

---

Kamprath Reihe

Dipl.-Ing. Walter Wagner

# Wärmeübertragung

Grundlagen

6., überarbeitete und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

---

# Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort	5
Formelzeichen und Einheiten	11
1 Einleitung	17
2 Wärmeleitung	19
2.1 Stationäre Wärmeleitung	19
2.1.1 Wärmeleitfähigkeit	20
2.1.2 Wärmeleitung durch eine ebene Wand	20
2.1.3 Wärmeleitung durch einen Hohlzylinder	22
2.1.4 Wärmeleitung durch eine Hohlkugel	24
2.1.5 Berücksichtigung von Wärme-Übergangswiderständen bei der Wärmeleitung	25
2.2 Wärmeleitung mit gleichzeitigem Wärmeübergang an der Oberfläche	26
2.2.1 Langer Stab	27
2.2.2 Kurzer Stab	28
2.2.3 Wärmestrom am Stabanfang	30
2.2.4 Rippenwirkungsgrad	31
2.3 Instationäre Wärmeleitung	31
2.3.1 Ableitung der Grundgleichung	31
2.3.2 Differentialgleichung des Temperaturfeldes	33
2.3.3 Mathematische Lösung des Temperaturfeldes	33
2.3.3.1 Grenzbedingungen für die größtmöglichen Temperaturunterschiede	39
2.3.3.2 Asymptotische Näherungsgleichungen für die praktische Berechnung	41
2.3.4 Zeichnerische Lösung des Temperaturfeldes	42
2.4 Gekoppelte Systeme	45
2.5 Wärmeausgleichsprobleme	46
2.5.1 Ein Körper mit kleiner Abmessung taucht in ein großes Fluidbecken	46
2.5.2 Ein Körper mit kleinen Abmessungen taucht in ein kleines, gedämmtes Fluidbecken	47
2.5.3 Energiezufuhr unter Abkühlung des Wärmeträgers	48
2.6 2-dimensionale Wärmeleitung	49
3 Konvektion	65
3.1 Wärmeübergang	65
3.2 Nußelt-Kennzahl	66
3.3 Grenzschicht	66
3.3.1 Wärmestromgleichung der Temperaturgrenzschicht	66
3.3.2 Strömungsgrenzschicht	68
3.3.3 Temperaturgrenzschicht	69
3.3.4 Bestimmung der Grenzschichtdicken aus dem Druckverlust	70
3.3.5 Turbulente Grenzschicht	72
3.4 Randbedingungen	78
3.4.1 Reynolds-Zahl	78
3.4.2 Prandtl-Zahl	78
3.4.3 Bezugstemperatur für Stoffwerte	79
3.4.4 Richtung des Wärmestroms	79
3.4.5 Anlaufbedingungen	80
3.4.6 Rauigkeit	85
3.4.7 Gekrümmte Rohre	86
3.4.8 Nichtkreisförmige Querschnitte	87
3.4.8.1 Strömung durch Ringspalte	88
3.4.8.2 Ebener Spalt	89
3.5 Medien mit sehr kleinen $Pr$ -Zahlen (flüssige Metalle)	89

3.6	Überströmter Einzelkörper . . . . .	90
3.6.1	Wärmeübergang im Staupunkt . . . . .	93
3.7	Quer angeströmte Rohrreihen und Rohrbündel . . . . .	95
3.7.1	Rohrbündel mit Umlenklechen . . . . .	98
3.8	Berippte Oberflächen . . . . .	98
3.8.1	Wärmeübergang bezogen auf den Rohraußendurchmesser $d_a$ . . . . .	98
3.8.2	Wärmeübertragung bezogen auf die äußere Gesamtoberfläche $A$ . . . . .	102
3.9	Freie Konvektion . . . . .	106
3.9.1	Freie Konvektion in Fluidschichten . . . . .	109
3.9.2	Freie Konvektion bei Luft . . . . .	110
3.9.3	Überlagerung von erzwungener und freier Strömung . . . . .	110
3.9.3.1	Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion bei Luft . . . . .	111
<b>4</b>	<b>Kondensation</b> . . . . .	<b>125</b>
4.1	Filmkondensation bei ruhendem Sattdampf . . . . .	125
4.1.1	Filmdicke . . . . .	125
4.2	Dimensionslose Darstellung . . . . .	127
4.3	Turbulente Kondensatströmung . . . . .	128
4.4	Geneigte Wand und waagerechte Rohre . . . . .	128
4.5	Kondensation von strömendem Sattdampf . . . . .	129
4.6	Kondensation von überhitztem Dampf (Heißdampf) . . . . .	130
4.7	Kondensation vom Dämpfen mit inerten Gasen . . . . .	130
<b>5</b>	<b>Verdampfung</b> . . . . .	<b>139</b>
5.1	Sieden bei freier Konvektion . . . . .	141
5.2	Blasensieden . . . . .	141
5.3	Kritische Wärmestromdichte . . . . .	144
5.4	Filmsieden . . . . .	144
5.5	Verdampfung mit erzwungener Strömung in Rohren . . . . .	145
5.5.1	1-phasige Flüssigkeitsströmung . . . . .	146
5.5.2	Unterkühltes Sieden . . . . .	146
5.5.3	Blasensieden (Sättigungssieden) . . . . .	146
5.5.4	Stilles Sieden . . . . .	148
5.5.5	Filmsieden . . . . .	149
5.5.6	Kritische Wärmestromdichte . . . . .	149
<b>6</b>	<b>Strahlung</b> . . . . .	<b>155</b>
6.1	Grundgesetz der Temperaturstrahlung . . . . .	155
6.2	Das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz . . . . .	156
6.3	Die Lambert'schen Gesetze . . . . .	159
6.4	Strahlungsaustausch . . . . .	160
6.4.1	Strahlungsaustausch in einem offenen System . . . . .	160
6.4.2	Strahlungsaustausch in einem umschlossenen System . . . . .	165
6.4.3	Strahlungsaustausch zwischen mehreren Oberflächen . . . . .	165
6.5	Strahlung von Gasen . . . . .	170
6.5.1	Strahlungsaustausch zwischen Gas und Wand . . . . .	173
6.6	Staubstrahlung . . . . .	175
6.6.1	Gas- und Staubstrahlung . . . . .	176
6.7	Wärmestrahlung von Flammen . . . . .	176
6.7.1	Flammenabmessungen . . . . .	176
6.7.2	Flammentemperaturen . . . . .	177
6.7.3	Wärmeübertragung im Flammenraum . . . . .	178
6.7.4	Emissionsgrad $\epsilon_{Fl}$ der Flamme . . . . .	178
6.8	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung . . . . .	179
<b>7</b>	<b>Spezialformen der Wärmeübertragung</b> . . . . .	<b>189</b>
7.1	Wirbelschicht . . . . .	189
7.1.1	Druckverlust der wirbelnden Partikelmasse . . . . .	189
7.1.2	Grenzgeschwindigkeiten . . . . .	190

---

7.1.3	Wärmeübergang . . . . .	190
7.2	Wärmerohr . . . . .	191
7.2.1	Kapillardruck . . . . .	191
7.3	Rührkessel . . . . .	193
7.3.1	Wärmeübertragung durch aufgeschweißte Halbbrohrscllangen . . . . .	194
7.4	Rieselfilme . . . . .	196
7.5	Durchströmte ruhende Schüttungen. . . . .	198
7.6	Prallströmung aus einzelnen Rund- und Schlitzdüsen . . . . .	199
7.7	Wärmeübertragung im Vakuumbereich. . . . .	200
7.7.1	Wärmeübergang im Gebiet mäßig verdünnter Gase . . . . .	201
<b>8</b>	<b>Wärmeübertragung durch Stofftransport . . . . .</b>	<b>203</b>
8.1	Diffusion . . . . .	203
8.2	Stoffübergang . . . . .	206
8.3	Verdunstung von Wasserdampf in Luft . . . . .	209
<b>9</b>	<b>Wärmedurchgang . . . . .</b>	<b>211</b>
9.1	Beeinflussung des Wärmedurchgangs durch Schutzschichten und Verschmutzung . . . . .	211
9.1.1	Foulingwiderstand . . . . .	212
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung der wichtigsten Gleichungen . . . . .</b>	<b>215</b>
<b>11</b>	<b>Stoffwerte. . . . .</b>	<b>237</b>
	<b>Literaturverzeichnis. . . . .</b>	<b>255</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>257</b>