

# Inhaltsverzeichnis

Häufig verwendete Formelzeichen . . . . .	XIII
---	------

1 Allgemeines – Definition des Begriffs Stahl – Ziel der Stahlherstellung . . .	1
---	---

2 Thermodynamische Grundlagen . . . . .	4
2.1 Übersicht über die wichtigsten bei der Raffination ablaufenden Reaktionen . . . . .	4
2.2 Aktivitäten in metallischen Mehrstoffsystemen . . . . .	7
2.3 Struktur der Schlacken . . . . .	10
2.4 Gasgleichgewichte . . . . .	15
2.5 Oxidationsgleichgewichte . . . . .	20
2.5.1 Das System Eisen-Sauerstoff . . . . .	20
2.5.2 Zweistoffsysteme von Schlacken der Oxidationsreaktionen . . . . .	25
2.5.2.1 Das System FeO-MnO . . . . .	25
2.5.2.2 Das System FeO-SiO <sub>2</sub> . . . . .	27
2.5.2.3 Das System FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO . . . . .	28
2.5.2.4 Das System FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO . . . . .	36
2.5.2.5 Die Systeme CaO-SiO <sub>2</sub> und CaO-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . . . . .	37
2.5.3 Das Dreistoffsystem CaO-FeO <sub>n</sub> -SiO <sub>2</sub> und die zugehörigen Metall-Schlacke-Gleichgewichte . . . . .	39
2.5.4 Das System CaO-FeO <sub>n</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> und das Entphosphorungsgleichgewicht . . . . .	49
2.6 Desoxidationsgleichgewichte . . . . .	57
2.6.1 Einfache Desoxidationsgleichgewichte . . . . .	57
2.6.2 Bildung komplexer Oxide . . . . .	65
2.7 Gleichgewichte der Entschwefelung . . . . .	76
2.7.1 Löslichkeitsprodukte der Sulfide . . . . .	79
2.7.2 Entschwefelung mit festen Entschwefelungsmitteln . . . . .	82
2.7.3 Entschwefelung mit kalkbasischen Schlacken . . . . .	85
2.8 Gleichgewichte mit alkalihaltigen Schlacken . . . . .	94
2.9 Calciummetallurgie . . . . .	102
3 Stoffübertragung . . . . .	107
3.1 Formen schmelzmetallurgischer Reaktionen . . . . .	107
3.1.1 Einführung und Grundbegriffe . . . . .	107
3.1.2 Reaktionstypen . . . . .	112

3.1.2.1	Konsekutivreaktionen . . . . .	113
3.1.2.2	Doppelte Umsetzungen . . . . .	115
3.1.2.3	Reaktionen mit Verzweigungen . . . . .	120
3.2	Transportvorgänge . . . . .	123
3.2.1	Einführung und Grundbegriffe . . . . .	123
3.2.2	Grenzschichten . . . . .	125
3.2.3	Stoffübergang bei reibungsfreier Strömung . . . . .	127
3.2.4	Strömung und Stoffübergang bei Strömung mit Reibung, Strömung laminar . . . . .	132
3.2.4.1	Gleichung der Strömungsgrenzschicht bei laminarer erzwungener Strömung . . . . .	132
3.2.4.2	Gleichung der Diffusionsgrenzschicht bei laminarer erzwungener Strömung . . . . .	135
3.2.4.3	Lösung der Grenzschichtgleichungen . . . . .	137
3.2.5	Näherungsweise Berechnung der Grenzschichtgleichungen mit Hilfe der Integralprofilmethode . . . . .	143
3.2.5.1	Grenzschicht an der längs angeströmten Platte . . . . .	143
3.2.5.2	Strömungs- und Konzentrationsgrenzschichten an einer flüssig-flüssig-Phasengrenze . . . . .	145
3.2.6	Strömung und Stoffübergang bei Strömung mit Reibung, Strömung turbulent . . . . .	153
3.2.6.1	Begriff der Turbulenz . . . . .	153
3.2.6.2	Reynoldssche Schubspannung . . . . .	154
3.2.6.3	Prandtlscher Mischungsweg . . . . .	156
3.2.6.4	Turbulenter Stofftransport . . . . .	158
3.2.7	Turbulenter Impuls- und Stofftransport an freien Oberflächen . . . . .	160
3.2.8	Einfluß grenzflächenaktiver Stoffe auf den Stoffübergang . . . . .	164
3.2.9	Stoffübergang mit Fällungsreaktion an einer Phasengrenze . . . . .	167
4	<b>Kinetik schmelzmetallurgischer Reaktionen . . . . .</b>	<b>169</b>
4.1	Einführung . . . . .	169
4.2	Metall-Gas-Reaktionen . . . . .	170
4.2.1	Reaktion zwischen flüssigem Eisen und Stickstoff . . . . .	170
4.2.1.1	Aufstellung des Reaktionsschemas . . . . .	170
4.2.1.2	Stofftransport in der Gasphase . . . . .	172
4.2.1.3	Stofftransport in der Schmelze . . . . .	175
4.2.1.4	Phasengrenzreaktion bei reinen Eisen-Stickstoff- Schmelzen . . . . .	178
4.2.1.5	Einfluß von Sauerstoff und Schwefel auf den Stickstoffübergang . . . . .	179
4.2.2	Reaktion zwischen flüssigem Eisen und Wasserstoff . . . . .	182
4.2.3	Kohlenstoff-Sauerstoff-Reaktion in flüssigem Eisen . . . . .	183
4.2.3.1	Oxidation des Kohlenstoffs an einer freien Oberfläche der Metallschmelze mit einem gasförmigen Oxidationsmittel . . . . .	184
4.2.3.2	Oxidation von flüssigem Eisen durch Sauerstoff . . . . .	190
4.2.3.3	Kohlenmonoxidreaktion . . . . .	192

4.3	Metall-Schlacke-Reaktionen . . . . .	196
4.3.1	Reaktionen ohne Beteiligung von Kohlenstoff . . . . .	196
4.3.1.1	Transportbestimmte Reaktionen . . . . .	196
4.3.1.2	Phasengrenzreaktion . . . . .	198
4.3.2	Reaktionen mit Beteiligung von Kohlenstoff . . . . .	201
4.4	Auflösung fester Stoffe . . . . .	208
4.4.1	Auflösung dichter Stoffe . . . . .	208
4.4.1.1	Der Ausbau der Atome aus dem Kristall . . . . .	208
4.4.1.2	Transportbestimmte Auflösung . . . . .	210
4.4.2	Auflösung poröser Stoffe . . . . .	213
4.4.3	Auflösung von Kalk in silicatischen Schlacken . . . . .	217
<b>5</b>	<b>Bewegungsgesetze von festen Teilchen, Tropfen und</b>	
	<b>Gasblasen in Mehrphasensystemen . . . . .</b>	<b>219</b>
5.1	Einführung . . . . .	219
5.2	Bewegung fester Teilchen . . . . .	219
5.3	Bewegung von Gasblasen . . . . .	223
5.3.1	Blasenentstehung . . . . .	223
5.3.2	Widerstandsgesetze für Gasblasen . . . . .	230
5.3.3	Blasenzerfall . . . . .	236
5.4	Bewegung von Tropfen . . . . .	237
5.5	Bewegungsgesetze von Teilchensuspensionen und Blasenschwärmen	238
5.5.1	Bewegung von Partikelwolken begrenzter Höhe . . . . .	240
5.5.2	Blasensäulen . . . . .	244
5.5.2.1	Allgemeines . . . . .	244
5.5.2.2	Blasensäulen im Konverter . . . . .	249
5.5.2.3	Blasensäulen in der Pfanne . . . . .	252
5.6	Verhalten feststoffbeladener Gasstrahlen . . . . .	265
5.6.1	Zustandsdiagramm der pneumatischen Förderung . . . . .	265
5.6.2	Hydrodynamisches Verhalten feststoffbeladener Gasstrahlen	266
5.6.2.1	Typen von Gas-Feststoff-Strahlen . . . . .	266
5.6.2.2	Verhalten gekoppelter Gas-Feststoff-Strahlen beim Eindringen in Schmelzen . . . . .	268
5.6.3	Eindringen von Teilchen in Schmelzen . . . . .	276
5.6.3.1	Einführung . . . . .	276
5.6.3.2	Eindringen eines Einzelteilchens . . . . .	278
5.6.3.3	Weiteres Verhalten der Teilchen in der Schmelze, Eindringen eines Teilchenschwarms . . . . .	281
5.7	Emulgierung . . . . .	282
5.7.1	Bedingung der Tropfenbildung . . . . .	284
5.7.2	Geschwindigkeit der Phasengrenze Schlacke-Metall . . . . .	286
5.7.3	Menge der emulgierten Tropfen . . . . .	292
<b>6</b>	<b>Stoffübergang in metallurgischen Systemen . . . . .</b>	<b>295</b>
6.1	Einführung . . . . .	295
6.2	Verschleiß von feuerfestem Material . . . . .	296
6.3	Blasengerührte Grenzfläche . . . . .	301

6.3.1	Modellvorstellungen . . . . .	301
6.3.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	303
6.4	Grundsätzliches zum Stoffübergang an Teilchen, Tropfen und Blasen . . . . .	307
6.5	Wachstum und Auflösung kleiner Teilchen in Schmelzen . . . . .	308
6.6	Wechselwirkung zwischen Teilchen und Grenzflächen. Teilchenkoagulation und Teilchenabscheidung . . . . .	315
6.7	Teilchenabscheidung durch Rühren . . . . .	318
6.8	Stoffübergang an festen Teilchen bei höheren Reynoldszahlen . . . . .	324
6.9	Stoffübergang an Teilchen mit Berücksichtigung von Diffusion im Teilchen . . . . .	327
6.10	Stoffübergang zwischen Schmelzen und Tropfen . . . . .	333
6.11	Stoffübergang zwischen Gasblasen und Schmelzen . . . . .	337
<b>7</b>	<b>Reaktortheorie . . . . .</b>	<b>341</b>
7.1	Begriff der Reaktortheorie . . . . .	341
7.2	Makrokinetik in homogenen Systemen . . . . .	343
7.2.1	Vorbemerkung . . . . .	343
7.2.2	Makrokinetik in nichtemulgierten Systemen . . . . .	344
7.2.2.1	Permanenter Phasenkontakt . . . . .	345
7.2.2.2	Transitorischer Phasenkontakt . . . . .	347
7.2.3	Makrokinetik in emulgierten Systemen . . . . .	349
7.2.3.1	Permanenter Phasenkontakt . . . . .	349
7.2.3.2	Transitorischer Phasenkontakt . . . . .	354
7.2.4	Folgerungen . . . . .	356
7.3	Stoffumsätze in dispergierten Systemen . . . . .	357
7.3.1	Regeln für die Bestimmung der Stoffumsätze an Teilchen, Tropfen und Blasen . . . . .	357
7.3.2	Metall-Schlacke-Reaktionen im Sauerstoffkonverter . . . . .	360
7.3.2.1	Reaktionssystem Sauerstoffkonverter . . . . .	360
7.3.2.2	Teilchengrößenverteilung, Menge und Verweilzeit der in der Schlacke emulgierten Eisentropfen . . . . .	363
7.3.2.3	Entphosphorungsreaktion . . . . .	364
7.3.2.4	Einfluß veränderter Parameter . . . . .	374
7.3.3	Entschwefelung von Roheisen durch Einblasen von Kalk oder Calciumcarbid . . . . .	375
7.3.3.1	Reaktionstechnische Analyse der Entschwefelung mit Kalk . . . . .	375
7.3.3.2	Entschwefelung mit Calciumcarbid . . . . .	381
7.4	Entkohlungsreaktion . . . . .	381
7.5	Mischung . . . . .	392
7.5.1	Einführung . . . . .	392
7.5.2	Mischungsmodelle . . . . .	395
7.5.2.1	Modell der turbulenten Umlaufströmung . . . . .	395
7.5.2.2	Einfaches Umlaufmodell . . . . .	397
7.5.2.3	Tank-in-Reihe-Modell . . . . .	399
7.5.2.4	Zwei-Tank-Modell . . . . .	402

7.5.2.5	Kombiniertes Umlauf- und Zwei-Tank-Modell . . .	406
7.5.2.6	Verallgemeinertes Teilvolumenmodell . . . . .	410
7.5.3	Mischung im Konverter . . . . .	410
<b>8</b>	<b>Kinetik des Einschmelzens</b> . . . . .	<b>414</b>
8.1	Einschmelzen mit direkter Übertragung der Wärme von der Heizquelle auf das Einschmelzgut . . . . .	414
8.1.1	Aufgabenstellung . . . . .	414
8.1.2	Vorwärmperiode . . . . .	418
8.1.3	Schmelzperiode . . . . .	424
8.2	Einschmelzen des Wärmeguts in der eigenen Schmelze . . . . .	429
8.2.1	Einführung . . . . .	429
8.2.2	Einschmelzen ohne Berücksichtigung der Wärmeleitung im Festkörper . . . . .	433
8.2.2.1	Isothermes Schmelzen eines auf Schmelztemperatur befindlichen Feststoffs in schwach überhitztem Bad .	434
8.2.2.2	Adiabatisches Schmelzen eines auf Schmelztemperatur befindlichen Feststoffs in schwach überhitztem Bad .	435
8.2.2.3	Isothermes Schmelzen eines auf Schmelztemperatur befindlichen Feststoffs in stark überhitztem Bad . .	437
8.2.2.4	Isothermes und adiabatisches Schmelzen eines kalten Einsatzstoffs mit der Wärmeleitzahl $\lambda' = 0$ . . . . .	439
8.2.2.5	Isothermes Schmelzen eines kalten Einsatzstoffs mit der Wärmeleitzahl $\lambda' = \infty$ . . . . .	439
8.2.3	Einschmelzen mit Berücksichtigung der Wärmeleitung im Feststoff . . . . .	440
8.2.4	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	446
8.3	Schmelzen von reinem Eisen in flüssigen Eisen-Kohlenstofflegierungen . . . . .	448
8.4	Prozeßmodell des Einschmelzens . . . . .	451
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>453</b>
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>483</b>