

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Begriffe und Phänomene	1
1.1	Einige grundlegende Begriffe	1
1.2	Grundlegende Flammentypen	2
1.3	Übungsaufgaben	6
2	Experimentelle Untersuchungen an Flammen	7
2.1	Messung von Geschwindigkeitsfeldern	7
2.2	Messung des Drucks	9
2.3	Messung von Dichtefeldern	9
2.4	Messung von Konzentrationsfeldern	9
2.5	Messung von Temperaturfeldern	14
2.6	Messung von Partikelgrößen	16
3	Mathematische Beschreibung laminarer flacher Vormischflammen	17
3.1	Erhaltungsgleichungen für laminare flache Vormischflammen	17
3.2	Wärme- und Stofftransport	21
3.3	Die Beschreibung einer laminaren flachen Vormischflammenfront	22
3.4	Übungsaufgaben	26
4	Thermodynamik von Verbrennungsvorgängen	27
4.1	Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	27
4.2	Standard-Bildungsenthalpien	28
4.3	Wärmekapazitäten	30
4.4	Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik	32
4.5	Der Dritte Hauptsatz der Thermodynamik	33
4.6	Gleichgewichtskriterien und Thermodynamische Funktionen	34
4.7	Gleichgewicht in Gasmischungen; Chemisches Potential	35
4.8	Bestimmung von Gleichgewichtszusammensetzungen in der Gasphase	36
4.9	Bestimmung adiabatischer Flamentemperaturen	39
4.10	Tabellierung thermodynamischer Daten	40
4.11	Übungsaufgaben	42

5	Transportprozesse	43
5.1	Einfache physikalische Deutung der Transportprozesse	43
5.2	Wärmeleitung	45
5.3	Viskosität	47
5.4	Diffusion	49
5.5	Thermodiffusion, Dufour-Effekt und Druckdiffusion	51
5.6	Vergleich mit dem Experiment	52
5.7	Übungsaufgaben	55
6	Chemische Reaktionskinetik	57
6.1	Zeitgesetz und Reaktionsordnung	57
6.2	Zusammenhang von Vorwärts- und Rückwärtsreaktion	59
6.3	Elementarreaktionen, Reaktionsmolekularität	59
6.4	Experimentelle Untersuchung von Elementarreaktionen	63
6.5	Temperaturabhängigkeit von Geschwindigkeitskoeffizienten	64
6.6	Druckabhängigkeit von Geschwindigkeitskoeffizienten	66
6.7	Übungsaufgaben	68
7	Reaktionsmechanismen	69
7.1	Eigenschaften von Reaktionsmechanismen	69
7.1.1	Quasistationarität	69
7.1.2	Partielle Gleichgewichte	73
7.2	Analyse von Reaktionsmechanismen	75
7.2.1	Empfindlichkeitsanalyse	75
7.2.2	Reaktionsflußanalysen	79
7.2.3	Eigenwertanalysen von chemischen Reaktionssystemen	81
7.3	Steifheit von gewöhnlichen Differentialgleichungssystemen	85
7.4	Vereinfachung von Reaktionsmechanismen	86
7.5	Radikalkettenreaktionen	87
7.6	Übungsaufgaben	90
8	Laminare Vormischflammen	91
8.1	Die vereinfachte thermische Theorie der Flammenfortpflanzung von Zeldovich	91
8.2	Numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen	92
8.2.1	Ortsdiskretisierung	93
8.2.2	Anfangs- und Randwerte, Stationarität	95
8.2.3	Explizite Lösungsverfahren	96
8.2.4	Implizite Lösungsverfahren	97
8.2.5	Semi-implizite Lösung von partiellen Differentialgleichungen	97
8.2.6	Implizite Lösung von partiellen Differentialgleichungen	98
8.3	Flammenstrukturen	99
8.4	Flammengeschwindigkeit	104
8.5	Empfindlichkeitsanalyse	106
8.6	Übungsaufgaben	107

9	Laminare Diffusionsflammen	109
9.1	Gegenstrom-Diffusionsflammen	109
9.2	Strahldiffusionsflammen	113
9.3	Diffusionsflammen mit schneller Chemie	115
9.4	Übungsaufgaben	118
10	Zündprozesse	119
10.1	Vereinfachte thermische Theorie der Explosion von Semenov	120
10.2	Thermische Theorie der Explosion von Frank-Kamenetskii	121
10.3	Selbstzündungsvorgänge: Zündgrenzen	123
10.4	Selbstzündungsvorgänge: Induktionszeit	126
10.5	Fremdzündung, Mindestzündenergie	127
10.6	Detonationen	131
10.7	Übungsaufgaben	133
11	Die Navier-Stokes-Gleichungen dreidimensionaler reaktiver Strömungen	135
11.1	Die Erhaltungsgleichungen	135
11.1.1	Erhaltung der Gesamtmasse	137
11.1.2	Erhaltung der Speziesmassen	137
11.1.3	Erhaltung des Impulses	138
11.1.4	Erhaltung der Energie	138
11.2	Die empirischen Gesetze	139
11.2.1	Das Newtonsche Schubspannungsgesetz	139
11.2.2	Das Fouriersche Wärmeleitfähigkeitsgesetz	140
11.2.3	Ficksches Gesetz und Thermodiffusion	140
11.2.4	Ermittlung von Transportkoeffizienten aus molekularen Eigenschaften	141
11.3	Definitionen und Gesetze aus der Vektor- und Tensorrechnung	141
11.4	Übungsaufgaben	143
12	Turbulente reaktive Strömungen	145
12.1	Einige Grunderscheinungen	145
12.2	Direkte Simulation	147
12.3	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF's)	147
12.4	Zeitmittelung und Favre-Mittelung	149
12.5	Gemittelte Erhaltungsgleichungen	151
12.6	Turbulenzmodelle	153
12.7	Mittlere Reaktionsgeschwindigkeiten	157
12.8	Eddy-Break-Up-Modelle	162
12.9	Large-Eddy Simulation (LES)	163
12.10	Turbulente Skalen	163
12.11	Übungsaufgaben	165

13	Turbulente Diffusionsflammen	167
13.1	Typen von turbulenten Diffusionsflammen	167
13.2	Diffusionsflammen mit „unendlich“ schneller Chemie	170
13.3	Flamelet-Modell für endlich schnelle Chemie	172
13.4	Flammenlöschung	175
13.5	Übungsaufgaben	177
14	Turbulente Vormischflammen	179
14.1	Flamelet-Behandlung	179
14.2	Weitere Modelle	181
14.3	Turbulente Flammengeschwindigkeit	181
14.4	Flammenlöschung	183
14.5	Übungsaufgaben	186
15	Verbrennung flüssiger und fester Brennstoffe	187
15.1	Tröpfchen- und Spray-Verbrennung	187
15.1.1	Verbrennung von Einzeltröpfchen	188
15.1.2	Verbrennung eines Sprays	190
15.2	Kohleverbrennung	191
16	Motorklopfen	193
16.1	Grundlegende Phänomene	193
16.2	Hochtemperatur-Oxidation	195
16.3	Klopfschäden	200
16.4	Übungsaufgaben	200
17	Stickoxid-Bildung	201
17.1	Thermisches NO (Zeldovich-NO)	201
17.2	Promptes NO (Fenimore-NO)	204
17.3	Konversion von Brennstoff-Stickstoff in NO	207
17.4	NO-Reduktion durch primäre Maßnahmen	210
17.5	NO-Reduktion durch sekundäre Maßnahmen	210
18	Bildung von Kohlenwasserstoffen und Ruß	213
18.1	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe	213
18.1.1	Flammenlöschung durch Streckung	213
18.1.2	Flammenlöschung an der Wand und in Spalten	214
18.2	Bildung von polzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) ...	216
18.3	Rußbildung	217
19	Literaturverzeichnis	219