

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 • eMail: 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

Formelzeichen	XII
Zusammenfassung	1
1 Einführung und Aufgabenstellung	3
2 Mehrwellen-Hochleistungsreaktor TFR	8
2.1 Aufbau und Funktionsweise	8
2.2 Geometrie der Schnecken, des Schneckenbündels und der Gehäuse	13
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
2.3 Fördermodell	28
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
3 Verweilzeit- und Mischgüteuntersuchung	49
3.1 Mischvorgänge in kontinuierlichen Systemen	49
3.2 Verweilzeitverteilung	52
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
3.3 Mischgüte	65
3.4 Optische Verfahren zur Verweilzeit- und Mischgütemessung	69
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
4	Versuche	86
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
5	Ergebnisse	117
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
6	Technische Folgerungen und Ausblick	161

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

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 _{th}	m	theoretischer Achsabstand
B	m ⁻³	Geometriefaktor für die Druckströmung in Rohren
B _{AZ}	m ⁴	Geometriefaktor für die gesamte Druckströmung in der Austragzone
B _{geo,KZ}	m	Geometriefaktor für die Druckströmung in den Schneckenkanälen
B _{geo,L}	m	Geometriefaktor für die Druckleckströmung
B _k	m ⁻³	Geometriefaktor für die Druckströmung in den Einzelkanälen
B _S	m ⁻³	Geometriefaktor für die Druckströmung im Schmelzesammler
B _{SR}	m ⁻³	Geometriefaktor für die Druckströmung im Reaktoraustritt
B _R	m ⁻³	Geometriefaktor für die Druckströmung im Austrittsrohr
b	m	Schneckengangbreite
b _D	m	Schneckengangbreite am Schneckenaußendurchmesser
b _{D*}	m	approximierte Schneckengangbreite am Schneckenaußendurchmesser
b _K	m	Breite des Strömungskanals im Extrusionswerkzeug
b _M	m	Breite der Messlinie
b _{p,S}	m	Breite des Schmelzepools bei Teilfüllung
b _S	m	Approximierte Breite des Schneckengangs bei Bezug auf D _S
b _{Sp}	m	Breite des Messspatels bei der Schichtdickenmessung
b _{Z,S}	m	Approximierte Gangbreite im Zwickelbereich bei Bezug auf D _S
Bo	-	Bodensteinzahl
C		Proportionalitätsfaktor
C _Θ	kg/m ³	Proportionalitätsfaktor in der dimensionslosen Verweilzeitverteilung
C ₀	kg s/m ³	Proportionalitätsfaktor in der Verweilzeitverteilung
C ₁	-	1. WLF-Parameter
C ₂	K	2. WLF-Parameter
c	kg/m ³	Konzentration
c _F	kg/m ³	Farbstoffkonzentration
c _{gl}	kg/m ³	Gleichgewichtskonzentration
c _M	kg/kg	Massenanteil
c _{M,i}	kg/kg	Massenanteil der kritischen Komponente in einer einzelnen Probe
c _{M,p}	kg/kg	Massenanteil der Partikel in einer Dispersion
c _{M,T}	kg/kg	Massenanteil der Trockensubstanz
c _p	1/m ³	Anzahl der Partikel pro Volumeneinheit
c _V	m ³ /m ³	Volumenanteil
c _{1...c4}	-	Anpassungsparameter
c _M	m ³ /m ³	mittlerer Massenanteil der kritischen Komponente in Stichproben
D	m	Schneckenaußendurchmesser
D _{ax}	m ² /s	axialer Dispersionskoeffizient
D _B	m	Durchmesser des Schneckenbündels
D _{diff}	m ² /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 ²	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 ² 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_{∞}	-	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 ³	Volumen
V_A	-	Variationskoeffizient des Absorptionsmaßes
$V_{AZ,t}$	m ³	Schmelzevolumen im teilgefülltem Abschnitt der Austragzone
V_c	-	Variationskoeffizient der Farbstoffkonzentration
V_{Ds}	m ³	Dünnschichtvolumen
$V_{Ds,S}$	m ³	Dünnschichtvolumen bei Bezug auf D_S
V_{EZ}	m ³	Schmelzevolumen im Außenbereich der Entgasungszone
V_{frei}	m ³	freies Volumen
V_{gef}	m ³	gefülltes Volumen
V_{HM}	m ³	Schluckvolumen des Hydraulikmotors
V_{HU}	m ³	Schmelze-Inhalt
V_K	m ³	Volumen des Schneckenkanals
$V_{K,S}$	m ³	approximiertes Kanalvolumen
V_L	-	Variationskoeffizient der Markierung
V_{Lo}	m ³	Volumen der Lösung
V_M	-	Variationskoeffizient aufgrund der Messgenauigkeit
V_m	-	Variationskoeffizient einer Mischung
$V_{P,S}$	m ³	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
\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
β_F	rad	Flankenwinkel
β_G	rad	Grundwinkel
β_K	rad	Kammwinkel
β_S	rad	realer Eingriffswinkel

$\beta_{S,th}$	rad	theoretischer Eingriffswinkel
γ	rad	Gehäuseumfangswinkel
γ_a	rad	Gehäuseumfangswinkel im Außenbereich
γ_i	rad	Gehäuseumfangswinkel im Innenbereich
γ_G	rad	Umfangswinkel eines Schneckenkanals
γ_K	-	Gradation
γ_T	rad	Teilungswinkel
ΔA	-	Absorptionsmaßdifferenz
ΔE	-	Extinktionsdifferenz
ΔL	m	Längendifferenz in Richtung der Schneckenachse
ΔL_R	m	Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Rückstaulänge
Δp	Pa	Druckdifferenz
Δs_{Sn}	m	Abweichungen bei der Bestimmung der Schneckenposition
Δt	s	Zeitdifferenz
Δt_B	s	Breite eines Verweilzeitpektrums
Δt_S	s	Selbstreinigungszeit
Δt_W	s	Abstand zwischen den Wendepunkten einer Verweilzeitverteilung
Δt_0	s	Zeitintervall
Δx_D	m	Längendifferenz senkrecht zum Schneckensteg
Δz	m	Längendifferenz in Kanalrichtung
$\Delta \Theta_W$	-	normierter zeitlicher Abstand zwischen den Wendepunkten
δ	m	Schneckenpaltweite
δ_G	m	Gehäusespaltweite
ζ	-	Integrationsvariable
η	Pas	dynamische Viskosität
η_0	Pas	dynamische Bezugviskosität
Θ	-	normierte Zeit
Θ_{max}	-	maximale Verweilzeit, auf die mittlere Verweilzeit normiert
Θ_{min}	-	minimale Verweilzeit, auf die mittlere Verweilzeit normiert
θ	rad	Beobachtungswinkel
κ	m ² /kg	bezogener dekadischer Absorptionskoeffizient
Λ	-	normierte Länge
λ	m	Wellenlänge
ξ	m	Diffusionsweg
ρ	kg/m ³	Dichte
σ		wahre Standardabweichung
σ^2		wahre Varianz
σ_A	-	theoretische Standardabweichung des Absorptionsmaßes
σ_E^2		theoretische Endvarianz bei einer Mischgütemessung

σ_M^2		wahre Varianz der Messfehler
σ_V	s	wahre Standardabweichung der Verweilzeitverteilung
σ_V^2	s ²	wahre Varianz der Verweilzeitverteilung
σ_Z^2		wahre Varianz der homogenen Zufalls Mischung
σ_0^2		wahre Varianz des ungemischten Systems
τ_i	-	spektraler Reintransmissionsgrad
τ_s	-	allgemeiner Transmissionsgrad
Φ_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
φ	rad	Gangsteigungswinkel
$\varphi_{B,eff}$	rad	effektiver Gangsteigungswinkel der Schneckengänge im Bündel
φ_D	rad	Gangsteigungswinkel bezogen auf den Schneckenaußendurchmesser
$\varphi_{D,eff}$	rad	effektiver Gangsteigungswinkel der Schneckenstege im Bündel
φ_d	rad	Gangsteigungswinkel bezogen auf den Schneckenkerndurchmesser
φ_S	rad	Gangsteigungswinkel bezogen auf den Schwerpunktdurchmesser
χ_o	-	oberer Parameter der Chi-Quadrat-Verteilung
χ_u	-	unterer Parameter der Chi-Quadrat-Verteilung
Ψ	rad	Winkelkoordinate
ψ	-	Strömungsverhältnis

Indizes

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