

Inhalt

Vorwort	VII
Geleitwort	IX
Autorenverzeichnis	X
1. Einleitung	1
1.1 Definition des Begriffs Thermoprozesstechnik	2
1.2 Systematik und Klassifikation der Thermoprozessanlagen	3
1.2.2 Ofenart	4
1.2.3 Gutlagerung	9
1.2.4 Erwärmungsprinzip	14
1.2.5 Hüllmittel	25
1.2.6 Produktionsbereich	26
2. Werkstofftechnische Grundlagen	31
2.1 Schmelzen	32
2.1.1 Eisenwerkstoffe	32
2.1.1.1 Stahlherstellung	35
2.1.1.2 Sekundärmetallurgie der Stahlherstellung	37
2.1.1.3 Schmelzen von Eisenguss	37
2.1.2 Aluminium	41
2.1.2.1 Primär- und Sekundäraluminium	41
2.1.2.2 Guss- und Knetlegierungen	42
2.1.2.3 Qualität der Aluminiumschmelze	42
2.1.2.4 Schmelzebehandlung	44
2.1.3 Kupferwerkstoffe	45
2.1.3.1 Kupfergewinnung	45
2.1.3.2 Kupfersorten und -legierungen	45
2.1.3.3 Oxidierendes und reduzierendes Schmelzen	46
2.1.4 Glas	48
2.1.4.1 Glasarten und -rohstoffe	48
2.1.4.2 Herstellung von Glas	50
2.1.4.3 Glasschmelzanlagen	52
2.2 Grundlagen der technischen Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe ..	57
2.2.1 Härten	60
2.2.1.1 Begriffsbestimmung	60
2.2.1.2 Vergüten (Härten und Anlassen)	61
2.2.1.3 Prüfung der Härbarkeit	72
2.2.1.4 Berechnung der Härbarkeit	75
2.2.1.5 Einsatzhärten	76
2.2.1.6 Eigenschaften gehärteter Werkstücke	77
2.2.2 Glühbehandlungen	81
2.2.2.1 Diffusionsglühen	81

2.2.2.2	Großkornglößen	84
2.2.2.3	Normalglößen	86
2.2.2.4	Weichglößen	88
2.2.2.5	Rekristallisationsglößen	92
2.2.2.6	Spannungsarmglößen	98
2.2.2.7	Kombinierte Glößenverfahren	99
2.2.2.8	Patentieren von Dröhten	99
2.2.3	Beschreibung der Austenitumwandlung für technische Anwendungen	100
2.2.3.1	Ermittlung der Ungleichgewichtsschaubilder	100
2.3	Grundlagen der technischen Wärmebehandlung von nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen	103
2.3.1	Einteilung von nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen	103
2.3.2	Natursteine	104
2.3.2.1	Magmatite	104
2.3.2.2	Sedimente	104
2.3.2.3	Metamorphite	105
2.3.3	Glas	105
2.3.3.1	Rohstoffe und Herstellung	105
2.3.3.2	Wärmebehandlung von Glas	106
2.3.3.3	Formgebung von Glas	106
2.3.3.4	Eigenschaften von Glas und ihre Beeinflussung	107
2.3.4	Keramik	109
2.3.4.1	Einteilung keramischer Werkstoffe	110
2.3.4.2	Sintern keramischer Werkstoffe	113
2.3.4.2.1	Anfangsstadium	115
2.3.4.2.2	Zwischenstadium	116
2.3.4.2.3	Endstadium	118
2.3.4.2.4	Sintern von Hartporzellan	119
2.3.5	Nichtmetallisch-anorganische Bindemittel	120
2.3.5.1	Zement	120
2.3.5.1.1	Zementarten	121
2.3.5.1.2	Sintern zum Zementklinker	122
2.3.5.2	Kalk	123
2.3.5.2.1	Entstehung von Calciumcarbonat	123
2.3.5.2.2	Kalziniieren von Calciumcarbonat	123
2.3.5.3	Gips	124
2.3.5.3.1	System $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$	125
2.3.5.3.2	Dehydratisierung des Gipses	125
3.	Wärmeübertragung	129
3.1	Grundgleichungen der Wärmeübertragung	130
3.2	Wärmeleitung	131
3.2.1	Fouriersches Gesetz	131
3.2.2	Fouriersche Wärmeleitungsgleichung	131
3.2.3	Eindimensionale, stationäre Wärmeleitung	133
3.2.4	Wärmeübertragung an Rippen	137
3.2.4.1	Wärmeübertragung an Rippen mit konstanten Querschnitten	138

3.2.4.2	Rippenwirkungsgrad	139
3.2.5	Instationäre Wärmeleitung	145
3.2.5.1	Körper mit hoher Wärmeleitfähigkeit	146
3.2.5.2	Ebene Wand mit Konvektion	148
3.2.5.3	Unendlich langer Zylinder mit Konvektion	153
3.2.5.4	Kugel mit Konvektion	154
3.2.5.5	Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper	157
3.2.6	Numerische Lösung von Wärmeleitungsproblemen	157
3.2.6.1	Numerische Lösung stationärer Wärmeleitungsprobleme	159
3.2.6.2	Numerische Lösung instationärer Wärmeleitungsprobleme	167
3.3	Wärmestrahlung	172
3.3.1	Schwarze Strahlung	174
3.3.1.1	Plancksches Verteilungsgesetz	175
3.3.1.2	Wiensches Verschiebungsgesetz	176
3.3.1.3	Stefan-Boltzmannsches Gesetz	177
3.3.2	Oberflächenemission - Reflektion, Absorption, Transmission	177
3.3.3	Strahlungsaustausch zwischen diffusen, grauen Flächen	183
3.3.3.1	Einstrahlzahlen (view factors)	183
3.3.3.2	Berechnete Einstrahlzahlen	185
3.3.3.3	Strahlungsaustausch zwischen schwarzen Oberflächen	185
3.3.3.4	Strahlungsaustausch zwischen grauen Oberflächen in einem geschlossenen Raum	188
3.3.4	Gasstrahlung; Strahlung von Gasgemischen	191
3.3.4.1	Absorption und Strahlung in Gasen mit konstanten Temperaturen	191
3.3.4.2	Emissionsgrade von Gasen bei einem Gesamtdruck von $p = 1$ bar	195
3.3.4.3	Strahlungsaustausch zwischen Gas und Wand	200
3.4	Konvektion	202
3.4.1	Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten mittels dimensionsloser Kennzahlen	204
4.	Brennstoffe und Verbrennung	209
4.1	Einteilung der Brennstoffe	210
4.2	Zusammensetzungen gasförmiger Brennstoffe	211
4.3	Eigenschaften und Kenndaten von Gasen und gasförmigen Brennstoffen	211
4.3.1	Zusammensetzung eines Gasgemisches	212
4.3.2	Molare Masse eines Gasgemisches	212
4.3.3	Molares Volumen eines Gasgemisches	215
4.3.4	Dichte	215
4.3.5	Relative Dichte	215
4.3.6	Bezugszustand	215
4.3.7	Brennwert $H_{o,n}$	215
4.3.8	Heizwert $H_{u,n}$	216
4.3.9	Wobbe-Index eines gasförmigen Brennstoffs	217
4.3.10	Zündtemperatur eines gasförmigen Brennstoffs	217
4.3.11	Zündgrenzen eines gasförmigen Brennstoffs	218
4.3.12	Spezifische Wärmekapazität und Enthalpie	221

4.4	Verbrennung	223
4.4.1	Grundgleichungen der Verbrennung	223
4.4.1.1	Reaktionsgleichungen	225
4.4.1.2	Sauerstoff- und Luftbedarf der Verbrennung	228
4.4.1.3	Abgase bei der Verbrennung	229
4.4.2	Energetik der Verbrennungsprozesse	236
4.4.2.1	Verbrennungstemperatur	238
4.4.2.2	Abgasverluste	245
4.2.2.3	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	246
5.	Elektrothermische Verfahren	251
5.1	Übersicht der Elektrothermischen Verfahren und deren Anwendungsgebiete in der Industrie	252
5.2	Direkte Erwärmungsverfahren	256
5.2.1	Mathematische Grundlagen und Berechnung direkter Erwärmungsverfahren	257
5.2.1.1	Elektromagnetisches Feld	257
5.2.1.2	Temperaturfeld	264
5.2.1.3	Kopplung von elektromagnetischem und thermischem Feld	265
5.2.1.4	Fluiddynamisches Feld	266
5.2.1.5	Methoden zur numerischen Berechnung	268
5.2.2	Induktive Erwärmung	273
5.2.2.1	Physikalische und technische Grundlagen	273
5.2.2.2	Induktives Schmelzen	276
5.2.2.3	Induktive Erwärmung zum Wärmebehandeln, Umformen sowie zum Fügen und Trennen	282
5.2.3	Konduktive Erwärmung	290
5.2.3.1	Physikalische und technische Grundlagen	290
5.2.3.2	Anwendungsbereiche und Anlagentechniken	292
5.2.3.3	Energieversorgung und Energiebedarf	293
5.2.4	Dielektrische Erwärmung	294
5.2.4.1	Physikalische und technische Grundlagen	294
5.2.4.2	Hochfrequenzerwärmung	296
5.2.4.3	Mikrowellenerwärmung	299
5.3	Indirekte Erwärmungsverfahren	302
5.3.1	Widerstandserwärmung	302
5.3.1.1	Physikalische und technische Grundlagen	303
5.3.1.2	Anlagentechniken und Anwendungsbereiche	305
5.3.2	Infraroterwärmung	306
5.3.2.1	Physikalische und technische Grundlagen	306
5.3.2.2	Anlagentechniken und Auslegungskriterien	307
5.3.2.3	Anwendungsbereiche	308
5.3.3	Lichtbogenerwärmung	309
5.3.3.1	Physikalische und technische Grundlagen	309
5.3.3.2	Anwendungen	310
5.3.4	Plasmaerwärmung	313
5.3.4.1	Physikalische und technische Grundlagen	313
5.3.4.2	Anwendungsbereiche der Plasmastrahlverfahren	314

5.3.4.3	Anwendungsbereiche der Plasmawärmebehandlung und Plasmaoberflächentechniken	315
5.3.5	Laserstrahlerwärmung	318
5.3.5.1	Physikalische und technische Grundlagen	318
5.3.5.2	Anwendungsbereiche	319
5.3.6	Elektronenstrahlerwärmung	322
5.3.6.1	Physikalische und technische Grundlagen	322
5.3.6.2	Anlagentechniken und Anwendungsbereiche	324
5.3.7	Funkenerosion	325
5.3.7.1	Physikalische und technische Grundlagen	325
5.3.7.2	Anwendungstechniken	326
5.3.7.3	Anlagenaufbau	327
5.3.7.4	Anwendungsbereiche	327
6.	Energiebilanz von Industrieöfen und Energieeffizienz	331
6.1	Massenbilanz	332
6.2	Energiebilanz	332
6.2.1	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	333
6.2.2	Arbeit	335
6.2.3	System und Systemgrenze	336
6.2.4	Enthalpie, innere Energie	339
6.3	Bewertung von Bilanzen	342
6.3.1	Nutzungsgrad	343
6.3.2	Wirkungsgrad	344
6.3.3	Definition von Wirkungsgraden	345
6.4	Wirkungsgrade eines Ofens ohne Luftvorwärmung	349
6.5	Wirkungsgrade eines Ofens mit Luftvorwärmung	354
6.6	Wirkungsgrade und Energiebilanzen von elektrothermischen Verfahren ...	357
6.6.1	Wirkungsgradketten	359
6.6.2	Wirkungsgrade für die elektrothermische Energiewandlung bei direkten elektrothermischen Erwärmungsverfahren	362
6.6.3	Beispiele für Energiebilanzen elektrothermischer Verfahren	363
6.7	Energieeffizienz von Industrieöfen	365
6.7.1	Methodik zur Verbesserung der Energieeffizienz von Industrieöfen	365
6.7.2	Energieeffizienz von elektrothermischen Verfahren	366
6.7.2.1	Optimierung vorhandener Prozesse und Anlagen	368
6.7.2.2	Substitution oder Ergänzung konventioneller thermischer Prozesse und Anlagen	369
6.7.2.3	Entwicklung und Einführung neuer hocheffizienter Verfahren	369
6.8	Beispiele für Energiebilanzen brennstoffbeheizter Industrieöfen	371
7.	Thermoprozessanlagen mit Gasumwälzung	379
7.1	Anwendungsgebiete	380
7.2	Die Thermoprozessanlage mit Gasumwälzung als Strömungskreislauf	381

7.3	Grundzüge der Strömungstechnik	382
7.3.1	Stoffeigenschaften	382
7.3.1.1	Dichte	382
7.3.1.2	Dynamische Viskosität	383
7.3.1.3	Kinematische Viskosität	384
7.3.1.4	Wärmeleitfähigkeit	384
7.3.2	Grundgleichungen	385
7.3.2.1	Ruhende Gase	385
7.3.2.2	Fluidbewegung	386
7.3.3	Innere und äußere Strömung	396
7.3.4	Strömungsformen	399
7.3.5	Ähnlichkeit	402
7.3.6	Modellversuche	404
7.4	Gestaltung der Strömungsführung von Thermoprozessanlagen mit Gasumwälzung	407
7.5	Gasströmung und Wärmeübertragung	412
7.5.1	Physikalische Grundlagen für optimale konvektive Wärmeübertragung	412
7.5.2	Entwurfsüberlegungen für Systeme zur konvektiven Wärmeübertragung	417
7.5.3	Gebrauchsformeln zur Berechnung des Wärmeüberganges von Düsenfeldern	420
7.5.3.1	Düsenrippen mit Runddüsen	420
7.5.3.2	Düsenrippen mit Schlitzdüsen	422
7.5.3.3	Düsenysteme für gleichmäßige Wärmeübergangsverteilung	422
8.	Ofenatmosphären	425
8.1	Grundlagen der Vakuumtechnik	426
8.1.1	Allgemeines	426
8.1.2	Merkmale der Druckbereiche und Auswirkungen in der Thermoprozesstechnik	427
8.1.3	Vakuumerzeugung	428
8.1.4	Druckmessung	435
8.1.4.1	Totaldruckmessung	435
8.1.4.2	Partialdruckmessung	437
8.1.5	Vakuum in der Thermoprozesstechnik	439
8.2	Grundlagen der Vakuumwärmebehandlung	440
8.2.1	Glühen	442
8.2.2	Vergüten	442
8.2.3	Einsatzhärten im Vakuum	445
8.2.3.1	Niederdruckaufkohlung	446
8.2.3.2	Plasmaaufkohlen	452
8.2.4	Gasabschrecken	454
8.2.4.1	Physikalische Grundlagen	455
8.2.4.2	Reversieren	460
8.2.4.3	Düsenkühlung	461
8.2.4.4	Härtbarkeit	463
8.2.5	Vakuumnitrieren	465
8.2.5.1	Niederdruck-Nitrieren	465

8.2.5.2	Plasmanitrieren	465
8.2.6	Löten	466
8.2.7	Trockenes Bainitisieren	468
8.2.8	Verzug	469
8.3	Grundlagen der Schutz- und Reaktionsgastechnik	475
8.3.1	Schutz- und Reaktionsgas	475
8.3.1.1	Aufgaben von Schutz- und Reaktionsgasen	475
8.3.1.2	Herstellung/Erzeugung durch Verbrennung	476
8.3.1.3	Herstellung/Erzeugung durch thermische Spaltung	479
8.3.1.4	Herstellung/Erzeugung durch Mischung	480
8.3.2	Schutzgase für thermische Prozesse	480
8.3.2.1	Glühprozesse	480
8.3.2.2	Neutralhärten	481
8.3.3	Schutz- und Reaktionsgase für thermochemische Prozesse	482
8.3.3.1	Aufkohlen/Einsatzhärten	482
8.3.3.1.1	C-Pegel-Regelung	483
8.3.3.1.2	Partielle Aufkohlung durch Kohlenmonoxid und Wasserstoff (heterogenes Wassergasgleichgewicht)	483
8.3.3.1.3	Partielle Aufkohlung durch Kohlenmonoxid (Boudouard-Gleichgewicht)	484
8.3.3.1.4	Partielle Aufkohlung durch Kohlenmonoxid unter Bildung von Sauerstoff	486
8.3.3.1.5	Regelung der Aufkohlungsatmosphäre mit CH ₄ -Überschuss	488
8.3.3.1.6	Kohlenstoffaktivität a _C	488
8.3.3.1.7	Legierungsfaktor f	489
8.3.4	Schutzgasatmosphäre	490
8.3.4.1	Stöchiometrische Berechnungen	490
8.3.4.2	Berechnung der Schutzgaszusammenstellung	491
8.3.4.3	Homogene Wassergasreaktion	491
8.3.4.4	Homogene Methanbildungsreaktion	491
8.3.4.5	Boudouardsche Reaktion	492
8.3.4.6	Heterogene Wassergasreaktion	493
8.3.4.7	Heterogene Methanbildungsreaktion	494
8.3.4.8	Berechnung der Schutzgaszusammensetzung	494
8.3.4.9	Rußgrenze	500
8.3.5	Carbonitrieren	500
8.3.6	Vergüten	501
8.3.7	Nitrieren und Nitrocarburieren	502
9.	Werkstoffe im Ofenbau	519
9.1	Metallische Hochtemperaturwerkstoffe	520
9.1.1	Einleitung	520
9.1.1.1	Grundlagen hitzebeständiger Stähle	520
9.1.1.2	Grundlagen hochwarmfester Werkstoffe	522
9.1.2	Ofenbauwerkstoffe - Anwendungsbeispiele	526
9.1.2.1	Werkstoffe für die Wärmebehandlung an Luft	526
9.1.2.2	Blankglühanlagen und Nitrieröfen	528
9.1.2.3	Ofenbauwerkstoffe für den Einsatz unter aufkohlenden Bedingungen	529
9.1.2.4	Ofenbauwerkstoffe für den Einsatz unter komplexen Korrosionsbedingungen ..	531

9.1.3	Heizleiterwerkstoffe	532
9.1.3.1	Eisen-Chrom-Aluminium-Legierungen	532
9.1.3.2	Nickel-Chrom-(Eisen)-Legierungen	535
9.2	Keramische Werkstoffe	538
9.2.1	Dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse	542
9.2.1.1	Basische geformte Erzeugnisse	542
9.2.1.2	Nichtbasische geformte Erzeugnisse	544
9.2.2	Ungeformte feuerfeste Werkstoffe	551
9.2.2.1	Feuerbetone (C)	551
9.2.2.2	Formbare feuerfeste Massen (M)	553
9.2.2.3	Spritzmassen (G)	553
9.2.2.4	Feuerfeste Mörtel (J)	554
9.2.2.5	Sonstige ungeformte feuerfeste Erzeugnisse (O)	554
9.2.3	Wärmedämmende Werkstoffe	554
9.2.3.1	Wärmedämm- und Feuerleichtsteine	555
9.2.3.2	Hochtemperaturwolle	556
9.2.4	Sonstige wärmedämmende Werkstoffe	564
9.3	Kohlenstoff und Graphit im Ofenbau	565
9.3.1	Feinkorngraphit	565
9.3.1.1	Elektrische Heizelemente und Heizsysteme aus Feinkorngraphit	565
9.3.1.2	Elektrische Anschlusskontakte aus Spezialgraphiten mit hoher elektrischer Leitfähigkeit	568
9.3.2	Carbonfaserverstärkter Kohlenstoff (CFC)	572
9.3.2.1	Elektrische Heizelemente und Heizsysteme aus carbonfaserverstärktem Kohlenstoff (CFC)	572
9.3.2.2	Komponenten aus CFC-Verbundwerkstoffen für den Ofenbau	577
9.3.3	Isolationswerkstoffe aus Kohlenstoffen	578
9.3.3.1	Weichfilze	578
9.3.3.2	Kohlenstoff-Weichfilze	578
9.3.3.3	Graphit-Weichfilz	579
9.3.4	Hartfilze	580
9.3.5	Kohlenstoffschaum	582
	Stichwortverzeichnis	587
	Alphabetisches Firmenverzeichnis	597
	Inserentenverzeichnis	605