

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Begriffe und Phänomene	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Einige grundlegende Begriffe	2
1.3	Grundlegende Flammentypen	4
1.4	Übungsaufgaben	8
2	Experimentelle Untersuchungen an Flammen	9
2.1	Geschwindigkeitsmessungen	10
2.2	Dichtemessungen	11
2.3	Konzentrationsmessungen	12
2.4	Temperaturmessungen	17
2.5	Druckmessungen	19
2.6	Messung von Partikelgrößen	20
3	Mathematische Beschreibung laminarer flacher Vormischflammen	21
3.1	Erhaltungsgleichungen für laminare flache Vormischflammen	21
3.2	Wärme- und Stofftransport	25
3.3	Die Beschreibung einer laminaren flachen Vormischflammenfront	26
3.4	Übungsaufgaben	30
4	Thermodynamik von Verbrennungsvorgängen	31
4.1	Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	31
4.2	Standard-Bildungsenthalpien	32
4.3	Wärmekapazitäten	34
4.4	Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik	36
4.5	Der Dritte Hauptsatz der Thermodynamik	37
4.6	Gleichgewichtskriterien und Thermodynamische Funktionen	38
4.7	Gleichgewicht in Gasmischungen; Chemisches Potential	39
4.8	Bestimmung von Gleichgewichtszusammensetzungen in der Gasphase	41
4.9	Bestimmung adiabatischer Flammentemperaturen	44
4.10	Tabellierung thermodynamischer Daten	45
4.11	Übungsaufgaben	47

5	Transportprozesse	49
5.1	Einfache physikalische Deutung der Transportprozesse	49
5.2	Wärmeleitung	52
5.3	Viskosität	55
5.4	Diffusion	56
5.5	Thermodiffusion, Dufour-Effekt und Druckdiffusion	59
5.6	Vergleich mit dem Experiment	59
5.7	Übungsaufgaben	63
6	Chemische Reaktionskinetik	65
6.1	Zeitgesetz und Reaktionsordnung	65
6.2	Zusammenhang von Vorwärts- und Rückwärtsreaktion	67
6.3	Elementarreaktionen, Reaktionsmolekularität	67
6.4	Experimentelle Untersuchung von Elementarreaktionen	74
6.5	Temperaturabhängigkeit von Geschwindigkeitskoeffizienten	75
6.6	Druckabhängigkeit von Geschwindigkeitskoeffizienten	77
6.7	Oberflächenreaktionen	80
6.8	Übungsaufgaben	84
7	Reaktionsmechanismen	85
7.1	Eigenschaften von Reaktionsmechanismen	85
7.1.1	Quasistationarität	85
7.1.2	Partielle Gleichgewichte	89
7.2	Analyse von Reaktionsmechanismen	91
7.2.1	Empfindlichkeitsanalyse	91
7.2.2	Reaktionsflußanalysen	95
7.2.3	Eigenwertanalysen von chemischen Reaktionssystemen	97
7.3	Steifheit von gewöhnlichen Differentialgleichungssystemen	101
7.4	Vereinfachung von Reaktionsmechanismen	102
7.5	Radikalkettenreaktionen	106
7.6	Übungsaufgaben	109
8	Laminare Vormischflammen	111
8.1	Vereinfachte thermische Theorie der Flammenfortpflanzung von Zeldovich ...	111
8.2	Numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen	112
8.2.1	Ortsdiskretisierung	113
8.2.2	Anfangs- und Randwerte, Stationarität	115
8.2.3	Explizite Lösungsverfahren	116
8.2.4	Implizite Lösungsverfahren	117
8.2.5	Semi-implizite Lösung von partiellen Differentialgleichungen	117
8.2.6	Implizite Lösung von partiellen Differentialgleichungen	118
8.3	Flammenstrukturen	119
8.4	Flammengeschwindigkeit	122
8.5	Empfindlichkeitsanalyse	123
8.6	Übungsaufgaben	125

9	Laminare nicht-vorgemischte Flammen	127
9.1	Nicht-vorgemischte Gegenstromflammen	127
9.2	Nicht-vorgemischte Strahlflammen	131
9.3	Nicht-vorgemischte Flammen mit schneller Chemie	134
9.4	Übungsaufgaben	137
10	Zündprozesse	139
10.1	Vereinfachte thermische Theorie der Explosion von Semenov	140
10.2	Thermische Theorie der Explosion von Frank-Kamenetskii	141
10.3	Selbstzündungsvorgänge: Zündgrenzen	143
10.4	Selbstzündungsvorgänge: Induktionszeit	146
10.5	Fremdzündung, Mindestzündenergie	147
10.6	Funkenzündung	151
10.7	Detonationen	152
10.8	Übungsaufgaben	154
11	Die Navier-Stokes-Gleichungen für dreidimensionale reaktive Strömungen	155
11.1	Die Erhaltungsgleichungen	155
11.1.1	Erhaltung der Gesamtmasse	157
11.1.2	Erhaltung der Speziesmassen	157
11.1.3	Erhaltung des Impulses	158
11.1.4	Erhaltung der Energie	158
11.2	Die empirischen Gesetze	159
11.2.1	Das Newtonsche Schubspannungsgesetz	159
11.2.2	Das Fouriersche Wärmeleitfähigkeitsgesetz	160
11.2.3	Ficksches Gesetz und Thermodiffusion	160
11.2.4	Ermittlung von Transportkoeffizienten aus molekularen Eigenschaften	161
11.3	Definitionen und Gesetze aus der Vektor- und Tensorrechnung	161
11.4	Übungsaufgaben	163
12	Turbulente reaktive Strömungen	165
12.1	Einige Grunderscheinungen	165
12.2	Direkte Simulation	167
12.3	Turbulenzmodellierung: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) ..	168
12.4	Turbulenzmodellierung: Zeit- und Favre-Mittelung	170
12.5	Gemittelte Erhaltungsgleichungen	172
12.6	Turbulenzmodelle	174
12.7	Mittlere Reaktionsgeschwindigkeiten	178
12.8	„Eddy-Break-Up“-Modelle	184
12.9	„Large-Eddy“-Simulation (LES)	184
12.10	Turbulente Skalen	184
12.11	Übungsaufgaben	186

13	Turbulente nicht-vorgemischte Flammen	187
13.1	Nicht-vorgemischte Flammen mit Gleichgewichts-Chemie	187
13.2	Nicht-vorgemischte Flammen mit endlich schneller Chemie	191
13.3	Flammenlöschung	196
13.4	PDF-Simulationen turbulenter nicht-vorgemischter Flammen	199
13.5	Übungsaufgaben	201
14	Turbulente Vormischflammen	203
14.1	Charakterisierung turbulenter vorgemischter Flammen	203
14.2	„Flamelet“-Behandlung	206
14.3	Turbulente Flammengeschwindigkeit	208
14.4	Flammenlöschung	210
14.5	Weitere Modelle turbulenter vorgemischter Verbrennung	212
14.6	Übungsaufgaben	213
15	Verbrennung flüssiger und fester Brennstoffe	215
15.1	Tröpfchen- und Spray-Verbrennung	215
15.1.1	Verbrennung von Einzeltröpfchen	216
15.1.2	Verbrennung eines Sprays	218
15.2	Kohleverbrennung	219
16	Motorklopfen	221
16.1	Grundlegende Phänomene	221
16.2	Hochtemperatur-Oxidation	224
16.3	Niedertemperatur-Oxidation	225
16.4	Klopfschäden	229
16.5	Übungsaufgaben	230
17	Stickoxid-Bildung	231
17.1	Thermisches NO (Zeldovich-NO)	231
17.2	Promptes NO (Fenimore-NO)	234
17.3	Über Distickstoffoxid erzeugtes NO	237
17.4	Konversion von Brennstoff-Stickstoff in NO	237
17.5	NO-Reduktion durch primäre Maßnahmen	243
17.6	NO-Reduktion durch sekundäre Maßnahmen	246
18	Bildung von Kohlenwasserstoffen und Ruß	249
18.1	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe	249
18.1.1	Flammenlöschung durch Streckung	249
18.1.2	Flammenlöschung an der Wand und in Spalten	250
18.2	Bildung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH)	252
18.3	Phänomenologie der Rußbildung	253
18.3	Modellierung und Simulation der Rußbildung	255
19	Literaturverzeichnis	257
20	Index	269