

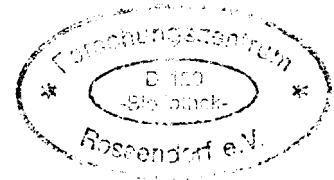
WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-334

Oktober 2001

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.



Gerhard Grunwald, Thomas Höhne und Horst-Michael Prasser

**Geschwindigkeitsmessungen im Downcomer
der ROCOM Versuchsanlage mittels Laser
Doppler Anemometrie im Vergleich mit
numerischen Berechnungen**

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

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

*Gerhard Grunwald und Thomas Höhne und
Horst-Michael Prasser*

**Geschwindigkeitsmessungen im Downcomer
der ROCOM Versuchsanlage mittels Laser
Doppler Anemometrie im Vergleich mit
numerischen Berechnungen**

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 150 1216 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Bericht Report

Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr./
Reactor Safety Research-project No.:

150 1216

Vorhabentitel: **Geschwindigkeitsmessungen im Downcomer der
ROCOM Versuchsanlage mittels Laser Doppler
Anemometrie im Vergleich mit numerischen Be-
rechnungen**

Project Title: **Laser-Doppler-Velocity Measurements in the
Downcomer of the ROCOM Test Facility in Com-
parison with Numerical Results**

Autoren / Author(s): **G. Grunwald, T. Höhne, H.-M. Prasser**

Dienststelle der Autoren /
Performing Organisation:

**Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Institut für Sicherheitsforschung**

Berichtsdatum / Publication Date: **Oktober 2001**

Berichts-Nr. / Report-No.: **FZR-334**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 150 1216 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Beschreibung der Anlage ROCOM und der eingesetzten Meßtechnik	3
2.1	Steuerung	6
2.2	Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	7
2.2.1	Die Systemphilosophie	7
2.2.2	LDA Polytec® LDE-300	8
2.2.3	Fiber Flow LDA	9
3	Numerische Strömungsberechnungen mit CFX-4	10
3.1	Modellannahmen, Geometrieaufbereitung und Gittergenerierung	10
3.2	Ermittlung der Druckverlustbeiwerte im RDB	12
3.3	Numerische Modellierung von Siebtonne und Stauplatte	13
4	Ergebnisse der strömungstechnischen Untersuchungen	14
4.1	Meßpositionen am Downcomer, Durchführung der Messungen	14
4.2	Voll- bzw. Teilschleifenbetrieb	15
4.2.1	Vergleich der mittleren Downcomergeschwindigkeiten	15
4.2.2	Vollschleifenbetrieb bei 50m ³ /h	15
4.2.3	Vollschleifenbetrieb mit Siebtonne bei 150m ³ /h	15
4.2.4	Vollschleifenbetrieb ohne Siebtonne bei 150m ³ /h	16
4.2.5	Vollschleifenbetrieb bei 185 m ³ /h	17
4.2.6	Vollschleifenbetrieb bei 250m ³ /h	17
4.2.7	Teilschleifenbetrieb (3 Schleifen) bei 185m ³ /h (Schleifen 1,2,3)	18
4.2.8	Teilschleifenbetrieb (2 Schleifen) bei 185m ³ /h (Schleifen 1,2)	18
4.2.9	Teilschleifenbetrieb (1 Schleife) bei 185m ³ /h (Schleife 1)	18
4.2.10	Teilschleifenbetrieb (2 Schleifen) bei 185m ³ /h (Schleifen 1,3)	18
4.2.11	Teilschleifenbetrieb (2 Schleifen) bei 185m ³ /h (Schleifen 1,4)	18
4.3	Untersuchung des Reynoldszahleinflusses der Strömung im Downcomer	19
4.4	Transiente Geschwindigkeitsmessungen	20
4.4.1	Rampenförmiges Anfahren einer Pumpe	20
4.4.2	Sprungförmiges Anfahren einer Pumpe	21
4.4.3	Vergleich von momentanen Geschwindigkeitsverteilungen bei rampen- und sprungförmigem Durchsatzverlauf	22
4.4.4	Vergleich der LDA-Messung mit den Meßwerten der induktiven Durchflußgeber	23
4.4.5	Bewertung der Zeitkonstante der abklingenden Wirbel der Sekundärströmung	23
5	Zusammenfassung	24
	Literatur	25

1 Einleitung

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens "Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren - Teil 2, Experimentelle Ausrüstung und Simulation der Vermischung", Förderkennzeichen 150 1216, wurden an der Versuchsanlage ROCOM [1-3] Experimente zur Untersuchung der Vermischung hypothetischer Kühlmittelpfropfen mit verringerter Borsäurekonzentration bei unterschiedlichen Schleifendurchsätzen und Schaltzuständen des Primärkreislaufs durchgeführt. Eine Reihe dieser Experimente wurden bei stationären und quasistationären Kühlmitteldurchsätzen realisiert, die Betriebsbedingungen im Kernkraftwerk nahekommen. Zusätzlich wurden noch Zustände der Kühlmittelzirkulation unter Störfallbedingungen untersucht, insbesondere das Anfahren der ersten Pumpe. Die Zustände wurden durch einen Betrieb der Umwälzpumpen bei entsprechend geregelter Drehzahl nachgebildet. Hauptaugenmerk bildeten Leitfähigkeitsmessungen als Grundlage zur Ermittlung der Vermischungsverteilungen an verschiedenen Positionen im RDB [4]. Durch die Verwendung von Plexiglas für das Modell waren jedoch auch Geschwindigkeitsmessungen im Downcomer mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie-Meßtechnik möglich.

Der vorliegende Bericht beschreibt Versuche, bei denen LDA-Messungen im Downcomer bei stationären und quasistationären Strömungsbedingungen, d.h. bei konstanten Schleifendurchsätzen, und bei einer transienten rampenförmigen Durchsatzveränderung in einer Schleife durchgeführt wurden.

2 Beschreibung der Anlage ROCOM und der eingesetzten Meßtechnik

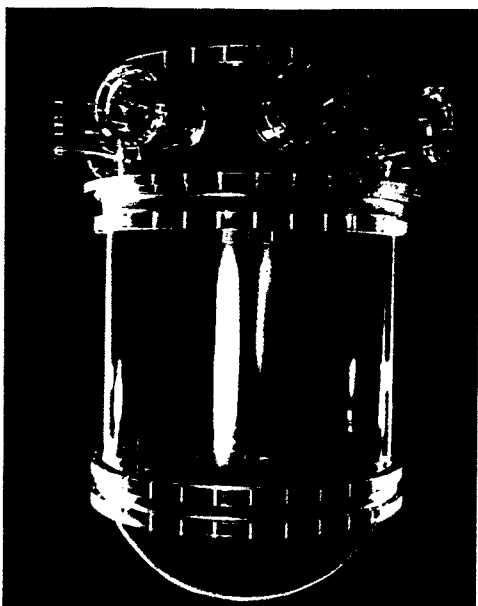


Bild 1 Plexiglas®-Modell des RDB

Ausgehend vom Stand der Technik und den durch die numerischen Strömungssimulationen im Rahmen von früheren Arbeiten [5] erhaltenen Erkenntnisse wurde der Bau einer neuen Versuchsanlage ROCOM (**R**ossendorf **C**oolant **M**ixing **M**odel) für notwendig erachtet. Diese Anlage wurde so ausgelegt, daß die in Tabelle 1 vorgestellte Versuchsmatrix durchführbar ist. Nachfolgend werden die Auslegungsgrundsätze vorgestellt, die aus dem Stand der Technik und den Ergebnissen theoretischer Arbeiten abgeleitet wurden.

Gegenüber den früheren Versuchsanlagen wurde ein Versuchsstand realisiert, der eine wesentlich größere Flexibilität hinsichtlich der Betriebsführung und eine neue Qualität der Instrumentierung aufweist. Er ist sowohl für quasistationäre als auch transiente Versuche geeignet. Die Anlage wurde für Wasser bei annähernd Umgebungstemperatur ausgelegt, um die Nachteile der luftbetriebenen Modelle auszuschließen, wie Kompressibilität des Strömungsmediums und

schlechte Realisierbarkeit von Massenstromtransienten. Außerdem bietet Wasser die Möglichkeit des Einsatzes von Tracerstoffen, die mit Leitfähigkeitsmeßverfahren nachgewiesen werden können, was eine hohe zeitliche Auflösung der Messung ermöglicht.

Tabelle 1 Versuchsmatrix

Gruppe	Gegenstand der Experimente	Bedeutung
A	Vermischung unter stationären Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • nominale Betriebszustände • Teilschleifenbetrieb
B	Vermischung unter quasi-stationären Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kaltwassertransienten bei laufenden HKP • Kaltwassertransienten unter Naturumlaufbedingungen
C	Anlauf der Kühlmittelzirkulation	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederanlaufen der Naturzirkulation in der Spätphase von Störfällen mit kleinen Lecks mit inhärenter Borverdünnung • Anfahren der ersten HKP nach externer Borverdünnung
D	Strömungstechnische Untersuchungen von Einbauten	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluß der Einbauten auf die Vermischung

Ausgehend von den Erfahrungen aus früheren Experimenten anderer Autoren und den Skalierungsüberlegungen wurde der Maßstab 1:5 als ausreichend betrachtet. Kernstück der Anlage ist das Reaktormodell, welches alle wichtigen Details der Strömungsführung im Bereich vom Reaktoreintritt bis zum Reaktorkern im gewählten Maßstab geometrisch ähnlich nachbildet. Hierzu zählen beim 1300 MW Siemens Konvoi-Reaktor:

- Die genauen Innenabmessungen des Reaktordruckbehälters,
- die Abmessungen des Kernbehälters,
- die Anordnung der Kühlmittlein- und Austrittsstutzen,
- die Krümmungsradien und die Durchmessererweiterung an der Verbindung Druckbehälter - Eintrittsstutzen,
- die konstruktionsbedingte Erweiterung des Ringspaltquerschnitts unterhalb der Stuzenebene bei genauer Nachbildung des entstehenden Diffusorwinkels,
- die Modellierung der Siebtone mit maßstäblicher Perforation im unteren Plenum
- die maßstäbliche Nachbildung des unteren Rostes mit den Öffnungen für das Kühlmittel,
- der Druckverlustbeiwert des Reaktorkerns, der durch entsprechende Blenden am Kerneintritt eingestellt werden kann.

Da die Hauptkühlmitteleitung beim Originalreaktor bereits kurz vor den Ein- bzw. nach den Austrittsstutzen Krümmer aufweisen, die einen Einfluß auf das Strömungsfeld im Reaktor haben können, ist es notwendig, zumindest die ersten Krümmer noch in die Modellierung einzubeziehen. Ein Querschnitt jenseits dieser Krümmer wird als Modellrand definiert.

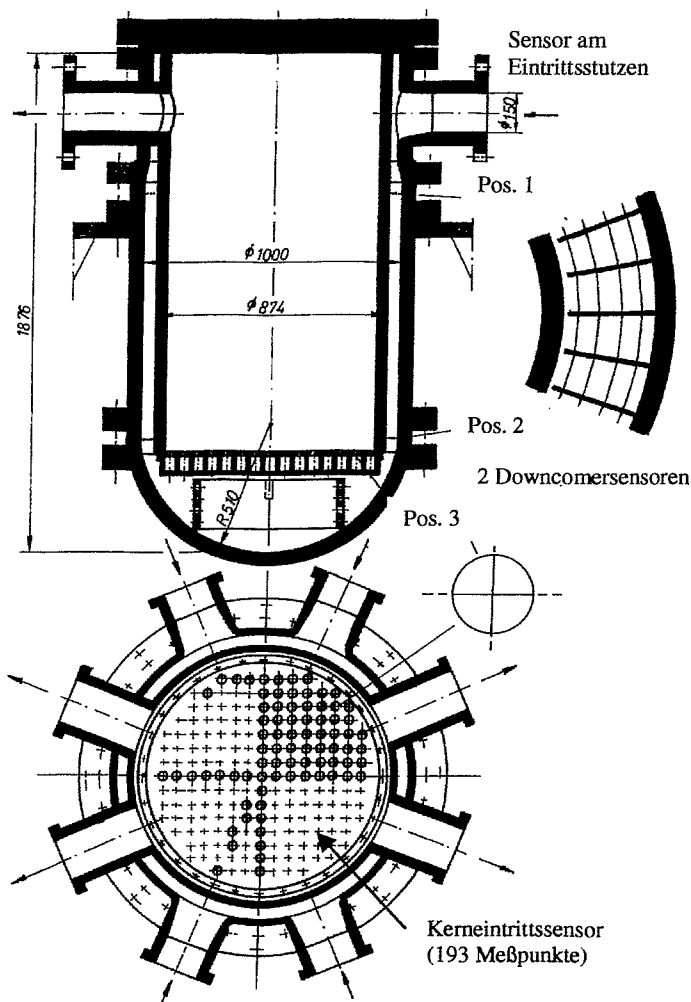


Bild 2 Schnittbild des Plexiglasmodells mit den Positionen der Gittersensoren

Zur Nachbildung der verschiedenen Szenarien aus der Versuchsmatrix (Tabelle 1) werden am Modellrand die Strömungsgeschwindigkeiten sowie die Qualität des Kühlmittels als zeitabhängige Randbedingungen vorgegeben. Temperatur- bzw. Borsäurekonzentrationsunterschiede werden durch Zugabe einer die elektrische Leitfähigkeit beeinflussenden Tracerlösung (NaCl-Lösung) simuliert. Die Vorgabe von zeitabhängigen Strömungsgeschwindigkeiten als Randbedingung erfordert eine Anlage mit vier Schleifen und separat steuerbaren Massenströmen. Eine präzise und verzögerungsarme Durchflußsteuerung wird durch den Einsatz einer Pumpendrehzahlregelung über Frequenzumrichter erreicht. Jenseits des Modellrands wurde auf eine geometrisch ähnliche Nachbildung der Schleifen verzichtet, was den Aufwand erheblich reduziert. Es wird jedoch Wert auf die Einhaltung der originalen Umlaufzeit des Kühlmittels gelegt, was bei einem Maßstab von 1:5 auf eine um den Faktor 5 reduzierte Kühlmittelgeschwindigkeit führt.

Durch Verwendung eines transparenten Reaktormodells aus Plexiglas (Bild 1 und 2) wird eine visuelle Beobachtung der Vermischungsvorgänge durch Farbdosierung möglich. Dies erlaubt weiterhin den Einsatz eines Laser-Doppler-Anemometers zur Geschwindigkeitsmessung.

2.2 Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)

2.2.1 Die Systemphilosophie

Ein Laser-Doppler-Velocitymeter (LDV) ist ein optisches Instrument, welches in einem strömenden Fluid örtliche Geschwindigkeitsmessungen erlaubt. Ein LDV benutzt die Interferenzmuster, die durch das Kreuzen von zwei Laserstrahlen erzeugt werden, um die Bewegung eines Partikels zu charakterisieren. Wenn das Partikel im

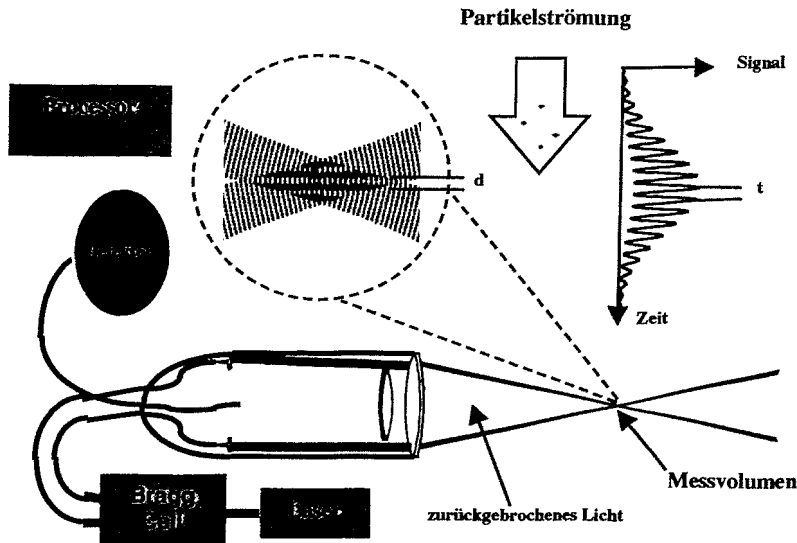


Bild 4 Meßprinzip eines LDA

Fluid den Meßort passiert, reflektiert es ein oszillierendes Lichtsignal, dessen Frequenz abhängig ist von der Geschwindigkeit des Partikels (Bild 4). Das Interferenzmuster, welches im Meßvolumen erzeugt wurde, ist stationär und die Frequenz des Dopplereffekts, welcher durch ein Partikel hervorgerufen wird, das sich durch das Meßvolumen bewegt, ist direkt proportional zu der jeweiligen Partikelgeschwindigkeitskomponente.

Unter Zuhilfenahme von kleinen Partikeln wird über einer bestimmten Meßzeit oder mit vorgegebener gemessener Partikelanzahl in einem Meßvolumen die Hauptgeschwindigkeit der Strömung in einer Richtung ermittelt und die dazugehörige Standardabweichung ausgegeben, die ein Maß für die Stabilität bzw. den stationären Zustand der Strömung im Bereich des Meßvolumens ist.

Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mit zwei Lasersystemen durchgeführt, dem Laser Polytec LDE-300 (Bild

Hauptgeschwindigkeit / (m/s)

$$\bar{V}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n V_{1i}}{n}$$

V_{1i} Geschwindigkeit Teilchen i Kanal 1
n Anzahl der Teilchen

Standardabweichung RMS / (m/s)

$$\bar{V}_{1,RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{1i} - \bar{V}_1)^2}{n-1}}$$

5) und dem Fiber Flow Laser System von Dantec (Bild 6). Der Fiber Flow Laser besitzt eine höhere Laserleistung als der Polytec Laser. Dies erleichtert die Durchführung von Messungen bei transienten Strömungszuständen, da die höhere Lichtleistung die Grenze der nutzbaren Tracerpartikel zu kleineren Partikelgrößen hin verschiebt und damit mehr Bursts pro Zeiteinheit registriert werden. Beim Einsatz des stärkeren Lasers waren in vielen Fällen die im Wasser ohnehin vorhandenen Partikel für die Messungen ausreichend, wogegen beim Halbleiterlaser von Polytec auch bei stationären Messungen Tracerkügelchen aus Glas zugegeben werden mussten.

2.2.2 LDA Polytec® LDE-300



Bild 5 LDA-Geschwindigkeitsmessungen im Downcomer des Vermischungsmodells

Mit dem Laser-Doppler-Anemometer LDV 380 [6] können für stationäre Verhältnisse an besonders interessanten Positionen im Plexiglasmodell Geschwindigkeiten des strömenden Fluids und deren Schwankungen gemessen werden. Mit diesem Laser wurden stationäre Geschwindigkeitsfelder bei 150 und 250 m³/h Schleifendurchsatz gemessen. Hierbei wurden die Einflüsse der Einbauten wie Bestrahlungsrohre, Siebtonne und der hydraulische Widerstand des unteren Rostes untersucht. Dieser Laser befindet sich mit der Optik in einem Gehäuse.

2.2.3 Fiber Flow LDA

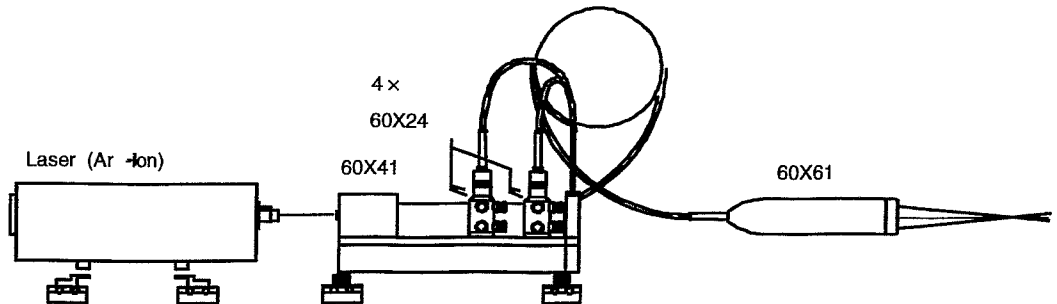
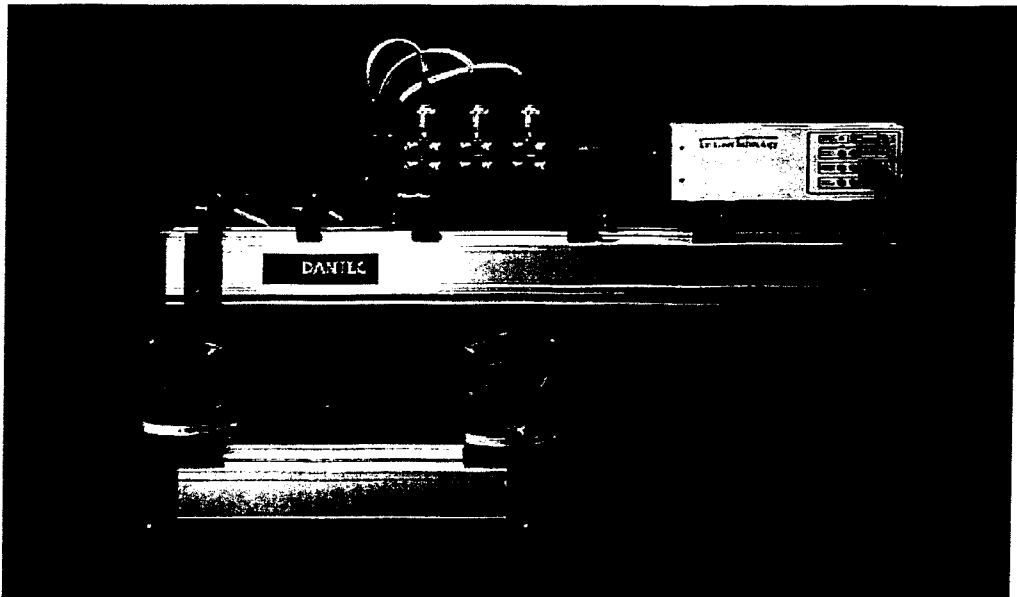


Bild 6 Fiber Flow System der Firma Dantec

Mit dem Laser-Doppler-Anemometer Fiber Flow [7] können stationäre und transiente Geschwindigkeitsverhältnisse gemessen werden. Das Fiber Flow System setzt sich aus einem wassergekühlten Argonionenlaser, einem Transmitter und vier Manipulatoren zusammen (Bild 6). An den Manipulatoren ist der Meßkopf mit Lichtleiterkabeln angeschlossen. Der Transmitter teilt den Laserstrahl in einen direkten und einen frequenzmodulierten Anteil auf. Jeder Strahl unterteilt sich in drei Farbbereiche:

grün $\lambda = 514,5 \text{ nm}$
blau $\lambda = 488 \text{ nm}$
violett $\lambda = 476,5 \text{ nm}$

Bei der Geschwindigkeitmessung am Ringspaltende wurde der Farbbereich grün mit 514,5 nm gewählt (Tabelle 2). Die Manipulatoren zentrieren den Laserstrahl, um ein Maximum an Leistung durch das Lichtleiterkabel zum Meßkopf weiterzuleiten. Für jeden Ausgangsstrahl des Transmitters benötigt man einen Manipulator. Die

Meßsonde besitzt vier Eingänge zur Kopplung mit den Manipulatoren. Der Kopf ist wasserdicht und besitzt mehrere Frontlinsen. Das vom Beugungsmuster reflektierte Laserlicht wird von einem Empfangslichtleiterkabel aufgenommen und zur Datenerfassungseinheit gesandt.

Tabelle 2 Technischen Daten der verwendeten Laser im Überblick

	Polytec® LDE-300	Fiber Flow®
Wellenlänge	830 ± 20 nm	514
Leistung	20 - 40 mW	1.5 W
Brennweite (Frontlinse)	160 mm	160 mm

3 Numerische Strömungsberechnungen mit CFX-4

3.1 Modellannahmen, Geometriaufbereitung und Gittergenerierung

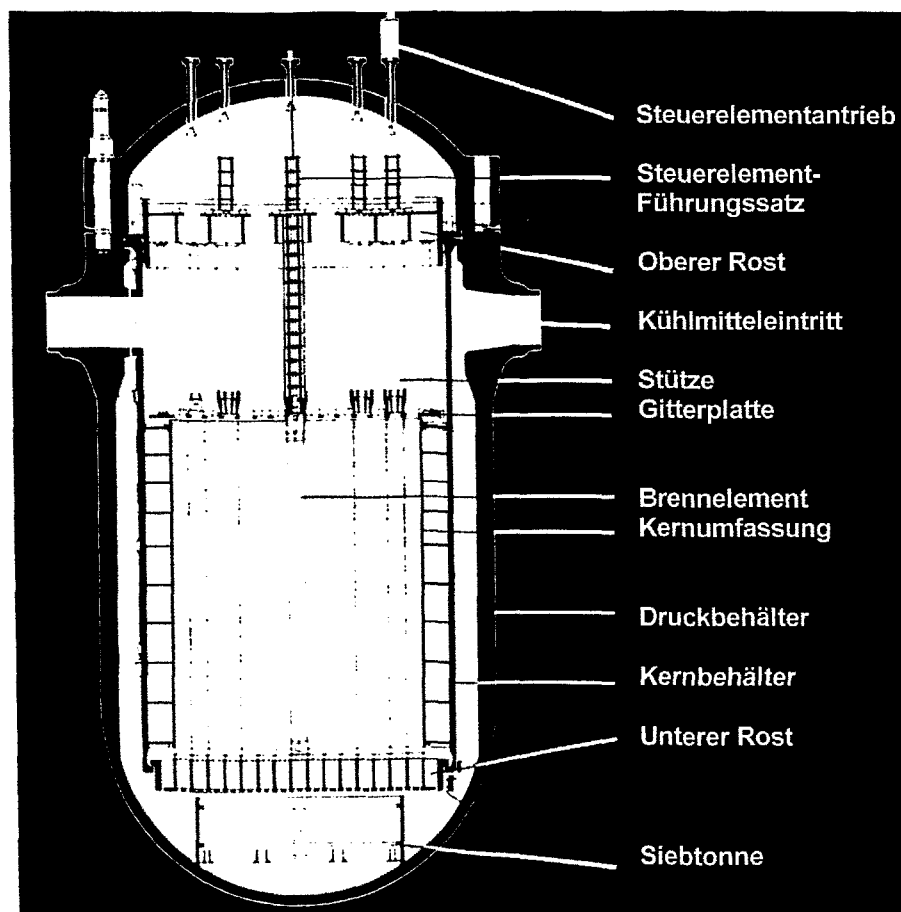


Bild 7 Schnitt durch den Original-RDB des DWR Konvoi

Für das Kühlmittel des Druckwasserreaktors Konvoi wurde ein inkompressibles, einphasiges Fluid zugrunde gelegt. Die Turbulenzmodellierung der Strömung erfolgte unter Zuhilfenahme des Standard (k, ε) Turbulenzmodelles. Die Eintrittsrandbedingungen (Geschwindigkeit, Temperatur, Borkonzentration) wurden an den Eintrittsstutzen definiert. Es wurden für die Beschreibung der Borkonzentration in CFX die Möglichkeit der Beschreibung von Konzentrationen mittels Skalarfelder benutzt. Der Original-RDB des DWR Konvoi ist in Bild 7 dargestellt. Für diesen Reaktortyp wurden zwei Gittermodelle erstellt (Bild 8). Bei beiden Modellen ist die Stutzenzone mit den Krümmungen an den jeweiligen vier Eintrittsstutzen, die Aussparungen der Austrittsstutzen und die diffusorartige Downcomerweiterung modelliert. In diesem Bereich wurde das Netz stark verfeinert, weil gerade dieses Strömungsgebiet entscheidend die Vermischung im Ringspalt beeinflusst. Bild 8 zeigt die Unterschiede zwischen den beiden Modelltypen: Im einfacheren Gittermodell wurde auf eine Darstellung der Siebtonne verzichtet, dafür aber der Kern als poröser Körper abgebildet; im komplizierteren Gittermodell erkennt man in Bild 9 die modellierte Siebtonne und den unteren Rost (Modellierung im Kapitel 3.2). Der Kern wurde hier nur zur Hälfte vernetzt dargestellt, da sonst die rechentechnischen Limits überschritten werden. Auch wurde in schon vorangegangenen Untersuchungen festgestellt, daß die Modellierung des kompletten Kerns keinen wesentlichen Einfluß auf das Strömungsfeld und damit die Vermischung am unteren Rost hat. Die unterschiedliche Anzahl der Gitterpunkte ist für beide Modelle in Tabelle 3 ersichtlich.

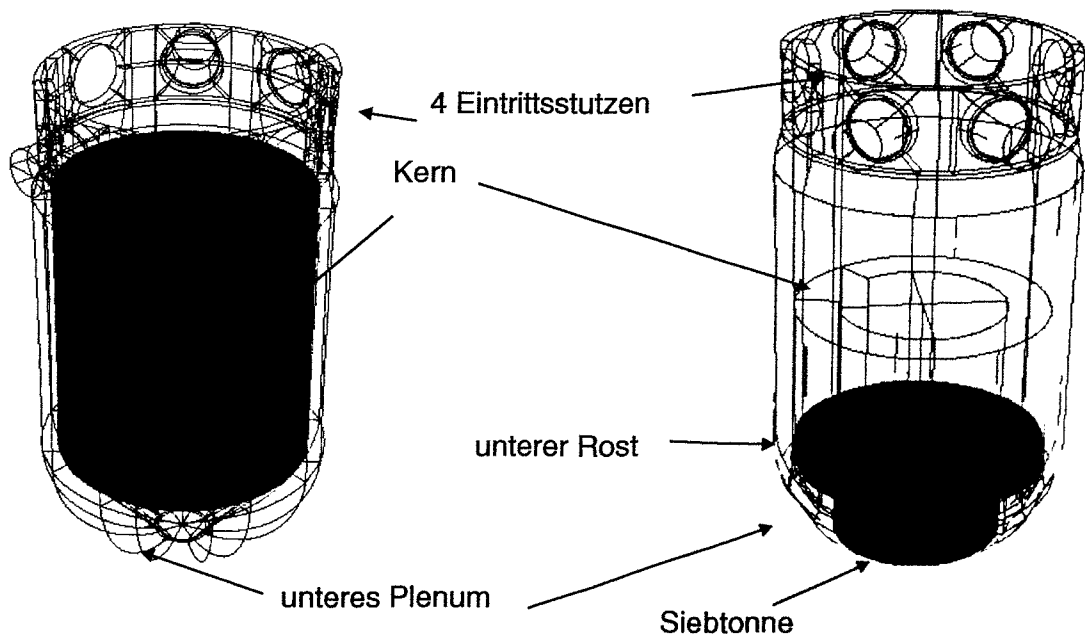


Bild 8 Vergleich der verwendeten numerischen Gittermodelle des DWR Konvoi

Tabelle 3 Vernetzungsdaten

	Blöcke	Patches	Gitterpunkte
DWR Konvoi (ohne Siebtonne)	166	685	109194
DWR Konvoi (mit Siebtonne)	464	2488	351264

3.2 Ermittlung der Druckverlustbeiwerte im RDB

Die Bestimmung des Druckverlustbeiwertes im RDB des Versuchsmodells ist für die Modellierung der durchströmten Einbauten notwendig. Beim DWR Konvoi ist die sogenannte Siebtonne ein wichtiges Element zur Strömungsberuhigung im unteren Plenum. Die Stauplatte bildet den Eintritt in den unteren Rost. Zur Ermittlung von relevanten Druckverlusten im RDB bei der späteren numerischen Modellierung wurden diese zwei Objekte und der Kern mit unterem Rost, Brennelementen und oberer Gitterplatte berücksichtigt.

Für einen Wasserdurchsatz von 185 m³/h in jeder Schleife der Versuchsanlage ROCOM wurde ein Druckverlust $\Delta p_K = 11200 \pm 1040 \text{ Pa}$ vom Eintritt unterer Rost bis zum Brennelementeaustritt rechnerisch ermittelt. Dieser Wert korrespondiert mit dem realen Druckverlust im Konvoi-Reaktor, d.h., die zugehörigen Verlustbeiwerte sind etwa gleich.

Bezogen auf die mittleren Fluidgeschwindigkeiten $c = 3.39 \text{ m/s}$ in den 193 Blenden je 20 mm Durchmesser am Brennelementen-Eintritt und mit $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ beträgt der zugehörige Verlustbeiwert

$$\zeta_E = \frac{\Delta p_K}{\frac{\rho}{2} c^2} \quad (1)$$

$$\zeta_E = 1.95 \pm 0.18.$$

Mit dem Geschwindigkeitsfaktor R_F , welcher in die CFX-Eingabefiles zur Modellierung der Druckverluste einfließt, ergibt sich dann mit der Durchströmfläche $A_E = 0.061 \text{ m}^2$ und dem zugehörigen Volumen $V_{St} = 0.049 \text{ m}^3$ entsprechend der (Modell-) Kernhöhe $h_K = 0.8 \text{ m}$ der Wert

$$R_F = \zeta_E \frac{A}{V} \cdot \frac{\rho}{2} \quad (2)$$

$$R_F = 1214 \pm 112 \frac{kg}{m^4}.$$

Mit der experimentell ermittelten Beziehung von Cornell [8] für Druckverlustbeiwerte wird mit einer Volumenporosität des unteren Rostes von ca. $\beta=0.15$

$$\zeta_C = 28$$

errechnet.

Es ergibt sich damit ein Geschwindigkeitsfaktor R_F von

$$R_{F,C} = 17240 \frac{kg}{m^4}.$$

Solange die Werte für R_F im Bereich $(1..20) \cdot 10^3$ liegen, liefert die numerische Simulation praktisch gleiche Vermischungsergebnisse. Andererseits bringen sehr hohe Werte für R_F im Bereich $>10^6$ Konvergenzprobleme in numerischen Simulationen mit sich und sollten in den CFD-Rechnungen vermieden werden.

3.3 Numerische Modellierung von Siebtonne und Stauplatte

Im DWR Konvoi existiert im Gegensatz zu den Vorkonvoi-Anlagen im unteren Plenum eine Siebtonne, die zur effektiven Strömungsberuhigung eingebaut wurde (Bild 9). Dadurch verkompliziert sich eine Gittergenerierung gerade in diesem für die Ausbildung der Vermischung am Kerneintritt so wichtigen Gebiet.

Es wurde ein Gittermodell geschaffen, welches diese Siebtonne und den unteren Rost des RDB sowohl im Original als auch in der 1:5 skalierten Versuchsanlage geometrisch nachbildet. Hierbei wurde auf eine Darstellung der Perforierungen aus rechentechnischen Gründen verzichtet und das Modell des porösen Körpers adaptiert. Im Fall des unteren Rostes konnten Daten aus Konstruktionsunterlagen von Siemens KWU verwendet werden.

Für die Stauplatte am Kerneintritt beträgt die Porosität $\beta = 0.229$. Im Fall des 1:5 skalierten Modells wurde der Strömungswiderstand ζ_{St} überschlägig bestimmt und in den Geschwindigkeitsfaktor $R_{F,St}$ umgerechnet. Hierbei war es wiederum wichtig, diesen Strömungswiderstand nur vertikal in der als poröses Medium modellierten Platte anzusetzen. Der Strömungswiderstand horizontal in den Platten wurde dagegen als maximal definiert. Für den Originalreaktor lagen Berechnungen von Siemens KWU bzw. Näherungslösungen zu auftretenden Strömungswiderständen vor und wurden in das CFD-Modell eingebaut.

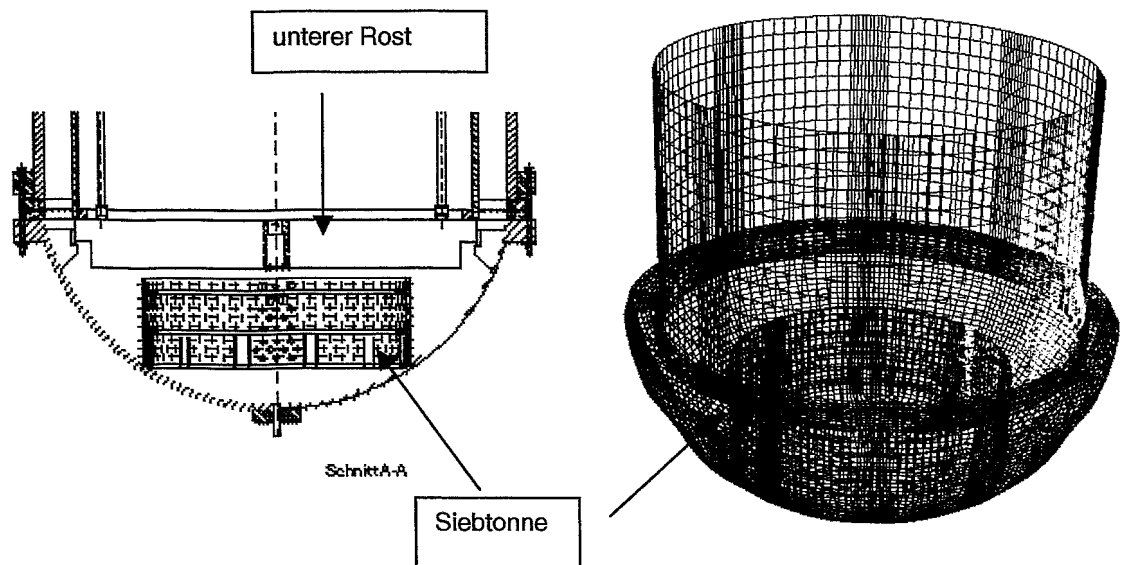


Bild 9 Siebtonne im unteren Plenum des RDB und als poröser Körper im Gittermodell

Für die Siebtonne wurde eine Porosität von $\beta = 0.208$ ermittelt. Der Strömungswiderstand wurde für jeden einzelnen Gitterpunkt der Siebtonne bestimmt. Dieser ortsabhängige Strömungswiderstand hat eine definierte Größe in Richtung Rotationsachse des RDB. Gleichzeitig existiert ein infiniter Strömungswiderstand senkrecht zur Rotationsachse und in vertikaler Richtung. Der Druckabfall über der gesamten Siebtonne wird als konstant angesehen.

4 Ergebnisse der strömungstechnischen Untersuchungen

4.1 Meßpositionen am Downcomer, Durchführung der Messungen

In Abb. 1 im Anhang sind die Schleifenpositionen in Umfangsrichtung am Plexiglasmodell ROCOM im horizontalen Schnitt durch die Stutzebene dargestellt. In den Abbildungen 3-13 ist der Downcomerbereich in Umfangsrichtung abgewickelt dargestellt und entspricht den in Abb. 1 eingetragenen Winkelpositionen. Demnach befinden sich die Eintrittsstutzen in den Positionen Schleife 1: 22.5° , Schleife 2: 337.5° , Schleife 3: 202.5° und Schleife 4: 157.5° . Die Meßebene zur Bestimmung der Downcomergeschwindigkeitsprofile mittels LDA-Meßtechnik befand sich bei der Messung in Umfangsrichtung 1045 mm unterhalb der Stutzebene des RDB am Downcomerende. Es wurde jeweils die horizontale und im Anschluß die vertikale Geschwindigkeitskomponente in der Mitte des Downcomers gemessen. Insgesamt über 1000 Bursts wurden bei beiden Lasertypen für eine Winkelposition aufgenommen. Dies war bei niedrigen Durchsätzen und Stagnationsgebieten nur mit Zuhilfenahme von Tracerpartikeln im strömenden Medium möglich. Gemessen wurde im Uhrzeigersinn, wobei bei den LDA-Messungen im stationären Geschwindigkeitsfeld angenommen wurde, daß sich das Geschwindigkeitsprofil an einzelnen Positionen nicht wesentlich ändert.

Die Ergebnisse aus den CFX-4 Rechnungen wurden ebenfalls aus der Ebene extrahiert, die der Meßebebene des LDA entspricht. In radialer Richtung wurde eine Gitterposition in der Mitte des Downcomers für den Vergleich ausgewählt. Die CFX-4 Daten sind in den Diagrammen im Anhang in Ergänzung zu den LDA Geschwindigkeitsplots ersichtlich.

4.2 Voll- bzw. Teilschleifenbetrieb

4.2.1 Vergleich der mittleren Downcomergeschwindigkeiten

Durch einen Vergleich der mittleren Downcomergeschwindigkeiten (Abb. 2) kann man die Genauigkeit der Lasermessungen bzw. der CFX-Rechnungen beurteilen. Die berechneten mittleren Downcomergeschwindigkeiten resultierten aus dem Durchsatz und der durchströmten Fläche am Downcomerende. Die gemittelten CFX- und LDA-Meßwerte stellen einen Wert dar, der in der Downcomermitte über dem Umfang berechnet wurde. Dort sind die Geschwindigkeiten etwas höher als in den Randzonen zur Außenwand bzw. zur Kernumwandung (siehe auch Abb. 27). Deshalb ergeben sich für die LDA- bzw. CFX-Werte im Vergleich zu den theoretisch ermittelten Werten geringfügig höhere mittlere Geschwindigkeiten. Diese Werte wurden mit dem turbulenten radialen Geschwindigkeitsprofil im Ringspalt nach Abb. 27 gewichtet (-3.8%). Insgesamt ist eine gute Übereinstimmung bei den jeweils unterschiedlichen Schleifendurchsätzen bzw. bei Teilschleifenbetrieb zu erkennen.

4.2.2 Vollschleifenbetrieb bei $50\text{m}^3/\text{h}$

Die LDA-Messungen mit eingebauter Siebtonne (siehe Bild 2) bei einem Durchsatz von $50\text{m}^3/\text{h}$ pro Schleife zeigen, daß die Geschwindigkeitsverteilung am Downcomerende (1045 mm unterhalb der Stutzebene) stark von der Umfangsposition abhängig (Abb. 3) ist. Auf den Positionen 0° , 90° , 180° sowie 270° , also jeweils in azimuthaler Richtung in der Mitte zwischen zwei benachbarten Ein- bzw. Austrittsstutzen, werden Geschwindigkeitsmaxima mit Werten bis zu ca. 0.62 m/s beobachtet. Auf den dazwischen liegenden Positionen 45° , 135° , 225° und 315° liegen Minima mit Geschwindigkeiten unterhalb von 30 % der Maximalwerte. Der radiale Verlauf der Axialgeschwindigkeit zeigt noch kleinere Werte, wobei in einem der Minima sogar eine Rückströmung auftrat (unterhalb des Stutzens 4).

Die Ungleichmäßigkeit der Geschwindigkeit am Downcomerende läßt sich auf eine Sekundärströmung in Form von acht Rezirkulationswirbeln zurückführen, die in der Ebene des durch den Downcomer gebildeten zylindrischen Spalts rotieren und die sich unterhalb der Eintrittsstutzen herausbilden. Diese Gebiete konnte auch mittels optischer Tracerverfahren sichtbar gemacht werden. An den Stellen, wo Eintritts- und Austrittsstutzen unmittelbar benachbart sind, liegen Gebiete hoher Geschwindigkeitsgradienten. In Abb. 3 deutet die positive vertikale Geschwindigkeitskomponente auf eine Rückströmung im Zirkulationsgebiet unterhalb des Stutzens 4.

4.2.3 Vollschleifenbetrieb mit Siebtonne bei $150\text{m}^3/\text{h}$

Die LDA-Messungen mit eingebauter Siebtonne bei einem Durchsatz von $150\text{m}^3/\text{h}$ pro Schleife (Abb. 4) zeigen ein ähnliches Geschwindigkeitsprofil wie bei dem gerin-

geren Durchsatz von 50 m³/h. Die Auswirkungen der Sekundärströmung in Form von Rezirkulationsgebieten sind wiederum dominierend. Der Maximalwert der Geschwindigkeit liegt bei ca. 1.6 m/s unterhalb zwischen den Austrittsstutzen 2 und 3. Der Minimalwert der Geschwindigkeit tritt im Rezirkulationsgebiet links unterhalb des Stutzens 2 auf. Zusätzlich ist die Breite der gemessenen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen in Gestalt von Fehlerbalken angegeben. Das Geschwindigkeitsprofil im Downcomerquerschnitt bei 0/360° (zwischen den Eintrittsstutzen 1 und 2) und 542 mm unterhalb der Stutzenebene zeigte eine zur Innenwand des Downcomers abnehmendes Geschwindigkeitsprofil (Abb. 27).

Eine stationäre Nachrechnung mit CFX im Downcomer gab qualitativ das gleiche Strömungsbild bezüglich den LDA-Messungen (Abbildungen 4 und 27). Es existierten jedoch Unterschiede bei der Lage der Geschwindigkeitsmaxima und Minima. Generell wurde ein Linksdrall des berechneten Strömungsprofils in Umfangsrichtung ermittelt. Die Absolutwerte der Geschwindigkeiten von CFX-Rechnung liegen jedoch in weiten Bereichen innerhalb der im Experiment beobachteten Schwankungsbreiten (Balken in Abb. 4). Das berechnete radiale Geschwindigkeitsprofil im Downcomerquerschnitt (Abb. 27) zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten. Es beschreibt eine zur Kernbehälterwand abnehmende Geschwindigkeit zwischen Eintrittsstutzen 1 und 2. Hierbei liegt das berechnete Profil im allgemeinen etwas über dem gemessenen Profil, was aber größtenteils im Rahmen der Meßtoleranzen liegt (siehe auch Abb. 4 im Bereich 0°/360°). Diese Geschwindigkeitsverteilung zeigt, daß aufgrund des Ablösewirbels der Downcomererweiterung unterhalb der Stutzenzone und damit einer Rückströmung unterhalb der Erweiterung sich die Hauptströmung von der Kernbehälterumwandung löst und sich im unteren Downcomerbereich an der äußeren RDB-Wandung wieder anlegt. Die Geschwindigkeit im turbulenten Geschwindigkeitsprofil in der Nähe der Kernumwandung beträgt nur noch ca. 75% im Bezug auf gemessene Werte in der Nähe der äußeren RDB-Wand. Bei den berechneten Werten ist diese Geschwindigkeitsverminderung hin zur Kernbehälterwand nicht so ausgeprägt, sie beträgt nur ca. 10% zum Maximalwert an der RDB-Außenwand.

4.2.4 Vollsleifenbetrieb ohne Siebtonne bei 150m³/h

Zum Vergleich mit der oben beschriebenen Messung mit Siebtonne wurde ein Experiment mit identischen Randbedingungen in den Schleifen bei ausgebauter Siebtonne durchgeführt (Abb. 5). Die Ergebnisse überraschen, denn es zeigt sich ein komplett anderes Geschwindigkeitsprofil am Ende des Downcomers, welches zudem noch sehr instabil war. Stark ausgeprägt sind bei diesem Strömungszustand auch die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten. Je nach der Reihenfolge des Zuschaltens der einzelnen Pumpen ergaben sich völlig unterschiedliche Strömungsbilder am Downcomerende, so daß man von einem bistabilen Verhalten der Strömung ausgehen muß. Die Fluidströme aus den vier Schleifen treffen im Mittelpunkt des unteren Plenums ungestört aufeinander. Geringfügige Massenstromunterschiede führen zu einer Verschiebung des Staupunktes an den Rand (Downcomerende), wo er eine stabile Position einnimmt. Das Kühlmittel aus den über dem Staupunkt gelegenen Schleifen weicht auf die Gegenseite aus. Wird der Massenstrom auf der Seite erhöht, wo sich der Staupunkt befindet, kann er auf die gegenüberliegende Seite springen. Im gemessenen Fall gibt es eine Verstärkung unterhalb von Stutzen 1 und 2 und ein Geschwindigkeitsminimum bei teilweiser Rückströmung in den Downcomer

aufwärts unterhalb von Stützen 3 und 4. Die Siebtonne übt offenbar eine sehr wichtige Funktion der Strömungsstabilisierung unterhalb des Kerns aus, indem sie den Aufprallpunkt der Fluidmassen aus den vier Schleifen aufhebt und die Strömung in die Randbereiche (Kernumwandung) umlenkt.

4.2.5 Vollsleifenbetrieb bei 185 m³/h

Bei einem Durchsatz von 185 m³/h pro Schleife (Abb. 6) zeigt sich ein ähnliches Geschwindigkeitsprofil wie schon bei den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Durchsätzen. Unterhalb der Eintritts- und Austrittsstützen sind die Auswirkungen von Rezirkulationsgebieten mit geringen Geschwindigkeitsgradienten zu erkennen. Zwischen den Eintrittsstützen und Austrittsstützen liegen Gebiete hoher Geschwindigkeitsgradienten. Der Maximalwert der Geschwindigkeit liegt bei ca. 1.9 m/s unterhalb des Eintrittsstützens 1. Der Minimalwert der Geschwindigkeit liegt im Rezirkulationsgebiet links daneben. Es existieren keine Rückströmungen unterhalb der Stützen.

Eine stationäre Nachrechnungen mit CFX im Downcomer gab qualitativ das gleiche Strömungsbild bezüglich den LDA-Messungen (Abb. 6). Die Maximalwerte werden gut getroffen, es existieren jedoch Unterschiede bei den Geschwindigkeitsminima.

4.2.6 Vollsleifenbetrieb bei 250m³/h

Die LDA-Messungen mit eingebauter Siebtonne bei einem Durchsatz von 250m³/h pro Schleife (Abb. 7) zeigen wieder ähnliche Geschwindigkeitsprofile. Der Maximalwert der Geschwindigkeit liegt bei ca. 2.5 m/s zwischen den Austrittsstützen 3 und 2. Der Minimalwert der Geschwindigkeit liegt im Rezirkulationsgebiet links unterhalb des Stützens 2. Es existieren keine Rückströmungen den Rezirkulationsgebieten unterhalb der Stützen. Das Geschwindigkeitsprofil im Downcomerquerschnitt bei 0/360° (zwischen den Eintrittsstützen 1 und 2) und 542 mm unterhalb der Stützebene zeigt wie schon bei dem Geschwindigkeitsprofil für 150 m³/h eine zur Innenwand des Downcomers abnehmende Geschwindigkeit (Abb. 27).

Eine stationäre Nachrechnungen mit CFX im Downcomer gab qualitativ das gleiche Strömungsbild bezüglich den LDA-Messungen (Abbildungen 7 und 27). Es existieren jedoch auch hier Unterschiede bei der Lage der Geschwindigkeitsmaxima und -minima. Generell wurde in der CFX-Rechnung ein Linksdrall des berechneten Strömungsprofils in Umfangsrichtung gefunden. Die Absolutwerte der Geschwindigkeiten von CFX-Rechnung und LDA-Messung zeigen jedoch im Rahmen der turbulenten Fluktuationen (Balken in Abb. 4) eine insgesamt gute Übereinstimmung. Weiter zeigt sich eine zur Kernbehälterwand abnehmende Geschwindigkeit zwischen Eintrittsstützen 1 und 2. Hierbei liegt das berechnete Profil etwas über dem gemessenen Profil. Bei der Messung beträgt die Geschwindigkeit in der Nähe der Kernumwandung beträgt nur noch ca. 73% der Werte in der Nähe der äußeren RDB-Wand. Bei den berechneten Werten ist diese Geschwindigkeitsverminderung hin zur Kernbehälterwand wiederum nicht so ausgeprägt, sie beträgt nur ca. 10% zum Maximalwert an der RDB-Außenwand.

4.2.7 Teilschleifenbetrieb (3 Schleifen) bei $185\text{m}^3/\text{h}$ (Schleifen 1,2,3)

Bei einem Dreischleifenbetrieb mit abgeschalteter Pumpe 4 (Abb. 8) entstehen nur noch drei Strömungsmaxima ($c_{\text{max}}=1.8\text{ m/s}$) am Downcomerende, die Maxima zwischen Austrittsstutzen 1 und 4 bzw. zwischen Austrittsstutzen 2 und 3 verschieben sich und unterhalb der Eintrittsstutzen 3 und 4 entsteht ein lokales Geschwindigkeitsminimum, wobei hier es sogar wieder zu einer geringfügigen Rückströmung kommt. In diesem Minimum wurde auch die maximale Umfangskomponente der Geschwindigkeit ($c_{h,\text{max}}=0.58\text{ m/s}$) gemessen.

4.2.8 Teilschleifenbetrieb (2 Schleifen) bei $185\text{m}^3/\text{h}$ (Schleifen 1,2)

Bei einem Zweischleifenbetrieb mit abgeschalteten Pumpen 3 und 4 (Abb. 9) entsteht nur noch ein Strömungsmaxima ($c_{\text{max}}=1.7\text{ m/s}$) am Downcomerende, es befindet sich unterhalb des Eintrittsstutzens 1. Ein Geschwindigkeitsminimum existiert unterhalb des Eintrittsstutzens 2 mit einem Rückströmgebiet. Die maximale Umfangskomponente der Geschwindigkeit (bei ca. $c_{h,\text{max}}=-0.6\text{ m/s}$) wurde im Maximum der Absolutgeschwindigkeit unterhalb des Eintrittsstutzens 1 gemessen.

4.2.9 Teilschleifenbetrieb (1 Schleife) bei $185\text{m}^3/\text{h}$ (Schleife 1)

Bei einem konstanten Betrieb von nur einer Pumpe (Pumpen 2,3 und 4 sind abgeschaltet) entwickelt sich im Downcomer aufgrund des horizontalen Impulses aus der Schleife eine jeweils links und rechts vom Staupunkt an der Kernumwandung führende schräg nach unten gerichtete Umströmung des Downcomers (Abb. 10). Diese Strömung teilt sich nach den Aussparungen für die Austrittsstutzen noch einmal in jeweils zwei Teilströme. Diese treffen auf der dem Stutzen 1 gegenüberliegenden Seite zusammen und ergeben am Downcomerende ein Geschwindigkeitsmaximum zwischen den Eintrittsstutzen 3 und 4. Unterhalb des Eintrittsstutzens 1 befindet sich ein größeres Rückströmgebiet. Im Strömungsmaximum ist $c_{\text{max}}=0.75\text{ m/s}$ (Abb. 10). Die CFX-Berechnung gibt das Geschwindigkeitsprofil beim Betrieb von nur einer Pumpe mit dem Maximum auf der gegenüberliegenden Seite von Schleife 1 und dem Rückströmgebiet unterhalb der Schleife 1 gut wieder.

4.2.10 Teilschleifenbetrieb (2 Schleifen) bei $185\text{m}^3/\text{h}$ (Schleifen 1,3)

Bei einem Zweischleifenbetrieb mit abgeschalteten Pumpen 2 und 4 (Abb. 11) entstehen zwei Strömungsmaxima ($c_{\text{max}}=1.3\text{ m/s}$) am Downcomerende, sie befinden sich zwischen den Austrittsstutzen 1 und 4 bzw. 2 und 3. Ein Geschwindigkeitsminimum existiert zwischen den Eintrittsstutzen 3 und 4 mit einem Rückströmgebiet. Die Umfangskomponente der Geschwindigkeit ist verglichen mit anderen Durchsatzkonfigurationen gering.

4.2.11 Teilschleifenbetrieb (2 Schleifen) bei $185\text{m}^3/\text{h}$ (Schleifen 1,4)

Der Betrieb von Schleife 1 und 4 (Abb. 12) ergibt im Gegensatz zum Betrieb von Schleife 1 und 3 in Kapitel 4.2.10 erstaunlich wenig Unterschiede im betrachteten Strömungsgebiet. Die Strömungsprofile kann man als fast identisch beurteilen. Auch hier entstehen zwei Strömungsmaxima ($c_{\text{max}}=1.3\text{ m/s}$) am Downcomerende, sie befinden sich zwischen den Austrittsstutzen 1 und 4 bzw. 2 und 3. Ein Geschwindig-

keitsminimum existiert zwischen den Eintrittsstutzen 3 und 4 mit einem Rückströmgebiet. Die Umfangskomponente der Geschwindigkeit ist auch wie schon bei der in Kapitel 4.2.10 vorgestellten Durchsatzkonfiguration im Vergleich mit anderen Durchsatzkonfigurationen gering.

4.3 Untersuchung des Reynoldszahleinflusses der Strömung im Downcomer

Turbulenz ist einer der dominanten Mechanismen bei Vermischungsprozessen während eines Borverdünnungsszenarios. Der Strömungszustand wird im allgemeinen durch die Reynoldszahl charakterisiert und liefert eine Aussage, ob die Strömung laminar oder turbulent ist, oder sich im Umschlagsbereich laminar-turbulent befindet. Als kritische Reynoldszahl wird für eine Rohrströmung bei Lesieur [9] 2300 genannt. Für eine Ringspaltströmung wie im Downcomer eines Druckwasserreaktors gilt in der Literatur [10] $Re=5000$ bis 10000 als kritische Reynoldszahl. Alvarez [10] ermittelte experimentell, daß die Reynoldszahl für eine vollständig entwickelte turbulente Strömung eine Größenordnung höher als die kritische Reynoldszahl liegt ($Re > 100000$).

Für den Downcomer eines Druckwasserreaktors gilt zur Definition der Reynoldszahl der hydraulische Durchmesser:

$$D_{DC} = \frac{4A_{DC}}{U_{DC}} \quad (3)$$

In Gleichung (3) ist A die durchströmte Fläche [m^2] und U der benetzte Umfang [m] aus dem Innen- und Außendurchmesser. Daraus ergibt sich für einen Vierschleifenbetrieb folgende Reynoldszahl:

$$Re_{DC} = \frac{16 \cdot \dot{Q}_{Schleife}}{3600 \cdot U_{DC} \nu} \quad (4)$$

In Gleichung (4) ist Q der Schleifendurchsatz in [m^3/h] und ν die kinematische Viskosität des Fluids [m^2/s].

In Abb. 13 sind die auf $185 \text{ m}^3/h$ skalierten Geschwindigkeitsprofile am Downcomer für verschiedene Durchsätze dargestellt. Durch die hochturbulenten Strömungsverhältnisse bei Durchsätzen ändern sich die azimuthalen Profile beginnend ab $150 \text{ m}^3/h$ kaum noch (oberes Diagramm Abb. 13). Das läßt den Schluß zu, daß das Geschwindigkeitsfeld im Original bei Nominalbedingungen den im Modell gemessenen Geschwindigkeitsprofilen gleicht. Die im Modell auf Nominaldurchsatz skalierte Geschwindigkeit von $185 \text{ m}^3/h$ liegt im Bereich der voll ausgebildeten turbulenten Strömung. Naturumlaufbedingungen bei einem Zehntel der Nominalgeschwindigkeit bei $18.5 \text{ m}^3/h$ entsprechen einer Reynoldszahl, die nur geringfügig über dem Umschlagpunkt laminar-turbulent liegt. Für den Nominalbetrieb kann bei numerischen Simulationen das k, ϵ -Turbulenzmodell benutzt werden, da eine voll ausgeprägte turbulente Strömung vorhanden ist. Die Profile weisen bei $50 \text{ m}^3/h$ pro Schleife (Abb. 13) deutlich höhere Ungleichmäßigkeiten auf, als bei Durchsätzen über $150 \text{ m}^3/h$, was auf den Einfluß des Übergangsbereichs laminar-turbulent schließen läßt. Was den Einfluß des Druckverlusts des Reaktorkerns betrifft, so besteht

kein Unterschied zwischen den Messungen, die mit (185 m³/h) bzw. ohne (150 und 250 m³/h) Nachbildung des originalen Druckverlustbeiwerts durchgeführt wurden (s. Abschnitt 2). Es wird festgestellt, daß die Geschwindigkeitsverteilung am Downcomer von den Verhältnissen am Kerneintritt entkoppelt ist.

Für den ebenfalls untersuchten Fall des Anlaufens einer Pumpe ergibt sich eine andere Definition der Reynoldszahl, da ja Kühlmittel aus der hochfahrenden Schleife zum Teil in die anderen abgeschalteten Schleifen zurückströmt.

$$\text{Re}_{DC} = \frac{4(1-x) \cdot \dot{Q}_{\text{Schleife}}}{3600 \cdot U_{DC} \nu} \quad (4)$$

In Gleichung 4 ist x der Rückströmkoefizient.

Mit diesen Definitionen läßt sich gut ein Vergleich der unterschiedlichen Durchsätze von Original und Modell durchführen. In Abb. 14 oben sind für die 1:5 skalierte Modellanlage Vattenfall die Reynoldszahlen für den Originalreaktor und dem Vattenfall-Modell für zwei verschiedene Durchsätze für das Anlaufen der 1. Hauptkühlmittelpumpe über der dimensionslosen Zeit gegenübergestellt [11]. Die Anlaufzeit war hier 20 s. In allen Fällen erreicht die Strömung ein turbulentes Strömungsregime innerhalb weniger Sekunden. Diese Aussage trifft auch auf die Anlaufkurven der ROCOM-Anlage im Vergleich mit dem Original Konvoi-DWR zu. Die Durchsatzkurve des Originals tritt relativ schnell (nach ca. 0.4 s) in den Bereich einer turbulenten Strömung ein, während am skalierten Modell diese Schwelle von $\text{Re}=1.0\text{E}+04$ erst nach etwa 3.4 s erreicht wird. Es existieren also am Anfang der Pumpentransiente verglichen mit dem Originalreaktor ungleiche Strömungsbedingungen im Modell. Da aber zu dieser Zeit noch kein Tracer eingegeben wird, hat dieser Abschnitt keinen Einfluß auf die Vermischungsbilder im Downcomer und unteren Plenum des Reaktors.

4.4 Transiente Geschwindigkeitsmessungen

4.4.1 Rampenförmiges Anfahren einer Pumpe

Die höhere Intensität des Fiber Flow Lasers ermöglicht kürzere Meßzeiten bis hin zur Ermittlung transienter Geschwindigkeitsverteilungen im Downcomer bei schneller Veränderung des Schleifendurchsatzes. Dies wurde genutzt, um die transiente Geschwindigkeitsverteilung am unteren Ende des Downcomers beim Anfahren einer der vier Kühlmittelpumpen zu untersuchen.

Die Pumpenfrequenz wurde zu diesem Zweck innerhalb von 15 s linear von Null auf die dem Durchsatz von 185 m³/h entsprechende Drehzahl hochgefahren. Die Nenn-drehzahl wurde weitere 15 s gehalten, anschließend wurde bei $t = 30$ s die Pumpe abgeschaltet und das Auslaufen der Kühlmittelzirkulation über weitere 30 s beobachtet. Die resultierenden Durchsätze sind in Abb. 15 dargestellt. Dieser Versuch wurde 5 mal unter identischen Randbedingungen wiederholt, um anschließend eine Ensemble- Mittelung der Durchsatz- und Geschwindigkeitsverläufe vornehmen zu können. Abb. 16 zeigt zur Illustration die fünfmalige Wiederholung der Durchsatz-

rampe. Wegen der Trägheit von Pumpenwelle und Flüssigkeitssäule in der Schleife läuft die Zirkulation gegenüber der Frequenzrampe verzögert an (s. auch Bild 15).

In Abb. 16 ebenfalls gezeigt sind die mit dem LDA gemessenen Geschwindigkeitswerte auf einer ausgewählten azimutalen Position (gegenüber dem Eintrittsstutzen der anlaufenden Schleife), wobei jeder registrierte Burst durch einen individuellen Meßpunkt dargestellt ist. Die Dichte der Bursts schwankt mit der sich ändernden Geschwindigkeit, in den Abschnitten mit niedriger Geschwindigkeit werden mitunter einige Sekunden lang keine Meßwerte registriert.

Das Ergebnis der Ensembleüberlagerung für die Positionen unterhalb (22.5°) und gegenüber (202.5°) des beaufschlagten Stutzens ist in Abb. 17 gezeigt. Zusätzlich ist die azimutale Position $-22.5^\circ = 337.5^\circ$ dargestellt, die sich 45° unterhalb des benachbarten Eintrittsstutzens befindet, da hier die größte Rückströmung auftrat.

Bis etwa $t = 7.5$ s nimmt die Geschwindigkeit der nach unten gerichteten Strömung an allen drei Positionen gleichermaßen zu. Erst nach diesem Zeitpunkt beginnt sich die Sekundärströmung in Form des Rezirkulationsgebietes herauszubilden, wodurch die Geschwindigkeit unterhalb des Stutzens der hochfahrenden Schleife wieder beginnt abzunehmen. Sie wird schließlich positiv, d.h. es erfolgt eine Strömungsumkehr nach oben entgegen der Hauptströmungsrichtung. Die größten Werte der Gegenströmung werden nicht genau unterhalb dieses Eintrittsstutzens beobachtet, sondern um 45° versetzt, d.h. unterhalb des benachbarten Eintrittsstutzens. Bei $t = 20$ s trat genau unterhalb des Stutzens der anlaufenden Schleife eine erneute Strömungsumkehr auf, unterhalb des benachbarten Stutzens blieb es bei der Gegenströmung.

Nach Abschaltung der Pumpe fällt der Durchsatz in der Schleife rasch ab. Nach ca. 10 s kommt das Medium in der Schleife zur Ruhe. Im Gegensatz dazu ist im Ringspalt des Downcomers weiterhin eine Strömung zu beobachten.

Bemerkenswert ist weiterhin das Einsetzen einer intensiven Fluktuation der Geschwindigkeitswerte im Zeitraum zwischen $t = 12.5$ und 17.5 s. Offensichtlich treten zu diesem Zeitpunkt weitere Wirbel mit kleinerem Maßstab in Erscheinung, bzw. der Turbulenzgrad steigt stark an.

Die dazugehörigen CFX-Rechnungen weisen eine gute qualitative Übereinstimmung der transienten Geschwindigkeitsverteilungen am Downcomerende auf. Dies gilt sowohl für die azimutalen Verteilungen als auch für die Zeitverläufe (Abb. 18). Generell liegen die Absolutwerte der Geschwindigkeit bei der CFX-Rechnung höher. Die Güte der Modellierung ist beachtlich, zumal man von einer stark instationären Strömung mit vielen offenen Randbedingungen (Pumpendrall, Rückströmung durch die restlichen Stutzen, veränderte Druckwiderstände an der Siebtonne und im unteren Rost) ausgehen muß.

4.4.2 Sprungförmiges Anfahren einer Pumpe

Um die Dynamik des Anlaufens der Kühlmittelzirkulation weiter zu erhöhen und dadurch die grundlegenden Effekte noch klarer herauszustellen, wurde ein Versuch zum sprungförmigen Anfahren einer Pumpe durchgeführt.

Die Pumpenfrequenz wurde zu diesem Zweck bei $t = 0$ s von 0 auf den Endwert geschaltet, der dem Durchsatz von $185 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht. Die Nenndrehzahl wurde 15 s gehalten, anschließend wurde die Pumpe abgeschaltet und das Auslaufen der Kühlmittelzirkulation über weitere 30 s beobachtet. Das sprungförmige Anlaufen der Pumpe wurde zur Ensemble-Mittelung insgesamt 10 mal unter identischen Randbedingungen wiederholt.

Die Durchsatzverläufe in der hochfahrenden Schleife sowie in den drei anderen Schleifen, in denen sich eine Rückströmung einstellt, sind in Abb. 19 gezeigt. Wegen der Trägheit von Pumpenwelle und Flüssigkeitssäule in der Schleife läuft die Zirkulation gegenüber der Frequenzrampe verzögert an. Der Nenndurchsatz wird nach ca. 3.4 s erreicht.

Wie in Abb. 20 zu erkennen ist, liegen bei diesem Versuch ähnliche Verhältnisse vor wie bei der Durchsatzrampe. Die verschiedenen charakteristischen Ereignisse treten wegen des schnelleren Hochlaufens der Zirkulation zu früheren Zeitpunkten auf. Die Sekundärströmung setzt nach ca. 2 s ein, die heftigen turbulenten Fluktuationen der Geschwindigkeit beginnen bereits nach 5 s. Beachtlich ist, daß zwischen dem Erreichen des stationären Schleifendurchsatzes (3.4 s) und dem Einsetzen der Fluktuationen etwa 1.6 s verstreichen. Bei $t = 10$ s wird nochmals eine qualitative Veränderung der Strömungsverhältnisse beobachtet, so daß erst danach von annähernd ausgeprägten Verhältnissen im Downcomer gesprochen werden kann. Hier zeigt sich das dem Downcomer innewohnende dynamische Verhalten sehr deutlich.

Werden die Geschwindigkeiten über dem Umfangswinkel für verschiedene Zeitpunkte geplottet (Abb. 21), so erkennt man, daß über dem gesamten Umfang eine abwärtsgerichtete Strömung mit nur geringer Ungleichmäßigkeit einsetzt, die der Potentialströmung nahekommt, die sich für die Bespeisung eines Stutzens ergibt. Das Maximum der Geschwindigkeit ist zu dieser Zeit noch wenig ausgeprägt und befindet sich annähernd unterhalb des beaufschlagten Stutzens. Mit wachsender Intensität der Sekundärströmung stellt sich später die Strömung mit dem ausgeprägten Maximum auf der Gegenseite ein.

4.4.3 Vergleich von momentanen Geschwindigkeitsverteilungen bei rampen- und sprungförmigem Durchsatzverlauf

In Abb. 22 sind die Geschwindigkeitsverteilungen gegenübergestellt, die bei rampen- sowie sprungförmigen Anfahren der Schleife zu dem Zeitpunkt auftraten, zu dem der Schleifendurchsatz in beiden Fällen 50 % vom Endwert erreicht hatte. In beiden Fällen ist noch keine Ausprägung der durch die Rezirkulationsgebiete verursachten Ungleichmäßigkeit zu erkennen. Im Moment des Erreichens des Enddurchsatzes (Abb. 23) tritt das großräumige Wirbelgebiet bereits in Erscheinung. Dabei bleibt die Stärke der Sekundärströmung im Falle des Sprungs hinter den Verhältnissen beim rampenförmiger Durchsatzzunahme zurück, d.h. bei der Rampe ist die Ausprägung des Geschwindigkeitsprofils bereits weiter fortgeschritten. Dies kann durch die längere Zeit erklärt werden, die bei der Rampe für die Herausbildung des Wirbelgebiets bis zum Erreichen des Enddurchsatzes zur Verfügung steht. Ergänzend sind in Abb. 24 Zeitverläufe der Geschwindigkeit für beide Fälle gegenübergestellt.

4.4.4 Vergleich der LDA-Messung mit den Meßwerten der induktiven Durchflußgeber

Die Integration der mit dem Laser-Doppler Anemometer gemessenen Axialgeschwindigkeiten am Downcomerende über den Umfang ermöglicht bei den transienten Experimenten eine Bewertung der dynamischen Eigenschaften der induktiven Durchflußmesser. In Abb. 25 erfolgt die Gegenüberstellung der umfangsgemittelten Geschwindigkeitsverteilungen am Downcomerende mit den Durchflußsignalen. Zu diesem Zweck waren die Durchsätze in den vier Umwälzschleifen unter Berücksichtigung der Rückströmung in den Schleifen 2 - 4 zu addieren. Der resultierende Durchsatz im Downcomer stimmt auch im Hinblick auf das dynamische Verhalten gut mit den umfangsgemittelten Profilen der Axialgeschwindigkeit überein. Die induktiven Durchflußgeber weisen eine zeitliche Verschiebung in der Größenordnung von 0.5 s auf. Da im Fall des LDA eine trägheitslose Messung vorliegt, ist davon auszugehen, daß dies auf die Trägheit der induktiven Durchflußmeßstellen zurückzuführen ist.

4.4.5 Bewertung der Zeitkonstante der abklingenden Wirbel der Sekundärströmung

Bei beiden Versuchen (Rampe, Sprung) fällt der Durchsatz in der Schleife nach Abschaltung der Pumpe rasch ab (vgl. Abb. 25). Nach ca. 10 s kommt das Medium in der Schleife zur Ruhe. Im Gegensatz dazu ist im Ringspalt des Downcomers weiterhin eine Strömung zu beobachten. Nach dem Wegfall der Hauptströmung bleibt die Sekundärströmung noch eine Zeit lang bestehen, bis die Energie in den beiden Rezirkulationswirbeln dissipiert ist. Für den Fall des sprungförmigen Anfahrens der Schleife wurde eine Bewertung der Zeitkonstanten des Abklingens der Wirbelintensität durchgeführt. Hierzu sind in Abb. 26 die Geschwindigkeitsverläufe unterhalb und gegenüber der hochgefahrenen Schleife für den Zeitbereich nach Rückgang der Strömung in der Schleife selbst dargestellt. Die Geschwindigkeitsabnahme läßt sich gut durch eine Exponentialfunktion mit negativem Argument beschreiben. Der Faktor im Exponenten beträgt -0.08 1/s gegenüber des Stutzens der hochgefahrenen Schleife bzw. -0.09 1/s unterhalb des Stutzens. Daraus resultieren Halbwertszeiten für die Wirbel zwischen 7.7 und 8.7 s.

5 Zusammenfassung

An der Vermischungsanlage ROCOM, einem 1:5 skalierten Modell des Druckwasserreaktors Konvoi, wurden umfangreiche Geschwindigkeitsmessungen im Downcomer des Reaktordruckbehälters für verschiedene Schleifendurchsätze und bei Teilschleifenbetrieb durchgeführt. Durch Verwendung eines leistungsfähigen Lasers konnten auch transiente Geschwindigkeitsprofile aufgenommen werden. Einige der gemessenen Profile wurden mit dem numerischen Strömungsberechnungsprogramm CFX-4 nachgerechnet.

Bei Vierschleifenbetrieb konnte eine Unabhängigkeit der Geschwindigkeitsprofile von der Reynoldszahl oberhalb über $100 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Schleife im Modell nachgewiesen werden. Im Vergleich zu anderen Reaktortypen bestehen im Ringraum des RDB des DWR Konvoi einige konstruktive Besonderheiten, die die Vermischung nachhaltig beeinflussen. Der Downcomer ist verhältnismäßig kurz und besitzt eine diffusorartige Erweiterung unterhalb der Stutzebene. Unterhalb der Eintrittsstutzen und Austrittsstutzen existieren Rezirkulationsgebiete mit geringen Geschwindigkeitsgradienten. Zwischen den Eintritts- und Austrittsstutzen liegen Gebiete hoher Geschwindigkeitsgradienten. Transiente Messungen bei Anfahren einer Pumpe belegen, daß die Strömung im Downcomer in den ersten Sekunden wie eine Potentialströmung anläuft. Das Geschwindigkeitsmaximum befindet sich dabei noch annähernd unterhalb des entsprechenden Kühlmittelstutzens. Erst mit einer gewissen Zeitverzögerung entwickeln sich die großräumigen Wirbelgebiete, die letztlich zum Geschwindigkeitsmaximum auf der der in Betrieb gegangenen Schleife entgegengesetzten Seite des Ringspalts führen.

Strömungsuntersuchungen im Downcomer mit Hilfe der LDA-Technik bei naturumlaufnahen Schleifendurchsätzen mit Hinzugabe von Glucose zur Simulation von Dichteeffekten sind geplant.

Literatur

- [1] Grunwald, G.; Höhne, T.; Prasser, H.-M.; Weiß, F.-P., **Coolant Mixing in Pressurized Water Reactors at Constant Coolant Flow in the Primary Circuit**, *Jahrestagung Kerntechnik 2000, 23.-25. Mai 2000 in Bonn, Proceedings pp. 109-114.*
- [2] Grunwald, G.; Höhne, T.; Prasser, H.-M., **Investigation of coolant mixing in pressurized water reactors at the Rossendorf mixing test facility ROCOM**, *KTG-Technical Expert Meeting, 31.1-1.2.2000, FZR, Germany.*
- [3] Grunwald, G.; Höhne, T.; Prasser, H.-M., **Investigation of coolant mixing in pressurized water reactors at the Rossendorf mixing test facility ROCOM**, *8th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE8), Baltimore, USA, April 2-6,2000.*
- [4] Prasser, H.-M., Böttger, A., Zschau, J., **A new electrode-mesh tomograph for gas liquid flows**, *Flow Measurement and Instrumentation 9, 111-119, 1998*
- [5] Höhne, T., **Vergleich von Kühlmittelströmung und -vermischung in einem skalierten Modell des DWR Konvoi mit den Vorgängen im Originalreaktor**, *FZR-Report FZR-210, 1998*
- [6] LDA Polytec® LDE-300, **User Manual**
- [7] FiberFlow Laser, **User Manual**, *Dantec Measurement Technology, Skovlunde, Danmark, 9040U2001, 1995*
- [8] Cornell, G., **Losses in flow normal to plane screens**, *Transactions of the ASME, 80:791-799, 1958*
- [9] Lesieur, M., **Turbulence in Fluids**, *Kluwer Academic Publishers, 1992*
- [10] Alvarez, D. et al., **Three dimensional calculations and experimental investigations of the primary coolant flow in a 990 MW PWR vessel**, *NURETH-5, Salt Lake City, Vol. II, 586-592, 1992*
- [11] Alavyoon, Hemström, Andersson, and Karlsson, **Experimental and Computational Approach to Investigating Rapid Boron Dilution Transients in PWRs**, *CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College, PA, U.S.A., 18th-20th October, 1995*

Anhang

- Abb. 1 Positionen der Schleifen am RDB
- Abb. 2 Vergleich gemittelter Geschwindigkeiten am Ende des Downcomers (LDA-Messung, CFX, theoretische Geschwindigkeiten)
- Abb. 3 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Vierschleifenbetrieb (1,2,3,4), 50 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 4 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Vierschleifenbetrieb (1,2,3,4), 150 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 5 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Vierschleifenbetrieb (1,2,3,4), 150 m³/h Durchsatz pro Schleife, ohne Siebtonne
- Abb. 6 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Vierschleifenbetrieb(1,2,3,4), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 7 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Vierschleifenbetrieb(1,2,3,4), 250 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 8 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Dreischleifenbetrieb(1,2,3), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 9 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Zweischleifenbetrieb(1,2), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 10 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Einschleifenbetrieb(1), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 11 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Zweischleifenbetrieb(1,3), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 12 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Zweischleifenbetrieb(1,4), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife
- Abb. 13 Vergleich skaliertener Strömungsprofile bei unterschiedlichen Durchsätzen am Ende des Downcomers, Vierschleifenbetrieb, Reynoldszahlen der Durchsätze am Modell
- Abb. 14 Anlauf der 1. Pumpe, Reynoldszahlenvergleich im Downcomer Original-Modell: Westinghouse 3 Loop-Vattenfall- Modell, DWR Konvoi-ROCOM-Modell

- Abb. 15 Durchsatz in den einzelnen Schleifen beim Hochfahren der Pumpe einschl. Rückströmung in den restlichen Schleifen (Rampe)
- Abb. 16 Experiment zum rampenförmigen Anlaufen der Kühlmittelpumpe in Schleife 1 und Ergebnisse der LDA-Messung (gegenüber dem beaufschlagten Eintrittsstutzen), fünf Realisierungen des transienten Vorgangs
- Abb. 17 Ergebnisse der Ensemble-Mittelung für 5 rampenförmige Pumpenanläufe, Durchsatzverlauf in der Schleife und Geschwindigkeitsmessung an ausgewählten azimutalen Positionen am Ende des Downcomers
- Abb. 18 Anlauf der 1. Pumpe, Geschwindigkeitsprofil in Umfangsrichtung und von verschiedenen Positionen am Ende des Downcomers
- Abb. 19 Durchsatz in den einzelnen Schleifen beim Hochfahren der Pumpe einschl. Rückströmung in den restlichen Schleifen (Sprung)
- Abb. 20 Ergebnisse der Ensemble-Mittelung für 10 spungförmige Pumpenanläufe, Durchsatzverlauf in der Schleife und Geschwindigkeitsmessung an ausgewählten azimutalen Positionen am Ende des Downcomers
- Abb. 21 Evolution der azimutalen Geschwindigkeitsverteilungen am Downcomerende im Vergleich zur Potentialnäherung
- Abb. 22 Anlauf der 1. Pumpe, Vergleich der transienten Geschwindigkeitsfelder am Downcomerende zum Zeitpunkt des Erreichens von 50 % des Nenn-durchsatzes in der Schleife (Rampe: $t = 8.5$ s, Sprung: $t = 1.5$ s)
- Abb. 23 Anlauf der 1. Pumpe, Vergleich der transienten Geschwindigkeitsfelder am Downcomerende zum Zeitpunkt des Erreichens von 100 % des Nenn-durchsatzes in der Schleife (Rampe: $t = 15.0$ s, Sprung: $t = 3.5$ s)
- Abb. 24 Anlauf der 1. Pumpe, Vergleich der transienten Geschwindigkeitsfelder am Downcomerende, Rampe (oben)-Sprung (unten)
- Abb. 25 Vergleich der gemittelten LDA-Meßdaten am Downcomerende mit FlowMeter-Schleifenmeßdaten (reduziert um die Rückströme durch die restlichen Schleifen) für Sprung und Rampe
- Abb. 26 Abnehmende Flanke der LDA-Meßdaten für die Downcomerpositionen 22.5° und 202.5°
- Abb. 27 Vergleich der Strömungsprofile über dem Querschnitt des Downcomers, Vierschleifenbetrieb 250 m³/h oben, 150 m³/h unten, 0° azimutale Position

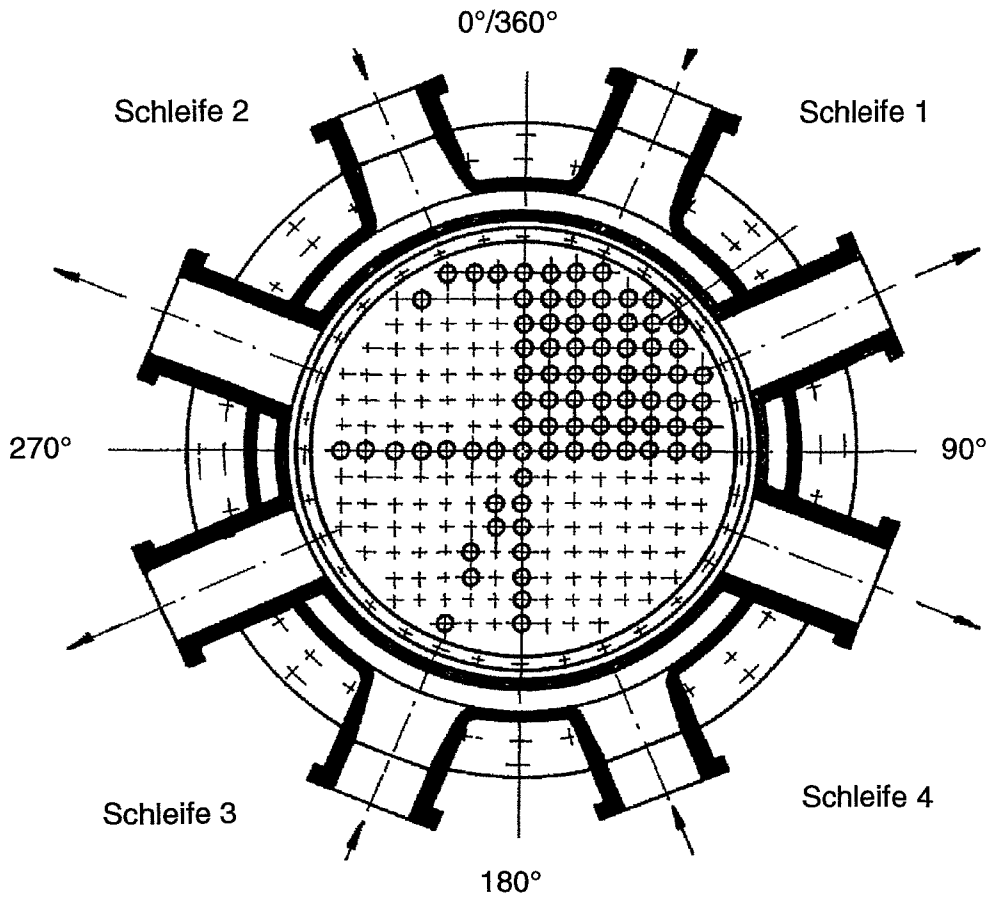


Abb. 1 Positionen der Schleifen am RDB

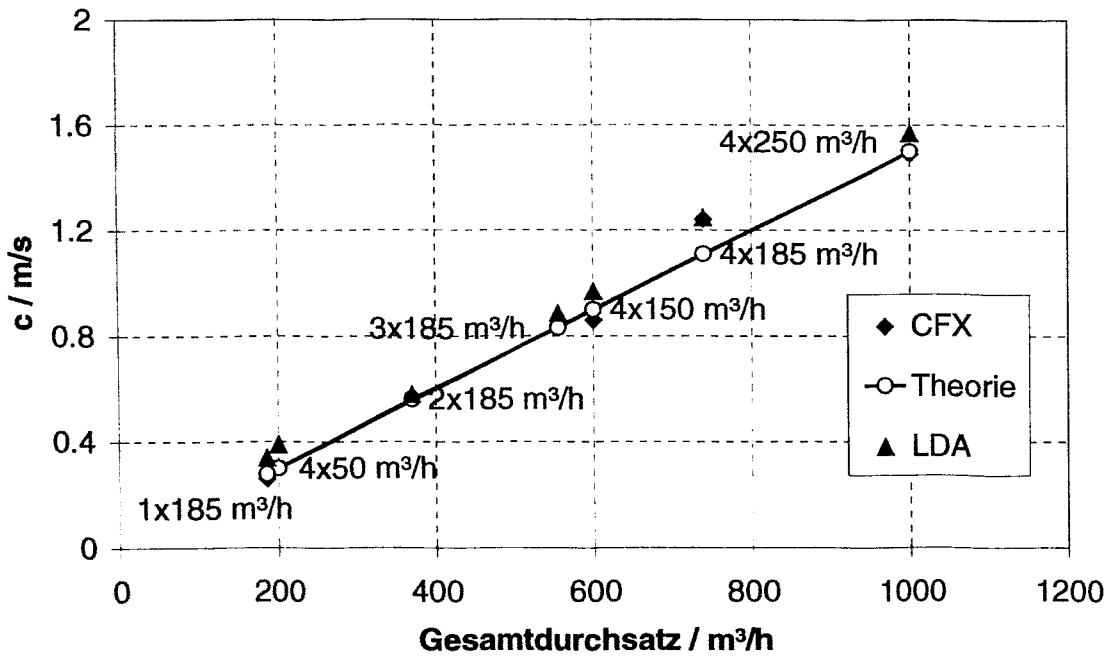


Abb. 2 Vergleich gemittelter Geschwindigkeiten am Ende des Downcomers (LDA-Messung, CFX, theoretische Geschwindigkeiten)

Schleife 1 Schleife 4 Schleife 3 Schleife 2

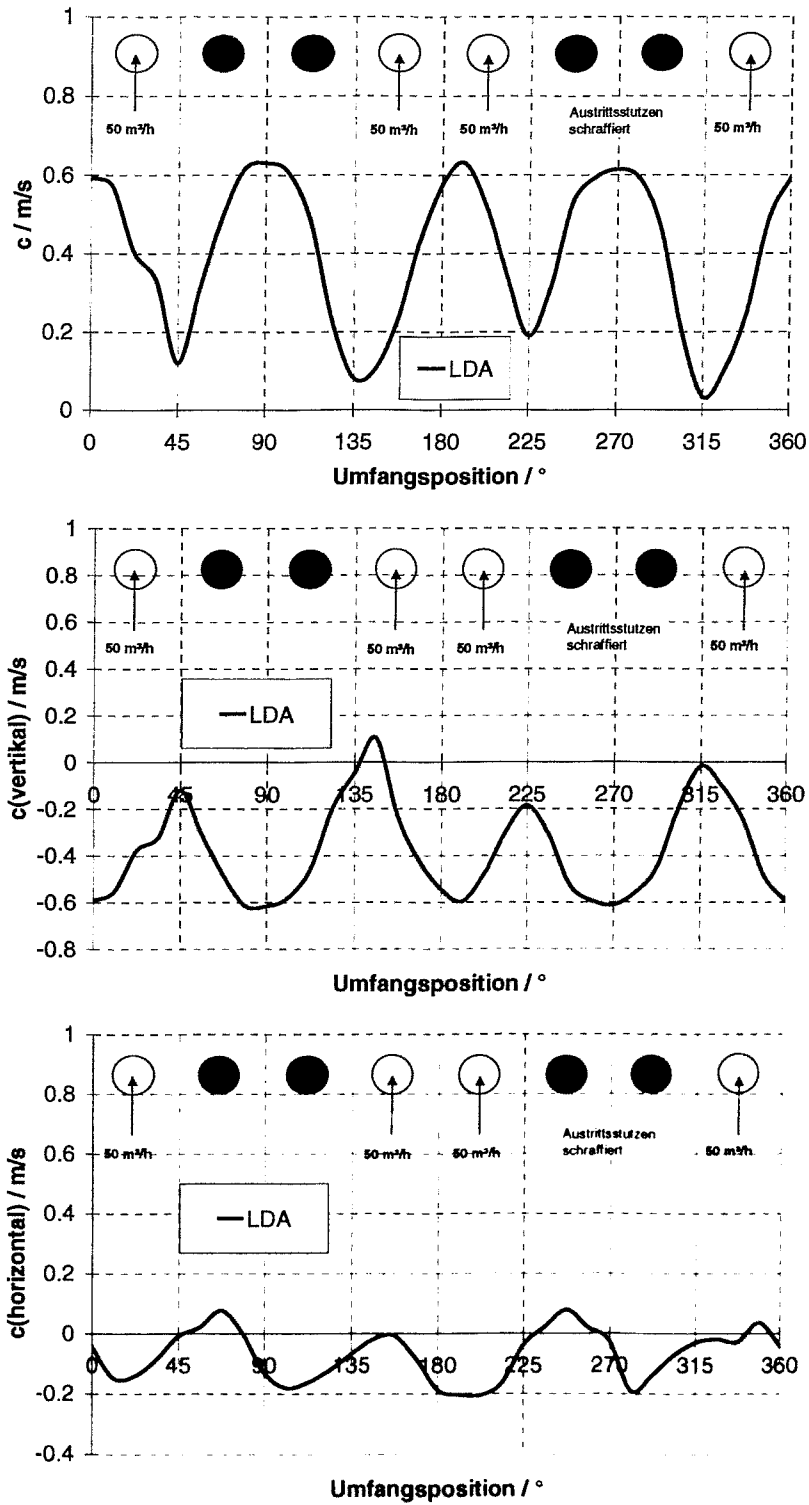


Abb. 3 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Vierschleifenbetrieb (1,2,3,4), 50 m³/h Durchsatz pro Schleife

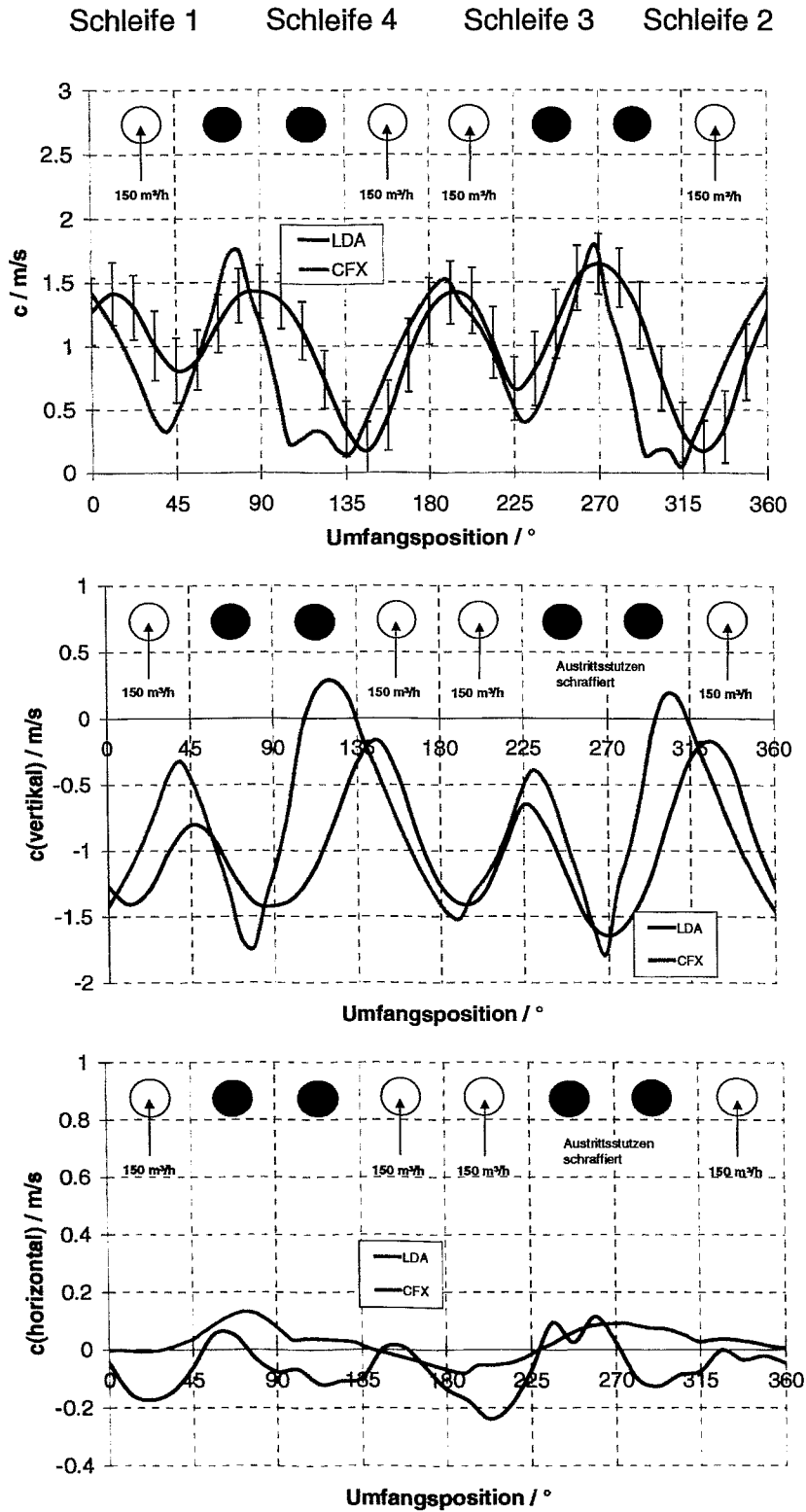


Abb. 4 Geschwindigkeitsprofile Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers Vierschleifenbetrieb (1,2,3,4), 150 m³/h Durchsatz pro Schleife

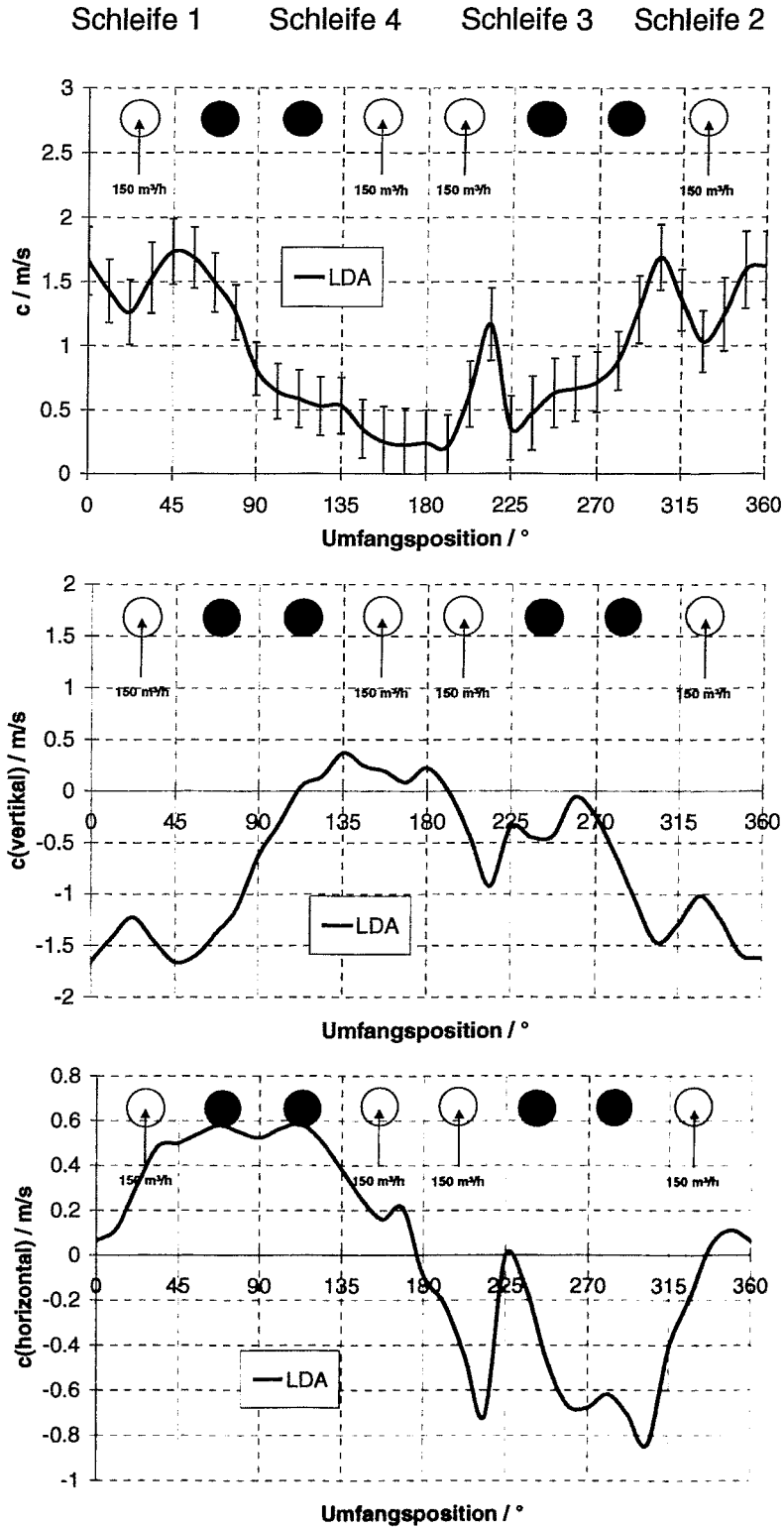


Abb. 5 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Vierschleifenbetrieb (1,2,3,4), 150 m³/h Durchsatz pro Schleife, ohne Siebtonne

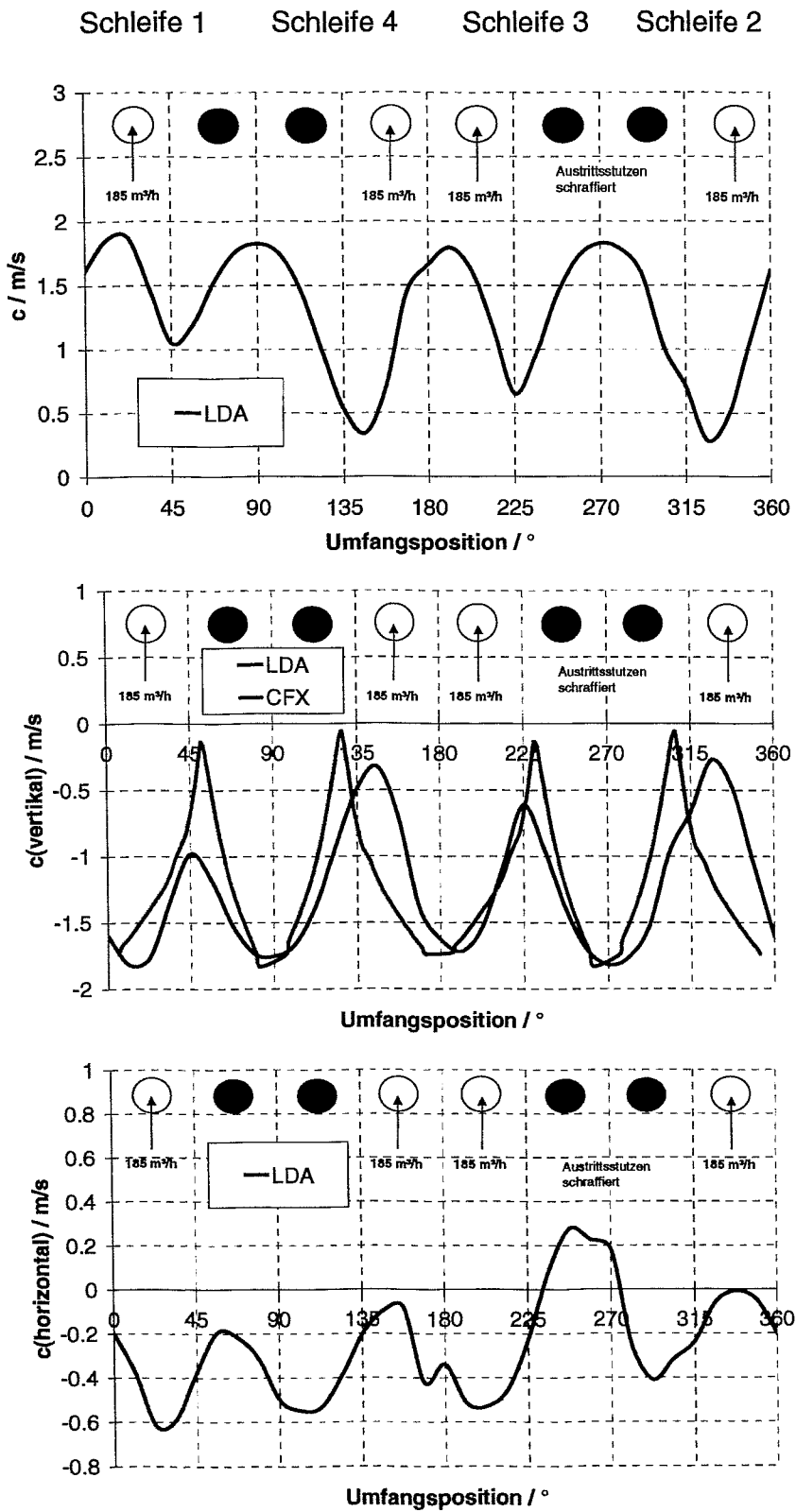


Abb. 6 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Vierschleifenbetrieb(1,2,3,4), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife

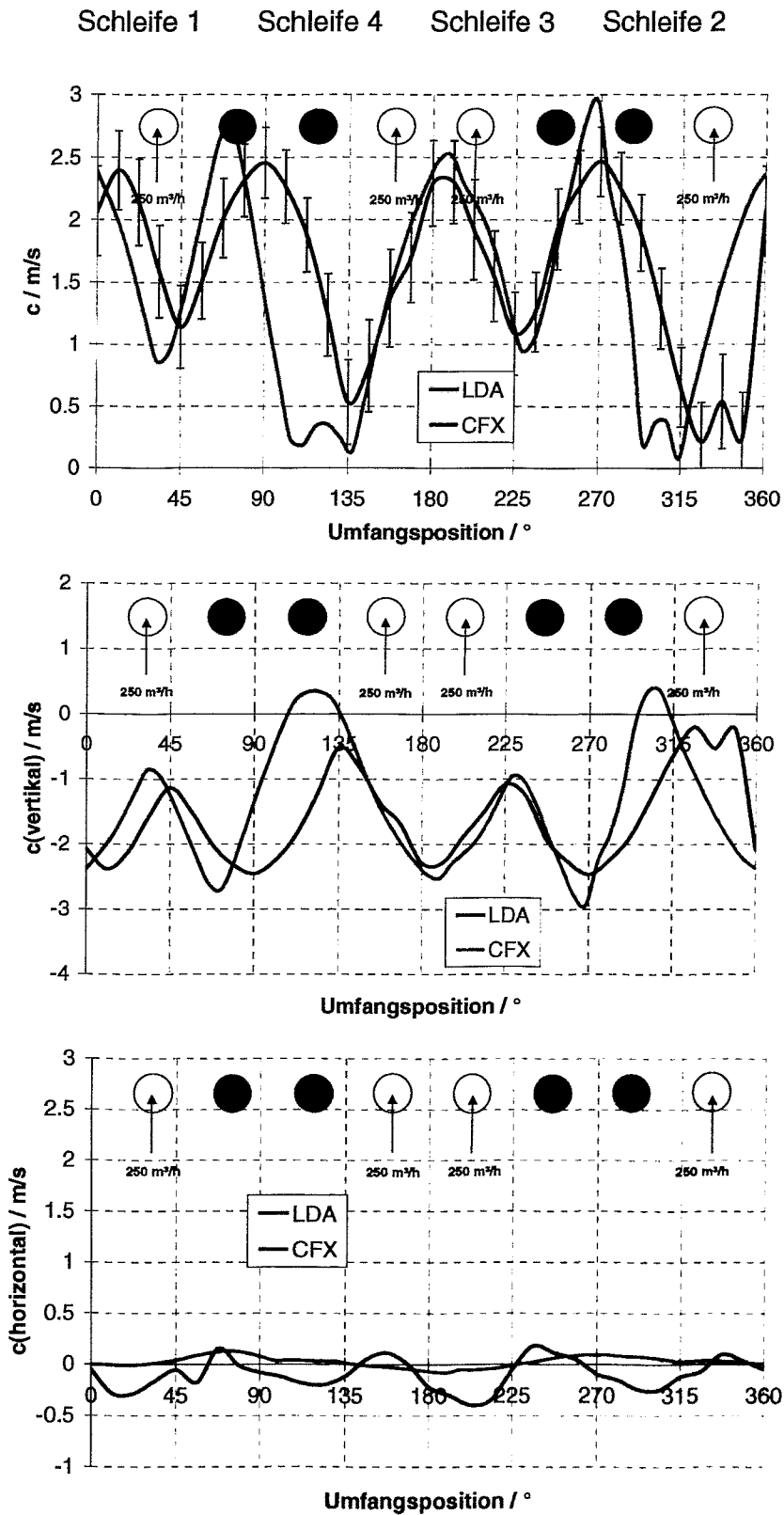


Abb. 7 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Vierschleifenbetrieb(1,2,3,4), 250 m³/h Durchsatz pro Schleife

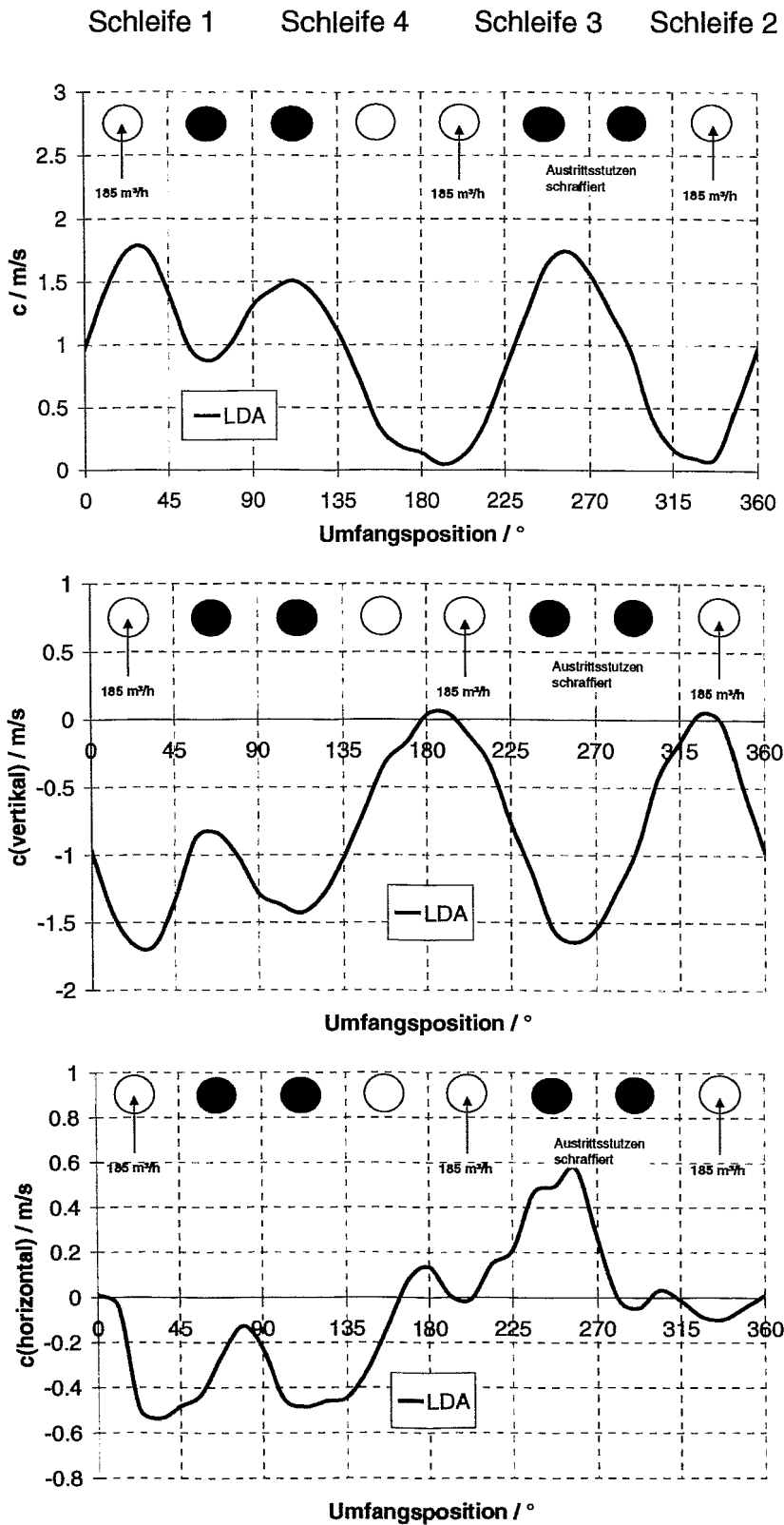


Abb. 8 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Dreischleifenbetrieb(1,2,3), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife

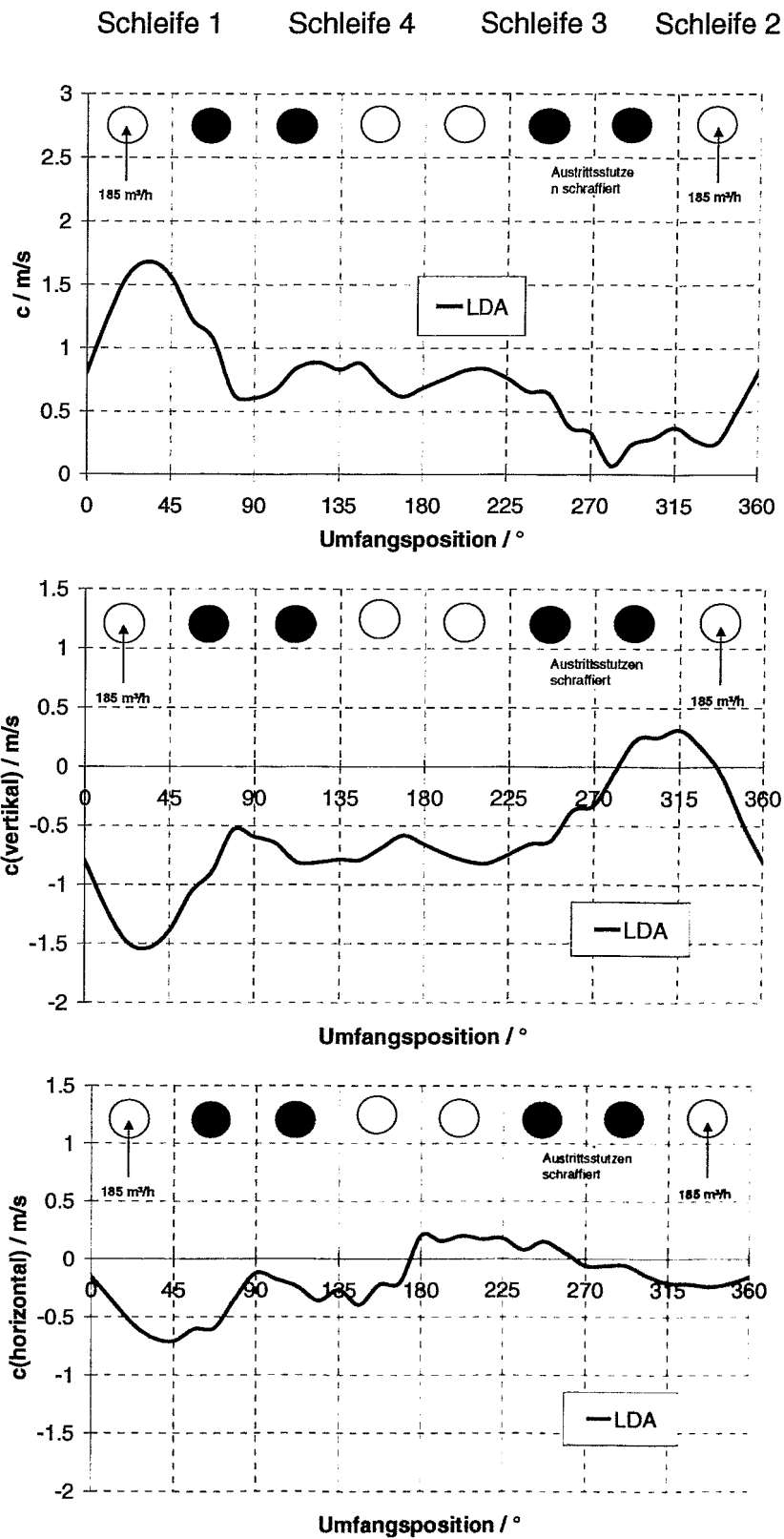


Abb. 9 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Zweischleifenbetrieb(1,2), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife

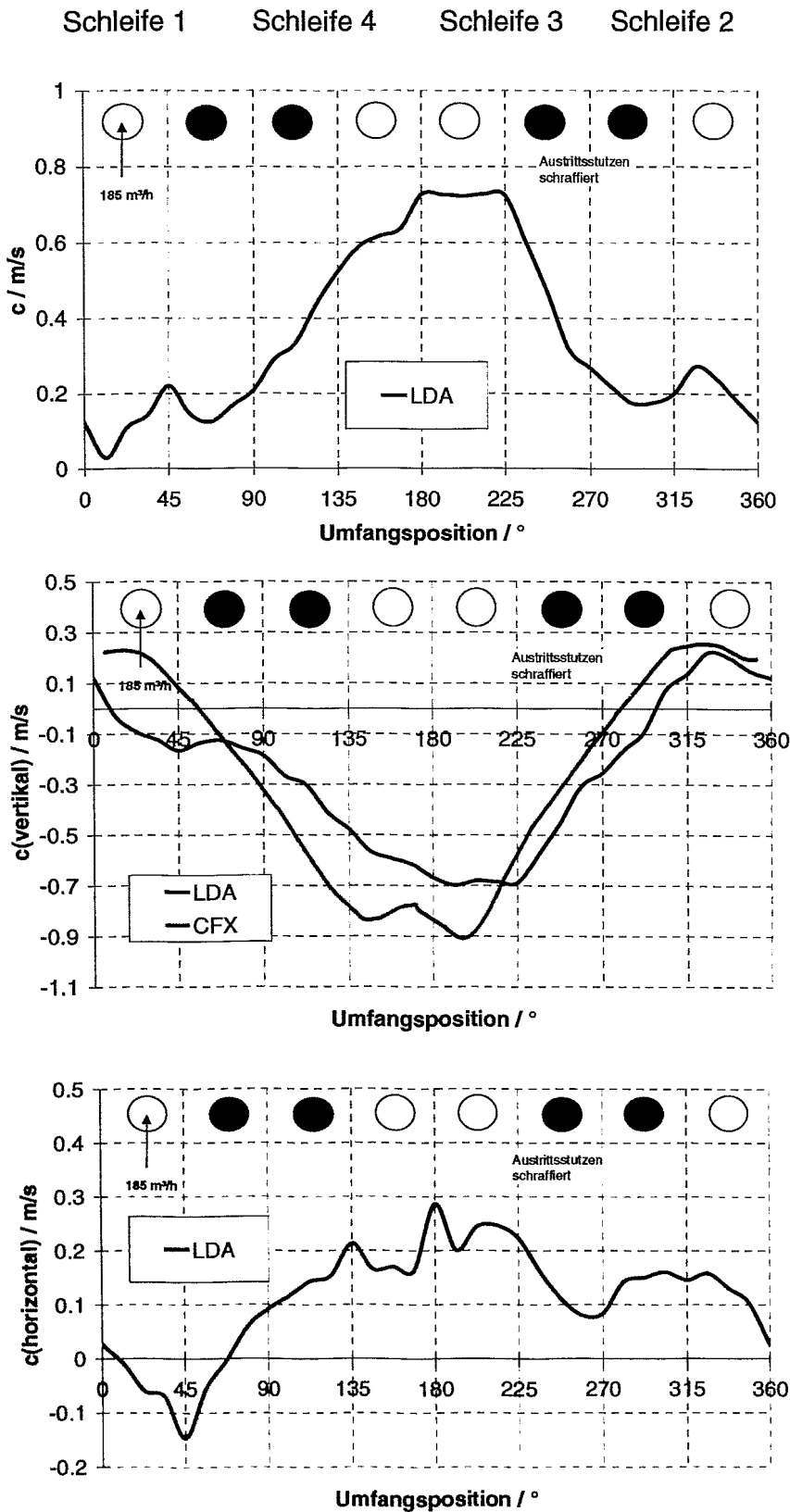


Abb. 10 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Einschleifenbetrieb(1), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife

Schleife 1 Schleife 4 Schleife 3 Schleife 2

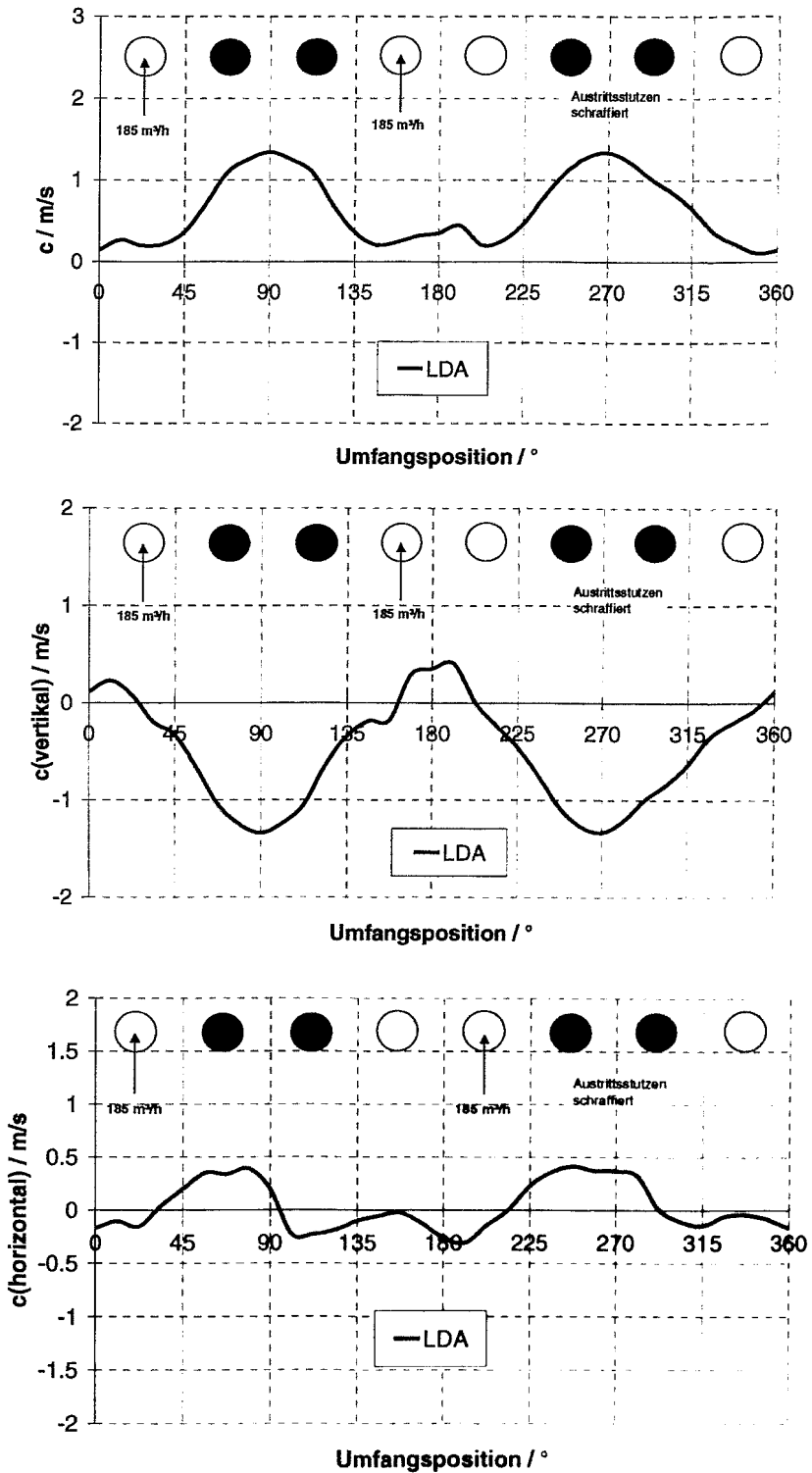


Abb. 11 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Zweischleifenbetrieb(1,3), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife

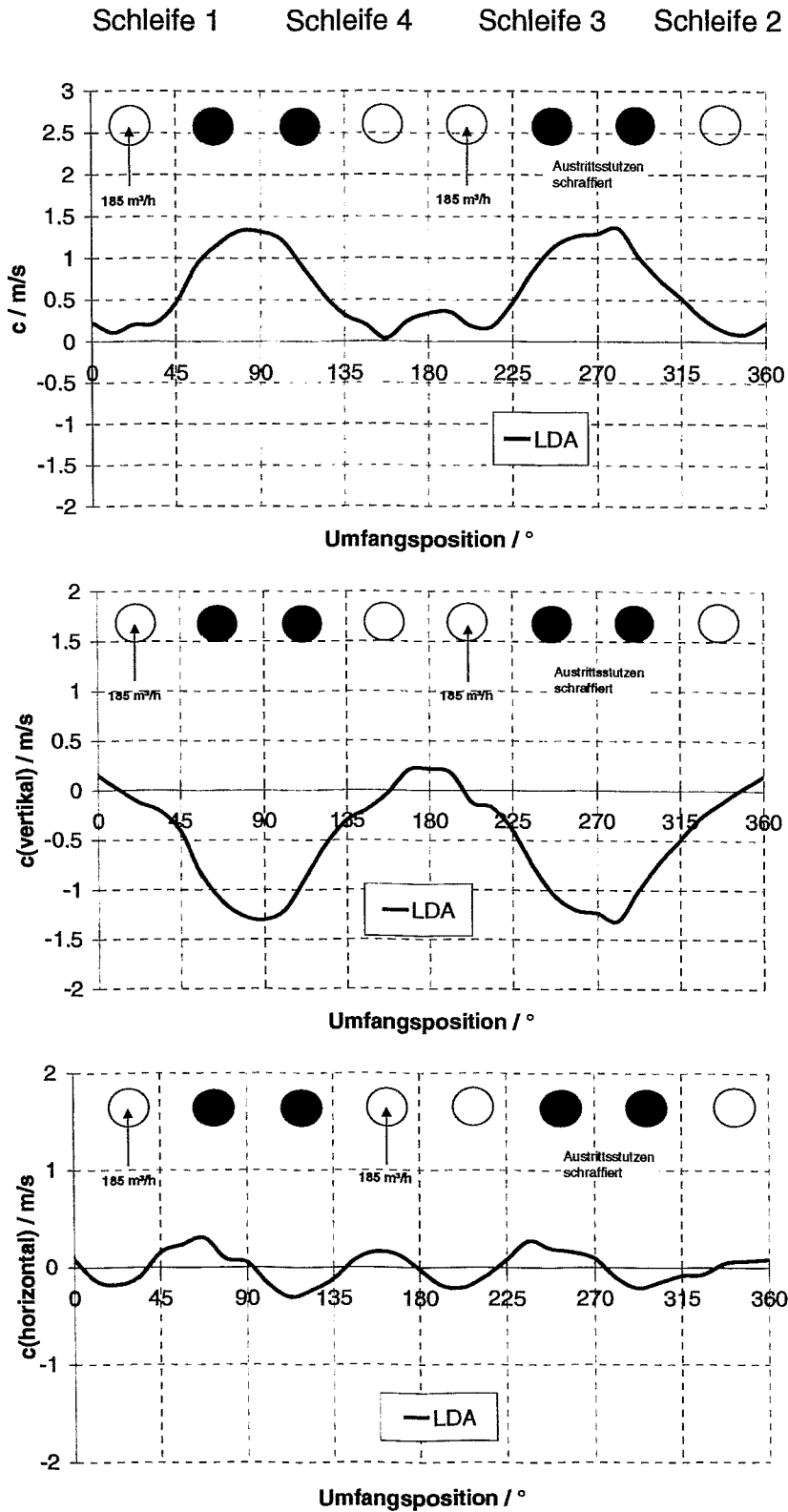


Abb. 12 Geschwindigkeitsprofile abhängig von der Umfangsposition am Ende des Downcomers, Zweischleifenbetrieb(1,4), 185 m³/h Durchsatz pro Schleife

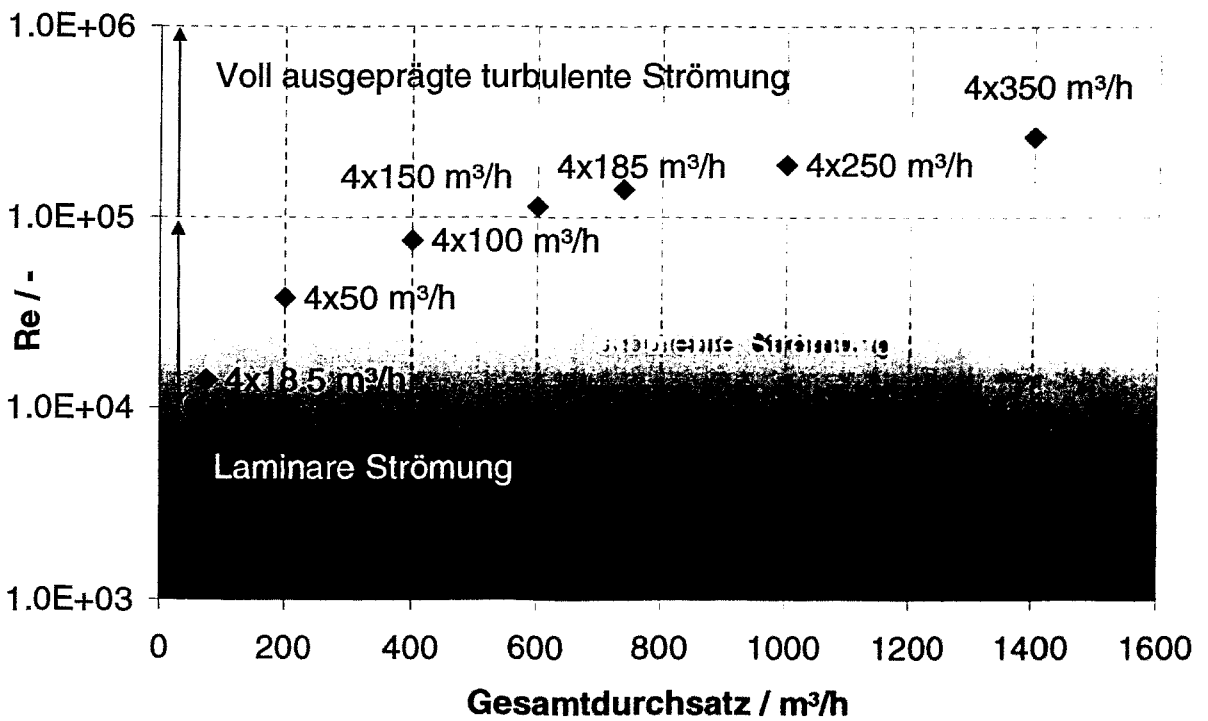
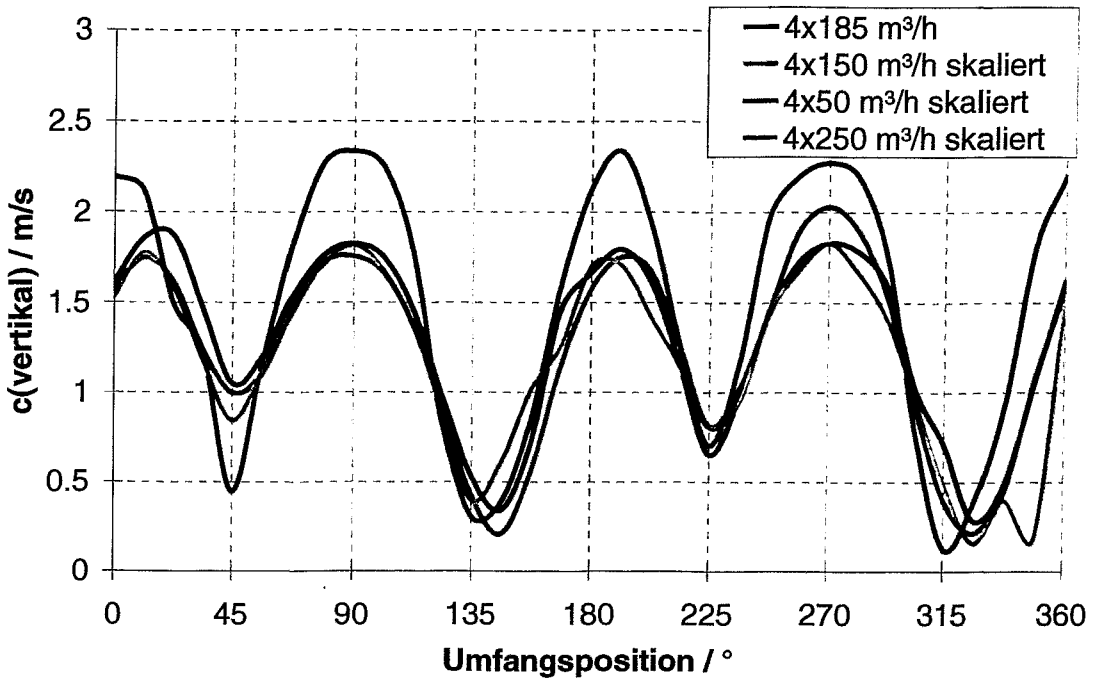


Abb. 13 Vergleich skaliertener Strömungsprofile bei unterschiedlichen Durchsätzen am Ende des Downcomers, Vierschleifenbetrieb, Reynoldszahlen der Durchsätze am Modell

DOWNCOMER REYNOLDS NUMBER DURING RCP TRANSIENT

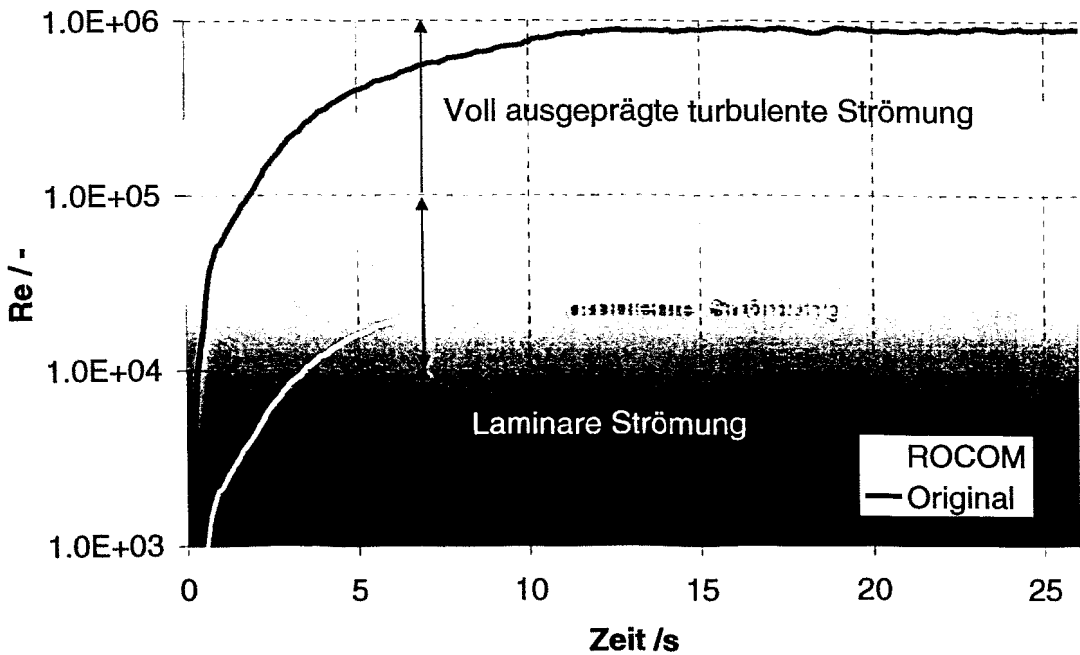
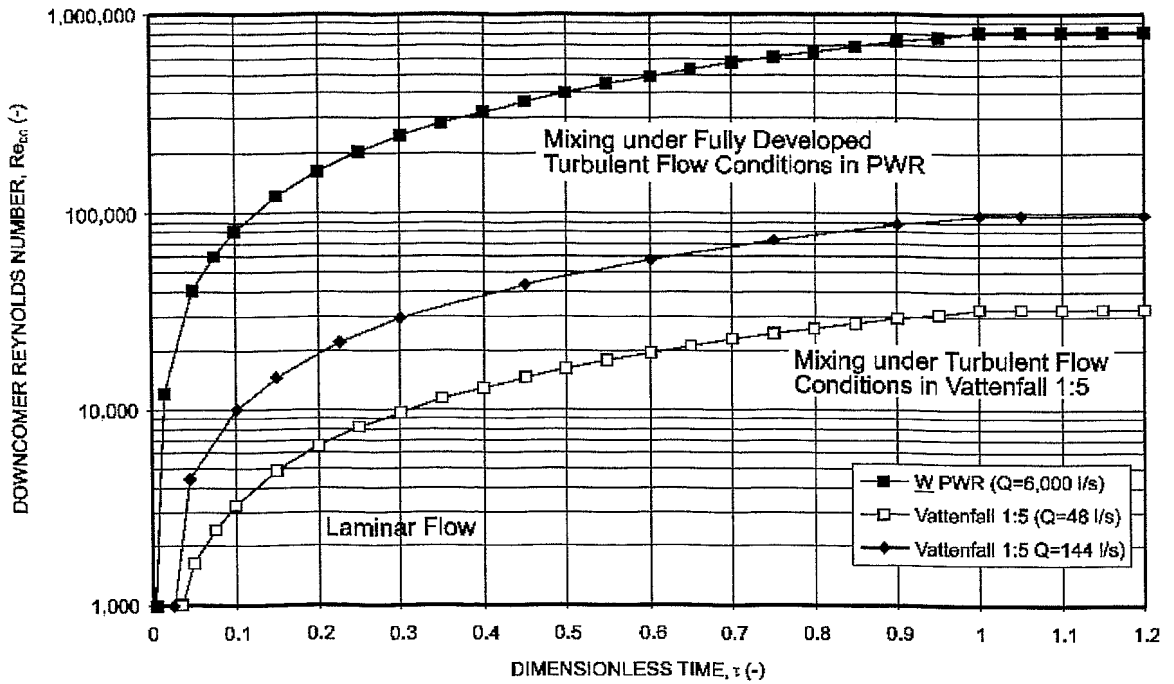


Abb. 14 Anlauf der 1. Pumpe, Reynoldszahlenvergleich im Downcomer Original-Modell: Westinghouse 3 Loop-Vattenfall- Modell, DWR Konvoi-ROCOM-Modell

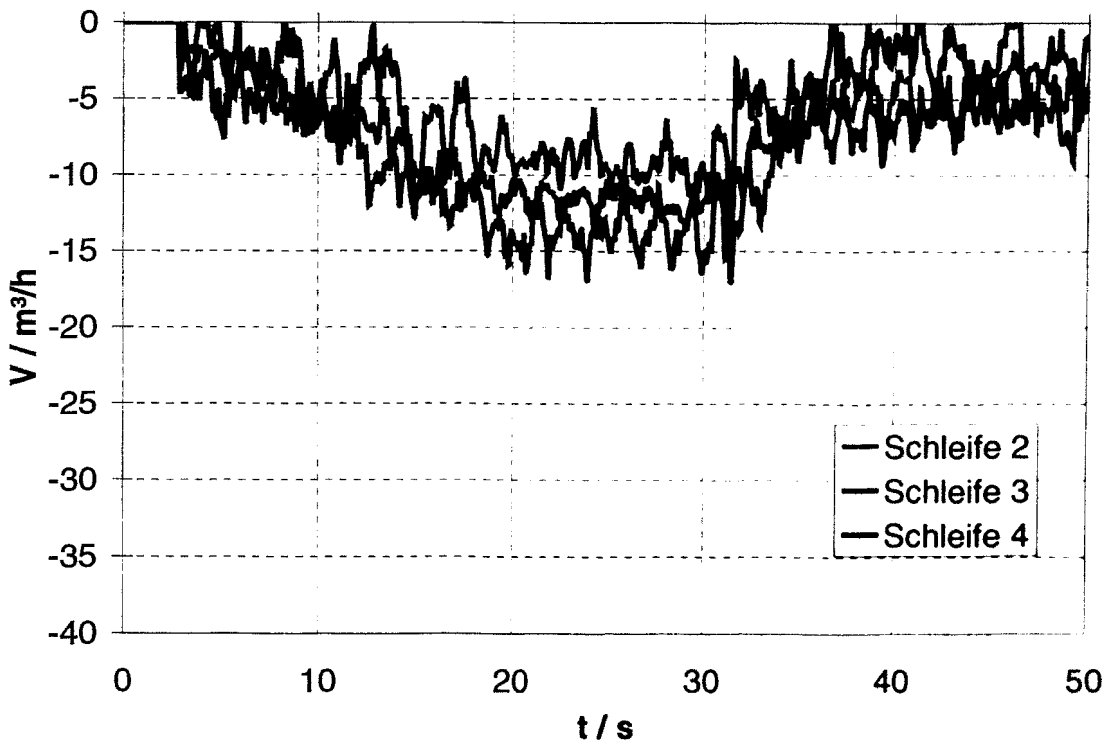
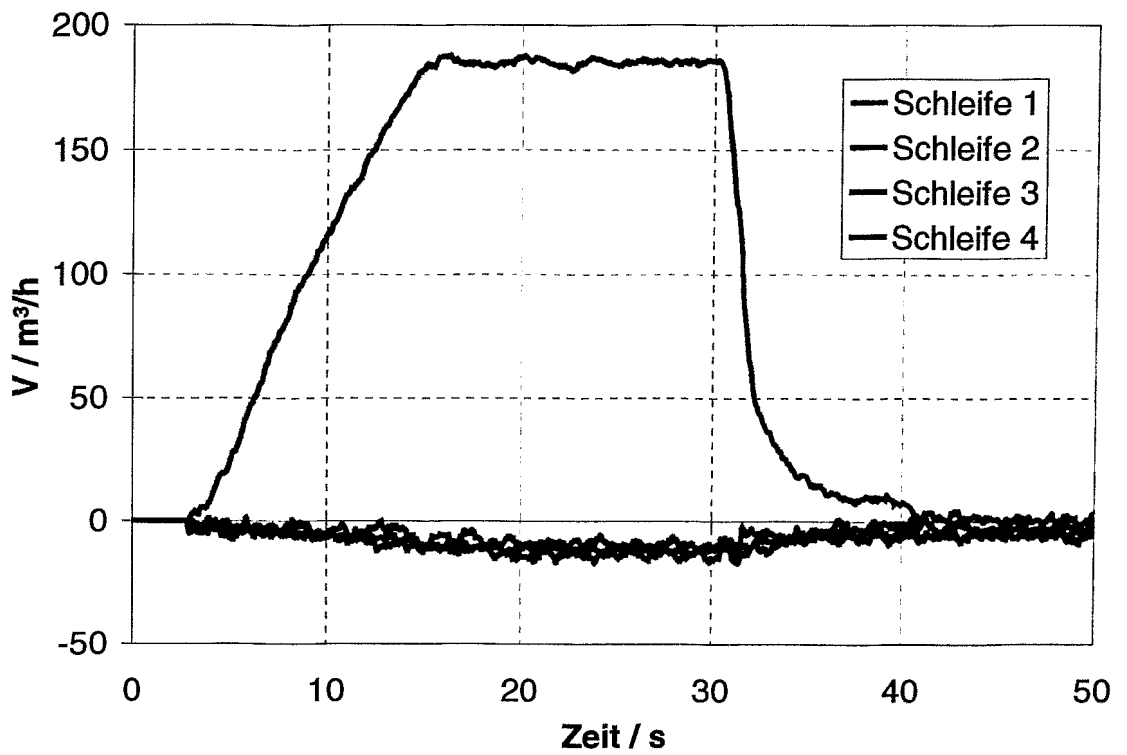


Abb. 15 Durchsatz in den einzelnen Schleifen beim Hochfahren der Pumpe einschl. Rückströmung in den restlichen Schleifen (Rampe)

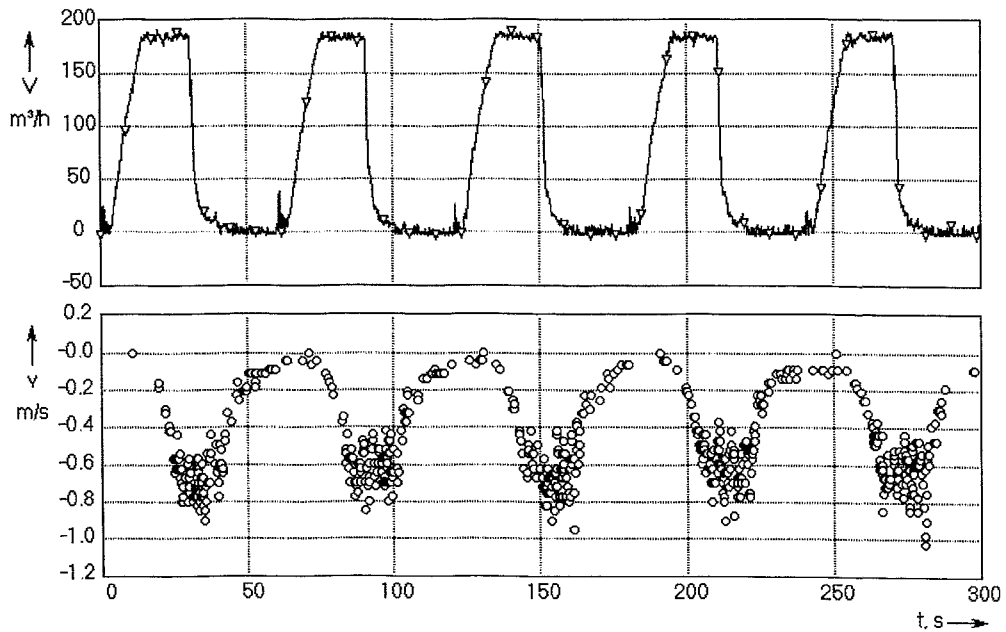


Abb. 16 Experiment zum rampenförmigen Anlaufen der Kühlmittelpumpe in Schleife 1 und Ergebnisse der LDA-Messung (gegenüber dem beaufschlagten Eintrittsstutzen), fünf Realisierungen des transienten Vorgangs

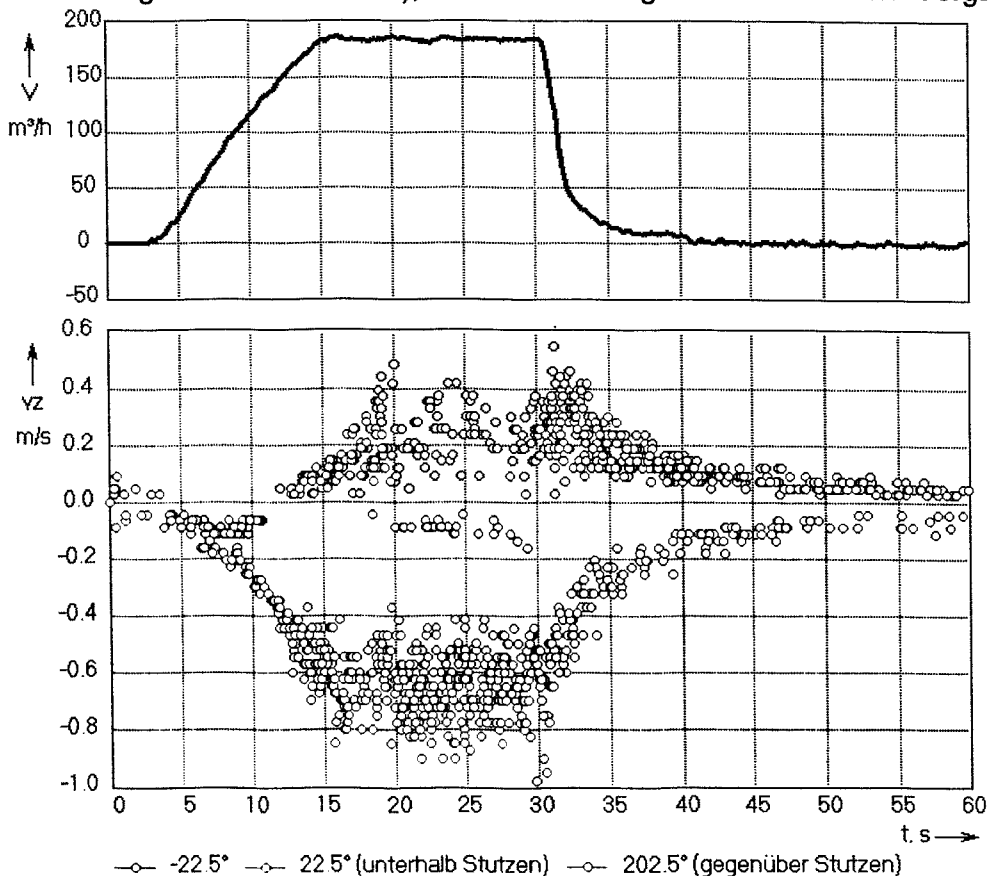


Abb. 17 Ergebnisse der Ensemble-Mittelung für 5 rampenförmige Pumpenanläufe, Durchsatzverlauf in der Schleife und Geschwindigkeitsmessung an ausgewählten azimuthalen Positionen am Ende des Downcomers

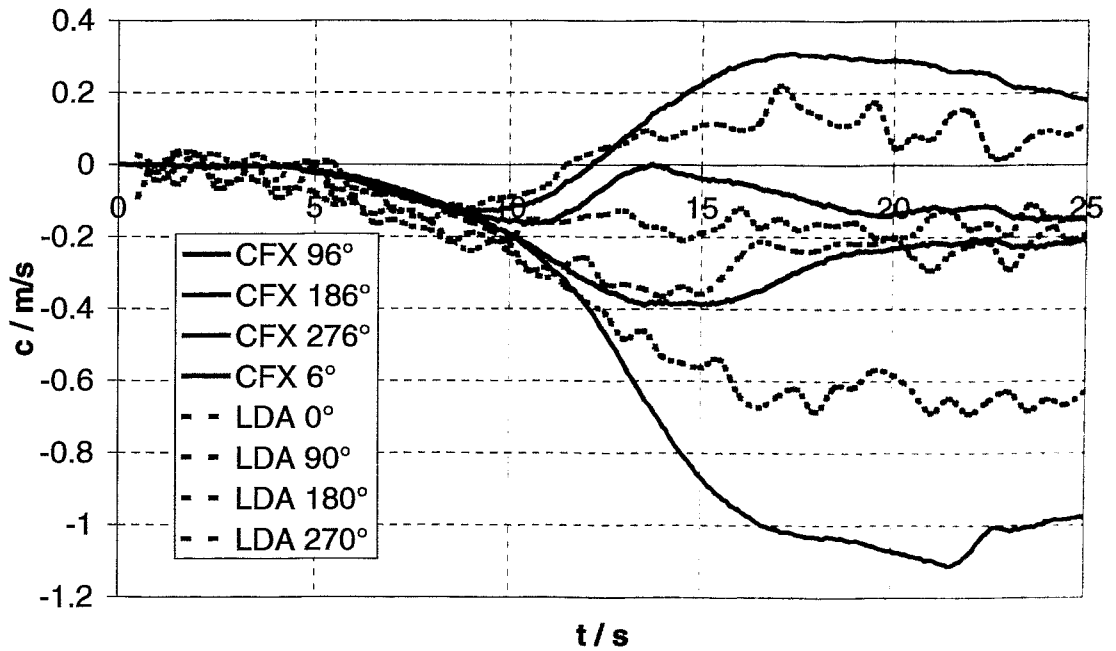
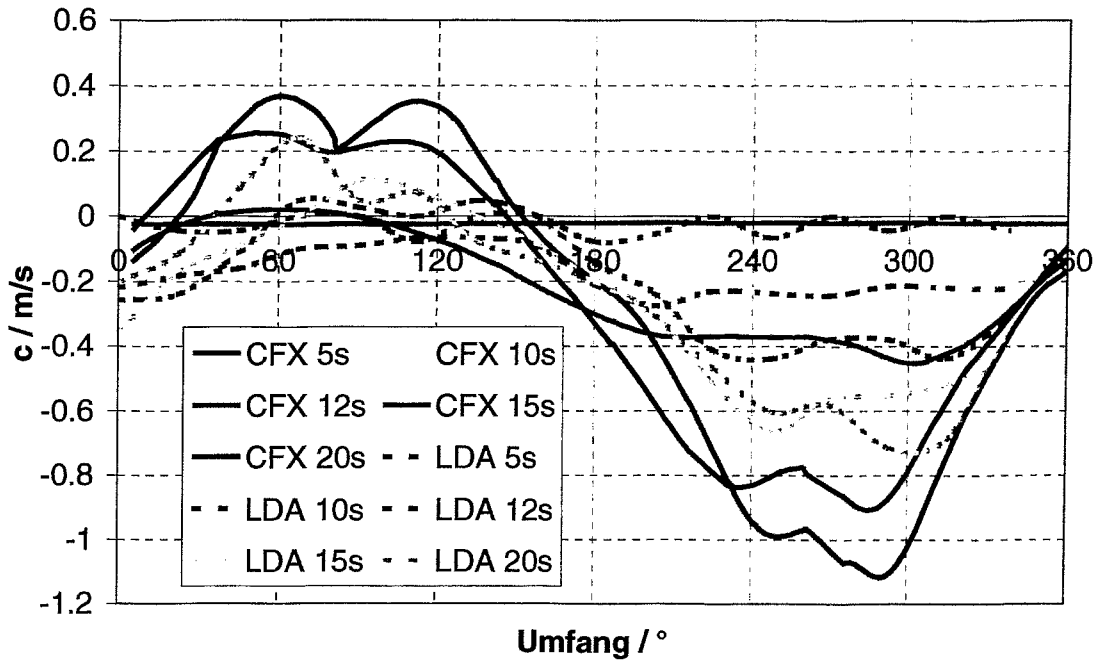


Abb. 18 Anlauf der 1. Pumpe, Geschwindigkeitsprofil in Umfangsrichtung und von verschiedenen Positionen am Ende des Downcomers

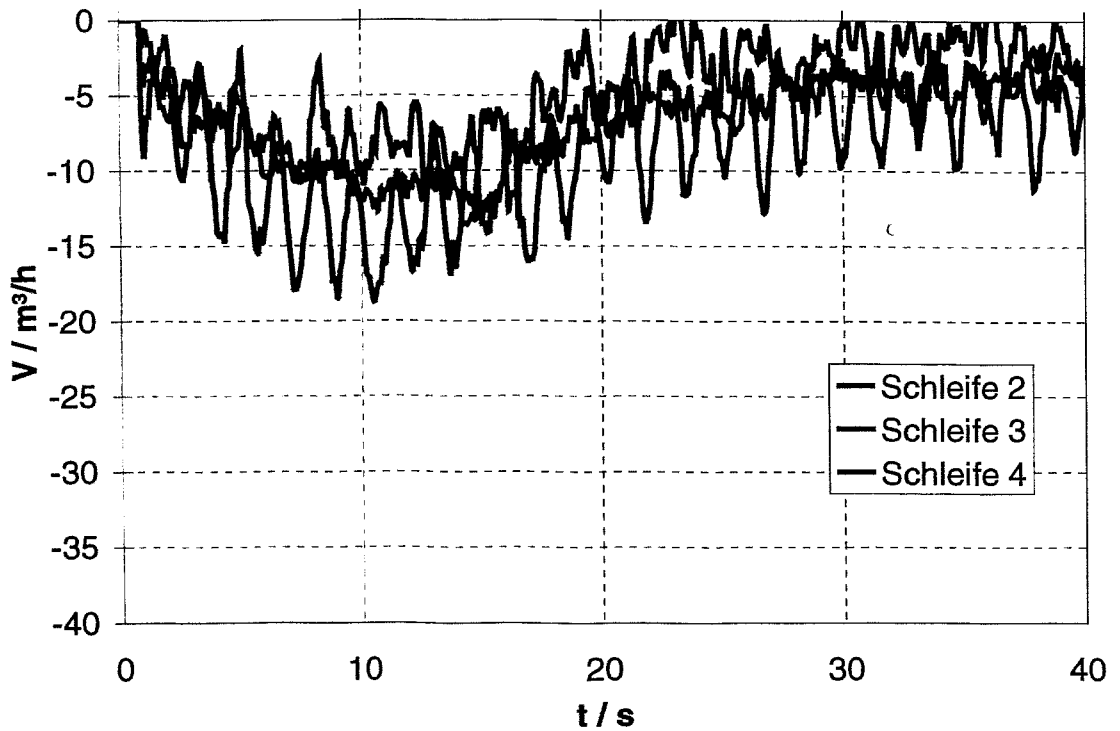
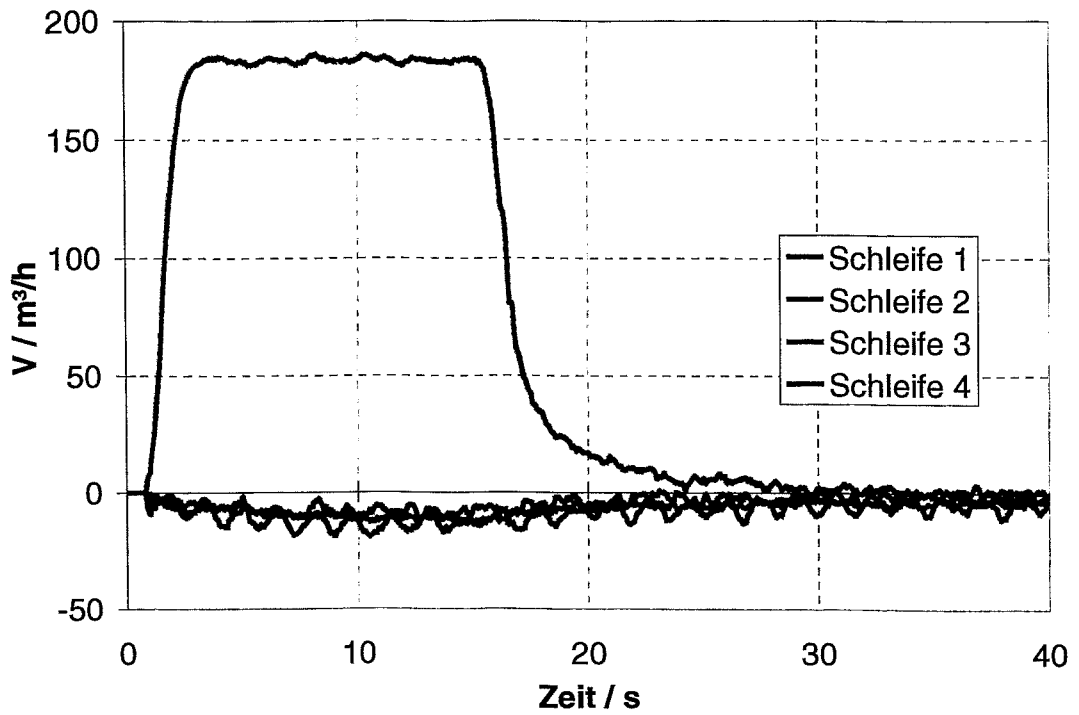


Abb. 19 Durchsatz in den einzelnen Schleifen beim Hochfahren der Pumpe einschl. Rückströmung in den restlichen Schleifen (Sprung)

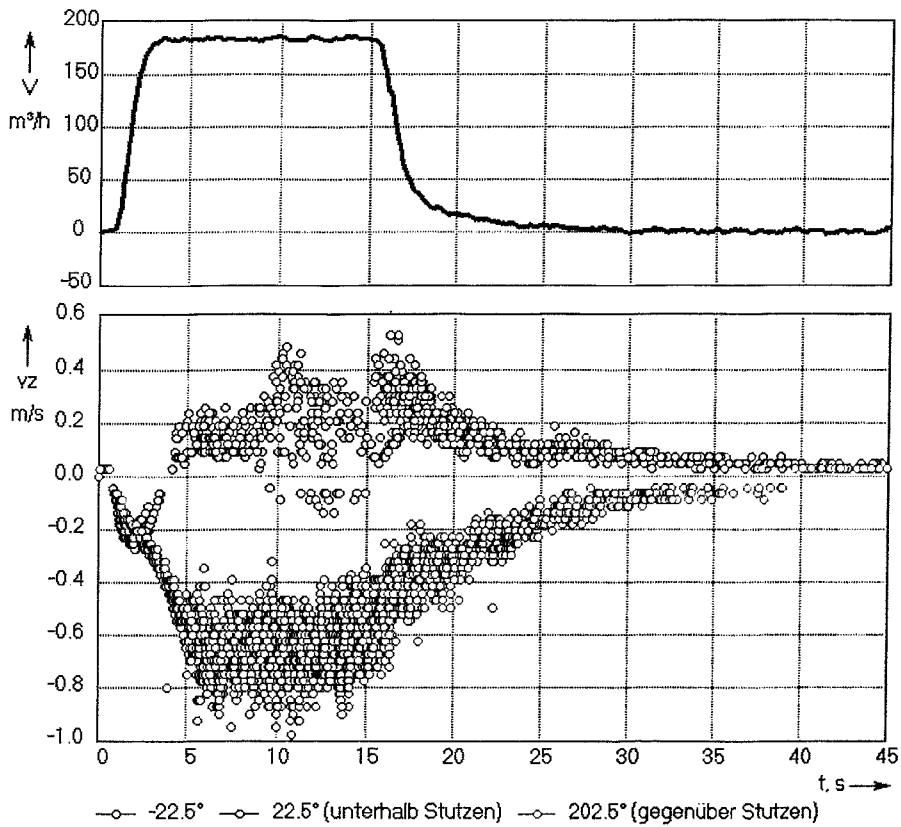


Abb. 20 Ergebnisse der Ensemble-Mittlung für 10 sprungförmige Pumpenanstöße, Durchsatzverlauf in der Schleife und Geschwindigkeitsmessung an ausgewählten azimuthalen Positionen am Ende des Downcomers

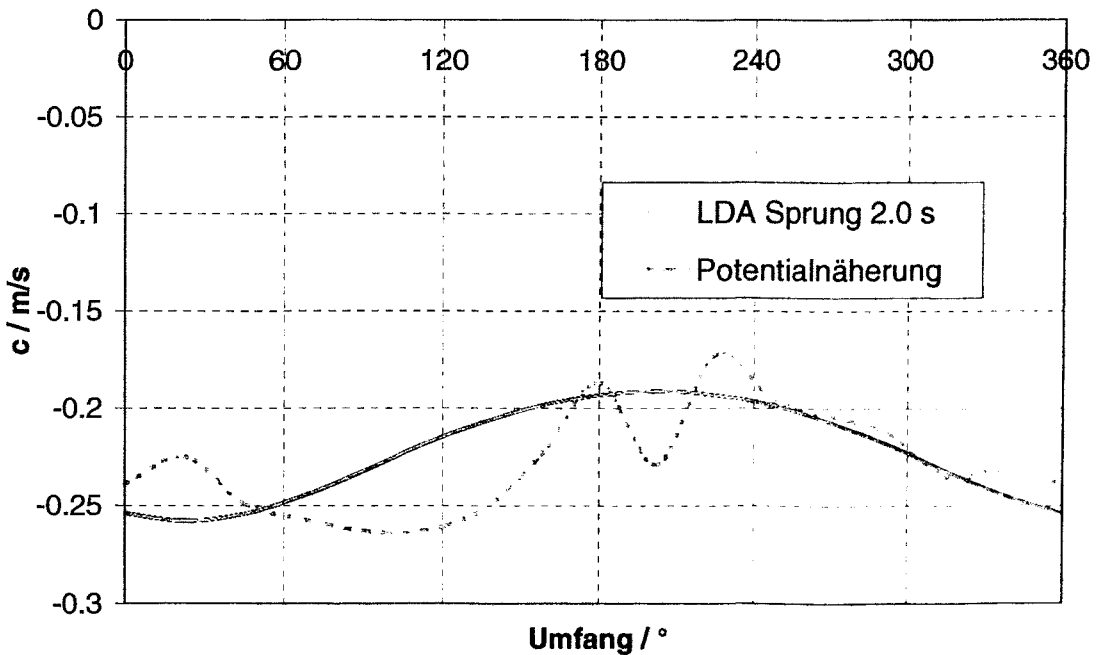


Abb. 21 Evolution der azimuthalen Geschwindigkeitsverteilungen am Downcomerende im Vergleich zur Potentialnäherung

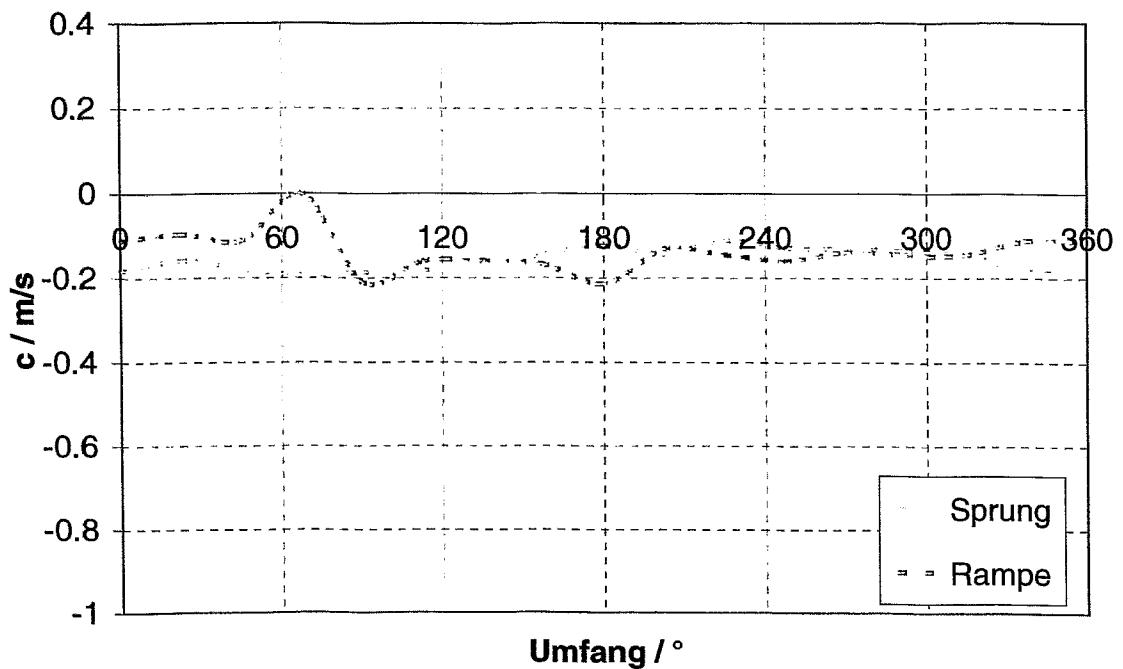


Abb. 22 Anlauf der 1. Pumpe, Vergleich der transienten Geschwindigkeitsfelder am Downcomerende zum Zeitpunkt des Erreichens von 50 % des Nenn-durchsatzes in der Schleife (Rampe: $t = 8.5$ s, Sprung: $t = 1.5$ s)

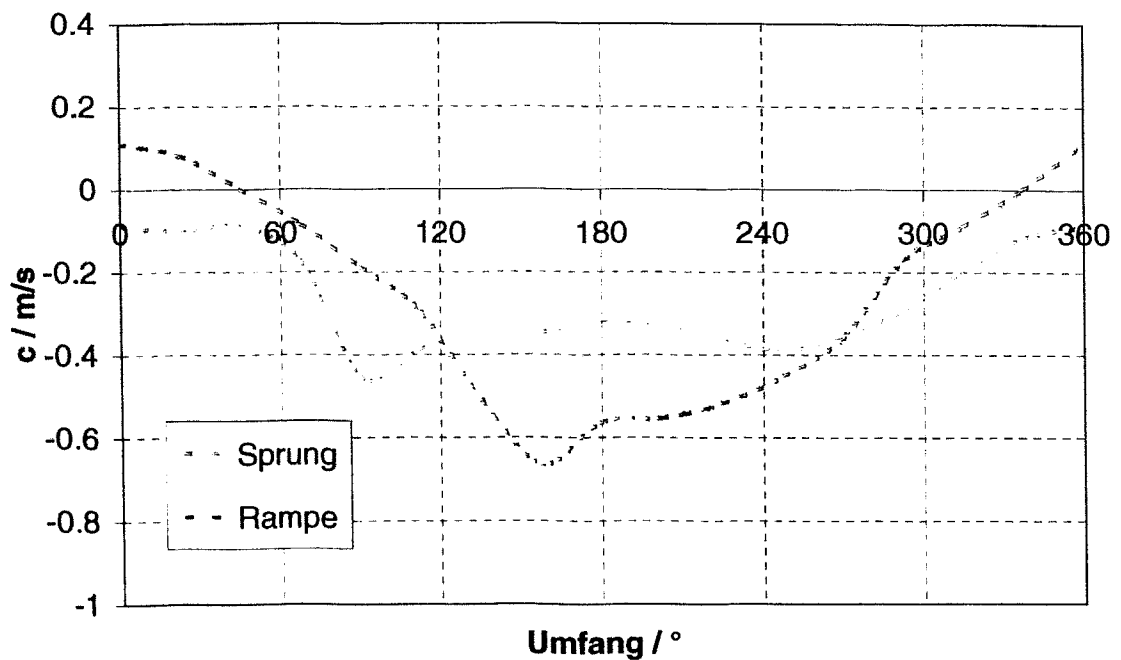


Abb. 23 Anlauf der 1. Pumpe, Vergleich der transienten Geschwindigkeitsfelder am Downcomerende zum Zeitpunkt des Erreichens von 100 % des Nenn-durchsatzes in der Schleife (Rampe: $t = 15.0$ s, Sprung: $t = 3.5$ s)

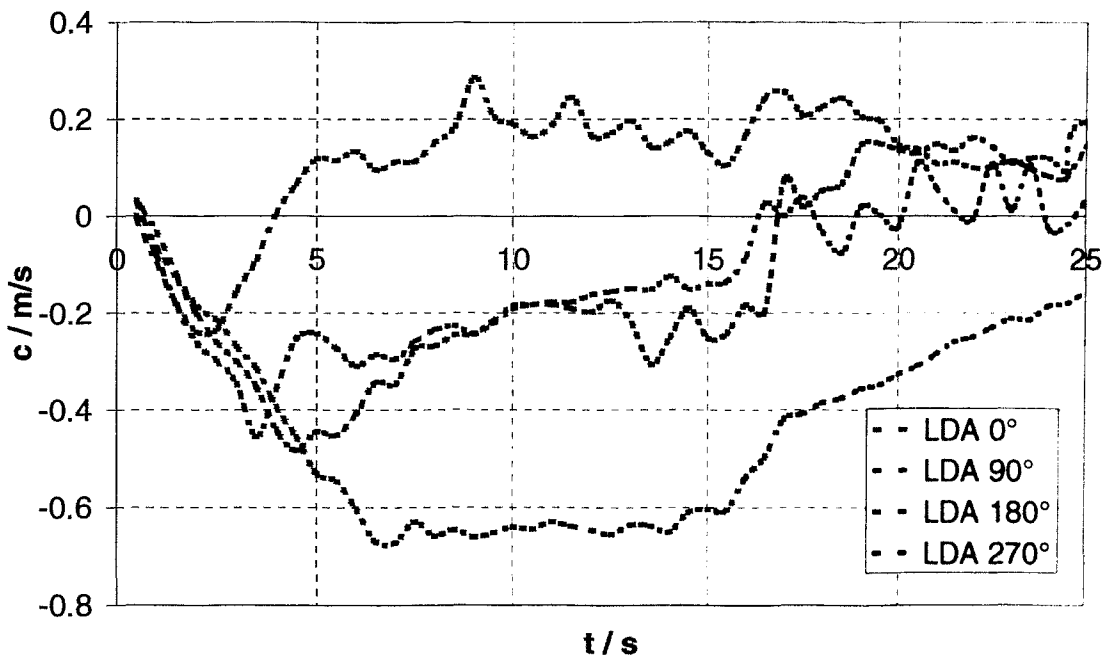
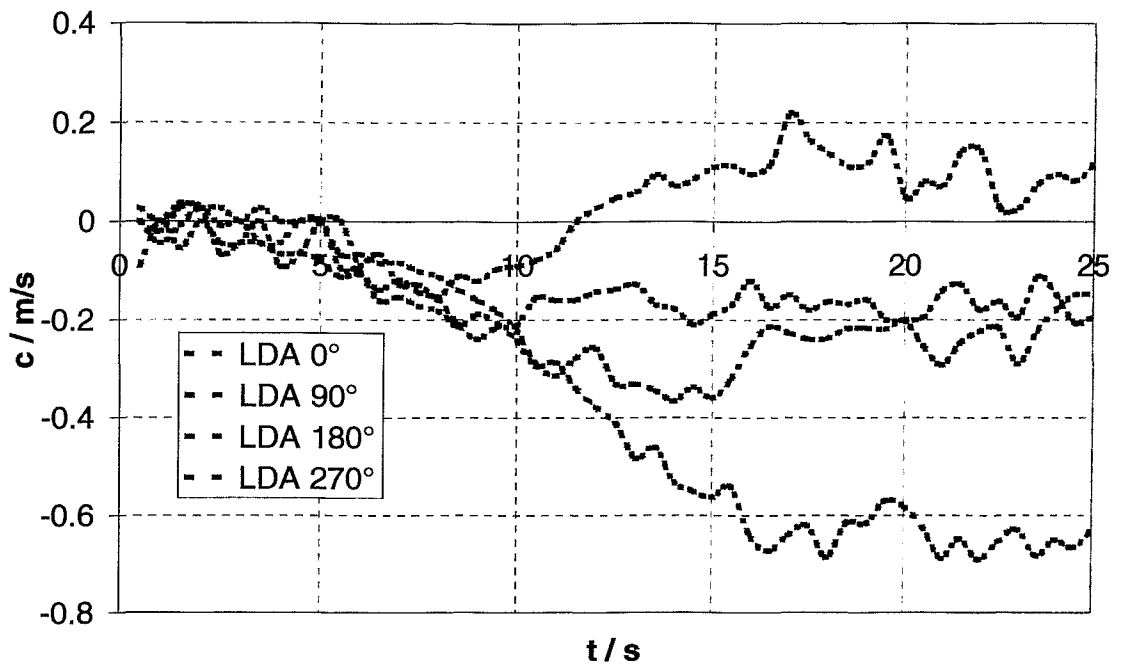


Abb. 24 Anlauf der 1. Pumpe, Vergleich der transienten Geschwindigkeitsfelder am Downcomerende, Rampe (oben)-Sprung (unten)

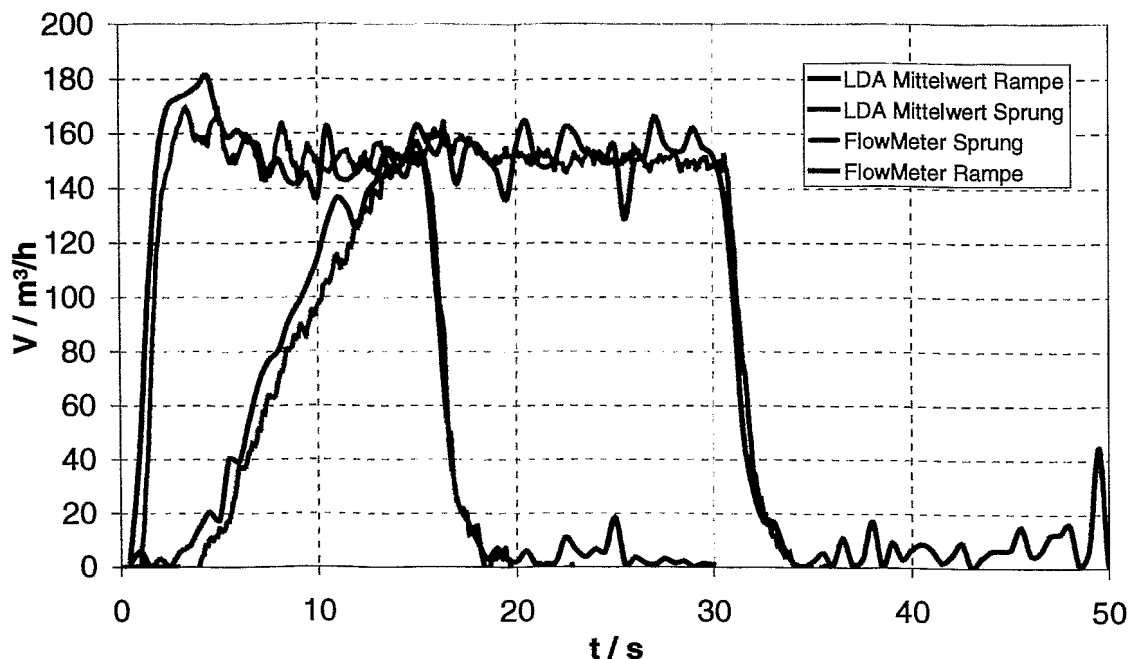


Abb. 25 Vergleich der gemittelten LDA-Meßdaten am Downcomerende mit FlowMeter-Schleifenmeßdaten (reduziert um die Rückströme durch die restlichen Schleifen) für Sprung und Rampe

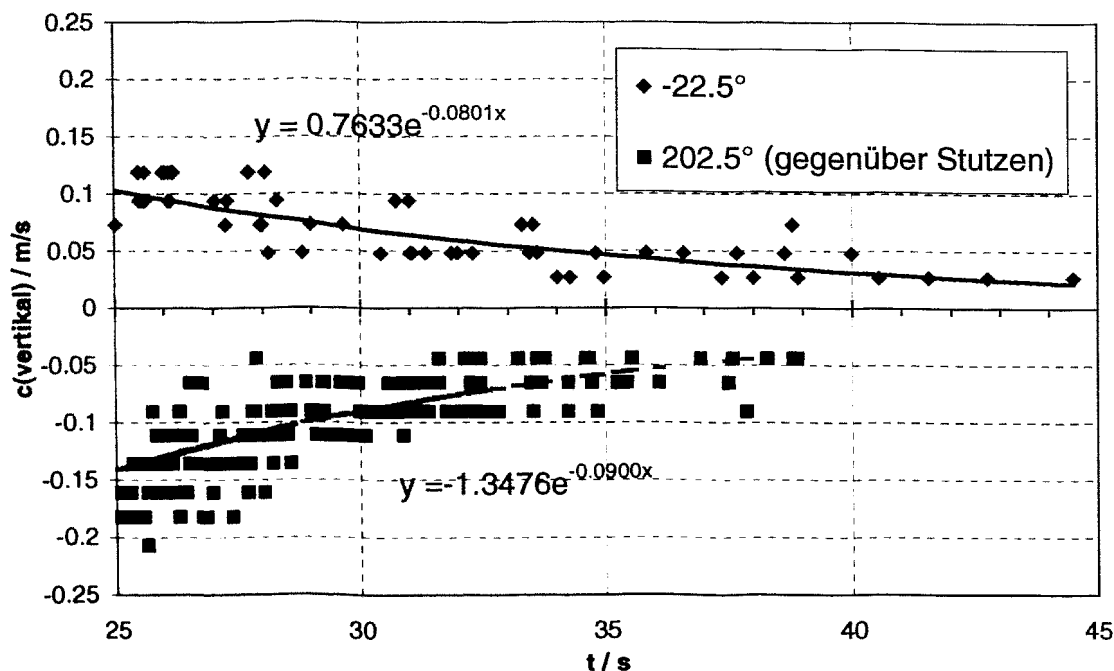


Abb. 26 Abnehmende Flanke der LDA-Meßdaten für die Downcomerpositionen 22.5° und 202.5°

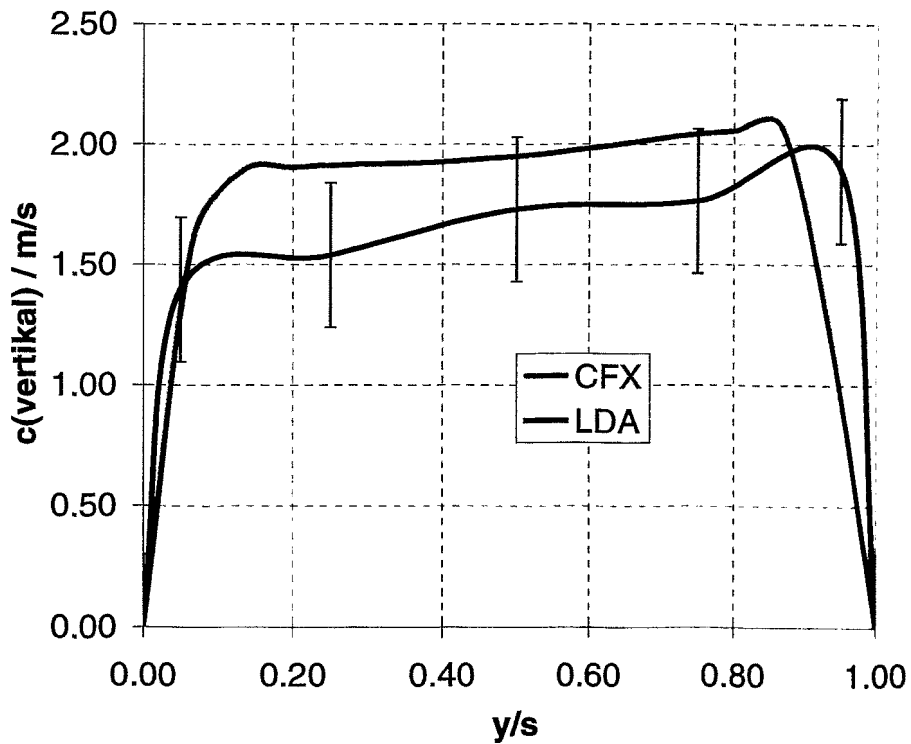
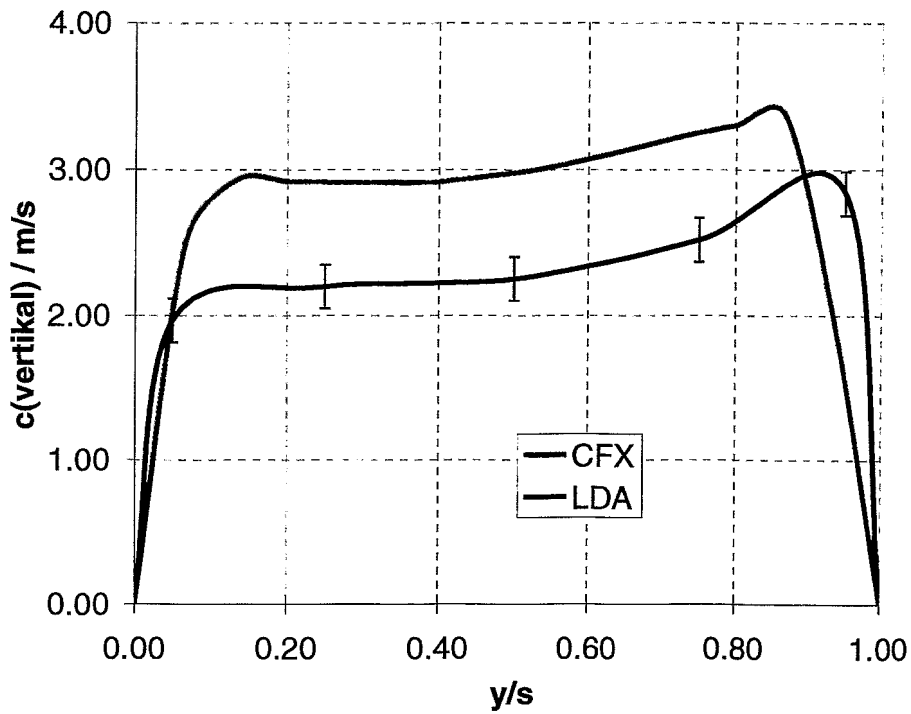


Abb. 27 Vergleich der Strömungsprofile über dem Querschnitt des Downcomers, Vierschleifenbetrieb $250 \text{ m}^3/\text{h}$ oben, $150 \text{ m}^3/\text{h}$ unten, 0° azimuthale Position