
Teil 1

Grundlagen der Auslegung von Packungskolonnen für Gas/Flüssigkeitssysteme

Symbolverzeichnis zu Teil 1

Formelgrößen, lateinische Buchstaben

a	$m^2 m^{-3}$	geometrische volumenbezogene Füllkörperoberfläche einer beliebigen Schüttung bzw. Packung
a'	$m^2 m^{-3}$	effektive volumenbezogene trockene Füllkörperoberfläche, die von Gas durchströmt wird
a_o	$m^2 m^{-3}$	geometrische volumenbezogene Standard-Füllkörperoberfläche
a_e	$m^2 m^{-3}$	effektive volumenbezogene Füllkörperoberfläche
A, B, C	–	Antoine-Konstanten zur Berechnung der Siededrucke reiner Stoffe. Mit Index „1“ für die leichtersiedende Komponente und Index „2“ für die schwersiedende Komponente.
A_l	m^2	Oberfläche eines Füllkörpers
A_e	m^2	effektive Stoffaustauschfläche
A_F	m^2	Füllkörperoberfläche
A_i	–	Konstante
A_w	m^2	Wandoberfläche
A_s	m^2	freier Kolonnenquerschnitt
B_L	–	dimensionslose Flüssigkeitsbelastung
C, C_i	–	Konstanten
C_B	$s^{2/3} m^{-1/3}$	Modellparameter zur Bestimmung des Druckverlustes der berieselten Schüttung bzw. Packung für $Re_L > 2$
$C_{B,0}$	–	Dimensionsloser Parameter in Gl. (4-41), $C_{B,0} = C_B \cdot g^{1/3}$, unterhalb der Staugrenze $C_B = 0,8562$
$C_{C,0}$	–	Dimensionsloser Parameter in Gl. (4-44), unterhalb der Staugrenze $C_{C,0} = 1$
C_C	$s^{2/3} m^{-1/3}$	Parameter zur Bestimmung des Druckverlustes der berieselten Schüttung bzw. Packung für $Re_L < 2$

C_{Fl}	-	Konstante zur Berechnung der Dampfgeschwindigkeit am Flutpunkt
$C_{Fl,0}$	-	universelle Flutpunktskonstante für Füllkörper und Packungen
C_H	DM/t	Heizdampfkosten
C_0	-	Abreißfaktor
$C_0, C_{0,B}$	DM/h	Betriebskosten einer Vakuumrektifizierkolonne bzw. einer Normaldruckrektifikation
C_p	-	Konstante zur Bestimmung des Flüssigkeitsinhaltes von Packungen und Füllkörperschüttungen bei turbulenter Flüssigkeitsströmung
C_T	-	Konstante
d	m	Füllkörperdurchmesser
d_i	m	Innendurchmesser eines Füllkörpers
d_h	m	hydraulischer Durchmesser
d_p	m	Partikeldurchmesser
d_R	m	Rohrdurchmesser, innen
d_S	m	Kolonnendurchmesser
d_T	m	Tropfendurchmesser
d_T^*	-	dimensionsloser Partikeldurchmesser, Gl. (2-25)
D	kg s^{-1}	Destillatmenge
\dot{D}	kmol s^{-1}	Destillatstrom
D_V, D_L	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Diffusionskoeffizient der leichtersiedenden Komponente im Dampfgemisch bzw. in der Flüssigkeit
E_K		kinetische Energie
f, f_i mit $i = 1, 2, \dots$		Funktion
F	kg s^{-1}	Zulaufmenge
\dot{F}	kmol s^{-1}	Zulaufstrom
F_p	m^{-1}	Packungsfaktor einer trockenen Schüttung $F_p = a/\varepsilon^3$
$F_{p,\text{exp}}$	m^{-1}	experimentell ermittelter Packungsfaktor am Flutpunkt bei Zweiphasenströmung
$F_{p,0}$	m^{-1}	Packungsfaktor für die Standardschüttungsdichte, $F_{p,0} = a_0/\varepsilon_0^3$
F_V	$(\text{m/s}) \sqrt{\text{kg/m}^3}$ $\text{Pa}^{1/2}$ $\text{m}^{-1/2} \text{kg}^{1/2} \text{s}^{-1}$	Gas- bzw. Dampfbelastungsfaktor
$F_{V,Fl}$	$(\text{m/s}) \sqrt{\text{kg/m}^3}$ $\text{Pa}^{1/2}$ $\text{m}^{-1/2} \text{kg}^{1/2} \text{s}^{-1}$	Dampfbelastungsfaktor am Flutpunkt
$F_{V,Fl}^*$	m s^{-1}	Flutbelastungsfaktor

$F_{V,0}$	$(\text{m/s}) \sqrt{\text{kg/m}^3}$ $\text{m}^{-1/2} \text{kg}^{1/2} \text{s}^{-1}$	Gas- bzw. Dampfbelastungsfaktor an der oberen Belastungsgrenze
$F_{V,U}$	$(\text{m/s}) \sqrt{\text{kg/m}^3}$ $\text{Pa}^{1/2}$ $\text{m}^{-1/2} \text{kg}^{1/2} \text{s}^{-1}$	Dampf- bzw. Gasbelastungsfaktor an der unteren Belastungsgrenze
$F_V/F_{V,FI}$	-	relative Gas- bzw. Dampfbelastung
g	m s^{-2}	Erdbeschleunigung
G	kg m^{-3}	Füllkörpergewicht pro m^3 Bauvolumen
h	m	Höhe eines einzelnen Füllkörpers
$h_L = V_L/V_S$	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	der gesamte Flüssigkeitsinhalt bezogen auf die leere Kolonne
h_L^0	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	Flüssigkeitsinhalt bezogen auf das freie Kolonnenvolumen, $h_L^0 = h_L/\varepsilon$
$h_{L,S}$	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	Flüssigkeitsinhalt oberhalb der Staugrenze
$h_{L,FI}^0$	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	Flüssigkeitsinhalt am Flutpunkt, bezogen auf das freie Kolonnenvolumen
h_{st}, h_d, h_H	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	statischer, dynamischer Flüssigkeitsinhalt, Haftinhalt
Δh_V	kJ kmol^{-1}	Verdampfungsenthalpie
H	m	Höhe einer Füllkörperschüttung bzw. Packung
HETP	m	Höhe einer theoretischen Stufe
HTU_{0V}	m	Höhe einer Übertragungseinheit bezogen auf die Dampfphase
HTU	m	Höhe einer Übergangseinheit
$(\Delta H)_i$	m	Höhe eines einzelnen Schüttungsabschnittes
i		Variable
k	-	Proportionalitätsfaktor
K	-	Wandfaktor
K_A	N	Auftriebskraft
K_g	N	Schwerkraft
K_ψ	N	Widerstandskraft
K_0	N	Oberflächenkraft
K_R	N	Abreißkraft
K_η	N	Viskositätskraft
K_1, K_2	-	Konstante K_1 und Exponent K_2 zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes bei der Einphasenströmung des Gases in der Schüttung oder Packung für $Re_V < 2100$ und für Gl. (3-14)
K_3, K_4	-	Zahlenwert von K_1 und K_2 , für $Re_V \geq 2100$
K_P	-	Parameter in Gl. von Teutsch [16], s. Kap. 4
$K_{\rho V}$	-	Korrekturfaktor der Gasdichte
L	kg s^{-1}	Massenstrom der Flüssigkeit
\dot{L}	kmol s^{-1}	Molenstrom der Flüssigkeit
	kmol h^{-1}	

\dot{L}/\dot{V}	-	Moldurchsatzverhältnis
m	-	Exponent
M	kg kmol ⁻¹	Molgewicht
n_i	-	Zahl der Messpunkte in Gl. (2-31)
n_t	-	theoretische Stufenzahl
n_t/H	m ⁻¹	theoretische Trennwirkung, Anzahl der theoretischen Stufen je Meter Schüttungshöhe
N, N_0	m ⁻³	Schüttungsdichte einer beliebigen Füllkörperschüttung bzw. Standard-Schüttungsdichte gemäß Herstellerangaben
NTU_{OV}	-	Anzahl der Übertragungseinheiten
p	mbar	Druck
p_T	mm Hg	Dampfdruck der reinen Komponente, Gl. (1-1)
Δp	Pa	Druckverlust der berieselten Schüttung bzw. Packung
Δp_0	Pa	Druckverlust der unberieselten, trockenen Füllkörperschüttung bzw. Packung
$\Delta p/H$	Pa m ⁻¹	auf die Schütthöhe H bezogener Druckverlust der berieselten Schüttung bzw. Packung
$\Delta p_0/H$	Pa m ⁻¹	auf die Schüttungshöhe H bezogener Druckverlust der unberieselten Schüttung bzw. Packung
$\Delta p/n_t,$ $\Delta p/NTU_{OV}$	Pa	spezifischer Druckverlust
$\Delta p/\Delta p_0$	-	Druckverlustquotient
$r = \dot{L}/D$	-	Rücklaufverhältnis
r_{\min}	-	minimales Rücklaufverhältnis
s	m	Wanddicke eines Füllkörpers
t	°C	Temperatur
\bar{u}_T	m s ⁻¹	effektive Fallgeschwindigkeit eines Einzeltropfens in der Schüttung
u_F	m s ⁻¹	mittlere Filmgeschwindigkeit
u_0	m s ⁻¹	effektive Gasgeschwindigkeit, bei der ein Tropfen in der Schüttung in Schwebelage gehalten wird
u_T	m s ⁻¹	reduzierte Geschwindigkeit eines Tropfens in der Schüttung
u_0	m s ⁻¹	auf die leere Kolonne bezogene Gasgeschwindigkeit in der Schüttung am Flutpunkt für $h_{L,FI}^0 \rightarrow 0$
u_K	m s ⁻¹	charakteristische Tropfengeschwindigkeit
u_L	m ³ m ⁻² h ⁻¹	spezifische Flüssigkeitsbelastung bezogen auf den freien Kolonnenquerschnitt
$u_{L,U}$	m ³ m ^{2p} s ⁻¹	spezifische Flüssigkeitsbelastung an der unteren Belastungsgrenze

u_V	ms^{-1}	Gas- bzw. Dampfgeschwindigkeit, bezogen auf den freien Kolonnenquerschnitt
u_V	ms^{-1}	effektive mittlere Dampf- bzw. Gasgeschwindigkeit
$u_{V,FI}$	ms^{-1}	Dampf- bzw. Gasgeschwindigkeit am Flutpunkt, bezogen auf den freien Kolonnenquerschnitt
V	kg s^{-1}	Massenstrom des Dampfes
\dot{V}	kmol s^{-1}	Molenstrom des Dampfes
V_L	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumenstrom der Flüssigkeit
V_V	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumenstrom des Dampfes bzw. des Gases
V_F	m^3	Füllkörpervolumen
V_L	m^3	Volumen der Flüssigkeit
V_S	m^3	Volumen der leeren Kolonne
V_1	m^3	Volumen eines einzelnen Füllkörpers
\dot{W}	kmol s^{-1}	Molenstrom des Sumpfpertes
W	kg s^{-1}	Sumpfmengenstrom
x	kmol kmol^{-1}	Molanteil der leichtersiedenden Komponente in der Flüssigkeit
x	–	Einschnürungsfaktor, Gl. (4-9)
X	–	Strömungsparameter am Flutpunkt
y	kmol kmol^{-1}	Molanteil der leichtersiedenden Komponente im Dampf
y_m	kmol kmol^{-1}	mittlerer Molanteil des Leichtersieders
y^*	kmol kmol^{-1}	Molanteil der leichtersiedenden Komponente im Dampf im Gleichgewichtszustand
Z, Z_{FI}	–	Quotient, $Z = h_{L,S}/h_L$

Formelgrößen, griechische Buchstaben

α	deg	Neigung der Strömungskanäle in der Packungsschicht s. Bild 1-2
α	–	relative Flüchtigkeit
$\Delta\rho$	kg m^{-3}	Dichtedifferenz, $\Delta\rho = \rho_L - \rho_V$
$\delta(i)$	%	relativer Fehler, bezogen auf den experimentellen Wert der Größe i
$\bar{\delta}$	%	mittlerer relativer Fehler
δ_L	m	mittlere Filmdicke
$\varepsilon, \varepsilon_0$	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	relatives Lückenvolumen einer beliebigen Schüttung bzw. der Standardschüttung
η	mPas $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	dynamische Viskosität
λ	–	Widerstandsbeiwert in Gl. (3-2)
λ_L	–	Widerstandsbeiwert für Zweiphasenströmung, Gl. (4-1)

λ_0	-	Phasendurchsatzverhältnis am Flutpunkt, $\lambda_0 = (V_L/V_V)_{Fl}$
μ	-	Formfaktor
ν	$m^2 s^{-1}$	kinematische Viskosität
ρ	$kg m^{-3}$	Dichte
σ_L	mNm^{-1} Nm^{-1}	Oberflächenspannung der Flüssigkeit für Gas/Flüssig-Systeme
τ	s	Kontaktzeit
ψ	-	Widerstandsbeiwert für die Einphasenströmung (Dampf bzw. Gasströmung) durch eine Schüttung, s. Gl. (3-8)
ψ_{Fl}	-	Widerstandsbeiwert für die Einphasenströmung der Gasphase für die Betriebsbedingungen am Flutpunkt
ψ_R, ψ_0	-	Widerstandsbeiwert für den in Luft fallenden Tropfenschwarm bzw. für den Einzeltropfen in der Füllkörperschüttung
ψ_{VL}	-	Widerstandsbeiwert für die Zweiphasenströmung
φ	-	Durchmesserverhältnis, d_S/d
Φ	-	Nutzungsgrad der trockenen Schüttung $\Phi = a'/a$
Σ	-	Summe

Dimensionslose Kennzahlen

$B_L = \left[\frac{\eta_L}{\rho_L \cdot g^2} \right]^{1/3} \cdot \frac{u_L}{\varepsilon} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon \cdot d_P}$	Dimensionslose Flüssigkeitsbelastung
$C_L = \frac{\rho_L \cdot \sigma_L^3}{\eta_L^4 \cdot g}$	Flüssigkeitskennzahl
$Fr_{Fl}^* = \frac{u_{V,Fl}^2}{d_T \cdot g} \cdot \frac{\rho_V}{\Delta\rho}$	erweiterte Froude-Zahl
$Fr_L^0 = \frac{u_L^2}{\varepsilon^2 \cdot g \cdot d}$	Froude-Zahl der Flüssigkeit
$Fr'_L = \frac{u_L^2}{g \cdot d}$	Froude-Zahl der Flüssigkeit
$Fr_L = \frac{u_L^2 \cdot a}{g}$	Froude-Zahl der Flüssigkeit
$Re_L = \frac{u_L}{a \cdot \nu_L}$	Reynolds-Zahl der Flüssigkeit
$Re'_L = \frac{u_L \cdot d}{\nu_L}$	Reynolds-Zahl der Flüssigkeit

$Re_T = \frac{u_T \cdot d_T}{\nu_V}$	Reynolds-Zahl der Tropfen
$Re_V = \frac{u_V \cdot d_p}{(1 - \varepsilon) \cdot \nu_V} \cdot K$	modifizierte Reynolds-Zahl des Dampfes bzw. Gases
$Re'_V = \frac{u_V \cdot d}{\nu_V}$	Reynolds-Zahl des Dampfes bzw. Gases
$We_{krit} = \frac{d_T \cdot u_V^2 \cdot \rho_V}{\sigma_L}$	kritische Tropfen-Weber-Zahl
$\frac{We_L}{Fr_L} = \frac{\rho_L \cdot g}{\sigma_L} \cdot \left[\frac{\varepsilon \cdot d_p}{1 - \varepsilon} \right]^2$	Kennzahlverhältnis der Weber-Zahl zur Froude-Zahl
$T_L \cong 0,9 \cdot \left[\frac{F_V}{F_{V,Fl}} \right]^{2,8}$	Schubspannungskennzahl

Indizes

1	leichtersiedende Komponente
2	schwersiedende Komponente
ber.	berechneter Wert
A	Abtriebsteil
D	Destillat
e	extrapolierter Wert
exp.	experimentell ermittelter Wert
eff.	effektiv
F	Zulauf
Fl	gilt für den Flutpunkt
i	Wert einer Variable, z. B. $\Delta p/H$, HTU_{0V} , $\Delta p/n_b$, ρ_L , $\eta_V \dots$ im Höhenabschnitt ΔH_i , $i = 1 \dots n$
j	$j = 1 \dots n$
krit.	kritischer Wert
L	Flüssigkeit
m	Mittelwert
min	minimaler Wert
O	obere (bei oberer Belastungsgrenze)
0	bezogen auf Standardschüttungsdichte N_0
P	gilt für Packung
S	gilt für den Staubereich (oberhalb der Staugrenze und unterhalb der Flutgrenze)
T	Kopf
u, U	unten; untere Grenze
V	Dampf bzw. Gas
W	Sumpf bei Molanteilen x, y bzw. gilt für Wasser bei Stoffwerten ρ, η, σ

Mathematische Operatorzeichen

\in	liegt im Bereich (...)
∂	partiell Differential

Abkürzungen

A, []	Autor bzw. andere Quellen der Messdaten
Abb.	Abbildung
BR	Bialeckiring
BR-S	geordnete Packung von Bialeckiringen
Fi	interne Messungen TU-Wrocław, S. Filip
Gl., Gln.	Gleichung, Gleichungen
Kap.	Kapitel
Lu	interne Messungen TU-Wrocław, Z. Ługowski
max. Re_L	gültig bis zu einer maximalen Reynoldszahl der Flüssigkeit, vgl. Tabellen 4-4 zu Kap. 4 und 5-1a-c zu Kap. 5
Mc	interne Messungen TU-Wrocław, J. Maćkowiak
mK	mit Kragen
MP	Messpunkt Nr. ...
NSW	Füllkörper der Fa. Norddeutsche Seekabelwerke
oK	ohne Kragen
PR	Pallring
RA	Randabweiser
RK	Rohrkolonne mit fluchtend angeordneten Füllkörpern
RR	Raschigring
S	geordnete Füllkörperschichten
s.	siehe
TSB	Tropfen-Schwebbett-Modell

Werkstoffkennzeichnung

K	Keramik (Steinzeug oder Porzellan)
M	Metall
P	Porzellan
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVDF	Polyvinylidenfluorid