

# Physikalische Chemie für Techniker und Ingenieure



dandelion.com

© 2008 AGI-Information Management Consultants  
May be used for personal purposes only or by  
libraries associated to dandelion.com network.

Von  
Studiendirektor Karl-Heinz Näser †  
Doz. Dr. sc.nat. Dieter Lempe  
Fachschuldozent Dipl.-Chem. Otfried Regen

18., stark überarbeitete Auflage

Mit 142 Bildern und 1 Beilage



VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie · Leipzig

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der wichtigsten Größen und ihrer Formelzeichen</b>	<b>16</b>
<b>1. Stellung, Aufgaben und Methoden der physikalischen Chemie</b>	<b>19</b>
1.1. Wesen und Ziel der physikalischen Chemie	19
1.2. Arbeitsmethoden und Grundbegriffe der physikalischen Chemie	21
1.2.1. Grundlagen der Thermodynamik zur Beschreibung von Zuständen und Zustandsänderungen	22
1.2.2. Größen zur Charakterisierung zeitlicher Abläufe	23
1.2.3. Grundlagen der molekularkinetischen Theorie der stofflichen Materie und der Quantentheorie	24
1.3. Mathematische Prinzipien und typische numerische Methoden zur Behandlung physikalisch-chemischer Aufgaben	25
1.3.1. Funktionelle Zusammenhänge zwischen den Größen, Grenzwerte, Differential- und Integralrechnung	26
1.3.2. Einige wichtige mathematische Eigenschaften physikalisch-chemischer Größen	31
1.3.2.1. Funktionen mit mehreren unabhängigen Variablen, Zustandsfunktionen	31
1.3.2.2. Integration von Zustandsfunktionen, integrierender Nenner	33
1.3.2.3. Homogene Funktionen und EULERSches Theorem	34
1.3.3. Einige wichtige mathematische Methoden zur numerischen Lösung physikalisch-chemischer Aufgabenstellungen	35
Zusammenfassung, Kontrollfragen	39
<b>2. Beschreibung des Verhaltens stofflicher Materie und seine molekularkinetische Interpretation</b>	<b>40</b>
2.1. Übersicht über die Aggregatzustände	40
2.2. Festkörper	42
2.2.1. Charakterisierung des festen Zustandes – idealer Festkörper	42
2.2.2. Volumen idealer Festkörper	43
2.2.3. Verhalten der Festkörper bei höheren Temperaturen und Drücken	45
2.3. Fluider Zustand	47
2.3.1. Zustandsgleichungen für das ideale Gas	48
2.3.1.1. Gesetz von BOYLE und MARIOTTE	48
2.3.1.2. Gesetz von GAY-LUSSAC	50
2.3.1.3. Individuelle Zustandsgleichung	51

2.3.1.4. Gesetz von AVOGADRO . . . . .	52
2.3.1.5. Allgemeine Zustandsgleichung für das ideale Gasverhalten . . . . .	53
<b>Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .</b>	<b>55</b>
2.3.2. Molekularkinetische Betrachtung des idealen Gaszustandes . . . . .	56
2.3.2.1. Stoßzahl und mittlere freie Weglänge . . . . .	57
2.3.2.2. Molekularkinetische Deutung des Druckes . . . . .	59
2.3.2.3. Molekularkinetische Deutung der Temperatur im Falle einatomiger Gase . . . . .	60
2.3.2.4. MAXWELL/BOLTZMANN-Verteilung und allgemeine Interpretation der Temperatur . . . . .	61
<b>Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .</b>	<b>64</b>
2.3.3. Reale Gase . . . . .	65
2.3.3.1. Besonderheiten des realen Gasverhaltens . . . . .	65
2.3.3.2. Kritischer Punkt und Prinzip der korrespondierenden Zustände . . . . .	68
2.3.3.3. Bestimmung der kritischen Eigenschaften . . . . .	69
2.3.3.4. Fugazität und Fugazitätskoeffizient . . . . .	72
2.3.4. Anwendung von Zustandsgleichungen . . . . .	74
2.3.4.1. Virialgleichung . . . . .	74
2.3.4.2. Gleichungen vom VAN-DER-WAALS-Typ . . . . .	75
2.3.4.3. Anwendung der REDLICH/KWONG-Gleichung zur Volumenberechnung . . . . .	79
2.3.4.4. Anwendung der Zustandsgleichung nach REDLICH/KWONG auf den kritischen Punkt . . . . .	82
2.3.5. Flüssigkeiten . . . . .	83
2.3.6. Überblick über das Phasenübergangs- und Phasengleichgewichtsverhalten . . . . .	84
2.3.6.1. Zustandsdiagramm . . . . .	84
2.3.6.2. Funktionelle Abhängigkeiten . . . . .	85
<b>Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .</b>	<b>88</b>
<b>3. Homogene und heterogene Gemische, Mischphasen . . . . .</b>	<b>90</b>
3.1. Übersicht über die Erscheinungsformen von Mischphasen . . . . .	90
3.2. Größen zur Charakterisierung der Zusammensetzung eines Mischsystems . . . . .	91
3.3. Einfluß der zwischenmolekularen Wechselwirkungen . . . . .	95
3.4. Mittlere und partielle Mischungsfunktionen . . . . .	97
3.5. Ideale und reale Gasmischungen . . . . .	101
3.5.1. Gemische idealer Gase . . . . .	101
3.5.2. Gemische realer Gase . . . . .	103
3.6. GIBBS'sches Phasengesetz . . . . .	105
3.6.1. Empirische Herleitung des Phasengesetzes . . . . .	105
3.6.2. Anwendung auf chemisch reagierende Systeme . . . . .	106
3.6.3. Abhängigkeit der Zahl der Freiheitsgrade von der Komponentenzahl . . . . .	107
<b>Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .</b>	<b>108</b>
3.7. Lösungen von Feststoffen, kolligative Eigenschaften . . . . .	109

3.7.1.	Ideal verdünnte Lösung . . . . .	109
3.7.2.	Dampfdruckerniedrigung . . . . .	110
3.7.3.	Siedepunktserhöhung und Gefrierpunktserniedrigung . . . . .	112
3.7.4.	Osmose . . . . .	115
3.8.	Lösungsgleichgewichte . . . . .	118
3.8.1.	Verteilung von Stoffen zwischen zwei nichtmischbaren Flüssigkeiten . . . . .	118
3.8.2.	Verteilung von Stoffen zwischen Gasphase und Lösung . . . . .	120
3.8.3.	Verteilung eines Stoffes zwischen fester Phase und Lösung . . . . .	123
	Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	124
3.9.	Verhalten der Gemische im gesamten Konzentrationsbereich . . . . .	125
3.9.1.	Vollständige und partielle Mischbarkeit . . . . .	125
3.9.2.	Verdampfungs- und Kondensationsverhalten von Gemischen . . . . .	129
3.9.3.	Ermittlung der Gleichgewichtsdaten Dampf-Flüssigkeit in idealen Systemen . . . . .	132
3.9.3.1.	Anwendung auf vollständig mischbare Systeme . . . . .	132
3.9.3.2.	Isobares Gleichgewichtsdiagramm binärer idealer Systeme, K-Werte und relative Flüchtigkeit . . . . .	137
3.9.3.3.	Idealisierte Systeme mit Mischungslücke . . . . .	139
3.9.4.	Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichtsverhalten realer Systeme . . . . .	142
3.9.5.	Typen von Schmelz- und Erstarrungsdiagrammen . . . . .	144
3.9.5.1.	Systeme mit Mischkristallbildung . . . . .	145
3.9.5.2.	Systeme ohne Mischkristall- und Verbindungsbildung, eutektische Systeme . . . . .	147
3.9.5.3.	Systeme mit Verbindungsbildung, dystektische und peritektische Systeme . . . . .	148
	Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	149
4.	<b>Stoffsysteme mit chemischen Reaktionen, chemisches Gleichgewicht . . . . .</b>	<b>151</b>
4.1.	Charakterisierung von Stoffumwandlungen als Stoffmengenänderungen . . . . .	151
4.2.	Chemisches Gleichgewicht in homogenen Systemen und seine kinetische Interpretation . . . . .	157
4.3.	Besonderheiten heterogener Reaktionsgleichgewichte . . . . .	163
4.4.	Beeinflussung der Gleichgewichtslage . . . . .	164
4.4.1.	Einfluß des Druckes . . . . .	165
4.4.2.	Einfluß der Temperatur . . . . .	167
4.4.3.	Einfluß der Änderung von Komponentenanteilen . . . . .	167
4.5.	Anwendung des Massenwirkungsgesetzes auf die thermische Dissoziation . . . . .	169
	Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	171
5.	<b>Grundlagen der chemischen Thermodynamik . . . . .</b>	<b>173</b>
5.1.	Typen von thermodynamischen Systemen . . . . .	174
5.2.	Erster Hauptsatz der Thermodynamik und seine Anwendung . . . . .	174
5.2.1.	Innere Energie eines geschlossenen Systems . . . . .	175
5.2.2.	Behandlung offener Systeme, Enthalpie und technische Arbeit . . . . .	177

5.2.3.	Energieübergänge bei isothermer Volumen- und Druckänderung . . .	179
5.2.3.1.	Ausdehnung ohne äußere Volumenarbeit . . .	180
5.2.3.2.	Ausdehnung und Kompression mit äußerer Volumenarbeit . . .	181
5.2.3.3.	Ermittlung der technischen Arbeit in einem offenen System . . .	185
5.2.4.	Energieübergänge bei Temperaturänderung . . .	186
5.2.4.1.	Isochore Prozesse . . .	187
5.2.4.2.	Isobare Prozesse . . .	188
5.2.4.3.	Adiabatische Prozesse . . .	191
5.2.5.	Polytrope Prozesse . . .	193
5.2.6.	Ermittlung und molekularkinetische Interpretation der molaren Wärmekapazitäten . . .	195
5.2.6.1.	Gase . . .	195
5.2.6.2.	Flüssigkeiten . . .	198
5.2.6.3.	Feststoffe . . .	198
	Zusammenfassung, Kontrollfragen . . .	199
5.3.	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik und seine Anwendung . . .	200
5.3.1.	Reversible, irreversible und erzwungene Prozesse . . .	200
5.3.2.	Aussagen des Zweiten Hauptsatzes . . .	201
5.3.3.	Einführung der Entropie zur Charakterisierung der Irreversibilität . . .	201
5.3.4.	Statistisch-thermodynamische Deutung der Entropie . . .	203
5.3.5.	Temperatur- und Druckabhängigkeit der Entropie NERNST'Sches Wärmetheorem . . .	204
5.3.6.	Freie Energie, freie Enthalpie und Exergie . . .	207
5.3.6.1.	Gleichgewichtsbedingungen für nichtabgeschlossene Systeme . . .	207
5.3.6.2.	Freie Enthalpie und Affinität . . .	208
5.3.6.3.	Technische Arbeitsfähigkeit, Exergie und Anergie . . .	209
5.3.6.4.	GIBBS/HELMHOLTZ'Sche Gleichungen . . .	210
5.3.6.5.	Thermodynamische Zustandsgleichung . . .	212
5.4.	Anwendung auf Kreisprozesse . . .	212
5.5.	Thermodynamische Zustandsfunktionen in Gemischen, GIBBS/DUHEM'Sche Gleichung . . .	215
5.6.	Thermodynamische Funktionen in chemisch reagierenden Systemen . . .	222
5.6.1.	Thermodynamische Größen eines Reaktionsgemisches und molare Reaktionsgrößen . . .	222
5.6.2.	Molare Bildungsgrößen und ihre Normierung . . .	225
5.6.3.	Reaktionsenthalpie und HESS'Scher Satz . . .	226
5.6.4.	Temperatur- und Druckabhängigkeit der Reaktionsenthalpie und -entropie . . .	227
5.7.	Chemisches Potential . . .	229
5.7.1.	Definition des chemischen Potentials . . .	229
5.7.2.	Chemisches Potential in idealen Gemischen . . .	230
5.7.3.	Chemisches Potential in realen Gemischen . . .	232
	Zusammenfassung, Kontrollfragen . . .	235
5.8.	Thermodynamische Berechnung von Gleichgewichten . . .	236
5.8.1.	Allgemeine Bedingungen für Phasen- und Reaktionsgleichgewichte . . .	237
5.8.2.	Phasengleichgewichte reiner Stoffe, CLAUDIUS/CLAPEYRON'Sche Gleichung . . .	238
5.8.3.	Phasengleichgewichte in Gemischen . . .	241

5.8.3.1. RAOULT/DALTONSches Gesetz für ideale und reale Systeme . . . . .	241
5.8.3.2. Flüssig-Flüssig-Gleichgewichte, NERNSTscher Verteilungssatz . . . . .	243
5.8.3.3. Lösungsgleichgewicht für Feststoffe . . . . .	244
5.8.4. Thermodynamische Basis der kolligativen Eigenschaften . . . . .	245
5.8.5. Reaktionsgleichgewichte . . . . .	247
5.8.5.1. Thermodynamische Ableitung des Massenwirkungsgesetzes . . . . .	247
5.8.5.2. Druckabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten . . . . .	249
5.8.5.3. Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten . . . . .	249
5.8.5.4. Berechnung der Gleichgewichtskonstanten, die ULICHschen Näherungen . . . . .	250
5.8.5.5. Berechnung des Reaktionsgleichgewichtes durch Minimierung der freien Enthalpie des Reaktionssystems . . . . .	252
5.8.5.6. Reversibler Reaktionsablauf, freie Reaktionsenthalpie und maximale Arbeit . . . . .	254
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	256
<b>6. Zeitliche Abhängigkeit von Transportprozessen und chemischen Reaktionen . . . . .</b>	<b>258</b>
6.1. Transportphänomene . . . . .	258
6.1.1. Allgemeiner Zusammenhang zwischen den verschiedenen Transporterscheinungen . . . . .	258
6.1.2. Viskosität . . . . .	260
6.1.2.1. Interpretation der Viskosität . . . . .	260
6.1.2.2. Abhängigkeit der Viskosität von Temperatur und Druck . . . . .	262
6.1.2.3. Viskosität von Gemischen . . . . .	263
6.1.2.4. Viskosität kolloider Lösungen . . . . .	264
6.1.3. Wärmeleitfähigkeit . . . . .	265
6.1.4. Diffusion . . . . .	266
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	268
6.2. Kinetik chemischer Reaktionen . . . . .	269
6.2.1. Reaktionsgeschwindigkeit und Reaktionsordnung . . . . .	270
6.2.1.1. Reaktionen 1. Ordnung . . . . .	270
6.2.1.2. Reaktionen 2. Ordnung . . . . .	273
6.2.1.3. Reaktionen n-ter Ordnung . . . . .	275
6.2.1.4. Simultanreaktionen . . . . .	277
6.2.1.5. Bestimmung von Reaktionsordnung und Geschwindigkeitskonstanten . . . . .	280
6.2.2. Reaktionsmechanismus und Reaktionsmolekularität . . . . .	283
6.2.3. Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit und Konzepte zur Interpretation der Geschwindigkeitskonstanten . . . . .	283
6.2.4. Mechanismus von Kettenreaktionen . . . . .	289
6.2.5. Geschwindigkeit heterogener Reaktionen . . . . .	291
6.2.5.1. Allgemeine Betrachtungen . . . . .	291
6.2.5.2. Einfluß der Diffusion . . . . .	291
6.2.5.3. Einfluß der Adsorption . . . . .	292
6.2.6. Prinzipien der Katalyse . . . . .	293
6.2.6.1. Homogene Katalyse . . . . .	294

6.2.6.2. Heterogene Katalyse . . . . .	296
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	299
<b>7. Vorgänge in elektrochemischen Systemen . . . . .</b>	<b>301</b>
7.1. Elektrische Ladung von Ionen . . . . .	301
7.2. Elektrolytlösungen . . . . .	302
7.2.1. Herstellung und Zusammensetzung wäßriger Elektrolytlösungen . . . . .	302
7.2.2. Lösungen starker und schwacher Elektrolyte . . . . .	305
7.2.3. Kolligative Eigenschaften von Elektrolyten in verdünnten wäßrigen Lösungen . . . . .	308
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	310
7.3. Gleichgewicht in Elektrolytlösungen . . . . .	311
7.3.1. Anwendung des Massenwirkungsgesetzes . . . . .	311
7.3.2. Löslichkeitsgleichgewicht . . . . .	312
7.3.3. Protolysegleichgewichte . . . . .	314
7.3.3.1. Autoprotolyse von Wasser . . . . .	315
7.3.3.2. Protolysegleichgewichte von Säuren und Basen in Wasser . . . . .	316
7.3.3.3. Protolysegleichgewichte in wäßrigen Salzlösungen . . . . .	319
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	323
7.4. Elektrische Leitfähigkeit von Elektrolytlösungen . . . . .	324
7.4.1. Elektrische Leitfähigkeit in wäßrigen Elektrolytlösungen . . . . .	324
7.4.2. Molare Leitfähigkeit und Äquivalentleitfähigkeit . . . . .	326
7.4.3. Ionenwanderung im elektrischen Feld . . . . .	327
7.4.4. Zusammenhang zwischen Ionenwanderung und elektrischer Leitfä- higkeit . . . . .	328
7.4.5. Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Konzentration des Elektrolyten . . . . .	329
7.4.5.1. Starke Elektrolyte . . . . .	330
7.4.5.2. Schwache Elektrolyte . . . . .	331
7.4.6. Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur . . . . .	333
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	335
7.4.7. Ionengrenzleitfähigkeit . . . . .	335
7.4.8. Überführung . . . . .	338
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	341
7.4.9. Messung der elektrischen Leitfähigkeit und ihre Anwendung . . . . .	341
7.4.10. Elektrische Leitfähigkeit in nichtwäßrigen Lösungen . . . . .	343
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	344
7.5. Galvanische Vorgänge . . . . .	344
7.5.1. Bedingungen für den Ablauf galvanischer Vorgänge . . . . .	345
7.5.1.1. Elektrodenpotential und Elektrodenspannung . . . . .	346
7.5.1.2. Elektrochemisches Standardpotential . . . . .	348

7.5.1.3. Spannungsreihe . . . . .	350
7.5.1.4. Aktivitäts- und Temperatureinfluß in der Halbzelle . . . . .	351
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	353
7.5.2. Galvanische Zellen . . . . .	354
7.5.2.1. Aufbau galvanischer Zellen . . . . .	354
7.5.2.2. Zellspannung und EMK . . . . .	355
7.5.2.3. Gleichgewicht der Zellreaktion . . . . .	356
7.5.2.4. Arbeit und Wärme bei Zellreaktionen . . . . .	357
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	359
7.5.3. EMK-Messungen . . . . .	360
7.5.3.1. Elektroden zur EMK-Messung . . . . .	361
7.5.3.2. Einfluß der Ionenbeweglichkeit auf die EMK . . . . .	368
7.5.3.3. Verfahren der EMK-Messung . . . . .	371
7.5.3.4. Anwendung von EMK-Messungen . . . . .	372
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	374
7.6. Elektrochemische Vorgänge . . . . .	375
7.6.1. Ladungs- und Stoffmengenumsatz . . . . .	375
7.6.2. Strom und Spannung in Elektroden . . . . .	377
7.6.2.1. Stromdichte . . . . .	377
7.6.2.2. Elektrodenpotential bei Stromfluß . . . . .	378
7.6.2.3. Arten der Überspannung . . . . .	379
7.6.2.4. Polarisierbare und unpolarisierbare Elektroden . . . . .	382
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	383
7.6.3. Polarisation und Spannung in galvanischen Zellen . . . . .	384
7.6.3.1. Zersetzungsspannung . . . . .	384
7.6.3.2. Irreversible Polarisation . . . . .	386
7.6.3.3. Reversible Polarisation . . . . .	386
7.6.3.4. Zellspannung . . . . .	387
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	388
7.6.4. Anwendung elektrochemischer Prozesse . . . . .	389
7.6.4.1. Elektrolyseprozesse . . . . .	390
7.6.4.2. Coulometrie . . . . .	392
7.6.4.3. Polarographie . . . . .	393
7.6.4.4. Elektroanalytische Titrationsverfahren . . . . .	394
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	395
7.6.5. Elektrochemische Energiequellen . . . . .	396
7.6.5.1. Primärzellen . . . . .	397
7.6.5.2. Sekundärzellen . . . . .	400
7.6.5.3. Brennstoffzellen . . . . .	403
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	406

7.6.6. Korrosion und Passivität . . . . .	406
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	409
<b>8. Erscheinungen an Phasengrenzflächen . . . . .</b>	<b>411</b>
8.1. Oberflächenenergie . . . . .	411
8.1.1. Oberflächenenergie und Oberflächenspannung . . . . .	411
8.1.2. Molare Oberflächenspannung . . . . .	413
8.1.2.1. Temperaturabhängigkeit der molaren Oberflächenspannung . . . . .	413
8.1.3. Oberflächenenergie an gekrümmten Phasengrenzflächen . . . . .	414
8.2. Grenzflächenenergie und Grenzflächenspannung . . . . .	417
8.2.1. Adsorption . . . . .	417
8.2.1.1. Thermodynamische Betrachtung des Adsorptionsgleichgewichtes . . . . .	418
8.2.1.2. Adsorptionsisotherme . . . . .	419
8.2.1.3. Adsorption an festen Adsorbentien . . . . .	422
8.2.2. Grenzflächenspannung im Dreiphasensystem . . . . .	422
8.2.3. Grenzflächenaktive Stoffe . . . . .	423
8.3. Grenzflächenerscheinungen in kolloiden Dispersionen . . . . .	425
8.3.1. Einfluß der Wechselwirkungskräfte . . . . .	426
8.3.2. Koagulation und Koaleszenz . . . . .	427
8.3.3. Stabilisierung kolloider Dispersionen . . . . .	430
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	430
8.4. Grenzflächenreaktionen an Ionenaustauschern . . . . .	432
8.4.1. Aufbau und Wirkungsweise von Ionenaustauschern . . . . .	433
8.4.2. Gleichgewichte in Ionenaustauschern . . . . .	435
8.4.2.1. Austauschgleichgewicht . . . . .	436
8.4.2.2. Sorptionsgleichgewicht . . . . .	438
8.5. Chromatographie . . . . .	439
8.5.1. Aufbau der Trennsysteme . . . . .	439
8.5.2. Trennwirksamkeit chromatographischer Systeme . . . . .	440
8.5.3. Anwendung chromatographischer Methoden und Techniken . . . . .	441
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	445
<b>9. Wechselwirkung zwischen Strahlung und Stoff . . . . .</b>	<b>447</b>
9.1. Ablauf von Prozessen mit Beteiligung von Strahlung . . . . .	447
9.2. Absorption optischer Strahlung . . . . .	448
9.2.1. Grundbegriffe und Grundgesetze . . . . .	448
9.2.2. Anwendungen der Strahlungsmessung . . . . .	450
9.3. Energie optischer Strahlung . . . . .	450
9.3.1. Primärvorgänge . . . . .	452
9.3.2. Sekundärvorgänge . . . . .	452
9.4. Photo- und strahlenchemische Reaktionen . . . . .	455
9.4.1. Quantenausbeute . . . . .	455
9.4.2. Kinetik photo- und strahlenchemischer Reaktionen . . . . .	456
9.4.3. Reaktionstypen . . . . .	457
Zusammenfassung, Kontrollfragen . . . . .	461

<b>Anhang</b> . . . . .	463
<b>Literatur</b> . . . . .	473
<b>Sachwörterverzeichnis</b> . . . . .	475
<b>Beilage: PSE</b>	