

# **Transport- und Mischeigenschaften im Mehrwellen-Hochleistungsreaktor TFR**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Dietmar Becker  
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 11. Dezember 2003

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred H. Pahl

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Helmut Potente



Schriftenreihe der Verfahrenstechnik Universität Paderborn

Band 28

**Dietmar Becker**

**Transport- und Mischeigenschaften  
im Mehrwellen-Hochleistungsreaktor TFR**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2004

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2004

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3002-5

ISSN 1435-1137

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik der Universität Paderborn.

Besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M.H. Pahl für die Überlassung des Themas und die zahlreichen Anregungen während der Bearbeitungszeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Potente danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates.

Das Forschungsprojekt wurde in enger wissenschaftlicher Zusammenarbeit mit der BASF AG, Ludwigshafen, bearbeitet, die die beiden Versuchsanlagen und einen Teil der Messgeräte zur Verfügung stellte. Besonders sei an dieser Stelle Herrn H. Bobbink und Herrn Dr. H. Thiele für die umfangreiche Unterstützung gedankt.

Ebenso bedanke ich mich bei der Berstorff GmbH, Hannover, namentlich bei den Herren M. Behling, G. Scheel und Dr. T. Winkelmann, für die vielen Hinweise und Informationen. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn, danke ich für die finanzielle Förderung des Projekts.

Weiterer Dank gilt der BASF AG, Ludwigshafen, und der Cerestar Deutschland GmbH, Krefeld, für die Überlassung des Versuchsguts.

Ich danke allen Mitarbeitern und Hilfskräften der Paderborner Verfahrenstechnik für die gute Zusammenarbeit und die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Ich danke meinen Eltern dafür, dass sie mir die Ausbildung ermöglichten und meine Arbeit stets mit großem Interesse begleiteten. Abschließend bedanke ich mich bei meiner Frau Ingeborg für ihre Geduld und die unermüdliche Unterstützung besonders in der Endphase der Arbeit.

Bad Driburg, im Juni 2004

Dietmar Becker

Meiner Familie.

**Teilergebnisse dieser Arbeit wurden an folgender Stelle veröffentlicht:**

- 1 Pahl, M.H. Transport- und Mischeigenschaften im neuartigen Hochleistungsreaktor.  
Becker, D. Zwischenbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Pa 276/24-1,  
Paderborn, 1999.
- 2 Pahl, M.H. Transport- und Mischeigenschaften im neuartigen Hochleistungsreaktor.  
Becker, D. Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Pa 276/24-2,  
Paderborn, 2002.
- 3 Becker, D. Grauwertanalyse, theoriekonforme Anwendung und Einsatzgrenzen beim  
Pahl, M.H. kontinuierlichen Mischen hochviskoser Flüssigkeiten.  
Vortrag auf der VDI-GVC Fachausschuss-Sitzung "Mischvorgänge",  
Hameln, 04.05.1999.
- 4 Becker, D. Transport- und Mischvorgänge im Mehrwellen-Hochleistungsreaktor.  
Pahl, M.H. Vortrag auf der VDI-GVC Fachausschuss-Sitzung "Mischvorgänge",  
Wernigerode, 01.03.2001.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b> .....	<b>XII</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einführung und Aufgabenstellung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Mehrwellen-Hochleistungsreaktor TFR</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Aufbau und Funktionsweise</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2 Geometrie der Schnecken, des Schneckenbündels und der Gehäuse</b> .....	<b>13</b>
2.2.1 Schneckenprofile .....	13
2.2.2 Schneckengänge .....	15
2.2.3 Schneckenoberfläche .....	21
2.2.4 Geometrie des Schneckenbündels und der Gehäuse .....	22
2.2.5 Geometrische Daten bisher realisierter Maschinen .....	27
<b>2.3 Fördermodell</b> .....	<b>28</b>
2.3.1 Schmelzeförderkapazität .....	28
2.3.2 Druckaufbau und Materialaustrag .....	32
2.3.2.1 Druckströmung in Schneckenkanälen und Zwickeln. ....	33
2.3.2.2 Druckleckströmung .....	37
2.3.2.3 Rückstaulänge .....	40
2.3.3 Schmelze-Inhalt des Reaktors .....	41
2.3.3.1 Schmelze-Inhalt und Füllgrade .....	41
2.3.3.2 Förderfüllgrad und optischer Füllgrad im freien Schneckenkanal. ....	43
2.3.3.3 Volumetrischer Füllgrad .....	44
<b>3 Verweilzeit- und Mischgüteuntersuchung</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1 Mischvorgänge in kontinuierlichen Systemen</b> .....	<b>49</b>
<b>3.2 Verweilzeitverteilung</b> .....	<b>52</b>
3.2.1 Kenngrößen .....	52
3.2.2 Auswertung realer Verweilzeitmessungen .....	55
3.2.3 Verweilzeitmodelle .....	56
3.2.3.1 Dispersionsmodell .....	56
3.2.3.2 Zellenmodell .....	60
3.2.3.3 Modellierung durch eine doppelte Weibull-Verteilung .....	63
3.2.4 Modellierung des Verweilzeitverhaltens von Mischerkombinationen .....	64
<b>3.3 Mischgüte</b> .....	<b>65</b>
<b>3.4 Optische Verfahren zur Verweilzeit- und Mischgütemessung</b> .....	<b>69</b>
3.4.1 Lichtabsorptionsmessung .....	70
3.4.1.1 Grundlagen .....	70
3.4.1.2 Zweistrahl-Absorptionsphotometer .....	71
3.4.1.3 CCD-Kamera und Bildverarbeitung .....	73

3.4.2	Streulichtmessung	82
3.4.2.1	Grundlagen	82
3.4.2.2	Streulichtsensoren	83
<b>4</b>	<b>Versuche</b>	<b>86</b>
4.1	Versuchsanlagen	86
4.2	Versuchsgut	90
4.2.1	Glukosesirup	90
4.2.2	Markierungen	93
4.2.2.1	Lösliche Farbstoffe	93
4.2.2.2	Titandioxid	95
4.3	Versuchsaufbau, -durchführung und -planung	96
4.3.1	Dicke der Entgasungsschicht	96
4.3.2	Druckaufbau und Rückstaulänge	101
4.3.3	Verweilzeitmessungen	102
4.3.4	Mischgüte	106
4.4	Kalibrierung der Messtechnik	108
4.4.1	Schichtdickenmessung	108
4.4.2	ZweistrahlabSORPTIONSPHOTOmeter	109
4.4.3	Streulichtsensoren	110
4.4.4	Videosystem	112
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>117</b>
5.1	Dicke der Entgasungsschicht	117
5.1.1	Reproduzierbarkeit	117
5.1.2	Einfluss der Produktviskosität	119
5.1.3	Einfluss von Durchsatz und Schnecken-Drehfrequenz	119
5.2	Druckaufbau und Rückstaulänge	126
5.3	Verweilzeit	131
5.3.1	Reaktor 1	131
5.3.2	Reaktor 2	138
5.3.2.1	Gesamtreaktor	138
5.3.2.2	Entgasungszone	145
5.3.2.3	Austragzone	150
5.3.3	Vergleich beider Versuchsreaktoren	151
5.4	Validierung des Fördermodells	153
5.5	Mischgüte	154
<b>6</b>	<b>Technische Folgerungen und Ausblick</b>	<b>161</b>

<b>Literatur</b> .....	<b>163</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>172</b>
<b>A.1 Axialer Dispersionskoeffizient und Bodensteinzahl</b> .....	<b>172</b>
<b>A.2 Druckabfall in den Schmelzesammlern der ausgeführten Reaktoren</b> .....	<b>173</b>
<b>A.3 Aufbereitung der Messsignale bei Verweilzeitmessungen in rotierenden Schnecken</b> .....	<b>177</b>
<b>A.4 Teiltransparentes Extrusionswerkzeug</b> .....	<b>182</b>

## Formelzeichen

$A$	-	Absorptionsmaß
$A_{ax}$	$m^2$	Kanalfläche im Axialschnitt
$A_{ax,K,AZ}$	$m^2$	Kanalfläche im Axialschnitt der Austragzone
$A_{ax,K,EZ}$	$m^2$	Kanalfläche im Axialschnitt der Entgasungszone
$A_{ax,Z}$	$m^2$	Zwickelfläche im Axialschnitt
$A_{ax,Z,AZ}$	$m^2$	Zwickelfläche im Axialschnitt der Austragzone
$A_{ax,Z,EZ}$	$m^2$	Zwickelfläche im Axialschnitt der Entgasungszone
$A_{ax,Z,e}$	$m^2$	Fläche eines einzelnen Zwickels im Axialschnitt
$A_{Ds}$	$m^2$	nicht vom Schmelzpool bedeckte Oberfläche des Schneckengangs
$A_F$	-	Absorptionsmaß bei Lichtabsorption durch einen Farbstoff
$A_f$	$m^2$	freier Querschnitt
$A_{f,a}$	$m^2$	freier Querschnitt im Außenbereich
$A_{f,AZ}$	$m^2$	freier Querschnitt in der Austragzone
$A_G$	$m^2$	Querschnitt der Gehäusebohrung
$A_{G,a}$	$m^2$	Querschnitt der Gehäusebohrung im Außenbereich
$A_{GF}$	$m^2$	Phasengrenzfläche
$A_{G,K}$	$m^2$	Gehäuseoberfläche zum Schneckenkanal
$A_K$	$m^2$	Oberfläche des Schneckenkanals
$A_{K,S}$	$m^2$	Kanalquerschnitt bei Bezug auf $D_S$
$A_N$	-	Strahlungsabsorption bei NIR-Spektroskopie
$A_O$	$m^2$	Rotationsfläche
$A_P$	$m^2$	Querschnitt eines einzelnen Schnecke profils
$A_{P,ges}$	$m^2$	Gesamtquerschnitt aller Schneckenprofile im Bündel
$A_{P,ges,a}$	$m^2$	Gesamtquerschnitt aller Schneckenprofile im Außenbereich
$A_{P,i}$	$m^2$	lichtempfindliche Oberfläche einer Zelle auf einem CCD-Chip
$A_{P,S}$	$m^2$	Querschnittsfläche des Schmelzepools bei Bezug auf $D_S$
$A_{pig}$	-	Strahlungsabsorption eines Pigments
$A_R$	$m^2$	Rohrquerschnitt
$A_{Ref}$	-	Strahlungsabsorption einer Referenzprobe
$A_{rot}$	$m^2$	rotierende Fläche
$A_{SO}$	$m^2$	Schneckenoberfläche
$A_{SO,K}$	$m^2$	Schneckenoberfläche zum Schneckenkanal
$A_{SO,K,B}$	$m^2$	Schneckenoberfläche zum Schneckenkanal bei mehr als einer Schnecke
$A_{SO,St}$	$m^2$	Stegoberfläche
$A_s$	-	allgemeines Absorptionsmaß bei Lichtabsorption
$A_{s,F}$	-	allgemeines Absorptionsmaß bei Lichtabsorption durch einen Farbstoff
$A_{s,W}$	-	wahres allgemeines Absorptionsmaß

a	m	realer Achsabstand
a <sub>th</sub>	m	theoretischer Achsabstand
B	m <sup>-3</sup>	Geometriefaktor für die Druckströmung in Rohren
B <sub>AZ</sub>	m <sup>4</sup>	Geometriefaktor für die gesamte Druckströmung in der Austragzone
B <sub>geo,KZ</sub>	m	Geometriefaktor für die Druckströmung in den Schneckenkanälen
B <sub>geo,L</sub>	m	Geometriefaktor für die Druckleckströmung
B <sub>k</sub>	m <sup>-3</sup>	Geometriefaktor für die Druckströmung in den Einzelkanälen
B <sub>S</sub>	m <sup>-3</sup>	Geometriefaktor für die Druckströmung im Schmelzesammler
B <sub>SR</sub>	m <sup>-3</sup>	Geometriefaktor für die Druckströmung im Reaktoraustritt
B <sub>R</sub>	m <sup>-3</sup>	Geometriefaktor für die Druckströmung im Austrittsrohr
b	m	Schneckengangbreite
b <sub>D</sub>	m	Schneckengangbreite am Schneckenaußendurchmesser
b <sub>D*</sub>	m	approximierte Schneckengangbreite am Schneckenaußendurchmesser
b <sub>K</sub>	m	Breite des Strömungskanals im Extrusionswerkzeug
b <sub>M</sub>	m	Breite der Messlinie
b <sub>p,S</sub>	m	Breite des Schmelzepools bei Teilfüllung
b <sub>S</sub>	m	Approximierte Breite des Schneckengangs bei Bezug auf D <sub>S</sub>
b <sub>Sp</sub>	m	Breite des Messspatels bei der Schichtdickenmessung
b <sub>Z,S</sub>	m	Approximierte Gangbreite im Zwickelbereich bei Bezug auf D <sub>S</sub>
Bo	-	Bodensteinzahl
C		Proportionalitätsfaktor
C <sub>Θ</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Proportionalitätsfaktor in der dimensionslosen Verweilzeitverteilung
C <sub>0</sub>	kg s/m <sup>3</sup>	Proportionalitätsfaktor in der Verweilzeitverteilung
C <sub>1</sub>	-	1. WLF-Parameter
C <sub>2</sub>	K	2. WLF-Parameter
c	kg/m <sup>3</sup>	Konzentration
c <sub>F</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Farbstoffkonzentration
c <sub>gl</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Gleichgewichtskonzentration
c <sub>M</sub>	kg/kg	Massenanteil
c <sub>M,i</sub>	kg/kg	Massenanteil der kritischen Komponente in einer einzelnen Probe
c <sub>M,p</sub>	kg/kg	Massenanteil der Partikel in einer Dispersion
c <sub>M,T</sub>	kg/kg	Massenanteil der Trockensubstanz
c <sub>p</sub>	l/m <sup>3</sup>	Anzahl der Partikel pro Volumeneinheit
c <sub>V</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Volumenanteil
c <sub>1...c4</sub>	-	Anpassungsparameter
c <sub>M</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	mittlerer Massenanteil der kritischen Komponente in Stichproben
D	m	Schneckenaußendurchmesser
D <sub>ax</sub>	m <sup>2</sup> /s	axialer Dispersionskoeffizient
D <sub>B</sub>	m	Durchmesser des Schneckenbündels
D <sub>diff</sub>	m <sup>2</sup> /s	Diffusionskoeffizient

$D_G$	m	Gehäusedurchmesser
$D_{K,S}$		Durchmesser des Schwerpunktkreises der Gangprofilkurve
$D_{P,S}$	m	Durchmesser des Schwerpunktkreises des Schmelzepools
$D_S$	m	Durchmesser des Schwerpunktkreises des Gangprofiles
$d$	m	Schneckenkerndurchmesser
$d_{opt}$	m	optische Pfadlänge
$d_p$	m	Partikeldurchmesser
$d_R$	m	Rohrdurchmesser
$E$	-	Lichtextinktion
$e$	m	Schneckenstegbreite
$e_D$	m	Schneckenstegbreite am Schneckenaußendurchmesser
$e_{D^*}$	m	approximierte Schneckenstegbreite am Schneckenaußendurchmesser
$F$	-	Aussagesicherheit
$F_{cd}$	kg/m <sup>2</sup>	Produkt aus Farbstoffkonzentration und optischer Pfadlänge
$f$	-	relativer Fehler
$f_F$	-	Förderfüllgrad
$f_M$	Hz	Messfrequenz
$f_{OF}$	-	relative Oberflächenbedeckung
$f_{opt}$	-	optischer Füllgrad
$f_p$	-	Formfaktor der Druckströmung
$f_{p,K}$	-	Formfaktor der Druckströmung im freien Schneckengang
$f_{p,Z}$	-	Formfaktor der Druckströmung im Zwickelbereich
$f_r$	-	relativer Fehler
$f_S$	-	Formfaktor der Schleppestromung
$f_V$	-	volumetrischer Füllgrad
$GW$	-	Grauwert
$GW_i$	-	Grauwert für eine einzelne Zelle eines CCD-Chips
$GW_{OS}$	-	Offset-Grauwert
$GW_0$	-	Grauwert für ein farbstofffreies Lösungsmittel
$g_S$	m	Gangbreite am Schneckengrund bezogen auf $D_S$
$h$	m	Gangtiefe
$h_K$	m	Höhe des Strömungskanals im Extrusionswerkzeug
$h_{max}$	m	maximale Gangtiefe
$h_{p,S}$	m	Gangkontur des Schmelzepools
$h_S$	m	Schwerpunkthöhe
$h_W$	m	wahre Gangtiefe
$\bar{h}$	m	Gangtiefe eines flächengleichen Rechtecks
$i_{B,th}$	-	theoretische Gangzahl
$i_{B,th,a}$	-	theoretische Gangzahl im Außenbereich des Schneckenbündels

$i_{B,th,i}$	-	theoretische Gangzahl im Innenbereich des Schneckenbündels
$i_{B,S}$	-	Zahl der Stoffströme
$i_{B,S,a}$	-	Zahl der Stoffströme im Außenbereich des Schneckenbündels
$i_{B,S,i}$	-	Zahl der Stoffströme im Innenbereich des Schneckenbündels
$i_G$	-	Gangzahl eines Schneckenelements
$J$	kg/(m <sup>2</sup> s)	Stoffstrom
$j_M$	-	Übersetzung des Motorgetriebes
$j_R$	-	Übersetzung des Reaktorgetriebes
$K$	-	Rührkesseläquivalent
$K_K$	lm/W	Kamerakennzahl
$K_S$	-	Selbstreinigungskennwert
$k$	-	Stichprobenzahl
$k_{SO}$	-	Oberflächenfaktor
$k_{\infty}$	-	maximale Stichprobenzahl
$L$	m	axiale Länge
$L_{AZ}$	m	Länge der Austragzone
$L_b$	m	axiale Gangbreite
$L_{EZ}$	m	Länge der Entgasungszone
$L_F$	m	axiale Flankenbreite
$L_{ges}$	m	Gesamtlänge des Verfahrensteils
$L_i$	m	axiale Länge eines Schneckenabschnitts
$L_M$	m	Position des Messspatels bei der Schichtdickenmessung
$L_m$	m	Einmischlänge
$L_R$	m	Rückstaulänge
$l_i$	m	Länge eines Messlinienabschnitts
$l_M$	m	Länge der Messlinie
$M$	kg	Masse
$M_F$	kg	Farbstoffmasse
$M_G$	-	Mischgütemaß
$M_M$	Nm	Motordrehmoment
$M_P$	kg	Probengröße
$M_{P, \bar{x}, i}$	kg	Masse der kritischen Komponente in einer einzelnen Probe
$M_{\bar{x}}$	kg	Masse der kritischen Komponente im Mischgut
$M_Z$	Nm	Drehmoment der Zahnradpumpe
$\dot{M}_{diff}$	kg/s	Diffusionsmassenstrom
$\dot{M}$	kg/kmol	Molmasse
$m$	-	Zahl der Freiheitsgrade
$m_{dig}$	-	Exponent der Digitalisierung
$m_p$	Nm/Pa	spezifisches Drehmoment

$\bar{m}_{\bar{x}}$	kg	Masse einer Einzelpartikel
N	-	Anzahl
$N_S$	-	Anzahl der Schnecken im Bündel
$n_A$	1/min	Drehfrequenz der Antriebswelle
$n_M$	1/min	Drehfrequenz des Motors
$n_S$	1/min	Drehfrequenz der Schnecken
$n_Z$	1/min	Drehfrequenz der Zahnradpumpe
OS	-	Offset-Einstellung
$P_a$	-	Anteilsummenverteilung der Verweilzeit, Austrittswahrscheinlichkeit
$P_M$	kW	Antriebsleistung des Motors
$P_Z$	kW	Antriebsleistung der Zahnradpumpe
p	Pa	Druck
$p_A$	Pa	Druck am Anfang der Schmelzeleitung
$p_a$	1/s	Anteildichteverteilung der Verweilzeit
$p_{DS}$	Pa	Druck auf der Druckseite einer Pumpe
$p_E$	Pa	Druck am Ende der Schmelzeleitung
$p_k$	Pa	Druck an der Position k im Schmelzesammler
$p_S$	Pa	Druck vor den Schnecken spitzen
$p_{SS}$	Pa	Druck auf der Saugseite einer Pumpe
$p_{vac}$	Pa	Druck im Reaktorinnenraum
$p_{\bar{x}}$	kg/kg	Soll-Massenanteil der kritischen Komponente
Q	lm s	Lichtmenge
$Q_i$	lm s	Lichtmenge, die auf einen Pixel fällt
R	-	Korrelationskoeffizient
Re	-	Reynolds-Zahl
r	m	Abstand zum beleuchteten Volumenelement
$S_{rot}$	m	Länge einer rotierenden Kurve
$S_{K,S}$	m	Länge der Kanalkontur
s		empirische Standardabweichung
$s^2$		empirische Varianz
$s_{Ds}$	m	Stärke der Dünnschicht
$s_{Fl}$	m	Stärke der Dünnschicht auf den Schneckenflanken
$s_{Gr}$	m	Stärke der Dünnschicht auf dem Schnecken grund
$s_{M,abs}$	m	Position der freien Materialoberfläche
$s_{Sn,abs}$	m	Position des Schneckenstegs
$s_{St}$	m	Stärke der Dünnschicht auf den Schneckenstegen
$s_{rel}$	-	relative spektrale Empfindlichkeit eines Empfängers
$s_V$	-	Standardabweichung des Variationskoeffizienten
T	°C	Temperatur

$T_0$	°C	Bezugstemperatur
$t$	s	Zeit
$t_B$	s	Belichtungszeit
$t_G$	m	Gangsteigung
$t_M$	s	Mischzeit
$t_V$	s	Verweilzeit
$t_{V,H}$	s	hydrodynamische Verweilzeit
$t_{V,h}$	s	häufigste Verweilzeit
$\overline{t_0}$	s	Bezugszeitpunkt
$\overline{t_V}$	s	mittlere Verweilzeit
$U$	m	Umfang
$U_{AZ}$	m	Gesamter schneckenseitiger Umfang der Gehäuse in der Austragzone
$U_a$	m	schneckenseitiger Umfang des Außengehäuses
$U_{EZ}$	m	Gesamter schneckenseitiger Umfang der Gehäuse in der Entgasungszone
$U_i$	m	schneckenseitiger Umfang des Innengehäuses
$U_{K,S}$	m	Umfang des Schwerpunktkreises bei Rotationsflächen
$U_R$	m	Umfang eines Strömungskanals
$U_S$	m	Umfang des Schwerpunktkreises bei Rotationskörpern
$U_{St,G}$	m	Mittelwert aus Schnecken- und Gehäuseumfang
$U_{sig}$	V	Signalspannung
$U_{sig,i}$	V	Signalspannung einer einzelnen Zelle
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$V_A$	-	Variationskoeffizient des Absorptionsmaßes
$V_{AZ,t}$	m <sup>3</sup>	Schmelzevolumen im teilgefülltem Abschnitt der Austragzone
$V_c$	-	Variationskoeffizient der Farbstoffkonzentration
$V_{Ds}$	m <sup>3</sup>	Dünnschichtvolumen
$V_{Ds,S}$	m <sup>3</sup>	Dünnschichtvolumen bei Bezug auf $D_S$
$V_{EZ}$	m <sup>3</sup>	Schmelzevolumen im Außenbereich der Entgasungszone
$V_{frei}$	m <sup>3</sup>	freies Volumen
$V_{gef}$	m <sup>3</sup>	gefülltes Volumen
$V_{HM}$	m <sup>3</sup>	Schluckvolumen des Hydraulikmotors
$V_{HU}$	m <sup>3</sup>	Schmelze-Inhalt
$V_K$	m <sup>3</sup>	Volumen des Schneckenkanals
$V_{K,S}$	m <sup>3</sup>	approximiertes Kanalvolumen
$V_L$	-	Variationskoeffizient der Markierung
$V_{Lo}$	m <sup>3</sup>	Volumen der Lösung
$V_M$	-	Variationskoeffizient aufgrund der Messgenauigkeit
$V_m$	-	Variationskoeffizient einer Mischung
$V_{P,S}$	m <sup>3</sup>	approximiertes Volumen des Schmelzepools

$V_p$	$m^3$	Partikelvolumen
$V_R$	$m^3$	Rückstauvolumen
$V_{rot}$	$m^3$	Volumen eines Rotationskörpers
$V_{SF}$	$m^3$	auf die Drehfrequenz der Schnecken bezogene Schmelzeförderkapazität
$V_{Sp}$	$m^3$	Volumen der Spalte
$V_{St,G}$	$m^3$	Volumen zwischen Steg und Gehäuse
$V_t$	-	Variationskoeffizient der Verweilzeitverteilung
$v_{ax}$	$m/s$	Axialgeschwindigkeit
$v_{ax,K}$	$m/s$	Axialgeschwindigkeit in den freien Schneckenkanälen
$v_{ax,Z}$	$m/s$	Axialgeschwindigkeit in den Zwickeln
$v_W$	$m/s$	Strömungsgeschwindigkeit im Beobachtungsspalt des Werkzeugs
$v_0$	$m/s$	Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke
$v_{0,x}$	$m/s$	x-Komponente der Schneckenumfangsgeschwindigkeit
$v_{0,z}$	$m/s$	z-Komponente der Schneckenumfangsgeschwindigkeit
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$\dot{V}_{ax,K}$	$m^3/s$	Axialströmung in freien Schneckenkanälen
$\dot{V}_{ax,L}$	$m^3/s$	axiale Leckströmung im Gehäusespalt
$\dot{V}_{ax,Z}$	$m^3/s$	Axialströmung in Zwickelspalten
$\dot{V}_k$	$m^3/s$	Druckströmung in Einzelkanälen zum Schmelzesammler
$\dot{V}_{Oe}$	$m^3/s$	Volumenstrom des Ölumlaufs
$\dot{V}_p$	$m^3/s$	Druckströmung
$\dot{V}_{p,K}$	$m^3/s$	Druckströmung im freien Schneckenkanal
$\dot{V}_{p,KZ}$	$m^3/s$	Druckströmung im freien Schneckenkanal und Zwickelbereich
$\dot{V}_{p,L}$	$m^3/s$	Druck-Leckströmung
$\dot{V}_{p,Z}$	$m^3/s$	Druckströmung im Zwickelbereich
$\overline{\dot{V}}_{SF}$	$m^3/s$	Schmelzeförderkapazität
$\overline{v}_{ax}$	$m/s$	mittlere axiale Geschwindigkeit
$x$	$m$	Breitenkoordinate
$x_{b,S}$	$m$	Gangbreite bezogen auf den Schwerpunktdurchmesser
$x_{F,S}$	$m$	Flankenbreite bezogen auf den Schwerpunktdurchmesser
$\tilde{x}$	-	normierte Breitenkoordinate
$Z_B$	$m$	Länge des Schneckenkanals bei einem Umlauf um das Schneckenbündel
$Z_{K,S}$	$m$	Länge eines freien Kanalabschnitts
$Z_{Z,S}$	$m$	Länge eines Zwickelabschnitts
$\beta_F$	rad	Flankenwinkel
$\beta_G$	rad	Grundwinkel
$\beta_K$	rad	Kammwinkel
$\beta_S$	rad	realer Eingriffswinkel

$\beta_{S,th}$	rad	theoretischer Eingriffswinkel
$\gamma$	rad	Gehäuseumfangswinkel
$\gamma_a$	rad	Gehäuseumfangswinkel im Außenbereich
$\gamma_i$	rad	Gehäuseumfangswinkel im Innenbereich
$\gamma_G$	rad	Umfangswinkel eines Schneckenkanals
$\gamma_K$	-	Gradation
$\gamma_T$	rad	Teilungswinkel
$\Delta A$	-	Absorptionsmaßdifferenz
$\Delta E$	-	Extinktionsdifferenz
$\Delta L$	m	Längendifferenz in Richtung der Schneckenachse
$\Delta L_R$	m	Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Rückstaulänge
$\Delta p$	Pa	Druckdifferenz
$\Delta s_{Sn}$	m	Abweichungen bei der Bestimmung der Schneckenposition
$\Delta t$	s	Zeitdifferenz
$\Delta t_B$	s	Breite eines Verweilzeitspektrums
$\Delta t_S$	s	Selbstreinigungszeit
$\Delta t_W$	s	Abstand zwischen den Wendepunkten einer Verweilzeitverteilung
$\Delta t_0$	s	Zeitintervall
$\Delta x_D$	m	Längendifferenz senkrecht zum Schneckensteg
$\Delta z$	m	Längendifferenz in Kanalrichtung
$\Delta \Theta_W$	-	normierter zeitlicher Abstand zwischen den Wendepunkten
$\delta$	m	Schneckenpaltweite
$\delta_G$	m	Gehäusespaltweite
$\zeta$	-	Integrationsvariable
$\eta$	Pas	dynamische Viskosität
$\eta_0$	Pas	dynamische Bezugsviskosität
$\Theta$	-	normierte Zeit
$\Theta_{max}$	-	maximale Verweilzeit, auf die mittlere Verweilzeit normiert
$\Theta_{min}$	-	minimale Verweilzeit, auf die mittlere Verweilzeit normiert
$\theta$	rad	Beobachtungswinkel
$\kappa$	m <sup>2</sup> /kg	bezogener dekadischer Absorptionskoeffizient
$\Lambda$	-	normierte Länge
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\xi$	m	Diffusionsweg
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$		wahre Standardabweichung
$\sigma^2$		wahre Varianz
$\sigma_A$	-	theoretische Standardabweichung des Absorptionsmaßes
$\sigma_E^2$		theoretische Endvarianz bei einer Mischgütemessung

$\sigma_M^2$		wahre Varianz der Messfehler
$\sigma_V$	s	wahre Standardabweichung der Verweilzeitverteilung
$\sigma_V^2$	s <sup>2</sup>	wahre Varianz der Verweilzeitverteilung
$\sigma_Z^2$		wahre Varianz der homogenen Zufalls Mischung
$\sigma_0^2$		wahre Varianz des ungemischten Systems
$\tau_i$	-	spektraler Reintransmissionsgrad
$\tau_s$	-	allgemeiner Transmissionsgrad
$\Phi_e$	W	Strahlungsfluss
$\Phi_{e,d}$	W	durchtretender Strahlungsfluss
$\Phi_{e,rel}$	-	relativer Strahlungsfluss
$\Phi_{e,st}$	W	gestreuter Strahlungsfluss
$\Phi_{e\lambda}$	W/m	spektraler Strahlungsfluss
$\Phi_{e\lambda,ein}$	W/m	eindringender spektraler Strahlungsfluss
$\Phi_{e\lambda,em}$	W/m	emittierter spektraler Strahlungsfluss
$\Phi_{e\lambda,0}$	W/m	spektraler Strahlungsfluss, der das reine Lösungsmittel verlässt
$\varphi$	rad	Gangsteigungswinkel
$\varphi_{B,eff}$	rad	effektiver Gangsteigungswinkel der Schneckengänge im Bündel
$\varphi_D$	rad	Gangsteigungswinkel bezogen auf den Schneckenaußendurchmesser
$\varphi_{D,eff}$	rad	effektiver Gangsteigungswinkel der Schneckenstege im Bündel
$\varphi_d$	rad	Gangsteigungswinkel bezogen auf den Schneckenkerndurchmesser
$\varphi_S$	rad	Gangsteigungswinkel bezogen auf den Schwerpunktdurchmesser
$\chi_o$	-	oberer Parameter der Chi-Quadrat-Verteilung
$\chi_u$	-	unterer Parameter der Chi-Quadrat-Verteilung
$\Psi$	rad	Winkelkoordinate
$\psi$	-	Strömungsverhältnis

## Indizes

anl	Anlauf
bed	bedeckt
dig	Digitalisierung
ges	gesamt
max	Maximum
min	Minimum
nenn	Nenngröße