

Wärme- und Stoffübertragung in Strömungen

Formel- und Aufgabensammlung

Teil 1 -Formelsammlung-

Lehrmaterial der Professur
Thermofluiddynamik und Angewandte Aerodynamik
am Institut für Luft- und Raumfahrttechnik der
Technische Universität Dresden
Tel.:(0351) 463 8086

Zusammengestellt und überarbeitet von Erwin Richter

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Hinweise zur Benutzung des Studienmaterials und zu den Anforderungen in der Lehrveranstaltung	3
2. Wichtige in der Wärme- und Stoffübertragung verwendeten Symbole, Indizes und Ähnlichkeitskennzahlen	4
2.1. Symbole	4
2.2. Indizes	6
2.3. Ähnlichkeitskennzahlen (mit der Bezugslänge l gebildet)	8
3. Stoffwerte ausgewählter Fluide	10
3.1. Stoffwerte von Flüssigkeiten	10
3.2. Stoffwerte gesättigter Dämpfe	11
3.3. Stoffwerte von Gasen und überhitzten Dämpfen	11
3.4. Diffusionskoeffizienten und Schmidt-Zahlen einiger Fluide bei $p_B = 0,1013$ MPa in Luft bzw. in Wasser	12
4. Wichtige physikalische und mathematische Beziehungen und Gleichungen	13
4.1. Ströme	13
4.2. Stromdichten infolge Mitführung	14
4.3. Mittlere Größen im durchströmten Querschnitt bei $x = \text{const}$	14
4.4. Beziehungen aus der Vektoranalysis in Operator- und indizierter Schreibweise	15
4.5. Grundgleichungen zur Berechnung des Wärme- und Stoffübergangs (bei konstanten Stoffwerten)	17
4.6. Reynolds-Gleichungen	18
4.7. Spezielle Formen der Grundgleichungen für die Berechnung zweidimensionaler Strömungen mit Wärme- und Stofftransport (bei konstanten Stoffwerten)	20
5. Kennzahlgleichungen für den Wärmeübergang in einphasigen Fluiden	22
5.1. Definitionen, Übergangskoeffizienten sowie Grundformen und Korrekturfaktoren der Kennzahlgleichungen einschließlich der Angaben für den Stoffübergang	22
5.2. Wärmeübergang bei freier Konvektion	25
5.3. Wärmeübergang bei erzwungener Konvektion	28
5.4. Wärmeübergang bei Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion (gemischte Konvektion)	37
6. Stoffübergang	38
6.1. Gebräuchliche Konzentrationsmaße zur Berechnung des stoffüberganges	38
6.2. Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang	38

	Seite
6.3. Kennzahlgleichungen	39
6.4. Korrektur des Stoffübergangskoeffizienten bei großen Stoffstromdichten nach Stefan für Zweistoffgemische ..	39
7. Kennzahlgleichungen für die Kondensation ruhender reiner Dämpfe	40
7.1. Wärmeübergang bei laminarer Filmkondensation (Nußeltsche Wasserhauttheorie)	40
7.2. Wärmeübergang bei turbulenter Filmkondensation	40
7.3. Wärmeübergang bei der Tropfenkondensation	41
7.4. Berücksichtigung verschiedener Einflüsse auf den Wärmeübergang	41
8. Kennzahlgleichungen für die Verdampfung ruhender reiner Flüssigkeiten	44
8.1. Verdampfungskurve	44
8.2. Oberflächenverdampfung (Stilles Sieden)	44
8.3. Blasenverdampfung	45
8.4. Filmverdampfung	46
9. Literatur	47
9.1. Zusammenfassende Darstellungen zu den Grundfragen der konvektiven Wärme- und Stoffübertragung, zur Kondensation, Verdampfung, Turbulenztheorie und zur numerischen Berechnung	47
9.2. Wichtige Zeitschriften und Sammelbände des Fachge- bietes in alphabetischer Reihenfolge (Auswahl) ...	56
10. Wichtige Sachwörter des Fachgebietes	58

1. Hinweise zur Benutzung des Studienmaterials

Grundlage für den erfolgreichen Abschluß des Studienfaches „Wärme- und Stoffübertragung in Strömungen“ sind ein regelmäßiger Besuch der Vorlesungen bzw. der Seminare und/oder ein gründliches Durcharbeiten eines Lehrbuches (z.B.[7], [12], [16], [18], [23], [29], [36], [42], [46], [50], [74]).

Die Formel- und Aufgabensammlung soll ein Hilfsmittel für die Studenten der Fakultät Maschinenwesen sein, um das in den Vorlesungen bzw. im Selbststudium erworbene Wissen zu festigen, Symbole, Stoffwerte, Begriffe, Formeln und Literaturangaben nachschlagen zu können und das selbständige Lösen von Aufgaben und Beantworten von Fragen zu gewährleisten (2. Teil des Studienmaterials).

In den Übungen werden Beispiele und Problemaufgaben in seminaristischer Form behandelt. Diese Aufgaben sind im 2. Teil des Studienmaterials enthalten und wie folgt geordnet

- Grundlagen (Bilanzen, Vorgänge in Grenzschichten, laminare und turbulente Wärme- und Stoffübertragung),
- Grundgleichungen, Ähnlichkeit, Analogie. mathematische Lösungen,
- Kennzahlgleichungen für den Wärmeübergang,
- Stoffübergang,
- Kondensation und Verdampfung,
- Komplexaufgaben.

Die im Studienmaterial aufgeführten Beziehungen sind durch Buchstaben und Ziffern wie folgt gekennzeichnet.

Grundlagen (G .), Mathematische Beziehungen (Ma.), Grundgleichungen (GGl.), Kennzahlgleichungen (K.), Verdampfung (V.), Kondensation (Ko..)

Die im Selbststudium zu bearbeitenden Aufgaben bzw. zu beantwortenden Fragen (etwa 4 bis 6 Stück je Übung bzw. je Fernstudienkurs) werden i. d. R.. zur Vorlesung ausgegeben und sind an den Seminarleiter zu **Beginn der folgenden Übung oder des folgenden Fernstudienkurses bzw. zum geforderten Termin** zu übergeben. Für aktive Mitarbeit und richtige Lösung der Aufgaben wird eine Vor-Note vergeben.

2. Wichtige in der Wärme- und Stoffübertragung verwendeten Symbole, Indizes und Ähnlichkeitskennzahlen

2.1 Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m ²	Fläche
a		Exponent
a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeitskoeffizient
b		Exponent
C		Konstante; Koeffizient
\dot{C}	W/K	Wärmekapazitätsstrom
C _f		örtlicher Widerstandsbeiwert
C _p	J/(kg.K)	spez. Wärmekapazität bei p = const.
C _α	kmol/m ³	Molkonzentration der Stoffkomponente α
D	m ² /s	Diffusionskoeffizient
D, dm		Durchmesser
E	m ² /s ²	spez. kinetische Turbulenzenergie
F	N.s/s	Impulsstrom
f		Funktion, dimensionsl. Stromfunktion
f	1/s	Frequenz
f _i (i=1,...,3)	N/m ³	äußere Kraft je Volumeneinheit
f' _i	N/m ³	Schwankung der äußeren Kraft
g _i	m/s ²	Fallbeschleunigung
H	m	Höhe, Abmessung
\dot{H}	W	Enthalpiestrom
h	m	Schrittweite
h''	W/m ²	Enthalpiestromdichte
\dot{I}	Strom
IN		maximale Punktzahl in x-Richtung
j _w		Colburn-Faktor
j' _w		Colburn-Faktor für den Stoffübergang
JN		maximale Punktzahl in y-Richtung
K		Korrekturfaktor
k	W/(m ² .K)	Wärmedurchgangskoeffizient
k	m	Schrittweite
k _S	m	Rauhigkeit
L, l	m	Länge
l	m	integraler Maßstab der Turbulenzelemente
l _m	m	Mischungsweg
M	kg/kmol	molare Masse
m		Exponent
\dot{m}	kg/s	Massestrom
\dot{m}_α	kg/s	Stoffstrom der Komponente α
\dot{m}''_α	kg/(m ² .s)	Stoffstromdichte der Komponente α
n		Exponent, Anzahl
n	m	Wandnormalabstand
n	kmol	Molmenge der Komponente α
\dot{n}_α	kmol/s	Molstrom der Komponente α
\dot{n}''_α	kmol/(s.m ²)	Molstromdichte der Komponente α

Symbol	Einheit	Bezeichnung
\bar{p}	Pa	zeitlich gemittelter Druck
p	Pa, -Druck, Exponent	
p_s	Pa	Sättigungsdruck
p_α	Pa	Partialdruck der Komponente α
p'	Pa	Schwankung des Druckes
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{q}	W/m ²	Wärmestromdichte
R, r	m	Radius
r_s	J/kg	Verdampfungsenthalpie
s	m	Abstand
T	K, °C	Temperatur
\bar{T}	K, °C	zeitlich gemittelte Temperatur
T^+	-	dimensionslose Temperatur
T'	K	Schwankung der Temperatur
t	s	Zeit
$i''_{j,i}$	N.s/(m ² .s)	Impulsstromdichte
w_x, w_y, w_z	m/s	Komponenten des Geschwindigkeitsvektors
w_j (j=1,2,3)	m/s	Geschwindigkeitsvektor
\bar{w}_i (j=1,2,3)	m/s	zeitlich gemittelter Geschwindigkeitsvektor
w'_j	m/s	Vektor der Schwankungsgeschwindigkeit
$-\rho \cdot \overline{w'_j \cdot w'_j}$	N/m ²	turbulenter Spannungstensor
$-\rho \cdot \overline{w'_j \cdot T'}$	W/m ²	turbulente Wärmestromdichte
$\overline{w'_j \cdot \rho_\alpha}$	kg/(m ² .s)	turbulente Stoffstromdichte der Komponente α
U	m	Umfang
u^+	-	dimensionslose Geschwindigkeit
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
v^+	m/s	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
x_j (j=1,2,3)	m	Ortsvektor
x, y, z	m	Komponenten des Ortsvektors
x_α	kmol/kmol	Molanteil der Stoffkomponente α (flüssige Phase)
y_α	kmol/kmol	Molanteil der Stoffkomponente α (gasförmige Phase)
y^+		dimensionsloser Wandabstand
α	W/(m ² .s)	Wärmeübergangskoeffizient
β	m/s	Stoffübergangskoeffizient
δ	m	Grenzschichtdicke
δ_{ij}		Einheitstensor 2. Stufe (Kronecker-Symbol)
$\Delta\rho$	kg/m ³	Dichte bzw. Konzentrationsdifferenz
ΔT	K	Temperaturdifferenz
Δx	m	Schrittweite in x-Richtung
Δy	m	Schrittweite in y-Richtung
$\Delta\varphi$		Differenz der allgemeinen Variablen φ
ε	m ³ /(m ³ .K)	thermischer Volumenausdehnungskoeffizient
ε	m ² /s ³	Dissipation der kinetischen Turbulenzenergie
ε_f		Diskretisierungsfehler

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
η		dimensionslose Koordinate
ϑ		dimensionslose Temperatur
Θ	Grad (°)	Winkel
χ		von Karmán-Konstante
λ	W/(m.K)	Wärmeleitkoeffizient
λ		Konstante
μ	Pa·s	dynamische Viskosität
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
ξ	kg/kg	Masseanteil
ξ		hydraulischer Widerstandsbeiwert
ρ	Kg/m ³	Dichte
ρ_α	kg/m ³	Konzentration der Stoffkomponente α
$\overline{\rho_\alpha}$	kg/m ³	zeitlich gemittelte Konzentration der Stoffkomponente α
ρ'_α	kg/m ³	Schwankung der Konzentration
σ	N/m	Oberflächenspannung
$\tau_{j,i}$	N/m ²	Spannungstensor
τ_w	N/m ²	Wandschubspannung
φ	m ³ /m ³	Volumenanteil
ψ	m ² /s	Stromfunktion
Ψ		Volumenporosität
ω	1/s	Wirbelstärke

2.2 Indizes

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>
A	Auftrieb
a	außen
ab	Abluft
aus	auf den Austrittsquerschnitt bezogen
D	Dampf
d	auf den Durchmesser bezogen
eff	effektiv
ein	auf den Eintrittsquerschnitt bezogen
F	Fluid
f	Film
ges	gesamt
h	hydraulisch, hydrodynamisch
i	innen
i,j,k	Indizes des Ortes bzw. Laufvariable
K	Kondensat
krit	kritisch
k	Krümmung
l	auf die Länge bezogen, Laufvariable
lam	laminar
m	mittel, Modell
max	maximal

Symbol Bezeichnung

n	Iterationsindex
o	Original
p	auf den Punkt bezogen, Partikel
R	auf den Radius bezogen
S	auf den Stoffübergang bezogen
SÜ	Stoffübergang
s	Sättigungszustand
T, th	Temperaturbezogen, thermisch
Tu	auf den Turbulenzgrad bezogen
t, turb	turbulent
u	unten
ü	übergehend
W	Wand
WÜ	Wärmeübergang
wn	Wandnähe
x,y,z	auf die Koordinaten bzw. Länge x, y, z bezogen
α	auf die Komponente α bezogen
δ	auf die Grenzschicht- oder Filmdicke bezogen
0	auf die Zuströmung bezogen
∞	in großer Entfernung

2.3. Ähnlichkeitskennzahlen (mit Bezugslänge l gebildet)

Kennzahl	Bezeichnung
$Ar = \frac{g \cdot l}{w^2} \cdot \varepsilon \cdot \Delta T = \frac{Gr_l}{Re_l^2}$	Archimedes-Zahl
$Ec = \frac{w^2}{c_p \cdot \Delta T}$	Eckert-Zahl
$Eu = \frac{dP}{dx} \cdot \frac{1}{\rho \cdot w^2}$	Euler-Zahl
$Fr_l = \frac{w}{\sqrt{g \cdot l}}$	Froude-Zahl
$Gr_l' = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \frac{\Delta \rho}{\rho}$	Grashof-Zahl für den Stoffübergang
$Gr_l = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \Delta T \cdot \varepsilon$	Grashof-Zahl
$Gr_l^+ = \frac{g \cdot l^4}{\nu^2} \frac{\dot{q}_w}{\lambda} \varepsilon = Gr_l \cdot Nu_l$	Grashof-Zahl bei freier Konvektion mit $\dot{q} = \text{const}$
$Ja = \frac{\rho_f \cdot c_{p,f} (T_f - T_s)}{\rho_D \cdot r_s}$	Jakob-Zahl
$Ko_l = \frac{\alpha_l}{\lambda} \left(\frac{\nu^2}{g} \right)^{1/3}$	Kondensationszahl
$Le = \frac{a}{D}$	Lewis-Zahl
$Nu_l = \frac{\alpha_l \cdot l}{\lambda}$	Nußelt-Zahl
$Pe_l = \frac{w \cdot l}{a} = Re_l \cdot Pr$	Peclet-Zahl
$Pe_l' = \frac{w \cdot l}{D} = Re_l \cdot Sc$	Peclet-Zahl für den Stoffübergang
$Pr = \frac{\nu}{a}$	Prandtl-Zahl
$Pr_t = \frac{\nu_t}{a_t}$	turbulente Prandtl-Zahl
$Ra_l = \frac{\varepsilon \cdot \Delta T \cdot g \cdot l^3}{\nu \cdot a} = Gr_l \cdot Pr$	Rayleigh-Zahl
$Ra_l' = \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot l^3}{\rho \cdot \nu \cdot D} = Gr_l' \cdot Sc$	Rayleigh-Zahl für den Stoffübergang
$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$	Reynolds-Zahl
$Re_t = \frac{\nu_t}{\nu}$	turbulente Reynolds-Zahl

$$S = n \cdot D / w$$

Strouhal-Zahl

$$Sc = \frac{\nu}{D}$$

Schmidt-Zahl

$$Sc_t = \frac{\nu_t}{D_t}$$

turbulente Schmidt-Zahl

$$Sh_l = \frac{\beta \cdot l}{D}$$

Sherwood-Zahl

$$St = \frac{\alpha}{c_p \cdot \rho \cdot w} = \frac{Nu_l}{Re_l \cdot Pr}$$

Stanton-Zahl

$$St' = \frac{\beta}{w} = \frac{Sh_l}{Re_l \cdot Sc}$$

Stanton-Zahl für den Stoffübergang

$$Tu = \frac{\sqrt{\frac{w'_i \cdot w'_i}{3}}}{|w_i|}$$

Turbulenzgrad

$$We_l = \frac{w^2 \cdot l \cdot \rho}{\sigma}$$

Weber-Zahl

3. Stoffwerte ausgewählter Fluide

3.1. Flüssigkeiten

T °C	ρ kg/m ³	c_p J/(kg·K)	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	λ W/(m·K)	Pr	$\epsilon \cdot 10^3$ 1/K	p_s MPa	$\sigma \cdot 10^3$ N/m	r_s kJ/kg
---------	-----------------------------	-------------------	---------------------------------------	----------------------	----	------------------------------	--------------	----------------------------	----------------

Wasser auf der Siedelinie

0,01	999,8	4217	1,791	0,561	13,46	-0,085	0,0006	75,65	2501
50	988	4181	0,554	0,644	3,55	0,462	0,0123	67,95	2382,6
100	958,1	4216	0,291	0,681	1,73	0,754	0,1013	58,78	2257,3
150	916,8	4310	0,197	0,687	1,14	1,024	0,4759	48,7	2114,2
179,8	887	4407	0,169	0,673	0,98	1,207	1	42,22	2014,4
200	864,7	4497	0,155	0,665	0,9	1,372	1,5551	37,81	1939
250	799,2	4869	0,134	0,618	0,84	1,955	3,9776	26,19	1713,7
300	712,2	5773	0,127	0,541	0,95	3,29	8,5917	14,39	1403,1
350	574,5	10080	0,123	0,437	1,64	10,39	16,5367	3,79	893,3
374,2	322	-	0,122	0,83	-	-	22,115	0	0

Wasser bei $p_B = 0,1 \text{ MPa}$

0,01	999,8	4217	1,791	0,561	13,46	-0,085	0,0006	75,65	2501
10	999,7	4192	1,308	0,58	9,45	0,082	0,0012	74,22	2477,4
20	998,3	4182	1,005	0,599	7,01	0,204	0,0023	72,74	2453,8
30	995,7	4178	0,801	0,616	5,41	0,301	0,0042	71,2	2430,3
40	992,3	4179	0,658	0,631	4,33	0,389	0,0074	69,6	2406,5
50	988	4181	0,554	0,644	3,55	0,462	0,0123	67,95	2382,6
60	983,2	4185	0,475	0,654	2,99	0,529	0,0199	66,24	2358,4
70	977,7	4190	0,414	0,663	2,56	0,589	0,0312	64,49	2333,8
80	971,6	4196	0,365	0,67	2,22	0,647	0,0473	62,68	2308,8
90	965,2	4205	0,326	0,675	1,96	0,699	0,0701	60,82	2283,3
T °C	ρ kg/m ³	c_p J/(kg·K)	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	λ W/(m·K)	Pr	$\epsilon \cdot 10^3$ 1/K	p_s MPa	$\sigma \cdot 10^3$ N/m	r_s kJ/kg

Ammoniak auf der Siedelinie

-40	690,1	4441	0,4093	0,6018	2,084	1,764	0,07172		1388,5
-30	677,8	4484	0,3641	0,5815	1,903	1,85	0,1195	33,4	1358,8
-20	665,1	4530	0,3277	0,5611	1,759	1,943	0,1902	31,1	1328,7
-10	652	4573	0,2973	0,5406	1,64	2,045	0,2908	28,9	1296,1
0	638,6	4619	0,2715	0,5201	1,539	2,16	0,4294	26,6	1262
10	624,6	4672	0,249	0,4996	1,455	2,293	0,6149	24,3	1225,5
20	610,2	4738	0,2295	0,4789	1,385	2,45	0,8571	22	1186,3
30	595,2	4821	0,2124	0,4581	1,331	2,641	1,1678	19,6	1144,4

Natrium auf der Siedelinie

204	902,5	1338	0,499	81,46	0,0074	0,266	2,30E-08	0,186	4454,3
316	876,2	1300	0,38	75,76	0,0057	0,27	3,30E-06	0,175	4385,7
427	849,8	1274	0,312	70,22	0,0048	0,281	9,60E-05	0,164	4301,5
538	823,2	1258	0,274	65,03	0,0044	0,292	0,0011	0,153	4201,5
649	796,4	1255	0,246	60,18	0,0041	0,304	0,0069	0,142	4100
760	769,4	1262	0,226	55,52	0,0039	0,315	0,0291	0,131	3993,5
871	742,6	1281	0,213	51,19	0,0039	0,326	0,0924	0,12	3886,3

Transformatoröl bei $p_B = 0,1013 \text{ MPa}$

20	866	1892	36,5	0,124	480,3	0,69			
40	854	1993	16,7	0,123	231,9	0,69			
60	842	2093	8,7	0,122	126,1	0,7			
80	830	2198	5,2	0,12	78,8	0,71			
100	818	2294	3,8	0,119	60,3	0,72			

3.2 Stoffwerte gesättigter Dämpfe

T °C	ρ kg/m ³	c_p J/(kg·K)	$v \cdot 10^6$ m ² /s	λ W/(m·K)	Pr	$\varepsilon \cdot 10^3$ 1/K	p_s MPa	$\sigma \cdot 10^3$ N/m	r_s kJ/kg
-----------	-----------------------------	-------------------	-------------------------------------	----------------------	----	---------------------------------	--------------	----------------------------	----------------

Wasserdampf

0,01	0,0048	1865	1900,9	0,017	1,01	3,669			
20	0,0172	1874	562,7	0,018	1	3,431			
50	0,083	1907	127,9	0,02	0,99	3,15			
100	0,5974	2034	20,55	0,025	1	2,882			
150	2,547	2319	5,5	0,032	1,03	2,897			
200	7,8653	2881	2,01	0,04	1,13	3,291			

Ammoniak

-40	0,6445	2290	12,04	0,0168	1,059	4,791			
-30	1,04	2374	7,75	0,0179	1,072	4,754			
-20	1,607	2469	5,202	0,01896	1,087	4,759			
-10	2,396	2580	3,619	0,02023	1,1	4,82			
0	3,463	2710	2,594	0,0218	1,11	4,933			
10	4,876	2862	1,908	0,0235	1,12	5,105			
20	6,711	3043	1,434	0,0254	1,15	5,347			
30	9,06	3260	1,099	0,0273	1,19	5,674			

3.3. Stoffwerte von Gasen und überhitzten Dämpfen

T °C	ρ kg/m ³	c_p J/(kg·K)	$v \cdot 10^6$ m ² /s	λ W/(m·K)	Pr	$\varepsilon \cdot 10^3$ 1/K	p_s MPa	$\sigma \cdot 10^3$ N/m	r_s kJ/kg
-----------	-----------------------------	-------------------	-------------------------------------	----------------------	----	---------------------------------	--------------	----------------------------	----------------

Trockene Luft bei $p_B = 0,1$ MPa

-20	1,376	1006	11,73	0,023	0,71	3,95			
0	1,275	1006	13,41	0,0245	0,7	3,671			
20	1,188	1007	15,13	0,026	0,7	3,419			
40	1,112	1008	16,92	0,0275	0,69	3,2			
60	1,045	1009	18,88	0,0289	0,69	3,007			
80	0,986	1010	21,02	0,0304	0,69	2,836			
100	0,933	1012	23,15	0,0318	0,69	2,684			
160	0,804	1020	29,88	0,0361	0,68	2,311			
200	0,735	1026	34,94	0,0389	0,68	2,115			
250	0,665	1035	41,18	0,0424	0,67	1,912			

T °C	ρ kg/m ³	c_p J/(kg·K)	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	λ W/(m·K)	Pr	$\epsilon \cdot 10^3$ 1/K	p_s MPa	$\sigma \cdot 10^3$ N/m	r_s kJ/kg
---------	-----------------------------	-------------------	---------------------------------------	----------------------	----	------------------------------	--------------	----------------------------	----------------

Ammoniak bei $p_B = 0,1$ MPa

-30	0,862	2160	10,2	0,019	0,99	4,115		
-20	0,826	2155	11,01	0,0202	0,97	3,953		
-10	0,794	2150	11,84	0,0213	0,95	3,802		
0	0,763	2140	12,71	0,0224	0,93	3,663		
10	0,735	2150	13,67	0,0235	0,92	3,534		
20	0,708	2160	14,52	0,0245	0,91	3,431		

Helium bei $p_B = 0,1$ MPa

-270		5200		0,0106				
-240	1,4657	5200	3,42	0,353	0,74	30,303		
-129	3,3799	5200	37,11	0,0928	0,7	6,944		
-73	0,2435	5200	64,38	0,1177	0,69	5		
-18	0,1906	5200	95,5	0,1357	0,7	3,922		
93	0,1328	5200	173,6	0,1691	0,71	2,732		
^{204,4}	0,102	5200	269,3	0,197	0,72	2,096		

Wasserdampf bei $p_B = 5,0$ MPa

300	22,06	3199	0,9	0,053	1,2	3,211		
350	19,25	2669	1,15	0,0552	1,07	2,579		
400	17,3	2451	1,41	0,0595	1	1,947		

3.3 Diffusionskoeffizienten und Schmidt-Zahlen einiger Fluide bei $p_B = 0,1013$ MPa in Luft bzw. in Wasser

Diffundierendes Fluid geringer Konzentration	in Luft ($T_B = 0^\circ\text{C}$)		In Wasser ($T_B = 25^\circ\text{C}$)	
	$D \cdot 10^5$ in m ² /s	Sc	$D \cdot 10^9$ in m ² /s	Sc
Wasserdampf	2,2	0,6		
Wasserstoff	6,11	0,22	5,85	154
Sauerstoff	1,78	0,75	2,5	361
Kohlendioxid	1,38	0,96	1,96	461
Ammoniak	1,98	0,67	1,7	531
Methanol	1,32	1	1,6	564
Ethanol	1,02	1,3	1,28	705
Essigsäure	1,064	1,25	1,24	728

Bei $T \neq T_B$ und $p \neq p_B$ gilt:

$$D(T, p) \approx D \cdot \left(\frac{p_B}{p}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_B}\right)^{2/3} \quad \text{für Gase}$$

$$D(T) = D \left[1 + 0,02(T - T_B)\right] \quad \text{oder für Flüssigkeiten (mit T in K)}$$

$$D(T) \approx D \frac{\rho_B \cdot \nu_B \cdot T}{\rho \cdot \nu \cdot T_B}$$

4. Wichtige physikalische und mathematische Beziehungen

4.1. Ströme

Ströme allgemein:

$$\text{Strom} = \int_A \text{Stromdichte} \cdot \text{Flächenelement} \quad (\text{G } 1)$$

$$\text{Massestrom} \quad \dot{m} = \int_A \dot{m}'' dA_i = \int_A \rho \cdot w_i dA_i \quad (\text{G } 2)$$

$$\text{Volumenstrom} \quad \dot{V} = \int_A w_i dA_i \quad (\text{G } 3)$$

$$\text{Enthalpiestrom} \quad \dot{H} = \int_A \dot{h}_i dA_i = \int_A h \cdot \dot{m}_i'' dA_i = \int_A \rho \cdot c_p \cdot w_i \cdot \Delta T dA_i \quad (\text{G } 4)$$

Wärmekapazitätsstrom

$$\dot{C} = \int_A c_p \cdot \dot{m}'' dA_i = \int_A \rho \cdot c_p \cdot w_i dA_i \quad (\text{G } 5)$$

$$\text{Wärmestrom} \quad \dot{Q} = \int_A \dot{q}_i dA_i \quad (\text{G } 6)$$

$$\text{Stoffstrom} \quad \dot{m}_\alpha = \int_A \dot{m}''_{\alpha,i} dA_i = \int_A \rho_\alpha \cdot w_i dA_i \quad (\text{G } 7)$$

4.2. Stromdichten infolge Mitführung

Stromdichten infolge Mitführung = Konzentration · Geschwindigkeit

$$\text{Massestromdichte} \quad \dot{m}_i'' = \rho \cdot w_i \quad (\text{G 8})$$

$$\text{Enthalpiestromdichte} \quad \dot{h}_i'' = \rho \cdot h \cdot w_i \quad \text{mit } h = c_p (T - T_o) \quad (\text{G 9})$$

$$\text{Stoffstromdichte} \quad \dot{m}_{\alpha,i}'' = \rho_{\alpha} \cdot w_i \quad (\text{G 10})$$

4.3. Mittlere Größen in durchströmten Querschnitten bei x = const :

$$\text{mittlere Fluidtemperatur} \quad T_F = \frac{\dot{H}}{\dot{C}} \quad (\text{G 11})$$

Ebene Strömungen:

$$\text{mittlere Temperatur:} \quad T_F = \frac{\dot{H}}{\dot{C}} = \frac{\int_0^b T(y) \cdot w_x(y) dy}{\int_0^b w_x(y) dy} \quad (\text{G 12})$$

$$= T_W + \frac{\int_0^b (T(y) - T_W) \cdot w_x(y) dy}{\int_0^b w_x(y) dy}$$

$$\text{mittlere Geschwindigkeit: } w_m = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \quad \text{In x-Richtung: } w_{x,m} = \frac{\dot{m}_x}{\rho \cdot A_x} \quad (\text{G 13})$$

$$\text{mittlere Konzentration} \quad : \rho_{\alpha,m} = \frac{\dot{m}_{\alpha}}{\dot{V}}$$

$$\rho_{\alpha,m} = \rho_{\alpha,W} + \frac{\int_0^b (\rho_{\alpha}(y) - \rho_{\alpha,W}) \cdot w_x(y) dy}{\int_0^b w_x(y) dy} \quad (\text{G 14})$$

4.4. Beziehungen aus der Vektoranalysis in Operator- und indizierter Schreibweise

Den folgenden Beziehungen ist ein kartesisches Koordinatensystem mit den Koordinatenrichtungen x, y, z und den zugehörigen Einheitsvektoren $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ zugrunde gelegt. Bei der indizierten Schreibweise wird von der Summationskonvention Gebrauch gemacht. Die Indizes i, j, k laufen von 1 bis 3.

Vektor- und Operatorschreibweise von

Geschwindigkeiten
$$\vec{w} = \vec{i} w_x + \vec{j} w_y + \vec{k} w_z \quad \rightarrow \quad w_j \quad (\text{Ma 1})$$

Gradient eines Skalars

$$\text{grad } T = \nabla T = \vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (\text{Ma 2})$$

Gradient eines Vektors

$$\text{grad } \vec{w} = \nabla \vec{w} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_x}{\partial x} & \frac{\partial w_y}{\partial x} & \frac{\partial w_z}{\partial x} \\ \frac{\partial w_x}{\partial y} & \frac{\partial w_y}{\partial y} & \frac{\partial w_z}{\partial y} \\ \frac{\partial w_x}{\partial z} & \frac{\partial w_y}{\partial z} & \frac{\partial w_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \quad (\text{Ma 3})$$

Divergenz eines Vektors

$$\text{div } \vec{w} = \nabla \vec{w} = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial w_j}{\partial x_j} \quad (\text{Ma 4})$$

Laplace-Operator eines Skalars (z.B. des Druckes)

$$\Delta p = \text{div grad } p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} \quad (\text{Ma 5})$$

Laplace-Operator eines Vektors (z.B. Geschwindigkeit)

$$\begin{aligned} \Delta \vec{w} &= \text{grad div } \vec{w} - \text{rot rot } \vec{w} = \\ &= \vec{i} \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \\ &+ \vec{j} \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_j^2} \quad (\text{Ma 6}) \\ &+ \vec{k} \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

Rotation eines Vektors (z.B. Geschwindigkeit (Wirbelvektor))

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{w} &= \nabla \times \vec{w} = \vec{\omega} = \\ &= \vec{i} \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} - \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} - \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} - \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) \quad (\text{Ma 7}) \\ &= \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ w_x & w_y & w_z \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \varepsilon_{ijk} \frac{\partial w_k}{\partial x_j} = \omega_i \end{aligned}$$

Substantielle Ableitung nach der Zeit (z.B. für die Temperatur)

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{w} \text{ grad } T \quad \rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial t} + w_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (\text{Ma 8})$$

Einheitstensor 3. Stufe ist folgendermaßen definiert:

$$\varepsilon_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ -1 \\ 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} 1 \text{ für gerade Permutation der Indizes } 123 \quad (ijk \in \{123, 231, 312\}), \\ -1 \text{ für ungerade Permutation der Indizes } 123 \quad (ijk \in \{132, 213, 321\}), \\ \text{sonst } 0. \end{array} \quad (\text{Ma 9})$$

4.5. Grundgleichungen zur Berechnung des Wärme- und Stoffübergangs (bei konstanten Stoffwerten)

Navier-Stokes-Gleichungen

Operatorschreibweise: indizierte Schreibweise: (GGI 1
)

$$\frac{D \vec{w}}{D t} + \frac{1}{\rho} \text{grad } p = \nu \Delta \vec{w} + \vec{f}$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_j \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_j \cdot \partial x_j} + f_i$$

Wärmetransportgleichung:

Operatorschreibweise: indizierte Schreibweise: (GGI 2
)

$$\frac{D T}{D t} = a \cdot \Delta T \qquad \frac{\partial T}{\partial t} + w_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \cdot \partial x_j}$$

Stofftransportgleichung:

Operatorschreibweise: indizierte Schreibweise: (GGI 3
)

$$\frac{D \rho_\alpha}{D t} = D \cdot \Delta \rho_\alpha \qquad \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial t} + w_j \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial x_j} = D \frac{\partial^2 \rho_\alpha}{\partial x_j \cdot \partial x_j}$$

Kontinuitätsgleichung

Operatorschreibweise: indizierte Schreibweise: (GGI 4
)

$$\text{div } \vec{w} = 0 \qquad \frac{\partial w_j}{\partial x_j} = 0$$

Fouriersches Gesetz der Wärmeleitung :

Operatorschreibweise: indizierte Schreibweise: (GGI 5
)

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } T \qquad q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

Ficksches Gesetz der Diffusion:

mit

$$-\rho \overline{w'_j w'_i} = \tau_{j,i,t} = \rho \cdot \nu_t \left(\frac{\partial \overline{w}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{w}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{3} \rho \delta_{ji} \overline{u'_k u'_k} \quad (\text{GGI})$$

12)

Reynoldscher Spannungstensor

$$-\rho \cdot c_p \cdot \overline{w'_j T'} = -\dot{q}_{j,t} = \rho \cdot c_p \cdot a_t \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} \quad (\text{GGI})$$

13)

Reynoldsche Wärmestromdichte

$$-\overline{w'_j \rho'_\alpha} = -\dot{m}''_{\alpha,j,t} = D_t \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial x_j} \quad (\text{GGI})$$

14)

Reynoldsche Stoffstromdichte

Man beachte: $\nu_t \approx a_t \approx D_t \quad (\text{GGI})$

15)

Bedingt durch den gleichen Transportmechanismus der Fluidballen mit dem Impulsinhalt, der Temperatur bzw. der Konzentration werden die Transportkoeffizienten am gleichen Ort in der gleichen Strömung annähernd gleich groß.

Berechnung turbulenter Austauschgrößen (Beispiele)

a) $\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \overline{w}_x}{\partial y} \right|, \quad l_m \cong \text{Mischungsweg} \quad (\text{GGI})$

16)

Der Mischungsweg für einige charakteristische Strömungen

Rohrströmung:

$$l_m = R \left[0,14 - 0,08 \left(1 - \frac{r}{R} \right)^2 - 0,06 \left(1 - \frac{r}{R} \right)^4 \right] \quad (\text{GGI})$$

17)

ebene Grenzschichten: $l_m = 0,4y,$

ebene Freistrahlen : $l_m = 0,09\delta,$

runde Freistrahlen: $l_m = 0,07\delta.$

b) $v_t = C \cdot E^{1/2} \cdot L,$ (GGI

18)

($E = \frac{1}{2} \overline{w'_i w'_i}$ spezifische Turbulenzenergie; L = charakteristische Abmessung der

Turbulenzelemente → 2-Parameter-Modelle → partielle Differentialgleichungen)

4.7. Spezielle Formen der Grundgleichungen für die Berechnung zweidimensionaler Strömungen mit Wärme- und Stofftransport bei konstanten Stoffwerten

Wirbeltransportgleichung:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (\text{GGI}$$

19)

Gleichung für die Stromfunktion:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (\text{GGI}$$

20)

Wärmetransportgleichung:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{GGI}$$

21)

Stofftransportgleichung:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 \rho_\alpha}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_\alpha}{\partial y^2} \right) \quad (\text{GGI})$$

22)

Die senkrecht zu einer begrenzenden Wand integrierten Platten-
grenzschichtgleichungen:

Impulssatz

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta} (w_{x,\infty} - w_x) \cdot w_x \, dy = \nu \frac{\partial w_x}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (\text{GGI})$$

23)

Wärmestromgleichung der Temperaturgrenzschicht

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_T} (T_\infty - T) \cdot w_x \, dy = a \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (\text{GGI})$$

24)

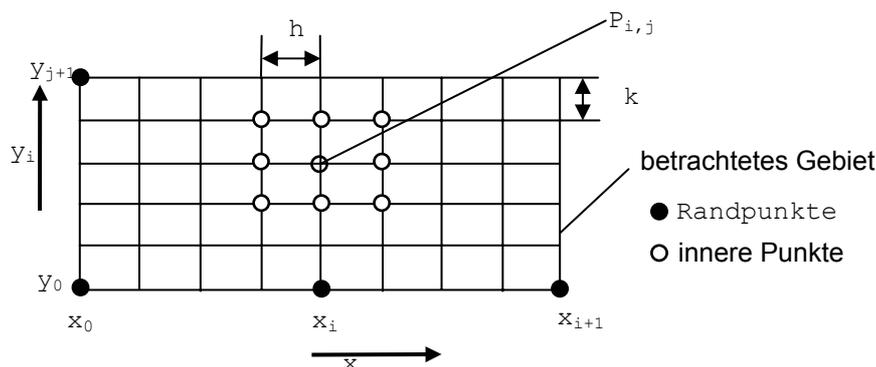
Stoffstromgleichung der Konzentrationsgrenzschicht

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_{\rho_\alpha}} (\rho_{\alpha,\infty} - \rho_\alpha) \cdot w_x \, dy = D \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (\text{GGI})$$

25)

Die Wärmetransportgleichung in Differenzenschreibweise (zentrale
Differenzenquotienten):

Man setzt unter Beachtung der Gitternotation



Mit $\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{x_{i+1} - x_{i-1}} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2h}$ usw. erhält man : (N 1)

$$w_{x,i,j} \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2h} + w_{y,i,j} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2k} = a \left(\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h^2} + \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{k^2} \right) \quad (N 2)$$

5. Kennzahlgleichungen für den Wärmeübergang in einphasigen Fluiden

5.1. Definitionen, Übergangskoeffizienten sowie Grundformen und Korrekturfaktoren der Kennzahlgleichungen einschließlich der Angaben für den Stoffübergang

	Wärmeübergang	Stoffübergang
Stoffwerte (K 1)	λ bzw. a Pr	D Sc
Treibende Differenz (K 2)	ΔT	$\Delta \rho$
Stromdichte	$\dot{q}_j = \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}$	$\dot{m}''_{\alpha,j} = D \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial x_j}$
Übergangskoeffizient		
Örtlicher (K 3)	$\alpha_x = \frac{\dot{q}_{W,x}}{T_W - T_F} \Big _x$	$\beta_x = \frac{\dot{m}''_{\alpha,W,x}}{\rho_{\alpha,W} - \rho_{\alpha,F}} \Big _x$
Mittlerer (K 4)	$\alpha_l = \frac{\dot{q}_W}{T_W - T_F} \Big _l$	$\beta_l = \frac{\dot{m}''_{\alpha,W}}{\rho_{\alpha,W} - \rho_{\alpha,F}} \Big _l$
Kennzahlen (K 5)	Gr, Nu, St	Gr', Sh, St'

	Wärmeübergang	Stoffübergang
Kennzahlgleichungen		
erzwungene Konvektion (K 6)	Nu = f(Re, Pr) Nu = C.Re ^m .Pr ⁿ .K _p	Sh = f(Re, Sc) Sh = Re ^m .Sc ⁿ .K _p
freie Konvektion (K 7)	Nu = f(Gr, Pr) Nu = C.(Gr, Pr) ⁿ .K _p	Sh = f(Gr', Sc) Sh = C.(Gr', Sc) ⁿ .K _p
gemischte Konvektion (K 8)	Nu = f(Re, Gr, Pr) Nu = C.Re ^m .Pr ⁿ .Gr ^k .K _p	Sh = f(Re, Gr', Sc) Sh = C.Re ^m .Sc ⁿ .Gr' ^k .K _p

Korrekturfaktoren und Bezugstemperatur

K_p : Korrekturfaktor für

- Temperatureinflüsse (K_T , K_{T^*})
- sich entwickelnde Strömungen (K_1)
- Einflüsse der Geometrie (K_k , K_{dh} u.a.)
- Konvektionseinflüsse (K_C)
- Kombinierte Einflüsse ($\prod_p K_p$)

Die Anwendung der Korrekturfaktoren ist bei jeder Rechnung mit Kennzahlgleichungen zu überprüfen!

T_B : Bezugstemperatur für die Stoffwerte

- bei Gasen und flüssigen Metallen: $T_B = \frac{T_F + T_W}{2}$ (K 9)

- bei Flüssigkeiten (außer flüssigen Metallen): $T_B = T_F$. (K 10)

(Korrekturfaktor für den Zähigkeitseinfluß infolge Temperaturgradienten beachten!)

T_F : Fluidtemperatur (K 11)

- in durchströmten Rohren, Kanälen, Rohrbündeln, Haufwerken:

$$T_F = \frac{T_{F, \text{ein}} + T_{F, \text{aus}}}{2}$$

- bei Grenzschichten, Umströmung: $T_F = T_\infty$

- kurze Rohre. Rohreinlaufströmungen: $T_F = T_{\text{ein}}$

- Kondensation bzw. Verdampfung reiner Fluide: $T_F \approx T_S$ bzw.

$$T_F = (T_W + T_S)/2$$

Beispiele:

Korrekturfaktoren für Temperatureinflüsse

(K 12)

	Flüssigkeiten	Gase
Durchströmung	$K_T = (Pr/Pr_w)^{0,11}$	$K_T = 1$
Umströmung	$K_T = (Pr/Pr_w)^{0,25}$	$K_T = (T_F/T_W)^{0,12}$
Freie Konvektion	$K_T = (Pr/Pr_w)^{0,25}$	$K_T = 1$

Es gilt: Pr bei T_F (vgl. auch Abschn. 4.3.), Pr_w bei T_W .

Bei fehlenden Angaben wird $K_T = 1$ angenommen.

Einlaufängen für laminare Strömung:

	$l_h/(d_h \cdot Re)$	$l_{th}/(d_h \cdot Re \cdot Pr)$	
		$T_w = const$	$\dot{q}_w = const$
Kreisrundes Rohr	0,065	0,055	0,07
ebener Kanal	0,01	0,014	0,02
Ringkanal	0,01 bis 0,015	0,05	0,06

Korrekturfaktor für sich entwickelnde Einlaufströmung $K_i = 1 + (d/l)^{2/3}$.

5.2. Wärmeübergang bei freier Konvektion

allgemeine Gleichung nach Michejew:

$$Nu = C Ra^n \cdot \varepsilon_F \cdot K(Pr) \quad (K 13)$$

$Gr_1 \cdot Pr = Ra_1$	C	n	Geometrie, Bezugslänge l und Faktor ε_F
$< 10^{-3}$	0,45	0	
$10^{-3} \dots \dots \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	
$5 \cdot 10^2 \dots \dots \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	
$2 \cdot 10^7 \dots \dots \dots 10^{13}$	0,135	1/3	

Wärmeübergang an senkrecht stehenden ebenen Flächen im laminaren Bereich ($Ra_l < 10^{12}$)

$$Nu_x = 0,508 \left(\frac{Gr_x \cdot Pr^2}{0,952 + Pr} \right)^{1/4}, \quad Nu_l = 4/3 \cdot Nu_{x=l} \quad (T_w = \text{const}) \quad (K 14)$$

$$Nu_x = 0,616 \left(\frac{Gr_x^+ \cdot Pr^2}{0,8 + Pr} \right)^{1/5}, \quad Nu_l = 5/4 \cdot Nu_{x=l} \quad (\dot{q}_w = \text{const}) \quad (K 15)$$

Mittlerer Wärmeübergang an senkrecht stehenden Flächen im turbulenten Bereich ($Ra_l > 10^{12}; T_w = \text{const}$)

$$Nu_l = 0,15 \cdot Ra_l^{1/3} \cdot K(Pr) \quad \text{mit} \quad K(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{16/27} \quad (K 16)$$

Mittlerer Wärmeübergang an waagerechten Flächen

- a) im Falle gegen die Fläche gerichtet wirkender Auftriebskraft
($Ra_l < 10^{12}$; $0,5 < Pr < 100$; $T_W = \text{const}$):

$$Nu_l = 0,657 \cdot Ra_l^{1/5} \cdot Pr^{1/20} \quad (\text{K 17})$$

- b) im Falle von der Fläche weg gerichtet wirkender Auftriebskraft
($Pr > 0,5$; $T_W = \text{const}$):

$$Nu_l = 0,54 \cdot Ra_l^{1/4} \quad \text{für } 10^5 < Ra_l < 10^7 \dots 10^8$$

$$Nu_l = 0,14 \cdot Ra_l^{1/3} \quad \text{für } 10^8 < Ra_l < 10^{12} . \quad (\text{K 18})$$

Mittlerer Wärmeübergang an horizontalen Zylindern

$$Nu_d = 0,433 + 0,087 \cdot Ra_d^{1/12} + 0,5 \cdot Ra_d^{1/4} \quad \text{für } 10^{-4} < Ra_d < 10^9 \text{ und} \quad (\text{K 19})$$

$$Nu_d = 0,1 \cdot Ra_d^{1/3} \quad \text{für } Ra_d > 10^9$$

Mittlerer Wärmeübergang an Kugeln

$$Nu_d = 2 + 0,569 Ra_d^{1/4} \quad \text{für } Ra_d < 10^8 , \quad (\text{K 20})$$

$$Nu_d = 2 + 0,0254 Ra_d^{1/3} \quad \text{für } Ra_d > 10^8 .$$

Wärmestromdichte in eingeschlossenen Fluidschichten

$$\dot{q}_W = \frac{\lambda}{\delta} (T_{W,1} - T_{W,2}) \cdot K_C . \quad (\text{K 21})$$

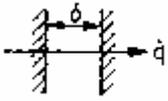
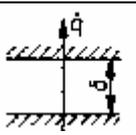
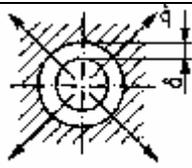
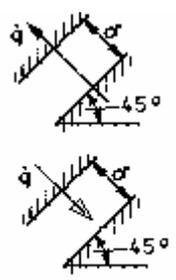
$$\text{Für } Ra_\delta < 1700 \quad \text{gilt } K_C = 1,$$

$$\text{für } 1700 < Ra_\delta < 10^8 \quad \text{gilt } K_C = 1 + \frac{m(Gr_\delta \cdot Pr)^k}{n + Gr_\delta \cdot Pr} \quad (\text{K 21a})$$

)

Stoffwerte bei $T_B = (T_{W,1} + T_{W,2})/2$

Faktoren und Exponenten für die Wärmestromdichte in eingeschlossenen Fluidschichten

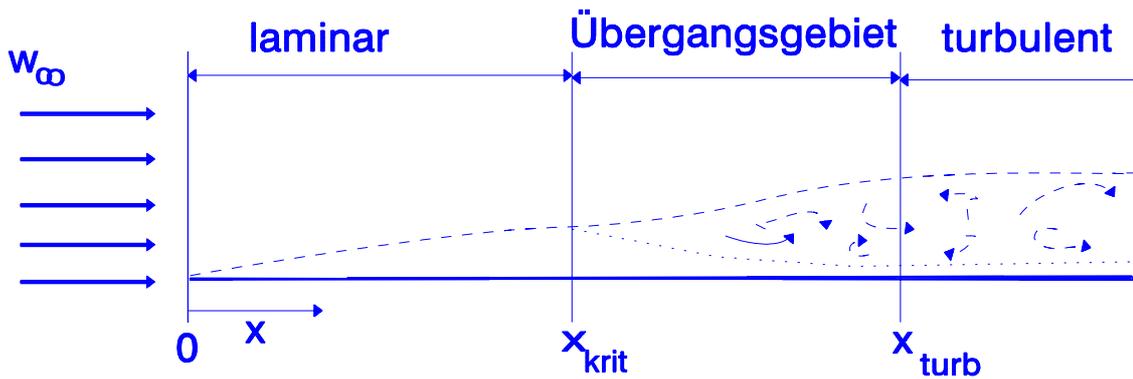
Geometrische Anordnung	Bild	m	n	k
Senkrechte Spalte		0,0236	10100	1,393
Horizontale Spalte		0,07	3200	1,333
Ringspalte		0,119	14500	1,27
Geneigte Spalte		0,043	4100	1,36
		0,025	13000	

5.3. Wärmeübergang bei erzwungener Konvektion

Wärmeübergang an längs angeströmten ebenen Platten ($Pr > 0,5$)

Allgemeine Aussagen zur Plattenumströmung:

Geschwindigkeits-Grenzschicht an einer ebenen Platte



$$Re_x = \frac{w_x \cdot x}{\nu}, Re_{krit} = \frac{w_x \cdot x_{krit}}{\nu} \approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ bis } 5 \cdot 10^5$$

Grenzschichtdicken:

Laminarer Bereich

$$\delta \approx 5 \cdot \frac{x}{\sqrt{Re_x}}, \quad \delta_T = \delta \cdot Pr^{-1/3}$$

Turbulenter Bereich

$$\delta = 0,37 \cdot x \cdot Re_x^{-0,2}, \quad \delta_T = \delta$$

laminare Unterschicht

$$\delta_u = 71,7 \cdot x \cdot Re_x^{-0,9},$$

Kennzahlgleichungen für den Wärmeübergang:

a) $T_W = \text{const}$:

$$Nu_x = 0,332 Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{für } Re_x < Re_{x,krit} \quad (\text{K 22})$$

$$Nu_x = 0,0296 Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad \text{für } Re_x > Re_{x,krit} \quad (\text{K 23})$$

$$Nu_l = 0,664 Re_l^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{für } Re_l < Re_{x,krit} \quad (K 24)$$

$$Nu_l = 0,664 Re_{x,krit}^{1/2} \cdot Pr^{1/3} + 0,037 (Re_l^{0,8} - Re_{x,krit}^{0,8}) \cdot Pr^{0,43} \quad (K 25)$$

oder

$$Nu_l = \frac{0,037 Re_l^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 Re_l^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad \text{für } Re_l > Re_{x,krit} .$$

Korrekturfaktor bei Turbulenter Grundströmung

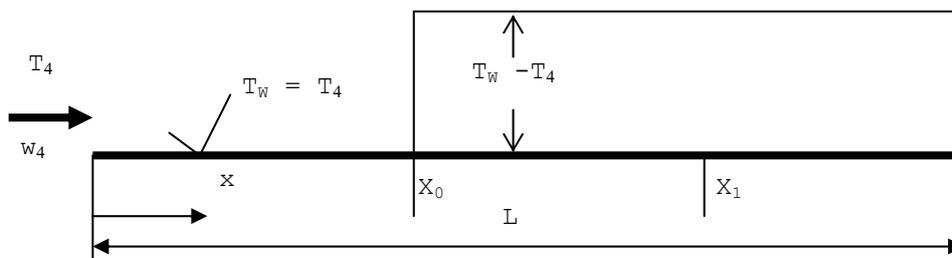
($Re < Re_{krit}$; $0,5 < Pr < 100$; $Tu < 10\%$):

$$K_{Tu} = \frac{St(Tu \neq 0)}{St(Tu = 0)} = 1 + 0,41 \tanh(0,2 Tu) \quad (K 26)$$

b) $T_W \neq const$:

$$Nu_{TW \neq const} = Nu_{TW = const} \cdot K_T^* \quad (K 27)$$

Temperatursprung an der Stelle $x = x_0$:



$$K_{T,x}^* = \left[1 - \left(\frac{x_0}{x} \right)^{3/4} \right]^{-1/3} \quad \text{für } Re < Re_{krit} \quad (K 27a)$$

)

$$K_{T,x}^* = \left[1 - \left(\frac{x_0}{x} \right)^{9/10} \right]^{-1/9} \quad \text{im Übergangsbereich bzw. für } Re > Re_{krit} \quad (K 27b)$$

)

$$T_w(x) = T_\infty + C \cdot x^m, \quad \text{Pr} > 1; \text{Re} < \text{Re}_{\text{krit}}; T_B = T_\infty: \quad (\text{K 28})$$

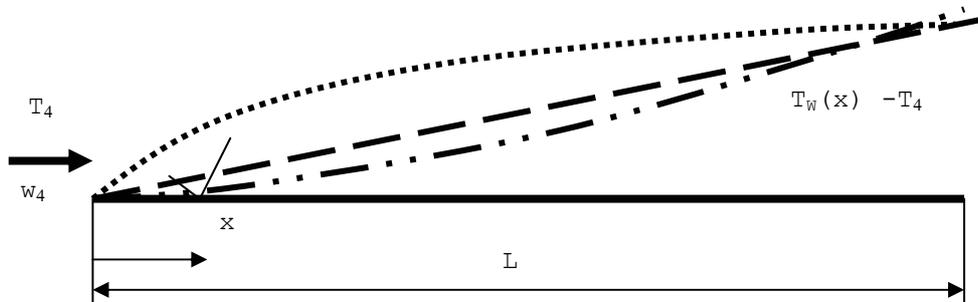


Tabelle: Korrekturfaktoren $K_{T,x}^*$ in Abhängigkeit vom Exponenten m

m	-0,25	0	0,2	0,4	0,5	0,8	2,0
$K_{T,x}^*$	0,665	1	1,17	1,3	1,36	1,52	1,98
		↑			↑		
		$T_w = \text{const}$			$\dot{q} = \text{const}$		

Wärmeübergang an längs angeströmten Zylindern ($\text{Re} < \text{Re}_{\text{krit}}$) (K 29)

$$Nu_x = 0,332 \text{Re}_x^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \left[1 + 4,6 \left(\frac{x}{d} \right) \cdot \text{Re}_x^{-0,5} \right] \quad \text{Korrekturfaktor bei turbulenter}$$

Anströmung:

$$Nu_l = 0,664 \text{Re}_l^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \left[1 + 2,3 \left(\frac{l}{d} \right) \cdot \text{Re}_l^{-0,5} \right] \quad K_{\text{Zyl}} = \left(1 + 0,37 \frac{2 \cdot l}{d \cdot \text{Re}^{1/5}} \right)^{0,14}$$

Mittlerer Wärmeübergang an quer angeströmten Zylindern ($T_w = \text{const}$)

$$Nu_d = C \cdot \text{Re}_d^m \cdot \text{Pr}^n \quad (\text{K 30})$$

Re_d -Bereich	C	m	n	Strömungsform
1 40	0,76	0,4	0,37	schleichende Strömung
40 10^3	0,152	0,5	0,37	laminare Strömung
10^3 $2 \cdot 10^5$	0,26	0,6	0,37	Übergangsbereich
$2 \cdot 10^5$... $4 \cdot 10^7$	0,023	0,8	0,4	turbulente Strömung

Korrekturfaktor bei turbulenter Anströmung:

$$Nu_{d(T_u \neq 0)} = Nu_{d(T_u = 0)} \cdot Tu^{0,15} \text{ für } 1\% < Tu < 15\%. \quad (\text{K 30a})$$

Mittlerer Wärmeübergang an quer angeströmten Zylindern $\dot{q}_W = \text{const}; 10^{-2} < Re_d \leq 10^5$:

$$Nu_d = 0,42 Pr^{1/5} + 0,57 Re_d^{1/2} \cdot Pr^{-1/3}. \quad (\text{K 31})$$

Mittlerer Wärmeübergang in durchströmten Rohren ($T_W = \text{const}$)

Laminare Durchströmung von Rohren:

a) $Re_d < 2300$; $Pr > 0,5$; hydrodynamisch und thermisch ausgebildete Strömung:

$$Nu_d = 3,66 \quad (\text{K 32})$$

b) $Re_d < 2300$; $0,5 < Pr < 500$; $10^{-4} < \frac{l}{(d \cdot Re_d \cdot Pr)} < 1$;

hydrodynamisch und thermisch sich entwickelnde Strömung:

$$Nu_d = 3,66 + \frac{0,0677 \left(Re_d \cdot Pr \cdot \frac{d}{l} \right)^{1,33}}{1 + 0,1 \left(Re_d \cdot \frac{d}{l} \right)^{0,83} \cdot Pr} \quad (\text{K 33})$$

c) $Re_d < 2300$; $0,5 < Pr < 500$; $10^{-4} < \frac{l}{(d \cdot Re_d \cdot Pr)} < 1$;

hydrodynamisch ausgebildete und thermisch sich entwickelnde Strömung:

$$Nu_d = 3,66 + \frac{0,0668 Re_d \cdot Pr \cdot \frac{d}{l}}{1 + 0,045 \left(Re_d \cdot \frac{d}{l} \cdot Pr \right)^{2/3}} \quad (\text{K 34})$$

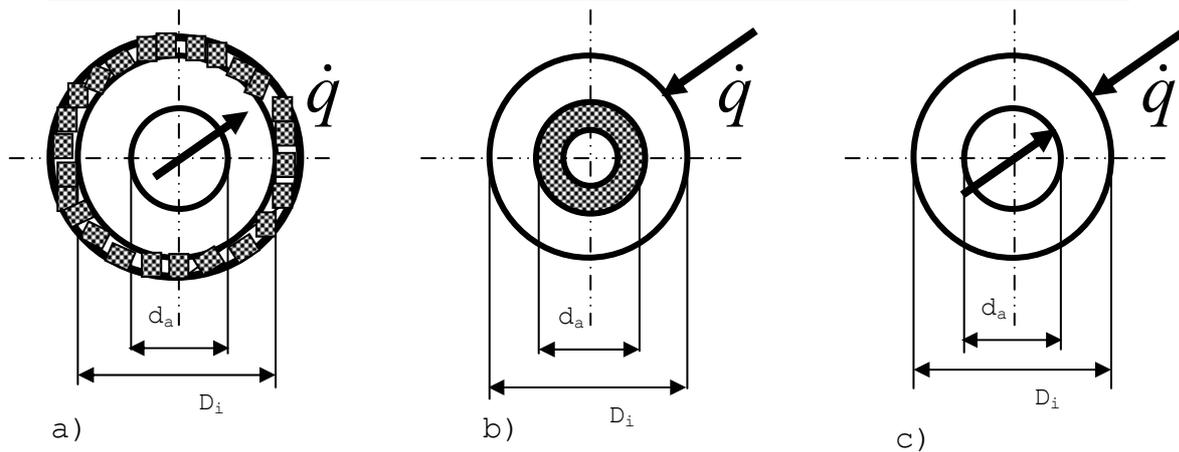
Turbulente Durchströmung von Rohren:

d) $Re_d \geq 2300$; glatte Oberfläche:

(I. d. R. werden für $T_W = \text{const}$ und $\dot{q}_W = \text{const}$ dieselben Kennzahlen verwendet.)

$$Nu_d = \frac{\frac{\xi}{8} (Re_d - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \cdot K_l; \text{ Widerstandsbeiwert: } \xi = (1,82 \lg Re_d - 1,64)^{-2} \quad (\text{K 35})$$

Mittlerer Wärmeübergang in Kreisringkanälen (Doppelrohrwärmeübertrager)



($T_W = \text{const}$; $2300 < Re_{dh} < 10^6$; $0,5 < Pr < 2 \cdot 10^3$)

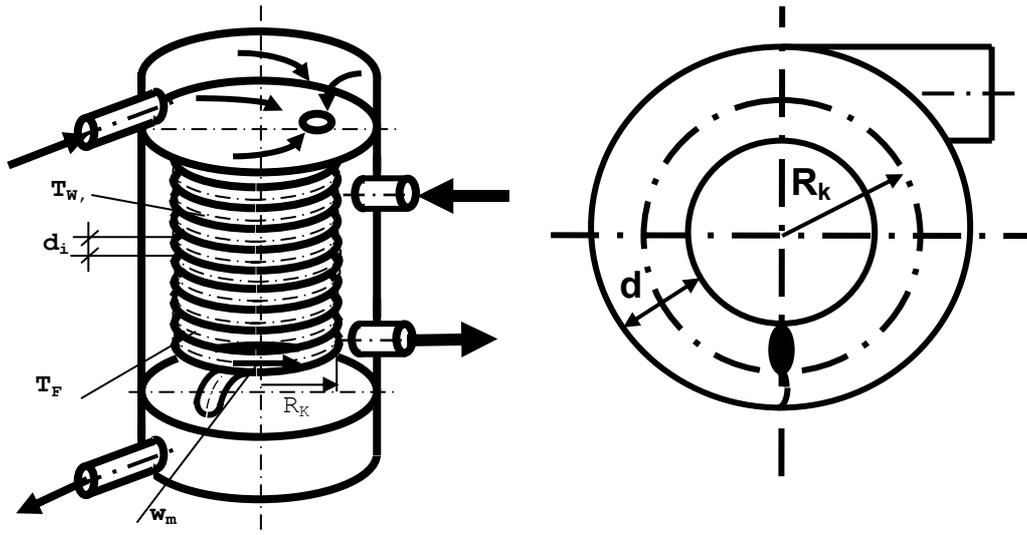
Nu_d entsprechend der vorangegangenen Gleichung für die Rohrströmung
mit $d_h = D_i - d_a$)

$$\text{a) } Nu_{dh}^* = Nu_{dh} \cdot 0,86 \left(\frac{d_a}{D_i} \right)^{-0,16} \quad (\text{K 36})$$

$$\text{b) } Nu_{dh}^* = Nu_{dh} \cdot \left[1 - 0,14 \left(\frac{d_a}{D_i} \right)^{0,6} \right] \quad (\text{K 37})$$

$$\text{c) } Nu_{dh}^* = Nu_{dh} \cdot \frac{0,86 \left(\frac{d_a}{D_i} \right)^{0,84} + \left[1 - 0,14 \left(\frac{d_a}{D_i} \right)^{0,6} \right]}{1 + \left(\frac{d_a}{D_i} \right)} \quad (\text{K 38})$$

Mittlerer Wärmeübergang in durchströmten Rohrwendeln und Rohrkrümmern



Gültigkeitsbereiche der Kennzahlgleichungen für die Durchströmung von Rohrbögen

Mit den Grenz-Reynoldszahlen

$$Re' = 16,5 \left(\frac{R_k}{d} \right)^{1/2} \quad (K 39)$$

$$Re'' = 15200 \left(\frac{d}{R_k} \right)^{0,28} \quad (K 40)$$

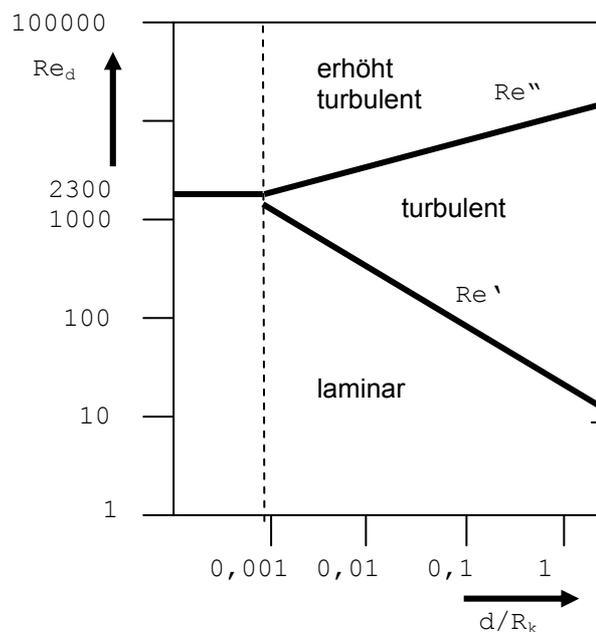
gelten :

a) bei $Re_d < Re'$ die Gleichungen für die laminare Rohrströmung, (K 41)

b) bei $Re' < Re_d < Re''$

$$Nu_d = C \cdot Re_d^{1/2} \cdot K(Pr) \cdot K_k \quad (K 42)$$

mit $C = 0,73$;



$$K(\text{Pr}) = \frac{11}{2} \left[1 + \sqrt{\left(1 + \frac{77}{4 \text{Pr}^2} \right)} \right]^{-1} \quad \text{für } \text{Pr} > 1$$

$$K(\text{Pr}) = 5 \left[2 + \sqrt{\left(\frac{10}{\text{Pr}^2} - 1 \right)} \right]^{-1} \quad \text{für } \text{Pr} < 1$$

$$K_k = \left(\frac{d}{R_k} \right)^{1/4} \cdot \left[1 + \frac{2,79}{\text{Re}_d^{1/2} \cdot \left(\frac{d}{R_k} \right)^{1/4}} \right],$$

c) bei $\text{Re}_d \geq \text{Re}''$ die Gleichungen für turbulente Rohrströmung mit

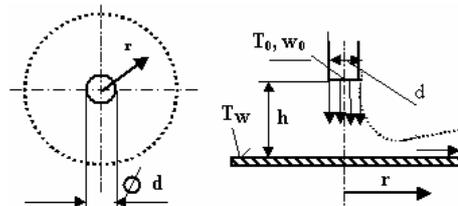
$$K_k = 1 + 1,8 d/R_k. \quad (\text{K } 43)$$

Mittlerer Wärmeübergang an einer ebenen Oberfläche, die durch einen runden Einzelstrahl senkrecht angeströmt wird (Staupunkt – Wandstrahl - System)

($2 \cdot 10^3 < \text{Re}_d < 4 \cdot 10^5$; $2,5 < r/d < 7,5$; $2 < h/d < 12$; h = Abstand Austritt - Wand)

$$Nu_d = \sqrt{\text{Re}_d \left(1 + \frac{\text{Re}_d^{0,55}}{200} \right)} \cdot \text{Pr}^{0,42} \cdot K \left(\frac{h}{d} \right)$$

$$\text{mit } K \left(\frac{h}{d} \right) = \frac{d}{r} \cdot \frac{2 - 2,2 \cdot \frac{d}{r}}{1 + 0,1 \left(\frac{h}{d} - 6 \right) \cdot \frac{d}{r}}$$



(K 44)

Man beachte, daß die Düsenaustrittstemperatur T_0 in der Definition $\alpha = \frac{\dot{q}}{(T_w - T_0)}$

verwendet wird.

Wärmeübergang an Rohrbündeln und in Haufwerken

Bezugsgrößen:

Volumenporosität

$$\psi = \frac{V_{ges} - V_P}{V_{ges}} \quad (\text{K 45})$$

Für ein Element eines Rohrbündels der Länge l wird für $\frac{s_2}{d} \geq l$ definiert

$V_{ges} = s_1 \cdot d \cdot l$, $V_P = 0,25 \cdot d^2 \cdot \pi \cdot l$ damit wird $\psi = 1 - 0,25 \cdot d \cdot \pi / s_1$, s_1 ist die Querteilung

Bei Rohrbündeln mit versetzten Rohren $s_2/d < 1$ gilt

$$\psi = 1 - 0,25 \cdot d^2 \pi / (s_1 \cdot s_2), \quad s_2 \text{ ist die Längsteilung.}$$

Mit der überströmten Länge d^* , $d^* = 0,5 \pi \cdot d$ und der Anströmgeschwindigkeit w wird

$$Re_{d^*} = \frac{w \cdot d^*}{\psi \cdot \nu} \text{ gebildet.}$$

Mittlerer Wärmeübergangskoeffizient ($T_W = \text{const}$)

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{\Delta T_m} \quad \text{mit} \quad \Delta T_m = \frac{T_{F,aus} - T_{F,ein}}{\ln \left[\frac{T_W - T_{F,aus}}{T_W - T_{F,ein}} \right]} = \frac{T'' - T'}{\ln \left[\frac{T_W - T''}{T_W - T'} \right]}$$

Mittlerer Wärmeübergang für eine Glattrohrreihe im Querstrom

($10 < Re_{d^*} < 10^6$; $0,5 < Pr < 10^3$)

$$Nu_{d^*} = 0,3 + \sqrt{Nu_{d^*,lam}^2 + Nu_{d^*,lam}^2} \quad \text{mit} \quad Nu_{d^*,lam} = 0,664 \cdot Re_{d^*}^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$
$$\text{und} \quad Nu_{d^*,turb} = \frac{0,037 Re_{d^*}^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 Re_{d^*}^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (\text{K 46})$$

Korrekturfaktor für Rohrbündel mit 10 und mehr Rohrreihen bei regelmäßig versetzter Rohranordnung

$$K_B = 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{d}{s_2} \quad (\text{K 46a})$$

)

bei fluchtender Rohranordnung

$$K_B = 1 + \frac{0,7}{\psi^{1,5}} \cdot \frac{s_2/s_1 - 0,3}{(s_2/s_1 + 0,7)^2} \quad (\text{K 46b})$$

)

Berücksichtigung des Anwachsens des Wärmeübergangs zwischen 1. und 10.

Rohrreihe:

$$Nu_{d^*,n} = Nu_{d^*} \frac{1 + (n-1) \cdot K_B}{n}, \quad n = \text{Anzahl der Rohrreihen.}$$

Mittlerer Wärmeübergang beim Rohrbündel im reinen Längsstrom

($\dot{q}_W = \text{const}$; $3 \cdot 10^3 < Re_{dh} < 10^6$; $0,5 < Pr < 5$; $0,10^3 < B < 3,5$)

$$Nu_{dh}^* = Nu_{dh} \left[1 + 0,912 Re_{dh}^{-0,1} \cdot Pr^{0,4} (1 - 2e^{-B}) \right] \quad \text{mit} \quad Nu_{dh} = 0,027 \cdot Re_{dh}^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{K 47})$$

Für fluchtende Rohranordnung mit $s_1 = s_2$ gilt:

$$B = \frac{4}{\pi} \left(\frac{s_1}{d} \right)^2 - 1 \quad (\text{K 47a})$$

)

und für regelmäßig versetzte Rohranordnung mit $s_2 = \frac{s_1 \sqrt{3}}{2}$ gilt:

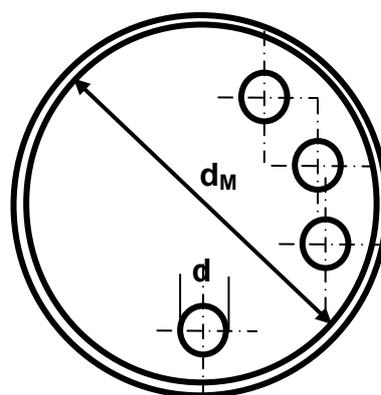
$$B = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{s_1}{d} \right)^2 - 1. \quad (\text{K 47b})$$

)

Hydraulischer Durchmesser bei längs umströmten Rohrbündeln mit n Rohren und Behälterdurchmesser d_M

$$d_h = \frac{4A}{U} = \frac{4 \frac{\pi}{4} (d_M^2 - n \cdot d^2)}{\pi (d_M + n \cdot d)} = \frac{d_M^2 - n \cdot d^2}{d_M + n \cdot d}.$$

Mittlere Geschwindigkeit



(K 47c)

$$\bar{w}_m = \frac{4 \dot{m}}{\pi \cdot \rho \cdot (d_M^2 - n \cdot d^2)}$$

(K 47d

)

Wärmeübergang in Haufwerken

$$Nu_{d_H} = \left(2 + \sqrt{Nu_{d,lam} + Nu_{d,turb}}\right) \cdot K_\psi \text{ mit} \quad (\text{K 48})$$

$$Nu_{d,lam} = 0,664 Re_d^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (\text{K 48a})$$

)

$$Nu_{d,turb} = \frac{0,037 Re_d^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 Re_d^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (\text{K 48b})$$

$$Re_d = \frac{1}{1 - \Psi} \frac{\bar{w} \cdot d_P}{\nu} \quad (\text{K 48c})$$

$$K_\psi = 1 + 1,5(1 - \psi); \quad 0,26 < \psi < 1 \quad (\text{K 48d})$$

)

Geometrie (Beispiele)	Volumenporosität ψ
Kugeln (zufällig)	0,375
Zylinder	0,34 ... 0,48
Raschigringe	0,52 ... 0,69
Metalldrahtwendeln	0,82 ... 0,87

5.4. Wärmeübergang bei Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion (gemischte Konvektion)

$$Nu = \left(Nu_{erzw}^n \pm Nu_{frei}^n\right)^{1/n} \quad (\text{K 49})$$

Beispiel:

Für eine ausgebildete, laminare Strömung ($T = \text{const}$) in vertikalen Röhren gilt $n = 3$ mit :

$$Nu_{d,erzw} = 3,66 \quad (\text{K 49a})$$

)

$$Nu_{d, frei} = \frac{0,75 \left(Gr_d \cdot Pr \cdot \frac{d}{l} \right)^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}}$$

(K 49b

)

6. Stoffübergang

6.1. Gebräuchliche Konzentrationsmaße zur Berechnung des Stoffüberganges

(K 50

)

Konzentrationsmaße für die Stoffkomponente α		In einem binären Fluidgemisch gilt:
Stoffkonzentration	$\rho_\alpha = \frac{m_\alpha}{V} = c_\alpha \cdot M_\alpha$	$\rho_\alpha + \rho_\beta = \rho = \frac{m}{V}$
Masseanteil	$\xi_\alpha = \frac{\rho_\alpha}{\rho} = \frac{m_\alpha}{m}$	$\xi_\alpha + \xi_\beta = 1$
Molkonzentration	$c_\alpha = \frac{n_\alpha}{V} = \frac{\rho_\alpha}{M_\alpha}$	$c_\alpha + c_\beta = c = \frac{n}{V}$
Molanteil einer flüssigen Phase	$x_\alpha = \frac{c_\alpha}{c} = \frac{n_\alpha}{n}$	$x_\alpha + x_\beta = 1$
Molanteil einer gasförmigen Phase	$y_\alpha = \frac{c_\alpha}{c} = \frac{n_\alpha}{n} = \frac{p_\alpha}{p}$	$y_\alpha + y_\beta = 1$
Partialdruck für ideale Gase	$p_\alpha = \rho_\alpha \cdot R_\alpha \cdot T = c_\alpha \cdot M_\alpha \cdot R_\alpha \cdot T$	$p_\alpha + p_\beta = p$

Durch Verknüpfen der Beziehungen können die Konzentrationsmaße umgerechnet werden. Es gilt beispielsweise:

$$y_\alpha = \frac{\frac{\xi_\alpha}{M_\alpha}}{\frac{\xi_\alpha}{M_\alpha} + \frac{\xi_\beta}{M_\beta}} \quad \text{und} \quad \xi_\alpha = \frac{y_\alpha \cdot M_\alpha}{M_{\alpha\beta}} \quad (K 51)$$

Aus der letzten Gleichung erhält man durch Differentiation

$$\partial \xi_{\alpha} = \frac{M_{\alpha} \cdot M_{\beta} \cdot \partial y_{\alpha}}{M_{\alpha\beta}^2}; \quad M_{\alpha\beta} = y_{\alpha} \cdot M_{\alpha} + y_{\beta} \cdot M_{\beta} \quad (\text{K 52})$$

6.2. Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang

siehe dazu die Tafel im Abschnitt 5.1.

6.3. Kennzahlgleichungen

Alle Kennzahlgleichungen des Wärmeübergangs können bei kleinen Stoffstromdichten auf den Stoffübergang angewendet werden, wobei die Größen des Wärmeüberganges durch die analogen Größen für den Stoffübergang formal zu ersetzen sind!

Beispiel: Freie Konvektion an senkrechter Platte:

- Wärmeübergang bei $T_w = \text{const}$, $Pr > 0,5$; $0 < Gr_l \cdot Pr < 10^{12}$.

$$Nu_l = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 (Gr_l \cdot Pr)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{K 53a})$$

- Stoffübergang bei $\rho_{\alpha,w} = \text{const}$, $Sc > 0,5$; $0 < Gr' \cdot Sc < 10^{12}$.

$$Sh_l = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 (Gr'_l \cdot Sc)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Sc} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{K 53b})$$

6.4. Korrektur des Stoffübergangskoeffizienten bei großen Stoffstromdichten nach Stefan für Zweistoffgemische

Wenn die Beziehung $\frac{|w_y|}{w_{x,\infty}} = \frac{\sum \dot{m}_{\alpha,y}}{\rho \cdot w_{x,\infty}} \ll 1$ nicht mehr erfüllt ist, dann

$$\text{gilt: } \beta^* = \beta \frac{\rho}{\rho_{\beta,m}};$$

$$\text{mit } \rho_{\beta,m} = \frac{\rho_{\beta,w} - \rho_{\beta,\infty}}{\ln \frac{\rho_{\beta,w}}{\rho_{\beta,\infty}}}, \quad (\text{K 54})$$

wobei der Index β die nichtdiffundierende Stoffkomponente symbolisiert. Allgemein gilt der Zusammenhang $\rho_{\beta} = \rho - \rho_{\alpha}$.

Für die Massekonzentrationen sind gegebenenfalls Partialdrücke einzusetzen, vergleiche Abschnitt 5.1.

7. Kennzahlgleichungen für die Kondensation ruhender reiner Dämpfe

7.1. Wärmeübergang bei laminarer Filmkondensation (Nußeltsche Wasserhauttheorie)

Für $Re_{\delta,l} = \frac{\dot{m}}{\rho_K \cdot b \cdot v_K} \leq 256 Pr_K^{-0,47}$, $1 \leq Pr_K \leq 10$, (Ko 1)

senkrecht stehende ebene Fläche und Rohre mit $d \gg \delta_K$:

örtlicher Wärmeübergang $\alpha_x = \frac{\lambda_K}{\delta_{K,x}} = \sqrt[4]{\frac{\rho_K \cdot g \cdot r_s \cdot \lambda_K^3}{4 \nu_K (T_S - T_W) \cdot x}}$; $Ko_x = 0,093 Re_{\delta,x}^{-1/3}$ (Ko 2)

mittlerer Wärmeübergang $\alpha_l = 0,943 \sqrt[4]{\frac{\rho_K \cdot g \cdot r_s \cdot \lambda_K^3}{\nu_K (T_S - T_W) \cdot l}}$; $Ko_l = 0,925 Re_{\delta,l}^{-1/3}$ (Ko 3)

horizontales Rohr mit $d \gg \delta_K$ und $Re_{\delta,l} = \frac{\dot{m}}{\rho_K \cdot l \cdot v_K}$ (Ko 4)

$\alpha_d = 0,728 \sqrt[4]{\frac{\rho_K \cdot g \cdot r_s \cdot \lambda_K^3}{\nu_K (T_S - T_W) \cdot d}}$; $Ko_d = 0,959 Re_{\delta,d}^{-1/3}$ (Ko 5)

7.2. Wärmeübergang bei turbulenter Filmkondensation

Für den Umschlagpunkt bei $Re_{\delta,l} = 400$ gilt:

$l_{krit} = 3188 \frac{Pr_K}{(T_S - T_W)} \cdot \frac{r_s}{c_{p,K}} \cdot \left(\frac{\nu_K^2}{g}\right)^{1/3}$ (Ko 6)

senkrecht stehende Flächen und Rohre (Ko 7)

$Ko_x = 0,0863 Re_{\delta}^{1/6} Pr_K^{0,43}$ für $0 < x < l$ und $Ko_l = \frac{Re_{\delta,l}}{3188 + (13,905 Re_{\delta,l}^{0,833} - 2049) \cdot Pr_K^{-0,43}}$

Eine gute Übereinstimmung mit Meßwerten liefert die folgende Beziehung

bei $400 < Re_{\delta} < 7 \cdot 10^5$, $1 < Pr < 25$:

$Ko_x = 0,0325 Re_{\delta}^{1/4} Pr_K^{1/2}$ mit $Re_{\delta} = \left[89 + 0,024 Pr_K^{1/2} \left(\frac{Pr_K}{Pr_W}\right)^{1/4} \cdot (Z - 2300) \right]^{4/3}$ und

$Z = \left[\frac{g \cdot x^3}{\nu^2} \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho_K}\right) \right]^{1/3} \cdot \frac{c_{p,K} \cdot (T_S - T_W)}{Pr \cdot r_s}$ (Ko 8)

Der Wärmeübergangskoeffizient im Übergangsgebiet für $256 Pr^{-0,47} < Re_{\delta} < 400$,

$1 < Pr < 10$ kann mit guter Näherung aus der Beziehung

$$\alpha = \sqrt[4]{(K_W \cdot \alpha_{lam})^4 + \alpha_{urb}^4}, \quad K_W = 1,15 \quad \text{berechnet werden.} \quad (\text{Ko } 9)$$

Der Wärmeübergang an Rohrbündeln waagerechter, übereinander liegender Rohre kann mit guter Näherung für kleine Dampfgeschwindigkeiten durch folgende Beziehungen berechnet werden:

(Ko 10)

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{n=1}} = n^{-1/6} \quad \text{Wärmeübergang von n übereinander liegenden Rohren}$$

$$\frac{\alpha_n^*}{\alpha_{n=1}} = n^{5/6} - (n-1)^{5/6}; \quad n \geq 10 \quad \text{Wärmeübergang des n-ten Rohres von oben}$$

7.3. Wärmeübergang bei der Tropfenkondensation

Mit $Re_* = \frac{\lambda_K (T_S - T_W)}{\nu_K \cdot \rho_K \cdot r_S}$; $R_{krit} = \frac{2 \sigma \cdot T_S}{r_S \cdot \rho_K \cdot (T_S - T_W)}$ (kritischer Tropfenradius), (Ko 11)

)

$$Nu = \frac{\bar{\alpha} \cdot R_{krit}}{\lambda_K} \quad \text{und} \quad P_K = \frac{R_{krit} \cdot \sigma \cdot \xi \cdot (T_S - T_W)}{\rho_K \cdot \nu_K^2}; \quad \xi = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \quad (\text{Ko } 12)$$

)

ergeben sich folgende Beziehungen:

$$Nu = 3,2 \cdot 10^{-4} Re_*^{-0,84} \cdot P_K^{1,16} \cdot Pr^{1/3}; \quad (8 \cdot 10^{-4} \leq Re_* \leq 3,3 \cdot 10^{-3}) \quad (\text{Ko } 13)$$

)

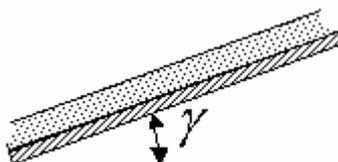
$$Nu = 5,0 \cdot 10^{-6} Re_*^{-1,57} \cdot P_K^{1,16} \cdot Pr^{1/3}; \quad (3,3 \cdot 10^{-3} \leq Re_* \leq 1,8 \cdot 10^{-2}) \quad (\text{Ko } 14)$$

)

7.4. Berücksichtigung verschiedener Einflüsse auf den Wärmeübergang

- Welligkeit des laminaren Kondensatfilms: $K_W = 1,15$ (Ko 15)

- Neigung der Oberfläche



Korrekturfaktor für den laminaren Film $K_\gamma = (\sin \gamma)^{1/4}$. Ist nicht für abtropfende Filme und an Rohren anwendbar!

- Überhitzung des Dampfes ($T_S < T_D$):

$$\frac{\alpha_{\text{überh}}}{\alpha_{\text{Sattdampf}}} = \left(\frac{h_{\text{überh}} - h'}{r_S} \right)^{1/4} = \left[1 + \frac{c_{p,D}}{r_S} (T_D - T_S) \right]^{1/4} \quad (\text{Ko 16})$$

)

- Widerstand durch den laminaren Kondensatfilm (Verbesserung der unter 7.1 angegebenen Gleichung):

$$\alpha_l = 0,943 \sqrt[4]{\frac{(\rho_K - \rho_D) \cdot g \cdot r_S^* \cdot \lambda_K^3}{\nu_K (T_S - T_W) \cdot l}} \quad \text{mit } r_S^* = r_S + 0,68 c_{p,K} (T_S - T_W), \quad ($$

Ko 17)

Stoffwerte bei $T_B = T_W + (T_S - T_W)/4$,

(Gültigkeit für $Pr_K > 0,5$ und $c_{p,K}(T_S - T_W)/r_S < 1$)

- Einfluß der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte beim laminaren Kondensationsfilm:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{1 + \eta^*}{10(1 + \lambda^*)^3} \left[5 + \lambda^*(14 + 11\lambda^*) + \frac{\lambda^*}{\eta^*} (1 + 4\lambda^* + 5\lambda^{*2}) \right]$$

$$\text{mit } \eta^* = \frac{\eta_S}{\eta_W} \quad \text{und} \quad \lambda^* = \frac{\lambda_S}{\lambda_W} \quad (\text{Ko 18})$$

)

α_0 Wärmeübergangskoeffizient nach der Wasserhauttheorie mit Verwendung der Stoffwerte bei $(T_S + T_W)/2$.

- Einfluß von Inertgas:

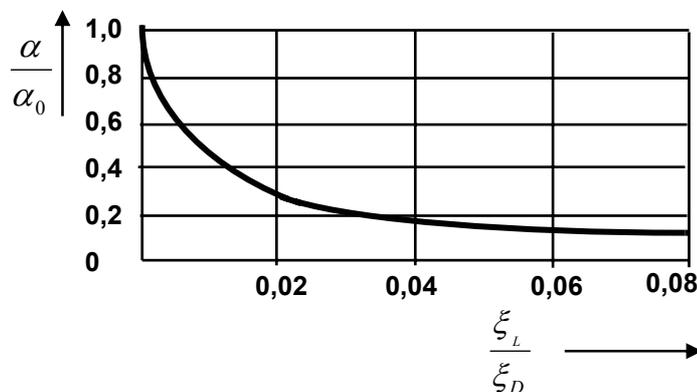
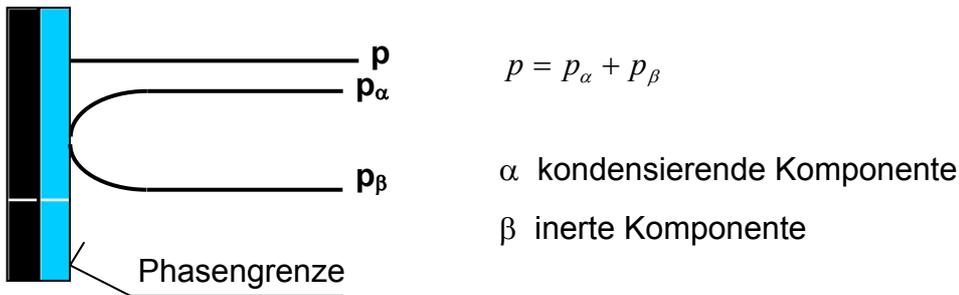


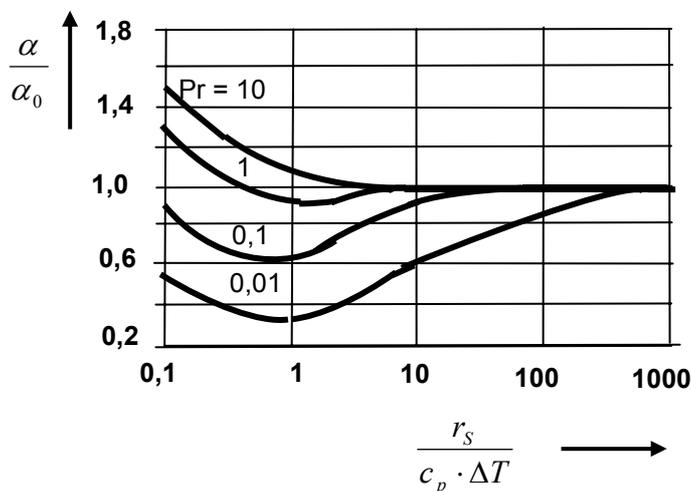
Bild: Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten vom Masseanteil der Luft im Wasserdampf



$$\frac{\dot{q}_D}{\dot{q}_0} = \frac{\alpha_{D,0} \cdot r_S}{(T_S - T_W) \cdot \alpha_K \cdot c_{p,D}} \ln \frac{p_{\beta, \text{Phasengrenze}}}{p_{\beta, \infty}}, \quad \alpha_{D,0} \text{ Wärmeübergangskoeffizient der}$$

Dampfströmung

- Veränderung der Prandtlzahl



Einfluß der Prandtlzahl und der Intensität der Kondensation auf den Wärmeübergangskoeffizienten

- Veränderung der Richtung der Dampfgeschwindigkeit:

allg.: $w_D \cdot w_K > 0$ Wärmeübergang steigt

$w_D \cdot w_K < 0$ Wärmeübergang sinkt für kleine w_D .

Wärmeübergang steigt für große w_D .

- für hohe Dampfgeschwindigkeiten an Rohrbündeln mit waagrecht übereinander liegenden Rohren gilt:

$$Nu_d = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_K} = 0,9 \left(\frac{w_D \cdot d}{\nu_K} \right)^{1/2} \quad \text{mit} \quad w_D = \frac{w_{D,0}}{\Psi} \quad \text{und} \quad \Psi = \frac{V_L}{V_R} \quad . \quad (\text{Ko 19})$$

)

$w_{D,0}$ Dampfgeschwindigkeit ohne Anwesenheit der Rohre

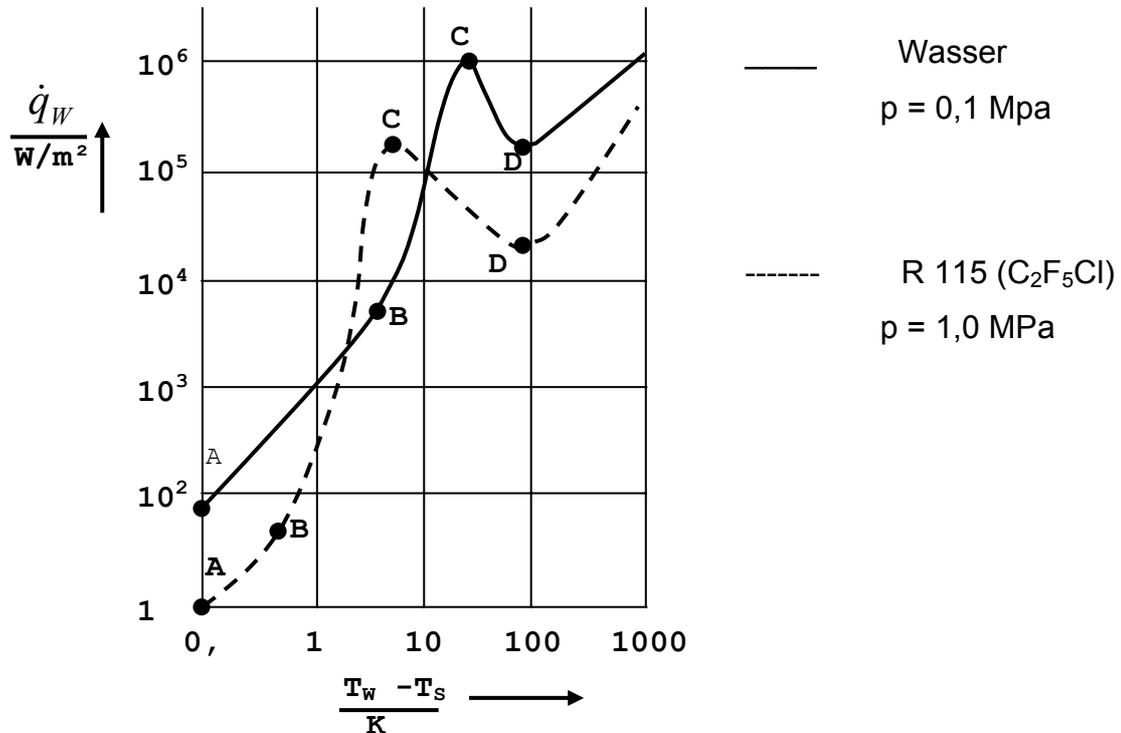
Ψ Volumenporosität

V_L Leerraumvolumen

V_R real zur Verfügung stehendes Dampfvolumen (mit Rohren)

8. Kennzahlgleichungen für die Verdampfung ruhender reiner Flüssigkeiten

8.1. Verdampfungskurve



- AB natürliche Konvektion in der Flüssigkeit ; Verdunstung bzw. Verdampfung an der Flüssigkeitsoberfläche
- B Beginn der Blasenverdampfung
- BC Blasenverdampfung
- C 1. kritische Heizflächenbelastung $\dot{q}_{krit,1}$
- CD instabile Filmverdampfung
- D Leiden-Frost-Punkt
- DE stabile Filmverdampfung

8.2. Oberflächenverdampfung (Stilles Sieden)

Verwendung von Kennzahlgleichungen für die freie Konvektion mit Bezugslänge l (Flüssigkeitshöhe).

Laminar: $Nu_l = 0,54 Ra_l^{1/4}$; ($10^5 \leq Ra_l \leq 10^8$).

Turbulent: $Nu_l = 0,14 Ra_l^{1/3}$; ($10^8 \leq Ra_l \leq 10^{12}$).

(K 13)

8.3 Blasenverdampfung

charakteristische Bezugslänge l_c ($l_c = d_{B,krit}/4$, $d_{B,krit}$ kritischer Blasendurchmesser):

$$l_c = \frac{\sigma \cdot T_S}{r_S \cdot \rho_D \cdot (T_W - T_S)}, \quad (V 1)$$

auf die Heizfläche bezogene Dampf-Geschwindigkeit w_D :

$$w_D = \frac{\dot{m}_D''}{\rho_D} = \frac{\alpha \cdot (T_W - T_S)}{r_S \cdot \rho_D} \text{ mit} \quad (V 2)$$

$$Re_{l_c} = \frac{w_D \cdot l_c}{\nu_F}, \quad Nu_{l_c} = \frac{\alpha \cdot l_c}{\lambda_F} \quad (V 3)$$

Für $0,002 \leq Re_{l_c} \cdot Pr_F^{2/3} \leq 0,00625$; $0,86 \leq Pr_F \leq 7,6$ gilt:

$$Nu_{l_c} = 0,0039 Pr_F^{-1/3} \quad (V 4)$$

Für $0,00625 \leq Re_{l_c} \cdot Pr_F^{2/3} \leq 50$; $0,86 \leq Pr_F \leq 7,6$

$$Nu_{l_c} = 0,0408 Re_{l_c}^{0,462} \cdot Pr_F^{-0,0256} \quad (V 5)$$

Die folgende empirische Beziehung berücksichtigt die Beschaffenheit der Oberfläche:

$$\alpha = C \cdot \dot{q}_W^n \text{ mit } n = 2/3, \quad C = b \left(\frac{\lambda_F^2}{\nu_F \cdot \sigma_F \cdot T_S} \right)^{1/3} \text{ und}$$

$$b = 0,075 \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_D}{\rho_D - \rho_F} \right)^{2/3} \right]. \quad (V 6)$$

Für Wasser bei $10^5 \text{ Pa} \leq p_s \leq 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ ergibt sich daraus

$$\alpha = \frac{0,428 p_s^{0,18}}{1 - 4,5 \cdot 10^{-8} p_s} \cdot \dot{q}_W^{2/3}, \text{ wobei } \alpha \text{ in } W/(m^2 \cdot K), \dot{q}_W \text{ in } W/m^2 \text{ und } p_s \text{ in Pa einzusetzen}$$

sind.

1. kritische Wärmestromdichte (Siedekrise 1. Art)

$$\dot{q}_{W,krit,1} = \frac{\pi}{24} \cdot r_S \cdot \rho_D \cdot \left[\frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_F - \rho_D)}{\rho_D^2} \right]^{1/4} \cdot \left(\frac{(\rho_F + \rho_D)}{\rho_F} \right)^{1/2} \quad (V7)$$

8.4. Filmverdampfung

Der Wärmeübergangskoeffizient ist abhängig von der Wärmestrahlung und -Leitung:

$$\alpha = \alpha_{Leit} + \frac{1}{5} \alpha_{Str} \left(4 + \frac{1}{1 + 3 \frac{\alpha_{Leit}}{\alpha_{Str}}} \right) \quad (V8)$$

Wärmestrahlung: (V9)

$$\alpha_{Str} = \frac{1}{T_W - T_S} C_{12} \left[\left(\frac{T_W}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \text{ mit } C_{12} = \frac{C_S}{\frac{1}{\varepsilon_W} + \frac{1}{\varepsilon_F} - 1} \text{ und } C_S = 5,67 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$\varepsilon_W, \varepsilon_F$ Emissionszahl der Wand- bzw. Flüssigkeitsoberfläche

Wärmeleitung (durch den Dampffilm):

α_{Leit} entsprechend der Filmkondensation mit den Stoffwerten des Dampfes bei $T_B = 0,5(T_W + T_S)$

$$\alpha_{Leit} = K_f \left[\frac{(\rho_F - \rho_D) \cdot g \cdot r_S \cdot \lambda_D^3}{l \cdot \nu_D \cdot (T_W - T_S)} \right]^{1/4} \quad (V10)$$

$K_f = 0,62$ für ein horizontales Rohr ($l = d$)

$K_f = 0,8$ für ein senkrechttes Heizelement ($l = H$)

9. Literatur

9.1. Zusammenfassende Darstellungen zu den Grundfragen der konvektiven Wärme- und Stoffübertragung, zur Kondensation, Verdampfung, Turbulenztheorie und zur numerischen Berechnung

- [1] Albring, W.: Angewandte Strömungsmechanik, 6. Auflage
Berlin: Akademie-Verlag, 1990

- [2] Albring, W.: Elementarvorgänge fluider Wirbelbewegungen.
Berlin: Akademie-Verlag, 1981

- [3] Berkovskij, B. M.; Nogotov, E. F.: Raznostnye metody issledovanija zadac teploomena
(Differenzmethoden zur Untersuchung von Wärmeübertragungsaufgaben). -
Minsk Izd. Nauka i Technika, 1976

- [4] Berliner, P.: Psychrometrie.
Karlsruhe C. F. Müller-Verlag, 1979

- [5] Bradshaw, P.; Cebeci. T.; Whitelaw, J. H.
Engineering Calculation Methods for Turbulent flow.
London, New York: Akademic Press, 1981

- [6] Bradshaw, P./Hrsg.
Turbulence (Topics in Applied Physics. Vol. 12).
Berlin, New York: Springer-Verlag. 1976

- [7] Brauer, H.
Stoffaustausch einschließlich chemischer Reaktionen.
Aarau, Frankfurt am Main: Verlag Sauerländer, 1971

- [8] Cebeci, T.; Bradshaw, P.
Physical and Computational Aspects of Convektive Heat Transfer.
New York, Berlin: Springer-Verlag, 1984

- [9] Danilov, Ju. I.; Džjubenko, B. V.; Drejzer, G.A.; Ašmantas, . A.
 Teploobmen i gidrodinamika v kanalach složnoj
 formy (Wärmeübertragung und Hydrodynamik
 in Kanälen komplizierter Form).
 Moskva: Izd. Mašinostroenie, 1986
- [10] Dyban, E. P.; Epik, E. Ja.: Teplomassoobmen i gidrodinamika
 turbulirovannyh potokov (Wärme- und Stoffübergang und
 Hydrodynamik in verwirbelten Strömungen).
 Kiev: Izd. Naukove dumka, 1985
- [11] Eckert, E. R. G., Drake. R. M.: Analysis of Heat and Mass Transfer.
 New York: McGraw-Hill Book Comp. Inc.. 1972
- [12] Eckert, E. R. G.: Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch.2 Aufl.
 Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1959
- [13] Elsner, N.: Grundlagen der technischen Thermodynamik. - 6. Aufl.
 Berlin: Akademie-Verlag, 1985
- [14] Gosman. A. D.; Pun, W. M.; Runchal, A. K.; Spalding, D. B.; Wolfshtein. M.:
 Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows.-
 London. New York: Akademic Press, 1969
- [15] Grigorev, V. A.; Zorin, V. M./Hrsg.: Spravočnik teplo- i massoobmen.
 Teplotečničeskij eksperiment. (Handbuch für den Wärme- und Stoffübergang.
 Wärmetechnische Experimente).
 Moskva: Energoizd., 1982
- [16] Gröber, H.; Erk, S.; Grigull, U. : Die Grundlagen der Wärme- und
 Stoffübertragung.
 Heidelberg, Berlin, Göttingen: Springer-Verlag, 1963
- [17] Hackeschmidt, M. :Strömungstechnik. Ähnlichkeit-Analogie-Modell.
 Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1972
- [18] Hanel, B.: Einführung in die konvektive Wärme- und Stoffübertragung. –

Berlin: VEB Verlag Technik, 1989/90

- [19] Hausen, H. : Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. -2. Aufl.
Berlin: Springer-Verlag, 1976

- [20] Heat Exchanger Design Handbook.
Washington, Düsseldorf: Hemisph. Publ. Corp., VDI-Verlag, 1983
(Sowj. Ausgabe: Spravoc'nik po teploobmennikam. - Moskva: Energoatomizdat, 1987)

- [21] Hinze, J. O.: Turbulence.
New York: McGraw-Hill Book Comp.. 1959

- [22] Huhn, J.; Wolf, J.: Zweiphasenströmung - gasförmig/flüssig.
Leipzig: VEB Fachbuchverlag. 1975

- [23] Incropera. F. P.; Dewitt, D. P. : Fundamentals of Heat and Mass Transfer.
- 4. Aufl.- New York: John Wiley & Sons, 1996

- [24] Isaacson, E.; Keller, H. B.: Analyse numerischer Verfahren.
Leipzig: Edition Leipzig, 1972

- [25] Isačenko. V. P. :Teploobmen pri kondensacii
(Wärmaübergang bei der Kondensation).
Moskva: Izd. Energija, 1977

- [26] Isačenko, V. P.; Osipova, V. A.; Sukomel, A. S.: Teploperdača.
(Wärmeübertragung). - 4. Aufl.
Moskva: Izd. Energija, 1982

- [27] Jaluria, Y.; Torrance, K. E.
Computational Heat Transfer. - Washington.
Berlin: Hemisph. Publ. Corp., 1986; Springer-Verlag, 1986
- [28] Jaluria, Y.
Natural Convection Heat and Mass Transfer.
Oxford: Pergamon Press, 1988
- [29] Jischa, M.
Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch.
Braunschweig: Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, 1982
- [30] Jurenev, V. M.; Lebedev, P. D./Hrsg.
Teplotekhniceskij spravočnik, Tom 2. 2. Izd.
(Wärmet. Handbuch. Bd. 2. 2. Aufl.). Moskva: Izd. Energija. 1975
- [31] Kakaš, S.; Spalding. D. B./Hrsg.
Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles. Bd. 112.
Washington: Hemisph. Publ. Corp., 1979
- [32] Kakaš, S.; Bergles, A. E.; Mayinger. F./Hrsg.
Heat Exchanger - Thermal-hydraulic Fundamentals and Design. -
Berlin, Washington: Springer-Verlag. Hemisph. Publ. Corp., 1985
- [33] Kakaš, S.; Shah. R. K.; Bergles, A. E./Hrsg.
Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers.
Washington, Berlin:Hemisph. Publ. Corp., Springer-Verlag. 1983
- [34] Kast, W.; Krischer. O.; Reinicke, H.; Wintermantel, K.
Konvektive Wärme- und Stoffübertragung.
Berlin: Springer Verlag, 1974
- [35] Kattanek, S.; Gröger, R.; Bode, C.
Ähnlichkeitstheorie.
Leipzig: VEB Deutscher Verlaq für Grundstoffindustrie. 1967

- [36] Keys, W. M.; Crawford, M. E.
 Konvektive Heat and Mass Transfer. - 2. Aufl.
 New York: McGraw-Hill Book Coop., 1980
- [37] Keys, W. M.; London, A. L.
 Hochleistungswärmeübertrager.
 Berlin: Akademie-Verlag. 1973
- [38] Kern, D.; Kraus, A.
 Razvitye poverchnosti teploobmena (Vergrößerte Wärmeübertrager-
 Oberflächen) Moskva: Izd. Energija. 1977
- [39] Kozlov, L. F. u. a.
 Formirovanie turbulentnosti v sdvigovykh tečenijach. (Turbulenzentstehung in
 Scherströmungen).
 Kiev: Izd. Naukova dumka. 1985
- [40] Landau, L. D.; Lifšic, E. M.
 Gidrodinamika. Teoretičeskaja fizika. TOM VI. (Hydrodynamik. Th. Physik,
 Band VI). Moskva: Izd. Nauka, 1986
- [41] Launder, B. E.; Spalding, D. B.
 Mathematical Model of Turbulence.
 London. New York: Academic Press. 1972
- [42] Leontev, A. I./Hrsg.
 Teorija teplomassoobmena. (Theorie des Wärme- und Stoffübergangs).
 Moskva: Izd. Vyššaja Skola, 1979
- [43] Loitsianski, L. G.
 Laminare Grenzschichten.
 Berlin: Akademie-Verlag, 1967

- [44] Martynenko, O. G.; Sokovinin, Ju. A.
Svobodno-konvektivnyj teploobmen: Spravočnik. (Freie konvektive Wärmeübertragung: Handbuch).
Minsk: Isd. Nauka i Technika 1982
- [45] Martynenko, O. G. u. a. Teploobmen smešannoj konvekcijej.
(Wärmeübertragung bei gemischter Konvektion).
Minsk: Izd. Nauka. 1975
- [46] Mascheck, H.-J.
Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung. - 2. Aufl. -
Leipzig: VEB Verlag für Grundstoffindustrie, 1983
- [47] Mayinger, F.
Strömung und Wärmeübergang in Gas- Flüssigkeitsgemischen. -
Wien, New York: Springer-Verlag. 1982
- [48] Marker, G. P.
Konvektive Wärmeübertragung. (Reihe Wärme- und Stoffübertragung).
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 1987
- [49] Mersmann, A.: Stoffübertragung. (Reihe Wärme- und Stoffübertragung).
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1986
- [50] Michejew, M. A. Grundlagen der Wärmeübertragung. - 3. Aufl.
Berlin: VEB Verlag der Technik, 1966
- [51] Michejev, M. A.; Michejeva, I. M. : Osnovy teploperedaci. (Grundlagen der Wärmeübertragung). –
Moskva: Izd. Energija, 1977
- [52] Patankar, S. V.. Spalding, D. B.: Heat and Mass Transfer in Boundary Layers.
- 2. Aufl. – London: Intertext Books, 1970
- [53] Patankar, S. V. : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, - Washington.

New York: Hemisph. Publ. Corp.. McGraw-Hill Book Comp.. 1980

- [54] Petuchov, B. S.; Poljakov, A. F.: Teploobmen pri smešannoj turbulentnoj konvekcii. (Wärmeübergang bei gemischter turbulenter Konvektion).
Moskva: Izd. Nauka, 1986
- [55] Peyret, R.; Taylor, T. O.: Computational Methods for Fluid Flow.
Berlin; New York: Springer-Verlag. 1982
- [56] Rohsenow, W. M.; Hartnett, J. P.; Ganic, E. N./Hrsg.: Handbook of Heat Transfer Fundamentals. 2. Auf.1.
New York: McGraw-Hill Book Comp., 1985
- [57] Rojzen. L. I.; Dul'kin, I. N. :
Teplovoj rasčet orebrennych poverchnostej. (Wärmeberechnung berippter Oberflächen). -
Moskva: Izd. Energija, 1977
- [58] Roache, P. J.: Computational Fluid Dynamics. - 2. Aufl.
Albuquerque, N. M.: Hermosa Publ., 1976
- [59] Rotta, J. C. :Turbulente Strömungen.
Stuttgart: B. G. Teubner, 1972
- [60] Schlichting, H.: Grenzschichttheorie. - 5. Aufl.
Karlsruhe: Verlag G. Braun, 1965
- [61] Scholz, R.: Hanel, B. Computergestützte Berechnung der Raumlufströmung.
(Reihe Luft- und Kältetechnik).
Berlin: VEB Verlag Technik, 1988

- [62] Shah, R. K.; London, A. L.: Laminar Flow in Forced Convection in Ducts. New York, London: Academic Press, 1978
- [63] Sherwood, T. K.; Pickford, R. L.; Wilke, C. R.: Mass Transfer. Moskva: Izd. Chimija, 1982
- [64] Shih, T.-M.: Numerical Heat Transfer. Washington, New York: Hemisph. Publ. Corp., McGraw-Hill Book Comp., 1980
- [65] Spalding, D. B.: Konvektiver Stoffübergang. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1969
- [66] Stephan, K. : Wärmeübergang beim Kondensieren und beim Sieden. (Reihe Wärme- und Stoffübertragung). – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1988
- [67] Szablewski, W. Turbulente Scherströmungen. Freie Turbulenz.,- Berlin: Akademie-Verlag. 1979
- [68] Szablewski, W. Turbulente Scherströmungen. Grenzschichten. :- Berlin. Akademie Verlag, 1976
- [69] Törnig, W.; Gipser, M.; Kaspar, E. Numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen der Technik. Stuttgart: B. G. Teubner, 1985
- [70] VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 8. Aufl. – Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1998

- [71] Weiß, S./Hrsg. Wärmeübertrager. (Reihe Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden, Teil 1).
Leipzig: VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1986
- [72] Weise, S.; Militzer, K.- E.
Thermische Verfahrenstechnik I/II. - 3. Aufl. -
Leipzig: VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1984
- [73] White, B. M.: Viscous Fluid Flow.
New York: McGraw-Hill Book Comp.. 1974
- [74] Wilde, K.: Wärme- und Stoffübertragung in Strömungen. - 2. Aufl.
Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff-Verlag, 1978
- [75] Wong, H. Y.
Handbook of Essential Formulas and Data on Heat Transfer for Engineers.
London, New York: Longman Group, 1977
- [76] Zukauskas, A. A.
Konvektivnyj perenos v teploobmennikach. (Konvektiver Transport in Wärmeübertragern). Moskva: Izd. Nauka, 1982
- [77] Zukauskas, A. A.; Zjugzda, J.: Teplootdaca cilindra v poperecnom potoko zidkosti.
(Wärmeabgabe von Zylindern im Querstrom von Flüssigkeiten).
Vilnius: Izd. Mokslas, 1979

9.2. Wichtige Zeitschriften und Sammelbände des Fachgebiets in alphabetischer Reihenfolge (Auswahl)

Advances in Chemical Engineering, New York/USA
Advances in Heat Transfer, London/Großbritannien, New York/USA
AIChE-Journal. New York/USA
Brennstoff-Wärme-Kraft, Düsseldorf/BRD
Chemical Engineering Science, London/Großbritannien
Chemie-Ingenieur-Technik, Weinheim/BRD
Chemische Technik, Leipzig/DDR
Computational Mechanics, Berlin (West)
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Amsterdam/Niederlande
Computers and Fluids, Oxford/Großbritannien
Experimental Thermal and Fluid Science, New York/USA
Experiments in Fluids, Berlin (West)
Forschung im Ingenieurwesen, Düsseldorf
Industrial and Engineering Chemistry, New York/USA
International Chemical Engineering, New York/USA
International Journal of Heat and Fluid Flow, London/Großbritannien
International Journal of Heat and Mass Transfer, London/Großbritannien
International Journal of Multiphase Flow, Oxford/Großbritannien
International Journal for Numerical Methods in Engineering,
Chichester/Großbritannien
International Journal for Numerical Methods in Fluids Chichester/Großbritannien,
New York/USA
Inzenerno-Fiziceskij Zurnal. Minsk/UdSSR
Izvestija Akademii Nauk SSSR, Moskva/UdSSR
Mechanika Zidkosti i Gaze, Moskva/UdSSR
Izvestija Vuzov, Serija Energetika, Minsk/UdSSR
Izvestija Sibirskogo Otdelenija Akademii Nauk SSSR, Serija Techniceskich Nauk,
Novosibirsk/UdSSR
Journal of Aerospace Sciences. New York/USA.
Journal of Chemical Engineering. Tokio
Journal of Computational Physics, New York/USA
Journal of Fluid Mechanics, London/Großbritannien

Luft- und Kältetechnik, Berlin/DDR
Notes on Numerical Fluid Mechanics, Braunschweig
Numerical Heat Transfer Washington
Proceedings of the International Heat Transfer Conference,
Chicago, Paris, Tokyo, Toronto, München. San Francisco
Promyslennaja Teplotekhnika AN USSR, Kiev/UdSSR
Referativnyj Zurnal, Moskva/UdSSR
Technische Mechanik. Leipzig/DDR
Teploenergetika, Moskva/udSSR
Teplo- i Massoperenos (Materialy Mez'dunarodnoj Skoly-Seminare). Minsk/UdSSR
Teplofizika Vysokich Temperatur. Moskva/UdSSR
The Physics of Fluids New York/USA
Transactions of the American Society of Mechanical-Engineers
(ASME), Journal of Fluids Engineering. Easton/USA
Transactions of the American Society of Mechanical Engineers
(ASME), Journal of Heat Transfer, New York/USA
Verfahrenstechnik, Mainz/BRD
VDI-Forschungsheft, Düsseldorf/BRD
Wärme- und Stoffübertragung. Berlin (West)
Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM), Berlin/DDR
Jurnal Prikladnoj Mehaniki i Techniceskoj Fiziki. Sibir.Otdel. Akademii Nauk SSSR,
Novosibirsk/UdSSR

10. Wichtige Sachwörter des Fachgebietes

Adiabate Verdunstung

Ähnlichkeit (geometrische, physikalische), Ähnlichkeitstheorie

Analogiebeziehungen

Analoge Gleichungen

Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung

Auftriebskräfte

Ausgebildete Strömung

Bernard-Konvektion

Berippte Oberflächen

Bestandteile einer Bilanz

Bewegungs- und Transportgleichungen

Bezugslängen

Bezugstemperaturen

Bildung von Dampfblasen

Blasenablösung

Blasenverdampfung

Blasenwachstum

Blasius-Lösung für die Plattengrenzschicht

Daltonsches Gesetz

Dampfdruckkurve

Dampffilm

Diffusion

Diffusionskoeffizient

Dimensionsanalyse

Dissipation

Druckgradient

Druckverlust

Durchströmung

Einlauflänge

Empirische Beziehungen

Entspannungsverdampfung

Erzwungene Konvektion

Extensive und intensive Größen

Ficksches Gesetz

Finite-Differenzen-Methode
Fouriersches Gesetz
Filmdicke
Filmkondensation
Filmverdampfung
Fluid
Freie Konvektion
Freistrah
Gekoppelter Wärme- und Stoffübergang
Gekrümmtes Rohr
Gemischte Konvektion
Geschlossene / offene thermodynamische Systeme
Geschwindigkeits-, Temperaturverteilung im Film
Gleichgewichtsbedingungen
Gleichwertiger Durchmesser
Gradient (z. B. Temperaturgradient an der Wand)
Grashof-Zahl
Grenzschicht
Grenzschichtvereinfachungen
Haftbedingung
Hauptströmung
Herleitung der Kontinuitätsgleichung
Hohe Stoffstromdichten
Hydrodynamischer Einlauf
Impulsstromdichte, Impulstransport
Impulsverlustdicke
Inertgas
Instabile Filmverdampfung
Integralverfahren
Intensivierung des Wärme- und Stoffübergangs
Isotropie der Turbulenz
Kennzahlen
Kennzahlfunktionen
Kennzahlgleichungen
Kondensation

Kondensation eines überhitzten Dampfes
Kondensation in durchströmten Rohren
Kondensationszahl
Kontinuitätsgleichung
Konvektion senkrecht zu Übertragerfläche
Konvektiver Wärme- und Stofftransport
Konzentration
Korrektur nach Stefan
Korrekturfaktoren
Kritische Reynolds-Zahl
Kritischer Blasendurchmesser
Laminare Plattengrenzschicht
Laminare Strömung
Laminarer Kondensatfilm
Lauflänge
Lewis-Zahl
Maxwell-Stefan-Gleichungen
Maximale Heizflächenbelastung
Mischkondensation
Mischungsweghypothese
Mittlere Temperatur in einem durchströmten Querschnitt
Mittlere logarithmische Konzentrationsdifferenz , mittlere logarithmische
Temperaturdifferenz
Mittlerer Diffusionskoeffizient in
Mehrkomponentensystemen
Mittlerer Übergangskoeffizient
Molekulare Transportkoeffizienten
Molekulare/turbulente Diffusion in Strömungen
Molmasse (Molekulargewicht)
Molstromdichte
Nachlaufströmung
Navier-Stokes-Gleichungen
Newtonsches Gesetz
Nusseltsche Wasserhauttheorie
Nusselt-Zahl

Oberbeck-Boussinesq-Approximation
Oberflächenverdampfung
örtliche Nusselt-Zahl
örtlicher Übergangskoeffizient
Phasengrenze
Phasenumwandlung
Prandtl-Zahl
Profile
Querangeströmter Zylinder
Raoult'sches Gesetz
Rauheit
Rayleigh-Zahl
Randbedingungen
Reibungsbeiwert, Reibungskräfte
Reynolds-Zahl
Reynolds-Analogie
Reynolds-Gleichungen
Rezirkulationsbewegungen
Rieselfilm
Ringspaltströmung
Rohrbündel
Schmidt-Zahl
Sherwood-Zahl
Schubspannung,
Schubspannungsgeschwindigkeit
Schüttungen
Sekundärströmungen
Siedekrise 1. Art/2. Art
Siedelinie
Spezifische Verdampfungsenthalpie
Stabile Filmverdampfung
Stanton-Zahl
Staupunkt-Wandstrahl-System
Stoffstromdichte
Stofftransport

Stofftransportgleichung
Stoffübergangskoeffizient
Stoffübergang bei kleinen Stoffstromdichten
Stoffwerte
Strömungsformen einer Dampf-Flüssigkeits-Strömung
Stromfunktion
Taylor-Reihenentwicklung
Temperaturfeld
Thermischer Einlauf
Thermodiffusion
Trägheitskräfte
Tropfenkondensation
Turbulente Rohrströmung
Turbulenter Kondensatfilm
Turbulente Transportkoeffizienten
Turbulenzenergie
Turbulenzansätze
Turbulenzgrad
Turbulenzmodelle
Übergangsgebiet
Übergangskoeffizient
Übertemperatur von Heizflächen
Umschlagpunkt
Umströmung
Unterkühltes Sieden
Verdampfung
Verdampfungskurve
Viskose Unterschicht
w- und T-Profile im Einlaufbereich
Wärmeübergang
Wärmeübergangskoeffizient
Wärmeleitung
Wärmestromdichte
Wärmetransport
Wärmetransportgleichung

Wandgesetz turbulenter Strömungen

Wandtemperatur

Welligkeit (Kondensatfilmoberfläche)

Wirbelschicht

Wirbelstärke

Zähigkeit

Zylinderumströmung