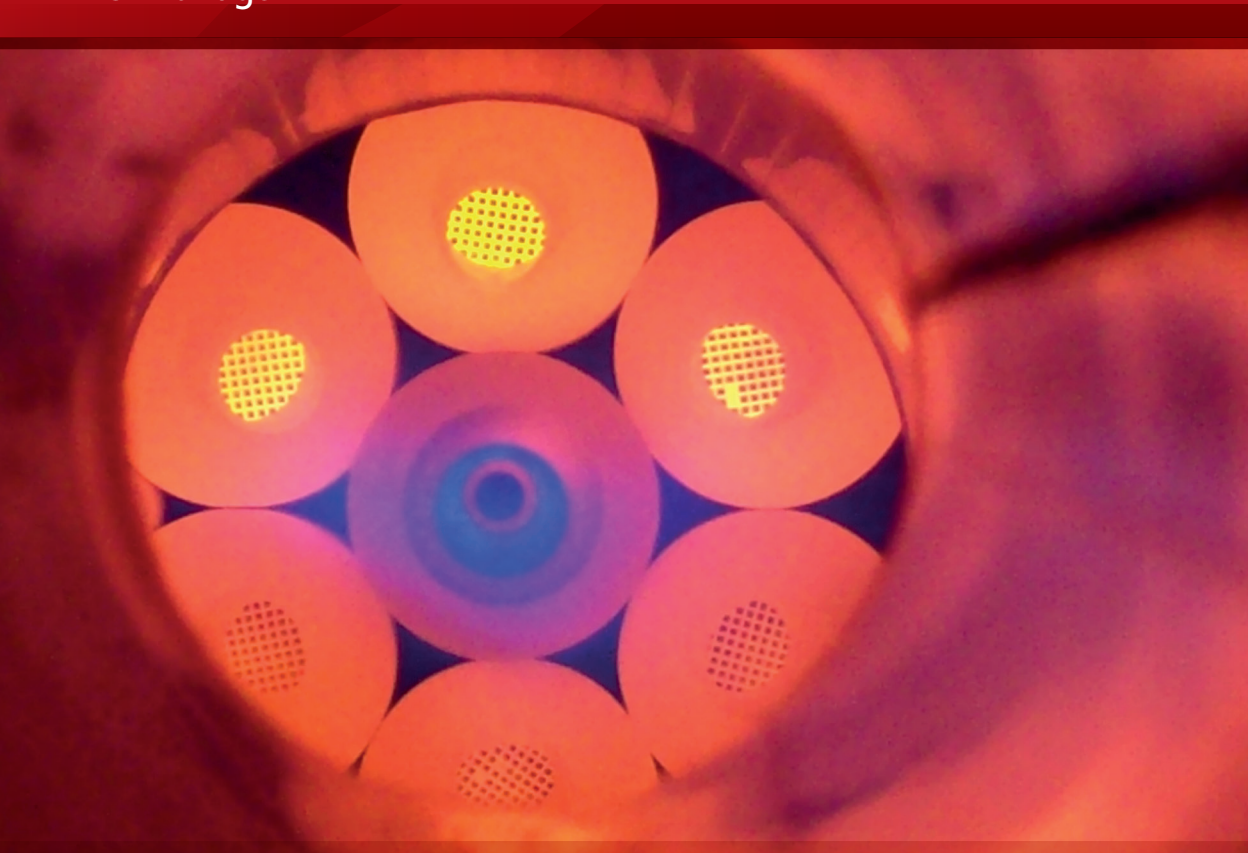


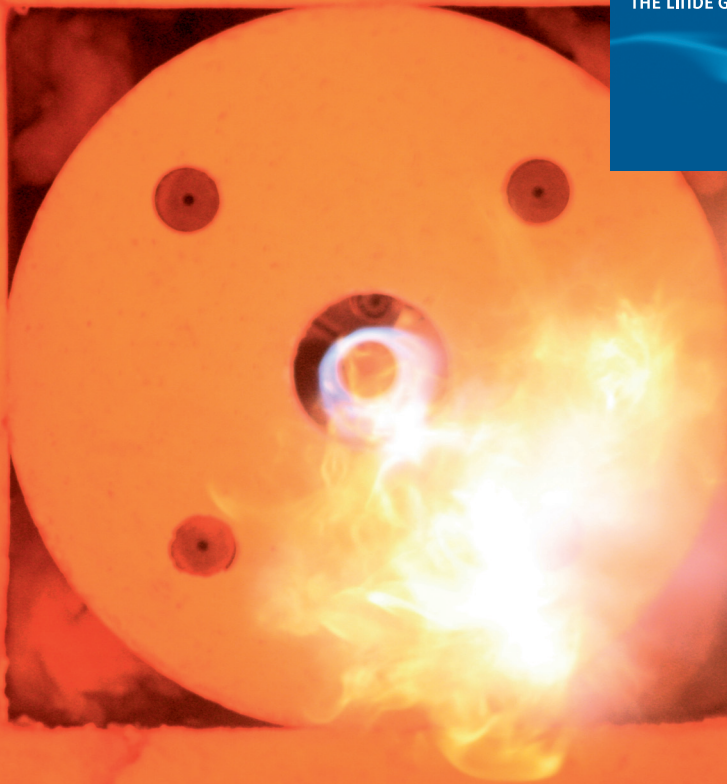
Joachim G. Wüning (Hrsg.)

Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen

Grundlagen | Brenntechniken | Anwendungen

3. Auflage





Wer jedes Detail bedenkt, kann Großes leisten.

Energieeffizienz durch flammenlose Oxyfuel-Verbrennung.

Diese innovative Technologie steigert die Effizienz und Flexibilität der Beheizung eines Industrieofens, wobei Brennstoffverbrauch und Emissionen reduziert werden. Im Vergleich zur konventionellen Oxyfuel-Verbrennung wird die Flamme so stark mit Abgasen verdünnt, dass sie praktisch unsichtbar wird. Durch umfassendes Know-how bei Oxyfuel-Verfahren sichert Ihnen Linde entscheidende Wettbewerbsvorteile.

Ihre Vorteile:

- Brennstoffeinsparung
- Deutlich verringerter Ausstoß von NO_x und CO_2
- Homogene Temperaturverteilung
- Schnelles und gleichmäßiges Schmelzen und Erwärmen
- Steigerung der Effizienz und Flexibilität der Verbrennung

Linde AG

Gases Division, Linde Gas Deutschland, Seitnerstraße 70, 82049 Pullach, www.linde-gas.de

**Handbuch der
Brennertechnik für Industrieöfen**

DIE ELEMENTE IM GRIFF

Feuerfest-Lösungen mit Know-how und Erfahrung

Das Wissen um die Anforderungen der Metallerzeugung und -verarbeitung sowie die Erfahrung aus zahlreichen Projekten über viele Jahre machen RATH zu einem kompetenten Partner im Bereich der Eisen-, Stahlerzeugung und Wärmebehandlung. Unser Sortiment umfasst dichte Feuerfeststeine, Feuerleichtsteine, Betonfertigteile, Feuerbetone und -massen, Hochtemperaturwolle und Vakuumformteile.

www.rath-group.com/metals

top technology
creates confidence

RATH

Joachim G. Wüning (Hrsg.)

Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen

Grundlagen
Brennertechniken
Anwendungen

3. Auflage

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

*Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen
Grundlagen / Brennertechniken / Anwendungen
Joachim G. Wüning
3. Auflage 2019*

ISBN: 978-3-8027-3102-0 (Print)

ISBN: 978-3-8027-3103-7 (eBook)

© 2019 Vulkan-Verlag GmbH

Friedrich-Ebert-Straße 55, 45127 Essen, Deutschland

Telefon: 0201 82002-0, Internet: www.vulkan-verlag.de

Projektmanagement: Stephan Schalm, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Lektorat: Sabrina Finke, Marie-Therese Hanschmann, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Herstellung: Nilofar Mokhtarzada, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Umschlaggestaltung: Melanie Zöller, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Titelbild: © WS Wärmeprozestechnik GmbH, Renningen

Layout/Satz: H.-Jürgen Widuckel, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Druck: AC medienhaus GmbH, Wiesbaden

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen. Der Erwerb berechtigt nicht zur Weitergabe des eBooks an Dritte.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Vorwort

Im Januar 2019 wurde in Deutschland der Kohleausstieg durch die von der Bundesregierung eingesetzte Kohlekommission empfohlen. Für das in den Industriebrennern eingesetzte Erdgas kann dies vorübergehend sogar zu einem Mehrabsatz führen, mittelfristig wird sich aber auch unsere Branche auf grundlegende Veränderungen einstellen müssen.

Ich bin davon überzeugt, dass Verbrennung auch langfristig eine wichtige Rolle spielen wird. Wir werden dann aber keinen fossilen Kohlenstoff mehr verbrennen, sondern biogene oder synthetische Brennstoffe verwenden. Noch weiß niemand, welche Energieträger sich in Zukunft durchsetzen werden. Elektrischer Strom wird sicher eine wesentliche Rolle spielen, braucht aber wegen seiner eingeschränkten Transport- und Speicherfähigkeit auch chemische Energieträger für ein sicheres und bezahlbares Energieversorgungssystem.

Von der Politik einen Masterplan für die Energiewende und damit verbundene Großaufträge mit garantierten Gewinnen einzufordern, halte ich nicht für sinnvoll. Mit den richtigen Marktanreizen in Verbindung mit Forschungsförderung, sozialer Ausgewogenheit und der Akzeptanz von unternehmerischem Risiko, auch wenn damit in manchen Fällen der Verlust von Arbeitsplätzen einhergeht, werden bessere Lösungen gefunden als mit Planwirtschaft.

Extrem saubere und effiziente Verbrennung auch von Brennstoffen mit unterschiedlicher Zusammensetzung ist Voraussetzung dafür, dass die Verbrennung auch in Zukunft ihren Platz bei der Energieumwandlung hat. Eine sinnvolle Nutzung der fortschreitenden Digitalisierung kann dabei helfen, diese Ziele zu erreichen.

Dieses Buch soll dabei helfen, eine Brücke zwischen Theorie und Praxis zu schlagen und somit gleichzeitig dem engagierten Praktiker wie auch Personen aus dem Bereich Forschung und Lehre nützlich sein.

Manche der im Buch beschriebenen technischen Lösungen werden schon in wenigen Jahren veraltet sein, aber die grundlegenden Prinzipien werden weiterhin Gültigkeit haben. Es ist deshalb unerlässlich, sich ständig über neue Entwicklungen weiter zu informieren. Im Anhang des Buches werden aus diesem Grund Hinweise gegeben, wo weitere Informationen zum Thema zu finden sind.

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Lehrern aus meiner Aachener Studentenzeit. Mit den Beiträgen über die Verbrennungslehre (Prof. G. Woelk, † 2016) und Wärmeübertragung (Prof. U. Renz) werden die wesentlichen Grundlagen der Verbrennungstechnik fundiert behandelt. Zum Kapitel 8 hat eine Vielzahl von Personen und Firmen mit Beiträgen und Bildmaterial beigetragen. Auch Dr. Beneke möchte ich dafür danken, dass er das Kapitel 9, Normung, komplett übernommen hat.

Renningen, 2019

Joachim G. Wünnig



Geleitwort

Das vorliegende Fachbuch wird nach der Erstaufgabe im Jahr 2007 jetzt schon in der dritten, überarbeiteten Auflage herausgegeben. Woher kommt die Nachfrage?

Macht man sich das Leben leicht, so wird die schnelle Antwort lauten: Der Bedarf nach einem Fachbuch über Brennertechnik und deren Anwendung für Industrieöfen ist da. Geht man jedoch gedanklich einen deutlichen Schritt weiter, so wird der Zusammenhang zwischen den großen Herausforderungen der Zukunft (z. B. in Richtung Klimaerwärmung) und der dadurch erforderlichen Reduzierung der Emissionen bewusst. Hierbei liefert der Brenner in der Industrie, aber auch im Haushalt – nicht nur seit Kurzem, sondern schon immer – einen wesentlichen Beitrag.

In den ersten Kapiteln werden die Grundlagen der Verbrennungslehre, der Strömungstechnik, der Wärmeübertragung und der Brennertechnik dargestellt. Kapitel, die den Leser die Zusammenhänge erkennen lassen und die Basis schaffen zur Beurteilung von Brennern.

Das umfangreichste Kapitel beschreibt die Vielfalt der Brennerbauarten und deren Besonderheiten im Detail. Lesenswert nicht nur für Spezialisten, sondern auch, um Ideen für weitere Einsatzgebiete in bisher nicht genutzten Anwendungsbereichen zu finden.

Industrieöfen bieten ein breites Anwendungsgebiet für den Einsatz von Brennern. Für jeden Industrieofen und jede Anwendung ist der bzw. sind die Brenner anzupassen. Einen universal einzusetzenden Brenner gibt es nicht. Nur eine Zusammenarbeit – schon in der Planungs- und Entwurfsphase – zwischen Industrieofen- und Brennerherstellern führt zu Anwendungen, die auf die Prozesse im Industrieofen abgestimmt sind. Energieeffizienz, Ressourcenschonung und Minimierung der Emissionen sind das Ergebnis. Daher werden Brenner in der Industrie auch weiterhin einen wesentlichen Beitrag dazu liefern, da aus unserer Sicht die Entwicklung in der Brennertechnik noch lange nicht am Ende ist. Erdgas und gasförmige Brennstoffe aus nachhaltigen Quellen sind dabei gemeinsam zu beachten.

Im vorliegenden „Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen“ wird sowohl von theoriesicheren als auch praxiserfahrenen Autoren ein umfassender Überblick über den modernsten Stand der Brennertechnik gegeben. Ein Buch, das nicht nur für Techniker, sondern auch für einen breiten Kreis von fachfremden Lesern lesenswert ist.

VDMA Metallurgy
Frankfurt am Main, 2019



Dr. Franz Beneke



Lars Böhmer

Deutschlands führendes Fachmedium für Thermoprozesstechnik



Jetzt Probelesen und Kennenlernen!

Mehr zum Abo und Ihren Vorteilen
der Club-Mitgliedschaft unter:

www.prozesswaerme.net/club

PROZESSWÄRME

Autoren

Dr.-Ing. Wolfgang Bender

Hülsenbusch Apparatebau GmbH & Co. KG
Hülser Str. 49
47906 Kempen

Kapitel 7.1.1**Dr.-Ing. Franz Beneke**

Fachverband Metallurgie im VDMA e.V.
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main

Kapitel 9**Lars Böhmer**

Fachverband Metallurgie im VDMA e.V.
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main

Geleitwort**Dipl.-Ing. Jörg tom Felde**

promeos GmbH
Gießener Straße 14
90427 Nürnberg

Kapitel 8.1.5**Dr.-Ing. Ambrogio Milani**

Chemin de Haute-Brise 15
1012 Lausanne (Schweiz)

Kapitel 2, 4**Dipl.-Ing. Rainhard Paul**

Linde AG (Linde Gas Deutschland)
Fangdieckstraße 75
22547 Hamburg

Kapitel 8.1.9**Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Ulrich Renz**

Friedrich-Ebert-Allee 66
52066 Aachen

Kapitel 3.1-3.4**Prof. Dr.-Ing. Günther Woelk †****Kapitel 1, 3.5****Dipl.-Ing. Gerrit Wohlschläger**

Elster GmbH (Honeywell)
Strotheweg 1
49504 Lotte

Kapitel 8.1.1, 8.1.2**Dr.-Ing. Joachim G. Wünnig**

WS Wärmeprozessestechnik GmbH
Dornierstraße 14
71272 Renningen

Kapitel 2, 4 bis 8, 10



JASPER

Setting The Standards For Highest
Efficiency In Thermal Processing

Spänetrockner (Trommel), Kapazität 3 t/h
mit 2,25 MW Regenerativ-Brennersystem

JASPER

Gesellschaft für Energiewirtschaft und Kybernetik mbH / Bönninghauser Str. 10 / D-59590 Geseke
Telefon: +49 2942 9747 0 / Fax: +49 2942 9747 47 / www.jasper-gmbh.de / info@jasper-gmbh.de



Inhalt

Vorwort	V
Geleitwort	VII
Autoren	IX
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 Freistrahler	30
2.5 Druckverluste in Rohrleitungen	31
3. Wärmeübertragung	33
3.1 Mechanismen des Wärmetransports	34
3.2 Wärmestrahlung	36
3.2.1 Elektromagnetisches Spektrum	36
3.2.2 Stefan-Boltzmannsches Gesetz	37
3.2.3 Plancksches Verteilungsgesetz	38
3.2.4 Reflexion, Absorption, Transmission	38
3.2.5 Kirchhoffsches Gesetz	39

3.2.6	Richtungsabhängige und diffuse Strahlung	40
3.2.7	Strahlungsaustausch	40
3.2.7.1	Strahlungsdichte	40
3.2.7.2	Strahlungsaustausch zwischen zwei Körpern	41
3.2.8	Gasstrahlung	45
3.3	Wärmeleitung	45
3.3.1	Differentialgleichung des Temperaturfeldes	45
3.3.2	Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung	46
3.3.2.1	Ebene Wände mit vorgegebenen Oberflächentemperaturen	46
3.3.2.2	Ebene Wände mit konvektivem Wärmeübergang	47
3.3.3	Instationäre Wärmeleitung	47
3.3.3.1	Körper mit sehr großer Wärmeleitfähigkeit	47
3.4	Konvektion	49
3.4.1	Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur Darstellung von Wärmeübertragungsgesetzen	50
3.4.2	Längs und quer angeströmter Zylinder	51
3.5	Erwärmung und Abkühlung bei kleiner Biot- oder Sparrow-Zahl	53
3.5.1	Erwärmung eines Gutes bei annähernd homogener Guttemperatur	53
3.5.1.1	Definition der Kennzahlen.....	53
3.5.2	Erwärmung durch konvektiven Wärmeübergang	54
3.5.3	Erwärmung durch Temperaturstrahlung.....	57
3.5.4	Erwärmung durch Konvektion und Strahlung	59
4.	Brennertechnik	67
4.1	Verbrennungstechnik	68
4.1.1	Buschfeuer	69
4.1.2	Offenes Rostfeuer	69
4.1.3	Einfacher Ofen	70
4.1.4	Feuerung mit Brennern	70
4.1.5	Entstehung der Flamme	70
4.1.6	Flammengeschwindigkeit	72
4.1.7	Einteilung von Flammen	73
4.2	Klassifizierung von Brennern und Flammen	74
4.2.1	Luftzufuhr	74
4.2.2	Brennstoff/Aggregatzustand	74
4.2.3	Stabilisierungsart	75
4.2.4	Flammenfarbe	76
4.2.5	Luft- oder Brennstoffstufung	76
4.2.6	Flammenform	76
4.2.7	Strömungsgeschwindigkeit	77
4.2.8	Direkte und indirekte Beheizung	77
4.2.9	Luftvorwärmung	78
4.2.10	Stoichiometrie	79

4.2.11	Leistungsanpassung	79
4.3	Flammlose Oxidation	79
4.3.1	Prinzip	80
4.3.2	Berechnungen und Versuchsergebnisse	84
4.3.3	Feldmessungen	85
4.3.4	Anwendungen	89
4.3.5	Wesentliche Merkmale	90
5.	Computersimulation	91
5.1	Aufbereiten der Aufgabenstellung	92
5.1.1	Berechnungsgitter	93
5.1.2	Stationäre oder instationäre Berechnung	95
5.1.3	Stoffeigenschaften	95
5.1.4	Randbedingungen	95
5.1.5	Rechenmodelle	97
5.2	Lösen der Gleichungen	99
5.3	Ergebnisdarstellung	100
5.4	Die Zukunft von CFD	101
6.	Schadstoffminderung	103
6.1	NO _x -Minderung durch Flammenkühlung	107
6.2	Magere Vormischverbrennung	108
6.3	Flammenstufung	108
6.4	Abgasrezirkulation	109
6.5	Sauerstoffverbrennung	110
6.6	Begrenzung der Luftvorwärmung	110
6.7	Brennstoff NO-Reduzierung	110
6.8	Abgasentstickung	111
6.9	NO _x -Maßeinheiten	111
6.10	NO _x -Messungen	111
7.	Wärmetauscher	115
7.1	Grundbauarten	117
7.1.1	Zentralrekuperatoren	120
7.1.2	Rekuperator- und Regeneratorbrenner	122
7.2	Kenngößen	122
7.3	Bestimmung von Wirkungsgraden	125
7.3.1	Bestimmung des Leerwertes	126
7.3.2	Messung der Luftvorwärmtemperatur	130
7.3.3	Messung der Abgastemperatur	130

8.	Industriebrenner	131
8.1	Kaltluftbrenner	133
8.1.1	Vorgemischbrenner	133
8.1.2	Mündungsmischbrenner	133
8.1.3	Gebläsebrenner	139
8.1.4	Oberflächenbrenner	139
8.1.5	Porenbrenner	140
8.1.6	Flachflammenbrenner	141
8.1.7	Schwach- und Sondergasbrenner	141
8.1.8	Mehrstoffbrenner	142
8.1.9	Sauerstoffbrenner	144
8.2	Warmluftbrenner	146
8.2.1	Stetig geregelte Warmluftbrenner mit Zentralrekuperator	149
8.2.2	Getaktete Warmluftbrenner mit Zentralrekuperator	151
8.2.3	Warmluftbrenner mit Zentralregenerator	155
8.2.4	Stetig geregelte Warmluftbrenner mit Zonenreku oder Drehbettregenerator	155
8.3	Rekuperatorbrenner	158
8.3.1	Rekuperatorbrenner mit Eduktor	161
8.3.2	Rekuperatorbrenner mit Abgasklappe	165
8.4	Regeneratorbrenner	166
8.4.1	Regeneratorbrenner-Paare	166
8.4.2	Regeneratorbrenner	169
8.5	Strahlheizrohre	171
8.5.1	Strahlrohrbauformen	171
8.5.2	Wärmerückgewinnung bei Strahlheizrohren	174
8.5.3	Temperaturgleichmäßigkeit	178
8.5.4	Regelung von Strahlheizrohren	178
8.5.5	Strahlrohranordnung und Auslegung	180
8.6	Brenner mit feuerungstechnischem Wirkungsgrad > 80 %	182
8.6.1	Rippenrohr-Rekuperatorbrenner mit Metallschaum	182
8.6.2	Rekuperatorbrenner mit Spaltstromwärmetauscher	183
9.	Normen und gesetzliche Vorschriften	185
9.1	Einleitung und Grundsätzliches	186
9.2	Normungsorganisationen	186
9.3	Normen, Normungsbezeichnungen und deren Wirkungsbereich	187
9.3.1	DIN-Norm	189
9.3.2	EN-Norm und DIN EN-Norm	189
9.3.3	ISO-Norm, DIN ISO-Norm, EN ISO-Norm und DIN EN ISO-Norm	189
9.4	Grundsätzliches zur europäischen Normungsarbeit	189
9.4.1	EG-Binnenmarktrichtlinien	190
9.4.2	Neue Konzeption (New Approach)	190
9.4.3	Zusammenhang zwischen Richtlinie/Verordnung und Normung	191

9.4.4	Anwendung europäischer Harmonisierter Normen	192
9.5	Die EG-Maschinenrichtlinie	192
9.5.1	Allgemeine Anforderungen an Maschinen	193
9.5.2	Grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen	194
9.5.3	Konformitätserklärung	196
9.5.4	Verfahren für unvollständige Maschinen	197
9.5.5	CE-Kennzeichen	198
9.5.6	Schutzklauselverfahren	199
9.6	Weitere EG-Richtlinien	199
9.6.1	Druckgeräterichtlinie (PED)	199
9.6.2	Gasgeräterichtlinie (GAR)	200
9.7	Normungsstruktur zur Maschinenrichtlinie	200
9.8	Wichtige Typ A- und Typ B-Normen für Industriebrenner	202
9.8.1	Wichtige Typ A-Normen für Thermoprozessanlagen und Industriebrenner	202
9.8.1.1	DIN EN ISO 12100	202
9.8.2	Wichtige Typ B-Normen für Thermoprozessanlagen und Industriebrenner	202
9.8.2.1	DIN EN 614-1 Ergonomische Gestaltungsgrundsätze	202
9.8.2.2	DIN EN ISO 13732-1 Kontakt mit heißen Oberflächen	202
9.8.2.3	DIN EN ISO 13849-1 sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen	203
9.8.2.4	DIN EN ISO 13850 NOT-HALT-Einrichtung	204
9.8.2.5	DIN EN ISO 14118 Vermeidung von unerwartetem Anlauf	205
9.8.2.6	DIN EN ISO 14120	205
9.8.2.7	DIN EN 60204-1	206
9.8.2.8	DIN EN 61496-1	206
9.9	Wichtige Typ C-Normen für Industriebrenner	207
9.9.1	DIN EN 746-1	207
9.9.2	DIN EN 746-2	208
9.10	Normen für Komponenten von Industriebrennern	209
9.10.1	DIN EN 161	209
9.10.2	DIN EN 225-1	210
9.10.3	DIN EN 225-2	210
9.10.4	DIN EN ISO 23553-1	210
9.10.5	DIN EN 298	211
9.10.6	DIN EN 1643	212
9.10.7	DIN EN 1854	212
9.10.8	DIN EN 88-1	213
9.10.9	DIN EN 12067-2	213
9.11	Normen für Kompaktbrenner	214
9.11.1	DIN EN 267	214
9.11.2	DIN EN 676	215
9.12	Normen für Thermoprozessanlagen	215
9.12.1	DIN EN 746-3	215
9.12.2	DIN EN 746-4	216
9.12.3	DIN EN 746-5	217
9.12.4	prEN 746-6	218

9.12.5	prEN 746-7	219
9.12.6	DIN EN 746-8	220
9.12.7	DIN EN 1547	221
9.12.8	DIN EN 1539	222
9.13	Wie liest man eine Norm	222
10.	Zukunft der industriellen Verbrennungstechnik	225
10.1	Belastung durch Verbrennung	226
10.1.1	Preisentwicklung fossiler Brennstoffe.....	226
10.1.2	Alternativen zur Beheizung mit fossilen Brennstoffen.....	227
10.1.2.1	Heizen mit elektrischer Energie	228
10.2	Effizienzsteigerung und Einsparung	228
10.3	Heizen mit alternativen Brennstoffen.....	229
10.3.1	Wasserstoff	229
10.3.2	Synthetische nicht-fossile Brennstoffe.....	229
10.3.3	Biogas	229
10.3.4	Vergasungsprozesse.....	230
10.3.5	Schwankende Gaszusammensetzung.....	230
10.4	Hybridbeheizungen	230
10.5	Digitalisierung	230
10.5.1	Brennersteuerungen	230
10.5.2	Sensoren.....	230
10.5.3	Informationen über Verfügbarkeit und Preise von Energie.....	230
10.5.4	Echtzeit Computersimulation.....	231
Anhang	233
	Arbeitsblätter GWI	234
	Weitere Informationen zum Fach	297
	Gaswärme International – Veröffentlichungen (1998-2017)	308
	PROZESSWÄRME – Veröffentlichungen (2018).....	326
Stichwortverzeichnis	327
Inserentenverzeichnis	333

1. Verbrennungslehre

Günther Woelk †

1. Verbrennungslehre

Günther Woelk †

1.1 Stöchiometrie

1.1.1 Reaktionselemente technischer Brennstoffe

Technische Brennstoffe enthalten neben inerten (nicht an der Reaktion beteiligten) Bestandteilen in der Regel nur drei Elemente in wechselnder Zusammensetzung, die durch Reaktion mit dem Element Sauerstoff die erforderliche Energie für einen Prozess liefern. Es handelt sich um:

- Wasserstoff (H)
als reiner Wasserstoff in molekularer Form oder in Verbindung mit den übrigen Reaktionselementen,
- Kohlenstoff (C)
als reiner Kohlenstoff oder in Verbindung mit Wasserstoff und / oder Sauerstoff,
- Schwefel (S)
in Verbindung mit den übrigen Reaktionselementen.

Als Reaktionspartner tritt immer Sauerstoff (O) in molekularer Form O_2 auf. In der Regel wird der Sauerstoff der Luft entnommen. Die Zusammensetzung der trockenen Luft wird vereinfacht wie folgt angenommen:

$$0,2099 \text{ mol } O_2 + 0,7901 \text{ mol } N_2 = 1 \text{ mol Luft} \quad (1.1)$$

Der Stoffmengenanteil des Sauerstoffes in der Verbrennungsluft $n(O_2)_\ell$ (Index ℓ für Luft) wird für die normale Luft mit dem Wert $0,2099 \approx 0,21$ angenommen.

Wird sauerstoffangereicherte Luft (a-Luft) verwendet, so gilt für die Zusammensetzung folgende Beziehung:

$$1 \text{ mol } O_2 + \frac{1 - n(O_2)}{n(O_2)} \text{ mol } N_2 = \frac{1}{n(O_2)} \text{ mol a-Luft} = 4,76 \text{ mol Luft/mol } O_2 \quad (1.2)$$

Die wichtigsten chemischen Reaktionen sind in **Bild 1.1**, **Bild 1.2** und **Bild 1.3** sowie in der Gleichung (1.3) dargestellt

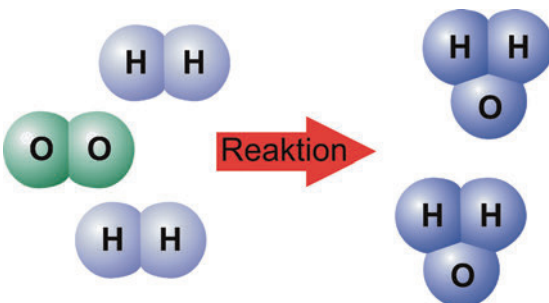


Bild 1.1: Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion

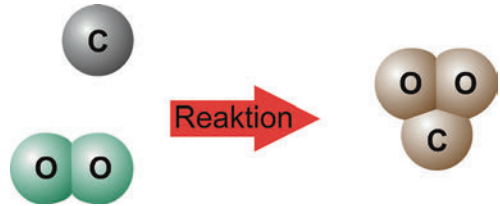


Bild 1.2: Kohlenstoff-Sauerstoff-Reaktion

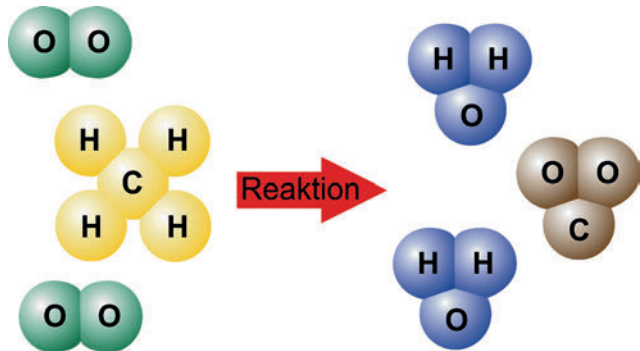
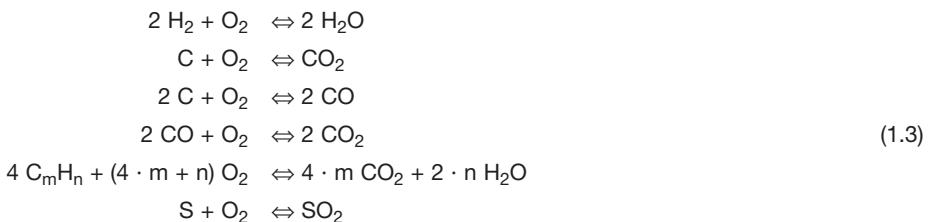


Bild 1.3: Methan-Sauerstoff-Reaktion



1.1.2 Charakteristische Größen für die Zusammensetzung von gasförmigen Brennstoffen

Bei der Reaktion eines Brennstoffes mit Sauerstoff ist es zur Berechnung des Luftbedarfes und der Abgasmenge nicht von Interesse, aus welchen chemischen Verbindungen der Brennstoff besteht. Bei der Verbrennung werden die meisten dieser Verbindungen aufgespalten.

Es hat sich als sehr günstig erwiesen, die Brennstoffe gedanklich in die Elementarbestandteile Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel so zu zerlegen, als ob diese Elementarbestandteile in atomarer Form vorliegen würden.

Die einzelnen Stoffmengen der Elementarbestandteile berechnen sich für gasförmige und für flüssige oder feste Brennstoffe auf unterschiedliche Weise.

1.1.2.1 Charakteristische Atomsummen bei gasförmigen Brennstoffen

Da flüssige und feste Brennstoffe nur selten in Industrieöfen eingesetzt werden, wird hier auf die relevanten Formeln verzichtet. Gasförmige Brennstoffe sind überwiegend dort im Einsatz, wo eine Versorgung durch Gasnetze gegeben ist. Gasförmige Brennstoffe stammen aus den verschie-

Tabelle 1.1: Analyse einiger technischer Gase in Stoffmengenprozent

Lfd. Nr.	Komponente		molare Masse in kg/kmol	Stadt-gas	Kokerei-gas	Erdgas L	Erdgas H	Flüssig-gas
1	Kohlenstoff	C	12,01					
2	Methan	CH ₄	16,04	19	25	81,30	93,30	
3	Ethan	C ₂ H ₆	30,07			2,85	3,38	
4	Propen	C ₃ H ₆	42,08	2	2			
5	Propan	C ₃ H ₈	44,10			0,37	0,88	57,2
6	Butan	C ₄ H ₁₀	58,12			0,14	0,36	42,8
7	Pentan	C ₅ H ₁₂	72,15			0,04	0,15	
8	Hexan	C ₆ H ₁₄	86,18			0,05	0,07	
9	Heptan	C ₇ H ₁₆	100,20				0,04	
10	Oktan	C ₈ H ₁₈	114,23				0,01	
11	Kohlenmonoxid	CO	28,01	18	6			
12	Kohlendioxid	CO ₂	44,01	4	2	0,89	1,06	
13	Wasserstoff	H ₂	2,02	51	55			
14	Stickstoff	N ₂	28,02	6	10	14,35	0,75	
15	Sauerstoff	O ₂	32,00			0,01		

densten Quellen, teils natürlicher Art teils technischen Ursprungs. Die **Tabelle 1.1** enthält die Durchschnittsanalyse einiger wichtiger technischer Brenngase als Stoffmengenanteilen (Volumen oder Molaranteilen) in Prozent.

Die Zusammensetzung eines gasförmigen Brennstoffes wird gewöhnlich in der Form einer Standardanalyse angegeben:

$$\begin{aligned}
 & x(\text{CH}_4)_b + x(\text{C}_2\text{H}_4)_b + x(\text{C}_2\text{H}_6)_b + x(\text{C}_3\text{H}_6)_b + x(\text{C}_3\text{H}_8)_b + x(\text{C}_4\text{H}_{10})_b + x(\text{C}_5\text{H}_{12})_b \\
 & + x(\text{C}_6\text{H}_{14})_b + x(\text{C}_7\text{H}_{16})_b + x(\text{C}_8\text{H}_{18})_b + x(\text{CO})_b + x(\text{CO}_2)_b + x(\text{H}_2)_b + x(\text{H}_2\text{O})_b \\
 & + x(\text{N}_2)_b + x(\text{O}_2)_b + x(\text{SO}_2)_b = 1
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Hierin bedeutet zum Beispiel $x(\text{CO})_b$ den Stoffmengenanteil von Kohlenmonoxid im Brennstoff (Index b für Brennstoff).

Der Stoffmengenanteil $x(i)$ ist das Verhältnis der Stoffmenge der Komponenten i zur Gesamtstoffmenge aller Komponenten in einer Mischung:

$$x(i) = \frac{N(i)}{\sum_j N(j)} \tag{1.5}$$

Die Stoffmengen der einzelnen Elemente in den Brennstoffbestandteilen lassen sich zu Atomsummen zusammenfassen.

So gilt für die Atomsumme der gesamten *Kohlenstoffmenge* im Brennstoff:

$$\begin{aligned} ASC_b = & x(\text{CH}_4)_b + 2 \cdot [x(\text{C}_2\text{H}_4)_b + x(\text{C}_2\text{H}_6)_b] + 3 \cdot [x(\text{C}_3\text{H}_6)_b + x(\text{C}_3\text{H}_8)_b] \\ & + 4 \cdot x(\text{C}_4\text{H}_{10})_b + 5 \cdot x(\text{C}_5\text{H}_{12})_b + 6 \cdot x(\text{C}_6\text{H}_{14})_b + 7 \cdot x(\text{C}_7\text{H}_{16})_b + 8 \cdot x(\text{C}_8\text{H}_{18})_b \\ & + x(\text{CO})_b + x(\text{CO}_2)_b \end{aligned} \quad (1.6)$$

Für die Atomsumme der gesamten *Wasserstoffmenge*:

$$\begin{aligned} ASH_b = & 4 \cdot [x(\text{CH}_4)_b + x(\text{C}_2\text{H}_4)_b] + 6 \cdot [x(\text{C}_2\text{H}_6)_b + x(\text{C}_3\text{H}_6)_b] \\ & + 8 \cdot x(\text{C}_3\text{H}_8)_b + 10 \cdot x(\text{C}_4\text{H}_{10})_b + 12 \cdot x(\text{C}_5\text{H}_{12})_b + 14 \cdot x(\text{C}_6\text{H}_{14})_b \\ & + 16 \cdot x(\text{C}_7\text{H}_{16})_b + 18 \cdot x(\text{C}_8\text{H}_{18})_b + 2 \cdot [x(\text{H}_2)_b + x(\text{H}_2\text{O})_b] \end{aligned} \quad (1.7)$$

Für die Atomsumme der gesamten *Stickstoffmenge*:

$$ASN_b = 2 \cdot x(\text{N}_2)_b \quad (1.8)$$

Für die Atomsumme der gesamten *Sauerstoffmenge*:

$$ASO_b = x(\text{CO})_b + x(\text{H}_2\text{O})_b + 2 \cdot [x(\text{CO}_2)_b + x(\text{O}_2)_b] \quad (1.9)$$

Für die Atomsumme der gesamten *Schwefelmenge*:

$$ASS_b = x(\text{SO}_2)_b \quad (1.10)$$

Da gasförmige Brennstoffe in der Regel nur sehr wenig Schwefel enthalten, kann der Schwefel im Allgemeinen unberücksichtigt bleiben.

Die charakteristischen Atomsummen sind bei gasförmigen Brennstoffen auf die Brennstoffmenge bezogene Größen und damit dimensionslos. Es ist jedoch zu beachten, dass ihre Zahlenwerte im Gegensatz zu den Stoffmengenanteilen größer 1 sein können. So ist zum Beispiel für den Brennstoff Erdgas L aus Tabelle 1.1:

$$ASC_b = 0,9006 \quad ASH_b = 3,4784 \quad ASN_b = 0,2870 \quad ASO_b = 0,0180 \quad ASS_b = 0,0000$$

1.1.3 Verbrennungsrechnung

Bei einer technischen Verbrennung unterscheidet man im Allgemeinen zwei Möglichkeiten:

- Die „vollkommene Verbrennung“

Das ist eine Reaktion, die in ihrem Ablauf vollkommen stattgefunden hat. Bei der vollkommenen Verbrennung können im Abgas ohne Weiteres noch unverbrannte Bestandteile vorhanden sein, wenn die Verbrennung unter Luftmangel durchgeführt wurde. Es ist jedoch nicht möglich, dass Sauerstoff und unverbrannte Bestandteile nebeneinander vorkommen. In diesem Falle würde es sich um eine

- „unvollkommene Verbrennung“
handeln, weil die Reaktion nicht vollkommen abgelaufen ist. Die unvollkommene Verbrennung ist in der Regel ein technisch ungewollter Vorgang.

Bei beiden Vorgängen ist die bei hohen Temperaturen auftretende Dissoziation der Verbrennungsgase außer Acht gelassen.

Eine weitere Unterscheidung der technischen Verbrennungen wird nach der Menge der zugeführten Verbrennungsluft vorgenommen. Aus der Chemie ist die Sauerstoffmenge bekannt, die erforderlich ist, damit jedes Brennstoffmolekül reagieren kann. Wird eine Verbrennung mit der dazugehörigen Luftmenge durchgeführt, so nennt man sie „stöchiometrisch“. Wird eine größere Luftmenge als die stöchiometrische Luftmenge der Verbrennung zugeführt, so ist es eine „überstöchiometrische“ oder „luftreiche“ oder „arme“ Verbrennung. Ist die Verbrennungsluft geringer als die stöchiometrische Menge, so spricht man von „unterstöchiometrischer“ oder „luftarmer“ oder „fetter“ Verbrennung.

1.1.3.1 Berechnung des Luftbedarfs

Die Sauerstoffmenge $N(\text{O}_2)_{\text{st}}$ für eine stöchiometrische Reaktion mit einer Brennstoffmenge N_b oder Brennstoffmasse M_b ist:

$$N(\text{O}_2)_{\text{st}} = N_b \cdot (\text{ASC}_b + \text{ASS}_b + 0,25 \cdot \text{ASH}_b - 0,5 \cdot \text{ASO}_b) \quad (1.11)$$

Der Index „st“ zeigt für die genannte Größe an, dass sie für eine stöchiometrische Reaktion gilt. Die zur stöchiometrischen Sauerstoffmenge zugehörige trockene Luftmenge ist:

$$N_{\ell, \text{tr}, \text{st}} = 4,764 \cdot N(\text{O}_2)_{\text{st}} \quad (1.12)$$

Der Index „tr“ zeigt den trockenen Zustand an. Bezieht man diese Luftmenge $N_{\ell, \text{tr}, \text{st}}$ auf die Stoffmenge oder Masse des Brennstoffes, so erhält man die brennstoffbezogene trockene Luftmenge $l_{\text{tr}, \text{st}}$ für eine stöchiometrische Verbrennung.

$$\frac{N_{\ell, \text{tr}, \text{st}}}{N_b} = l_{\text{tr}, \text{st}} = 4,764 \cdot (\text{ASC}_b + \text{ASS}_b + 0,25 \cdot \text{ASH}_b - 0,5 \cdot \text{ASO}_b) \quad (1.13)$$

Wird die Verbrennung mit einer anderen als mit der stöchiometrischen Luftmenge betrieben, so nennt man das Verhältnis zwischen der verwendeten Luftmenge und der stöchiometrischen Luftmenge den „Luftfaktor λ “. Es gilt:

$$\lambda = \frac{l_{\text{tr}}}{l_{\text{tr}, \text{st}}} \Rightarrow l_{\text{tr}} = \lambda \cdot l_{\text{tr}, \text{st}} \quad (1.14)$$

Die bisherige Berechnung wurde für trockene Luft durchgeführt. Nun besitzt die zur Verbrennung benutzte atmosphärische Luft immer einen wechselnden Anteil an Wasserdampf, der je nach Temperatur, Druck und relativer Feuchte verschieden ist.

Unter der relativen Feuchte φ eines Gases (in diesem Falle Luft) versteht man das Verhältnis der im Gas enthaltenen Wasserdampfmenge N_w zur maximalen Wasserdampfmenge $N_{w, S}$, die bei der gegebenen Temperatur und dem gegebenen Druck im Gas enthalten sein kann, ohne dass eine Kondensation eintritt (Sättigungsmenge).

Tabelle 1.2: Sättigungsdruck $p_{w,s}$ von Wasserdampf in Luft

ϑ °C	$p_{w,s}$ mbar	ϑ °C	$p_{w,s}$ mbar	ϑ °C	$p_{w,s}$ mbar	ϑ °C	$p_{w,s}$ mbar	
-20	1,030	-5	4,011	10	12,271	25	31,666	
-19	1,134	-4	4,368	11	13,117	26	33,598	
-18	1,246	-3	4,754	12	14,015	27	35,637	
-17	1,369	-2	5,172	13	14,966	28	37,785	
-16	1,503	-1	5,621	14	15,974	29	40,041	
-15	1,649	0	6,108	15	17,040	30	42,414	
-14	1,808	1	6,565	16	18,169	31	44,914	
13	1,980	2	7,054	17	19,363	32	47,533	
-12	2,169	3	7,574	18	20,623	33	50,289	
-11	2,373	4	8,129	19	21,957	34	53,181	
-10	2,595	5	8,718	20	23,369	35	56,222	
-9	2,833	6	9,346	21	24,850	36	59,399	
-8	3,095	7	10,031	22	26,419	37	62,743	
-7	3,376	8	10,721	23	28,076	38	66,244	
-6	3,681	9	11,473	24	29,822	39	69,912	
						40	73,746	
Gesamtdruck: 981 mbar = 98,1 kPa								

Nach der Zustandsgleichung für ideale Gase ist ein Stoffmengenverhältnis gleich dem Verhältnis der Partialdrücke. Es gilt demnach:

$$\varphi = \frac{N_w}{N_{w,s}} = \frac{p_w}{p_{w,s}} \Rightarrow p_w = \varphi \cdot p_{w,s} \quad (1.15)$$

Der Sättigungsdruck $p_{w,s}$ von Wasserdampf in Luft ist in erster Linie eine Funktion der Temperatur $p_{w,s}(\vartheta)$ und als solche in der **Tabelle 1.2** wiedergegeben. Er lässt sich annähernd durch die Gleichung (1.16) beschreiben.

$$\frac{p_{w,s}}{\text{mbar}} = 5,87 \cdot \exp \left[0,078 \cdot \frac{\vartheta}{\text{°C}} - 0,00039 \cdot \left(\frac{\vartheta}{\text{°C}} \right)^2 \right] \quad -20 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 40 \text{ °C} \quad (1.16)$$

Nach der Zustandsgleichung gilt ebenfalls das Verhältnis:

$$\frac{N_w}{N_{\ell, \text{tr}}} = \frac{p_w}{p_{\ell, \text{tr}}} \quad (1.17)$$

Da sich der atmosphärische Druck $p_{\ell,\text{ges}}$ aus den Partialdrücken der trockenen Luft $p_{\ell,\text{tr}}$ und des Wasserdampfes p_w zusammensetzt, gilt mit $p_{\ell,\text{ges}} = p_{\ell,\text{tr}} + p_w$

$$w_{\ell} = \frac{N_w}{N_{\ell,\text{tr}}} = \frac{p_w}{p_{\ell,\text{ges}} - p_w} = \frac{\varphi \cdot p_{w,s}}{p_{\ell,\text{ges}} - \varphi \cdot p_{w,s}} \quad (1.18)$$

Bezieht man die Wasserdampfmenge in der Luft nicht auf die Luftmenge, sondern auf die Brennstoffmenge, so ergibt sich:

$$w_{\ell,b} = \frac{N_w}{N_b} = \frac{N_{\ell,\text{tr}}}{N_b} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{w,s}}{p_{\ell,\text{ges}} - \varphi \cdot p_{w,s}} \quad (1.19)$$

Gleichung (1.19) gibt die Berechnungsmöglichkeit für die brennstoffbezogene Wasserdampfmenge (Wasserdampfmenge der Luft / Brennstoffmenge), die mit der Verbrennungsluft in die Verbrennung hineingebracht wird.

Der Bedarf an feuchter Luft, der kurz Luftbedarf genannt wird, ergibt sich aus der Gleichung (1.20).

$$l = l_{\text{tr}} + w_{\ell,b} = l_{\text{tr}} + l_{\text{tr}} \cdot (1 + w_{\ell}) \quad (1.20)$$

So wie man den Brennstoff in die Atommenge der einzelnen Elemente zerlegen kann, ist es auch für die Verbrennungsluft möglich.

So gilt für die Atomsumme der gesamten brennstoffbezogenen Sauerstoffmenge in der Verbrennungsluft:

$$ASO_{\ell} = l_{\text{tr}} \cdot \left(2 \cdot n(\text{O}_2)_{\ell} + w_{\ell} \right) \quad (1.21)$$

Für die Atomsumme der gesamten Wasserstoffmenge in der Verbrennungsluft:

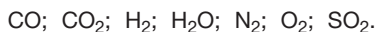
$$ASH_{\ell} = 2 \cdot l_{\text{tr}} \cdot w_{\ell} \quad (1.22)$$

Für die Atomsumme der gesamten Stickstoffmenge in der Verbrennungsluft:

$$ASN_{\ell} = 2 \cdot \left(1 - n(\text{O}_2) \right) \cdot l_{\text{tr}} \quad (1.23)$$

1.1.3.2 Berechnung der Abgasmenge und der Abgaszusammensetzung

Bei der Verbrennung eines Brennstoffes mit Luft können folgende Verbrennungsprodukte auftreten:



Dabei ist angenommen, dass alle Kohlenwasserstoffe während des Verbrennungsvorganges aufgespalten wurden. Als Spaltungsprodukt soll kein reiner Kohlenstoff auftreten (nichtrußende Flamme).

Zur Berechnung der Abgasmenge und der einzelnen Abgaskomponenten ist es üblich, diese Größen auf die Brennstoffmenge zu beziehen.

$$\frac{N_a}{N_b} = a \quad \frac{N(i)_a}{N_b} = a(i) \quad (1.24)$$

Die gesamte, brennstoffbezogene Abgasmenge ist somit:

$$a = a(\text{CO}) + a(\text{CO}_2) + a(\text{H}_2) + a(\text{H}_2\text{O}) + a(\text{O}_2) + a(\text{N}_2) + a(\text{SO}_2) \quad (1.25)$$

Zur Vereinfachung der Formelschreibweise werden die Atomsummen des Brennstoffes und der Verbrennungsluft jeweils zusammengefasst:

$$\begin{aligned} \text{ASC} &= \text{ASC}_b \\ \text{ASH} &= \text{ASH}_b + \text{ASH}_\ell \\ \text{ASO} &= \text{ASO}_b + \text{ASO}_\ell \\ \text{ASN} &= \text{ASN}_b + \text{ASN}_\ell \\ \text{ASS} &= \text{ASS}_b \end{aligned} \quad (1.26)$$

Gleichung (1.25) enthält 8 Unbekannte, nämlich die 7 möglichen Abgaskomponenten $a(i)$ und die gesamte Abgasmenge a . Zur Berechnung dieser Größen werden 5 Stoffbilanzen aufgestellt.

- Kohlenstoffbilanz:

$$a(\text{CO}) + a(\text{CO}_2) = \text{ASC} \quad (1.27)$$

- Wasserstoffbilanz:

$$2 \cdot a(\text{H}_2) + 2 \cdot a(\text{H}_2\text{O}) = \text{ASH} \quad (1.28)$$

- Sauerstoffbilanz:

$$a(\text{CO}) + a(\text{H}_2\text{O}) + 2 \cdot a(\text{CO}_2) + 2 \cdot a(\text{O}_2) + 2 \cdot a(\text{SO}_2) = \text{ASO} \quad (1.29)$$

- Stickstoffbilanz:

$$2 \cdot a(\text{N}_2) = \text{ASN} \quad (1.30)$$

- Schwefelbilanz:

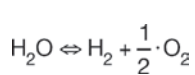
$$a(\text{SO}_2) = \text{ASS} \quad (1.31)$$

Mit der Abgassummengleichung und den 5 Stoffbilanzen stehen vorerst nur 6 Gleichungen zur Bestimmung der 8 Unbekannten zur Verfügung. Mithilfe zweier thermodynamischer Gleichgewichte ist es möglich, die Zusammensetzung des Abgases zu berechnen. Hierbei wird vorausgesetzt, dass Stickstoff und Schwefel auf die Gleichgewichtsbildung der übrigen Elemente keinen Einfluss haben.

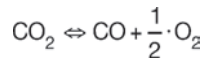
Die Formeln zur Gleichgewichtsberechnung der entsprechenden Reaktionen lauten (1.32) bzw. (1.33):

chemische Gleichung

Gleichgewichtsfunktion



$$\frac{p_{\text{H}_2} \cdot \sqrt{p_{\text{O}_2} / p_{\text{ges}}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = k_{\text{H}} \quad (1.32)$$



$$\frac{p_{\text{CO}} \cdot \sqrt{p_{\text{O}_2} / p_{\text{ges}}}}{p_{\text{CO}_2}} = k_{\text{C}} \quad (1.33)$$

Eine allgemeine mathematische Funktion zur Beschreibung der Gleichgewichte in Abhängigkeit der thermodynamischen Temperatur lautet:

$$k = \exp\left(a_0 + \frac{a_1}{T} + \frac{a_2}{T^2} + \frac{a_3}{T^3}\right) \quad (1.34)$$

Für den Normdruck von 101,325 kPa und den Temperaturbereich von 500 bis 1.500 °C oder 773 bis 1.773 K sind die Koeffizienten der einzelnen Gleichgewichtsfunktionen in der **Tabelle 1.3** aufgelistet.

Tabelle 1.3: Koeffizienten der Gleichgewichtsfunktionen zur Gleichung (1.34) für $p = 101,325 \text{ kPa}$ (Ausgangswerte nach THERDAS, Thermodynamische Datenbank, RWTH Aachen, vom 28.07.86)

Koeffizient	a_0	a_1	a_2	a_3
k_{H}	7,208765 ³	-31,138434 · 10 ³	0,91346131 · 10 ⁶	-0,16926632 · 10 ⁹
k_{C}	9,970491 ¹	-32,635178 · 10 ³	-1,2141997 · 10 ⁶	0,3409479 · 10 ⁹

Um einen Zusammenhang zwischen der Stoffmenge eines Bestandteils und dem Partialdruck dieses Bestandteils zu erhalten, ist die Kenntnis der gesamten Stoffmenge und des Gesamtdruckes des Abgases erforderlich.

Die einzelnen Bestandteile des Abgases können bei den Temperaturen in einem Industrieofen als ideale Gase angesehen werden. Für ideale Gase gilt der nachfolgende Zusammenhang zwischen den Stoffmengen und Partialdrücken

$$\frac{p_i}{p_{\text{ges}}} = \frac{N_i}{N_{\text{ges}}} = x_i \quad (1.35)$$

wobei x_i der Stoffmengenanteil der Komponenten i ist.

Gleichung (1.35) kann auch in der Form

$$p_i = p_{\text{ges}} \frac{N_i}{N_{\text{ges}}} = p_{\text{ges}} \cdot x_i \quad (1.36)$$

geschrieben werden.

Entsprechend Gleichung (1.35) lässt sich der Stoffmengenanteil x_i für das Abgas auch definieren als:

$$\frac{N_i}{N_{\text{ges}}} = \frac{N_i}{N_b} \cdot \frac{N_b}{N_{\text{ges}}} = \frac{a(i)}{a} \quad (1.37)$$

Setzt man in die beiden Gleichgewichtsfunktionen k_C und k_H die Größen entsprechend den Gleichungen (1.36) und Gleichung (1.37) ein, so erhält man

$$\frac{a(\text{CO}) \cdot \sqrt{a(\text{O}_2)}}{a(\text{CO}_2) \cdot \sqrt{a}} = k_C \quad (1.38)$$

und

$$\frac{a(\text{H}_2) \cdot \sqrt{a(\text{O}_2)}}{a(\text{H}_2\text{O}) \cdot \sqrt{a}} = k_H \quad (1.39)$$

Mit den zuletzt genannten Gleichgewichtsfunktionen liegen 8 Gleichungen mit 8 Unbekannten vor. Das Gleichungssystem ist zwar nichtlinear, aber lösbar. Es ist wegen des großen rechnerischen Aufwandes nicht ratsam, eine analytische Lösung zu benutzen. Eine numerische Lösung mit einem Computer ist hierfür angebracht.

Für den Fall, dass die Verbrennung mit einem Luftüberschuss arbeitet, das heißt, dass der Luftfaktor λ größer 1 ist, kann man in 1. Annäherung davon ausgehen, dass die Abgaskomponenten $a(\text{CO})$ und $a(\text{H}_2)$ gleich 0 sind. Durch diese Annahme reduziert sich das Gleichungssystem um 2 Unbekannte. Es liegt damit ein lineares Gleichungssystem von 6 Gleichungen mit 6 Unbekannten vor, das zu lösen ist.

$$\begin{aligned} a(\text{CO}) &= 0 \\ a(\text{CO}_2) &= \text{ASC} \\ a(\text{H}_2) &= 0 \\ a(\text{H}_2\text{O}) &= 0,5 \cdot \text{ASH} \\ a(\text{O}_2) &= 0,5 \cdot \text{ASO} - 0,25 \cdot \text{ASH} - \text{ASC} - \text{ASS} \end{aligned} \quad (1.40)$$

Die brennstoffbezogene Abgasmenge ist:

$$a = \sum_i a(i)$$

Bei flüssigen und festen Brennstoffen ist eine Verbrennungsrechnung bei luftarmer Verbrennung nicht mehr ohne Weiteres durchzuführen, weil nicht von der Voraussetzung ausgegangen werden kann, dass aller Kohlenstoff wenigstens zu CO oxidiert wird. Bei luftarmer Verbrennung wird bei flüssigen und festen Brennstoffen in den meisten Fällen Ruß, das heißt elementarer Kohlenstoff anfallen. Hierfür sind aber die Gleichgewichtsbedingungen nicht in der einfachen Form wie in Gleichung (1.38) und Gleichung (1.39) zu fassen.

1.2 Energieströme im Ofenraum

1.2.1 Kennzeichnende Ofenflächen

Damit ein Industrieofen seinen Zweck erfüllen kann, muss er mit Energie versorgt werden. Hierzu ist ein Energiestrom erforderlich, den man auch mit dem gleichbedeutenden physikalischen Begriff

Leistung = Energie pro Zeit = Energiestrom

belegt. Bei brennstoffbeheizten Öfen besteht der Energiestrom aus der Zufuhr von Brennstoff und Luft, bei elektrisch beheizten Öfen aus der Zufuhr von elektrischer Energie. Da die Verhältnisse beim brennstoffbeheizten Ofen komplexer sind, soll dieser hier genauer betrachtet werden.

Verfolgt man die mit den Energieströmen verbundenen Stoffströme durch den Ofen, so kann man vier verschiedene, gedanklich fixierte Flächen angeben, durch die die Stoffströme hindurchfließen, und die für den Zustand der Stoffströme charakteristisch sind (**Bild 1.4**).

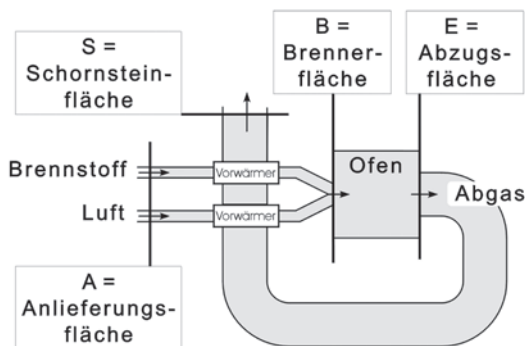


Bild 1.4: Charakteristische Durchtrittsflächen des Stoffstroms der Verbrennung

Bei der Anlieferung an den Ofen haben Brennstoff und Luft bestimmte Temperaturen und Drücke. Es wird eine Fläche geben, durch die die Stoffströme im Anlieferungszustand (Index A) hindurchfließen.

Ist der Ofen mit Wärmerückgewinnungsanlagen für Brennstoff und/oder Luft ausgerüstet, so ändern die Stoffströme auf ihrem Weg vom Ort der Anlieferung bis zum Ort der Reaktion im Brenner ihre Enthalpie. Zur Kennzeichnung des veränderten Zustandes wird eine zweite Fläche, die Brennerfläche (Index B) definiert. Sie wird unmittelbar vor die Reaktion von Brennstoff und Luft in den Brennermündung gelegt.

Bei der Verbrennung eines Brennstoffes entstehen Reaktionsprodukte, die aus dem Ofen abtransportiert werden müssen. Auch diese haben einen Zustand, der von dem Bezugszustand (0 °C und 101,3 kPa) verschieden ist. Damit die abströmenden Reaktionsprodukte und die inerten Bestandteile zustandsmäßig beschrieben werden können, wird eine weitere Fläche definiert. Es ist die Abzugsfläche (Esse oder Exit) (Index E).

Da ein Ofen mit einer Vorwärmung für Brennstoff und/oder Luft ausgerüstet sein kann, ändert sich in diesem Fall der Zustand des Abgases auf seinem Weg von der Abzugsfläche bis zum Eintritt in den Schornstein durch die Wärmeabgabe im Vorwärmer. Um den Zustand des Abgases hinter dem Vorwärmer zu beschreiben, wird als vierte Fläche die Eintrittsfläche in den Schornstein, die Schornsteinfläche (Index S) definiert.

1.2.2 Charakteristische Leistungen und Wärmeströme

Zum Betrieb eines Industrieofens wird dieser mit Brennstoff und Luft versorgt. In den Ofen wird damit ein Brennstoffstrom (Brennstoffmassenstrom \dot{M}_b oder Brennstoffmengenstrom \dot{N}_b) und ein