

## Dreidimensionale LDV in der Umgebung gleichsinnig rotierender Doppelschneckenelemente

### THREE-DIMENSIONAL LDV IN THE VICINITY OF CO-ROTATING TWIN-SCREW ELEMENTS

**J. Stock, G. Böhme**

Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, Institut für Mechanik, Professur für Strömungsmechanik, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Dreidimensionale LDV, Doppelschneckenextruder, kinematische Reversibilität  
Three-dimensional LDV, twin-screw extruder, kinematic reversibility

#### Zusammenfassung

Engkämmende Gleichdralldoppelschneckenextruder werden in der Kunststoff- und der Lebensmittelindustrie zur Verarbeitung hochviskoser Flüssigkeiten eingesetzt. Bei sehr kleinen REYNOLDSzahlen können in voll gefüllten Förderzonen aufgrund der kinematischen Reversibilität beachtenswerte Symmetrien im Strömungsfeld prognostiziert werden, wenn NEWTONsches Fluidverhalten vorausgesetzt werden kann. In dieser Arbeit wird ein Modelldoppelschneckenmischer vorgestellt, der aufgrund ebener Gehäusewände dreidimensionale LDV ohne Brechungsindexanpassung zulässt und gleichzeitig die für die Symmetrien im Strömungsfeld notwendigen geometrischen Randbedingungen erfüllt. Die Geschwindigkeitsmessungen an ausgewählten, korrespondierenden Punkten bestätigen die theoretisch begründeten Zusammenhänge im Strömungsfeld.

#### Einleitung

Schneckenmaschinen werden in der Kunststoff-, der Kautschuk- und der Lebensmittelindustrie in vielfältiger Weise eingesetzt. Sie funktionieren im Prinzip wie eine ARCHIMEDISSche Schneckenpumpe. Anfangs wurden einwellige Schneckenextruder hauptsächlich zum Fördern von Schüttgütern und zähen Flüssigkeiten verwendet. Heute existiert eine große Zahl verschiedener, auch mehrwelliger Extruderarten. Eine besondere Stellung nimmt dabei der dicht kämmende Gleichdralldoppelschneckenextruder ein, der eine Reihe vorher einzeln durchgeführter Prozessschritte zusammenfasst. Seine ein- oder mehrgängigen Schnecken sind so geformt, dass sie sich in jeder Drehwinkelstellung berühren bzw. ein maschinentechnisch notwendiges, konstantes Spiel zwischen ihnen vorliegt, so dass sie sich gegenseitig abschaben und damit selbstreinigend wirken. Neben den genannten Aufgaben sind typische Funktionen das Aufschmelzen von Feststoffen, das Ein- und Vermischen von Füllstoffen, das Dispergieren von Farbstoffen sowie das Homogenisieren des Fördergutes. Je nach Aufgabenstellung werden dazu neben den Förderschnecken verschiedene Werkzeuge wie zum Beispiel Knet- oder Mischelemente miteinander kombiniert. Vor dem Austragen, dem Extrudieren durch ein Formwerkzeug, befindet sich in der Regel eine vollgefüllte Druckaufbauzone. Wirkmechanismen, verfahrenstechnische und maschinenbauliche Aspekte sowie die geometrischen Eigenschaften der Schneckenprofile von Gleichdralldoppelschneckenelementen werden in der Literatur ausführlich beschrieben (Hensen 1989; White 1991; Kohlgrüber 2007).

Für ein gutes Verständnis des Extrusionsprozesses ist es notwendig, neben der Kenntnis integraler Betriebsgrößen, wie dem Durchsatz oder der notwendigen Leistung, detaillierte Informationen über lokale Strömungsgrößen, also das Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld zu gewinnen. Analytische Untersuchungen einer vollgefüllten Förderzone führen bei schleichenden Strömungen NEWTONScher Flüssigkeiten unter Berücksichtigung der kinematischen Reversibilität zu Symmetrieprognosen für das Druck- und das Geschwindigkeitsfeld (Böhme 1995). Numerische Untersuchungen stützen diese theoretischen Prognosen (Pokriefke 2005). Ihre experimentelle Überprüfung durch Geschwindigkeitsmessungen ist bisher nicht durchgeführt worden. Bei bisherigen Arbeiten wurde an realitätsnahen Doppelschneckenextrudern mit zylinderförmigen Gehäusewänden zweidimensionale LDV eingesetzt (Karwe 1996; Yerramilli 2004). Dabei spielten jedoch Symmetriebetrachtungen keine Rolle. Aufgrund der gekrümmten Wände können dort dreidimensionale Messungen ohne Brechungsindexanpassung nicht durchgeführt werden. In dieser Arbeit wird ein Extrudermodell vorgestellt, dessen Gehäuse aus ebenen, rechteckigen Plexiglasplatten besteht und, von der Verschiebung des Messvolumens abgesehen, eine ungestörte dreidimensionale LDV ermöglicht.

## Versuchsaufbau und Theorie

Die in dem Extrudermodell eingesetzten Schneckenelemente sind eingängig und haben 1,5 Windungen. Der Plexiglasbehälter wird mit einem Deckel abgeschlossen, der einen axialen Massenstrom verhindert. Insofern ist das Modell besser als Doppelschneckenmischer denn als Doppelschneckenextruder zu bezeichnen. Eine Kapillarbohrung im Deckel verhindert, dass der Druck unkontrolliert ansteigt. Abbildung 1 zeigt einen Stirnschnitt und Abbildung 2 eine perspektivische Ansicht des Modells. Die wichtigsten geometrische Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Geometrische Parameter des Doppelschneckenmischers

Schneckeninnendurchmesser	27 mm
Schneckenaußendurchmesser	139 mm
Achsabstand	84 mm
Gangsteigung	140 mm
Schneckenhöhe	210 mm
Behälterhöhe	214 mm
Behälterbreite	200 mm
Spiel an Boden/Deckel	2 mm
Spiel zwischen den Schnecken	1 mm
Spiel zur Gehäusewand	1 mm

Als NEWTONSches Modellfluid wird ein Silikonöl mit einer kinematischen Viskosität von  $\nu = 0,02 \text{ m}^2/\text{s}$  verwendet. Die REYNOLDSzahl wird mit dem Schneckenaußendurchmesser  $D$  und der Umfangsgeschwindigkeit  $\pi n D$  gebildet:

$$Re = \frac{\pi n D^2}{\nu}. \quad (1)$$

Bei der gewählten Drehzahl von  $n = 0,25 \text{ s}^{-1}$  beträgt sie 0,76. Für die im Anschluss aufgestellten Symmetrieprognosen werden damit folgende notwendige Voraussetzungen erfüllt:

- Die Strömung ist einphasig, d.h. der Apparat ist vollständig gefüllt und weist keine freien Oberflächen auf.
- Das Fluid haftet an allen benetzten Rändern.

- Die Schnecken drehen sich um parallele, raumfeste Achsen.
- Das Gehäuse ist in einem geeignet gewählten kartesischen Koordinatensystem bezüglich aller drei Ebenen symmetrisch.
- Das Strömungsfeld ist zeitlich periodisch mit einer vollen Schneckenumdrehung.
- Das hydraulische und das thermische Problem sind nur einseitig gekoppelt.

Unter diesen Bedingungen sind im Geschwindigkeitsfeld bezüglich des in Abbildung 1 gewählten Koordinatensystems die räumlich-zeitlichen Reziprozitätsbeziehungen

$$u(x, -y, -z, -\alpha) = -u(x, y, z, \alpha), \quad (2)$$

$$v(x, -y, -z, -\alpha) = v(x, y, z, \alpha), \quad (3)$$

$$w(x, -y, -z, -\alpha) = w(x, y, z, \alpha) \quad (4)$$

zu erwarten, wobei  $\alpha$  den Schneckendrehwinkel bezeichnet (Böhme 1995). Zur Validierung dieser theoretischen Prognosen sind dreidimensionale Geschwindigkeitsmessungen an ausgewählten korrespondierenden Punkten durchgeführt worden. Das dazu verwendete LDV-System wird wie in anderen Arbeiten im Seitstreuverfahren betrieben (Derksen 1999, Leitner 2001). Damit ist sichergestellt, dass sich die Messvolumina der 2-D-Optik und der 1-D-Optik an der gleichen Position befinden. Die Brennweite beträgt 400 mm; die durch die drei Strahlenpaare der Wellenlängen 514,5 nm, 488 nm und 476,5 nm erzeugten Messvolumina haben jeweils eine Länge von ca. 3,5 mm und einen Durchmesser von ca. 0,1 bis 0,2 mm, wobei der Einfluss der unterschiedlichen Brechungsindizes von Plexiglas und Silikonöl schon berücksichtigt ist. Die Zuordnung der einzelnen Messwerte erfolgt über einen mit einer Schneckenwelle verbundenen Drehgeber. Wie aus Abbildung 1 zu entnehmen ist, wird wegen der unterschiedlichen Orientierung des Doppelschneckenmischers und des LDV-Systems nur die  $w$ -Komponente der Geschwindigkeit direkt gemessen, während statt  $u$  und  $v$ , die in Richtung der Koordinatenachsen zeigen, die parallel zu den Gehäusewänden verlaufenden Komponenten  $u^*$  und  $v^*$  ermittelt werden. Anstelle der Gleichungen 2 und 3 lassen sich jedoch äquivalente "gemischte" Beziehungen zwischen diesen Komponenten formulieren:

$$v^*(x, -y, -z, -\alpha) = u^*(x, y, z, \alpha) \quad (5)$$

$$u^*(x, -y, -z, -\alpha) = v^*(x, y, z, \alpha). \quad (6)$$

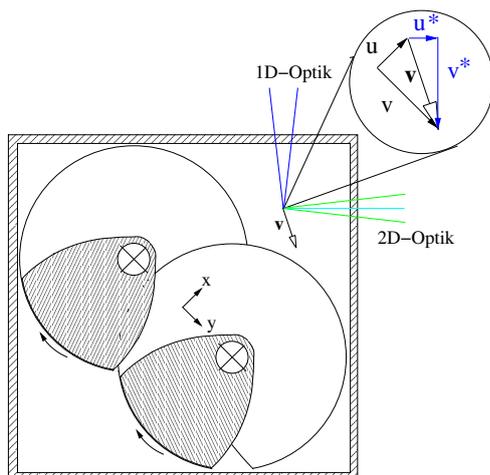


Abb. 1: Schnittansicht des Doppelschneckenmischers bei  $z = 0$  und  $\alpha = 0$  und Anordnung der LDV-Optiken. In der Vergrößerung wird der Zusammenhang zwischen den gemessenen und den der Theorie zugrunde liegenden Geschwindigkeitskomponenten verdeutlicht.

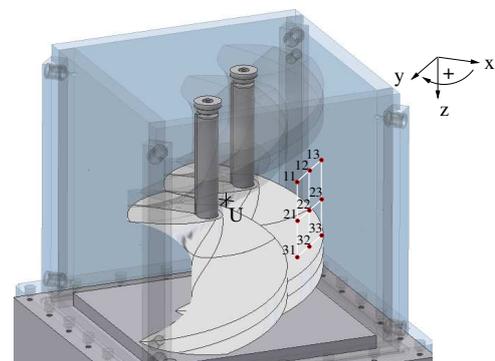


Abb. 2: Perspektivische Darstellung des Doppelschneckenmischers (ohne Deckel). Der Ursprung  $U$  des Koordinatensystems befindet sich zwischen den Schneckenachsen auf halber Schneckenhöhe, d.h. in der Mitte des quaderförmigen Behälters. Der obere Teil der Schnecken ist transparent dargestellt.

## Ergebnisse

Die im Folgenden gezeigten Messergebnisse wurden an fünf verschiedenen Punkten ermittelt, deren Positionen aus der in Abbildung 2 eingezeichneten 3x3-Matrix sowie aus den in Tabelle 2 angegebenen Koordinaten hervorgehen.

Tab. 2: Koordinaten der Messpositionen

Position	$x$ [mm]	$y$ [mm]	$z$ [mm]
11	89,3	10,0	-35,0
13	89,3	-10,0	-35,0
21	89,3	10,0	0
22	89,3	0	0
23	89,3	-10,0	0
31	89,3	10,0	35,0
33	89,3	-10,0	35,0

Die Messpositionen befinden sich alle außerhalb des von den Schneckenkämmen überstrichenen Bereichs, so dass für den gesamten Drehwinkelbereich Geschwindigkeitssignale im Fluid gemessen werden können. Die Geschwindigkeitskomponenten  $c$  werden auf die Umfangsgeschwindigkeit der Schneckenkämme bezogen und sind damit dimensionslos.

Abbildung 3 zeigt die Verläufe der drei Geschwindigkeitskomponenten in Abhängigkeit vom Drehwinkel  $\alpha$  an der Position 22, die sich bei  $y = 0$  und  $z = 0$  befindet. Der Verlauf von  $w$  ist zu sich selbst symmetrisch, das heisst, dass er sich ausgehend von  $\alpha = 0$  für ein Vorwärtsdurchlaufen des Winkels genauso verhält, wie wenn er ausgehend von  $\alpha = 2\pi$  rückwärts durchlaufen wird. Damit wird der durch Gleichung 4 beschriebene Zusammenhang bestätigt und veranschaulicht. Auch für die beiden anderen Geschwindigkeitskomponenten bestätigen sich die Symmetrieprognosen an dieser Position:  $u^*$  nimmt, passend zu Gleichung 5, bei vorwärts durchlaufenem  $\alpha$  die gleichen Werte an wie  $v^*$  bei rückwärts durchlaufenem  $\alpha$ ; auf die gleiche Art wird auch Gleichung 6 verifiziert. Auch außerhalb der Symmetrieachse sind die experimentell ermittelten Geschwindigkeitsverläufe mit den Prognosen im Einklang: Aus Abbildung 4 lässt sich die reziproke Korrespondenz zwischen den Verläufen von  $w$  an den Positionen 11 und 33 bzw. an den Positionen 13 und 31 deutlich ablesen, und Abbildung 5 bestätigt wiederum den Zusammenhang von Gleichung 5 zwischen  $u^*$  an den Positionen 11, 21 und 31 und  $v^*$  an den Positionen 33, 23 und 13.

Unter Ausnutzung der nunmehr experimentell bestätigten Symmetrien im Geschwindigkeitsfeld ergibt sich ein weiterer bemerkenswerter Zusammenhang: Gemäß Abbildung 1 lassen sich  $u$  und  $v$  an jeder Position  $x, y, z$  und bei jeder Winkelstellung  $\alpha$  über

$$u = (u^* - v^*)/\sqrt{2}, \quad (7)$$

$$v = (u^* + v^*)/\sqrt{2} \quad (8)$$

berechnen. Mit Gleichung 5 und Gleichung 6 folgt

$$v(x, y, z, \alpha) = (v^*(x, y, z, \alpha) + v^*(x, -y - z, -\alpha))/\sqrt{2}, \quad (9)$$

$$u(x, y, z, \alpha) = (v^*(x, -y, -z, -\alpha) - v^*(x, y, z, \alpha))/\sqrt{2}. \quad (10)$$

Demnach können die kartesischen Komponenten  $u$  und  $v$  aus Daten der messbaren Komponente  $v^*$  zusammengesetzt werden. Es genügt also eine zweidimensionale LDV an korrespondierenden Positionen, um die Informationen über alle drei Geschwindigkeitskomponenten zu gewinnen, was zu einer erheblichen Verringerung des Messaufwands führt. Der in Abbildung 6 durchgeführte Vergleich von Ergebnissen dieser Methode mit denen aus dreidimensionalen Messungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

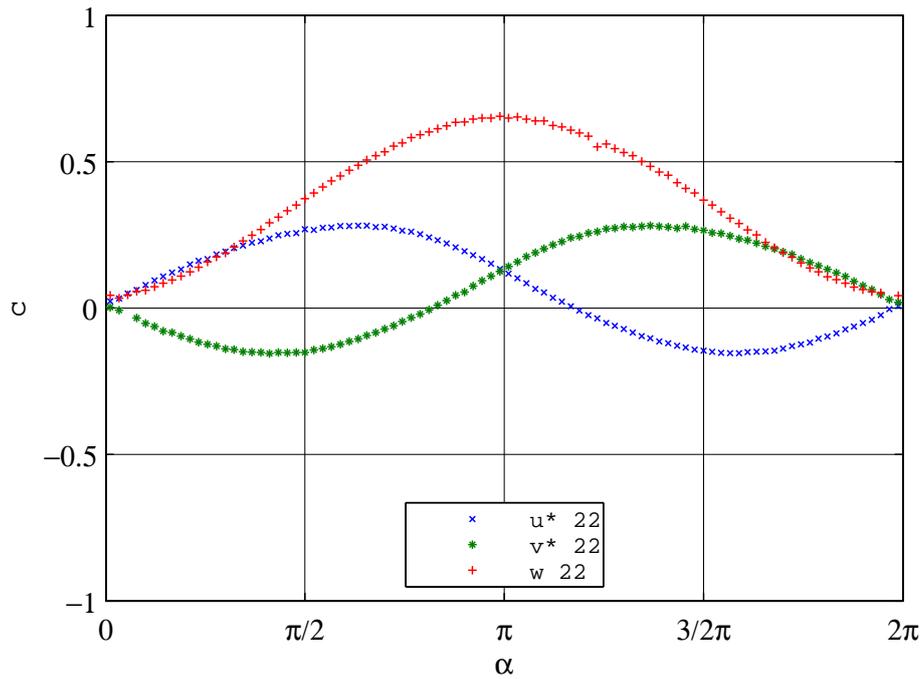


Abb. 3: Verläufe von  $u^*$ ,  $v^*$  und  $w$  in Abhängigkeit des Drehwinkels  $\alpha$  bei Position 22.

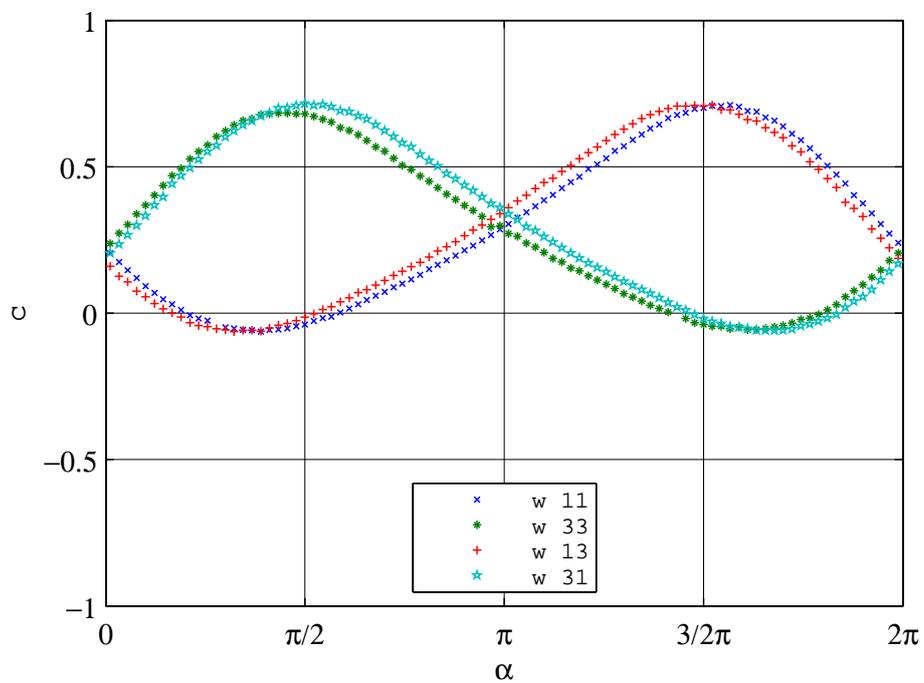


Abb. 4: Verlauf von  $w$  in Abhängigkeit von  $\alpha$  an Punkten außerhalb der Symmetrieachse.

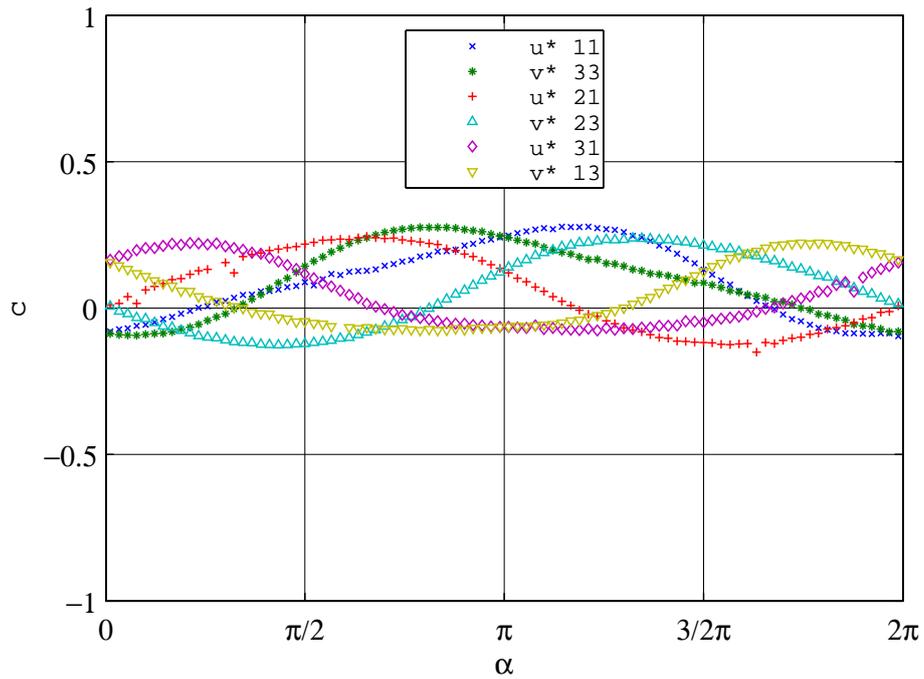


Abb. 5: Verläufe von  $u^*$  und  $v^*$  in Abhängigkeit von  $\alpha$  an Punkten außerhalb der Symmetrieachse.

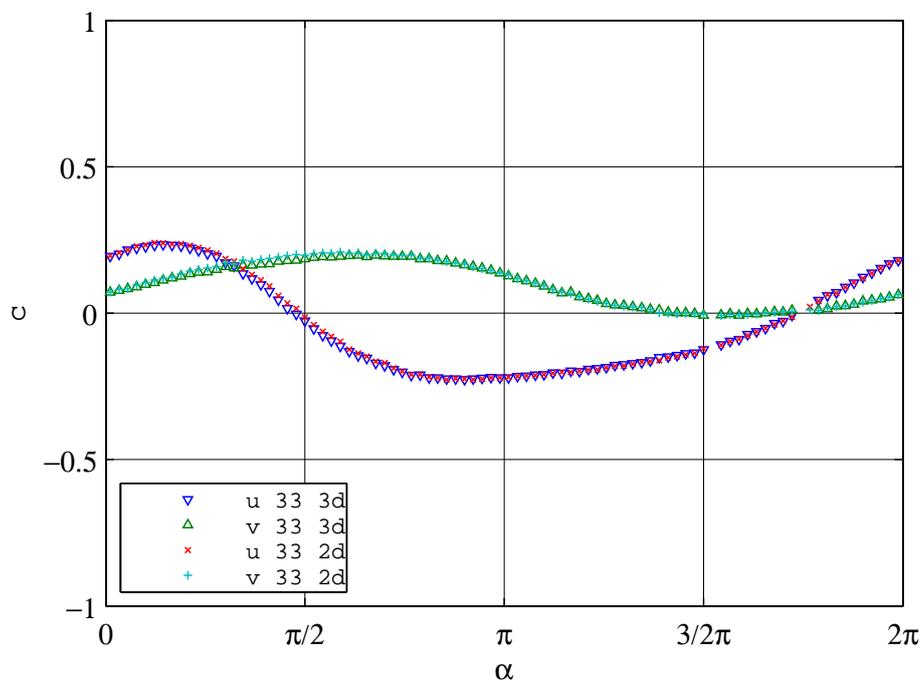


Abb. 6: Vergleich der Ergebnisse einer dreidimensionalen Messung mit aus zweidimensionalen Messdaten gemäß Gleichung 9 und 10 synthetisierten Ergebnissen.

## Fazit und Ausblick

Es wurde ein Doppelschneckenmischer entwickelt, bei dem durch die Verwendung ebener Gehäusewände dreidimensionale LDV eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen bestätigen die räumlich-zeitliche Reziprozität, die für schleichende, NEWTONSche Strömungen im Geschwindigkeitsfeld voll gefüllter Förderzonen theoretisch prognostiziert wird. Durch die Ausnutzung der Symmetrien kann der messtechnische bzw. der numerische Aufwand zur Untersuchung des Strömungsfeldes reduziert werden. Es konnte gezeigt werden, dass zweidimensionale Messungen an geometrisch korrespondierenden Positionen genügen, um dort alle drei Geschwindigkeitskomponenten zu ermitteln. Obwohl der Doppelschneckenmischer sich geometrisch von realen Doppelschneckenextrudern unterscheidet, sind die für das Geschwindigkeitsfeld nachgewiesenen Zusammenhänge übertragbar. Zukünftig soll überprüft werden, ob sich derartige Korrespondenzen auch für das Druckfeld nachweisen lassen. Außerdem sollen die Geschwindigkeitsmessungen mit einer makromolekularen Flüssigkeit an den gleichen Positionen wiederholt werden, um den Einfluss nichtNEWTONscher Stoffeigenschaften auf das Strömungsfeld zu untersuchen.

## Literatur

Böhme, G., 1995: "Theoretische Betrachtungen über schleichende Strömungen in Schneckenmaschinen", Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. J. Siekmann, Uni-GH Essen, pp. 27-40

Derksen, J.J., M.S. Doelman, H.E.A. Van Den Akker, 1999: "Three-dimensional LDA Measurements in the Impeller Region of a Turbulently Stirred Tank", Experiments in Fluids, Vol. 27, pp. 522-532

Hensen, F. (Herausgeber), 1989: "Handbuch der Kunststoffextrusionstechnik, Band 1", Carl Hanser Verlag, München, Wien

Karwe, M.V., V. Sernas, 1996: "Application of Laser Doppler Anemometry to measure Velocity Distribution inside the Screw Channel of a Twin-Screw Extruder", Journal of Foodprocessing and Engineering, Vol. 19, pp. 135-152

Kohlgrüber, K. (Herausgeber), 2007: "Der gleichläufige Doppelschneckenextruder", Carl Hanser Verlag, München

Leitner, M., 2001: "Dreidimensionale Laser-Doppler-Velocimetry zur Analyse der Strömung in statischen Mischelementen", VDI-Verlag, Düsseldorf

Pokriefke, G., 2005: "Numerische Analyse reibungsbehafteter Strömungen in teilgefüllten Extrudern", Berichte aus dem Institut für Mechanik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

White, J.L., 1991: "Twin Screw Extrusion: Technology and Principles", Carl Hanser Verlag, München, Wien, New York

Yerramilli, L., M.V. Karwe, 2004: "Velocity Distribution and Mixing in the Translational Regions of a Kneading Section in a Co-Rotating Twin-Screw Extruder", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 82, No. C1, pp. 5-12