

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Fein verteiltes Wasser  
als Volumen- und Oberflächenlöschmittel

# 98

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER  
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

# **Fein verteiltes Wasser als Volumen- und Oberflächenlöschmittel**

Forschungsbericht Nr. 98

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

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

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt  
Heyrothsberge  
Juni 1996

ISSN 0179-0060

---

FA: Nr. 17 (5/95) H

# BERICHTS-KENNBLETT

1. BERICHTSNUMMER

Instituts-Bericht Nr. 344

2. TITEL DES BERICHTES (KURZ)

Fein verteiltes Wasser als Volumen- und Oberflächenlöschmittel

3. AUTOR(EN)

Brandoberrat Dr. Horst Starke  
Dipl.-Phys. Friedrich-Wilhelm Wienecke  
Branddirektor Prof. Dr. Grabski

4. DURCHFÜHRENDE INSTITUTION (NAME/ANSCHRIFT)

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt  
Biederitzer Straße 5  
D-39175 Heyrothsberge  
Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Grabski  
Branddirektor

5. FÖRDERNDE INSTITUTION/AUFTRAGGEBER (NAME/ANSCHRIFT)

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer  
Arbeitskreis V - Unterausschuß „Feuerwehrangelegenheiten“

6. ABSCHLUßDATUM

April 1996

7. FÖRDER-/ AUFTRAGS-NR.

IMK 17 (5/95) H

8. SEITENZAHL

112

9. ABBILDUNGEN

71

10. TABELLEN/DIAGRAMME

5

11. LITERATURANGABEN

64

12. KURZFASSUNG

Ausgehend von einer Zusammenstellung der Verfahren zur Messung von Tropfendurchmessern und -geschwindigkeiten wird der am IdF aufgebaute Meßplatz zur Sprühstrahlvermessung beschrieben. Kernstück ist ein Phasen-Doppler-Anemometer, dessen Meßprinzip erläutert wird.

Bei den Versuchen wurden 5 Sprühstrahlrohre/Pistolen berücksichtigt, wobei einige Parameter variiert wurden. Dabei wurden mobil eingesetzte Sprühstrahlrohre/Pistolen aus dem Normal- und Hochdruckbereich berücksichtigt. Es wurden insgesamt 10 Sprühstrahlen vermessen. Die Ergebnisaufbereitung erfolgte in Form von 3D-Grafiken und Diagrammen. Die für die Auswertung wichtigen Grundlagen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematischen Statistik sind im Bericht zusammengestellt worden.

13. SCHLAGWÖRTER

Sprühstrahlen, Wassernebel, Wasseraerosole,  
Tropfenverteilung, Tropfengeschwindigkeit,  
Lasermesstechnik, Statistik,  
Wahrscheinlichkeitsrechnung

14. VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

Juli 1996

# Inhalt

	Verzeichnis der Bilder	ii
	Verzeichnis der Tabellen	v
	Symbolik	vi
1	Einführung	1
2	Sprühstrahlen bei der Feuerwehr	3
2.1	Begriffsbildung	3
2.2	Zerstäuben von Flüssigkeiten	5
2.3	Erzeugung von Sprühstrahlen durch die Feuerwehr	8
2.4	Problemstellungen	10
3	Verfahren zur Tröpfchenvermessung in Zweiphasenströmungen	11
3.1	Begriffe und Definitionen	11
3.2	Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung	14
3.3	Abbildende Meßverfahren	17
3.4	Lasermeßverfahren	20
4	Statistische Beschreibung von Sprühstrahlen	27
4.1	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der mathematischen Statistik	27
4.2	Beziehungen zwischen den Momenten	32
4.3	Spezielle Verteilungen des Tropfendurchmessers	34
5	PDA-Meßplatz	37
5.1	Ausgewählte Bestandteile des PDA-Meßplatzes	37
5.2	Beschreibung des Meßplatzes	39
6	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	42
6.1	Versuchsprogramm	42
6.2	Schritte der Versuchsauswertung	43
6.3	Auswertungen für den einzelnen Sprühstrahl	46
6.4	Vergleichende Auswertungen	88
7	Zusammenfassung	99
	Literaturverzeichnis	101

## Verzeichnis der Bilder

2.1	Bezeichnung des Sprühstrahls in Abhängigkeit vom Durchmesser	3
2.2	Anzahl und Oberfläche der aus // Wasser erzeugten Tropfen	4
3.1	Zerlegung des Geschwindigkeitsvektors in Komponenten	11
3.2	Prinzipiskizze eines einfachen Hitzdrahtanemometers	15
3.3	Prinzipieller Aufbau einer Drucksonde	16
3.4	Reflexion und Brechung am Wassertropfen	21
3.5	Lichtstreuung an einer Luftblase im Wasser	21
3.6	Lichtstreuung an einem Wassertropfen in Luft	21
3.7	Typische Streulichtintensität	22
3.8	Intensitätsprofil eines Laserstrahls	23
3.9	Interferenzstreifenmuster im Meßvolumen	23
3.10	Aufbau eines Phasen-Doppler-Anemometers	24
3.11	Typischer Doppler-Burst	24
5.1	Bestandteile des Phasen-Doppler-Anemometers am IdF	37
5.2	Bestandteile des Bildverarbeitungssystems	38
5.3	Parametermeßsystem	38
5.4	Der Bedienstand in der Übersicht	39
5.5	Blick auf den gesamten Versuchsstand	39
5.6	Positioniersystem für das PDA	40
5.7	Seitenansicht der Verfahreneinrichtung	41
6.1	Typische Bildschirmdarstellung für die On-line-Auswertung	44
6.2a	Sprühstrahlrohr span45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser	48
6.2b	Sprühstrahlrohr span45 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung	49
6.2c	Sprühstrahlrohr span45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten	50
6.2d	Sprühstrahlrohr span45 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	51
6.3a	Sprühstrahlrohr span90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser	52

6.3b	Sprühstrahlrohr span90 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	53
6.3c	Sprühstrahlrohr span90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	54
6.3d	Sprühstrahlrohr span90 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	55
6.4a	Sprühstrahlrohr spqn45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	56
6.4b	Sprühstrahlrohr spqn45 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	57
6.4c	Sprühstrahlrohr spqn45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	58
6.4d	Sprühstrahlrohr spqn45 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	59
6.5a	Sprühstrahlrohr spqn90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	60
6.5b	Sprühstrahlrohr spqn90 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	61
6.5c	Sprühstrahlrohr spqn90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	62
6.5d	Sprühstrahlrohr spqn90 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	63
6.6a	Sprühstrahlrohr ppnn06 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	64
6.6b	Sprühstrahlrohr ppnn06 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	65
6.6c	Sprühstrahlrohr ppnn06 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	66
6.6d	Sprühstrahlrohr ppnn06 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	67
6.7a	Sprühstrahlrohr ppnn10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	68
6.7b	Sprühstrahlrohr ppnn10 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	69
6.7c	Sprühstrahlrohr ppnn10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	70
6.7d	Sprühstrahlrohr ppnn10 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	71
6.8a	Sprühstrahlrohr ppan10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	72

6.8b	Sprühstrahlrohr ppan10 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	73
6.8c	Sprühstrahlrohr ppan10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	74
6.8d	Sprühstrahlrohr ppan10 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	75
6.9a	Sprühstrahlrohr ppah20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	76
6.9b	Sprühstrahlrohr ppah20 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	77
6.9c	Sprühstrahlrohr ppah20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	78
6.9d	Sprühstrahlrohr ppah20 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	79
6.10a	Sprühstrahlrohr ppnh20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	80
6.10b	Sprühstrahlrohr ppnh20 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	81
6.10c	Sprühstrahlrohr ppnh20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	82
6.10d	Sprühstrahlrohr ppnh20 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	83
6.11a	Sprühstrahlrohr ppnh30 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)	84
6.11b	Sprühstrahlrohr ppnh30 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	85
6.11c	Sprühstrahlrohr ppnh30 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)	86
6.11d	Sprühstrahlrohr ppnh30 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)	87
6.12a	Sprühstrahlrohre span45 und spqn45 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	89
6.12b	Sprühstrahlrohre span45 und spqn45 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	90
6.13a	Sprühstrahlrohre span90 und spqn90 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	91
6.13b	Sprühstrahlrohre span90 und spqn90 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	92
6.14a	Sprühstrahlrohre ppnn06 und ppnn10 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	93

6.14b	Sprühstrahlrohre ppnn06 und ppnn10 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	94
6.15a	Sprühstrahlrohre ppan10 und ppah20 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	95
6.15b	Sprühstrahlrohre ppan10 und ppah20 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	96
6.16a	Sprühstrahlrohre ppnn06 und ppnh30 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	97
6.16b	Sprühstrahlrohre ppnn06 und ppnh30 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)	98

## Verzeichnis der Tabellen

2.1	Einteilung der dispersen Systeme nach dem Aggregatzustand der Bestandteile	3
2.2	Einteilung der dispersen Systeme nach der Teilchengröße (Dispersum)	4
2.3	Anzahl und Oberfläche der aus // Wasser erzeugten Tropfen	5
4.1	Schätzungen für den Tropfendurchmesser und Anwendungsgebiete	34
6.1	Parameter der durchgeführten Versuche	43

## Symbolik

$a$	- Skalenparameter der Weibullverteilung - Parameter der Verteilung von Nukiyama und Tanasawa - Parameter der 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolischen Verteilung
$A$	- Fläche bzw. Oberfläche - Parameter der 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolischen Verteilung
$b$	- Parameter der Verteilung von Nukiyama und Tanasawa
$d$	- Tropfendurchmesser in $m$
$d_m$	- Modalwert
$D$	- Zufallsgröße für den Tropfendurchmesser
$D_{ab}$	- Punktschätzfunktion für den Tropfendurchmesser der Ordnung $a+b$
$D(X)$	- Standardabweichung der Zufallsgröße $X$
$D^2(X)$	- Varianz der Zufallsgröße $X$
$E(X)$	- Erwartungswert der Zufallsgröße $X$
$f_x(t)$	- Dichtefunktion der Zufallsgröße $X$
$F_n(t)$	- empirische Verteilungsfunktion
$F_x(t)$	- Verteilungsfunktion der Zufallsgröße $X$
$g(t)$	- Funktion
$h$	- Höhe in $m$
$h(t)$	- inverse Funktion von $g(t)$
$I$	- Stromstärke in $A$
$m_k$	- gewöhnliches Moment k-ter Ordnung
$\hat{M}_k$	- Punktschätzfunktion für das gewöhnliche Moment k-ter Ordnung
$n$	- ganzzahliger Index, Stichprobenumfang
$n_{rel}$	- relativer Brechungsindex
$\hat{N}_k$	- Punktschätzfunktion für das zentrale Moment k-ter Ordnung
$p$	- Druck in $N/m^2$ bzw. $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$ - Formparameter der Weibullverteilung - Parameter der Verteilung von Nukiyama und Tanasawa - Wahrscheinlichkeit
$p_0$	- statischer Druck in $N/m^2$ bzw. $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
$P(...)$	- Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses

$q$	- dynamischer Druck in $N/m^2$ bzw. $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$ - Parameter der Verteilung von Nukiyama und Tanasawa
$Q_p$	- Quantil der Ordnung $p$
$\vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$	- zeitabhängiger Ortsvektor mit seinen zeitabhängigen Komponenten
$R$	- elektrischer Widerstand in $\Omega$
$s(t)$	- zeitabhängige Wegfunktion
$S$	- Punktschätzfunktion für die Standardabweichung
$S^2$	- Punktschätzfunktion für die Varianz
$S_n(t)$	- Anzahl der Stichprobenelemente, die kleiner als $t$ sind
$t$	- reellwertiger Parameter unterschiedlicher Dimension - Zeit in $s$
$T$	- Temperatur in $K$ oder $^{\circ}C$
$Tr$	- Index für Tropfen
$v, v(t)$	- Geschwindigkeit in $m/s$
$v_x, v_y, v_z$	- Geschwindigkeitskomponenten, hier für die $x, y, z$ -Richtung
$\vec{v}(t)$	- Geschwindigkeitsvektor
$V$	- Zufallsgröße der Geschwindigkeit in $m/s$ - Modulationstiefe - Volumen in $m^3$
$x$	- reellwertiger Parameter - Realisierung der Zufallsgröße $X$
$X$	- Zufallsgröße
$\bar{X}$	- Punktschätzfunktion für das Stichprobenmittel
$Y$	- Funktion der Zufallsgröße $X$ , standardisierte Zufallsgröße
$\alpha$	- Parameter der Mie-Streuung
$\varepsilon$	- Einfallswinkel
$\varepsilon'$	- Brechungswinkel
$\varphi$	- Winkel
$\lambda$	- Wellenlänge in $m$
$\mu$	- Erwartungswert der Normalverteilung - Parameter der 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolischen Verteilung
$\mu_k$	- zentrales Moment $k$ -ter Ordnung
$\mu_0$	- Parameter der 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolischen Verteilung
$\nu$	- Frequenz in $Hz$

- $\rho$  - Dichte in  $kg/m^3$
- $\sigma^2$  - Varianz der Normalverteilung
- $\theta$  - Parameter der 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolischen Verteilung
- $\hat{\vartheta}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  - Punktschätzwert für  $\Theta$
- $\hat{\Theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$  - Punktschätzfunktion für den Parameter  $\Theta$

### Konstanten

- $g$  - Fall- bzw. Erdbeschleunigung,  $9,80665 \cdot m \cdot s^{-2}$
- $Ma$  - Machzahl
- $R$  - allgemeine Gaskonstante,  $8,314510 \cdot J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
- $\pi$  - 3,14159

### Mathematische Operationen und Bezeichnungen

- $\frac{df(x)}{dx}$  bzw.  $f'(x)$  - Ableitung der Funktion  $f(x)$  nach  $x$
- $\Delta x$  - Differenz von zwei Werten der Variablen  $x$
- $\dot{x}$  - Ableitung der Variablen  $x$  nach der Zeit
- $\int_a^b \dots dx$  - bestimmtes Integral von  $a$  bis  $b$  über eine Funktion in Abhängigkeit von  $x$
- $(x_1, x_2)$  - offenes Intervall von  $x_1$  bis  $x_2$  der Variablen  $x$
- $\bar{x}$  - der Querstrich ist das Symbol für den Mittelwert der Größe  $x$
- $\vec{x}$  - der Pfeil bezeichnet den Vektor der Größe  $x$
- $x_1, x_n, x_T, \dots$  - durch Indizes (Ziffern, kleine oder große Buchstaben) werden verschiedene Werte der Größe  $x$  unterschieden
- $|x|$  - Betrag der Größe  $x$

# 1 Einführung

Wasser ist auf der Erde weit verbreitet. Seit Jahrhunderten wird es als „natürliches“ Löschmittel verwendet (s. [Zeising]) und es ist in der griechischen Naturphilosophie neben Luft, Erde und Feuer eines der vier Grundelemente [Rossotti 94]. Für die Verwendung des Wassers als Löschmittel sprechen nach wie vor folgende Gründe:

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

Die grundlegenden Technologien zur Wasserausbringung zum Zwecke des Löschens sind langjährig erprobt (Pumpen, Düsen, Schläuche mit erforderlichen Armaturen usw.) und haben sich ständig entwickelt. Wasser als Löschmittel optimal einzusetzen heißt, mit möglichst geringem Wasserverbrauch eine maximale Löschwirkung zu erzielen.

Gegenwärtig gibt es eine Reihe neuer Entwicklungen von Löschtechniken, die die Konsistenz des Wassers so verändern, daß die Löschwirkung in einer konkreten Brandsituation erhöht wird. Einige Verfahren sind darauf ausgerichtet, Wasser in äußerst fein verteilter Form zu benutzen. Mit derartigen neuen technischen Lösungen entstehen zugleich Fragen, die die Einsatztaktik der Feuerwehren betreffen und die in der Regel auch mit logistischen Problemstellungen verbunden sind [Smith 95].

Ursachen für das verstärkte Interesse am Löschmittel Wasser sind u. a. [Grabski et al. 95]:

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

- ◆ Nicht zuletzt bewirken die ökonomischen Zwänge vor allem im baulichen Brandschutz, die tatsächlich erforderliche Sicherheit mit möglichst wenig Kosten zu realisieren. Dies führt dazu, daß auch die üblichen Löschverfahren mit Wasser (z.B. Sprinklerung) auf ihre Effizienz geprüft werden, um eventuelle Leistungsreserven zu erschließen.

Für viele der vorstehend genannten Probleme erscheint der Einsatz von feinverteiltem Wasser, insbesondere in Form von Nebeln, als vielversprechend.

Die Verbesserung der Löschwirkung des Löschmittels Wasser erfordert es, seine physikalische Beschaffenheit dem Brandgeschehen anzupassen. Um die einzelnen Effekte untersuchen zu können, wird zunächst auf das Hinzugeben von chemischen Zusätzen verzichtet. Der physikalische Zustand des Wassers beim Löschen ist vor allem durch das Tropfenspektrum und seine räumliche Ausdehnung charakterisiert. Hierbei sind die konkreten Strömungsbedingungen, die Erzeugung des feinverteilten Wassers sowie die zeitliche Verteilung zu berücksichtigen [Lefebvre 89, van der Geld et al. 94].

**Eine wissenschaftliche Betrachtung erfordert, Sprühnebel zu charakterisieren und deren Löscheigenschaften zu untersuchen. Der erste Schritt besteht in der Wahl geeigneter Meßmethoden und eine darauf aufbauende Beschreibung der erzeugten Sprühstrahlen mittels statistischer Verfahren. Diesem Anliegen ist der vorliegende Forschungsbericht gewidmet. Im Mittelpunkt stehen die im mobilen Feuerwehreinsatz erzeugten Sprühstrahlen.**

In einem Fortsetzungsprojekt gilt es, die erhaltenen Resultate mit Löschversuchen zu koppeln, um Wirkprinzipien zu erkennen und die Löschwirksamkeit der Nebel zu bewerten.

Die Untersuchung der Sprühstrahlen ist aber nicht nur aus der Sicht des Löschens von Interesse. Das betrifft auch andere Anwendungsgebiete wie zum Beispiel den Einsatz von feinverteiltem Wasser zum Zweck des Kühlens, zur Absorption von Schwergasen mit dem Ziel der Konsequenzminderung bei Havarien (vgl. [Barth et al. 86]) u. a.

Der vorliegende Bericht befaßt sich im zweiten Kapitel mit der Einführung von Begriffen und ausgewählten Prinzipien der Erzeugung von feinverteiltem Wasser.

Das Problem der Vermessung von Sprühstrahlen (Tropfengröße und Geschwindigkeit) wird im dritten Kapitel behandelt. Auf die Phasen-Doppler-Anemometrie wird dabei ausführlicher eingegangen, da ein auf diesem Verfahren basierender Meßplatz am IdF aufgebaut wurde.

Daran schließt sich eine kurze Zusammenstellung von Begriffen und Aussagen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematischen Statistik an. Dabei wird auf die im Zusammenhang mit der Untersuchung von Sprühstrahlen/Sprays häufig verwendeten Durchmesser-schätzungen eingegangen, und es werden einige zwischen ihnen bestehende Beziehungen angegeben.

Das fünfte Kapitel enthält eine Beschreibung des am IdF aufgebauten Versuchsplatzes. Daran schließen sich eine Schilderung der durchgeführten Versuche sowie einige Schlußfolgerungen an.

Der Anhang enthält grafische Darstellungen für die Tropfendurchmesserverteilung sowie das Geschwindigkeitsprofil für die betrachteten Strahlrohre.

## 2 Sprühstrahlen bei der Feuerwehr

### 2.1 Begriffsbildung

#### Disperse Systeme, Zweiphasenströmungen

Ein aus mindestens zwei Bestandteilen bestehendes Stoffsystem wird als disperses System bezeichnet, wenn ein Bestandteil in mindestens einer Ausdehnung mikroskopisch klein ist. Dabei ist der disperse Bestandteil (Dispersum) im Dispersionsmittel (Dispergens) fein verteilt. In Abhängigkeit vom Aggregatzustand der Bestandteile, die auch als Phasen bezeichnet werden, unterscheidet man die in Tabelle 2.1 angegebenen dispersen Systeme.

**Tabelle 2.1:** Einteilung der dispersen Systeme nach dem Aggregatzustand der Bestandteile [Brockhaus 89]

Bezeichnung	Dispersionsmittel (Dispergens)	disperser Bestandteil (Dispersum)
Nebel Aerosol	} gasförmig	flüssig fest
Schaum Emulsion Sol		} flüssig
fester Schaum	fest	} gasförmig flüssig fest

Neben dieser Bezeichnungsweise wird bei der Betrachtung von strömenden dispersen Systemen in der Regel von Zweiphasenströmungen gesprochen. Beides wird in diesem Bericht synonym verwendet.

Entscheidend für die Untersuchung und die zu wählenden Meßverfahren ist die Teilchengröße des Dispersums. Eine allgemeine Einteilung ist in Tabelle 2.2 vorgenommen worden.

Bei Sprühnebeln/Aerosolen handelt es sich nach dieser Einteilung um grobdisperse Systeme mit Wasser als Dispersum und dem Dispergens Luft. Die Tropfengrößen liegen im Bereich von einigen  $mm$  bis zu wenigen  $\mu m$ . Die Begriffsbildung zur Beschreibung der Sprühnebel ist auch hier nicht einheitlich, wie Bild 2.1 zeigt. Aus diesem Grund soll im folgenden von Nebeln bei Tropfengrößen  $\leq 0.1 mm$  gesprochen werden.

Bei den in diesem Projekt zu untersuchenden Zweiphasenströmungen handelt es sich um Sprühstrahlen. Es wird angenommen, daß die Wassertropfen sphärisch ausgeprägt sind, d. h. Kugelgestalt haben.

#### Monodisperse und polydisperse Sprühstrahlen

Man unterscheidet monodisperse und polydisperse Sprühstrahlen. Bei den monodispersen Sprühstrahlen sind die Tropfen annähernd gleich groß, wobei die Meßgenauigkeit zu berücksichtigen ist. In der VDI-Richtlinie 3491 wird ein Spray als monodispers definiert, wenn der Betrag der relativen Abweichung zwischen dem auf Basis einer Meßreihe ermittelten empirischen Erwartungswert  $\bar{X}$  und der Schätzung  $\hat{d}_m$  für den Modalwert (vgl. Abschnitt 4.1) kleiner 10 % ist, d. h.

$$\frac{|\bar{X} - \hat{d}_m|}{\hat{d}_m} < 0,1 \quad (2.1)$$

[Brenn 95].

Dieses Kriterium ist aber nicht für alle Problemstellungen geeignet, da das Streuungsmaß nicht berücksichtigt ist. Im Fall einer unimodalen symmetrischen Verteilung ist der theoretische Wert des Quotienten in (2.1) Null, unabhängig von der Streuung. Bei einer großen Streuung können die Tropfendurchmesser jedoch erheblich schwanken.

Bei polydispersen Sprühstrahlen sind Tropfen unterschiedlicher Größe enthalten. Die im Bereich der Feuerwehr eingesetzten Sprühstrahlrohre bzw. Pistolen liefern polydisperse Sprühstrahlen.

**Tabelle 2.2:** Einteilung der dispersen Systeme nach der Teilchengröße (Dispersum)  
[Brockhaus 89]

	grobdisperse Systeme	kolloiddisperse Systeme	molekulardisperse Systeme
Teilchengröße	$>10^{-6} m$	$10^{-6} \dots 10^{-9} m$	$<10^{-9} m$
Zahl der Atome je Teilchen	mehr als $10^9$	$10^3 \dots 10^6$	weniger als $10^3$
Betrachtungsmöglichkeiten der Teilchen	mit dem Auge bzw. im Mikroskop sichtbar	nur im Ultramikroskop sichtbar	unsichtbar
Trennungsmöglichkeiten zwischen Dispersionsmittel und dispersem Bestandteil	filtrierbar mit gewöhnlichem Filterpapier	filtrierbar mit Pergament, tierischen Membranen u. ä.	nicht filtrierbar

### Feinverteiltes Wasser (Nebel), Sprühstrahlen

Die Bezeichnung der Sprühstrahlen in Abhängigkeit von der Tropfengröße ist nicht einheitlich. Bild 2.1 vermittelt einen Überblick. Markant ist der Tropfendurchmesser von  $0,1 mm$ , der die Grenze zu den Aerosolen darstellt. Dies ist auch der Bereich, von dem ab von feinverteiltem Wasser gesprochen werden sollte.

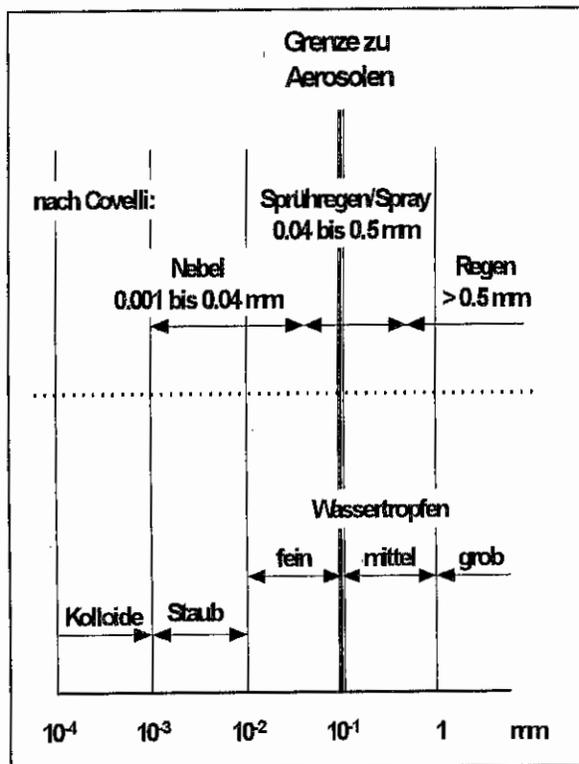
Im Ergebnis der Messungen stellte sich heraus, daß in Abhängigkeit vom jeweiligen Sprühstrahlrohr/Pistole auch Tropfen mit einem Durchmesser unter  $0,1 mm$  registriert wurden, jedoch die mittleren Durchmesser in den Meßpunkten in der Regel zwischen  $0,1$  und  $0,5 mm$  liegen. Aus diesem Grund wird im folgenden von Sprühstrahlen gesprochen.

Betrachtet man die bei der Tropfenbildung aus  $H_2O$  Wasser erzeugte Oberfläche, so kann festgestellt werden, daß sich die Tropfenoberfläche indirekt proportional zur Änderung des Durchmessers verhält. Tabelle 2.3 und Bild 2.2 verdeutlichen 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.

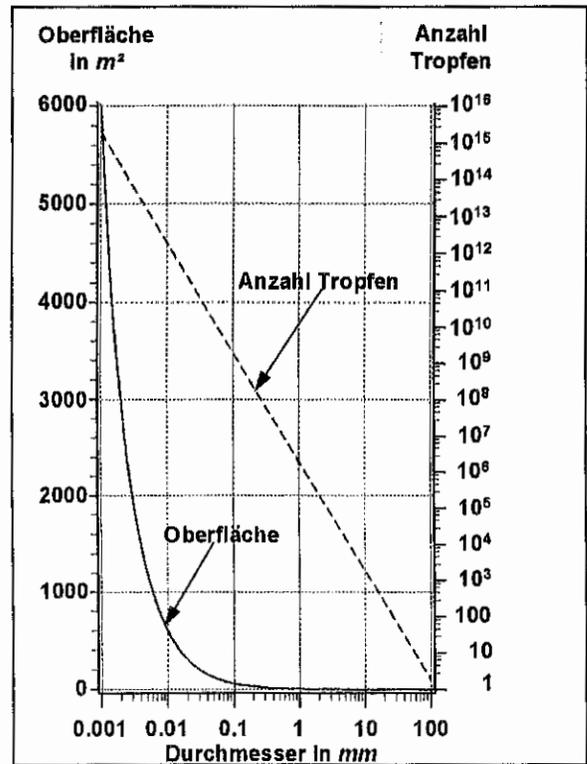
**Tabelle 2.3:** Anzahl und Oberfläche der aus // Wasser erzeugten Tropfen

Tropfen-durchmesser in mm	Anzahl der Tropfen	Oberfläche in m <sup>2</sup>
1	1,91*10 <sup>3</sup>	6
0,1	1,91*10 <sup>6</sup>	60
0,01	1,91*10 <sup>9</sup>	600
0,001	1,91*10 <sup>12</sup>	6000

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. Auf eine umfassende Diskussion der anderen Löscheffekte soll hier verzichtet werden. Es sei z. B. auf [Grabski et al. 95, Covelli 93] verwiesen.



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



**Bild 2.2:** Anzahl und Oberfläche der aus // Wasser erzeugten Tropfen

## 2.2 Zerstäuben von Flüssigkeiten

### Zerstäuben von Flüssigkeiten, Anwendungsgebiete

Die Bezeichnung „Zerstäuben“ ist genau genommen falsch, da kein Staub erzeugt wird, sondern ein Sprühstrahl. Sie hat sich aber in der Fachliteratur durchgesetzt und wird auch hier beibehalten.

Der Prozeß der Tropfenbildung bei Flüssigkeiten ist im Zusammenhang mit technischen Anwendungen von vielen Autoren untersucht worden. Das betrifft zum Beispiel:

- ◆ Beschichtungs- und Reinigungsvorgänge (Lackieren u. a.),
- ◆ Energieumwandlungsprozesse (Verbrennungsmotoren u. a.),
- ◆ Spraytrocknung und Erzeugung von Granulaten,
- ◆ landwirtschaftliche,
- ◆ kosmetische,
- ◆ medizinische Anwendungen.

Die Aufzählung ließe sich noch fortsetzen. Voraussetzung für effektive Resultate bei den Anwendungen ist die Kenntnis und technische Beherrschung des Zerstäubungsprozesses. Bei den oben angeführten Anwendungen ist man bemüht, monodisperse Sprühstrahlen zu erzeugen, um eine hohe Produktqualität zu sichern. Grundlegende Ausführungen dazu sind in [Bauckhage 90, Brauer 71, Lefebvre 89, Schmidt et al. 80] enthalten.

### **Zerstäuber, Düsen**

Im folgenden wird nur auf einige Zerstäuber und deren Wirkprinzipien eingegangen, die bei der Konstruktion von Sprühstrahlrohren und Sprühpistolen von Bedeutung sind. Der Begriff der Düse ist weit gefaßt. Es gibt Düsen, die Vollstrahlen erzeugen sollen, die möglichst stabil bleiben und nicht in Tropfen zerfallen sollen. Mit derartigen Wasserstrahlen läßt sich bei hohen Drücken sogar Stahlbeton schneiden. Hier werden aber nur die Düsen betrachtet, die auch als Zerstäuber verwendet werden können.

#### ◆ **Düsen**

Bei den als Zerstäuber eingesetzten Düsen unterscheidet man wiederum drei Arten:

##### • **Druckzerstäuber**

In diese Düsen wird Wasser gepumpt. Der Arbeitsdruck am Pumpenausgang beträgt bei stationären Löschanlagen im Niederdruckbereich bis *16 bar* und im Mitteldruckbereich bis ca. *60 bar*. Im Hochdruckbereich kann er sogar über *300 bar* [Järvinen 92] betragen. Bei mobilen Löschverfahren wird im Zusammenhang mit den auf Feuerwehrfahrzeugen eingesetzten Schnellangriffseinrichtungen, deren Pumpenausgangsdruck bis ca. *40 bar* reicht, bereits vom Hochdrucklöschen gesprochen. Es gibt auch mobile Löschgeräte, die mit Drücken über *200 bar* [Minimax 95] arbeiten.

Die technischen Ausführungen sind sehr vielfältig. Im einfachsten Fall ist der Düseninnenraum im Bereich des Wasseraustritts einem Zylinder ähnlich, aus dem ein fast laminarer Wasserstrahl austritt. Mit diesen Vollstrahlen wird zwar eine große Wurfweite erreicht, jedoch sind diese zur Erzeugung von Sprühstrahlen denkbar ungeeignet und sollen hier auch nicht weiter betrachtet werden.

Durch Veränderung der Düsengeometrie und Hinzufügen von zum Teil verstellbaren Düseneinsätzen (Kernen) wird am Düsenausgang eine starke Turbulenz des ausströmenden Wassers erzeugt. Diese führt zu einem schnellen Strahlzerfall.

Ziel der Konstruktionen ist, ein möglichst gleichmäßiges, kegelförmiges, rotationssymmetrisches Sprühbild zu erzeugen. Es gibt aber auch Düsen, die andere Sprühstrahlformen ausbilden, z. B. Flachstrahlen oder rechteckige Sprühbilder.

- **Rotationszerstäuber**

Bei diesen Düsen trifft ein Wasserstrahl auf eine rotierende Scheibe bzw. auf eine rotierende Hülle. Durch Variieren der Geometrien können auch hier unterschiedliche Sprühbilder erzeugt werden.

Es gibt auch eine Reihe von Mischformen, zum Beispiel, wenn Düsenkerne oder Teile der Düsenöffnung rotieren.

Bei den meisten Düsen wird ein kegelförmiger Tropfenschwarm erzeugt. Je nach Konstruktion unterscheidet man zum Beispiel:

- Pralldüsen, bei denen ein Flüssigkeitsstrahl auf einen Deflektor trifft. In Abhängigkeit von der Deflektoroberfläche wird der Strahl zerteilt.
- Dralldüsen, bei denen durch einen Drallkörper im Düseninnern eine Rotationsbewegung realisiert wird.
- Zwillingsdüsen, bei denen Flüssigkeit am Rand des Kegels und im Innern zerstäubt wird. Dadurch werden zwei unterschiedliche Tropfenspektren gleichzeitig erzeugt.

- **Zweistoffzerstäuber**

Bei der Zweistoffdüse werden gleichzeitig eine Flüssigkeit und ein gasförmiges Medium eingesetzt. Das können zum Beispiel Wasser und Luft sein. Dabei wird zwischen der internen Mischung von Flüssigkeit und Gas im Düseninnern und einer externen Mischung außerhalb des Düsenkörpers unterschieden. Strömen Flüssigkeit und Gas mit unterschiedlicher Geschwindigkeit oder sind die Strömungsrichtungen nicht parallel ausgerichtet, so werden Druckwellen erzeugt, die ein Aufreißen der Flüssigkeitsoberfläche in zum Teil sehr kleine Tropfen bewirken.

Auf das Zerstäuben und damit im Zusammenhang stehende Problemstellungen wird bei [Bauckhage 90, Brauer 71, Grassmann 61, Lefebvre 89, Schmidt et al. 82, Schmidt 91, Wang 94] näher eingegangen.

- ◆ **Sprinkler**

Sprinkler werden beim Bau stationärer Löschanlagen eingesetzt. Wie bei den Düsen werden je nach Einsatzart vielfältige Formen und Varianten unterschieden. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß Sprinkleranlagen mit einem integrierten Branderkennungssystem versehen sind. Bei klassischen Sprinklern sind das zum Beispiel kleine mit Flüssigkeit gefüllte Glasgefäße, die bei Erwärmung platzen und dadurch den Sprinkler öffnen. Da im Rahmen dieses Versuchsprogramms nur mobile Löschmittelauswurfvorrichtungen betrachtet werden, soll auf Sprinkler nicht näher eingegangen werden. Es sei lediglich auf [Bryan 90, Bryan 93, Nash et al. 91, Schremmer 94, Wang 94] verwiesen.

## **Tropfenausbildung**

Von den Zweistoffdüsen abgesehen, beginnt der eigentliche Prozeß der Zerstäubung erst außerhalb der Düse, wenn sich die Flüssigkeit in der Luft zerteilt. Dabei tritt nicht sofort eine völlige Zerteilung in Tropfen auf. Einige Erscheinungen seien kurz verbal erläutert.

- ◆ Strömt Wasser durch eine kleine Öffnung, so bildet sich zunächst ein Faden aus. Auch bei einer laminaren Strömung kommt es zu einem Tropfenzerfall infolge der Instabilität der Oberfläche in der Größenordnung des Strahles. Das ist durch die Oberflächenspannung des Wassers und durch die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Luft

und Wasserfäden bedingt. Dabei entstehen in der Regel unterschiedlich große Tropfen. Beim „Abreißen“ sind die Tropfen noch nicht sphärisch ausgeprägt. Es kommt in diesem Prozeß häufig dazu, daß noch ein zweiter kleinerer Tropfen gebildet wird. Eine Kugelform besitzt die geringste Oberflächenenergie. Ist diese noch nicht ausgeprägt, so kommt es zu Schwingungen der „Wassertropfen“ um diese Kugelform. Das kann zur Zerlegung in kleinere Tropfen führen. Diese als Sekundärerfall bezeichnete Tropfenbildung wird u. a. von [Samenfink et al. 94, Samenfink 95]) untersucht.

- ◆ Ist die Öffnung wesentlich größer, so zerfällt der Strahl über mehrere Etappen. Die erforderlichen Zerstäubungsimpulse werden dadurch erzeugt, daß in der Düse Querschnitte verengt werden. Dadurch erhöht sich die kinetische Energie. Tritt die Flüssigkeit aus der Düse, so entspannt sie sich. Es entstehen Flüssigkeitslamellen, die in Tropfen zerfallen.

Die Form der Zwischengebilde und die Größe der resultierenden Tropfen hängen wesentlich von der Geometrie der Düse, den Druckverhältnissen, der Strömungsgeschwindigkeit, dem Grad der Turbulenz und anderem ab.

- ◆ Strömt Wasser durch einen schmalen Spalt, so kommt es zu Ausbildung von Filmen, die ebenfalls über mehrere Etappen in Tropfen zerfallen. Die resultierenden Tropfengrößen hängen von der Filmdicke und den Strömungsverhältnissen ab.

Fotografien und Skizzen zu diesen Vorgängen sind in [Brauer 71, Lefebvre 89, Schmidt et al. 80, Lechler 94] enthalten.

Für die experimentellen Arbeiten ist zu beachten, daß die Tropfenbildung nicht hinter der Düsenöffnung vollzogen ist. Wie groß dieser Abstand ist, hängt von der betrachteten Düse ab. Da mit einem Phasen-Doppler-Anemometer nur sphärische Partikel gemessen werden können (vgl. Abschnitt 3.4), müssen die Meßpunkte dort liegen, wo die Tropfenbildung abgeschlossen ist.

## 2.3 Erzeugung von Sprühstrahlen durch die Feuerwehr

### Sprühstrahlrohre und Sprühstrahlpistolen

Die Entwicklung mobiler Löschmittelauswurfvorrichtungen ist wie bei den Düsen sehr vielfältig. Bei vielen der oben beschriebenen Anwendungen sind die Düsen in stationäre Anlagen oder abgeschlossene Systeme integriert. Das betrifft Chemieanlagen, Verbrennungsmotore u.a.

Im Feuerwehrbereich, gemeint ist hier der Bereich der Brand- und Havariebekämpfung mit mobilem Gerät, sind die Düsen in Strahlrohre integriert, die über eine Ankuppelmöglichkeit an Schläuche und über eine manuell zu betätigende Öffnungs- bzw. Verschußeinrichtung verfügen (s. [Ebert 88]).

#### ◆ Sprühstrahlrohre

Bei den Sprühstrahlrohren gibt es im Vergleich zu den Düsen eine Reihe von Besonderheiten. Um eine breite Einsatzmöglichkeit zu haben, sind viele Sprühstrahlrohre vom Vollstrahl zum Sprühstrahl manuell regulierbar. Einige bieten sogar die Möglichkeit, ein Wasserschild vor dem Feuerwehrmann zum Schutz vor Wärmestrahlung zu erzeugen. Bei den Versuchen wurden nur Sprühstrahlen betrachtet.

#### ◆ Pistolen

Der Unterschied zu den Sprühstrahlrohren liegt zunächst in der Form. Um ein sicheres Festhalten und eine gute Handhabung der Löschmittelauswurfvorrichtung zu gewährleisten, wurde eine an Gewehre und Pistolen angelehnte Form gewählt. Diese Entwicklungen sind in Form der Schnellangriffseinrichtungen insbesondere an das Hochdrucklöschverfahren gebunden. Allerdings gibt es diese auch beim Normaldruckbereich.

#### Weitere Formen zur Zerstäubung von Wasser im Feuerwehrbereich

Die folgenden Verfahren weichen in ihrer Dimension und Realisierung von den herkömmlichen Methoden und Verfahren zur Zerstäubung von Wasser ab. Es wird nur kurz das Zerstäubungsprinzip erläutert. Die darauf aufbauenden Löschverfahren und anderen Anwendungsmöglichkeiten sollen hier nicht diskutiert und bewertet werden (vgl. [Grabski et al. 95, Grabski et al. 96]).

#### ◆ Hydroschilde

Hydroschilde könnten als eine spezielle, großdimensionierte Form der Pralldüse angesehen werden. Auf eine halbkreisförmige Metallplatte (Deflektor) wird Wasser gespritzt, das sich entsprechend verteilt. Ziel ist es, ein senkrecht stehendes halbkreisförmiges Wasserschild zu erzeugen, das zum Beispiel die Ausbreitung von Schwergaswolken unterbinden oder vor Wärmestrahlung schützen soll.

#### ◆ Impulslöschverfahren

Die Grundidee besteht darin, in Bruchteilen einer Sekunde, wenig Wasser sehr fein zu zerstäuben. Das hat zur Folge, daß die Löschantensität

$$I_{\text{Lösch}} = \frac{V_{\text{Wasser}}}{t_{\text{Lösch}} \cdot A_{\text{Brand}}}, \quad (2.2)$$

das ist das pro Zeiteinheit auf eine Fläche aufgebrachte Wasservolumen, sehr groß wird. Dadurch kann der Wassereinsatz reduziert werden.

Ein typischer Vertreter ist die Wasserkanone. Sie besteht z. B. aus zwei hintereinander liegenden zylindrischen Kammern. Eine wird mit Preßluft gefüllt, die andere mit Wasser. Durch Lösen einer Arretierung wird durch die Trennwand zwischen beiden Kammern schlagartig ein hoher Druck auf die Wasserkammer ausgeübt. Dadurch wird das Wasser sehr schnell aus der Kanone geschleudert und versprüht.

#### ◆ Sprenglöschverfahren

Wie beim Impulslöschverfahren soll auch hier das Wasser in extrem kurzer Zeit mit Hilfe einer Sprengladung fein verteilt werden.

Bekannt ist das 2RS-Sprenglöschverfahren. In einen mit Wasser gefüllten Plastikschlauch ist eine Sprengschnur gezogen. Wird diese gezündet, so können in kurzer Zeit mehrere Kubikmeter Wasser in ein großes Volumen fein versprüht werden. Damit können große Poolbrände gelöscht werden. Eine Anwendung im Bereich der Waldbrandbekämpfung ist vielversprechend.

Zu den theoretischen Grundlagen sei auf [Grabski 95, Sedov 93] verwiesen.

### ◆ Abgas-Aerosol-Löschverfahren

In den Abgasstrahl einer Flugzeugturbine wird Wasser gespritzt. Nach dem Prinzip einer offenen Zweistoffdüse kann ein Sprühstrahl 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. Eine Weiterentwicklung wurde mit dem sogenannten Turbo-Löschler der BASF vollzogen (s. [Anonym 96, Fritsche 96, Hornung 96]).

## 2.4 Problemstellungen

Die durch die Feuerwehr verwendeten Sprühstrahlen sind bisher nur eingeschränkt untersucht worden. Ermittelt wurden meist nur folgende Parameter:

- ◆ Löschmittelvolumenstrom (d. h. wieviel Löschmittel wird pro Zeiteinheit verbraucht)
- ◆ Wurfweite in Abhängigkeit von den Druckverhältnissen
- ◆ Berechnungsdichte (durch Auffangen der Tropfen in Meßbechern und anschließendes Ausmessen)
- ◆ Tropfengröße (Einsatz von fotografische Verfahren und manuelles Ausmessen der auf den Fotos dargestellten Tropfen)
- ◆ ...

Die Untersuchungen von [Rimen 88] berücksichtigen mehrere dieser Parameter und wurden für eine Reihe von Sprühstrahlrohren und Pistolen durchgeführt.

Vor allem mit einsatztaktischen Fragen der Anwendung von Wassernebeln beschäftigt sich [Grimwood 92, Grimwood 93].

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, Grassmann 61, Lefebvre 89, Lekic et al. 76, van der Geld et al. 94, Wang 94] mit der statistischen Beschreibung der Tropfendurchmesser befaßt. Mit der Verfügbarkeit der Laser-Meßtechnik zur Partikelmessung ergeben sich neue Möglichkeiten. Das betrifft die ortsabhängigen Angaben

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

Letzterer Problematik ist die Arbeit von [Xu 96] gewidmet.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag zur Beantwortung der ersten beiden Fragestellungen geleistet. Darauf aufbauend können Löscheigenschaften von Sprühstrahlen und Wassernebeln untersucht und einsatztaktische Hinweise abgeleitet werden. Mit Löschmodellen lassen sich die Wirkungen von Sprühstrahlen erfassen.

### 3 Verfahren zur Tröpfchenvermessung in Zweiphasenströmungen

#### 3.1 Begriffe und Definitionen

##### Bahnlinie und Geschwindigkeit

Die Tropfen eines Sprühstrahles bewegen sich entlang einer Bahn, die als Bahnlinie bezeichnet wird. Diese verläuft nicht geradlinig und kann im Fall auftretender Turbulenzen einen sehr komplizierten Verlauf annehmen. Der Betrag der Bahngeschwindigkeit eines Tropfens berechnet sich nach

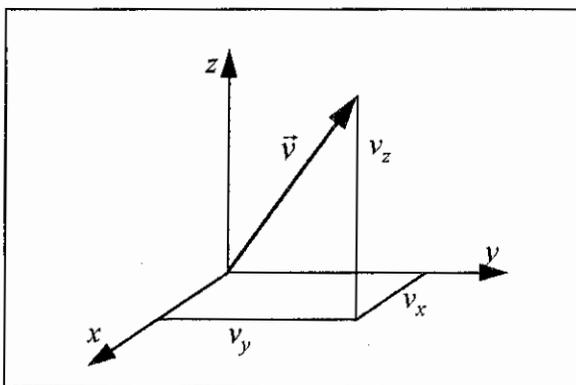
$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \dot{s}, \quad (3.1)$$

wobei  $\Delta s$  seine örtliche Änderung im Zeitintervall der Länge  $\Delta t$  ist. Aufgrund der komplizierten Bahnlinien ist es nicht möglich und auch nicht sinnvoll, diese sowie den Geschwindigkeitsverlauf im einzelnen zu verfolgen. Das betrifft sowohl die meßtechnische Erfassung als auch die analytische Beschreibung der Bahnlinien.

##### Zerlegung in Komponenten

Viele Meßverfahren bestimmen nur die Ortsveränderung in einer bestimmten Richtung, d. h. es wird die Geschwindigkeit in Komponenten zerlegt und nur eine oder mehrere dieser Komponenten gemessen. Geeignet ist hier eine vektorielle Betrachtungsweise. Dabei wird in der Regel das Euklidische Koordinatensystem, in dem drei Richtungsvektoren orthogonal aufeinanderstehen, gewählt. Hierbei wird die Bahnkurve in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  durch den Ortsvektor  $\vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$  beschrieben. Es gilt

$$\vec{v}(t) = (v_x, v_y, v_z) = (\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t)) = \dot{\vec{r}}(t) \quad (3.2)$$



**Bild 3.1:** Zerlegung des Geschwindigkeitsvektors in Komponenten

##### Interpolation und gemittelte Meßwerte

Der in (3.1) angegebene Grenzwert wird bei praktischen Messungen nicht realisiert. Das ist auch der Fall, wenn Meßwerte mit sehr hoher Frequenz bereitgestellt werden. Sehr schnelle Änderungen der Meßgrößen werden nicht genau erfaßt. Der tatsächliche Verlauf zwischen zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Meßpunkten wird durch eine Funktion interpoliert und oft als linear angenommen.

Sind die zeitlichen Veränderungen der zu messenden Größe im Vergleich zur Länge des

Meßintervalls  $(t_1, t_2)$  klein, so liefert das Meßverfahren für dieses Intervall einen repräsentativen Mittelwert der Meßgröße

$$\bar{v} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt. \quad (3.3)$$

Die Gleichung gilt analog auch für die einzelnen Komponenten sowie für andere Meßgrößen. Bei der Erläuterung der Meßverfahren wird darauf nach Bedarf näher eingegangen.

### Statistische Auswertung, Zufallsgrößen

Die Tropfen eines Sprühstrahles sind nicht monodispers. Ihr Durchmesser hängt vom technischen Erzeugungsprinzip, den Druckverhältnissen im Strahlrohr, der Durchflußmenge und vielen anderen Einflußgrößen ab. Gleiches gilt natürlich auch für die Geschwindigkeit der Tropfen. Die Vielzahl der Einflußparameter erlaubt keine befriedigende analytische Beschreibung dieser Vorgänge, aus der die gewünschten Aussagen für den Durchmesser und die Geschwindigkeit abgeleitet werden können.

Hier bieten statistische Verfahren Ansätze, die Sprühstrahlen zu beschreiben, um im Anschluß daran vergleichende Aussagen abzuleiten. Diese Verfahren gehen davon aus, daß die zu betrachtende Größe eine Zufallsgröße ist, die durch große Buchstaben bezeichnet wird. Stellvertretend für den Tropfendurchmesser  $D$ , die Geschwindigkeitskomponente  $V$  und weitere zu betrachtende Größen wird im folgenden  $X$  verwendet.

### Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion

Jede 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

$$f_X(t) \geq 0, \quad -\infty < t < +\infty, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx = 1 \quad (3.4)$$

bzw.

$$F_X(t) = P(X < t) = \int_{-\infty}^t f_X(x) dx, \quad (3.5)$$

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. Die Verteilungsfunktion an der Stelle  $t$  ist definiert als die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Zufallsgröße einen Wert annimmt, der kleiner als  $t$  ist. Aus dieser Definition folgen unmittelbar die Eigenschaften

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} F_X(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} F_X(t) = 1. \quad (3.6)$$

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. Auf beide Funktionen wird im Kapitel 4 noch näher eingegangen.

**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.**

## Felder, Vektorgrafiken, Falschfarbendarstellungen

Moderne rechnergestützte Meßverfahren liefern eine Vielzahl von Meßwerten, die ohne eine rechnergestützte Auswertung und eine geeignete grafische Aufbereitung nicht überschaubar und bewertbar sind. Für die Betrachtung von Strömungen (auch Zweiphasenströmungen) sind zur Visualisierung Vektorgrafiken geeignet, das sind bei diesem Beispiel vektorielle Darstellungen des Strömungsfeldes. Am Beispiel einer zweidimensionalen Darstellung eines Geschwindigkeitsfeldes sei das Prinzip erläutert. Auf das darzustellende Gebiet wird ein Gitter gelegt, das man sich wie ein kariertes Papier vorstellen kann. Es empfiehlt sich, die Abstände zwischen den Gitterpunkten gleich groß zu wählen. Für jeden Punkt werden die Strömungsrichtung und der Betrag der Geschwindigkeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Meß- oder Berechnungszeitpunkten bestimmt. Die resultierenden Vektoren werden in die Gitterpunkte eingezeichnet. Die entstehende Grafik erlaubt eine gleichzeitige Übersicht über die Richtung und den Betrag der Geschwindigkeit. Diese Vektorgrafiken werden in der Regel per Computer gezeichnet.

Ist nur eine skalare Größe darzustellen, wird häufig eine Falschfarbendarstellung verwendet. Dabei werden die Meßwerte auf die Farbskala abgebildet und somit jeder Meßwert in eine Farbe „umgesetzt“. Solche „Äquipotentiallinien“ charakterisieren das Feld ähnlich den Höhenlinien einer geografischen Karte als Isolinie. In der Praxis werden unterschiedliche Darstellungen gewählt. So können z. B. die Meßwerte durch die Palette aller Regenbogenfarben dargestellt werden oder man beschränkt sich auf wenige diskret abgestufte Farben, so daß Gebiete mit nahezu gleichen Meßwerten durch das Auge leichter erkannt werden können. Die erhaltene Farbe wird nun in jedem Punkt eingetragen und die Lücken durch Interpolation ausgefüllt.

## Lichtschnitte

Bei der Visualisierung von Strömungen mit Hilfe fotografischer und kinematografischer Verfahren ist die Beleuchtung außerordentlich wichtig. Da Sprühstrahlen sich nicht in der Ebene, sondern im Raum ausbreiten, ist es mit Hilfe einfacher fotografischer Aufnahmen schwer, Aussagen über den Strömungsverlauf oder Tropfengrößen zu machen.

Lichtschnitte bieten die Möglichkeit, Aufnahmen in ausgewählten „Ebenen“ zu machen, die nach Bedarf beliebig durch das dreidimensionale Spray gelegt werden können. Einen Lichtschnitt kann man sich als eine dünne, stark beleuchtete Fläche vorstellen. Technisch können diese Lichtschnitte heute mit leistungsfähigen Lasern ( $> 1W$ ) realisiert werden [Brenn et al. 96].

Gebräuchlich sind zwei Techniken.

- ◆ Der Laserstrahl wird durch eine kurzbrennweitige Zylinderlinse zu einer Ebene aufgespannt. Die beleuchtete „Ebene“ ist bis zu einigen *cm* breit.
- ◆ Eine Schwingenspiegel-Vorrichtung („scanner“) schwingt mit einer Frequenz, die deutlich größer als  $20\text{ Hz}$  ist. Da die Beleuchtung nicht kontinuierlich erfolgt, spricht man auch von einem „Pseudolichtschnitt“. Das menschliche Auge hat jedoch den Eindruck einer ständig beleuchteten Ebene.

Die Strömungsvisualisierung erfolgt durch Hinzugeben kleiner Teilchen (Tröpfchen, Pulver), die als „tracer“ wirken. Bei Zweiphasenströmungen dient die disperse Phase (Tropfen) selbst als „tracer“. Die Methode ist geeignet, Rückstromgebiete, Totzonen und andere Strömungsbesonderheiten zu visualisieren.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellte Übersicht der Meßverfahren erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie wurde in Verbindung mit der Untersuchung von Sprühstrahlen und den damit in Verbindung stehenden Problemstellungen zusammengestellt. Neben Messungen in Zweiphasenströmungen gilt das auch für Messungen in Strömungsfeldern der Luft. Diese Aussagen sind wichtig, wenn bei der Untersuchung von Löschprozessen, Absorptionsvorgängen u. a. Aussagen zum Volumen der mit dem Sprühstrahl mitgeführten Luft erforderlich sind.

## 3.2 Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung

Zunächst werden einige Anemometer und deren Meßprinzipien kurz erläutert. Im Anschluß daran wird auf ausgewählte Drucksonden eingegangen. Lasermeßverfahren werden im Abschnitt 3.4 behandelt.

### Schalenkreuz- und Flügelradanemometer

Diese Anemometer gehören zu den älteren Geschwindigkeitsmeßgeräten in Strömungen. Sie nutzen eine durch die Strömung erzeugte mechanische Drehbewegung zur Geschwindigkeitsmessung aus.

Beim Schalenkreuzanemometer sind senkrecht zur Drehachse offene Halbkugelschalen angeordnet, die in Abhängigkeit von der relativen Anströmgeschwindigkeit unterschiedliche Widerstände erfahren. Dadurch wird ein Drehmoment erzeugt, daß das Schalenkreuz in Bewegung setzt. Von der Drehzahl wird auf die Geschwindigkeit geschlossen.

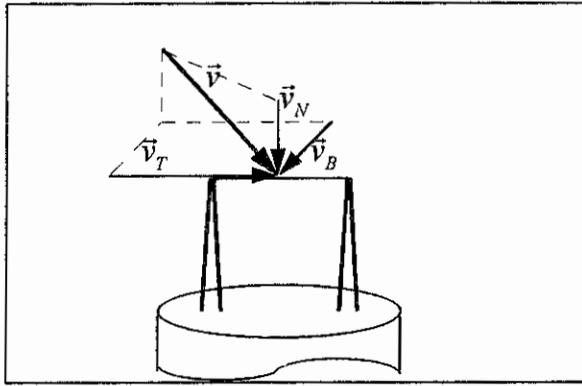
Das Flügelradanemometer arbeitet wie ein Propeller, im Unterschied zum Schalenkreuzanemometer muß die Drehachse in die Anströmrichtung weisen. Es wird die Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Drehachse gemessen. Soll die Geschwindigkeit in Strömungsrichtung gemessen werden, kann durch zusätzliche Verwendung einer „Windfahne“ das Anemometer in die Strömungsrichtung gedreht werden.

Schalenkreuz- und Flügelradanemometer werden zur Messung kleiner Geschwindigkeiten eingesetzt. Sie besitzen kein hohes zeitliches Auflösungsvermögen und liefern nur Mittelwerte (s. Gleichung (3.3) ), d. h. sie sind vor allem zur Messung von Geschwindigkeiten in laminaren Einphasenströmungen (Gase, Flüssigkeiten) geeignet.

### Hitzdrahtanemometer [Lienhart et al. 96, Tropea 96, Nitzsche 94]

Die Hitzdrahtanemometer nutzen thermoelektrische Effekte zur Geschwindigkeitsmessung aus. Es ist ein indirektes Meßverfahren, bei dem die Wärmeabgabe eines elektrisch erhitzten Drahtes an die Strömung zur Bestimmung der Geschwindigkeit ausgenutzt wird.

Der prinzipielle Aufbau ist im Bild 3.2 dargestellt. Zwischen den Halterstiften der Hitzdrahtsonde ist ein dünner Metalldraht (Durchmesser ca. 5  $\mu\text{m}$ , Länge wenige mm) gespannt. Dieser wird derart erhitzt, daß zwischen Draht und Strömung ein deutlicher Temperaturunterschied besteht. Durch die Strömung wird der Hitzdraht ständig abgekühlt. Mit Hilfe einer Brückenschaltung wird kontinuierlich so „nachgeheizt“, daß die Temperatur des Hitzdrahtes erhalten bleibt. Gemessen wird nur die elektrische Heizspannung, die erforderlich ist, um die Temperatur des Hitzdrahtes konstant zu halten (CTA — constant-temperature-anemometer).



**Bild 3.2:** Prinzipskizze eines einfachen Hitzdrahtanemometers

Im Bild 3.2 ist der Geschwindigkeitsvektor in die drei Komponenten

- $\vec{v}_N$  - normale Komponente  
(orthogonal zur Hitzdrahtachse,  
parallel zu den Haltestiften),
- $\vec{v}_B$  - binormale Komponente  
(orthogonal zur Hitzdrahtachse,  
orthogonal zu den Haltestiften)  
und
- $\vec{v}_T$  - die tangentielle Komponente  
(parallel zur Hitzdrahtachse)

zerlegt worden. Bei der Hitzdrahtanemometrie ist zu beachten, daß bei dem in Bild 3.2 dargestellten Anemometer nur die Geschwindigkeitskomponenten gemessen werden, die orthogonal zur Hitzdrahtachse verlaufen, wobei noch experimentell zu bestimmende Korrekturglieder zu berücksichtigen sind [s. Tropea 96, Lienhart 96].

Der Grund hierfür ist, daß mit kleinerem Anströmwinkel sich die Kühlfläche des Hitzdrahtes bezogen auf die Geschwindigkeit ändert. Das führt zu einer Verringerung der Heizspannung. Neben dem eben erläuterten CTA-Verfahren gibt es auch das CCA-Verfahren (constant-current-anemometer). Bei diesem wird die Stromstärke  $I$  konstant gehalten und der sich ändernde Widerstand  $R$  gemessen.

Folgende Anmerkungen zur Hitzdrahtanemometrie sind festzuhalten:

- ◆ Durch komplexere Sondengestaltung (z. B. mehrere Hitzdrähte, unterschiedlich lange Haltestifte mit resultierender schräger Hitzdrahtlage) lassen sich gleichzeitig auch die anderen Geschwindigkeitskomponenten messen.
- ◆ Die Hitzdrahtsonden sind zu kalibrieren. Da der Hitzdraht sehr empfindlich ist, wirken sich Verunreinigungen oder Ablagerungen auf die Meßergebnisse aus, weshalb bei verunreinigten Medien die Abstände der Kalibrierung klein zu halten sind.
- ◆ Bei geringen Geschwindigkeiten ( $< 0,5 \text{ m/s}$ ) sind Hitzdrahtanemometer-Messungen ungenau.
- ◆ Die Meßfrequenz kann im kHz -Bereich liegen, wodurch im Vergleich zu anderen Meßverfahren große Geschwindigkeitsgradienten erfaßt werden können.
- ◆ Die Luftgeschwindigkeit in Sprühstrahlen kann mit Hitzdrahtanemometern nicht gemessen werden. Auf den Hitzdraht auftreffende Tropfen führen zu einer starken mechanischen Beanspruchung und verfälschen das Meßergebnis.

### **Pulsdrahtanemometrie [Nitsche 94]**

Die Pulsdrahtanemometrie ist ein direktes Meßverfahren. An den Pulsdraht (Sendedraht) wird eine Heizspannung angelegt und eine Wärmewelle erzeugt. In definiertem Abstand sind orthogonal zum Pulsdraht Empfangsdrähte angebracht. Aus der gemessenen Laufzeit des „mitschwimmenden“ Pulses wird direkt die Geschwindigkeit berechnet. Die Pulsdrahtanemometrie ist zur Messung in Zweiphasenströmungen, wie sie in Sprühstrahlen anzutreffen sind, nicht geeignet.

## Drucksonden

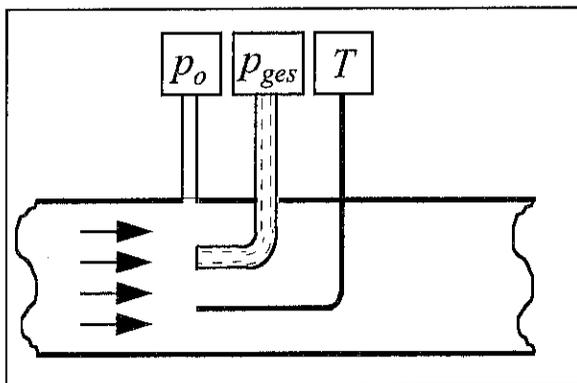
Das Prinzip einer Drucksonde ist im Bild 3.3 dargestellt. Die Öffnung des Rohres wird in Richtung der ankommenden Strömung im Staupunkt ausgerichtet. Durch das strömende Medium wird im Rohr ein Aufstauereffekt (dynamischer Druck) erzeugt. Der gemessene Gesamtdruck setzt sich aus dem dynamischen Druck, dem statischen Druck und dem hydrostatischen Druck zusammen.

Für stationäre inkompressible Strömungen liefert die Integration der Eulerschen Gleichung die Bernoulli-Gleichung

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h = p_{ges} = \text{const.}, \quad (3.7)$$

wobei  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit,  $p_0$  der statische Druck,  $\rho$  die Dichte des Mediums,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $h$  die Höhe zu dem gegebenen Bezugspunkt darstellen. Die drei Summanden in (3.7) entsprechen dem dynamischen Druck  $q$ , dem statischen Druck  $p_0$  und dem hydrostatischen Druck. Der hydrostatische Druck kann insbesondere bei Gasen aufgrund der geringen Dichte vernachlässigt werden. Somit ergibt sich für diesen Fall der dynamische Druck aus

$$q = p_{ges} - p_0 = \frac{\rho}{2} v^2. \quad (3.8)$$



**Bild 3.3:** Prinzipieller Aufbau einer Drucksonde

Da  $\rho$  temperaturabhängig ist, muß auch die Temperatur gemessen werden, woraus unter Berücksichtigung der idealen Gasgleichung

$$\frac{p}{\rho} = R \cdot T,$$

$R$  ist die Gaskonstante, die Geschwindigkeit  $v$  ermittelt werden kann.

Für die praktische Anwendung ist es günstig, nicht  $p_{ges}$  und  $p_0$  zu messen, sondern gleich deren Differenz  $q = p_{ges} - p_0$ . Ein Beispiel für derartige Differenzdrucksonden ist das

Prandtlrohr.

Bis zu einer Anström-Machzahl  $Ma = 0,2$  können Gase als nahezu inkompressibel angesehen werden [Brockhaus 89], was bei Umgebungsbedingungen einer Luftgeschwindigkeit bis zu  $240 \text{ km/h}$  entspricht.

Drucksonden sind nicht geeignet, Luftgeschwindigkeiten in Sprühstrahlen zu messen, da im Rohr befindliche Wassertropfen die Meßergebnisse wesentlich verfälschen. Sie sind zur Messung von laminaren Luftströmungen einsetzbar, wobei zu beachten ist, daß nur die Geschwindigkeitskomponente berücksichtigt wird, die senkrecht zur Ebene der Rohröffnung verläuft.

Bei starken Turbulenzen bzw. bei großen Geschwindigkeitsgradienten ist auf Hitzdrahtanemometer zurückzugreifen, die eine hohe Meßfrequenz erlauben. Es sei noch darauf hingewiesen, daß zur Messung räumlicher Strömungen auch Drucksonden mit mehreren Bohrungen (Fünffingerfühler) entwickelt wurden [Brockhaus 89].

## Vortex-Anemometer

[Stutzke 96] beschreibt Vortex-Strömungssensoren. In die Gasströmung wird ein Hindernis zum Beispiel in Form eines Stabes eingebracht. An diesem kommt es zur Wirbelbildung. Die Frequenz der sich ablösenden Wirbel wird zur Geschwindigkeitsbestimmung ausgenutzt. Da diese Sensoren keine beweglichen Teile besitzen, sind sie robust. Die Meßergebnisse sollen unabhängig von Dichte, Druck und Temperatur des strömenden Gases sein und auch durch Verunreinigungen nicht beeinflusst werden. Durch die Wirbelbildung wird ein Reinigungseffekt bewirkt.

Die Meßwerte werden direkt angezeigt, so daß keine Umrechnungstabellen erforderlich sind. Es können Geschwindigkeiten ab  $0.5\text{m/s}$  gemessen werden. Angaben zur Genauigkeit und zu Grenzen des Verfahrens sind in [Stutzke 96] nicht enthalten.

## 3.3 Abbildende Meßverfahren

Geschwindigkeiten können auch über optische Verfahren ermittelt werden, auf die im folgenden eingegangen wird.

Auch zur Bestimmung der Tropfendurchmesser gibt es eine Reihe klassischer fotografischer und kinematografischer Verfahren. Erstere liefern ein „Foto“, von dem ausgehend über manuelle oder computergestützte Bildverarbeitung Tropfengrößen ermittelt werden können. Kinematografische Verfahren erlauben bei kurzer Bildfolge auch die Ermittlung von Geschwindigkeitsfeldern (Vektorgrafiken), indem die strömenden Teilchen verfolgt werden.

### Fotografische Meßverfahren

Die Fotografie ist ein wichtiges Instrument zur Untersuchung von Sprühnebeln. Tritt das Wasser aus der Düse bzw. dem Sprühstrahlrohr aus, so beginnt je nach technischem Zerstäubungsprinzip die Tropfenbildung außerhalb der Düse. Dabei kommt es zur Ausbildung von „Wasserfäden“, zu zusammenhängenden „Wasserfilmen“ u. a. In diesen Bereichen sind die Partikelmeßverfahren, die ausgebildete Tropfen voraussetzen, nicht anwendbar. Zur Betrachtung des Zerstäubungsvorgangs sind hinter der Düse im Dispergierungsbereich fotografische Verfahren geeignet [Manasse 93, Lefebvre 89, Schmidt ]. Diese waren recht zeitaufwendig, da nach dem Fotografieren die Bilder zu entwickeln und im Anschluß daran zu digitalisieren und auszuwerten waren. Aus diesem Grund arbeiteten diese Verfahren auch nur off-line.

Die Ergebnisse bei der Untersuchung der Tropfengrößen mit diesen Methoden in einer Zweiphasenströmung hängen von mehreren Einflußgrößen ab.

- ◆ Die räumliche Beobachtungstiefe ist gering.
- ◆ Die Aufnahmen werden durch Beleuchtungsart, -intensität und -dauer beeinflusst.
- ◆ Bei einer Mehrphasenströmung ist die Qualität der Fotos von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.
- ◆ Große Tropfen haben eine größere räumliche Beobachtungstiefe, d. h. bei der Auswertung werden sie bevorzugt. Diese „Verzerrung“ der Messung in Richtung großer Tropfendurchmesser wird als Bias bezeichnet.

Die kleinsten zu bestimmenden Tropfendurchmesser liegen bei ca.  $5\ \mu\text{m}$  [Manasse 93].

Die statistische Beschreibung von Sprühstrahlen erfordert die Bestimmung der Dichte- und Verteilungsfunktionen von Tropfendurchmesser und -geschwindigkeit (s. Abschnitt 3.1) sowie der Kenngrößen dieser Verteilungen (s. Kapitel 4). Zuverlässige Angaben sind nur bei einem großen Stichprobenumfang, d. h. einer Vielzahl von Meßwerten, möglich. Hier stößt man, von den anderen Problemen abgesehen, schnell auf Grenzen der fotografischen Verfahren.

### **Particle Image Velocimetry (PIV)**

Mit der Entwicklung preiswerter, leistungsfähiger Videotechnik und CCD-Kameras haben sich weitere Anwendungen aufgetan [Tropea et al. 96].

Wie im Abschnitt 3.1 eingeführt, kann das Geschwindigkeitsfeld einer Strömung gut durch Vektorgrafiken dargestellt werden, die zu einer bestimmten Zeit für die Gitterpunkte der Ebene Richtung und Betrag der Geschwindigkeit angeben. Das Problem liegt hierbei in der gleichzeitigen Bestimmung dieser Meßwerte für alle Gitterpunkte der betrachteten Ebene. Werden zur Ermittlung des Feldes die im nächsten Abschnitt erläuterten Lasermeßverfahren eingesetzt, die nur punktweise arbeiten, so lassen sich daraus nur Felddarstellungen für die zeitlichen Mittelwerte analog zu (3.3) angeben. Kurzzeitige Aufnahmen, die auch Turbulenzen berücksichtigen, sind mit der PIV möglich.

Das Prinzip sei kurz erläutert. Einem strömenden Fluid (Gas oder Flüssigkeit) werden Partikel zugegeben. Die Art der Partikel ist abhängig von ihrem Vermögen, der Strömung zu folgen, und ihren Lichtstreuungseigenschaften, d. h. ihrer guten Sichtbarkeit bei fotografischen Aufnahmen. Im Fall der uns interessierenden Sprühstrahlen werden die Tropfen als Partikel verwendet. Da diese Tropfendurchmesser nicht unterhalb von  $7\ \mu\text{m}$  [Tropea 96a] liegen, unterscheidet sich die Tropfengeschwindigkeit von der Luftströmung. Aus diesem Grund wird auch von der Tropfen- und nicht von der Strömungsgeschwindigkeit gesprochen.

Zur Beleuchtung werden bei modernen Verfahren in der Regel Laserlichtschnitte verwendet. Durch Doppel- oder Mehrfach-Lichtpuls werden Aufnahmen in kurzer zeitlicher Folge gemacht. Diese werden in Abhängigkeit von der Teilchendichte nach verschiedenen Verfahren ausgewertet.

#### **◆ Particle Tracking Velocimetry (PTV)**

Die Partikelkonzentration ist klein. Bei aufeinanderfolgenden Aufnahmen kommt es nicht zur Überschneidung verschiedener Partikel. Diese „individual particles“ können nun verfolgt und die Strömungsrichtung und die Partikelgeschwindigkeit bestimmt werden. Das Verfahren wird auch als „low-image-density PIV“ bezeichnet. Aufgrund der geringen Partikelanzahl kann die Auswertung auch von Hand aus erfolgen. Erste Anwendungen erfolgten schon um 1932 [Tropea et al. 96]. Bei entsprechend gutem Auflösungsvermögen sind auch Aussagen zur Partikelgröße möglich.

#### **◆ Particle Image Velocimetry (PIV) im engeren Sinne**

Bei dem auch als „high-image-velocimetry PIV“ bezeichneten Verfahren lassen sich die einzelnen Partikel nicht mehr auflösen. Es befinden sich an jedem Ort mehrere Partikel. Die in der Regel rechnergestützten Auswerteverfahren verfolgen Partikelgruppen in aufeinanderfolgenden Aufnahmen, woraus das Geschwindigkeitsfeld ermittelt wird. Diese Verfahren wurden seit Beginn der 80iger Jahre verstärkt entwickelt.

#### ◆ Laser Speckle Velocimetry (LSV)

Durch eine sehr hohe Partikelkonzentration im Fluid kommt es zur Überschneidung der Partikelbilder. Eine Handauswertung ist hier unmöglich. Der Einsatz leistungsfähiger PC oder Workstations ist erforderlich.

Die PIV wird z. B. bei der Untersuchung von Einspritzvorgängen in Motoren genutzt. Das optische Auflösungsvermögen der Aufnahme muß im Bereich der Partikelgrößen liegen, wenn Partikel diagnostiziert und Aussagen zu Größe und Geschwindigkeit getroffen werden sollen. Werden Laserlichtschnitte verwendet, die durch Aufweitung des Laserstrahls mittels eines Prismas erzeugt werden, so kann folgende Abschätzung getroffen werden.

Beträgt das Auflösungsvermögen des digitalisierten Fotos  $1024 \times 768$  Pixel und sollen Bereiche mit  $5 \mu\text{m}$  Durchmesser einem Pixel entsprechen, so kann eine Fläche von ca.  $5.1 \times 3.8 \text{ mm}^2$  beobachtet werden. Soll die Pixelbreite  $0.1 \text{ mm}$  betragen, ergibt sich eine Fläche von  $10.2 \times 7.7 \text{ cm}^2$ . Die im Bereich der Feuerwehr interessanten Sprühnebel haben Tropfengrößen von deutlich unter  $1 \text{ mm}$  und eine räumliche Ausdehnung von mehr als einem Meter Breite und mehreren Metern Länge. Die erforderliche Pixelauflösung zur Untersuchung des gesamten Sprühstrahls steht zur Zeit nicht zur Verfügung. Es könnten lediglich vergleichsweise kleine Ausschnitte betrachtet werden.

Ein zweites Problem ist die Größe der zu erzeugenden Laserlichtschnitte durch Aufweitung des Laserstrahls. Die erforderliche Laserleistung, um einen Lichtschnitt im Bereich mehrerer  $\text{m}^2$  zu erzeugen, steht ebenfalls nicht zur Verfügung. Die PIV-Verfahren sind aus diesem Grund hier nicht einsetzbar, um Tropfendurchmesser und -geschwindigkeit zu ermitteln. Da die Belichtungszeiten sehr klein sein müssen, sind Laserlichtschnitte mittels Schwingspiegel zur Partikelgrößenbestimmung nur begrenzt einsetzbar.

Da bei den zu betrachtenden Sprühstrahlen große Partikeldichten auftreten, sind zur Strömungsvisualisierung Videoaufzeichnungen mit Hilfe von Laserlichtschnitten mittels rotierendem Spiegel vielversprechend.

#### Holografische Meßverfahren

Mit der Verfügbarkeit von Lasern (1960), die als kohärente Lichtquelle dienen, erlangte die Holografie eine technische Bedeutung. Mit Hilfe der „holografischen Aufnahme“ ist es möglich, schnell veränderliche räumliche Vorgänge aufzunehmen und sie im Anschluß daran off-line auszuwerten. Die Holografie hat dabei eine bessere räumliche Beobachtungstiefe als die Fotografie.

Insbesondere können Hologramme von dreidimensionalen Partikelströmen gemacht werden, in denen deren Größe und Ort aufgezeichnet werden. Werden Hologramme zweifachbelichtet, so spricht man von der Doppel-Impuls-Holografie. Die Geschwindigkeitsvektoren der Partikel stellen Mittelwerte zwischen den Belichtungsblitzen dar (s. Gleichung (3.3)).

In der Literatur wird angegeben, daß mit Hilfe einer zeitlich und räumlich hochauflösenden Holografie die Größe und Geschwindigkeit von brennenden Kohlepartikeln im Bereich von 3 bis  $75 \mu\text{m}$  bestimmt wurden. Der Meßbereich wird mit ca. 2 bis  $1000 \mu\text{m}$  angegeben [Manasse 93, Schmidt 91].

## 3.4 Lasermeßverfahren

### Anwendungsmöglichkeiten

Durch die Bereitstellung technischer Laser in den 60iger Jahren und die von leistungsfähigen, preisgünstigen Computern haben die Entwicklung und der Einsatz von Lasermeßverfahren zur Untersuchung von Strömungen einen enormen Aufschwung genommen und eine breite Anwendung erfahren. Die in diesem Abschnitt betrachteten Verfahren gehen davon aus, daß Teilchen, die in einem Fluid strömen, das auf sie auftreffende Laserlicht streuen und absorbieren. Die resultierende Streulichtintensität wird gemessen.

Sollen Einphasenströmungen untersucht werden, d. h. das Fluid (Dispersum) ist gasförmig oder flüssig, so müssen zur Strömung Partikel (Dispergens) hinzugegeben werden. Dabei ist zu sichern, daß die Partikel der Strömung hinreichend gut folgen. Bei der Untersuchung von Luftströmungen können z. B. Rauchpartikel, Öltröpfen, Pulver, Wassertröpfchen u. a. zugesetzt werden. Bei flüssigem Dispersum können dies Wasserstoffbläschen, Luftbläschen, Metallpulver u. a. sein. [Tropea 96a] gibt im Ergebnis der Auswertung der Bewegungsgleichungen an, daß, wie oben bereits erwähnt, Wassertropfen mit einem Durchmesser kleiner als  $7\mu\text{m}$  einer Luftströmung gut folgen. Lasermeßverfahren liefern quantitative Aussagen zum Geschwindigkeitsfeld der Strömung.

Befindet sich im Dispersum bereits ein Dispergens, d. h. es wird eine Zweiphasenströmung betrachtet, so müssen dem Fluid keine Partikel hinzugegeben werden. Es wird die zweite Phase zur Messung verwendet. Hierbei ist zu beachten, daß in der Regel das Dispergens nicht monodispers ist und die Geschwindigkeit des Dispersums nicht mit der des Dispergens übereinstimmt. Das muß bei der konkreten Anwendung berücksichtigt werden. Neben dem Strömungsverlauf liefern Lasermeßverfahren auch Aussagen zur Teilchengröße des Dispergens. Neue Untersuchungen befassen sich auch mit der Ermittlung von Volumenströmen der Partikel [Xu 96].

Da im Bereich der Anwendung von Sprühstrahlen bei Löschvorgängen die Ausbreitung des Sprühstrahls (Dispergens) zu untersuchen ist, ist auf die Beschreibung der Wassertropfen einzugehen.

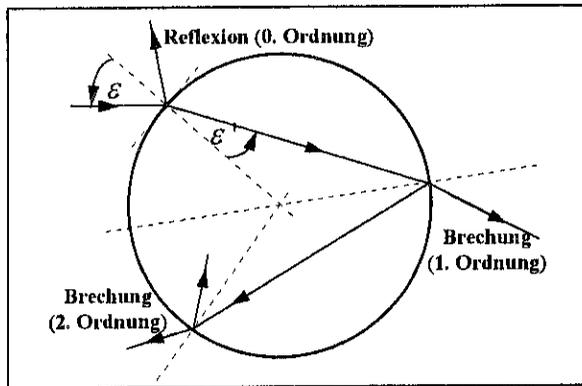
Lasermeßverfahren werden u. a. bei [Tropea 95b, Tropea 95, Willmann 95, Manasse 93, Durst 96, Pickenäcker et al. 96, Xu 96] betrachtet. Eine gründliche Beschreibung übersteigt den Rahmen der vorliegenden Arbeit. Es wird im folgenden nur auf wesentliche physikalische Effekte eingegangen, die von den einzelnen Verfahren ausgenutzt werden.

### Streulicht

Tritt Licht durch die Grenzfläche zwischen zwei Stoffen, in denen es sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreitet, so wird es gebrochen (Lichtbrechung). Der Winkel zwischen dem Lot auf der Oberfläche und dem einfallenden Licht ist der Einfallswinkel  $\varepsilon$ . Der Winkel zwischen Lichtstrahl und Lot hinter der Grenzfläche ist der Brechungswinkel  $\varepsilon'$ . Für beide Winkel gilt das Snelliussche Gesetz

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon'} = n_{rel} \quad (3.9)$$

Der relative Brechungsindex  $n_{rel}$  für den Übergang Luft→Wasser hat den Wert 1.33. Das Licht wird also zum Lot hin gebrochen. Beim Austritt aus dem Wasser in Luft wird es entsprechend (3.9) vom Lot weg gebrochen [Grimsehl 88].



**Bild 3.4:** Reflexion und Brechung am Wassertropfen

Bild 3.4 zeigt die Brechung eines Lichtstrahls durch einen Wassertropfen in der Luft. Die Reflexion, oft auch als Brechung 0. Ordnung bezeichnet, ist die Spiegelung an der Tangentialebene des Tropfens an der Stelle, an der der Lichtstrahl auf den Tropfen trifft. Es wird aber nur ein Anteil des Lichtstrahls reflektiert, der andere Teil durchdringt den Tropfen im Brechungswinkel  $\varepsilon'$ . Erreicht der Lichtstrahl die Tropfenoberfläche auf der anderen Seite, so wird der noch verbliebene Teil an der Tropfeninnenseite teilweise reflektiert und der Rest tritt aus dem Tropfen

aus. Dieser Vorgang wiederholt sich, wobei die Intensität des Lichtstrahls stark abnimmt.

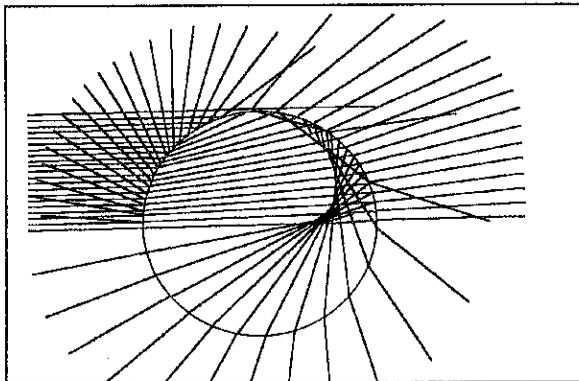
Es ist leicht einzusehen, daß die Streuung von Licht an Wassertropfen in Luft und die an Luftbläschen in Wasser verschiedene Ergebnisse liefert. Diese sind in den Bildern 3.5 und 3.6 dargestellt.

In dispersen Systemen wird Licht, das auf Partikel (Dispergens) trifft, im allgemeinen sowohl gestreut als auch absorbiert. Die Bestandteile der Streuung sind

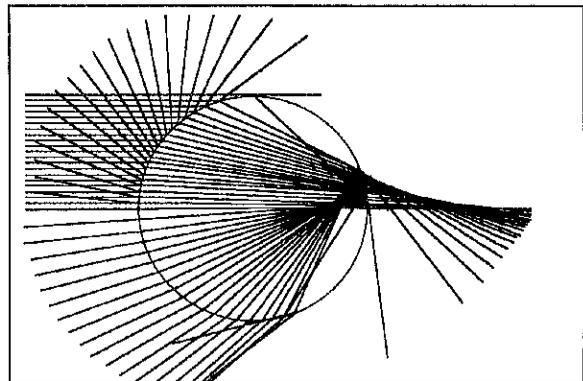
- ◆ Beugung,
- ◆ Reflexion,
- ◆ Brechung.

Sie sind abhängig von der Größe der Streuzentren, der Schwingungsanregung usw.

Der Beugungsanteil beschränkt sich im wesentlichen auf einen engen Bereich in Vorwärtsrichtung (s. Bild 3.7). Da dieser Effekt bei der Phasen-Doppler-Anemometrie nicht berücksichtigt wird, soll die Beugung im folgenden auch nicht näher betrachtet werden.



**Bild 3.5:** Lichtstreuung an einer Luftblase im Wasser [Tropea 95a]



**Bild 3.6:** Lichtstreuung an einem Wassertropfen in Luft [Tropea 95a]

Die Bilder 3.4 bis 3.6 sind vereinfachte ebene Darstellungen. Die Streuung an den Tropfen muß eigentlich räumlich betrachtet werden.

Durch Absorption wird ein Teil der Energie des Lichtstrahls in Wärme umgewandelt. Bei Laser-Messungen ist zu beachten, daß durch Absorption die Intensität des Laserstrahls unter

Umständen stark geschwächt wird. Ist der Absorptionseffekt zu groß, so kann der zu messende Streueffekt so gering werden, daß eine Auswertung nicht mehr möglich ist. Die Intensität des Laserstrahls ist dann zu vergrößern. Auf die eigentlichen Effekte der Lasermeßverfahren hat die Absorption keinen Einfluß.

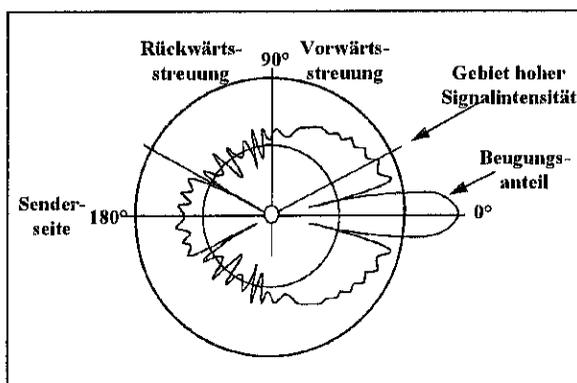
Sehr starke Laser beeinflussen unter Umständen die Meßobjekte aufgrund der Absorption. Bei den für die Vermessung der Sprühstrahlen eingesetzten Lasern können diese Effekte vernachlässigt werden.

## Mie-Streuung

Zur Berechnung der Streuung gibt es verschiedene Modellansätze. Für die Sprühstrahlproblematik ist die Mie-Streuung von Bedeutung. Mie berechnet die Streuung von Lichtstrahlen an homogenen, kugelförmigen Partikeln, deren Durchmesser im Bereich der Wellenlänge des Lichtes und darüber liegt.

Ein Resultat der Berechnung der Mie-Streuung ist, daß die Vorwärtsstreuung bevorzugt wird [Brockhaus 89]. Durchgeführte Messungen bestätigen dies. Der Effekt ist im Bild 3.7 zu erkennen. Bei der Darstellung wurde eine logarithmische Skaleneinteilung verwendet.

Sind die Partikeldurchmesser  $d$  um ein Vielfaches größer (Mie-Parameter  $\alpha > 10$ ,  $\alpha = \pi \cdot d / \lambda$ ) als die Wellenlänge  $\lambda$  des Lichtes, so wird die Streulichtintensität durch die Projektionsfläche des Partikels bestimmt. In diesem Bereich gelten die Gesetze der geometrischen Optik. Die Strahlenverläufe bei Reflexion und Brechung entsprechen der Darstellung im Bild 3.4.



**Bild 3.7:** Typische Streulichtintensität [Polytec 95]

## Laserstrahlen

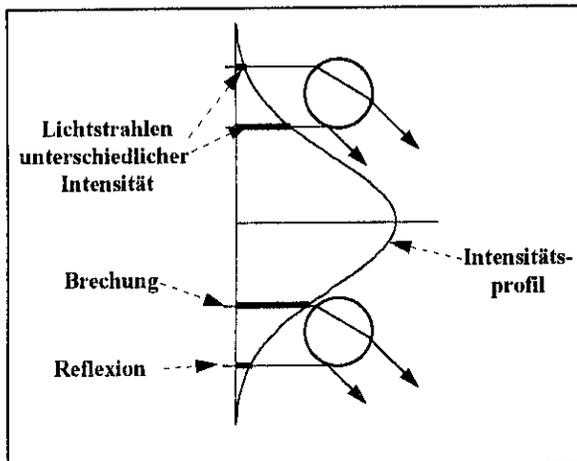
Für optische Meßverfahren ist die verwendete Lichtquelle von außerordentlicher Bedeutung. Will man Dopplereffekte oder Phasenverschiebungen ausnutzen, benötigt man Lichtquellen, die monochromatisches, paralleles Licht liefern. Werden mehrere Lichtstrahlen verwendet, sind Aussagen zu den Phasenverschiebungen erforderlich. Diese Voraussetzungen lassen sich durch Laserstrahlen absichern.

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 3.7 dargestellt. Er entspricht der bekannten Gaußkurve und wird als „gaussian beam“ bezeichnet. Die dargestellten Auswirkungen auf die Streuung werden unten erläutert.

Bei vollständiger Beleuchtung der betrachteten kugelförmigen Partikel ist die Intensität des gestreuten Lichtes im Näherungsbereich der geometrischen Optik proportional zum Quadrat des Partikeldurchmessers.

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].

Eine weitere Folgerung ist, daß für unterschiedlich große Partikel verschieden große Meßvolumina zu wählen sind, innerhalb derer die Partikel noch erkannt werden (Erklärung des Meßvolumens s. unten).



**Bild 3.8:** Intensitätsprofil eines Laserstrahls

Bild 3.8. verdeutlicht noch einen weiteren Effekt, der im Gaußschen Strahlprofil begründet ist. Wie oben bereits erläutert, ist das Streulicht eine Mischung aus reflektiertem und gebrochenem Licht. Bei gleichmäßiger Beleuchtung ist insbesondere bei Flüssigkeitstropfen der Anteil des reflektierten Lichtes wesentlich geringer als der des gebrochenen. Passieren jetzt z. B. gleichgroße Tropfen den Rand des Meßvolumens, so kann der Anteil des reflektierten Lichtes (oberer Tropfen Bild 3.8), das den Empfänger erreicht, wesentlich nach oben verschoben werden. Beim unteren Tropfen nach unten. Dies kann zu Fehlinterpretationen und damit zu Fehlmessungen führen. Ursache ist, daß die

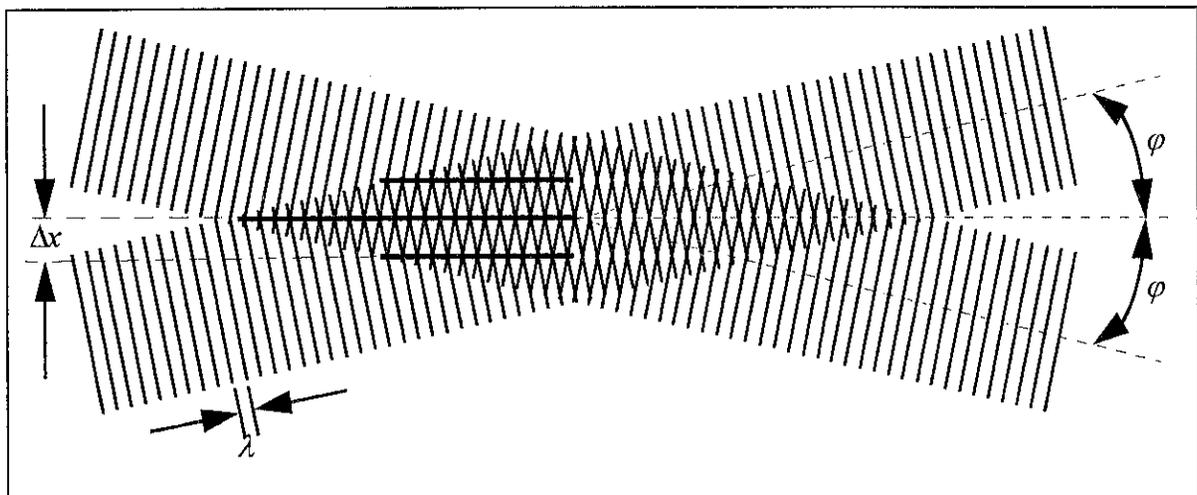
Phasendifferenz bei gebrochenem und reflektiertem Licht unterschiedliche Vorzeichen hat (s. [Manasse 93]).

Die für Meßzwecke verwendeten Laser haben in der Regel je nach Anforderung eine Leistung von wenigen Milliwatt bis zu mehreren Watt.

### Interferenz zweier Laserstrahlen

PDA-Messungen gehen von einer Strahlaufteilung des Laserstrahls in zwei Strahlen aus, die zur Interferenz gebracht werden. Bild 3.9 veranschaulicht das Entstehen von Interferenzstreifen bei der Überlagerung von zwei Laserstrahlen. Für den Interferenzstreifenabstand  $\Delta x$  erhält man durch eine einfache geometrische Betrachtung

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \varphi} \quad (3.10)$$



**Bild 3.9:** Interferenzstreifenmuster im Meßvolumen

Diese Interferenzstreifenmuster im Meßvolumen werden zur Erkennung durchfliegender Partikel verwendet.

### Zweistrahlanemometer

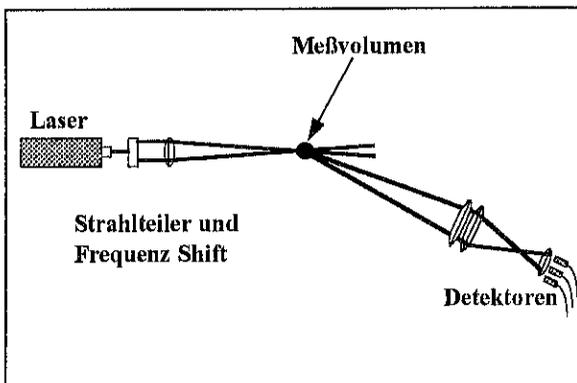
Beim Zweistrahlanemometer wird der Laserstrahl mit der Frequenz  $\nu$  und der Wellenlänge  $\lambda$  in zwei Strahlen gleicher Intensität geteilt. Diese werden mit einer Linse fokussiert. Der Kreuzungsbereich ist das Meßvolumen, das näherungsweise der Form eines räumlichen Ellipsoids entspricht.

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 umwandeln (vgl. Bild 3.10). Der zeitliche Verlauf des elektrischen Signals wird „Doppler-Burst“ genannt. Er besteht aus einer niederfrequenten („Pedestal“) und einer hochfrequenten Komponente.

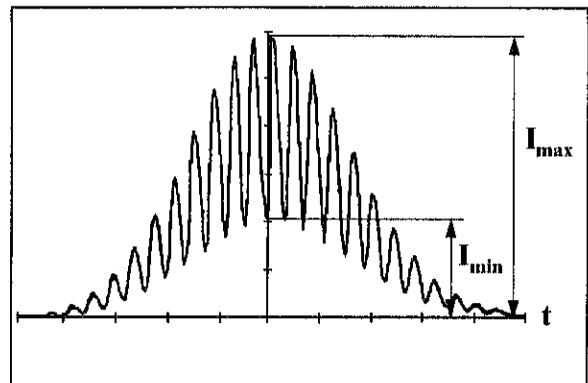
Typisch für Laser-Doppler-Verfahren sind die im Bild 3.11 dargestellten Bursts. Die Modulationstiefe bzw. die „visibility“ des ungefilterten Signals wird definiert als

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3.11)$$

Sie kann zur Partikelgrößenbestimmung verwendet werden.



**Bild 3.10:** Aufbau eines Phasen-Doppler-Anemometers [Polytec 95b]



**Bild 3.11:** Typischer Doppler-Burst

Bewegt sich das Partikel durch das Meßvolumen, so passiert es dessen Hell-Dunkel-Bereiche. Die resultierenden Intensitätsschwankungen werden im Burst deutlich. Die Frequenz des Doppler-Bursts ist proportional zu den durchquerten Interferenzstreifen des Meßvolumens und kann zur Bestimmung der Geschwindigkeit verwendet werden.

Bei den Phasen-Doppler-Anemometern werden mehrere Detektoren verwendet, die an verschiedenen Stellen positioniert sind. Es wird davon ausgegangen, daß die von demselben Partikel detektierten Streulichtstrahlen unterschiedliche Wege durch das Partikel zurückgelegt haben. Aus der resultierenden Phasenverschiebung wird simultan auf die Partikelkrümmung und hieraus folgernd auf den Durchmesser geschlossen. Das Visibility-Verfahren muß dann nicht verwendet werden.

## **Lasermessverfahren**

In Abhängigkeit der zu messenden Größen und der ausgenutzten Effekte unterscheidet man verschiedenen Lasermessverfahren.

### ◆ **Laser-Beugungsverfahren**

Das Laser-Beugungsverfahren (Laser-Diffraction Particle Sizing) ist eines der ältesten Verfahren. Es wertet das durch Partikel gebeugte Licht aus. Dabei ist für die Beugung die Partikelform und Größe entscheidend, nicht die optischen Eigenschaften des Partikels selbst. Bild 3.7 ist zu entnehmen, daß durch Beugung das Licht nach vorn gestreut wird. Dementsprechend ist die Meßeinrichtung so aufgebaut, daß sich Sender und Detektorebene gegenüber liegen.

Laser-Beugungsverfahren sind relativ einfach handhabbar. Sie führen bei der Tropfengrößenbestimmung eine räumliche Mittelung durch. Das führt dazu, daß bei Partikeln, die unterschiedlich schnell strömen, ein Bias der Tropfenverteilung zugunsten der langsamen Tropfen erfolgt. Sie sollten nur in Bereichen eingesetzt werden, in denen keine Korrelation zwischen Partikelgröße und Geschwindigkeit vorliegt. [Willmann 95]

### ◆ **Laser-Doppler-Anemometrie**

Die Laser-Doppler-Anemometer (LDA) verwenden ein kohärentes optisches Meßverfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit in Fluiden. Genau genommen werden Geschwindigkeiten von Partikeln gemessen, die sich in der Strömung befinden. Zu der Frage, wie sich die Geschwindigkeit des Fluids zu der der Partikel verhält, wurde bereits im Abschnitt 3.3 bei der Erläuterung des PIV-Verfahrens einiges gesagt.

Bei einem einfachen LDA wird nur die Geschwindigkeitskomponente gemessen, mit der die Ebenen der Interferenzstreifenmuster durchquert werden. Im Bild 3.9 entspricht das der Bewegung von unten nach oben oder umgekehrt.

Durch den gleichzeitigen Einsatz einer zweiten oder dritten LDA-Komponente können auch die anderen Geschwindigkeitskomponenten gemessen werden. Damit ist es möglich, die räumlichen Geschwindigkeitsvektoren zu bestimmen [Durst 96, Pickenäcker et al. 96, Nitsche 94].

### ◆ **Laser-2Fokus-Anemometrie**

Das Laser-2Fokus-Anemometer dient zur direkten Messung der Geschwindigkeit von Partikeln. Gemessen wird die Zeit, die ein Partikel benötigt, um zwei parallele Laserstrahlen (Abstand im Bereich  $0.5\text{mm}$ ) zu passieren. Bestimmt wird die Geschwindigkeitskomponente in der Ebene, die durch die beiden Laserstrahlen verläuft. Durch Drehen dieser Ebene werden auch Partikel auf anderen Bahnlinien erfaßt [Nitsche 94].

### ◆ **Phasen-Doppler-Anemometrie**

Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) sind geeignet, um gleichzeitig die Geschwindigkeit und Durchmesser von Partikeln zu bestimmen. Dabei wird wie beim LDA aber nur eine Geschwindigkeitskomponente gemessen [Tropea 95].

Zur Partikelgrößenbestimmung hat sich die Phasen-Doppler-Anemometrie gegenüber der Visibility-Methode durchgesetzt, da dort zeitgleich Partikeldurchmesser und –geschwindigkeit bestimmt werden können. Ein weiterer Vorteil der PDA ist, daß dieses Verfahren auch bei hoher Partikelkonzentration arbeitet [Manasse 93].

Durch den Einsatz weiterer Laser können auch hier die anderen Geschwindigkeitskomponenten bestimmt werden.

Am Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt wurde ein Meßplatz zum Vermessen von Sprühstrahlen aufgebaut. Kernstück ist ein PDA. Die folgenden Aussagen beziehen sich aus diesem Grund vor allem auf die Phasen-Doppler-Anemometrie.

Bei der Untersuchung von Sprühstrahlen sind sowohl Aussagen zur Tropfengröße, als auch zur Geschwindigkeit zu machen. Die Tropfengröße wird insbesondere dann wichtig, wenn der Löschprozeß betrachtet wird. Eine Betrachtung der Meßverfahren ergab, daß für diese Zwecke ein PDA am besten geeignet ist.

### **Charakteristika der Phasen-Doppler-Anemometrie**

Die Phasen-Doppler-Anemometrie gestattet ein berührungsloses Messen. Die anschließenden 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.  $1\mu\text{m}$  bis zu einigen  $\text{mm}$ .
- ◆ 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.**

## 4 Statistische Beschreibung von Sprühstrahlen

In diesem Kapitel 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 ausgehend von Messungen insbesondere viele verschiedene Schätzungen für den Tropfendurchmesser verwendet. Eine Bewertung und ein Vergleich setzen eine klare Begriffsbildung voraus. Im Abschnitt 4.2 sind Beziehungen zwischen diesen Schätzwerten angegeben. Insgesamt gesehen ist dieses Kapitel zur Einarbeitung in diese Problematik gedacht und kann bei einer ersten Lektüre übergangen werden.

### 4.1 Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der mathematischen Statistik

#### 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. Wie bereits im Abschnitt 3.1 angegeben, ist eine stetige Zufallsgröße  $X$  eindeutig beschrieben durch ihre Dichtefunktion  $f_X(t)$  bzw. die Verteilungsfunktion  $F_X(t)$  (s. Gleichungen (3.4) und (3.5)).

#### 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

$$E(Y) = E(g(X)) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) \cdot f_X(x) dx. \quad (4.1)$$

Folgende Spezialfälle spielen im folgenden eine Rolle.

A)  $Y = X$ :

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x) dx \quad (4.2)$$

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

$$E(X^k) = m_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \cdot f_X(x) dx \quad (4.3)$$

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

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

$$D^2(X) = E\left((X - E(X))^2\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^2 \cdot f_X(x) dx \quad (4.4)$$

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

$$D(X) = \sqrt{D^2(X)} \quad (4.5)$$

wird als **Standardabweichung** bezeichnet.

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

$$E\left((X - E(X))^k\right) = \mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^k \cdot f_X(x) dx \quad (4.6)$$

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

$$D^2(X) = E\left(\left(X - E(X)\right)^2\right) = E(X^2) - \left(E(X)\right)^2 = \mu_2 = m_2 - m_1^2. \quad (4.7)$$

### Standardisierte Zufallsgrößen

Die Verwendung von Tabellen für Funktionswerte von Verteilungsfunktionen von Zufallsgrößen setzt in der Regel deren Normierung bzw. Standardisierung voraus. Eine Zufallsgröße heißt standardisiert, falls der Erwartungswert Null und die Varianz Eins sind. Durch die Transformation

$$Y = \frac{X - E(X)}{D(X)} \quad (4.8)$$

der Zufallsgröße  $X$ , erhält man die zugehörige **standardisierte Zufallsgröße**  $Y$  mit

$$E(Y) = 0 \text{ und } D^2(Y) = 1. \quad (4.9)$$

### Quantile

Für viele Anwendungen ist es wichtig, das **Quantil  $Q_p$  der Ordnung  $p$  (oder  $p$ -Quantil)** zu kennen. Es ist durch die Beziehung

$$F_X(Q_p) = P(X < Q_p) = p, \quad 0 < p < 1 \quad (4.10)$$

definiert.  $p$  ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Wert der Zufallsgröße  $X$  kleiner ist als  $Q_p$ .

Das Quantil der Ordnung 0.5 wird als **Median** bezeichnet.

Der Wert einer Zufallsgröße, der mit der größten Wahrscheinlichkeit angenommen wird, heißt **Modalwert**. Bei stetigen Zufallsgrößen ist das der Wert, für den die Dichtefunktion ein Maximum hat.

Eine ausführliche Erläuterung kann [Müller 91, Beyer et al. 95] entnommen werden.

### Funktionen von Zufallsgrößen

Es sei  $X$  eine stetige Zufallsgröße, deren Verteilung durch die Dichte- oder Verteilungsfunktion (s. Gleichungen (3.4) und (3.5)) gegeben ist. Gesucht ist nun die Verteilung einer Zufallsgröße  $Y$ , die eine Funktion von  $X$  ist.

Beispiele der behandelten Thematik sollen das verdeutlichen. Ist die Verteilung der Tropfendurchmesser  $D_{Tr}$  eines Sprühnebels bekannt, so stellt sich die Frage nach der Verteilung der Tropfenoberfläche  $A_{Tr}$  und des Tropfenvolumens  $V_{Tr}$ . In diesem Fall gelten zwischen den Zufallsgrößen die Beziehungen

$$A_{Tr}(D_{Tr}) = \pi \cdot D_{Tr}^2. \quad (4.11)$$

und

$$V_{Tr}(D_{Tr}) = \frac{\pi}{6} D_{Tr}^3. \quad (4.12)$$

Um nicht jeden Fall einzeln behandeln zu müssen, wird eine allgemeinere Betrachtung durchgeführt.  $Y = g(X)$  sei eine von  $X$  abhängige Zufallsgröße.  $g(X)$  sei eine eindeutige, stetig differenzierbare Funktion, was in den vorliegenden Anwendungsfällen stets der Fall ist. Dann existiert auch stets die inverse Funktion, d. h.

$$Y = g(X), \quad g^{-1}(X) = h(X) \quad (4.13)$$

Zunächst wird angenommen, daß  $g(X)$  streng monoton wachsend ist. Dann gilt

$$F_Y(t) = P(Y < t) = P(g(X) < t) = P(X < h(t)) = F_X(h(t)).$$

Für die Dichtefunktion folgt hieraus

$$f_Y(t) = \frac{dF_Y(t)}{dt} = \frac{dF_X(h(t))}{dt} = f_X(h(t)) \cdot h'(t).$$

Die analoge Betrachtungsweise für den Fall, daß  $g(X)$  streng monoton fallend ist, liefert

$$F_Y(t) = 1 - F_X(h(t)),$$

woraus

$$f_Y(t) = -f_X(h(t)) \cdot h'(t)$$

abgeleitet wird. Zusammengefaßt liefert das

$$f_Y(t) = |h'(t)| f_X(h(t)). \quad (4.14)$$

Aus der letzten Gleichung folgt, daß das Verteilungsgesetz einer funktionell abhängigen Größe bestimmt ist, wenn man das Verteilungsgesetz des Arguments kennt. Auf die behandelte Problematik bezogen heißt das, daß bei Kenntnis der Tropfendurchmesser-Verteilung auch die der Tropfenoberfläche und des Tropfenvolumens gegeben sind.

### 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.

## 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  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 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.

### Punktschätzungen

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

$$\hat{\Theta}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.15)$$

berechnet. Der auf Basis einer konkreten Stichprobe erhaltene Punktschätzwert ist

$$\hat{\Theta}(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4.16)$$

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 Verteilungsfunktion sowie die oben eingeführten Momente wichtig.

Mit  $S_n(t)$  wird die Anzahl aller Stichprobenelemente bezeichnet, deren Werte kleiner sind als  $t$ ,  $-\infty < t < +\infty$ . Dann ist die **empirische Verteilungsfunktion** der Zufallsgröße  $X$  gegeben durch

$$F_X(t) = \frac{S_n(t)}{n}, \quad -\infty < t < +\infty. \quad (4.17)$$

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

$$\hat{M}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^k \quad (4.18)$$

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

$$\hat{N}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^k, \quad (4.19)$$

wobei

$$\bar{X} = \hat{M}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.20)$$

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

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4.21)$$

verwendet. Analog zu (4.18) bis (4.21) 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**.

### Eigenschaften von Schätzfunktionen

Schon in den 30iger Jahren wurden drei Eigenschaften für Schätzfunktionen eingeführt, die zu deren Bewertung sehr nützlich sind. Ausgangspunkt der Überlegungen ist die Tatsache, daß die Schätzfunktionen (4.15) selbst Zufallsgrößen sind, deren Verteilung von der Verteilung der Grundgesamtheit abhängt.

Eine Schätzung  $\hat{\Theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$  für den Parameter  $\Theta$  heißt **erwartungstreu** (unverzerrt, unbiased), wenn

$$E(\hat{\Theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)) = \Theta \quad (4.22)$$

gilt. Sie ist asymptotisch erwartungstreu, wenn der Erwartungswert für  $n \rightarrow \infty$  gegen  $\Theta$  konvergiert. Mit der Erwartungstreue wird gefordert, daß die Schätzwerte bei häufiger Wiederholung der Stichprobennahme im Mittel beim wahren Wert des Parameters  $\Theta$  liegen. Die Stichprobenfunktionen (4.17), (4.18) und (4.20) sind erwartungstreu, vorausgesetzt, daß die entsprechenden Momente bezogen auf die Verteilung der Grundgesamtheit auch existieren. (4.19) ist für  $k > 1$  nur asymptotisch erwartungstreu. Aus diesem Grund wird zur Schätzung der Varianz die korrigierte Funktion (4.21) verwendet. Diese liefert eine erwartungstreue Schätzung für die Varianz.

Eine Punktschätzung heißt schwach **konsistent** (passend), wenn für  $n \rightarrow \infty$

$\hat{\Theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$  in Wahrscheinlichkeit gegen  $\Theta$  konvergiert. Das bedeutet, daß bei sehr großen Stichprobenumfängen die Schätzung nahe beim wahren Wert des Parameters liegt und man sich diesem beliebig nähern kann, wenn  $n$  nur groß genug gewählt wird. In jedem Fall gilt aber, daß eine Schätzung, die nicht erwartungstreu bzw. asymptotisch erwartungstreu ist, auch nicht konsistent ist. Die Stichprobenfunktionen (4.17) bis (4.21) sind konsistent.

Eine Schätzung  $\hat{\Theta}_1$  für den Parameter  $\Theta$  heißt **effizienter** (wirksamer) als eine Schätzung  $\hat{\Theta}_2$ , wenn für deren Varianzen  $D^2(\hat{\Theta}_1) < D^2(\hat{\Theta}_2)$  gilt. Das bedeutet, daß die auf Basis von  $\hat{\Theta}_1$  gewonnenen Schätzwerte dichter am wahren Wert liegen als die Schätzungen nach  $\hat{\Theta}_2$ .

## 4.2 Beziehungen zwischen den Momenten

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

$$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad x_i > 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.23)$$

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 (4.18) berechneten Schätzungen für die  $k$ -ten Momente gelten die Beziehungen

$$\hat{m}_1 \leq \frac{\hat{m}_{k+1}}{\hat{m}_k}, \quad k \geq 1, \quad (4.24)$$

$$\frac{\hat{m}_k}{\hat{m}_{k-1}} \leq \frac{\hat{m}_{k+1}}{\hat{m}_k}, \quad k \geq 2, \quad (4.25)$$

$$\sqrt[k]{\hat{m}_k} \leq \sqrt[k+1]{\hat{m}_{k+1}}, \quad k \geq 1 \quad (4.26)$$

und

$$\hat{m}_1 \leq k \sqrt[k]{\frac{\hat{m}_k}{\hat{m}_1}}, \quad k \geq 2. \quad (4.27)$$

Auf den umfangreichen Nachweis soll an dieser Stelle verzichtet werden. Für den Beweis von (4.24) bis (4.27) sind einige in [Korowkin 66] angegebene Ungleichungen hilfreich.

[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

$$D_{ab} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n x_i^a}{\sum_{i=1}^n x_i^b} \right]^{\frac{1}{a-b}} = \left[ \frac{\hat{m}_a}{\hat{m}_b} \right]^{\frac{1}{a-b}}. \quad (4.28)$$

Beachtet man, daß  $\hat{m}_0 = 0$  ist, so ergeben sich einige in der Tabelle 4.1 bereits berücksichtigte Vereinfachungen.

Aus (4.26) folgt

$$D_{10} \leq D_{20} \leq D_{30}. \quad (4.29)$$

In (4.28) gilt das Gleichheitszeichen nur, wenn alle Elemente der Stichprobe gleich sind, d. h. ein monodisperses Spray gegeben ist. Bei den im Rahmen der Arbeit 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 (4.24) und (4.25) auch für  $D_{21}$ ,  $D_{32}$ ,  $D_{43}$  und wegen (4.27) auch für  $D_{31}$ . Es gelten die Ungleichungen

$$\begin{aligned} D_{10} &\leq D_{21} \leq D_{32} \leq D_{43}, \\ D_{10} &\leq D_{31} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Die zu wählende Stichprobenfunktion ist von der Anwendung abhängig. Da in der vorliegenden Arbeit zunächst Sprühstrahlen zu vergleichen sind, wurde sich in der Auswertung auf  $D_{10}$  beschränkt. Die Verwendung anderer Schätzungen wird im Vergleich dazu zu keinen Verschiebungen führen.

**Tabelle 4.1:** Schätzungen für den Tropfendurchmesser und Anwendungsgebiete [Lefebvre 89]

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

### 4.3 Spezielle Verteilungen des Tropfendurchmessers

Von [Domnick 95] wurden 3 Verteilungen zur Charakterisierung der Tröpfchenverteilung angegeben, eine weitere von [Lefebvre 89]. Das sind die Lognormalverteilung, die Rosin-Rammler Verteilung und die 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolische Verteilung sowie die Verteilung von Nukiyama und Tanasawa.

#### logarithmische Normalverteilung (Lognormalverteilung)

Eine Zufallsgröße  $D_{Tr}$  heißt **logarithmisch normalverteilt** oder kurz **lognormalverteilt**, wenn deren Dichtefunktion mit

$$f_{D_{Tr}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} & \text{für } t > 0 \end{cases} \quad (4.31)$$

gegeben ist.

Betrachtet man die Histogramme von Stichproben für den Tropfendurchmesser, so paßt sich deren Verlauf häufig sehr gut an die Dichte einer logarithmisch normalverteilten Zufallsgröße an. Histogramme sind die grafischen Darstellungen der Häufigkeitsverteilung der Meßwerte.

Der Name der Verteilung ist daraus abgeleitet, daß die Zufallsgröße  $Y = \ln D_{Tr}$

normalverteilt mit den Parametern  $\mu$  und  $\sigma$  ist, d. h.

$$f_Y(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \mu \text{ reell, } \sigma > 0. \quad (4.32)$$

Die logarithmische Normalverteilung hat eine sehr schöne Eigenschaft. Hat der Tropfendurchmesser diese Verteilung, so haben auch die durch (4.11) und (4.12) gegebenen Tropfenoberflächen und Tropfenvolumina diese Verteilung, nur mit anderen Parametern.

Die gewöhnlichen Momente der logarithmischen Normalverteilung (4.30) sind gegeben mit

$$m_k = E(D_{Tr}^k) = e^{k\mu + \frac{k^2\sigma^2}{2}}. \quad (4.33)$$

Bei Verwendung dieser Beziehung lassen sich die Erwartungswerte und die Varianzen für Oberfläche und Volumen ableiten.

$$\begin{aligned} E(D_{Tr}) &= e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}, \\ E(A_{Tr}) &= \pi \cdot e^{2\mu + 2\sigma^2}, \\ E(V_{Tr}) &= \frac{\pi}{6} \cdot e^{3\mu + \frac{9}{2}\sigma^2}, \\ D^2(D_{Tr}) &= e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1), \\ D^2(A_{Tr}) &= \pi^2 e^{4\mu + 4\sigma^2} (e^{4\sigma^2} - 1), \\ D^2(V_{Tr}) &= \frac{\pi^2}{36} e^{6\mu + 9\sigma^2} (e^{9\sigma^2} - 1). \end{aligned} \quad (4.34)$$

### Rosin-Rammler-Verteilung, Weibull-Verteilung

Die oben zitierte **Rosin-Rammler-Verteilung** [Rosin et al. 33] ist auch unter dem Namen **Weibull-Verteilung** [Müller et al 91] bekannt. Sie wird zur Beschreibung der Tropfenvolumina verwendet. Die Dichte ist gegeben durch

$$f_X(t) = \begin{cases} \frac{p}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{p-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^p\right) & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t \leq 0 \end{cases}, \quad a > 0, \quad p > 0. \quad (4.35)$$

Der Parameter  $a$  ist ein Skalenparameter der Verteilung,  $p$  ist ein Formparameter, der die Streuung der Tropfenvolumina charakterisiert. Je größer  $p$  ist, um so geringer ist die Streuung. Für  $p \rightarrow \infty$  nähert sich die Verteilung einer Einpunktverteilung, d. h. die Tropfenvolumina sind gleich groß und es liegt ein monodisperses System vor. [Domnick 95] nimmt eine Parameterauswahl vor. Die Dichtefunktion hat die Gestalt

$$f_x(t) = \begin{cases} 0,693 \cdot \frac{N}{\bar{d}} \left(\frac{t}{\bar{d}}\right)^{N-1} \exp\left(-0,693 \cdot \left(\frac{t}{\bar{d}}\right)^N\right) & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t \leq 0 \end{cases}, \quad (4.36)$$

$\bar{d} > 0, \quad N > 0.$

Hierin werden  $N$  als Breite der Verteilung und  $\bar{d}$  als Volumenmedian bezeichnet. Man erhält (4.36) aus (4.35), indem man

$$p = N \quad \text{und} \quad a = \frac{\bar{d}}{\sqrt[0,693]{}}$$

wählt.

### Verteilung von Nukiyama und Tanasawa

Die Verteilung von Nukiyama und Tanasawa [Lefebvre 89] hat die Form

$$f_x(t) = a \cdot t^p \exp(-(bt)^q). \quad (4.37)$$

Die Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $p$  und  $q$  müssen so gewählt sein, daß das Integral über die Dichte den Wert Eins liefert (vgl. (3.4)). Aus dieser Verteilung erhält man mit

$$q_{NT} = p, \quad b_{NT} = a^{-p}, \quad p_{NT} = p - 1, \quad a_{NT} = p \cdot a^{-p} \quad (4.38)$$

die Weibull-Verteilung (4.35). Um Verwechslungen zu vermeiden, wurden die Parameter aus (4.37) in (4.38) mit dem Index  $NT$  versehen.

### 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolische Verteilung

Die 3-Parameter-logarithmisch-hyperbolische Verteilung [Xu et al. 93] ist gegeben mit

$$f(t) = A \cdot \exp \left[ - \frac{a}{\alpha^2 \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta)} \sqrt{(\alpha^2 \cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (t + \mu_0 - \mu)^2} - \frac{(\alpha^2 + 1) \sin \theta \cos \theta}{\alpha^2 \cos^2(\theta) - \sin^2 \theta} (t + \mu_0 - \mu) \right] \quad (4.39)$$

Für die Parameter dieser Verteilung gelten eine Reihe von Bedingungen, die hier nicht näher angegeben werden. Es wird auf [Xu et al. 93] verwiesen.

Der Vorteil der Verwendung dieser Verteilung liegt darin, daß sie die Beschreibung des ganzen räumlichen Sprays erlaubt. Die vorher genannten Verteilungen beziehen sich jeweils nur auf einen Meßpunkt.

**Zusammenfassend ist nochmals zu unterstreichen, daß auf Basis der Messungen die Momente und die Parameter der oben angegebenen Verteilungen geschätzt werden können. Damit hat man explizit Aussagen für Zweiphasensysteme (Wasser-Luft-Gemische) verfügbar. Mit deren Hilfe ist ein Vergleich unterschiedlich erzeugter Sprühstrahlen und der damit verbundenen Armaturen möglich.**

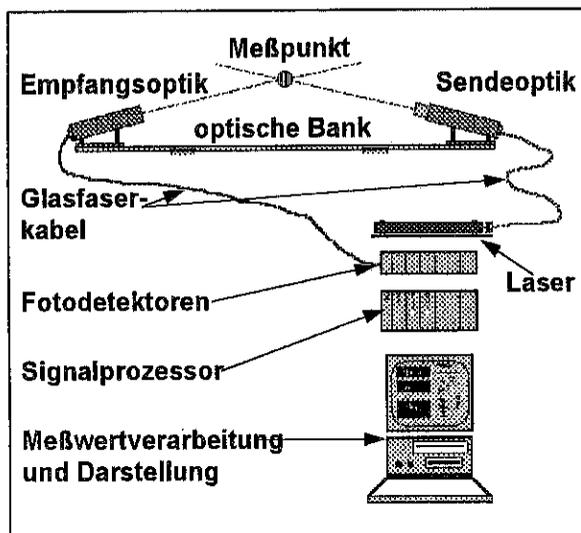
## 5 PDA-Meßplatz

### 5.1 Ausgewählte Bestandteile des PDA-Meßplatzes

#### Phasen-Doppler-Anemometer

Zur Realisierung des im Abschnitt 3.4 beschriebenen PDA-Meßverfahrens wurde am IdF ein aus mehreren Komponenten bestehender Meßplatz aufgebaut. In diesem Abschnitt wird zunächst das PDA beschrieben. Zum Einsatz kommt ein PDPA (Phasen-Doppler-Partikel-Analysator) der Firma POLYTEC.

Im optischen System erzeugt ein He/Ne-Laser einen Laserstrahl, der über einen 10 m langen Lichtwellenleiter (Glasfaserkabel) zur Sendeoptik (Transmitter) geleitet wird, die auf einer optischen Bank montiert ist. Dort wird der Strahl mittels Strahlteiler in zwei kohärente Teilstrahlen zerlegt, die mittels eines geeigneten Linsensystems (Sendeoptik) im sogenannten Meßvolumen zur Interferenz gebracht werden (s. Bild 5.1).



**Bild 5.1:** Bestandteile des Phasen-Doppler-Anemometers am IdF

Das Meßvolumen wird mittels eines zweiten Linsensystems, das Empfangsoptik oder Receiver genannt wird, über einen Schlitz auf Fotodetektoren (photo-multiplier tube) abgebildet, die die optischen Signale zur Weiterverarbeitung in elektrische Signale umwandeln. Durch Ändern der optischen Parameter, wie Linsen mit verschiedenen Brennweiten und dem Einsatz der Strahlaufweitungsoptik, läßt sich das Meßvolumen variieren und das PDA optimal an die Teilchenkonzentration anpassen. Für diese Untersuchungen wurden Linsen mit Brennweiten von  $1000\text{ mm}$  benutzt und die Teilstrahlen auf  $40\text{ mm}$  aufgeweitet. Der Abstand zwischen den Optiken betrug somit  $2\text{ m}$ . Daraus resultiert ein Meßvolumen mit einem Durchmesser von  $820\text{ }\mu\text{m}$ .

Die dem Meßverfahren zugrundeliegende Signalanalyse des gestreuten Laserlichtes erfolgt digital mit einem Signalprozessor für Dopplerfrequenzen bis  $20\text{ MHz}$ . Somit sind äußerst hohe Datenraten bis zu  $120000\text{ Teilchen/s}$  erfaßbar, die auch Messungen in sehr dichten Sprays und hohen Teilchenkonzentrationen erlauben.

Der Betrieb der Optiken im Sprühnebel erwies sich als nicht möglich. Die äußeren Linsen beschlugen und es drang auch Wasser in die Optiken ein. Aus diesem Grund wurden die Optiken eingehaust. Im Innern der Einhausung wurde mit Preßluft ein leichter Überdruck erzeugt, womit auch die äußeren Linsen trocken gehalten werden können.

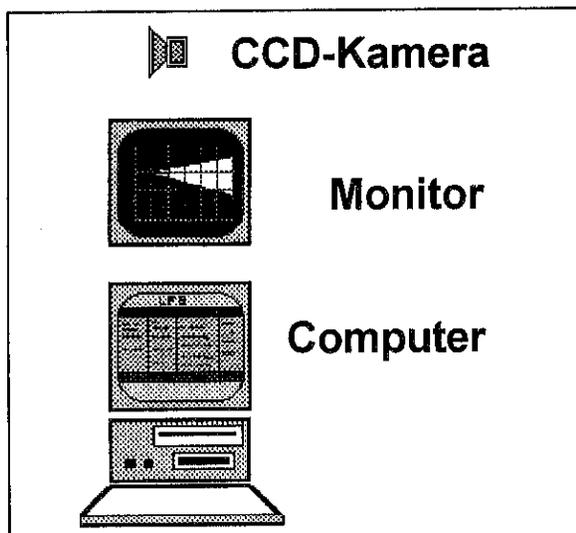
Der PC und die PDPA-Software bieten eine menügesteuerte Kontrolle der Datenaufnahme, Auswertung und Datenspeicherung. Alle Einstellungen der Optik und des Signalprozessors werden software-gesteuert durchgeführt.

Gemessen werden der Tropfendurchmesser und die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung (vgl. Bild 5.7).

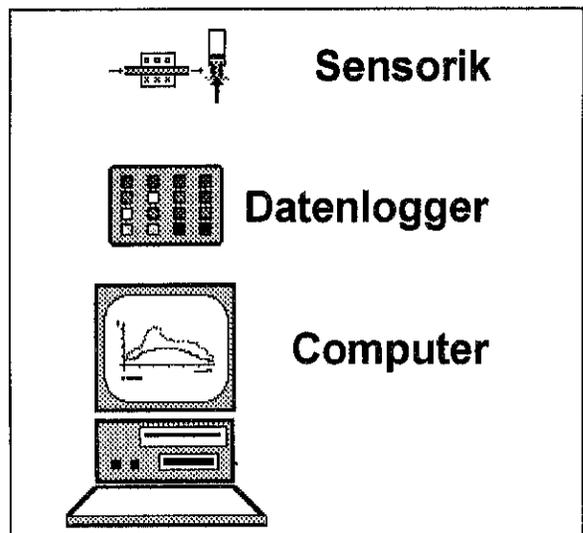
### Bildverarbeitungssystem

Das Bildverarbeitungssystem (s. Bild 5.2) dient der geometrischen Vermessung der Sprühstrahlen. Hierbei wird mittels CCD-Kamera (charge coupled device) ein Videobild aufgenommen und auf einem Monitor dargestellt.

Im Computer ist eine Framegrabber-Karte gesteckt, die ein Digitalisieren der Bilder erlaubt. Eine Bildverarbeitungssoftware [PROFESS 92] gestattet das Einfügen von Rastern mit definiertem Maßstab. Die Möglichkeit der Falschfarbendarstellung gestattet eine erste Auswertung am Bildschirm. Die digitalisierten Bilder können gespeichert, bearbeitet und in eine Reihe von Grafik-Formaten ausgegeben werden.



**Bild 5.2:** Bestandteile des Bildverarbeitungssystems



**Bild 5.3:** Parametermeßsystem

### Parametermeßsystem

Die wesentlichen Parameter beim Betrieb der Strahlrohre sind der Wasserdruck (in *bar*) vor dem Strahlrohr und der Wasservolumenstrom (in *l/min*). Diese Größen sind bei der Versuchsdurchführung über einen längeren Zeitraum konstant zu halten, da sie einen maßgeblichen Einfluß auf die Qualität des Sprühnebels haben und sich während einer Messung nicht ändern dürfen. Aus diesem Grund werden Druck und Durchfluß ständig gemessen. Zur computergestützten Erfassung der Meßwerte wird ein Datenlogger verwendet. An den Datenlogger können in der vorhandenen Ausbaustufe bis zu 16 Sensoren parallel angeschlossen werden. Die Meßwerte können auf dem Bildschirm dargestellt, aufgezeichnet und abgespeichert werden.

Der Volumenstrom wird mit einem magnetisch-induktiven Durchflußmesser gemessen. Zur Druckmessung wird ein Druckaufnehmer verwendet.

## 5.2 Beschreibung des Meßplatzes

Der Meßplatz ist im Naßlabor des IdF aufgebaut. Die räumliche Ausdehnung des Naßlabors mit  $22\text{ m}$  Länge,  $12\text{ m}$  Breite und  $6.5\text{ m}$  Höhe bietet die Möglichkeit, Sprühstrahlen zu vermessen. Zum Bau der einzelnen Elemente wurde durchgängig das korrosionsfeste Bosch-Montagesystem verwendet.

Davon ausgehend wurde ein Meßplatz konzipiert, der aus folgenden Bausteinen besteht:

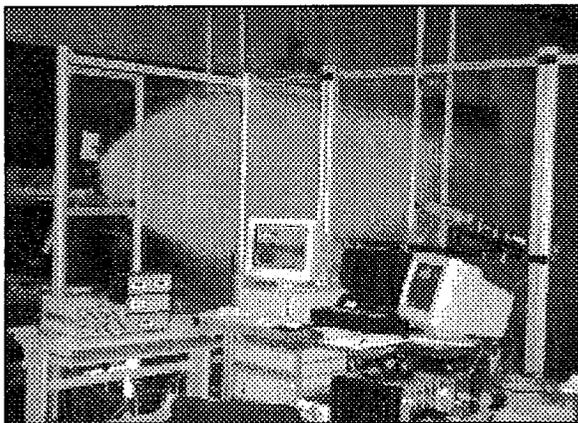
- ◆ Bedienstand,
- ◆ Pumpenstand,
- ◆ Positioniereinrichtung für PDA mit Verfahrenrichtung,
- ◆ Einspannvorrichtung,
- ◆ Geräteträgerwagen.

### Bedienstand

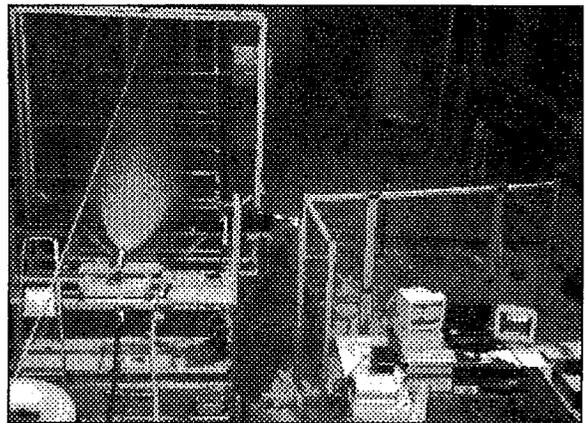
In den Bedienstand integriert sind:

- ◆ Phasen-Doppler-Anemometer,
- ◆ Bildverarbeitungssystem,
- ◆ Parametermeßsystem,
- ◆ Steuerung des Positioniersystems.

Die Bestandteile wurden bereits im vorigen Abschnitt erläutert. Das Positioniersystem wird anschließend beschrieben.



**Bild 5.4:** Der Bedienstand in der Übersicht



**Bild 5.5:** Blick auf den gesamten Versuchsstand

Der Bedienstand enthält alle meßtechnischen Komponenten zur Versuchsdurchführung und Steuerung. Damit ist eine „Einmann-Bedienung“ der Anlage gewährleistet. Da die Ausdehnung der Sprühstrahlen bei über  $10\text{ m}$  liegen kann und die Lichtwellenleiter aus technischen Gründen auf  $10\text{ m}$  begrenzt ist,

wurde der Bedienstand verfahrbar aufgebaut. Er kann innerhalb des Naßlabors den Meßorten angepaßt werden. Zum Schutz vor Spritzwasser und feinen Wassernebeln ist der Stand mit einer durchsichtigen Wand umbaut (s. Bilder 5.4 und 5.5).

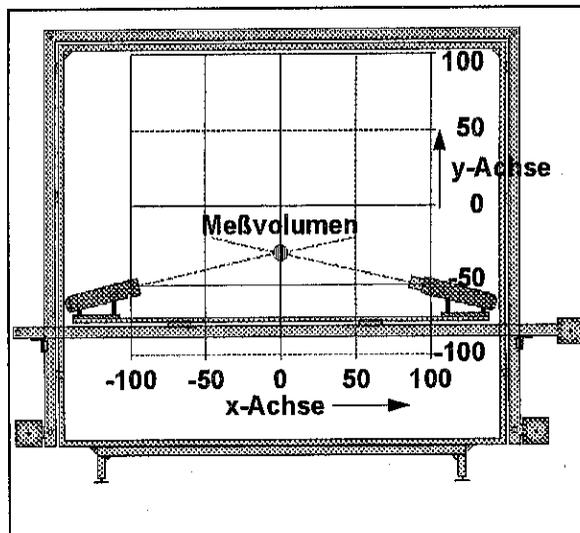
### Pumpenstand

Zur Wasserversorgung wird ein Pumpenstand verwendet. Gegenwärtig muß bei Arbeiten im Hochdruckbereich auf Pumpen zurückgegriffen werden, die manuell geregelt werden müssen.

Im Normaldruckbereich steht eine Pumpe zur Verfügung, bei der ein gewünschter Druck vorgegeben werden kann. Die Pumpe reguliert sich mit hoher Genauigkeit selbständig. Die Druckschwankungen liegen unter  $0,1 \text{ bar}$ .

### Positioniereinrichtung für PDA

Die Positioniereinrichtung für das PDA ist auf einem Verfahrwagen aufgebaut. Dieser trägt die optische Bank mit allen Versorgungseinrichtungen und ermöglicht die Positionierung innerhalb einer vertikalen Ebene (( $x,y$ )-Ebene). Die Normale dieser Ebene verläuft parallel zur Sprühstrahlachse, also der  $z$ -Richtung.



Mit Hilfe einer Schrittmotorsteuerung wird über einen PC vom Bedienstand aus die Position der optischen Bank und somit des Meßortes eingestellt. Die Koordinatenangaben werden für den Meßpunkt gemacht. Die Sprühstrahlachse hat die ( $x,y$ )-Koordinate  $(0,0)$ .

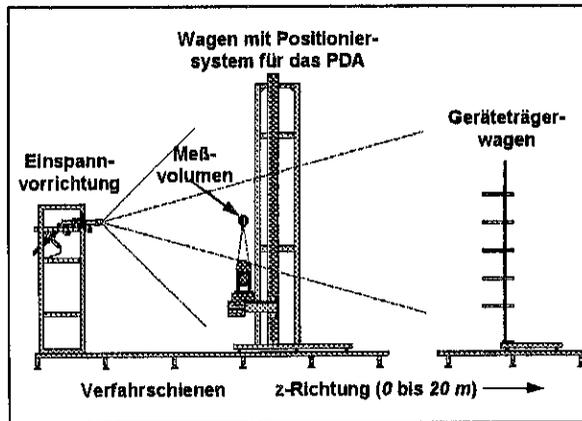
Die Abmessungen des Meßbereiches in der vertikalen ( $x,y$ )-Ebene und des Meßrasters sind im Bild 5.6 schematisch dargestellt. Die zu wählende Schrittweite hängt von der jeweiligen Meßaufgabe ab. Der Meßpunkt, d. h. die Lage des Meßvolumens im Sprühstrahl, kann auf  $1 \text{ mm}$  genau eingestellt werden.

**Bild 5.6:** Positioniersystem für das PDA

### Verfahreinrichtung

Im Naßlabor sind zwei parallele Verfahrschienen von ca. 20 m Länge aufgebaut. An dem einen Ende befindet sich die Einspannvorrichtung für die Sprühstrahlrohre. Die Mündung des Sprühstrahlrohres hat die  $z$ -Koordinate  $0$ . Die horizontale Linie, die durch die Mitte der Strahlrohröffnung parallel zum Verfahrweg verläuft, ist die Strahlmitte. Das Sprühstrahlrohr ist parallel zum Verfahrweg einzuspannen. Auf diesem Verfahrweg kann der Wagen mit der Positioniereinrichtung für das PDA manuell verschoben werden (vgl. Bild 5.9).

Das Grundgerüst ermöglicht ein Verfahren der optischen Bank in Richtung der Strahlachse über die gesamte Länge.



**Bild 5.7:** Seitenansicht der Verfahrereinrichtung

Geräteträger. Er kann zur Montage z. B. Probeentnahmesonden oder Prallplatten im Sprühstrahl eingesetzt werden.

### Einspannvorrichtung

In die Einspannvorrichtung können die zu untersuchenden Strahlrohre oder Düsen in Position gebracht und auf einem verfahrbaren Schlitten auch angestellt werden, um verschiedene Auswurfwinkel zu realisieren. Hier erfolgten auch die Wasserzuführung und die Messung des Druckes vor dem Sprühstrahlrohr.

### Geräteträgerwagen

Ein zweiter Wagen, der ebenfalls auf dem Verfahrweg positioniert werden kann, dient als

## 6 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

### 6.1 Versuchsprogramm

Im ersten Halbjahr 1995 wurde in ausgewählten Feuerwehren eine Umfrage mit dem Ziel durchgeführt, das Spektrum der in den Feuerwehren eingesetzten Sprühstrahlrohre/Pistolen zu ermitteln. Dabei wurden die Bereiche

- ◆ Berufsfeuerwehren (BF),
- ◆ Werkfeuerwehren (WF),
- ◆ Freiwillige Feuerwehren (FF)

und die entsprechenden Arbeitsgemeinschaften und Verbände einbezogen. Insbesondere wurden die Mitglieder und Gäste des Arbeitskreises Technik der Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren gebeten, die gewünschte Information aus ihrem Wirkungsbereich zur Verfügung zu stellen, was sie dankenswerterweise auch taten. Parallel dazu wurden die den Bearbeitern bekannten Hersteller um eine entsprechende Produktinformation gebeten.

Die auf der Basis dieser Stichprobe erhaltene Übersicht ist sicher nicht umfassend, läßt aber folgende Schlüsse zu:

- ◆ Das Spektrum der verwendeten Sprühstrahlrohre/Pistolen ist sehr vielfältig und nicht auf wenige Produkte beschränkt.
- ◆ Diese Produktvielfalt gilt auch, wenn jeder Bereich (BF, WF, FF) für sich betrachtet wird.
- ◆ Es gibt keinen Hersteller, der den Markt eindeutig beherrscht.
- ◆ Neben deutschen und anderen europäischen Herstellern sind auch Produkte aus Übersee vertreten.

Damit ist offensichtlich, daß innerhalb dieses finanziell und zeitlich begrenzten Projektes nicht alle in Frage kommenden Löschmittelauswurfvorrichtungen berücksichtigt werden konnten, um die Zahl der Versuche auf ein vertretbares Maß einzuschränken.

Das in der Einführung formulierte Anliegen dieser Untersuchungen ist die Erarbeitung einer Vergleichsmethode für die Sprühstrahlen, die durch die im mobilen Feuerwehreinsatz verwendeten Sprühstrahlrohre/Pistolen erzeugt werden. Dabei war sicherzustellen, daß sowohl Sprühstrahlen aus dem Normal- als dem Hochdruckbereich berücksichtigt werden. Dies führte zu dem in Tabelle 6.1 zusammengestellten Versuchsprogramm.

Es wurden auch zwei Sprühstrahlrohre ausgesucht, deren Düsen manuell während des Einsatzes verstellt werden können. Die Messungen wurden für die in der letzten Spalte angegebenen Öffnungswinkel durchgeführt (Versuche 1 bis 4).

Die drei ausgewählten Pistolenstrahlrohre wurden zum Teil bei unterschiedlichen Drücken, die vor dem Strahlrohr bestimmt wurden, vermessen. Bei dem Strahlrohr *ppnn06* handelt es sich um ein Pistolenstrahlrohr mit C-Anschluß. Bei den Versuchen 6, 9 und 10 wurde jeweils dasselbe Strahlrohr verwendet. Die Versuche 7 und 8 wurden auch mit jeweils demselben

Strahlrohr durchgeführt. Beim letzten Versuchspaar konnte kein Durchfluß gemessen werden, da die erforderlichen Adapter nicht kurzfristig zu beschaffen waren.

Der relativ große Unterschied bei den Durchflußmengen der Versuche 5 und 6 ist darauf zurückzuführen, daß Einstellungen am Strahlrohr zu ändern waren, die sich durchflußreduzierend auswirkten.

**Tabelle 6.1:** Parameter der durchgeführten Versuche

Nr.	Bezeichnung	Bemerkung	Druck in bar	Durchfluß in l/min	Öffnungswinkel in °
1	span45	Sprühstrahlrohr, verstellbar	6	218	45
2	span90	Sprühstrahlrohr, verstellbar	6	220	90
3	spqn45	Sprühstrahlrohr, verstellbar	6	194	45
4	spqn90	Sprühstrahlrohr, verstellbar	6	198	90
5	ppnn06	Pistolenstrahlrohr	6	131	
6	ppnn10	Pistolenstrahlrohr	10	75	
7	ppan10	Pistolenstrahlrohr	10	52	
8	ppah20	Pistolenstrahlrohr	20	66	
9	ppnh20	Pistolenstrahlrohr	20		
10	ppnh30	Pistolenstrahlrohr	30		

Die Meßpunkte wurden so gewählt, daß ein Vergleich zwischen den Strahlrohren möglich ist. Aus diesem Grund wurden alle Messungen in der horizontalen Ebene in Höhe Rohrmündung durchgeführt, d. h. der Wert der  $y$ -Koordinate (vgl. Abschnitt 5.2) ist stets Null. Die Entfernung des ersten Meßpunktes in Strahlmitte hing vom jeweiligen Strahlrohr ab. Wie bei der Erläuterung des Meßverfahrens dargestellt, mußte insbesondere eine sphärische Ausprägung der Tropfen gesichert sein. Bei den meisten Versuchen wurde, von einem Meter beginnend, in Meterschritten gemessen, d. h.  $z$  nahm die Werte 100, 200, 300, 400 und 500 cm an. Für jeden  $z$ -Wert wurde in 10 cm Abständen in  $x$ -Richtung gemessen. Die Zahl der Meßpunkte hing von der Länge und Breite der betrachteten Sprühstrahlen ab. Sie betrug zwischen 50 und 80 Meßreihen für jedes Strahlrohr.

## 6.2 Schritte der Versuchsauswertung

### Software des PDA-Meßplatzes

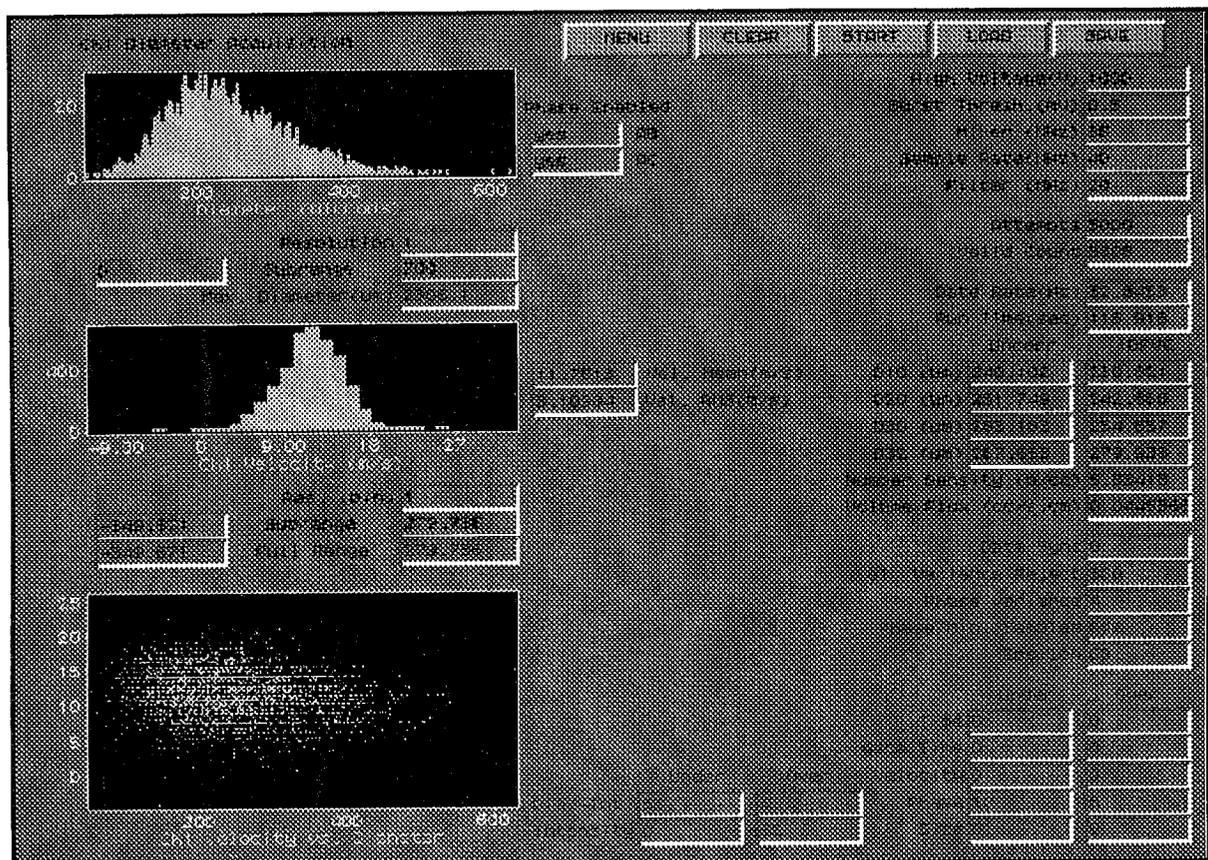
Sowohl die Steuerung des Versuchsablaufs als auch die Meßwerterfassung erfolgten durch Computer. Die in den Meßplatz integrierte Software umfaßt folgende Funktionen:

- ◆ Die Programmsteuerung erfolgt mit Hilfe von Pull-Down-Menüs.
- ◆ Alle Meßeinstellungen der Optik und des Signalprozessors werden software-gesteuert durchgeführt. Die Software wertet die Meßergebnisse für die Phase und die Intensität aus.

- ◆ Es sind die Auswertung der Meßsignale und die Abspeicherung der Daten für die Geschwindigkeit und den Durchmesser für jeden berücksichtigten Tropfen auf die Festplatte des PC gewährleistet. Dabei wird für jeden Meßpunkt automatisch eine Datei angelegt. Diese Datei enthält neben den Meßwerten unter anderem auch die Parameter für die Meßplatzeinstellungen. Das Dateiformat ist durch andere Programme nicht verarbeitbar.
- ◆ Die Software bietet die Möglichkeit, die Meßdaten für Tropfengeschwindigkeit und -größe in eine ASCII-Datei zu exportieren, was für die folgenden Auswertungen von großer Bedeutung ist.
- ◆ Die gemessenen Werte werden On-line verarbeitet, wobei das Programm eine Vielzahl von Darstellungs- und Analysemöglichkeiten über den Bildschirm bietet.

### On-line-Auswertung

Die Meßwernerfassung und -verarbeitung erfolgen On-line, d. h. parallel zur Datenaufnahme werden zum Beispiel die Histogramme der Teilchengröße und der Teilchengeschwindigkeit ständig auf dem Bildschirm aktuell dargestellt. Gleiches gilt für die Berechnung von Schätzwerten für Durchmesser und Geschwindigkeit. Es werden der Längen-Durchmesser bzw. der arithmetische Mittelwert  $D_{10}$ , der Oberflächen-Durchmesser  $D_{20}$ , der Volumendurchmesser  $D_{30}$  und der Sauter-Durchmesser  $D_{32}$  geschätzt (vgl. Tabelle 4.1). Für die Geschwindigkeit werden Mittelwert und Standardabweichung angegeben.



**Bild 6.1:** Typische Bildschirmdarstellung für die On-line-Auswertung

Die im Bild 6.1 enthaltenen Darstellungen sind insbesondere in der Testphase wertvoll bzw. wenn die Zahl der Meßpunkte nicht sehr groß wird. Hervorzuheben ist auch die während der Messung ständig laufende Statistik zur Zahl der identifizierten und nichtidentifizierbaren

Tropfen. Am Verhältnis der beiden Zahlen ist zu erkennen, ob man sich in einem Bereich sphärisch ausgeprägter Tropfen befindet und ob das Meßvolumen in sinnvoller Weise gewählt wurde. Eine weitere Größe ist die Datenrate, d. h. die pro Zeiteinheit identifizierten Objekte. Ist die Datenrate und die Zahl der identifizierten Objekte zu gering, so ist die statistische Sicherheit nicht gewährleistet. Das ist bei der Interpretation der Bilder in den Randbereichen des Sprühstrahles zu beachten.

Anstelle dieser On-line-Auswertungen bzw. zum Aufbau eigener grafischer Darstellungen ist ein Abschreiben der Werte vom Bildschirm mit anschließender manueller Eingabe in ein Grafiksystem nicht praktikabel.

### **Anforderungen an die Software zur Datenauswertung**

Der im diesem Projekt notwendige Vergleich von Sprühnebeln erfordert bei der Auswertung die gleichzeitige Einbeziehung der Meßwerte aller Meßpunkte der am Vergleich beteiligten Sprühnebel. Das sind bei den hier untersuchten Sprühstrahlen bis zu 164.000 Datensätze je Sprühstrahl, die zu berücksichtigen sind. Hier ist die Arbeit mit einem leistungsfähigen Datenbanksystem mit integrierter Grafiksoftware unumgänglich. Das Datenbanksystem muß auch in der Lage sein, Daten zu importieren. Für die Datenauswertung wurde das SAS<sup>®</sup> Statistikpaket [SAS 95] verwendet, das über alle benötigten Datenbankfunktionen verfügt und noch weitere Komponenten beinhaltet, auf die unten eingegangen wird.

Bei der Datenübernahme ist die Zuordnung jedes Meßwertes zum

- ◆ Sprühstrahl (Bezeichnung aus der 1. Spalte der Tabelle 6.1),
- ◆ Meßort (x-, y- und z-Koordinate des Meßvolumens, vgl. Abschnitt 5.3),
- ◆ Druck (4. Spalte Tabelle 6.1),
- ◆ Öffnungswinkel (6. Spalte Tabelle 6.1)

zu sichern. D. h. bei der Übernahme sind die entsprechenden Datenfelder zu definieren, und es sind gleichzeitig diese Werte bereitzustellen. Folgende Aufgaben sind zu erfüllen:

- ◆ Die Rohdaten für jeden Meßpunkt sind in eine sequentielle Datei zu entladen, in der in jedem Datensatz ein Wertepaar für den Tropfendurchmesser und die -geschwindigkeit stehen.
- ◆ Diese sequentiellen Dateien sind in eine gemeinsame Datenbank zu importieren, wobei gleichzeitig die oben angegebenen Informationen jedem Einzeltropfen zuzuordnen sind. Bei der Vielzahl der zu verarbeitenden Meßpunkte war eine manuelle Übernahme jeder Datei auf der Ebene der Kommandosprache des Datenbanksystems nicht möglich. Aus diesem Grund wurden in der in SAS<sup>®</sup> integrierten Makrosprache Makros und Programme geschrieben, die diese Arbeiten effektiv ausführten.

Unter Einbeziehung von SAS<sup>®</sup>-Unterprogrammen wurden für die übernommenen Meßwerte Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt, um systematische Fehler bei der Datenübernahme zu erkennen bzw. auszuschließen.

- ◆ Die Datenmengen sind nur durch grafische Darstellungen überschaubar. Die Entwicklung der Grafiken erfordert eine Aggregation der darzustellenden Meßwerte. Programmtechnisch wurden folgende Schritte abgearbeitet:
  - Selektion der zu berücksichtigenden Meßwerte aus der Datenbank,
  - Berechnung der in der Grafik darzustellenden Größen,

- Beschreibung der Grafiklayouts,
- Ausgabe der Grafik.

Auf die Details der Realisierung sei hier nicht näher eingegangen. Es wurden die SAS<sup>®</sup>-Makrosprache und eine Reihe integrierter Statistik-Module des SAS<sup>®</sup>-Systems verwendet.

### 6.3 Auswertungen für den einzelnen Sprühstrahl

Für jeden vermessenen Sprühstrahl wurden vier Grafiken entwickelt, deren Inhalt nun erläutert wird. Die Erläuterungen beziehen sich unmittelbar auf die vier Bilder 6.2a bis 6.2d.

#### a) 3D-Darstellung für die mittleren Tropfendurchmesser

Die Meßpunkte liegen alle in der Ebene der Rohrmündung (vgl. Abschnitt 5.2), d. h. die  $y$ -Koordinate ist Null und muß in der Grafik nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist im Bild die  $(x,z)$ -Ebene eingezeichnet.  $x$  ist der Abstand von der Strahlmitte und kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen.  $z$  gibt den Abstand von der Rohrmündung an.

Über jedem Punkt dieser Ebene ist der mittlere Tropfendurchmesser aufgetragen. Da Werte für den mittleren Tropfendurchmesser nur in den Meßpunkten zur Verfügung stehen, wurden sie für die anderen Gebiete der  $(x,z)$ -Ebene mit Hilfe von Interpolationsverfahren berechnet. Die so ermittelten Werte wurden auf der dritten mit  $d$  (für Durchmesser) bezeichneten Achse abgetragen und durch Linien verbunden. Im Ergebnis liefert das eine räumliche Fläche. Ein hoher  $z$ -Wert entspricht einem großen Tropfendurchmesser usw.

Das Bild vermittelt auch einen Eindruck davon, ob es sich um einen monodispersen oder polydispersen Sprühstrahl handelt. Bei einem monodispersen Sprühstrahl, d. h. bei etwa gleichgroßen Tropfen, ist die Fläche eine Ebene, die parallel zur  $(x,z)$ -Ebene verläuft. Die vertikale  $d$ -Achse wurde für alle Sprühstrahlen gleich gewählt, um einen visuellen Vergleich anstellen zu können. Es zeigt sich, daß bei den Sprühstrahlen im Hochdruckbereich (20 bzw. 30 bar) diese Flächen flacher verlaufen.

An den Rändern, insbesondere an den Seiten bei einem Meter Entfernung ( $z=100\text{ cm}$ ), sind die Flächen zum Teil stark nach oben gewölbt. Die Ursache ist, daß in den Randbereichen des Sprühstrahls in der Regel etwas größere Tropfen gemessen werden. Da der Sprühstrahl sich nahezu kegelförmig ausbreitet, sind die Datenraten vorn außen sehr gering, bzw. das Gebiet wird vom Sprühstrahl nicht erreicht. Sodann sind die eingezeichneten Werte durch Extrapolation entstanden, was in diesem Fall zu einer nach oben gerichteten Wölbung der Flächen führt.

#### b) Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung

In diesem Bild werden für ausgewählte  $z$ -Koordinaten die Kurven für die mittleren Tropfendurchmesser eingezeichnet. Die Kurven ergeben sich aus den Schnitten der im Bild a dargestellten Fläche mit den Ebenen, die senkrecht auf der  $(x,z)$ -Ebene stehen und für die  $z$  konstant ist. So erhält man zum Beispiel die Kurve für  $z=100$  dadurch, daß im Abstand von 100 cm von der Rohrmündung eine zur Sprühstrahlachse senkrechte Ebene betrachtet wird. Die in dieser Ebene liegenden Meßpunkte werden berücksichtigt. Die aus den Meßwerten

berechneten mittleren Durchmesser gehen in ein Interpolationsverfahren ein, das auch für die anderen x-Werte die mittleren Durchmesser berechnet.

Betrachtet man die Strahlmitte, so ist im Bild 6.2b ersichtlich, daß die größeren Tropfen bei dieser Sprühstrahlentfernung weiter fliegen. In den Randbereichen ist das anders. Das kann aber nicht generell gesagt werden. Bei den hohen Drücken ist die Streubreite der Tropfendurchmesser relativ klein. Es sind folglich auch keine deutlichen Entmischungen von größeren und kleineren Tropfen zu erwarten. Bei den 4 Messungen an den manuell verstellbaren Sprühstrahlrohren hängt das Ergebnis stark vom Öffnungswinkel ab.

### **c) 3D-Darstellung für die mittleren Tropfengeschwindigkeiten**

Die Darstellung entspricht im Aufbau der des Bildes a. Es sind aber nicht die mittleren Tropfendurchmesser, sondern die mittleren Tropfengeschwindigkeiten  $v$  aufgetragen. Bei allen Bildern ist erkennbar, daß in der Strahlmitte die Geschwindigkeit am größten ist und mit zunehmender Entfernung von der Strahlrohrmündung abnimmt.

Im Bereich der Strahlgrenze werden aufgrund der starken Turbulenzen auch negative Geschwindigkeiten gemessen.

### **d) Mittlere Tropfengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung**

Das Bild entspricht dem Bild b. Hier sind die entsprechende Schnittkurven für die Geschwindigkeiten aufgetragen. Sie verdeutlichen die beim Bild c bereits genannten Effekte.

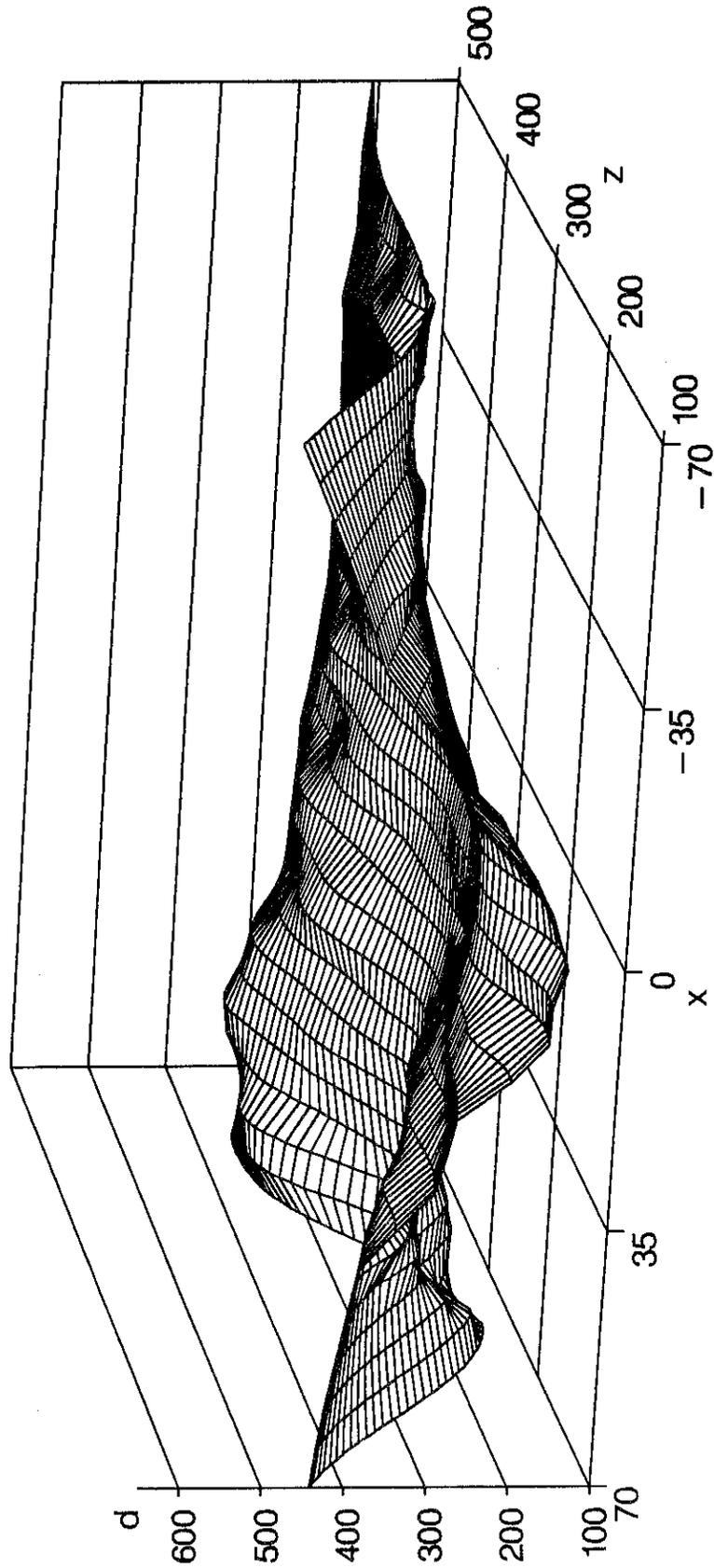
**Insgesamt zeigt sich eine komplizierte Tropfendynamik. Damit ändert der Sprühstrahl während des Fluges der Tropfen seine für die Löschung wichtigen Eigenschaften. Dies erschließt die Möglichkeit, für jedes Sprühstrahlrohr eine optimale Einsatzentfernung zu formulieren.**

**Bild 6.2a:** Sprühstrahlrohr span45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)

### Mittlere Tropfendurchmesser

Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung

Druck am Rohr (span45): 6 bar, Öffnungswinkel: 45°

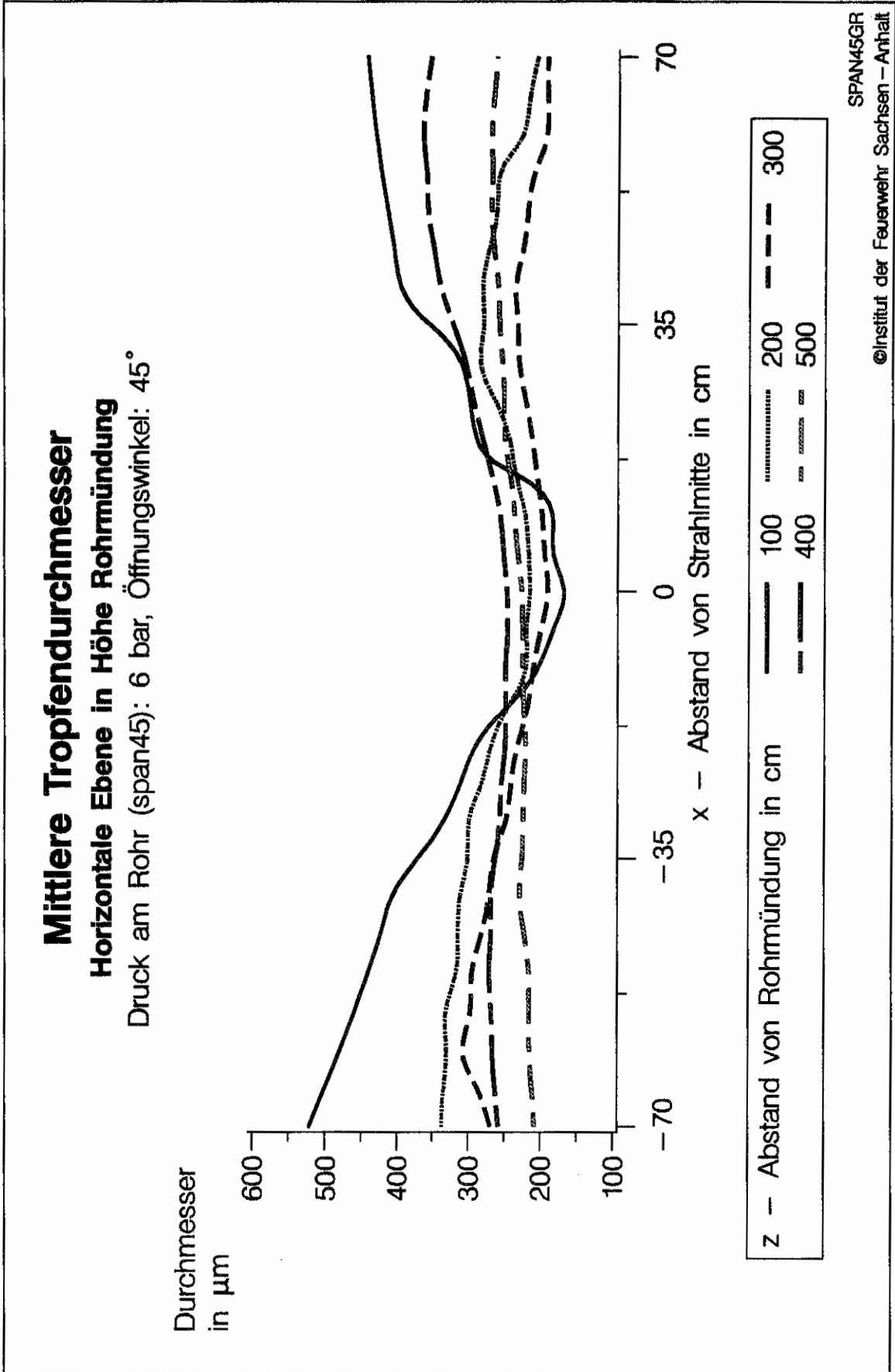


- x – Abstand von Strahlmitte in cm
- z – Abstand von Rohrmündung in cm
- d – Durchmesser in  $\mu\text{m}$

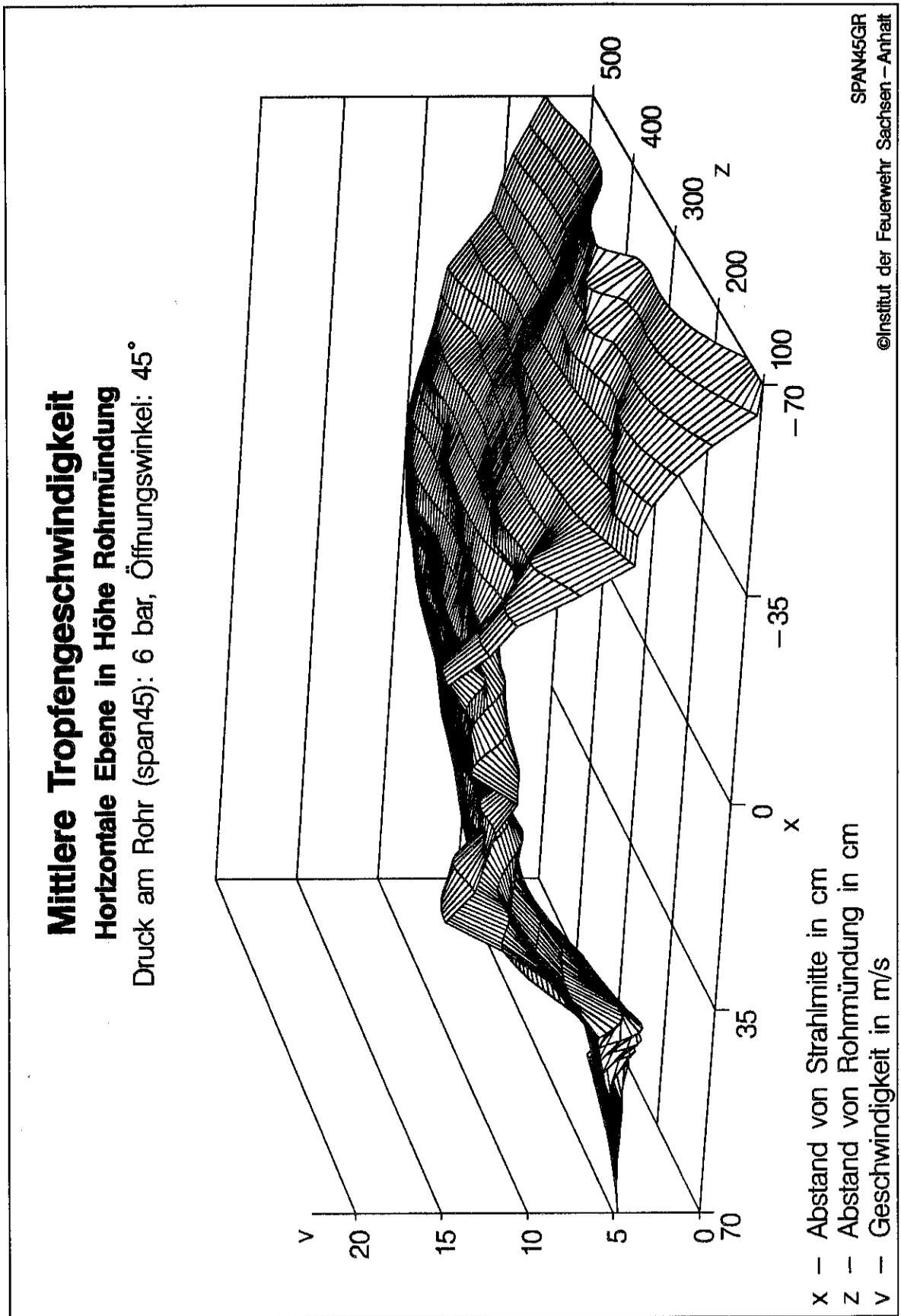
SPAN45GR

©Institut der Feuerwehr Sachsen – Anhalt

**Bild 6.2b:** Sprühstrahlrohr span45 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.2c: Sprühstrahlrohr span45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)**



**Bild 6.2d:** Sprühstrahlrohr span45 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)

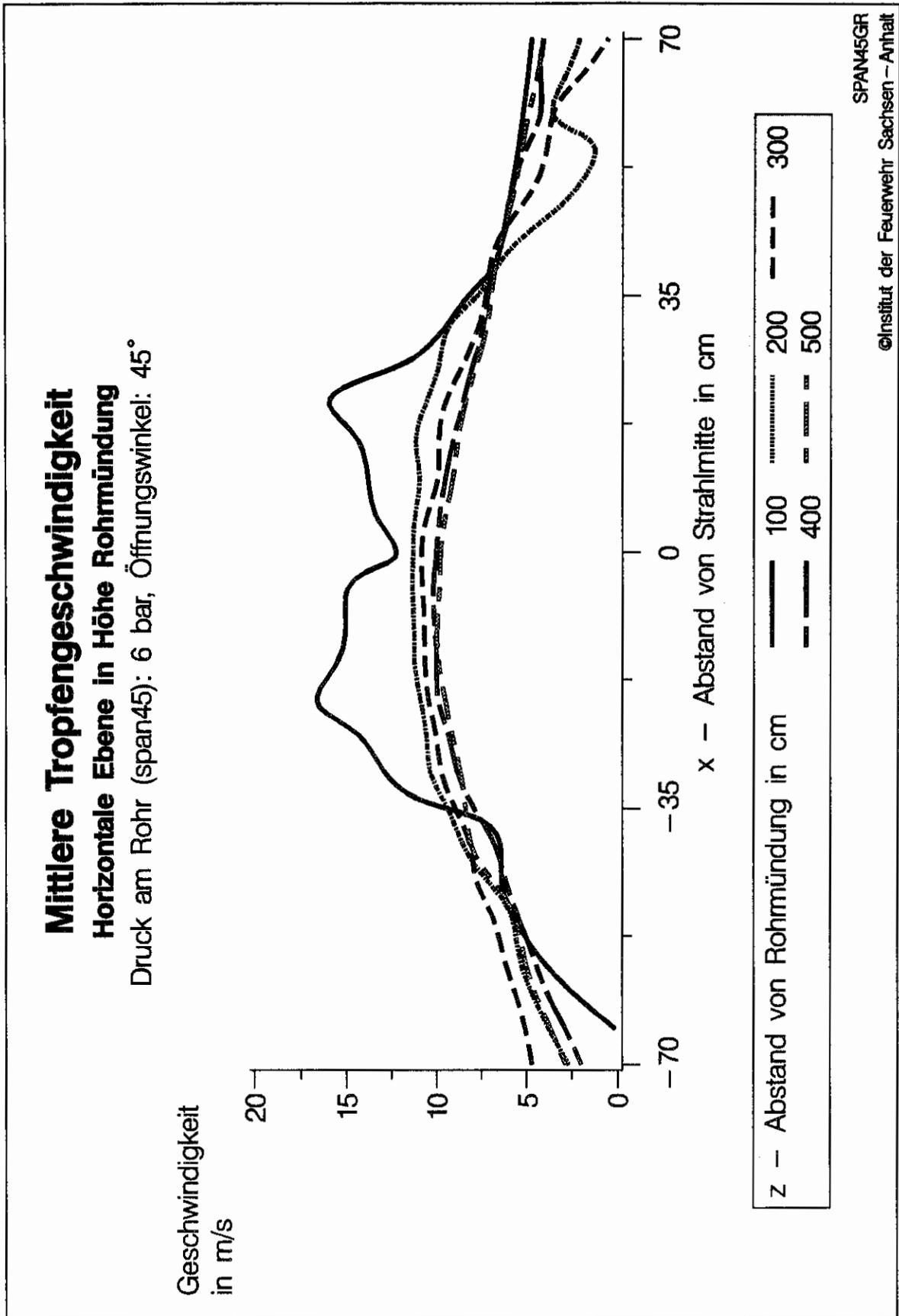
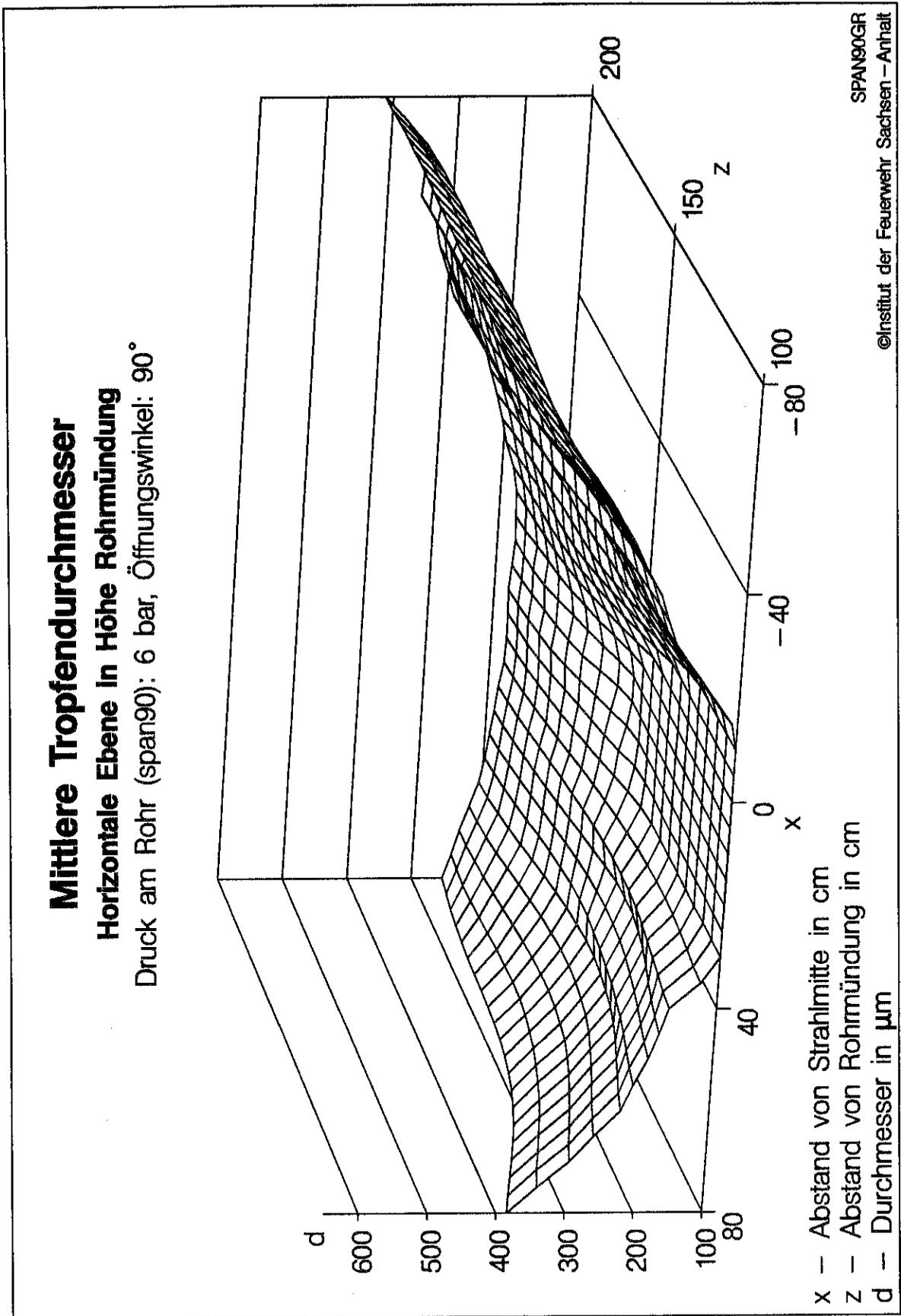
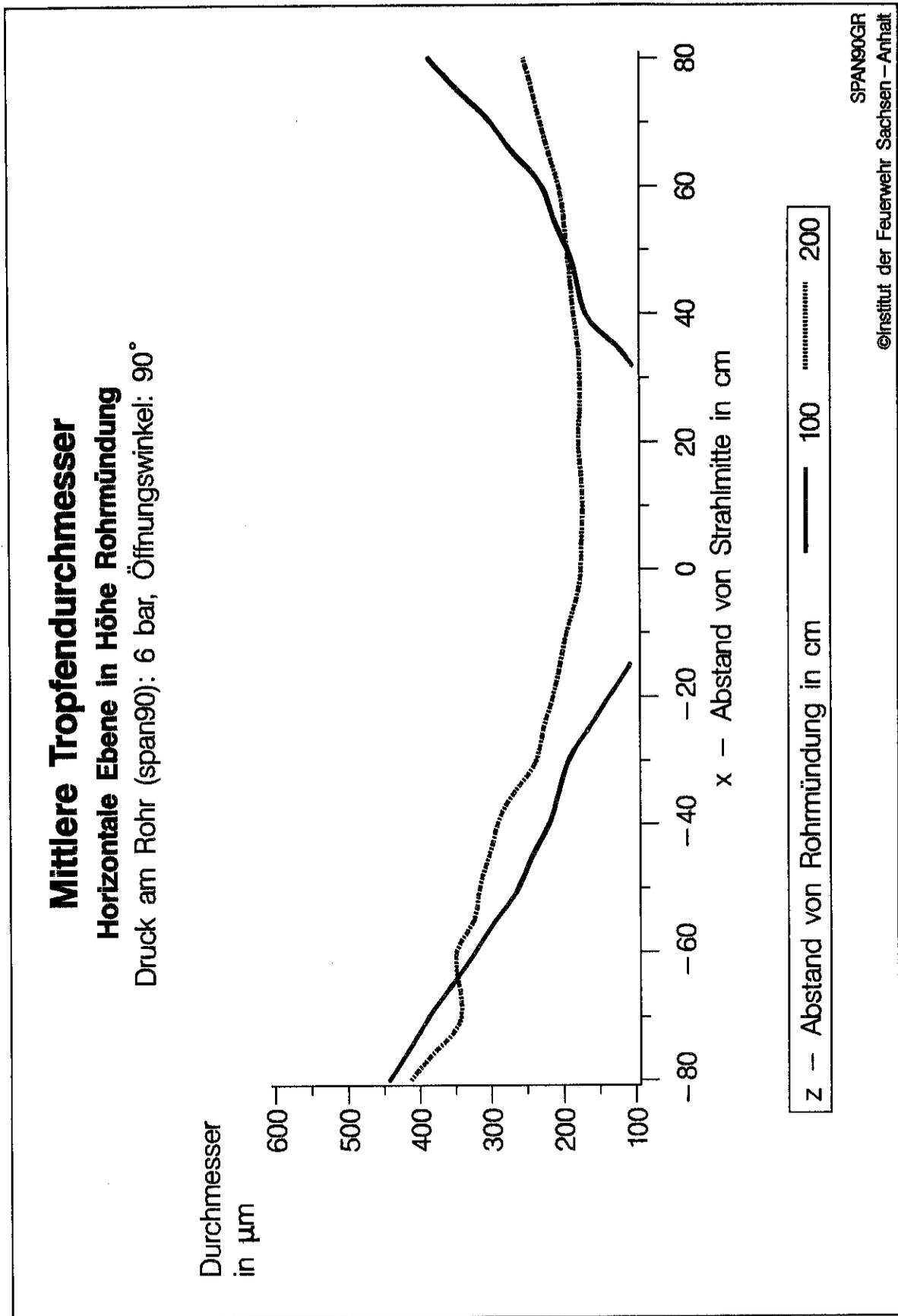


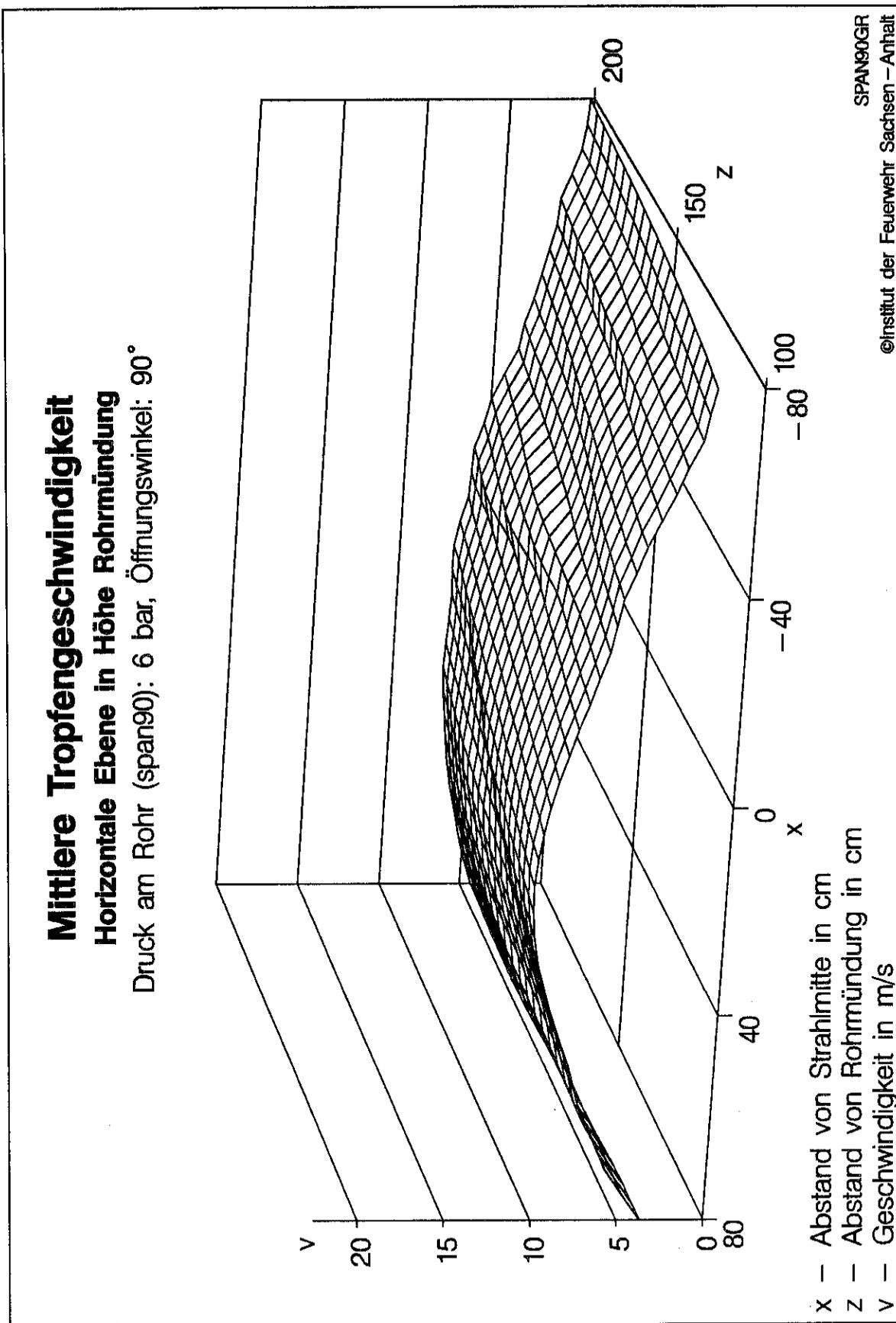
Bild 6.3a: Sprühstrahlrohr span90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)



**Bild 6.3b:** Sprühstrahlrohr span90 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.3c: Sprühstrahlrohr span90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)**



**Bild 6.3d:** Sprühstrahlrohr span90 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)

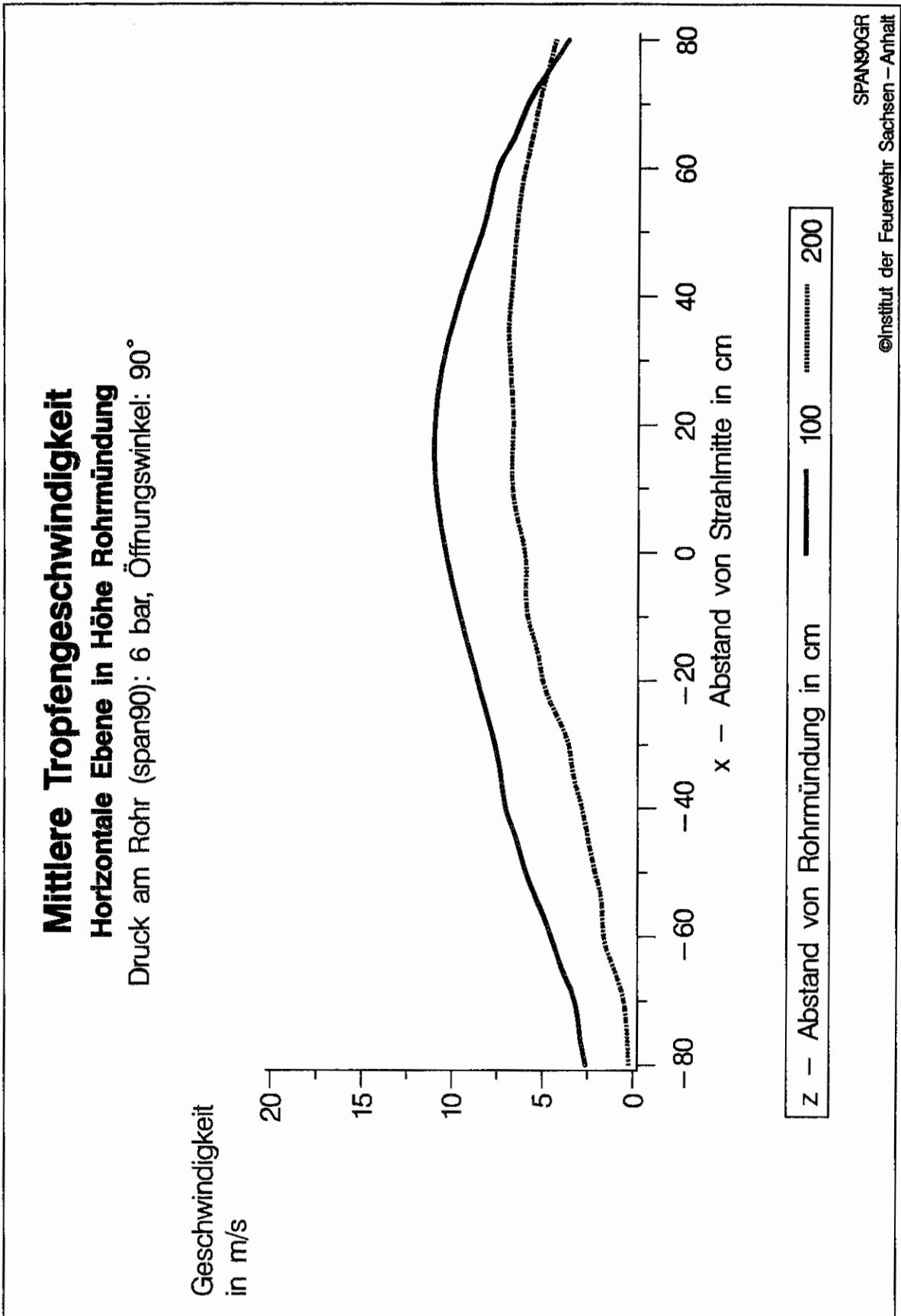
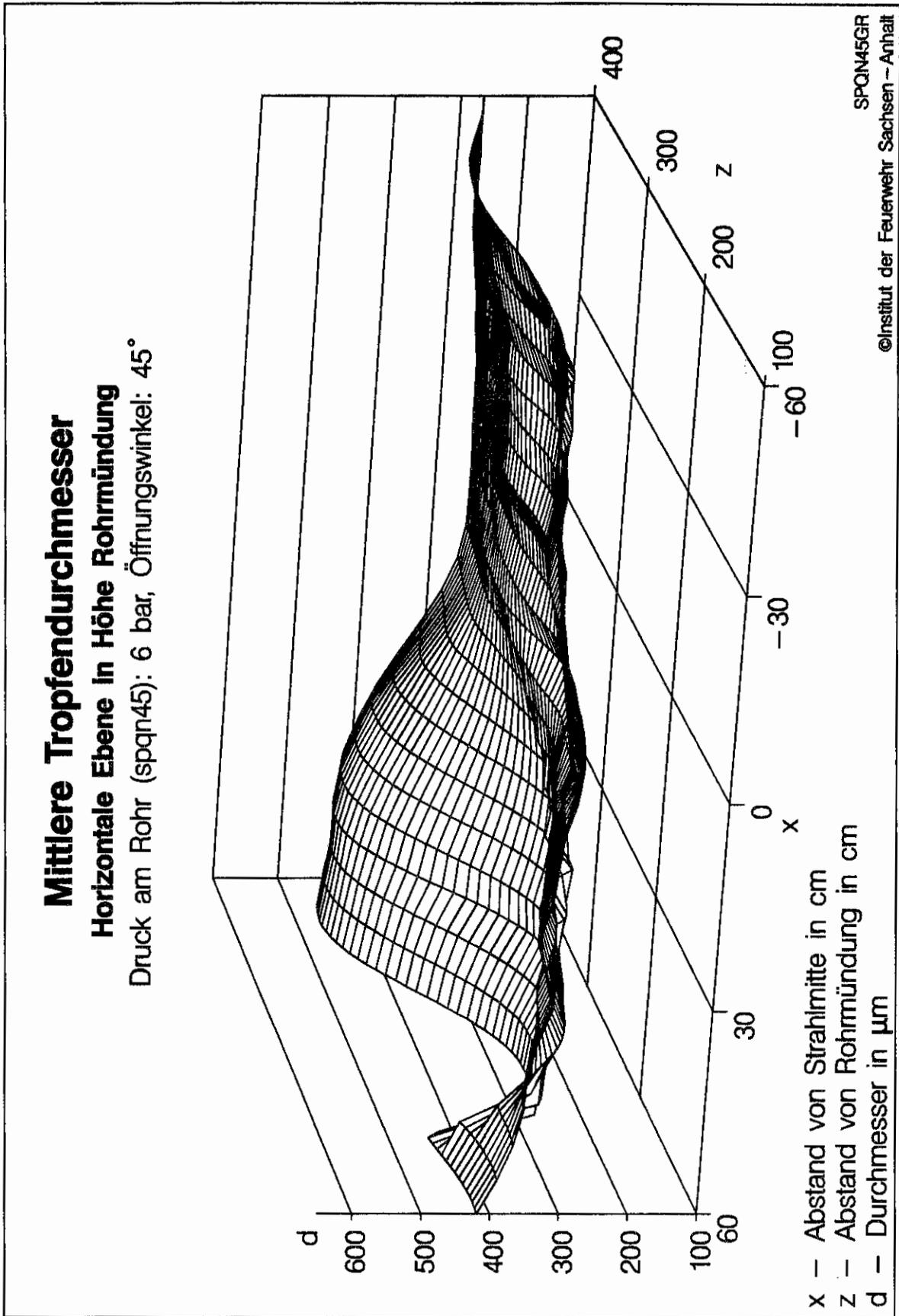
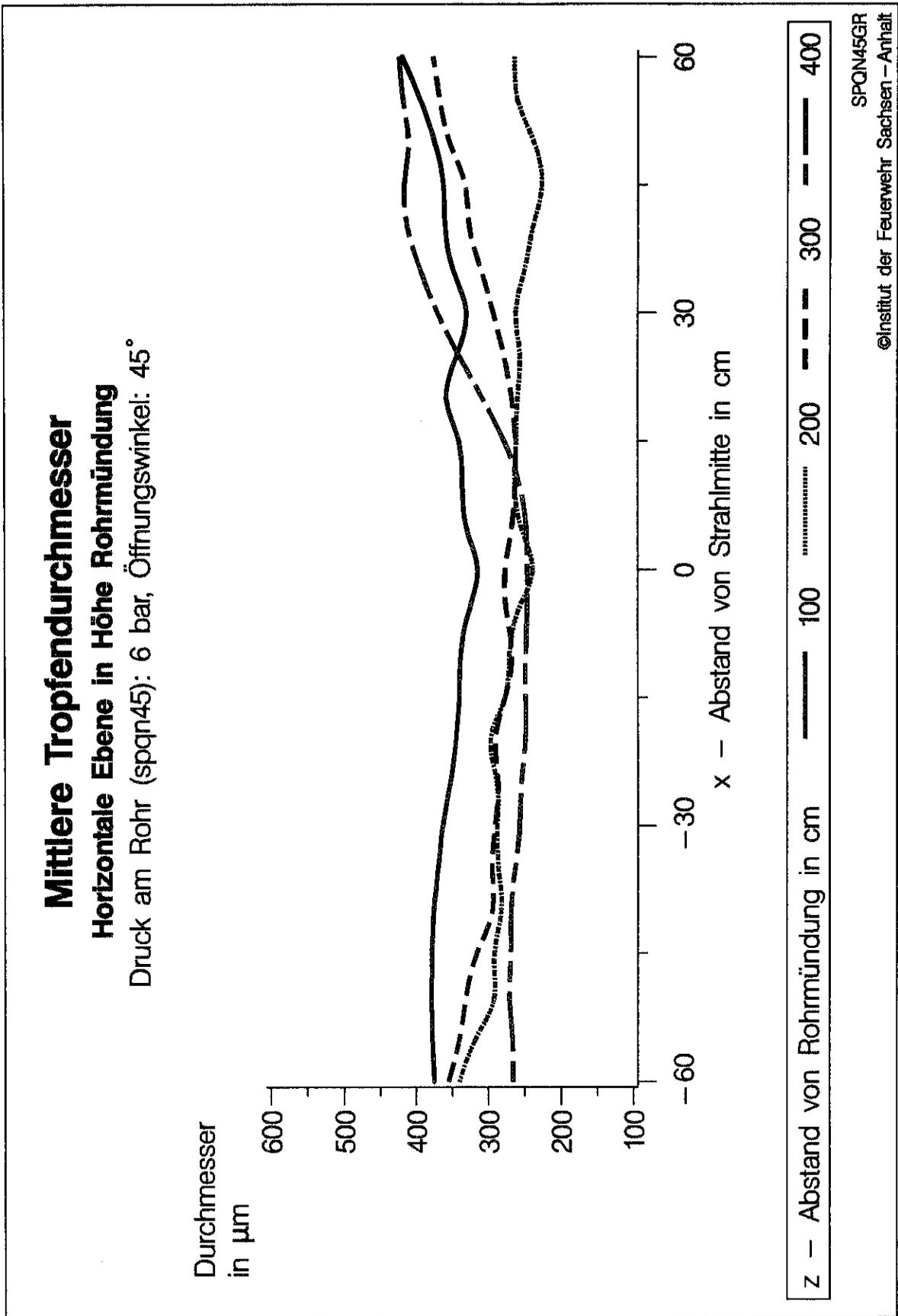


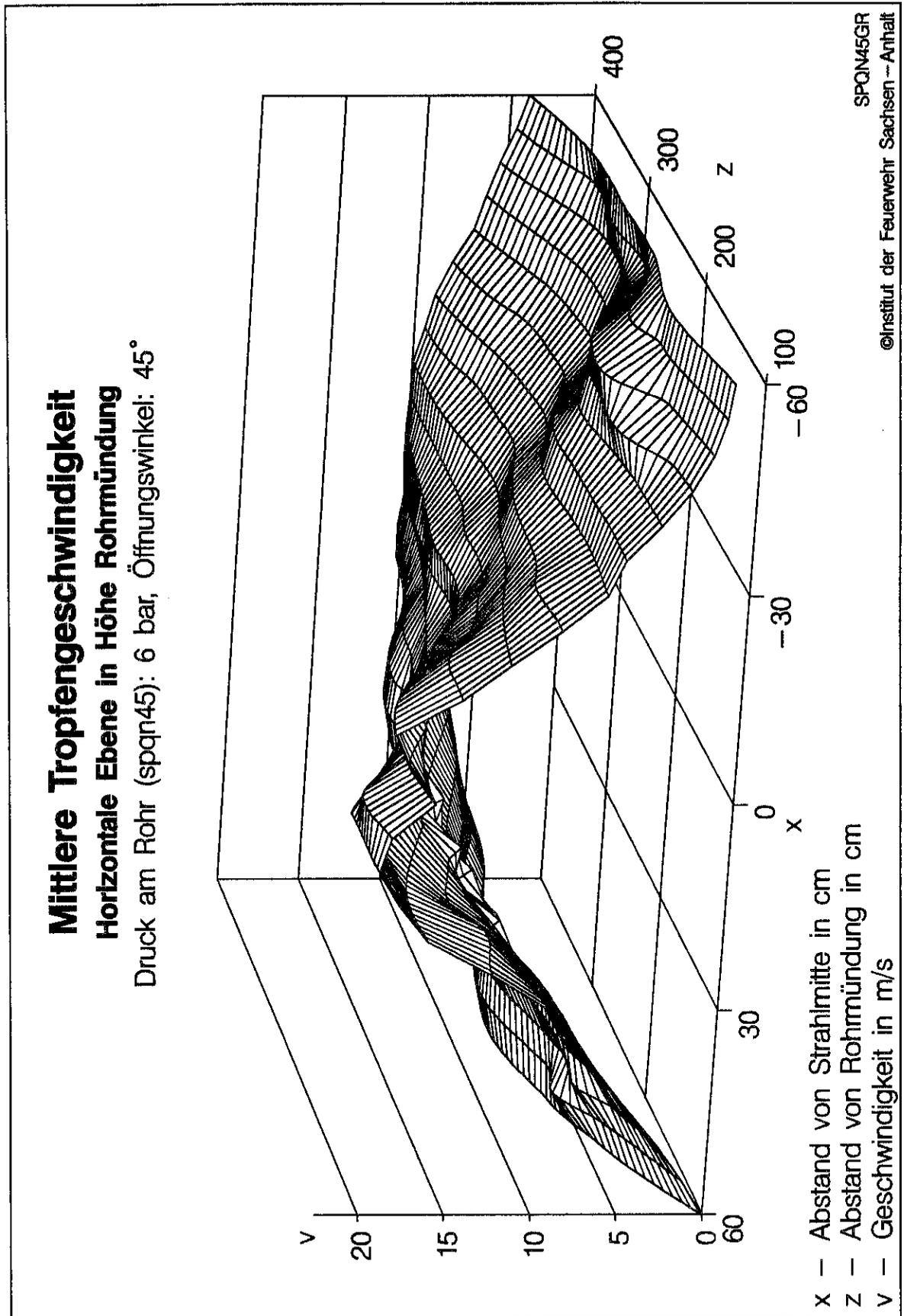
Bild 6.4a: Sprühstrahlrohr spqn45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)



**Bild 6.4b:** Sprühstrahlrohr spqn45 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.4c:** Sprühstrahlrohr spqn45 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)



**Bild 6.4d:** Sprühstrahlrohr spqn45 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)

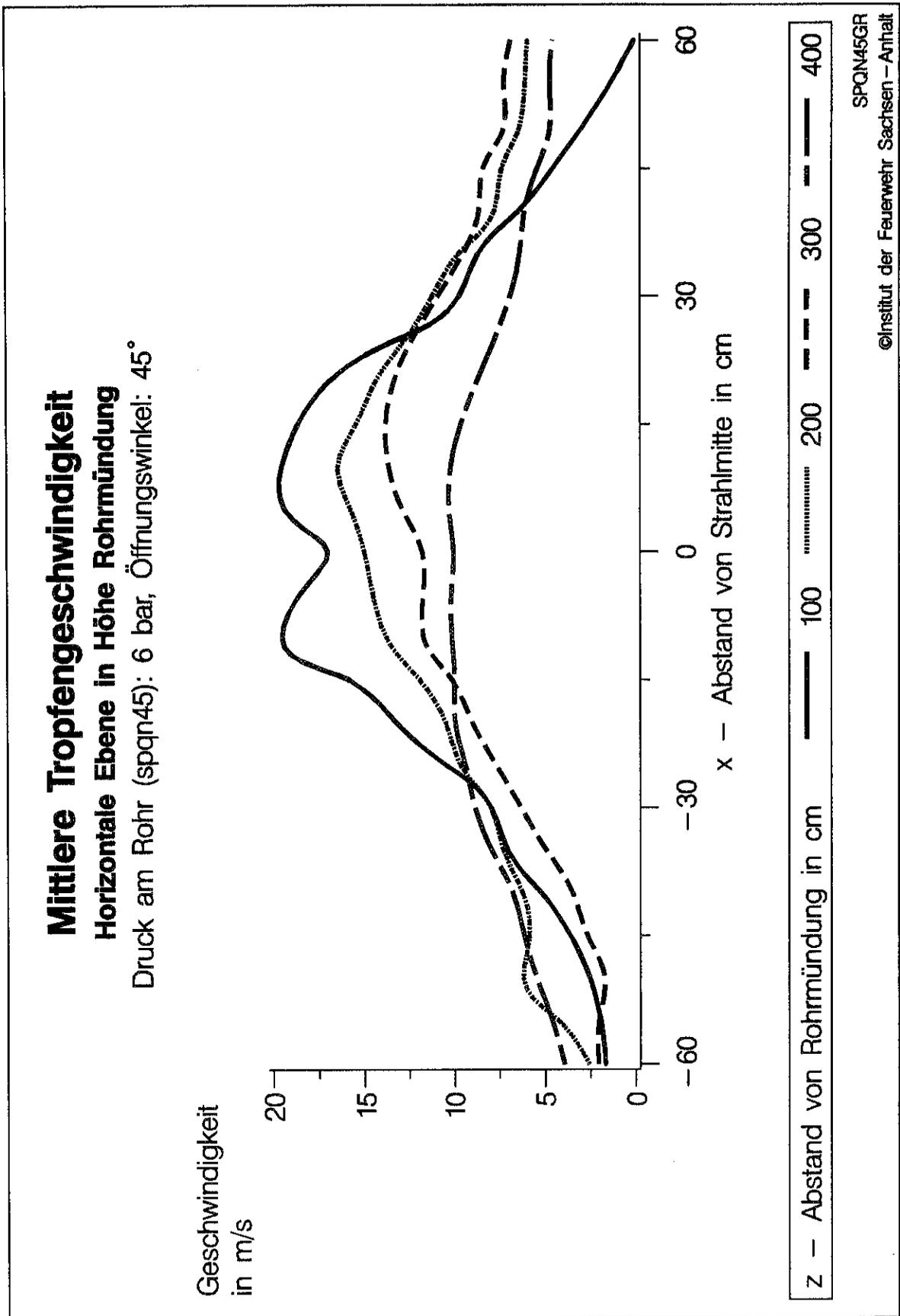
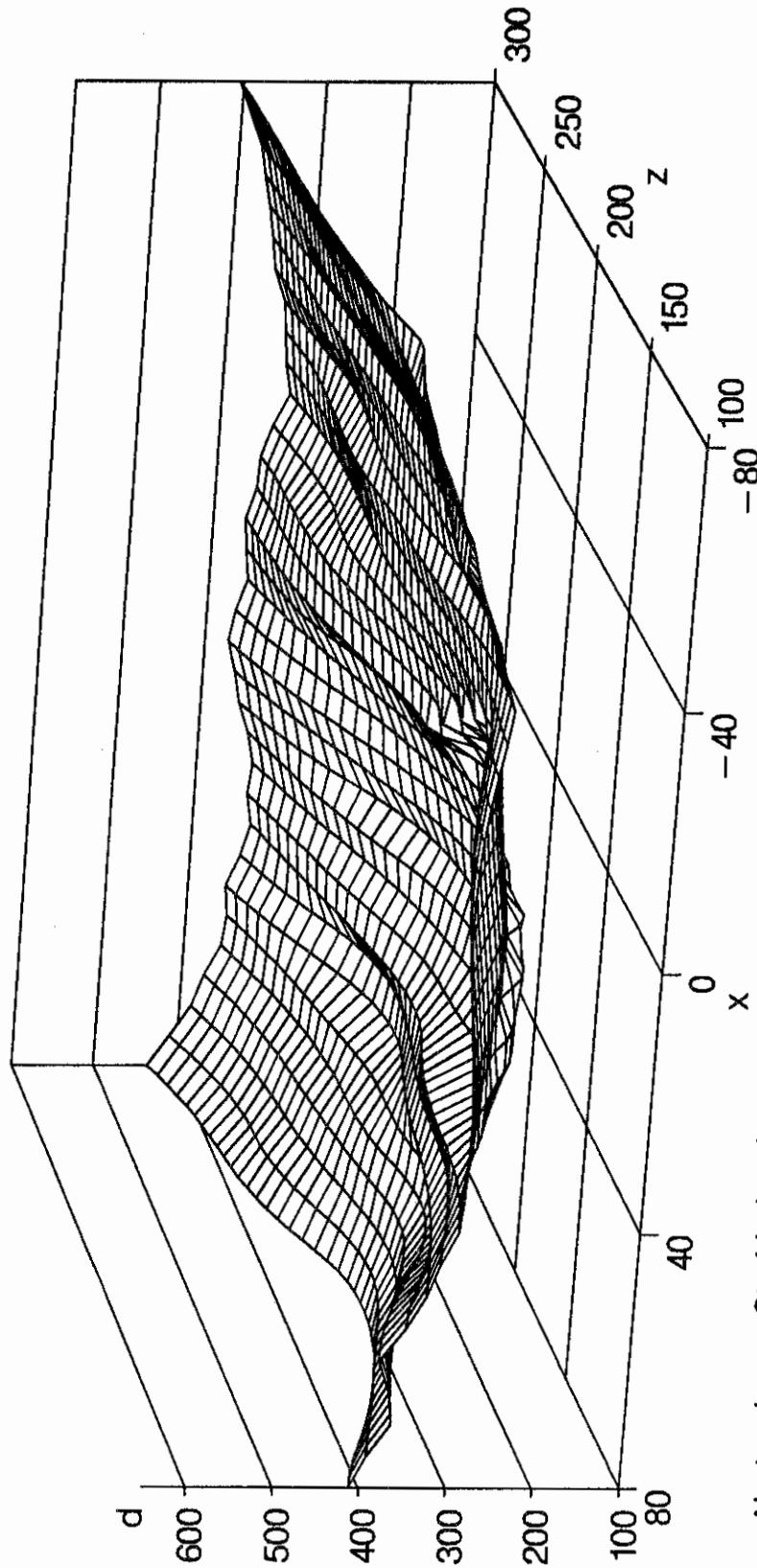


Bild 6.5a: Sprühstrahlrohr spqn90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)

### Mittlere Tropfendurchmesser

#### Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung

Druck am Rohr (spqn90): 6 bar, Öffnungswinkel: 90°

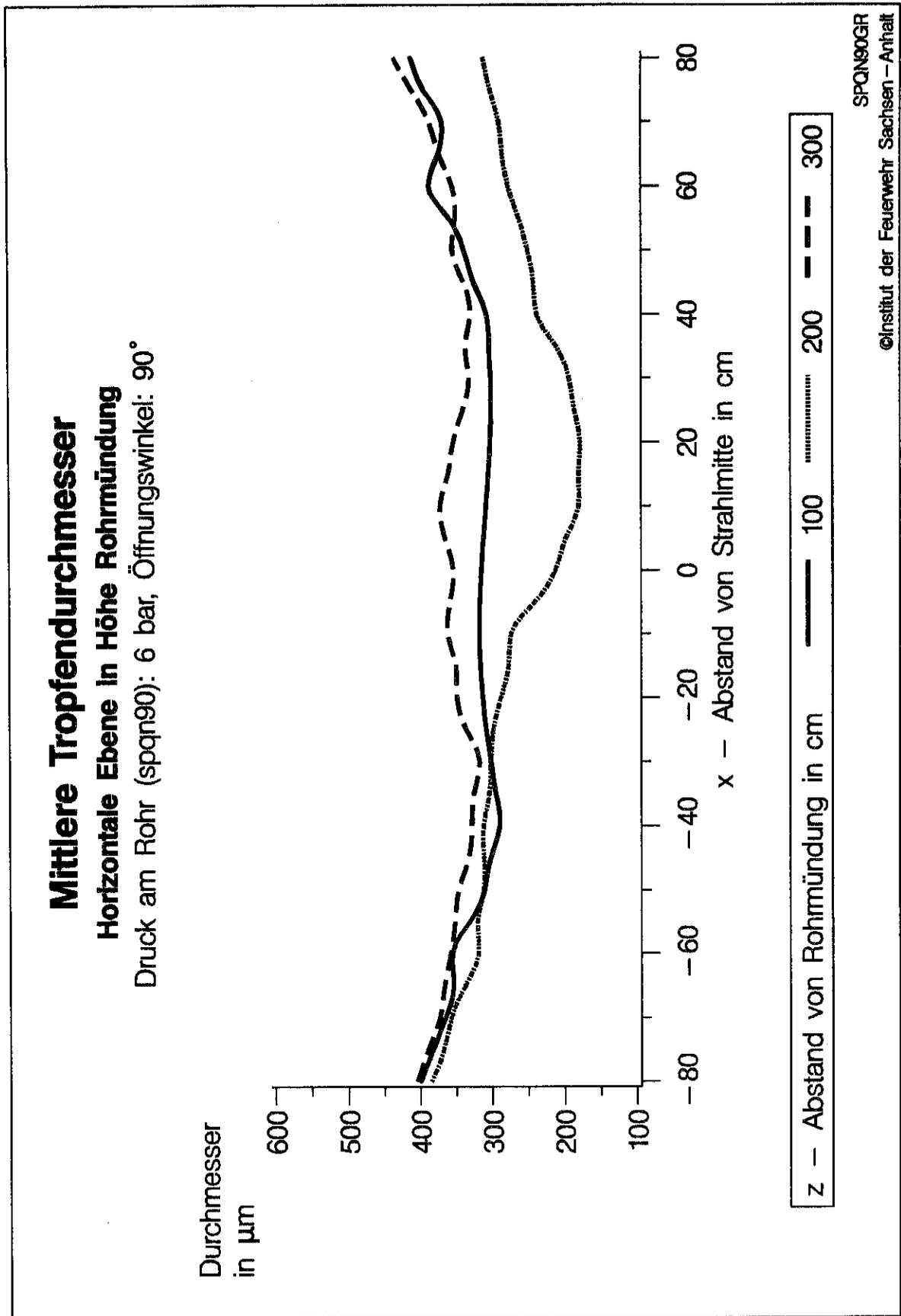


x – Abstand von Strahlmitte in cm

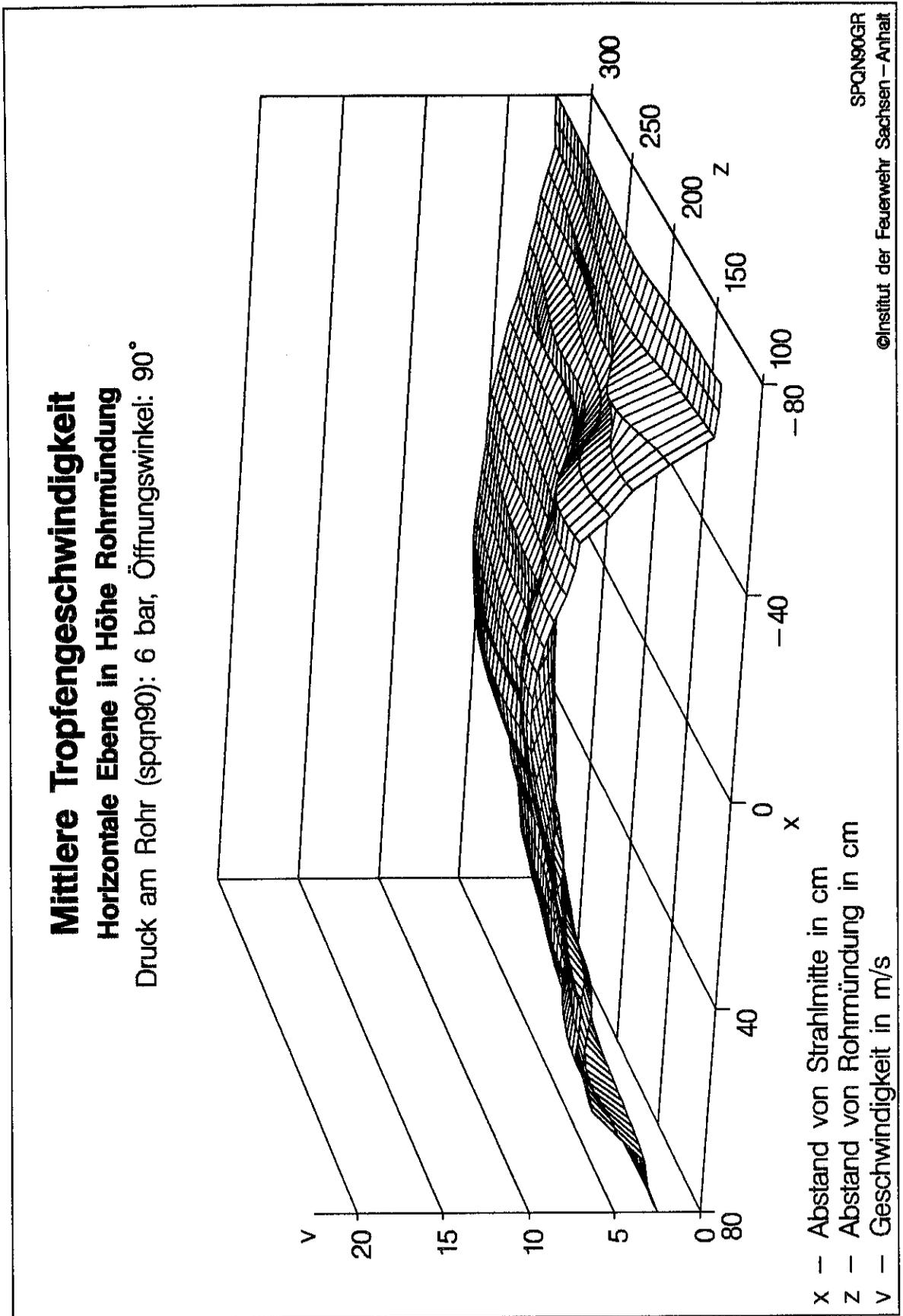
z – Abstand von Rohrmündung in cm

d – Durchmesser in  $\mu\text{m}$

**Bild 6.5b:** Sprühstrahlrohr spqn90 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.5c:** Sprühstrahlrohr spqn90 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)



**Bild 6.5d:** Sprühstrahlrohr spqn90 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)

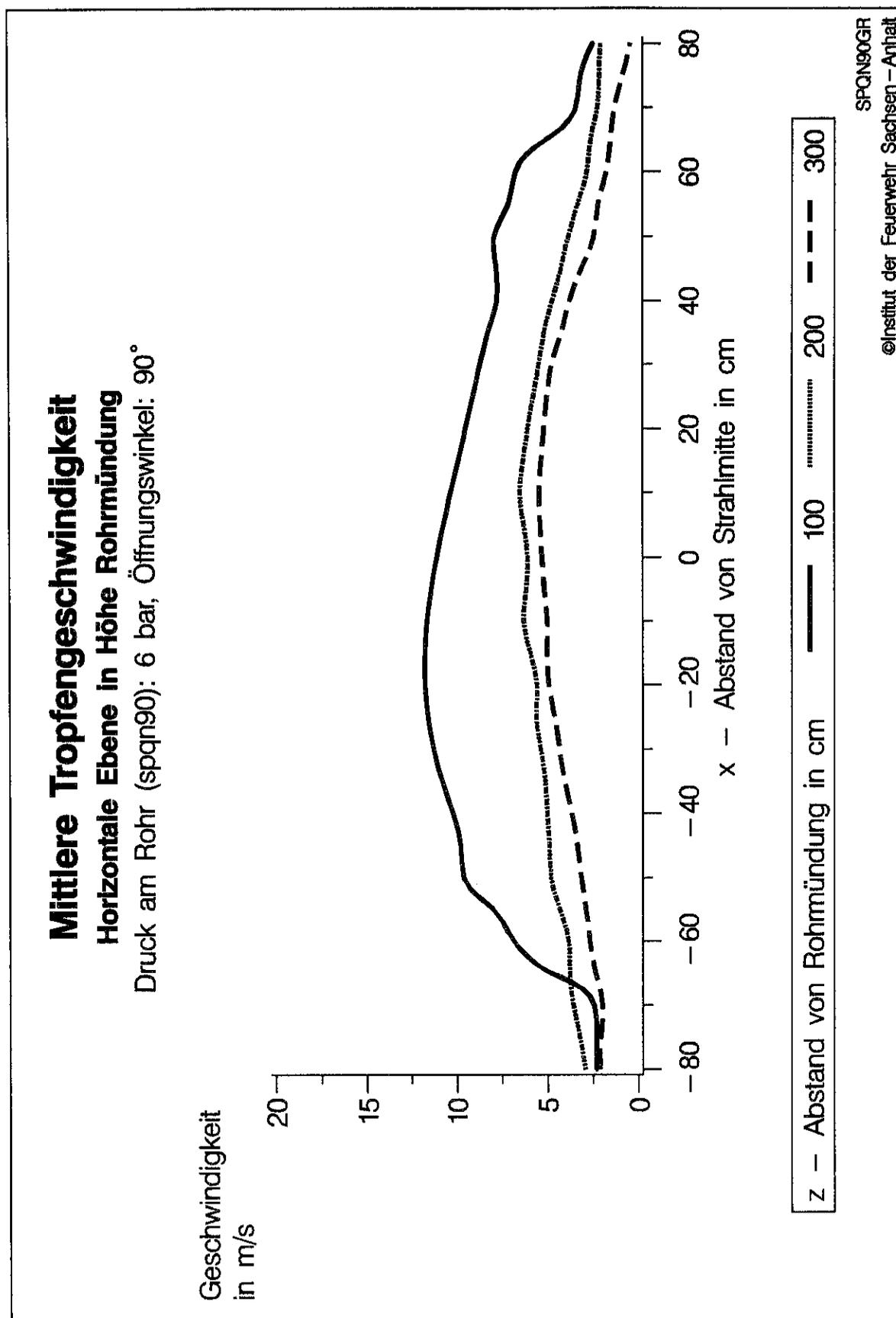
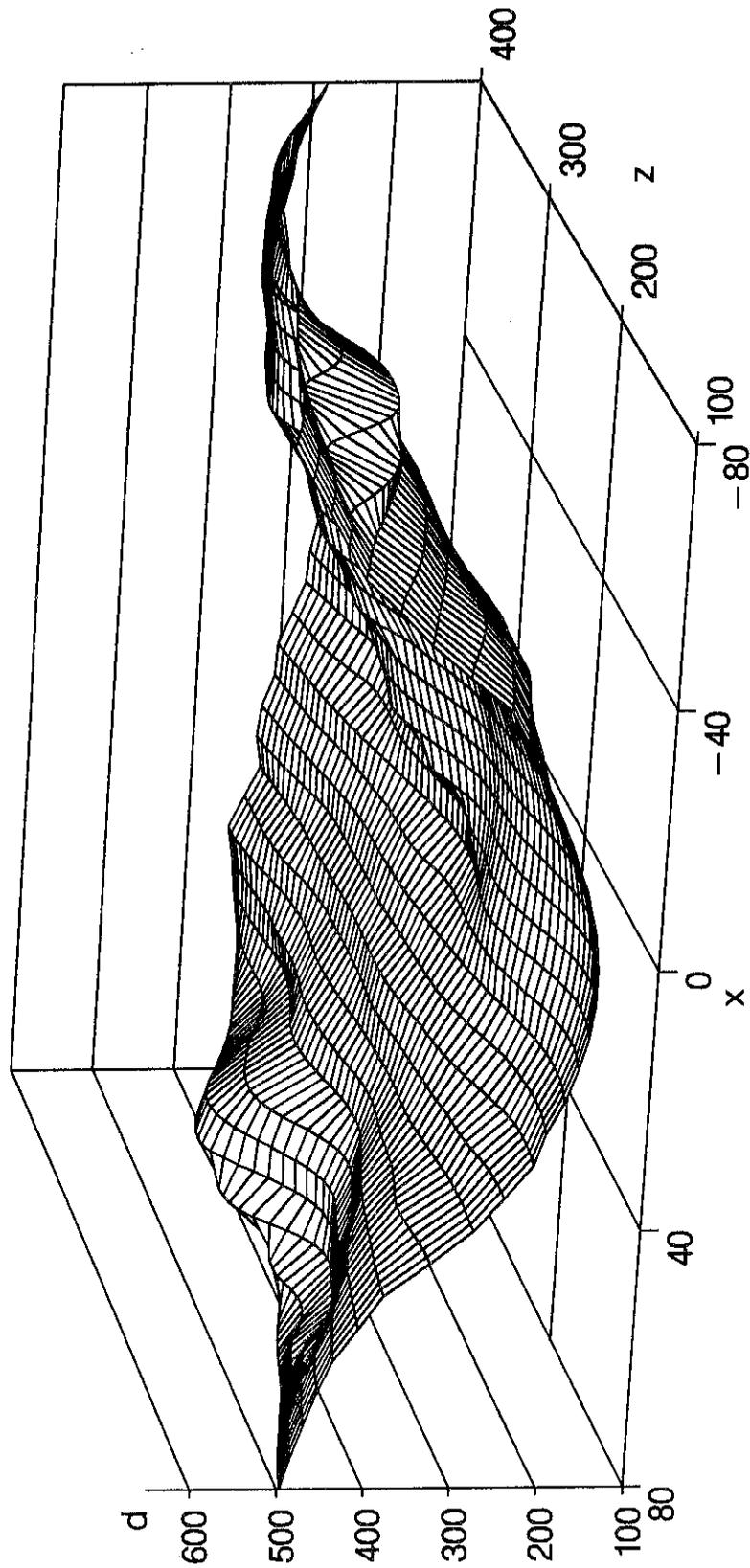


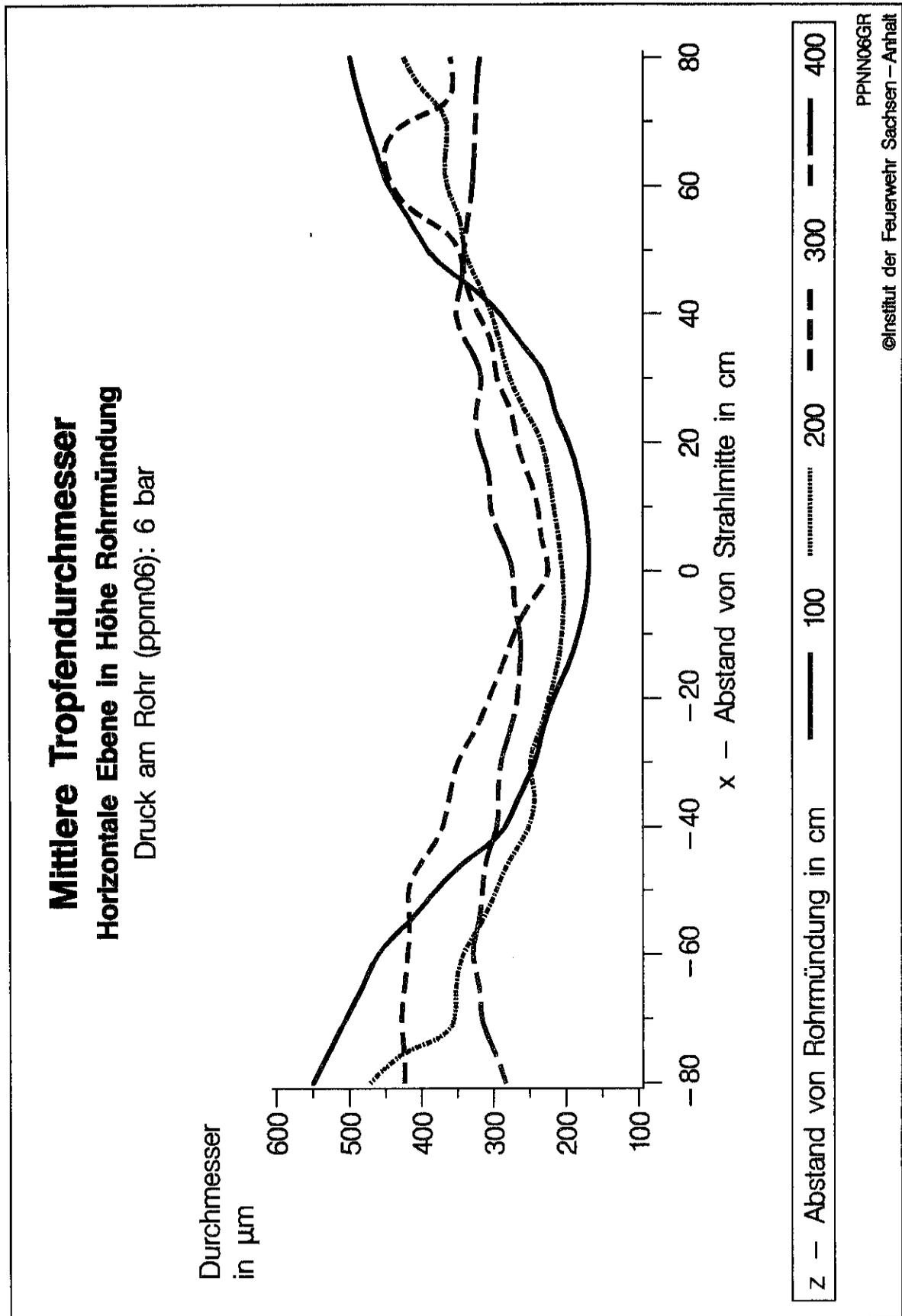
Bild 6.6a: Pistolenstrahlrohr ppnn06 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)

**Mittlere Tropfendurchmesser**  
**Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**  
Druck am Rohr (ppnn06): 6 bar



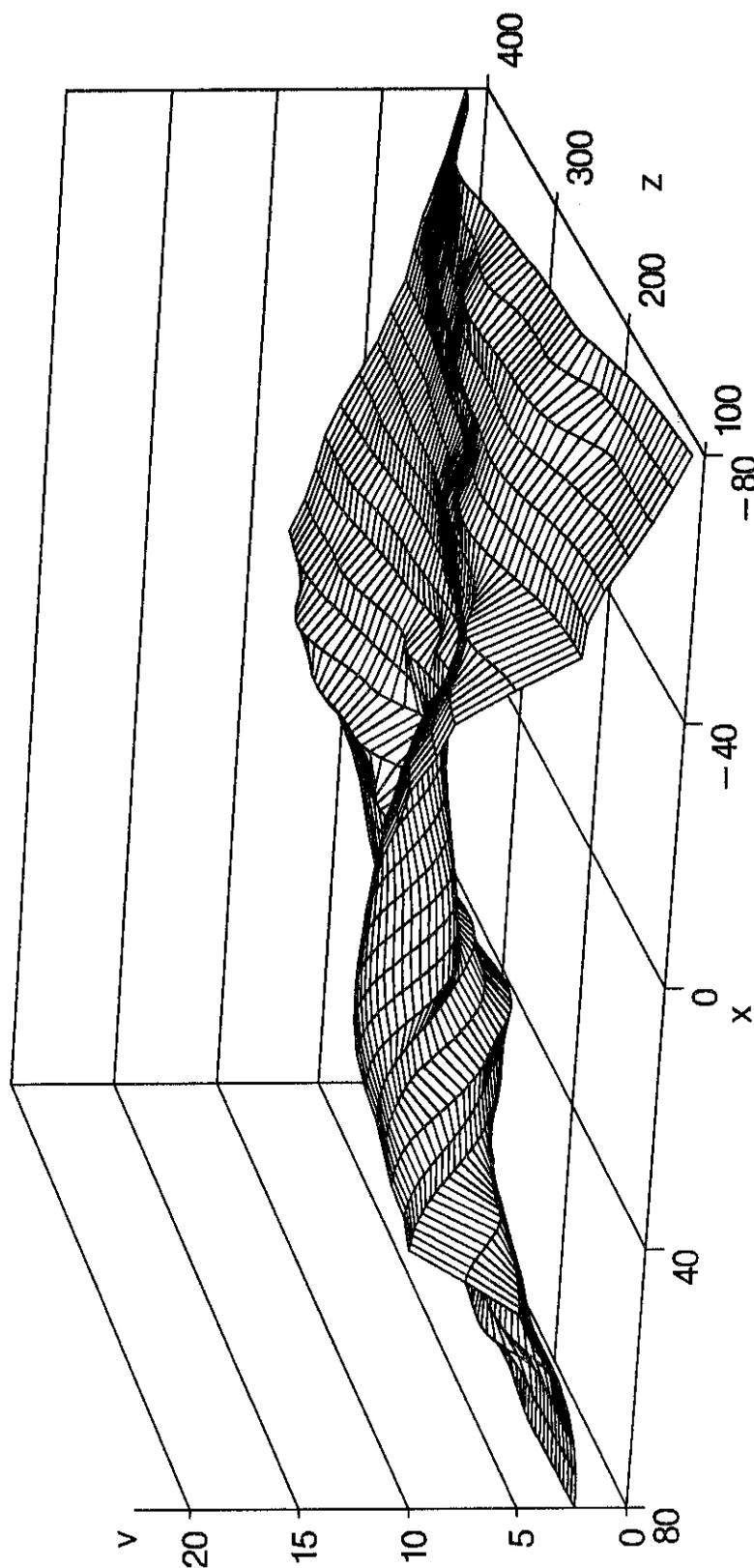
x – Abstand von Strahlmitte in cm  
z – Abstand von Rohrmündung in cm  
d – Durchmesser in  $\mu\text{m}$

**Bild 6.6b:** Pistolenstrahlrohr ppnn06 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.6c:** Pistolenstrahlrohr ppnn06 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)

**Mittlere Tropfengeschwindigkeit**  
**Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**  
 Druck am Rohr (ppnn06): 6 bar



- x – Abstand von Strahlmitte in cm
- z – Abstand von Rohrmündung in cm
- v – Geschwindigkeit in m/s

**Bild 6.6d:** Pistolenstrahlrohr ppnn06 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)

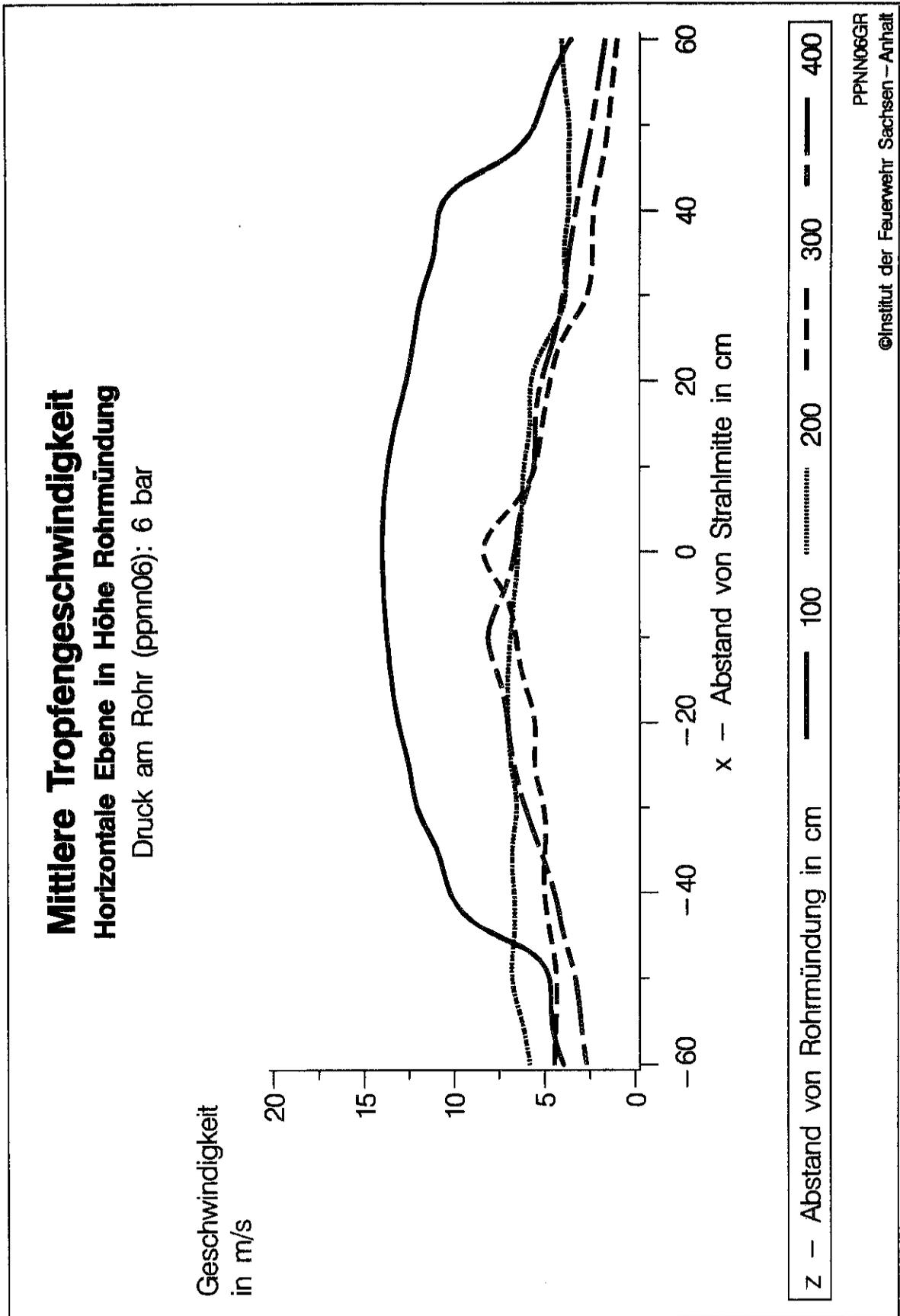
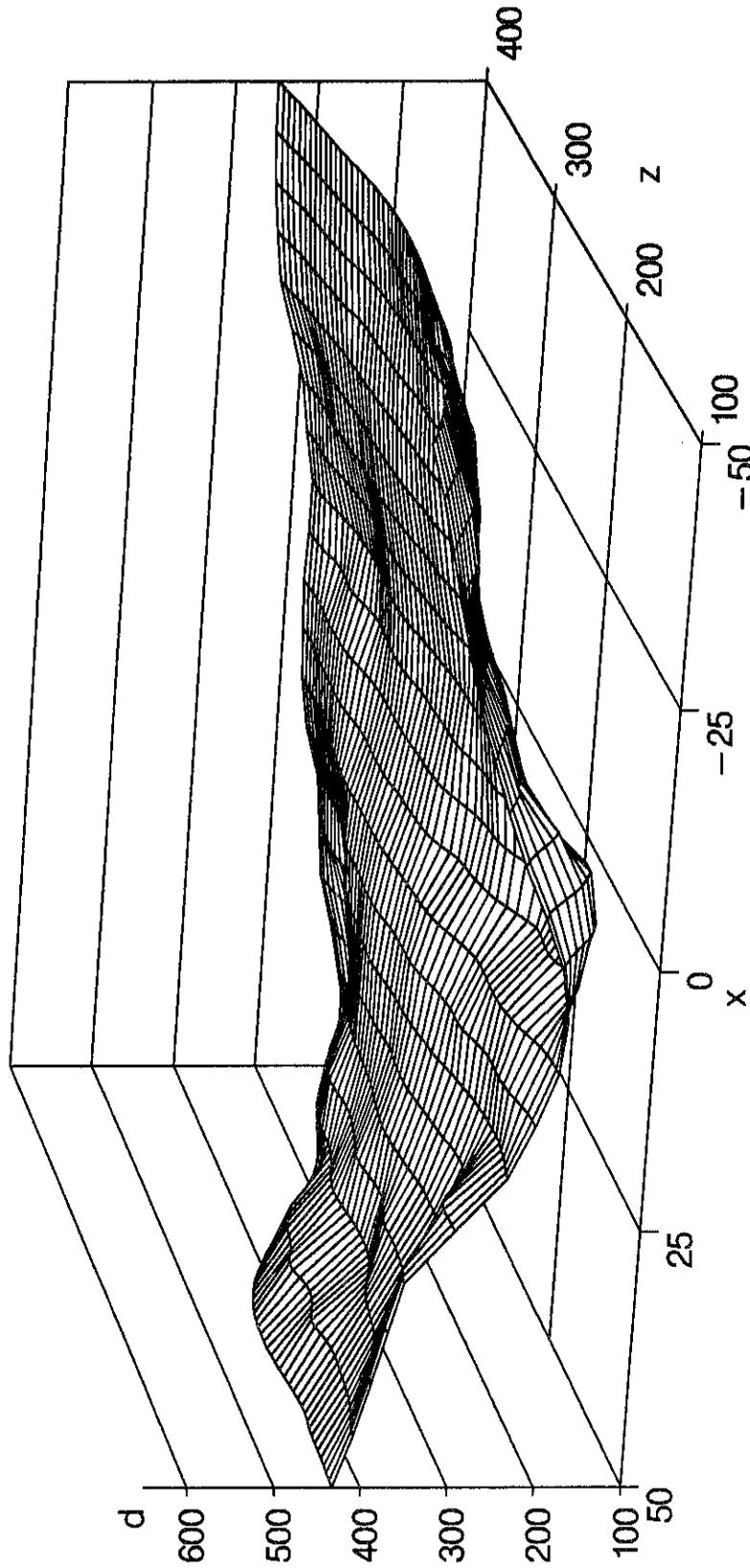


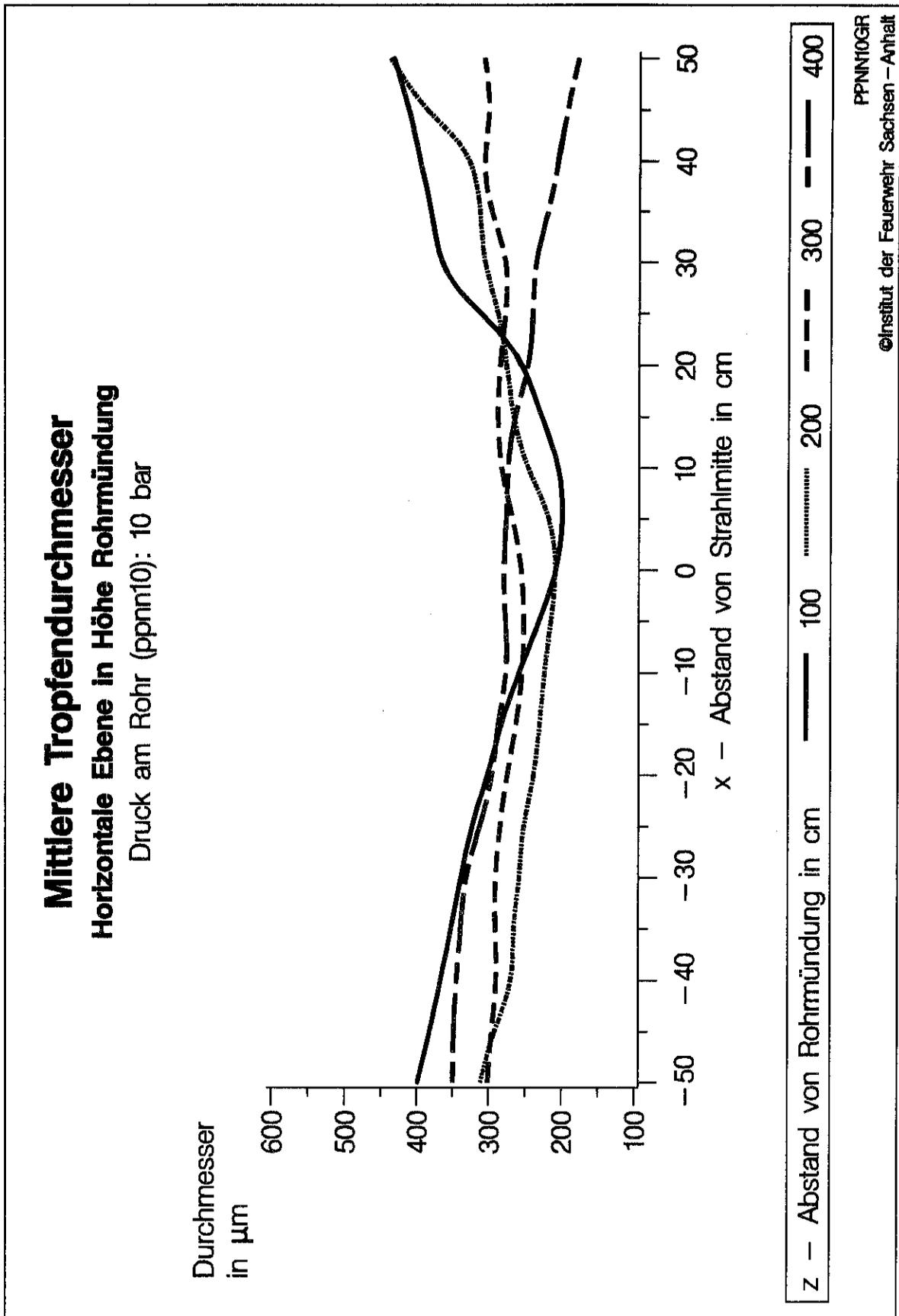
Bild 6.7a: Pistolenstrahlrohr ppnn10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)

**Mittlere Tropfendurchmesser**  
**Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**  
Druck am Rohr (ppnn10): 10 bar



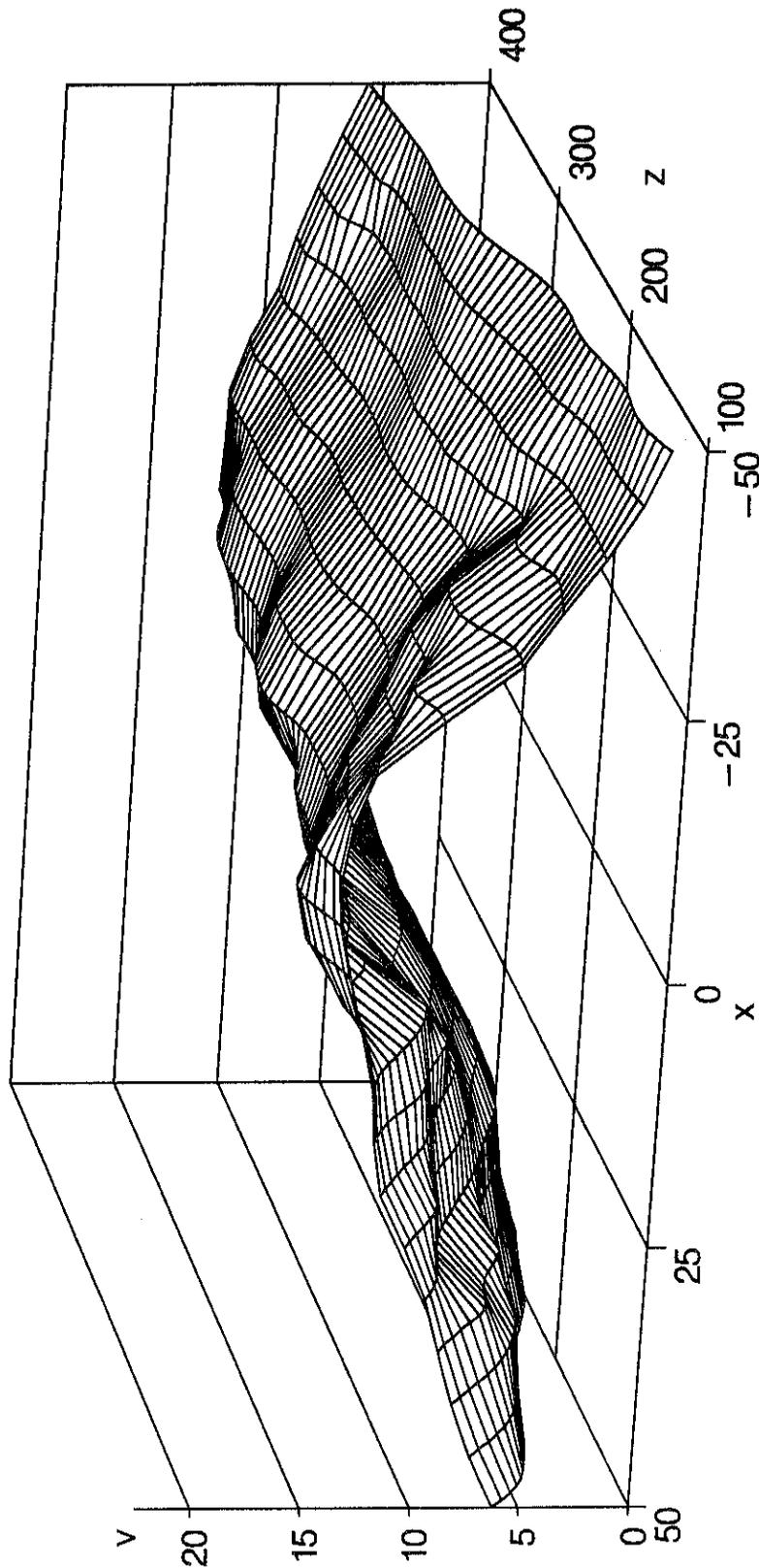
- x – Abstand von Strahlmitte in cm
- z – Abstand von Rohrmündung in cm
- d – Durchmesser in  $\mu\text{m}$

**Bild 6.7b:** Pistolenstrahlrohr ppnn10 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.7c:** Pistolenstrahlrohr ppnn10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)

**Mittlere Tropfengeschwindigkeit  
Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**  
Druck am Rohr (ppnn10): 10 bar



- x — Abstand von Strahlmitte in cm
- z — Abstand von Rohrmündung in cm
- v — Geschwindigkeit in m/s

Bild 6.7d: Pistolenstrahlrohr ppnn10 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)

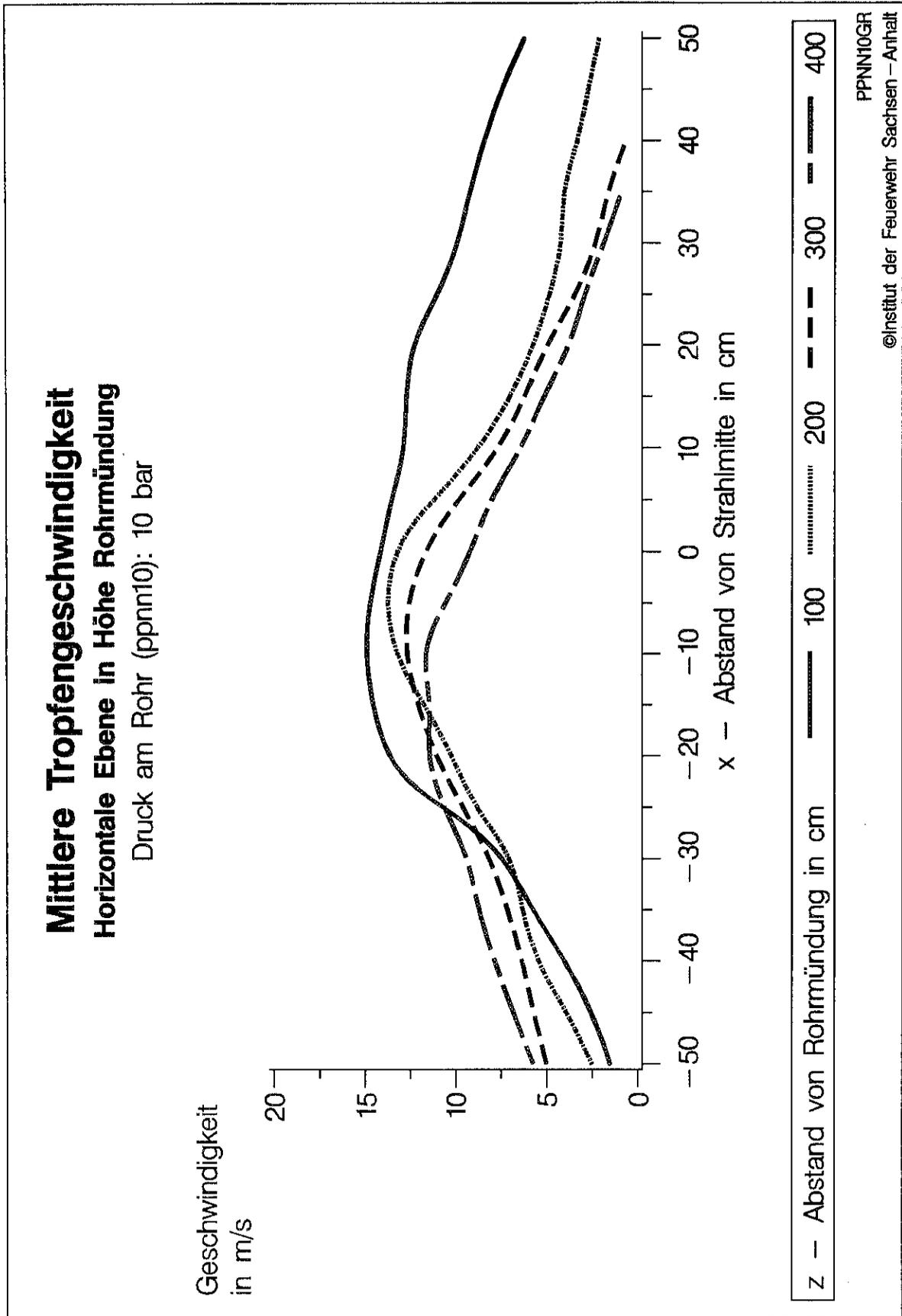
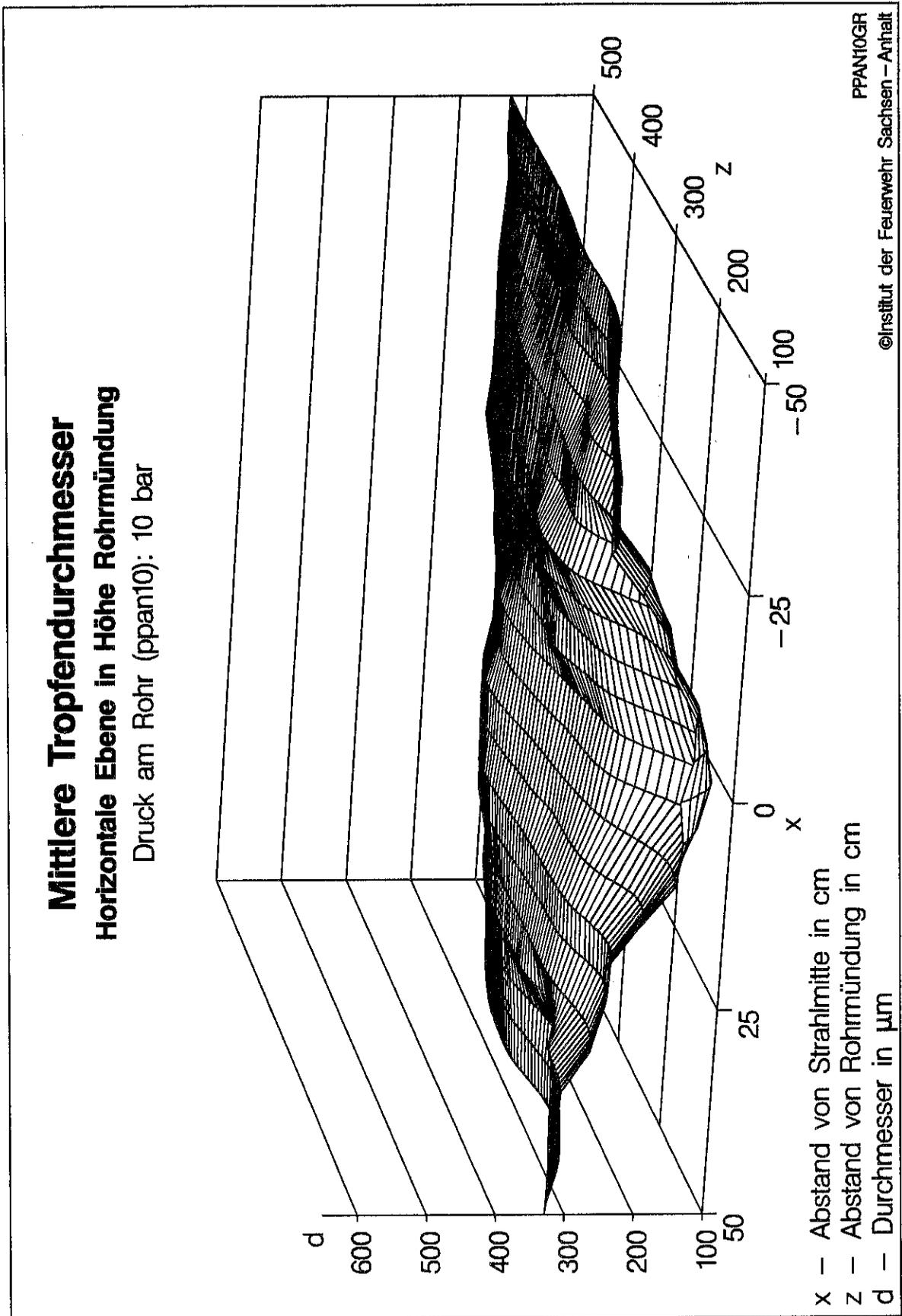
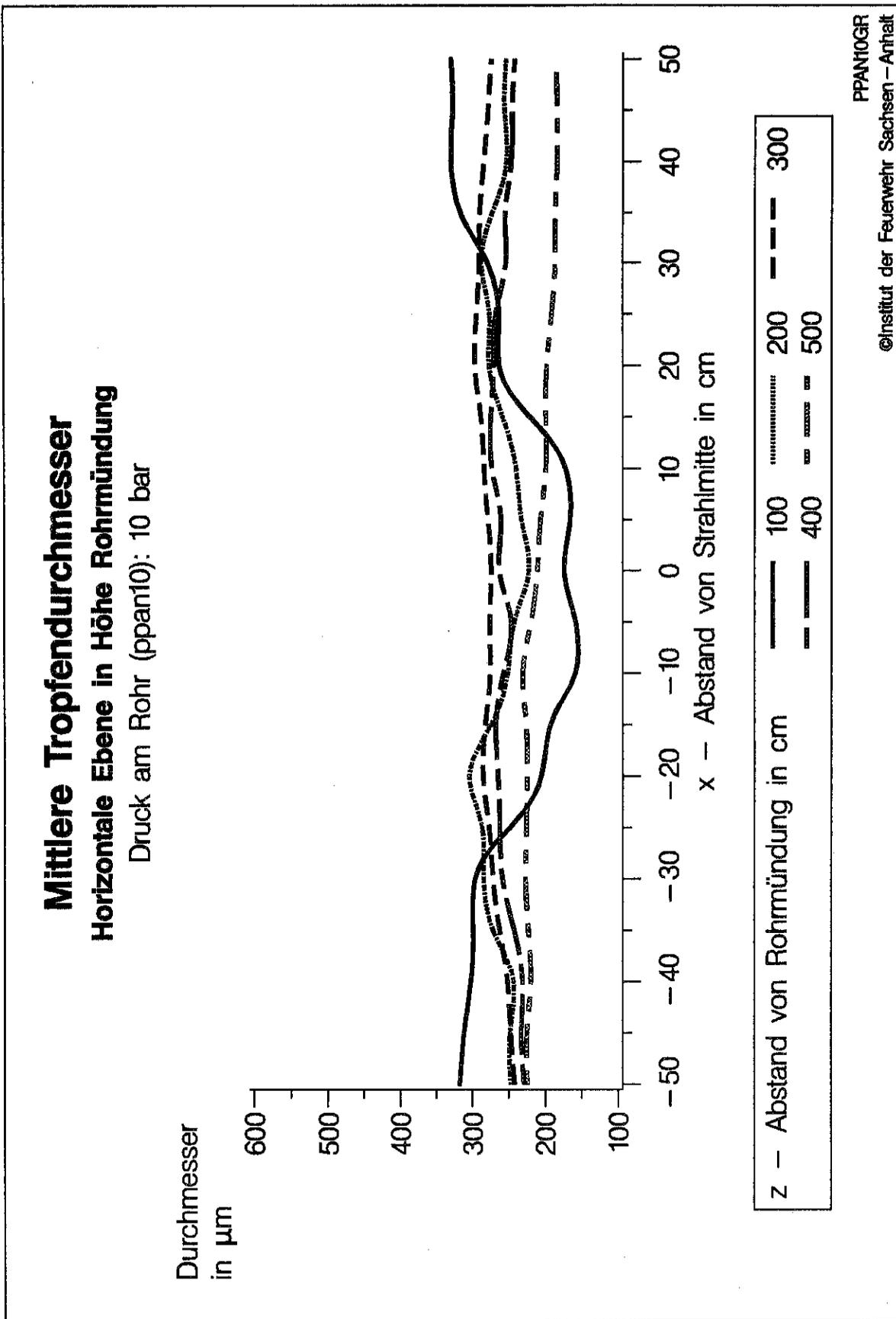


Bild 6.8a: Pistolenstrahlrohr ppan10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)



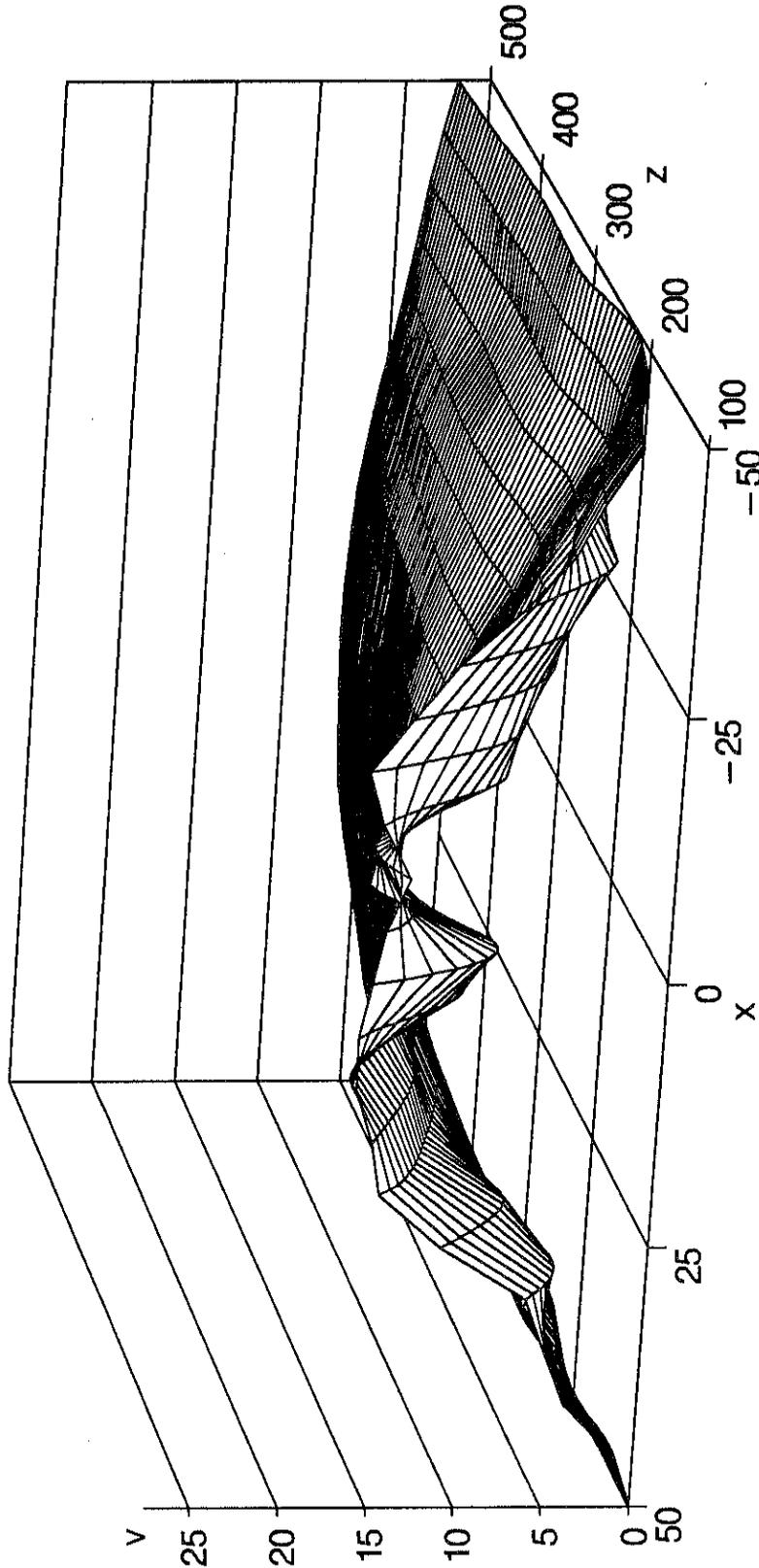
**Bild 6.8b:** Pistolenstrahlrohr ppan10 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.8c:** Pistolenstrahlrohr ppan10 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)

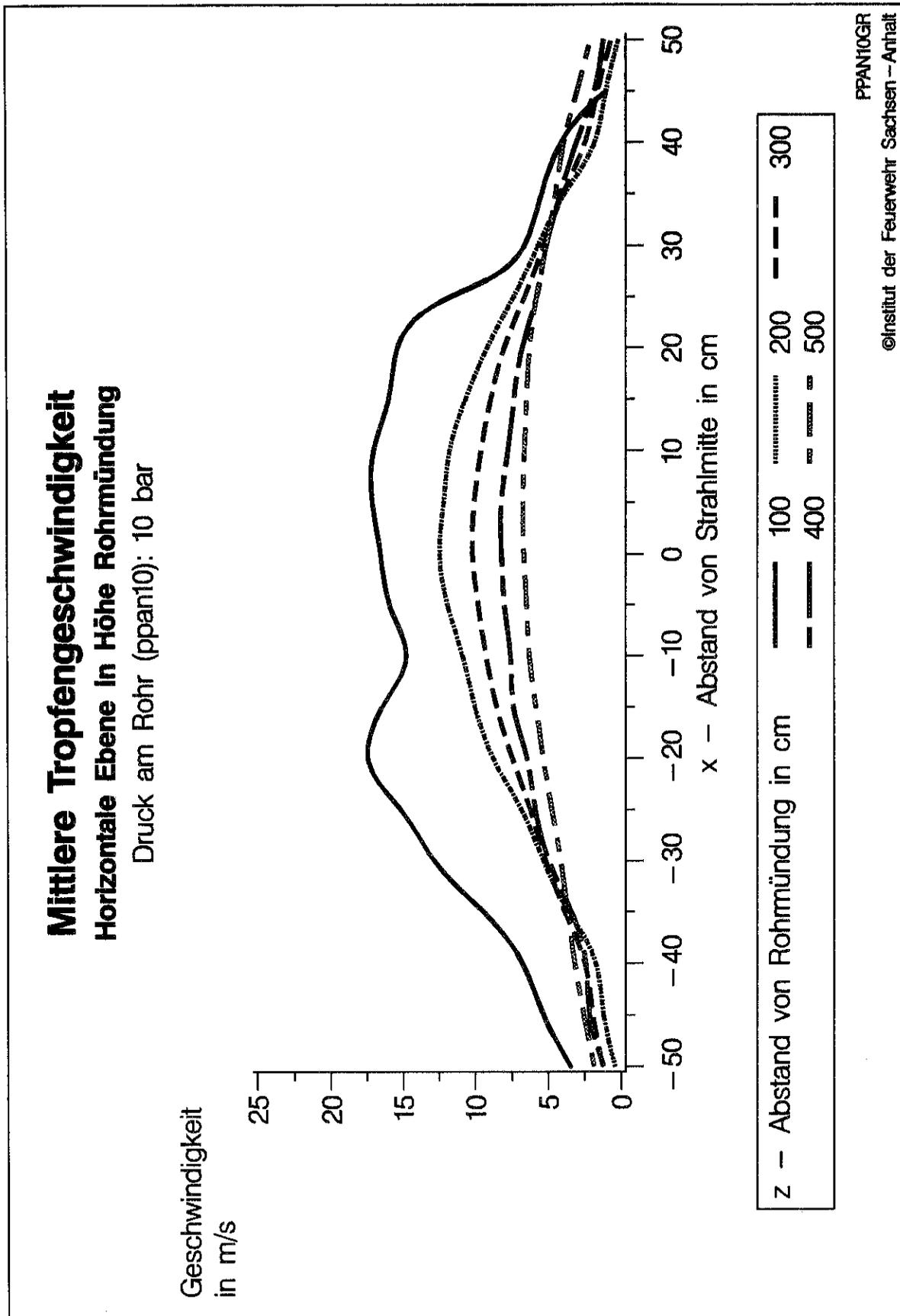
**Mittlere Tropfengeschwindigkeit  
Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**

Druck am Rohr (ppan10): 10 bar

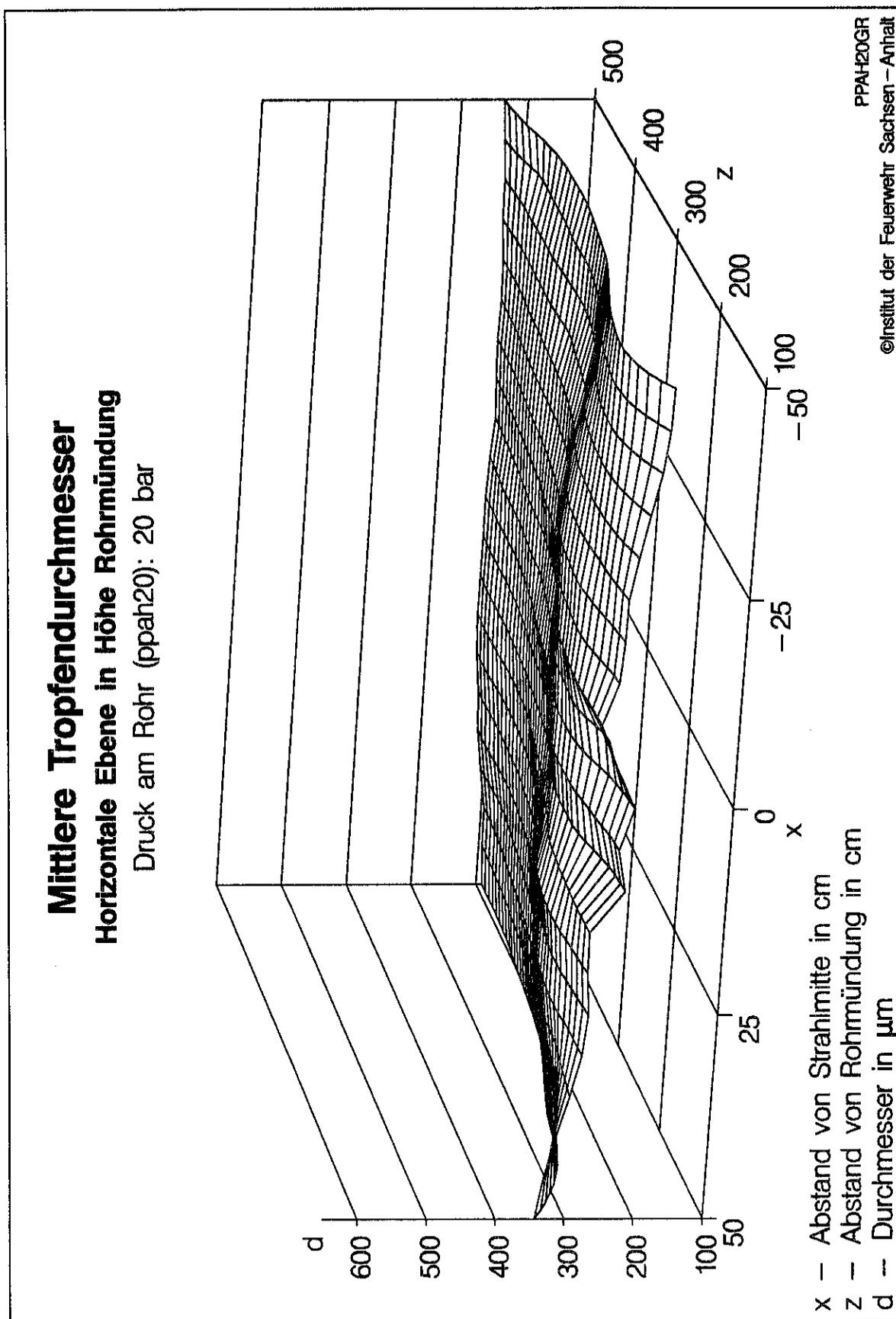


- x — Abstand von Strahlmitte in cm
- z — Abstand von Rohrmündung in cm
- v — Geschwindigkeit in m/s

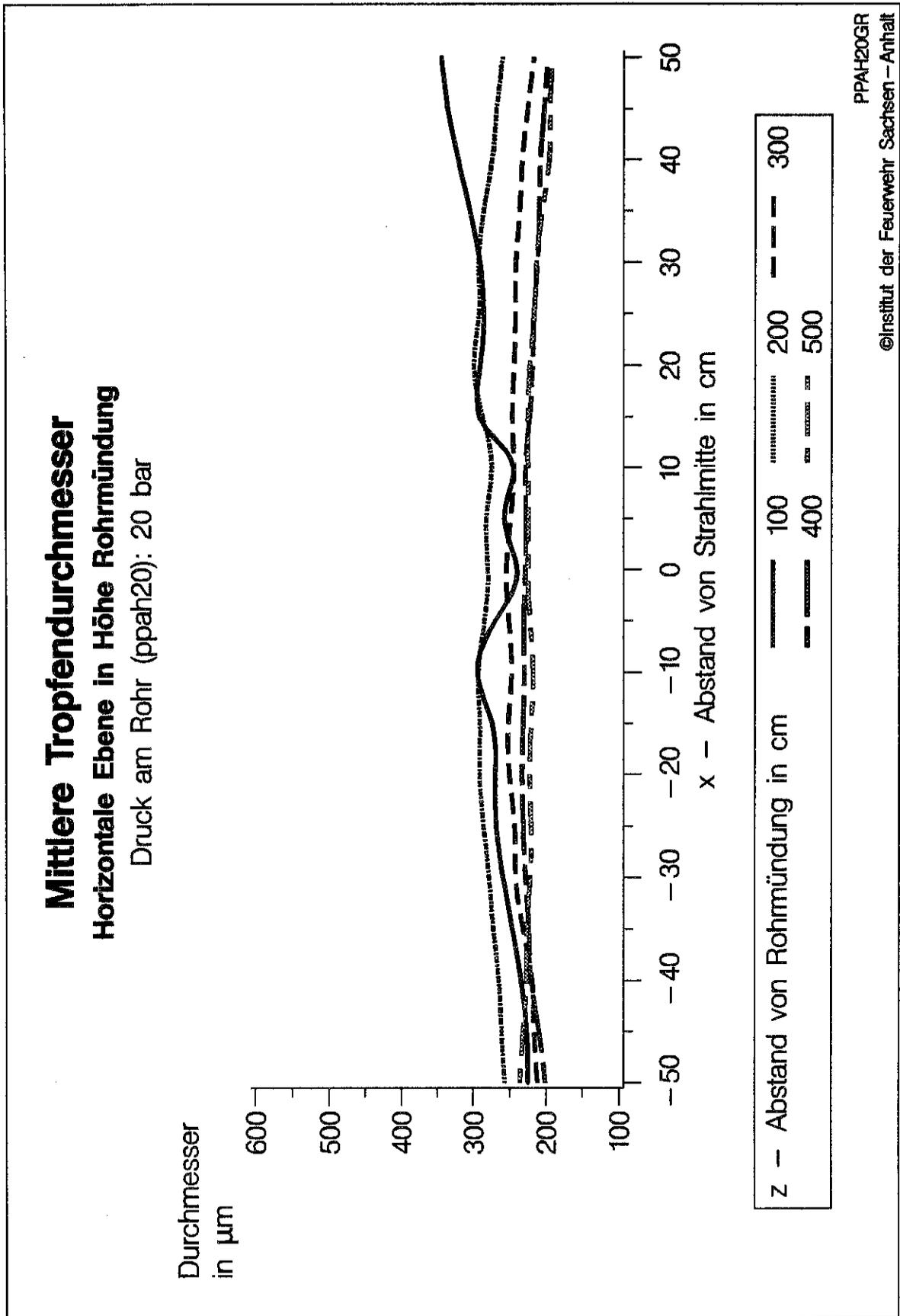
**Bild 6.8d:** Pistolenstrahlrohr ppan10 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.9a:** Pistolenstrahlrohr ppah20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)



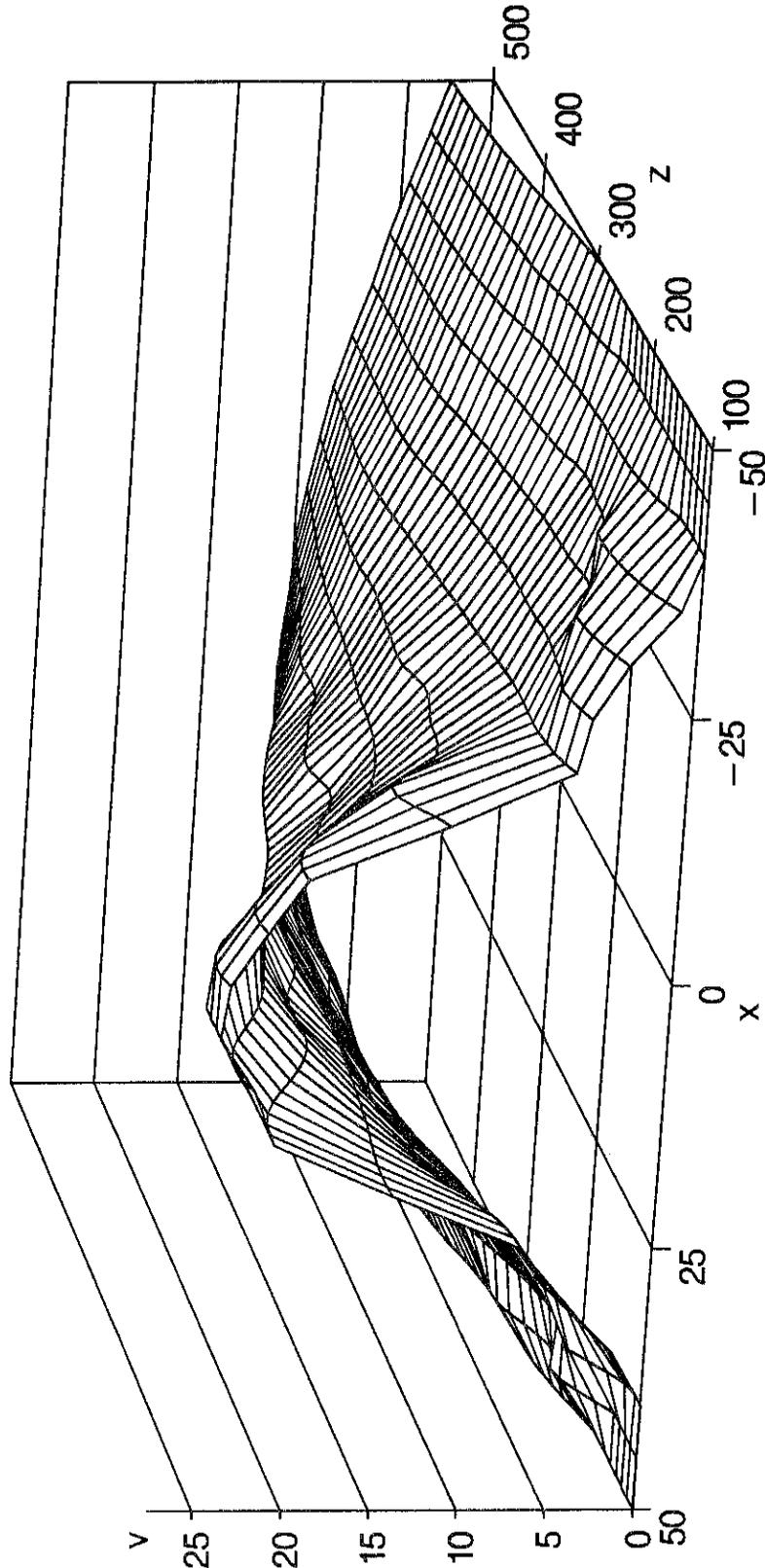
**Bild 6.9b:** Pistolenstrahlrohr ppah20 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.9c:** Pistolenstrahlrohr ppah20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)

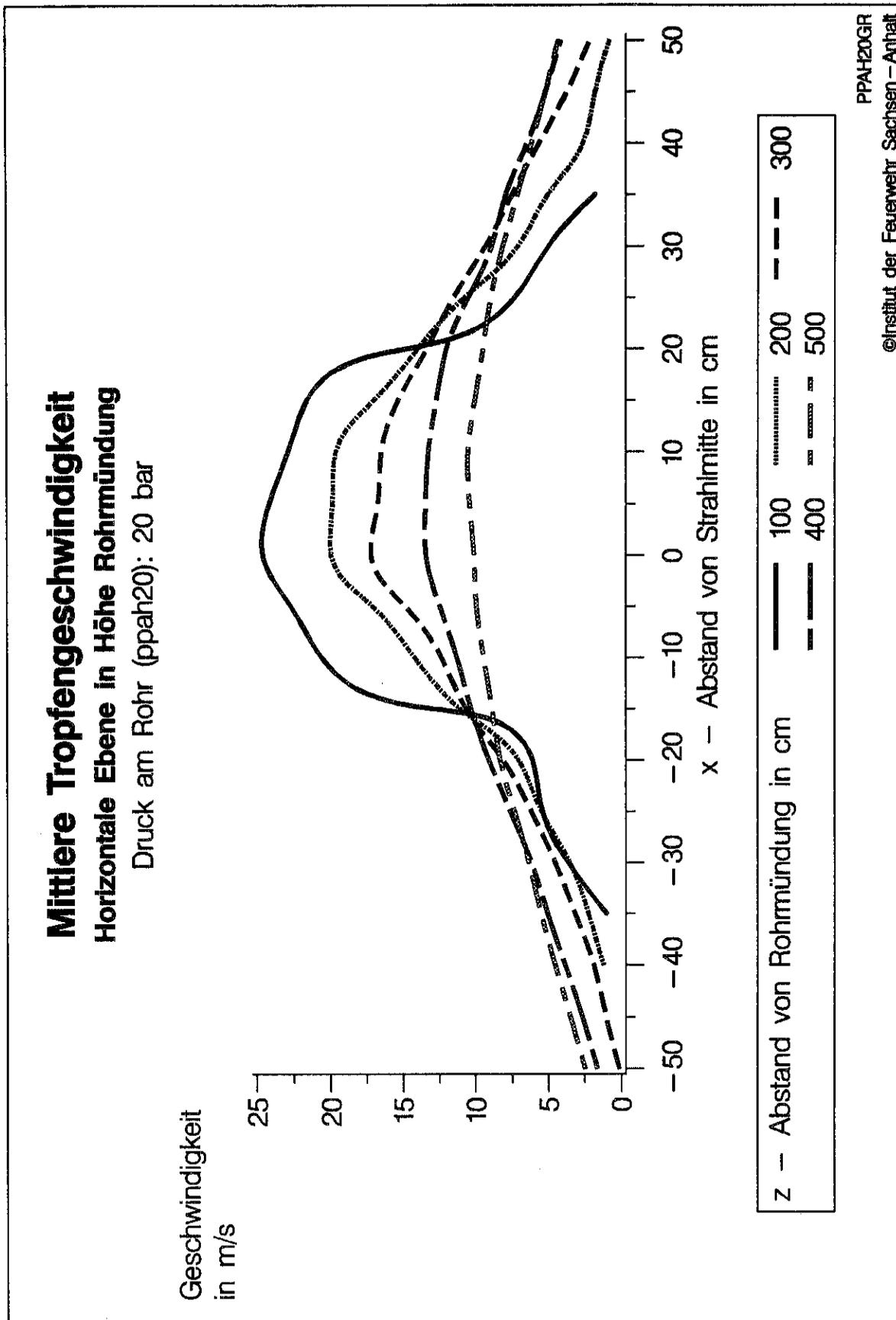
**Mittlere Tropfengeschwindigkeit  
Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**

Druck am Rohr (ppah20): 20 bar



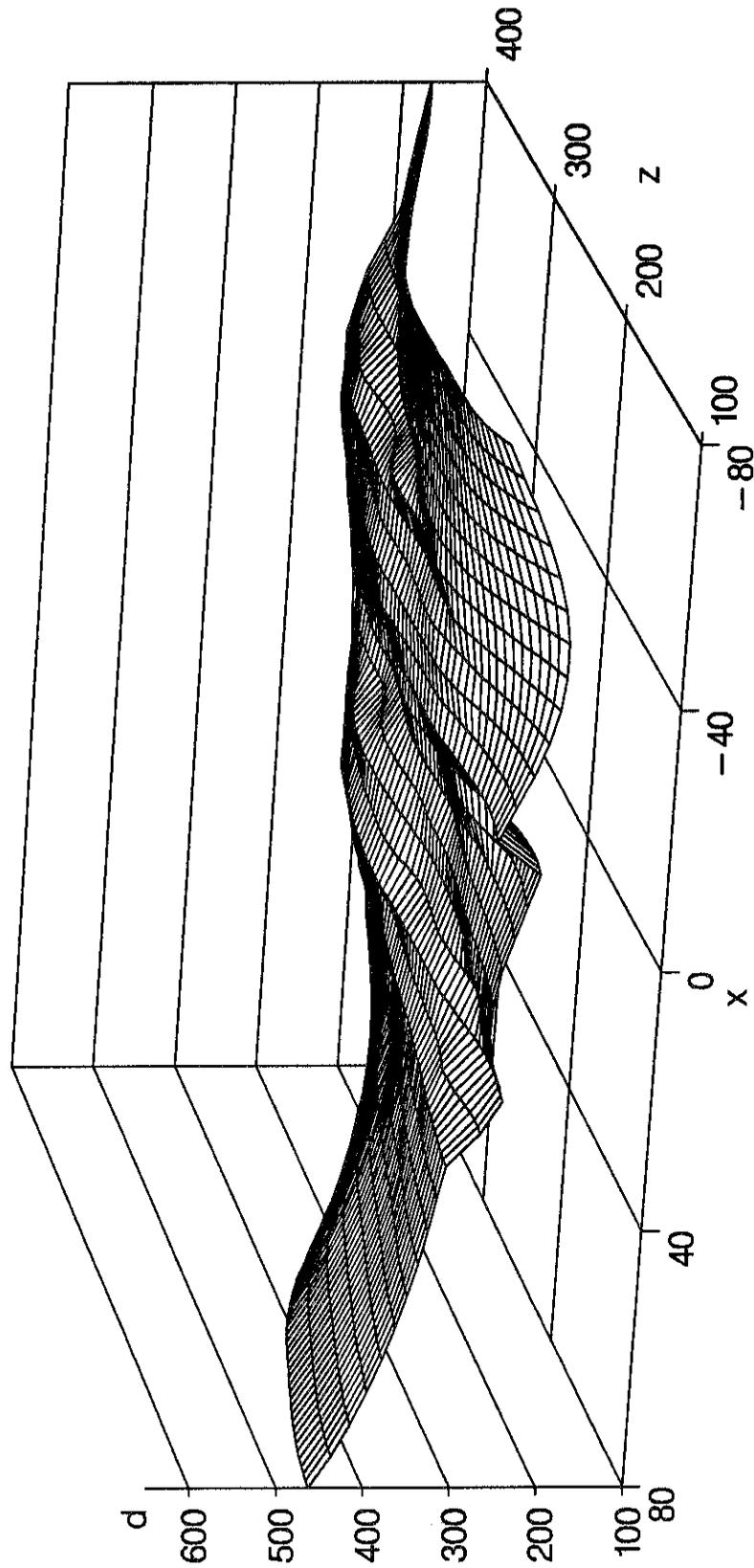
- x – Abstand von Strahlmitte in cm
- z – Abstand von Rohrmündung in cm
- v – Geschwindigkeit in m/s

**Bild 6.9d:** Pistolenstrahlrohr ppah20 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



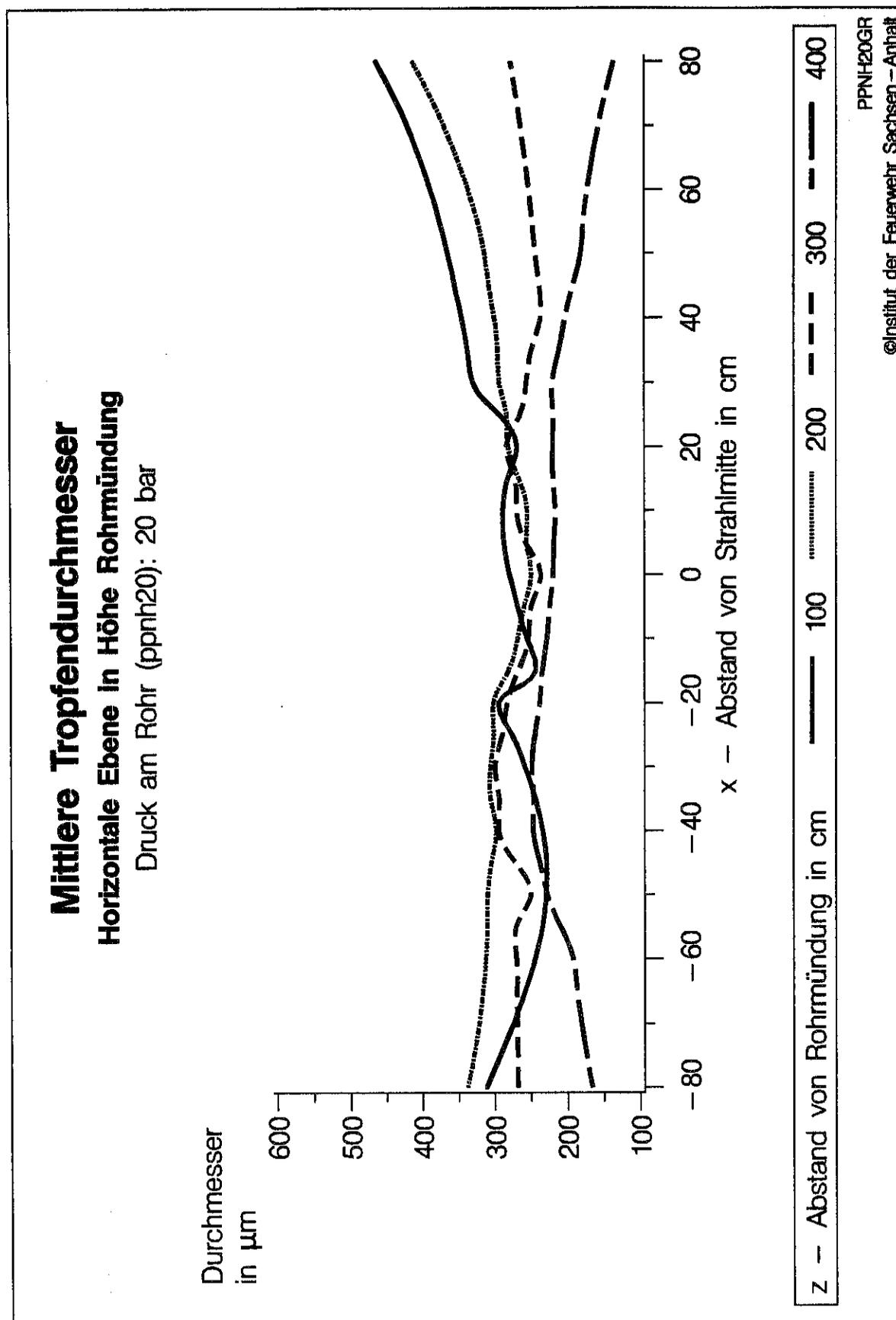
**Bild 6.10a:** Pistolenstrahlrohr ppnh20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)

**Mittlere Tropfendurchmesser**  
**Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**  
Druck am Rohr (ppnh20): 20 bar



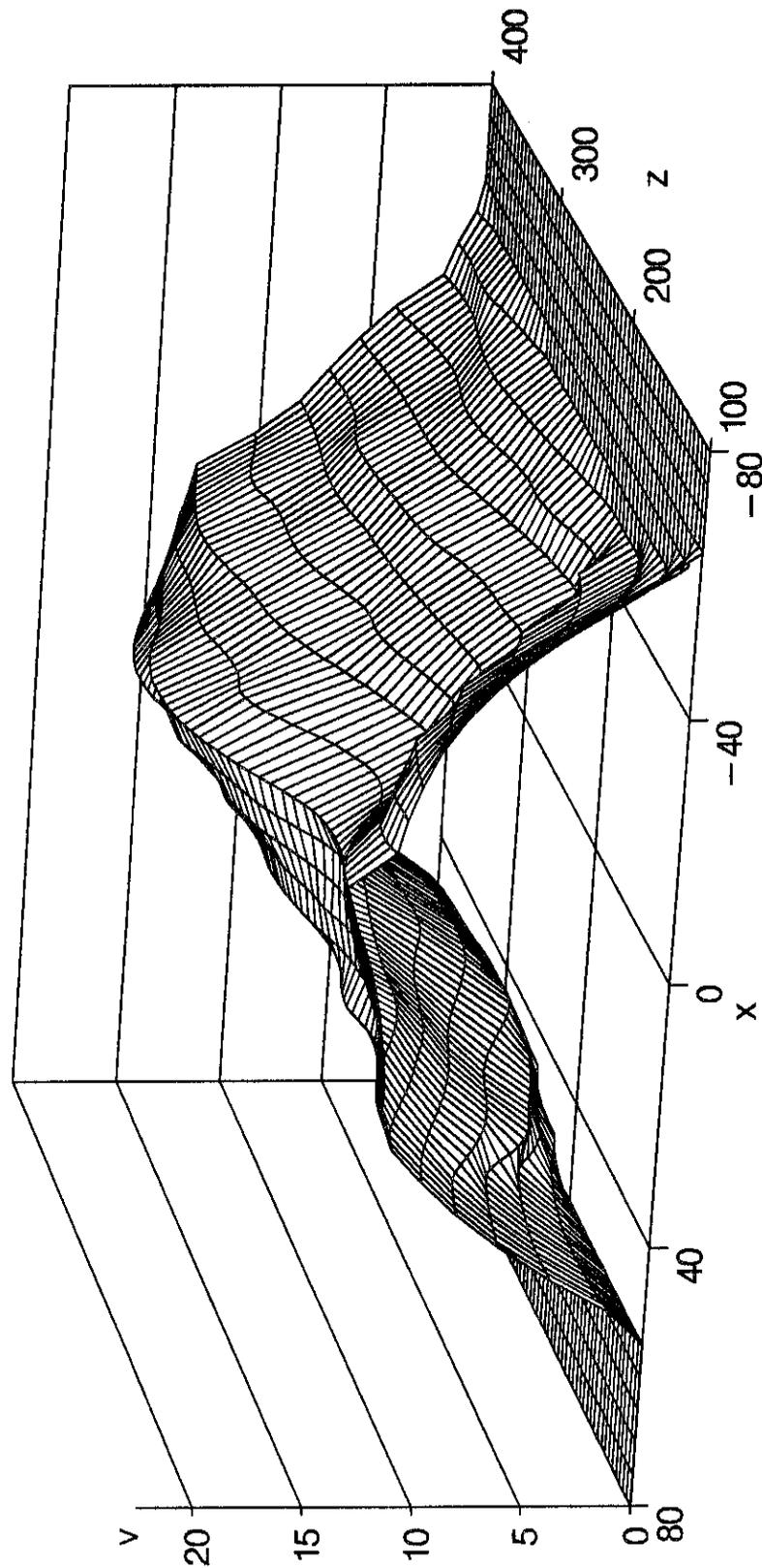
- x – Abstand von Strahlmitte in cm
- z – Abstand von Rohrmündung in cm
- d – Durchmesser in  $\mu\text{m}$

**Bild 6.10b:** Pistolenstrahlrohr ppnh20 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.10c:** Pistolenstrahlrohr ppnh20 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)

**Mittlere Tropfengeschwindigkeit**  
**Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**  
 Druck am Rohr (ppnh20): 20 bar



- x – Abstand von Strahlmitte in cm
- z – Abstand von Rohrmündung in cm
- v – Geschwindigkeit in m/s

PPNH20GR  
 ©Institut der Feuerwehr Sachsen – Anhalt

**Bild 6.10d:** Pistolenstrahlrohr pph20 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)

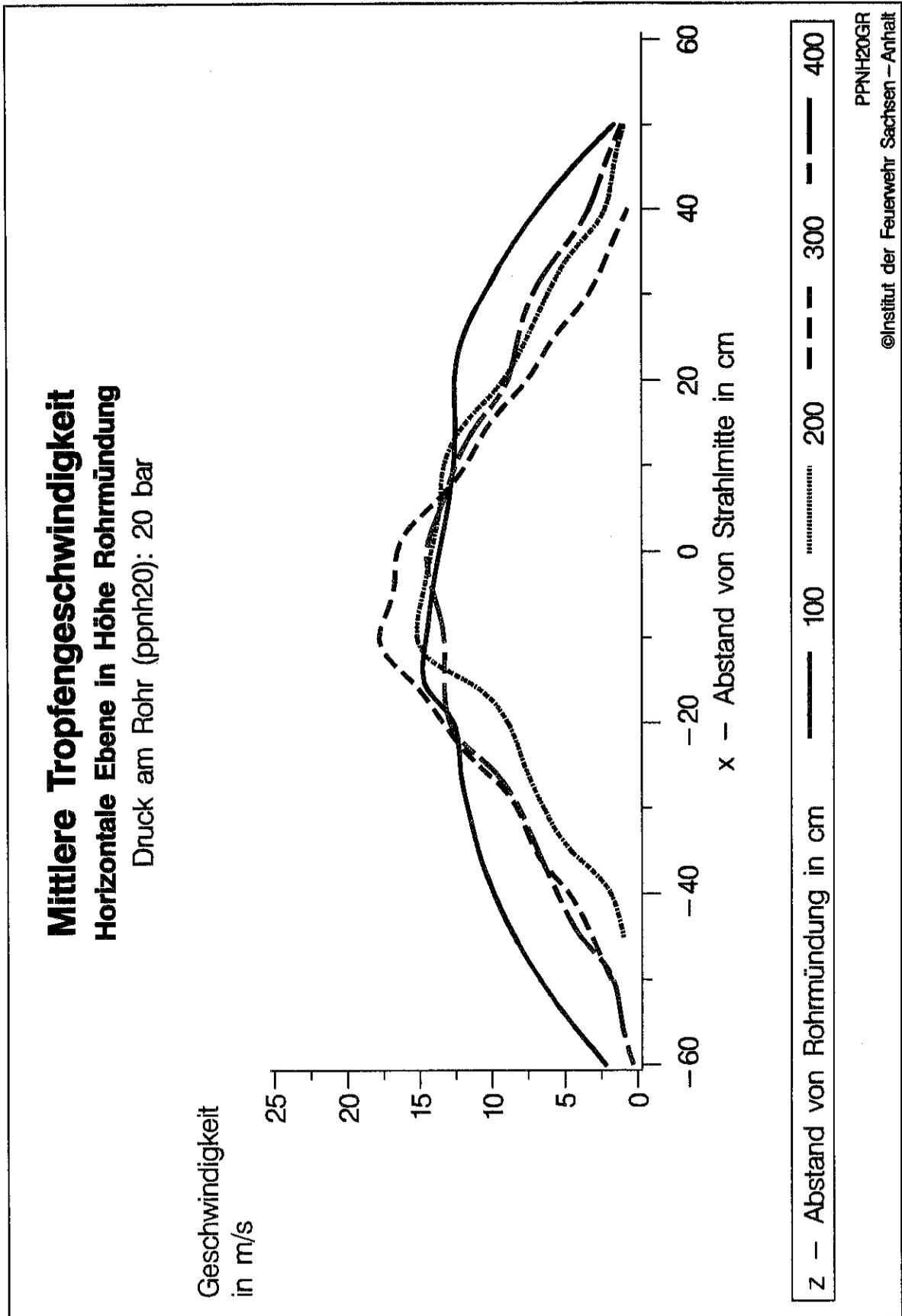
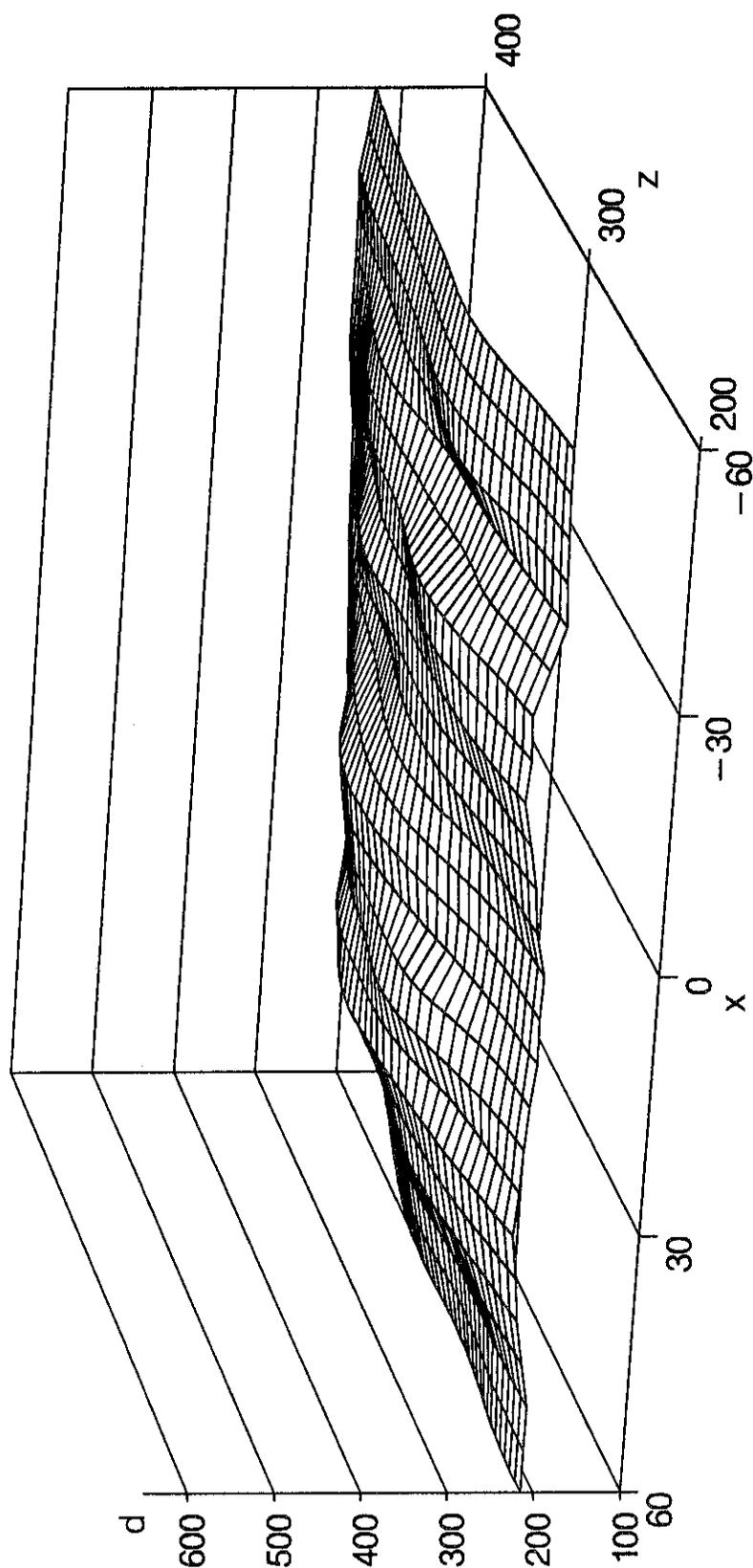


Bild 6.11a: Pistolenstrahlrohr ppnh30 (3D-Darstellung der mittleren Tropfendurchmesser)

**Mittlere Tropfendurchmesser**  
**Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**

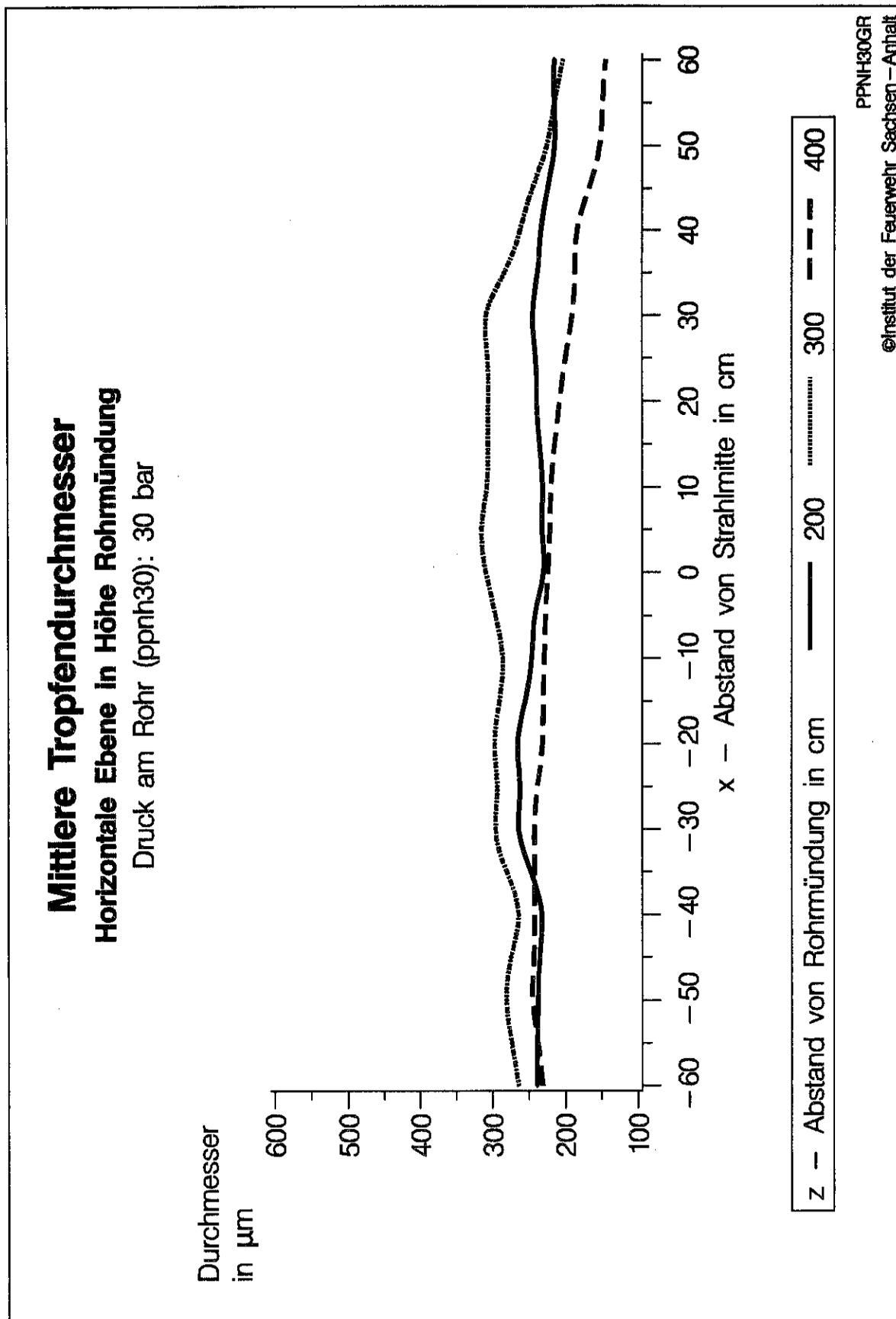
Druck am Rohr (ppnh30): 30 bar



x – Abstand von Strahlmitte in cm  
z – Abstand von Rohrmündung in cm  
d – Durchmesser in  $\mu\text{m}$

PPNH30GR  
©Institut der Feuerwehr Sachsen – Anhalt

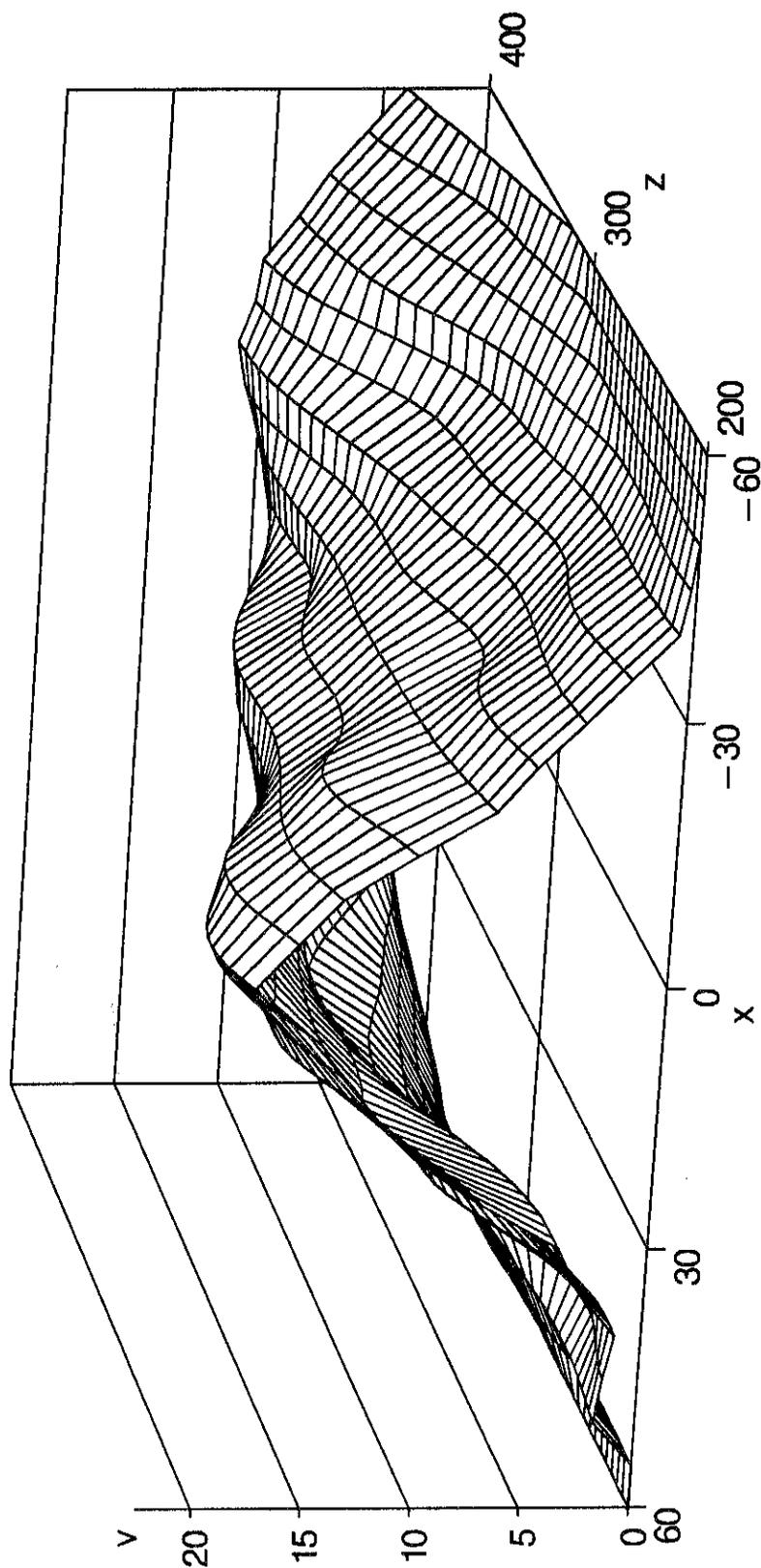
**Bild 6.11b:** Pistolenstrahlrohr ppnh30 (Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



**Bild 6.11c:** Pistolenstrahlrohr pph30 (3D-Darstellung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten)

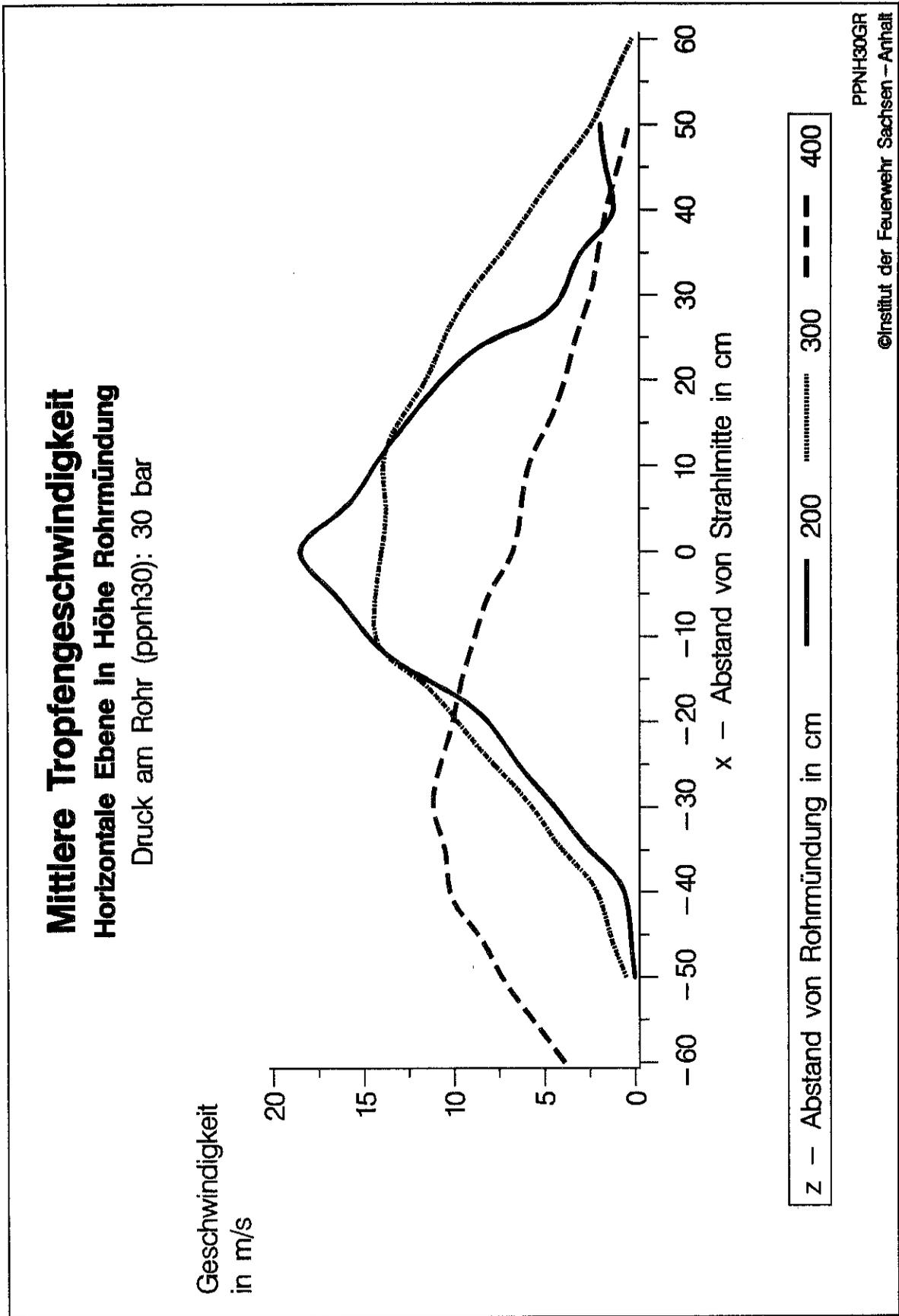
**Mittlere Tropfengeschwindigkeit  
Horizontale Ebene in Höhe Rohrmündung**

Druck am Rohr (ppnh30): 30 bar



- x – Abstand von Strahlmitte in cm
- z – Abstand von Rohrmündung in cm
- v – Geschwindigkeit in m/s

**Bild 6.11d:** Pistolenstrahlrohr pph30 (Mittlere Tropfengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Rohrmündung)



## 6.4 Vergleichende Auswertungen

Die zur Verfügung stehenden Daten bieten weitere, vielfältige Analysemöglichkeiten. In diesem Abschnitt werden jetzt die Meßwerte nochmals verdichtet. Es erfolgt eine Mittelung aller Meßdaten über alle Meßpunkte, die in der senkrechten Ebene zur Sprühstrahlachse liegen. Die mittleren Tropfendurchmesser und die -geschwindigkeiten sowie die dazugehörigen Standardabweichungen (vgl. Gleichungen (4.5) und (4.21)) werden grafisch aufbereitet.

Es wurden zwei Bildtypen berechnet:

### a) Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten

Dargestellt werden der Tropfendurchmesser und die -geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand von der Rohrmündung. Zu diesem Zweck wurden die Meßwerte mit gleicher  $z$ -Koordinate wie oben bereits erwähnt zusammengefaßt. Anders ausgedrückt, aus den Stichproben der Meßpunkte mit den Koordinaten  $(x_i, z_j)$  wurden alle Meßpunkte mit dem Index  $i$  bei konstantem  $j$  zu einer neuen Stichprobe für die  $z$ -Koordinate  $z_j$  vereint. Für diese neu konstruierten Stichproben wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung für Tropfendurchmesser und -geschwindigkeit berechnet.

Die grafische Darstellung ist folgendermaßen aufgebaut (s. Bild 6.12a). Auf der horizontalen Achse wird der Abstand  $z$  der Meßpunkte von der Rohrmündung aufgetragen. Auf der linken vertikalen Achse der mittlere Tropfendurchmesser und auf der rechten vertikalen Achse die mittlere Tropfengeschwindigkeit. Im Bild sind die von den Meßdaten ausgehenden durch Interpolation berechneten Kurven für jeweils zwei Strahlrohre dargestellt, wodurch ein direkter Vergleich zwischen beiden möglich ist.

### a) Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten

Das Bild b hat den gleichen Aufbau wie Bild a. Auf den vertikalen Achsen sind jedoch anstelle der Mittelwerte die entsprechenden Standardabweichungen abgetragen.

Betrachtet man Bild 6.12a, so ist ersichtlich, daß es beim Öffnungswinkel von  $45^\circ$  weder beim mittleren Tropfendurchmesser noch bei der mittleren Tropfengeschwindigkeit Unterschiede gibt. Auch im Bild 6.12b für die dazugehörigen Standardabweichungen sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Dies kann ebenfalls für die Öffnungswinkel von  $90^\circ$  festgehalten werden.

Betrachtet man Bild 6.16a, so ist ersichtlich, daß die mittleren Tropfendurchmesser bei  $30 \text{ bar}$  unter denen bei  $6 \text{ bar}$  liegen. Die Standardabweichung beim höheren Druck ist ebenfalls deutlich unter der bei  $6 \text{ bar}$ . Daraus kann für den vorliegenden Fall festgehalten werden, daß beim mit  $30 \text{ bar}$  erzeugten Sprühstrahl die Tropfen kleiner sind und ein fast monodisperser Sprühstrahl entsteht.

**Bild 6.12a:** Sprühstrahlrohre span45 und spqn45 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)

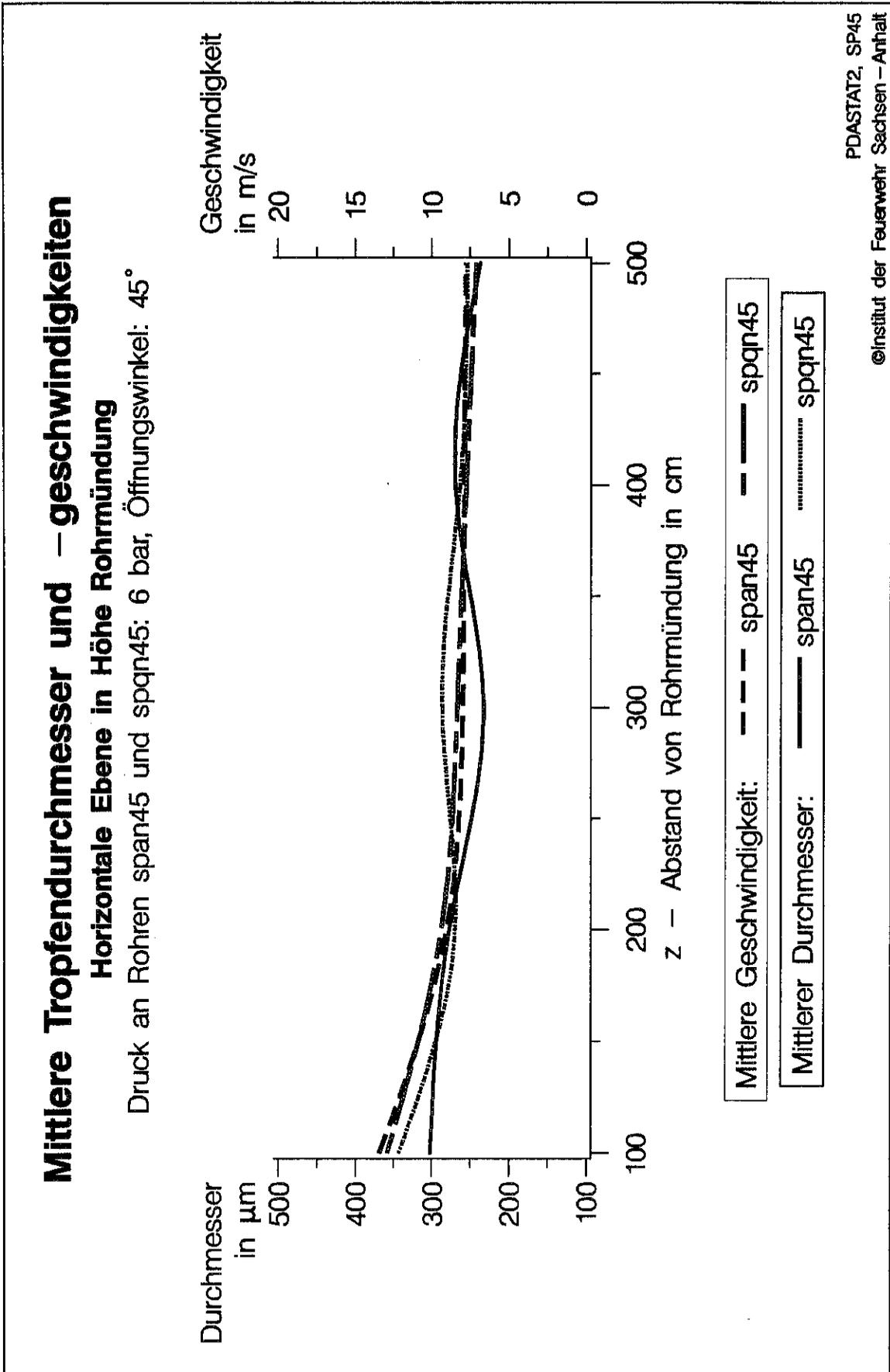


Bild 6.12b: Sprühstrahlrohre span45 und spqn45 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)

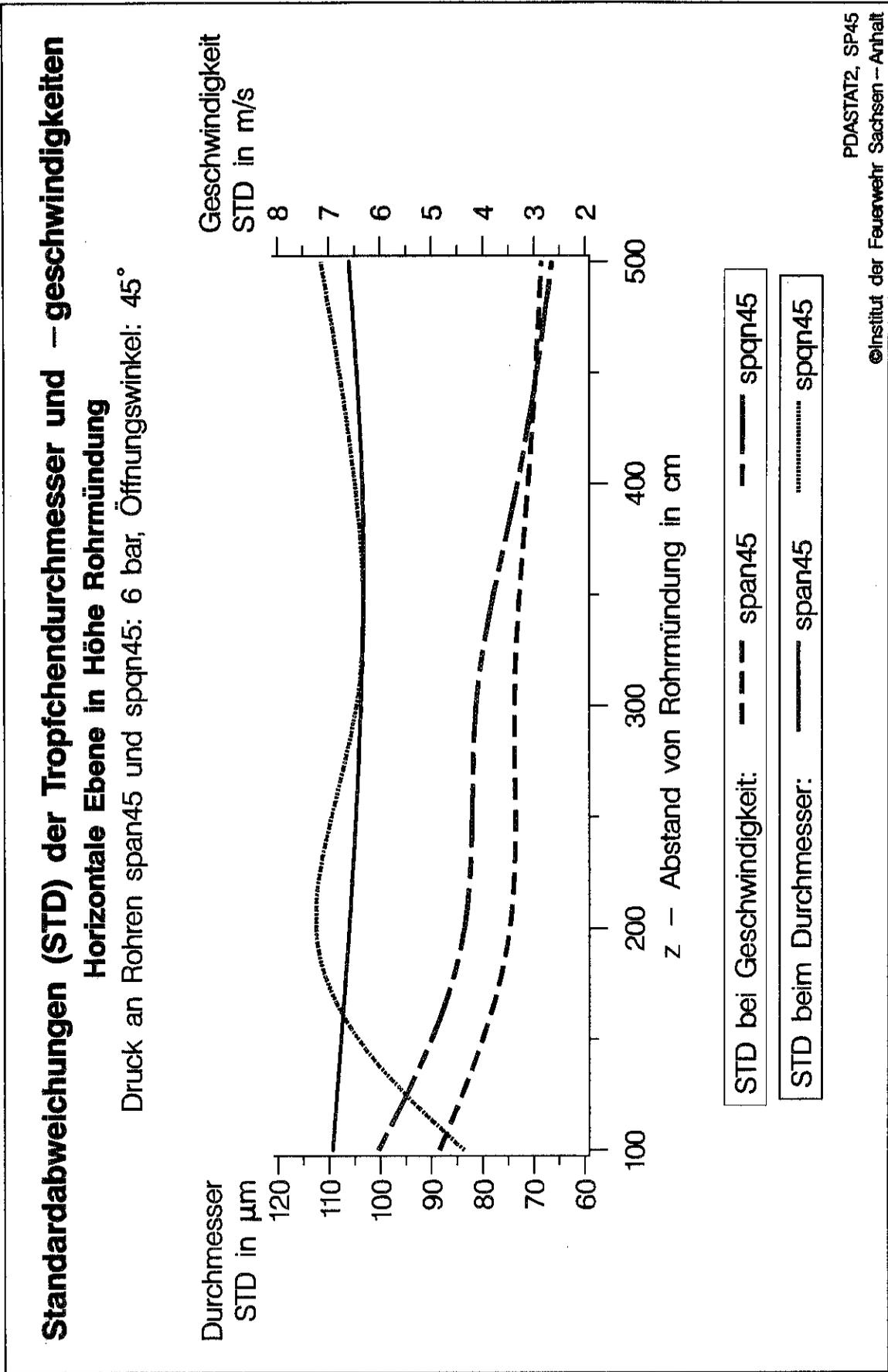
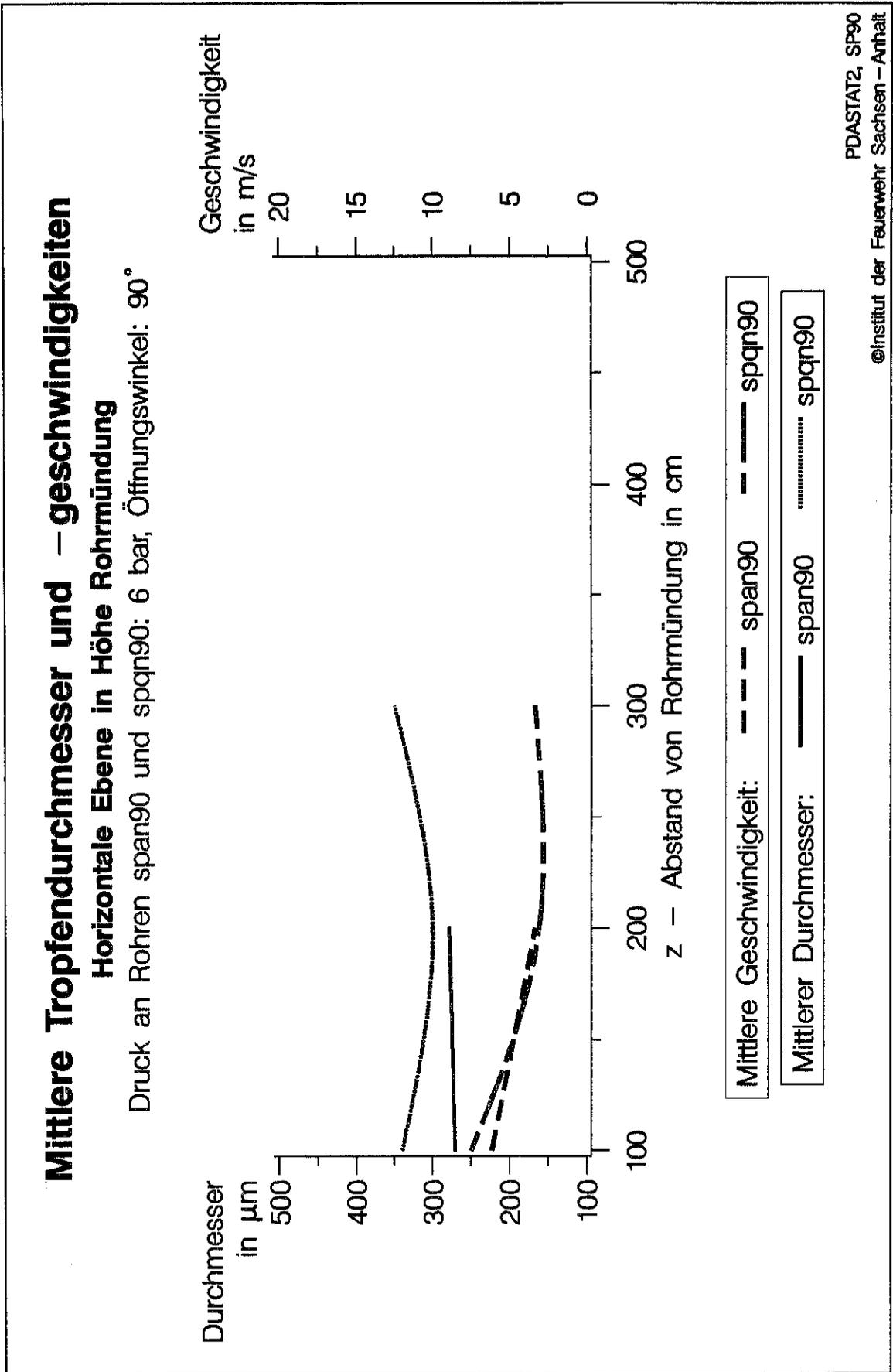


Bild 6.13a: Sprühstrahlrohre span90 und spqn90 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)



**Bild 6.13b:** Sprühstrahlrohre span90 und spqn90 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)

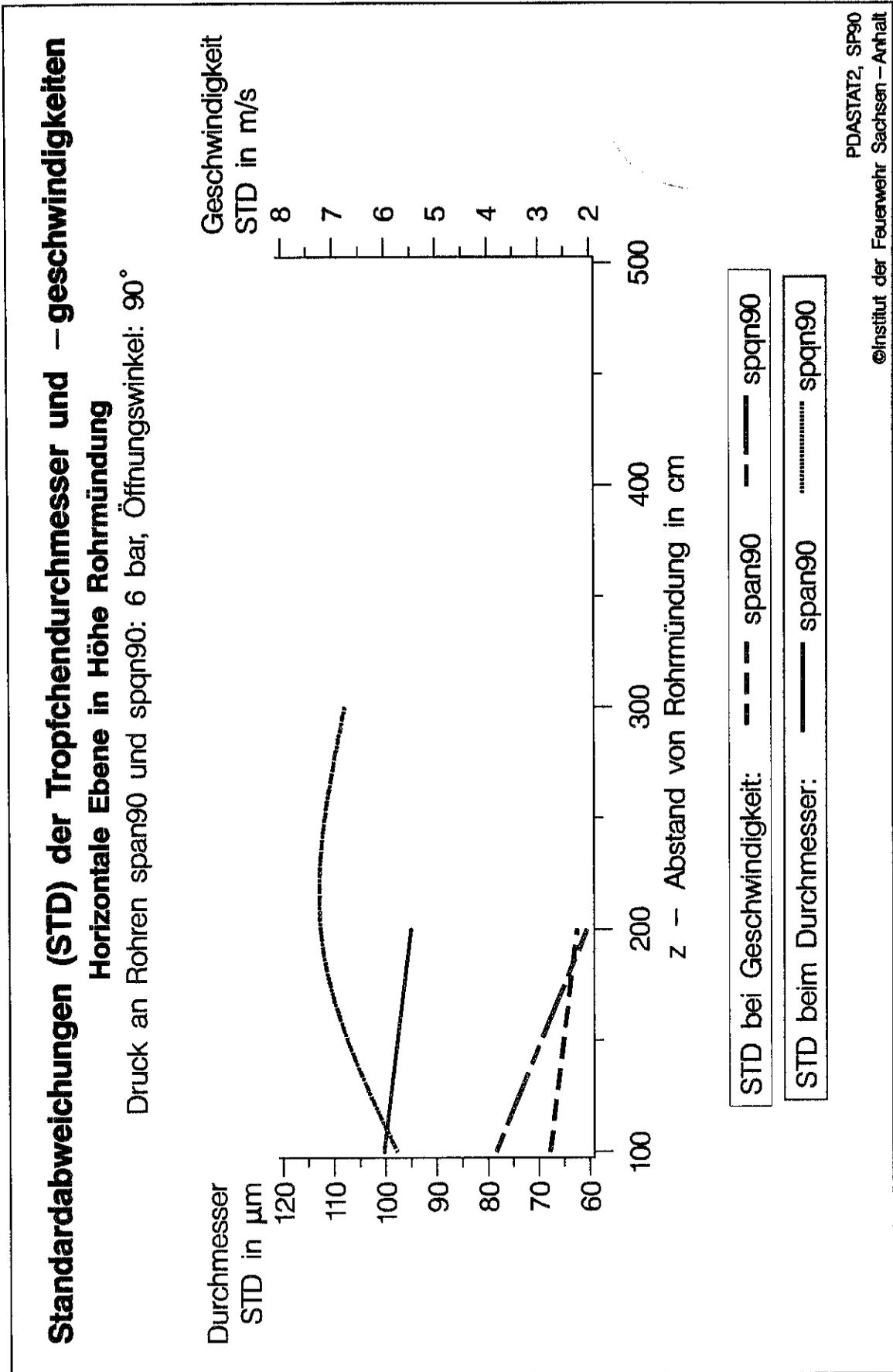
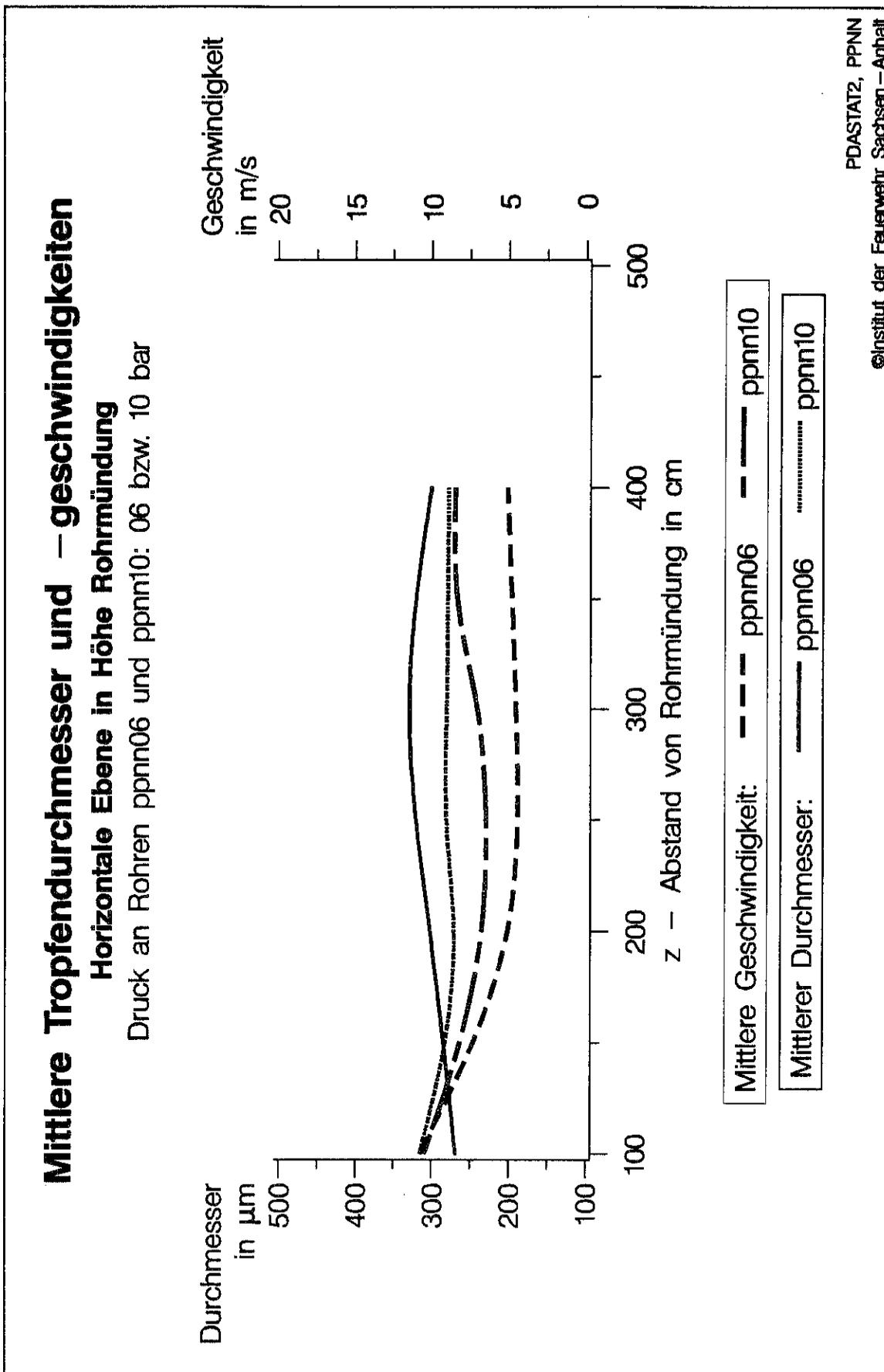
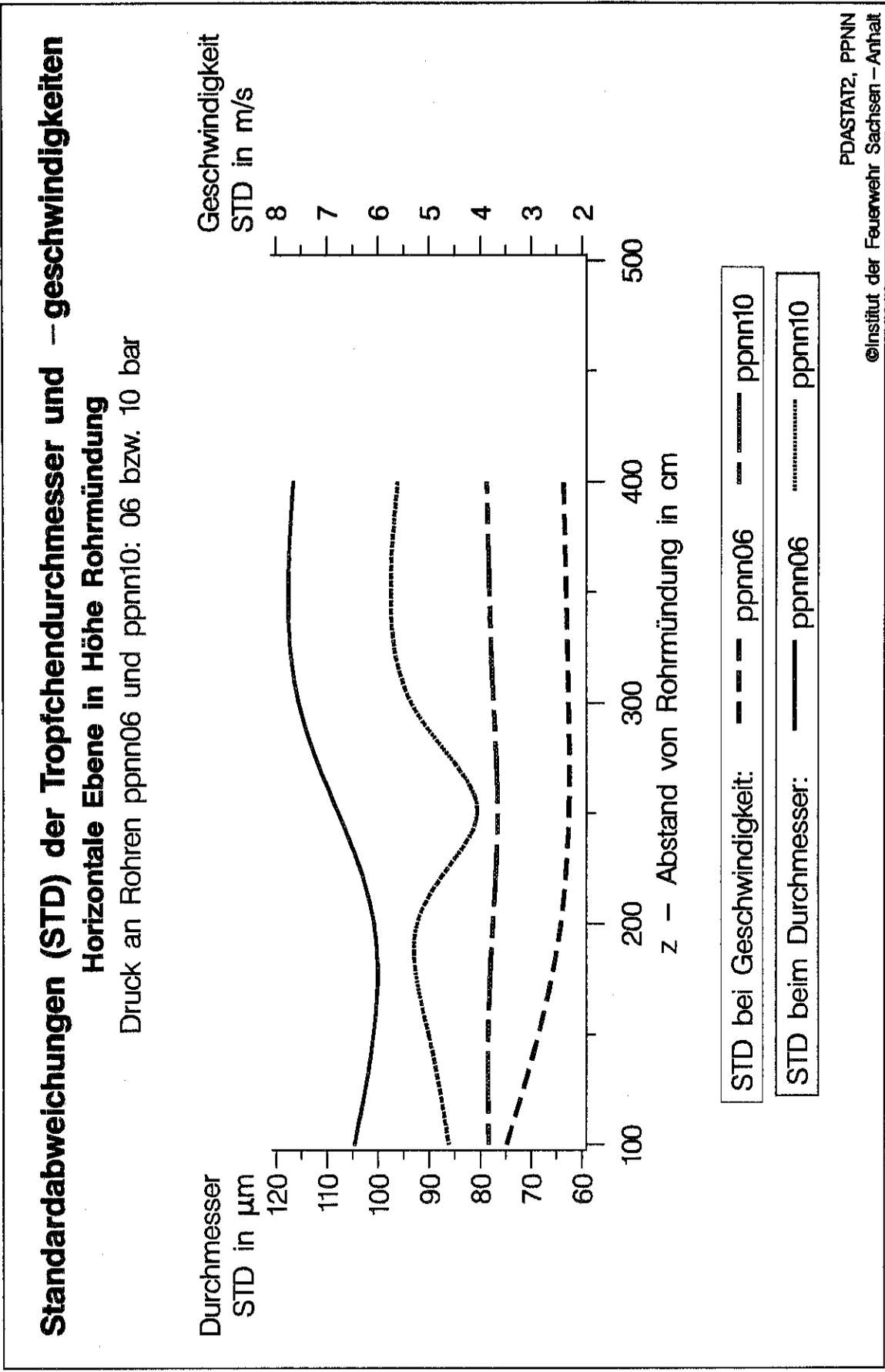


Bild 6.14a: Pistolenstrahlrohre ppnn06 und ppnn10 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)



**Bild 6.14b:** Pistolenstrahlrohre ppnn06 und ppnn10 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)



**Bild 6.15a:** Pistolenstrahlrohre ppan10 und ppah20 (Mittlere Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)

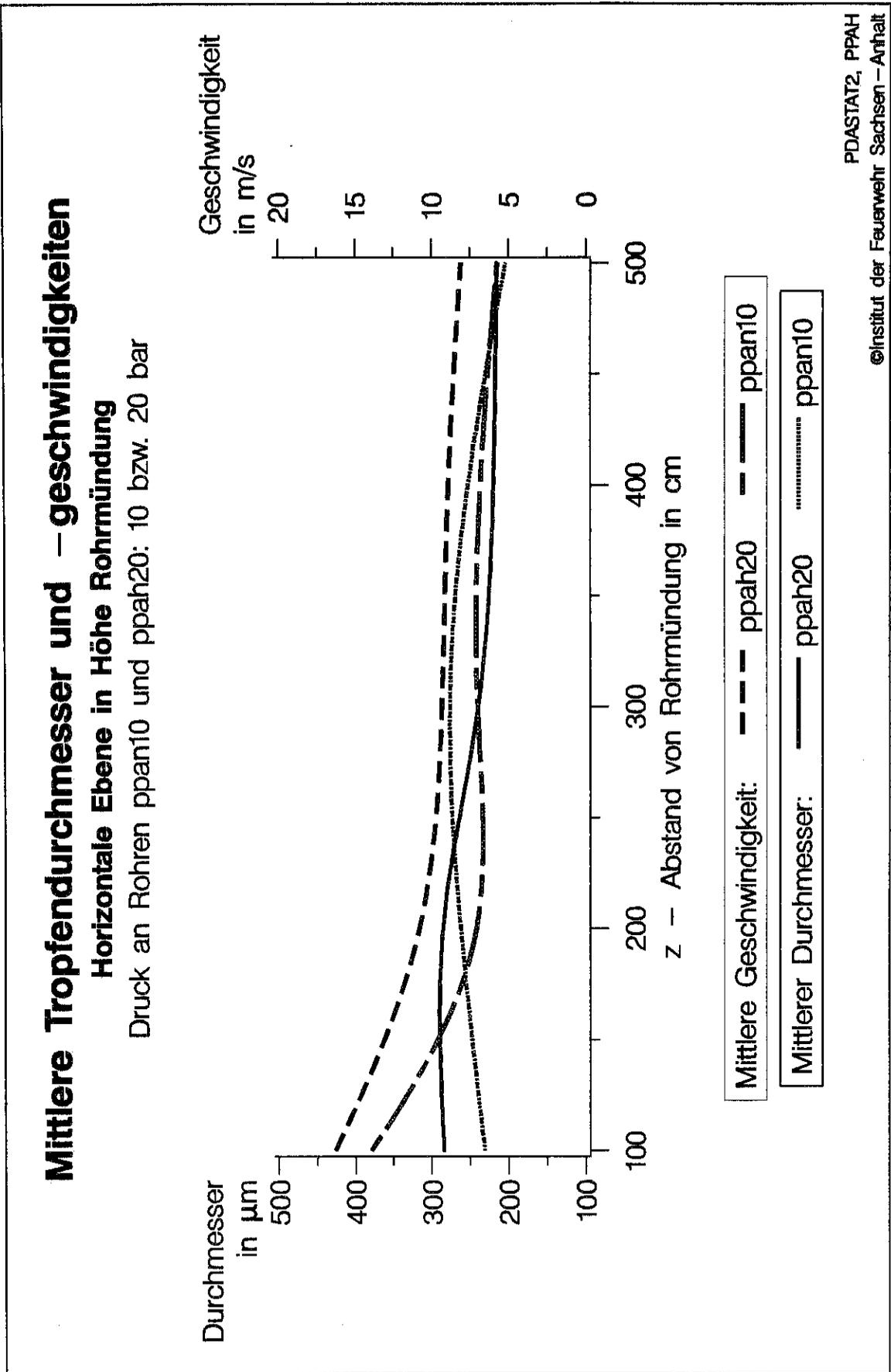
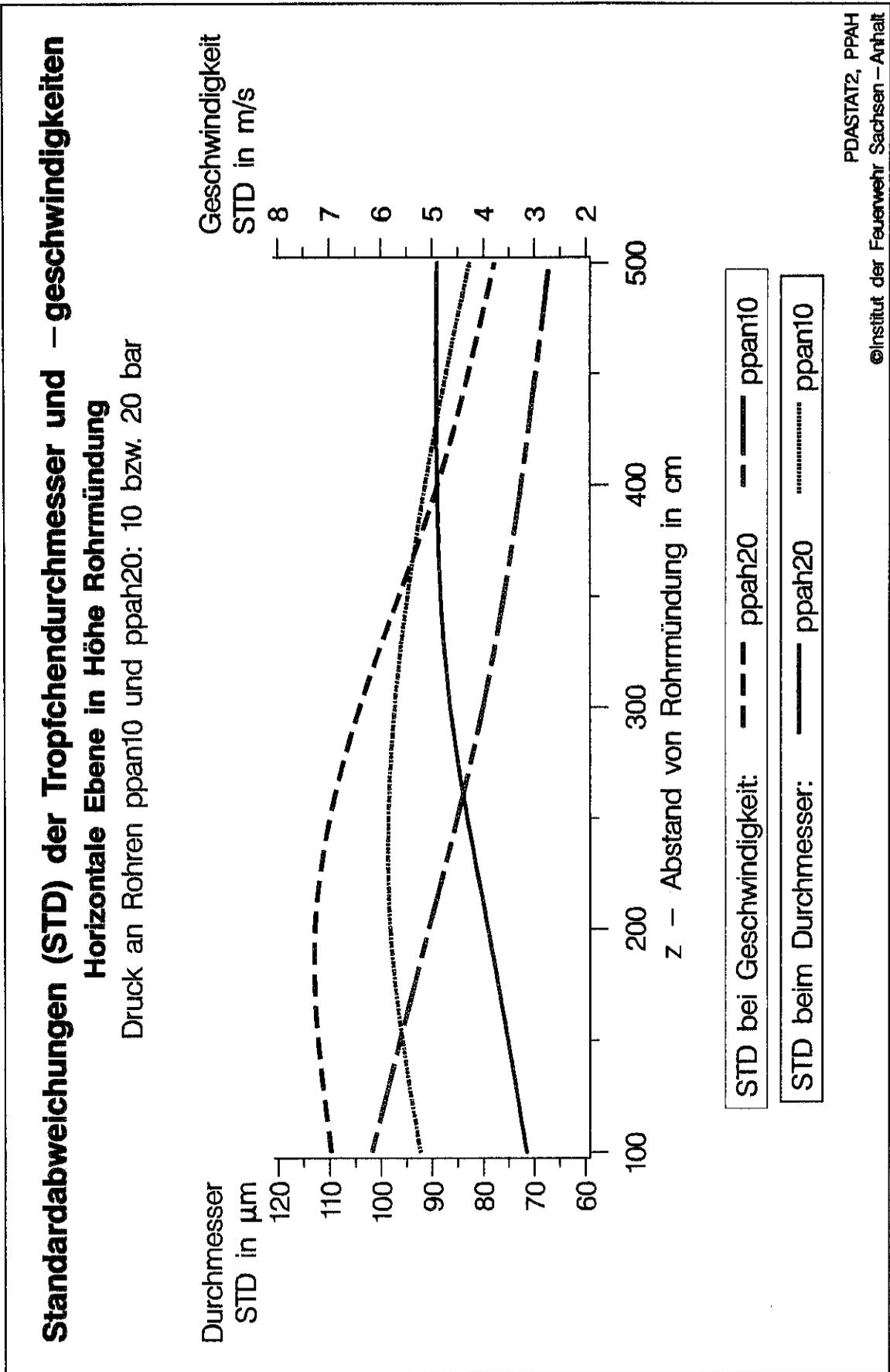
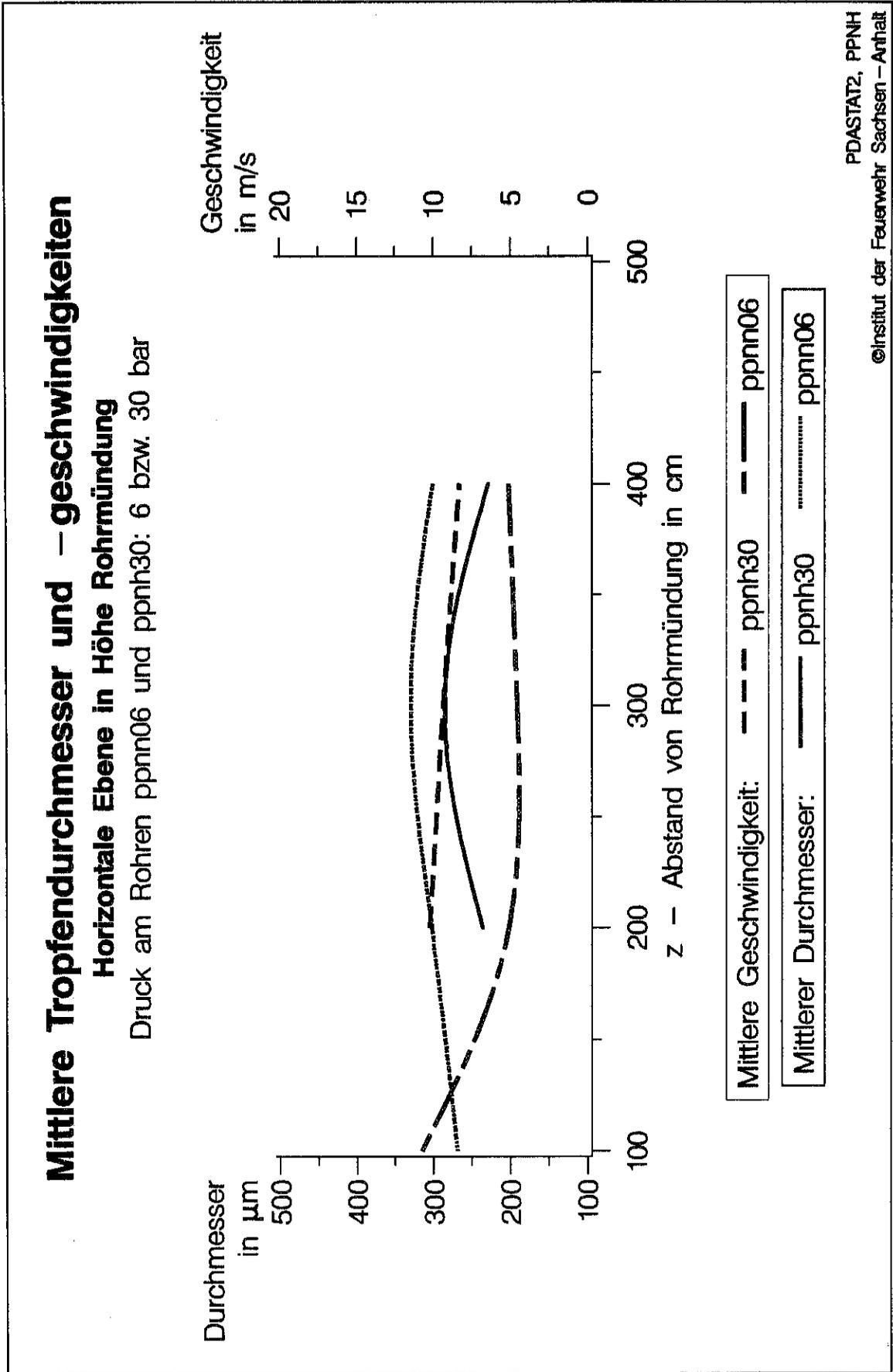


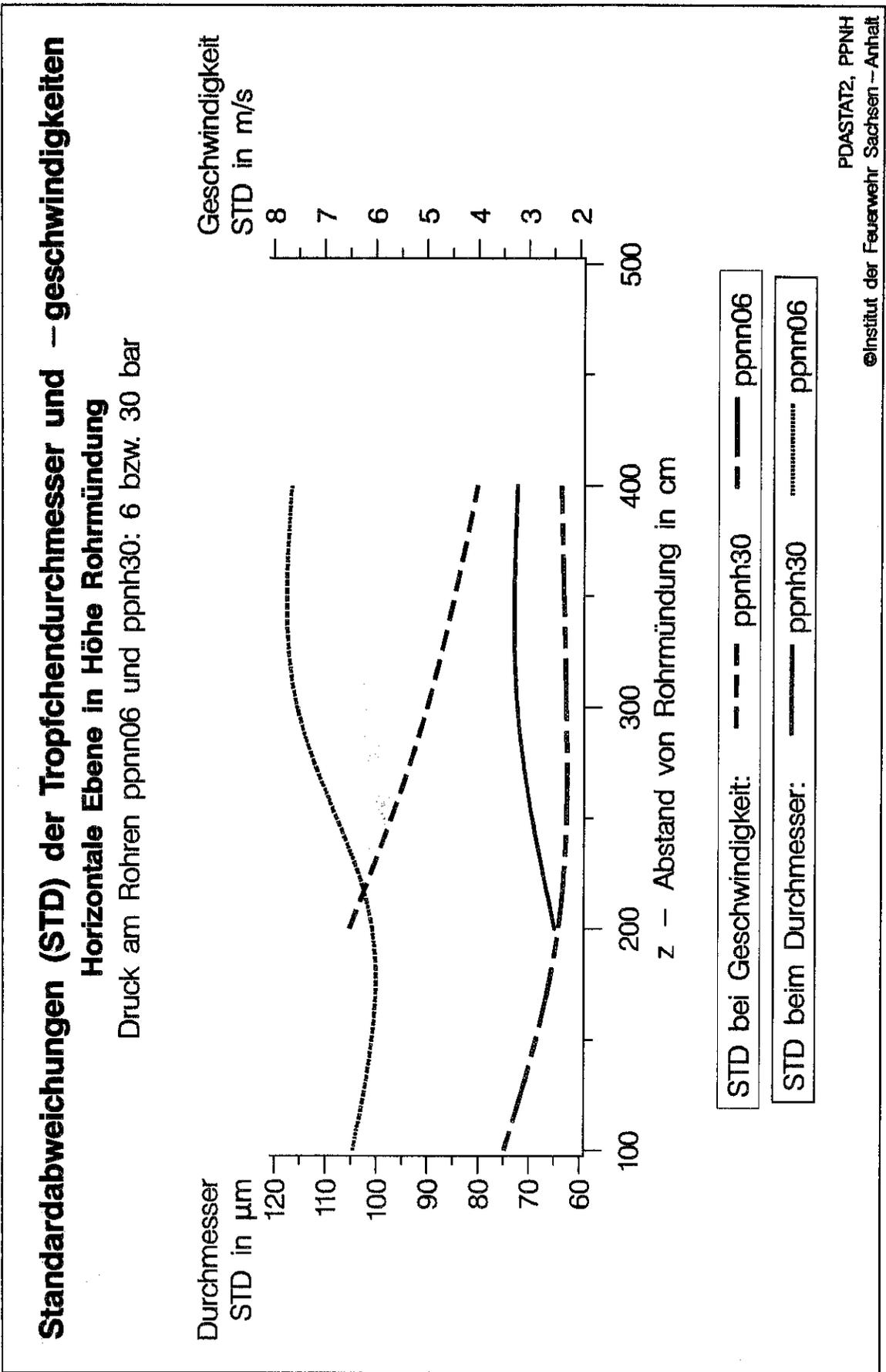
Bild 6.15b: Pistolenstrahlrohre ppan10 und ppah20 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)



**Bild 6.16a:** Pistolenstrahlrohr ppnn06 und ppnh30 (Mittlere Tropendurchmesser und -geschwindigkeiten)



**Bild 6.16b:** Pistolenstrahlrohre ppnn06 und ppnh30 (Standardabweichungen der Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten)



## 7 Zusammenfassung

Bei der mobilen Brand- und Havariebekämpfung werden von den Feuerwehren durch verschiedene Verfahren und technische Realisierungen Sprühstrahlen/Nebel erzeugt. Ein Vergleich und eine darauf aufbauende Bewertung sind für eine optimale Auswahl und einen effektiven Einsatz zur umfassenden Schadenminimierung erforderlich und sinnvoll.

Eine Analyse von Meßverfahren zeigt, daß moderne Laserverfahren eine meßtechnische Möglichkeit bieten, diese komplexe Fragestellung zu bearbeiten. Sie bieten gegenüber anderen Verfahren bedeutend mehr Möglichkeiten. Am Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt wurde in einem großen Naßlabor ein moderner Meßplatz aufgebaut, der auch die Vermessung großer Sprühstrahlen (bis zu 20 m Länge) erlaubt.

Eine analytische Beschreibung der Sprühstrahlen durch mathematisch/physikalische Modelle war wegen der Komplexität des Zerstäubungsvorganges und der komplizierten Strömungsverhältnisse nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes. Hier bieten sich statistische Verfahren und Methoden als Alternative an. Die erforderlichen Grundbegriffe sowie eine Zusammenstellung und Bewertung der verschiedenen Momentenschätzungen für die Tropfendurchmesser sind im vorliegenden Bericht enthalten.

Die Auswertung der großen Datenmengen ist nur mit Hilfe eines leistungsfähigen Datenbankbetriebssystems mit integrierten Programmpaketen zur grafischen Ergebnisaufbereitung zu bewältigen.

Es wurden, ausgehend von einer Befragung repräsentativer Feuerwehren, 5 Sprühstrahlrohre/Pistolenstrahlrohre ausgewählt und in einigen Parametern variiert. Insgesamt wurden 10 Sprühstrahlen vermessen. Die Meßdaten wurden mit Hilfe von 3D-Darstellungen und Kurvendiagrammen grafisch aufbereitet. Es kann folgendes zusammenfassend festgestellt werden:

- ◆ Die Sprühstrahlen haben eine komplizierte Tropfdynamik. Während des Tropfenfluges ändert der Sprühstrahl seine für die Löschung wichtigen Eigenschaften.
- ◆ Es werden meist polydisperse Sprühstrahlen erzeugt, d. h. es ist ein breites Tropfenspektrum vertreten. Die mittleren Tropfendurchmesser liegen zwischen 0,1 und 0,4 mm.
- ◆ Die 3D-Darstellungen für die mittleren Tropfendurchmesser zeigen, daß die Verläufe bei steigenden Drücken flacher werden, d. h. die mittleren Tropfendurchmesser eine geringere Streubreite haben. Die Sprays sind zwar auch dann nicht monodispers, sie nähern sich aber einem solchen Verhalten an.
- ◆ Der aufgebaute Meßplatz und die dargestellte Auswertung bieten eine Möglichkeit zum Vergleich von Sprühstrahlen.

Weiterführend sind nach Auffassung der Autoren folgende Probleme interessant und bedürfen einer weiteren wissenschaftlichen Bearbeitung:

- ◆ Auf der Grundlage der erhaltenen Charakterisierung kann künftig durch Löschversuche die Evaluierung einzelner Sprühstrahlen bzgl. ihrer Löschwirkung erfolgen.

- ◆ Die Untersuchungen sollten auch auf typische Wassernebel ausgedehnt werden, wie sie im Feuerwehreinsatz mehr und mehr üblich werden.
- ◆ Es sind Berechnungsmethoden zu entwickeln, die die Vorausberechnung der Löschwirkung von feinverteiltem Wasser ermöglichen.

## Literaturverzeichnis

### [Anonym 96]

Anonym: Aerosol-Löschfahrzeug "Turbo-Löscher". 112 Magazin der Feuerwehr, 1996, 6, 321-324

### [Barth et al. 86]

Barth, U.; Hartwig, S.; Heudorfer, W.: Untersuchung über Möglichkeiten und Nutzen des Einsatzes von Systemen zur Erzeugung der erzwungenen Dispersion bei Freisetzung von potentiell gefährlichen Gasen aus technischen Industrieanlagen sowie deren Modellierung. Forschungsbericht für das BMFT. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 1986

### [Bauckhage 90]

Bauckhage, Klaus: Das Zerstäuben als Grundverfahren. Chem.-Ing.-Tech., 62, 1990, 8, 613-625

### [Beyer et al. 95]

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

### [Brauer 71]

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

### [Brenn et al. 96]

Brenn, Günter; Huber, Norbert: Strömungssichtbarmachung mittels Laserlichtschnitt. Kurzlehrgang Einführung in die Strömungsmechanik, Laborübung, 22.-26.04.1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 3 Seiten

### [Brenn 95]

Brenn, Günter: Erzeugung monodisperser Sprühstrahlen. Kurzlehrgang Atomization and Sprays, 6. - 8. Nov. 1995, Universität Karlsruhe, 1995, Tagungsmaterial, 31 Seiten

### [Brockhaus 89]

Brockhaus: Physik. VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig, 1989

### [Bryan 90]

Bryan, John L.: Automatic Sprinkler and Standpipe Systems. National Fire Protection Association, 1990

### [Bryan 93]

Bryan, John L.: Fire Suppression and Detection Systems. Prentice Hall Englewood Cliffs - New Jersey, 1993

### [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

### [Debatin 95]

Debatin, Siegbert: Systematische und statistische Fehler bei der Geschwindigkeitsmessung an ein- und zweiphasigen Strömungen mit Korrelationsverfahren. Dissertation. Verlag Shaker, Aachen, 1995

### [Domnick 95]

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

### [Durst 96]

Durst, F.: Grundlagen der Laser-Doppler-Anemometrie. Kurzlehrgang Einführung in die Strömungsmechanik, 22.-26.04.1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 13 Seiten

### [Ebert 88]

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

### [Fritsche 96]

Fritsche, Andreas H.: Turbo-Löscher. Feuerwehr, 1996, 7, 50-54

- [Grabski et al. 95]**  
Grabski, Reinhard; Starke, Horst: Wasser - ein universelles Löschmittel dank neuer Technologien. 4. Wagner-Symposium, 21.09.1995, Frankfurt/Main, 1995, Tagungsband, 70-91
- [Grabski et al. 96]**  
Grabski, Reinhard; Starke, Horst: Physical Fundamentals of New Techniques for Forest Fire-Fighting with Water. Proceedings of the 3rd International Scientific Conference "Wood & Fire Safety", May 6-9 1996, Slovakia, 1996, 283-292
- [Grabski 95]**  
Grabski, Reinhard: Theoretische Grundlagen des Sprenglöschverfahrens. Jahresbericht 1994. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1995, 45-52
- [Grassmann 61]**  
Grassmann, Peter: Physikalische Grundlagen der Chemie-Ingenieur-Technik. Verlag H. R. Sauerländer & Co., 1, Aarau und Frankfurt am Main, 1961
- [Grimsehl 88]**  
Grimsehl, E.: Lehrbuch der Physik. Band 3 Optik. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1988
- [Grimwood 93]**  
Grimwood, Paul T.: Water-fog in structural attack: A European view. Fire Chief, 1993, August, 86-93
- [Hornung 96]**  
Hornung, Fritz: Turbo-Löscher - Das neue Löschfahrzeug der BASF. Lauffeuer, 1996, 6, 148-148
- [Järvinen 92]**  
Järvinen, Jussi P.: Hochdruck-Wasserlöschanlagen, Funktion, Anwendung, Grenzen. VdS-Fachtagung "Feuerlöschanlagen", 3. und 4. November 1992 in Köln, 1992, Tagungsband, 1-16
- [Kneubühl et al. 95]**  
Kneubühl, F. K.; Sigrist, M. W.: Laser. B. G. Teubner Stuttgart, 1995
- [Korowkin 66]**  
Korowkin, P. P.: Ungleichungen. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1966
- [Lechler 94]**  
Anonym: Die ganze Welt der Düsenteknik. Firmenprospekt. Lechler GmbH + Co KG, Fellbach, 1994
- [Lefebvre 89]**  
Lefebvre, Arthur H.: Atomization and Sprays. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1989
- [Lekic et al. 76]**  
Lekic, A.; Bajramovic, R.; Ford, J. D.: Droplet Size Distribution: An Improved Method For Fitting Experimental Data. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 54, 1976, October, 399-402
- [Lienhart et al. 96]**  
Lienhart, H.; Unger, T.: Hitzdrahtanemometrie. Kurzlehrgang Einführung in die Strömungsmechanik, Laborübung, 22.-26.04.1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 3 Seiten
- [Manasse 93]**  
Manasse, Uwe: Erweiterung der Phasen-Doppler-Anemometrie auf optisch absorbierende Flüssigkeiten. VDI Fortschrittsberichte. Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, VDI Verlag, Düsseldorf, 1993, Nr. 353
- [Minimax 95]**  
Minimax: Hochdruck-Feuerlöschanlage HDL 250. UB Unabhängige Brandschutzzeitschrift, 1995, 5, 30
- [Müller 91]**  
Müller, Paul Heinz: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistik. Lexikon der Stochastik. Akademie Verlag, Berlin, 1991
- [Mugele et al. 51]**  
Mugele, R. A.; Evans, H. D.: Droplet Size Distribution in Sprays. Industrial and Engineering Chemistry, 43, 1951, 6, 1317-1324

- [Nash et al. 91]**  
Nash, Philip; Young, Roy A.: Automatik Sprinkler Systems for Fire Fighting Protection. Paramount Publishing Limited, Borehamwood - Hertfordshire, 1991
- [Nitsche 94]**  
Nitsche, Wolfgang: Strömungsmeßtechnik. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1994
- [Pickenäcker et al. 96]**  
Pickenäcker, O.; Trimis, D.: Laser-Doppler-Anemometrie. Kurzlehrgang Einführung in die Strömungsmechanik, Laborübung, 22.-26.04.1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 6 Seiten
- [Polytec 95]**  
Polytec: Aerometrics PDPA Operations Manual. Polytec GmbH, Waldbronn
- [Polytec 95a]**  
Polytec: PDPA - Phasen-Doppler-Partikel-Analysator. Polytec GmbH, Waldbronn, Firmenprospekt
- [PROFESS 92]**  
PROFESS Bildverarbeitungssoftware. Manual. Leutron Vision Systemhaus für Bildverarbeitung, Gerlinden bei München, 1992
- [Rao 73]**  
Radhakrishna Rao, C.: Lineare statistische Methoden und ihre Anwendungen. Akademie-Verlag, Berlin, 1973
- [Rimen 88]**  
Rimen, J. G.: The use of High Pressure and Low Pressure Pumps with Hose Reel Systems. Home Office Scientific Research and Development Branch, Publication 34/88, 1988
- [Rosin et al. 33]**  
Rosin, P.; Rammler, E.: The Laws Concerning the Fineness of Powdered Coal. Journal of the Institute of Fuel, 7, 1933, October, 29-36
- [Rossotti 94]**  
Rossotti, Hazel: Feuer. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford, 1994
- [Samenfink et al. 94]**  
Samenfink, W.; Hallmann, M.; Elsäßer, A.; Wittig, S.: Secondary Break-up of Liquid Droplets: Experimental Investigation for a Numerical Description. ICLASS 1994, Rouen, Frankreich, I.21, p. 156-163, 1994, Proceedings
- [Samenfink 95]**  
Samenfink, Wolfgang: Sekundärerzerfall von Tropfen. Kurzlehrgang Atomization and Sprays, 6. - 8. Nov. 1995, Universität Karlsruhe, 1995, Tagungsmaterial, 13 Seiten
- [SAS 95]**  
SAS System under Microsoft Windows - Release 6.11. SAS Institute Inc., Cary, 1995
- [Schmidt et al. 82]**  
Schmidt, Paul; Walzel, Peter: Zerstäuben von Flüssigkeiten. Chem.-Ing.-Tech., 52, 1980, 4, 304-311
- [Schmidt 91]**  
Schmidt, Olaf: Zerstäuben von Flüssigkeiten mit rotierenden Walzen. VDI Fortschrittberichte Reihe 3: Verfahrenstechnik. VDI Verlag, 250, Düsseldorf, 1991
- [Schremmer 94]**  
Schremmer, Ulf: Anwendung des Wassernebel-Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdrucklöschverfahrens für stationäre Löschanlagen. TOTAL WALTHER Feuerschutz GmbH, Löschversuchszentrum, Manuskript, 1994, 36 Seiten
- [Sedov 93]**  
Sedov, Leonid Ivanovich: Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. by CRC Press Inc, Boca Raton, 1993
- [Smith 95]**  
Smith, David P.: Water Mist Fire Suppression Systems. Fire Safety Engineering, 2, 1995, 2, 10-15
- [Tropea et al. 96]**  
Tropea, Cam; Brenn, Günter: Grundlagen der Partikel Image Velocimetry (PIV). Kurzlehrgang Einführung in die Strömungsmechanik, 22.-26.04.1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 15 Seiten

- [Tropea 95]**  
Tropea, Cam: Orthogonale und Planare PDA-Systeme und ihre Eigenschaften. Kurzlehrgang Atomization and Sprays, 6. - 8. Nov. 1995, Universität Karlsruhe, 1995, Tagungsmaterial, 24 Seiten
- [Tropea 95a]**  
Tropea, Cam: Grundlagen der PDA-Meßtechnik. Kurzlehrgang Atomization and Sprays, 6. - 8. Nov. 1995, Universität Karlsruhe, 1995, Tagungsmaterial, 20 Seiten
- [Tropea 95b]**  
Tropea, Cam: Laser Doppler Anemometry: Recent Developments and Future Challenges. Meas. Sci. Technol., 6, 1995, 605-619
- [Tropea 96]**  
Tropea, Cam: Grundlagen der Hitzdrahtanemometrie. Kurzlehrgang Einführung in die Strömungsmechanik, 22.-26.04.1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 13 Seiten
- [Tropea 96a]**  
Tropea, Cam: Methoden der Strömungssichtbarmachung. Kurzlehrgang Einführung in die Strömungsmechanik, 22.-26.04.1996, Universität Erlangen-Nürnberg, 1996, Tagungsmaterial, 8 Seiten
- [van der Geld et al. 94]**  
van der Geld, C. W. M.; Vermer, H.: Prediction of Drop Size Distributions in Sprays Using the Maximum Entropy Formalism: The Effect of Satellite Formation. International Journal Multiphase Flow, 20, 1994, 2, 363-381
- [Wang 94]**  
Wang, Mingyi: Theoretische Grundlagen der Löschwirkung und Effizienz von Sprinklern. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994
- [Willmann 95]**  
Willmann, Michael: Laser-Beugungsverfahren zur Sprühstrahlcharakterisierung. Kurzlehrgang Atomization and Sprays, 6. - 8. Nov. 1995, Universität Karlsruhe, 1995, Tagungsmaterial, 20 Seiten
- [Xu et al. 93]**  
Xu, T.-H.; Durst, F.; Tropea, C.: The Three-Parameter Log-Hyperbolic Distribution and its Application to Particle Sizing. Atomization and Sprays, 3, 1993, 109-124
- [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
- [Zeising]**  
Zeising (Hrsg.), : Technik Mini Reprint 1612. VEB Verlag Technik, Berlin