

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

**FZR-300**

September 2000

ISSN 1437-322X



**Archiv-Ex.:**

*Danilo Scholz*

**Bewertung der Genauigkeit eines  
Gittersensors zur Visualisierung einer  
Zweiphasenströmung durch Vergleich  
mit optischen  
Hochgeschwindigkeitsaufnahmen**

Herausgeber:  
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF  
Postfach 51 01 19  
D-01314 Dresden  
Telefon +49 351 26 00  
Telefax +49 351 2 69 04 61  
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt  
Alle Rechte beim Herausgeber

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF



WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

**FZR-300**

September 2000

*Danilo Scholz*

**Diplomarbeit**

**Bewertung der Genauigkeit eines Gittersensors  
zur Visualisierung einer Zweiphasenströmung  
durch Vergleich mit optischen  
Hochgeschwindigkeitsaufnahmen**

**Bewertung der Genauigkeit eines Gittersensors zur  
Visualisierung einer Zweiphasenströmung durch  
Vergleich mit optischen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen**

**Diplomarbeit**

zur Erlangung des Grades eines Diplom-Ingenieur (FH)  
des Studienganges Energie- und Umwelttechnik  
der Hochschule Zittau/Görlitz (FH)

vorgelegt von

**Danilo Scholz**

geboren am 09.09.1973 in Görlitz

Rosendorf, 15.09.2000

## Kurzreferat

In der Energie- und der Verfahrenstechnik spielen Zweiphasenströmungen eine wichtige Rolle. Sie treten in Rohrleitungen und Apparaten auf, und beeinflussen dort chemische Reaktionen, sowie Wärme- und Stoffübergänge. Um die komplexen Vorgänge in den Zweiphasenströmungen modellieren zu können, bedarf es der Ergebnisse umfangreicher Experimente. Zur Ermittlung der charakterisierenden Parameter einer Zweiphasenströmung, wie die Phasenverteilung und die Strömungsgeschwindigkeiten, ist eine Messtechnik notwendig, die eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Visualisierung der Strömung ermöglicht. Für diese Aufgabe eignen sich bspw. konduktive Messverfahren.

Im Institut für Sicherheitsforschung des FZ Rossendorf wurde in den vergangenen Jahren ein Gittersensor zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen entwickelt. Dieser basiert auf der Messung der momentanen lokalen elektrischen Leitfähigkeit des Zweiphasengemischs. Er ermöglicht eine hochaufgelöste Visualisierung der Strömung. Bei einer Reihe unterschiedlicher Experimente wurde die Anwendbarkeit des Gittersensors zur Ermittlung der Phasenverteilung in einer Zweiphasenströmung nachgewiesen.

In dieser Arbeit soll die Genauigkeit des Gittersensors bei der Ermittlung von Blasengrößen untersucht werden. Dafür wurde ein Plexiglaskanal angefertigt, in den die Elektroden des Sensors direkt eingebaut wurden. Da es nicht möglich war, für einen Vergleich in der Kanalströmung einzelne Blasen mit einem definierten Volumen zu erzeugen, wurde die Bewegung der Blasen in diesem Kanal mit einer Hochgeschwindigkeits-Videoeinrichtung erfasst. Mit beiden Verfahren wurden synchron Messungen bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und mit verschiedenen Blasenvolumen durchgeführt. Mit Hilfe von Rechnerprogrammen wurden aus den Kamerabildern die Durchmesser der Blasen bestimmt und daraus die Volumen berechnet. Damit konnten die ermittelten Blasenvolumen des Gittersensors mit denen der Kameraaufnahmen verglichen werden. Dieser Vergleich ließ qualitative und teilweise quantitative Aussagen über die Genauigkeit des Gittersensors zu.

## Inhalt:

Formelzeichen

Indizes

Abbildungen

Tabellen

1. Bedeutung der Zweiphasenströmung für die Kernreaktorsicherheit.....	7
2. Untersuchung von Zweiphasenströmungen.....	10
2.1 Charakterisierung .....	10
2.2 Messtechnik für Zweiphasenströmungen.....	13
3. Gittersensoren.....	16
3.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	16
3.2 Beispiele für den Einsatz der Gittersensoren.....	19
3.3 Untersuchung der Messgenauigkeit des Gittersensors.....	21
4. Aufbau der Versuchsanordnung.....	22
4.1 Die Testschleife.....	22
4.2 Der Plexiglaskanal mit integrierten Gittersensor.....	24
4.3 Die Videoeinrichtung.....	26
5. Vorbereitung und Durchführung der Versuche.....	28
5.1 Vorbereitungen an der Testschleife.....	28
5.2 Einstellung der Videoeinrichtung.....	30
5.3 Versuchsdurchführung.....	30
6. Datenauswertung.....	32
6.1 Auswertung der Sensormessdaten.....	32
6.2 Datengewinnung aus den Kamerabildern.....	35
6.3 Vergleich der Daten.....	42
7. Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung.....	46
7.1 Vergleich der Blasendurchmesser.....	46
7.2 Nachweisgrenzen des Gittersensors.....	56
7.3 Wechselwirkungen zwischen der Strömung und dem Sensor.....	59
8. Verbesserung der Werte des Vergleichsverfahrens.....	60
8.1 Vergrößerung des Betrachtungsbereichs.....	60
8.2 Spiegelsystem für stereoskopische Betrachtung.....	61
9. Zusammenfassung.....	64

Anhang

Literaturverzeichnis

## Formelzeichen

$T$	Temperatur	[°C]
$U$	elektrische Spannung	[V]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$\tilde{V}$	auf die Blasengeschwindigkeit bezogenes Volumen	[m <sup>2</sup> s]
$d$	Durchmesser	[m]
$\tilde{d}$	auf die Blasengeschwindigkeit bezogener Durchmesser	[m <sup>2/3</sup> s <sup>1/3</sup> ]
$h$	Höhe, vertikale Ausdehnung	[m]
$j$	Leerrohrgeschwindigkeit	[m/s]
$m$	Anzahl der Pixel einer Zeile	
$n$	Anzahl der Pixel einer Spalte	
$p$	Druck	[Pa]
$r$	Radius	[m]
$\tilde{r}$	auf die Blasengeschwindigkeit bezogener Radius	[m <sup>2/3</sup> s <sup>1/3</sup> ]
$t$	Zeit	[s]
$u$	Phasengeschwindigkeit	[m/s]
$x$	Breite im Kamerabild	[m]
$z$	Höhe im Kamerabild	[m]
$\Delta$	Differenz, Abstand, Fehler	
$\varepsilon$	volumetrischer Dampfanteil	[%]
$\gamma$	elektrische Leitfähigkeit	[Sm/mm <sup>2</sup> ]

## Indizes

$Bl$	Blase
$L$	Luft
$K$	Kugel
$Kanal$	Kanal
$W$	Wasser
$Z$	Zylinder
$h$	horizontale Richtung
$i$	Index für Sendelektrode
$j$	Index für Empfängerelektrode
$max$	Maximalwert
$min$	Minimalwert
$perspektiv$	auf die Perspektive bezogen
$opt$	Werte aus Kameradaten
$rel$	relativ
$sz$	auf Abstand zwischen den Zeilen im Kamerabild bezogen
$t$	Momentanwert
$threshold$	Schwellwert
$v$	vertikale Richtung

## Abbildungen

- Abb. 1.1, Schematische Darstellung des Barrierensystems eines Druckwasserreaktors
- Abb. 2.1, Schematische Darstellung der Strömungsformen in vertikalen Rohrleitungen
- Abb. 2.2, Schematische Darstellung der Strömungsformen in horizontalen Rohrleitungen
- Abb. 2.3, Strömungskarte [3] einer vertikalen Strömung nach Taitel u. Dukler
- Abb. 3.1, Prototyp des Gittersensors (NW 50)
- Abb. 3.2, Schema der Messwerterfassung [7]
- Abb. 3.4, Drei-Ebenen-Gittersensor
- Abb. 3.5, Gittersensor des Vermischungsmodells
- Abb. 3.6, Gittersensor (NW50) mit 2x24 Elektrodendrähten
- Abb. 3.7, „schwerer“ Gittersensor (NW50)
- Abb. 3.8, „schwerer“ Gittersensor (NW100)
- Abb. 4.1, Schematische Darstellung der Testschleife
- Abb. 4.2, Schematische Darstellung des Plexiglaskanals
- Abb. 4.3, Gittersensor im Plexiglaskanal
- Abb. 4.4, Schematische Darstellung des Gittersensor (Draufsicht)
- Abb. 4.5, Schema des Versuchsaufbaus
- Abb. 4.6, Versuchsstand mit Plexiglaskanal, Gittersensor und Messtechnik
- Abb. 4.7, Bitmap-File aus 256x240 Pixeln
- Abb. 5.1, verwendete Luftdüsen
- Abb. 5.2, Qualitätsmerkmale der Kamerabilder
- Abb. 6.1, Verlauf des Störsignals für einen ausgewählten Zeitbereich
- Abb. 6.2, Ausschnitt einer Projektion der Strömung aus den Sensordaten, z.B.: 17050001
- Abb. 6.3, Bitmap-File mit Kennzeichnung der Extraktionszeilen
- Abb. 6.4, Programmstruktur der Helligkeitskorrektur
- Abb. 6.5, Programmstruktur der Histogrammbildung
- Abb. 6.6, Ausschnitt einer Projektion aus den Kamerabildern, z.B.: 17050001
- Abb. 6.7, Ausschnitt einer Projektion nach den Korrekturen und der Identifizierung der einzelnen Gasblasen, Bsp.: 17050001,
- Abb. 6.8, Projektionsfläche einer Blase
- Abb. 6.9, Zylinder-Modell zur Berechnung des Blasenvolumens
- Abb. 6.10, Schnittmenge auswertbarer Objekte
- Abb. 6.11, Unrealistische Fragmentierung einer Gasblasen durch den Schwellwert
- Abb. 6.12, Fragmentierung im Kamerabild durch Reflektionen auf der Blasenoberfläche



- Abb. 7.1, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser  
 Abb. 7.2, zeitlicher Verlauf der Bewegung einer Blase durch den Sensor  
 Abb. 7.3, Diagramm der relativen Abweichung des Volumens in Abhängigkeit vom Durchmesser durch mehrfach gemessene Volumenanteile  
 Abb. 7.4, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser nach der Korrektur der Blasenvolumen aus den Kameradaten  
 Abb. 7.5, Diagramm mit mittleren relativen Fehler der bezogenen Blasendurchmesser durch die zweidimensionale Betrachtung mittels Kamera  
 Abb. 7.6, Diskretisierungsfehler in Abhängigkeit der Pixelanzahl  
 Abb. 7.7, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser unter Berücksichtigung des relativen Gesamtfehlers der Kameradaten  
 Abb. 7.8, Modell, Mittelpunkt der Projektionsfläche stimmt mit Messpunkt überein  
 Abb. 7.9, Modell, Mittelpunkt der Projektionsfläche stimmt mit Schnittpunkt der Begrenzungsebenen überein  
 Abb. 7.10, Grenzen des Gasgehalts in Abhängigkeit von der Position und des Durchmessers der Blasen  
 Abb. 7.11, gemessener maximaler momentaner lokaler Gasgehalt in Abhängigkeit vom realen Blasendurchmesser  
 Abb. 7.12, Fragmentierung einer Luftblase im Gittersensor
- Abb. 8.1, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser für Messungen mit unterschiedlichem Betrachtungsbereich  
 Abb. 8.2, Verlauf des Strahlengangs im Spiegelsystem, Draufsicht  
 Abb. 8.3, Verlauf des Strahlengangs im Spiegelsystem, Vorderansicht  
 Abb. 8.4, Spiegelkasten am Plexiglaskanal  
 Abb. 8.5, durch Spiegelsystem erhaltenes Kamerabild

## **Tabellen**

- Tab. 5.1, durchgeführte Messungen mit verwendeten Parametern
- Tab. 6.1, Wertetabelle für die vom Programm ermittelten Gasblasen, z.B.: 19060002
- Tab. 6.2, Wertetabelle der Kameratenauswertung, z.B.: 19060002
- Tab. 6.3, Wertetabelle mit Blasendurchmessern, z.B.: 19060002
- Tab. 6.4, Vergleich der Blasendurchmesser, z.B.: 19060002
- Tab. 8.1, Strömungsgeschwindigkeiten und verwendete Luftdüse für Messreihen bei größerem Betrachtungsbereich

## 1. Bedeutung der Zweiphasenströmung für die Kernreaktorsicherheit

Der sichere Betrieb von Kernkraftwerken setzt voraus, dass Störfälle durch die Reaktorsicherheitstechnik beherrscht werden. Von großer Bedeutung bei der Analyse von Störfällen sind hierbei die sogenannten Transienten und Kühlmittel-verluststörfälle. Alle unter diese Kategorien einzuordnenden Ereignisse werden als Auslegungsstörfälle bezeichnet, weil sie durch die Betriebs- und Sicherheitssysteme, ohne Eingriff von außen, bewältigt werden. Für die richtige Dimensionierung der zur Betriebs- und Sicherheitstechnik gehörenden technischen Systeme ist es unumgänglich, die Ursachen und vor allem die Abläufe dieser Störfälle genau zu kennen. Da für die Analyse dieser sehr komplexen Vorgänge nicht auf Betriebserfahrungen zurückgegriffen werden kann, benutzt man mathematische Modelle, mit deren Hilfe die Störfallabläufe simuliert und damit untersucht werden können. Eine wichtige Aufgabe der Sicherheitsforschung besteht dementsprechend in der Entwicklung solcher Modelle. Sie bilden die Grundlage für Programmsysteme, welche die Störfallanalyse unterstützen.

Oberstes Ziel der Reaktorsicherheitstechnik ist es, die Integrität der Brennstäbe, in denen sich der Brennstoff und die entstehenden Spaltprodukte befinden, bzw. des Sicherheitsbehälters, in allen Betriebs- und Störfallsituation zu erhalten. Es dürfen keine radioaktiven Bestandteile nach außen gelangen, damit keine Aktivität freigesetzt wird. In einem Kernkraftwerk existiert aus diesem Grund ein Barrierensystem. Das Barrierensystem eines Druckwasserreaktors zeigt Abb. 1.1. Es setzt sich aus der Brennstoffmatrix, den Brennstabhüllrohren, dem Reaktordruckbehälter und Wandungen des Primärkreislaufes, dem Sicherheitsbehälter und dem Reaktorgebäude aus Stahlbeton zusammen.

Die grundsätzliche Forderung bei der Auslegung eines Kernreaktors ist die Gewährleistung der Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern, um das Schmelzen der Brennstabhüllrohre und des Brennstoffes, also der Zerstörung der ersten beiden Barrieren, zu verhindern. Aus diesem Grund gibt es eine Reihe von Systemen, wie z.B. die Reaktorschnellabschaltung (RESA), die Notkühlsysteme oder die Notstromversorgung, die zur Erfüllung dieser Aufgabe dienen und als aktive Sicherheitseinrichtungen bezeichnet werden.

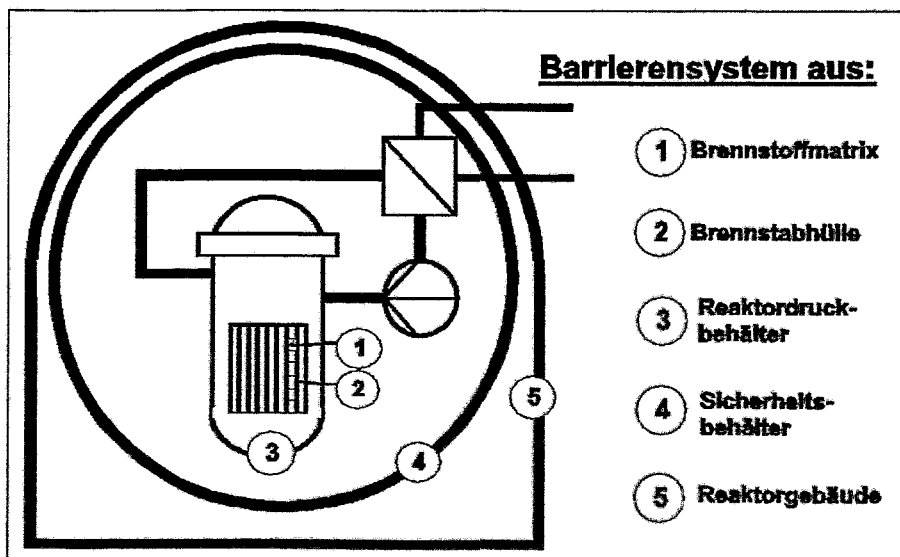


Abb. 1.1, Schematische Darstellung des Barrierensystems eines Druckwasserreaktors

Bei den heute in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen Kernkraftwerken handelt es sich um Leichtwasserreaktoren, welche Wasser sowohl als Moderator als auch zur Kernkühlung und dementsprechend als Medium zur Energieübertragung benutzen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die thermohydraulischen Phänomene zu untersuchen, die bei der Erwärmung von strömendem Wasser unter Druck auftreten. Beispielsweise sind bei den Druckwasserreaktoren mit einer Leistung von ca. 1400MW Temperaturen von 330°C und Drücke von ca. 16MPa zu berücksichtigen. Das Teilgebiet der Physik, welches sich mit diesen Untersuchungen beschäftigt, wird als Thermofluidodynamik bezeichnet, und stellt eine wichtige Komponente in der Sicherheitsforschung bzw. -analyse dar.

Wird das benutzte Kühlmittel so stark erwärmt, dass es zu Siedevorgängen kommt, besteht die Kühlmittelströmung aus der flüssigen und der gasförmigen Phase. In Siedewasserreaktoren tritt dieser Zustand auslegungsgemäß ein. Man spricht an dieser Stelle von einer Zweiphasenströmung. Im Allgemeinen werden mit Zwei- bzw. Mehrphasengemischen Medien bezeichnet, in denen mehrere Phasen gleichzeitig existieren. Neben der flüssigen (liquid) und der gasförmigen (gas), kann auch die feste (solid) Phase auftreten. Zweiphasenströmungen spielen in der Verfahrenstechnik und der Energietechnik eine wichtige Rolle.

Die Zweiphasenströmung, welche beim Betrieb von Leichtwasserreaktoren auftreten kann, setzt sich aus Wasser und Dampf mit unterschiedlichen Verteilungen und Strömungsformen zusammen. Diese Strömungsformen, auf die im Kapitel 2. noch näher eingegangen werden soll, spielen vor allem bei der Beurteilung des Wärmeübergangs von der Brennstabhülle zum Kühlmittel eine wichtige Rolle. Daneben beeinflusst die Verteilung der Phasen im Reaktorkern die reaktorphysikalischen Vorgänge, z.B. die Moderation der Neutronen.

Soll der Ablauf eines Störfalles, der sich aus einer unzureichenden Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern ergibt, simuliert werden, so benötigt man Informationen über die integralen Parameter der Kühlmittelströmung, wie Druck, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeiten und Volumenstromanteile. Diese Informationen bilden die Grundlage und die Eingangsdaten bei der Entwicklung der mathematischen Modelle und der Verifizierung von Thermohydraulik-programmsystemen.

Als Beispiele seien hier die Rechencodes RELAP und ATHLET genannt. Diese Programmsysteme dienen der Analyse der Thermofluidodynamik bei Transienten und Kühlmittelverluststörfällen. Sie setzen sich aus einer Vielzahl eigenständiger Berechnungsmodule zusammen. Neben der Thermofluidodynamik, in der die Phänomene der Zweiphasenströmung berücksichtigt werden, benutzt man auch Module für die Neutronenkinetik und den Wärmeübergang, bzw. die Wärmeleitung. Die Simulation der Zweiphasenfluidodynamik basiert auf den Erhaltungsgleichungen von Energie, Impuls und Masse.

Ein Nachteil der bisher in den Rechencodes verwendeten Modelle besteht überwiegend in der eindimensionalen Betrachtungsweise von Strömungen, die auf einer Zerlegung in unterschiedliche Kontrollvolumen mit verschiedenen Randbedingungen, z.B. Strömungsquerschnitten, basieren. Außerdem werden bei der Modellierung von Zweiphasenströmungen homogene Modelle verwendet, bei denen von einer gleichmäßigen Verteilung der beiden Phasen über dem Rohrleitungsquerschnitt, von einer gleichen Phasengeschwindigkeit und gleicher Temperatur zwischen den Phasen ausgegangen wird. Damit kann die Zweiphasenströmung vereinfacht dargestellt werden. Für eine realistische

Modellierung der Strömungen sind aber die Vorgänge an den Grenzflächen zwischen den Phasen von Bedeutung. Diese werden durch die makroskopische Betrachtung der Strömung nicht berücksichtigt.

Die Daten, welche in die Modelle der Codes eingehen, wurden empirisch ermittelt. Damit ergibt sich ein Problem bei der Übertragbarkeit auf andere Strömungsquerschnitte. Um die Modelle von Randbedingungen unabhängig zu machen, muss von der integralen zur lokalen Betrachtungsweise der Zweiphasenströmung übergegangen werden. Dafür benötigt man Informationen über die mikroskopischen Größen, z.B. lokale Phasengeschwindigkeit und lokale Volumenstromdichte, einer Zweiphasenströmung.

Um diese Informationen zu erhalten, müssen umfangreiche Experimente durchgeführt werden, die über die Phasenverteilung Auskunft geben können. Für diese Experimente ist eine Messtechnik notwendig, die in der Lage ist, Daten über die momentane lokale Verteilung der Phasen in der Zweiphasenströmung zu ermitteln. Die herkömmlichen Messverfahren, liefern nur Mittelwerte des Drucks, der Temperatur und der Geschwindigkeiten einer Strömung für einen bestimmten Rohrleitungsquerschnitt.

Im Institut für Sicherheitsforschung des FZ Rossendorf wird in Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen an der Entwicklung von Messverfahren gearbeitet, die Informationen über die Phasenverteilung in einer Zweiphasenströmung liefern. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften der beiden Phasen verwendet, die sich unterscheiden. Ein Verfahren, welches auf der Messung der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit der Phasen basiert, ist die konduktive Tomographie mittels Gittersensor. Dieser Sensor ermöglicht eine zeitlich und räumlich hochauflösende Visualisierung der Zweiphasenströmung. Der vom Institut entwickelte Gittersensor wurde in einer Reihe unterschiedlicher thermohydraulischer Experimente bereits eingesetzt, allerdings gibt es noch eine Reihe offener Fragen, welche im Kapitel 3.3 explizit erläutert werden. Besonders die Genauigkeit und die Nachweisgrenzen, der durch den Gittersensor ermittelten Messwerte, stellen ein noch zu untersuchendes Problem dar. Aufgabe dieser Arbeit soll es sein, einen Teil dieser noch offenen Fragen zu beantworten.

## 2. Untersuchung von Zweiphasenströmung

### 2.1 Charakterisierung

Eine Zweiphasenströmung wird durch die Größen, z.B. die Volumenstromdichte, den Volumenstromanteil und die Phasengeschwindigkeiten, charakterisiert. Diese Größen sind vom Druck, der Temperatur, dem Rohrleitungsquerschnitt und den physikalischen Stoffwerten, z.B. der Viskosität, der beteiligten Phasen abhängig. Diese Parameter bestimmen die Strömungsform einer Zweiphasenströmung, die sich in einer Rohrleitung einstellt. Aufgrund des unterschiedlichen Einflusses der Schwerkraft, muss zwischen der horizontalen, der vertikalen und der geneigten Strömung unterschieden werden. Die Strömungsformen sind bei der Analyse von Wärmeübergangsvorgängen und chemischen Reaktionen an den Grenzflächen der Phasen von Bedeutung. In einer Reihe von Untersuchungen konnten bestimmten Parametern charakteristische Strömungsformen zugeordnet werden.

In Abb. 2.1 sind die Strömungsformen schematisch dargestellt, die sich in einer vertikalen Rohrleitung bei bestimmten Parametern einstellen.

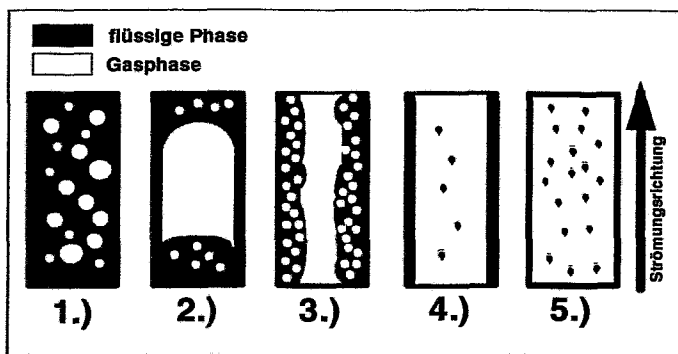


Abb. 2.1, Schematische Darstellung der Strömungsformen in vertikalen Rohrleitungen

Dabei handelt es sich um [1]:

- 1.) Blasenströmung: Hier sind viele einzelne Gasblasen gleichmäßig in der flüssigen Phase verteilt.
- 2.) Pfropfenströmung: Große pfropfenförmige Gasblasen füllen fast den gesamten Rohrquerschnitt aus. Zwischen diesen befindet sich die Flüssigkeit, in der sich kleinere Blasen befinden können.
- 3.) Schaumströmung: Wenn sich bei einer Pfropfenströmung die Turbulenz in der Rohrleitung durch größere Phasengeschwindigkeiten erhöht, entsteht eine Schaumströmung, die sehr instabil ist. Sie stellt einen Übergang von der Pfropfen- zur Ringströmung dar und besteht aus einer Vielzahl großer und kleiner Blasen.

4.) Ringströmung: Strömt die Gasphase mit einer sehr Geschwindigkeit, bildet sich an der Rohrwand ein Flüssigkeitsfilm. Kleine Tropfen werden dabei von der Gasphase mitgerissen, die im Kern der Rohrleitung strömt.

4.) Tröpfchenströmung: Wird die Geschwindigkeit der Gasphase in einer Ringströmung weiter erhöht, stellt sich eine Tröpfchenströmung ein. Dabei wird die Flüssigkeit in der Form von kleinen Tropfen mit der kontinuierlich strömenden Gasphase transportiert.

In einer horizontalen Rohrleitung stellen sich die Strömungsformen ein, die in Abb. 2.2 dargestellt sind.

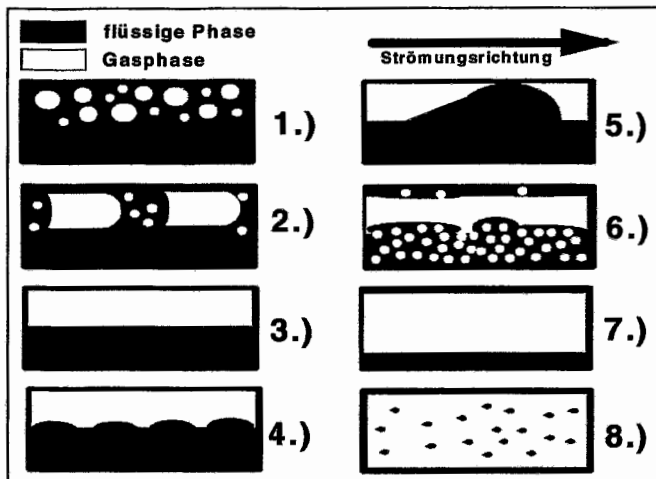


Abb. 2.2, Schematische Darstellung der Strömungsformen in horizontalen Rohrleitungen

Die sich bei bestimmten Parametern einstellenden Strömungsformen werden wie folgt beschrieben [1]:

- 1.) Blasenströmung: Sie entspricht der vertikalen Strömung. Die einzelnen Gasblasen bewegen sich aufgrund der Schwerkraft überwiegend im oberen Teil der Rohrleitung
- 2.) Pfropfenströmung: Sie entspricht der Strömung in vertikalen Rohrleitungen. Die Pfropfenblasen bewegen sich aufgrund der Schwerkraft im oberen Teil des Rohrquerschnitts.
- 3.) Schichtströmung: Bei kleinen Phasengeschwindigkeiten tritt eine glatte Phasengrenzfläche zwischen den Phasen auf.
- 4.) Wellenströmung: Wenn die Geschwindigkeit der Gasphase einer Schichtströmung weiter steigt, bilden sich Wellen an der Flüssigkeitsoberfläche.

- 5.) Schwallströmung: Wächst die Geschwindigkeit der Gasphase einer Wellenströmung weiter an, entstehen Flüssigkeitsschwallen, welche den gesamten Rohrquerschnitt mit Flüssigkeit ausfüllen. Zwischen diesen Schwallen befindet sich ein Flüssigkeitsfilm.
- 6.) Schaumströmung: Diese entspricht der instabilen Schaumströmung in vertikalen Rohrleitungen.
- 7.) Ringströmung: Bei dieser Strömung bildet sich ein Gaskern, wie bei der vertikalen Ringströmung. Aufgrund der Schwerkraft ist der Flüssigkeitsfilm unregelmäßig über dem Rohrquerschnitt verteilt.
- 8.) Tröpfchenströmung: Wird die Geschwindigkeit der Gasphase einer Ringströmung weiter erhöht, wird die flüssige Phase in Form von kleinen Tröpfchen von der konstant strömenden Gasphase mitgerissen.

Soll der Druckverlust berechnet werden, der in Rohrleitungen mit ausgeprägter Zweiphasenströmung auftritt, reicht das in Kap. 1 angesprochene homogene Modell nicht mehr aus (bis  $\varepsilon < 0,05$  anwendbar), da die Reibungsdruckverluste zwischen den beiden Phasen zu berücksichtigen sind. Für diese Berechnungen werden Schlupf- und Drift-Modelle verwendet. Bei den Schlupf-Modellen wird davon ausgegangen, dass die Verhältnisse der Phasen zueinander vom Quotienten der Leerrohrgeschwindigkeiten der flüssigen und der gasförmigen Phase abhängen. Dagegen basieren die mathematischen Ansätze der Drift-Modelle auf der Abweichung der Phasengeschwindigkeit von der Gemischgeschwindigkeit. Um die komplexen Vorgänge zwischen den beiden Phasen beschreiben zu können, wurden eine Reihe von Schlupf- und Drift-Modellen entwickelt, die sich auf bestimmte Gültigkeitsbereiche (Stoffwerte, Massendampfanteile, Drücke, Temperaturen) beschränken. Diese Bereiche resultieren aus der Abhängigkeit der Parameter, die eine Zweiphasenströmung charakterisieren, von den Stoffwerten der beiden Phasen. Eine Reihe dieser Modelle wurden in [2] zusammengefasst.

Für einige dieser Modelle wurden Parameter definiert, die auf die Dichte und dynamische Viskosität der Phasen bezogen und damit unabhängig von diesen sind. In Strömungskarten werden die Strömungsformen dargestellt, die sich für bestimmte Parameter ergeben. In Abb. 2.3, ist als Beispiel eine Strömungskarte dargestellt, in der die Leerrohrgeschwindigkeiten von Wasser und Luft als bestimmende Parameter benutzt wurden.

Ein Teil der mathematischen Gleichungen, die zur Modellierung der Vorgänge in Zweiphasenströmungen, wie der Phasenverteilung, dienen, wurden empirisch ermittelt. Um den Einfluß der bestimmenden Parameter zu ermitteln, sind Messverfahren notwendig, die dem dreidimensionalen Charakter der Zweiphasenströmung gerecht werden. Messdaten die integral über dem Rohrquerschnitt ermittelt wurden, sind für realistische Modelle nicht mehr ausreichend. Daher müssen Messprinzipien benutzt werden, die eine dreidimensionale physikalische Größe, wie die Verteilung der Phasen in der Zweiphasenströmung, wiedergeben können. Für diese Messungen werden verschiedene tomographische Messverfahren verwendet, deren Messwerte sich in ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung unterscheiden.

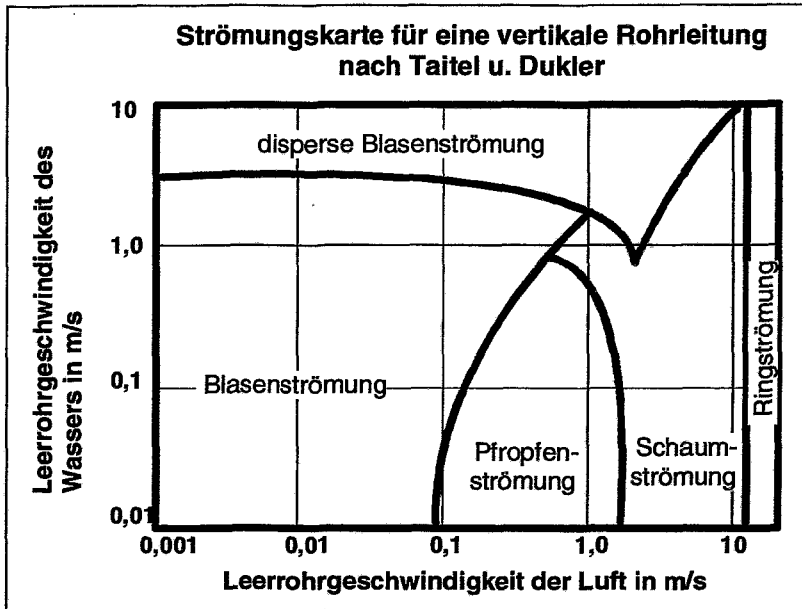


Abb. 2.3, Strömungskarte [3] einer vertikalen Strömung nach Taitel u. Dukler

## 2.2 Messtechnik für Zweiphasenströmungen

Die Gamma- und die Röntgentomographie sind Messverfahren, bei denen elektromagnetische Strahlung eingesetzt wird. Die Anwendbarkeit dieser Verfahren zur Visualisierung der Phasenverteilung in einer Zweiphasenströmung, wird durch die zeitliche Auflösung begrenzt. Die Verwendung von Szintillatoren und der Aufbau der Messeinrichtungen lassen nur eine geringe Messfrequenz zu. Das Messprinzip beruht auf der Schwächung der Strahlung. Daher kann die Auflösung durch die Verwendung einer höheren Strahlungsintensität verbessert werden. Hier wird eine Grenze durch den hohen gerätetechnischen Aufwand gesetzt, der durch gesetzliche Vorschriften des Strahlenschutzes notwendig wäre.

Optische Messverfahren verwenden weißes oder kohärentes Licht. Sie setzen die Transparenz des Rohrleitungsabschnitts voraus, in welchem die Phasenverteilung ermittelt werden soll. Zu der begrenzten zeitlichen Auflösung kommt bei diesen Verfahren die Grenze der Transparenz der Strömung, welche mit steigender Blasenzahl abnimmt. Gleiches gilt für Ultraschall-Messverfahren bei denen mit steigender Blasenzahl die Interpretation der Messsignale und damit die Rekonstruktion der Verteilung schwieriger wird. Um die Phasenverteilung in Rohrleitungen mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung zu ermitteln, sind die genannten Verfahren ungeeignet.

Prinzipiell geeignet sind kapazitive und konduktive Messverfahren, welche die unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften der zu untersuchenden Phasen ausnutzen.



Die kapazitive Tomographie nutzt die unterschiedliche Dielektrizität der Phasen. Diese führt zu einer Änderung des elektrischen Feldes im empfindlichen Volumen zwischen zwei Elektroden, wenn sich die Phasenverteilung in der Strömung ändert. Kapazitive Sensoren bestehen aus mehreren Elektroden, die außerhalb der Rohrleitung peripher um das Messvolumen verteilt sind. Dadurch können rotierende elektrische Felder erzeugt werden. Zwischen jeweils zwei Elektroden wird die Kapazität gemessen.

Aus den Messwerten die während einer Umrundung des empfindlichen Volumens durch das elektrische Feld ermittelt wurden, wird mit Hilfe von Rekonstruktionsverfahren die Phasenverteilung ermittelt. Durch die Nichtlinearität des elektrischen Feldes sind der Genauigkeit der ermittelten Verteilung Grenzen gesetzt. Ein Vorteil der kapazitiven Tomographie ist das berührungslose und rückwirkungsfreie Messen der Phasenverteilung in der Zweiphasenströmung. [4]

Konduktive Messverfahren beruhen auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Phasen oder Komponenten eines Gemischs. Prinzipiell wird dafür an zwei Elektroden, zwischen denen sich das Gemisch befindet, eine Spannung angelegt und die Änderung des elektrischen Stroms gemessen. Es ist auch möglich einen Strom fließen zu lassen und den Potentialabfall zwischen den Elektroden zu messen. Zwischen den Elektroden und dem Gemisch besteht somit ein direkter Kontakt. Konduktive Messverfahren sind dementsprechend nicht berührungslos. [5]

Bei der Ermittlung der Phasenverteilung in Zweiphasenströmungen durch konduktive Messverfahren wurden bspw. Nadelsonden verwendet. Diese können die Leitfähigkeit aber nur in einem kleine begrenzten Volumen innerhalb der Strömung ermitteln. Um die Verteilung der Phasen zu untersuchen, müssen mehrere Sonden über die Rohrwandung in die Strömung eingebracht werden. Damit wird die räumliche Auflösung der Sensoren durch den Umfang der Rohrleitung begrenzt, an welchem die Sonden angebracht werden.

Um die räumliche Auflösung des konduktiven Messverfahrens zu erhöhen, können mehrere parallele Elektrodendrähte in Form von Gittern gleichmäßig über den gesamten Strömungsquerschnitt verteilt werden. Um die momentane lokale Leitfähigkeit des Zweiphasengemischs zu ermitteln wird die Änderung des Stroms gemessen, die zwischen jeweils zwei Elektrodendrähten auftritt, wenn an einem ein Potential angelegt wird.

Ein Sensor der auf diesem Verfahren basiert wurde von Mewes in [5] vorgestellt. Dieser Gittersensor besteht aus drei parallelen Elektrodenebenen, die in einem Abstand von 3mm zueinander und quer zur Strömungsrichtung angeordnet sind. Jede Ebene besteht aus 29 Drähten mit einem Durchmesser von 0,1mm. Zwischen den Elektrodendrähte besteht ein Abstand von 2mm. Die Gitterebenen sind jeweils um einen Winkel von  $60^\circ$  versetzt, wodurch drei Projektionsebenen für die Phasenverteilung entstehen. Bei diesem Sensor wird die Leitfähigkeit zwischen zwei benachbarten Elektrodendrähten gemessen. Damit werden 28 linear unabhängige Messwerte pro Projektionsebene ermittelt. Aufgrund der begrenzten Anzahl der Projektionsflächen ist das für die Rekonstruktion der Phasenverteilung benötigte Gleichungssystem unterbestimmt, was zu einer verminderten Güte der Rekonstruktion führt.

Darauf aufbauend wurde im Institut für Sicherheitsforschung am FZ Rossendorf ein eigener Gittersensor entwickelt, aus dessen Messdaten ohne eine Bildrekonstruktion die Phasenverteilung ermittelt werden kann. Dieser Sensor wurde von Prasser in [6] vorgestellt.

Dieser Gittersensor erlaubt eine hohe zeitliche und räumliche Visualisierung der Gasverteilung in einer Zweiphasenströmung. Der Unterschied zum Sensor von Mewes [5] besteht darin, dass dieser Gittersensor aus zwei um  $90^\circ$  versetzten Elektrodenebenen besteht. Die Leitfähigkeit wird lokal an den Kreuzungspunkten der Elektrodendrähte der beiden Ebenen gemessen. Die Auflösung der Visualisierung wird damit durch den Abstand der Elektroden bestimmt.

Der Aufbau und die Wirkungsweise dieses Gittersensors wird in dem folgenden Kapitel beschrieben. Anwendungsbeispiele sollen diese Ausführung ergänzen, bevor auf die Untersuchung der Genauigkeit des Sensors und die Beeinflussung der Strömung durch die Drähte eingegangen wird.

### 3. Gittersensoren

#### 3.1 Aufbau und Wirkungsweise

Der am Institut für Sicherheitsforschung des FZ Rossendorf in den vergangenen Jahren entwickelte Gittersensor, erlaubt eine hochauflösende Visualisierung von Zweiphasenströmungen. Er ermöglicht die Messung des momentanen lokalen Gasanteils und damit die Bestimmung der Phasenverteilung im Querschnitt eines Strömungskanals. [7]

Das Messprinzip des Gittersensors beruht auf der Ermittlung der momentanen lokalen elektrischen Leitfähigkeit. Für die gasförmige Phase ist diese gleich Null und dementsprechend kleiner als die Leitfähigkeit der flüssigen Phase in dem zu untersuchenden Zweiphasengemisch. Mit diesem Sensor kann die Verteilung von Flüssigkeiten mit einer unterschiedlichen Konzentration an Ionen, z.B. Salzlösung und Wasser, in einer Gemischströmung ermittelt werden.

Es wurden bereits Gittersensoren für unterschiedliche Anwendungszwecke, z. B. für den Einsatz unter experimentellen oder industriellen Bedingungen, und für verschiedene Rohrleitungsgeometrien, z.B. für NW50 und NW100, sowie für rechteckige Kanalquerschnitte, gebaut. Die Gittersensoren unterscheiden sich in ihren Abmessungen, den für die Elektroden benutzten Werkstoffen und der Art und Weise wie und wo die Elektroden befestigt sind. Der prinzipielle Aufbau, dem das Messverfahren zugrunde liegt, ist bei allen Sensoren identisch. In den folgenden Abschnitten soll der Aufbau an einem Prototyp des Gittersensors (Abb. 3.1) für eine Rohrleitung NW 50 erläutert werden [7].

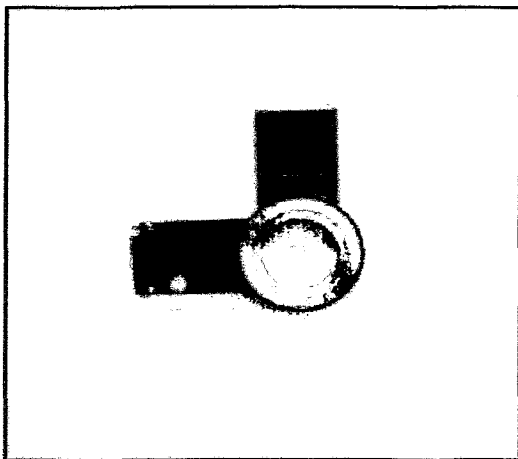


Abb. 3.1, Prototyp des Gittersensors (NW 50)

Der Sensor besteht aus zwei parallelen, sich quer zur Strömungsrichtung befindenden, Gitterebenen, die in einem Abstand von 1,5mm zueinander angeordnet sind. Jede Ebene besteht aus 16 parallelen Elektrodendrähten, die gleichmäßig über den Querschnitt verteilt sind. Aufgrund des Einsatzgebietes, vorzugsweise in Wasser-Dampf- und Wasser-Luft-Gemischen, werden die Elektroden aus einem korrosionsbeständigem Material hergestellt. Für den Prototyp wurden Edelstahldrähte mit einem Durchmesser von 0,125mm verwendet. [7]

Die beiden Gitterebenen sind um einen Winkel von  $90^\circ$  versetzt. Der Abstand zwischen den Drähten einer Ebene beträgt 3mm. Sie sind gegeneinander und gegen die leitfähige Wandung isoliert. Die Elektrodendrähte sind in einen Metallring eingesetzt. Dieser kann mit einer Flanschverbindung direkt in eine Rohrleitung mit der Nennweite NW50 eingebaut werden. Die Elektroden sind einseitig nach außen geführt und mit einer Vorspannung von 6N auf je einer Leiterplatte pro Gitterebene befestigt. Die Vorspannung ist notwendig, um einer Verformung des Gitters bei Erwärmung und aufgrund der Strömungskräfte entgegenzuwirken. Auf den beiden Leiterplatten befinden sich Sub-D-Buchsen, an denen die Signalübertragungsleitungen angesteckt werden.

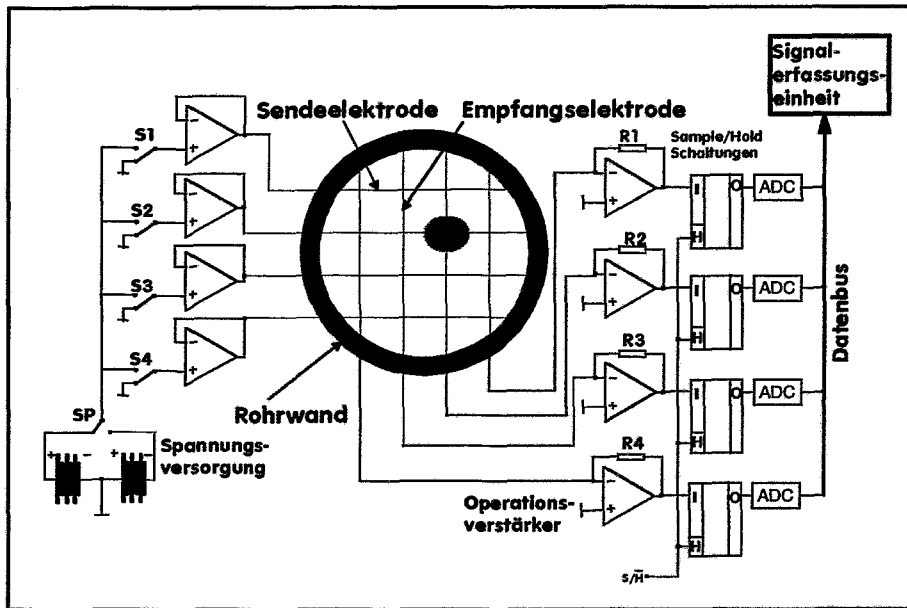


Abb. 3.2, Schema der Messwertfassung [7]

In Abb. 3.2 ist die Messwertfassung schematisch dargestellt. Eine der beiden Gitterebenen dient als Sender, die andere als Signalempfänger. Beide sind mit einer Elektronik verbunden, deren Aufgabe die Signalgebung und -verarbeitung ist. Mittels einer Multiplexschaltung, die in der Abb. 3.2 vereinfacht durch die Schalter S1 bis S4 dargestellt ist, werden die Elektroden der Sendeebene nacheinander mit kurzen Spannungsimpulsen beaufschlagt, indem die Schalter S1 bis S4 kurz schließen und öffnen. Dadurch fließt in allen Empfangselektroden ein elektrischer Strom, der proportional zur elektrischen Leitfähigkeit des Zweiphasengemischs im empfindlichen Volumen des entsprechenden Kreuzungspunkts von Sendelektrode und Empfangselektrode ist. Dieser Strom wird durch einen Operationsverstärker (OPV) in eine Spannung umgewandelt. Der Ausgang eines OPV wird durch eine Sample/Hold-Schaltung abgetastet.

Die dabei gemessenen Spannungswerte werden in einem Analog-Digital-Wandler (ADC) in digitale Signale umgewandelt, die danach über einen Datenbus an den Datenerfassungsrechner übermittelt werden. Diese Prozedur wird nacheinander für alle Sendelektroden durchgeführt. Dadurch wird zeilenweise die elektrische Leitfähigkeit des Gemischs über dem gesamten Rohrleitungsquerschnitt ermittelt.

Ein Problem bei der Anwendung ist das Übersprechen von Signalen, sowohl zwischen den Sendeelektroden, als auch den Empfangselektroden. Wird eine Sendeelektrode mit einem Spannungsimpuls beaufschlagt, so fließt auch ein Strom zu den benachbarten Sendeelektroden, wodurch an diesen ein Spannungspotential auftritt. Durch dieses Potential kommt es zwischen den Sende- und den Empfangselektroden zu einem unerwünschten Stromfluß. Dadurch nimmt der Kontrast der Signale quer zur Ausrichtung der Sendeelektroden ab. Weiter kann es zu einem Stromfluß zwischen benachbarten Empfängerelektroden mit unterschiedlichem Potential kommen, was den Signalkontrast quer zur Ausrichtung der Empfangselektroden schwächt. Deshalb wird bei der Ansteuerung einer Sendeelektrode das Potential der benachbarten Sendeelektroden mit einer Treiberschaltung auf Null gehalten. Das Potential wird abgebaut, indem die Übersprechströme, die durch dieses Potential entstehen, sofort über eine niedrige Ausgangsimpedanz abgeführt werden. Durch den Einsatz von Impedanzwandlern, die niederohmigen Messverstärkern entsprechen, wird das Potential an den Empfangselektroden auf Null gehalten. Damit befinden sich alle Elektroden des Sensors außer der gerade angesteuerten auf dem gleichen Potentialniveau. Da somit keine unerwünschten Ströme auftreten können, entspricht die räumliche Auflösung des Messverfahrens der Dichte der Messpunkte über dem Rohrleitungsquerschnitt. [7]

Wird bei konduktiven Messverfahren eine Gleichspannung verwendet treten Polarisations- und Elektrolyseeffekte auf. Um diese zu vermeiden wird für diese Messverfahren eine Wechselspannung benutzt. Für den Gittersensor wird eine Spannung in der Form bipolarer symmetrischer Rechteckimpulse verwendet, mit denen die Sendeelektroden nacheinander beaufschlagt werden.[7]

Vor jeder Messung ist eine Kalibrierung des Sensors notwendig. Dabei werden zum einen die Spannungswerte für die flüssige Phase (Wasser)  $U_{W,i,j}$  und zum anderen die Werte für die Gasphase (Luft)  $U_{L,i,j}$  für jeden Messpunkt  $i,j$  ermittelt. Diese liegen der Berechnung des lokalen Gasanteils  $\varepsilon_{i,j}$  (Gl. 6.1) zugrunde. Die Werte für Wasser werden ermittelt, indem die Rohrleitung vollständig mit Wasser gefüllt wird. Durch eine Unterbrechung der Signalerfassung erhält man die Spannungswerte für die Luft, da deren Leitfähigkeit Null ist und damit ausgeschlossen wird, dass durch flüssige Rückstände an den Elektroden die Werte verfälscht werden. Die Kalibrierwerte werden in Form von Matrizen im Speicher des Datenerfassungsrechners hinterlegt.

### 3.2 Beispiele für den Einsatz der Gittersensoren

Für verschiedene experimentelle und industrielle Anwendungen wurden Gittersensoren mit unterschiedlichen Abmessungen und Eigenschaften gebaut. Die folgende Übersicht soll einige Beispiele für die Einsatzmöglichkeiten des Sensors aufzeigen.

- 1.) Der Drei-Ebenen-Gittersensor (Abb. 3.4) wurde zur Messung von Wasser-Luft-Gemischen in einem Versuchskanal mit rechteckigem Querschnitt (Kantenlängen 20 und 100mm) gebaut. Mit ihm sollten neben den bereits beschriebenen Messungen der

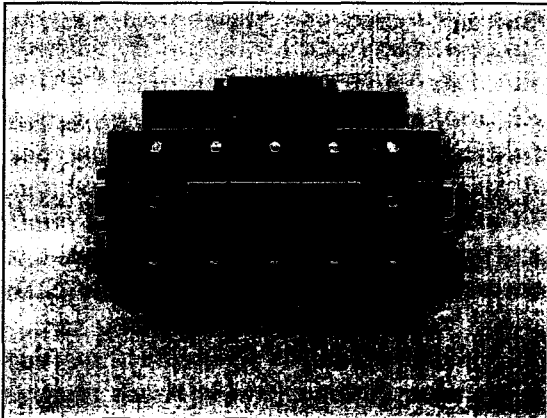
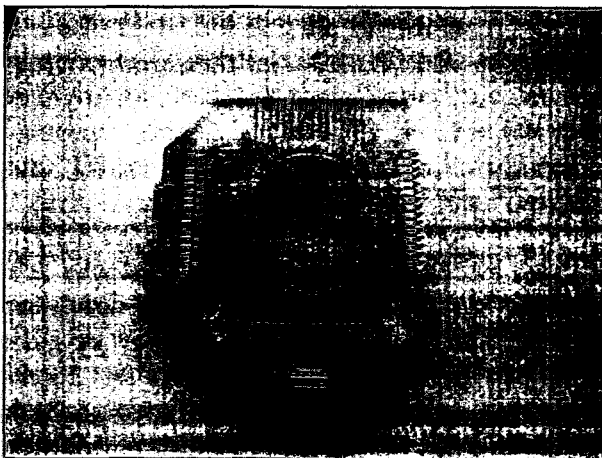


Abb. 3.4, Drei-Ebenen-Gittersensor

Gasanteile und damit der Phasenverteilung, gleichzeitig die Blasengeschwindigkeiten ermittelt werden. Dafür besitzt dieser Sensor drei Gitterebenen, wobei die 1. und 3. Ebene aus jeweils 8 und die 2. Ebene aus 32 Drähten mit einem Drahtdurchmesser von 0,05mm bestehen. Die erwartete Blasengeschwindigkeit beträgt 0,5m/s, die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Versuchskanal wird mit 0,05m/s angegeben. Alle Messungen finden bei Atmosphärendruck statt.

- 2.) Zur Ermittlung der Verteilung von Flüssigkeiten mit einer unterschiedlichen Ionenkonzentration in einem Zweikomponentengemisch wurde der Gittersensor in Abb. 3.5 gebaut. Er wurde im Rossendorfer Vermischungsmodell „ROCOM“ eingesetzt, in dem zur Untersuchung von



Vermischungsvorgängen Reinwasser und Kochsalz-lösung verwendet wurde. Der Sensor ist für einen Querschnitt mit dem Durchmesser 150mm gebaut. Er besitzt 2 Gitterebenen mit jeweils 16 Elektrodendrähten aus Edelstahl, die in einer Plexiglasummantelung befestigt sind. Er wird bei Umgebungsbedingungen eingesetzt.

Abb. 3.5, Gittersensor des Vermischungsmodells

- 1.) Um die Auflösung des Messverfahrens zu erhöhen, wurde ein Gittersensor für NW 50 mit 24 Elektrodendrähten pro Gitterebene gebaut. Für diesen wurden Drähte mit einem Durchmesser von 0,1mm verwendet, die in einem Abstand von 2mm gleichmäßig über dem Querschnitt angeordnet sind. Sie wurden auf einer Leiterplatte mit einer Vorspannung von jeweils 4N befestigt. Um zusätzlich Angaben über die Temperatur an der Messstelle zu erhalten lässt sich in diesen Gittersensor ein Thermoelement einbauen.

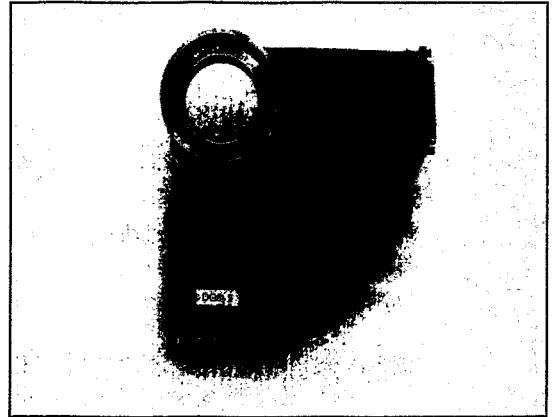
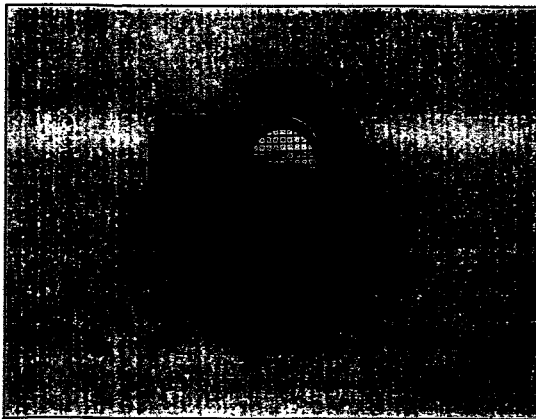


Abb. 3.6, Gittersensor (NW50) mit 2x24 Elektrodendrähten

- 2.) Für einen industriellen Einsatz müssen die Sensoren höheren Belastungen standhalten. Deshalb wurden bei diesen Gittersensoren anstelle der Drähte, stabile Stäbchen aus



ausenitischem Stahl verwendet, die einen linsenförmigen Querschnitt zur Verringerung des Strömungswiderstands besitzen. Die Abb. 3.8 zeigt einen „schweren“ Gittersensor für NW50. Er besteht aus zwei Gitterebenen mit jeweils 8 Stahlelektroden und ist für einen Druck bis 7MPa und eine Temperatur bis 80°C ausgelegt. [7]

Abb. 3.7, „schwerer“ Gittersensor (NW50)

- 3.) Ein weiterer „schwerer“ Gittersensor für hohe mechanische Belastungen (Abb. 3.9) wurde für den Einsatz bei Druckstoßversuchen [7] gebaut. Dieser Sensor besteht aus zwei Gitterebenen mit jeweils 16 linsenförmigen Stahlelektroden. Er ist für Drücke bis 7MPa und Temperaturen bis 80°C ausgelegt.

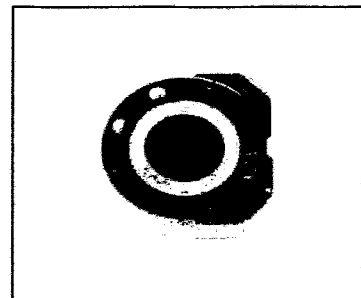


Abb. 3.8, „schwerer“ Gittersensor (NW100)

### 3.3 Untersuchung der Messgenauigkeit des Gittersensors

Im Kap. 3.2 wurden einige Beispiele für die Anwendung verschiedener Gittersensoren in unterschiedlichen Einsatzgebieten beschrieben. Die seit der Entwicklung des Sensors gemachten Erfahrungen belegen, dass das Messverfahren zur Ermittlung der Phasenverteilung anwendbar ist. Allerdings fehlten bisher Untersuchungen des Sensors, die Aussagen über die Genauigkeit der gemessenen lokalen Gasgehalte zuließen. Daraus ergab sich die Aufgabenstellung dieser Arbeit, deren Grundanliegen die Untersuchung der Genauigkeit des Messverfahrens war.

Für diese Untersuchungen wurde ein Gittersensor verwendet, dessen Elektrodrähte in die transparenten Wände eines Experimentierkanals aus Plexiglas eingebaut waren (Abb. 4.3). Durch den Plexiglas Kanal war es möglich, die Gasblasen der Zweiphasenströmung in der Umgebung des Gittersensors zu beobachten. Dieser Sensor bestand aus zwei Gitterebenen im Abstand von 1,5mm mit jeweils 16 Elektrodrähten, die einen Drahtdurchmesser von 0,12mm besaßen. Diese waren gleichmäßig über den quadratischen Kanalquerschnitt von 50x50mm verteilt. Zwischen den Elektroden bestand demzufolge ein Abstand von 3,125mm. Der Kanal war nur für Messungen bei Umgebungsbedingungen geeignet.

Aus den gemessenen momentanen lokalen Gasanteilen konnten mit Hilfe von Rechnerprogrammen die Blasenvolumen bestimmt werden. Um Informationen über die Genauigkeit der lokalen Gasanteile zu erhalten, sollten die berechneten Blasenvolumen mit den tatsächlich vorhandenen verglichen werden. Es wurde angenommen, dass der Gittersensor größere Blasenvolumen ermitteln würde. Das Problem bestand darin, dass es keine Möglichkeit gab, Blasen mit einem definierten Volumen zu erzeugen, damit über einen direkten Vergleich die Genauigkeit des Sensors hätte bestimmt werden können. Deshalb musste ein Verfahren gefunden werden, mit dessen Hilfe ein Vergleich der Blasenvolumen möglich war.

Für diese Aufgabe bot sich die Beobachtung der Strömung mit einer Hochgeschwindigkeits-Videoeinrichtung an (Kap. 4.3). Ein Vorteil dieses Verfahrens bestand darin, dass es die Strömung nicht zusätzlich beeinflusste. Aus den Videoaufnahmen konnten die Höhe und der Durchmesser jeder einzelnen Blase ermittelt und daraus das Blasenvolumen berechnet werden. Dieses wurde mit den Blasenvolumen aus den Messwerten des Gittersensors verglichen. Damit war es möglich Aussagen über dessen Genauigkeit machen zu können.

Für die Ermittlung der Blasenvolumen aus den lokalen Gasanteilen ergab sich eine untere Grenze durch die räumliche Auflösung des Gittersensors. Die sich dadurch ergebende Frage war, bis zu welcher Blasengröße aus den gemessenen Gasanteilen noch genaue Volumina berechnet werden können, wenn der Blasendurchmesser kleiner als die Schrittweite des Elektrodrähtgitters ist. Um darauf eine Antwort zu finden, wurden die im Gittersensor gemessenen maximalen Gasanteile der Blasen den Blasendurchmessern, die aus den Videoaufnahmen ermittelt wurden, gegenübergestellt.

Der Gittersensor befand sich zur Ermittlung der Phasenverteilung direkt im Strömungsquerschnitt. Dadurch kommt es zu Wechselwirkungen zwischen den Elektrodrähten und der Zweiphasenströmung. Eine weitere Aufgabe bestand daher in der Untersuchung der Beeinflussung der Strömung durch den Gittersensor, sowie die Rückwirkung auf dessen Messergebnisse.



## 4. Aufbau der Versuchsanordnung

### 4.1 Die Testschleife

Im Institut für Sicherheitsforschung am FZ Rossendorf befindet sich eine Versuchsschleife für Zweiphasenströmungen (Abb. 4.1). Sie dient zum Testen und Verifizieren von Sensoren, die im Institut entwickelt wurden. Darüber hinaus können auch Untersuchungen der Strömungen und ihrer Parameter durchgeführt werden. In den Publikationen des Institutes [8] wird die Testschleife als „MTLoop“, Meaurements Test Loop, bezeichnet.

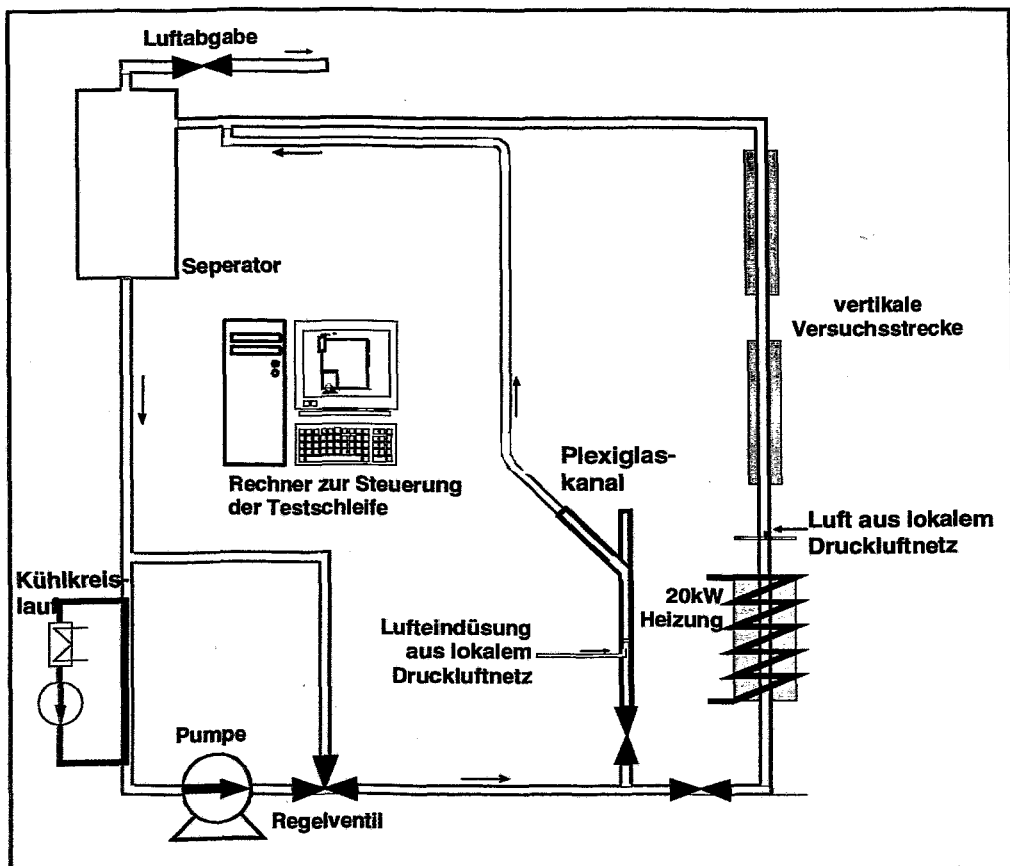


Abb. 4.1, schematische Darstellung der Testschleife

Die Testschleife besitzt eine Gesamtlänge von ca. 18m. Sie erstreckt sich über zwei Stockwerke des Institutsgebäudes und ist somit überall zugänglich. Kernstück der Schleife bildet eine 5767mm lange vertikale Versuchsleitung mit einem Innendurchmesser von 51,3mm. Im oberen Teil dieser Leitung werden die Sensoren zur Untersuchung der Zweiphasenströmung installiert.

Im unteren Teil befindet sich eine 20kW-Heizung zur Erwärmung der Strömung und zur Erzeugung von Dampf. Darüber wurden Düsen eingebaut, die zum Einperlen von Luft aus dem lokalen Druckluftnetz in die Leitung dienen. Die maximal erreichbare Leerrohrgeschwindigkeit der Luft,  $j_{L,max}$ , in der Testschleife beträgt 14m/s.

An entscheidenden Punkten der gesamten Anlage, z.B. am Versuchsleitungsein- und -austritt, sind Druck- und Temperaturmessstellen, sowie Durchflussmesser vorhanden. Die Schleife kann bis zu einem Druck,  $p_{max}$ , von 2,5MPa und einer Temperatur,  $T_{max}$ , von 225°C betrieben werden [8].

Die Wasserströmung in der Schleife wird durch eine Umwälzpumpe erzeugt, die sich am tiefsten Punkt der Schleife befindet. Die maximal erreichbare Leerrohrgeschwindigkeit,  $j_{w,max}$ , beträgt 4m/s. Das Wasser wird über ein Dreiwegeventil von unten durch die Versuchsstrecke gepumpt. Es ist als Regelventil ausgeführt und dient, zusammen mit der Drehzahlregelung der Pumpe, zur Einstellung eines definierten Volumenstroms. Am höchsten Punkt der Testschleife ist ein Separator installiert. Er trennt die Gasphase vom Wasser. Unter anderem soll dadurch verhindert werden, dass Messergebnisse verfälscht werden, indem sich bspw. Gasblasen schon vor der Einperlung von Luft in der Strömung befinden, und sich durch die längere Einlaufstrecke für diese Blasen in der Versuchsleitung andere Strömungsformen ergeben.

Zwischen dem Separator und der Pumpe ist ein Kühlsystem eingebaut. Es dient zur Absenkung der Parameter (Temperatur, Druck) bei Verwendung der Heizung und der Einstellung stabiler Strömungsverhältnisse in der Schleife. Bei den Messungen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführt worden sind, wurde mit Umgebungsbedingungen gearbeitet.

Die gesamte Anlage wird über einen Rechner bedient und kontrolliert. Alle Daten, welche die Messstellen liefern, werden über ihn ausgegeben und in einem Protokoll gespeichert. Die benötigten Volumenströme für Wasser und Luft werden über den Rechner eingegeben. Dieser steuert die Drehzahlregelung der Umwälzpumpe und die Regelventile der Druckluftanlage.

An der unteren horizontalen Leitung der Testschleife befindet sich eine Abzweigung, auf welcher ein Plexiglaskanal angeflanscht ist (Abb. 4.1). In diesem befindet sich der Gittersensor, der so von außen beobachtet werden kann. An diesem Plexiglaskanal wurden die Messungen zur Untersuchung der Genauigkeit des Gittersensors durchgeführt. Der Aufbau der Versuchseinrichtung war nicht Bestandteil dieser Arbeit. Für die Messungen konnte auf vorhandene Einrichtungen, z.B. Testschleife, Plexiglaskanal mit Gittersensor und Videoeinrichtung, zurück gegriffen werden.

Die für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit nicht benötigte vertikale Versuchsleitung wurde mittels Kugelhahn von der Testschleife getrennt. Dadurch wurde die gesamte Wasserströmung durch den Kanal gefördert, welcher über eine flexible Schlauchleitung mit dem Separator verbunden ist.

Bei der Verwendung des Plexiglaskanals musste die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in der Schleife auf 1,2m/s begrenzt werden. Da sich durch die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal ein Druckverlust einstellt, der vor allem durch die Querschnittsverengung am oberen Kanalende hervorgerufen wird, und der Plexiglaskanal nur für Atmosphärendruck ausgelegt wurde, ist diese Begrenzung notwendig. Höhere Geschwindigkeiten würden zu einem höheren Gesamtdruck im Kanal führen, der Leckagen und im schlimmsten Fall die Zerstörung des Plexiglaskanals zur Folge hätte.

## 4.2 Der Plexiglaskanal mit integrierten Gittersensor

Zur Untersuchung der Genauigkeit des Gittersensors wurden Luftblasen bei der Bewegung durch die Gitterebenen mit Hilfe einer Videoeinrichtung beobachtet. Dafür wurde ein durchsichtiger Plexiglaskanal genutzt, der eine direkte Beobachtung der Strömung erlaubte. Dieser Kanal wurde in die Testschleife (Abb. 4.1) integriert.

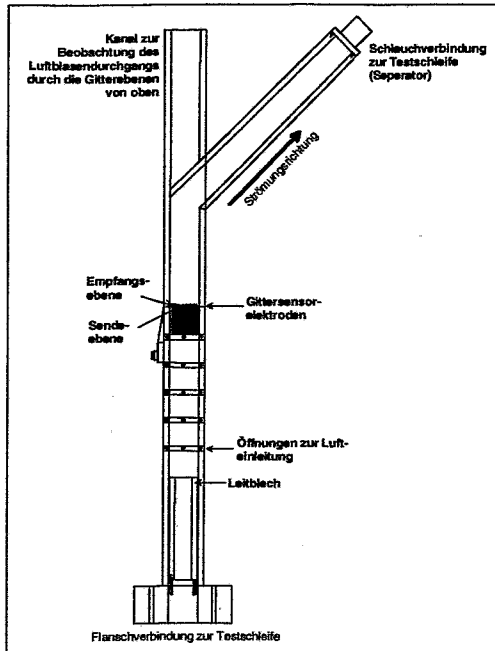


Abb. 4.2, schematische Darstellung des Plexiglaskanals

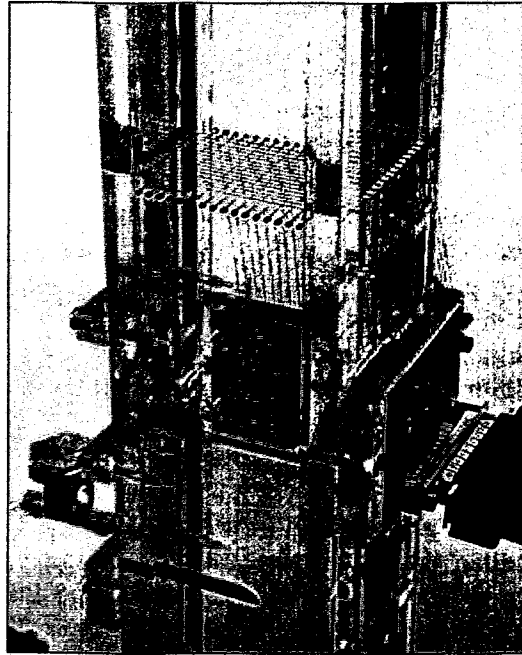


Abb. 4.3, Gittersensor im Plexiglaskanal

Der Plexiglaskanal (Abb. 4.2) besitzt einen quadratischen Querschnitt von 50x50mm und ist insgesamt 1070mm hoch. Davon entfallen 70mm auf den zylindrischen Sockel, der einen Durchmesser von 170mm hat. Er dient zur Installation des Plexiglaskanals durch eine Flanschverbindung an der Abzweigung der Testschleife.

Der Gittersensor (Abb. 4.3), welcher im Aufbau dem im Kapitel 3. vorgestellten entspricht, wurde bei 500mm, ab der oberen Sockelkante, in den Kanal eingebaut. Die beiden Elektrodengitter haben einen Abstand von 1,5mm zueinander und bestehen aus jeweils 16 Drähten, die direkt in die Wände des Plexiglaskanals eingeklebt und einseitig nach außen geführt wurden (Abb. 4.4). Die Elektrodenenden einer Ebene sind außerhalb des Kanals auf jeweils eine Leiterplatte aufgelötet, auf der sich eine Anschlußbuchse für die Signalleitungen befindet. Über diese wird der Sensor mit der Elektronik verbunden (Abb. 4.5).

An einer Seite des Kanals befinden sich 55mm unterhalb des Sensors fünf Bohrungen mit einem Durchmesser von 6mm. Die Bohrungen sind untereinander im Abstand von 50mm angeordnet. Sie dienen dem Einbau verschiedener Düsen, durch welche die zu beobachtenden Luftblasen eingepert werden. Der Abstand zwischen den Bohrungen dient zur Variation der Einlaufängen für die Blasen. Die Düsen werden, wie auch die Einperlungen der Versuchsstrecke über das lokale Druckluftnetz versorgt.

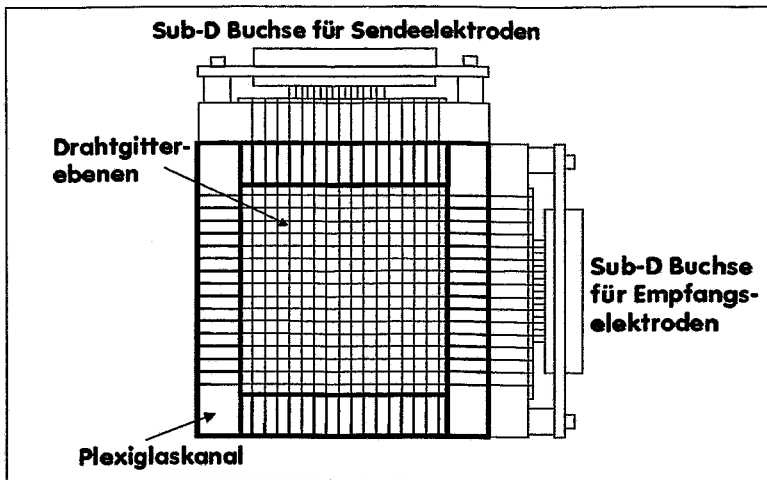


Abb. 4.4, Schematische Darstellung des Gittersensor (Draufsicht)

Eine direkte Einstellung des Luftvolumenstroms, der für die Messungen dieser Arbeit benötigt wird, über den Schleifenrechner hat sich als ungünstig erwiesen, weil es nicht möglich war, auf diese Weise Einzelblasen zu erzeugen, die für die Untersuchungen notwendig waren (Kap. 5.1). Daher wurde zusätzlich ein Regelventil eingebaut, was einen konstanten Luftdruck gewährleistet. Zur Erzeugung der Einzelblasen diente eine Schlauchklemme. Mit dieser konnte der Querschnitt des flexiblen Verbindungsschlauches zwischen Ventil und Düse verengt werden. Dadurch wurde der Volumenstrom der Luft soweit verringert bis nur einzelne Blasen aus der Düse austreten konnten.

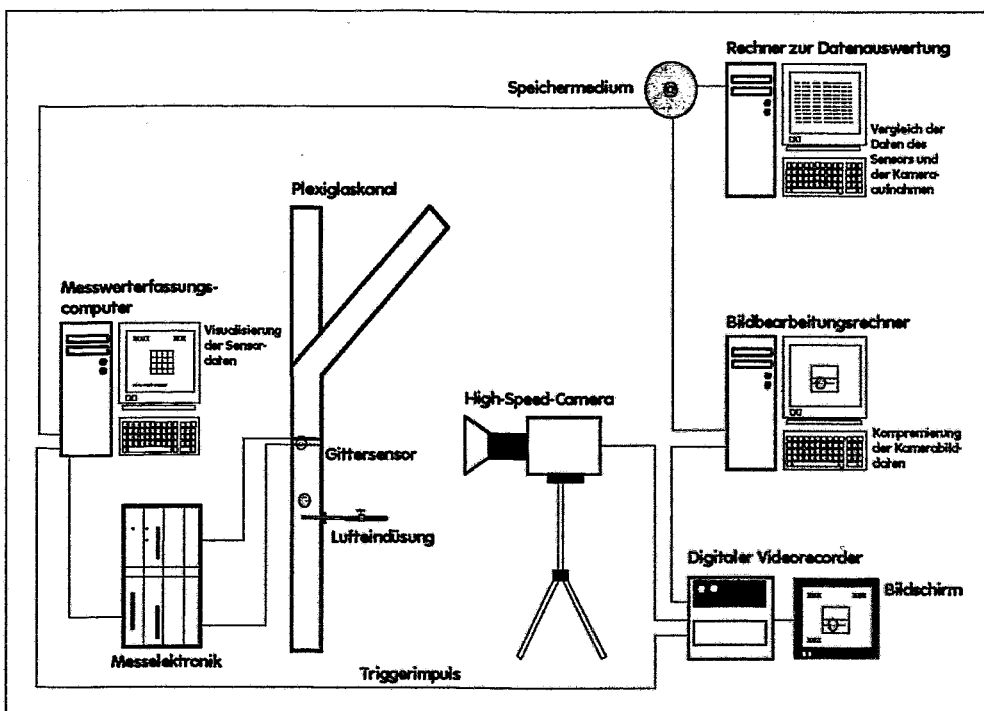


Abb. 4.5, Schema des Versuchsaufbaus

Zur Vergleichmäßigung der Wasserströmung, befindet sich ein 200mm langes Leitblech im unteren Teil des Plexiglaskanal. Es dient dazu Turbulenzen, die durch die Umlenkung der Wasserströmung an der Abzweigung und durch die Querschnittsänderungen in Schieber und in dem Kanal, entstehen, auszugleichen. Für die Messungen wird eine gleichmäßige Strömung benötigt, in der sich die Luftblasen möglichst senkrecht nach oben bewegen. Das ist vor allem für die Bestimmung der Blasendurchmesser durch die Kameraaufnahmen von Bedeutung.

Weiter gehören die Messelektronik und der Datenerfassungsrechner des Gittersensors zum Versuchsaufbau. Die Messelektronik ist direkt mit dem Sensor und dem Rechner verbunden (Abb. 4.5). Alle benötigten Geräte, außer dem Schleifenrechner, sind an einem Versuchsplatz im unteren Stockwerk direkt neben der Schleife aufgebaut und können von einem Arbeitsplatz aus bedient werden.

Prinzipiell läßt der Plexiglaskanal zwei Beobachtungsmöglichkeiten zu. Einmal kann der Blasendurchgang, wie in den Versuchen zu dieser Arbeit, von der Seite betrachtet werden. Zum zweiten ist es möglich den Durchgang von oben zu beobachten. Dafür wurde der Plexiglaskanal im oberen Drittel abgewinkelt (Abb. 4.2) und ein zweiter Kanal aufgesetzt. Dieser kann mit Wasser gefüllt werden, um die Brechung des Lichtes zu kompensieren, und somit die Draufsicht auf den Gittersensor zu ermöglichen.

Neben der Beobachtung der Luftblasen im Kanal von einer Seite aus, was einer zweidimensionalen Ansicht entspricht, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Möglichkeit entwickelt, eine dreidimensionale Beobachtung durchführen zu können. Hierbei werden mit Hilfe eines Spiegelsystems zwei Seiten des Kanals, die sich in einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander befinden, in eine gemeinsame Beobachtungsebene projiziert.

### **4.3 Die Videoeinrichtung**

Der Plexiglaskanal wurde so aufgestellt, das mit Hilfe einer Videokamera der Gittersensor beobachtet werden kann (Abb. 4.6). Bei der Videoeinrichtung handelt es sich um eine Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Kodak, die eine Bildfrequenz bis zu 10.000 Bildern pro Sekunde ermöglicht.

Die Videoeinrichtung besteht aus der digitalen Kamera mit dem entsprechendem Objektiv (Brennweite: 16-100mm) und einem digitalen Videorecorder. Diese Einrichtung wird durch einen Bildverarbeitungsrechner und einen Bildschirm ergänzt (Abb. 4.5). Weiter gehören zwei Laborleuchten und eine Reflektorwand zum Versuchsaufbau. Sie dienen der Beleuchtung des Hintergrundes. Damit wird ein hoher Kontrast zwischen Hintergrund und Luftblase, sowie die notwendige Helligkeit für die Kamerabilder erreicht.

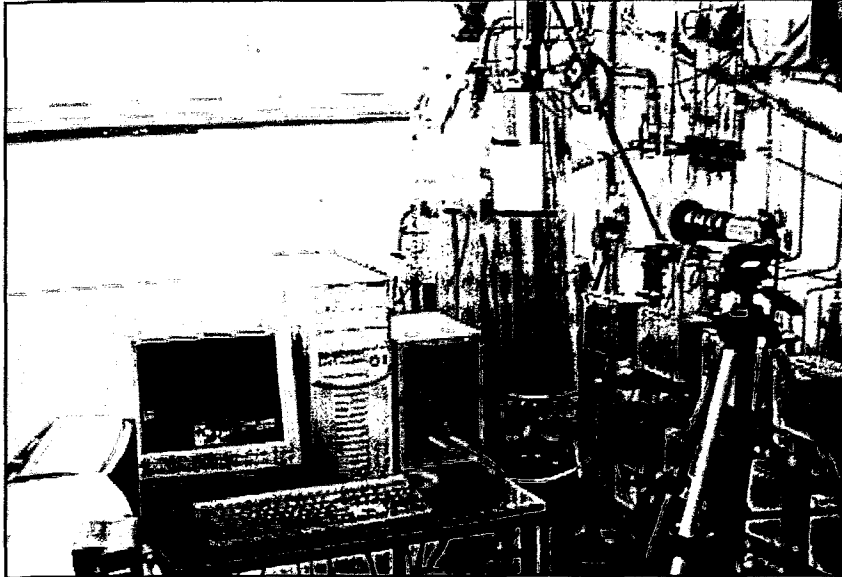
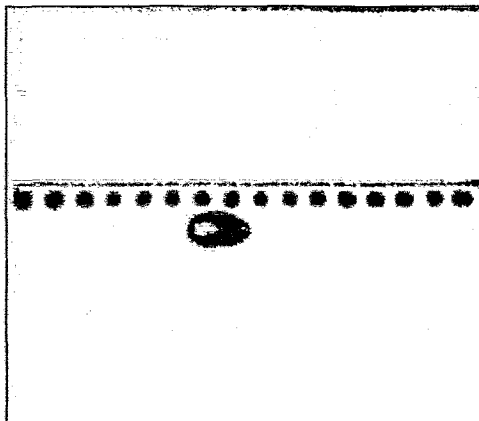


Abb. 4.6, Versuchsstand mit Plexiglaskanal, Gittersensor und Messtechnik

Zur Versuchsdurchführung wird der Videorecorder mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1000 Bildern pro Sekunde betrieben. Das entspricht der Messfrequenz der Gittersensorelektronik, welche bei diesen Experimenten eingesetzt wurde. Die Messung des Gittersensors und die Aufnahme der Videoeinrichtung werden synchron gestartet. Dadurch wird über den zeitlichen Bezug ein direkter Vergleich der Daten beider Methoden möglich. Der Beginn einer Messung wird mittels Tastendruck über den Datenerfassungsrechner des Gittersensors initiiert. Der Rechner und der Videorecorder sind direkt über eine Signalleitung miteinander verbunden (Abb. 4.5). Vom Datenerfassungsrechner wird über diese Leitung, beim Start der Messung, ein Triggersignal an den Videorecorder gesendet, welcher daraufhin die Aufnahme startet.

Bei der genannten Aufnahmegeschwindigkeit liefert die Videoeinrichtung insgesamt 8738 Bilder, die in Form von Bitmap-Files (Abb. 4.7) gespeichert werden können. Diese Bilder bestehen aus 256x240 Pixeln.



Werden größere Aufnahmegeschwindigkeiten gewählt, verringert sich die Bildgröße aufgrund der Speicherkapazität des Videorecorders. Gespeichert wird jeweils die Sequenz einer Messung. Diese kann über einen Bildschirm in beliebiger Geschwindigkeit betrachtet werden, was eine Abschätzung der Qualität der Messung erlaubt. Die gewonnen Bildsequenzen werden auf die Festplatte des Bildverarbeitungsrechners übertragen und von dort aus ausgewertet.

Abb. 4.7, Bitmap-File aus 256x240 Pixeln

## 5. Vorbereitung und Durchführung der Versuche

### 5.1 Vorbereitungen an der Testschleife

Die Durchführung der Versuche war Bestandteil der Aufgaben, welche im Rahmen dieser Arbeit gelöst werden sollen. Der Aufbau der gesamten Versuchseinrichtung wurde im Kapitel 4. beschrieben. Für eine möglichst hohe Genauigkeit der Messungen war es wichtig, die genannten Komponenten der Anlage aufeinander abzustimmen.

Eine Aufgabe bestand darin, Qualitätsmerkmale für die Strömung und die Kamerabilder zu finden und die Einrichtungen, bzw. Parameter, entsprechend einzustellen. Für die Strömung verlangten die verwendeten Auswertungsverfahren für die Ergebnisse des Gittersensors zwei Bedingungen.

- 1.) Es mussten Einzelblasen mit verschiedenen Durchmessern erzeugt werden. Das bedeutet zuerst einmal, dass sich vor der Luftindüsung im Kanal keine Gasanteile in der Strömung befinden durften. Dafür musste der Füllstand am Separator regelmäßig überprüft werden. Der Separator ist für die Trennung der beiden Phasen nach dem Passieren der Versuchsleitung bzw. des Plexiglaskanals verantwortlich (Kap. 4.1). Wenn der Füllstand zu niedrig ist, findet die Trennung nicht vollständig statt.
- 2.) Bei jeder Messungen mussten mindestens 20 bis 30 Blasen in der kurzen Messdauer von 8,738s erzeugt werden, um aussagefähige Ergebnisse mit einer guten statistischen Sicherheit zu gewinnen.

Zur Vorbereitung einer Messung gehörte die Einstellung der Strömungsgeschwindigkeiten von Wasser und Luft am Rechner der Testschleife Da hier nicht auf Erfahrungswerte zurück gegriffen werden konnte, war durch Probieren festzustellen, bei welchen Parametern die geforderten Bedingungen erfüllt sind.

Die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers wurde zwischen 0,05m/s und 0,8m/s stufenweise variiert (Tab. 5.1). Ab 0,9m/s war es nicht mehr möglich einzelne Luftblasen zu erzeugen. Ab dieser Geschwindigkeit bildeten sich am Düsenausgang „Fähnchen“, die in unregelmäßigen Zeitabständen abrissen und Blasenwolken bildeten. Für jede Messung wurden konstante Strömungsgeschwindigkeiten eingestellt, die durch den Schleifenrechner kontrolliert wurden. Für die Luft wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,0033m/s vorgegeben. Davon wichen die in Tab. 5.1 entsprechend gekennzeichneten Messungen ab. Mit Hilfe des Regelventils und der Schlauchklemme wurde der Luftvolumenstrom so beeinflusst, dass Einzelblasen in ausreichender Anzahl erzeugt werden konnten.

Der Volumenstrom der Luft wurde erst eingestellt, wenn der Wert der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers nahezu konstant blieb. Der Grund dafür ist die Abhängigkeit des Gesamtdruckes am Düsenaustritt von der Strömungsgeschwindigkeit. Der Gesamtdruck am Düsenaustritt setzt sich aus dem statischen Druck durch die Wassersäule in der Testschleife und dem dynamischen Druck aus der Strömung des Wassers zusammen. Der Druck am Düsenaustritt beeinflusste die Bildung von einzelnen Luftblasen.

Zur Variation der Blasengröße wurden drei verschiedene Düsen mit unterschiedlichem Austrittsquerschnitt (Abb. 5.1) nacheinander in den Plexiglaskanal eingebaut. Dafür musste

der Kanal jeweils entleert werden. Im Gegensatz zur Versuchsstrecke der Testschleife mit fest verlegten Rohren, wird am Kanal die Luft vom Druckluftnetz über eine flexible Schlauchleitung zum Düsen Eintritt geleitet. Die Größe der Düsen und die Konstruktion des Austrittsquerschnitts wurde durch die Bohrungen im Plexiglskanal, welche 6mm beträgt, begrenzt. Die Düse mit dem mittleren Austrittsquerschnitt wurde nach einem eigenen Entwurf angefertigt.

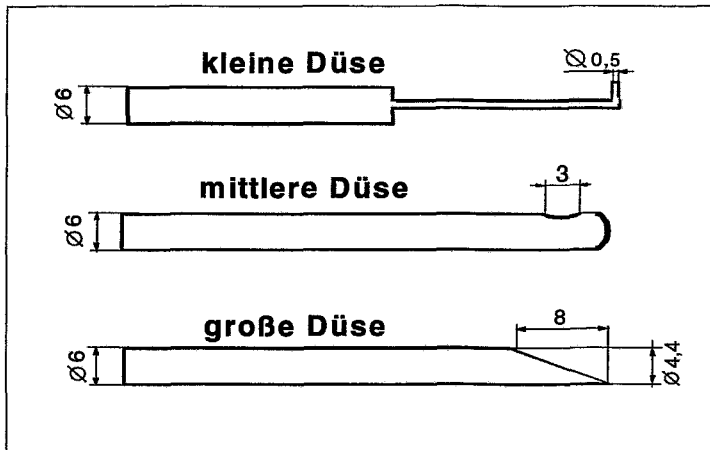


Abb. 5.1, verwendete Luftdüsen

Einen Überblick über alle durchgeführten Messungen und den dabei verwendeten Parametern liefert die Tabelle 5.1. Der Filename der Messung, bspw. **19060004**, bezieht sich auf das Datum der Versuchsdurchführung (19.06.2000) und eine laufende Nummer (04). Diese Bezeichnung wurde gewählt um eine genaue Zuordnung der Messwerte herstellen zu können und um die Daten von anderen Gittersensormessungen zu unterscheiden, die vor allem an der Versuchsstrecke der Schleife durchgeführt worden sind.

Strömungs- geschwindigkeit des Wassers in m/s	kleine Düse	mittlere Düse	große Düse
0,05	19060004	19060001	16060001
0,11			16050001
0,20	19060005	19060002	15060001/16060003
0,33			17050001*
0,40	22060003	19060003	16060002
0,50			22060002
0,60	20060001	20060003	22060001
0,67			17050002*
0,80	20060002	20060004	

\* Strömungsgeschwindigkeit der Luft (0,0053 m/s) weicht von den anderen Messungen (0,0033 m/s) ab

Tab. 5.1, durchgeführte Messungen mit verwendeten Parametern



## 5.2 Einstellung der Videoeinrichtung

Um die Bilder der aufgenommenen Videosequenzen auswerten zu können, war eine genaue Einstellung der Kamera auf den Gittersensor im Plexiglaskanal notwendig. Dieser Vorgang wurde online über den Bildschirm der Videoeinrichtung kontrolliert. Für die aufzunehmenden Kamerabilder wurden ebenfalls Qualitätsmerkmale definiert, welche eine Auswertung mit Rechnerprogrammen ermöglichen sollten. Sie sind in der Abb. 5.2 dargestellt.

- 1.) Die gesamte Bildbreite von 240 möglichen Bildpunkten musste ausgenutzt werden. Das bedeutet, die innere Kantenlänge des Kanals von 50mm musste mit der Bildbreite möglichst übereinstimmen.
- 2.) Bei der Auswertung der Kameraaufnahmen sollte eine Helligkeitskorrektur des Bildhintergrunds vorgenommen werden, dafür war im Bild ein Feld zu bestimmen, in welchem während der Messung keine Blasen auftreten konnten. Dafür boten sich einige Millimeter der transparenten Kanalwand an, die im Bild zu sehen waren.
- 3.) Die Bildzeile im Spalt zwischen den beiden Gitterebenen des Sensors musste deutlich erkennbar sein, da sie für die Auswertung aus dem Bild herausgetrennt werden sollte. Dafür ist die Kamera so einzustellen, dass diese Zeile parallel zur Unterkante des Bildes verläuft.
- 4.) Der Sensor befand sich in der oberen Hälfte des Bildes, weil weitere Bildzeilen unterhalb des Sensors zur Auswertung benutzt werden sollten.
- 5.) Die Elektroden der unteren Gitterebene verliefen parallel zur Blickrichtung. Daher waren von ihnen nur die Punkte sichtbar, an denen sie in den Kanal eingeklebt wurden. Die beiden Klebepunkte einer Elektrode mussten sich im Bild überdecken, damit der Abstand zwischen benachbarten Elektroden beobachtet werden konnte.
- 6.) Die Helligkeit, die Bildschärfe und der Kontrast zwischen Hintergrund und Luftblase mussten optimal eingestellt werden. Neben den Einstellungen am Kameraobjektiv, z.B. durch die Blende, wurden hierfür die Laborlampen und die Reflektorwand benutzt. Die Blasen mussten sich im Bild deutlich vom Hintergrund unterscheiden. Lichtreflexe auf der Blasenoberfläche waren zu vermeiden. Das hieß, die Lampen durften nicht direkt den Plexiglaskanal beleuchten.

Vor jeder Messung waren die Einstellungen zu überprüfen und wenn notwendig zu korrigieren.

## 5.3 Versuchsdurchführung

Nach den genannten Vorbereitungen wurden die Messungen durchgeführt. Dafür wurde zuerst der Gittersensor kalibriert, indem nacheinander die Spannungswerte für Wasser und Luft aufgenommen wurden. Danach folgte ein synchroner Start von Gittersensormessung und Videoaufnahme.

Um diesen zu gewährleisten, war der Videorecorder über eine Signalleitung mit dem Datenerfassungsrechner des Sensors verbunden, von dem die Messung per Tastendruck initialisiert und gleichzeitig ein Triggersignal an den Videorecorder übertragen wurde. Dieses Signal startete die Videoaufnahme. Jede Messung dauerte 8,738 Sekunden. Diese Messzeit war durch die Speicherkapazität des Recorders vorgegeben.

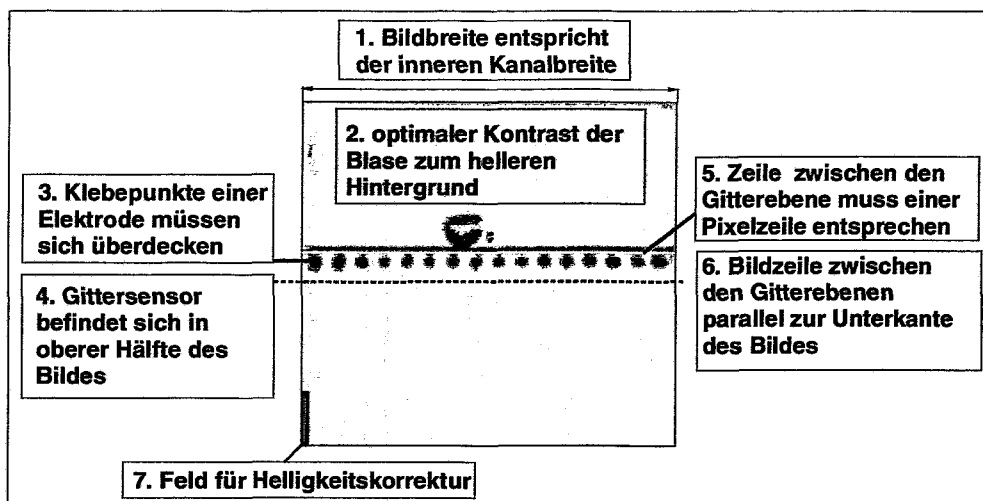


Abb. 5.2, Qualitätsmerkmale der Kamerabilder

Nach abgeschlossener Messung konnte die Videosequenz im Monitor und die Visualisierung der Messdaten des Gittersensors auf dem Bildschirm des Datenerfassungsrechners betrachtet werden. Ein erster optischer Vergleich gab Auskunft darüber, ob die Daten für eine weitere Auswertung geeignet waren. Dabei mussten vor allem die vorher angeführten Bedingungen erfüllt sein. Danach konnten Daten, unter Angabe des die Messung betreffenden Filenamens, gespeichert werden.

Bei den erfassten Daten des Gittersensors handelte es sich um die momentanen lokalen Spannungswerte  $U_{ij}$  der betrachteten Strömung und bei den Videoaufnahmen um die 8738 Bilder pro Messung. Alle Daten, sowohl die des Sensors, als auch die der Kamera wurden auf CD gespeichert. Zum einen waren an den verwendeten Rechnerprogrammen zur Auswertung Veränderungen vorgenommen worden, die eine Wiederholung der Auswertung notwendig machten. Zum anderen sollte eine zusätzliche Sicherheit aufgrund des engen Zeitrahmens für diese Arbeit geschaffen werden.

Insgesamt wurden 19 Messreihen aufgenommen, von denen 15 für eine Auswertung geeignet waren. Die übrigen Messungen dienten dazu, die gewählten Einstellungen oder die Änderungen in den Auswertungsprogrammen zu überprüfen. Daraus geht hervor, dass die Durchführung der Versuche ein iterativer Prozeß war, bei dem die genannten Bedingungen für die Strömung die Art und Weise der Auswertung beeinflussten und rückwirkend diese Bedingungen durch die gewonnenen Ergebnisse korrigiert wurden.

## 6. Datenauswertung

### 6.1 Auswertung der Sensormessdaten

Jede der durchgeführten Messungen lieferte eine Folge von Spannungswerten  $U_{i,j,t}$ , die proportional zur momentanen lokalen elektrischen Leitfähigkeit  $\gamma_{i,j,t}$  des Zweiphasengemischs innerhalb des empfindlichen Volumens eines Kreuzungspunktes von Sende- und Empfängerelektrode sind. Beim Sensor im Plexiglaskanal handelt es sich dabei um 256 Kreuzungspunkte, von denen jeder 1000 Spannungswerte in einer Sekunde liefert. Die Spannungswerte einer Messung werden zusammen mit den Werten der Kalibrierung gespeichert und können mit den Rechnerprogrammen ausgewertet werden.

Zur Ermittlung der Phasenverteilung, bzw. wie in dieser Arbeit benötigt, der Blasen volumens, ist es in einem ersten Schritt notwendig, aus den gemessenen Spannungswerten momentane lokale Gasanteile zu berechnen. Näherungsweise wird hierbei von einer Proportionalität zwischen der lokalen Leitfähigkeit des Zweiphasengemischs und dem lokalen Gasanteil ausgegangen [3]. Der lokale Gasanteil  $\varepsilon_{i,j}$  berechnet sich demzufolge aus:

$$\varepsilon_{i,j,t} = \frac{U_{W,i,j} - U_{i,j,t}}{U_{W,i,j} - U_{L,i,j}} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Dabei sind  $U_{W,i,j}$  und  $U_{L,i,j}$  die Spannungswerte der Kalibrierung für jeweils 100% Wasser und 100% Luft eines Kreuzungspunktes  $i,j$ . Durch die Berechnung erhält man eine dreidimensionale Matrix von Werten, wobei die zwei Dimensionen  $i$  und  $j$  die Koordinaten der Kreuzungspunkte wiedergeben und die dritte Dimension  $t$  den Zeitabstand  $\Delta t$  angibt, in dem die Messungen durchgeführt worden sind. Dieser Zeitabstand beträgt hier 1ms und resultiert aus der Messfrequenz von 1000Hz.

Aus der dreidimensionalen Matrix von Gasgehaltswerten, sollen in einem nächsten Schritt die einzelnen Blasen identifiziert werden. In einem Rechnerprogramm wird dafür ein Algorithmus verwendet, der innerhalb der Matrix nach einem lokalen Gasgehaltsmaximum sucht. Der Algorithmus beginnt bei einem Gasgehaltsmaximum von  $\varepsilon_{max}=100\%$ . Ist ein Suchlauf abgeschlossen, wird das Gasgehaltsmaximum jeweils in 1%-Schritten verringert, und ein neuer Suchlauf gestartet. Wurde in der Matrix das Volumenelement mit dem höchsten lokalen Gasanteil gefunden, wird dieses als „Kern“ einer Gasblase definiert. Von dieser Zelle ausgehend, beginnt ein Füllalgorithmus alle benachbarten Volumenelemente zu untersuchen. Ist der Wert des lokalen Gasanteils eines Volumenelements höher als ein definierter Schwellwert  $\varepsilon_{threshold}$ , dessen Bedeutung wird im folgenden Abschnitt erläutert, wird dieser Gasanteil zum Kern der Blase gezählt.

Sind alle Volumenelemente gefunden, die den Kern einer Blase bilden, werden durch eine Agglomeration die Volumenelemente untersucht, die diesen Kern umgeben. Ist der Gasgehaltswert eines dieser Volumenelemente größer als Null aber kleiner als der definierte Schwellwert, wird der Gasanteil dieses Elements zur Blase gezählt, wenn der Gasgehaltswert eines benachbarten Volumenelements größer als der Schwellwert ist. Damit werden die Anteile am Rand einer Gasblase berücksichtigt, die nur einen geringen Teil des Volumens des betreffenden Volumenelements einnehmen.

Werden keine Gasanteile mehr ermittelt, die Bestandteil dieser Gasblase sein können, wird allen bisher gefundenen lokalen Gasanteilen dieser Blase der Wert 0 zugewiesen. Damit werden sie bei einem weiteren Suchlauf des Algorithmus nicht mehr berücksichtigt. So werden alle Blasen, die der Gittersensor registriert hat identifiziert. [3]

Die Vorgabe eines Schwellwerts ist notwendig, da dem Nutzsignal ein Signalrauschen überlagert ist, das hauptsächlich von äußeren Störquellen ausgeht, die über die Sensorelektroden und die Signalleitungen eingekoppelt werden. Dazu kommt das Rauschen der Analogbauelemente und Einstreuungen vom Digitalteil der Schaltung auf den Analogteil. In der Abb. 6.1 ist der Verlauf des in den Gasgehalt umgerechneten Sensorsignals für einen ausgewählten Messpunkt (Sendeelektrode 8, Empfängerelektrode 1) dargestellt. Dabei wurde ein Zeitbereich ausgewählt, in dem keine Blasen registriert wurden. Die Signalschwankungen sind folglich ausschließlich auf das Signalrauschen zurückzuführen. Die Amplitude, der in den lokalen Gasanteil umgerechneten Stromänderung, beträgt Peak-zu-Peak etwa 6-7 % (Abb. 6.1). Ähnliche Verhältnisse können für alle Messungen vorausgesetzt werden, da sie mit den gleichen Geräten und unter ähnlichen äußeren Bedingungen durchgeführt wurden. Der gewählte Schwellwert beträgt 20% und stellt somit einen genügend großen Sicherheitsabstand zwischen den zur Auswertung benutzten Gasgehaltswerten und denen die auf das Signalrauschen zurückzuführen sind, her. Eine detaillierte Erläuterung des Schwellwerts und seines Einflusses auf die Messergebnisse befindet sich in [9].

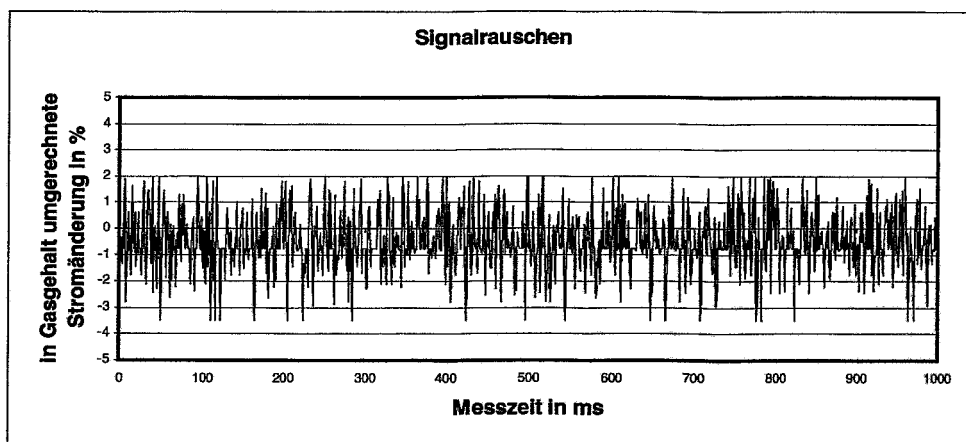


Abb. 6.1, Verlauf des Störsignals für einen ausgewählten Zeitbereich

Für jede Gasblase werden charakteristische Werte, die im folgenden Abschnitt erläutert werden, ermittelt. Diese werden in einer Tabelle gespeichert, in der für jede Blase eine Zeile erstellt wird (z.B.: Tab. 6.1). Bei den in den Tabellen verwendeten Symbolen für diese Werte handelt es sich nicht um Formelzeichen, sondern um die in den Rechnerprogrammen benutzten Bezeichnungen.

Folgende Werten werden durch das Rechenprogramm ermittelt :

- 1.) Die Koordinaten des Schwerpunktes der Blase ( $i_m$ ,  $j_m$ ,  $k_m$ ). Der Wert  $i_m$  gibt die Differenz zwischen dem Zeitpunkt des Beginns der Messung und dem Zeitpunkt der Erfassung der Blase durch den Sensor in ms wieder. Die Werte  $j_m$  und  $k_m$  sind die bereits in mm umgerechneten Angaben der Position des Schwerpunktes der Blase im Kanalquerschnitt beim Durchströmen des Sensors.

im	jm	km	mi	mj	mk	mr	max	v	r	n	deps
7976.5	36.9	27.8	4.9	3.8	4.1	5.3	85	182	3.51	246	0.0008319
1591.2	34.4	28.1	4.8	4.3	3.6	5.2	82	182	3.52	234	0.0008337
65.0	37.6	30.4	5.1	4.3	3.7	5.4	79	212	3.70	265	0.0009683
2110.0	37.2	28.6	5.1	3.9	3.6	5.2	79	161	3.37	242	0.0007363
3107.9	38.1	24.9	4.1	3.7	4.5	5.1	78	169	3.43	234	0.0007743
4222.3	40.9	25.2	4.6	4.2	3.6	5.1	76	151	3.30	230	0.0006893
5753.8	33.4	26.8	4.2	4.1	3.7	4.9	75	183	3.52	228	0.0008395
6863.2	36.8	28.8	6.2	4.2	3.9	6.0	75	193	3.58	288	0.0008816
1142.7	35.4	29.2	4.2	4.0	3.8	4.9	74	181	3.51	236	0.0008288
503.9	32.7	29.4	4.2	3.5	4.6	5.0	73	181	3.51	238	0.0008284
8649.3	37.0	32.5	5.7	4.5	3.4	5.7	73	201	3.63	263	0.0009200
5279.9	38.2	26.8	5.9	4.0	4.2	5.8	70	210	3.69	286	0.0009629
3805.2	32.9	30.6	5.3	3.7	4.0	5.4	69	201	3.63	255	0.0009187
2630.4	35.3	25.7	5.1	4.0	3.4	5.1	68	160	3.37	214	0.0007336
7519.9	36.1	25.6	4.7	4.2	3.8	5.2	68	179	3.49	242	0.0008181
4747.0	36.5	30.8	5.8	3.5	3.2	5.3	66	129	3.13	217	0.0005892
6398.3	35.7	32.9	4.7	4.0	4.3	5.3	66	202	3.64	268	0.0009245

Tab. 6.1, Wertetabelle für die vom Programm ermittelten Gasblasen,  
z.B.: 19060002

- 2.) Die Werte  $m_i$ ,  $m_j$ ,  $m_k$  und  $m_r$  stellen die Angabe eines auf die entsprechende Koordinatenachse ( $m_i, m_j, m_k$ ) bzw. auf den Radius ( $m_r$ ) bezogenen Momentes der Gasblase dar. Diese Werte werden ebenfalls in mm angegeben.
- 3.) Der maximale Gasgehalt  $\epsilon_{max,Bl}$  wird durch den Parameter max angegeben. Hierbei handelt es sich um den lokalen Gasanteil der sogenannten „Keimzelle“, welcher in % angegeben wird.
- 4.) Unter  $v$  steht das Blasenvolumen. Die Einheit dieses Volumens ist  $mm^2ms$ . Der Grund dafür ist der Bezug der Messung auf die Blasengeschwindigkeit  $u_{Bl}$ . Deshalb wird dieses Volumen in den folgenden Abschnitten als bezogenes Volumen  $\tilde{V}_{Bl}$  bezeichnet. Es wird verwendet, um den Fehler, der durch die Abhängigkeit von der Blasengeschwindigkeit in die Messergebnisse einfließt, auszuschließen. Durch Multiplikation mit der Blasengeschwindigkeit  $u_{Bl}$  ist die Ermittlung des Volumens  $V_{Bl}$  der Blase in  $mm^3$  möglich.
- 5.) Aus dem bezogenen Volumen läßt sich ein bezogener Blasendurchmesser  $\tilde{d}_{Bl}$  berechnen. Dabei geht man von einem Kugelvolumen  $\tilde{V}_K$  anstelle von  $\tilde{V}_{Bl}$  aus und benutzt die Formel [3]:

$$\tilde{d}_{Bl} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot \tilde{V}_{Bl}} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Aus diesem bezogenen Blasendurchmesser wird der Wert unter  $r$ , der bezogene Radius  $\tilde{r}_{Bl}$ , berechnet. Wie  $\tilde{d}_{Bl}$  wird auch der Radius in der Einheit  $mm^{2/3} ms^{1/3}$  angegeben. Ein echter Durchmesser  $d_{Bl}$  kann durch die Multiplikation mit der dritten Wurzel aus der Blasengeschwindigkeit errechnet werden.

- 6.) Der Wert  $n$  entspricht der Anzahl aller Volumenelemente deren lokale Gasanteile zur Blase gehören.

- 7.) Mit  $\text{deps}$  wird der Anteil der Blase am Gesamtgasanteil  $\epsilon$  der Strömung beschrieben. Die Angabe erfolgt in %.

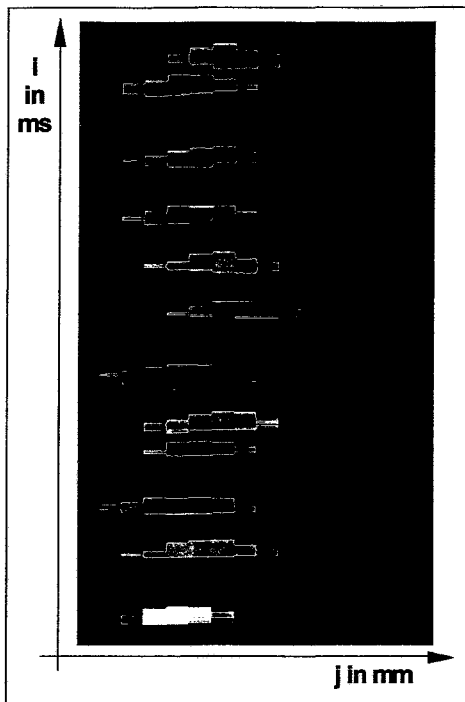


Abb. 6.2, Ausschnitt einer Projektion aus den Sensordaten, z.B.: 17050001

Mit Hilfe weiterer Programme ist es möglich, aus der dreidimensionalen Matrix von Gasgehaltswerten Projektionsbilder einer Strömung zu erzeugen (Abb. 6.2). In diesen Bildern ist der zeitliche Verlauf der Strömung beim Passieren des Gittersensors in einer Seitenansicht dargestellt. Dafür wird unter den Volumenelementen, die sich in Blickrichtung in einer Reihe der Matrix befinden, das mit dem maximalen lokalen Gasanteil bestimmt. Diese Werte werden zeilenweise gesucht und in den Projektionsbildern dargestellt. Die einzelnen Elemente einer Gasblase erhalten eine Identifikationsnummer. Zur Darstellung in den Projektionsbildern wird jeder Blase eine Farbe zugeordnet, die dieser Identifikationsnummer entspricht. Somit werden die Blasen in unterschiedlichen Farben dargestellt (Abb. 6.2), wobei die Intensität der Farbe dem Gasgehaltswert entspricht. Neben der Wertetabelle, dienen diese Projektionsbilder zum Vergleich der Blasengrößen und damit zur Auswertung.

Die Rechnerprogramme, welche zur Berechnung der bezogenen Volumen und Durchmesser, sowie zur Erstellung der Wertetabellen und der Projektionsbilder benutzt wurden, standen für diese Arbeit schon zur Verfügung.

## 6.2 Datengewinnung aus den Kamerabildern

Ziel der Untersuchung war es, aus den Bildsequenzen der Kamera die Volumen der Blasen zu ermitteln, um sie mit den Blasen volumens des Gittersensor zu vergleichen. Das bedeutet, dass aus den einzelnen Bildern Angaben über das Blasen volumens und den Durchmesser, sowie über die Position einer Blase gewonnen werden müssen.

Die zu jeweils einer Messung gehörende Sequenz besteht aus 8738 einzelnen Bildern, welche als Bitmap-Files gespeichert wurden. Jedes Bild besteht aus 256x240 Bildpunkten. Diese Pixel können einen Grauwert zwischen 0 (schwarz) und 255 (weiß) annehmen. Durch ein Rechnerprogramm werden alle Bilddateien nacheinander aufgerufen und bearbeitet.

Dabei werden aus jedem Bild die Pixelzeilen herausgeschnitten (Abb. 6.3), die der Konstruktion der zur Auswertung benötigten Projektionen dienen. Dazu gehört die Zeile zwischen den beiden Gitterebenen, sie bildet den Bezug für weitere Extraktionszeilen, die zur Auswertung benötigt werden.

Die genaue Position der Bezugszeile muß vorher aus einem der Kamerabilder ermittelt und dem Rechnerprogramm mitgeteilt werden, dass die Bilddaten ausgewertet. Im Abstand jeweils von 20 Pixeln werden vier Zeilen unterhalb und eine über der Bezugszeile extrahiert.

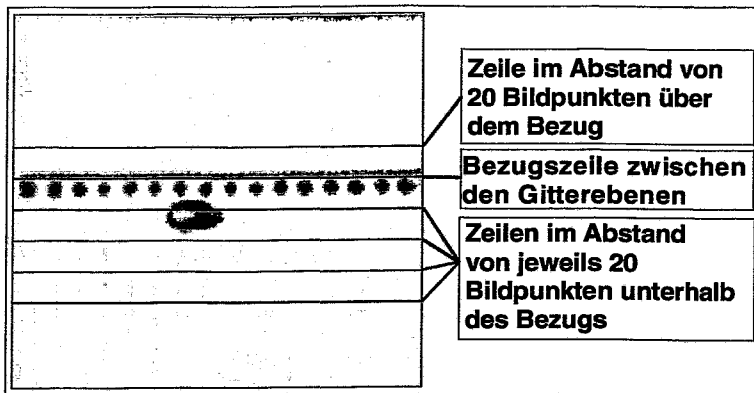


Abb. 6.3, Bitmap-File mit Kennzeichnung der Extraktionszeilen

Die Zeilen, die in den einzelnen Bildern die gleiche Position haben und die aus allen Aufnahmen einer Sequenz herausgeschnitten wurden, werden jeweils hintereinander in einem neuen File gespeichert. Das heißt, es entstehen insgesamt 6 Bilddateien, die eine Projektion des zeitlichen Verlaufs der Strömung aus einer Blickrichtung wiedergeben.

Unter Herausschneiden wird hier das separate Speichern der Helligkeitswerte der Bildpunkte jeweils einer Zeile in einer neuen Bitmap-Datei verstanden.

Die Schnittbilder aus den Kamerabildern setzen sich aus 256x8738 Bildpunkten zusammen. Die 8738 entstehenden Zeilen entsprechen somit der Anzahl der Bilder einer Sequenz. Da die Kamerabilder in einem Abstand von 1ms aufgenommen wurden, stellt jede Zeile in den Schnittbildern ein Zeitintervall von 1ms dar. Des weiteren wird das im Kap. 5 bereits erwähnte Feld mit den Bildpunkten zur späteren Helligkeitskorrektur ausgewertet. Dafür wird aus den Helligkeitswerten der Pixel des betrachteten Feldes ein Mittelwert für jede einzelne Aufnahme gebildet, der in einer weiteren Datei gespeichert wird. Die Projektionen und die Datei mit den Werten zur Helligkeitskorrektur stellen die Eingangsdaten für den folgenden Auswertungsalgorithmus dar.

Durch die Benutzung der Laborlampen zur Ausleuchtung des Plexiglskanals während der Kameraaufnahmen, entstehen in den Bildern horizontale Helligkeits-schwankungen mit einer Frequenz von 100Hz (Abb. 6.6), die durch die 50Hz Sinusschwingung der Wechselspannung hervorgerufen werden. Diese Schwankungen können mit Hilfe der vorher errechneten Mittelwerte in den Schnittbildern beseitigt werden. Der Algorithmus der diese Korrektur in allen Projektionen vornimmt ist in seiner Programmstruktur in Abb. 6.4 dargestellt.

```
...
  for y:=ny_out downto 1 do begin
    readln(fc,mw);
    for x:=1 to nx_out do begin
      pix[y,x]:=round((int(pic_in.pix[y,x])*200)/mw);
      pic_in.pix[y,x]:=pix[y,x];
    end;
  end;
...
```

Abb. 6.4, Programmstruktur der Helligkeitskorrektur

mw entspricht dem Mittelwert der Helligkeitswerte, die aus dem Korrekturfeld jedes Bildes ermittelt wurden.  $\text{pix}[y,x]$  ist der resultierenden Helligkeitswert eines Pixel nach der Korrektur. Die Helligkeit wird auf den Wert 200 normiert, wodurch die Schwankungen korrigiert werden.

Des weiteren entstehen durch die sichtbaren Elektrodendrähte auf den Bildern Längsstreifen (Abb. 6.6). Durch die Erzeugung eines Histogramms, in welchem der Helligkeitswert ermittelt wird, der in einer Pixelspalte in vertikaler Richtung am häufigsten vorkommt, wird eine weitere Korrektur der Helligkeitswerte des Hintergrundes vorgenommen. Die Programmstruktur für diese Histogrammbildung ist in Abb. 6.5 wiedergegeben. Nach den vorgenommenen Korrekturen lassen sich die zu einer sichtbaren Gasblase gehörenden Bildpunkte eindeutig identifizieren.

```
...
for x:=1 to nx_out do for col:=0 to 255 do hist[x,col]:=0;
for x:=1 to nx_out do for y:=1 to ny_out do begin
  col:=cut(pix[y,x]);
  hist[x,col]:=hist[x,col]+1;
end;
for x:=1 to nx_out do begin
  hmax:=0;
  cmax:=0;
  for col:=0 to 255 do if hist[x,col]>hmax then begin
    hmax:=hist[x,col];
    cmax:=col;
  end;
  c0[x]:=cmax;
end;
for x:=1 to nx_out do for y:=1 to ny_out do begin
  pix[y,x]:=abs(c0[x]-pix[y,x]);
  pic_out.pix[y,x]:=cut(pix[y,x]);
end;
...
```

Abb. 6.5, Programmstruktur der Histogrammbildung

Eine weitere Prozedur ordnet den Pixeln, die eine Blase abbilden, eine Identifikationsnummer zu. Dafür werden die Bilder zeilenweise nach Bildpunkten abgesucht, deren Helligkeitswert zwischen 0 (schwarz) und 30 liegt, und die sich somit vom Helligkeitswert der Pixel des Hintergrundes, der ca. 200 beträgt unterscheidet. Die Helligkeitswerte 30 und 200 wurden so festgelegt, dass die Pixel der Blase eindeutig zugeordnet werden können. Diese optimalen Werte wurden ermittelt, indem sie im Rechnerprogramm variiert wurden. Ist ein Bildpunkt gefunden, der zu einer Blase gehört, erhält er zur Wiedererkennung eine laufende Nummer, welche später bei der Darstellung der Blasen in den Projektionsbildern die Farbe definiert, in der die Blase abgebildet wird. Danach werden alle Bildpunkte untersucht, die sich in der direkten Umgebung des zuerst gefundenen Pixel befinden. Ein identifizierter Punkt, erhält die gleiche Identifikationsnummer und gehört somit zu dieser Blase. In seiner Umgebung wird nach weiteren Punkten gesucht. Sind alle zu einer Gasblase gehörenden Pixel gefunden, beginnt die Suche nach der nächsten Blase. So werden alle Gasblasen identifiziert, die durch die Kamera aufgenommen worden sind. Durch diese Prozedur entstehen Projektionen (Abb. 6.7) der Strömung, die mit denen des Gittersensors vergleichbar sind.



Aus den Projektionen der Kamerabilder wird das gesuchte Blasenvolumen ermittelt. Das Problem bei dieser Aufgabe besteht darin, aus einer zweidimensionalen Ansicht einer Blase, also der Projektion des räumlichen Gebildes auf eine Fläche, eine dreidimensionale Größe zu bestimmen. Dafür wurde ein Modell verwendet, welches näherungsweise zu einem Ergebnis führt.

Grundlage ist die Annahme, dass es sich bei einer Blase um einen rotationssymmetrischen Körper handelt. Jede Ansicht einer Blase setzt sich aus einer Anzahl von  $n$  Bildzeilen, die aus  $m$  einzelnen Pixeln bestehen, zusammen (Abb. 6.7).

Es wird angenommen, dass jede Zeile die Seitenansicht eines Zylinders darstellt (Abb. 6.9). Damit setzt sich das Volumen einer Blase aus einer Anzahl von  $n$  Zylindervolumen zusammen, die mit der Anzahl der Zeilen übereinstimmt, die zu einer Blase gehören.

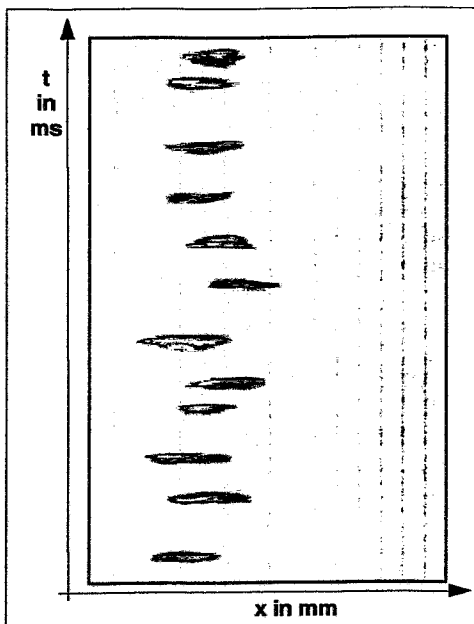


Abb. 6.6, Ausschnitt einer Projektion aus den Kamerabildern, z.B.: 17050001

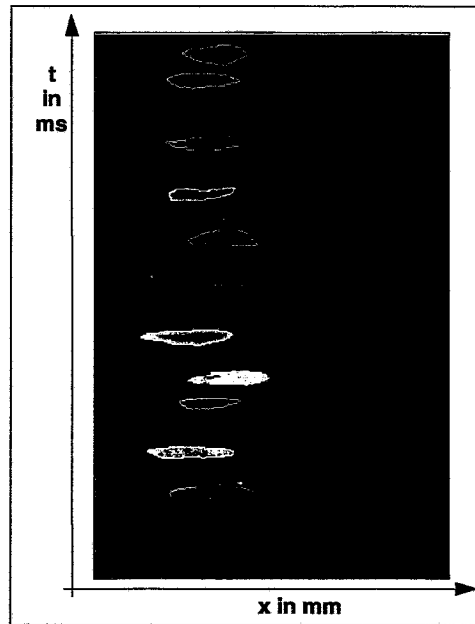


Abb. 6.7, Ausschnitt einer Projektion nach den Korrekturen und der Identifizierung der einzelnen Gasblasen, z.B.: 17050001

Der Durchmesser des Zylinders  $d_z$  ergibt sich aus der Anzahl  $m$  der Bildpunkte, mit der Breite  $\Delta x$ , einer Zeile, die einer Blase zugeordnet werden können. Die Höhe des Zylinders  $h_z$  entspricht dem Zeitschritt  $\Delta t$ . Diese resultiert aus dem Zeitabstand der Kameraaufnahmen und beträgt 1ms. Das Volumen der Blase  $V_{Bl,opt}$  berechnet sich dementsprechend aus (Gl. 6.3):

$$\tilde{V}_{Bl,opt} = \sum_n \frac{\pi}{4} \cdot (\Delta x \cdot m)^2 \cdot \Delta t \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Aufgrund von  $\Delta t$  ergibt sich für das Blasenvolumen  $V_{Bl,opt}$  die Einheit  $\text{mm}^2\text{ms}$ . Das bedeutet, dass hier ebenfalls ein bezogenes Volumen  $\tilde{V}_{Bl,opt}$  berechnet wird. Damit steht eine Größe zur Verfügung, die direkt mit dem bezogenen Blasenvolumen aus den Gittersensordaten verglichen werden kann.

Aus  $\tilde{V}_{Bl, opt}$  lässt sich nach Gleichung (Gl. 6.2) ein bezogener Durchmesser  $\tilde{d}_{Bl, opt}$  berechnen, der ebenfalls eine vergleichbare Größe repräsentiert.

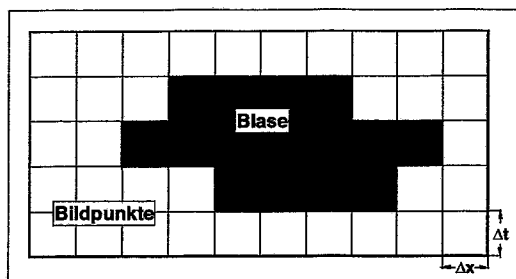


Abb. 6.8, Projektionsfläche einer Blase

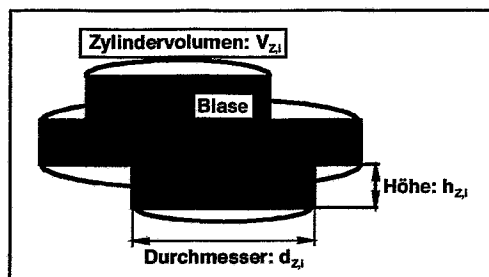


Abb. 6.9, Zylinder-Modell zur Berechnung des Blasenvolumens

Dieses Modell wird in ein Rechenprogramm implementiert, welches die identifizierten Blasen in den Projektionen auswertet. Ein Algorithmus untersucht die Blasen zeilenweise und zählt alle gefundenen Bildpunkte dieser Blase.

Der Bezug der Bildbreite, die aus jeweils 256 Bildpunkten besteht, auf die Kanalbreite von 50mm, plus 1mm Rand für das Korrekturfeld, ergibt für die Breite eines Bildpunktes  $\Delta x = 0,199\text{mm}$ .

Alle für die Blasen einer Sequenz charakteristischen Werte, die das Programm errechnet, werden jeweils in einer Wertetabelle (z.B.: Tab. 6.2) gespeichert. Für jede Blase wird eine Zeile geschrieben. Die Identifikationsnummern dienen hierbei zur Erkennung aller Bildpunkte, die zu einer Blase gehören.

Ein weiteres Modell wird zur Ermittlung der realen Blasendurchmesser  $d_{Bl, opt}$  aus den Kameradaten verwendet. Dabei wird jede Blase näherungsweise als Rotationsellipsoid betrachtet. Bei kleinen Blasen konnte die Richtigkeit dieser Näherung beobachtet werden. Ausgehend von dem Zylindervolumen-Modell kann man sagen, dass der Durchmesser  $d_z$  des Zylinders mit dem größten Volumen näherungsweise dem horizontalen Durchmesser des Ellipsoids und damit dem Durchmesser  $d_{Bl, opt}$  der Blase entspricht. Des Weiteren soll die vertikale Ausdehnung der Blase ermittelt werden. Diese ergibt sich aus der Multiplikation der Summe der zu einer Blase gehörenden Zeilen bzw. Zeitabschnitte  $\Delta t$  mit der Blasengeschwindigkeit  $u_{Bl}$ . Die Blasengeschwindigkeit erhält man aus dem Vergleich der vertikalen Positionen einer Blase aus zwei unterschiedlichen Projektionsbildern. Verwendet wurden die Projektionen aus der ersten und der vierten Extraktionszeile unterhalb des Gittersensor. Der Abstand zwischen den Bildzeilen beträgt 60 Pixel. Diese entsprechen 11,94mm, wenn  $\Delta x = 0,199\text{mm}$  auch für die Höhe eines Pixels gilt. Ein Pixel wird somit als quadratische Fläche behandelt. Als Bezug dient der Schwerpunkt der Blase. Die Zeit, in welcher der Weg zwischen den zwei Zeilen zurückgelegt wurde, entspricht der Differenz der Positionen. Aus diesen beiden Angaben kann näherungsweise die Blasengeschwindigkeit und damit die vertikale Ausdehnung der Blase ermittelt werden. Diese Berechnungen werden von einem Programm für alle Blasen durchgeführt.

Die aus den Kamerabilder ermittelten Werte der Blasen werden zeilenweise in einer Tabelle (z.B.: Tab. 6.2) gespeichert.

bb	sx	sy	sum	asum	pixx	pixy	dopt	nt
1	1138.9	24.7	78.1	319.4	114	1138	6.4	16
2	2249.4	24.9	74.5	320.0	115	2248	6.6	15
3	3361.2	27.1	74.1	297.0	126	3360	6.6	16
4	4478.5	24.5	98.4	477.1	113	4478	7.6	17
5	5586.6	23.3	56.0	167.7	107	5586	5.0	17
6	6706.0	31.7	61.0	281.7	149	6705	6.8	11

Tab. 6.2, Wertetabelle der Kameradatenauswertung, z.B.: 19060002

Dabei handelt es sich um folgende Werte:

- 1.) bb ist die Identifikationsnummer einer Blase, die zur Erkennung der dazugehörigen Bildpunkte dient. Des weiteren wird durch sie der Farbwert festgelegt, in dem die Blase in den Projektionsbildern dargestellt wird.
- 2.) Die Position des Schwerpunktes der Blase in vertikaler Richtung der Projektion wird durch sy in der Einheit ms angeben. Dieser Wert entspricht der Differenz zwischen dem Zeitpunkt des Beginns der Messung und des Zeitpunkts an dem die Blase die betrachtete Zeile passiert.
- 3.) Mit sx wird die Position des Blasenschwerpunktes in horizontaler Richtung in mm angegeben.
- 4.) Das bezogene Blasenvolumen  $\tilde{V}_{Bl,opt}$  in mm<sup>2</sup>ms wird unter asum wiedergegeben.
- 5.) sum gibt die Größe der sichtbaren Projektionsfläche einer Blase in den Projektionsbildern wieder.
- 6.) pixx und pixy sind die Koordinaten des Blasenschwerpunkts in der Darstellung der Projektionsbilder im Bildbearbeitungsprogramm „Paint“. Die Werte sy und sx wurden aus pixx und pixy berechnet.
- 7.) Der reale Blasendurchmesser  $d_{Bl,opt}$  wurde unter dopt gespeichert. Die Angabe erfolgt in mm.
- 8.) Für die Ermittlung der vertikalen Abmessung wird die Anzahl der von einer Blase eingenommenen Zeilen nt benötigt.

Um die realen Ausdehnungen der Blasen in horizontaler und vertikaler Richtung zu ermitteln, werden weitere Berechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse in einer neuen Tabelle (z.B.: Tab. 6.3) dargestellt werden.

bb	sz1	sz2	difz	vel	dz	dx	bvol
1	29.9	55.3	25.4	0.47	4.7	7.0	119.3
2	471.5	495.3	23.8	0.50	3.5	5.8	61.2
3	1108.2	1133.8	25.6	0.46	3.2	6.4	69.3
4	1557.2	1582.0	24.8	0.48	3.8	5.4	58.2
5	2074.7	2100.2	25.5	0.46	3.7	5.6	60.8
6	2595.7	2620.9	25.2	0.47	4.2	6.6	96.2
7	3074.1	3098.6	24.5	0.48	3.9	6.2	77.6
8	3768.2	3795.2	27.0	0.44	3.9	5.0	51.5
9	4186.6	4212.8	26.2	0.45	4.1	6.4	87.0
10	4709.3	4736.1	26.8	0.44	4.8	5.8	85.4
11	5242.2	5269.2	27.0	0.44	4.8	4.2	44.4
12	5720.1	5743.7	23.6	0.50	3.0	6.6	68.5
13	6363.3	6387.8	24.5	0.48	3.9	5.6	63.3
14	6826.2	6852.6	26.4	0.45	4.5	4.4	45.4
15	7483.8	7509.5	25.7	0.46	4.1	6.0	78.0
16	7941.3	7965.8	24.5	0.48	4.8	6.2	97.0
17	8611.8	8637.7	25.9	0.46	4.6	6.2	91.8

Tab. 6.3, Wertetabelle mit Blasendurchmessern, z.B.: 19060002

- 1.) Die Zuordnung der Blasen zueinander geschieht durch die Identifikationsnummer bb.
- 2.) sz1 und sz2 geben jeweils die vertikalen Positionen des Schwerpunktes in den zur Berechnung der Geschwindigkeit verwendeten Projektionen an.
- 3.) Die zeitliche Differenz  $\Delta t_{sz}$  ergibt sich aus der Subtraktion von sz2 und sz1. Sie gibt die Zeit in ms an, welche die Blase benötigt, um den Weg zwischen den beiden Extraktionszeilen zurückzulegen und wird unter difz gespeichert.
- 4.) Die Blasengeschwindigkeit  $u_{Bl}$  errechnet sich aus der Gleichung (Gl. 6.4):

$$u_{Bl} = \frac{\Delta z}{\Delta t_{sz}} \quad (\text{Gl. 6.4})$$

Dabei stellt  $\Delta z$  den Abstand zwischen den verwendeten Schnittebenen dar.  $\Delta z$  beträgt 11,94mm. Die Geschwindigkeit wird somit in der Einheit  $\text{ms}^{-1}$  unter vel angegeben.

- 5.) Die vertikale Ausdehnung die sich nun aus der Multiplikation von Blasengeschwindigkeit  $u_{Bl}$  und der Summe der Zeitabschnitte bzw. Bildzeilen einer Blase  $\Delta t$  (Gl. 6.5) ergibt, wird mit  $d_{Bl,v}$  bezeichnet, in mm angegeben und unter dz gespeichert.

$$d_{Bl,v} = u_{Bl} \cdot \sum \Delta t \quad (\text{Gl. 6.5})$$

- 6.) Der horizontale Durchmesser  $d_{Bl,h}$  wird unter dx gespeichert. Dabei handelt es sich um den Mittelwert der Blasendurchmesser, die aus den beiden verwendeten Projektionen ermittelt wurden. Dieser Durchmesser entspricht dem Produkt aus der Anzahl der Bildpunkte der größten zu einer Blase gehörigen Zeile (Abb. 6.8) und der wiedergegebenen Bildbreite eines Pixels  $\Delta x$ . Die Einheit von  $d_{Bl,h}$  ist mm.
- 7.) Ausgehend von dem Ellipsoidmodell wird mit der Gleichung (Gl. 6.6), ein Blasenvolumen  $V_{Bl,opt}$  ermittelt, welches sich aus den berechneten Abmessungen  $d_{Bl,h}$  und  $d_{Bl,v}$  ergibt und die Einheit  $\text{mm}^3$  besitzt und unter bvol angegeben wird.

$$V_{Bl, opt} = \frac{\pi}{6} \cdot d_{Bl, v} \cdot d_{Bl, h}^2 \quad (\text{Gl. 6.6})$$

### 6.3 Vergleich der Daten

Als Ergebnis, der in den Abschnitten 6.1 und 6.2 beschriebenen Auswertungsalgorithmen, standen für die 15 durchgeführten Messungen die genannten Wertetabellen aus den Gittersensordaten und den Kamerabildern zur Verfügung. Damit konnten die berechneten bezogenen Blasendurchmesser miteinander verglichen werden.

Aufgrund der großen Datenmenge wurde ein Rechenprogramm entwickelt, was anhand der Positionsangaben des Blasenschwerpunkts eine Blase in beiden Tabellen (Tab. 6.1 und Tab. 6.2) identifiziert und ihr die benötigten Werte aus den beiden Tabellen zuordnen kann. Eine Voraussetzung dafür ist, dass in den Tabellen (Tab. 6.1 u. 6.2) die gleiche Anzahl und alle Blasen vorhanden sein müssen.

Da es sich bei den Messungen um unterschiedliche Verfahren handelt, die mit verschiedenen Randbedingungen arbeiten, treten bei der Erkennung der Blasen Fehler auf, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden. Es bildet sich eine Schnittmenge von Objekten (Abb. 6.10), die einen Vergleich miteinander zulassen.

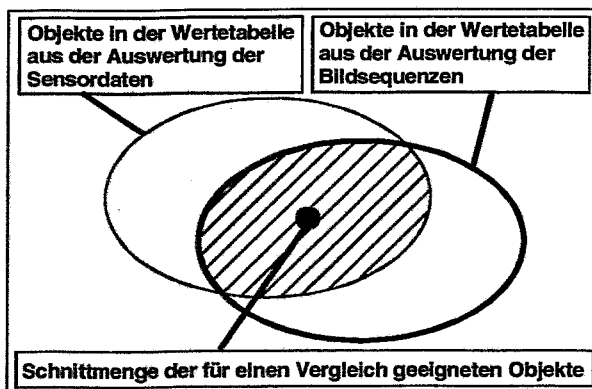


Abb. 6.10, Schnittmenge auswertbarer Objekte

Um diese Schnittmenge zu erhalten, müssen alle fehlerbehafteten Objekte herausgefiltert werden. Der Vergleich der Werte in den Tabellen stellt somit einen ersten Schritt zur Untersuchung der angewandten Methoden dar. Dieser Vorgang wurde nicht mit einem Rechenprogramm durchgeführt, um einen Überblick über eventuell aufgetretene Fehler und die Art der zu entfernenden Objekte zu erhalten.

Bei diesen Objekten handelt es sich um:

- 1.) Blasen, bei denen aufgrund des in Kap. 6.1 beschriebenen Schwellwerts, unrealistischen Fragmente gemessen werden. Der Gittersensor registriert hierbei mehrere Einzelblasen (Abb. 6.11). Da die Kamera nur eine Blase identifiziert, sind diese Daten ohne Änderung nicht verwendbar. Die Volumen der einzelnen Blasen können addiert werden. Dadurch erhält man vergleichbare Werte.

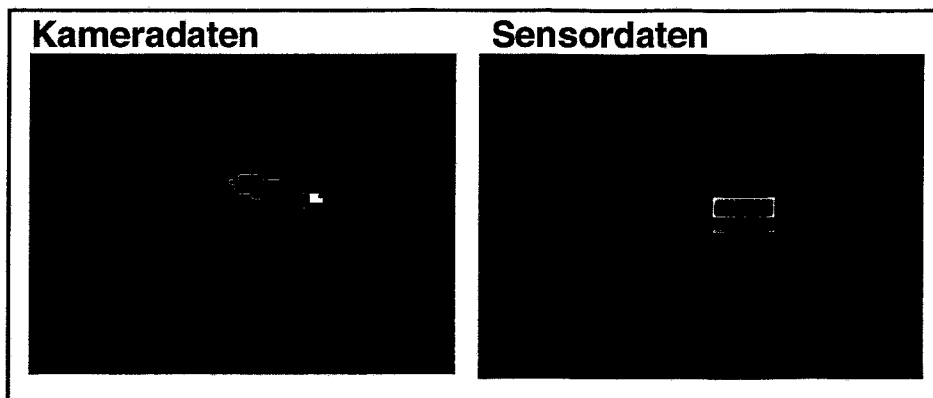


Abb. 6.11, Unrealistische Fragmentierung einer Gasblasen durch den Schwellwert

- 2.) Fragmente einer Gasblase, die in den Kamerabildern aufgrund von Reflektionen des Lichtes der Laborlampen auf der Oberfläche der Blasen entstehen (Abb. 6.12). Die Blase kann nicht mehr vollständig identifiziert werden, weil sich teilweise die Helligkeitswerte mit denen des Hintergrundes überdecken. Da diese Blasen nicht vollständig erfasst werden, können diese Daten nicht verglichen werden. Die Werte müssen aus den Tabellen der Gittersensor- und Kameradaten entfernt werden.

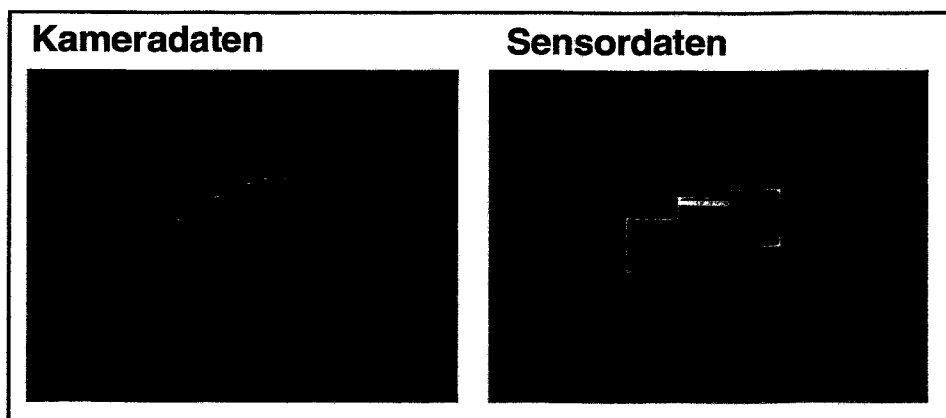


Abb. 6.12, Fragmentierung im Kamerabild durch Reflektionen auf der Blasenoberfläche

- 3.) Gasblasen mit sehr kleinem Durchmesser. Bei diesen Blasen misst der Gittersensor nur geringe Gasanteile. Sind diese kleiner als der Schwellwert, der im Erkennungsalgorithmus vorgegeben ist, wird die Blase nicht registriert. Ist die Gasblase jedoch in der Tabelle der Kameradaten, muß sie dort entfernt werden, weil ein Vergleich nicht möglich ist.

Eine Möglichkeit das Problem zu lösen, besteht darin, den Schwellwert zu verringern. Das kann aber dazu führen, dass statt zwei eng beieinander liegenden Einzelblasen eine einzige große Gasblase registriert wird. Der Schwellwert kann nur bis zum Maximalwert des Rauschpegels verringert werden. Ist der Schwellwert dagegen zu hoch, werden die kleinen Blasen nicht mehr registriert und bei sehr großen Blasen kann eine Trennung in mehrere Blasen erfolgen, da bestehende Übergänge aus Volumenelementen mit geringem Gasanteil nicht mehr als solche erkannt werden.

Außer den beschriebenen Abweichungen wurden während dieses Vergleichs keine fehlerhaften Messungen festgestellt. Aus den Wertetabellen des Gittersensors wurden 7% und aus den der Kameradaten 6% fehlerhafter Datensätze entfernt. Durch ein Rechnerprogramm konnten alle anderen Blasen gegenübergestellt werden. Alle Werte die sich dabei aus den beiden Tabellen ergaben wurden in einer weiteren gespeichert (z.B.: Tab. 6.4).

ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5
7.0	85	79	7974	5.6	7.1	6.4	6.8	7.1	7.0
7.0	82	92	1590	6.4	7.2	6.1	5.7	5.8	5.7
7.4	79	76	64	7.6	8.3	7.7	7.8	7.8	7.4
6.7	79	75	2109	5.6	7.5	6.3	6.5	6.3	5.8
6.9	78	74	3107	5.8	6.9	6.4	6.5	6.8	6.6
6.6	76	56	4221	6.2	7.2	7.0	6.9	6.6	6.2
7.0	75	96	5752	7.8	8.3	6.4	6.2	6.2	6.5
7.2	75	74	6863	4.4	6.0	5.5	5.4	5.9	6.4
7.0	74	87	1141	6.0	7.0	6.4	6.2	6.1	6.0
7.0	73	100	503	6.6	7.0	6.0	5.9	6.3	6.7
7.3	73	77	8646	6.8	8.1	7.1	6.8	6.2	6.2
7.4	70	71	5278	5.6	6.5	5.7	6.0	6.5	7.0
7.3	69	98	3804	7.4	7.6	6.3	6.5	6.9	7.5
6.7	68	88	2629	6.0	7.6	7.2	7.6	7.3	7.4
7.0	68	83	7518	7.0	7.2	6.4	6.3	6.8	6.6
6.3	66	81	4744	4.6	6.0	6.9	5.8	6.7	7.2
7.3	66	83	6396	5.4	6.3	6.1	5.9	6.0	6.6

Tab. 6.4, Vergleich der Blasendurchmesser, z.B.: 19060002

In Tabelle Tab. 6.4 werden folgende Werte zusammengefasst:

- 1.) Der bezogene Blasendurchmesser  $\tilde{d}_{Bl}$  in  $\text{mm}^{2/3} \text{ms}^{1/3}$ , der aus den Sensordaten berechnet wurde, ist unter ds angegeben.
- 2.) Der maximale Gasgehalt einer Gasblase ist unter max abgelegt. Dabei wurde der Gasgehalt des Volumenelementes, welches den Kern einer Blase bildete verwendet.
- 3.) Mit sx und sz ist die Position der betreffenden Blase angegeben. Die Werte entsprechen denen der ersten Extraktionszeile unterhalb des Sensors. Sie geben näherungsweise die Position wieder, an der sich die Blase durch den Gittersensor bewegt.
- 4.) Neben dem bezogenen Durchmesser, wird auch der reale Blasendurchmesser  $d_{Bl,h}$  zur Auswertung benötigt. Er wird unter dr gespeichert.
- 5.) Die Werte unter d1 bis d5 stellen die bezogenen Blasendurchmesser dar, die aus den Projektionen der Kamerabilder ermittelt wurden. Unter d1 steht der Wert des bezogenen Blasendurchmessers der sich auf die Zeile zwischen den Gitterebenen bezieht.

Aus den Tabellen (z.B.: Tab. 6.3 u. 4) werden die Werte entnommen die der Lösung der Aufgaben dienen sollen. Dazu gehören die bezogenen Blasendurchmesser unter  $d_s$  und  $d_2$  bis  $d_5$ , der maximale Gasgehalt unter  $max$  und der reale Blasendurchmesser unter  $d_r$ . Die Wertetabellen, die dem Vergleich zugrunde lagen, befinden sich im Anhang dieser Arbeit. In diesen wurde eine weitere Spalte angefügt, in der ein Mittelwert aus den Werten von  $d_2$  bis  $d_5$  gebildet wurde, der zum Vergleich dienen soll.



## 7. Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung

### 7.1 Vergleich der Blasendurchmesser

Die Genauigkeit des Gittersensors bei der Messung momentaner lokaler Gasgehalte sollte durch den Vergleich mit den Messwerten eines anderen Verfahrens untersucht werden. Dazu wurden aus den momentanen lokalen Gasgehaltswerten der einzelnen Blasen deren Durchmesser mit Hilfe von Rechnerprogrammen ermittelt (Kap. 6). Da es nicht möglich war, Luftblasen mit einem definierten Volumen zu erzeugen, wurde zum Vergleich die Bewegung der Blasen durch den Gittersensor mit einer Hochgeschwindigkeits-Videoeinrichtung aufgenommen. Aus den Bildsequenzen der Kamera konnten die Abmessungen der Blasen, wie Durchmesser und Höhe, ermittelt werden. Um das aus diesen Abmessungen berechnete Blasenvolumen vom Fehler einer Blasen-geschwindigkeitsmessung unabhängig zu machen, wurden Blasenvolumen definiert, die sich auf die Blasesgeschwindigkeit beziehen. Aus diesen bezogenen Blasenvolumen wurden unter der Annahme, dass eine Blase näherungsweise einer Kugel entspricht, für beide Verfahren bezogene Blasendurchmesser  $\tilde{d}_{Bl}$  berechnet, die miteinander verglichen werden konnten.

Insgesamt wurden 15 Messungen ausgewertet, die jeweils bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers  $j_w$  und für verschiedene Blasenvolumen aufgenommen wurden. Die aus diesen Messungen berechneten Werte einer Blase, wie die bezogenen und realen Blasendurchmesser, sowie die Position des Blasenschwerpunktes zum Zeitpunkt der Erfassung der Blase durch den Sensor und die Kamera, wurden zum Vergleich in Wertetabellen (z.B.: Tab. 6.4) gegenübergestellt. Die Tabellen der 15 ausgewerteten Messreihen befinden sich im Anhang.

Zum Vergleich wurde ein Mittelwert aus den bezogenen Blasendurchmessern  $\tilde{d}_{Bl, opt}$  der Kameradaten verwendet, welche sich aus den vier Projektionen der Extraktionszeilen aus den Kamerabildern ergaben, die sich unterhalb des Gittersensors befanden. Damit wurde der Fehler verringert, der durch die Berechnung des Blasenvolumens aus der zweidimensionalen Ansicht der Blasen entsteht. Dieser Fehler wurde durch die unterschiedlichen Ausdehnungen der Blasen parallel und quer zur Blickrichtung verursacht. Durch die Fluktuation der Blasen innerhalb der Strömung ändert sich die sichtbare Fläche der Blase auf dem Weg durch den Plexiglas Kanal und damit das berechnete Blasenvolumen.

Zum Vergleich wurden der bezogene Blasendurchmesser aus den Gittersensordaten  $\tilde{d}_s$  mit dem Mittelwert aus den bezogenen Blasendurchmessern  $\tilde{d}_2$  bis  $\tilde{d}_5$  der Kameradaten in einem Diagramm (Abb. 7.1) gegenübergestellt, die der Wertetabellen (z.B.: Tab. 6.4) entnommen wurden.

Die verwendeten Symbole für die Punkte einer Messreihe beziehen sich auf die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers  $j_w$  und die zur Messung eingesetzte Düse. Die Bezeichnungen der einzelnen Messreihen können der Tab. 5.1 entnommen werden.

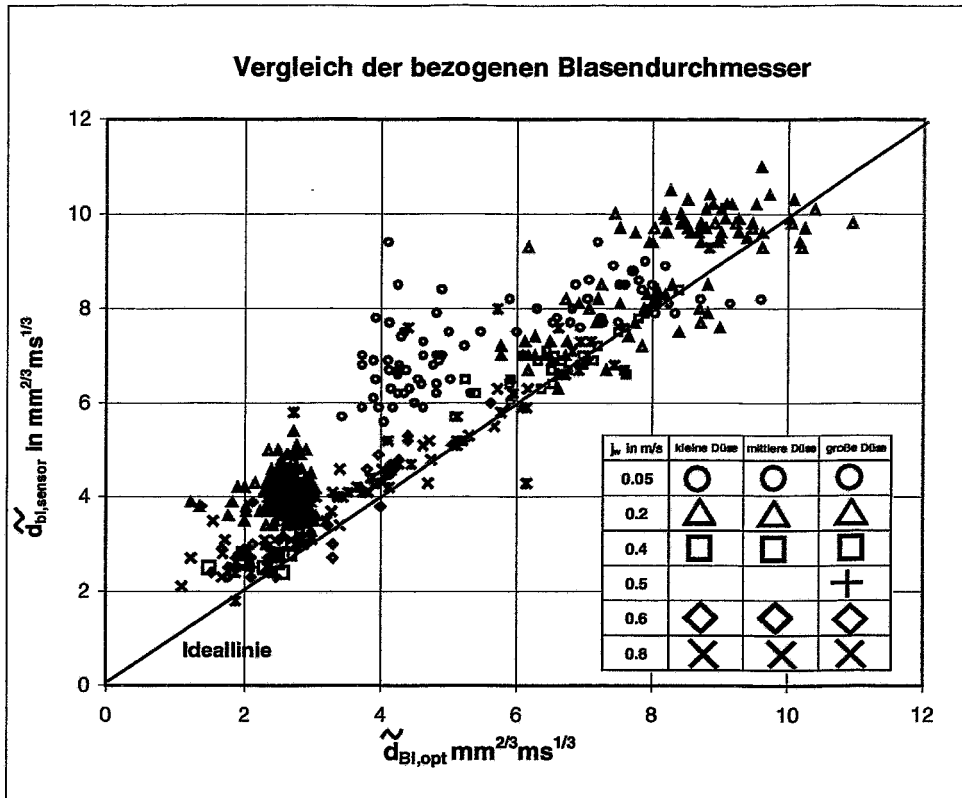


Abb. 7.1, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser

Der Vergleich zeigt, dass beim bezogenen Blasendurchmesser 91% der Messdaten des Gittersensors größer sind als die der Kameradaten sind. Die mittlere Abweichung der Gittersensordaten von den Kameradaten beträgt über alle bezogenen Blasendurchmesser 20%. Damit bestätigt sich die Vermutung, dass der Gittersensor größere Blasenvolumen misst, als tatsächlich vorhanden sind. Der Grund dafür ist der vertikale Abstand der beiden Elektrodenebenen.

In Abb. 7.2 ist der zeitliche Verlauf der Bewegung einer Blase durch den Gittersensor schematisch dargestellt, die Blase wird dabei näherungsweise als Kugel betrachtet. Zwischen den beiden Gitterebenen befindet sich das empfindliche Volumen des Sensors. Bewegt sich eine Blase durch dieses empfindliche Volumen, ruft sie eine Änderung des Stromes zwischen den Elektroden hervor.

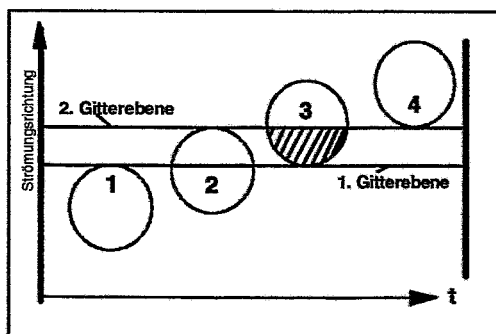


Abb. 7.2, zeitlicher Verlauf der Bewegung einer Blase durch den Sensor

Von einer Blase wird dementsprechend nur der Volumenabschnitt gemessen, der sich zum Zeitpunkt der Messung zwischen den Gitterebenen befindet. Die Summation der gemessenen Volumenabschnitte ergibt das Gesamtvolumen der Blase.

Das gesamte Volumen der Blase wurde bereits näherungsweise ermittelt, wenn sie in der Abb. 7.2 die Position 3 erreicht hat. Die Volumenabschnitte, die durch Messungen zwischen den Positionen 3 und 4 ermittelt werden, führen somit zu einem größeren Gesamtvolumen der Blase. Die Größe der Abweichung vom tatsächlichen Blasenvolumen hängt von der Messfrequenz, dem Abstand der Elektrodgitter, der Blasengeschwindigkeit, dem Blasenvolumen und der Blasenform ab. Die Blasengeschwindigkeit bestimmt die Zeit, in der sich die Blase zwischen den Positionen 3 und 4 bewegt. Bei einer konstanten Messfrequenz des Gittersensors, nimmt die Abweichung des gemessenen Blasenvolumens vom tatsächlichen Blasenvolumen mit sinkender Blasengeschwindigkeit zu. Besonders deutlich ist das anhand der Messungen bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,05m/s und 0,2m/s im Diagramm (Abb. 7.1) zu sehen.

Betrachtet man die relative Abweichung des gemessenen zum tatsächlichen Blasenvolumen, so ist diese für Blasen mit geringen Blasenvolumen größer. Ist die vertikale Ausdehnung einer Blase kleiner als der Abstand zwischen den Gitterebenen, so ist es möglich, dass das tatsächliche Blasenvolumen mehrfach gemessen wird. Die relative Abweichung ist dann größer als 100%.

Im Diagramm der Abb. 7.3 ist die relative Abweichung eines aus diesen Überlegungen berechneten abweichenden Blasenvolumens vom Blasenvolumen, welches sich bei Annahme eines Kugelvolumens für die Blase aus dem Blasendurchmesser ergeben würde, in Abhängigkeit von diesem Blasendurchmesser dargestellt.

Die Abweichung entspricht dem unteren Volumenabschnitt (Kugelabschnitt) der Blase, der sich zwischen den Gitterebenen befinden würden, wenn die Blase die Position 3 in der Abb. 7.2 erreicht hat. Die Höhe des Kugelabschnitts entspricht dem Abstand der Gitterebenen.

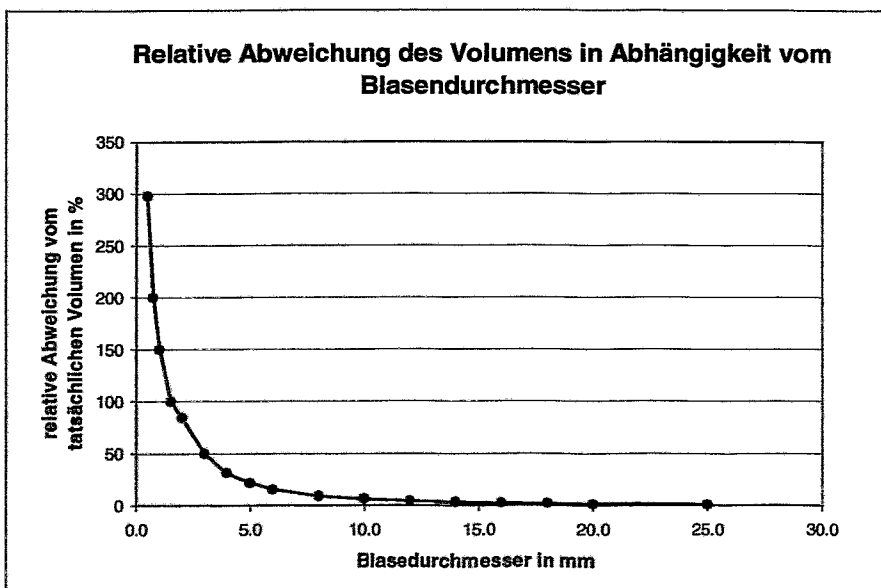


Abb. 7.3, Diagramm der relativen Abweichung des Volumens in Abhängigkeit vom Durchmesser, durch mehrfach gemessene Volumenanteile

Die Frage die sich damit stellt, ist die, inwieweit diese Abweichungen vom tatsächlichen Blasenvolumen, in die Ermittlung des Blasenvolumens aus den Messwerten des Gittersensors eingehen. Um das zu untersuchen, wurden die bezogenen Blasenvolumen aus den Kameradaten mit einer „fiktiven Abweichung“ korrigiert, welche der, die durch den Gittersensor gemessen wird, näherungsweise entspricht. Diese „fiktive Abweichung“ ist von der Blasengeschwindigkeit, dem Blasendurchmesser, der Messfrequenz und dem Abstand der Elektrodengitter abhängig. Zur Berechnung der Abweichung wurde für die Blasen näherungsweise ein Kugelvolumen angenommen. Die „fiktive Abweichung“ des Blasenvolumens vom tatsächlichen Volumen wurde durch die Gl. 7.1 bestimmt.

$$\Delta V = \sum_{x=1}^n \left( \frac{\pi \cdot \left( h - \frac{x \cdot h}{u} \right)^2}{3} \cdot \left( \frac{3}{2} d - \left( h - \frac{x \cdot h}{u} \right) \right) \right) \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Dabei ist  $n$  die sich aus der Messfrequenz ergebende Anzahl der Messungen, bei denen sich Volumenabschnitte der Blase im empfindlichen Volumen des Gittersensors befinden, nachdem bereits das gesamte Volumen erfasst wurde. Der Abstand zwischen den Elektrodendrähten wird durch  $h$  wiedergegeben und entspricht der Höhe des Volumenabschnitts der Blase, wenn diese sich in der Position 3 (Abb. 7.2) befindet. Die Volumenabschnitte der Blase entsprechen durch die vereinfachende Annahme eines Kugelvolumens Kugelabschnitten.

Mit der Gl. 7.1 wird die Summe der Kugelabschnitte berechnet, die sich bei den Messungen im empfindlichen Volumen des Gittersensors befinden. Die Summe der berechneten Volumenabschnitte gibt die „fiktive Abweichung“ näherungsweise wieder, die auf die bezogenen Blasenvolumen der Kameradaten addiert wird. Aus diesem abweichenden bezogenen Blasenvolumen wurden korrigierte bezogene Blasendurchmesser berechnet.

Für einige Messungen wurden die Gegenüberstellungen der ursprünglichen bezogenen Blasendurchmesser und die der Blasendurchmesser nach der Korrektur in einem Diagramm (Abb. 7.4) miteinander verglichen.

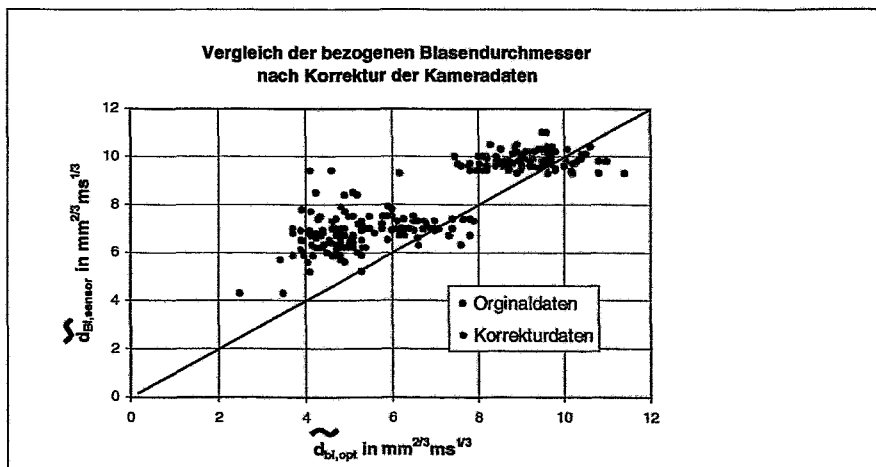


Abb. 7.4, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser nach der Korrektur der Blasenvolumen aus den Kameradaten

Der Vergleich im Diagramm (Abb. 7.4) zeigt, dass sich der Abstand der Punkte, die sich aus dem Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser aus Gittersensor- und Kameradaten ergeben, zur Linie gleicher Blasendurchmesser verringert. Für die Punkte der Blasen mit einem größeren Blasendurchmesser kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Dagegen bleibt die Differenz zwischen den Blasendurchmessern einiger kleiner Blasen und der Ideallinie des Vergleichs bestehen.

Eine Ursache dafür könnte in dem Einfluß der Elektrodengitter auf diese Luftblasen liegen. Eine Erläuterung dieser Ursache erfolgt im Kap. 7.3.

Beim Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser, die durch zwei unterschiedliche Verfahren ermittelt wurden, muss die Frage beantwortet werden, wie groß der Fehler ist den jedes Verfahren in das Ergebnis einbringt. Da die Genauigkeit des Gittersensors untersucht werden sollte, mussten die Fehler untersucht werden, die bei der Ermittlung der bezogenen Blasendurchmesser aus den Kameradaten auftraten. In den folgenden Abschnitten werden für diese Fehler vier Ursachen untersucht, die das Ergebnis des Vergleichs maßgeblich beeinflussen.

### 1. Fehler durch die zweidimensionale Betrachtung einer Blase

Es wurde beobachtet, dass die Form einer Blase von der einer Kugel abweicht. Die Ausdehnungen einer Blase variieren in allen Richtungen. Dazu kommen die bereits angesprochene Fluktuationen der Gasblasen in der Strömung, durch welche sich diese Ausdehnungen ständig ändern. In den Bildsequenzen der Kamera ist nur eine zweidimensionale Projektionsfläche der Blase zu sehen. Die Größe dieser Projektionsfläche ist von den Ausdehnungen der Blase abhängig und ändert sich dementsprechend auch ständig. Das bezogene Blasenvolumen der Kameradaten wird aus den Projektionsflächen der Blasen in den Projektionsbildern, die sich aus den Extraktionszeilen zusammensetzen (Kap. 6.2), ermittelt. Das bezogene Blasenvolumen und damit der bezogene Blasendurchmesser ändern sich durch Fluktuationen der Gasblase in der Strömung. Dadurch ist es nicht möglich das tatsächliche Blasenvolumen zu erfassen. Der Fehler, der sich aus der zweidimensionalen Betrachtung ergibt, wurde näherungsweise durch die Ermittlung der relativen Abweichung der berechneten zu einem mittleren bezogenen Blasendurchmesser bestimmt. Dieser Mittelwert wurde für jeweils alle Blasen aus den bezogenen Blasendurchmessern berechnet, die den Projektionen, die sich aus den vier Extraktionszeilen, die in den Bildsequenzen der Kamera unterhalb des Gittersensors herausgeschnitten wurden, entnommen wurden.

Für jede Blase wurde aus den vier bezogenen Blasendurchmessern die Differenz aus dem maximalen und dem minimalen Wert gebildet. Die Hälfte dieser Differenz wurde zum mittleren bezogenen Blasendurchmesser ins Verhältnis gesetzt. Dadurch konnte ein mittlerer relativer Fehler für die Berechnung des bezogenen Blasendurchmessers einer Blase angegeben werden. Aufgrund der geringen statistischen Sicherheit der vier verwendeten Werte, wurde aus den mittleren relativen Fehlern der Blasen einer Messreihe ein Mittelwert gebildet.

Dieser mittlere relative Fehler einer Messung wurde im Diagramm (Abb. 7.5) an alle zu einer Messung gehörenden Blasendurchmesser angetragen. Bildet man diesen mittleren relativen Fehler über alle Messreihen, ergibt sich für die bezogenen Blasendurchmesser ein mittlerer relativer Gesamtfehler von  $\Delta \tilde{d}_{Bl, opt} = 8\%$

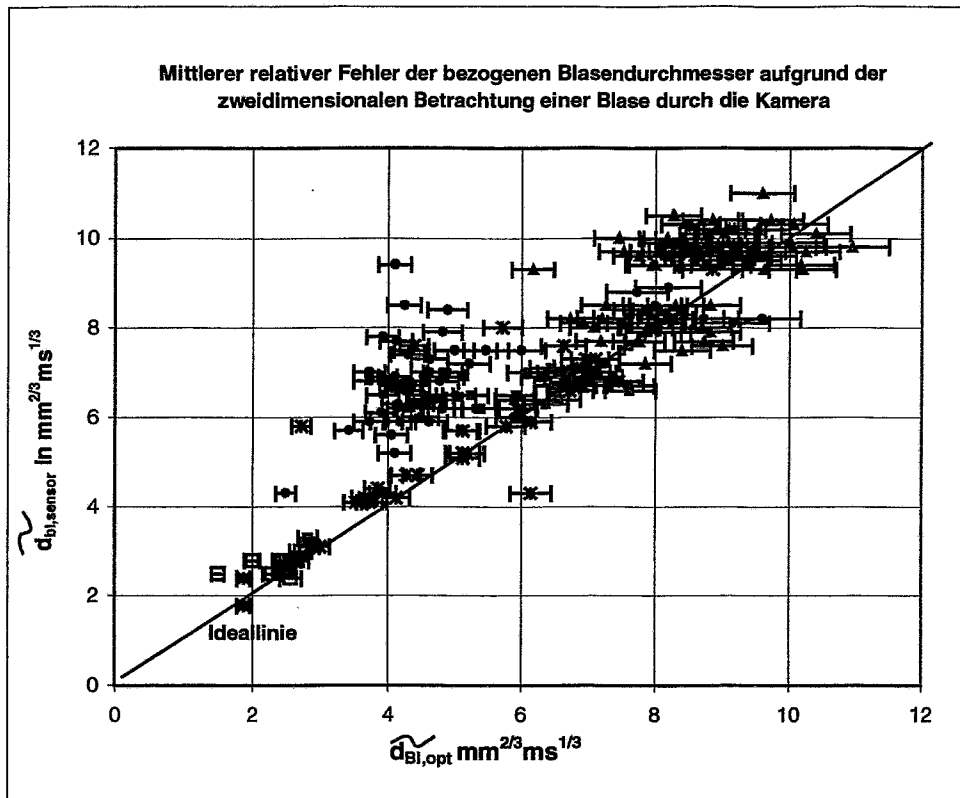


Abb. 7.5, Diagramm mit mittlerem relativen Fehler der bezogenen Blasendurchmesser durch die zweidimensionale Betrachtung mittels Kamera

Aus dem Diagramm (Abb. 7.5) geht der maßgebliche Einfluß des Fehlers, der durch die zweidimensionale Betrachtung der Blasen entsteht, auf das Ergebnis des Vergleichs hervor. Die Ideallinie des Vergleichs schneidet die Streubreite der bezogenen Blasendurchmesser aus den Kameradaten, die sich aus dem mittleren relativen Fehler ergibt, für einen großen Teil der Blasen. Das bedeutet, dass die bezogenen Blasendurchmesser der beiden Verfahren unter Berücksichtigung dieses Fehlers übereinstimmen. Eine Ausnahme ergibt sich bei Blasen mit geringen Blasen volumens und Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers von 0,05m/s.

Eine Möglichkeit, den Fehler, der durch die Berechnung des bezogenen Blasen volumens aus den Abmessungen einer zweidimensionalen Ansicht der Blase, entsteht zu verringern ist eine stereoskopische Betrachtung der Blase. Diese Möglichkeit und ihre Umsetzung wird im Kap. 8.2 genauer erläutert.

## 2. Fehler durch die Perspektive

Der Abstand zwischen der Kamera und einer Blase kann maximal um die innere Kanalbreite von 50mm variieren. Durch die Perspektive, die sich in der Abbildung des Kanals in den Bildsequenzen der Kamera ergibt, erscheinen Blasen mit gleichem Durchmesser kleiner, wenn sie sich in einem größeren Abstand zur Kamera befinden. Bei einem Abstand von ca. 3000mm zwischen Kamera und Kanalvorderseite ergibt sich aufgrund der Perspektive für den sichtbaren horizontalen Durchmesser einer Blase ein mittlerer relativer Fehler von

$$\Delta d_{z, \text{perspektiv}} = 1\% .$$

Dieser Fehler wurde mit dem Strahlensatz für gleichliegende Parallelenabschnitte ermittelt. In den Projektionsbildern der Extraktionszeilen der Kamerabilder geht dieser relative Fehler in die Ermittlung der Länge einer Pixelzeile, die durch eine Blase belegt ist, ein. Diese Länge entspricht dem Zylinderdurchmesser (Zylinder-Modell). Der relative Fehler geht dementsprechend in die Berechnung der Zylindervolumen und damit in Ermittlung des bezogenen Blasendurchmessers ein.

### 3. Diskretisierungsfehler

In den Kamerabildern, die aus 256x240 quadratischen Bildpunkten bestehen, wird die sichtbare Projektionsfläche der Luftblasen abgebildet. Die Projektionsfläche setzt sich somit aus einer bestimmten Anzahl von Pixeln zusammen, die sich durch die Differenz ihres Farbwertes von dem des Hintergrundes eines Bildes unterscheiden. Da der Rand der Projektionsfläche nicht mit den Rändern der belegten Pixel übereinstimmt, entsteht ein Diskretisierungsfehler. Das Gleiche gilt für die Projektionsbilder aus 256x8738 Pixeln, die sich aus den extrahierten Bildzeilen der Bildsequenzen ergeben.

Das Blasenvolumen wird aus der Summe von Zylindervolumen gebildet, deren Höhe und Durchmesser sich aus einer Pixelzeile der Projektionsfläche einer Blase ergeben (Zylindervolumen-Modell). Der Diskretisierungsfehler tritt dementsprechend am linken und am rechten Ende einer Pixelzeile auf, indem ein Pixel nicht berücksichtigt wird, was nur durch einen geringen Teil der Blase belegt ist oder ein Pixel, das nicht vollständig zur Projektionsfläche der Blase gehört, wird zu dieser dazu gezählt.

Im Allgemeinen wird für den Diskretisierungsfehler ein halbes Pixel angenommen. Da der Fehler an beiden Enden auftritt, ergibt sich für ihn insgesamt ein Pixel. Die Abweichung des Blasenvolumens durch den Diskretisierungsfehler läßt sich mit der Gl. 7.2 berechnen, die aus der Gleichung (Gl. 6.3) hervorgeht.

$$\left| \Delta \tilde{V}_{Bl, opt} \right| = \frac{\pi}{2} \cdot \Delta t \cdot \Delta x^2 \cdot \sum_n m_z \cdot \Delta m \quad (\text{Gl. 7.2})$$

Dabei wird der Fehler des Zeitschritts  $\Delta(\Delta t)$  und der Fehler der Breite, die ein Pixel wiedergibt,  $\Delta(\Delta x)$  vernachlässigt. Im Diagramm (Abb. 7.6) ist die Abhängigkeit des Diskretisierungsfehlers von der Anzahl der Pixel dargestellt. Dabei ist die logarithmische Teilung der Achse, welche die Anzahl der Bildpunkte beschreibt zu beachten.

Die Größe des relativen Fehlers der in das berechnete Blasenvolumen eingeht, ist von der Anzahl der Pixel der Projektionsfläche abhängig. Der maximale relative Fehler für das berechnete Blasenvolumen durch den Diskretisierungsfehler beträgt 40%. Er ist damit für kleine Blasen mit einer geringen Projektionsfläche sehr groß. Ab 10 Pixeln für eine Projektionsfläche, was für den größten Teil der untersuchten Blasen der Fall war, sinkt der Fehler unter 4%. Die kleinste Projektionsfläche, die in den Projektionen der Extraktionszeilen aus den Bildsequenzen der Kamera gefunden wurde, bestand aus 8 Pixeln. Der durch die Diskretisierung der Projektionsfläche einer Blase verursachte maximale relative Fehler beträgt somit  $\left| \Delta \tilde{V}_{Bl, opt, max} \right| = 5\%$ .

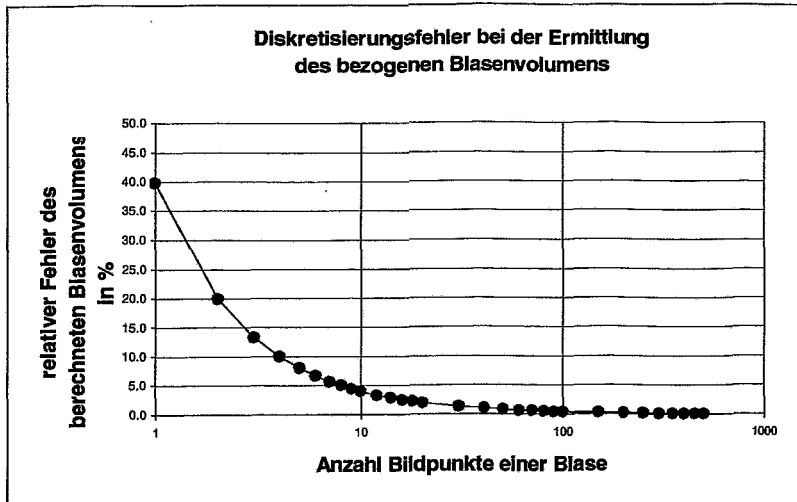


Abb. 7.6, Diskretisierungsfehler in Abhängigkeit der Pixelanzahl

#### 4. Fehler der wiedergegebenen Breite durch einen Bildpunkt

Im Kap. 6.2 wurde die Breite berechnet die ein Pixel in den Kamerabilder aus 256x240 Bildpunkten wiedergibt. Sie betrug  $\Delta x = 0,199\text{mm}$  und ergab sich aus der Gleichung

$$\Delta x = \frac{x_{\text{Kanal}}}{m} \quad (\text{Gl. 7.3})$$

Die sichtbare Kanalbreite  $x_{\text{Kanal}}$  wurde mit einem Lineal gemessen, dessen Teilungsfehler im Allgemeinen mit 1mm angegeben wird. Sie beträgt insgesamt 51mm, die von 256 Bildpunkten wiedergegeben werden. Der maximale Fehler der dadurch auftritt, berechnet sich aus

$$|\Delta(\Delta x)| = \left| \frac{m}{m^2} \right| \cdot \Delta x_{\text{Kanal}} \quad (\text{Gl. 7.4})$$

und beträgt somit  $|\Delta(\Delta x)| = 0,0039\text{mm}$ . Dieser maximale absolute Fehler fließt in die Berechnung der Abweichung des Blasenvolumens nach Gl. 7.2 mit ein.

#### Zusammenfassung der Fehler

Um einen maximalen Fehler für die bezogenen Blasendurchmesser angeben zu können, müssen die vier beschriebenen unterschiedlichen Fehler zusammengefasst werden. Dazu wird für 2.) bis 4.) der maximale Fehler bestimmt, der in die Ermittlung des Zylinderdurchmesser eingeht. Für die Anzahl der Pixel  $m_z$  einer Zeile, die durch die Projektionsfläche einer Blase belegt sind, wird die kleinste ermittelte Anzahl  $m_z=8$ , verwendet. Der maximale Fehler berechnet sich aus

$$\Delta d_z = (\Delta x \cdot \Delta m + m \cdot \Delta(\Delta x)) + (\Delta x \cdot m \cdot \Delta d_z, \text{perspektiv}) \quad (\text{Gl. 7.5})$$



Damit beträgt der maximale Fehler für die Zylinderdurchmesser  $\Delta d_z = 0,25 \text{ mm}$ .

Für das daraus ermittelte Zylindervolumen ergibt sich damit ein Maximalfehler von

$$\Delta \tilde{V}_z = \frac{\pi}{2} \cdot \Delta t \cdot d_z \cdot \Delta d_z \quad (\text{Gl. 7.6})$$

$$\Delta \tilde{V}_z = 0,63 \text{ mm}^2 \text{ ms}$$

Das entspricht einem maximalen relativen Fehler von  $\Delta \tilde{V}_{z, \text{rel}} = 32\%$ .

Wird der maximale Fehler des Zylindervolumens auf das bezogene Blasenvolumen übertragen, ergibt sich für den bezogenen Blasendurchmesser ein maximaler Fehler von

$$\Delta \tilde{d}_{Bl, \text{opt}} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}} \cdot \frac{1}{3} \cdot (\tilde{V}_{Bl, \text{opt}})^{\frac{-2}{3}} \cdot \Delta \tilde{V}_{Bl, \text{opt}}$$

$$\Delta \tilde{d}_{Bl, \text{opt}} = 0,1 \text{ mm}^{\frac{2}{3}} \text{ ms}^{\frac{1}{3}}$$

Der sich daraus ergebene maximale relative Fehler beträgt

$$\Delta \tilde{d}_{Bl, \text{opt}, \text{rel}} = 11\%$$

Der relative Gesamtfehler, der in die Berechnung des bezogenen Blasendurchmessers eingeht, würde sich durch Addition des mittleren relativen Fehlers der durch die zweidimensionale Betrachtung der Blase entsteht und dem relativen Fehler, der sich aus dem Perspektivfehler, dem Diskretisierungsfehler und dem Fehler der wiedergegebenen Breite durch ein Pixel entsteht, ergeben. Der relative Gesamtfehler beträgt

$$\underline{\Delta \tilde{d}_{Bl, \text{opt}, \text{rel}, \text{gesamt}} = 19\%}$$

Man geht davon aus, dass sich die beiden addierten Fehler bei der Ermittlung der bezogenen Blasendurchmesser überlagern oder kompensieren. Der relative Fehler jeder einzelnen Blase wird mit hoher Wahrscheinlichkeit kleiner sein.

Der relative Gesamtfehler wurde im Diagramm (Abb. 7.7) für einige Messungen an die bezogenen Blasendurchmesser aus den Kameradaten angetragen. Die Ideallinie des Vergleichs schneidet somit die Streubreite der bezogenen Blasendurchmesser aus den Kamerabildern, bis auf die Blasen mit kleinem Blasenvolumen und einer geringen Strömungsgeschwindigkeit des Wassers von 0,05m/s.

Aus dem Diagramm (Abb. 7.7) ist der wesentliche Einfluß des Fehlers, der durch die Berechnung des bezogenen Blasendurchmessers aus den Kameradaten entsteht, auf das Ergebnis des Vergleichs zu erkennen.

Berücksichtigt man die Streubreite der bezogenen Blasendurchmesser aus den Kameradaten, so ist zu sehen, dass die bezogenen Blasendurchmesser die aus der Messung mittels Gittersensor berechnet wurden, der Ideallinie des Vergleichs nähern.

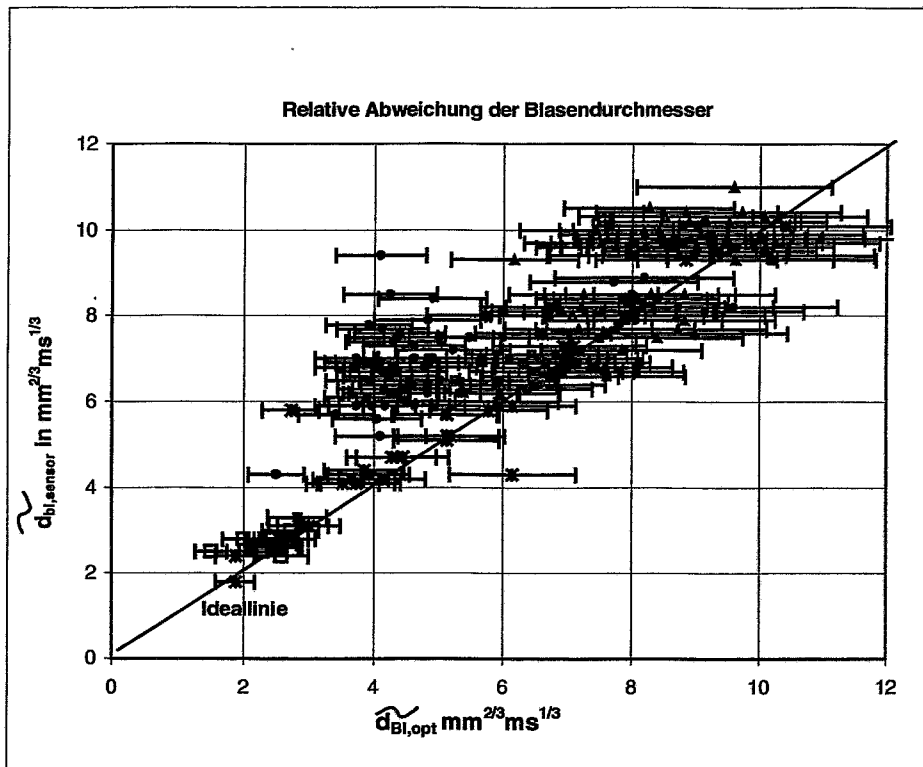


Abb. 7.7, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser unter Berücksichtigung des relativen Gesamtfehlers der Kameradaten

Damit wird deutlich, dass unter der Berücksichtigung des Fehlers des Vergleichsverfahrens, die Abweichung der vom Gittersensor gemessenen Blasenvolumen von dem tatsächlichen Blasenvolumen, deutlich geringer ausfallen könnte, als es aus dem Diagramm (Abb. 7.1) abzulesen ist.

Um einen aussagefähigen Zahlenwert für die Genauigkeit der Messwerte des Gittersensors angeben zu können, müsste der Fehler des Vergleichsverfahrens verringert werden. Zwei Möglichkeiten den Fehler der bezogenen Blasendurchmesser, die aus den Kameradaten ermittelten wurden, zu verringern, werden im Kap. 8 erläutert.

## 7.2 Nachweisgrenzen des Gittersensors

Aus der Wertetabellen (z.B.: Tab. 6.1) des Gittersensors ist zu erkennen, dass der maximal auftretende momentane lokale Gasanteil beim Durchgang von Blasen, deren Durchmesser kleiner als die Gitterschrittweite ist, weit unter dem Wert von 100 % liegt. Je kleiner die Blase ist, um so geringer ist die durch sie verursachte Abnahme des Stroms an den betroffenen Empfängerelektroden. Es gilt die Frage zu beantworten, wie groß der Durchmesser einer Blase mindestens sein muss, damit sie vom Sensor nachgewiesen werden kann.

Das gesamte empfindliche Volumen des Gittersensors befindet sich zwischen den beiden Drahtebenen. Das einem einzelnen Kreuzungspunkt von Empfänger- und Sendeelektrode zuzuordnende empfindliche Volumen, wird aufgrund der Symmetriebeziehungen durch senkrechte Ebenen begrenzt, die genau in der Mitte zwischen den horizontalen Elektrodendrähten die Messebene schneiden.

Ein einfaches Modell für die Abnahme des Stroms erhält man, indem die Flächenprojektion der Blase auf die Messebene in Beziehung zur Querschnittsfläche des empfindlichen Volumens gebracht wird. Das entspricht der Vorstellung, dass die Blase den Stromfluss in diesem Teil des Querschnitts unterbricht. Die Stromänderung, und damit der maximale lokale Gasanteil, ist bei Blasen gleichen Durchmessers davon abhängig, an welcher Stelle sich die Blase durch das Elektrodengitter bewegt. Wenn der Mittelpunkt der Projektion mit dem Kreuzungspunkt übereinstimmt, bewirkt die Blase eine maximale Stromänderung (Abb. 7.8). Fällt dieser Punkt bei einer Blase mit dem gleichen Durchmesser, auf den Schnittpunkt zweier Ebenen die das empfindliche Volumen von vier Messpunkten begrenzen, beträgt die Änderung des Stromes nur ein viertel des maximalen Wertes (Abb. 7.9).

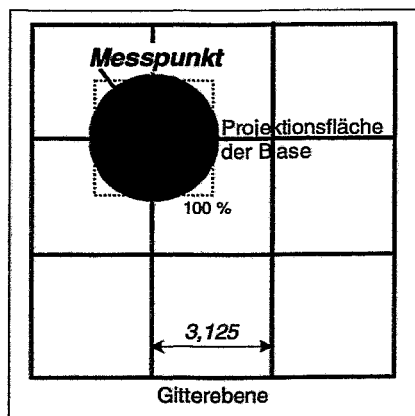


Abb. 7.8, Modell, Mittelpunkt der Projektionsfläche stimmt mit Messpunkt überein

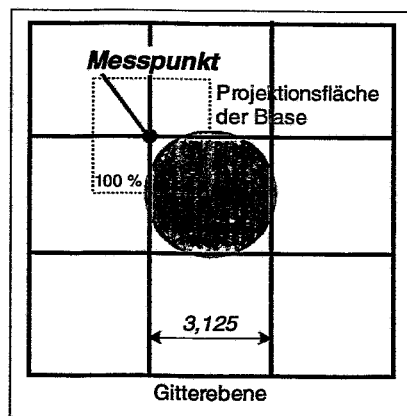


Abb. 7.9, Modell, Mittelpunkt der Projektionsfläche stimmt mit Schnittpunkt der Begrenzungsebenen überein

Dadurch ergeben sich für den momentanen lokalen Gasanteil, den eine Blase im empfindlichen Volumen eines Messpunktes bewirkt, zwei charakteristische Grenzen (Abb. 7.10). Die obere Grenze gibt den zu erwartenden maximalen momentanen lokalen Gasanteil an, der gemessen wird, wenn sich die Blase an einem Kreuzungspunkt durch das Gitter bewegt. Die untere Grenze gibt den Gasehaltswert an, der an einem Kreuzungspunkt mit Sicherheit gemessen wird, wenn sich eine Blase auch nur teilweise durch dessen empfindliches Volumen bewegt.

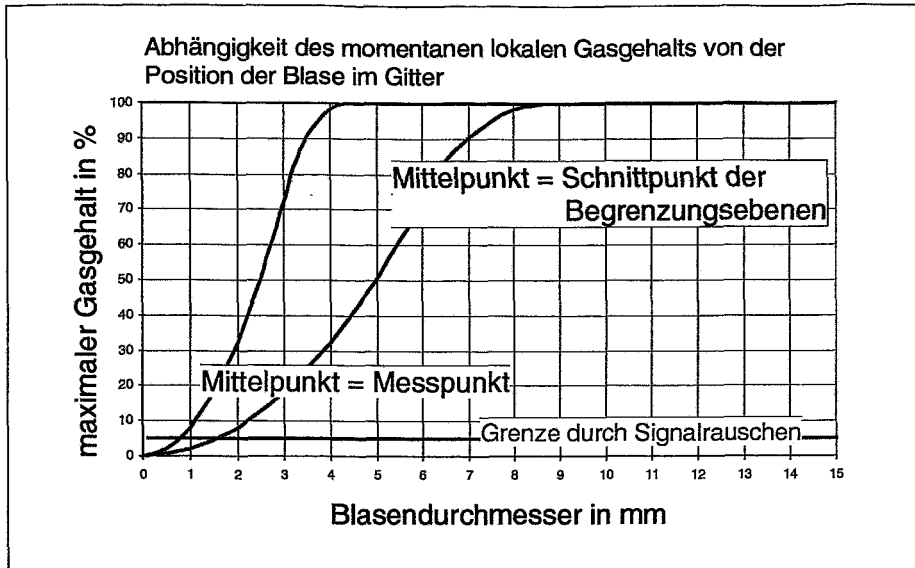


Abb. 7.10, Grenzen des Gasgehalts in Abhängigkeit von der Position und des Durchmessers der Blasen

Die Positionen an denen sich die Blasen durch den Gittersensor bewegen, sind statistisch über die quadratische Fläche verteilt, deren Diagonale gleich der Verbindungslinie von Kreuzungspunkt und Schnittpunkt der Begrenzungsebenen (Abb. 7.8) ist. Die momentanen Gasgehaltswerte für Blasen mit gleichem Durchmesser sind dementsprechend zwischen den beiden Grenzen verteilt.

Die durch eine Gasblase hervorgerufene Änderung des Stromflusses an einem Kreuzungspunkt muss das Signalrauschen (Kap. 6.1), dass aufgrund von Störungen in den Signalleitungen und der Elektronik entsteht, übersteigen. Für den momentanen lokalen Gasgehalt beträgt dieser Grenzwert 6 bis 7%. Damit muss der Blasendurchmesser mindestens 1,6mm betragen, damit die Blase vom Gittersensor mit Sicherheit nachgewiesen werden kann.

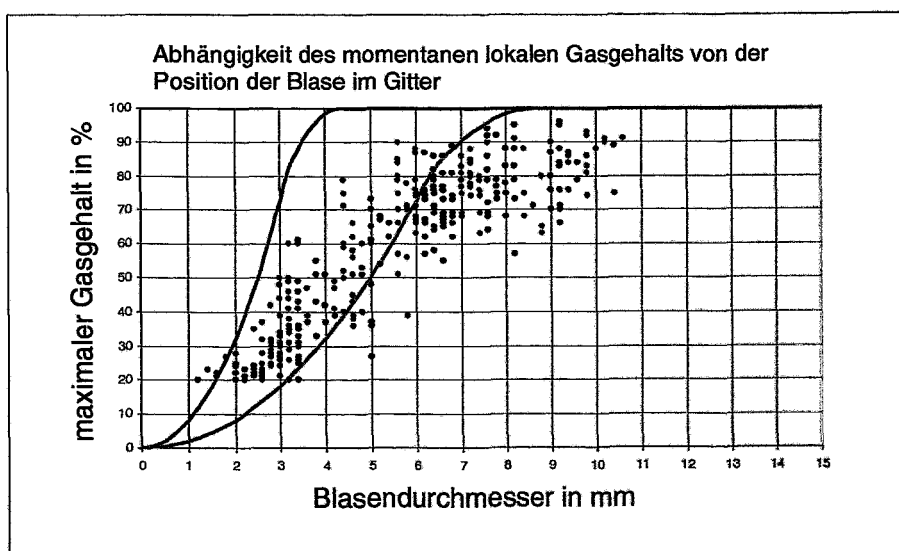


Abb. 7.11, gemessener maximaler momentaner lokaler Gasgehalt in Abhängigkeit vom realen Blasendurchmesser

Um die Richtigkeit dieses groben Modells zu überprüfen, wurde der gemessene maximale momentane lokale Gasgehalt einer Blase dem realen Durchmesser gegenübergestellt, der aus den Kameraaufnahmen ermittelt wurde (Abb. 7.11).

Die dazu benötigten Werte, maximaler Gasgehalt  $\max$  und realer Blasendurchmesser  $d_r$ , wurden den Wertetabellen (z.B.: Tab. 6.4) der einzelnen Messreihen entnommen.

Der Gasanteil von Blasen mit einem Durchmesser der kleiner als die Gitterschrittweite ( $d_{Bl} < 3,125\text{mm}$ ), befindet sich innerhalb der Grenzen, die durch das Modell ermittelt wurden. Damit wird die Richtigkeit des Modells, welches zur Festlegung der Grenzen verwendet wurde bestätigt. Durch den festgelegten Schwellwert ( $\epsilon_{threshold} = 20\%$ ) für den maximalen Gasgehalt, bei der Auswertung der Sensordaten (Kap. 6.1), sind Blasen nicht erfasst worden, die im empfindlichen Volumen eines Kreuzungspunktes eine Änderung des Stroms hervorrufen, die kleiner als 20% ist.

Die maximalen Gasgehalte von Blasen, deren Durchmesser größer als die Gitterschrittweite ist, befinden sich zum größten Teil außerhalb der Grenzen, die das Modell vorgibt. Wie eingangs beschrieben, wird kein Gasanteil von 100% gemessen. Ein Grund dafür ist die Bildung von Wasserlamellen bei der Fragmentierung der Gasblasen an den Elektrodendrähten. Diese stellen eine Brücke für den Stromfluß von der Sende- zur Empfangselektrode dar.

Aufgrund der Messwerte wird für die kleinste Blase, die der Gittersensor mit Sicherheit erkennen kann, ein Durchmesser von  $d_{Bl,min} = 3,1\text{mm}$  ermittelt. Aufgrund des Modells kann davon ausgegangen werden, dass der Gittersensor Blasen bis zu einem Durchmesser  $d_{Bl,min} = 1,6\text{mm}$  erfassen kann, wenn das Signalrauschen eine Stromänderung von maximal 7% hervorruft.

### 7.3 Wechselwirkungen zwischen der Zweiphasenströmung und dem Sensor

Bewegen sich die Gasblasen durch den Gittersensor, werden einige an den Elektrodendrähten deformiert oder in mehrere Fragmente geteilt (Abb. 7.12). Diese Fragmentierung geschieht an beiden Gitterebenen, wobei für die Messung der momentanen elektrischen Leitfähigkeit mit dem Gittersensor, nur die Fragmentierung an den unteren Elektroden von Bedeutung ist. Aufgrund dieser Fragmentierung bilden sich hinter einer Elektrode zwischen den einzelnen Blasenteilen Flüssigkeitslamellen. Diese stellen eine leitende Brücke zwischen Sende- und Empfängerelektrode her. Aufgrund dessen, werden für die einzelnen Volumenelemente einer Blasen keine Gasanteile von 100% gemessen. (Kap. 7.2).



Abb. 7.12, Fragmentierung einer Luftblase im Gittersensor

Das Blasenvolumen wird durch die Addition der Gasanteile berechnet, die in den empfindlichen Volumen der Kreuzungspunkte gemessen werden. Durch die Fragmentierung wird das Gesamtgasvolumen nicht verändert. Dadurch wird das gesamte Volumen einer Blase gemessen. Der Fehler wirkt sich dementsprechend nicht auf die Ermittlung der Blasenvolumen durch den Gittersensor aus.

Bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers ( $j_w=0,05\text{m/s}$ ) und kleinen Blasendurchmessern, bleibt ein Teil der Blasen für einen kurzen Moment an den Elektrodendrähten hängen. Durch das Hängenbleiben an der zweiten Gitterebene bewegt sich die Blase länger im empfindlichen Volumen des Gittersensors, als sie es aufgrund ihrer Blasengeschwindigkeit tun würde. Dadurch wird der Effekt des zu groß gemessenen Volumens (Kap. 7.1) verstärkt. Deutlich wird das an den Messwerten für  $0,05\text{m/s}$  Strömungsgeschwindigkeit des Wassers und Verwendung der kleinen Düse.

## 8. Verbesserung der Werte des Vergleichsverfahrens

### 8.1 Vergrößerung des Betrachtungsbereichs


Zur Untersuchung der Genauigkeit des Gittersensors war es nicht möglich Luftblasen mit einem definierten Volumen zu erzeugen (Kap. 3.3). Mit diesen könnten die Messwerte des Sensors direkt überprüft werden. Stattdessen wurden Werte aus der Beobachtung der Strömung mit einer Hochgeschwindigkeits-Videoeinrichtung zum Vergleich herangezogen. Im Kap. 7.1 wurden die Fehler betrachtet, die dieses Vergleichsverfahren in das Ergebnis des Vergleichs einbrachte.

Einen wesentlichen Anteil am Gesamtfehler des berechneten bezogenen Blasendurchmessers aus den Kameradaten hat der Diskretisierungsfehler. Dieser wird durch die Pixelung der sichtbaren Projektionsfläche einer Blase in den Projektionsbildern der extrahierten Bildzeilen aus den Kamerabildern verursacht. Aus dem Diagramm (Abb. 7.6) wird die Abhängigkeit der Größe dieses Fehlers von der Anzahl der Pixel einer Projektionsfläche der Blase im Kamerabild deutlich. Da sich die Auflösung der Kamerabilder und damit der Diskretisierungsfehler nicht verändern lässt, kann der Einfluß dieses Fehlers auf den berechneten Blasendurchmesser nur durch die Vergrößerung der Anzahl der Pixel einer Projektionsfläche verringert werden.

Die Kamera liefert, wie in Kap. 4.3 beschrieben wurde, Bilder in Form von Bitmap-Files, die aus 256x240 Bildpunkten bestehen. Bisher wurde die gesamte Kanalbreite von 50mm in einem Bild erfasst. Indem nur noch eine Hälfte des Kanals, also 25mm, mit der Kamera beobachtet wurde, konnte die sichtbare Projektionsfläche einer Blase mit gleichem Durchmesser in den Kamerabildern vergrößert werden. Damit verringert sich der Fehler der in die Berechnung des bezogenen Blasendurchmessers aufgrund des Diskretisierungsfehler eingeht.

Durch Veränderung der Lage der benutzten Luftdüse, wurde dafür gesorgt, dass eine große Anzahl der Blasen den Sensor nur im betrachteten Bereich durchströmten. Des weiteren mussten die Programme zur Auswertung der Kamerabilder entsprechend angepasst werden.

Es wurden drei Messungen durchgeführt (Tab. 8.1), um zu untersuchen, ob die Vergrößerung des Betrachtungsbereichs zu einer Verringerung des Gesamtfehlers führt. Es wurden Strömungsgeschwindigkeiten für das Wasser von jeweils 0,05, 0,4 und 0,6m/s eingestellt. Die Auswertung war mit der im Kap. 6 identisch. Für die durchgeführten Messungen liegen die Wertetabellen vor. Sie befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

Strömungs- geschwindigkeit des Wassers in m/s	kleine Düse
	
0,05	13070001
0,40	13070002
0,60	13070003

Tab. 8.1, Strömungsgeschwindigkeiten und verwendete Luftdüse für Messreihen mit unterschiedlichem Betrachtungsbereich

Zum Vergleich wurden die Werte der Messreihen aus Kap. 6.1 verwendet, die mit den gleichen Strömungsgeschwindigkeiten und mit der selben Düse durchgeführt worden sind. Im Diagramm (Abb. 8.1) wurden die Werte der bezogenen Blasendurchmesser aus Sensor- und Kameradaten der Messreihen mit jeweils unterschiedlichem Betrachtungsbereich gegenübergestellt.

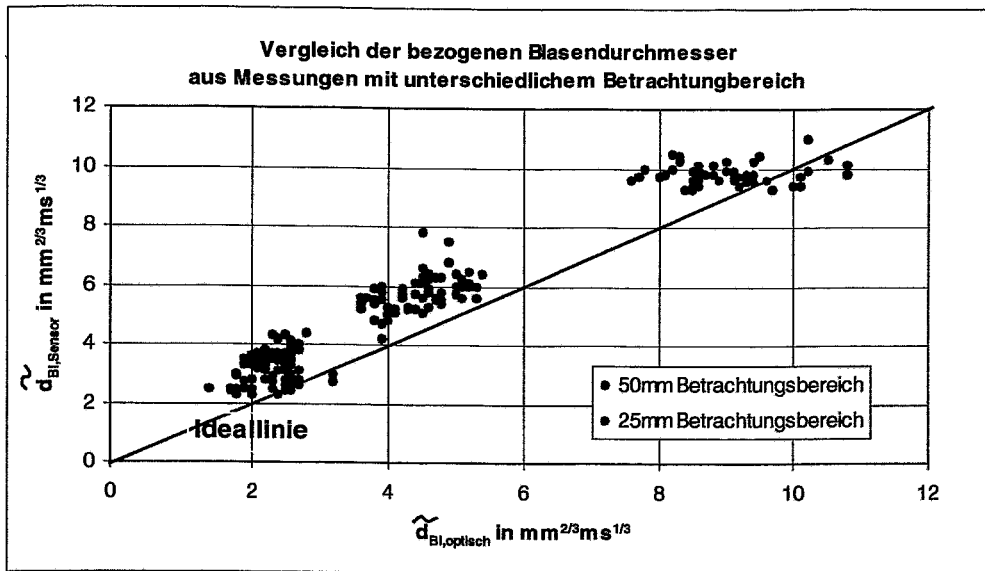


Abb. 8.1, Diagramm zum Vergleich der bezogenen Blasendurchmesser für Messungen mit unterschiedlichem Betrachtungsbereich

In dem Diagramm ist zu erkennen, dass sich die Werte der Messungen mit dem größeren Betrachtungsbereich, bezüglich ihrer Abweichung von der Ideallinie des Vergleichs, in die bisher durchgeführten Messungen einordnen. Der Beitrag des Diskretisierungsfehlers zum Gesamtfehler ist dem nach nicht so groß, dass er das Ergebnis des Vergleichs bei einer Verringerung verbessert.

## 8.2 Spiegelsystem für stereoskopische Betrachtung

Den größten Anteil am Gesamtfehler des bezogenen Blasenvolumens aus den Kameradaten hatte die zweidimensionale Betrachtung der Blase. Dieser Fehler ließe sich verringern, indem man die Blase aus zwei Richtungen beobachten würde. Damit könnten die unterschiedlichen Ausdehnungen der Blase parallel und quer zur Blickrichtung berücksichtigt werden. Das wäre möglich, indem zur Beobachtung des Sensors zwei Videoeinrichtungen installiert werden, die jeweils eine Seitenansicht des Kanals aufnehmen. Da aber nur eine Kamera zur Verfügung stand, musste eine andere Möglichkeit der stereoskopischen Betrachtung gefunden werden. Dafür wurde ein Spiegelsystem entwickelt, was es ermöglicht mit einer Videoeinrichtung zwei Seiten des Kanals zu beobachten. Dabei mussten beide Ansichten des Kanals in dem zur Verfügung stehenden Kamerabild untergebracht werden. Mit Hilfe von zwei parallelen Spiegeln (Abb. 8.2,3) werden die Bilder der beiden Seitenansichten jeweils nach oben und unten reflektiert, so dass sie im Kamerabild übereinander erscheinen (Abb. 8.5). Ein dritter Spiegel (Abb. 8.2,3) sorgt dafür, dass die zwei Ansichten aus einer Blickrichtung erkennbar sind.



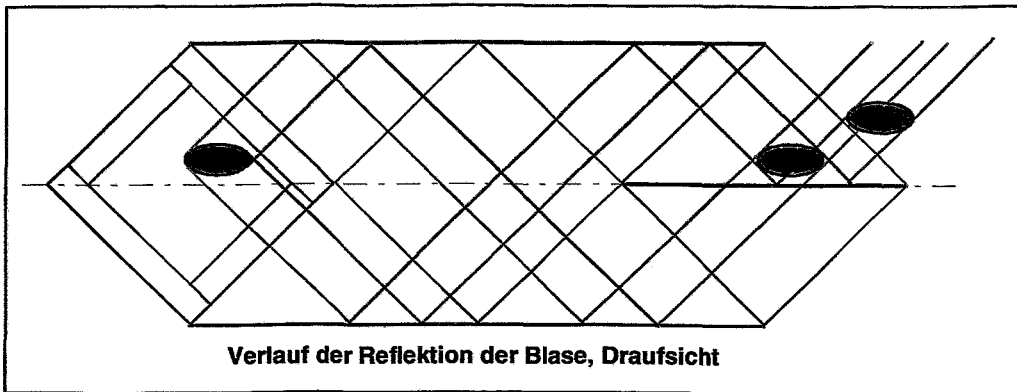


Abb. 8.2, Verlauf des Strahlengangs im Spiegelsystem, Draufsicht

Das dieses System anwendbar ist konnte in einer Funktionsprobe nachgewiesen werden. Dafür wurde ein Spiegelkasten hergestellt, in dem sich das beschriebene System befand. Dieser wurde am Plexiglaskanal in Höhe des Sensors angebracht (Abb. 8.4). Um eine gute Bildaufteilung zu erhalten, muss sich der Sensor im Mittelschnitt des Systems befinden.

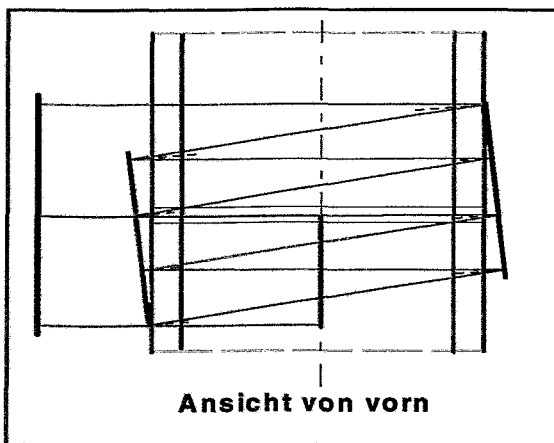


Abb. 8.3, Verlauf des Strahlengangs im Spiegelsystem, Vorderansicht

Durch den Test des Spiegelsystems konnten einige Kamerabilder aufgezeichnet (Abb. 8.5) werden. Aus diesen Bildern wurden die Probleme ersichtlich, die bei der Verwendung dieses Systems berücksichtigt werden müssen. Dazu gehört, dass die beiden großen Spiegel parallel sein müssen, weil es sonst zu einer Verzerrung der Bildes kommt. Das bedeutet, die Neigung eines Spiegels muß geringfügig veränderbar sein. Des weiteren ist eine gute Maßhaltigkeit notwendig, um die gesamte Kanalbreite zu erfassen.

Abb. 8.4,  
Spiegelkasten am Plexiglaskanal



Da zur Durchführung von Messungen für die Untersuchung der Sensorgenauigkeit kein Spiegelsystem in der benötigten Qualität angefertigt werden konnte, sind keine Vergleichsmessungen möglich gewesen. Durch diese hätte untersucht werden können, ob sich der beschriebene Fehler mit diesem System reduzieren lässt. Aus den aufgenommen Bildern (Abb. 8.5) ist zu erkennen, dass eine stereoskopische Betrachtung grundsätzlich möglich ist.

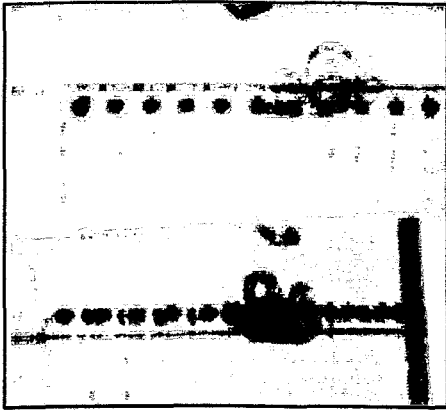


Abb. 8.5, durch Spiegelsystem erhaltenes Kamerabild

Beide Möglichkeiten, den Gesamtfehler des bezogenen Blasenvolumens aus den Kameradaten zu reduzieren, haben noch zu keinem aussagefähigen Ergebnis geführt.

## 9. Zusammenfassung

Die Aufgabe dieser Arbeit war die Untersuchung der Genauigkeit eines Gittersensors zur Visualisierung von Zweiphasenströmungen. Dabei handelt es sich um einen Gittersensor der im Institut für Sicherheitsforschung des FZ Rossendorf entwickelt wurde. Das Messprinzip des Sensors beruht auf der Ermittlung der momentanen lokalen elektrischen Leitfähigkeit eines Zweiphasengemischs. Dieser Gittersensor besteht aus zwei parallelen Elektrodenebenen, die sich quer zur Strömungsrichtung befinden. Zwischen diesen Elektroden befindet sich das empfindliche Volumen des Sensors, in welchem die Leitfähigkeit des Zweiphasengemischs gemessen wird. Der Gittersensor ermöglicht die Erfassung der Phasenverteilung. Aus den gemessenen lokalen Gasanteilen lassen sich die Blasenvolumen berechnen. Verschiedene Gittersensoren dieses Typs wurden bereits bei einer Reihe unterschiedlicher Experimente eingesetzt. Durch die dabei gewonnenen Erfahrungen konnte die Anwendbarkeit des Sensors für die Messung der Phasenverteilung nachgewiesen werden. Es fehlten aber bisher Untersuchungen des Gittersensors selbst, die Angaben über die Genauigkeit der Messwerte zuließen.

Die Aufgabe bestand nun in der Durchführung dieser Untersuchungen. Dabei sollten die durch den Gittersensor ermittelten Blasenvolumen mit dem tatsächlichen Volumen der Blasen verglichen werden. Da die Erzeugung von Luftblasen mit einem definierten Volumen nicht möglich war, wurde ein zweites Verfahren benötigt, das die Ermittlung von Werten zuließ, die mit denen des Sensors verglichen werden konnten. Dafür wurde eine Hochgeschwindigkeits-Videoeinrichtung benutzt, mit der die Strömung durch den Gittersensor in einem Plexiglaskanal beobachtet wurde. Ein Teil der Aufgabe war die Abstimmung beider Verfahren aufeinander. Mit diesen wurden synchron Messungen durchgeführt. Dafür wurden in die Wasserströmung des Plexiglaskanals einzelne Luftblasen eingedüst, die jeweils von Sensor und Videokamera erfasst wurden. Durch Rechnerprogramme wurde aus den Messdaten der beiden Verfahren ein auf die Blasengeschwindigkeit bezogener Blasendurchmesser berechnet. Durch den Vergleich dieser bezogenen Blasendurchmesser konnten Aussagen über die Genauigkeit des Gittersensors gemacht werden.

Der Vergleich bestätigte, dass der Gittersensor größere Blasenvolumen misst als tatsächlich vorhanden sind. Dieser Fehler des ermittelten Blasenvolumen nimmt mit kleiner werdenden Blasendurchmesser und bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten zu. Er ist darauf zurückzuführen, dass einige Volumenabschnitte einer Blase aufgrund des Abstandes der Elektrodengittern mehrfach gemessen werden.

Um Aussagen über die Genauigkeit des Gittersensors machen zu können, war die Untersuchung des Fehlers, der durch das Vergleichsverfahren in das Ergebnis des Vergleichs eingebracht wird, notwendig. Dabei wurden vier Fehlerursachen betrachtet. Den größten Anteil am Gesamtfehler hat der Fehler, der durch Berechnung des Blasenvolumens aus den Daten der zweidimensionalen Projektionsfläche einer Blase resultiert. Für diesen Fehler wurde ein mittlerer relativer Fehler für die berechneten bezogenen Blasendurchmesser von  $\Delta \tilde{d}_{Bl, opt} = 8\%$  ermittelt.

Einen weiteren, nicht unwesentlichen Beitrag zum Gesamtfehler liefert der Diskretisierungsfehler, der durch die Pixelung der Kamerabilder entsteht. Weiter wurden der Fehler durch die Perspektive, sowie von der durch ein Pixel wiedergegebenen Breite, untersucht. Für diese drei Fehler wurde ein relativer Fehler von  $\Delta \tilde{d}_{Bl, opt, rel} = 11\%$  berechnet. Daraus ergab sich ein Gesamtfehler von  $\Delta \tilde{d}_{Bl, opt, rel, gesamt} = 19\%$ . Der Gesamtfehler der Werte des Vergleichsverfahren hat demzufolge einen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis.

Die Messungen haben ergeben, dass die mittlere Abweichung der Gittersensorwerte von den Werten der Kameradaten aller bezogener Blasendurchmesser 20% beträgt. Der Beitrag, den der maximale Fehler der Kamerawerte zu dieser mittleren Abweichung liefert, ist sehr groß. Darum mussten Möglichkeiten gefunden werden, den Fehler der Kamerawerte zu verringern.

Der Diskretisierungsfehler sollte durch die Vergrößerung des Betrachtungsbereichs der Kamera verringert werden. Diese Variante brachte aber keine Verbesserung der bisher gefundenen Ergebnisse.

Der Fehler, der durch die Berechnung des Blasenvolumens aus den zweidimensionalen Abmessungen der Blase auftrat, sollte durch eine stereoskopische Betrachtung verringert werden. Dafür wurde ein Spiegelsystem entwickelt, das diese Betrachtung der Gasblasen mit nur einer Kamera erlaubt. In einer Funktionsprobe konnte die Anwendbarkeit des Spiegelsystems nachgewiesen werden.

Eine entscheidende Frage war, bis zu welchem minimalen Durchmesser einer Blase der Gittersensor diese identifizieren kann. Dafür wurden die vom Sensor gemessenen maximalen Gasgehalte der Blasen mit den Blasendurchmessern der Kameradaten ins Verhältnis gesetzt. Dabei wurde nachgewiesen, dass eine genaue Angabe eines Durchmessers nur mit Kenntnis der Position möglich ist, an der sich die Blase durch den Sensor bewegt. Durch Überlegungen wurde ein Bereich ermittelt, in den die Blasendurchmesser anhand der Gasgehalte eingeordnet werden konnten. Unter Berücksichtigung einer unteren Grenze aufgrund des Signalrauschens konnte ein minimaler Blasendurchmesser von 1,6mm festgestellt werden.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass sich die Beeinflussung der Strömung bzw. der Gasblasen durch die Elektrodendrähte des Sensors nicht auf das ermittelte Blasenvolumen, aber auf die gemessenen maximalen Gasanteile auswirken.

## Anhang

Im Anhang befinden sich die Wertetabellen der 15 durchgeführten Messungen, welche die Blasendurchmesser enthalten, die dem Vergleich der Gittersensordaten mit den Kameradaten dienten. Eine genaue Beschreibung der Werte befindet sich im Kap. 6.3. Die Tabellen im Anhang wurden um eine Spalte erweitert. In dieser wurde der Mittelwert aus den Kameradaten eingetragen, der dem Vergleich zugrunde liegt.

15060001.....	I
16060001.....	II
16060002.....	II
16060003.....	II
19060001.....	III
19060002.....	IV
19060003.....	IV
19060004.....	V
19060005.....	VI
20060001.....	XI
20060002.....	XI
20060003.....	XI
20060004.....	XII
22060002.....	XIII
22060003.....	XIV

15060001			j <sub>w</sub> = 0.2 m/s			große Düse					
Nr.	d <sub>s</sub>	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	d <sub>m</sub>
1	11.0	96	142	7684	9.1	13.4	10.2	10.0	9.1	9.1	9.6
2	10.3	95	124	2404	9.1	10.8	8.3	8.2	8.5	9.1	8.5
3	9.6	95	132	4855	9.1	10.3	9.6	9.7	9.5	9.7	9.6
4	10.5	94	74	3079	7.5	9.9	8.2	8.1	8.3	8.5	8.3
5	9.9	93	124	5051	9.6	11.1	9.0	9.0	9.0	9.3	9.1
6	9.4	92	121	1898	7.5	9.8	8.5	8.4	7.6	7.3	8.0
7	9.6	92	111	6535	9.6	10.2	9.3	9.7	9.3	8.8	9.3
8	9.8	92	103	8346	7.7	9.1	8.7	9.2	8.9	8.1	8.7
9	10.2	91	104	6222	8.1	10.6	9.4	9.8	9.4	9.5	9.5
10	9.7	91	130	7350	10.0	11.2	9.2	9.2	8.7	8.1	8.8
11	9.8	90	102	7864	5.5	8.3	8.1	8.1	8.4	9.1	8.4
12	9.9	90	117	8022	10.0	11.9	10.2	10.1	9.8	10.0	10.0
13	9.7	90	104	8200	7.5	10.5	10.1	10.2	10.9	9.8	10.3
14	10.2	89	128	578	10.2	11.4	9.4	9.2	9.4	8.7	9.2
15	10.1	88	108	1069	8.1	10.5	8.6	8.3	9.0	9.3	8.8
16	9.4	88	89	1572	9.8	10.8	10.1	9.5	8.6	7.7	9.0
17	9.4	88	94	5385	8.3	10.1	10.0	10.7	10.5	9.5	10.2
18	9.7	88	113	7033	9.1	9.8	8.6	8.3	8.6	8.6	8.5
19	10.3	87	103	73	8.9	10.7	10.5	10.7	10.1	9.0	10.1
20	10.0	87	110	6876	9.3	10.4	8.6	8.4	8.1	7.6	8.2
21	10.2	86	86	2069	9.3	10.4	9.0	9.5	9.0	8.9	9.1
22	9.9	86	89	4053	7.5	10.8	8.5	8.1	7.7	8.5	8.2
23	10.0	86	123	4374	6.3	8.9	7.8	7.2	7.2	7.6	7.5
24	9.8	86	113	5186	9.6	10.1	9.4	9.7	10.4	10.7	10.1
25	10.1	86	148	5857	6.9	8.7	8.8	8.9	9.1	9.3	9.0
26	9.6	84	117	4192	9.1	10.2	8.6	7.8	7.4	7.2	7.8
27	10.1	84	128	4534	9.3	11.5	10.8	10.6	10.0	10.2	10.4
28	9.5	84	113	5713	9.4	10.8	9.4	9.7	9.1	9.4	9.4
29	9.6	83	94	2906	8.1	10.4	9.1	9.2	8.8	9.0	9.0
30	9.6	83	110	3858	9.6	10.6	9.3	9.0	8.5	7.9	8.7
31	10.4	83	153	7526	9.1	10.2	8.3	8.7	9.2	9.2	8.9
32	10.4	82	116	2727	7.5	10.2	9.5	9.6	9.6	10.2	9.7
33	9.7	81	123	1403	7.1	9.4	8.0	7.5	7.2	7.4	7.5
34	9.9	81	109	3712	9.6	11.6	9.1	9.2	9.6	9.2	9.3
35	10.2	81	124	4711	6.5	10.0	8.3	9.0	9.1	9.2	8.9
36	9.8	80	95	256	8.7	10.4	8.6	8.5	8.7	8.2	8.5
37	9.6	80	109	6386	6.3	8.3	7.6	7.9	8.3	9.1	8.2
38	9.6	80	128	6720	8.9	10.8	8.9	8.3	7.9	7.7	8.2
39	9.8	79	89	391	9.4	10.4	8.8	9.0	9.1	8.8	8.9
40	9.8	79	93	920	8.1	10.8	10.8	11.3	11.3	10.4	11.0
41	9.3	78	87	2237	7.9	8.9	8.5	9.4	10.2	10.4	9.6
42	9.7	78	102	7191	7.1	9.2	7.7	7.5	7.8	9.1	8.0
43	9.8	76	79	3390	9.1	10.7	9.3	9.0	9.3	9.3	9.2
44	9.5	76	95	3529	8.9	11.3	9.3	9.5	8.9	8.3	9.0
45	9.7	76	127	6048	9.3	10.7	9.1	9.8	9.7	9.3	9.5
46	9.3	75	108	1249	10.2	11.1	9.7	9.7	10.3	11.1	10.2

15060001			$j_w = 0.2 \text{ m/s}$			große Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
47	9.4	74	100	8524	9.6	10.7	9.2	8.9	8.5	8.3	8.7
48	10.0	74	125	8681	6.7	8.9	8.2	8.3	8.6	8.6	8.4
49	9.4	73	118	3202	7.7	9.9	8.6	8.0	7.6	7.8	8.0
50	9.6	73	101	5533	8.1	9.6	8.5	9.0	8.6	8.2	8.6

16060001			$j_w = 0.05 \text{ m/s}$			große Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	8.9	81	121	2266	6.9	10.1	8.4	8.1	8.1	8.2	8.2
2	8.2	75	115	4494	7.9	9.4	9.6	9.6	9.4	9.8	9.6
3	8.4	74	149	6720	7.1	9.7	8.1	7.6	7.7	8.0	7.9
4	8.2	70	99	31	4.9	7.9	8.4	8.0	9.7	8.8	8.7
5	7.9	68	123	3376	6.7	9.2	8.2	8.1	7.9	8.0	8.1
6	8.8	68	98	5603	5.1	8.1	6.8	8.2	8.0	7.9	7.7
7	8.1	65	112	1154	6.5	8.7	8.4	9.7	9.7	8.8	9.2
8	8.5	65	131	7823	8.7	10.4	7.7	7.4	7.8	9.1	8.0

16060002			$j_w = 0.4 \text{ m/s}$			große Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	7.6	82	90	6476	7.5	8.2	7.3	7.1	7.8	8.2	7.6
2	7.9	82	79	7129	6.3	8.1	7.7	7.8	7.6	7.1	7.6
3	7.9	81	80	812	6.7	7.8	6.2	6.1	6.4	6.3	6.3
4	7.6	81	63	8659	6.7	7.5	7.1	7.2	6.6	6.3	6.8
5	8.4	80	79	7863	7.3	9.0	8.2	8.4	9.0	9.2	8.7
6	7.9	79	104	1436	7.3	8.5	6.9	6.8	6.1	7.0	6.7
7	7.2	76	93	5060	6.3	7.0	7.1	7.5	7.4	6.3	7.1
8	7.8	71	99	2895	9.1	9.6	8.6	8.5	7.7	7.6	8.1
9	7.8	71	89	5726	8.5	9.4	8.6	8.3	8.1	7.9	8.2
10	7.8	70	87	2207	8.9	9.0	7.6	7.3	7.8	8.0	7.7
11	7.5	68	90	3614	7.9	8.1	8.2	8.2	7.7	7.3	7.9

16060003			$j_w = 0.2 \text{ m/s}$			große Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	8.5	90	122	5801	8.9	10.7	9.3	9.5	8.8	7.7	8.8
2	8.0	83	96	4374	8.1	9.2	8.6	8.8	8.7	8.7	8.7
3	8.1	83	135	7670	6.9	9.4	9.0	8.3	7.4	7.3	8.0
4	8.5	80	124	8416	5.5	7.7	6.8	6.8	7.3	8.1	7.3
5	8.1	78	106	3612	5.7	9.1	8.0	7.8	8.1	8.3	8.1
6	8.2	77	93	296	7.1	9.7	8.2	8.0	8.3	8.1	8.2
7	7.5	77	122	6555	6.9	8.5	8.4	8.5	8.0	8.7	8.4
8	8.0	76	108	2519	6.5	8.8	7.5	7.6	8.1	8.3	7.9
9	8.3	76	151	8021	7.3	9.1	8.1	7.9	7.7	8.0	7.9
10	7.6	75	137	1399	8.3	9.3	9.2	9.1	8.8	8.9	9.0
11	7.7	74	121	7293	7.3	9.2	9.5	9.1	8.2	8.1	8.7
12	7.7	71	116	2863	5.9	7.8	7.6	7.4	7.8	8.2	7.8

-III-

16060003			$j_w = 0.2 \text{ m/s}$			große Düse					
Nr.	$d_s$	max	$s_x$	$s_z$	$d_r$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_m$
13	8.2	71	140	5099	6.3	8.4	7.2	7.3	7.3	7.0	7.2
14	7.2	69	137	5454	6.3	8.8	8.3	7.5	7.5	8.1	7.9
15	8.4	68	124	3251	7.5	9.9	8.4	7.6	7.8	8.5	8.1
16	8.5	68	123	6174	7.5	9.2	8.2	8.3	8.5	8.2	8.3
17	7.7	68	92	6956	8.3	8.8	7.9	7.2	6.5	7.1	7.2
18	8.1	67	104	4005	6.5	8.6	6.4	6.9	7.2	7.2	6.9
19	8.2	67	102	4724	5.1	6.8	6.2	6.5	7.0	7.2	6.7
20	7.9	66	103	651	9.1	10.5	9.2	8.8	8.5	8.8	8.8
21	8.1	65	128	2138	6.3	8.7	6.9	7.5	7.8	7.9	7.5
22	8.0	64	124	1043	7.5	9.3	7.4	7.0	7.0	6.9	7.1
23	8.3	63	100	1788	8.7	10.7	8.0	8.0	8.4	8.4	8.2

19060001			$j_w = 0.05 \text{ m/s}$			mittlere Düse					
Nr.	$d_s$	max	$s_x$	$s_z$	$d_r$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_m$
1	9.4	84	115	7280	5.5	9.3	6.0	8.2	7.4	7.2	7.2
2	9.0	80	108	5549	7.1	10.8	9.0	8.2	7.2	7.2	7.9
3	8.8	77	138	2602	6.9	10.5	8.5	8.3	7.2	6.8	7.7
4	8.2	77	141	3240	6.5	8.7	6.9	6.8	7.6	6.9	7.1
5	8.9	75	107	6891	7.7	11.0	8.5	7.4	7.5	6.3	7.4
6	8.2	74	121	3573	7.1	9.6	8.7	8.0	7.5	8.0	8.1
7	8.6	73	130	6558	4.9	7.9	7.1	7.4	7.0	6.8	7.1
8	8.6	70	131	594	5.5	7.8	6.4	7.5	8.6	8.7	7.8
9	7.7	70	123	937	6.3	8.9	8.6	8.3	6.5	6.6	7.5
10	8.1	69	122	244	7.5	9.8	8.6	8.1	8.1	8.2	8.3
11	7.7	69	125	2271	6.5	8.3	7.0	7.3	7.1	7.7	7.3
12	8.2	69	137	4582	6.9	8.8	7.1	7.8	0.7	8.0	5.9
13	8.5	69	95	8542	6.7	9.0	6.9	7.7	7.9	7.9	7.6
14	8.0	68	115	4234	5.9	8.1	8.7	8.3	0.7	7.5	6.3
15	7.7	67	137	1952	6.1	7.7	6.8	6.5	6.7	7.2	6.8
16	7.6	66	168	5254	6.7	8.7	7.5	8.1	7.4	7.5	7.6
17	7.9	65	129	8242	4.9	7.2	8.2	8.9	8.6	7.7	8.4
18	7.8	64	132	5923	6.3	7.6	6.8	6.5	6.3	6.8	6.6
19	8.5	63	118	7955	7.3	10.2	6.5	7.0	7.0	7.0	6.9
20	7.6	62	91	1624	6.1	7.9	6.7	6.6	7.0	7.5	7.0
21	7.8	62	109	2915	6.7	8.7	7.2	7.1	7.5	7.2	7.3
22	8.0	58	144	6234	6.3	7.6	6.9	6.8	7.1	6.5	6.8
23	7.7	57	87	3924	5.5	6.8	6.1	6.2	6.8	7.1	6.6
24	8.5	57	143	4912	6.1	9.3	7.8	7.8	7.7	6.8	7.5
25	8.0	57	129	7583	8.1	9.6	7.8	7.8	8.1	8.1	8.0



19060002			$j_w = 0.2 \text{ m/s}$			mittlere Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	7.0	85	79	7974	5.5	7.0	6.3	6.7	7.0	6.9	6.7
2	7.0	82	92	1590	6.3	7.2	6.0	5.6	5.8	5.7	5.8
3	7.4	79	76	64	7.5	8.3	7.6	7.8	7.8	7.4	7.7
4	6.7	79	75	2109	5.5	7.4	6.3	6.4	6.2	5.8	6.2
5	6.9	78	74	3107	5.7	6.9	6.4	6.5	6.7	6.5	6.5
6	6.6	76	56	4221	6.1	7.1	6.9	6.9	6.6	6.1	6.6
7	7.0	75	96	5752	7.7	8.2	6.4	6.1	6.2	6.4	6.3
8	7.2	75	74	6863	4.3	6.0	5.5	5.4	5.8	6.4	5.8
9	7.0	74	87	1141	5.9	6.9	6.4	6.1	6.0	5.9	6.1
10	7.0	73	100	503	6.5	6.9	6.0	5.8	6.3	6.6	6.2
11	7.3	73	77	8646	6.7	8.1	7.1	6.7	6.1	6.1	6.5
12	7.4	70	71	5278	5.5	6.5	5.7	5.9	6.5	7.0	6.3
13	7.3	69	98	3804	7.3	7.5	6.2	6.5	6.8	7.5	6.8
14	6.7	68	88	2629	5.9	7.5	7.1	7.5	7.3	7.4	7.3
15	7.0	68	83	7518	6.9	7.1	6.3	6.2	6.7	6.5	6.4
16	6.3	66	81	4744	4.5	6.0	6.9	5.8	6.6	7.2	6.6
17	7.3	66	83	6396	5.3	6.3	6.0	5.9	6.0	6.6	6.1

19060003			$j_w = 0.4 \text{ m/s}$			mittlere Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	6.9	91	47	7661	8.1	7.3	7.2	6.8	6.5	6.2	6.7
2	6.8	88	57	2346	7.1	6.8	7.0	7.1	6.9	6.8	7.0
3	6.4	88	24	4330	5.9	6.0	6.1	6.7	6.7	6.7	6.6
4	7.0	88	45	6838	7.9	7.6	7.1	7.0	6.9	6.9	7.0
5	6.0	87	56	4636	6.1	6.0	6.0	6.0	5.9	5.8	5.9
6	7.1	87	43	4979	5.9	6.3	6.0	6.2	6.7	6.9	6.5
7	6.6	85	64	2995	7.1	7.7	7.7	7.7	7.7	7.4	7.6
8	7.0	84	34	1524	7.1	7.4	6.7	6.8	6.4	6.4	6.6
9	6.9	81	59	3818	6.9	6.2	6.1	5.8	6.3	7.1	6.3
10	7.0	79	36	803	7.7	7.5	6.5	6.2	5.7	6.0	6.1
11	6.5	79	54	1886	6.9	6.3	5.8	5.9	6.0	6.0	5.9
12	6.7	79	23	6190	5.9	6.5	6.2	6.8	6.8	6.3	6.5
13	6.7	79	41	8047	6.9	6.9	7.0	6.9	6.7	6.5	6.8
14	6.9	77	49	5378	6.3	6.8	6.8	7.1	7.1	7.6	7.2
15	6.7	76	58	1120	6.5	7.0	7.5	8.0	7.7	7.2	7.6
16	5.7	76	59	4098	5.9	5.4	5.1	5.0	5.1	5.2	5.1
17	6.4	75	73	3425	5.5	6.0	5.8	5.8	5.9	6.1	5.9
18	6.3	75	44	5733	6.3	6.3	6.3	6.4	6.2	6.6	6.4
19	6.8	71	29	396	5.7	7.3	6.7	6.8	7.1	7.4	7.0
20	6.5	66	52	7239	6.5	5.9	4.8	5.1	5.4	5.7	5.3
21	6.2	61	23	6495	4.9	5.7	5.3	5.1	5.4	5.8	5.4
22	4.1	52	57	2615	4.3	4.3	4.3	3.9	3.6	3.4	3.8
23	3.3	35	42	4586	2.4	2.8	2.8	2.9	2.6	3.0	2.8

19060004			j <sub>v</sub> = 0.05 m/s			kleine Düse					
Nr.	d <sub>s</sub>	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	d <sub>m</sub>
1	8.4	62	165	5837	4.5	6.1	4.5	5.3	4.9	4.9	4.9
2	7.9	60	131	106	3.3	4.9	4.5	4.7	4.9	5.2	4.8
3	9.4	60	226	1232	3.1	6.9	4.9	3.9	3.8	3.8	4.1
4	8.5	59	165	4416	4.3	6.2	4.4	4.2	4.0	4.4	4.3
5	7.5	56	168	5127	5.7	6.9	5.8	6.2	6.1	5.9	6.0
6	7.5	56	146	6198	4.5	5.5	5.4	5.7	5.6	5.2	5.5
7	7.4	51	184	2226	4.5	6.5	4.8	4.5	4.0	3.9	4.3
8	7.8	51	206	3345	3.7	5.6	4.0	3.8	3.9	4.0	3.9
9	6.9	51	179	6558	3.9	5.3	5.1	4.9	4.8	4.6	4.9
10	6.7	50	162	4082	3.1	4.2	4.5	4.0	3.9	4.1	4.1
11	7.7	50	178	7973	3.0	5.0	4.2	4.0	4.1	4.2	4.1
12	6.8	49	192	835	3.1	4.6	3.6	3.7	3.9	3.7	3.7
13	6.6	49	156	4449	3.3	4.9	4.4	4.2	4.0	4.4	4.3
14	7.5	48	132	4772	4.9	5.8	4.3	4.5	4.3	4.3	4.4
15	7.0	48	178	6918	3.0	4.7	3.6	3.7	3.6	4.0	3.7
16	7.5	47	174	2984	4.1	6.0	4.7	5.2	5.0	5.1	5.0
17	6.8	46	177	1914	3.1	4.4	4.7	4.9	4.6	4.9	4.8
18	6.5	46	178	3697	3.3	4.6	4.3	5.1	5.4	5.3	5.0
19	6.9	46	207	7572	3.3	4.8	4.0	4.0	3.9	3.7	3.9
20	7.0	44	177	2609	3.1	4.4	5.1	5.2	4.5	4.8	4.9
21	6.5	44	94	3367	3.1	4.3	4.0	3.8	3.9	4.0	3.9
22	7.2	43	191	1561	3.7	5.4	5.8	5.5	5.0	4.6	5.2
23	6.4	43	191	7244	3.3	4.2	4.9	5.2	4.7	4.5	4.8
24	7.0	42	189	8707	3.9	5.2	4.8	4.5	4.5	4.7	4.6
25	6.9	41	189	1203	4.1	4.8	4.9	3.9	3.8	3.8	4.1
26	6.5	41	157	1590	3.3	5.0	5.0	4.6	4.4	4.2	4.6
27	6.4	39	166	2280	4.5	6.6	5.0	4.8	4.5	4.1	4.6
28	5.9	39	221	5156	3.0	3.9	4.3	4.3	4.1	4.0	4.2
29	7.3	39	149	5475	5.7	7.4	5.0	4.5	4.4	4.6	4.6
30	6.8	39	232	8394	4.1	6.7	4.6	4.3	4.2	4.0	4.3
31	6.2	38	209	4053	4.5	5.5	5.1	5.6	5.5	5.1	5.3
32	6.7	38	128	6238	3.1	4.6	4.4	4.6	4.1	3.9	4.3
33	6.2	37	132	4772	4.9	5.8	4.3	4.5	4.3	4.3	4.4
34	5.9	37	202	6942	2.6	3.8	3.6	3.7	3.6	4.0	3.7
35	5.9	37	144	8717	3.5	5.1	4.8	4.5	4.5	4.7	4.6
36	6.7	36	136	430	4.5	5.9	4.1	4.5	4.5	4.4	4.4
37	5.2	36	234	6618	3.3	5.0	4.6	4.0	3.9	3.9	4.1
38	6.2	35	208	380	3.1	4.3	4.4	4.4	3.9	4.3	4.3
39	7.0	35	159	8337	3.3	5.2	5.4	4.7	4.4	4.8	4.8
40	6.3	30	222	2147	3.3	4.5	4.3	4.5	4.5	4.4	4.4
41	6.0	30	157	5878	3.3	4.8	4.8	4.4	4.3	4.5	4.5
42	6.3	29	112	3725	3.1	4.5	4.1	4.1	4.1	4.3	4.2
43	6.1	29	224	7587	2.8	3.8	4.0	4.0	3.9	3.7	3.9
44	5.9	28	189	7661	2.8	4.0	4.1	4.1	3.8	3.9	4.0
45	6.2	27	232	7270	4.9	6.2	4.9	5.2	4.7	4.5	4.8
46	5.6	24	176	492	3.0	3.6	3.8	4.1	4.1	4.2	4.1

19060005			j <sub>v</sub> "			0.2 m/s		kleine Düse					
Nr.	d <sub>s</sub>	max	ax	ax	dr	d1	d2	d3	d4	d5	d <sub>m</sub>		
1	5.1	44	137	7225	3.5	4.2	2.8	2.7	2.7	2.9	2.8		
2	5.4	43	138	250	3.5	3.6	2.7	2.8	2.7	2.7	2.7		
3	4.9	41	118	4460	3.5	3.9	2.7	2.6	2.7	2.5	2.6		
4	4.7	40	150	5816	3.1	3.8	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6		
5	5.1	39	153	5312	3.1	3.6	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8		
6	5.0	39	103	6601	3.3	3.9	3.1	3.0	2.8	2.7	2.9		
7	4.6	38	166	8179	3.0	3.1	2.4	2.6	2.7	2.6	2.6		
8	4.8	37	152	3631	3.3	4.0	2.4	2.7	2.5	2.6	2.6		
9	4.9	36	102	7646	3.3	4.0	2.8	2.6	2.6	2.6	2.7		
10	4.3	35	162	2445	2.4	2.9	2.9	2.8	2.9	2.8	2.9		
11	4.6	35	147	3946	2.8	3.0	2.6	2.6	2.8	2.8	2.7		
12	4.4	35	109	4709	2.4	2.7	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8		
13	4.7	35	184	6743	3.5	3.9	2.7	2.7	2.4	2.5	2.6		
14	4.2	35	192	7018	2.6	3.3	3.3	3.2	2.9	2.7	3.0		
15	4.1	34	162	623	2.2	2.7	3.0	3.0	3.0	2.8	3.0		
16	4.2	34	130	4053	2.6	2.9	2.9	2.9	2.7	2.8	2.8		
17	4.2	34	157	5208	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6		
18	4.2	34	191	5487	2.4	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8		
19	4.3	34	138	6044	2.2	2.6	2.8	2.7	2.6	2.7	2.7		
20	4.4	33	122	1227	2.2	2.8	2.6	2.8	2.7	2.7	2.7		
21	4.2	33	162	1865	2.6	3.0	2.9	3.0	2.6	2.6	2.8		
22	5.0	33	123	2134	3.3	4.1	3.0	2.8	2.8	2.5	2.8		
23	4.5	33	136	2930	2.0	2.4	2.5	2.5	2.7	2.7	2.6		
24	4.3	33	133	5082	3.3	3.9	3.0	2.9	2.7	2.5	2.8		
25	4.4	33	175	6989	2.4	3.0	3.0	3.0	2.6	2.5	2.8		
26	4.2	33	127	7402	3.0	3.2	3.1	3.1	3.0	2.9	3.0		
27	4.4	32	93	709	2.2	2.6	2.7	2.4	2.4	2.3	2.5		
28	4.4	32	144	948	2.8	2.8	2.6	2.7	2.4	2.5	2.6		
29	4.5	32	150	1469	3.1	3.1	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4		
30	4.6	32	137	1674	3.1	3.7	2.9	2.9	2.8	2.8	2.9		
31	4.1	32	161	2464	2.4	2.6	2.7	2.8	2.8	2.7	2.8		
32	4.3	32	145	2570	2.6	3.1	2.8	2.8	2.6	2.5	2.7		
33	4.5	32	165	3238	3.1	3.8	2.8	2.7	2.4	2.5	2.6		
34	4.1	32	105	4580	2.2	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6		
35	4.6	32	179	8205	3.3	4.0	2.8	2.7	2.5	2.5	2.7		
36	4.9	31	136	1307	3.3	3.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8		
37	4.7	31	122	1730	3.1	3.4	2.7	2.4	2.6	2.4	2.5		
38	4.2	31	157	4130	2.4	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.4		
39	5.0	31	145	4211	2.6	3.0	2.5	2.2	2.4	2.3	2.4		
40	4.2	31	164	5593	2.6	2.9	2.7	2.7	2.7	2.5	2.7		
41	4.8	31	124	5941	2.8	3.6	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7		
42	4.1	31	161	7537	2.6	2.9	2.9	2.5	2.8	2.8	2.9		
43	4.6	31	151	8405	2.8	3.0	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4		
44	4.2	31	153	8591	3.0	3.0	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9		
45	4.3	30	183	1184	2.6	2.9	2.8	2.8	2.9	2.5	2.8		
46	4.1	30	82	1757	2.6	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.6		

19060005			$j_v = 0.2 \text{ m/s}$			kleine Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
47	4.1	30	160	2842	2.6	2.8	2.9	2.9	2.7	2.7	2.8
48	4.2	30	145	3973	2.4	2.8	3.0	3.0	2.9	2.8	2.9
49	4.1	30	139	4283	2.4	2.7	2.8	2.6	2.5	2.4	2.6
50	4.2	30	110	5009	2.8	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.8
51	4.1	30	140	5279	2.4	2.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8
52	4.0	30	163	6320	2.2	2.7	2.7	2.6	2.5	2.6	2.6
53	4.5	30	151	6808	3.0	3.4	2.7	2.6	2.6	2.5	2.6
54	4.5	30	111	8092	2.6	2.9	2.6	2.6	2.3	2.5	2.5
55	4.3	30	185	8127	2.4	2.8	2.9	2.9	2.9	2.8	2.9
56	4.0	30	109	8221	2.6	2.9	2.8	2.7	2.5	2.5	2.6
57	4.3	30	180	8545	3.1	3.6	2.8	3.0	2.9	3.1	3.0
58	4.1	29	162	685	2.4	2.9	2.9	2.6	2.6	2.3	2.6
59	4.3	29	103	2274	3.5	3.7	2.8	2.9	2.9	2.8	2.9
60	4.6	29	132	2369	3.3	4.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.8
61	4.4	29	117	2740	3.0	3.5	2.7	2.7	2.6	2.5	2.6
62	4.5	29	125	3013	2.4	2.9	2.7	2.8	2.7	2.7	2.7
63	4.3	29	171	3187	2.8	3.2	2.8	2.6	2.6	2.6	2.7
64	4.2	29	130	4087	2.4	2.7	2.6	2.8	2.8	2.7	2.7
65	4.0	29	187	6723	2.2	2.5	2.4	2.6	2.5	2.7	2.6
66	4.2	29	160	7256	2.6	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.6
67	3.9	29	153	8244	3.1	3.6	2.9	2.9	3.0	2.8	2.9
68	4.0	28	164	749	2.0	2.5	2.4	2.2	2.4	2.5	2.4
69	3.9	28	177	780	2.0	2.4	2.4	2.5	2.3	2.4	2.4
70	4.2	28	78	972	2.0	2.4	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6
71	4.1	28	146	1706	2.2	2.8	2.8	2.8	2.9	3.0	2.9
72	4.5	28	98	2668	2.6	2.9	2.9	3.1	2.9	3.0	3.0
73	3.9	28	166	2699	3.1	3.5	2.8	2.7	2.6	2.6	2.7
74	4.0	28	177	3709	2.2	2.7	2.8	2.8	2.9	2.6	2.5
75	4.1	28	143	4107	2.8	2.8	2.7	2.8	2.6	2.6	2.7
76	4.3	28	130	4325	2.6	3.1	3.2	3.1	3.0	2.7	3.0
77	4.3	28	94	4505	2.2	2.8	2.4	2.5	2.5	2.4	2.5
78	4.2	28	137	4538	2.6	2.8	2.4	2.6	2.2	2.3	2.4
79	4.3	28	122	5567	2.8	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	3.0
80	4.2	28	163	7035	2.0	2.9	2.4	2.6	2.6	2.4	2.5
81	4.1	28	162	7365	2.2	2.5	2.8	2.8	2.6	2.7	2.7
82	4.2	27	168	666	3.1	3.5	2.6	2.6	2.7	2.8	2.7
83	4.0	27	145	1146	2.4	2.6	2.5	2.6	2.6	2.4	2.5
84	4.1	27	157	2890	2.6	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8
85	4.4	27	129	3224	2.8	2.8	2.8	2.7	2.4	2.5	2.6
86	4.0	27	141	3418	2.6	2.7	2.8	2.7	2.7	2.6	2.7
87	4.0	27	167	3453	3.1	3.4	2.7	2.6	2.5	2.4	2.5
88	4.0	27	109	3990	2.6	2.8	3.0	2.8	2.7	2.5	2.8
89	4.2	27	152	5452	3.0	3.2	2.6	2.8	3.0	2.9	2.8
90	3.9	27	142	5603	2.8	2.8	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6
91	4.4	27	169	5647	2.8	3.0	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4
92	4.1	27	142	5744	2.4	2.6	2.9	2.9	3.0	2.8	2.8

-VIII-

19060005			$j_w = 0.2 \text{ m/s}$			kleine Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
93	4.3	27	104	5924	3.5	4.0	2.7	2.6	2.6	2.7	2.7
94	4.2	27	189	6259	2.2	2.6	2.6	2.8	2.7	2.8	2.7
95	4.1	27	92	6384	2.2	2.6	2.6	2.7	2.5	2.4	2.6
96	4.1	27	94	6445	2.4	2.6	2.6	2.4	2.4	2.4	2.5
97	4.1	27	156	6917	2.4	2.8	2.8	2.6	2.8	2.5	2.7
98	4.2	27	127	7106	2.4	2.6	2.7	2.7	2.9	2.8	2.8
99	4.2	27	144	7332	2.6	2.7	2.7	2.8	2.6	2.6	2.7
100	4.4	27	188	7680	2.2	3.0	2.9	2.8	2.6	2.6	2.7
101	4.3	27	129	8366	2.6	2.8	2.8	2.8	2.6	2.5	2.7
102	4.2	26	127	1393	2.8	3.1	3.1	3.2	2.9	2.9	3.0
103	4.3	26	147	1444	3.0	3.3	2.7	2.7	2.6	2.7	2.7
104	4.0	26	144	1637	2.8	2.9	2.6	2.6	2.6	2.4	2.6
105	3.9	26	90	1782	3.3	3.7	2.9	2.5	2.6	2.4	2.6
106	4.1	26	127	2511	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6
107	4.1	26	152	2811	3.3	3.6	2.7	2.8	2.6	2.6	2.7
108	4.3	26	148	3868	2.2	2.5	2.8	2.6	2.8	2.7	2.7
109	3.9	26	143	4379	2.6	2.8	2.9	3.0	2.9	2.7	2.9
110	4.1	26	68	4414	2.2	2.6	2.9	2.6	2.7	2.5	2.7
111	4.0	26	132	5131	2.2	2.5	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6
112	4.2	26	125	5230	2.4	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
113	4.0	26	152	5511	3.3	3.5	2.6	2.5	2.4	2.6	2.5
114	4.3	26	186	6227	3.0	3.4	2.6	2.7	2.4	2.6	2.6
115	3.7	26	175	7157	2.6	2.6	2.8	2.8	2.6	0.7	2.2
116	5.0	26	100	7614	3.0	4.0	2.5	2.6	2.4	2.5	2.5
117	4.3	26	175	7870	2.0	2.4	2.3	2.3	2.4	2.3	2.3
118	3.4	26	187	7977	2.6	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.7
119	3.9	25	169	552	3.1	3.6	2.9	3.0	3.0	2.8	2.9
120	4.0	25	132	1130	3.0	3.4	2.8	2.6	2.7	2.6	2.7
121	4.2	25	142	1598	2.4	2.8	2.7	2.8	2.7	2.6	2.7
122	3.9	25	140	1824	2.4	2.6	2.4	2.5	2.4	2.1	2.4
123	4.1	25	133	1840	3.3	3.6	2.8	2.6	2.5	2.7	2.7
124	4.2	25	154	2078	3.3	3.5	2.8	2.8	2.8	2.7	2.8
125	4.2	25	156	2237	2.2	2.8	2.8	2.6	2.6	2.5	2.6
126	3.9	25	164	2916	3.3	3.7	2.5	2.5	2.7	2.7	2.6
127	4.0	25	156	3800	2.6	3.1	3.0	2.9	2.6	2.7	2.8
128	4.8	25	171	4245	2.8	3.5	2.4	2.5	2.7	2.6	2.6
129	3.9	25	142	4433	2.0	2.4	2.5	2.6	2.7	2.5	2.6
130	4.1	25	161	4739	2.6	2.9	3.1	2.8	2.7	2.7	2.8
131	3.8	25	172	4824	2.6	2.6	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8
132	3.8	25	146	6197	2.4	3.0	3.0	2.8	2.6	2.5	2.7
133	3.9	25	151	6765	3.1	3.6	2.8	2.7	2.6	2.4	2.6
134	3.9	25	176	6788	2.2	2.7	2.7	2.6	2.7	2.6	2.7
135	3.7	25	187	7189	2.6	3.0	2.5	0.6	2.4	2.6	2.0
136	3.7	25	152	7478	3.3	3.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
137	4.3	25	102	7834	3.3	3.3	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
138	4.2	24	160	168	2.6	2.6	2.7	2.9	2.9	3.0	2.9

19060005			j <sub>w</sub> = 0.2 m/s			kleine Düse					
Nr.	d <sub>s</sub>	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	d <sub>m</sub>
139	4.1	24	162	351	2.4	2.8	2.6	2.4	2.1	2.0	2.3
140	4.0	24	174	407	2.4	2.6	2.7	2.6	2.7	2.7	2.7
141	3.7	24	105	1418	2.8	3.1	2.9	2.7	2.6	2.7	2.7
142	4.3	24	142	1516	2.6	2.9	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8
143	3.9	24	101	2162	2.2	2.6	2.3	2.8	2.7	2.5	2.6
144	4.4	24	179	2339	3.0	3.1	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
145	3.9	24	148	2988	3.0	3.3	2.7	2.7	2.7	2.6	2.7
146	3.9	24	143	3079	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.6	2.7
147	3.7	24	152	4034	3.3	3.7	2.8	2.7	2.7	2.8	2.8
148	3.9	24	163	4352	1.8	2.6	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8
149	3.7	24	139	4562	2.2	2.5	2.7	2.5	2.5	2.5	2.6
150	4.4	24	182	4806	3.1	3.5	2.9	2.8	2.7	2.6	2.8
151	4.4	24	132	5709	3.3	3.8	2.8	2.8	2.7	2.4	2.7
152	4.0	24	143	5779	2.8	2.8	2.8	2.7	2.4	2.5	2.6
153	3.9	24	128	5985	2.8	2.8	3.0	2.9	3.0	3.0	3.0
154	3.7	24	176	6520	1.4	1.8	2.4	2.3	2.5	2.5	2.4
155	4.3	24	117	6632	3.5	4.1	2.6	2.6	2.6	2.3	2.5
156	4.1	24	176	6642	2.4	2.7	2.6	2.6	2.6	2.3	2.5
157	3.9	24	187	7139	2.2	2.7	2.6	2.7	2.7	2.6	2.7
158	4.2	24	188	7518	2.0	2.7	2.7	2.7	2.8	2.6	2.7
159	4.0	24	141	7761	2.6	2.9	2.9	3.1	2.9	2.8	2.9
160	3.4	24	172	7857	2.2	2.5	2.3	2.3	2.4	2.3	2.3
161	3.9	24	113	8620	2.8	3.0	2.8	2.7	2.6	2.5	2.7
162	3.7	23	202	817	2.6	3.0	2.6	2.5	2.5	2.7	2.6
163	3.8	23	176	1557	2.4	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
164	4.1	23	167	2006	3.3	3.6	2.9	2.7	2.8	2.4	2.7
165	3.9	23	137	2213	3.1	3.4	2.8	2.8	2.8	2.7	2.8
166	3.9	23	114	2488	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
167	4.1	23	174	2773	2.2	2.5	2.4	2.4	2.6	2.4	2.5
168	3.7	23	147	3639	2.2	2.5	2.4	2.7	2.5	2.6	2.6
169	4.3	23	133	3834	3.0	3.4	2.8	2.7	2.7	2.5	2.7
170	3.8	23	138	4783	2.4	2.7	2.6	2.5	2.4	2.1	2.4
171	4.0	23	156	5546	2.2	2.6	2.8	3.0	2.8	2.8	2.9
172	3.8	23	183	6557	2.8	3.2	2.4	2.7	2.7	2.6	2.6
173	3.6	23	126	7084	2.2	2.7	2.9	3.0	3.1	2.9	3.0
174	3.7	23	160	7118	2.2	2.6	2.7	2.7	2.9	2.8	2.8
175	4.0	23	158	8329	2.8	3.1	2.9	3.1	3.0	2.9	3.0
176	3.9	23	118	8519	3.5	3.8	2.9	2.8	2.6	2.7	2.8
177	3.8	23	163	8639	2.0	2.5	2.7	2.6	2.7	2.7	2.7
178	4.1	22	188	272	2.4	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	2.8
179	3.4	22	169	375	2.6	2.9	2.6	2.4	2.4	2.3	2.4
180	3.8	22	171	985	2.2	2.7	2.9	2.8	2.7	2.7	2.8
181	4.0	22	150	1005	3.3	3.2	2.7	2.6	2.7	2.6	2.7
182	3.0	22	146	1888	2.4	2.7	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8
183	3.8	22	127	3154	2.8	3.0	3.1	2.9	2.8	2.7	2.9
184	4.2	22	206	3668	1.8	2.5	2.5	2.6	2.7	2.6	2.6

19060005			j <sub>w</sub> = 0.2 m/s			kleine Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
185	3.7	22	109	3686	2.2	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.5
186	4.1	22	137	4071	3.0	3.4	2.8	2.8	2.8	2.7	2.8
187	3.9	22	152	4599	3.0	3.2	2.5	2.5	2.3	2.6	2.5
188	4.1	22	148	4768	3.1	3.3	3.0	2.7	2.9	2.8	2.9
189	3.6	22	171	4937	2.2	2.6	2.9	2.8	2.5	2.4	2.7
190	4.1	22	141	5879	2.4	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8
191	3.9	22	143	6118	2.4	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	2.9
192	4.1	22	141	6151	2.4	2.7	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6
193	3.8	22	147	6288	2.4	2.8	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3
194	3.6	22	136	6339	2.8	3.3	2.7	2.6	2.5	2.5	2.6
195	4.0	22	166	6467	3.0	3.1	2.5	2.3	2.3	2.3	2.4
196	3.4	22	188	6951	2.2	2.5	2.8	2.7	2.4	2.6	2.6
197	3.8	22	187	7189	2.6	3.0	2.5	0.6	2.4	2.6	2.0
198	3.9	22	133	7897	3.3	3.6	2.8	2.7	2.7	2.4	2.7
199	4.0	22	173	8052	2.6	2.6	2.7	2.6	2.4	2.3	2.5
200	4.1	21	168	92	3.3	3.9	2.9	2.9	2.8	2.7	2.8
201	2.4	21	169	375	2.6	2.9	2.6	2.4	2.4	2.3	2.4
202	3.7	21	160	603	2.6	2.6	2.7	2.5	2.4	2.6	2.6
203	4.1	21	173	886	2.0	2.6	2.6	2.5	2.5	2.3	2.5
204	4.1	21	157	926	2.2	2.6	2.9	2.8	2.8	2.9	2.9
205	3.4	21	146	1888	2.4	2.7	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8
206	4.3	21	144	2195	2.2	2.6	2.5	2.4	2.6	2.6	2.5
207	3.7	21	147	3113	2.2	2.4	2.6	2.6	2.6	2.7	2.6
208	3.9	21	129	3287	2.8	3.0	2.7	2.8	2.7	2.9	2.8
209	3.6	21	117	4422	3.1	3.4	2.5	2.6	2.7	2.5	2.6
210	3.2	21	142	4433	2.0	2.4	2.5	2.6	2.7	2.5	2.6
211	3.6	21	155	5049	2.4	2.8	3.0	3.0	3.0	3.1	3.0
212	4.1	21	127	5118	2.6	3.0	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6
213	3.7	21	178	6082	1.8	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.6
214	3.8	21	171	6355	2.2	2.5	2.8	2.7	2.6	2.5	2.7
215	3.4	21	188	6951	2.2	2.5	2.8	2.7	2.4	2.6	2.6
216	3.8	21	154	7053	2.2	2.6	2.7	2.5	2.4	2.5	2.5
217	3.3	21	126	7084	2.2	2.7	2.9	3.0	3.1	2.9	3.0
218	3.5	21	152	7296	3.1	3.2	2.8	2.7	2.5	2.5	2.6
219	3.5	21	187	7977	2.6	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.7
220	3.7	21	188	8019	2.4	2.8	3.0	3.0	3.0	2.9	3.0
221	3.9	20	126	725	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6	2.5
222	4.0	20	173	2114	2.2	2.6	2.6	2.9	2.7	2.6	2.7
223	3.7	20	147	3340	2.2	2.7	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3
224	3.5	20	148	4516	2.8	3.1	2.4	2.5	2.5	2.4	2.5
225	3.7	20	141	4859	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.5	2.7
226	3.9	20	137	5149	3.1	3.4	2.7	2.6	2.6	2.7	2.7
227	3.9	20	82	5386	2.4	2.6	2.6	2.5	2.6	2.4	2.5
228	3.7	20	155	6420	2.2	2.6	2.6	2.8	2.7	2.9	2.8
229	3.5	20	193	7575	2.2	2.8	3.0	3.1	2.9	3.1	3.0
230	3.6	20	131	8564	2.4	2.8	3.0	3.0	2.9	2.7	2.9

20060001			$j_w = 0.6 \text{ m/s}$			kleine Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	3.0	36	72	4564	3.1	3.2	1.8	1.7	2.5	2.5	2.1
2	3.1	34	84	786	3.0	2.9	2.7	2.7	2.3	2.4	2.5
3	3.0	34	87	3538	3.1	3.2	3.2	3.4	3.5	3.1	3.3
4	2.9	32	115	2171	2.8	2.6	2.3	2.5	2.4	2.3	2.4
5	2.7	32	84	8403	2.6	2.6	2.3	2.1	2.0	2.0	2.1
6	2.9	28	39	1140	2.8	2.7	1.8	1.5	1.7	1.7	1.7
7	2.7	27	86	6688	1.8	2.0	1.9	2.0	1.8	1.8	1.9
8	2.7	26	90	3532	3.0	2.8	3.2	3.4	3.5	3.1	3.3
9	2.8	26	67	6310	3.0	2.4	2.2	1.7	1.9	1.9	1.9
10	2.5	25	64	123	2.0	2.0	2.0	2.3	2.0	2.1	2.1
11	2.5	24	84	4944	2.8	2.8	1.7	1.9	2.1	2.0	1.9
12	2.5	24	158	5586	2.0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
13	2.4	23	106	4558	2.2	2.3	2.5	1.7	2.5	2.5	2.3
14	2.4	23	29	8392	2.4	2.6	2.6	2.4	2.1	2.3	2.4
15	2.5	22	81	2881	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	1.7	1.8
16	2.8	22	111	5574	2.0	2.2	2.5	1.9	1.8	1.8	2.0
17	2.5	22	139	7009	2.4	2.1	1.9	1.9	2.1	2.2	2.0
18	2.7	22	29	8392	2.4	2.6	2.6	2.4	2.1	2.3	2.4
19	2.5	21	87	6318	2.2	1.9	1.7	1.7	1.9	1.9	1.8
20	2.3	21	108	7365	2.6	2.1	2.4	2.2	2.8	2.5	2.5
21	2.3	21	61	8082	2.4	2.0	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8
22	2.3	20	70	128	2.6	2.2	2.0	2.3	2.0	2.1	2.1
23	2.4	20	183	3926	1.2	1.5	1.7	1.4	1.5	1.5	1.5

20060002			$j_w = 0.8 \text{ m/s}$			kleine Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	3.1	31	88	2709	2.8	3.0	1.4	1.9	1.8	1.8	1.7
2	3.5	30	81	7007	2.8	2.8	1.8	1.3	1.8	1.3	1.6
3	2.6	28	84	7726	2.8	2.5	2.0	2.2	2.2	1.9	2.1
4	2.7	27	99	4155	3.3	2.6	1.0	1.3	1.2	1.4	1.2
5	2.1	22	115	5904	2.6	2.2	1.0	1.0	1.3	1.1	1.1
6	2.5	22	71	7729	2.0	1.8	2.0	2.2	2.2	1.9	2.1
7	2.3	21	157	1330	1.6	1.9	1.7	1.8	1.7	1.5	1.7

20060003			$j_w = 0.6 \text{ m/s}$			mittlere Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	6.0	74	74	4681	6.1	6.1	5.2	5.7	5.8	5.8	5.6
2	5.2	73	87	2579	6.1	5.3	4.4	4.6	4.4	4.2	4.4
3	4.8	68	68	6250	6.5	5.3	4.5	4.2	4.2	4.2	4.3
4	5.1	67	51	4254	5.9	5.7	4.8	5.2	5.2	5.0	5.1
5	4.9	66	52	1647	5.5	5.0	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0
6	5.3	66	68	3973	6.5	6.0	4.5	4.3	4.4	4.4	4.4
7	4.7	63	65	8712	5.9	5.2	4.5	4.2	4.0	3.9	4.2
8	4.6	62	54	2299	5.3	5.0	4.2	3.9	4.1	4.3	4.1
9	4.6	62	39	7298	4.5	4.7	2.9	4.1	4.2	4.0	3.8



20060003			j <sub>v</sub> = 0.6 m/s			mittlere Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
10	4.5	60	61	387	4.3	4.2	3.7	4.1	4.2	4.6	4.2
11	5.2	55	58	5500	6.5	6.2	5.6	5.5	4.9	4.9	5.2
12	4.3	54	81	3071	5.1	4.7	4.0	4.3	3.8	3.5	3.9
13	4.0	51	96	716	4.7	4.2	3.4	3.5	3.0	3.4	3.3
14	4.6	51	73	738	5.5	5.4	4.6	4.3	4.1	3.8	4.2
15	3.6	42	42	3787	2.8	3.4	2.6	2.7	2.8	3.0	2.8
16	3.7	40	50	6302	4.3	4.1	3.1	2.8	3.0	3.0	3.0
17	4.2	36	77	1868	4.9	4.6	3.5	3.8	3.7	3.8	3.7
18	3.8	36	32	7255	4.9	4.5	1.7	1.3	1.3	1.2	1.4
19	3.8	33	51	2963	3.3	4.0	3.8	4.3	4.1	3.8	4.0
20	3.9	33	30	6185	3.0	3.1	1.9	2.3	2.3	2.0	2.1
21	2.9	28	97	6231	2.0	2.4	1.2	2.9	1.0	2.9	2.0
22	3.4	23	28	4656	2.6	3.4	2.9	3.3	3.3	3.4	3.2

20060004			j <sub>v</sub> = 0.8 m/s			mittlere Düse					
Nr.	ds	max	sx	sz	dr	d1	d2	d3	d4	d5	dm
1	6.3	89	91	7716	6.7	5.8	5.5	5.4	5.9	6.1	5.7
2	6.3	86	102	8190	6.5	6.6	6.6	6.5	6.0	5.6	6.2
3	5.9	79	72	1354	6.3	6.0	6.2	6.1	5.9	6.1	6.1
4	5.3	75	103	6500	5.9	5.9	5.6	5.6	5.2	4.8	5.3
5	5.5	72	95	952	7.5	6.6	6.2	5.9	5.6	5.0	5.7
6	5.1	71	71	6911	4.3	4.7	4.6	4.7	4.6	4.6	4.6
7	5.2	66	95	2570	5.9	5.2	4.9	4.8	4.7	4.5	4.7
8	4.6	61	66	5302	3.3	3.9	3.5	3.2	3.4	3.5	3.4
9	5.2	60	67	2073	4.7	4.4	4.1	3.9	4.0	4.4	4.1
10	4.8	60	53	2816	4.9	5.0	5.3	4.9	4.6	4.2	4.8
11	4.4	58	83	4909	4.5	4.0	3.8	3.7	4.0	4.0	3.9
12	4.6	53	79	2978	4.7	4.2	4.0	3.8	4.0	4.3	4.0
13	4.1	50	72	2144	4.3	4.2	3.8	3.8	3.8	3.9	3.8
14	4.0	49	105	3394	4.1	3.4	3.4	3.4	3.6	3.4	3.5
15	4.0	47	52	3356	3.5	3.7	3.3	3.1	2.7	3.1	3.1
16	4.1	46	51	2891	3.3	3.3	3.1	3.3	3.5	3.3	3.3
17	4.3	45	114	5898	4.5	4.2	4.0	4.1	4.1	3.9	4.0
18	4.0	44	59	7345	3.0	3.5	3.7	3.4	3.3	3.1	3.4
19	4.5	43	73	1727	4.5	4.2	3.8	3.9	4.3	4.3	4.1
20	3.5	41	84	5338	3.3	3.1	2.8	3.1	3.1	3.1	3.0
21	3.7	41	80	7410	3.1	3.1	3.4	3.2	3.3	3.2	3.3
22	3.5	39	84	3446	3.5	3.4	3.5	3.3	2.8	3.2	3.2
23	3.6	38	101	2206	3.1	3.4	3.1	2.8	2.7	2.7	2.8
24	3.4	37	102	4174	3.9	3.4	2.9	3.0	3.0	2.8	2.9
25	3.4	34	48	4127	3.0	3.1	3.5	3.6	3.4	3.1	3.4
26	3.5	31	54	4084	3.1	3.2	2.9	2.9	2.9	2.6	2.8
27	3.7	31	47	7155	3.0	3.3	3.1	3.4	3.3	3.3	3.3
28	3.1	30	84	2517	3.0	2.8	2.5	2.4	2.4	2.5	2.5
29	3.7	28	33	4886	2.8	3.2	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3

20060004			$j_v = 0.8 \text{ m/s}$			mittlere Düse						
Nr.	$d_s$	max	$s_x$	$s_z$	$d_r$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_m$	
30	3.1	28	130	4994	3.0	2.8	2.2	2.2	2.4	2.4	2.3	
31	3.1	26	73	4228	3.1	3.0	2.7	3.0	2.6	2.5	2.7	
32	3.0	25	58	4139	3.3	3.3	3.1	2.7	2.8	2.9	2.9	
33	4.3	25	94	4554	3.3	4.1	5.0	4.8	4.5	4.5	4.7	
34	2.5	21	74	5108	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.5	2.4	
35	2.8	20	56	872	2.2	2.4	1.6	1.7	1.8	1.7	1.7	
36	2.8	20	37	4950	3.3	3.1	2.4	2.5	2.6	2.4	2.5	

22060002			$j_v = 0.5 \text{ m/s}$			große Düse						
Nr.	$d_s$	max	$s_x$	$s_z$	$d_r$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_m$	
1	9.3	96	103	1536	12.0	9.4	9.1	9.0	8.7	8.6	8.9	
2	8.0	92	91	4216	8.3	7.8	7.2	7.0	7.4	1.3	5.7	
3	7.6	89	61	1945	8.7	6.9	6.7	6.6	6.5	6.7	6.6	
4	6.7	89	91	8628	6.9	6.4	7.0	6.9	6.9	6.9	6.9	
5	7.6	86	62	3889	7.7	7.4	6.9	7.3	2.5	0.9	4.4	
6	5.8	84	70	4662	6.1	5.4	5.6	1.6	1.8	1.9	2.7	
7	7.1	84	67	5138	7.7	7.3	6.9	6.9	6.7	6.8	6.8	
8	6.6	82	120	2695	7.7	6.4	6.5	7.0	6.8	6.6	6.7	
9	7.3	82	49	3252	8.7	7.6	7.4	7.1	6.6	6.7	7.0	
10	7.0	81	51	772	8.1	7.3	7.0	7.1	7.2	6.9	7.1	
11	7.3	81	107	8118	8.5	7.3	7.0	7.2	6.9	7.3	7.1	
12	6.8	78	83	7357	5.9	6.8	6.8	7.1	7.7	8.2	7.5	
13	5.2	75	117	4552	5.5	5.5	5.5	5.5	5.0	4.8	5.2	
14	5.8	73	72	5548	6.3	6.1	6.1	5.9	5.3	5.8	5.8	
15	6.2	70	77	2861	7.3	6.4	6.0	6.2	5.9	5.7	6.0	
16	5.2	68	106	1432	4.7	4.6	4.8	5.0	5.3	5.4	5.1	
17	5.9	68	97	7323	7.1	6.8	6.4	6.2	6.1	5.9	6.2	
18	4.7	68	70	7934	4.7	4.5	4.6	4.5	4.5	4.2	4.5	
19	5.7	66	122	7189	6.9	5.9	5.5	5.3	5.1	4.6	5.1	
20	4.7	65	70	5528	3.9	4.4	3.8	4.3	4.5	4.5	4.3	
21	5.1	62	106	7183	5.1	4.7	5.5	5.3	5.1	4.6	5.1	
22	4.3	60	97	7323	7.1	6.8	6.4	6.2	6.1	5.9	6.2	
23	4.1	58	89	3752	4.1	3.9	3.9	3.9	3.7	3.4	3.7	
24	4.1	52	74	91	3.3	3.7	3.5	3.4	3.6	3.6	3.5	
25	4.2	51	93	6642	4.3	4.2	4.0	4.2	4.1	4.2	4.1	
26	4.4	49	108	7821	4.9	4.5	4.1	3.8	3.9	3.6	3.9	
27	4.7	49	80	8576	4.7	4.5	4.4	4.4	4.2	4.1	4.3	
28	4.2	48	50	3593	4.3	3.9	3.6	3.6	3.8	3.6	3.7	
29	4.3	47	96	5748	4.9	4.4	3.7	3.8	4.2	4.0	3.9	
30	3.1	26	92	4703	3.0	3.0	3.1	3.1	2.9	2.9	3.0	
31	3.1	23	94	8689	2.6	2.9	2.8	3.0	2.7	2.9	2.9	
32	2.4	22	104	2713	2.0	2.0	1.9	2.0	1.7	1.9	1.9	
33	2.7	20	146	1320	3.0	2.6	2.3	2.4	2.4	2.6	2.4	
34	1.8	20	104	2713	2.0	2.0	1.9	2.0	1.7	1.9	1.9	

22060003			$j_v = 0.4 \text{ m/s}$			kleine Düse					
Nr.	$\bar{d}_s$	max	sz	sz	$\bar{d}_r$	$\bar{d}_1$	$\bar{d}_2$	$\bar{d}_3$	$\bar{d}_4$	$\bar{d}_5$	$\bar{d}_m$
1	2.8	33	133	899	3.3	3.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
2	3.0	31	132	4362	3.3	3.5	2.6	2.9	2.8	2.6	2.7
3	2.8	28	98	5906	2.6	2.7	2.6	2.7	2.8	2.6	2.7
4	2.8	27	168	2427	2.8	2.8	2.5	2.7	2.5	2.6	2.6
5	2.6	26	145	5495	3.3	3.2	2.7	2.5	2.4	2.2	2.5
6	2.8	25	103	5505	2.8	2.7	2.7	2.5	2.4	2.2	2.5
7	2.6	24	161	8191	2.8	3.1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
8	2.5	22	151	7075	1.6	1.7	1.4	1.3	1.6	1.7	1.5
9	2.4	21	156	1275	2.6	2.6	2.6	2.4	2.6	2.7	2.6
10	2.5	20	145	6676	3.1	3.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3

## Literaturverzeichnis

- [1] H.-M.Prasser, P.Schütz, N.Kossok: „Berührungslose Detektion der Struktur und Messung ausgewählter Parameter von Zweiphasenströmungen durch Mustererkennungsverfahren unter Verwendung von Ultraschall als Meßsonde“, Abschlußbericht zum Vorhaben 1500 967, FZR-203, November 1997, S. 8-9.
- [2] A.Schaffrath, H.Ringel: „Modelle zur Bestimmung der Relativbewegung der Phasen in einer Zweiphasenströmung“, Stand der Technik, FZR-294, Juni 2000.
- [3] H.-M.Prasser: „MESSUNG VON BLASENGRÖSSENVERTEILUNGEN MIT GITTERSENSOREN“, Workshop „Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen“, 24.-25. September 1998 in Rossendorf, FZR-241, November 1998, S. 157-164.
- [4] T.Loser: „Kapazitive Tomographie“, Entwickeln tomographischer Meßverfahren, [http://www.ifv.uni-hannover.de/Forschung/Tomographie/body\\_tomographie.html](http://www.ifv.uni-hannover.de/Forschung/Tomographie/body_tomographie.html) , August 2000.
- [5] N.Reinecke, M.Boddem, G.Petrisch, D.Mewes: „Tomographisches Messen der relativen Phasenteile in zweiphasigen Strömungen fluider Phasen“, Chemie Ingenieur Technik (68), November 1996, S. 1404-1412.
- [6] H.-M. Prasser, A.Böttger, J.Zschau: „A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows“, Flow Measurement and Instrumentation 9, 1998, S.111-119.
- [7] H.-M.Prasser: „LEITFÄHIGKEITSENSOREN FÜR DIE BESTIMMUNG VON PARAMETERN IN EINER ZWEIPHASENSTRÖMUNG“, Workshop „Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen“, 6.-7. November 1997 in Rossendorf, FZR-204, Dezember 1997, S. 64-71.
- [8] A.Schaffrath, A.-K. Krüssenberg, H.-M. Prasser: „A NEW CRITERION FOR THE BUBBLE SLUG TRANSITION IN VERTICAL TUBES“, Institute of Safety Research, Annual Report 1998, FZR-268, Juli 1999, S. 29-36.
- [9] H.-M.Prasser: „Bubble Size Measurement using Wire-Mesh Sensors“, Flow Measurement and Instrumentation, 2000 (zur Veröffentlichung eingereicht).

### **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich folgenden Personen, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben, herzlich danken:

Herrn Dr. C. Zippe vom Institut für Sicherheitsforschung des FZ Rossendorf, für die intensive Betreuung bei der Durchführung der Versuche, aber vor allem für die vielen wichtigen Hinweise, welche die Qualität der Arbeit entscheidend verbesserten,

Herrn Dr. H.-M. Prasser vom Institut für Sicherheitsforschung des FZ Rossendorf, für die Möglichkeit, diese Arbeit am Institut anzufertigen und seine inhaltlichen Hinweise, die mir einen Einblick in dieses Wissensgebiet verschafften und

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Lischke von der Hochschule Zittau/Görlitz (FH), für die wichtigen Hinweise und die Motivation, aber auch für die Unterstützung im Studium.

Vor allem möchte ich aber meiner Lebensgefährtin Vera Fritzsche danken, die mich während meiner gesamten Studienzzeit, und insbesondere in den letzten Monaten beim Anfertigen dieser Arbeit, moralisch, aber auch finanziell unterstützt und somit einen für mich sehr wichtigen Beitrag geleistet hat.