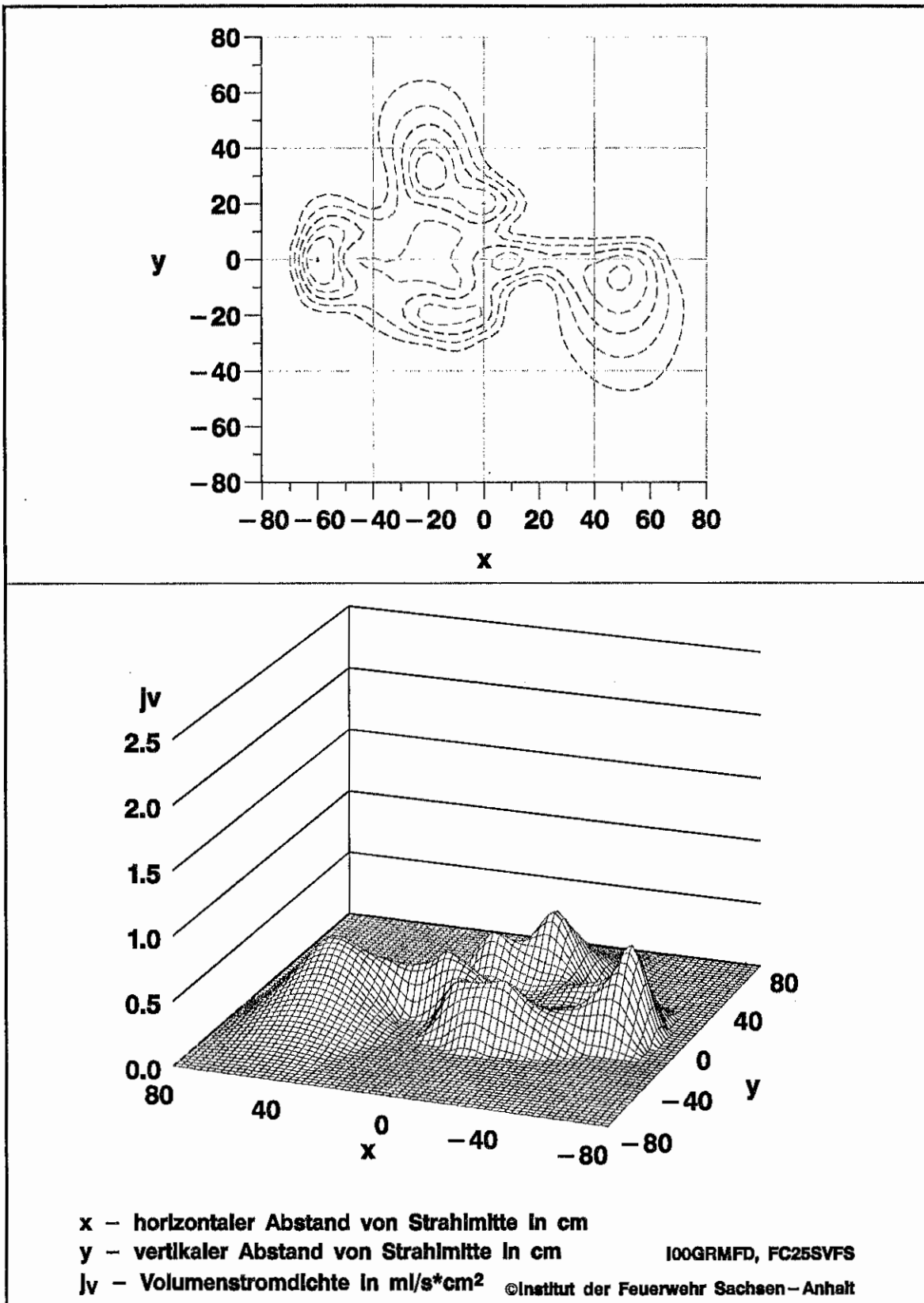


Bild 4.49: Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPAT025S in der Messebene  $z = 150\text{ cm}$



**Bild 4.50:** Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPFC025S in der Messebene  $z = 150 \text{ cm}$



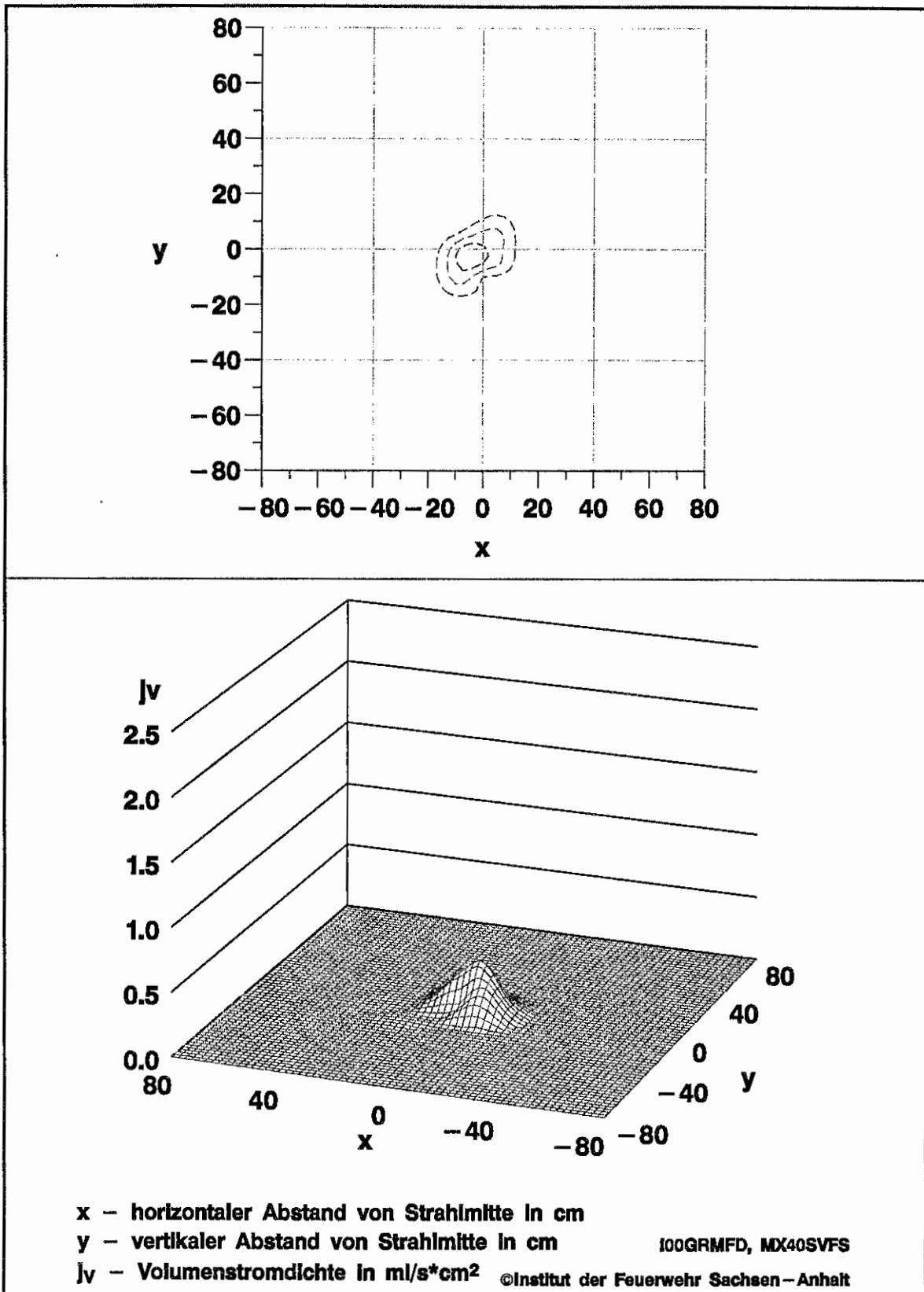


Bild 4.51: Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPMX040S in der Messebene  $z = 150 \text{ cm}$

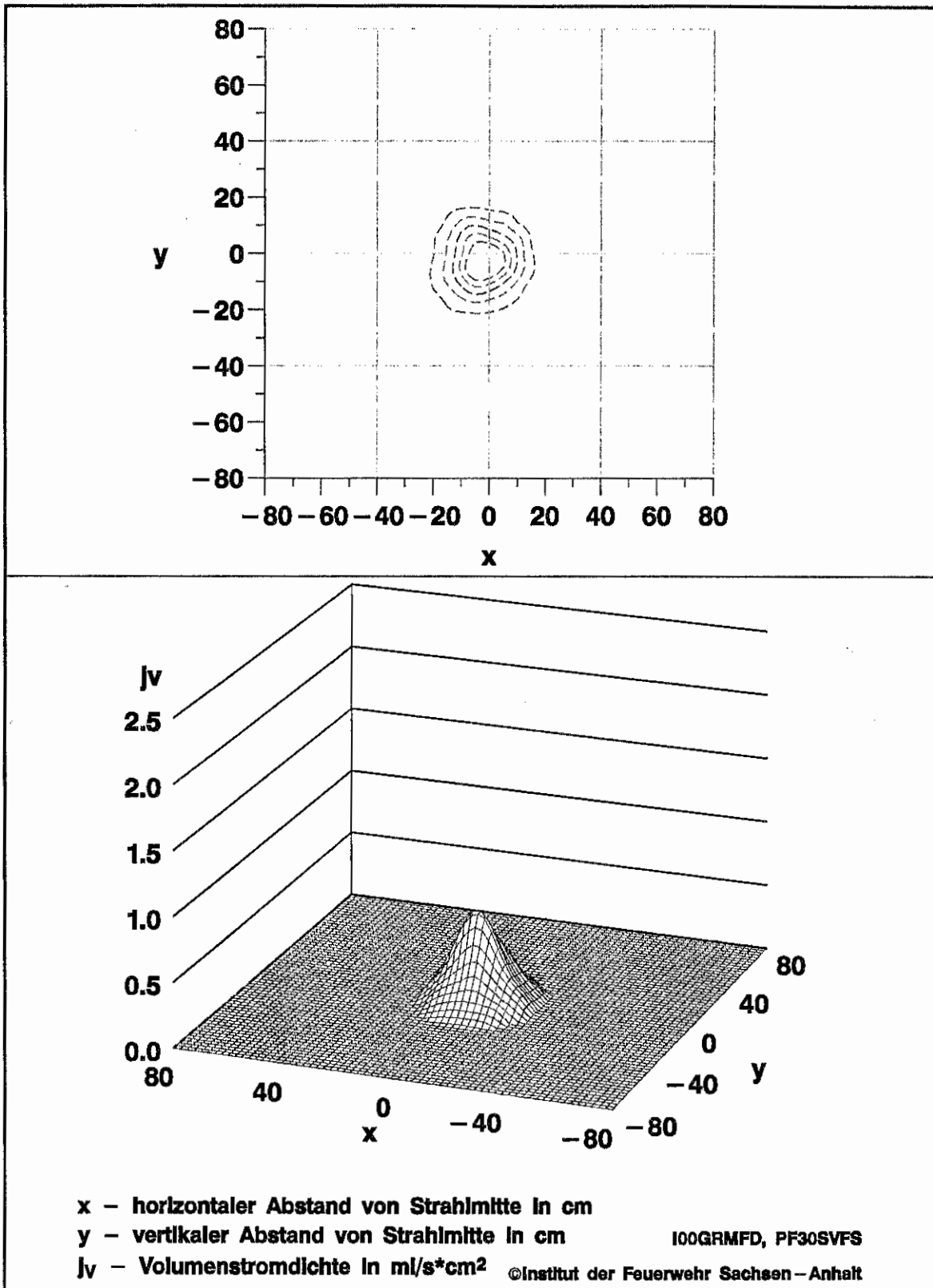


Bild 4.52: Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPPF030S in der Messebene  $z = 150 \text{ cm}$

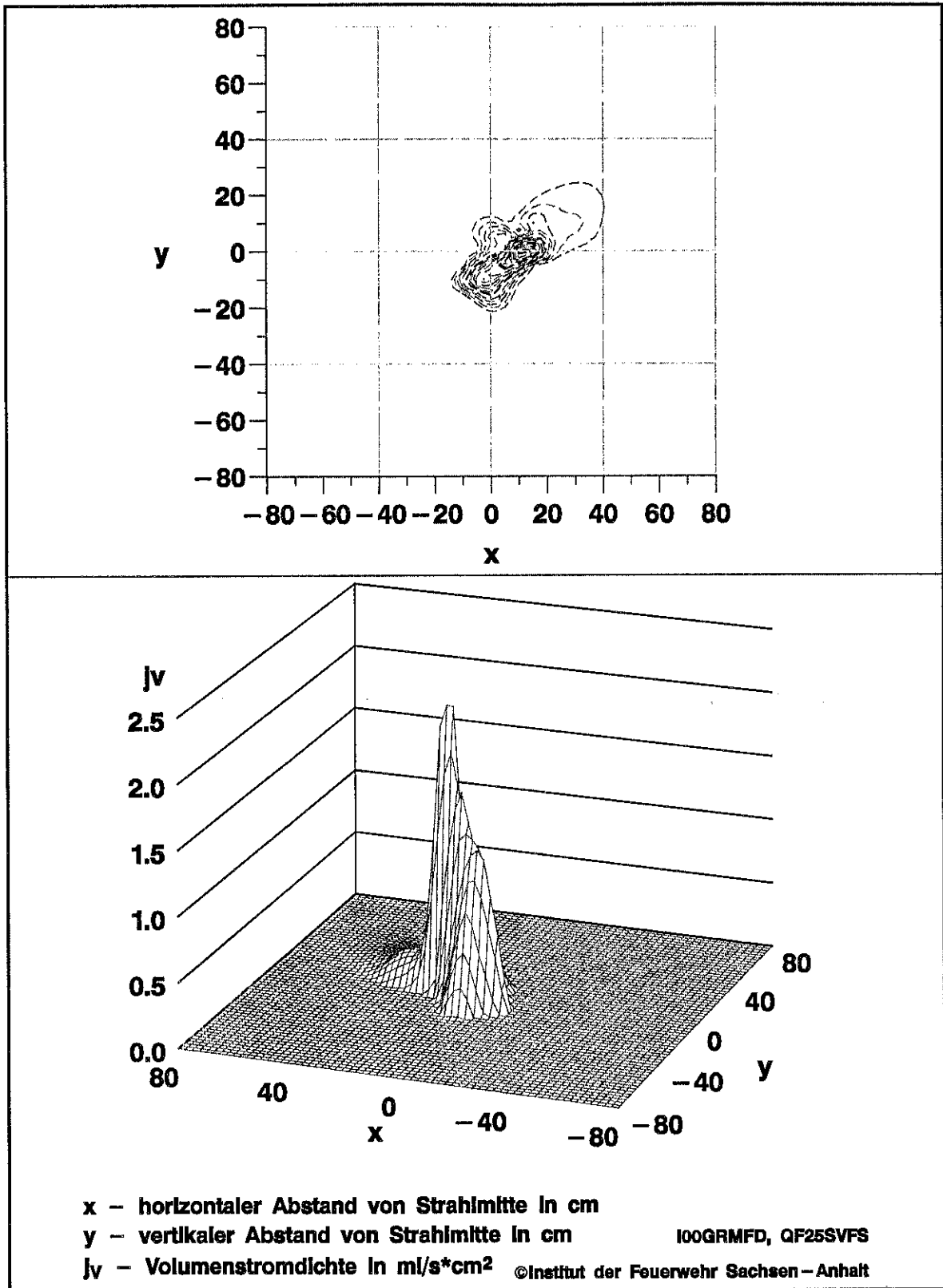


Bild 4.53: Volumenstromdichte für den Sprühstrahl PPQF025S in der Messebene  $z = 150\text{ cm}$

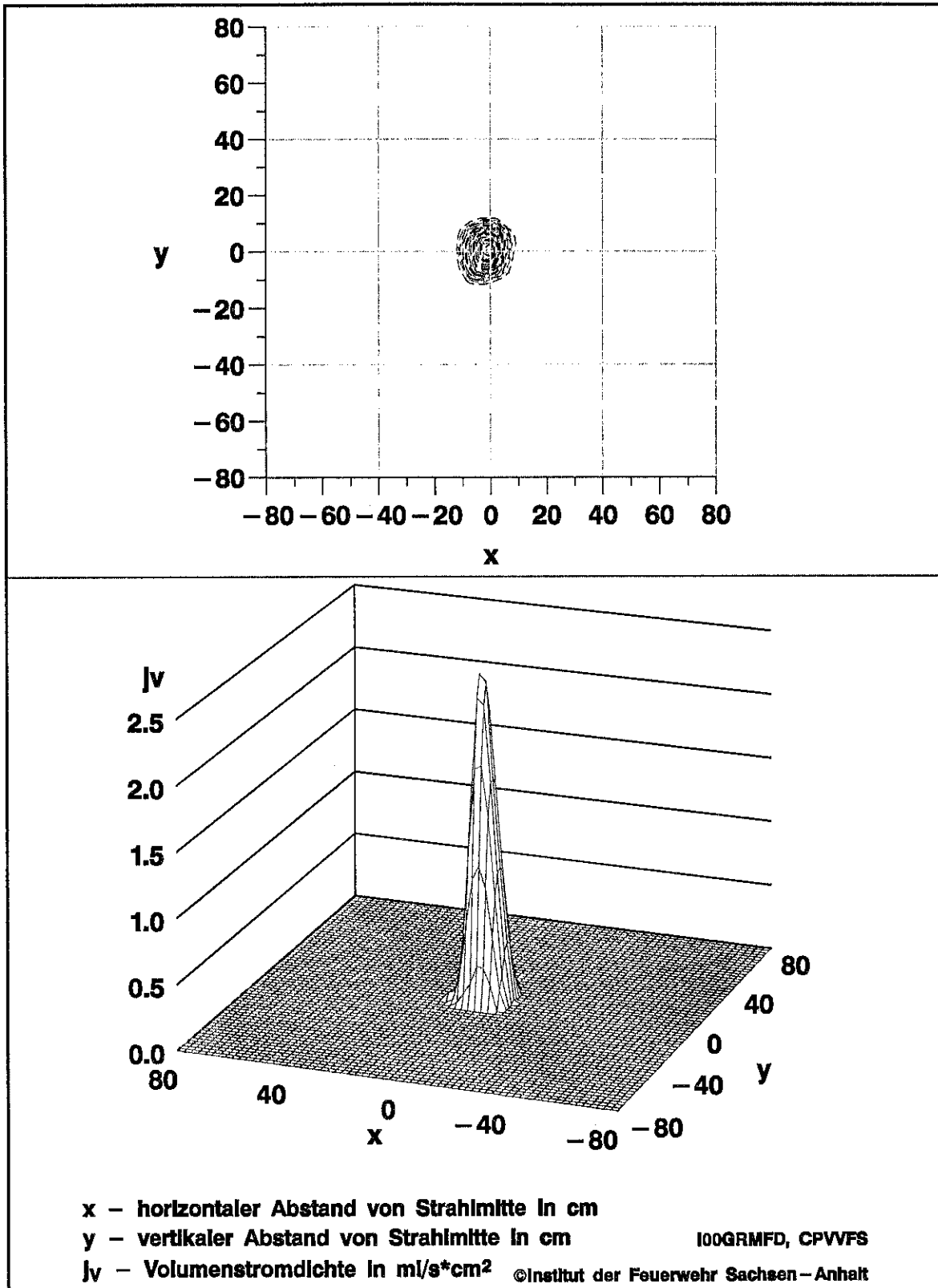
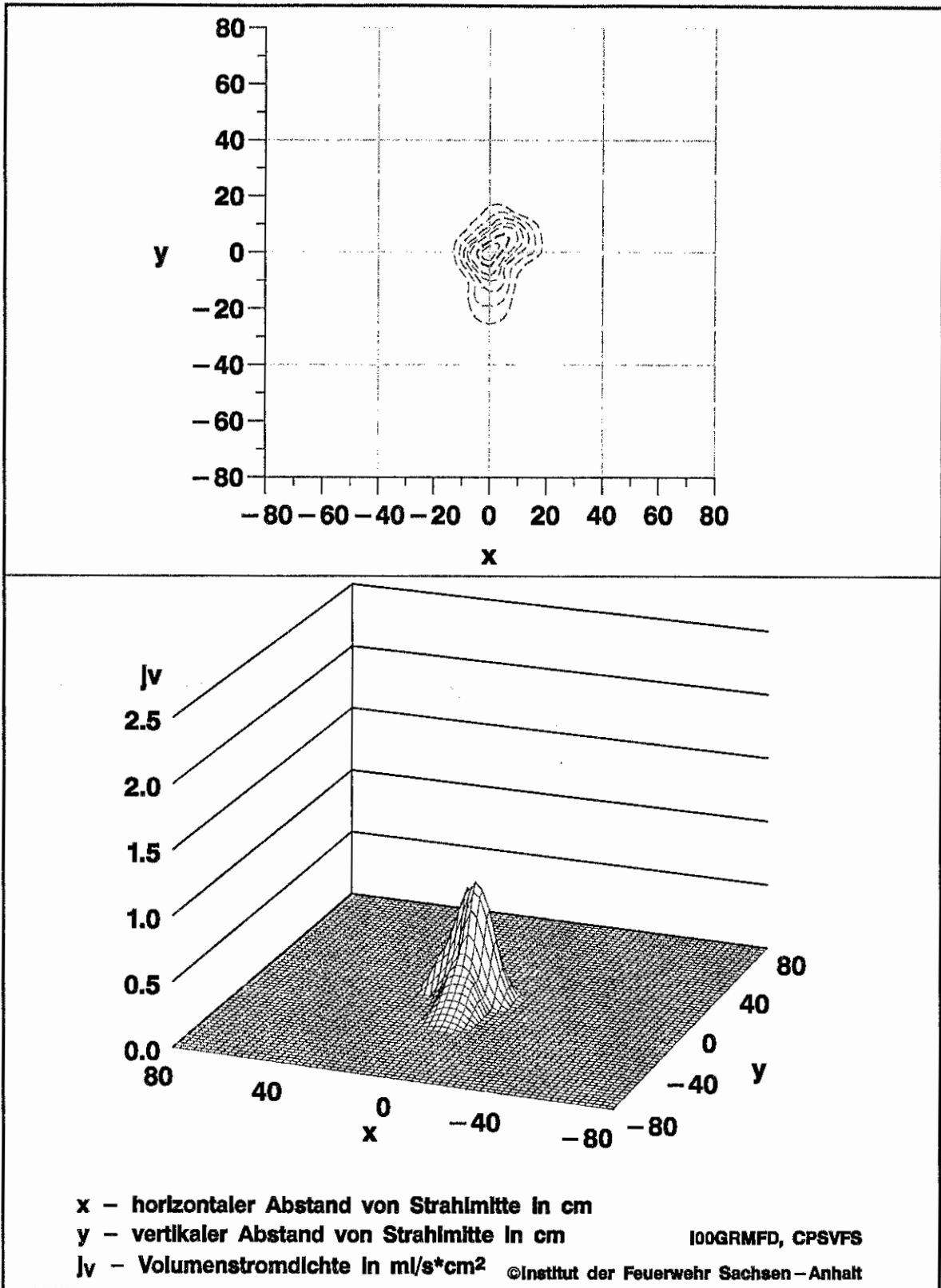


Bild 4.54: Volumenstromdichte für den Sprühstrahl SPCP115V in der Messebene  $z = 150\text{ cm}$



**Bild 4.55:** Volumenstromdichte für den Sprühstrahl SPCP120S in der Messebene  $z = 150\text{ cm}$

Für einen Strahlrohrführer ist es sicher gut, wenn er davon ausgehen kann, dass die Volumenstromdichte im Zentrum des Sprühstrahls ihr Maximum hat und nach außen hin abnimmt. Er kann hinter dem Strahlrohr stehend meist die Verteilung des Wassers im Sprühstrahl nicht erkennen. Unter realen Einsatzbedingungen sind die Sichtverhältnisse meist ohnehin sehr schlecht.

Im Ergebnis der Messung der Volumenstromdichten kann festgehalten werden:

- ◆ Entsprechend zu den Geschwindigkeitsmessungen liegen die Maxima der Volumenstromdichte auch in den Bereichen, wo die Tropfengeschwindigkeiten groß sind. Das Löschwasser verteilt sich in den Sprühstrahlen PPMX040S, PPPF030S, PPQF025S, SPCP115V und SPCP120S gut um das Zentrum.
  
- ◆ Bei den Sprühstrahlen PPAT025S und PPFC025S ist die Volumenstromdichte sehr unsymmetrisch verteilt. Besonders beim letzteren ist sie nicht befriedigend. Diesem Umstand ist das im Vergleich zu den anderen Sprühstrahlen abweichende Verhalten bei den Sprühversuchen zu erklären (vgl. Abschnitt 4.2).

## **5 KOMPLEXE AUSWERTUNGEN**

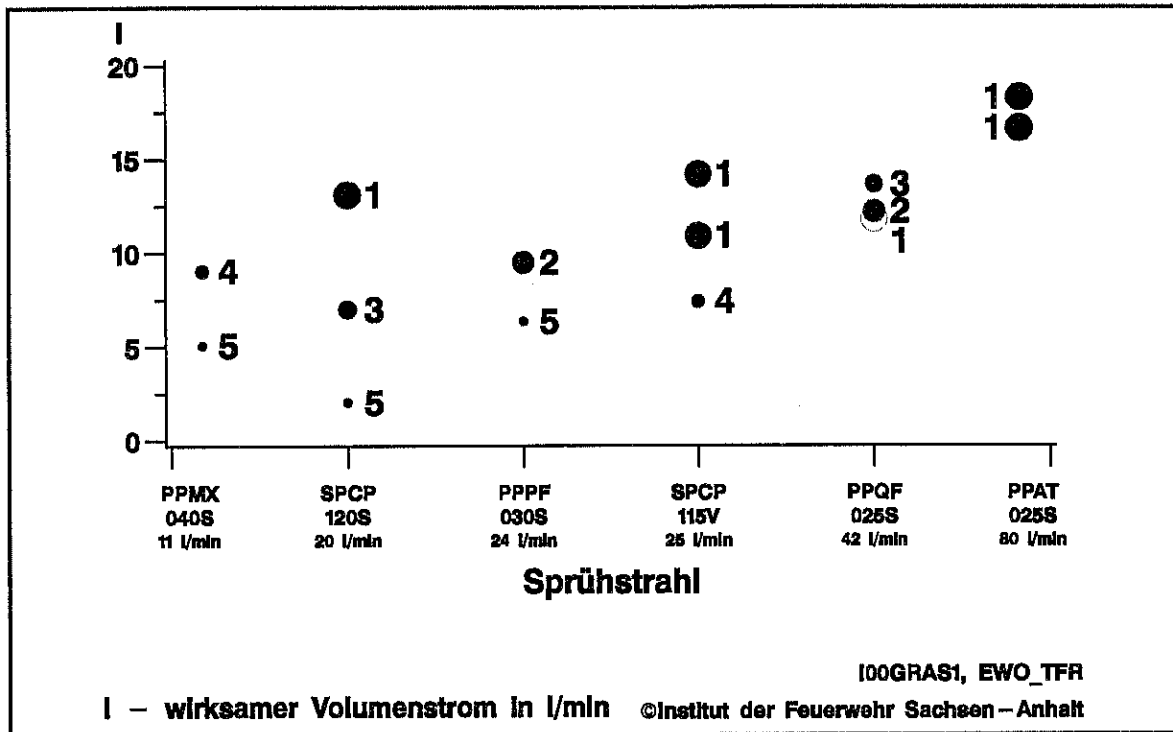
In diesem Kapitel werden einige Auswertungen vorgenommen, die Messergebnisse verschiedener Versuchsstände miteinander verknüpfen. Im ersten Abschnitt werden die Ergebnisse der Brandversuche auf dem AFF mit denen der Sprühversuche verknüpft. Im zweiten Abschnitt werden die mit dem PDA gemessenen Tropfengeschwindigkeiten und die Brandversuchsergebnisse gegenübergestellt.

### **5.1 Löschergebnisse in Abhängigkeit vom wirksamen Löschwasservolumenstrom**

Im Abschnitt 4.1 sind die Brand- und Löschversuche ausgewertet worden. Im Bild 4.14 sind für die hin- und herbewegte Holzkrippe alle Versuchsergebnisse in einer Blasengrafik zusammengestellt. In dieser Grafik gehen Sprühstrahlverhältnisse nicht ein. Es wird deutlich, dass bei den Holzkrippenbränden mit zunehmender Entfernung das Löschergebnis bei den betrachteten Sprühstrahlen schlechter wird. Die Ursache ist sicher zunächst darin zu vermuten, dass die Massenstromdichte abnimmt und der Sprühstrahl im Zentrum eine geringere Geschwindigkeit aufweist. Aus diesem Grund wurden die im Abschnitt 4.2 erläuterten Sprühversuche durchgeführt. Dabei wurde das Brandobjekt nicht gezündet und das auf das Brandobjekt auftreffende Wasser ermittelt. Diese Löschwassermenge wird im Folgenden als der wirksame Löschwasservolumenstrom bezeichnet. Die Betriebsbedingungen des AFF waren die gleichen wie bei den korrespondierenden Brandversuchen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das über bzw. seitlich am Brandobjekt im Sprühstrahl vorbeiströmende Wasser den Brandverlauf auch beeinflusst. Insbesondere bewirkt es ein Abkühlen der Umgebung und eine Unterdrückung der Verbrennung der Gasphase oberhalb des Brandobjektes.

Die Bilder 5.1 und 5.2 zeigen die Ergebnisse für die Brandversuche mit hin- und herbewegter Holzkrippe. Im Bild 5.1 wurden die Ergebnisse in Form einer Blasengrafik für jeden Sprühstrahl dargestellt.



**Bild 5.1:** Löschergebnisse für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe in Abhängigkeit vom wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen Sprühstrahlen

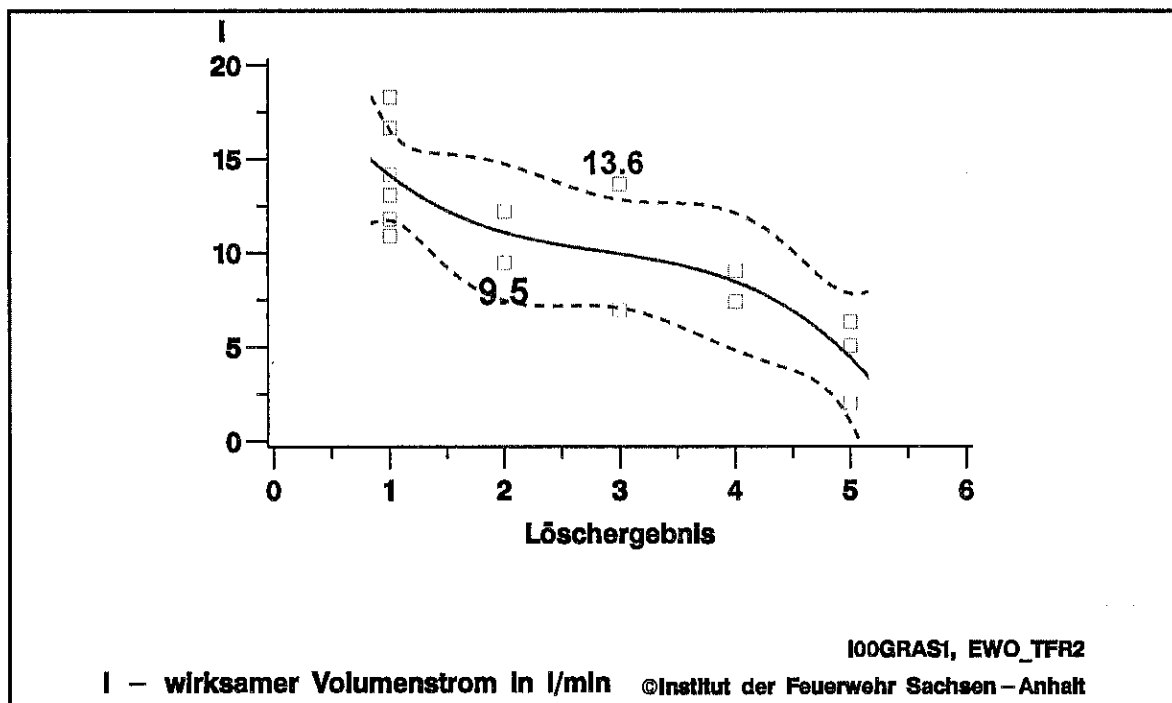
Beim Sprühstrahl PPQF025S wurden bei der Entfernung  $z = 300\text{ cm}$  im Sprühversuch  $11.8\text{ l/min}$  und bei  $z = 450\text{ cm}$   $12.2\text{ l/min}$  bestimmt (vgl. auch Bild 4.30). Der Löschwasservolumenstrom unterscheidet sich hier nur sehr wenig. Dies führt jedoch dazu, dass die das Löschergebnis darstellenden Blasen übereinanderliegen. Aus diesem Grund wurden in einigen Bildern Blasen in Form von Kreisen dargestellt. Ihnen entsprechen somit inhaltlich keine anderen Bewertungen des Löschergebnisses.

Mit Ausnahme des Sprühstrahls PPQF025S, bei dem sich die wirksamen Löschwasservolumenströme ohnehin nur wenig unterscheiden, verbessert sich das Löschergebnis mit zunehmendem Volumenstrom.

Im Bild 5.2 wurden die Sprühstrahlen weggelassen und der wirksame Löschwasservolumenstrom über dem Löschergebnis abgetragen. Die kubische Regressionskurve bestätigt, dass im Mittel bei Holzkruppenbränden mit einer Erhöhung des wirksamen Löschwasservolumenstroms sich auch das Löschergebnis verbessert. Deutlich wird im Bild auch die große Streubreite bezüglich des eingesetzten wirksamen



Löschmittelvolumenstromes zum Löschergebnis. Während zum Beispiel in einem Fall mit 9.5 l/min das Löschergebnis „2“ erreicht wurde, war es in einem anderen Versuch mit 13.7 l/min nur das Ergebnis „3“. Die große Streubreite macht deutlich, dass auch der hier eingeführte wirksame Löschmittelvolumenstrom allein nicht der einzig entscheidende Parameter ist.



**Bild 5.2:** Löschergebnisse und wirksame Löschwasservolumenströme für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe

Die Bilder 5.3 und 5.4 zeigen die Löschergebnisse bei feststehender Holzkrippe. Auch hier sind gleiche Sachverhalte festzustellen.

Im Anschluss daran sind die analogen Darstellungen für die Polypropylenbrandobjekte angegeben. Einige Bewertungen schließen sich an.

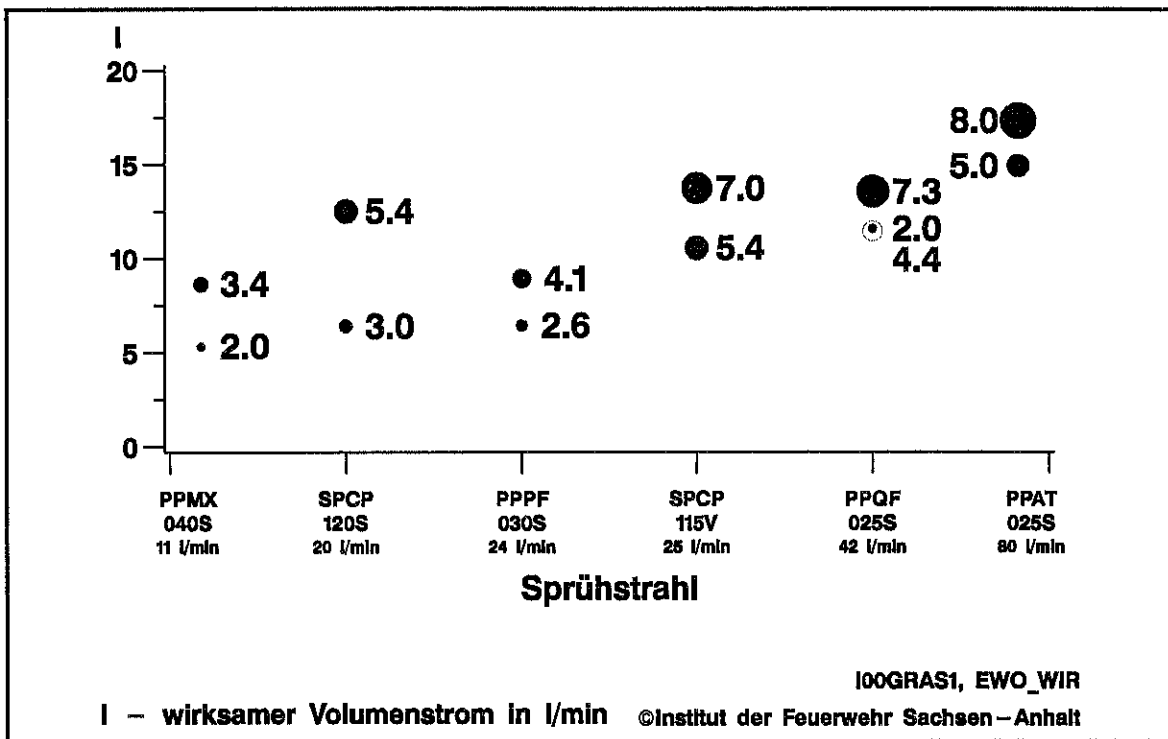


Bild 5.3: Eindringtiefen für die Versuche bei stehender Holzkippe in Abhängigkeit vom wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen Sprühstrahlen

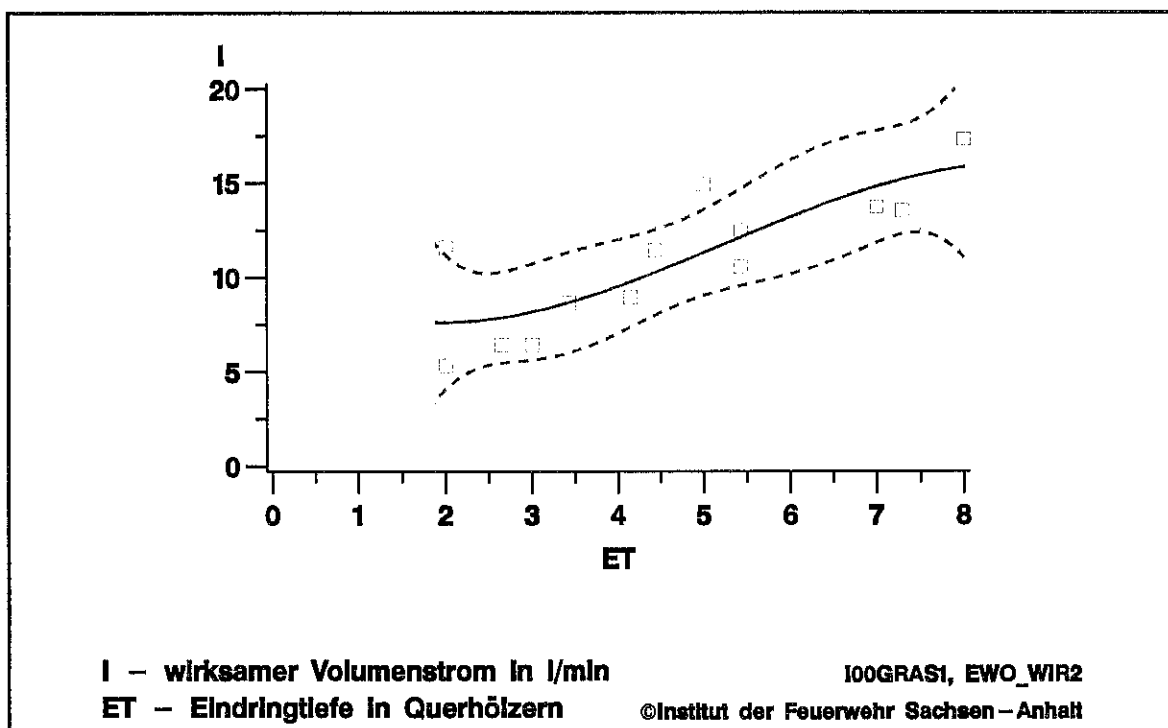


Bild 5.4: Eindringtiefen und wirksame Löschwasservolumenströme für die Versuche bei stehender Holzkippe

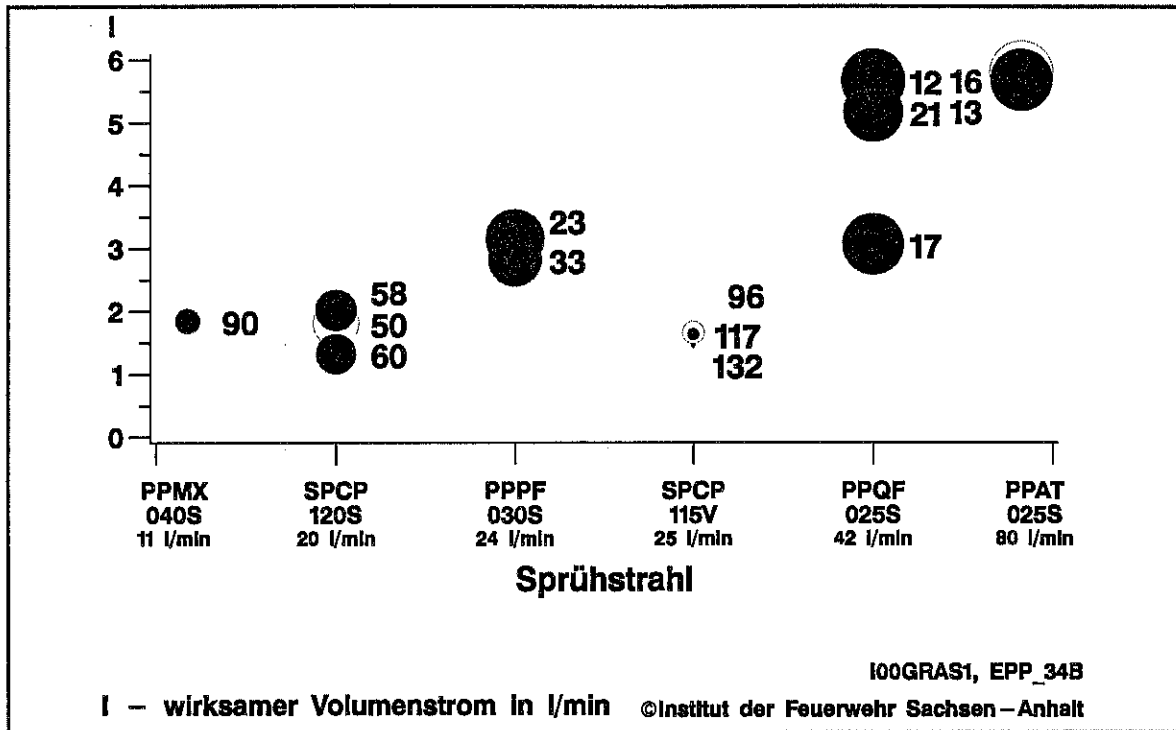


Bild 5.5: Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 34B in Abhängigkeit vom wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen Sprühstrahlen

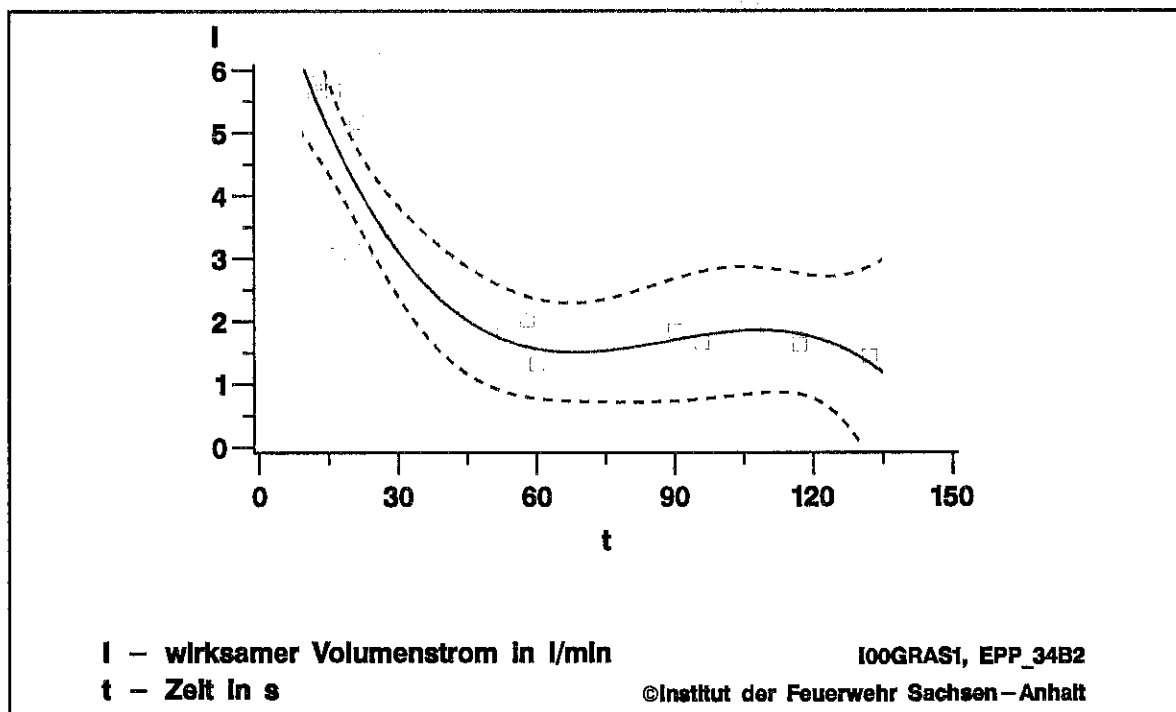


Bild 5.6: Löschzeiten und wirksame Löschwasservolumenströme beim Polypropylenbrandobjekt 34B

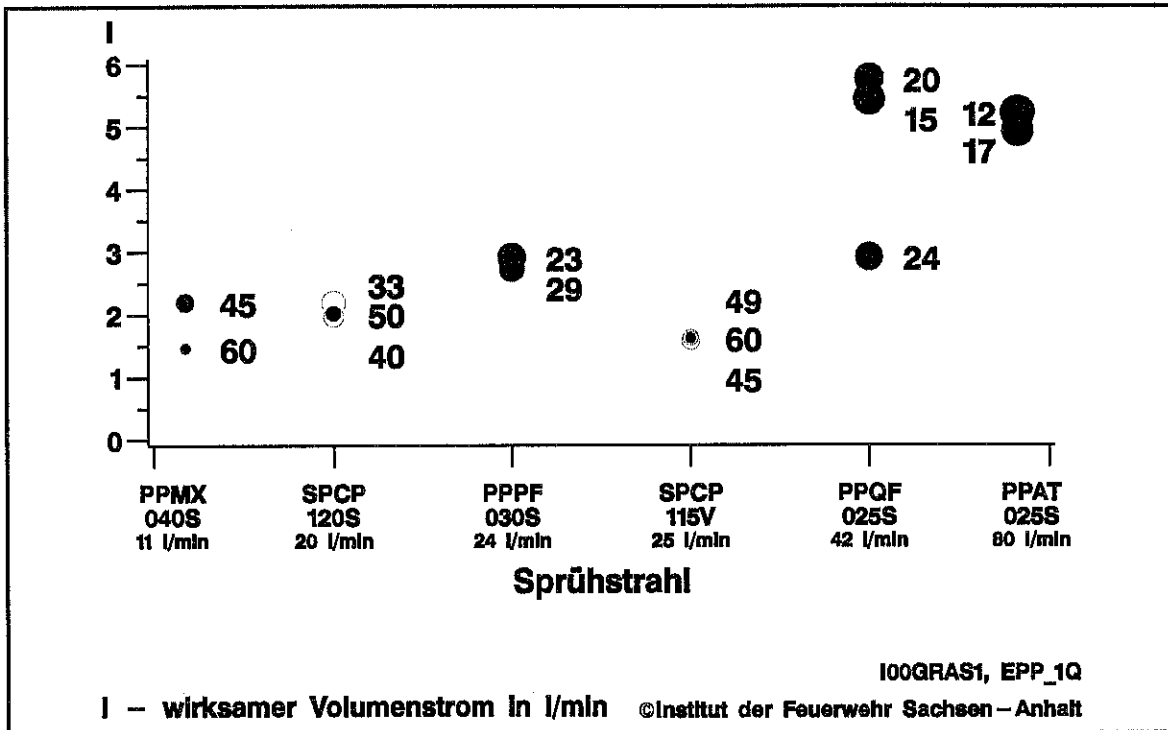


Bild 5.7: Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 1Q in Abhängigkeit vom wirksamen Löschwasservolumenstrom für die einzelnen Sprühstrahlen

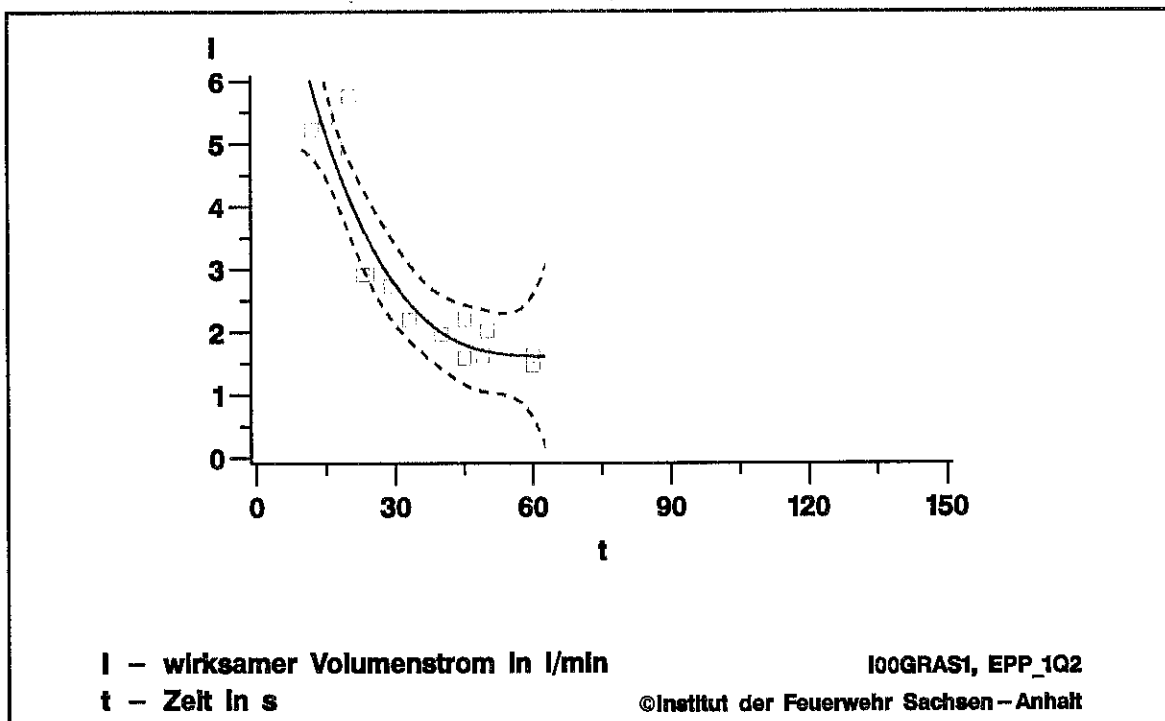


Bild 5.8: Löschzeiten und wirksame Löschwasservolumenströme beim Polypropylenbrandobjekt 1Q

Auch bei den Polypropylenbränden bewirkt ein höherer wirksamer Löschmittelvolumenstrom im Mittel eine Verbesserung des Löschergebnisses in Form einer kürzeren Löschzeit. Obwohl bei beiden Brandobjekten die Brandflächen nahezu gleich groß sind, unterscheiden sich jedoch die Löschzeiten auch bei vergleichbaren wirksamen Löschmittelvolumenströmen erheblich. Gründe hierfür sind auch im Abschnitt 4.1.3 zusammengestellt.

## **5.2 Löschergebnisse in Abhängigkeit von den Sprühstrahlgeschwindigkeiten**

Analog zur wirksamen Löschmittelintensität, die in den Bildern des vorhergehenden Abschnittes betrachtet wurde, wird nun die im Abschnitt 4.3 eingeführte mittlere Geschwindigkeit im Zentrum der Sprühstrahlen mit Bezug zum Löschergebnis untersucht. Dieser Wert wurde durch Mittelung aller PDA-Messergebnisse der Geschwindigkeit bestimmt, deren Messpunkte in der betreffenden Messebene höchstens 10 cm vom Sprühstrahlzentrum entfernt lagen (vgl. Abschnitt 4.3, Tabelle 4.4).

Betrachtet man für beide Holzrippenbrände die Blasengrafiken in den Bildern 5.9 und 5.11, so neigt man spontan zu der Einschätzung, dass eine höhere Geschwindigkeit auch eine Verbesserung des Löschergebnisses bewirkt. Dies trifft auf den einzelnen Sprühstrahl bezogen auch zu. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass mit höherer Geschwindigkeit meist auch ein größerer wirksamer Volumenstrom einhergeht. Die Geschwindigkeiten und die wirksamen Volumenströme nehmen beide mit zunehmender Entfernung in der Regel ab (s. Tabelle 4.4, Bilder 4.31 und 4.32). Trägt man für alle Sprühstrahlen über den Löschergebnissen bzw. der Eindringtiefen die Geschwindigkeiten ab, so sieht man in den Bildern 5.10 und 5.12, dass kein statistisch gesicherter Trend vorhanden ist. Bei den Polypropylenbrandobjekten bewirkt eine höhere Geschwindigkeit keine Verkürzung der Löschzeit. Der Trend ist bei dem konkret gewählten Versuchsaufbau eher entgegengesetzt.

Bei allen im Vorhaben untersuchten Brandobjekten ist die Betrachtung des wirksamen Löschwasservolumenstroms bzw. der Volumenstromdichte eine geeignete Größe. Die mittlere Geschwindigkeit ist stets im Zusammenhang mit diesen Größen zu betrachten. Isoliert kann sie zu Fehleinschätzungen führen.

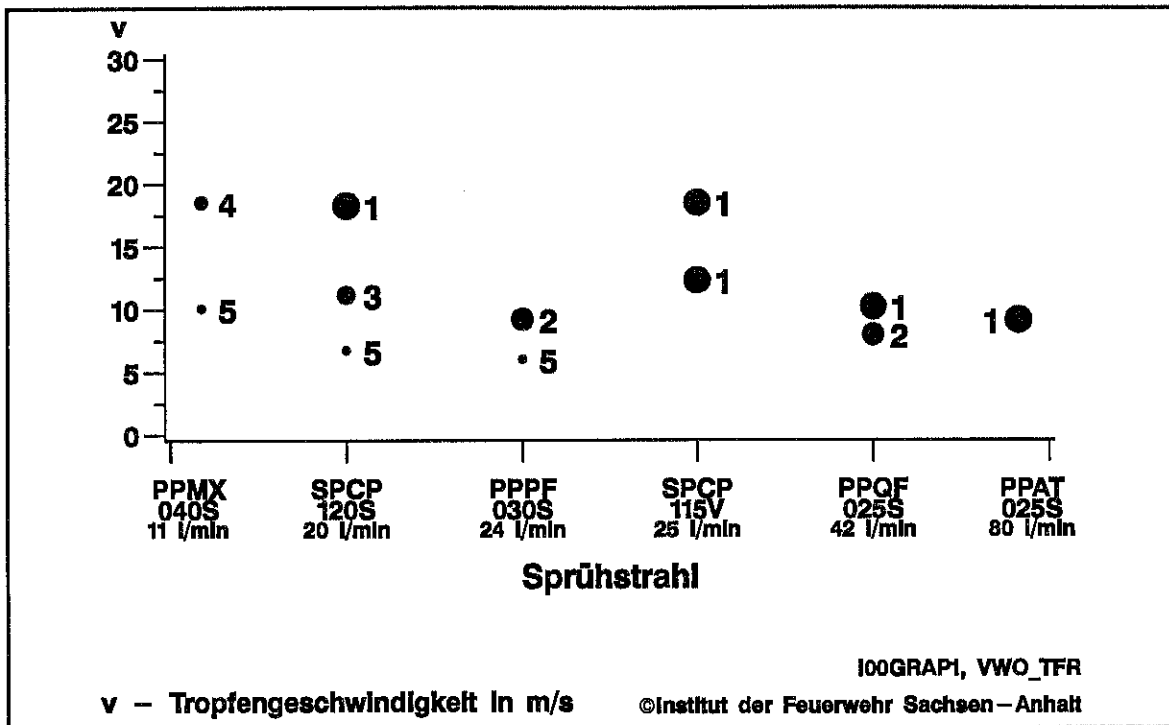


Bild 5.9: Löschergebnisse für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe in Abhängigkeit von der mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen Sprühstrahlen

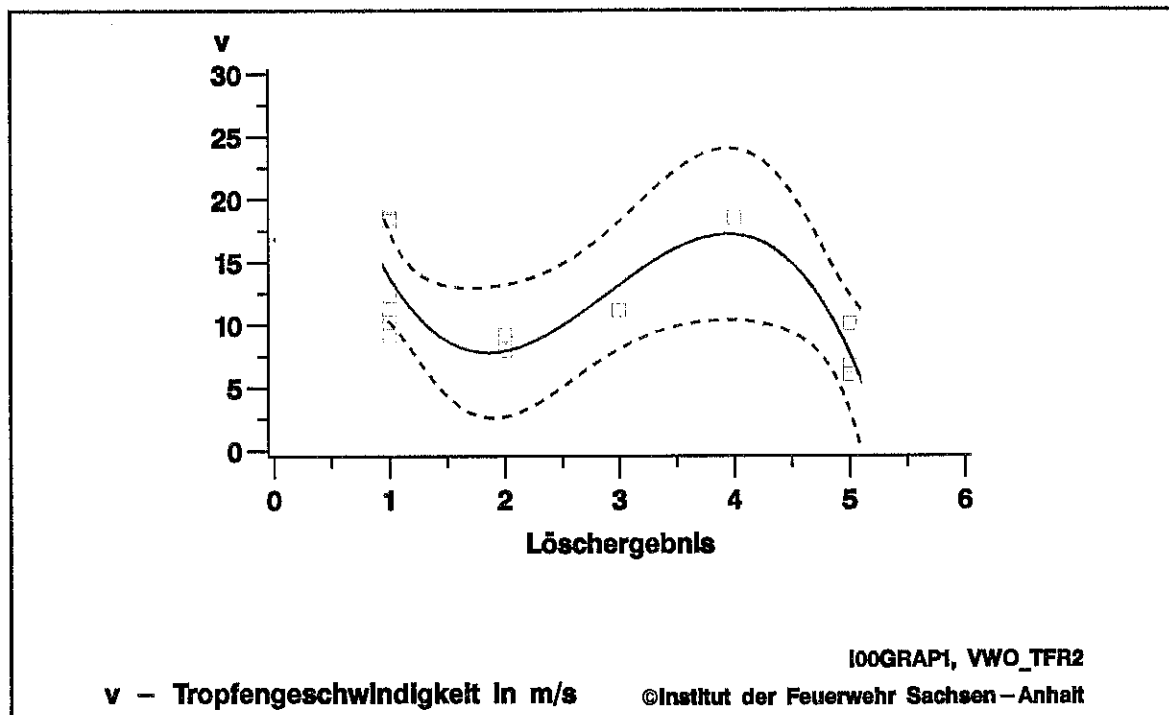


Bild 5.10: Löschergebnisse und mittlere Tropfengeschwindigkeiten für die Versuche bei hin- und herbewegter Holzkrippe

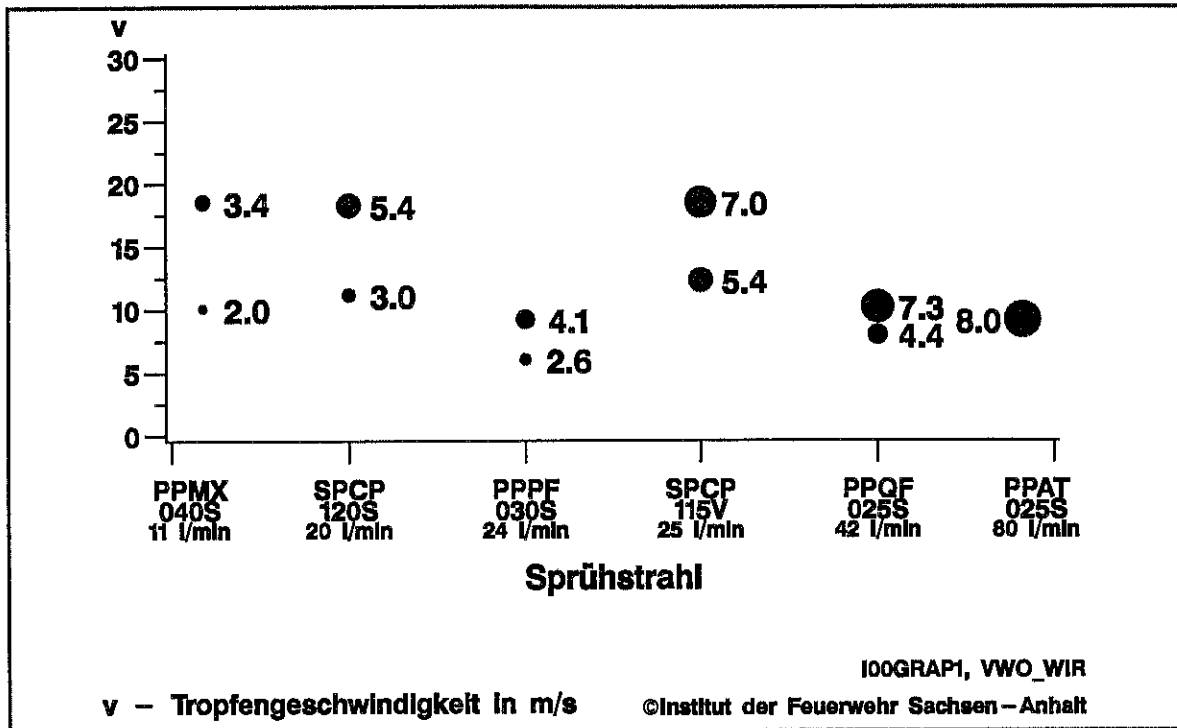


Bild 5.11: Eindringtiefen für die Versuche bei stehender Holzkrippe in Abhängigkeit von der mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen Sprühstrahlen

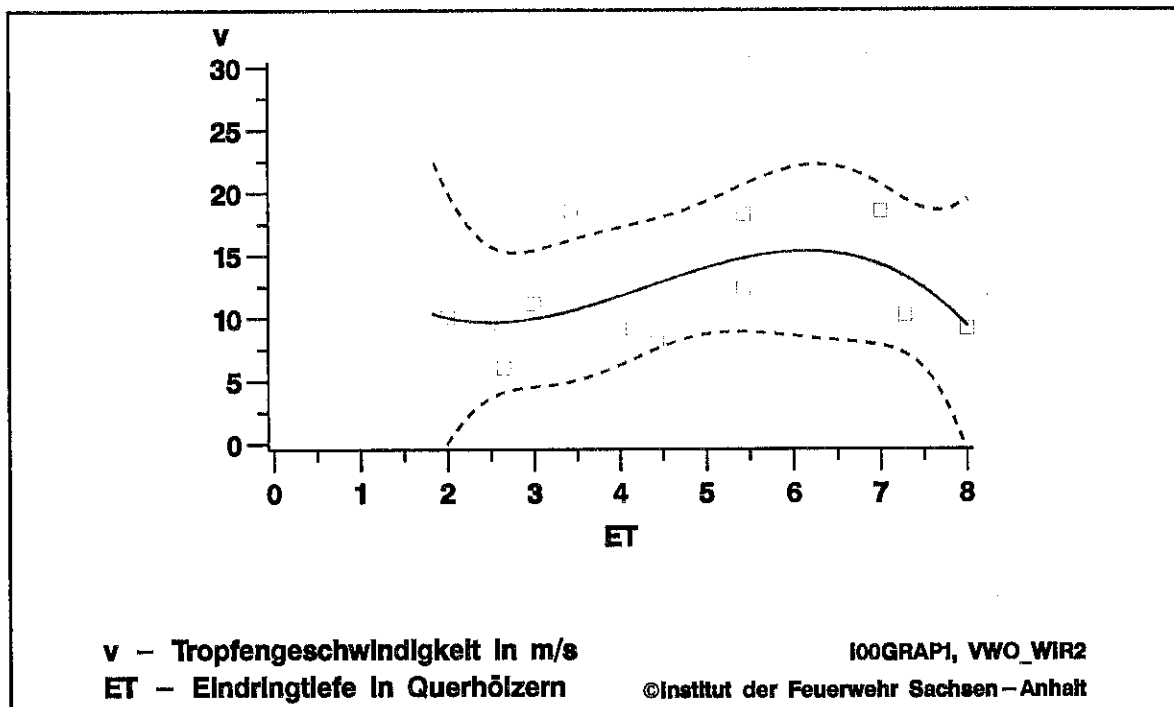


Bild 5.12: Eindringtiefen und mittlere Tropfengeschwindigkeiten für die Versuche bei stehender Holzkrippe

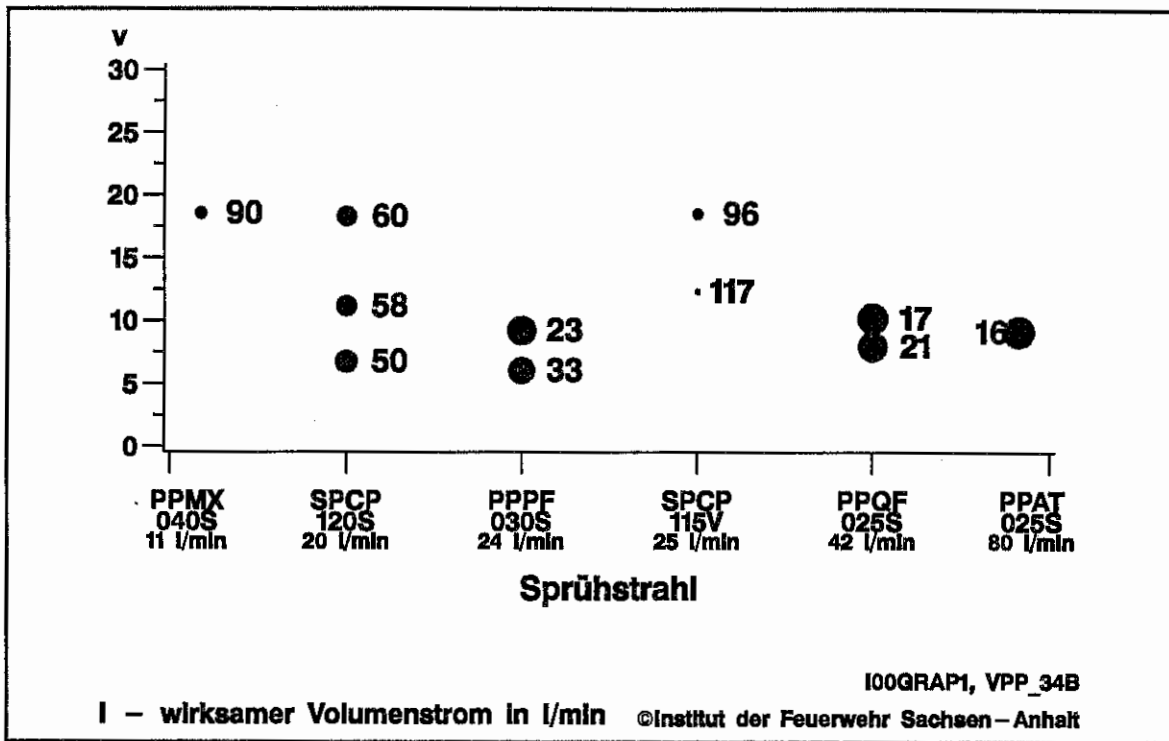


Bild 5.13: Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 34B in Abhängigkeit von der mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen Sprühstrahlen

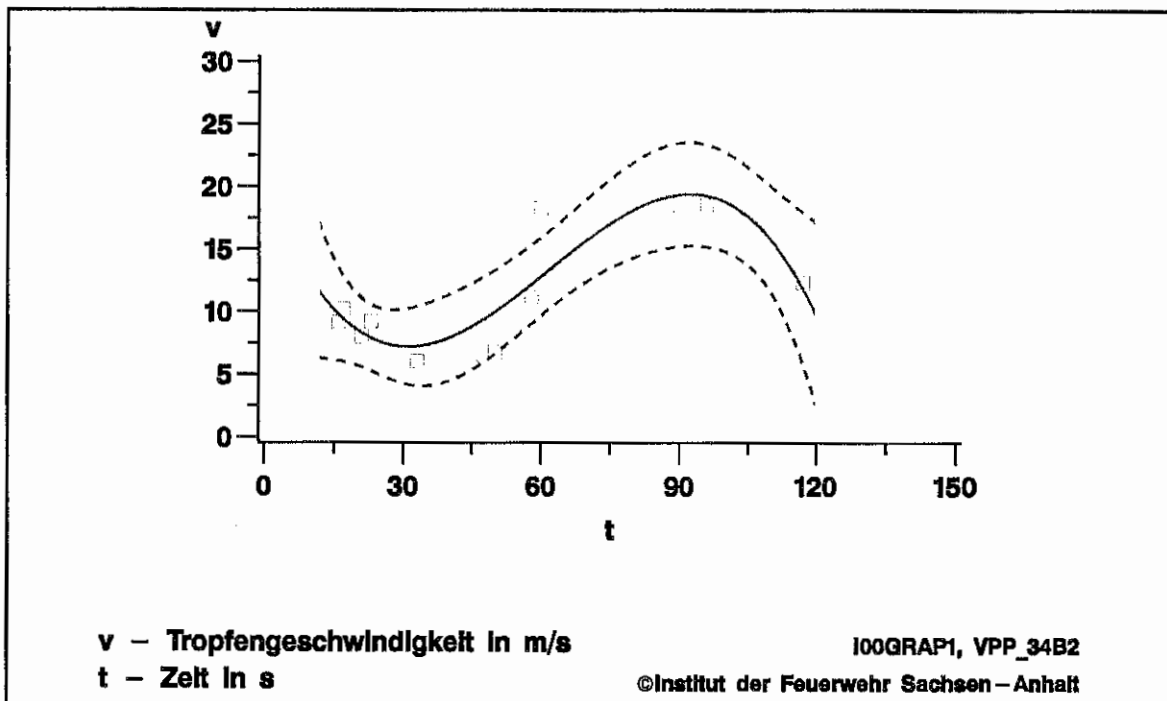


Bild 5.14: Löschzeiten und mittlere Tropfengeschwindigkeiten beim Polypropylenbrandobjekt 34B



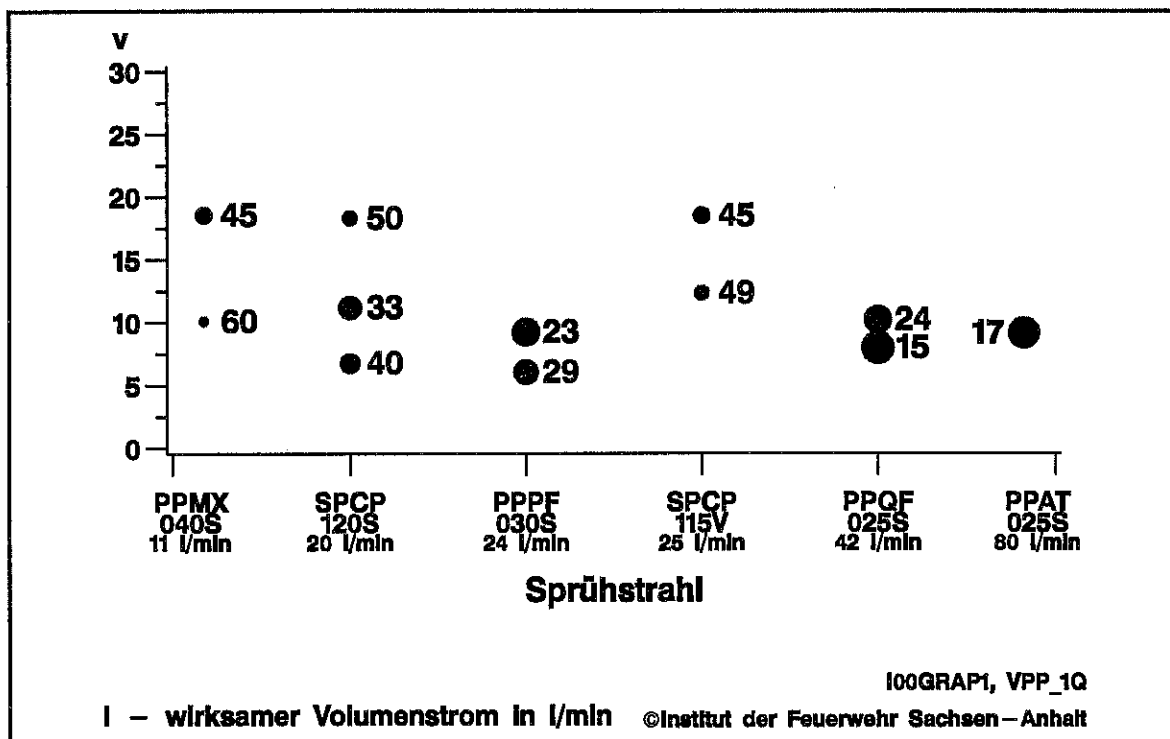


Bild 5.15: Löschzeiten beim Polypropylenbrandobjekt 1Q in Abhängigkeit von der mittleren Tropfengeschwindigkeit für die einzelnen Sprühstrahlen

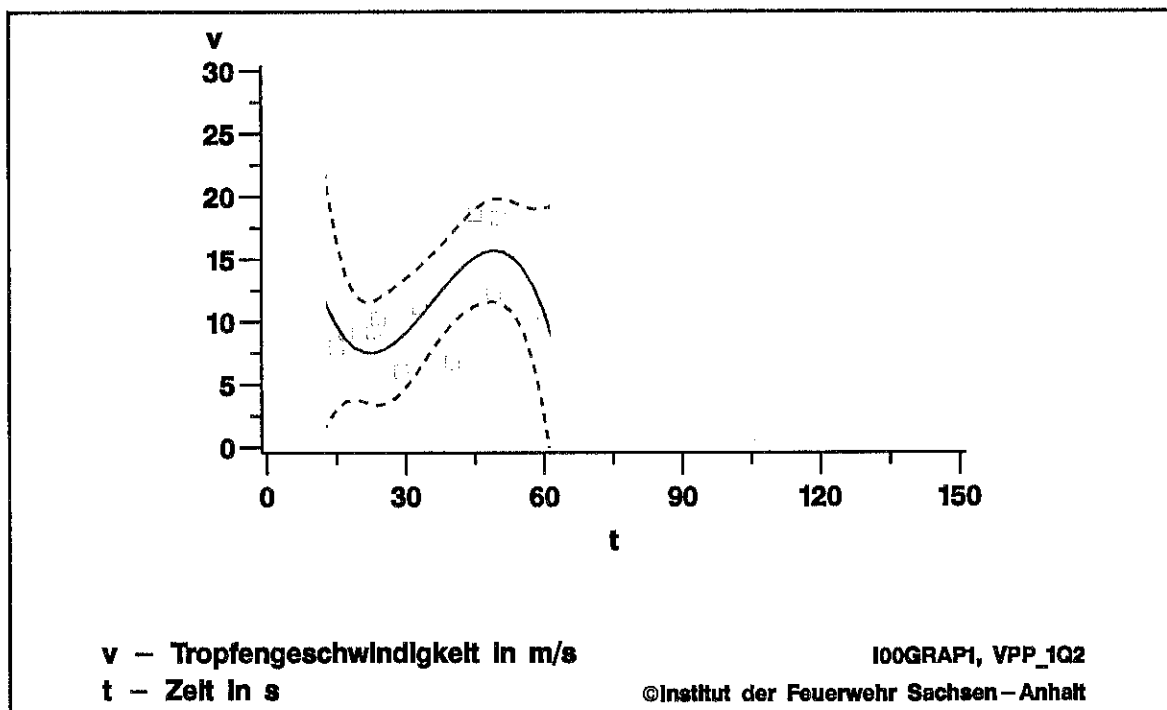


Bild 5.16: Löschzeiten und mittlere Tropfengeschwindigkeiten beim Polypropylenbrandobjekt 1Q

## **6 BEWERTUNG DES MOBILEN HOCHDRUCKLÖSCHENS**

Die Diskussion im Zusammenhang mit mobilen Hochdrucklöschverfahren wurde und wird zum Teil emotional geführt. Die Ursachen liegen sicher auch in einer allgemeinen Unsicherheit bei der Bewertung der Verfahren aufgrund der vielen Einflussgrößen. Eine einfache Antwort „gut“ oder „schlecht“ kann nicht gegeben werden, weil stets die konkrete Einsatzsituation zu berücksichtigen ist.

Aus diesem Grund werden im ersten Abschnitt zunächst kurz allgemeine Aspekte unabhängig von der mobilen Hochdrucktechnik zusammengestellt, die bei jeder Beschaffung und beim Einsatz von Löschtechnik zu berücksichtigen sind. Diese gelten jedoch auch für die Hochdrucktechnik. Daraus werden allgemeine Schlussfolgerungen gezogen und begründet.

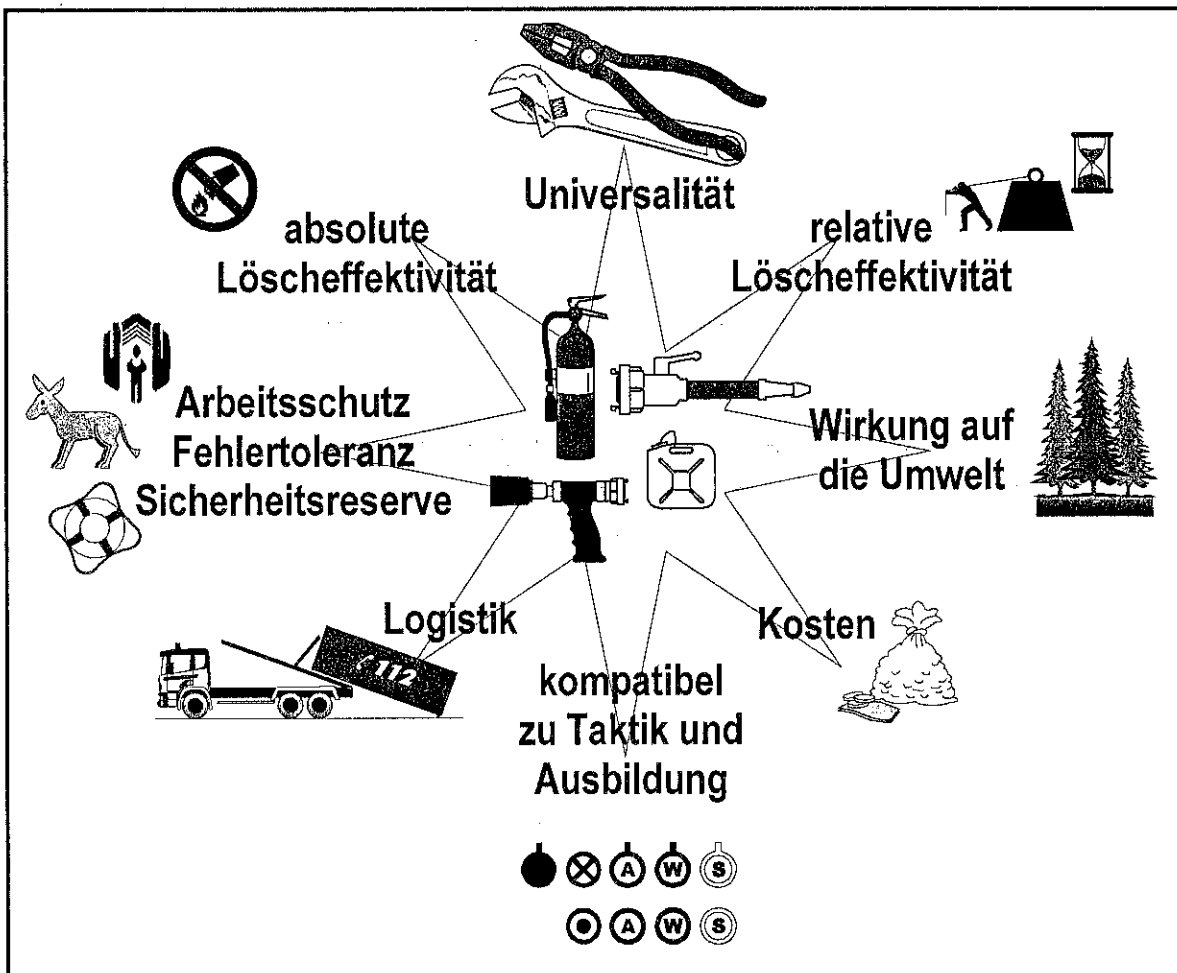
Im zweiten Abschnitt werden Unterschiede beim Einsatz von stationärer und mobiler Hochdrucklöschtechnik behandelt. Anschließend werden auch unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse Kriterien für die mobile Hochdrucklöschtechnik abgeleitet.

Im vorletzten Abschnitt werden zur Verdeutlichung der Einsatzmöglichkeiten Beispiele genannt. Zum Schluss wird kurz auf Vorteile in der Handhabung sowie auf Erfordernisse der Ausbildung eingegangen.

### **6.1 Aspekte der Beschaffung und dem Einsatz von Löschtechnik**

Zunächst sind vor jeder Beschaffung eines Löschgerätes auch die im Bild 6.1 dargestellten verschiedenen Aspekte zu berücksichtigen. Sie sollen hier nicht vollständig behandelt werden. Neben der in der Unterschrift zum Bild 6.1 angegebenen Literaturstelle wird ergänzend auch auf [de Vries 00, de Vries 00b] verwiesen. Beim Neuerwerb oder dem Ersatz von Löschtechnik werden häufig die Fragen der Beschaffungskosten in den Vordergrund gestellt. Damit im Zusammenhang stehende Folgekosten und logistische Probleme werden meist jedoch unterschätzt. Das betrifft unter anderem:

- ◆ Die Beschaffung eines neuen Gerätes ist nur sinnvoll, wenn die Einsatzkräfte an dieser Technik umfassend ausgebildet werden. Dazu gehört auch das Wissen um **die Möglichkeiten und vor allem um die Grenzen** dieser Technik im Einsatz. Dies kann mit einer „Einweisung“ allein nicht vermittelt werden. Gerade bei speziellen Löschverfahren und -techniken ist eine gründliche Ausbildung mit abgeschlossener praktischer Übung erforderlich. Auf dieses generelle Problem geht auch [Cimolino 98] ein. Nicht die Technik ist das Problem, sondern die Ausbildung.



**Bild 6.1:** Bei Beschaffungen zu berücksichtigende Faktoren [de Vries 01]

- ◆ Eine derartige Beschaffung muss auch aus dem bisherigen Einsatzgeschehen bzw. den im Ausrückebereich der betreffenden Feuerwehr zu schützenden Objekten begründbar sein. Wird eine Technik nicht im täglichen Einsatzgeschehen genutzt, so werden auch Fertigkeiten im Umgang mit der Technik nicht entsprechend entwickelt. Dem kann dann nur durch ständiges Training entgegengewirkt werden. Dies erfordert, abgesehen von den

Kosten, auch die ständige Motivation der Einsatzkräfte. Wird ein Gerät lange nicht eingesetzt, kann man sich der Frage „Brauchen wir das überhaupt?“ nicht auf Dauer entziehen, schließlich fallen zumindest Wartungskosten ständig an.

- ◆ Ferner ist zu bedenken, dass das Löschen für die Feuerwehren nur eine neben vielen weiteren Aufgaben ist. Auch bei anderen Einsatzarten kommt Technik zum Einsatz, die beherrscht werden muss. Aus diesem Grund sollte neue Technik in die vorhandene Logistik der Feuerwehr passen.

## 6.2 Einsatzbedingungen bei Bränden

Nach den allgemeinen Bemerkungen zur Frage der Beschaffung, werden nun einige Einsatzbedingungen zusammengestellt, die bei der Formulierung für Kriterien an mobile Hochdrucklöschtechnik ebenfalls zu beachten sind.

Die Anwendungen von Wassernebeln haben auf Grund ihrer Eigenschaften bei stationären Löschanlagen zugenommen. Ein Grund dafür ist, dass mit vergleichsweise wenig Wasser bei bekannter Geometrie und bekannten Brandstoffen schon in der Entstehungsphase von Bränden sehr effektiv gelöscht bzw. eine weitere Ausbreitung unterdrückt werden kann. Dies wird in Verbindung mit einer modernen Brandfrüherkennung technisch auch realisiert.

Im mobilen Bereich werden ebenfalls Löscheräte angeboten, deren Sprühstrahlen in die Kategorie der Wassernebel einzuordnen sind. Auch bei den in diesem Vorhaben eingesetzten Sprühstrahlen handelt es sich vorwiegend um Wassernebel (s. Abschnitt 4.3). Dennoch gibt es wesentliche Unterschiede im Einsatz von Wassernebeln in stationären Anlagen und bei der mobilen Brandbekämpfung. Auf einige Fragen gehen in diesem Zusammenhang auch [Buckley et al. 00, Vaari 00] ein.

Der Feuerwehreinsatz bei Bränden ist unter anderem durch folgende Punkte charakterisiert:

- ◆ Im Unterschied zu stationären Anlagen, die in der Entstehungsphase des Brandes aktiviert werden können, kommt die Feuerwehr meist erst in einer dann bereits fortgeschrittenen Brandphase zum Einsatz (vgl. auch Abschnitt 3.1). Folgende Zeitabschnitte werden durchlaufen:

### **Brandentstehung**

- Zeit bis zur Branderkennung (**stationäre Löschanlage kann aktiviert werden!**)
- Zeit für die Brandmeldung bzw. Meldezeit
- Alarmierungszeit
- Ausrückezeit
- Anmarschzeit
- Erkundungszeit
- Entwicklungszeit     **(Feuerwehr beginnt mit Brandbekämpfung!).**

Ist keine Brandmeldeanlage vorhanden, so kann keine Aussage zur Zeitdauer von der Entstehung bis zur Branderkennung bzw. zum Ausmaß der Brandentwicklung getroffen werden. Die Zeitspanne von der Meldung bis zum Eintreffen der Feuerwehr am Einsatzort ist in den Bundesländern unterschiedlich geregelt. In Sachsen-Anhalt soll „Ausrückezeit + Anmarschzeit“ den Wert von 12 *min* nicht überschreiten [BrSchG 94].

- ◆ Bei der Alarmierung der Feuerwehr sind die konkreten Bedingungen zum Brandobjekt dem zuständigen Einsatzleiter in der Regel nicht bekannt (Brandstoff, Geometrie des Raumes, Ventilationsverhältnisse, ...). Auch nach der Lageerkundung stehen noch nicht alle Informationen z. B. zum Brandstoff und zur Brandlast zur Verfügung.
- ◆ Die Sichtverhältnisse sind meist stark beeinträchtigt. Oft kann der Brandherd nicht genau eingesehen werden. Gegenstände oder andere Hindernisse, die Sprüschatten bilden, werden nicht immer erkannt. Aus diesen Gründen ist in derartigen Fällen eine präzise Strahlrohrführung nicht immer zu gewährleisten.

### 6.3 Kriterien für den Einsatz mobiler Hochdrucklöschtechnik

Im zweiten Kapitel wurden einige Parameter von mobilen Hochdrucklöschgeräten genannt. Zwei Sachverhalte seien an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben, da sie im Folgenden zu berücksichtigen sind:

- ◆ Hochdrucklöschgeräte verwenden Druckschläuche konstanter Länge. Während des Einsatzes können diese nicht verlängert werden. Gebräuchliche Längen sind 30 m bis 80 m.
- ◆ Die in einem Tank mitgeführte Wassermenge liegt meist bei 100 l bis 200 l. Prinzipiell können die Tanks im laufenden Betrieb nachgefüllt werden.

Aus den bisher genannten Bedingungen und aus den durchgeführten Versuchen lassen sich zunächst folgende Kriterien für die Brandbekämpfung ableiten:

- ◆ Das Löschgerät muss relativ dicht an den Brand herangeführt werden können, da die Schlauchlänge begrenzt ist. Bei Hochdrucklöschgeräten mit geringem Volumenstrom muss der Strahlrohrführer bis auf wenige Meter an den Brand heran können. Bei den Holzkrippenbränden war bei einigen Sprühstrahlen schon bei Entfernungen über 4 m das Löschergebnis nicht mehr befriedigend (vgl. z. B. Bild 4.14).
- ◆ Der Brandherd muss eingesehen werden können, da in Anbetracht des geringen Volumenstroms der Sprühstrahl genau geführt werden muss. Größere Hindernisse, die Sprüschatten darstellen und nicht umgangen werden können, stellen den Löscherfolg generell in Frage. Bei den Versuchen wurden die Strahlrohre vor dem Zünden so eingespannt, dass der Sprühstrahl das Brandobjekt an der zugewandten Seite möglichst vollständig überstreicht.

Mit Bezug auf den Sprühstrahl und den geförderten Volumenstrom kann festgehalten werden:

- ◆ Die Umfrage (vgl. Abschnitt 3.1) ergab, dass sich die Schnellangriffseinrichtungen zur Bekämpfung von kleineren Bränden (Wohnungsbrände, Laubenbrände, Kfz-Brände)

eigenen. Es kommt dabei in Abhängigkeit von den Betriebsparametern ein Volumenstrom von über 100 *l/min* Löschwasser zur Anwendung.

- ◆ Um Aussagen über erforderliche Löschwasservolumenströme zu begründen, wurden neben den Brandversuchen auch Sprühversuche durchgeführt, die das tatsächlich auf das Brandobjekt auftreffende Wasser (hier als wirksamer Volumenstrom bezeichnet) ermitteln. Betrachtet man die Bilder 5.2 und 5.4, so kann festgehalten werden, dass bei den Holzkrippen oberhalb von 10 *l/min* der Löscherfolg 3 bei hin- und herbewegter Krippe und die Eindringtiefe 5 bei stehender Krippe immer erreicht wurden. Die Löschphase 3 trat bei der drehenden Krippe in diesen Fällen stets innerhalb von 5 *min* Löschzeit ein, d. h. es brannte nur noch im Krippeninneren. Bei der hin- und herbewegten Krippe 8A wurden alle Seitenflächen direkt vom Sprühstrahl erreicht. Die Summe der vier Seitenflächen ist ca. 1.5 *m*<sup>2</sup> groß. Bei der stehenden Krippe wird direkt nur die dem Sprühstrahl zugewandte kleine Seitenfläche erreicht, das sind knapp 0.3 *m*<sup>2</sup>. Da beide Fälle Grenzsituationen darstellen, sollte bei glutbildenden Stoffen in einer derartigen Anordnung eine wirksame Volumenstromdichte von 8 *l/(min\*m*<sup>2</sup>) gefordert werden. Diese sollte auch mindestens über einen Zeitraum von 10 *min* zur Verfügung stehen, da die Holzkrippen nach 5 *min* im Innern noch nicht vollständig gelöscht waren.
- ◆ Bei Polypropylenbränden wurden für beide Brandobjekte Löschzeiten  $t \leq 1 \text{ min}$  erreicht, wenn der wirksame Volumenstrom 2 *l/min* betrug. Beide Brandwannen haben eine Fläche von ca. 1 *m*<sup>2</sup>, so dass für die Volumenstromdichte 2 *l/(min\*m*<sup>2</sup>) für diesen Anwendungsfall ausreichend ist. Bei den Versuchsbränden brannte das Polypropylen auf ebenen Flächen. Völlig anders gestaltet sich beispielsweise das Löschen von übereinandergestapelten Polypropylen-Kleinladungsträgern. Bedingt durch vorhandene Hohlräume ist hier ein Löschen nur mit Auseinanderreißen des Stapels und anschließendem Ablöschen möglich.
- ◆ Die Sprühstrahlen sollten um die Strahlachse annähernd rotationssymmetrisch sein. Das betrifft sowohl das Geschwindigkeitsprofil als auch die Volumenstromdichte. Beispiele für eine gute Verteilung der Dichte zeigen die Bildern 4.52 und 4.54. Bei starken Abweichungen wirkt sich das nachteilig auf das Löschergebnis aus.

**Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die genannten Volumenstromdichten nicht ohne weiteres für eine lineare Extrapolation auf große Brandflächen geeignet sind.** Sie gelten zunächst für diese Brandobjekte und für diese Bedingungen.

**Ferner ist zu berücksichtigen, dass es beim Einsatz auch praktisch gelingen muss, dass Wasser in der erforderlichen Menge auf das Brandobjekt „wirksam“ zu verteilen.** Allein die Bereitstellung des Löschwassers im erforderlichen Volumenstrom reicht nicht. Bei den Versuchen konnte diese Verteilung wegen des geringen räumlichen Ausmaßes der Brandobjekte problemlos realisiert werden.

Auf der Grundlage der in diesem Kapitel zusammengestellten Sachverhalte werden im nächsten Kapitel in der Zusammenfassung drei Schlussfolgerungen gezogen, die aus diesem Grund hier nicht angegeben werden.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass gegenwärtig eine Deutsche Norm für Hohlstrahlrohre erarbeitet wird. Dieser Strahlrohrtyp steht sowohl im Normal- als auch im Hochdruckbereich zur Verfügung. Der Vorteil besteht darin, dass man je nach Ausführung bei kleinen Strahlrohren in mehreren Stufen z. B. mit 20 *l/min* beginnend auf ca. 150 *l/min* gehen kann, ohne den Löschangriff zu unterbrechen. Andere C-Hohlstrahlrohre gestatten z. B. die Regulierung des Volumenstroms von 100 *l/min* bis ca. 450 *l/min*. Die Produktvielfalt ist hier sehr groß. Es können bei sachgemäßer Anwendung und entsprechendem Training Löschwasserschäden gering gehalten werden („trockene Brandstelle“), wobei gleichzeitig Reserven im Löschmittelvolumenstrom verfügbar sind. Die Hohlstrahlrohre sind deshalb zu empfehlen und als Alternative zur mobilen Hochdrucklöschtechnik auf Löschfahrzeugen der Feuerwehr in Betracht zu ziehen.

## **6.4 Beispiele zum Einsatz von mobilen Hochdrucklöschverfahren**

Auf einen Anwendungsfall, der aus der Sicht des Autors interessant ist, sei an dieser Stelle etwas näher eingegangen. Bei einem schweren Verkehrsunfall in Essen verbrannten 4 PKW-Insassen. Die Rettungswagenbesatzung konnte den eingeklemmten Opfern nicht helfen. Ausgehend von diesem Ereignis entwickelte die Berufsfeuerwehr Essen ein Löschrettungsfahrzeug (LRF). Es wurde so konzipiert, dass es uneingeschränkt im



Rettungsdienst eingesetzt werden kann und darüber hinaus auch die Aufgaben eines Vorausslösch- und Hilfeleistungsfahrzeuges übernimmt. Ausgestattet ist es mit einer Hochdrucklöscheinheit. Das Fahrzeug befindet sich in der Erprobungsphase. Erste positive Einsatzerfahrungen liegen vor. Es sei angemerkt, dass nicht vorgesehen ist, dass das LRF die Rettungswagen (RTW) generell ersetzen wird. In Essen wird der Rettungsdienst mit 87% zum überwiegenden Teil durch die Berufsfeuerwehr gefahren. Somit ist auf dem LRF auch die Feuerwehrkompetenz zur Bekämpfung von Kleinbränden gesichert. Im Brandfall werden durch den Einsatzleitreechner im Additionsverfahren automatisch von der nächstgelegenen Wache die erforderlichen Kräfte und Mittel hinzugezogen, sodass es zu keiner personellen Schwächung bei der Brandbekämpfung kommt (s. [Prochnow 00, Anonym 00]).

Außerdem kann der Einsatz von mobilen Hochdrucklöschgeräten in Form leistungsfähiger „Feuerlöcher“ auch in anderen Bereichen durchaus sinnvoll sein. Das können betriebliche Produktionsanlagen, Lager und anderes sein. Ausgebildetes Personal kann unter Umständen kritische Situationen entschärfen. In keinem Fall sollten derartige Aktivitäten die Alarmierung der Feuerwehr verzögern. Der Einsatzfall „Brand vor Ankunft der Feuerwehr gelöscht“ wird sicher von allen begrüßt.

Auf den möglichen Einsatz im Sinn einer Ergänzungsausstattung auf Löschfahrzeugen wurde bereits eingegangen.

## **6.5 Ergänzende Bemerkungen**

Auf zwei Sachverhalte sei noch hingewiesen:

- ◆ Ist die Anwendung von Hochdrucklöscheinheiten im Einsatzfall geeignet, so sprechen neben den in diesem Kapitel bereits genannten Sachverhalten noch weitere Fakten dafür:
  - Die Einsatzkräfte werden körperlich entlastet. Die Schläuche sind leicht und können bequem von der Haspel gezogen werden.
  - Der Löschangriff ist vergleichsweise schnell aufgebaut.

- ◆ Häufig ist ein Grund für die Ablehnung der mobilen Hochdrucklöschtechnik der, dass angenommen wird, dass eine zu große Verbrühungsgefahr für die Einsatzkräfte durch den schnell verdampfenden Wasserdampf gegeben ist. Dem Argument möchte der Autor nicht zustimmen. Es wird auch von den Feuerwehren, die Hochdrucklöschverfahren schon über einen längeren Zeitraum einsetzen, nicht bestätigt. Die Ursachen liegen bei derartigen Unfällen meist schon in der nicht genügenden Ausbildung und der Unterschätzung des Brandszenariums, das nicht mehr der Größe entspricht, die durch das Löschverfahren gut beherrschbar ist. Vorsicht ist vor allem in geschlossenen Räumen geboten, wo der sich schnell bildende Wasserdampf nicht nach oben entweichen kann. Vor dem Einsatz von mobilen Hochdrucklöschsystemen hat auch die entsprechende taktische Ausbildung zu erfolgen.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG

Im Forschungsvorhaben wurden verschiedene Sprühstrahlen untersucht, die durch mobile Hochdrucklöschtechnik erzeugt wurden. Bei den Versuchen wurde nur das Löschmittel Wasser ohne Löschmittelzusätze verwendet.

Nach der Diskussion der Löschwirkung des Wassers wurden Gründe für die Verringerung des Löschmitteleinsatzes genannt, die auch zur Entwicklung der Hochdrucklöschtechnik für den Bereich der mobilen Brandbekämpfung führten. Einige in der Praxis eingesetzte Verfahren und technische Parameter wurden zusammengestellt.

Im Versuchsprogramm wurden 7 Sprühstrahlen berücksichtigt. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

### ◆ **Brand- und Löschversuche auf dem AFF**

Als Brandobjekte wurden stellvertretend für Brände glutbildender Brandstoffe Holzkrippenbrandobjekte und für schmelzende Stoffe Polypropylenbrände gewählt. Das Löschen von Flüssigkeitsbränden erfordert bei der mobilen Brandbekämpfung den Einsatz von Löschmittelzusätzen. Aus diesem Grund wurden sie hier nicht betrachtet. Die Löschversuche wurden auf Video aufgezeichnet. Während der Versuche wurden Temperaturen sowie der Löschwasserdruck am Strahlrohr aufgezeichnet. In Vorversuchen wurden Abbrandraten bestimmt und die Wärmestrahlung in verschiedenen Entfernungen gemessen.

### ◆ **Sprühversuche auf dem AFF**

Es wurde das tatsächlich auf das Brandobjekt auftreffende Löschwasser bestimmt (wirksamer Löschwasservolumenstrom).

### ◆ **Sprühstrahlvermessung mit dem PDA**

Im Nasslabor des IdF LSA wurden mit dem PDA die Tropfendurchmesser- und -geschwindigkeitsverteilungen bestimmt.

◆ **Messung der Massenstromdichte**

Mit einer am IdF LSA konzipierten Sonde wurde die Massenstromdichte in den Sprühstrahlen bestimmt.

Die Versuchsplätze können für weitere Versuchsserien genutzt werden. Der aktuelle Stand der Versuchsaufbauten ist in den Anhängen beschrieben.

Die Versuchsergebnisse wurden vorwiegend als Grafiken ausgewertet. Schlussfolgerungen wurden sowohl aus Literaturlauswertungen als auch unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse gezogen. Die im vorigen Kapitel genannten Sachverhalte führen zu folgenden Aussagen:

- ◆ Die Sprühstrahlen von mobilen Hochdrucklöschverfahren, die hier betrachtet wurden, haben Grenzen. Sie sind effektiv zum Löschen kleiner Brände und von Entstehungsbränden geeignet, jedoch muss das Brandszenarium klar eingeschätzt werden können.
- ◆ Ist die Situation nicht eindeutig zu bewerten, z. B. schlechte Sichtverhältnisse wegen starker Rauchentwicklung und zügig voranschreitende Brandausbreitung, so sollte der Löschangriff konventionell vorgenommen werden. Das Risiko der Eskalation des Brandgeschehens darf nicht eingegangen werden.
- ◆ Mobile Hochdrucklöschverfahren der hier betrachteten Größenordnung können als ergänzendes Verfahren eingesetzt werden. Ein Löschfahrzeug der Feuerwehr sollte sich jedoch nicht auf diese Löschtechnik allein beschränken.

## LITERATUR

### [Anonym 00]

Anonym: Das Löschrettungsfahrzeug (LRF) im neuen Löschzugkonzept der BF Essen. Feuerwehr Essen, Jahresbericht 1999, 2000, 16-19

### [Anonym 95]

Anonym: Großversuch mit Sprenglöschverfahren. 112 Magazin der Feuerwehr, 1995, 10, 564-566

### [AUER 98]

Anonym: Mit Hochdruck Brände bekämpfen - schnell und effektiv. brandschutz / Deutsche Feuerwehrzeitung, 1998, 12, 997

### [Babrauskas 92]

Babrauskas, Vytenius: Burning Rates. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. NFPA, Quincy and SFPE, Boston, 1992, Section 2, Chapter 1, 2\_1 - 2\_15

### [Beyer et al. 95]

Beyer, O.; Hackel, H.; Pieper, V.; Tiedge, J.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995

### [BIG 99]

BIG: Mobiler Großventilator zur Überdruckbelüftung in Verkehrstunneln und anderen großvolumigen Objekten - Test-Reports. Bericht der Firma Brandschutz-Innovation Jürgen Bader, 1999

### [Bill et al. 97]

Bill, R. G.; Hansen, R. L.; Richards, K.: Fine-Spray (Water Mist) Protection of Shipboard Engine Rooms. Fire Safety Journal, 29, 1997, 317-336

### [Brauer 71]

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

**[Brockhaus 86-94]**

Brockhaus Enzyklopädie in vierundzwanzig Bänden. Neunzehnte Auflage. F. A. Brockhaus, Mannheim, 1986-1994

**[BrSchG 94]**

Brandschutz- und Hilfeleistungsgesetz des Landes Sachsen-Anhalt (Brandschutzgesetz - BrSchG), vom 6. Juli 1994 geändert durch Gesetz vom 29. März 2001. GVBl. LSA Nr. 14/2001, Bekanntmachung der Neufassung des Brandschutzgesetzes GVBl. LSA Nr. 22/2001

**[Buckley et al. 00]**

Buckley, Greg; Bradhorn, Wayne; Edwards, Jarrod; Marchant, Roger; Terry, Paul; Wise, Stephen: The Fire Brigade Intervention Model. Fire Safety Science-Proceedings of the Sixth International Symposium, University of Poitiers, France, from 5-9 July 1999, 2000, 183-194

**[Bürgel et al. 99]**

Bürgel, Hans-Gerhard; Starke, Horst: Development trends in fire safety techniques - ultrafine spray fire extinguishing systems as a measure to reduce risks in nuclear power plants. Fire&Safety, 08.-10.02.1999, Frankfurt/Main, 1999, 291-299

**[Callies 00]**

Callies, Oliver: Höchstdruck - Wassernebellöschsysteme im Einsatz bei den Feuerwehren. VDMA Informationsveranstaltung "Wasserhydraulik" des Fachverbandes Fluidtechnik im VDMA, Frankfurt, 18. Oktober 2000

**[Chow et al. 98]**

Chow, W. K.; Yin, Rumin: Review of Droplet Size Distributions for a Water Spray. J. Applied Fire Science, 7, 1997-98, 195-205

**[Cimolino 98]**

Cimolino, Ulrich: Untersuchungen zur notwendigen Reform der Grund-Ausbildungsvorschriften (FwDV 3 und 4) der Feuerwehren. <http://www.kitzingen.de//ffw-wiesenbronn/cimoFwdv34.htm>, 1998

**[Covelli 93]**

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

**[Cronwright et al. 99]**

Cronwright, Hugh; Hume, Brett: Nozzles & Monitors. Fire & Rescue, 1999, July, 21-29

**[de Vries 00]**

de Vries, Holger: Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum - Technik und Taktik. Reihe: Einsatzpraxis. ecomed verlagsgesellschaft AG & CO. KG, Landsberg, 2000

**[de Vries 00a]**

de Vries, Holger: Strahlrohre - Technik und Taktik. Unser Brandschutz, 2000, 11, 12-16

**[de Vries 00b]**

de Vries, Holger: Untersuchungen zur Optimierung der Bekämpfung von Feststoffbränden mit Wasser und Schaum im mobilen Einsatz der Feuerwehren. Dissertation D 468, Bergische Universität GH Wuppertal

**[de Vries 01]**

de Vries, Holger: Ausbildungsfolien Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum (CD-ROM). Moderne Löschtechniken und -methoden, ecomed Verlag, Landsberg, 2001

**[DIN 51900, Teil 1]**

Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes, allgemeine Angaben Grundgeräte Grundverfahren., November 1989

**[DIN EN 1028, Teil 1]**

Feuerwehrrpumpen, Teil 1: Anforderungen an Feuerlöschkreiselpumpen mit Entlüftungseinrichtung, Deutsche Fassung prEN 1028-1:1993. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Juni 1993

**[DIN EN 3, Teil 1]**

Tragbare Feuerlöscher. Benennung, Funktionsdauer, Prüfung des Löschvermögens, Prüfobjekte der Brandklassen A und B. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Oktober 1990, 5 Seiten

**[Fachtagung 96]**

Fachtagung: Bahnbetriebsunfall mit Brandfolge und erheblicher Gefährdung der Umgebung - Gefahrgutunfall - Eisenbahn am 01. Juni 1996 in Schönebeck/Elbe. 11. und 12. September 1996, Heyrothsberge, 1996

**[Grabski 96]**

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

**[Grabski et al. 00]**

Grabski, Reinhard; Pleß, Georg; Thon, Werner; Mummert, Peter: Druckbelüftung im Hamburger Elbtunnel mit dem Turbo-Löcher. vfdB, 1999, 4, 151-158

**[Grabski et al. 01]**

Grabski, Reinhard; Starke, Horst: Fundamental Scientific Methods of Investigation about Water Mist for User's Guidance. International Water Mist Conference, Vienna, Austria, 04.-06. April, 2001

**[Grabski et al. 95]**

Grabski, Reinhard; Starke, Horst: Wasser - ein universelles Löschmittel dank neuer Technologien. 4. Wagner-Symposium "Zukunftsweisende Brandschutzkonzepte", 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 et al. 97]**

Grabski, Reinhard; Fiedler, Siegfried; Mehr, Horst; Starke, Horst: Vinylchlorid-Unfall in Schönebeck/Elbe - Analyse eines Eisenbahn-Gefahrgutunfalls. brandschutz/Deutsche Feuerwehrzeitung, 1997, 3, 127-134

**[Grant et al. 00]**

Grant, G.; Brenton, J.; Drysdale, D.: Fire suppression by water sprays. Progress in Emergency and Combustion Science, 26, 2000, 79-130

**[Grimsehl 88]**

Grimsehl, E.: Lehrbuch der Physik. Band 2 Elektrizitätslehre. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1988

**[Hähnel et al. 77]**

Hähnel, Erich (Herausgeber): Brandschutz Formeln und Tabellen. Staatsverlag der DDR, Berlin, 1977

**[Harvie et al. 99]**

Harvie, D. J. E.; Novozhilov, V.; Kent, J. H.; Fletcher, D. F.: An Experimental Study of Wood Crib Extinguishment by a Sprinkler Spray. Journal Applied Fire Science, 8, 1999, 4, 283-299

**[Haselhorst 98]**

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

**[HC10 94]**

Betriebsanleitung Verbrennungskalorimeter HC10. HAAKE Materialprüfgeräte, 1994

**[HNE 01]**

Online in Internet: [www.hne-gmbh](http://www.hne-gmbh) (Stand 26.09.2001).

**[Hochdrucklöschen 01]**

Richter, Sabine: Hochdrucklöschen (Hochdrucklöschverfahren, -einheiten, Impuls-, Sprenglöschverfahren, Hochdruckpumpen u. ä.). IdF Literaturrecherche Nr. 227, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2001

**[IFEX 01]**

Online in Internet: [www.ifextechnologies](http://www.ifextechnologies) (Stand 26.09.2001).

**[Jöhstadt 97]**

Anonym: Hochleistungslöschgerät - Effektiv im Einsatz (PF Pumpen und Feuerlöschtechnik GmbH, Jöhstadt). Unser Brandschutz, 1997, 12, 18

**[Kohlrausch 85]**

Kohlrausch, Friedrich: Praktische Physik, Band 1. B. G. Teubner, Stuttgart, 1985

**[Kubiza 88]**

Kubiza, Gerald: Der Schnellangriff mit Wasser. Feuerwehr, 1988, 4, 18-21

**[Lefebvre 89]**

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

**[Lexikon 01]**

Prendke, Wolf-Dieter; Schröder, Günter (Hrsg.): Lexikon der Feuerwehr. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart - Berlin - Köln, 2001

**[Mawhinney 93]**

Mawhinney, J. R.: Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures. Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, May 11-13, 1993, 291-302

**[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 94]**

Minimax: Hochdruck-Löschgerät HDL 250. Firmenprospekt, 1994

**[Morita et al. 99]**

Morita, Masahiro; Kikkawa, A.; Watanabe, Yosio: Oil Fire Extinguishment by Using Water Mist. Preprint, 1999, 1-9

**[Mugele et al. 51]**

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

**[Müller 91]**

Müller, Paul Heinz: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistik. Lexikon der Stochastik. Akademie Verlag, Berlin, 1991

**[Müller 96]**

Anonym: Tragbares Hochdrucklöschgerät mit 100-l-Wassertank der Brandschutztechnik Müller GmbH. brandschutz / Deutsche Feuerwehrzeitung, 1996, 12, 955

**[NISTIR 6088]**

Rebecca W. Portier; Richard D. Peacock; Paul A. Reneke: Data Structures for the Fire Data Management System, FDMS 2.0. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1997

**[Pleß 98]**

Pleß, Georg: Abbrandversuch Holzstapel: Versuchsprotokoll. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge (nicht veröffentlicht), 1998

**[Pleß et al. 93]**

Pleß, Georg; Herrmann, Hardy; Heinrich, Gert: Aufbau und Erprobung eines Abgas-Löschkomplexes auf Kettenfahrgestellen T 55. Abschlußbericht für den BMFT, Förderkennzeichen 13RG9115. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1993

**[POLY 00]**

Anonym: HD Wassernebel-Kanone. POLY Feuerlöschtechnik, Firmenprospekt, 2000, 6 Seiten

**[Polytec 95]**

Polytec: Aerometrics PDPA Operations Manual. Polytec GmbH, Waldbronn

**[Prochnow 00]**

Prochnow, Jörg: Retten und löschen neu entdeckt. Feuerwehr Magazin, 2000, 2, 52-55

**[Rao 73]**

Radhakrishna Rao, C.: Lineare statistische Methoden und ihre Anwendungen. Akademie-Verlag, Berlin, 1973

**[Röfer 01]**

Röfer, Ulrich: Wasser marsch. Mitteldetscher Verlag, Halle, 2001

**[Röfer 95]**

Röfer, Ulrich: Das haut(e) dem Faß den Boden aus - 1715: Die Greylsche Feuerlöschbombe. Feuerwehr in Sachsen-Anhalt , 1995, 8, 28

**[Rosenbauer 00]**

Anonym: Löschen mit Höchstdruck - neues aus dem Hause Rosenbauer: Ultra High Pressure System UHPS, universelle Schnellangriffshaspel. Die Österreichische Feuerwehr, 2000, 1, 20-21

**[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 00]**

SAS System under Microsoft Windows - Release 6.12. SAS Institute Inc., Cary, 2000

**[Schmitz 95]**

Anonym: Das neue TSF-W von Schmitz: "KTLF-FUTURA" - voller Einsatz. Feuerwehr in Sachsen-Anhalt , 1995, 6, 21

**[Schremmer 97]**

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

**[SS 1192:1985]**

Svensk Standard. Fire fighting equipment., 1986, 32 pages

**[Starke et al. 01]**

Starke, Horst; Grabski, Reinhard: Wassernebel als eine neue Variante des Löschmittels Wasser. Pozarni ochrana 2001, Ostrava, September 12 - 13, 2001, 393-405

**[Starke et al. 96]**

Starke, Horst; Wienecke, Friedrich; 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. 98]**

Starke, Horst; Wienecke, Friedrich; Grabski, Reinhard; Schmeißer, Regina: Fein verteiltes Wasser als Volumen- und Oberflächenlöschmittel, Teil II. Brandschutzforschung der Bundesländer - Bericht Nr. 113 - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1998

**[Starke et al. 98a]**

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

**[Starke et al. 99]**

Starke, Horst; Bürgel, Hans-Gerhard: Einsatz von Zweistoff-Löschanlagen zum Schutz von Einrichtungen. vfdb-Jahresfachtagung, 30.05.-02.06.1999, Saarbrücken, 1999, Tagungsband, 541-558

**[Starke et al. 99a]**

Starke, Horst; Wienecke, Friedrich: Löschen von Flüssigkeitsbränden als Entstehungsbrand in Lägern mit Hochdruck-Wassernebel. Im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, nicht öffentlich, 1999

**[Stiebeler et al. 72]**

Stiebeler, Erdmann; Bohn, Heinrich; Klug, Alfred; Ludewig, Siegfried; Weichert, Rolf; Wollburg, Fritz: Bau-Holz. Reihe: Friedrich-Tabellenbücher. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1972

**[Strieder 97]**

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

**[Stroppe 92]**

Stroppe, Heribert: Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften.  
Fachbuchverlag, Leipzig - Köln, 1992

**[Tropea 95]**

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

**[Vaari 00]**

Vaari, Jukka: Large-scale fire suppression with water mists in enclosures: experiment and modelling. vfdb Jahresfachtagung Stuttgart, 08.-12. Oktober, Tagungsband, 2000, 381-394

**[Vrtal 96]**

Vrtal, Jiri: Strahlrohre - Prüfungsergebnisse der technisch-taktischen Parameter - 1. Teil,  
Beilage (tschechisch). 150 Hori, 1996, 11, 51 Seiten

**[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

**[Wighus et al. 95]**

Wighus, Ragnar; Aune, Petter: Engineering Relations for Water Mist Fire Suppression  
Systems. Proceedings of the Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque,  
New Mexico, May 09-11, 1995, 397-409

**[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

**[ZUMRO 99]**

ZUMRO: Tunnel Hochleistungslüfter. Informationsmaterial der Firma ZUMRO RES

Q<sup>TM</sup>, 1999

## **ANHANG A SKIZZEN ZU DEN VERSUCHSAUFBAUTEN**

### **VERZEICHNIS DER BILDER**

|    |   |     |
|----|---|-----|
| A1 | Drauf- und Seitenansicht des Brandkanals des IdF LSA .....  | 112 |
| A2 | Lage des AFF im Brandkanal des IdF LSA .....  | 113 |
| A3 | Holzkrippe, Brandobjekt 13A nach [DIN EN 3, Teil 1] .....   | 114 |
| A4 | Formular für die Erfassung ausgewählter Parameter bei den Brandversuchen  | 115 |
| A5 | Formular zur Beschreibung des Brandobjekts nach Beendigung des<br>Löschversuchs am Beispiel der Holzkrippe 8A ..... | 116 |



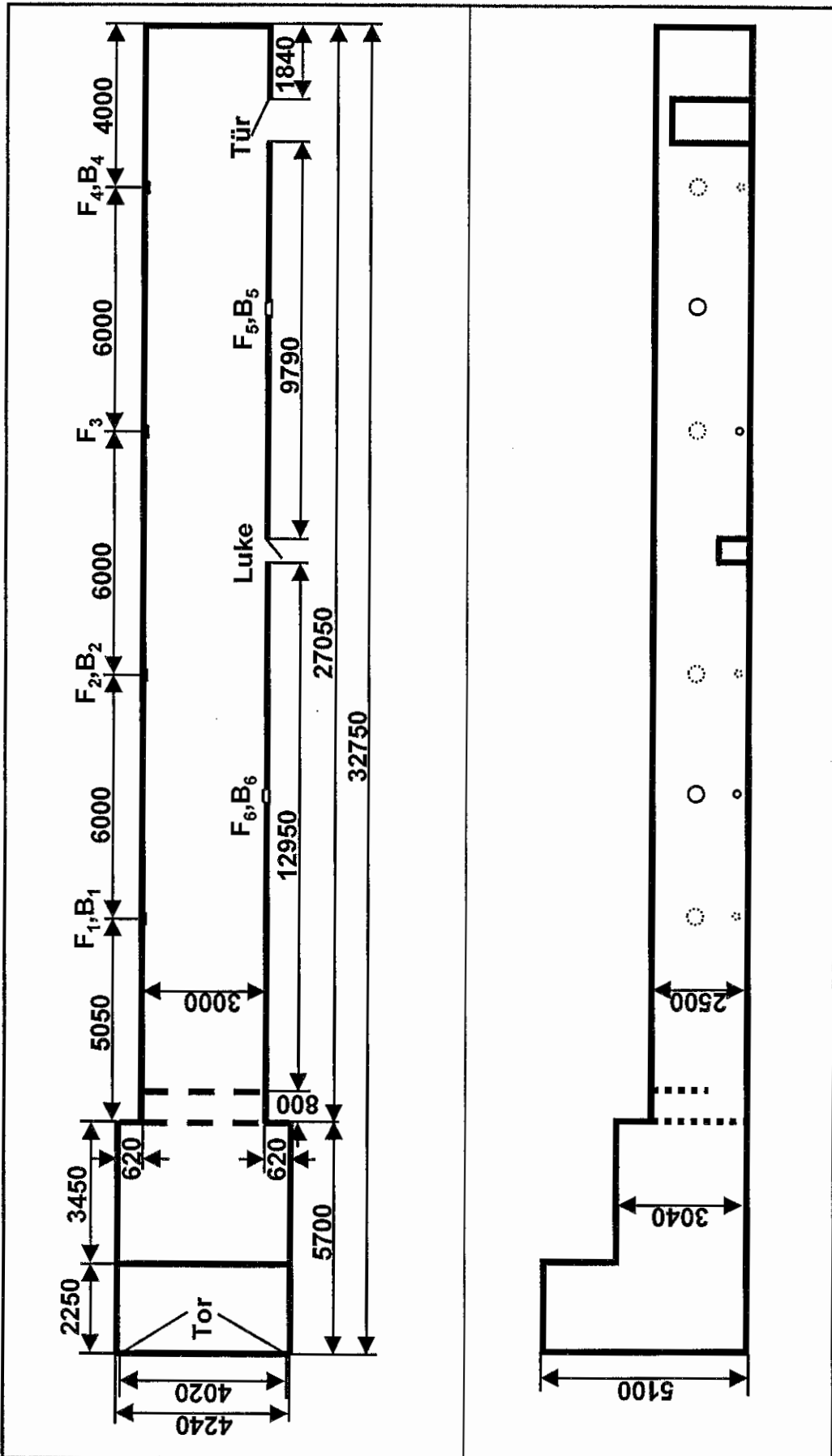
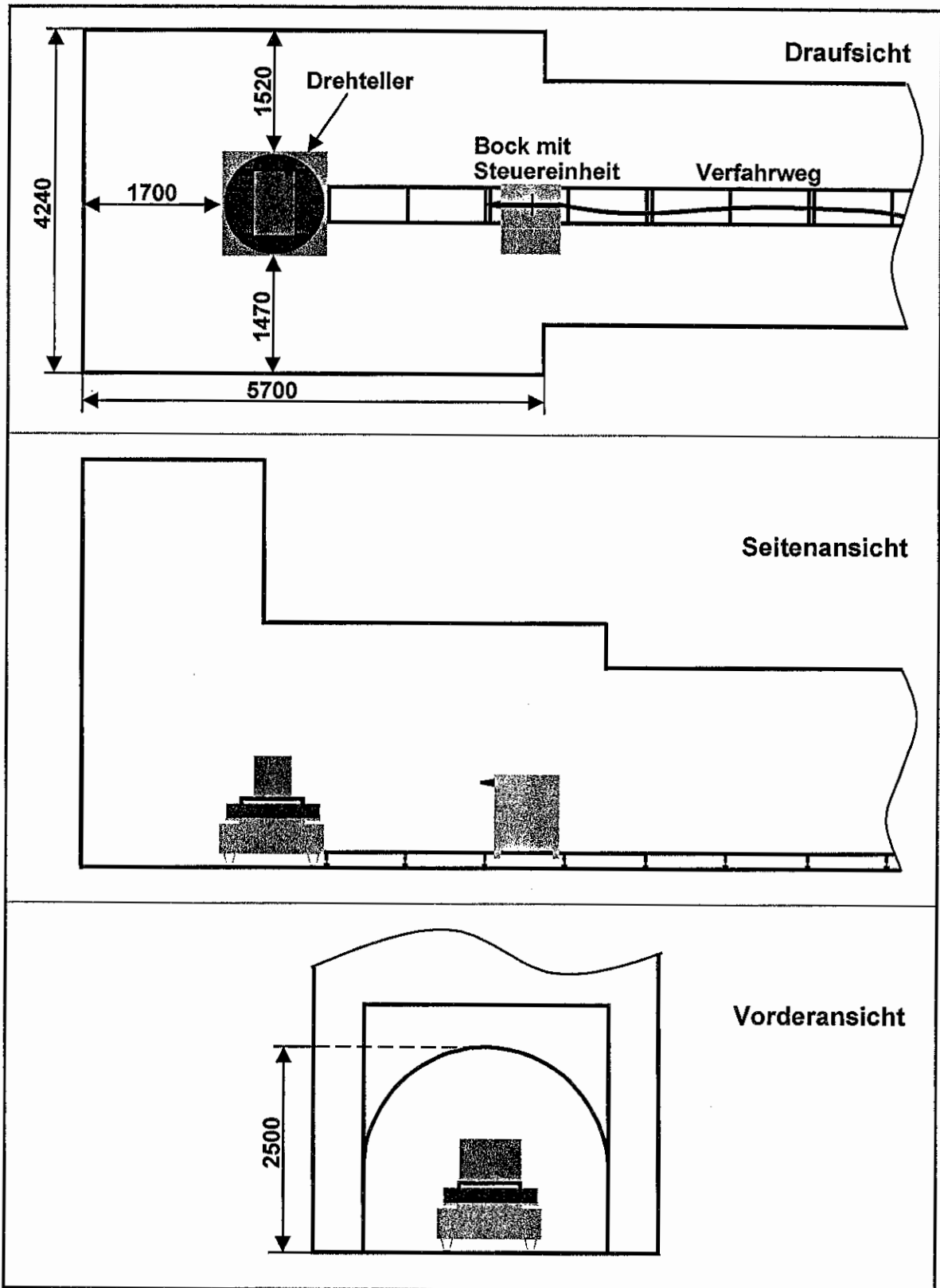


Bild A1: Drauf- und Seitenansicht des Brandkanals des IdF LSA



**Bild A2:** Lage des AFF im Brandkanal des IdF LSA

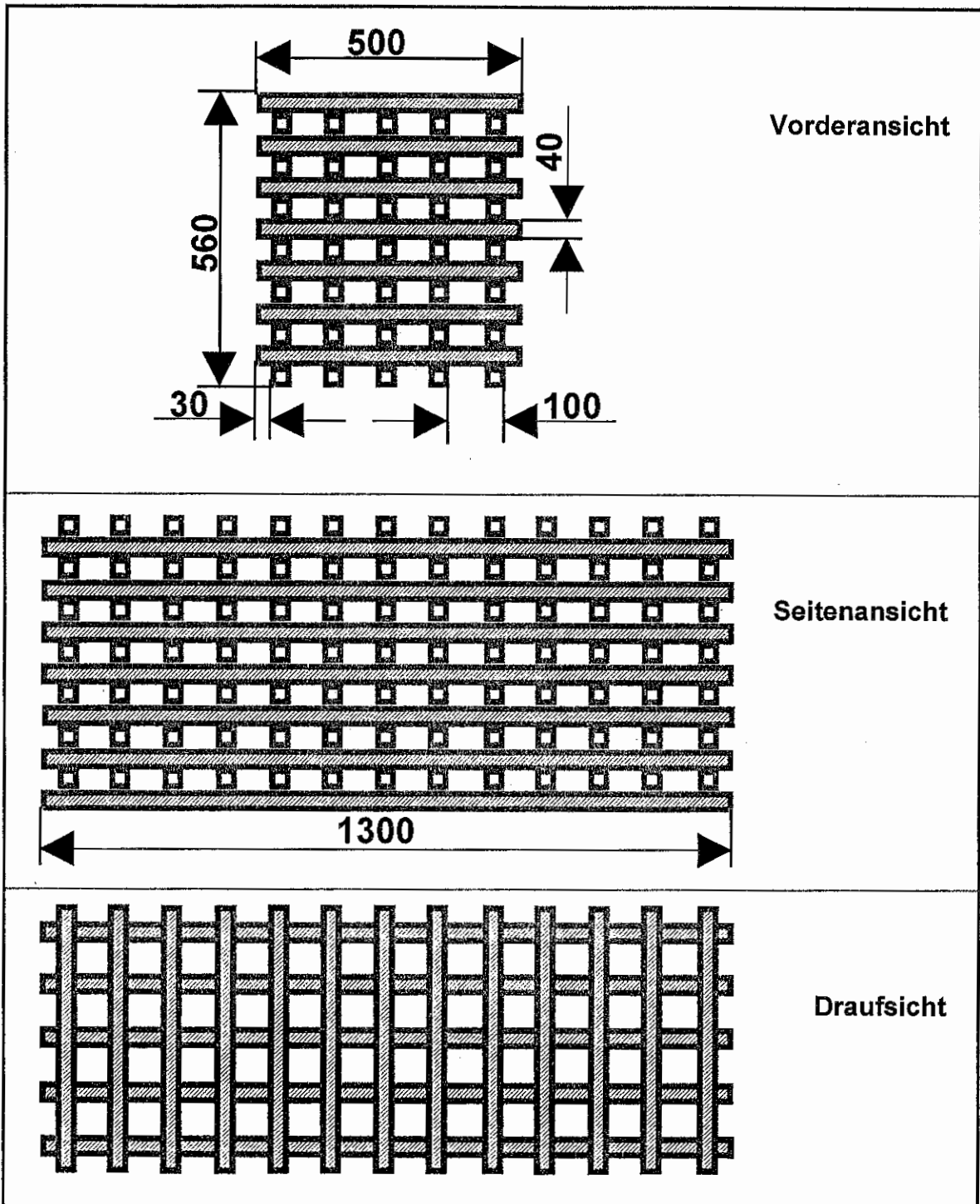


Bild A3: Holzkrippe, Brandobjekt 13A nach [DIN EN 3, Teil 1]

|                                     |                                  |   |                          |  |  |
|-------------------------------------|----------------------------------|---|--------------------------|--|--|
| <b>Brandversuch: BV</b>             |                                  | <b>Datum: . .</b>                                       |                          | <b>Uhrzeit: :</b>                      |  |
| <b>Wetter:</b>                      |                                  |   |                          |  |  |
| Temperatur<br>in °C                 | Luftfeuchtigkeit<br>in %         | Windgeschwindigkeit<br>in m/s                           | Windrichtung             |  |  |
|                                     |                                  |   |                          |  |  |
| <b>Brandobjekt/ Brandstoff:</b>     |                                  |   |                          |  |  |
|                                     |                                  |   |                          |  |  |
| <b>Drehteller:</b>                  |                                  |   |                          |  |  |
| <b>Wird Teller gedreht?</b>         |                                  |   |                          |  |  |
| Ja                                  |                                  |   | nein!                    |  |  |
| <b>Hin- und Herbewegung (hbb)?</b>  |                                  |   |                          |  |  |
| Ja                                  |                                  |   | nein!                    |  |  |
| Wird nicht gedreht, dann ankreuzen! |                                  |   | <input type="radio"/>    |  |  |
| Drehbereich: ..... °                |                                  | Bei vollständiger Umdrehung, ohne Hin- und Herbewegung! |                          | <input type="radio"/>                  |  |
| Drehfrequenz: .... hbb in .... s    |                                  | Umdrehungen: ..... u in ..... s                         |                          |  |  |
| <b>Bock:</b>                        |                                  |   |                          |  |  |
| Anstellwinkel: ..... °              |                                  | <b>Auf- und Abwärtsbewegung (aab)?</b>                  |                          |  |  |
| Entfernung: ..... cm                |                                  | ja  |                          | nein!                                  |  |
| Schwenkbereich: ..... °             |                                  | Schwenkfrequenz: .... aab in .... s                     |                          | Wird nicht geschwenkt, dann ankreuzen! |  |
|                                     |                                  |   |                          | <input type="radio"/>                  |  |
| <b>Einspannung der Löschdüse:</b>   |                                  |   |                          |  |  |
|                                     |                                  |   |                          |  |  |
| <b>Löschmittelmenge und -dauer:</b> |                                  |   |                          |  |  |
| Wasser-<br>druck<br>in bar          | Wasser-<br>durchfluß<br>in l/min | Zündmittel<br>und Menge<br>in ml                        | Lösch-<br>beginn<br>in s | Feuer<br>aus<br>in s                   |  |
| An Pumpe:                           |                                  | Mittel:   |                          |  |  |
| Am Rohr:                            |                                  | Menge:  |                          |  |  |
| <b>Bemerkungen:</b>                 |                                  |   |                          |  |  |
|                                     |                                  |   |                          |  |  |

Bild A4: Formular für die Erfassung ausgewählter Parameter bei den Brandversuchen

Brandversuch: *BV48* Datum: *29.05.2001* Uhrzeit: *10:30*  
Holzkrippe 8 A

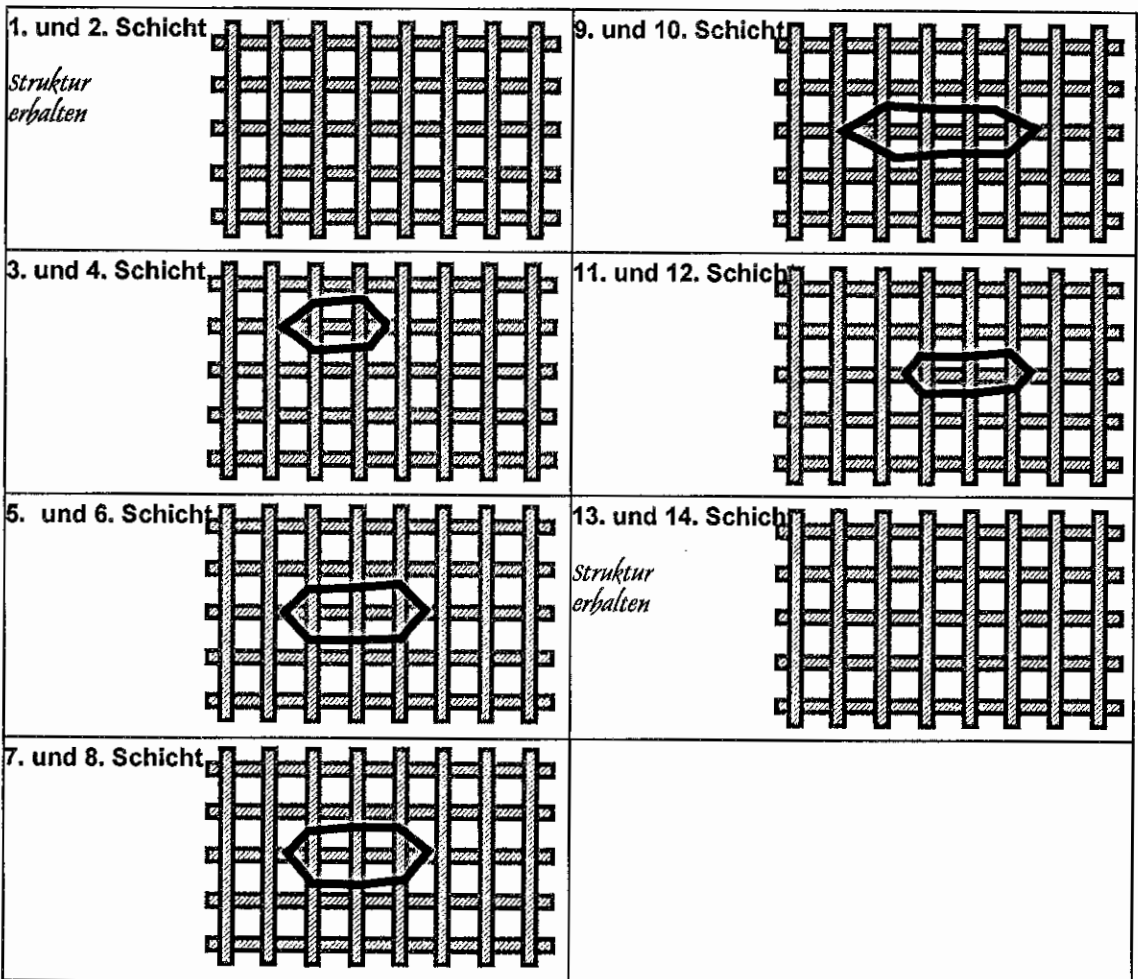
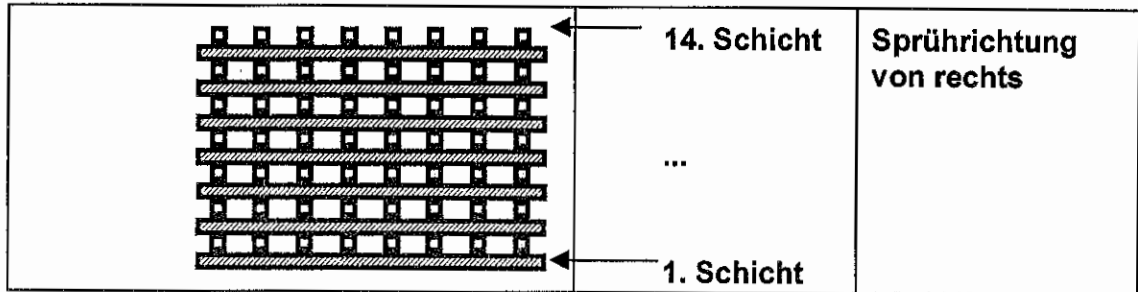


Bild A5: Formular zur Beschreibung des Brandobjekts nach Beendigung des Lösversuchs am Beispiel der Holzkrippe 8A

## **ANHANG B VERWENDETE MESSVERFAHREN UND -TECHNIK**

### **INHALT**

|        |   |     |
|--------|---|-----|
|        | Verzeichnis der Bilder .....                    | 117 |
| B1     | EINFÜHRUNG .....                                | 118 |
| B2     | MOBILES BRANDTECHNISCHES LABOR – MOBLAB .....   | 118 |
| B2.1   | MOBLAB .....                                    | 118 |
| B2.2   | Vielstellenmesstechnik .....                    | 119 |
| B2.3   | Videotechnik .....                              | 120 |
| B2.4   | Wetterstation .....                             | 121 |
| B3     | MESSVERFAHREN UND –TECHNIK .....                | 121 |
| B3.1   | Temperaturmessung mittels Thermoelementen ..... | 121 |
| B3.2   | Messung der Wärmestrahlung .....                | 122 |
| B3.3   | Druck- und Kraftmessung .....                   | 123 |
| B3.3.1 | Druckmessung in Fluiden .....                   | 123 |
| B3.3.2 | Kraftmessung .....                              | 124 |
| B3.4   | Volumenstrommessung .....                       | 124 |

### **VERZEICHNIS DER BILDER**

|      |   |     |
|------|---|-----|
| B2.1 | Mobiles Brandtechnisches Labor – MOBLAB ..... | 119 |
| B2.2 | Steckplätze der Vielstellenmesstechnik .....  | 119 |
| B2.3 | Endoskopkamera .....                          | 120 |
| B3.1 | Thermoelemente .....                          | 122 |
| B3.2 | Radiometer .....                              | 122 |
| B3.3 | Druckaufnehmer .....                          | 123 |
| B3.4 | Kraftmessdose .....                           | 124 |
| B3.5 | Durchflussmesser für Flüssigkeiten .....      | 124 |

## **B1 EINFÜHRUNG**

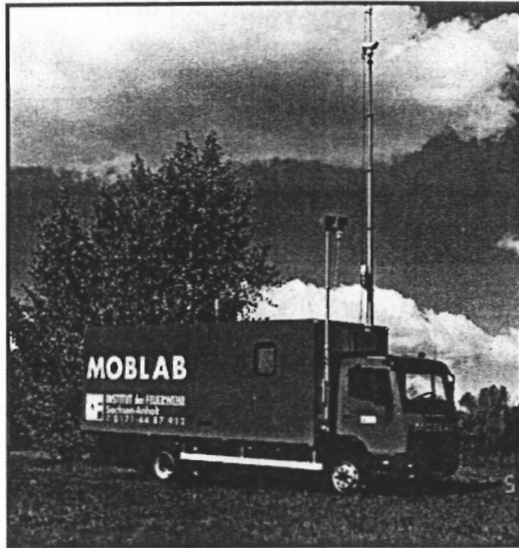
In der Anlage werden die bei der Bearbeitung des Vorhabens verwendeten Messverfahren und die entsprechenden Komponenten kurz erläutert. Hierbei geht es vor allem um die Messung physikalischer Parameter wie Temperaturen, Drücke und Massen- bzw. Volumenströme. Im Abschnitt B3 werden die physikalischen Effekte, auf denen die Messverfahren aufbauen, nur genannt, aber nicht begründet. Die Erläuterung der Effekte und deren messtechnische Umsetzung erfolgt eingehend bei [Kohlrausch 85]. Ausführungen zu den physikalischen Hintergründen können zum Beispiel auch bei [Brockhaus 86-94, Grimsehl 88, Stroppe 92] nachgelesen werden.

Bei der Messdatenerfassung wird das Mobile Brandtechnische Labor (MOBLAB) des IdF LSA eingesetzt. Im Folgenden werden in dieser Anlage jedoch nur die bei den Versuchen auch verwendeten Komponenten kurz erläutert.

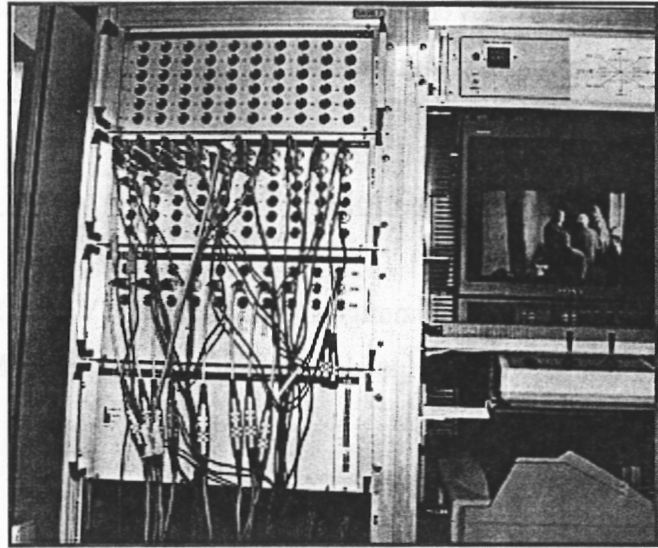
## **B2 MOBILES BRANDTECHNISCHES LABOR - MOBLAB**

### **B2.1 MOBLAB**

Das IdF LSA verfügt mit dem MOBLAB über ein modern ausgerüstetes Forschungsfahrzeug, das bei Messaufgaben im Rahmen der Bearbeitung von Forschungsvorhaben als auch bei operativen Einsätzen zur Beurteilung der Gefahrenlage eingesetzt wird. Es verfügt zum einen über umfangreiche Messmöglichkeiten für physikalische Größen und zum anderen über eine leistungsfähige chemische Analytik. Eine umfassende Beschreibung der Komponenten kann [Fachtagung 96] entnommen werden. Operative Einsatzmöglichkeiten des MOBLAB bei realen Gefahrenlagen werden bei [Grabski et al. 97] erläutert.



**Bild B2.1:** Mobiles Brandtechnisches Labor – MOBLAB



**Bild B2.2:** Steckplätze der Vielstellenmesstechnik

## B2.2 Vielstellenmesstechnik

Mit der Vielstellenmesstechnik können physikalische oder chemische Messgrößen erfasst werden. Voraussetzung ist jedoch, dass der zur Messung verwendete Sensor ein standardisiertes elektrisches Ausgangssignal liefert. Am IdF LSA werden 5polige Steckverbinder verwendet.

Realisiert ist auf dem MOBLAB eine Vielkanalerfassung, mit der parallel die Signale von bis zu 150 Sensoren aufgezeichnet werden können. Bild B2.2 zeigt auf der linken Seite die Steckplätze der Vielstellenmesstechnik. Werden alle 150 Messkanäle verwendet, so kann für jeden Kanal pro  $s$  ein Wert abgespeichert werden. Der Erfassungszyklus kann kürzer gewählt werden, wenn weniger Messkanäle aktiviert sind.

Die Messreihen werden auf PC abgelegt und stehen für spätere Auswertungen zur Verfügung. Die Abspeicherung erfolgt in Form von ASCII-Dateien. Davon ausgehend können die Messwerte in beliebige relationale Datenbanksysteme importiert werden. Es ist zum Beispiel auch eine Datenübername in EXCEL-Tabellen möglich.



Während der Versuchsdurchführung können die aktuellen Messwerte online auf dem Bildschirm verfolgt werden.

### **B2.3 Videotechnik**

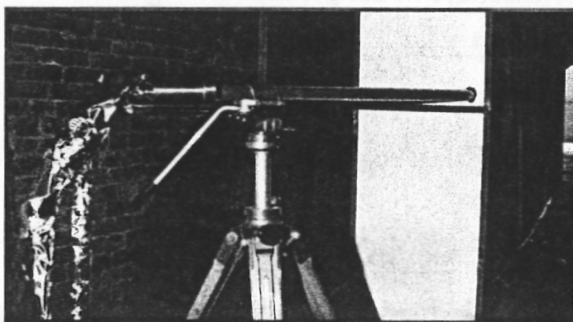
Für Videoaufzeichnungen stehen analoge (VHS, 25 Bilder/s) und digitale Camcorder zur Verfügung. Im Folgenden soll auf weitergehende Möglichkeiten eingegangen werden.

#### ***Mastkamera***

Das MOBLAB verfügt über einen Mast, der bei stehendem Fahrzeug ausgefahren werden kann. Auf diesem ist in ca. 10 m Höhe eine Videokamera wettergeschützt in einem heizbaren Gehäuse montiert (vgl. Bild B2.1). Mit Hilfe einer Fernsteuerung lässt sich die Kamera bewegen (drehen, auf- und abschwenken). Sie verfügt auch über eine Auto-Zoom-Funktion. Die Aufnahmen können auf einem Kontrollmonitor im MOBLAB betrachtet werden. Bei Erfordernis ist eine Videoaufzeichnung möglich.

#### ***Endoskopkamera***

Das IdF LSA verfügt über zwei Endoskopkameras, die unterschiedlich konstruiert sind und sich in ihren Abmaßen unterscheiden. Die kleinere Endoskopkamera ist im Bild B2.3 in aufgebautem Zustand zu sehen. In diesem Fall wurde sie auf einem Stativ befestigt.



**Bild B2.3:** Endoskopkamera

Die eigentliche „Kamera“ ist eine kleine Fingerkamera, die wärme­geschützt am vorderen, offenen Ende des „Rohres“ der Endoskopkamera untergebracht ist. Der Innenraum des Rohres wird mittels fließenden Wassers gekühlt. Im Bild B2.3 sind an der Rückseite der Endoskopkamera die Wasseranschlüsse zu sehen.

Beim Betrieb der Kamera ist es erforderlich, das Objektiv der Fingerkamera vor Verschmutzung durch Rußpartikel sowie vor Beschlagen mit kleinen Wassertropfen zu schützen. Dieses Freiblasen erfolgt mit Hilfe eines geringen Druckluftvolumenstromes, der auch am hinteren Ende der Endoskopkamera zugeführt wird.

Die Kamera kann, wie im Bild B2.3 zu sehen ist, durch eine kleine Öffnung direkt in den Brandversuchsraum geführt werden. Es wurden bereits Aufnahmen in Brandräumen bei Temperaturen weit über 1000 °C durchgeführt.

## **B2.4 Wetterstation**

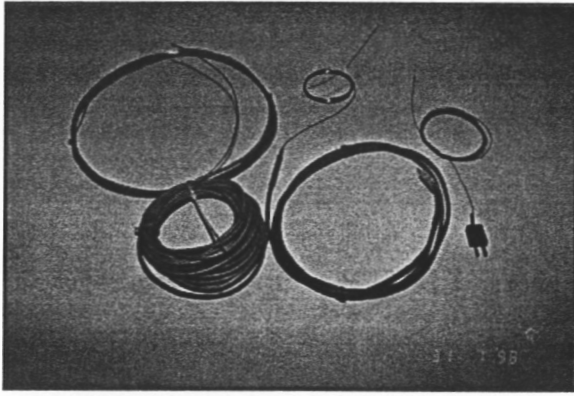
Auf dem Messmast (s. Bild B1.1) ist eine Wetterstation montiert, die u.a. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur und Luftfeuchte in ca. 10 m Höhe misst. Die Messreihen dieser Wetterparameter werden auf PC gespeichert. Sie können aber auch direkt online auf dem Bildschirm verfolgt und nach Bedarf abgelesen werden.

## **B3 MESSVERFAHREN UND –TECHNIK**

### **B3.1 Temperaturmessung mittels Thermoelementen**

Zur Temperaturmessung bei Brandversuchen haben sich am IdF LSA Mantelthermoelemente (Typ K – NiCr/Ni) bewährt. Dieser Typ ist zur Temperaturmessung bis ca. 1400 °C geeignet. Der Name rührt daher, dass zwei thermoelektrisch wirksame Leiter (NiCr und Ni) von einem temperaturbeständigen Metallmantel umgeben sind und somit durch diesen geschützt werden. Die voneinander isolierten Leiter werden als Thermopaar bezeichnet. Der Messpunkt befindet sich am Ende des Thermoelementes, an dem das Thermopaar verschweißt ist. Das Spannungssignal des Sensors verhält sich proportional zur Temperatur.

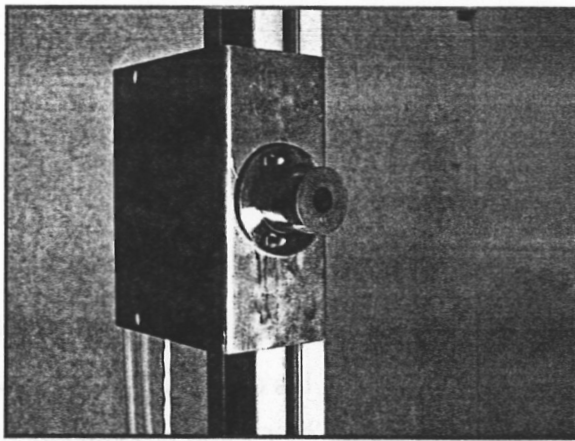
Zur Temperaturmessung wird der Seebeck-Effekt ausgenutzt, der Folgendes beinhaltet: Sind die Enden von zwei verschiedenen metallischen Leitern miteinander verschweißt und sind beide Lötstellen unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt, so fließt ein elektrischer Thermostrom.



**Bild B3.1:** Thermoelemente

Die Länge des Metallmantels wird nach Bedarf ausgelegt und ist von den bei den Brandversuchen zu erwartenden Temperaturen abhängig. Der Mantel sollte mindestens so lang sein, dass das dem Messpunkt gegenüberliegende Ende des Mantels in einen Temperaturbereich von unter  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  geführt werden kann. Es genügt meist, ihn bis auf den Fußboden des Brandversuchsraumes zu verlegen und die weiterführenden Leitungen abzudecken. Längen bis zu  $10000\text{ mm}$  kommen bei den Brandversuchen zum Einsatz. Mit der im Bild B3.1 zu erkennenden grünen Ausgleichsleitung wird die Entfernung zum Steckplatz im MOBLAB überbrückt.

### B3.2 Messung der Wärmestrahlung



**Bild B3.2:** Radiometer

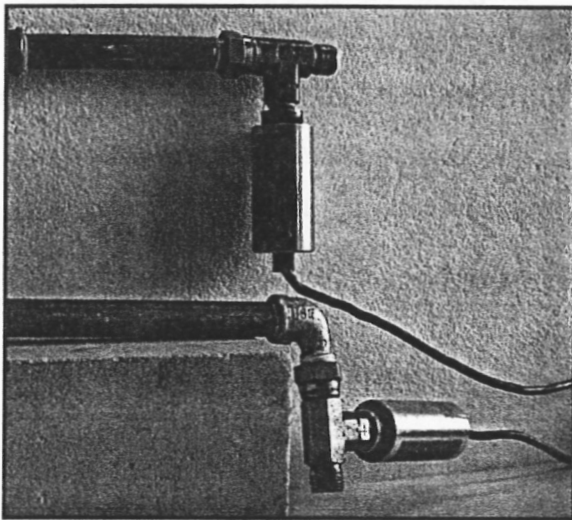
Zur Messung der Wärmestrahlung werden Radiometer eingesetzt. Bei dem im Bild B3.2 dargestellten Typ handelt es sich um einen thermischen Strahlungsempfänger, der die aus dem davor liegenden Raum auftreffende Strahlungsintensität im Wellenlängenbereich von  $0.6$  bis  $15.0\text{ }\mu\text{m}$  misst. Er liefert ein proportionales lineares Spannungs-Ausgangssignal bis  $10\text{ mV}$  bei  $10\text{ W/cm}^2$ .

Die auftreffende Wärmestrahlung wird durch ein geeignetes Material absorbiert und die entstehende Temperaturerhöhung gemessen. Somit müssen ein Absorber (Target), zwei Thermoelemente und eine Wärmesenke vorhanden sein. Die Senke muss während des Messzyklus eine konstante Bezugstemperatur liefern. Im vorliegenden Anwendungsfall wird das durch eine Wasserkühlung erreicht. Im Bild B3.2 ist die der Strahlungsquelle zugewandte

Seite des Radiometers dargestellt. Im Hintergrund sind die Schläuche für die Wasserkühlung zu erkennen. Die Sensoren weisen eine hohe Ansprechgeschwindigkeit auf.

### B3.3 Druck- und Kraftmessung

#### B3.3.1 Druckmessung in Fluiden



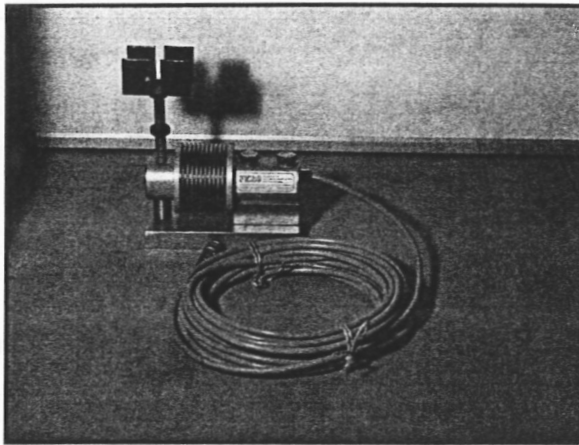
**Bild B3.3:** Druckaufnehmer

Bei diesen Sensoren wird der piezoresistive Effekt (Piezo-Widerstandseffekt) von Halbleitern ausgenutzt, der auf dem Spannungs-Dehnungsverhalten dieser Stoffe beruht. Übt das Fluid auf die Membran des Sensors einen Druck aus, so ändert sich der elektrische Widerstand des Halbleiters, der auf der Membran angebracht ist. Diese Widerstandsänderung wird gemessen und daraus der Druck ermittelt.

Zur Druckmessung in Fluiden werden am IdF LSA die im Bild B3.3 im eingebauten Zustand abgebildeten Sensoren verwendet. An der Vorderseite der zylinderförmigen Sensoren befindet sich ein kurzer, aufgebohrter Stutzen mit Außengewinde, der wie im abgebildeten Fall in einen Fitting geschraubt werden kann. Das Fluid hat somit eine direkte Verbindung ins Innere des Sensors, wo sich eine Membran zur Druckaufnahme befindet.

Bei diesen Sensoren wird der

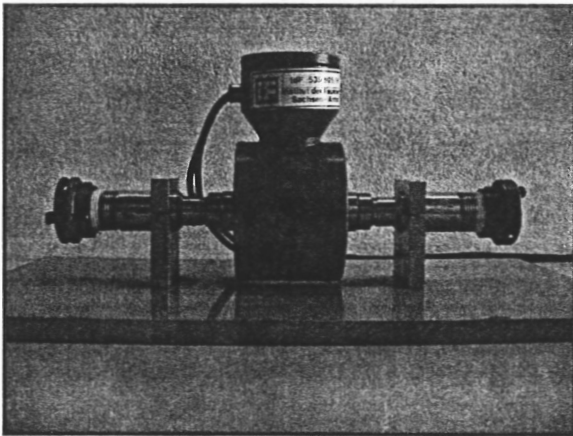
### B3.3.2 Kraftmessung



**Bild B3.4:** Kraftmessdose

Spannungs-Ausgangssignal erzeugt.

### B3.4 Volumenstrommessung



**Bild B3.5:** Durchflussmesser für  
Flüssigkeiten

Zur Kraftmessung wird meist die elastische Verformung von Körpern aus geeigneten Werkstoffen und geeigneter Form verwendet. Bei der im Bild B3.4 dargestellten Kraftmessdose kommt das Biegebalkenprinzip zur Anwendung. Auf der Ober- und der Unterseite eines Biegebalkens sind vier Dehnmessstreifen aufgebracht, die zu einer Vollbrücke geschaltet sind. Bei Belastung des freien Teils wird ein lastabhängiges lineares

Im Bild B3.5 ist ein Durchflussmesser zu sehen. Die Flüssigkeit strömt durch das Rohr, um das eine Spule angeordnet ist. Diese erzeugt ein Magnetfeld, dessen Feldstärkevektor quer zur Strömungsrichtung zeigt. Fließt durch das Rohr eine elektrisch leitende Flüssigkeit, so wird nach dem Faradayschen Induktionsgesetz eine elektrische Spannung induziert, deren Größe sich proportional zur Strömungsgeschwindigkeit verhält.

Die Anwendung des Verfahrens ist bei schlecht leitenden Flüssigkeiten problematisch. Eine Mindestleitfähigkeit von  $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$  (Siemens/Meter) sollte gesichert sein. Die Messungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie von Stoffparametern wie der Dichte, der Temperatur, der

Viskosität, dem Druck und der elektrischen Leitfähigkeit unabhängig sind. Verunreinigungen der Flüssigkeit haben nur geringe Auswirkungen auf das Messergebnis.

Je nach Größe des Volumenstroms werden am IdF LSA Durchflussmesser für verschiedene Messbereiche eingesetzt. Es können Volumenströme von  $0.5 \text{ l/min}$  bis zu  $3200 \text{ l/min}$  gemessen werden.

## **ANHANG C    SPRÜHSTRAHLVERMESSUNG IM NASSLABOR DES IDF LSA**

### **INHALT**

|      |  |     |
|------|--|-----|
|      | VERZEICHNIS DER BILDER .....   | 127 |
| C1   | SPRÜHSTRAHLEN BEI DER STATIONÄREN UND MOBILEN<br>BRANDBEKÄMPFUNG .....         | 128 |
| C1.1 | Begriffsbildung .....  | 128 |
| C1.2 | Problemstellungen .....  | 130 |
| C2   | SPRÜHSTRAHLVERMESSUNG MIT DEM PHASEN-DOPPLER-ANEMOMETER<br>(PDA) .....         | 131 |
| C2.1 | Messverfahren .....  | 131 |
| C2.2 | Arbeitsweise der Phasen-Doppler-Anemometrie .....                              | 131 |
| C2.3 | Charakteristika der Phasen-Doppler-Anemometrie .....                           | 133 |
| C3   | VERSUCHSPLÄTZE ZUR SPRÜHSTRAHLVERMESSUNG MIT DEM PDA<br>AM IDF LSA .....       | 135 |
| C3.1 | Bedienstand .....  | 135 |
| C3.2 | Vermessung horizontal strömender Sprühstrahlen .....                           | 135 |
| C3.3 | Vermessung vertikal strömender Sprühstrahlen .....                             | 137 |
| C4   | MESSEN DER VOLUMENSTROMDICHTEN IN HORIZONTAL STRÖMENDEN<br>SPRÜHSTRAHLEN ..... | 138 |

## VERZEICHNIS DER BILDER

|      |  |     |
|------|--|-----|
| C1.1 | Bezeichnung des Sprühstrahls in Abhängigkeit vom Durchmesser .....       | 129 |
| C1.2 | Anzahl und Oberfläche der aus // Wasser erzeugten Tropfen .....          | 129 |
| C2.1 | Aufbau eines Phasen-Doppler-Anemometers .....                            | 131 |
| C2.2 | Intensitätsprofil eines Laserstrahls .....                               | 132 |
| C3.1 | Bedienstand in der Übersicht .....                                       | 135 |
| C3.2 | Positioniersystem für das PDA bei horizontal strömenden Düsen .....      | 136 |
| C3.3 | Seitenansicht der Verfahreinrichtung bei horizontal strömenden Düsen ... | 136 |
| C3.4 | Vermessen eines Strahlrohres .....                                       | 136 |
| C3.5 | Vermessung einer horizontal strömenden Wassernebeldüse .....             | 136 |
| C3.6 | Versuchsplatz zur Vermessung vertikal strömender Düsen .....             | 137 |
| C3.7 | PDA auf der gedrehten optischen Bank und der Verfahreinrichtung .....    | 137 |
| C3.8 | Messsonde zur Massenstromdichtemessung .....                             | 138 |
| C3.9 | Messsonde auf der Verfahreinrichtung .....                               | 138 |



## **C1 SPRÜHSTRAHLEN BEI DER STATIONÄREN UND MOBILEN BRANDBEKÄMPFUNG**

### **C1.1 Begriffsbildung**

#### **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 der Untersuchungen sind Sprühstrahlen und Wassernebel, d. h. disperse Systeme, bei denen Wasser (Dispersum) in Luft (Dispergens) in Form kleiner Tropfen fein verteilt ist. Werden strömende disperse Systeme betrachtet, was hier gegeben ist, so spricht man auch von **Zweiphasenströmungen**.

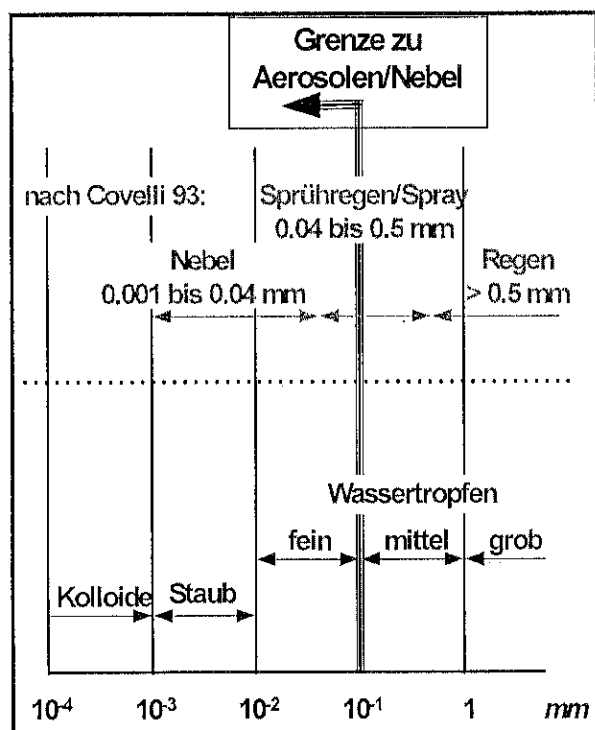
#### **Monodisperse und polydisperse Sprühstrahlen**

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**.

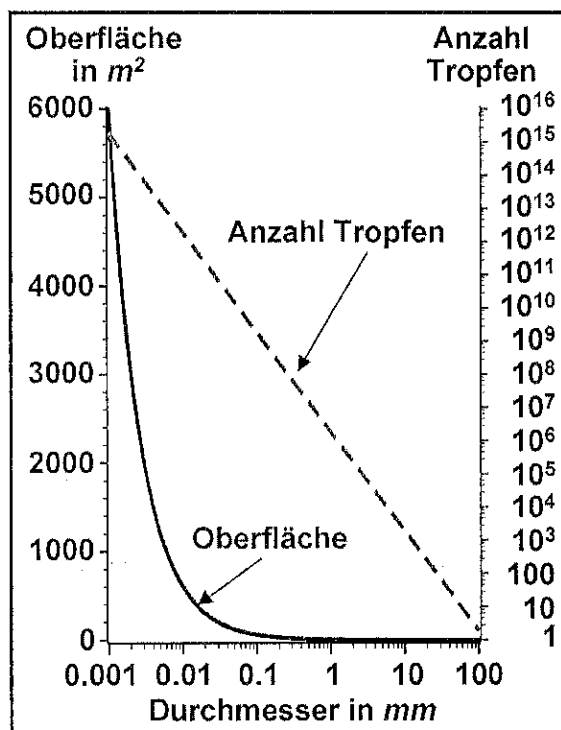
#### **Feinverteiltes Wasser (Aerosole, Nebel), Sprühstrahlen**

Die Bezeichnungsweise dieser Wasser-Luft-Gemische in Abhängigkeit von der Tropfengröße ist nicht einheitlich. Bild C1.1 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. Es sind oft Tropfendurchmesser aus dem Bereich der Wassernebel sowie auch mittlere und große Wassertropfen vertreten. Aber auch bei Sprinklern und den Düsen, die bei stationären Löschanlagen verwendet werden, sind die unterschiedlichsten Tropfenspektren zu beobachten. Aus diesem Grund wird im Folgenden von Sprühstrahlen gesprochen.



**Bild C1.1:** Bezeichnung des Sprühstrahls in Abhängigkeit vom Durchmesser [Grabski et al. 95]



**Bild C1.2:** Anzahl und Oberfläche der aus // Wasser erzeugten Tropfen

Betrachtet man die bei der Tropfenbildung aus // Wasser erzeugte Oberfläche, so kann festgestellt werden, dass sich die Tropfenoberfläche indirekt proportional zur Änderung des Durchmessers verhält. Bild C2 verdeutlicht das. Der Einfachheit halber wurde diese Betrachtung für einen monodispersen Sprühstrahl durchgeführt. Es wird deutlich, dass bei gleichem Wassereinsatz die Wasseroberfläche vergrößert werden kann, wenn Sprühstrahlen mit möglichst kleinen Tropfen erzeugt werden.

Die wesentliche Löschwirkung des Wassers beruht auf dem Kühleffekt. Dieser hängt unmittelbar von der Wasseroberfläche ab. Das erklärt die gute Löschwirkung von feinen

Sprühstrahlen. Es muss jedoch gesichert sein, dass die Sprühstrahlen auch an die brennende Oberfläche gelangen, um diesen Effekt voll auszunutzen. Dies ist erforderlich, um die Prozesse zur Bildung brennbarer Gasgemische zu unterbrechen. Auf eine Diskussion der anderen Löscheffekte soll hier verzichtet werden. Es sei z. B. auf [Covelli 93, Grabski et al. 95, Grabski 96, Grabski et al. 96, Schremmer 97, Starke et al. 98a, Strieder 97, Widetschek 95] verwiesen.

## **C1.2 Problemstellungen**

Die sowohl bei stationären Löschanlagen als auch durch die Feuerwehr verwendeten Sprühstrahlen und die neu angebotenen Löschmethoden sind sehr vielfältig [Starke et al. 96, Starke et al. 98]. In vielen Fällen sind aber bisher unzureichend die Grenzen und Möglichkeiten der einzelnen Verfahren abgeprüft. Dies hat aber unter anderem mit Bezug auf die Sicherheit der Feuerwehreinsatzkräfte unbedingt zu erfolgen. Die sachliche Diskussion dieser Fragestellung erfordert aber den Vergleich von Sprühstrahlen, der auf der Grundlage einer statistischen Beschreibung erfolgen kann. Hierbei geht es insbesondere um die Kenntnis folgender Parameter des Sprühstrahls:

- ◆ Tropfendurchmesser,
- ◆ Tropfengeschwindigkeiten und
- ◆ Massenstromdichten bzw. den Volumenstromdichten.

Die ersten beiden Fragestellungen lassen sich mit dem im Folgenden beschriebenen Lasermessplatz sehr gut beantworten. Auf die letzte Problematik wird im Abschnitt C4 eingegangen. Die Ermittlung der Massenstromdichte mit Lasermessungen wird in [Xu 96] behandelt.

## C2 SPRÜHSTRAHLVERMESSUNG MIT DEM PHASEN-DOPPLER-ANEMOMETER (PDA)

### C2.1 Messverfahren

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Messverfahren zur Tropfenmessung ist in [Starke et al. 96] enthalten. Dort sind auch weiterführende Literaturangaben zu finden. Auf die auf der Lasermesstechnik beruhenden Verfahren geht insbesondere [Tropea 95] ein. Im Folgenden wird kurz auf das im Nasslabor des IdF LSA eingesetzte Lasermessverfahren eingegangen.

### C2.2 Arbeitsweise der Phasen-Doppler-Anemometrie

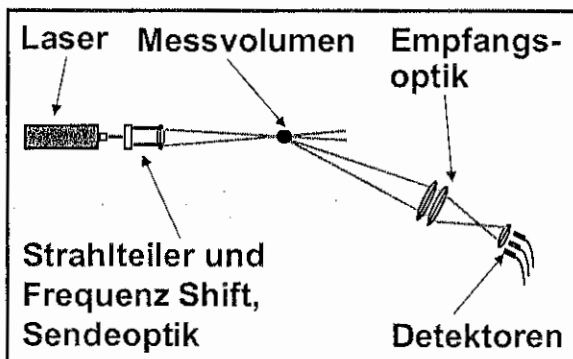


Bild C2.1: Aufbau eines Phasen-Doppler-Anemometers [Polytec 95]

Lasermessverfahren sind optische Messverfahren, die die Effekte der Lichtstreuung ausnutzen. Das sind die Beugung, die Reflektion 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 Streueffekte 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 C2.1 zeigt eine typische Messanordnung für ein PDA. Bei dem dargestellten Zweistrahanemometer wird der Laserstrahl mit der Frequenz  $\nu$  und der Wellenlänge  $\lambda$  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 umsetzen. Der zeitliche Verlauf des elektrischen Signals wird „Doppler-Burst“ genannt. Ein rechnergestütztes Auswertesystem gewinnt aus den empfangenen Signalen Informationen zum Tropfendurchmesser und zur Tropfengeschwindigkeit.

An dieser Stelle sind einige weitere Erläuterungen erforderlich. Betrachtet man den Querschnitt eines Laserstrahls, so ist festzustellen, dass seine Intensität nicht konstant ist. Sie ist in der Mitte am stärksten und nimmt nach außen hin ab. Der Intensitätsverlauf ist im Bild C2.2 dargestellt. Er entspricht der bekannten Gaußkurve und wird als „gaussian beam“ bezeichnet. Dies hat Auswirkungen auf die Streulichtsignalauswertung, auf die unten kurz eingegangen wird.

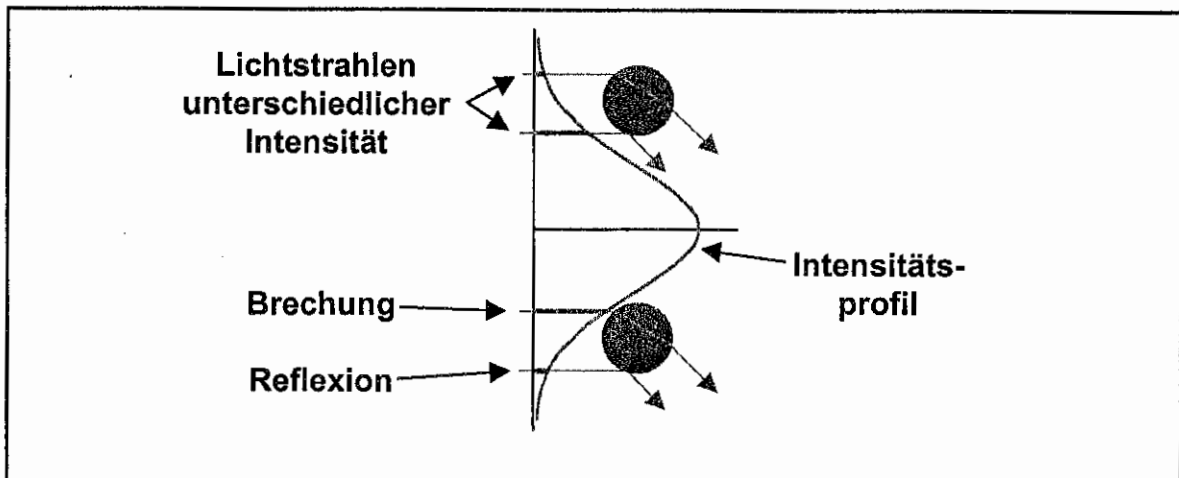


Bild C2.2: Intensitätsprofil eines Laserstrahls

Das Intensitätsprofil des Laserstrahles kann in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  von der Strahlmitte durch

$$I_{l(r)} = I_0 e^{\frac{-2r^2}{r_w^2}} \quad (\text{C2.1})$$

beschrieben werden, dabei sind  $I_0$  die Strahlungsintensität im Zentrum des Laserstrahles und  $r_w$  ein Maß für die Breite (Taille) des Laserstrahles [Anonym 99].

Passiert nun ein Tröpfchen das Messvolumen, so hängt die Intensität des Streulichtsignals davon ab, ob z. B. ein kleiner Tropfen durch das Zentrum des Laserstrahles oder durch den Randbereich fliegt. Ist er zu sehr am Rand, kann er unter Umständen nicht mehr erkannt werden.

Daraus resultiert, dass insbesondere beim Passieren des Randes des Messvolumens durch verschieden große Partikel das Große erkannt und das Kleinere aufgrund der geringeren Signalstärke unter Umständen nicht erkannt wird. Das kann auch der Fall sein, wenn beide Partikel auf der gleichen Bahn das Messvolumen passieren. Es besteht ein Bias zugunsten der großen Tropfen [Manasse 93].

Durch den Hersteller des PDA wird nun softwareseitig eine Korrektur angeboten. Das Prinzip dieser „probe volume correction“ (PVC) wird bei [Anonym 99a] ausführlich beschrieben. Man muss aus diesem Grund stets darauf hinweisen, ob die Messwertauswertungen sich auf die unkorrigierten Werte (Rohdaten) oder auf die korrigierten PVC-Werte beziehen. Das ist auch beim Vergleich von Ergebnissen verschiedener Autoren zu beachten.

Allgemein kann festgestellt werden, dass für die Schätzungen  $D_{k0}$  (s. (E4.6)) gilt:

$$D_{k0} \text{ der PVC-Werte} < D_{k0} \text{ der Rohdaten}, k \geq 1. \quad (\text{C2.2})$$

**Bei den Auswertungen dieses Berichtes wurde die „probe volume correction“ berücksichtigt.**

### **C2.3 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.

**Die Erläuterungen zeigen, dass die Lasermessverfahren High-Tech-Verfahren sind, die neue Möglichkeiten zur Sprühstrahlvermessung bieten. Sie erfordern jedoch in der Anwendung und Handhabung ein hohes physikalisch-technisches Wissen, verbunden mit dem nötigen Know-how und der entsprechenden Erfahrung.**

## C3 VERSUCHSPLÄTZE ZUR SPRÜHSTRAHLVERMESSUNG MIT DEM PDA AM IDF LSA

### C3.1 Bedienstand



Bild C3.1: Bedienstand in der Übersicht

Im Nasslabor des IdF LSA wurde ein Versuchsstand aufgebaut, dessen Kernstück ein PDA ist. Im Folgenden werden einige Ausführungen zum Versuchsaufbau gemacht. Eine ausführliche Beschreibung ist in [Starke et al. 96] enthalten. Bild C3.1 zeigt den Bedienstand.

Die im Bild C2.1 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. Im Nasslabor des IdF LSA können horizontal und vertikal strömende Sprühstrahlen vermessen werden.

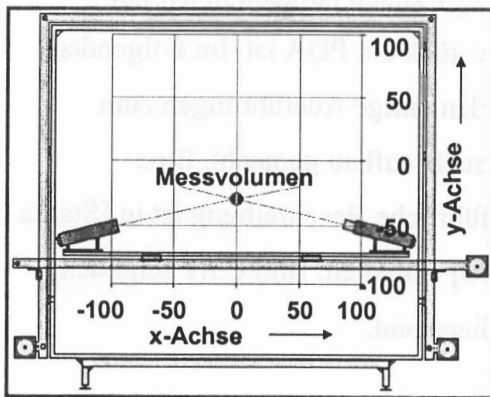
### C3.2 Vermessung horizontal strömender Sprühstrahlen

Die Messungen erfolgen punktweise. Zur Beschreibung dieser Messpunkte werden die Koordinaten  $(x,y,z)$  verwendet. 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 C3.2 schematisch dargestellt.

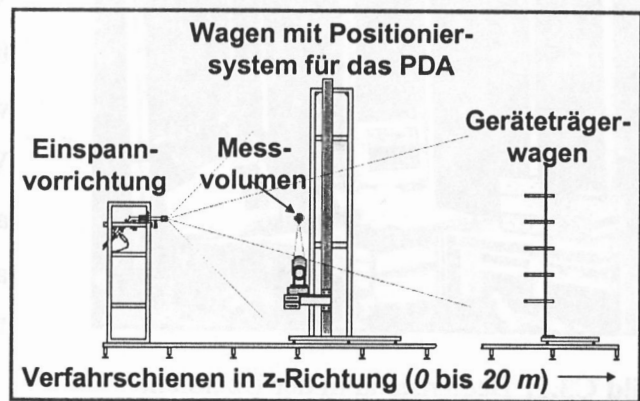
Die zu wählende Schrittweite zwischen den einzelnen Messpunkten hängt von der jeweiligen Messaufgabe ab. Der Messpunkt, d. h. die Lage des Messvolumens im Sprühstrahl, kann auf  $1\text{ cm}$  genau eingestellt werden.



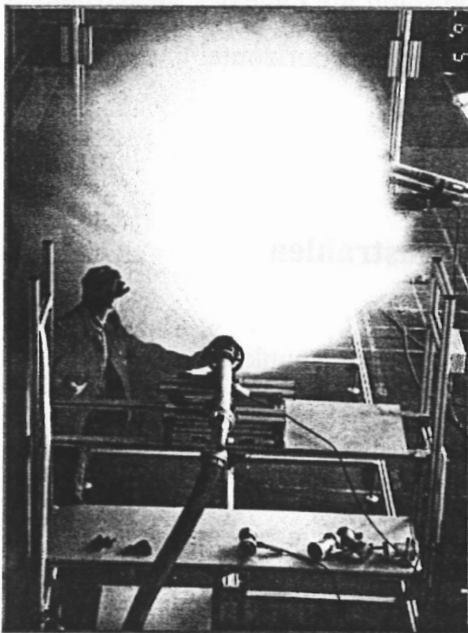
Im Nasslabor sind zwei parallele Verfahrschienen von ca. 20 m Länge aufgebaut. An dem einen Ende befindet sich die Einspannvorrichtung für die zu vermessende Düse. Die Mündung des Sprühstrahlrohres hat die z-Koordinate 0. Die horizontale Linie, die durch die Mitte der Strahlrohröffnung parallel zum Verfahrweg verläuft, ist die theoretische Strahlmitte. Das Sprühstrahlrohr bzw. die Düse sind parallel zum Verfahrweg einzuspannen. Auf diesem Verfahrweg kann der Wagen mit der Positioniereinrichtung für das PDA rechnergesteuert verfahren (vgl. Bild C3.3) werden.



**Bild C3.2:** Positioniersystem für das PDA bei horizontal strömenden Düsen



**Bild C3.3:** Seitenansicht der Verfahreinrichtung bei horizontal strömenden Düsen



**Bild C3.4:** Vermessen eines Strahlrohres



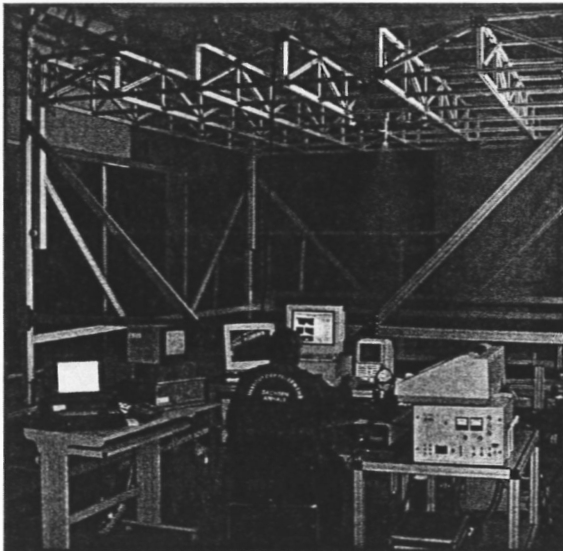
**Bild C3.5:** Vermessung einer horizontal strömenden Wassernebeldüse

Das Grundgerüst ermöglicht ein Verfahren der optischen Bank in Richtung der Strahlachse über die gesamte Länge. Gemessen werden auf dem Versuchsstand mit dem PDA **der Tropfendurchmesser und die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung** (vgl. Bild C3.3). Bilder von Sprühstrahlvermessungen sind in C3.4 und C3.5 wiedergegeben.

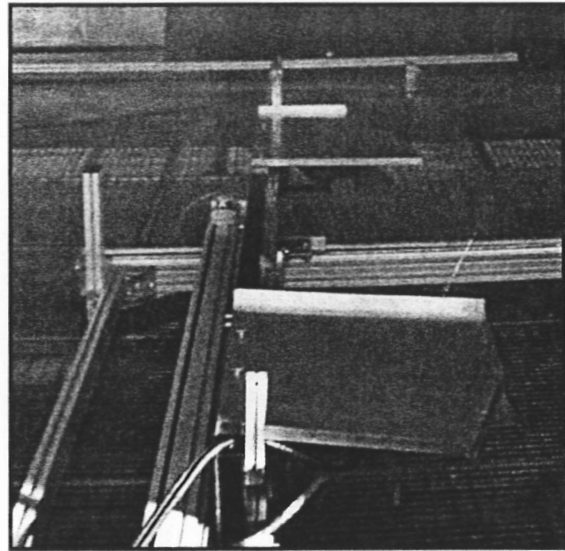
### C3.3 Vermessung vertikal strömender Sprühstrahlen

Für die Vermessung vertikal strömender Düsen wurde das in Bild C3.6 dargestellte Gerüst gebaut. Es handelt sich um einen großen Quader mit quadratischer Grundfläche von  $6000\text{ mm} \times 6000\text{ mm}$ . Die Decke kann verfahren und in beliebiger Höhe positioniert werden. Der Abstand von der Düsenöffnung bis zum Messpunkt kann fast  $5000\text{ mm}$  betragen.

Da das PDA nur eine Geschwindigkeitskomponente messen kann, musste die optische Bank um  $90^\circ$  gedreht werden. In dieser Position wird das PDA und somit der Messpunkt in einer horizontalen Ebene ca.  $500\text{ mm}$  über dem Fußboden verfahren. Diese Ebene hat bei diesem Messaufbau die Koordinaten  $x$  und  $y$ . Damit wird in Analogie zur Vermessung horizontaler Sprühstrahlen auch hier der Abstand von der Düsenöffnung bis zur Ebene, in der der Messpunkt verfahren wird, mit  $z$  bezeichnet. Bild C3.7 zeigt das PDA bei einer Messung.



**Bild C3.6:** Versuchsplatz zur Vermessung vertikal strömender Düsen

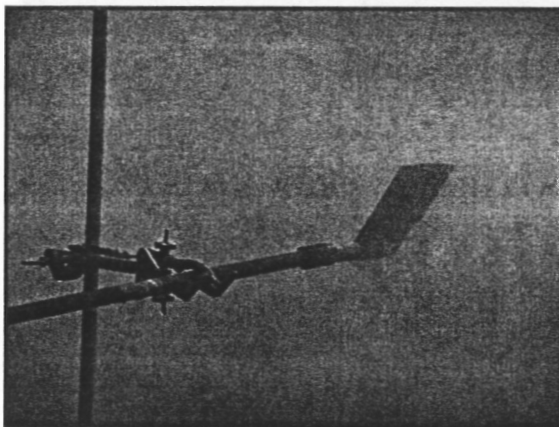


**Bild C3.7:** PDA auf der gedrehten optischen Bank und der Verfahreneinrichtung

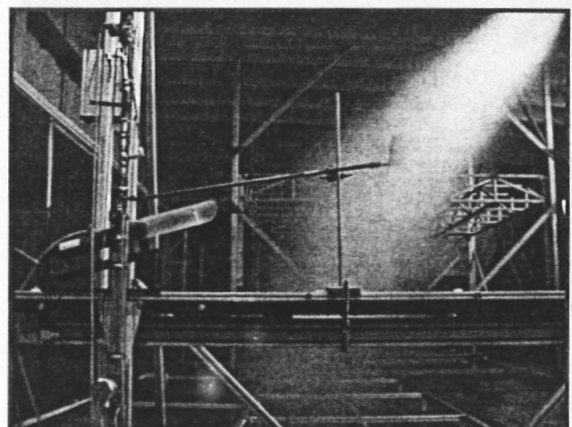
## C4 MESSEN DER VOLUMENSTROMDICHTE IN HORIZONTAL STRÖMENDEN SPRÜHSTRAHLEN

Die Messung der Volumenstromdichte  $j_v$  des Wasseranteils im Sprühstrahl erfolgte auf folgendem Weg. Der durch eine Fläche der Messebene (Messfläche der Messsonde) strömende Teil des Sprühstrahls wird in geeigneter Weise in einen Glaszylinder geleitet. Der flüssige Anteil wird von der Luft getrennt und im Messzylinder gesammelt. Dies erfolgt über einen definierten Zeitraum. Da die spezifische Dichte des Wassers nahe bei Eins liegt, stimmen Volumen- und Massenstromdichte  $j_m$  zahlenmäßig hinreichend genau überein. Das Messen der Wassermenge ist automatisiert. Nach Eingabe der Messsondenfläche und der Länge des Zeitintervalls wird der Messwert in  $ml/(cm^2*s)$  angezeigt. Dieser Wert wird als Messwert der Volumen- und Massenstromdichte im Mittelpunkt der Messsondenfläche angenommen.

Das Messverfahren liefert für die bei Feuerwehren verwendeten Sprühstrahlen hinreichend genaue Messwerte. Je nach Sprühstrahl werden Messsondenflächen von  $10\text{ cm}^2$  bis  $25\text{ cm}^2$  verwendet. Das Verfahren ist nicht geeignet für sehr feine Wassernebel mit geringer Strömungsgeschwindigkeit und für nur teilweise zerfallene Vollstrahlen.



**Bild C3.8:** Messsonde zur  
Volumenstromdichtemessung



**Bild C3.9:** Messsonde auf der  
Verfahreneinrichtung

Zur Positionierung der Messsonde im Sprühstrahl wird die Verfahreneinrichtung des PDA verwendet.

## **ANHANG D    VERSUCHSSTAND: AUTOMATIC FIRE FIGHTER - AFF**

### **INHALT**

|      |  |     |
|------|--|-----|
|      | VERZEICHNIS DER BILDER .....           | 139 |
| D1   | ZIELSTELLUNG .....                     | 140 |
| D2   | BESTANDTEILE DES VERSUCHSSTANDES ..... | 141 |
| D2.1 | Drehteller .....                       | 141 |
| D2.2 | Bock .....                             | 142 |
| D2.3 | Verfahrweg .....                       | 142 |
| D3   | AUFBAU DES AFF .....                   | 142 |

### **VERZEICHNIS DER BILDER**

|      |  |     |
|------|--|-----|
| D2.1 | Versuchsstand AFF .....  | 142 |
| D2.2 | Bock mit eingespanntem Strahlrohr und Steuereinheit .....                                | 142 |
| D3.1 | Skizze des AFF in der Drauf- und Seitenansicht mit einem<br>Holzkrippenbrandobjekt ..... | 143 |

## D1 ZIELSTELLUNG

Brandversuche werden von sehr vielen Faktoren beeinflusst und sind oft nur mit hohem Aufwand reproduzierbar zu gestalten. Werden bei den Versuchen auch noch Löscheräte 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 Löscheräten ein Versuchsstand konzipiert und aufgebaut, der die Strahlrohrführung übernimmt und diese reproduzierbar gestaltet. Dieser Automatic Fire Fighter (AFF) ist auch in [Starke et al. 98] beschrieben. Dort sind auch erste Versuchsergebnisse beim Einsatz des Standes dargestellt. Der AFF muss wesentliche Komponenten der Löschmittelbeaufschlagung berücksichtigen:

- ◆ 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.

## **D2 BESTANDTEILE DES VERSUCHSSTANDES**

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“.

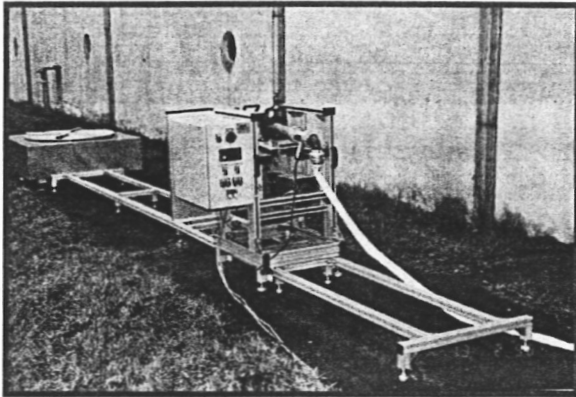
### **D2.1 Drehteller**

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 D2.1 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:

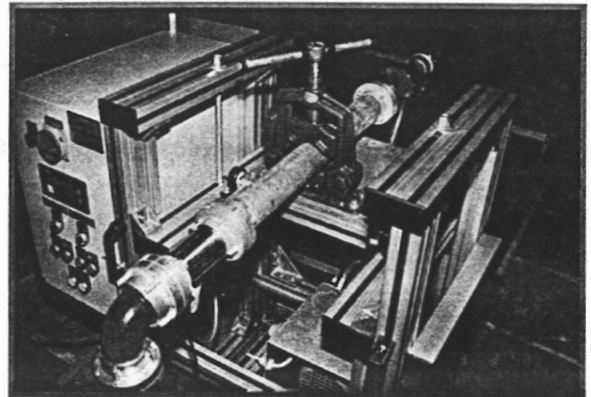
- ◆ Der Drehteller kann sich kontinuierlich in einer Richtung bewegen. Er führt dann vollständige Umdrehungen durch, wobei die Drehzahl vorgegeben werden kann.
- ◆ In vielen Fällen kann das Brandobjekt nur aus einem bestimmten Bereich angegriffen werden, da der Zugang um den Brandherd herum versperrt 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 D2.1:** Versuchsstand AFF



**Bild D2.2:** Bock mit eingespanntem Strahlrohr und Steuereinheit

## **D2.2 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 D2.2 zeigt den Bock mit der Steuereinheit des AFF.

## **D2.3 Fahrweg**

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

## **D3 AUFBAU DES AFF**

Der Versuchsstand wird in Brandräumen des IdF LSA aufgebaut. Bild D3.1 enthält einige spezielle Abmaße des AFF. Hier ist ein typischer Versuchsaufbau für einen Holzkrippenbrand skizziert.

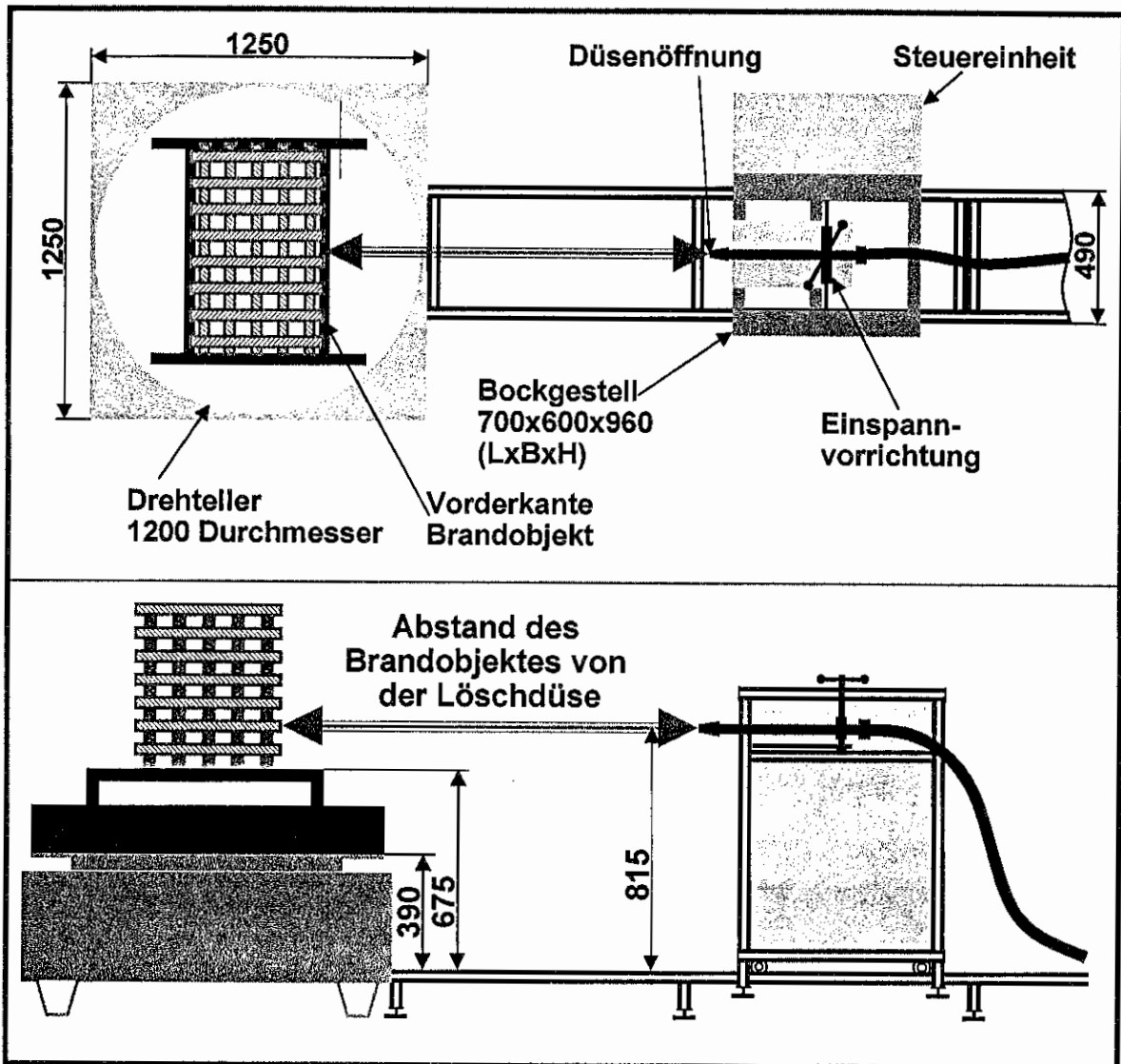


Bild D3.1: Skizze des AFF in der Drauf- und Seitenansicht mit einem Holzrippenbrandobjekt



## **ANHANG E      ZUR STATISTISCHEN BESCHREIBUNG VON                   SPRÜHSTRAHLEN**

### **INHALT**

|      |  |     |
|------|--|-----|
|      | VERZEICHNIS DER TABELLEN .....                               | 144 |
| E1   | EINFÜHRUNG .....   | 145 |
| E2   | GRUNDBEGRIFFE AUS DER WAHRSCHEINLICHKEITSRECHNUNG .....      | 145 |
| E2.1 | Zufallsgrößen und ihre Realisierungen .....                  | 145 |
| E2.2 | Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion .....      | 146 |
| E2.3 | Erwartungswert, Varianz, Momente .....                       | 147 |
| E3   | GRUNDBEGRIFFE AUS DER MATHEMATISCHEN STATISTIK .....         | 149 |
| E3.1 | Aufgaben der Statistik .....                                 | 149 |
| E3.2 | Grundgesamtheit, mathematische und konkrete Stichprobe ..... | 149 |
| E3.3 | Punktschätzungen .....                                       | 150 |
| E4   | SCHÄTZFUNKTIONEN FÜR DEN TROPFENDURCHMESSER .....            | 151 |

### **VERZEICHNIS DER TABELLEN**

|      |  |     |
|------|--|-----|
| E4.1 | Schätzungen für den Tropfendurchmesser und Anwendungsgebiete ..... | 153 |
|------|--|-----|

## **E1 EINFÜHRUNG**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit spielt die Auswertung der Messdaten eine zentrale Bedeutung. Dies betrifft insbesondere die Messungen mit dem PDA, bei denen je nach Wahl der Parameter mehrere Tausend Datensätze für jeden Messpunkt abgespeichert wurden. Eine visuelle Auswertung dieser Datenmengen ist nicht möglich. Die Messwerte müssen mittels geeigneter statistischer Verfahren aggregiert und in der Regel grafisch dargestellt werden.

Die statistische Betrachtungsweise der Tropfendurchmesser ist nicht neu. Eine Reihe von Autoren befassten 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.

Im Folgenden werden einige Grundlagen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der mathematischen Statistik zusammengestellt, die für die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse mit dem Phasen-Doppler-Anemometer von Interesse sind. In der Praxis werden viele verschiedene Schätzungen für den Tropfendurchmesser verwendet. Eine Bewertung und ein Vergleich setzen eine klare Begriffsbildung voraus. Allgemeine Beziehungen zwischen diesen Schätzwerten werden angegeben. Eine ausführlichere Darstellung ist bei [Beyer et al. 95, Starke et al. 96] enthalten.

## **E2 GRUNDBEGRIFFE AUS DER WAHRSCHEINLICHKEITSRECHNUNG**

### **E2.1 Zufallsgrößen und ihre Realisierungen**

Nimmt eine Größe  $X$  im Ergebnis eines zufälligen Versuches bzw. einer Messung stets einen Wert aus einem definierten Wertevorrat an, so bezeichnet man  $X$  als **Zufallsgröße**. Beispiele für Zufallsgrößen sind der Tropfendurchmesser  $D_{Tr}$ , die Tropfenoberfläche  $A_{Tr}$  und das

Tropfenvolumen  $V_{Tr}$ . Als theoretisch mögliche Messwerte für diese drei Zufallsgrößen kommen alle positiven reellen Zahlen in Betracht. Da es nicht möglich ist, einen kleinsten oder größten Wert anzugeben, wird der Bereich nicht weiter eingeschränkt. Die im Ergebnis einer Messung erhaltenen konkreten Messwerte werden Realisierungen der Zufallsgrößen genannt und mit kleinen Buchstaben  $x, x_i, d_{Tr}, d_{Tr,i}, \dots$  bezeichnet. Handelt es sich um mehrere Messungen, so wird zur Kennzeichnung ein laufender Index, der nach Bedarf mit  $i, k, l, \dots$  bezeichnet wird, verwendet.

Neben den oben angegebenen Beispielen wird auch die Tropfengeschwindigkeit gemessen, die auch als Zufallsgröße interpretiert werden kann. Diese Zufallsgröße kann auch negative Werte annehmen. In den Randbereichen der Sprühstrahlen wurden infolge der Turbulenzbildung auch negative Werte gemessen.

Kann eine Zufallsgröße nur Werte aus einem zusammenhängenden Intervall der reellen Zahlen annehmen, so wird sie als **stetige Zufallsgröße** bezeichnet. Da die in dieser Arbeit betrachteten Zufallsgrößen stetig sind, werden Formeln und Aussagen für diese angegeben. Das ist bei der Übertragung auf diskrete oder beliebige Zufallsgrößen zu beachten.

## E2.2 Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion

Jede stetige Zufallsgröße ist durch ihre Dichtefunktion  $f_X$  und die Verteilungsfunktion  $F_X$  eindeutig charakterisiert, wobei sich beide Funktionen ineinander überführen lassen. Sie besitzen die in den folgenden Gleichungen angegebenen Eigenschaften

$$f_X(t) \geq 0, -\infty < t < +\infty, \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx = 1 \quad (\text{E2.1})$$

bzw.

$$F_X(t) = P(X < t) = \int_{-\infty}^t f_X(x) dx, \quad (\text{E2.2})$$

wobei  $t$  ein reellwertiger Parameter ist. Die Dichtefunktion gibt die Verteilung der Werte der Zufallsgröße an. Dort, wo die Dichtefunktion gleich Null ist, kann die Zufallsgröße auch keine Werte annehmen.

Für den Durchmesser, der immer positiv ist, bedeutet das, dass die Dichtefunktion für negative Argumente immer Null ist. Bei der Geschwindigkeit sind negative und positive Werte möglich.

**In der Fachliteratur wird  $t$  für den Parameter der Dichte- und Verteilungsfunktion verwendet, auch wenn es sich nicht um eine zeitabhängige Zufallsgröße handelt. Dies ist zu beachten.**

### E2.3 Erwartungswert, Varianz, Momente

Zur Charakterisierung der Zufallsgrößen werden neben der Dichte- und der Verteilungsfunktion auch Kennwerte verwendet, die zwar keine vollständigen Informationen über die Verteilung beinhalten, aber zur Charakterisierung der Zufallsgrößen geeignet sind. Es sei  $Y = g(X)$  eine zunächst beliebige Funktion der Zufallsgröße  $X$ . Dann wird der Erwartungswert der Zufallsgröße  $Y = g(X)$  definiert als

$$E(Y) = E(g(X)) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) \cdot f_X(x) dx. \quad (\text{E2.3})$$

Folgende Spezialfälle spielen im Folgenden eine Rolle.

A)  $Y = X$ :

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x) dx \quad (\text{E2.4})$$

Dies ist der Erwartungswert der Zufallsgröße  $X$ . Physikalisch kann er als Schwerpunkt einer auf der x-Achse entsprechend der Dichtefunktion  $f_X(x)$  verteilten Wahrscheinlichkeitsmasse interpretiert werden. Daraus folgt unmittelbar, dass es nicht der Wert mit der größten Wahrscheinlichkeit sein muss.

So ist z. B. der Schwerpunkt einer Hohlkugel deren Mittelpunkt, in dem überhaupt keine Masse enthalten ist.

B)  $Y = X^k, k = 1, 2, \dots$ :

$$E(X^k) = m_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \cdot f_X(x) dx \quad (\text{E2.5})$$

wird als das (**gewöhnliche**) **Moment  $k$ -ter Ordnung** der Zufallsgröße  $X$  bezeichnet. Für  $k=1$  ist es der Erwartungswert.

C)  $Y = (X - E(X))^2$ :

$$D^2(X) = E((X - E(X))^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^2 \cdot f_X(x) dx \quad (\text{E2.6})$$

ist die **Varianz** oder Dispersion der Zufallsgröße  $X$ . Im Folgenden wird stets von Varianz gesprochen, da der Begriff der Dispersion in der Physik und Chemie mit anderen Inhalten belegt ist. Am Symbol wird festgehalten, da es sich in der Fachliteratur durchgesetzt hat.

Die Varianz ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsgröße  $X$  um den Erwartungswert. Beim Vergleich von Zufallsgrößen bedeutet eine kleine Varianz, dass die großen Abweichungsquadrate  $(x - E(X))^2$  bei der Mittelung nicht so stark ins „Gewicht“ fallen, d. h. die Werte der Zufallsgröße dichter um den Erwartungswert gestreut sind als im Fall der größeren Varianz. Der Wert

$$D(X) = \sqrt{D^2(X)} \quad (\text{E2.7})$$

wird als **Standardabweichung** bezeichnet.

D)  $Y = (X - E(X))^k, k = 2, 3, \dots$ :

$$E((X - E(X))^k) = \mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^k \cdot f_X(x) dx \quad (\text{E2.8})$$

ist das **zentrale Moment  $k$ -ter Ordnung** der Zufallsgröße  $X$ . Die Existenz dieser Momente vorausgesetzt, kann die Berechnung der zentralen Momente durch Anwendung des binomischen Lehrsatzes auf die Berechnung der gewöhnlichen Momente zurückgeführt werden. Häufig verwendet wird für die Varianz die Beziehung

$$D^2(X) = E((X - E(X))^2) = E(X^2) - (E(X))^2 = \mu_2 = m_2 - m_1^2. \quad (\text{E2.9})$$

## **E3 GRUNDBEGRIFFE AUS DER MATHEMATISCHEN STATISTIK**

### **E3.1 Aufgaben der Statistik**

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung untersucht Gesetzmäßigkeiten zufälliger Massenerscheinungen. Sie liefert die Methoden und Hilfsmittel, um diese durch Zufallsgrößen zu beschreiben und Aussagen abzuleiten. Eine unmittelbare Anwendung dieses Apparates in der Praxis stößt jedoch auf Schwierigkeiten. Die Verteilung bzw. die Parameter der zu untersuchenden Zufallsgrößen sind in der Regel unbekannt und müssen auf der Grundlage von Messungen ermittelt werden, was auch als Schätzen bezeichnet wird. Die mathematische Statistik befasst sich mit der Ermittlung geeigneter Schätzfunktionen und deren Bewertung.

So gibt es zum Beispiel für die Schätzung der Tropfendurchmesser eine Vielzahl von Schätzfunktionen. Es entsteht zwangsläufig die Frage, welche denn geeignet sind, bzw. welche Beziehungen es zwischen ihnen gibt. Eine derartige Diskussion ist aber nur möglich, wenn man prüfbare Eigenschaften von Schätzfunktionen formuliert.

### **E3.2 Grundgesamtheit, mathematische und konkrete Stichprobe**

Während eines Versuches wird ein Merkmal beobachtet bzw. gemessen. Kann dieses Merkmal durch eine Zufallsgröße  $X$  beschrieben werden, so wird  $X$  als Grundgesamtheit bezeichnet.  $X$  selbst ist durch die Dichte- oder die Verteilungsfunktion beschrieben, die in der Regel aber unbekannt sind.

Aus Erfahrung ist bekannt, dass nacheinander aufgenommene Messreihen unterschiedliche Werte liefern, auch wenn diese im Idealfall nur wenig voneinander abweichen. Es ist demzufolge zwischen einer mathematischen und einer konkreten Stichprobe zu unterscheiden. Als **mathematische Stichprobe** vom Umfang  $n$  wird der Vektor  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  bezeichnet. Die Komponenten  $X_1$  bis  $X_n$  müssen alle die Verteilung der Grundgesamtheit haben und voneinander unabhängig sein. Letzteres bedeutet, dass ein Messwert nicht durch das Ergebnis der vorhergehenden Messwerte beeinflusst werden darf. Eine Realisierung

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , d. h. eine beobachtete Messreihe, wird als **konkrete Stichprobe** bezeichnet.

Die oben allgemein beschriebene Aufgabe der Statistik ist es, von konkreten Stichproben ausgehend, die gesuchten Größen zu schätzen. Bei Punktschätzungen erhält man im Ergebnis der Schätzung einen Zahlenwert und bei Intervall bzw. Konfidenzschätzungen ein Intervall, das den wahren Wert des Parameters mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit überdeckt. Im Folgenden wird sich auf Punktschätzungen beschränkt.

### E3.3 Punktschätzungen

Eine Punktschätzung für einen unbekanntem Parameter  $\Theta$  wird mit Hilfe einer Punktschätzfunktion

$$\hat{\Theta}(X_1, X_2, \dots, X_n) \tag{E3.1}$$

berechnet. Der auf Basis einer konkreten Stichprobe erhaltene Punktschätzwert ist

$$\hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n). \tag{E3.2}$$

Wie man geeignete Punktschätzungen erhält, kann in [Müller 91, Beyer et al. 95, Rao 73] nachgelesen werden. Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die Punktschätzungen für die oben eingeführten Momente wichtig.

Zur Schätzung des **Stichprobenmomentes  $k$ -ter Ordnung** wird die Funktion

$$\hat{M}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^k \tag{E3.3}$$

verwendet und für die **zentralen Stichprobenmomente  $k$ -ter Ordnung**

$$\hat{N}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^k, \tag{E3.4}$$

wobei

$$\bar{X} = \hat{M}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{E3.5})$$

das **Stichprobenmittel** ist. Zur Schätzung der Varianz bzw. **Streuung** wird die korrigierte Schätzung für das zentrale Moment der zweiten Ordnung

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (\text{E3.6})$$

verwendet. Analog zu (E3.3) bis (E3.6) erhält man durch Einsetzen der konkreten Stichprobenwerte die empirischen Momente  $\hat{m}_k$ ,  $\hat{\mu}_k$ ,  $\bar{x}$  und  $s^2$ . Die Wurzel  $S$  aus der Streuung ist die Schätzung für die **Standardabweichung**.

## E4 SCHÄTZFUNKTIONEN FÜR DEN TROPFENDURCHMESSER

Die Tropfendurchmesser sowie die daraus abgeleiteten Oberflächen und Volumina sind stets positive Größen, d. h. für die konkreten Stichproben gilt stets

$$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n), x_i > 0, i = 1, \dots, n. \quad (\text{E4.1})$$

Bei der Diskussion der verschiedenen Schätzungen für die Tropfendurchmesser gibt es eine Reihe von Beziehungen zwischen den empirischen Momenten, die jetzt angegeben werden. Dabei wird stets die Existenz der betrachteten Momente vorausgesetzt, was aber durch die praktische Problemstellung auch immer gewährleistet ist. Für die analog zu (E3.3) berechneten Schätzungen für die  $k$ -ten Momente gelten die Beziehungen

$$\hat{m}_1 \leq \frac{\hat{m}_{k+1}}{\hat{m}_k}, k \geq 1, \quad (\text{E4.2})$$

$$\frac{\hat{m}_k}{\hat{m}_{k-1}} \leq \frac{\hat{m}_{k+1}}{\hat{m}_k}, k \geq 2, \quad (\text{E4.3})$$

$$\sqrt[k]{\hat{m}_k} \leq \sqrt[k+1]{\hat{m}_{k+1}}, k \geq 1 \quad (\text{E4.4})$$

und



$$\hat{m}_1 \leq k^{-1} \sqrt{\frac{\hat{m}_k}{\hat{m}_1}}, k \geq 2. \quad (\text{E4.5})$$

Auf den umfangreichen Nachweis soll an dieser Stelle verzichtet werden.

[Mugele et al. 51, Lefebvre 89] führen eine weitere allgemeine Stichprobenfunktion zur Auswertung von Stichproben des Tropfendurchmessers ein. Sie hat auf die oben eingeführte Symbolik angepasst die Form

$$D_{ab} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n x_i^a}{\sum_{i=1}^n x_i^b} \right]^{\frac{1}{a-b}} = \left[ \frac{\hat{m}_a}{\hat{m}_b} \right]^{\frac{1}{a-b}}. \quad (\text{E4.6})$$

Beachtet man, dass  $\hat{m}_0 = 1$  ist, so ergeben sich einige in der Tabelle E4.1 bereits berücksichtigte Vereinfachungen.

Aus (E3.4) folgt

$$D_{10} \leq D_{20} \leq D_{30}. \quad (\text{E4.7})$$

In (E4.7) gilt das Gleichheitszeichen nur, wenn alle Elemente der Stichprobe gleich sind, d. h. ein exakt monodisperses Spray gegeben ist. Bei den hier betrachteten Sprühstrahlen ist das jedoch nicht der Fall. Daraus folgt aber, dass, vom Mittelwert  $D_{10}$  abgesehen, keine der Schätzungen erwartungstreu und konsistent ist. Das gilt wegen (E4.2) und (E4.3) auch für  $D_{21}$ ,  $D_{32}$ ,  $D_{43}$  und wegen (E4.5) auch für  $D_{31}$ . Es gelten die Ungleichungen

$$\begin{aligned} D_{10} &\leq D_{21} \leq D_{32} \leq D_{43}, \\ D_{10} &\leq D_{31} \end{aligned} \quad (\text{E4.8})$$

Die zu wählende Stichprobenfunktion ist von der Anwendung abhängig. Für den Vergleich von Sprühstrahlen kann auf  $D_{10}$  zurückgegriffen werden. Die Verwendung anderer Schätzungen wird im Vergleich dazu zu keinen Verschiebungen führen.

**Tabelle E4.1:** Schätzungen für den Tropfendurchmesser und Anwendungsgebiete [Lefebvre 89]

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

An dieser Stelle wird auf die Beschreibung typischer Tropfendurchmesserverteilungen nicht eingegangen. Es wird hier auf [Lefebvre 89, Chow et al. 98, Starke et al. 96] verwiesen.