

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>1     Prozeßwärmeerzeugung als Aufgabenstellung</b> .....	<b>3</b>
1.1     Der Bedarf an Nutzenergien und seine Deckung .....	3
1.2     Ziele und Arten von Wärmeprozessen .....	8
1.3     Anforderungen an eine Prozeßwärmanlage .....	9
1.4     Der Energiebedarf einer wärmetechnischen Anlage .....	12
<b>2     Elektrowärmetechnik im Überblick</b> .....	<b>17</b>
2.1     Systematische Einteilung .....	17
2.2     Technische Eigenschaften .....	22
2.2.1     Erreichbare Temperaturen .....	22
2.2.2     Zeitliche Dosierbarkeit der Leistungszufuhr .....	22
2.2.3     Örtliche Temperaturverteilung .....	23
2.2.4     Leistungsdichte, Erwärmungsgeschwindigkeit, Wirkungs – querschnitt .....	25
2.2.5     Physikalische und chemische Beeinflussung des Gutes .....	27
2.2.6     Sonstige betriebliche Gesichtspunkte .....	28
2.3     Betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte .....	28
2.3.1     Allgemeines .....	28
2.3.2     Beispiel: Kostenvergleich für die Schmiedeblockerwärmung ..	31
2.4     Nutzungsgradketten und Primärenergieaufwand .....	39
 <b>Ausgewählte Grundlagen</b> .....	 <b>43</b>
<b>3     Thermodynamik</b> .....	<b>45</b>
3.1     Energiebilanzen (1. Hauptsatz) .....	45
3.2     Der thermodynamische Wert von Energien (2. Hauptsatz) . . .	49
3.3     Energetik chemischer Reaktionen .....	55

<b>4</b>	<b>Wärmeübertragung</b>	<b>62</b>
4.1	Wärmeleitung	62
4.2	Konvektion	64
4.3	Wärmestrahlung	65
4.4	Der technische Wärmedurchgang	73
<b>5</b>	<b>Elektrizitätslehre</b>	<b>76</b>
5.1	Wärmeerzeugung im elektrischen Leiter	76
5.1.1	Gesetzmäßigkeiten des elektrischen Stromes	76
5.1.2	Mechanismus der Stromleitung	79
5.2	Wärmeerzeugung im elektrischen Nichtleiter	87
5.2.1	Der Vorgang der Polarisierung im Nichtleiter	87
5.2.2	Das Ersatzschaltbild des verlustbehafteten Kondensators	91
5.2.3	Das Dielektrikum im elektrischen Wechselfeld	92
5.2.4	Feldübergänge zwischen verschiedenen Dielektrika	96
5.2.5	Wärmeerzeugung im gemischt leitenden Dielektrikum	98
5.3	Das elektromagnetische Wechselfeld	102
5.3.1	Die MAXWELLSchen Gleichungen	102
5.3.2	Energieinhalt und Leistungsfluß	104
5.3.3	Eindringverhalten elektromagnetischer Felder	106
5.4	Induktive Energieübertragung	116
5.4.1	Der magnetische Kreis	116
5.4.2	Elektrische Spannungen	120
5.4.3	Induktivitäten, Trafo – Ersatzschaltbild	122
5.4.4	Gesamtimpedanz	126
<b>Technologien und ihre Anwendung</b>		<b>129</b>
<b>6</b>	<b>Unmittelbare Widerstandserwärmung</b>	<b>131</b>
6.1	Standanlagen zur konduktiven Stangenenerwärmung	131
6.1.1	Anwendung und Anlagenaufbau	131
6.1.2	Erwärmungsablauf	132
6.1.3	Energiebedarf	138
6.2	Durchlaufanlagen zur konduktiven Drahterwärmung	141
6.3	Widerstandsschweißen	142
6.4	Elektro – Schlacke – Umschmelzen	145
6.4.1	Anlagenaufbau und Funktionsprinzip	145
6.4.2	Verfahrenstechnische Gesichtspunkte und Betriebsweise	147
6.4.3	Energieverbrauch	148
6.4.4	Elektrotechnische Gesichtspunkte	149
6.4.5	Anwendung	150

6.5	Elektrolyseofen zur Aluminiumgewinnung . . . . .	151
6.5.1	Allgemeine Verfahrensmerkmale und Anwendung der Schmelzflußelektrolyse . . . . .	151
6.5.2	Anlagenaufbau und -betrieb . . . . .	152
6.5.3	Reaktionsabläufe . . . . .	154
6.5.4	Energiebilanz . . . . .	156
6.6	Graphitierungsöfen . . . . .	160
6.6.1	Eigenschaften und Verwendung von Graphit . . . . .	160
6.6.2	Verfahrensgang . . . . .	161
6.6.3	Aufbau eines Graphitierungsöfens . . . . .	161
6.6.4	Ablauf eines Graphitierungsprozesses . . . . .	163
6.7	Siliciumcarbidöfen . . . . .	166
6.7.1	Eigenschaften, Verwendung und Gewinnung von SiC . . . . .	166
6.7.2	Aufbau und Betrieb des Ofens . . . . .	167
6.8	Elektro - Glasschmelzöfen . . . . .	168
6.8.1	Verfahrensgang . . . . .	168
6.8.2	Vollelektrisch beheizter Glasschmelzöfen . . . . .	169
6.8.3	Elektrozusatzheizung . . . . .	171
6.9	Elektroden - Salzbadöfen . . . . .	172
6.9.1	Aufbau und Betriebsweise . . . . .	172
6.9.2	Anwendung . . . . .	175
6.10	Elektrodenkessel . . . . .	175
7	<b>Mittelbare Widerstandserwärmung . . . . .</b>	<b>179</b>
7.1	Funktionsprinzip und Anwendung . . . . .	179
7.2	Beschickung und Führung des Erwärmungsgutes . . . . .	180
7.3	Ofenraum . . . . .	182
7.4	Ofengehäuse . . . . .	183
7.5	Heizelemente . . . . .	185
7.5.1	Widerstands - Heizleiter . . . . .	185
7.5.2	Infrarotstrahler . . . . .	189
7.6	Spezielle Ofenbauarten . . . . .	194
7.6.1	Infrarotöfen . . . . .	194
7.6.2	Wirbelbettofen . . . . .	197
8	<b>Induktive Erwärmung . . . . .</b>	<b>200</b>
8.1	Grundprinzipien . . . . .	200
8.1.1	Erwärmung mit Eisenkern . . . . .	200
8.1.2	Erwärmung ohne Eisenkern . . . . .	201
8.2	Frequenzerzeugung und Netzanschluß . . . . .	207
8.2.1	Frequenzbereiche . . . . .	207

8.2.2	Versorgung mit Netzfrequenz . . . . .	208
8.2.3	Frequenzvervielfacher . . . . .	209
8.2.4	Rotierender Umformer . . . . .	210
8.2.5	Statischer Umrichter . . . . .	212
8.2.6	Röhrengenerator . . . . .	217
8.3	Induktives Erwärmen zum Warmumformen . . . . .	218
8.3.1	Erwärmen im axialen Durchlauf . . . . .	218
8.3.2	Erwärmen im Querdurchlauf . . . . .	226
8.3.3	Technologische und betriebliche Anwendungskriterien . . . . .	226
8.4	Induktives Glühen . . . . .	228
8.5	Induktives Härten . . . . .	230
8.5.1	Vorgang und Zweck . . . . .	230
8.5.2	Prozeßparameter . . . . .	232
8.5.3	Der Induktor . . . . .	233
8.5.4	Arbeitsverfahren und Anwendung . . . . .	235
8.6	Induktives Löten . . . . .	239
8.7	Induktives Schweißen . . . . .	241
8.8	Induktives Schmelzen . . . . .	242
8.8.1	Induktions – Rinnenofen . . . . .	242
8.8.2	Induktions – Tiegelofen . . . . .	244
8.8.3	Anwendung . . . . .	251
9	<b>Dielektrische Erwärmung . . . . .</b>	<b>254</b>
9.1	Kondensatorfelderwärmung . . . . .	254
9.1.1	Frequenz, Feldstärke, Elektrodenanordnung . . . . .	254
9.1.2	Energieversorgung . . . . .	256
9.1.3	Erwärmung im Plattenkondensator . . . . .	256
9.1.4	Andere Kondensatorarten . . . . .	261
9.1.5	Spannungsverteilung an den Kondensatorelektroden . . . . .	264
9.1.6	Hochfrequenz – Trocknung . . . . .	266
9.1.7	Anwendungsgebiete . . . . .	269
9.1.7.1	Allgemeines . . . . .	269
9.1.7.2	Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen . . . . .	270
9.1.7.3	Vorwärmung von Kunstharz – Preßmassen . . . . .	271
9.1.7.4	Holzverleimung . . . . .	272
9.1.7.5	Textil – und Chemiefasertrocknung . . . . .	274
9.1.7.6	Papiertrocknung . . . . .	276
9.1.7.7	Trocknung und Aushärtung von Gußkernen . . . . .	278
9.2	Mikrowellenerwärmung . . . . .	280
9.2.1	Frequenzbänder . . . . .	280
9.2.2	Energieeintrag in das Erwärmungsgut . . . . .	280

9.2.3	Erwärmungsanlage . . . . .	283
9.2.4	Magnetron . . . . .	286
9.2.5	Energiebilanz . . . . .	291
9.2.6	Anwendung . . . . .	293
10	<b>Lichtbogenerwärmung . . . . .</b>	295
10.1	Lichtbogenofen zum Eisen – und Stahlschmelzen . . . . .	295
10.1.1	Drehstrom – Lichtbogenofen . . . . .	295
10.1.2	Gleichstrom – Lichtbogenofen . . . . .	306
10.1.3	Einsatzgebiete, Betriebsweise, Energiebedarf . . . . .	309
10.2	Lichtbogen – Reduktionsofen . . . . .	312
10.2.1	Aufbau und Arbeitsweise . . . . .	312
10.2.2	Einsatzbereiche, Energieverbrauch . . . . .	313
10.3	Vakuum – Lichtbogenofen . . . . .	314
10.4	Lichtbogenschweißen . . . . .	316
10.4.1	Lichtbogen zwischen Elektrode und Werkstück . . . . .	316
10.4.2	Lichtbogen zwischen den zu verschweißenden Teilen . . . . .	322
10.5	Funkenerodieren . . . . .	324
10.5.1	Anlagenaufbau und Funktionsweise . . . . .	324
10.5.2	Bearbeitungskenngrößen und Betriebsparameter . . . . .	327
10.5.3	Funkenerodierendes Senken . . . . .	329
10.5.4	Funkenerodierendes Schneiden . . . . .	330
11	<b>Plasmastrahlerwärmung . . . . .</b>	331
11.1	Plasmastrahlerzeugung . . . . .	331
11.1.1	Aufgabenstellung . . . . .	331
11.1.2	Plasmagenerator mit Bogenentladung . . . . .	334
11.1.3	Plasmagenerator mit HF – Feld . . . . .	336
11.2	Einwirkung des Plasmastrahls auf das Erwärmungsgut . . . . .	337
11.3	Anwendung . . . . .	338
11.3.1	Plasmagasofen . . . . .	338
11.3.2	Plasmaschmelzen . . . . .	341
11.3.3	Plasmaschweißen . . . . .	343
11.3.4	Plasmaschneiden . . . . .	345
11.3.5	Plasmaspritzen . . . . .	347
12	<b>Elektronenstrahlerwärmung . . . . .</b>	348
12.1	Einwirkung des Elektronenstrahls auf das Erwärmungsgut . . . . .	348
12.2	Elektronenstrahlkanone . . . . .	352
12.3	Anwendung . . . . .	355
12.3.1	Elektronenstrahlschmelzen . . . . .	356
12.3.2	Elektronenstrahlvergüten . . . . .	357

12.3.3	Elektronenstrahlschweißen . . . . .	358
12.3.4	Elektronenstrahlbohren . . . . .	361
13	<b>Laserstrahlerwärmung</b> . . . . .	364
13.1	Das Laserprinzip . . . . .	364
13.2	Laserbauarten und ihre Eigenschaften . . . . .	367
13.2.1	Nd – YAG – Laser . . . . .	368
13.2.2	CO <sub>2</sub> – Laser . . . . .	372
13.2.3	Excimerlaser . . . . .	378
13.3	Einwirkung des Laserstrahls auf das Erwärmungsgut . . . . .	379
13.4	Anwendung . . . . .	382
13.4.1	Laserschneiden . . . . .	382
13.4.2	Laserschweißen . . . . .	385
13.4.3	Laserbohren . . . . .	387
13.4.4	Oberflächenbehandlung mit Laser . . . . .	388
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	390
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	396