

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-336

November 2001

ISSN 1437-322X

Michael Christen, Gotthard Will**

*Dieter Baldauf, Jürgen Fietz, Uwe Hampel, Dietrich Hoppe,
Horst-Michael Prasser, Cornelius Zippe und Jochen Zschau*

Tomographisches Messverfahren für die Gasverteilung in einer Axialpumpe bei Zweiphasenbetrieb

aktueller Abschlussbericht zum Vorhaben 7531.50-03-0370-99 / 3

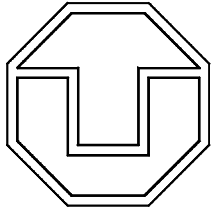
Berichtszeitraum: 01.07.1999 - 31.12.2000

**TU Dresden, Institut für Energiemaschinen und Maschinenlabor*

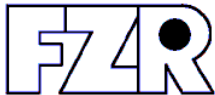
M.Christen, G.Will**

*D.Baldauf, J.Fietz, U.Hampel, D.Hoppe, H.-M.Prasser,
C.Zippe, J.Zschau*

**Tomographisches Messverfahren
für die Gasverteilung in einer Axialpumpe
bei Zweiphasenbetrieb**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Institut für Energiemaschinen und Maschinenlabor
Professur für Pumpen, Verdichter und Apparate



FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Institut für Sicherheitsforschung
Abteilung Experimentelle Thermofluidynamik

Tomographisches Messverfahren für die Gasverteilung in einer Axialpumpe bei Zweiphasenbetrieb

aktualisierter Abschlussbericht zum Vorhaben 7531.50-03-0370-99 / 3
Berichtszeitraum: 01.07.1999 – 31.12.2000

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst unter dem Aktenzeichen 7531.50-03-0370-99 / 3 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Zusammenfassung

Bei einer Vielzahl von natürlichen und technischen Strömungsvorgängen besteht das strömende Medium aus mehreren Phasen. Bei der Förderung derartiger Medien mit Kreiselpumpen führen bislang nicht genügend bekannte Vorgänge bei bestimmten Betriebsbedingungen zu einer starken Verringerung der Förderleistung und einem Anstieg des Leistungsbedarfs. Bei der Förderung von gasbeladenen Flüssigkeiten kann ein zu hoher Gasanteil die Förderung vollständig zusammenbrechen lassen. Zusätzlich vermindert die erosive Wirkung von Kavitationen stark die Lebensdauer der Pumpe.

Diese Arbeit beschreibt ein neuartiges Verfahren, das es erstmals gestattet, die Methode der Gamma-Tomographie zur Bestimmung der örtlichen Phasenverteilung innerhalb von rotierenden Pumpenläufern oder ähnlichen Objekten anzuwenden. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass tomographische Projektionen im zeitlichen Abstand von nur ca. 100 μs vorgenommen werden. Dies bedeutet bei relevanten Drehzahlen von etwa 25 s^{-1} eine vergleichsweise hohe Winkelauflösung um $0,9^\circ$. Dadurch kann die Gasverteilung wesentlich genauer als bisher erfaßt werden. Mit dem Tomographen wurden die Transportvorgänge innerhalb des Läufers einer Axialpumpe bei der Förderung eines Luft-Wasser-Gemischs visualisiert. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, wie sich die Änderung äußerer Strömungsparameter und die Variation des Arbeitspunktes auf die räumliche Phasenverteilung innerhalb des Läufers auswirkt.

Inhaltsverzeichnis

1	Zielstellung	4
2	Stand der Technik	5
2.1	Zweiphasenströmung in Kreiselpumpen	5
2.2	Messverfahren zur Ermittlung der Phasenverteilung	8
2.3	Gamma-Tomographie	9
3	Aufbau des Gamma-Tomographen	11
3.1	Messprinzip	11
3.2	Auslegung des Meßsystems	13
3.3	Aufbau der gerätetechnischen und elektronischen Hardware	17
3.4	Entwicklung der Software zur Steuerung des Tomographen	21
3.5	Entwicklung der Bildrekonstruktion	22
3.6	Strahlenschutzrechtliche Unterlagen und Antrag	29
4	Aufbau eines Versuchsstandes zur Messung der Phasenverteilung in einer Axialpumpe	29
4.1	Konzeption und Aufbau des Axialpumpenversuchsstandes	29
4.2	Einrichtung zum Aufbringen der Gasbeladung	32
4.3	Aufbau, Erprobung und Kalibrierung des Tomographen am Versuchsstand	35
5	Messdurchführung, Ergebnisse	36
5.1	Förderverhalten der Pumpe	36
5.1.1	Förderverhalten bei Einphasenströmung	36
5.1.2	Förderverhalten bei Zweiphasenströmung	37
5.2	Zeitgemittelte Phasenverteilung im Relativsystem bei Gasbeladung	40
5.2.1	Messprogramm	40
5.2.2	Ergebnisse	41
6	Zusammenfassung und Ausblick	48
6.1	Einschätzung des erreichten Standes	48
6.2	Möglichkeiten zur Verbesserung des Verfahrens	49
7	Literaturverzeichnis	51

1. Zielstellung

Bei einer Vielzahl von natürlichen und technischen Strömungsvorgängen besteht das strömende Medium aus mehreren Phasen. Als Phase wird eine identifizierbare Klasse von Material innerhalb der Strömung bezeichnet, die gleiche charakteristische physikalische Eigenschaften aufweist. Die Phasen können unterschiedliche Stoffe oder verschiedene Aggregatzustände ein- und desselben Stoffes sein.

Technisch relevante Zwei- und Mehrphasenströmungen treten z.B. beim pneumatischen und hydraulischen Transport, beim mechanischen Mischen und Trennen von Stoffströmen sowie in vielen Prozessen der thermischen und chemischen Verfahrenstechnik auf. Auch in Kreiselpumpen ist der Förderstoff immer öfter eine gas- oder feststoffbeladene Flüssigkeit. In vielen Fällen liegen die Phasen am Saugstutzen der Pumpe noch getrennt vor und die Pumpe dient gleichzeitig als Mischer. Ungünstige Saugbedingungen und hohe Leistungsdichte von Kreiselpumpen können auch bei reinen Flüssigkeiten über örtliche Verdampfung (Kavitation) zur Zweiphasenströmung führen.

Die Mehrphasenströmung in Kreiselpumpen hat gegenüber der einphasigen Strömung veränderte Strukturen, die in der Regel mit stärkerer Dissipation verbunden sind und eine Verringerung der Förderleistung und einen Anstieg des Leistungsbedarfs bewirken. Bei der Förderung von gasbeladenen Flüssigkeiten kann ein zu hoher Gasanteil zum vollständigen Zusammenbruch der Förderung führen. Bei Pumpen für feststoffbeladene Flüssigkeiten hat die erosive Wirkung des Feststoffs oft eine starke Minderung der Lebensdauer zur Folge.

Für die Hersteller von Kreiselpumpen ist es im Hinblick auf die Entwicklung von Maschinen mit guten Betriebseigenschaften bei mehrphasigen Förderstoffen wichtig, die internen Vorgänge bei Mehrphasenströmung zu analysieren. Da die Ergebnisse herkömmlicher Experimente zunächst nur für den speziellen Versuchsfall gelten, demgegenüber jedoch allgemeine Schlussfolgerungen für die Auslegung von Pumpen mit beliebigen Parametern gezogen werden müssen, kommt der Entwicklung von möglichst allgemein anwendbaren und trotzdem realitätsnahen Untersuchungsverfahren große Bedeutung zu.

Aufgrund der großen Vielfalt und hohen Komplexität der mehrphasigen Strömungsstrukturen in Turbomaschinen erzwingt die Entwicklung von Berechnungsverfahren erhebliche Vereinfachungen. Deren Sinnfälligkeit und Zulässigkeit kann in der Regel nur auf experimentellem Weg geprüft werden. Während für die integralen Werte der Pumpenströmung, z.B. für die Änderung des Kennfeldes von Pumpen bei Gemischförderung oder bei Kavitation hinreichend viele zuverlässige Messergebnisse vorliegen, sind Informationen zur Änderung der internen Strömungsstruktur bei Gemischförderung oder bei Kavitation nur in begrenztem Maße vorhanden. Gemeint ist damit insbesondere die Änderung der Druckverteilung an den Schaufeln des Laufrades und an den Wänden des Gehäuses. Über die räumliche Verteilung des örtlichen Volumenanteils der Phasen liegen meist nur qualitative

Informationen aus visueller Beobachtung vor. Im Hinblick auf die große wirtschaftliche Bedeutung technischer Mehrphasenströmungen - insbesondere in Turbomaschinen – und die Notwendigkeit der wissenschaftlich fundierten Auslegung spezieller Maschinen mit verbesserter Tauglichkeit für den Mehrphaseneinsatz ist die Entwicklung eines Messverfahrens für die Erfassung der Phasenverteilung in Turbomaschinen eine aktuelle und lohnende Aufgabe.

Für diesen Zweck ist eine nichtinvasive Methode wie die Gammatomographie besonders geeignet. Sie hat den Vorteil, dass sie ohne telemetrische Einrichtungen im rotierenden Laufrad auskommt und damit die zu untersuchende Strömung nicht beeinträchtigt. Zusätzlich unterliegt die Messeinrichtung hier keiner Zerstörungsgefahr durch die Strömung. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die zu untersuchende Maschine nicht durch Sichtfenster oder Gebereinbauten verändert werden muss.

2. Stand der Technik

2.1 Zweiphasenströmung in Kreiselpumpen

a) Die kavitierende Flüssigkeit

Werden Flüssigkeiten, deren Gesamtdruck am Saugstutzen der Pumpe nicht hinreichend über dem Verdampfungsdruck liegt, in Pumpen mit hoher Schaufelbelastung gefördert, kann es in den Gebieten des kleinsten Druckes (meist in der Nähe der Laufschaufel-Eintrittskanten) zur Verdampfung der Flüssigkeit kommen. Im weiteren Strömungsverlauf erreichen die Dampfblasen Gebiete, in denen der Druck über dem Verdampfungsdruck liegt und es erfolgt eine plötzliche Kondensation. Dieser Vorgang wird Kavitation genannt und sollte in Kreiselpumpen möglichst vermieden werden. Die physikalischen Grundlagen der Kavitation mit speziellem Bezug auf Turbomaschinen werden in [1] zusammenfassend dargelegt.

Ausgeprägte Kavitation (technische Kavitation) kann experimentell an der Minderung der Förderleistung mit abnehmendem Eintrittsdruck erkannt werden. Beginnende Kavitation wird meist durch optische Beobachtung der Strömung im Saugmund der dafür präparierten Pumpe erkannt.

Auf der Basis eindimensionaler Strömungsberechnung entwickelte Pfeleiderer [2] eine Überschlagsformel zur Berechnung des zur Vermeidung technischer Kavitation erforderlichen Haltedrucks (NPSHR-Wert) aus den Werten der absoluten und relativen Ausströmgeschwindigkeit. In der Fachliteratur nimmt die halbempirische Abschätzung des NPSHR-Wertes einen breiten Raum ein [3].

Mit Hilfe 2- und 3-dimensionaler Berechnungen der Einphasenströmung kann man – meist auch unter Vernachlässigung der Reibung – beginnende Kavitation voraussagen bzw.

Schaufelformen so gestalten, dass die Kavitation bei möglichst kleinem Druckniveau beginnt [4].

Einen Versuch zur theoretischen Voraussage der technischen Kavitation unternahm Finzel [5]. Er modifizierte ein zweidimensionales Gitterberechnungsverfahren so, dass die mit abnehmenden Eintrittsdruck sich ausbildenden Kavitationszonen durch eine Konturveränderung der Laufschaufel nachgebildet werden. Die Ersatzkontur wird iterativ aus der Bedingung konstanten Druckes (Verdampfungsdruck) bestimmt. Das Modell spiegelt die in einer radialen Versuchspumpe optisch beobachtete Entwicklung der Kavitationszonen qualitativ richtig wieder und ermöglicht die Abschätzung des kritischen NPSH-Wertes, bei dem eine messbare Förderhöhen-Abnahme eintritt. In diesem Fall reichen die Kavitationszonen bis in den engsten Querschnitt des Schaufelkanals und wachsen bei weiterer Druckabsenkung zusammen, was dem Förderabbruch entspricht.

Im letzten Jahrzehnt wurde die theoretische Modellierung des Kavitationsvorgangs auf der Basis von Navier-Stokes-Codes auf ein höheres Niveau gebracht. Zum Beispiel wurden an der Universität Karlsruhe verschiedene thermodynamische Zustandsbeschreibungen für den Verdampfungsvorgang erprobt [6, 7]. Eine sehr einfache Annahme verbindet den örtlichen Dampfanteil mit der Dampfdruckunterschreitung. Kompliziertere Modelle erfassen den zeitlichen Verlauf der Dampfbildung und den daraus folgenden örtlichen Dampfanteil. Die weitere Berechnung basiert auf allgemeinen Verfahren der Zweiphasenströmung.

b) Die feststoff- und gasbeladene Flüssigkeit

Aus den eingangs genannten Gründen ist die Zweiphasenströmung allgemein und speziell bei Kreiselpumpen Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen. Im folgenden wird die Einschätzung des erreichten Standes aus der Perspektive der deutschen Pumpenindustrie, an deren Gemeinschaftsforschung die Professur für Pumpen, Verdichter und Apparate der TU Dresden beteiligt war, vorgenommen.

Ausführliche Kennfeld-Messungen für Feststoffpumpen mit Ein-, Zwei- und Dreischaufelpumpen wurden an der TU Bergakademie Freiberg ausgeführt [8]. Variiert wurden dabei vor allem Konzentration, Korndurchmesser und Dichte des Feststoffs. Die Ergebnisse sind in empirischen Gleichungen für Korrekturfaktoren gegenüber der Wasserförderung zusammengefasst. Das Betriebsverhalten wird auch durch ein eindimensionales Schlupfmodell interpretiert. In Zusammenarbeit mit der TU Dresden wurden photographische Messungen der Partikelgeschwindigkeit in einer radialen Versuchskreiselpumpe vorgenommen [9]. Die Ergebnisse wurden zur Überprüfung des Schlupfmodells verwendet. An der gleichen Pumpe wurde auch der Versuch unternommen, die örtliche Partikelkonzentration anhand der Unterbrechungshäufigkeit eines Ultraschallstrahls zu bestimmen [10]. Die örtliche Auflösung des Messverfahrens erwies sich dabei als unzureichend.

Kennfeldmessungen an Kreiselpumpen bei Gasbeladung wurden an der Universität Magdeburg ausgeführt [11]. Diese Messungen wurden ergänzt durch interne Messungen in Strömungskanälen und Modellpumpen, wobei neben der LDV auch ein Stereo-Video-System zum Einsatz kam. Weitere Messungen bei Gasbeladung wurden in Kooperation mit der TU Braunschweig fortgeführt, wobei eine Messung der Druckverteilung auf den Laufschaufeln einer einstufigen radialen Leitradpumpe bei verschiedenen Gasanteilen des Förderstoffs vorgenommen wurde [12]. Kennfelduntersuchungen zur Förderung gasbeladener Öle wurden an der Universität Kaiserslautern ausgeführt [13].

An der TU Dresden wurde ein Berechnungsverfahren für die Zweiphasenströmung in Kreiselpumpen-Bauteilen [14] entwickelt, das auf der Modellvorstellung des Zweigeschwindigkeitskontinuums beruht und außer der Wechselwirkungskraft zwischen den Phasen die Reibung in der Flüssigkeit über eine Grenzschicht-Rechnung berücksichtigt. Das zunächst nur zweidimensionale Verfahren liefert für feststoffbeladene Flüssigkeiten brauchbare Aussagen zur Kennlinienänderung mit den Beladungsparametern. Bei Gasbeladung ist das Berechnungsverfahren auf Betriebspunkte mit sehr kleinen Konzentrationen beschränkt, die noch keine wesentlichen Phasentrennungseffekte aufweisen.

Eine Erweiterung des Verfahrens auf dreidimensionale Berechnung wurde gemeinsam von der TU München und der TU Dresden in Angriff genommen [15]. Grundlage des Verfahrens ist ein für einphasige Strömungen bewährter 3D-Euler-Code der TU München, der zunächst mit der sogenannten Einweg-Kopplung die Beladungsbewegung erfasst. Die zweifache Kopplung zur Berücksichtigung der Beladungswirkung auf die Trägerströmung befindet sich zur Zeit in der Erprobung. Vergleiche mit den Magdeburg/Braunschweiger Messungen zeigten, dass auch dieser Code noch nicht in der Lage ist, die Kennlinienveränderung bei mittlerer und hoher Gasbeladung vorauszusagen.

Einen anderen und prinzipiell aussichtsreicheren Zugang zur Berechnung der Zweiphasenströmung bieten kommerzielle Navier-Stokes-Codes. Während fast alle Codes ein Partikel-Tracking-Modell enthalten, das mit der Lagrangschen Betrachtung der Beladungselemente der Einweg-Kopplung entspricht, haben nur wenige Codes einen vollständigen Zweiphasenmodul, der auch die Beladungsbewegung nach dem Eulerschen Prinzip betrachtet und beide Phasen gleichberechtigt behandelt. Eine sehr frühe Realisierung dieses Prinzips erfolgte in dem Code PHOENIX [16], der jedoch nur mit Schwierigkeiten auf Turbomaschinen anwendbar ist. Ein Vergleich Magdeburger PHOENIX-Rechnungen mit den Magdeburg/Braunschweiger Messungen zeigte zwar eine gute Approximation der Förderhöhen-Änderung mit zunehmender Gasbeladung, spiegelt aber die gemessene Schaufeldruckverteilung nicht richtig wider. Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig interne Messergebnisse zur Strömungsstruktur für die Validierung von Berechnungsverfahren sind.

2.2 Messverfahren zur Ermittlung der Phasenverteilung

Für die berührungslose Tomographie an Mehrphasenströmungen sind zunächst alle Verfahren geeignet, die innerhalb des Mehrphasengemisches eine Feldgröße erzeugen, welche durch die Phasenverteilung beeinflusst wird und berührungslos von außen detektiert werden kann. Dies sind vor allem:

- optische Tomographie
- kapazitive Tomographie
- Kernspin-Resonanz-Tomographie
- Gamma-Tomographie
- Röntgen-Tomographie

Jedoch unterliegen alle diese Verfahren gewissen Einschränkungen. So benötigt die optische Tomographie ein durchsichtiges Medium. Sobald größere Mengen eines Gases in der Flüssigkeit auftreten, beginnen Beugungs- und Brechungseffekte an den Blasen die Messwertgewinnung zu erschweren. Die optische Tomographie ist deshalb allenfalls für Zweiphasengemische mit durchsichtigen Flüssigkeiten und geringen Gasanteilen oder wenigen Einzelblasen einsetzbar [17]. Zwar bietet die Streulichttomographie theoretisch eine Alternative, doch liefert sie erfahrungsgemäß nur eine schlechte Bildqualität.

Die kapazitive Tomographie wird im Einsatz hauptsächlich dadurch begrenzt, dass die Feldlinien des elektrischen Feldes üblicherweise ungleichmäßig über das Messvolumen verteilt sind. Aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten tritt am Rand des Messvolumens eine höhere Feldliniendichte auf als im Inneren. Demzufolge sinkt die räumliche Auflösung des Verfahrens zur Volumenmitte hin deutlich ab. Nichtlinearitäten in den Feldgleichungen (Rückwirkung der zu bestimmenden Dielektrizitätsverteilung auf das sich einstellende Feld des elektrischen Potentials) erschweren zudem die Bildrekonstruktion [18].

Die Kernspin-Resonanz-Tomographie liefert für Zweiphasengemische prinzipiell brauchbare Resultate. Jedoch erfordert sie einen äußerst hohen apparativen Aufwand, da die räumliche Auflösung durch Inhomogenitäten im erzeugten Magnetfeld mitbestimmt wird. Außerdem kann sie aufgrund der physikalischen Gegebenheiten nicht für schnell bewegte Zweiphasengemische eingesetzt werden, da für ein Bild eine minimale Integrationszeit in der Größenordnung von 10 ms notwendig ist [19].

Gamma- und Röntgen-Tomographie arbeiten auf einer einheitlichen physikalischen Grundlage. Die Röntgen-Tomographie erfordert im Vergleich zur Gamma-Tomographie einen wesentlich höheren gerätetechnischen Aufwand, liefert jedoch dafür auch einen deutlich intensiveren Photonenstrahl und gestattet damit eine Bildaufnahme in erheblich kürzeren Zeiten. Ein wesentlicher Nachteil von Röntgenquellen besteht darin, daß die mit

vertretbarem Aufwand erreichbare Photonenenergie für viele technische Anwendungen zu gering ist. Gammaquellen gestatten hingegen - je nach Energie des verwendeten Radionuklides - die Durchstrahlung größerer Flächenmassen. Da das Gammaskpektrum im Gegensatz zum kontinuierlichen Röntgenspektrum aus einer oder mehreren diskreten Linien besteht, lassen sich mit Gammaquellen monoenergetische Messungen durchführen. Dadurch wird die bei der Absorption von Röntgenstrahlung auftretende Spektrenaufhärtung, die letztlich zur Qualitätsminderung der erhaltenen Bilder führen kann, vermieden. Die Bildrekonstruktion ist bei Verwendung einer Gamma-Quelle außerdem mathematisch einfacher [39].

2.3 Gamma-Tomographie

Das Wort „Tomographie“ ist eine Kunstform, die sich aus den beiden griechischen Wörtern $\tau\omicron\mu\omicron\zeta$ für „schneidend, scharf“ und $\gamma\rho\alpha\phi\eta$ für „Aufzeichnung, Dokument“ ableitet. Bei der Tomographie handelt es sich um die schichtweise zwei- oder dreidimensionale Abbildung eines Objekts [20], wobei anhand einer Anzahl von Projektionen ein Bild des Objektes rekonstruiert wird.

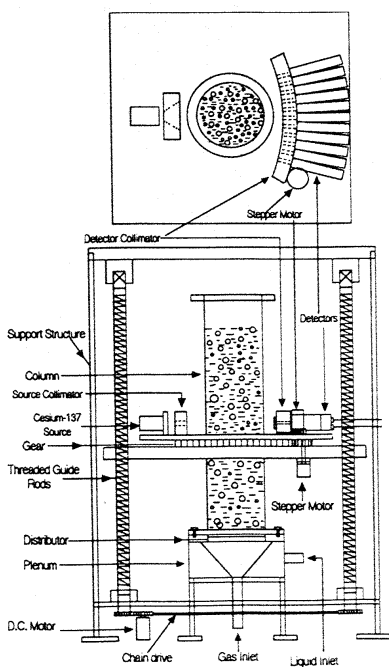
Die ersten mathematischen Grundlagen hierfür legte J. Radon schon 1917 [21]. Erste praktische Versuche führte Allan MacLeod Cormack um 1960 in Kapstadt durch. Gleichzeitig gehen auf ihn auch erste Gedanken zur medizinischen Verwendbarkeit des Verfahrens zurück [22]. Cormack und Hounsfield erhielten für ihre Leistungen 1979 den Nobelpreis für Medizin.

In der Folge entwickelte sich die Tomographie weiter. Einerseits wurden neue mathematische Bildrekonstruktionsverfahren erprobt, hauptsächlich zur Verbesserung der Bildqualität. Zweitens wurden zur Verringerung der Bildaufnahmedauer und damit zur Verringerung der Strahlenbelastung und Vermeidung von Bewegungsartefakten im rekonstruierten Bild die gerätetechnischen Parameter immer weiter verbessert.

Haupteinsatzgebiet der Tomographie ist heute die Medizin, wobei als Strahlenquellen ausschließlich Röntgenröhren zum Einsatz kommen. Daneben ist in den letzten Jahren zunehmend auch in der Technik ein Trend hin zur Tomographie zu erkennen, hauptsächlich zur gründlichen Prüfung kompliziert geformter Werkstücke, bei denen eine Radiographie keine eindeutigen Prüfergebnisse erwarten lässt.

Erstmalig erwähnt wird ein Gamma-Tomograph für Messungen an Zweiphasenströmungen im Jahre 1980 in [23]. Beschrieben wird ein System mit Cs-137 Quelle und einem NaJ-Detektor. Verwendet wird eine Fächerstrahlgeometrie, dabei tastet der Detektor bei stillstehender Strahlungsquelle mechanisch bewegten einen bestimmten Winkel ab, anschließend wird die Quelle weiterbewegt und der Fächerwinkel vom Detektor erneut abgetastet. Eine weiterentwickelte Variante benutzte später 48 NaJ-Detektoren.

In [24] und [25] wird ein Tomograph mit insgesamt fünf Am-241-Quellen und 5 Detektorzeilen aus je 17 CZT-Halbleiterdetektoren beschrieben, der zur Untersuchung der Phasenverteilung in Rohrleitungen der petrochemischen Industrie dient. Er wurde im Bereich Physik der Universität Bergen in Norwegen entwickelt. Der Tomograph arbeitet also mit 5 feststehenden Strahlenfächern. Der Vorteil des Tomographen besteht in seinem robusten, kompakten Aufbau ohne bewegte Teile, nachteilig ist dagegen sein mangelhaftes räumliches Auflösungsvermögen aufgrund der geringen Anzahl von Projektionen je Volumenelement. So kann der Querschnitt einer Rohrleitung nur mit ca. 8 x 8 Bildpunkten dargestellt werden. Für die im vorliegenden Projekt angestrebten Messungen innerhalb des Laufrades einer Kreiselpumpe ist dies völlig unzulänglich.



Als weiteres Vorbild kann der in [26] beschriebene Gamma-Tomograph dienen, der zur Visualisierung von Vorgängen in einer Blasensäule dient (**Bild 2.1**). Angewendet werden hier eine Cs-137-Gammaquelle und 11 NaJ-Szintillatoren in einer Fächerstrahlgeometrie, jedoch werden Quelle und Detektoren im Gegensatz zum vorher beschriebenen Gerät hier mit einem Schrittmotor um die Blasensäule gedreht. Die räumliche Auflösung dieses Tomographen wird mit 5.6 mm angegeben, die minimale Bildaufnahmedauer mit 1 Minute.

Bild 2.1:

Der Gamma-Tomograph von Kumar u.a. (aus [26])

Als viertes Vorbild kann der in [27] beschriebene Röntgentomograph dienen, der an der Universität Erlangen in Zusammenarbeit mit dem Entwicklungszentrum Röntgentechnik der Fraunhofer-Gesellschaft gebaut wurde. Er dient der Untersuchung von Vorgängen in Gas-Feststoff-Reaktoren der chemischen Industrie. Dieser Tomograph demonstriert vor allem die Gewinnung zeitlich gemittelter Bilder. Gleichzeitig gibt er ein Beispiel für den Einsatz einer Röntgenröhre bei der Tomographie an Mehrphasengemischen.

Der Röntgentomograph von Hori u.a. [44] stellt derzeit das technisch fortgeschrittenste und bei weitem leistungsfähigste Gerät für Aufnahmen von Mehrphasenströmungen dar. Mit einer Bildaufnahmedauer von 0,5 ms ist er um Größenordnungen schneller, als alle anderen bekannten Tomographen. Erreicht wird dies durch einen enormen wissenschaftlich-technischen Aufwand (60 Röntgenröhren und 584 Detektoren), der jedoch nur im Labor und nicht an einer Maschine realisierbar ist.

3. Aufbau des Gamma-Tomographen

3.1 Messprinzip

Alle in der Literatur beschriebenen Tomographen für ähnliche Anwendungszwecke wie im aktuellen Vorhaben arbeiten mit einer Fächerstrahlgeometrie. Diese hat sich bei der Entwicklung moderner Tomographen durchgesetzt, da sie eine große Anzahl von Informationen (raysums) bei minimalen Meßzeiten ermöglicht. Aus diesen Gründen wurde für das vorliegende Projekt ebenfalls eine Fächerstrahlgeometrie ausgewählt.

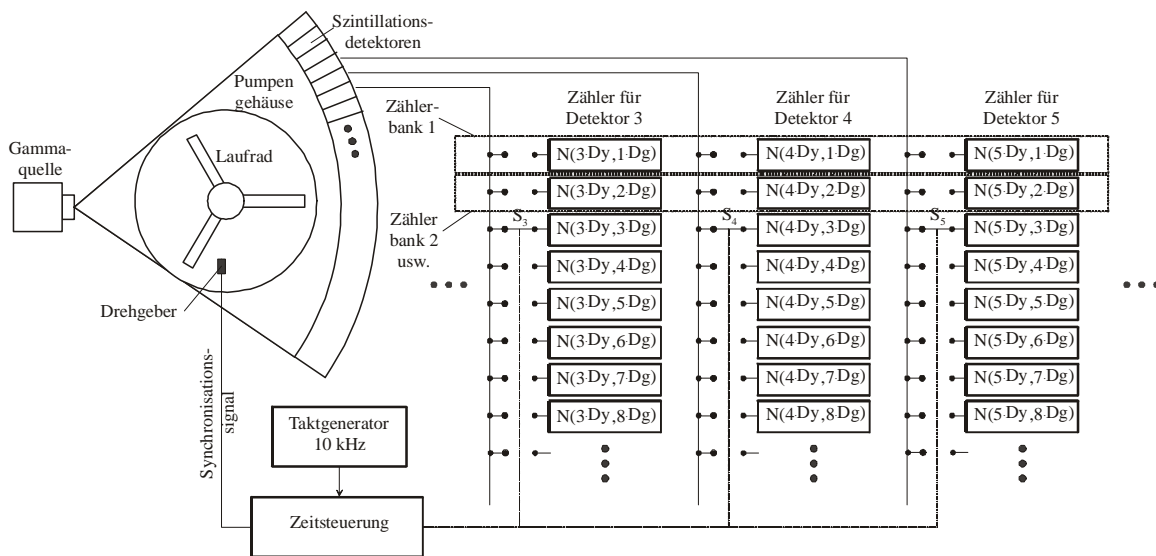


Bild 3.1: Messprinzip

Das Messprinzip basiert auf der Zählung der Impulse, die von den mit der Drehung des Laufrades synchronisierten Detektoren geliefert werden. Jede Umdrehung des Laufrades wird in eine Anzahl gleichgroßer Winkelintervalle $\Delta\gamma$ unterteilt. Jeder Detektor, der ein gegebenes Winkelintervall $\Delta\psi$ des Detektorbogens überwacht, ist mit individuellen, eindeutig diesem Detektor zugeordneten Zählereinheiten über Schalter verbunden. Die Zähler sind zu Zählerbänken gruppiert, deren Zahl der Anzahl der notwendigen Winkelintervalle entspricht. Jede Zählerbank entspricht einem bestimmten Winkelintervall i , welches als $(i-1)\Delta\gamma < \gamma < i\Delta\gamma$ definiert ist. Die Signal-Schalter (S) verbinden nacheinander, von einer Steuereinheit geschaltet, die Detektoren mit den jeweils aktivierten Zählern. Jeder einzelne Zähler ist für eine Zeitspanne von $100\ \mu\text{s}$ aktiv. Dieses Zeitintervall wird durch einen Zeittakt von 10 kHz bestimmt. Praktisch wird dieser Aufbau durch zwei Zähler pro Detektor realisiert, die abwechselnd in einen PC ausgelesen werden (Siehe Kap. 3.3). Die Synchronisation mit der Pumpe erfolgt durch einen Triggerimpuls, der bei jeder Umdrehung des Pumpenläufers einmal generiert wird. Das Eintreffen dieses Impulses definiert die

Null-Grad-Position ($\gamma=0$) und löst in der Steuereinheit das Beenden der aufeinanderfolgenden Aktivierung der Zähler und ein Zurückschalten auf die Zähler der ersten Zählerbank aus.

Um die notwendige statistische Sicherheit der Zählergebnisse $N(i\Delta\psi, j\Delta\gamma)$ zu erhalten, muss die Messprozedur über eine größere Anzahl von Pumpenumdrehungen fortgesetzt werden. Durch die Synchronisierung ist dabei gewährleistet, dass jeder Zähler nur diejenigen Impulse von dem Detektor des ihm zugeordneten Blickwinkels ψ zählt, die in einem definierten Zeitintervall eintreffen. Dieses Zeitintervall entspricht dem jeweiligen Drehwinkel γ des Laufrades, der durch die Nummer der mit ihm korrespondierenden Zählerbank gegeben ist.

Nach diesem Messprinzip ist der Tomograph in der Lage, ensembledemittelte Projektionen der Gamma-Absorptionsdichte-Verteilung aufzunehmen, die nach dem Laufrad-Drehwinkel aufgelöst sind. Falls eine gleichmäßige oder radialsymmetrische Gasgehaltsverteilung am Einlauf der Pumpe angenommen werden kann, ist die Gasgehaltsverteilung innerhalb der rotierenden Teile der Pumpe aus Symmetriegründen quasistationär in bezug auf das sich bewegende Koordinatensystem. In diesem Fall kann die Rotation des Gasgehaltsfeldes selbst zur Gewinnung der voneinander unabhängigen Projektionen genutzt werden, das Tomographiesystem selbst muss sich dann nicht bewegen. Diese Situation entspricht der Technik, mit rotierendem Objekt statt mit rotierendem Tomographiesystem [28] zu arbeiten. Der Unterschied zu dieser Technik besteht jedoch in der deutlich höheren Rotationsgeschwindigkeit des Objektes.

Die genannte Methode zur Tomographie von periodisch veränderlichen Gasgehaltsverteilungen bzw. Dichtefeldern wurde zum Patent angemeldet [29].

Die Situation ändert sich, wenn die Gasgehaltsverteilung im Einlauf der Axialpumpe vom azimuthalen Winkel im Laborsystem abhängig ist. In diesem Fall kann die Gasgehaltsverteilung im rotierenden Koordinatensystem des Laufrades nicht als quasistationär angenommen werden. Einzig nutzbar ist hier die zeitliche Periodizität, d.h. es kann angenommen werden, dass die Gasgehaltsverteilung, die in identischen Drehwinkelintervallen des Laufrades gemessen wird, quasistationär ist. Um die notwendigen Projektionen zur Abbildung dieser Verteilung aufzunehmen, muss der Tomograph zusätzlich um das Objekt bewegt werden. Das Bild wird dann aus einem Satz von Projektionen rekonstruiert, der aus ein und demselben Intervall des Laufrad-Drehwinkels stammt, jedoch Projektionen aus verschiedenen Blickwinkeln des Tomographen $\theta_k = k \Delta\theta$ beinhaltet. Auf diese Weise kann für jedes Intervall des Laufrad-Drehwinkels $\gamma_j = j \Delta\gamma$ ein separates Bild rekonstruiert werden. Die entstehende Bildserie kann zu einer Animation der sich periodisch ändernden Gasgehaltsverteilung im Inneren des Laufrades genutzt werden. Für diese Methode wurde ebenfalls ein Patent angemeldet [30].

3.2 Auslegung des Messsystems

Die Auslegung des Tomographen erfordert in erster Linie die Festlegung der zu verwendenden Strahlenquelle und des Detektionssystems.

Die Gammaenergie der Strahlungsquelle muß so gewählt werden, daß die Strahlung ein hinreichendes Durchdringungsvermögen für die zu durchstrahlenden Strukturen (Pumpengehäuse, Läufer und Läuferachse) aufweist und gleichzeitig die Messung des Gasanteils der Strömung in einem weiten Bereich gestattet. Um Abklingkorrekturen während der Meßzeit zu vermeiden, sollte die Strahlungsquelle eine entsprechend große Halbwertszeit verfügen. Für die Abmessungen und die Materialzusammensetzung des zu untersuchenden Pumpenläufers erfüllt der monoenergetische Gammastrahler Cs-137 mit einer γ -Energie von 662 keV und einer Halbwertszeit von 30 Jahren diese Forderungen am besten. Auf Grund seiner Strahlungseigenschaften hat er in der industriellen Radiographie breite Anwendung gefunden.

Der Zusammenhang zwischen Aktivität der Strahlungsquelle und der Zahl der den Detektor erreichenden ungeschwächten Gammaquanten N errechnet sich zu:

$$N = A\eta \cdot \frac{F_D}{4\pi R^2} \cdot e^{-\sum_i \mu_i d_i} \quad (1.1)$$

Das Produkt aus der Aktivität A und der Emissionswahrscheinlichkeit η stellt die Quellstärke des Strahlers dar. Für die 662 keV Gammalinie des Cs-137 Strahlers liegt der Wert von η bei 0,85. Der Geometriefaktor $F_D/4\pi R^2$ beschreibt den Anteil der emittierten Gammaquanten, der die wirksame Detektorfläche F_D erreicht, wenn sich keine absorbierenden Medien zwischen Quelle und Detektor befinden (die Luftabsorption ist vernachlässigbar). Der Exponentialterm repräsentiert den Schwächungsfaktor der Anordnung und kennzeichnet den Bruchteil der Gammaquanten, der die absorbierenden Strukturen unbeeinflusst durchdringt. Dabei sind μ_i der Schwächungskoeffizient und d_i die Dicke der i -ten durchstrahlten Schicht.

Die maximale Schwächung tritt bei Durchstrahlung längs des Durchmessers der wassergefüllten Anordnung auf, wenn angenommen wird, daß neben der Achse des Läufers auch eine seiner Schaufeln vollständig traversiert wird. Das Absorptionsminimum wird bei Durchstrahlung tangential zur Läuferachse jenseits des Schaufelbereiches bei luftgefüllter Anlage erreicht. Unter vereinfachten Annahmen ergeben sich daraus Schwächungsfaktoren von etwa $2,5 \cdot 10^{-5}$ bzw. 0,67. Bezogen auf eine Aktivität von $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (1Ci), einer effektiven Detektorfläche von 1 cm^2 und einem Abstand $R = 750 \text{ mm}$ liegen die Extremwerte der Impulsraten bei 11 s^{-1} (maximale Absorption) und $2,98 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ (minimale Absorption). Der Minimalwert kann jedoch nur für sehr wenige Winkelinkremente an einzelnen

Detektoren in der Mitte des Detektorbogens auftreten, der Maximalwert wird im gesamten Läuferbereich nicht annähernd erreicht. Bei einer Umdrehungszahl des Läufers von 25 s^{-1} und 400 Meßintervallen pro Umdrehung ist ein Detektor für ein Winkelinkrement nur für 2,5 ms pro Sekunde geöffnet. Für die Realisierung einer effektiven Meßzeit von einer Sekunde für ein Winkelinkrement, sind 10^4 Umdrehungen bzw. 6,67 min Meßzeit erforderlich. Um möglichst geringe Meßzeiten bei vertretbarem Strahlenschutz aufwand zu erreichen, wurde die Aktivität der Cs-137-Quelle auf $1,85 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$ (5 Ci) festgelegt.

In einem Vorversuch wurde der originale Pumpenläufer in ein kurzes Rohrstück eingesetzt und mit einer im FZR zur Verfügung stehenden Cs-137-Quelle ($5,5 \cdot 10^8 \text{ Bq}$) durchstrahlt. Dabei wurden die Zählraten bei luftgefülltem und wassergefülltem Rohr in verschiedenen Durchstrahlungsrichtungen in Bezug auf den Pumpenläufer in einem Drehwinkelbereich von 0° .. 120° gemessen. Ein größerer Drehwinkelbereich brauchte aufgrund der Symmetrie des Laufrades nicht untersucht zu werden. Der gewonnene Kurvenverlauf zeigt, daß außerhalb der Läuferachse ein dynamischer Meßbereich besteht, der die Bestimmung auch niedriger Dampf/Luft-Anteile in der Strömung gestattet.

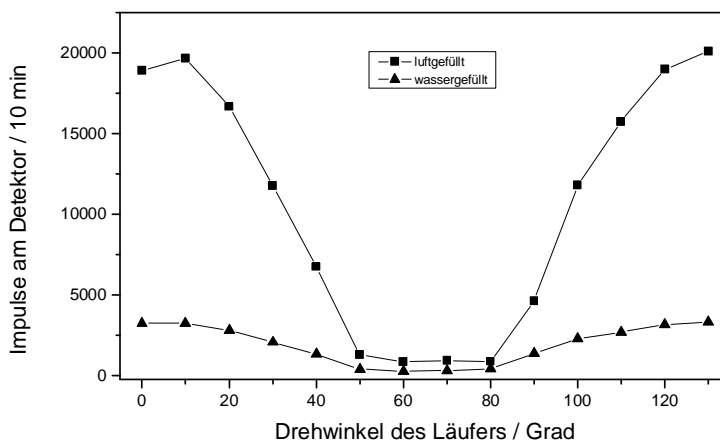


Bild 3.2: Beispiel einer Messserie der Vorversuche, Durchstrahlung eines Rohres mit originalem Pumpenläufer, Rohr mit Luft bzw. Wasser gefüllt.

Bei der Auswahl von geeigneten Detektoren mussten mehrere Anforderungen berücksichtigt werden. Die Detektoren sollten:

- robust gegen Temperaturschwankungen und mechanische Schwingungen sein.
- möglichst klein sein zugunsten eines hohen räumlichen Auflösungsvermögen des Tomographen.
- eine hohe Nachweiseffektivität besitzen.
- ein gutes energetisches Auflösungsvermögen zur gezielten Diskriminierung der Streustrahlung besitzen.

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, ist die Verwendung von Festkörperdetektoren (Halbleiter- oder Szintillationsdetektoren) notwendig.

Unter den Halbleiterdetektoren sind am ehesten moderne Detektoren aus Verbund-Halbleitermaterialien mit hoher mittlerer Ordnungszahl geeignet, weil die Nachweiswahrscheinlichkeit für die Cs-137-Gammastrahlung in diesen Detektoren am größten ist. Da in den letzten Jahren insbesondere CdTe- bzw. CdZnTe-Detektoren kommerzielle Verbreitung gefunden haben [31, 32], wurde deren Verwendbarkeit geprüft. Nachteilig ist bei diesen Detektoren jedoch deren geringe Nachweiseffektivität von 20..25% für die 662 keV-Gamma-Strahlung. Der Grund dafür liegt in der relativ geringen herstellbaren Dicke der Sperrschicht von maximal ca. 5 mm im Detektor.

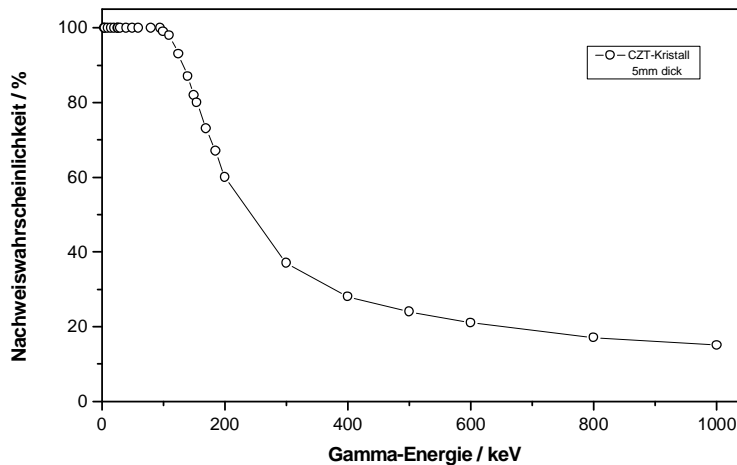


Bild 3.3: Nachweiseffektivität eines CdZnTe-Detektors mit 5 mm Kristalldicke (eVProducts) [33]

Deshalb wurde die Verwendung von Szintillationsdetektoren favorisiert. Auch bei Szintillationsdetektoren ist in den letzten Jahren ein Trend zur Miniaturisierung zu beobachten. So wird in der Literatur mehrfach beschrieben, daß der übliche Photomultiplier durch speziell auf den Szintillatorkristall abgestimmte Halbleiter-Photodioden ersetzt werden kann [34, 35, 36, 37]. Begrenzt durch das thermische Rauschen im Halbleiter sind zumindest theoretisch Photonen mit Energien bis herab zu 100..50 keV meßbar. Zu Testzwecken konnte über die Firma EKM-Messtechnik eine derartige Kristall-Photodioden-Kombination (CsJ-Kristall 10x10x25 mm³ auf Hamamatsu Photodiode S3590) der Firma Scionix inclusive Hybrid-Vorverstärker beschafft werden. Die Vorversuche mit diesem Detektor führten jedoch zu keinem befriedigenden Ergebnis, so daß auf die Verwendung der bewährten Kombination aus Szintillatorkristall und Photomultiplier mit dem Nachteil eines höheren Platzbedarfs orientiert wurde.

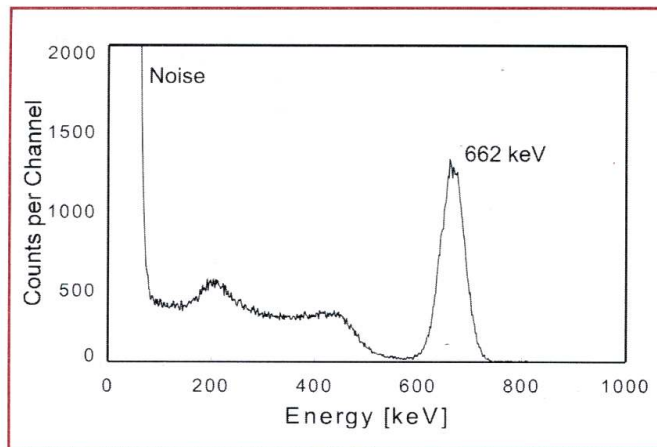


Bild 3.4: Cs-137-Spektrum, aufgenommen mit einer Szintillator-Photodioden-Kombination (Firma Scionix) [38]

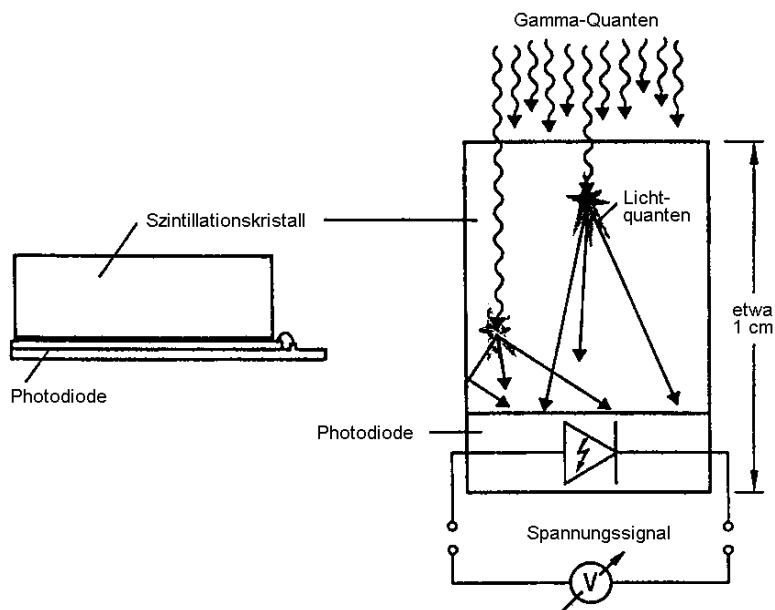


Bild 3.5: Detektor aus einer Szintillator-Photodioden-Kombination [39]

In der Folge dieser Entscheidung vergrößerten sich die Dimensionen des geplanten Detektorbogens deutlich, um die räumliche Auflösung (Abstand der Projektionen im Messvolumen) nicht zu verschlechtern. Für den Aufbau des Detektorbogens wurden 64 BGO-Kristalle ($10 \times 10 \times 30 \text{ mm}^3$) der Firma Crismatec über den Lieferanten GC Technology GmbH und 64 Photomultiplier R647 der Firma Hamamatsu beschafft.

3.3 Aufbau der gerätetechnischen und elektronischen Hardware

Für den Aufbau des Tomographen wurden folgende Anforderungen gestellt:

- keine direkte Berührung mit dem Axialpumpenstand zur Vermeidung von Vibrationen (Mikrofonieempfindlichkeit der Detektoren)
- Lastaufnahmevermögen des Tomographengestells von >50 kg (notwendige Bleiabschirmung)
- gute Justierbarkeit des Tomographen relativ zur Pumpenachse mit einer Genauigkeit von besser als 1 mm (unbedingt notwendig zur Gewinnung auswertbarer Tomogramme)
- Drehbarkeit von Quelle und Detektoren um die Pumpenachse von mindestens 240° (ermöglicht Untersuchung von Effekten, die durch Einwirkung der Schwerkraft entstehen können).

Den auf Grundlage dieser Anforderungen entstandenen Entwurf für den Tomographen zeigt **Bild 3.6**.

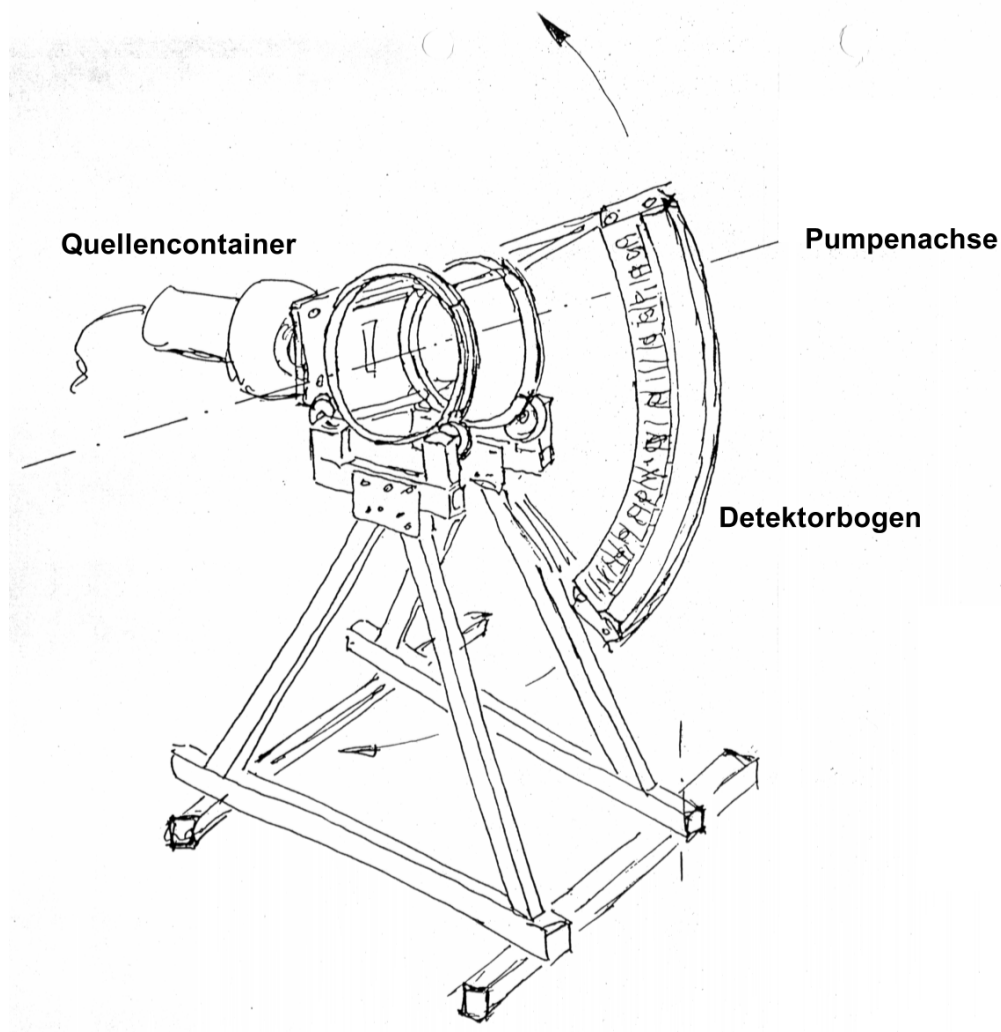


Bild 3.6: Entwurfszeichnung für den Gamma-Tomographen

Aus dem Entwurf ergeben sich als zu fertigende Hauptbaugruppen das eigentliche Grundgestell und der Detektorbogen. Für den Quellencontainer wurde der Einsatz eines handelsüblichen bauartzugelassenen Behälters angestrebt.

Die Dimensionierung des Detektorbogens ergibt sich aus den Abmaßen der gegebenen Axialpumpe mit einem Läuferdurchmesser von 220 mm. Das räumliche Auflösungsvermögen folgt bei der Tomographie aus dem Abstand der einzelnen Projektionen. Da die Detektoren eine empfindliche Fläche von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ besitzen, für das zu errechnende Bild jedoch eine Auflösung von besser als 5 mm gefordert wird, muss die Strecke Quelle-Detektor mindestens die doppelte Länge der Strecke Quelle-Rohrrückwand besitzen. Da der Pumpenläufer sich ständig vollkommen innerhalb des Strahlenfächers befinden muss, ergibt sich bei einem angestrebten 60° -Strahlenfächer eine Entfernung Strahlenquelle-Rohrmittelpunkt von mindestens 255 mm. Die entsprechende Entfernung zur Rohrrückwand beträgt dann $255 \text{ mm} + 220 \text{ mm} / 2 = 365 \text{ mm}$. Eine Verdoppelung dieses Maßes ergibt einen Mindestradius für den Detektorbogen von 730 mm.



Bild 3.7: Gehäuse des Detektorbogens im Rohbau, die senkrechten Röhren beinhalten die Photomultiplier, der darunterliegende waagerechte Schlitz nimmt die Detektorkristalle auf.

Die daraus resultierende Bogenlänge für ein 60° -Segment beträgt 764 mm, dies ist gerade ausreichend, um die 64 Kristalle mit einer Kantenlänge von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ mit lichtdichtem Gehäuse und dazwischen befindlichen Wolframabschirmblechen in diesem Bogensegment unterzubringen. Alle Teile des Detektorbogens wurden zur Gewichtsersparnis aus Aluminium gefertigt. Neben den Kristallen und Photomultipliern nimmt der Detektorbogen außerdem noch die Vorverstärker für alle 64 Signalkanäle auf.

Das Grundgestell des Tomographen wurde aus Stabilitätsgründen als Stahlkonstruktion gefertigt. Die Mechanik des Grundgestelles erlaubt die Drehung des Detektorbogens um die Pumpenachse und eine Verschiebung des Tomographen entlang der Pumpenachse. Außerdem enthält das Grundgestell alle Elemente, die zur Feinjustierung des Tomographen notwendig sind.



Bild 3.8:
Grundgestell des Tomographen
im Rohbau



Bild 3.9: Der für den Tomographen beschaffte Quellencontainer (Typ TIFF) der Firma Sauerwein (mit Kollimator)

Die Strahlenquelle des Tomographen ist in einem modernen Transport- und Arbeitscontainer vom Typ TIFF der Firma Sauerwein installiert. Als Abschirmmaterial wird in diesem Container abgereichertes Uran verwendet. Dadurch ergibt sich eine hohe Abschirmwirkung bei geringem Gewicht. Die Quelle kann ferngesteuert in ihre Arbeitsposition gebracht werden. Dabei befindet sie sich weiterhin im Container und ragt in einen mit diesem verbundenen Wolframkollimator hinein. Der in der Institutswerkstatt im FZR

modifizierte Kollimator begrenzt den Strahlaustritt auf den für die Messungen erforderlichen schmalen 60°-Fächer.

Die in den Photomultipliern des Detektorbogens erzeugten elektrischen Ladungen werden zunächst pro Detektor in einem ladungsempfindlichen Vorverstärker integriert und verstärkt.

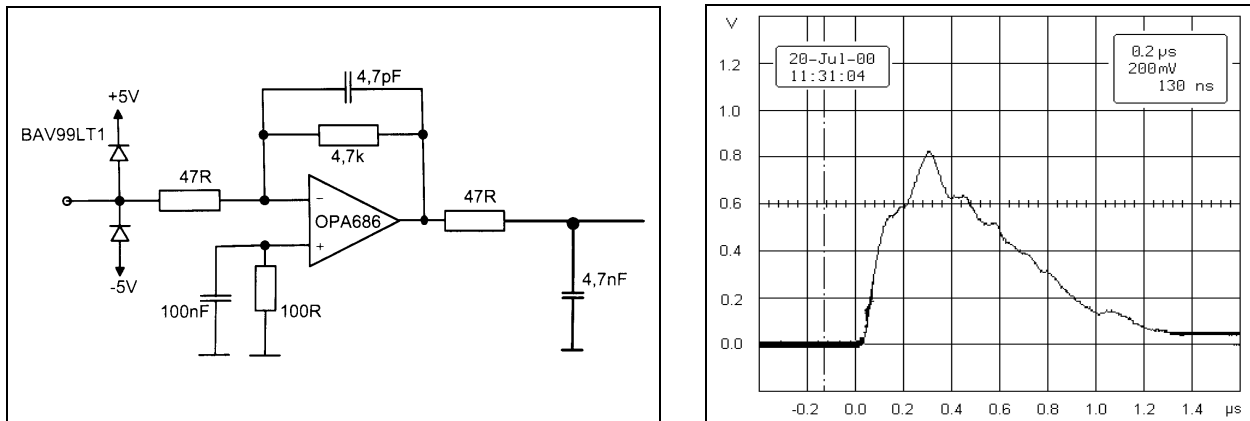


Bild 3.10: Vorverstärker, links Schaltbild, rechts typische Impulsform am Ausgang

Die so gewonnenen Impulse werden mit 64 geschirmten Kabeln an die nachfolgende Signalverarbeitungseinheit weitergeleitet. Dort werden die Signalimpulse auf vier gleichartigen 16-kanaligen Leiterkarten zunächst im jeweiligen Messkanal mit einer Diskriminatorstufe einer Höhenanalyse unterzogen. Impulse, die kleiner als die untere (gestreute Gamma-Quanten) oder größer als die obere Schwelle sind (Pile-Ups), werden diskriminiert. Die beiden Schwellwerte können vom Messrechner aus beim Programmstart gesetzt werden. Signalimpulse die innerhalb des durch die beiden Schwellwerte gesetzten Fensters liegen, werden zum Zähler weitergeleitet.

Wie in Kapitel 3.1 (S. 11) erwähnt, wird die große Zahl der virtuellen $n\Delta\gamma$ -Zähler hardwareseitig durch zwei Zähler pro Detektor (Meßkanal) realisiert. Einer dieser Zähler ist jeweils aktiv, der zweite Zähler kann währenddessen durch den PC ausgelesen und anschließend wieder rückgesetzt werden. Die Aufteilung der Zählergebnisse auf die einzelnen Winkelinkremente geschieht im Rechner. Alle etwa 100 µs wird zwischen den beiden Zählern gewechselt (siehe auch Kap. 3.1). Die gesamte Zählerschaltung inclusive deren Steuerung wurde pro Leiterkarte in einem FPGA realisiert.

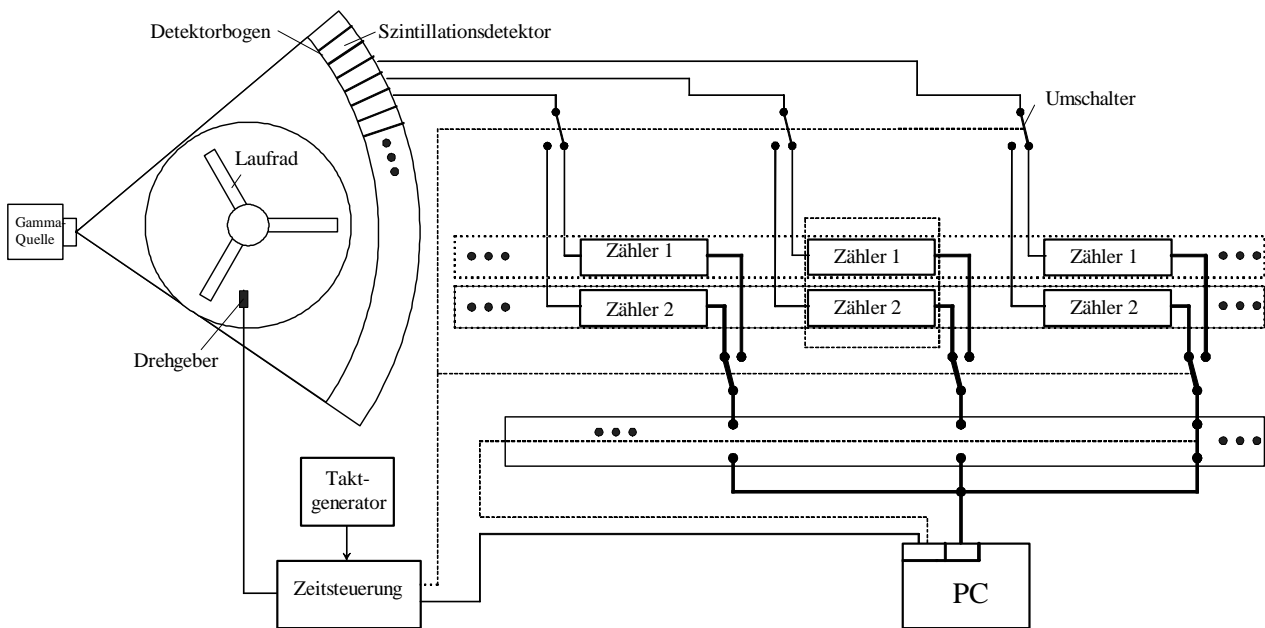


Bild 3.11: Blockschaltbild der Signalverarbeitung

Das Umschalten zwischen den einzelnen Zählern wird von einer fünften Leiterkarte gesteuert, die den Zeittakt liefert und außerdem das Interface zum PC beinhaltet. Auch diese Schaltung wurde in einem FPGA realisiert. Zusammen mit den Stromversorgungsmodulen bilden diese fünf Leiterkarten in einem Gehäuse eine kompakte Signalerfassungseinheit.

3.4 Entwicklung der Software zur Steuerung des Tomographen

Zur Erfassung und Abspeicherung der Daten im PC dient ein Programm, das in der Programmiersprache Turbo-Pascal realisiert wurde. Nach der Programminitialisierung werden zunächst die im Rechner notwendigen Datenmassive angelegt und nullgesetzt. Anschließend wird die Signalerfassungseinheit initialisiert und die Schwellwertregister mit den Spannungswerten für die Diskriminatorschwellen belegt. Danach werden die einzelnen Zähler nullgesetzt und die Messung gestartet. Der PC wartet nun auf den Reset-Impuls, den der Drehwinkelgeber an der Pumpenwelle bei jeder Umdrehung für den Winkel 0° liefert. Sobald dieser Impuls registriert wird, werden die Zähler nullgesetzt und anschließend aller $100 \mu\text{s}$ alternierend ausgelesen, etwa 400 mal pro Pumpenumdrehung. Bei Registrierung des nächsten Reset-Impulses wird das Zählen gestoppt und für den Rest der zweiten Umdrehung wartet der PC auf einen neuen Impuls vom Drehwinkelgeber. Wenn dieser Impuls am Beginn der dritten Umdrehung registriert wird, beginnt die Messung erneut. Die gezählten Impulszahlen pro Zeitintervall werden zu den bereits registrierten hinzuaddiert. Wenn die vorgegebene Messdauer erreicht ist, werden die Messwerte aus dem Speicher des Rechners in eine Datei auf der Festplatte des PC's geschrieben. Als Resultat entsteht eine Tabelle mit 64 Spalten für die 64 Detektoren des

Detektorbogens und ca. 400 Zeilen für die ca. 400 Zeitintervalle zu je $100 \mu\text{s}$, die für eine Umdrehung benötigt werden.

Die Erfassung der Messsignale bei nur jeder zweiten Umdrehung erwies sich als notwendig, da bei fortlaufender Messung der Beginn des 0° -Impulses nicht mit dem $100 \mu\text{s}$ -Takt synchronisiert werden kann und somit deutliche Bildunschärfen entstehen. Für die Zukunft ist vorgesehen, statt des $100 \mu\text{s}$ -Taktes das Wechselsignal zwischen den Zählern direkt vom Drehgeber an der Pumpenwelle abzuleiten. Diese Möglichkeit wurde anfänglich nicht in Betracht gezogen, da bei dieser Art der Steuerung die prinzipiell Gefahr besteht, dass die einzelnen Zähler bei starker Verringerung der Pumpendrehzahl überlaufen. Jedoch sind Messungen mit einer anderen Drehzahl als 1500 min^{-1} derzeit nicht geplant.

3.5 Entwicklung der Bildrekonstruktion

Für die tomographische Bildrekonstruktion wird zunächst vorausgesetzt, dass alle Objektbestandteile relativ zur Messanordnung (Detektorbogen und Strahlungsquelle) rotieren. Damit auch feststehende (stationäre) Objektbestandteile als rotierend gelten dürfen, müssen sie ein rotationssymmetrisches Schnittbild aufweisen. Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, das Objekte mit Hilfe einer feststehenden (vorzugsweise waagrecht orientierten) Messanordnung zu rekonstruieren. Das Objekt ist im vorliegenden Fall ein ebener Schnitt durch die Axialpumpe. Das Laufrad wie auch das von ihm bewegte Medium vollführen die geforderte Drehbewegung. Das ruhende Pumpengehäuse hat einen kreisförmigen Querschnitt und darf deshalb als rotierend gelten (Bild 3.12).

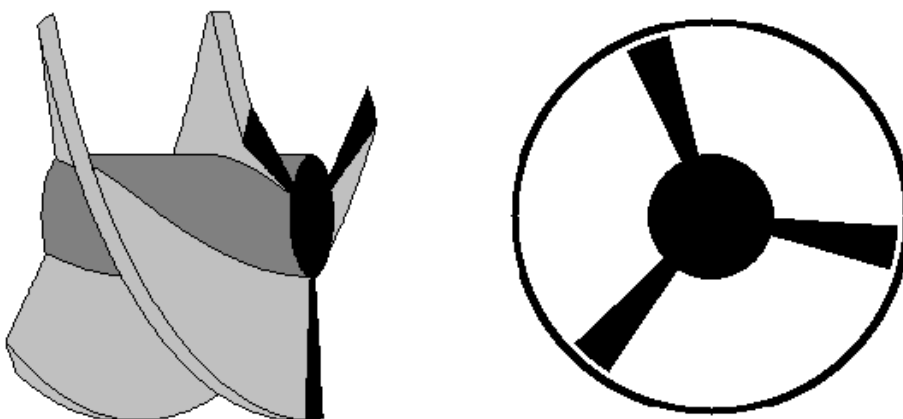


Bild 3.12: Skizze des Laufrades – links perspektivisch mit angedeuteter Schnittfläche, rechts Schnitt durch das Laufrad und das Pumpengehäuse in der Draufsicht

Für die tomographische Bildrekonstruktion gibt es algebraische und analytische Verfahren, wobei letztere auch als gefilterte Rückprojektion bekannt sind [40].

Bei den algebraischen Verfahren wird die Objektebene lückenlos in disjunkte Teilflächen unterteilt. Den insgesamt n Teilflächen wird ein n -dimensionaler Vektor \underline{y} zugeordnet. Ein Projektionsstrahl kann das Objekt auf verschiedenen Wegen durchdringen. Abhängig vom konkreten Weg trägt jede Teilfläche anteilmäßig zur Schwächung (Absorption) des Strahls bei. Die Anteile, mit denen die n Teilflächen an der Schwächung des jeweiligen Projektionsstrahls beteiligt sind, bilden einen n -dimensionalen Gewichtsvektor. Zu insgesamt m Projektionsstrahlen gehören entsprechend m Gewichtvektoren. Sie werden als Zeilenvektoren zu einer (m, n) -Matrix G zusammengestellt. Diese Matrix ist rein geometrisch bestimmt. Per Messung ist nur die Gesamtschwächung jedes Projektionsstrahls zugänglich; die Messwerte bilden den m -dimensionalen Vektor \underline{d} . Der Beitrag jeder Teilfläche zur Schwächung jedes Projektionsstrahls ergibt sich durch die Auflösung des linearen algebraischen Gleichungssystems

$$G\underline{y} = \underline{d} \tag{3.1}$$

nach dem Vektor \underline{y} . Die berechneten Elemente von \underline{y} bilden schließlich das gesuchte Objektbild.

Für $n \leq m$, d.h. für grobe Bildunterteilungen ist (Gl. 3.1) entweder eindeutig oder mit minimalem Fehlerquadrat lösbar. Praktisch verwendet wurden dafür die Pseudo-Inverse der Matrix G , ein iteratives Berechnungsverfahren auf der Grundlage der Pseudoinversen und die Methode der Singulärwertzerlegung. Die erreichte Bildauflösung war in keinem Fall befriedigend.

Bei $n > m$, d.h. vergleichsweise feinen Bildunterteilungen hat (Gl. 3.1) einen Lösungsraum bzw. eine Mannigfaltigkeit von Lösungen. Da diese Lösungen formal alle gleichberechtigt sind, wird zu ihrer Bewertung und Selektion A-priori-Information (eine Anfangsnäherung) über das wahre Objektbild benötigt. Gesucht wird dann dasjenige Element des Lösungsraumes, welches der Anfangsnäherung am nächsten kommt. Die Bereitstellung einer sinnvollen Anfangsnäherung ist praktisch ein erhebliches Problem. Eine falsche Anfangsnäherung kann dazu führen, dass das ausgewählte Element des Lösungsraumes von der Realität weit entfernt ist. Die Singulärwertzerlegung verwendet generell den Koordinatenursprung als Anfangsnäherung. Aufgrund rechentechnischer Einschränkungen konnte nur eine reduzierte Anzahl (die 500 größten) Singulärwerte berücksichtigt werden. Dadurch war trotz feingliedriger Objektunterteilung nur eine geringe Bildauflösung erreichbar. **Bild 3.13** zeigt dafür ein Beispiel; dieses Bild hat neben seiner Unschärfe noch andere, hier nicht weiter diskutierte Unzulänglichkeiten.

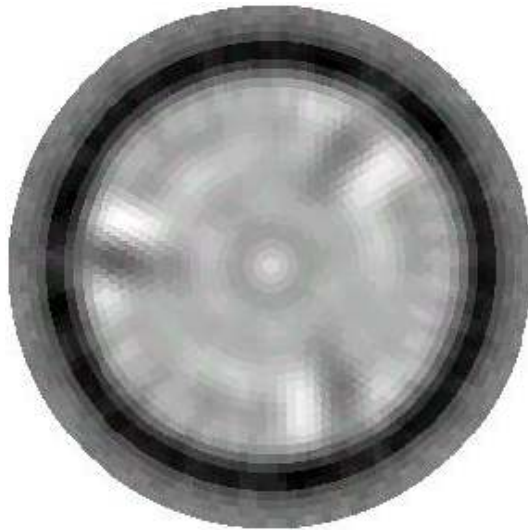


Bild 3.13: Mittels Singulärwertzerlegung gewonnenes Rekonstruktionsbild (Differenzbild – genauer unten)

Die iterative Lösung von (3.1) stellt nur vergleichsweise geringe technische Anforderungen, erlaubt daher eine wesentliche höhere Bildauflösung, ist aber noch mehr auf eine gute Anfangsnäherung angewiesen. Besonders gute Anfangsnäherungen konnten analytisch, d.h. durch gefilterte Rückprojektion gewonnen werden. Es zeigte sich sogar, daß eine solche Anfangsnäherung auf algebraischem Wege nicht erkennbar verbessert werden konnte. Die algebraischen Verfahren wurden deshalb nicht weiter verwendet.

Die mathematische Grundlage der gefilterten Rückprojektion ist die inverse Radon-Transformation [21]. Charakteristisch dafür ist neben einer speziellen Filterung, dass die Funktionswerte in rückwärtiger Richtung der Projektionsstrahlen über die Fläche des Objektbildes aufgetragen (verschmiert) werden. Jede einzelne Projektionsfunktion wird entsprechend ihres zugehörigen Drehwinkels separat rückprojiziert. Alle einzelnen Rückprojektionen, die zu einer vollständigen Umdrehung des Objektes gehören, werden zu einem Gesamtbild überlagert. Dieses Prinzip wird im vorliegenden Fall in folgenden Schritten realisiert:

1. Spline-Interpolation der diskreten Projektionsfunktionen (eindimensional abgetastete Absorptions-Schattenbilder des Objektes) und dabei Streckung von real 64 Stützstellen (= Anzahl der Detektoren) auf 640 Stützstellen
2. Rückprojektion der gestreckten Projektionsfunktionen gemäß der inversen Radon-Transformation; Ergebnis ist das Bild des ungefiltert rückprojizierten Objektes
3. 2D-Filterung des unter 2. gewonnenen Bildes (Shepp-Logan-Filter, modifiziert)

Die für die gefilterte Rückprojektion entwickelten Algorithmen wurden zunächst durch Simulationen erprobt [41]. Dafür wurde in dem von der Pumpe transportierten Zweiphasen-Medium zunächst eine homogene Gasverteilung angenommen. **Bild 3.14 links** zeigt eine

Gesamtheit von simulierten Projektionsfunktionen $R(\varphi, \theta)$ mit φ (senkrechte Achse): Fächerwinkel entlang des Detektorbogens, θ (waagerechte Achse): Drehwinkel der Messanordnung in 1-Grad-Schritten über eine vollständige 360°-Drehung des Laufrades. Diese Darstellung wird auch als Sinogramm bezeichnet. Praktisch wird ein Sinogramm meßtechnisch gewonnen. Die Aufgabe der gefilterten Rückprojektion ist es, aus dem gegebenen Sinogramm das Objektbild zu rekonstruieren. **Bild 3.14 rechts** zeigt das Ergebnis.

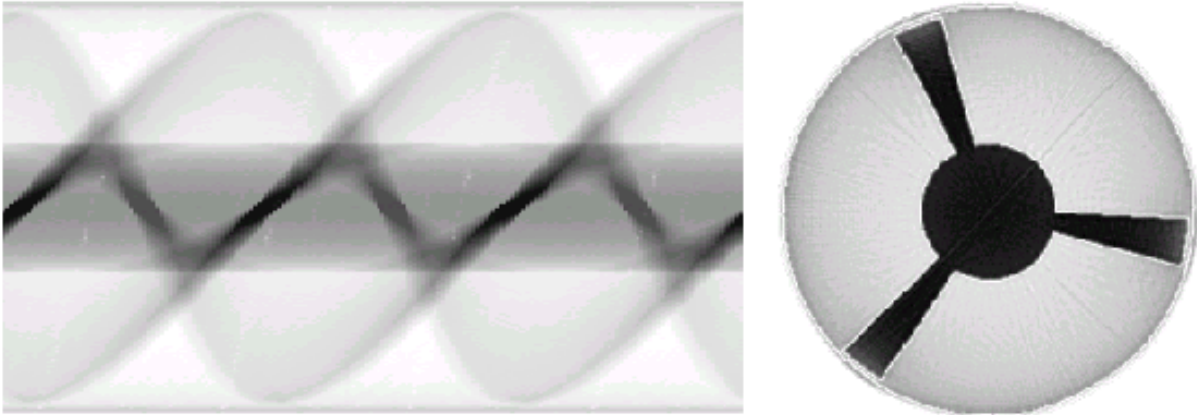


Bild 3.14: links: simuliertes Sinogramm , rechts: daraus rekonstruiertes Objektbild

Eine unbekannte Gasverteilung lässt sich durch die Subtraktion von Rekonstruktionsbildern gewinnen, nämlich durch die Differenz zwischen dem Fall a) der Zweiphasenströmung und dem Fall b) der reinen Flüssigkeitsströmung. Weil die Bildrekonstruktion eine lineare Operation ist, braucht die Subtraktion nicht erst mit den fertig rekonstruierten Objektbildern vorgenommen zu werden, sondern sie kann bereits bei den Sinogrammen erfolgen; letzteres ist rechenzeitgünstiger. Bei den Messwerten ist die Subtraktion aber noch nicht zulässig, denn deren Aufbereitung beinhaltet eine nichtlineare Operation (Logarithmus). Durch die Subtraktion entfallen alle invarianten Bestandteile der zu a) und b) gehörenden Rekonstruktionsbilder, insbesondere das Laufrad, dessen Achse und das Pumpengehäuse; die Bildwerte werden dort – jedenfalls formal - zu Null.

Im weiteren wurde nun ein inhomogenes, speziell schraubenförmiges Profil der Gasdichte angenommen; der Volumenanteil des Gases variiert zwischen 5% und 30%. Dieses Profil dreht sich phasenkonstant mit dem Laufrad mit. **Bild 3.15 links** zeigt das simulierte Differenz-Rekonstruktionsbild. Das beim Filtern unvermeidliche Gibbs'sche Phänomen hat dort bewirkt, dass nur in dem relativ großflächigen Bereich der Laufradachse Differenzen nahe Null erreicht wurden.

Wegen der nur kleinen Gasdichte und der vergleichsweise geringen Absorption in der flüssigen Phase ist bei der gegebenen Strahlungsintensität damit zu rechnen, dass stochastische Messfehler das Differenzbild erheblich stören. Die Messfehler sind darin begründet, dass die Projektionen nur wertdiskret (als Impulszahlen pro Messzeit) erfasst werden. Daher sind die Messgrößen Poisson-Zufallsprozesse.

Unter Verwendung realistischer Impulszahlen wurde das Differenzbild im **Bild 3.15 rechts** erzeugt. Die auffällig grobe Körnung im Gebiet des Laufrades und besonders in dessen Achse ist darin begründet, dass die Absorption dort besonders hoch ist. Insofern wirken die Messstörungen zum Ort ihrer Entstehung zurück. Dass die Bildstörungen auch über die Laufradachse hinaus in den Pumpenraum bzw. ins Gebiet des Mediums ausstrahlen, ist ein Effekt der Rückprojektion.

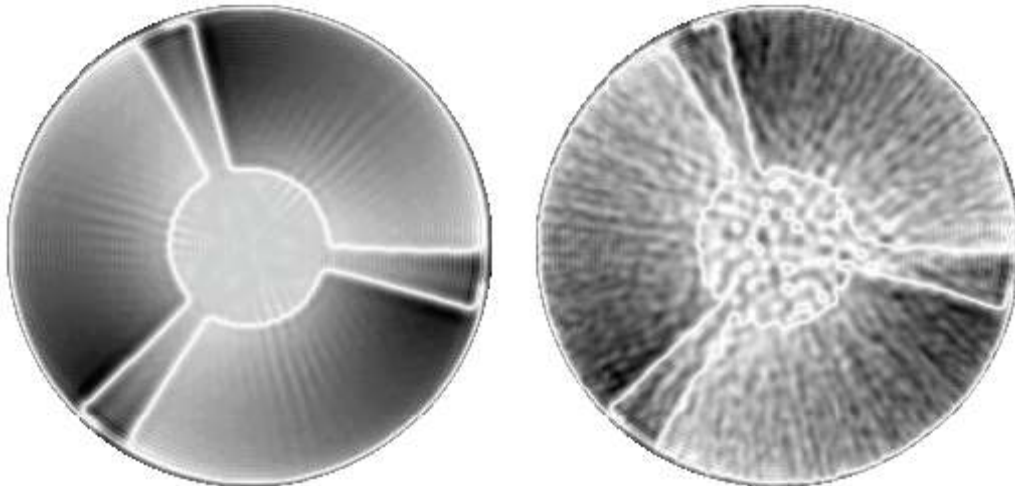


Bild 3.15: Simuliertes Differenzbild – links ohne und rechts mit stochastischen Messstörungen

Die Ergebnisse der praktischen Experimente bestätigen die simulativen Voraussage im wesentlichen (ausführlich im Abschnitt 5.2.2).

Unter realen Bedingungen kann es durch schwerkraftbedingte Entmischungen (Schichtströmung: Gasdichte oben höher als unten) zu vertikalen Inhomogenitäten in der Zweiphasenströmung kommen, insbesondere bei mittleren Gasgehalten oberhalb 6%. **Bild 3.16 links** zeigt eine solche Inhomogenität für etwa 10% Gasgehalt anhand eines Differenz-Sinogrammes: Die dunklen, nach rechts weisenden Fahnen deuten an, dass die Laufradflügel Gas hinter sich her ziehen – und zwar oben auffällig mehr als unten. Infolge solcher Inhomogenitäten besteht das betrachtete Objekt aus zwei Teilen, nämlich dem bisherigen rotierenden (Teil-)Objekt und einem zusätzlichen stationären Teilobjekt. Durch eine ebenfalls stationäre Messanordnung kann das stationäre Teilobjekt nicht korrekt rekonstruiert werden. Vielmehr verfälscht es die Rekonstruktion, da es – anschaulich ausgedrückt - über den gesamten Umkreis verschmiert wird. Somit ist im rekonstruierten Differenz-Objektbild von der vertikalen Inhomogenität nichts mehr wahrnehmbar. Richtig rekonstruiert wird nur das von den Laufradflügeln mitgerissene Gas (**Bild 3.16 rechts**). Das Laufrad selbst äußert sich nur durch gröbkörnige Bildstörungen, wie sie in ähnlicher Form durch Simulation vorhergesagt wurden (vgl. **Bild 3.15 rechts**).

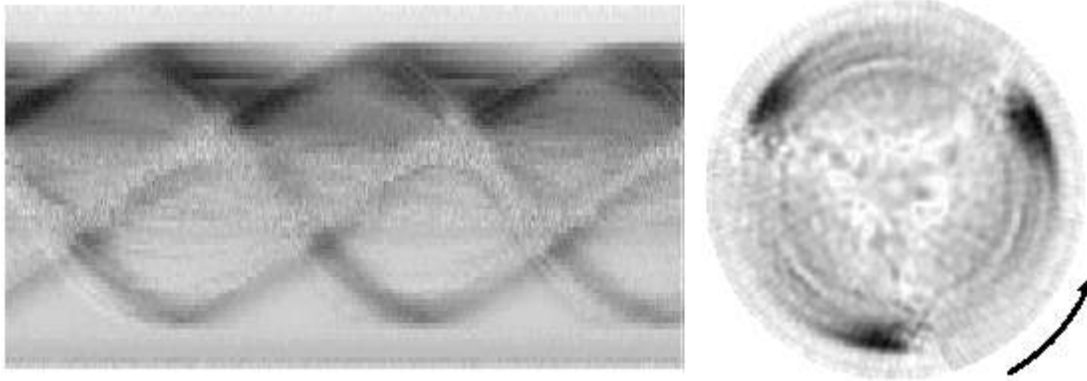


Bild 3.16: links: reales asymmetrisches Differenz-Sinogramm, rechts: das daraus rekonstruierte Differenz-Objektbild; der Schwärzungsgrad entspricht qualitativ dem Gasanteil; der Pfeil zeigt die Drehrichtung des Laufrades an

Damit beide Teilobjekte gemeinsam richtig rekonstruiert werden können, wird das rotierende Teilobjekt (das Laufrad und das von ihm mitgerissene Gas) periodisch an einer festgelegten, aber in $[0, 360^\circ]$ frei wählbaren Position erfaßt. Das rotierende Teilobjekt erscheint dadurch quasistationär. Das nunmehr insgesamt als stationär anzusehende Objekt läßt sich dadurch rekonstruieren, dass die tomographische Meßanordnung schrittweise um das Objekt gedreht wird; in jedem Schritt wird eine Projektion (Spalte des Sinogramms) erzeugt. Für einen Fall, der demjenigen im **Bild 3.16** nahe kommt, zeigt **Bild 3.17** das rekonstruierte Differenz-Objektbild. Das rotierende Teilobjekt ist dabei quasistationär in einer solchen Position erfaßt worden, in welcher beide Teilobjekte gut voneinander separiert sind. Das feststehende Teilobjekt erweist sich als überraschend kleines Gebiet erhöhten Gasanteils oberhalb der Drehachse des Laufrades.

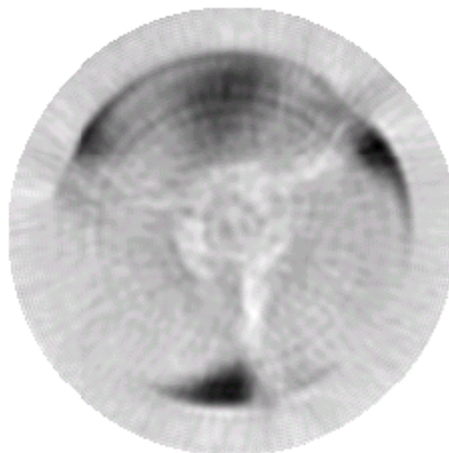


Bild 3.17: Gleichzeitige Rekonstruktion des stationären und des rotierenden Teilobjektes. Die erkennbaren konzentrischen Ringe sind auf eine unzulängliche Kalibrierung des Meßsystems zurückzuführen.

Eine schrittweise Verschiebung der Position, an welcher das rotierende Teilobjekt quasi-stationär erfaßt wird, verdeutlicht die Relativbewegung zwischen den beiden Teilobjekten, **Bild 3.18**; die schwankenden Helligkeiten in den oberen Bereichen der Einzelbilder zeigen eine Wechselwirkung zwischen dem vom Laufrad mitgerissenen und dem oben bleibenden Gas an.



Bild 3.18: Bildsequenz zur Verdeutlichung der Relativbewegung zwischen dem rotierenden und dem stationären Teilobjekt

Die Gasverteilung kann bislang nur qualitativ bestimmt werden. Eine quantitative Bestimmung erfordert die exakte Kenntnis der Schwächung entlang des jeweiligen Projektionsstrahles durch das Medium unter Berücksichtigung gestreuer Strahlungsanteile. Diese Angaben sind derzeit noch nicht ausreichend genau verfügbar. Eine Ersatzlösung für die quantitative Bildrekonstruktion ist in [41] beschrieben. Sie beruht darauf, dass im Objektbild zwei Referenzpunkte oder –bereiche reserviert werden, deren Absorption a priori bekannt ist. Dafür bevorzugt sind die beiden Extreme, dass sich (a) nur Flüssigkeit und (b) nur Gas im Pumpenraum (zwischen den Laufradflügeln) befindet. Anhand dieser beiden Referenzpunkte lässt sich eine Messskala bestimmen, an der dann jeder andere Wert des Gasgehaltes abgelesen werden kann. Selbst diese Lösung ist aber bisher nur in Näherung realisierbar, denn über den Extremfall (b) kann noch nicht in der erforderlichen Genauigkeit verfügt werden. Deshalb wird ersatzweise auf den a priori bekannten Gasgehalt zurückgegriffen, mit dem die Zweiphasenströmung in die Pumpe eintritt.

3.6 Strahlenschutzrechtliche Unterlagen und Antrag

Der Betrieb des Gamma-Tomographen bedarf einer Strahlenschutzgenehmigung nach §3 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). Die zuständige Genehmigungsbehörde für das FZR als Antragsteller ist das Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) des Freistaates Sachsen.

Zum Erhalt der Genehmigung wurden die erforderlichen Antragsunterlagen erarbeitet, deren wesentlicher Bestandteil Simulationsrechnungen des zu erwartenden Strahlungsfeldes und der sich daraus ergebenden Abschirmmaßnahmen waren. Diese Berechnungen wurden am Institut für Sicherheitsforschung des FZR durchgeführt. Die Auslegung der Versuchsanordnung erfolgte so, dass die Strahlenschutzmaßnahmen bereits der zu erwartenden Neufassung der Strahlenschutzverordnung mit ihren enger gefassten Grenzwerten entsprechen (jährlicher Dosisgrenzwert außerhalb des Kontrollbereiches 1 mSv bei einer angenommenen Betriebszeit von 200 Stunden pro Jahr). Änderungen der Genehmigung nach Inkrafttreten der Novellierung sind daher nicht erforderlich.

Die Strahlenschutzgenehmigung für den Versuchsstand wurde am 17. 7. 2000 durch das LfUG erteilt. Vor der Freigabe der Messanordnung durch den Strahlenschutzbeauftragten erfolgte eine detaillierte Ausmessung des Strahlungsfeldes, um die berechneten Werte zu verifizieren. Entsprechend der Genehmigung besitzt der Versuchsstand den Status eines Kontrollbereiches nach § 58 StrlSchV nur während der Messungen (temporärer Kontrollbereich) und ist nach Verbringung der Strahlenquelle in den Lagerraum für den normalen Versuchsbetrieb frei zugänglich.

Die Genehmigung gestattet alle Strahlrichtungen in den unteren Halbkreis. Sollten sich bei einer Weiterführung des Messprogramms Untersuchungen mit Strahlrichtungen in den oberen Halbkreis erforderlich machen, muss eine entsprechende Genehmigungsänderung unter Berücksichtigung der im Obergeschoss vorhandenen Arbeitsplätze, z. B. durch Verlegung der Messungen außerhalb der regulären Arbeitszeit, beantragt werden.

4 Aufbau eines Versuchsstandes zur Messung der Phasenverteilung in einer Axialpumpe

4.1 Konzeption und Aufbau des Axialpumpen-Versuchsstandes

Als Untersuchungsobjekt wurde ein axialer Vorsatzläufer (Inducer) mit schraubenflächenförmigen Schaufeln (**Bild 4.1**) gewählt. Seine Hauptparameter sind:

- Aussendurchmesser $d_a = 220.0 \text{ mm}$
- Innendurchmesser $d_i = 75.0 \text{ mm}$
- Axiale Länge $l = 93.8 \text{ mm}$
- Steigung $h = 175.2 \text{ mm}$
- Schaufelzahl $z = 3$
- Schaufelwinkel aussen $\beta_a = 14.2^\circ$

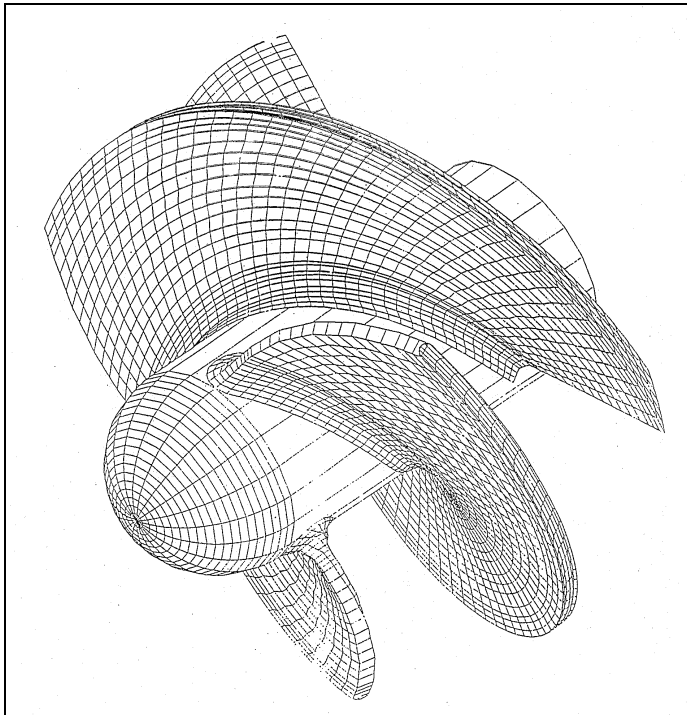


Bild 4.1: Inducer (Pumpenlaufrad) der Axialpumpe

Für den Bestpunkt wurden bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ folgende Kennwerte ermittelt:

- $Q_{\text{opt}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$
- $H = 3.6 \text{ m}$
- $\eta_{\text{opt}} = 75\%$
- $n_q = 160 \text{ min}^{-1}$

Dieses Laufrad bietet für die anstehenden tomographischen Messungen eine Reihe von Vorteilen:

- Axialpumpen sind wegen ihrer vergleichsweise großen Kanalquerschnitte generell gut zur Gasmitförderung geeignet.

- Die einfache Geometrie (schraubenflächenförmige Schaufeln, konstanter Innen- und Außendurchmesser, rotationssymmetrisches Gehäuse) bietet für die Verfahrensentwicklung günstige Bedingungen.
- Das Laufrad ist bereits vorhanden.
- Das Betriebsverhalten und die Strömungsstruktur bei Wasserförderung wurden im Rahmen eines DFG-Projekts [42] detailliert untersucht.

Ursprünglich war der Umbau des vorhandenen Axialpumpen-Versuchsstandes (geschlossener Kreislauf mit relativ kleinem Behälter) zur Anpassung an die Bedingungen der Zweiphasenförderung vorgesehen. Im Rahmen der Projektierungsarbeiten musste zur Kenntnis genommen werden, dass die für stabile Betriebsbedingungen erforderliche vollständige Abscheidung der Luft nach der Pumpe auch mit Umbauten des Speicherbehälters nicht sicher zu gewährleisten ist. Diese Erkenntnis zwang zu einer Neukonzeption des Versuchsstandes.

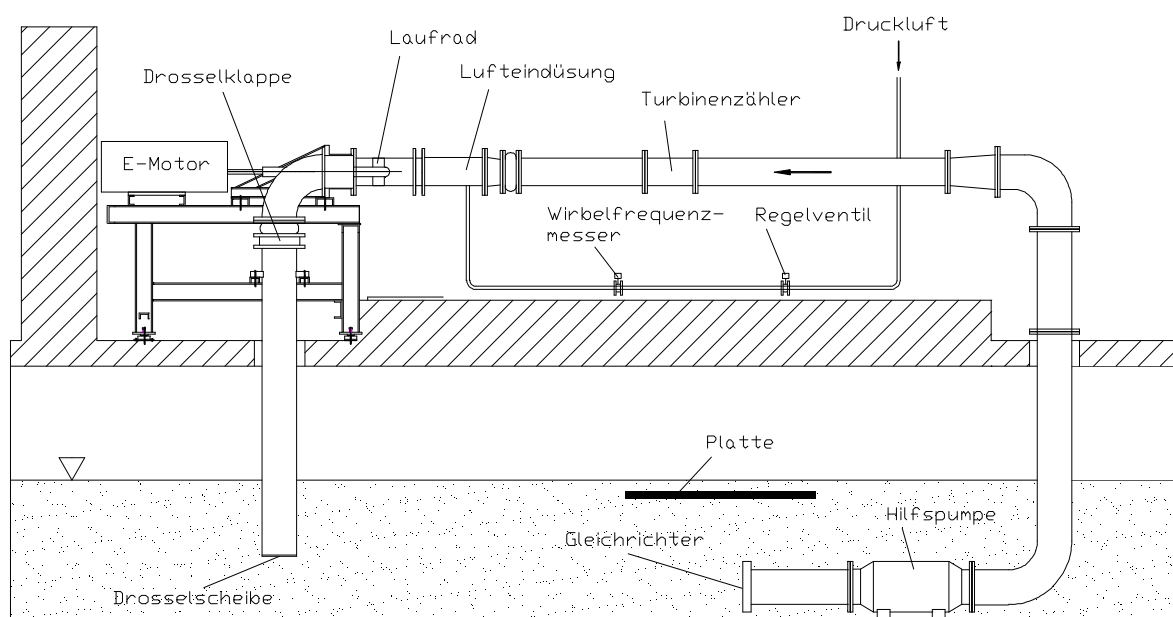


Bild 4.2: Schema der Versuchsanlage

Der neue Versuchsstand (**Bild 4.2**), der als offener Kreislauf ausgeführt ist, nutzt einen Wasserspeicher mit einem Volumen von ca. 100 m^3 und einer freien Oberfläche von 100 m^2 . Das Wasser wird über eine im Becken aufgestellte frequenzgeregelter Hilfspumpe angesaugt, die zum einen eine ausreichende Kavitationssicherheit gewährleistet, zum anderen die Einstellung von Betriebspunkten mit verschwindender Förderleistung des Inducers ermöglicht. Zur Vermeidung von luftziehenden Wirbelzöpfen (Hohlwirbel) wurde über der Ansaugöffnung eine ebene Platte ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) angebracht.

Aus Kostengründen musste die Messstrecke horizontal angeordnet werden. Der Wasservolumenstrom wird mittels eines Turbinenzählers (Turboquant) erfasst. Unmittelbar vor

der Versuchspumpe wurden der Einbau eines Moduls zur Gaseinspeisung sowie eines Drahtgittersensors zur Kontrolle der Eingangsluftverteilung vorgesehen.

Die Versuchspumpe wurde mit einem neuen Untergestell (Pumpentisch) sowie einem rotationssymmetrischen Aluminiumgehäuse versehen. Für die Kennlinienmessungen wurde dieses Gehäuse in zwei Kontrollquerschnitten vor bzw. nach dem Laufrad (**Bild 4.3**) mit je vier durch eine Ringleitung miteinander verbundenen Wandanbohrungen versehen. Die Leistungsaufnahme der von einem Asynchronmotor angetriebenen Versuchspumpe wird über eine Drehmomenten-Messwelle ermittelt. Ein Drehwinkelgeber liefert Informationen zur Pumpendrehzahl und zur Laufradposition. Die Messdaten werden mit Hilfe des Messwerterfassungssystems DASYLAB registriert, zeitgemittelt und protokolliert.

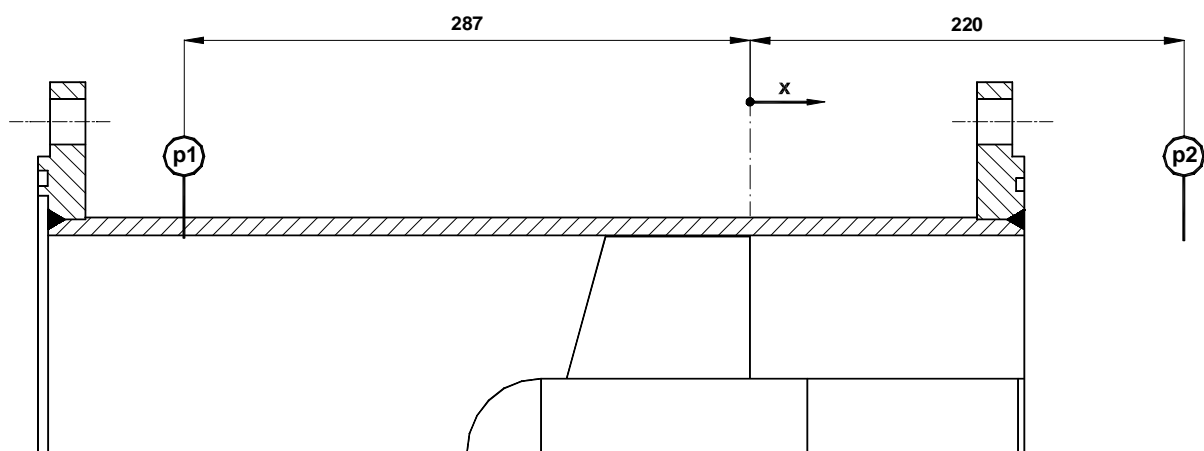


Bild 4.3: Position der Druckmessstellen

Eine nach der Versuchspumpe angeordnete Drosselklappe ermöglicht die Verstellung des Betriebspunktes der Anlage.

Für die Entgasung wird das offene Becken genutzt. Die Entfernung zwischen Saugrohr und Druckleitung beträgt etwa 8 m.

4.2 Einrichtung zum Aufbringen der Gasbeladung

Bei der Konzipierung der Lufteinspeisung wurde von einer maximalen Gaskonzentration von 30 Vol.% (ca. 90 m³/h) ausgegangen. Über ein in der Saugleitung der Versuchspumpe angeordnetes Lufteinspeisungsmodul wird Druckluft durch vier senkrecht zur Rohrachse stehende, beidseitig beaufschlagte, geschlitzte Rohre eingebracht (**Bild 4.4**).

Die Blasengröße kann durch die Maschenweite der über die Rohre gestreiften Gaze beeinflusst werden. Bei der Auslegung der freien Querschnittsflächen der Lufteindüsung wurde ursprünglich davon ausgegangen, dass die Austrittsgeschwindigkeiten – um geringe Blasenabmessungen zu erzielen – möglichst klein sein sollten. Im Rahmen der Erprobung stellte sich jedoch heraus, dass dieser Ansatz nicht günstig war. Das Einspeisungs-

modul verfügt über acht äquidistant über den Rohrumfang verteilte, radiale Luftzuführungen. Beim Eindüsen in die untere Hälfte des Rohres ist infolge des Gewichtes der Flüssigkeitssäule ein höherer Gegendruck vorhanden als beim Eindüsen in die obere Hälfte. Um dadurch bedingte Unterschiede in der Gasverteilung gering zu halten, müssen die Austrittsdruckverluste beim Eindüsen groß sein gegenüber den im Rohrquerschnitt vorhandenen Druckdifferenzen. Im Ergebnis der Erprobung wurde deshalb der freie Austrittsquerschnitt drastisch reduziert.

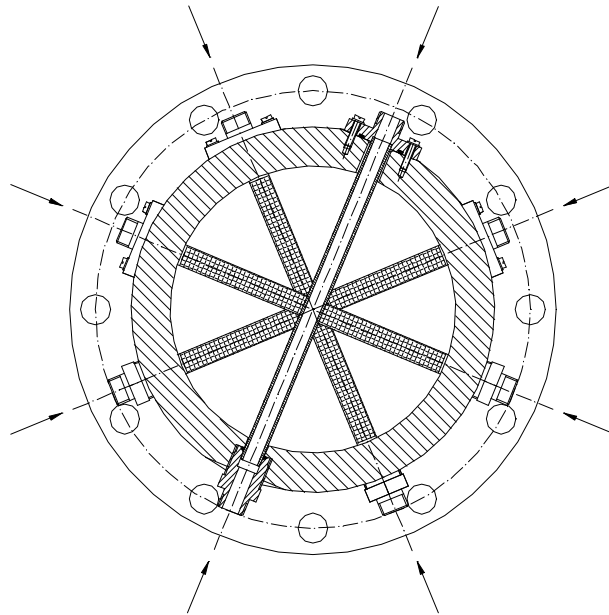


Bild 4.4: Achsnormalschnitt durch das Lufteinspeisungsmodul

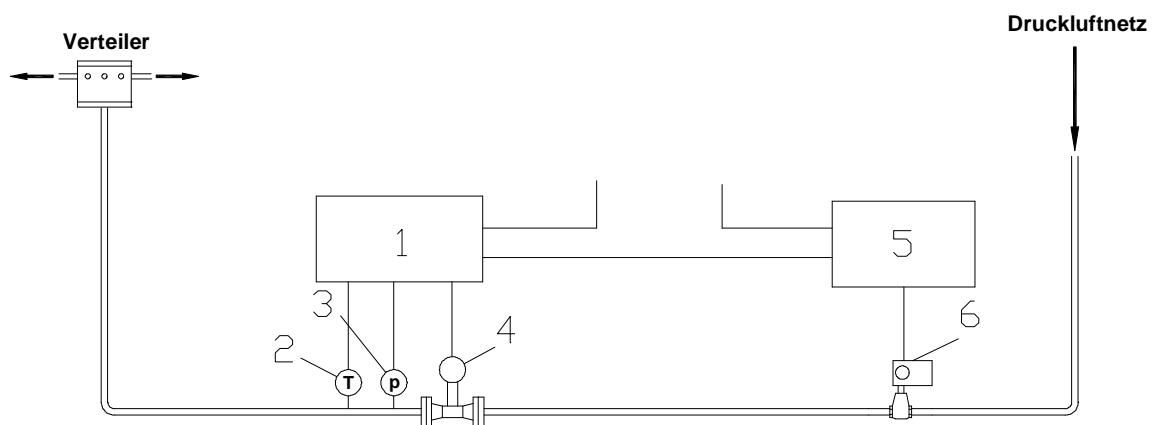


Bild 4.5: Volumenstromregelung der Lufteinspeisung

- 1 - Durchfluss-Rechner compart DXF 351
- 2 - Temperatursensor PT 100
- 3 - Druckaufnehmer Cerabar PMP 131
- 4 - Wirbeldurchflussmesser prowirl 77 PFM
- 5 - Kompaktregler TROVIS 6493
- 6 - Elektrischer Stellantrieb Typ 5824 / Elektrisches Stellventil Typ 3222

Das Modul bietet weiterhin die Möglichkeit zum Einbau zusätzlicher Siebe zur Vergleichmäßigung der Blasenverteilung. Die Kontrolle der am Laufradeintritt vorliegenden Phasenverteilung kann durch einen unmittelbar vor der Versuchspumpe einzubauenden, am FZR entwickelten Gittersensor erfolgen [43].

Die Druckluft wird aus dem Leitungsnetz des Versuchfeldes bezogen. In der Zuführungsleitung werden Volumenstrom, Druck und Temperatur gemessen und daraus von einem Durchflussmessrechner der Normvolumenstrom berechnet und an den Regler übergeben. Entsprechend der Sollwertabweichung wird über das elektrische Stellventil nachgeregelt. Der erforderliche Normvolumenstrom (Sollwert) wird bei Bezug auf die Kontrollfläche 1 unter Vernachlässigung der Temperaturdifferenzen und bei Vorgabe einer Volumenkonzentration der Beladung ε wie folgt bestimmt:

$$\varepsilon = \frac{Q_L}{Q} = \frac{Q_L}{Q_W + Q_L} \quad (4.1)$$

$$\frac{Q_L}{Q_{LN}} = \frac{p_1}{p_N} \quad (4.2)$$

$$Q_{LN} = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \cdot Q_W \cdot \frac{p_N}{p_1} \quad (4.3)$$

Aufgrund von Stabilitätsproblemen des Regelkreises wurde zeitweise das Stellsignal des Ventils über den Regler (Handbetrieb) direkt vorgegeben. Der Normvolumenstrom wird über ein Drosselventil mit integriertem Regler konstant gehalten. Die zeitliche Konstanz der einzudüsenden Luftmenge wurde nachträglich durch die Einbindung eines zusätzlichen Regelventils in die Versorgungsleitung zur Kompensation der Netzschwankungen verbessert.

Naturgemäß wächst die Schwingungsbelastung einer im Zweiphasenbetrieb arbeitenden Pumpe auch bei symmetrischer Eindüsung deutlich an. Unsymmetrien der Gasverteilung in der Zuströmung, z. B. durch das Aufschwimmen der Blasen, können in Verbindung mit ungünstigen Betriebspunkten schnell zum Erreichen kritischer Betriebszustände führen. Es wurden deshalb im wesentlichen nur Betriebszustände mit vergleichsweise geringer Gasbeladung (<15%) untersucht.

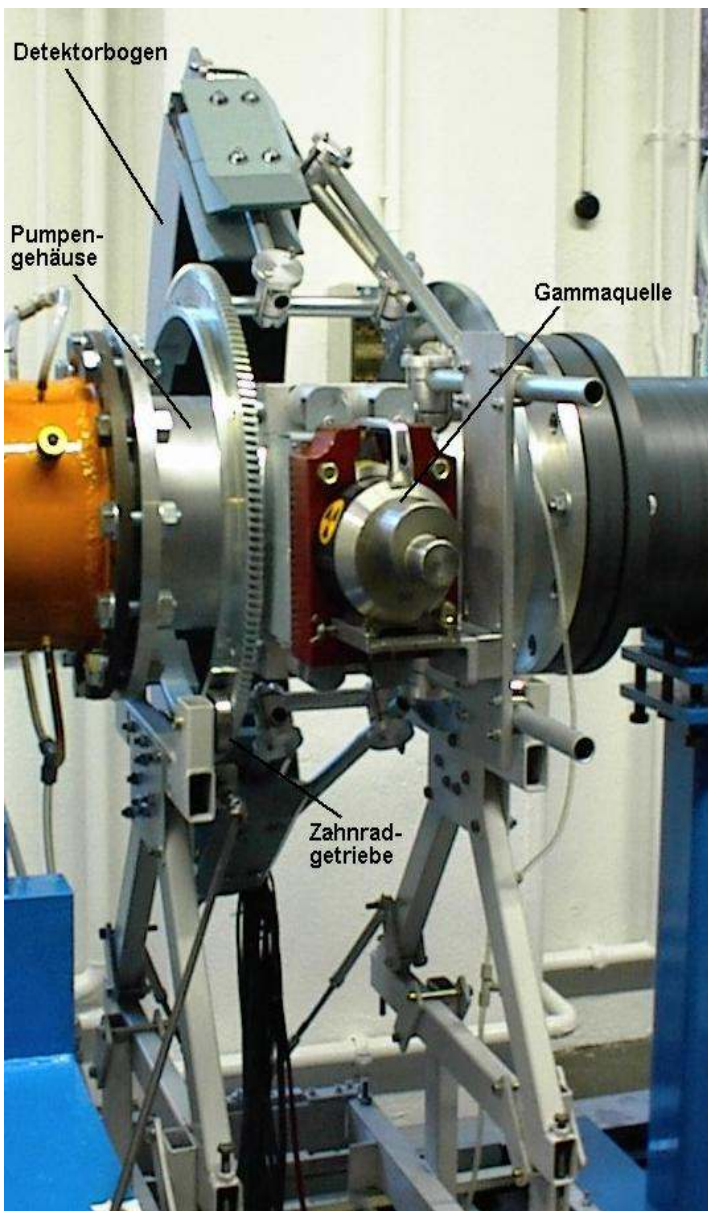
Überraschend trat dabei jedoch ein weiteres Problem zu Tage. Die Zulaufhöhe für die Hilfspumpe ist durch die geringe Tiefe des Beckens (1,1 m) begrenzt. Es besteht deshalb die Gefahr des Luftansaugen über sogenannte Hohlwirbel, die zum einen eine starke Schwingungsbelastung der Pumpe bewirken, zum anderen im konkreten Fall auch eine reproduzierbare Gasbeladung der Strömung verhindern.

Während die Kennlinienmessungen reiner Wasserförderung keinerlei Hinweis auf derartige Erscheinungen gaben, war beim Probetrieb für den Zweiphasenbetrieb schon bei kleinen Gasvolumenströmen die mit hoher Geräuschbelastung verbundene Ausbildung

derartiger Hohlwirbel zu erkennen. Nachdem zusätzliche Gleichrichter in der Saugleitung der Pumpe keine Besserung brachten, wurde das Problem durch die Anbringung einer über der Ansaugöffnung angeordneten, parallel zur Oberfläche verlaufenden Platte gelöst (vgl. **Bild 4.2**).

4.3 Aufbau des Tomographen am Versuchsstand

Nach Fertigstellung der einzelnen Baugruppen des Tomographen im FZR wurden die Einzelteile in die TU transportiert und in den Axialpumpen-Versuchsstand eingebaut. Als problematisch erwies sich die Justierung, da die Drehachsen von Pumpe und Tomograph in ihrer räumlichen Lage eine maximale Differenz von nicht mehr als 0,5 mm aufweisen sollten. Andernfalls ist mit einer deutlichen Verschlechterung der Qualität der rekonstruierten Bilder zu rechnen.



Die im Labor durchgeführte Kalibrierung der Detektoren erwies sich im eingebauten Zustand als nicht ausreichend. Eine erneute elektrische Justierung der einzelnen Photomultiplier mittels der Potentiometer im Detektorbogen war aus Gründen des Strahlenschutzes im eingebauten Zustand nicht mehr möglich. Bei der angestrebten Differenzbild-Tomographie erwachsen daraus aber keine Nachteile.

Bei der Erprobung zeigte sich neben dem prinzipiellen Funktionieren des Tomographen als deutliches Problem die mangelnde Synchronisierung des Null-Grad-Impulses der Axialpumpe mit dem Zeittakt der Signalerfassungseinheit. Die Beseitigung dieses Problems wurde bereits in Punkt 3.4 beschrieben.

Bild 4.3:

Aufstellung des Tomographen am Axialpumpenversuchsstand

5. Messdurchführung, Ergebnisse

5.1 Förderverhalten der Pumpe

5.1.1 Förderverhalten bei Einphasenströmung

Das Versuchsprogramm wurde mit der Aufnahme der Förderkennlinie des Inducers bei Einphasenbetrieb (reine Wasserförderung) eröffnet. Dazu wurde in Abhängigkeit vom Volumenstrom Q über Wandanbohrungen die umfangsgemittelte statische Druckdifferenz Δp zwischen zwei Kontrollquerschnitten vor bzw. nach dem Inducer (vgl. **Bild 4.3**) erfasst.

Inducer ($Q_{N,I} = 288 \text{ m}^3/\text{h}$) und Hilfspumpe ($Q_{N,HP} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$) unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Auslegungspunkte. Im Hinblick auf den zu großen nominellen Volumenstrom und das problematische Teillastverhalten der Hilfspumpe wäre deshalb deren Betrieb bei deutlich verringerter Drehzahl wünschenswert. Andererseits bewirkt die damit verbundene Absenkung der Förderhöhe eine Verringerung des statischen Druckes am Inducereintritt (Vordruck) und somit ein Ansteigen der Kavitationsgefahr.

Es wurden deshalb Kennlinienmessungen bei unterschiedlichen Hilfspumpendrehzahlen ausgeführt. Dazu wurde der Volumenstrom durch Verstellung der Drosselklappe schrittweise reduziert. Abbruchkriterien für die Messungen waren die Betriebsgrenzen der Hilfspumpe (zul. Volumenstrombereich, max. Motorstrom) bzw. das Schwingungsverhalten der Maschine. Die nicht ausreichend stabile Konstruktion der Versuchspumpe verbietet Teillastbetrieb mit starker Rezirkulation, instationären Kavitations- bzw. Gaszonen.

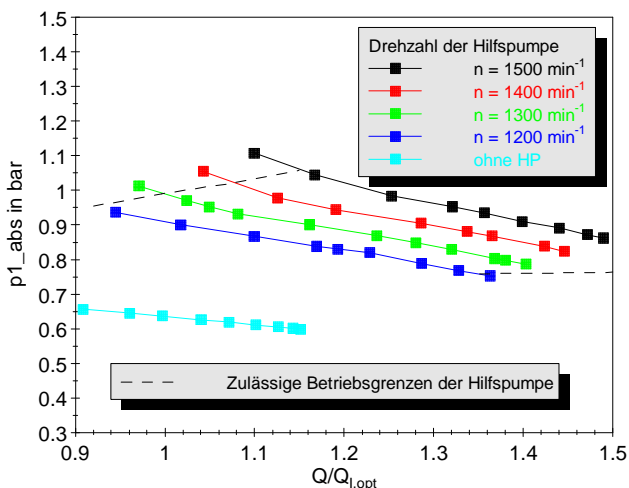


Bild 5.1: Statischer Druck am Inducereintritt

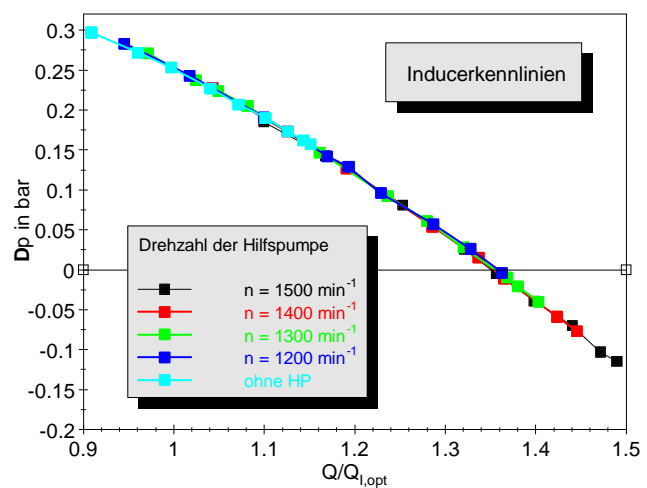


Bild 5.2: Inducerkennlinien

Infolge der einfachen, aus strömungstechnischer Sicht sehr ungünstigen Geometrie des Inducers und der daraus resultierenden stark stoßbehafteten Anströmung der Schaufeln machten sich bei sinkendem Vordruck und wachsender Teillast in zunehmendem Maße Kavitationsgeräusche bemerkbar. Die gute Übereinstimmung der bei verschiedenen Hilfspumpendrehzahlen (und damit verschiedenen Vordrücken (**Bild 5.1**)) gemessenen Inducerkennlinien (**Bild 5.2**) belegt jedoch, dass es sich dabei um lokal eng begrenzte Er-

scheinungen an der Laufradeintrittskante handelt, welche noch keinen Einfluss auf das Förderverhalten haben.

Im Ergebnis der Messungen wurde für die tomographischen Untersuchungen eine Hilfspumpendrehzahl von $n_{HP} = 1400 \text{ min}^{-1}$ ausgewählt. Diese erlaubt einerseits eine Volumenstromreduzierung bis in den Bereich des Bestpunktes der Pumpe, liefert andererseits jedoch einen ausreichend hohen Vordruck, um eine signifikante Verfälschung der gemessenen Phasenverteilungen durch Kavitationsgebiete auszuschliessen.

5.1.2 Förderverhalten bei Zweiphasenströmung

Im Anschluss wurde das Förderverhalten bei Zweiphasenströmung untersucht. Dazu wurden Kennlinien bei konstantem Gasvolumenanteil von 3%, 6%, 10% bzw. 15% aufgenommen. Auf Messungen bei höherer Beladung musste mit Rücksicht auf die damit verbundene starke Schwingungsbelastung verzichtet werden.

Da sich Wasservolumenstrom, Gasvolumenstrom und Vordruck wechselseitig beeinflussen, gestaltete sich die Betriebspunkteinstellung hier wesentlich komplizierter (zeitaufwendiger) und musste zum Teil iterativ erfolgen. Um repräsentative Mittelwerte zu erhalten, musste die Messdauer von 5 auf 20 Sekunden verlängert werden.

Die Ergebnisse sind in **Bild 5.4** dargestellt. Bei reiner Wasserförderung ist die Kennlinie nahezu linear. Mit zunehmender Beladung fällt die Kennlinie erwartungsgemäß ab. Bereits bei einem Gasgehalt von 6% geht die Förderhöhe gegen Null.

Unerwartet ist dagegen der Kennlinienanstieg gegenüber reiner Wasserförderung im Überlastbereich für 10% bzw. 15% Gasanteil. Es wurden deshalb zunächst Messfehler vermutet. Aber detaillierte Kontrollmessungen mit einem zusätzlichen Ultraschall-Durchflussmessgerät schließen einen derartig großen Fehler der Volumenstrommessung aus (**Bild 5.3**). Beide Messgeräte liefern bei Beladungsänderung qualitativ identische Verläufe, wobei die relativ großen quantitativen Abweichungen auf eine unzureichende Kalibrierung des Ultraschallmessgerätes zurückzuführen sind.

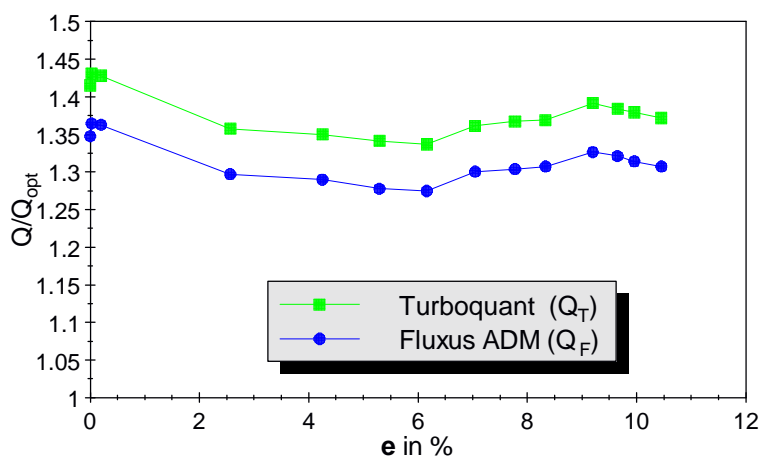


Bild 5.3:
Vergleichsmessung Turbinenzähler / Ultraschalldurchflussmesser

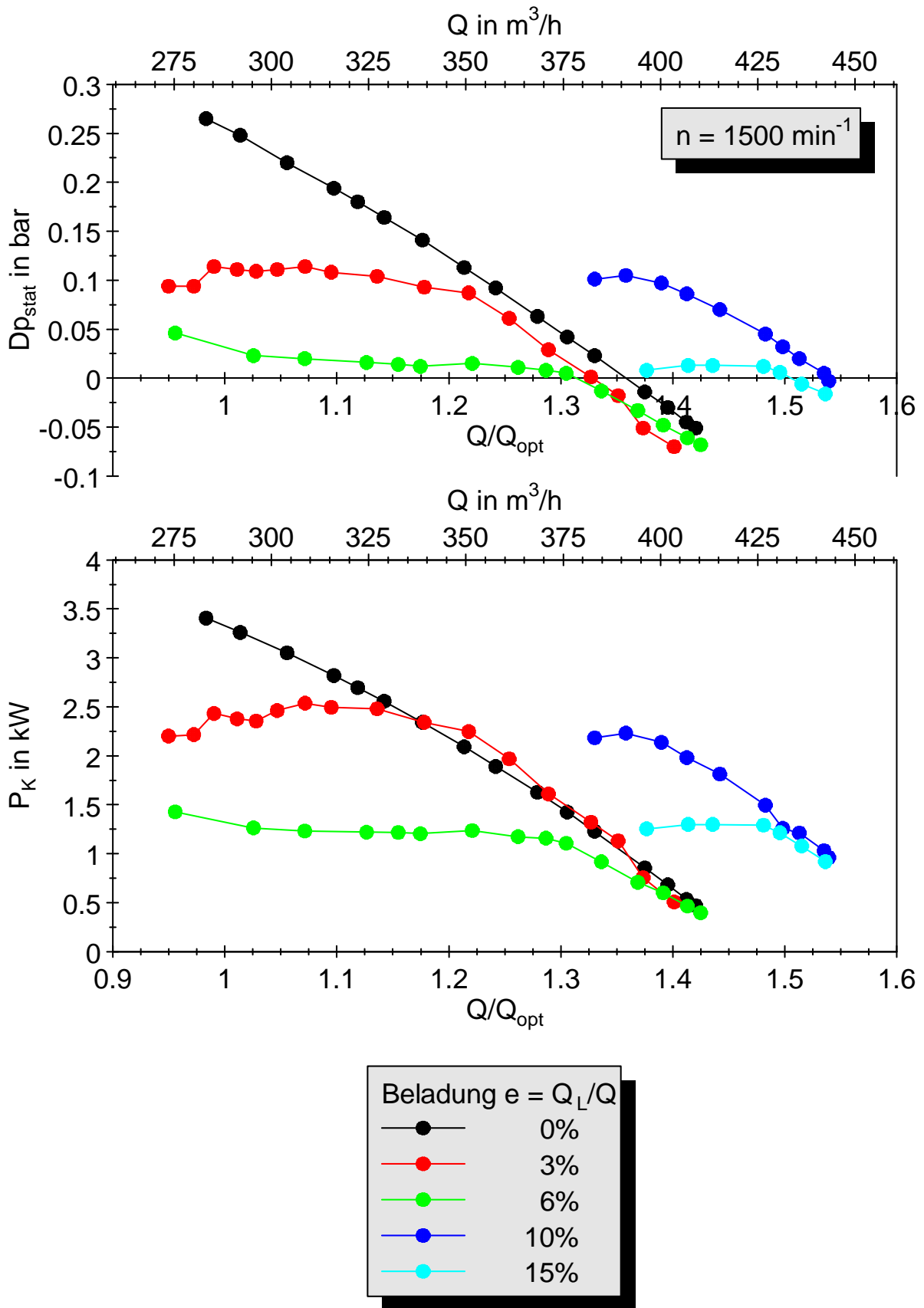


Bild 5.4: Inducerkennlinien bei Gasbeladung

In weiteren Testmessungen wurde die Gasbeladung bei konstanter Stellung der Drosselklappe schrittweise erhöht. Die gut reproduzierbaren unstetigen Verläufe von Vordruck, Volumenstrom und Drehmoment weisen für den Bereich von 6% bis 9% Beladung eine starke Änderung der Werte aus (**Bild 5.5**), die auf eine qualitative Umbildung der Strömungsstruktur im Laufrad schließen lassen.

Aufgrund der analogen Verläufe von Druckdifferenz und Leistungsaufnahme kann auch eine prinzipiell falsche Messung dieser Größen ausgeschlossen werden. Eine mögliche Erklärung für den unerwarteten Kennlinienverlauf wird in Abschnitt 5.2.2 angeführt.

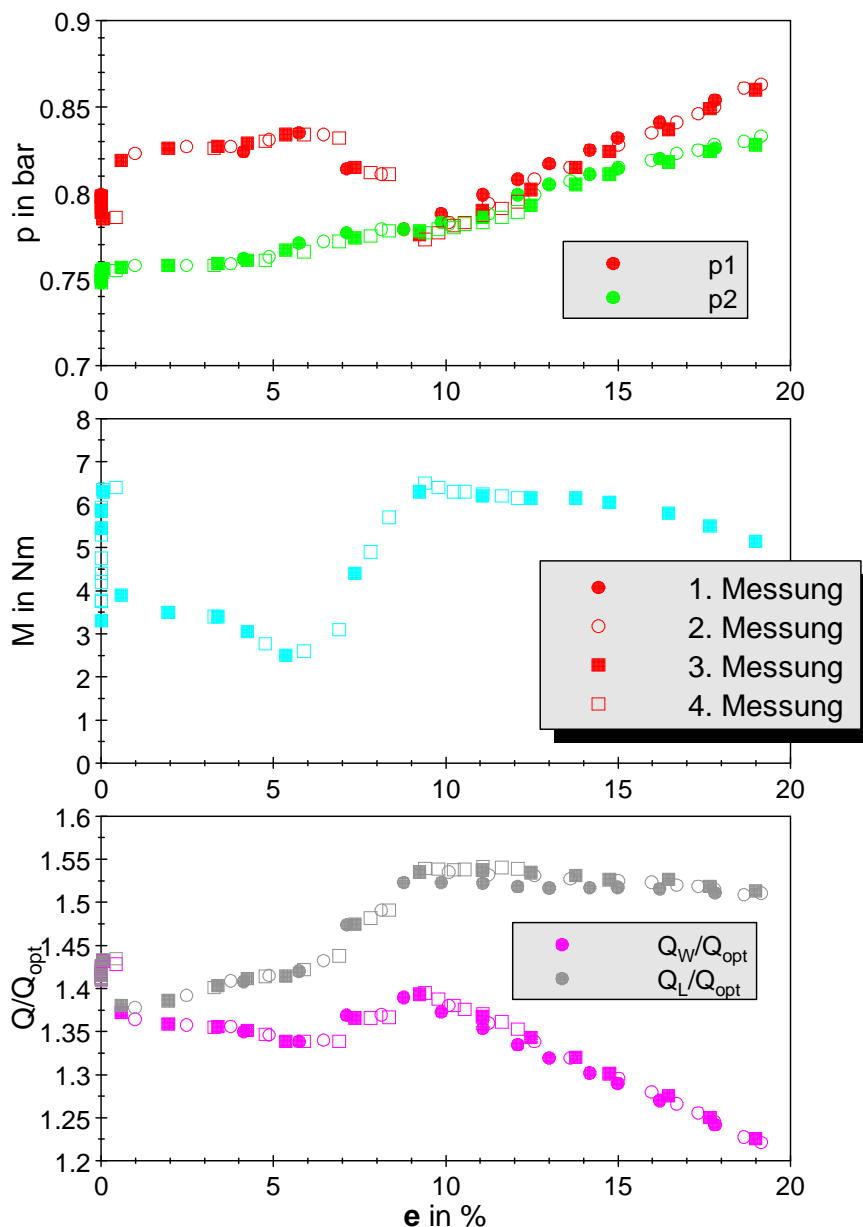


Bild 5.5: Änderung der Betriebsparameter bei Gaseinspeisung (voll geöffnete Drosselklappe)

5.2 Zeitgemittelte Phasenverteilung im Relativsystem bei Gasbeladung

5.2.1 Messprogramm

Die Messungen der zeitgemittelten Phasenverteilung im Relativsystem wurden bei horizontaler Ausrichtung des Tomographen in 7 achsnormalen Messebenen (ME 2 bis ME 8, **Bild 5.6**) vorgenommen.

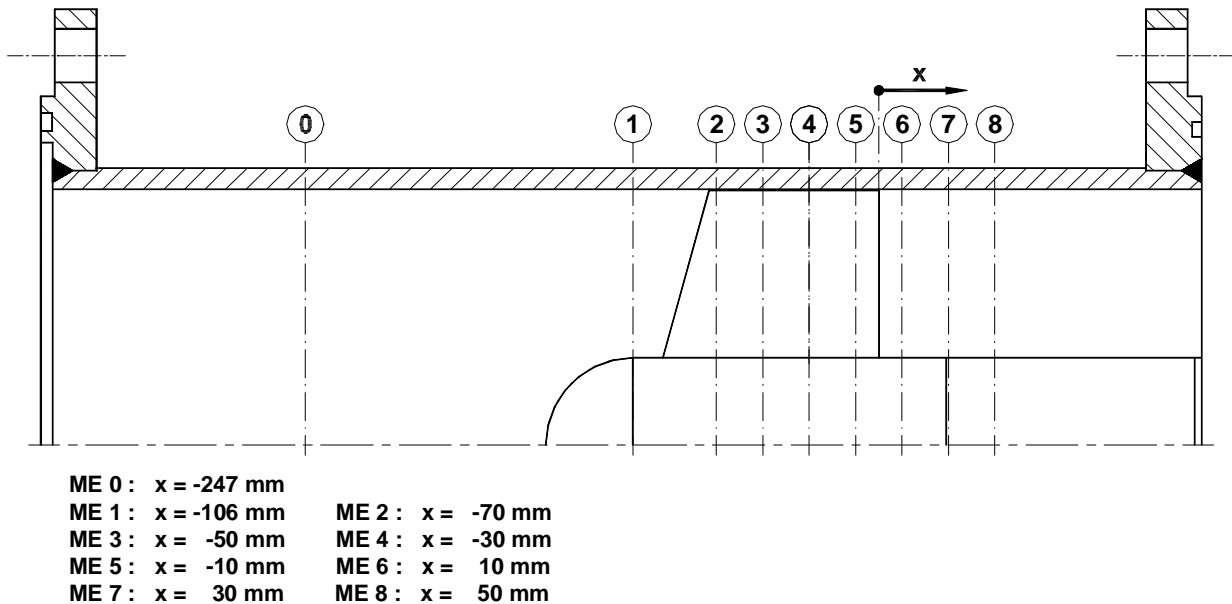


Bild 5.6: Messpositionen bei den tomographischen Messungen

Untersucht wurden drei verschiedene Beladungszustände bei je zwei anhand der Kennlinienmessungen ausgewählten Volumenströmen, wobei extreme Betriebszustände (schwankende Parameter, hohe Schwingungsbelastung der Pumpe) vermieden wurden. Das Messprogramm ist in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Beladung ε	Volumenstrom Q/Q_{opt}	
3%	1.1	1.3
6%	1.1	1.3
10%	1.4	1.5

Tab. 5.1 Messprogramm der tomographischen Messungen

Im Hinblick auf Quantifizierung der Phasenverteilung wäre zusätzlich zur Messung bei gasbeladener Strömung jeweils eine Messung bei vollständiger Wasser- bzw. Luftfüllung wünschenswert, die eine Interpolation des lokalen Gasgehaltes zwischen den beiden Extremwerten ermöglicht (vgl. Abschnitt 3.5). Die Konstruktion der Versuchspumpe lässt jedoch einen längeren Trockenlauf aufgrund des Vorhandenseins von flüssigkeitsgeschmierten Bauteilen (Gleitringdichtung, Lager) nicht zu. Die Messungen wurden deshalb

nur für Wasser- bzw. Gemischförderung ausgeführt. Bei der Auswertung wurde die fehlende Information durch die Vorgabe der mittleren Gasbeladung im Querschnitt ersetzt. Dabei bleibt die Änderung des Gasvolumenanteils durch den Druckanstieg in der Pumpe unberücksichtigt.

Die Messdauer betrug bei Auswertung von 5000 Rotationen der Pumpe ca. 7 min.

Die Vorversuche zeigten, dass beide Messungen (Wasser/Gemisch) unmittelbar aufeinanderfolgend, d.h. ohne Verschiebung des Tomographen erfolgen müssen. Das erwies sich als sehr nachteilig, da eine axiale Traversierung des Tomographen bei konstantem Betriebszustand der Versuchspumpe wesentlich einfacher und zeitökonomischer wäre. So musste nach jeder Messung erneut eine relativ aufwendige Betriebspunkteinstellung (Wasser- und Luftvolumenstrom) vorgenommen werden, was mindestens zu einer Verdopplung der Versuchszeit führte.

5.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen sind in den **Bildern 5.7 bis 5.9** zusammengefasst. Für jeden der drei Beladungszustände werden die in den Messebenen 2 bis 7 bei verschiedenen Volumenströmen vorliegenden zeitgemittelten Phasenverteilungen im Relativsystem gegenübergestellt.

3% / 6% Beladung

Die qualitative Phasenverteilung in den verschiedenen Messebenen ist für beide Beladungszustände ähnlich.

Kurz hinter der Eintrittskante konzentriert sich die Luft im wesentlichen an den Schaufeln. Während das beim kleineren untersuchten Volumenstrom ($Q/Q_{\text{opt}} = 1.1$) fast ausschließlich an der Saugseite erfolgt, ist bei $Q/Q_{\text{opt}} = 1.3$ auch an der Druckseite eine Gasansammlung vorhanden. In beiden Fällen sind kaum Konzentrationsunterschiede über der Kanalhöhe erkennbar.

Beim Durchströmen des Schaufelkanals ist eine mit dem Radius zunehmende Umfangserstreckung der Gebiete erhöhter Gaskonzentration zu erkennen. Dem überlagert sich eine Verschiebung des Gasanteils nach außen. Dieser Effekt nimmt mit dem Volumenstrom zu. Dem entsprechend liegt die lokale Gaskonzentration bei $Q/Q_{\text{opt}} = 1.3$ höher als bei $Q/Q_{\text{opt}} = 1.1$.

Kurz vor der Austrittskante ist – insbesondere beim größeren Volumenstrom - ein erneuter Anstieg der lokalen Gaskonzentration im Bereich Schaufelsaugseite / Außenwand zu verzeichnen. Nach dem Laufrad werden die Konzentrationsunterschiede in Umfangsrichtung schnell abgebaut.

Bild 5.7a:
 Gasverteilung im Inducer
 bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$,
 3% Beladung

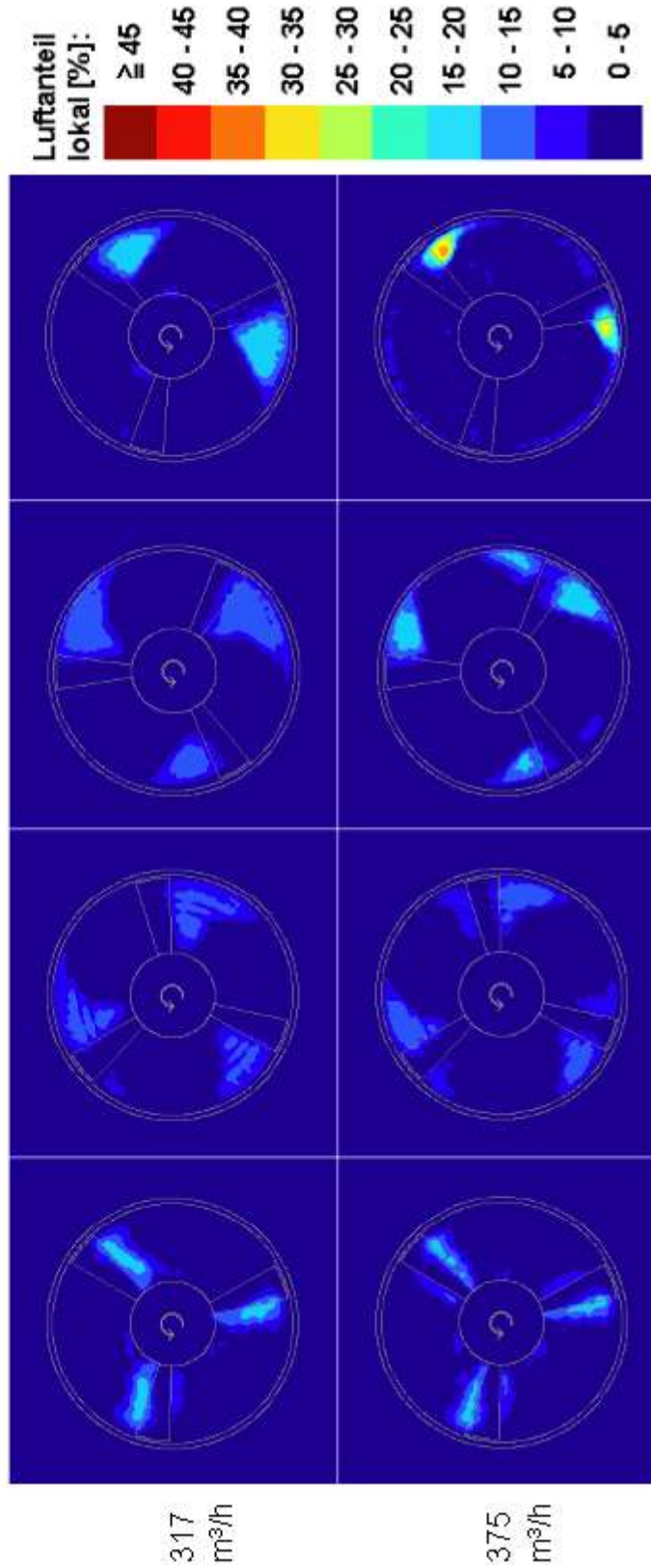
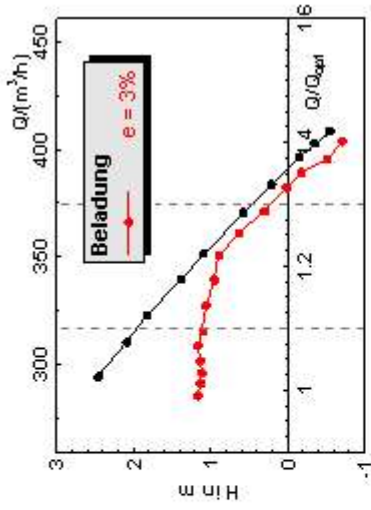
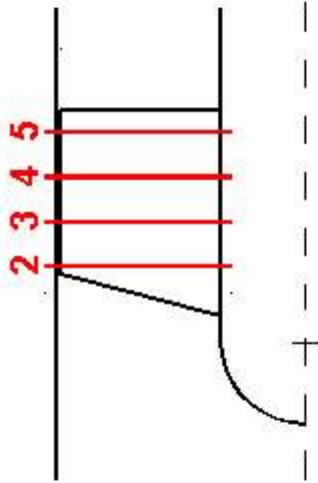
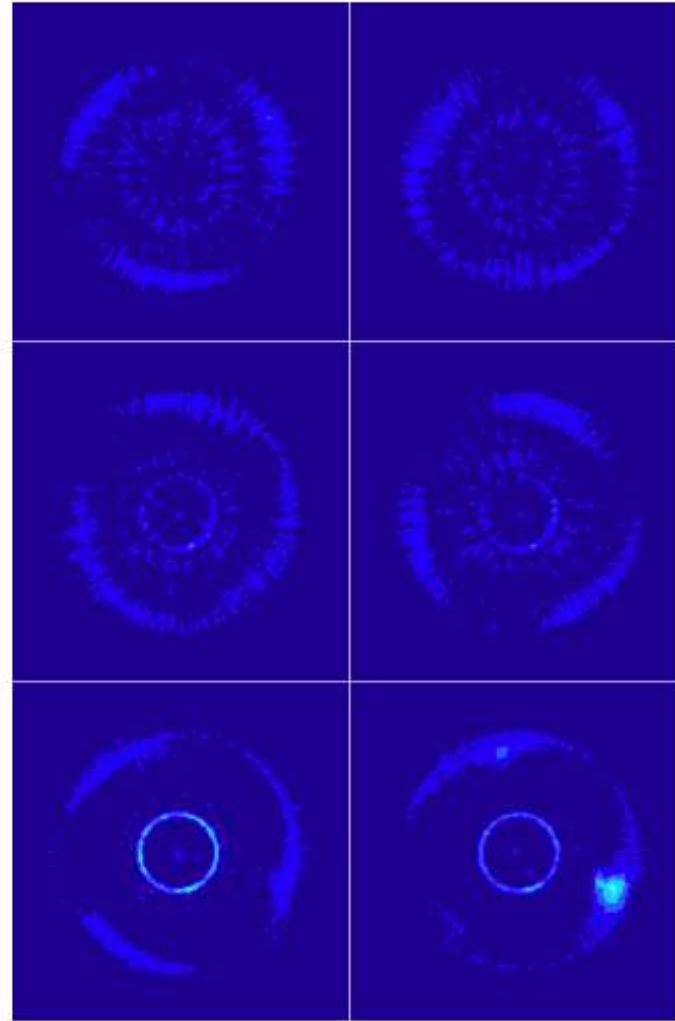
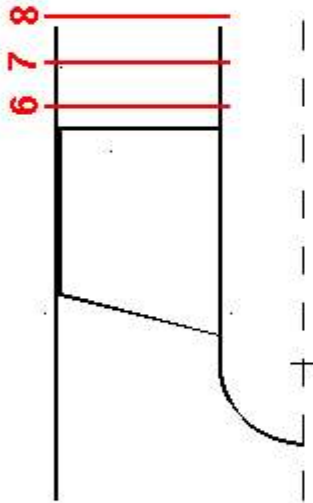
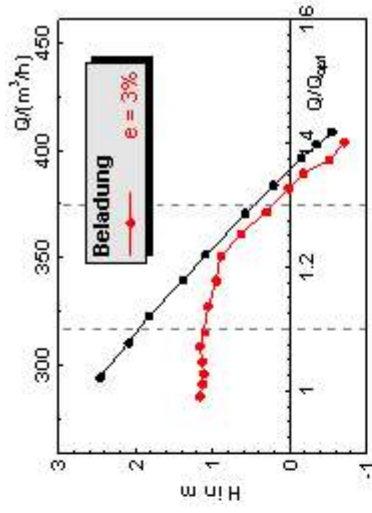


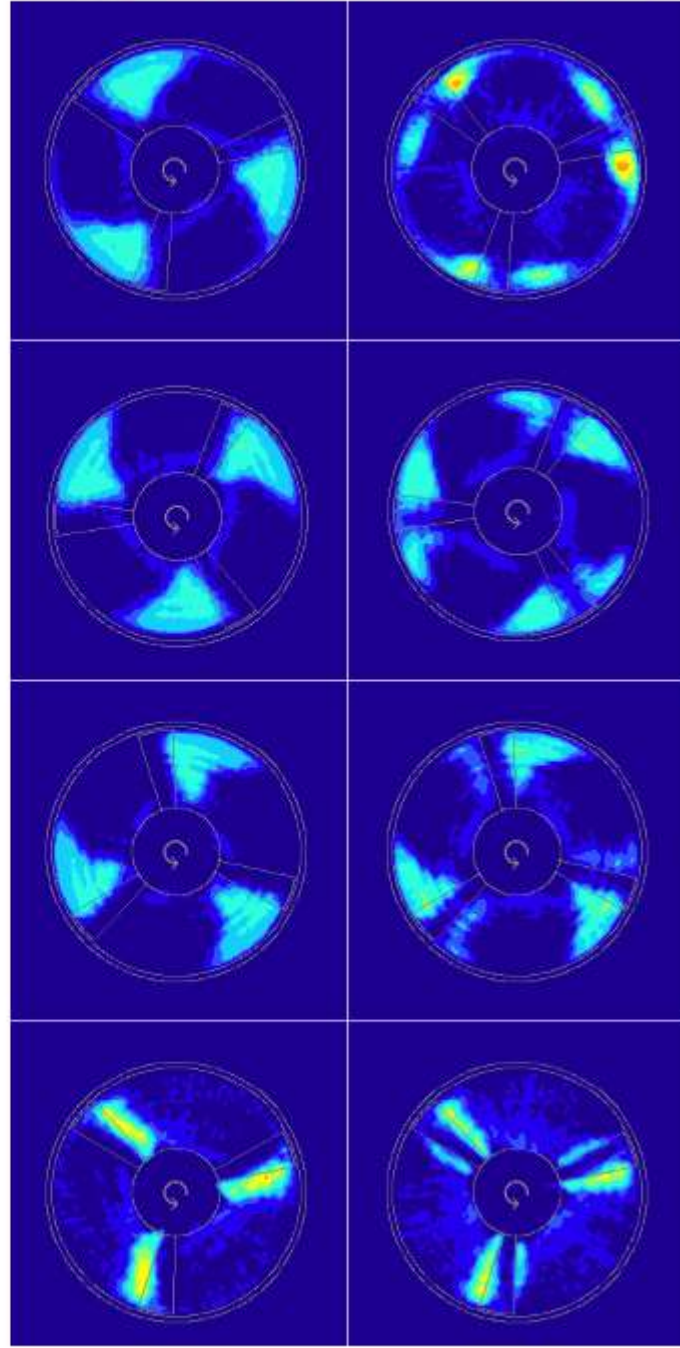
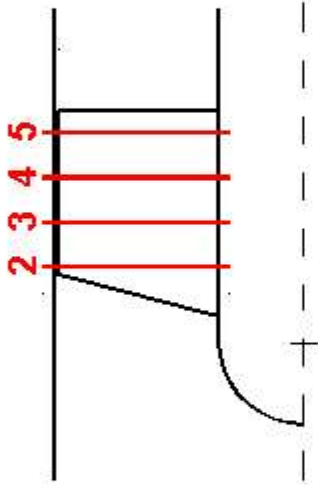
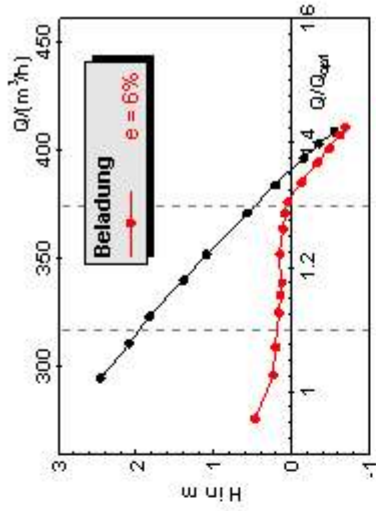
Bild 5.7b: Gasverteilung im Inducor bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, 3% Beladung



317 m^3/h

375 m^3/h

Bild 5.8a:
Gasverteilung im Inducer
bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$,
6% Beladung



317
 m^3/h

375
 m^3/h

Bild 5.8b:
Gasverteilung im Inducer
bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$,
6% Beladung

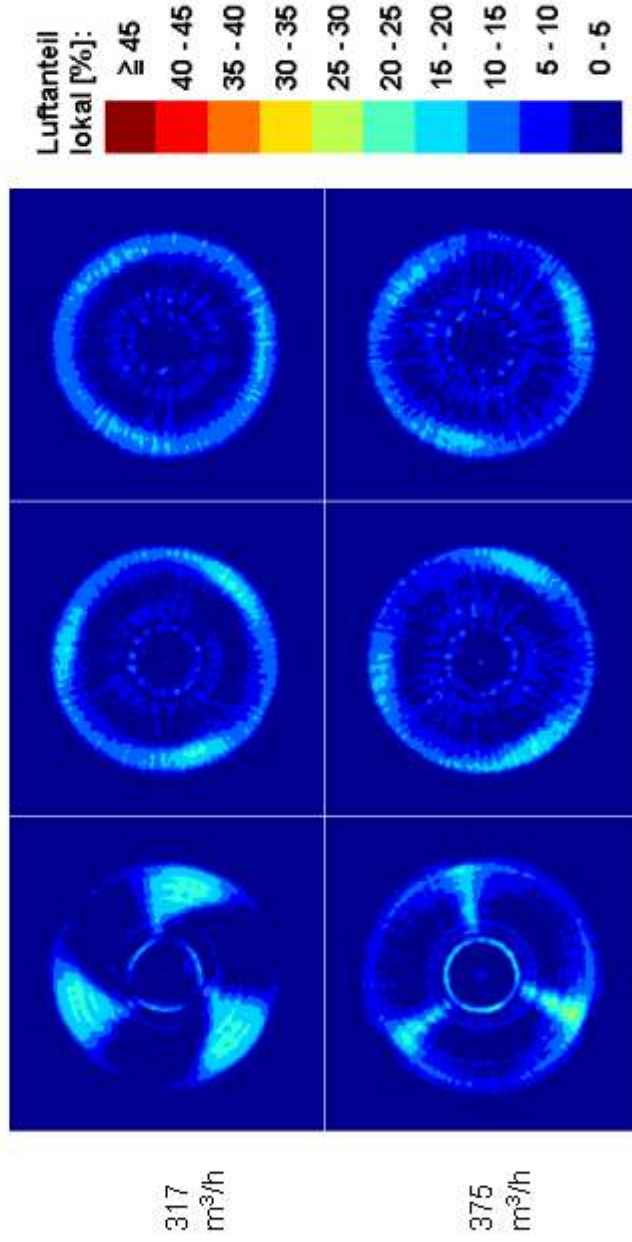
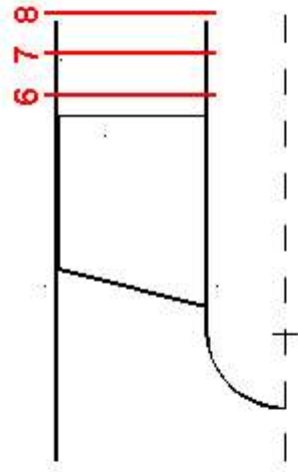
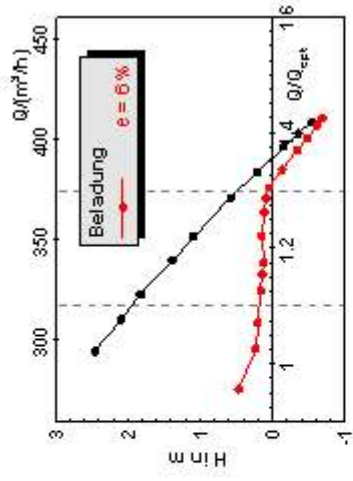


Bild 5.9a:
Gasverteilung im Inducer
bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$,
10% Beladung

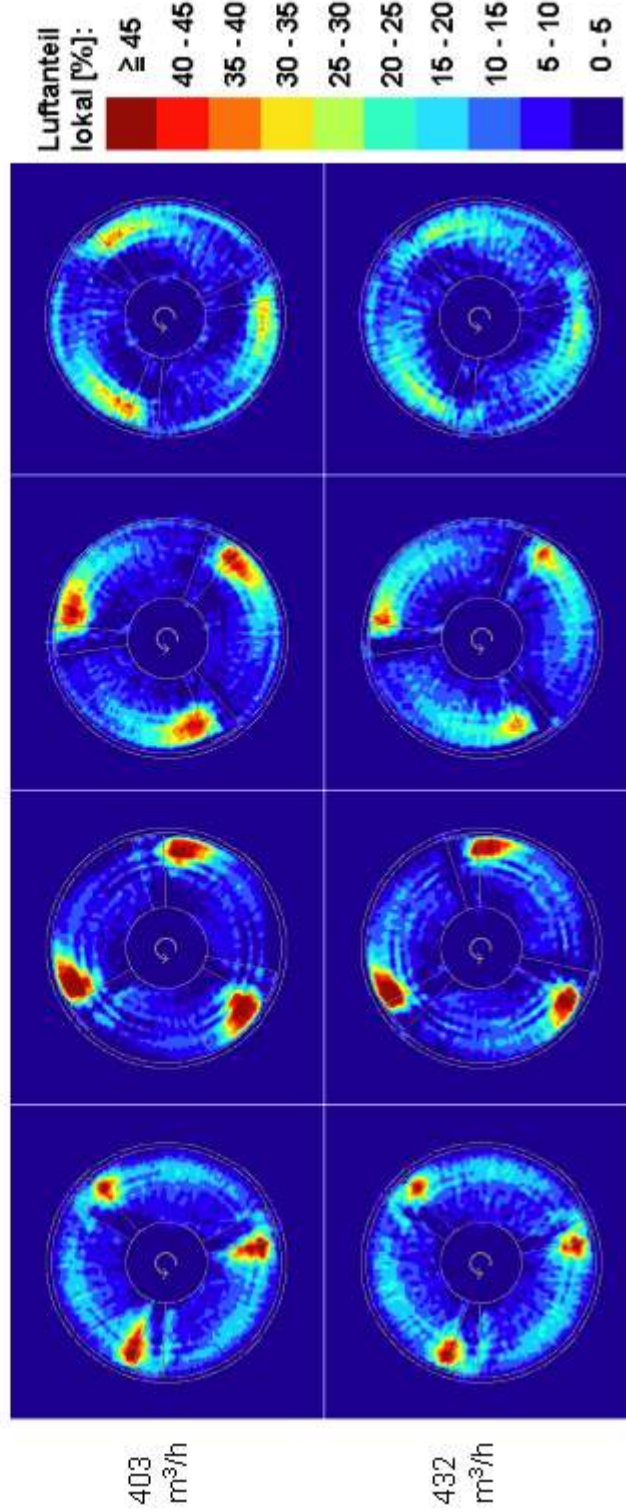
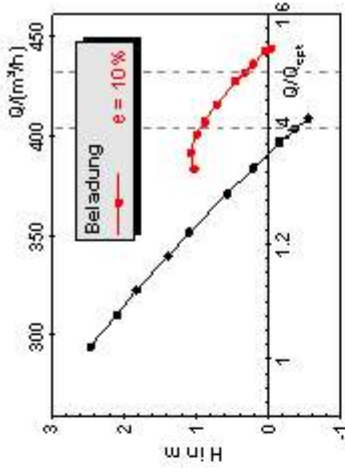
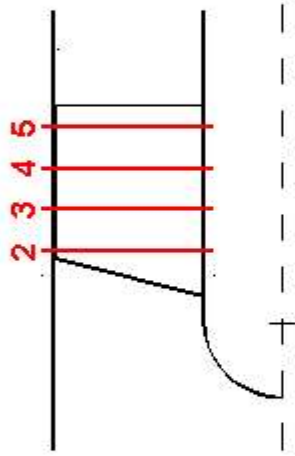
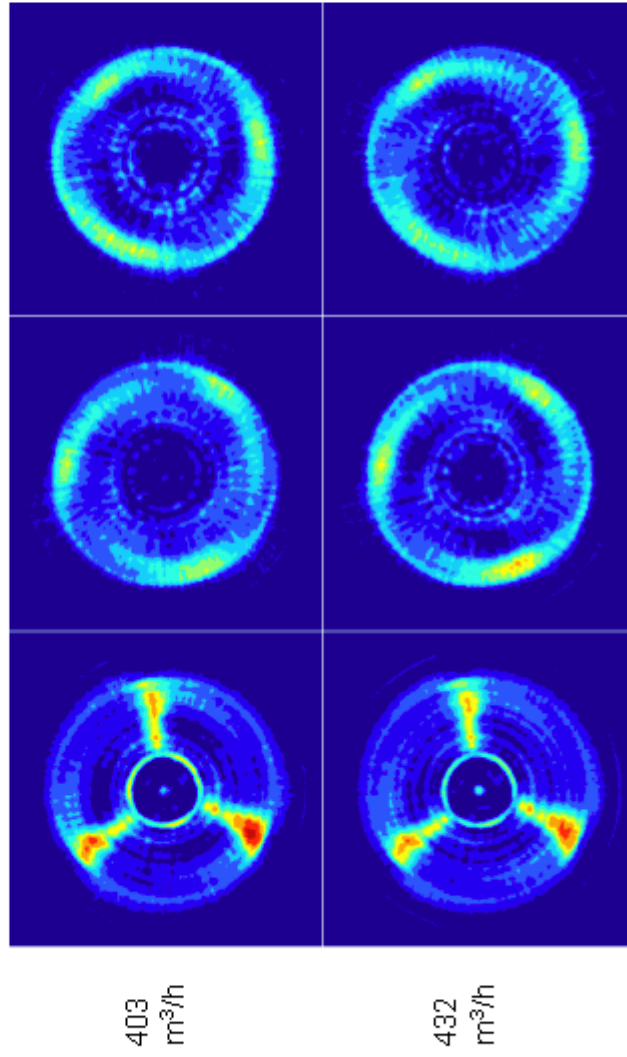
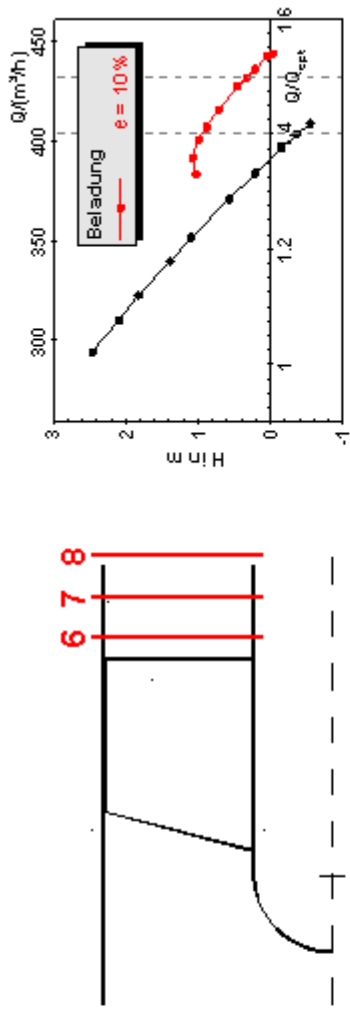


Bild 5.9b:
 Gasverteilung im Inducer
 bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$,
 10% Beladung



Die auffällige Abweichung der Gasverteilung in den einzelnen Schaufelkanälen bei 3% Beladung ist auf eine aus früheren Untersuchungen [42] bekannte, leichte Unsymmetrie des Laufrades zurückzuführen.

10% Beladung

Bei 10% Beladung wurden entsprechend der veränderten Kennlinie größere Volumenströme untersucht ($Q/Q_{\text{opt}} = 1.4 / 1.5$).

Die zwischen beiden Betriebspunkten zu verzeichnenden Unterschiede sind relativ gering. Die Gasphase ist bereits am Laufradeintritt auf die äußere Kanalhälfte konzentriert. Im vorderen Bereich des Laufrades sammelt sich die Luft zunehmend in der Ecke Saugseite / Außenwand (ME 2, ME 3), wobei der Gasgehalt örtlich über 45% liegt.

Im hinteren Bereich ist ein Auffächern der Gebiete erhöhter Gaskonzentration in Umfangsrichtung sichtbar (ME 4, ME 5). Die Gasphase ist in Umfangsrichtung gleichmäßiger verteilt. Eine nochmalige Erhöhung der lokalen Gaskonzentration analog zu den Resultaten bei geringerer Gasbeladung ist hier jedoch nicht erkennbar.

Nach dem Laufrad sammelt sich die Luft erst im Bereich der Nachlaufdelle (ME 6), bevor die Unterschiede in Umfangsrichtung abgebaut werden.

Die beschriebene räumliche Gasverteilung stellt eine mögliche Ursache für den unerwarteten Kennlinienverlauf dar. Die saugseitige Gasanlagerung im mittleren Schaufelbereich könnte wie eine zusätzliche Profilkrümmung wirken, was die Zunahme der Energieübertragung erklären würde.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Einschätzung des erreichten Standes

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein auf der Gamma-Tomographie beruhendes Messverfahren für die Phasenverteilung entwickelt und erprobt, das speziell für die Anwendung auf die Zweiphasenströmung in Turbomaschinen zugeschnitten ist.

Das Messverfahren wurde für die Untersuchung verschiedener Zweiphasenströmungen in einer speziellen Axialpumpe (axialer Vorsatzläufer mit schraubenflächenförmigen Schaufeln) eingesetzt. Dabei wurde die Zweiphasenströmung durch Lufteindüsung in Wasser erzeugt.

Die Messung des örtlichen Gasgehaltes erfolgte für drei Gaseintrittskonzentrationen und verschiedene Förderströme in bis zu 8 achsnormalen Querschnitten, in denen für die einzelnen Betriebszustände charakteristische Verteilungen zu erwarten waren.

Die vorliegenden Messergebnisse tragen zum Verständnis der beobachteten Kennlinienänderungen, die mit zunehmender Gasbeladung auftreten, bei. Außerdem sind die

Messergebnisse zum quantitativen Vergleich mit Rechenergebnissen für die Zweiphasenströmung geeignet, falls die rekonstruierten Objektbilder wenigstens zwei hinreichend große Gebiete mit bekannter Absorption aufweisen [41].

Praktisch wurde auch die Eignung des Verfahrens zur Bestimmung des örtlichen Dampfanteils bei kavitierender Strömung nachgewiesen, bislang allerdings nur qualitativ.

Aufgrund allgemeiner Überlegungen und der bisher vorliegenden Erprobungsergebnisse können weitere Einsatzbereiche des Messverfahrens erwartet werden:

- Für die Ermittlung von ruhenden Phasenverteilungen kann der Tomograph um die Drehachse des Untersuchungsobjektes schrittweise gedreht werden. Auf dieser Grundlage ist das Verfahren auch für radiale und diagonale Kreiselpumpen anwendbar.
- Ebenso ist das Verfahren zur Untersuchung von anderen rotierenden Maschinen mit flüssig/gasförmiger Zweiphasenströmung geeignet. Untersuchungsobjekte könnten z.B. auch Wasserturbinen, Strömungskupplungen und Flüssigkeitsringverdichter sein. Dabei ist auch das Auftreten von Phasengrenzen kein Anwendungshindernis.

Als prinzipieller Vorteil der differentiellen Tomographie ist deren Anwendbarkeit auf nicht präparierte Originalmaschinen anzusehen. Mit dem beschriebenen Tomographen können Objekte mit einem Durchmesser bis etwa 300 mm untersucht werden.

Außer gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen können auch Zweiphasenströmungen mit anderen Komponenten untersucht werden, z.B. die feststoffbeladene Flüssigkeit oder die flüssigkeits- bzw. feststoffbeladene Gasströmung.

6.2 Möglichkeiten zur Verbesserung des Verfahrens

Die erreichten Ergebnisse bestätigen die ursprüngliche Erwartung, Gasgehaltsverteilungen im Inneren der Pumpe mittels Gamma-Tomographie rekonstruieren zu können. Allerdings sind noch diverse Verbesserungen möglich:

- Die Anordnung von Kollimatoren vor den Detektoren würde den Streustrahlungs-Anteil verringern und damit letztlich die Bildschärfe erhöhen.
- Eine Verbesserung der Ankopplung der Photomultiplier an die Detektorkristalle kann eine Verbesserung der Energiediskriminierung der entstehenden elektrischen Impulse und damit eine Verringerung der registrierten Streustrahlung bewirken.
- Indem die vorliegende zeit-äquidistante Signalerfassung durch eine drehwinkel-äquidistante Signalerfassung ersetzt wird, kann das Sinogramm von gewissen Unschärfen befreit und somit ein detailreicheres Rekonstruktionsbild gewonnen werden.

- Der Einsatz einer speziellen Vorrichtung für die exakte quantitative Bestimmung der Gasverteilung (Patent in Vorbereitung) könnte den Informationsgehalt der Tomogramme weiter erhöhen.
- Eine zusätzliche Rotation des Tomographen im Vollkreis zur korrekten Rekonstruktion auch der nichtrotierenden Inhomogenitäten der Phasen-Verteilung, z.B. der sogenannten Schichtströmung könnte den Informationsgehalt der rekonstruierten Tomogramme ebenfalls erhöhen. Die Voraussetzung dafür ist eine entsprechend erweiterte Strahlengenehmigung.
- Eine Erhöhung (wenigstens Verdopplung) der Auflösung des Rekonstruktionsbildes könnte durch eine schrittweise Verdrehung des Tomographen in einem zweidimensionalen Raster, dessen Maschenweite deutlich kleiner als die Kantenlänge der aktiven Detektorfläche ist, erreicht werden. Die dazu notwendigen Auswerte-Algorithmen wurden bereits entwickelt und per Simulation erprobt.
- Die Automatisierung der Bewegung des Tomographen, insbesondere durch die Nachrüstung geeigneter Antriebe könnte den Aufwand für spezielle Messprogramme gemäß der beiden vorangehenden Punkte deutlich verringern.

7 Literaturverzeichnis

- [1] J. Raabe: Hydraulische Maschinen und Anlagen, VDI- Verlag, Düsseldorf 1989
- [2] C. Pfeleiderer: Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase. Springer Verlag, Berlin 1961
- [3] Technisches Handbuch Pumpen, Verlag Technik, Berlin 1975
- [4] P. Mensik: Wahl der Geometrie am radialen Laufrad von Spiralgehäusepumpen zur Erzielung guter Kavitationseigenschaften im Betriebsbereich. In: Pumpen- und Verdichterinformationen, 1978
- [5] R. Finzel: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Kavitation in radialen Kreiselpumpenlaufrädern. Dissertation TU Dresden, 1981
- [6] C. Vortmann: Thermodynamische Modellierung und Simulation von kavitierenden Düsenströmungen. Vortrag Darmstädter Kreis 2001
- [7] S. Wursthorn: Numerische Simulation von Kavitation in Kreiselpumpen. Vortrag Darmstädter Kreis 2001
- [8] G. Gneipel u.a.: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Gemischförderung fest/flüssig (AIF-Nr. B9831). Freiberg 1996
- [9] N. D. Suong, P. N. Tuong: Experimentelle Untersuchung über Bewegungsvorgänge von Feststoffpartikeln im Laufrad einer Radialkreiselpumpe. Bericht Bergakademie Freiberg, Institut für Fluidmechanik und Thermodynamik, Freiberg 1992
- [10] A. Braune, B. Hofmann, M. Rockstroh, G. Will: Experimental Study on a Particles-Water Two-Phase Flow inside of a Centrifugal Pump by means of an Ultrasonic Puls-Echo Method and Technique. In: Abstracts of the XIXth. Int. Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Kyoto 1996
- [11] Kecke u.a.: Untersuchungen zur Förderung von Flüssigkeit-gasgemischen mit Kreiselpumpen. Abschlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben 9831, Magdeburg 1996
- [12] G. Kosyna u.a.: Gemischförderung in Kreiselpumpen – Druckmessung von Zweiphasengemischen im rotierenden System. Schlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben 11735 N/1, Pfeleiderer-Institut für Strömungsmaschinen, TU Braunschweig, 1999
- [13] D.-H. Hellmann: Optimierung von Pumpen zur Anwendung bei Zweiphasenströmungen. In: Integrierter Umweltschutz, Transfer Verlag, Regensburg 1996
- [14] G. Kreuzfeld: Berechnung der Zweiphasenströmung in Kreiselpumpenbauteilen. Dissertation TU Dresden, 1999

- [15] G. Will, G. Kreuzfeld, R. Schilling, M. Frobenius: Entwicklung eines 3D Euler Codes zur numerischen Simulation der Gemischförderung in Kreiselpumpenlaufrädern. Abschlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben 11944 B, Dresden, München 2000
- [16] Section 2 of the PHOENICS Encyclopaedia article on multi-phase flow.
http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/enc_ipsa.htm
- [17] U. Hampel: Optische Tomographie. 3.Workshop „Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen, Rossendorf 14.10.99, Berichtsband FZR-281, 57-65
- [18] N. Reinecke, G. Petritsch, D. Schmitz, D. Mewes: Tomographische Meßverfahren – Visualisierung zweiphasiger Strömungsfelder. Chemie Ingenieur Technik 69 (1997), 1379 – 1394
- [19] C. Zippe: Möglichkeiten der Kernspinresonanztomografie bei der Messung an strömenden Zwei-Phasen-Gemischen, interner Bericht, FZ Rossendorf 1997
- [20] T. Hellmuth: Optische Tomographie in der Medizin. Technisches Messen 63 (1996) 6, 219
- [21] J. Radon: Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. Sächsische Akademie der Wissenschaften, Leipzig, Math-Nat. 69 (1917), 262 - 277
- [22] A. M. Cormack, G. N. Hounsfield: Microsoft Encarta Online Encyclopedia 2000, <http://encarta.msn.com>, Microsoft Corporation.
- [23] A. C. De Vuono, P. A. Schlosser, F. A. Kulacki, P. Munshi: Design of an Isotopic Scanner for Two-Phase-Flow Measurements, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-27, No.1, February 1980, 814 - 820
- [24] G. A. Johansen, T. Froystein, B. T. Hjertaker, O. Olsen: A dual sensor flow imaging tomographic system. Meas.Sci.Technol. 7 (1996), 297-307
- [25] T. Froystein: Flow Imaging by Gamma-ray Tomography: Data Processing and Reconstruction Techniques. in: Frontiers in Industrial Process Tomography II, 8.-12.4.97, Delft (NL), 185-187
- [26] S. B. Kumar, D. Moslemian, M. P. Dudukovic: A γ -ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems, Flow. Meas. Instr., Vol.6 (1995), No.1, 61-73
- [27] T. Grassler, K. E. Wirth: Computed Tomography in Mechanical Process Engineering. Poster zum International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, Berlin, 15.-17.3.1999

- [28] D. Schmitz, N. Reinecke, G. Petritsch, D. Mewes (1997): X-Ray Computed Tomography for Stationary Multiphase Flow in Random and Structured Packings. Frontiers in Industrial Process Tomography, Delft 9.-12.4.1997, proc. 303-308
- [29] H.-M. Prasser, J. Zschau: Anordnung zur messtechnischen Erfassung einer Projektion des Strahlabsorptionsvermögens eines periodisch veränderlichen Messobjekts. Erfindungsanmeldung Az. 101 17 569.8
- [30] D. Hoppe: Anordnung zur tomographischen Bildrekonstruktion. Erfindungsanmeldung Az. 101 21 998.9
- [31] K. Parnham: Recent progress in CdZnTe radiation detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A377 (1996) 487-491
- [32] R. Matz, M. Weidner: Charge collection efficiency and space charge formation in CdTe gamma and X-ray detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A406 (1998) 287-298
- [33] C. Bickel (eVProducts), persönliche Mitteilung, 2000
- [34] Halbleiter-Fotodioden für Szintillations-Detektoren, Design&Elektronik 18, August 1988, Verlag Markt&Technik
- [35] F. Tonetto, U. Abbondanno, M. Chiari, P. M. Milazzo, L. Travaglini: Optimizing performances of CsI(Tl) crystals with a photodiode readout. NIM A420 (1999), 181-188
- [36] G. Blamar, H. Dietl, J. Dobbins u.a.: Photodiode readout for scintillating crystals of BGO and NaI(Tl). NIM 203 (1982), 213-221
- [37] P. Kreutz, A. Kühmichel u.a.: Photodiode Readout and Pulse Shape Analysis of CsI(Tl) Scintillator Signals. NIM A260 (1987), 120-123
- [38] Scionix scintillation detectors. Firmenschrift, SCIONIX HOLLAND B.V., Bunnik, Niederlande, September 1998
- [39] H. Morneburg (Hrsg.): Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik. 3. erw. Aufl., Publicis MCD Verlag, München, 1995
- [40] A. C. Kak, M. Slaney: Principles of Computerised Tomographic Imaging. IEEE Press. New York, 1988
- [41] D. Hoppe: Methodische Grundlagen für die Tomographie durch gefilterte Rückprojektion an einer Axialpumpe. Forschungszentrum Rossendorf, FZR-306, Nov. 2000

- [42] G. Will, H. E. Siekmann, M. Christen, M. Dues, S. Kallweit: Experimentelle und theoretische Untersuchungen axialer Vorsatzläufer (Inducer) für radiale Kreiselpumpenlaufräder. Abschlußbericht zum DFG-Projekt KI 757/1-2, Si 251/13-2, Dresden, 1996
- [43] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau; A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows, Flow Measurement and Instrumentation 9 (1998) 111-119
- [44] K.Hori, T.Fujimoto, K.Kawanishi, H.Nishikawa; Advanced High Speed X-Ray CT Scanner for Measurement and Visualization of Multi-Phase-Flow, OECD/CSNI Specialist Meeting, Santa Barbara, California, 1997