

# Inhaltsverzeichnis

## A. Grundlagen

	Seite
1. Wärmeenergie . . . . .	1
a) Wesen und Wirkung der Wärmeenergie . . . . .	1
b) Maß der Wärmeenergie . . . . .	2
c) Grundgesetze der Wärmetechnik . . . . .	4
2. Wärmebilanz als Rechnungsgrundlage . . . . .	6
a) Wärmeausgaben, Nutzwärme und Verlustwärme . . . . .	6
b) Abgasverlust und Wärmerückgewinnung . . . . .	8
c) Feuerungstechnischer Wirkungsgrad . . . . .	11
3. Brennstoffe für Industrieöfen . . . . .	13
a) Gewinnung und Verbrauch . . . . .	13
b) Grundbrennstoffe . . . . .	16
c) Feste Brennstoffe . . . . .	21
d) Heizgase (Generatorgas, Gichtgas, Koksofengas, Erdgas, Raffineriegas, Mischgase) . . . . .	25
e) Heizöl . . . . .	30
4. Luftreiche und luftarme Verbrennung . . . . .	33
a) Luftreiche Verbrennung . . . . .	33
b) Luftarme Verbrennung bei gegebener Abgasanalyse . . . . .	34
c) Luftarme Verbrennung bei gegebenem Luftfaktor . . . . .	37
Gleichgewichte von Methan sowie von Kohlensäure und Wasserdampf über Kohlenstoff und von Wassergas	
d) Berechnung der Rauchgasanalyse mit Stoffbilanz und Gleichgewichtswerten . . . . .	41
e) Verzunderungsfreie Verbrennung . . . . .	45
f) Rußende Verbrennung . . . . .	49
5. Verbrennungseigenschaften der Brennstoffe . . . . .	52
a) Zündtemperatur . . . . .	52
b) Zündgrenzen für Gas-Luft-Gemische . . . . .	52
c) Reichgas-Luft-Gemische als Heizgase . . . . .	54
d) Erweiterung der Zündgrenzen durch höhere Temperatur . . . . .	55
e) Zündgeschwindigkeit von Gas-Luft-Gemischen . . . . .	55
6. Spezifische Wärme und Wärmehalt der Gase . . . . .	57
7. Abgastemperatur . . . . .	59

	Seite
8. Ausflammverlust und Falschlufteintritt . . . . .	61
9. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad . . . . .	68
a) Berechnung und graphische Darstellung für luftreiche Verbrennung . .	68
b) Berechnung für luftarme Verbrennung . . . . .	71
c) Anwendung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades . . . . .	72
d) Einfluß der Luftvorwärmung auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad	74
e) Bewertung der Brennstoffe mit dem feuerungstechnischen Wirkungsgrad	75
f) Sonstige Gesichtspunkte für die Brennstoffbewertung . . . . .	79
g) Vergleich von Gichtgas und Erdgas für den Kalkbrand . . . . .	81
h) Wärme-Temperatur-Schaubild . . . . .	84
10. Nutzwärme . . . . .	87
a) Begriffsinhalt der Nutzwärme . . . . .	87
b) Arbeitstemperatur einiger wichtiger Wärmvorgänge . . . . .	89
c) Spezifische Wärme und Wärmeinhalt von Metallen und anderen Stoffen	91
d) Wärmebedarf von Reaktionen . . . . .	100
e) Wärmebedarf der Reaktionen im Hochofen . . . . .	103
f) Nutzwärme der Stahlerzeugung . . . . .	106
g) Nutzwärme und Abbrand bei dem Erwärmen von Stahl . . . . .	106
h) Nutzwärme bei Wärmvorgängen mit bedeutender Hilfsnutzwärme . . .	107
Bewegungsgesetze . . . . .	110
11. Verbrennungsvorgang . . . . .	111
a) Verbrennung als Mischvorgang von Gas und Luft . . . . .	111
b) Verbrennung im freien Brennerstrahl . . . . .	114
c) Berechnung des Temperaturverlaufes . . . . .	117
d) Auflösung des Brennerstrahles durch Auftrieb . . . . .	124
e) Auflösung des Brennerstrahles durch Aufprall . . . . .	128
f) Verbrennung von Heizöl . . . . .	129
g) Bauarten von Kohlefeuerungen und Gasbrennern . . . . .	137
h) Bemessung der Brenner . . . . .	142
i) Freistrahlbrenner als Mittel der Umwälzheizung . . . . .	146
k) Berechnung von Injektorbrennern . . . . .	148
l) Regelung der Brenner . . . . .	151
12. Wärmeübergang durch Konvektion . . . . .	160
a) Grundbegriffe . . . . .	160
b) Wärmeübergang durch Berührung . . . . .	162
c) Stoffwerte der Gase . . . . .	167
d) Konvektiver Wärmeübergang in Rohren und Kanälen bei turbulenter	170
Strömung . . . . .	170
e) Konvektiver Wärmeübergang in Rohren und Kanälen bei laminarer	173
Strömung . . . . .	173
f) Wärmeübergang zwischen Gas und ebener Wand . . . . .	178
g) Wärmeübergang bei senkrechter Strömung auf die Wand . . . . .	181
h) Wärmeübergang an quer angeströmte Rohre . . . . .	181
i) Wärmeübergang an Rohrbündel . . . . .	185
k) Wärmeübergang an Rippenrohrbündel . . . . .	188
l) Wärmeübergang an Kugeln . . . . .	189

	Seite
m) Wärmeübergang an Kugelschüttungen . . . . .	190
n) Wärmeübergang in Rostgittern . . . . .	191
<b>13. Wärmeübergang durch Strahlung zwischen festen Körpern . . .</b>	<b>197</b>
a) Stefan-Boltzmannsches Gesetz und Grundbegriffe der Strahlung . . . . .	197
b) Emissionszahlen wichtiger Stoffe . . . . .	199
c) Wärmeübergang zwischen Flächen verschiedener Anordnung . . . . .	202
d) Strahlungsausgleich im Herdofen (Beispiel) . . . . .	205
<b>14. Wärmeübergang durch Gasstrahlung . . . . .</b>	<b>208</b>
a) Strahlung von Kohlensäure und Wasserdampf . . . . .	208
b) Wärmeübergangszahl der Gasstrahlung für Rauchgase . . . . .	211
c) Strahlung leuchtender Flammen . . . . .	217
<b>15. Gesamtwärmeübergang im Ofen . . . . .</b>	<b>223</b>
<b>16. Wärmeübergang an Außenwänden . . . . .</b>	<b>234</b>
<b>17. Wärmeleitung . . . . .</b>	<b>235</b>
a) Grundlagen der Wärmeleitung im stationären und nichtstationären Temperaturfeld . . . . .	235
b) Wärmeleitzahl für Metalle . . . . .	238
c) Wärmeleitzahl für feuerfeste Stoffe und Isolierstoffe . . . . .	241
d) Wärmeleitzahl sonstiger Stoffe . . . . .	243
e) Wärmeleitung im zeitlich konstanten Temperaturfeld . . . . .	244
f) Wärmeleitung im zeitlich veränderlichen Temperaturfeld . . . . .	249
g) Berechnung nach dem Näherungsverfahren von E. Schmidt . . . . .	249
h) Berechnung mit den Lösungen der Wärmeleitgleichung . . . . .	255
<b>18. Wärmeverlust von Ofenwänden . . . . .</b>	<b>257</b>
a) Berechnung des Wandverlustes im Dauerbetrieb . . . . .	258
b) Standsicherheit isolierter Gewölbe . . . . .	263
c) Temperatur und Wärmeverlust in Abgaskanälen . . . . .	270
d) Verlust von Kanten und Ecken . . . . .	273
e) Wandverlust bei zeitweiligem Betriebe . . . . .	276
f) Wandverlust bei periodischem Betriebe . . . . .	280
g) Anhaltswerte für den Wandverlust . . . . .	288
h) Anhaltswerte für den Verlust durch Kühlwasser . . . . .	291
<b>19. Erwärmungsvorgang . . . . .</b>	<b>294</b>
a) Übersicht über die verschiedenen Erwärmungsvorgänge . . . . .	294
b) Erwärmung dünnen Wärmgutes im Gleichtemperaturofen . . . . .	295
c) Erwärmung einer Platte . . . . .	298
d) Erwärmung eines Zylinders . . . . .	305
e) Erwärmung einer Kugel . . . . .	310
f) Erwärmung von Wärmgut anderer Formen . . . . .	313
g) Schaubild zur Berechnung der Erwärmung von plattenförmigen Körpern . . . . .	315
h) Erwärmung ruhenden Wärmgutes im Gasstrom . . . . .	319
i) Gasspeicherung in Hochofenwinderhitzern . . . . .	330

	Seite
k) Erwärmung bewegten Wärmgutes im Gegenstrom . . . . .	333
l) Erwärmung bewegten Wärmgutes im Gleichstrom . . . . .	337
m) Erwärmung bewegten Wärmgutes im Kreuzstrom (Querstrom) . . . . .	337
n) Beispiele und grafische Lösung für die Erwärmung bewegten Wärmgutes	338
<b>20. Rekuperatoren . . . . .</b>	<b>344</b>
a) Bestimmung der Wärmedurchgangszahl $k$ . . . . .	345
b) Bauarten von Rekuperatoren . . . . .	346
c) Änderung der Vorwärmung bei veränderter Ofenleistung . . . . .	349
d) Wirkung von Hilfsheizflächen im Rekuperator . . . . .	350
<b>21. Regeneratoren . . . . .</b>	<b>354</b>
a) Wärmeaustauschzahl $k$ bei zeitlich konstanten Gastemperaturen . . . . .	355
b) Wärmeaustauschzahl $k$ bei zeitlich veränderlichen Temperaturen . . . . .	359
c) Aufbau des Gitters . . . . .	365
<b>22. Hochofenwinderhitzer . . . . .</b>	<b>366</b>
a) Aufbau und Wahl des Gitters wärme- und strömungstechnisch betrachtet	366
b) Berechnung der Größe des Winderhitzers . . . . .	371
c) Berechnung eines Winderhitzers für 150000 Nm <sup>3</sup> /h und 1350°C . . . . .	379
<b>23. Sonderfragen von Ofenbetrieb und Ofenbau . . . . .</b>	<b>389</b>
a) Abbrand von Stahl . . . . .	389
b) Verwendung von Schutzgas . . . . .	395
c) Wärmetechnik des Strahlheizrohres . . . . .	400
<b>24. Strömungstechnik des Industrieofens . . . . .</b>	<b>408</b>
a) Grundgesetz des Druckverlustes . . . . .	408
b) Druckverlust in geraden Leitungen . . . . .	409
c) Druckverlust durch Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen . . . . .	412
d) Druckverlust im Gitter von Regeneratoren . . . . .	413
e) Druckverlust in Schüttungen . . . . .	415
f) Druckverlust in Regelorganen . . . . .	419
g) Kaminzug . . . . .	421
h) Druck- und Zugerzeugung durch Injektoren . . . . .	423

## B. Anwendung der Grundlagen auf die Berechnung von Öfen

<b>1. Einteilung der Öfen nach Konstruktionsmerkmalen . . . . .</b>	<b>431</b>
<b>2. Berechnung des Wärmeverbrauches . . . . .</b>	<b>433</b>
<b>3. Herdofen mit ruhendem Einsatz . . . . .</b>	<b>436</b>
a) Erforderliche Länge des Brennerstrahles . . . . .	436
b) Anordnung mehrerer Brenner im Ofen . . . . .	438
c) Leistung, Abgastemperatur und Wärmeverbrauch . . . . .	439
d) Leistung und Durchwärmung des Wärmgutes . . . . .	441
e) Temperaturverlauf im Brennerstrahl . . . . .	444
f) Beheizung durch Abgasumwälzung . . . . .	446

	Seite
g) Berechnung der Leistung von Herdöfen . . . . .	450
h) Wärmeübergangszahl in Herdöfen mit niedriger Arbeitstemperatur . . . . .	459
i) Muffelöfen und Halbmuffelöfen . . . . .	461
k) Wärmeverbrauch der Einsatzöfen . . . . .	462
<b>4. Herdofen mit bewegtem Einsatz . . . . .</b>	<b>466</b>
a) Allgemeine Betrachtungen . . . . .	466
b) Stoßöfen für Stahlwalzwerke . . . . .	468
c) Berechnung der Ausgleichszone eines Dreizonenofens . . . . .	470
d) Berechnung der Hauptwärmzone . . . . .	473
e) Berechnung der Vorwärmzone . . . . .	475
f) Gesamtdurchsatzdauer und Leistung des Ofens . . . . .	476
g) Berechnung des Einzonenofens und des Zweizonenofens . . . . .	480
h) Stoßöfen der Metallindustrie . . . . .	483
<b>5. Herdschmelzöfen . . . . .</b>	<b>485</b>
a) Siemens-Martin-Ofen . . . . .	486
(Nutzwärme, Wand- und Kühlwasserverlust, Abgas- und Ausflam- verlust, nutzbare Wärme der Heizgasarten, Wärmeverbrauch, Größe der Regeneratoren)	
b) Kupferaffinierofen . . . . .	492
c) Leichtmetallschmelzofen . . . . .	494
<b>6. Großraumöfen . . . . .</b>	<b>495</b>
a) Anwendungsgebiete der Großraumöfen . . . . .	495
b) Tieföfen des Blockwalzwerkes . . . . .	497
c) Berechnung der Abkühlung des Blockes . . . . .	498
d) Erwärmung des Blockes im Tieföfen . . . . .	501
e) Abkühlung in der Gießform nach Rechnung und Messung . . . . .	508
f) Wärmeverbrauch des Tiefofens . . . . .	509
g) Einfluß der Wandausbildung auf den Wärmeverbrauch . . . . .	511
(Beispiel Temperofen)	
h) Wärmeverbrauch der Rundöfen der keramischen Industrie . . . . .	513
<b>7. Schachtöfen . . . . .</b>	<b>517</b>
a) Anwendungsgebiete der Schachtöfen . . . . .	517
b) Hochofen für Roheisengewinnung, Bau- und Betriebsweise . . . . .	518
c) Bestimmung des Koksverbrauches mit der 3-Stufen-Bilanz . . . . .	521
d) Kohlenstoffverbrauch für direkte Reduktion des Eisens und der Begleit- elemente sowie für Wasserdampfzersetzung . . . . .	522
e) Koks- und Roheisenanalyse und Windmenge . . . . .	523
f) Ausnutzung von Kohlenmonoxyd und Wasserdampf für die Reduktion von FeO . . . . .	524
g) Menge und Zusammensetzung des Rastgases . . . . .	525
h) Reduktion von Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> und Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> zu FeO . . . . .	526
i) Gichtgasmenge und Gichtgaszusammensetzung . . . . .	526
k) Wärmebilanz des Gestells (Zone I) . . . . .	527
l) Wärmeausgaben der Zone II (1400 bis 900°C) . . . . .	528
m) Wärmeausgaben der Zone III (900°C bis Gicht) . . . . .	529
n) Wärmezufuhr durch Reduktions- und Möllergase . . . . .	530

	Seite
o) Zusammenstellung der Wärmebilanzen für die drei Zonen . . . . .	531
p) Einfluß des Schrottsatzes auf den Koksverbrauch . . . . .	535
q) Einfluß der Kohlenmonoxyd- und Wasserstoffausnutzung auf den Koks- verbrauch . . . . .	537
r) Koksverbrauch bei Verwendung von Zusatzbrennstoffen . . . . .	538
s) Reduktionsvermögen der Zusatzbrennstoffe . . . . .	540
t) Gasmenge, Koksverbrauch und Windtemperatur bei Erdgaszusatz . . . .	542
8. Drehrohrofen . . . . .	546
a) Bauarten und Anwendungsgebiete . . . . .	546
b) Bewegung des Wärmegutes im glatten Drehofen . . . . .	548
c) Bewegung des Wärmegutes im Drehofen mit Einbauten . . . . .	552
d) Bewegung von Feinkorn im Rauchgasstrom . . . . .	555
e) Zusammenstellung der Formeln für Leistung und Durchsatzdauer . . . .	560
f) Wärmeübergang im ausgemauerten Ofen . . . . .	560
g) Wärmeübergang in der glatten eisernen Trommel . . . . .	565
h) Wärmeübergang in der Trommel mit Einbauten . . . . .	566
i) Herstellung von Hochofen-Zementklinker im Drehofen . . . . .	571
k) Trockentrommel . . . . .	581
Schriftumsverzeichnis . . . . .	589
Namenverzeichnis . . . . .	591
Sachverzeichnis . . . . .	592