

Maximilian Wutz

Wärmeabfuhr in der Elektronik

Mit 150 Bildern und 12 Tabellen



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Die grundsätzliche Bedeutung der Wärmeabfuhr in der Elektronik	1
1.2	Physikalische Grundprinzipien der Wärmeübertragung	2
2	Wärmeübertragung durch Leitung	3
2.1	Wärmeleitung und Stromtransport	3
2.1.1	Die quantitative Analogie von Wärme- und Stromleitung	3
2.2	Strom- und Wärmetransport in rechtwinkligen Körpern	4
2.3	Wärmetransport in komplizierteren Körpern	9
2.4	Stoffwerte der Wärmeleitfähigkeit	9
3	Wärmeübertragung durch Konvektion	12
3.1	Die Definition des Wärmeüberganges von einer Wand auf ein Fluid (Wärmeübergangs- und Wärmedurchgangskoeffizient)	12
3.2	Die Definition der Zähigkeit	15
3.3	Wärmeübergang bei der Platte	16
3.3.1	Wärmeübergang bei erzwungener Strömung	16
3.3.1.1	Die Grundgleichungen für die Wärmeübertragung	17
3.3.1.2	Das Konzept der Grenzschicht	18
3.3.1.3	Kenngrößen (Kennzahlen)	19
3.3.1.4	Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten	21
3.3.2	Wärmeübergang bei Auftriebsströmung	26
3.3.3	Objektive Kriterien für die Vereinfachung	30
3.3.4	Zusammenfassende Darstellung des konvektiven Wärmeüberganges	31
3.4	Wärmeübergang im Rohr, Kanal und (Ring)spalt	32
3.4.1	Wärmeübergang bei erzwungener Strömung	33
3.4.1.1	Hydraulischer Durchmesser	33
3.4.1.2	Strömung und Wärmeübergang im Einlauf	35
3.4.2	Wärmeübergang bei Auftriebsströmung	37
3.5	Wärmeübergang bei Verdampfung und Kondensation	39
3.5.1	Verdampfung	41
3.5.2	Kondensation	46
4	Wärmeübertragung durch Strahlung	50
4.1	Energieaustausch zwischen Flächen	52
4.2	Wärmeübergangskoeffizient bei Strahlungsaustausch	54

5 Wärmeübertragung bei gleichzeitigem Auftreten der einzelnen Wärmeübertragungsphänomene	56
5.1 Stationäre Probleme	58
5.1.1 Lineare Probleme. Der dünne Stab	58
5.1.1.1 Keine Energiezufuhr über die Fläche	62
5.1.1.2 Nur Energiezufuhr über die Fläche	65
5.1.2 Flächenhafte Probleme. Die dünne Platte	69
5.1.2.1 Die Rechteckplatte	70
5.1.2.2 Die kreisförmige Platte (Kreisrippe)	70
5.1.3 Räumliche Probleme	79
5.1.3.1 Rechteckprobleme	80
5.1.3.2 Das Rotationssymmetrische Problem	81
5.2 Nichtstationäre Probleme	84
5.2.1 Kein räumlicher Temperaturgradient. Transienter Wärmewiderstand	84
5.2.2 Räumlicher Temperaturgradient beim plattenförmigen Körper	86
5.2.2.1 Halbunendliche Körper	96
5.2.3 Die Biotzahl als Kriterium des räumlichen Temperaturgradienten	99
6 Elektrische Analogien und andere Verfahren zur Lösung von Wärmeableitprobleme	100
6.1 Potentialtheorie	100
6.1.1 Eigenschaften des Potentialfeldes	100
6.1.2 Kugel- und zylindersymmetrische Potentialfelder	102
6.1.3 Mathematische Formulierung	104
6.1.3.1 Wichtige Lösungen der Potentialgleichung	105
6.1.4 Anwendungen auf Wärmequellen des Chips	108
6.2 Zeichnerische Abschätzung des Strömungsfeldes. Wärmespreizwinkel	111
6.3 Experimentelle Ausnutzung der elektrischen Analogie	113
6.3.1 Stationäre Wärmeübertragung	113
6.3.2 Nichtstationäre Wärmeübertragung	116
6.3.2.1 Aufheizung von plattenförmigen Körpern	116
6.3.2.2 Transienter Wärmewiderstand	119
6.4 Numerische Lösungsverfahren	121
6.4.1 Stationäre Probleme	121
6.4.1.1 Energiebilanzverfahren	121
6.4.1.2 Differenzenverfahren. Doppelindizierung	127
6.4.1.3 Iterationsverfahren. Gauß-Seidel-Approximation	128
6.4.1.4 Numerisches Beispiel	129
6.4.2 Nichtstationäre Probleme	133
6.4.2.1 Differenzenverfahren	133
6.4.2.2 Berechnungen nach dem elektrischen Analogiemodell	135

7 Praxis der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung	139
7.1 Wärmeübergang bei natürlicher Konvektion (Auftriebsströmung) ...	139
7.2 Wärmeübergang bei erzwungener Strömung	140
7.3 Wärmeübergang durch Strahlung	142
8 Wesentliche Grundprinzipien zur Verbesserung der Wärmeabfuhr an die Umgebung	143
8.1 Wärmespreizung	143
8.1.1 Prinzip und technische Grenzen der Wärmespreizung	143
8.1.2 Abschirmeffekte. Angaben für den Praktiker	145
8.2 Kühlkörper	152
8.2.1 Kühlkörper für Auftriebsströmung	154
8.2.2 Kühlkörper bei erzwungener Strömung	157
8.2.2.1 Fluidstrom, Fluiderhitzung und Druckverlust	158
8.2.2.2 Verdichtungsarbeit. Lüfter	162
8.2.2.3 Konventionelle Kühlkörper	164
8.2.2.4 Hochleistungskühlkörper	166
8.3 Wärmepumpen und thermoelektrische Kühlung	168
9 Technische Lösungen zur Wärmeabfuhr in der Elektronik	171
9.1 Grundkonzeption	171
9.1.1 Das Übertragungsmodul im Gehäuse	173
9.1.2 Der Kontaktwärmewiderstand	176
9.1.3 Der Transienter Wärmewiderstand	179
9.1.3.1 Transienter Wärmewiderstand bei Impulsbelastung ...	183
9.2 Die Wärmeabfuhr bei Leistungshalbleitern	187
9.2.1 Leistungshalbleiter mit hohen Verlusten	188
9.2.1.1 Luftkühlung	188
9.2.1.2 Wasser- und Ölkühlung	192
9.2.1.3 Verdampfungskühlung	194
9.2.2 Leistungshalbleiter mit mittleren Verlusten	196
9.2.3 Leistungshalbleiter mit kleinen Verlusten	199
9.3 Die Wärmeabgabe bei integrierten Schaltkreisen (IC's)	201
9.3.1 Wärmeabfuhr außerhalb der Schaltkreisebenen	201
9.3.1.1 Die Kühlung einzelner Bauelemente	207
9.3.2 Wärmeabfuhr in der Schaltkreisebene	207
9.3.2.1 Quantitative Beschreibung	209
9.3.2.1.1 Wärmequellen am Kartenende	209
9.3.2.1.2 Wärmequellen gleichmäßig über die Fläche verteilt	212
9.3.2.1.3 Wärmequellen ungleichmäßig über die Fläche verteilt	215
9.3.2.2 Wärmeabfuhrverbesserung durch Lüfter	215
9.3.2.3 Wärmewiderstand von Bauteilgehäusen	217

10 Strömungsvorgänge und Thermodynamik: Grundlage des Wärmeübergangs	218
10.1 Gesetzmäßigkeiten von Fluiden	218
10.1.1 Das Konzept des Fluids	218
10.1.2 Kenngrößen von Fluiden	218
10.1.3 Zustandsgrößen	220
10.1.4 Die Zustandsgleichungen von Fluiden	220
10.1.4.1 Die Zustandsgleichungen idealer Gase	221
10.1.5 Die Fluidkenngrößen im Strömungsfeld	223
10.1.5.1 Lokale und zeitliche Ableitung	223
10.2 Grundzüge der Thermodynamik	224
10.2.1 Der erste Hauptsatz: Innere Energie und Enthalpie	224
10.2.1.1 Geschlossene Systeme	224
10.2.1.2 Offene Systeme	226
10.2.1.3 Die Dissipationsarbeit	227
10.2.2 Kalorische Zustandsgleichungen	227
10.2.3 Der zweite Hauptsatz	228
10.2.4 Spezielle Prozesse	229
10.2.4.1 Adiabatische Prozesse	229
10.2.4.1.1 Der adiabatisch reversible Prozeß	229
10.2.4.1.2 Der adiabatisch irreversible Prozeß	230
10.2.4.2 Die Gasverdichtung	230
10.2.4.3 Der Carnotprozeß. Wirkungsgrad und Leistungsziffer	232
10.2.4.4 Verdampfung und Kondensation im p , v und T , s_E Diagramm	235
10.3 Eindimensionale stationäre Strömung	236
10.3.1 Definition	236
10.3.2 Die Erhaltungssätze von Masse, Impuls und Energie	237
10.3.2.1 Massenerhaltungssatz	237
10.3.2.2 Impulserhaltungssatz	238
10.3.2.3 Energiesatz	240
10.3.3 Die isentrope Strömung	240
10.3.3.1 Inkompressible Fluide. Bernoulli Gleichung. Hydrostatischer Druck	241
10.3.3.2 Kompressible Fluide (Gasdynamische Funktionen)	242
10.3.3.3 Inkompressibilitätskriterium für kompressible Fluide	246
10.3.4 Strömung im Rohr konstanten Querschnitts mit Reibung	247
10.3.4.1 Rohrwiderstand, Widerstandsbeiwert	247
10.3.4.2 Die Erhaltungssätze	248
10.3.4.3 Inkompressible Fluide	248
10.3.4.4 Kompressible Fluide	249
10.3.5 Strömung im Rohr konstanten Querschnitts mit Reibung und Wärmezufuhr	253
10.3.5.1 Inkompressible Fluide	253
10.3.5.1.1 Strömung mit aufgeprägtem Gasstrom	255
10.3.5.1.2 Auftriebsströmung	257
10.3.6 Die allgemeine Gleichung der eindimensionalen Strömung	259

10.4	Nichtstationäre Strömung im Raum von kompressiblen Fluiden	260
10.4.1	Der Massenerhaltungssatz, Kontinuitätsgleichung	260
10.4.2	Der Impulssatz, Navier-Stokesche Gleichungen	261
10.4.3	Der Energiesatz	262
10.5	Stationäre Strömung im Raum von inkompressiblen Fluiden	265
10.5.1	Dimensionslose Schreibweise der Erhaltungssätze	266
10.5.1.1	Erhaltungssätze unter Verwendung von Kenngrößen	266
10.5.2	Krummlinige Koordinatensysteme	267
10.5.2.1	Zylinderkoordinaten	268
10.6	Zweidimensionale stationäre Schichtströmung	270
10.6.1	Laminarströmung im Kanal	270
10.6.2	Laminarströmung im Rohr	272
10.7	Ausbreitung von Störungen (Schallgeschwindigkeit)	273
Anhang		
I	Stoffgrößen von Feststoffen und Fluiden	274
I.1	Metalle und Halbleiter	275
I.2	Metall-Legierungen	276
I.3	Anorganische Hartstoffe	277
I.4	Anorganische Isolierstoffe	277
I.5	Organische Isolierstoffe	278
I.6	Fluide	279
I.6.1	Fluide bei verschiedenen Temperaturen	280
I.6.1.1	Wasser	280
I.6.1.2	R113: $\text{CClF}_2\text{-CCl}_2\text{F}$	281
I.6.1.3	Transformatoröl (Flüssigkeit)	281
	Literaturverzeichnis	282
	Sachwortregister	285