

Inhalt

Vorwort V

Autoren VII

1. Verbrennungslehre 1

1.1 Stöchiometrie 2

1.1.1 Reaktionselemente technischer Brennstoffe 2

1.1.2 Charakteristische Größen für die Zusammensetzung von gasförmigen Brennstoffen 3

1.1.2.1 Charakteristische Atomsummen bei gasförmigen Brennstoffen 3

1.1.3 Verbrennungsrechnung 5

1.1.3.1 Berechnung des Luftbedarfs 6

1.1.3.2 Berechnung der Abgasmenge und der Abgaszusammensetzung 8

1.2 Energieströme im Ofenraum 12

1.2.1 Kennzeichnende Ofenflächen 12

1.2.2 Charakteristische Leistungen und Wärmeströme 12

1.2.3 Energiebilanz 15

1.2.4 Wirkungsgrade 15

1.2.4.1 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad 15

1.2.4.2 Ofentechnischer Wirkungsgrad 19

1.2.4.3 Wärmetechnischer Wirkungsgrad 19

1.2.5 Brennstoffersparnis bei Luftvorwärmung 20

2. Strömungstechnik 23

2.1 Ideales Gas 24

2.2 Kontinuitätsgleichung 26

2.3 Bernoullische Gleichung 27

2.4 Turbulenter Freistrah 30

2.5 Druckverluste in Rohrleitungen 31

2.5.1 Druckverluste bei unterschiedlichen Brenngasen 33

3. Wärmeübertragung 35

3.1 Mechanismen des Wärmetransports 36

3.2 Wärmestrahlung 38

3.2.1 Elektromagnetisches Spektrum 38

3.2.2 Stefan-Boltzmannsches Gesetz 39

3.2.3 Plancksches Verteilungsgesetz 40

3.2.4 Reflexion, Absorption, Transmission 40

3.2.5 Kirchhoffsches Gesetz 41

3.2.6 Richtungsabhängige und diffuse Strahlung 42

X		Inhalt
3.2.7	Strahlungsaustausch	42
3.2.7.1	Strahlungsdichte	42
3.2.7.2	Strahlungsaustausch zwischen zwei Körpern	43
3.2.8	Gasstrahlung	47
3.3	Wärmeleitung	47
3.3.1	Differentialgleichung des Temperaturfeldes	47
3.3.2	Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung	48
3.3.2.1	Ebene Wände mit vorgegebenen Oberflächentemperaturen	48
3.3.2.2	Ebene Wände mit konvektivem Wärmeübergang	49
3.3.3	Instationäre Wärmeleitung	49
3.3.3.1	Körper mit sehr großer Wärmeleitfähigkeit	49
3.4	Konvektion	51
3.4.1	Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur Darstellung von Wärmeübertragungsgesetzen	52
3.4.2	Längs und quer angeströmter Zylinder	53
3.5	Erwärmung und Abkühlung bei kleiner Biot- oder Sparrow-Zahl	55
3.5.1	Erwärmung eines Gutes bei annähernd homogener Guttemperatur	55
3.5.1.1	Definition der Kennzahlen	55
3.5.2	Erwärmung durch konvektiven Wärmeübergang	56
3.5.3	Erwärmung durch Temperaturstrahlung	59
3.5.4	Erwärmung durch Konvektion und Strahlung	61
4.	Brennertechnik	69
4.1	Verbrennungstechnik	70
4.1.1	Buschfeuer	71
4.1.2	Offenes Rostfeuer	71
4.1.3	Einfacher Ofen	72
4.1.4	Feuerung mit Brennern	72
4.1.5	Entstehung der Flamme	72
4.1.6	Flammengeschwindigkeit	74
4.1.7	Einteilung von Flammen	75
4.2	Klassifizierung von Brennern und Flammen	76
4.2.1	Luftzufuhr	76
4.2.2	Brennstoff/Aggregatzustand	76
4.2.3	Stabilisierungsart	77
4.2.4	Flammenfarbe	78
4.2.5	Luft- oder Brennstoffstufung	78
4.2.6	Flammenform	78
4.2.7	Strömungsgeschwindigkeit	79
4.2.8	Direkte und indirekte Beheizung	79
4.2.9	Luftvorwärmung	80
4.2.10	Stöchiometrie	81
4.2.11	Leistungsanpassung	81
4.3	Flammlose Oxidation	81

Inhalt	XI
4.3.1	Prinzip 82
4.3.2	Berechnungen und Versuchsergebnisse 86
4.3.3	Feldmessungen 87
4.3.4	Anwendungen..... 91
4.3.5	Wesentliche Merkmale 92
4.3.6	Gestufte flammlose Oxidation..... 92
5.	Computersimulation 93
5.1	Aufbereiten der Aufgabenstellung..... 94
5.1.1	Berechnungsgitter 95
5.1.2	Stationäre oder instationäre Berechnung 97
5.1.3	Stoffeigenschaften 97
5.1.4	Randbedingungen 97
5.1.5	Rechenmodelle 99
5.2	Lösen der Gleichungen 101
5.3	Ergebnisdarstellung 102
5.4	Die Zukunft von CFD 103
6.	Schadstoffminderung 105
6.1	NO _x -Minderung durch Flammenkühlung 109
6.2	Magere Vormischverbrennung 110
6.3	Flammenstufung 110
6.4	Abgasrezirkulation 111
6.5	Sauerstoffverbrennung..... 112
6.6	Begrenzung der Luftvorwärmung 112
6.7	Brennstoff-NO-Reduzierung..... 112
6.8	Abgasentstickung..... 113
6.9	NO _x -Maßeinheiten 113
6.10	NO _x -Messungen..... 113
6.11	NO _x bei Wasserstoffverbrennung 115
7.	Wärmetauscher 117
7.1	Grundbauarten 119
7.1.1	Zentralrekuperatoren 122
7.1.2	Rekuperator- und Regeneratorbrenner 124
7.2	Kenngrößen 124
7.3	Bestimmung von Wirkungsgraden..... 127
7.3.1	Bestimmung des Leerwertes 128
7.3.2	Messung der Luftvorwärmtemperatur..... 132
7.3.3	Messung der Abgastemperatur 132

XII		Inhalt
8.	Industriebrenner	133
8.1	Kaltluftbrenner	135
8.1.1	Vorgemischbrenner	135
8.1.2	Mündungsmischbrenner	135
8.1.3	Gebälsebrenner	141
8.1.4	Oberflächenbrenner	141
8.1.5	Porenbrenner	142
8.1.6	Flachflammenbrenner	143
8.1.7	Schwach- und Sondergasbrenner	143
8.1.8	Mehrstoffbrenner	144
8.1.9	Sauerstoffbrenner	146
8.2	Warmluftbrenner	148
8.2.1	Stetig geregelte Warmluftbrenner mit Zentralrekuperator	151
8.2.2	Getaktete Warmluftbrenner mit Zentralrekuperator	153
8.2.3	Warmluftbrenner mit Zentralregenerator	157
8.2.4	Stetig geregelte Warmluftbrenner mit Zonenreku oder Drehbettregenerator	157
8.3	Rekuperatorbrenner	160
8.3.1	Rekuperatorbrenner mit Eduktor	163
8.3.2	Rekuperatorbrenner mit Abgasklappe	167
8.4	Regeneratorbrenner	168
8.4.1	Regeneratorbrennerpaare	168
8.4.2	Regeneratorbrenner	171
8.5	Strahlheizrohre	173
8.5.1	Strahlrohrbauformen	173
8.5.2	Wärmerückgewinnung bei Strahlheizrohren	176
8.5.3	Temperaturgleichmäßigkeit	180
8.5.4	Regelung von Strahlheizrohren	180
8.5.5	Strahlrohranordnung und Auslegung	182
8.6	Brenner mit feuerungstechnischem Wirkungsgrad > 80 %	184
8.6.1	Rippenrohr-Rekuperatorbrenner mit Metallschaum	184
8.6.2	Rekuperatorbrenner mit Spaltstromwärmetauscher	185
8.7	Brenner für Wasserstoff	186
8.8	Hybride Gas-/Elektroheizungen	187
9.	Normen und gesetzliche Vorschriften	189
9.1	Einleitung und Grundsätzliches	190
9.2	Normungsorganisationen	190
9.3	Normen, Normungsbezeichnungen und deren Wirkungsbereich	194
9.3.1	DIN-Norm	195
9.3.2	EN-Norm und DIN EN-Norm	195
9.3.3	ISO-Norm, DIN ISO-Norm, EN ISO-Norm und DIN EN ISO-Norm	195
9.4	Grundsätzliches zur europäischen Normungsarbeit	195
9.4.1	EG-Binnenmarktrichtlinien und -Verordnungen	196

9.4.2	Neue Konzeption (New Approach).....	196
9.4.3	Zusammenhang zwischen Richtlinie/Verordnung und Normung.....	197
9.4.4	Anwendung europäischer Harmonisierter Normen	198
9.5	Die EG-Maschinenrichtlinie	198
9.5.1	Allgemeine Anforderungen an Maschinen.....	200
9.5.2	Grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen.....	200
9.5.3	Konformitätserklärung	200
9.5.4	Verfahren für unvollständige Maschinen	202
9.5.5	CE-Kennzeichen	203
9.5.6	Schutzklauselverfahren.....	203
9.5.7	Betrieb von Anlagen unter der Betriebssicherheitsverordnung sowie dem Vorschriften- und Regelwerk der gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)	204
9.5.8	Vermutungswirkung	204
9.6	Normungsstruktur zur Maschinenrichtlinie	204
9.7	Weitere EG-Richtlinien/Verordnungen.....	205
9.7.1	Druckgeräte richtlinie (PED).....	205
9.7.2	Gasgeräteverordnung (GAR).....	206
9.8	Übersicht von EN-Normen für Thermoprozessanlagen mit Bezug zur Maschinenrichtlinie	206

XIV		Inhalt
9.9	Übersicht von ISO-Normen für Thermoprozessanlagen und Industriebrenner	209
9.10	Übersicht von Normen für Thermoprozessanlagen mit Bezug zur Elektrotechnik	209
9.11	Wie liest man eine Norm	210
10.	Industrielle Brennertechnik und nachhaltige Wärmeerzeugung in Zeiten des Wandels	213
10.1	Einführung	214
10.2	Energiewende	215
10.3	Fluktuierende Erzeugung	215
10.4	Zukünftige Entwicklung der Energiepreise	216
10.5	Thermoprosesstechnik	217
10.6	Direkte Elektrifizierung	217
10.7	Hybride Systeme	217
10.8	Brennstoffflexible Brenner	217
10.9	Indirekte Elektrifizierung durch Nutzung von Elektrolysewasserstoff	218
10.10	Ausblick	219
Anhang		221
	Arbeitsblätter GWI	221
	Fachzeitschriften	286
	Konferenzen und Tagungen	286
	Forschungsinstitute, Forschungsvereinigungen und Verbände	287
	FOGI	288
	Universitäten	289
	Fachmessen	290
	Fachbücher zum Thema	291
Stichwortverzeichnis		317
Inserentenverzeichnis		322