

Walter J. Moore

Physikalische Chemie

Vierte, durchgesehene und verbesserte Auflage
bearbeitet von

Dieter O. Hummel

unter Mitwirkung von

G. Trafara und K. Holland-Moritz



Walter de Gruyter
Berlin · New York 1986

Inhalt

Liste der wichtigsten Symbole XXV

1 Physikochemische Systeme

1. Was ist Wissenschaft?	2
2. Das Lehr- und Forschungsgebiet der Physikalischen Chemie	3
3. Mechanik: Die Kraft	4
4. Mechanische Arbeit	5
5. Mechanische Energie	7
6. Gleichgewicht	9
7. Die thermischen Eigenschaften der Materie	11
8. Die Temperatur als mechanische Eigenschaft	13
9. »Springfeder der Luft«, das BOYLESche Gesetz	14
10. Das Gesetz von GAY-LUSSAC	16
11. Definition des Mols	18
12. Zustandsgleichung eines idealen Gases	19
13. Zustandsgleichung und PVT-Beziehungen	20
14. Das PVT-Verhalten realer Gase	24
15. Das Gesetz der korrespondierenden Zustände	25
16. Zustandsgleichungen für reale Gase	27
17. Der kritische Bereich	28
18. Die VAN-DER-WAALssche Gleichung und die Verflüssigung von Gasen	29
19. Andere Zustandsgleichungen	31
20. Mischungen idealer Gase	32
21. Mischungen nichtidealener Gase	34
22. Wärme und Wärmekapazität	35
23. Arbeit bei Veränderung des Volumens (Volumenarbeit)	36
24. Allgemeiner Begriff der Arbeit	39
25. Reversible Vorgänge	39

2 Chemische Energetik; der I. Hauptsatz der Thermodynamik

1. Die Geschichte des I. Hauptsatzes	41
2. Die JOULESchen Arbeiten	43
3. Die Formulierung des I. Hauptsatzes	45
4. Die Natur der inneren Energie	46
5. Adiabatische und isotherme Vorgänge	47
6. Eine mechanische Definition der Wärme	47
7. Eigenschaften vollständiger Differentiale	49
8. Die Enthalpie	50
9. Wärmekapazitäten, ausgedrückt durch U oder H	51
10. Das JOULESche Experiment	52
11. Das JOULE-THOMSONSche Experiment	53
12. Anwendung des I. Hauptsatzes auf ideale Gase	55
13. Rechenbeispiele für ideale Gase	59
14. Thermochemie, Reaktionswärmen	61

15. Bildungswärmen	64
16. Experimentelle Thermochemie	66
17. Wärmeleitungskalorimeter	69
18. Lösungs- und Verdünnungswärmen	71
19. Temperaturabhängigkeit der Reaktionsenthalpie	74
20. Bindungsenthalpien	77
21. Die chemische Affinität	83

3 Entropie und freie Energie; der II. Hauptsatz der Thermodynamik

1. Der CARNOTSche Kreisprozeß	85
2. Der II. Hauptsatz der Thermodynamik	88
3. Die thermodynamische Temperaturskala	89
4. Die CARNOTSche Maschine mit idealem Gas als arbeitendes Medium	92
5. Die Entropie	92
6. Die Kombination des I. und II. Hauptsatzes der Thermodynamik	95
7. Die Ungleichung von CLAUSIUS	96
8. Entropieänderungen in einem idealen Gas	97
9. Entropieänderungen bei Phasenumwandlungen	98
10. Entropieänderungen in isolierten Systemen	100
11. Entropie und Gleichgewicht	103
12. Gleichgewichtsbedingungen für geschlossene Systeme	106
13. Die freie Energie, Gleichgewicht bei konstantem T und V	106
14. Die freie Enthalpie, Gleichgewicht bei konstantem T und P	107
15. Isotherme Änderungen von A und G , maximale Arbeit	108
16. Thermodynamische Potentiale	110
17. LEGENDRE-Transformationen	111
18. Die MAXWELLSchen Beziehungen	114
19. Die Druck- und Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie	114b
20. Druck- und Temperaturabhängigkeit der Entropie	117
21. Anwendungen für thermodynamische Zustandsgleichungen	119
22. Die Annäherung an den absoluten Nullpunkt der Temperatur	120
23. Das NERNSTSche Wärmetheorem	125
24. Erläuterungen des III. Hauptsatzes der Thermodynamik	126
25. Die Bestimmung absoluter Entropien nach dem III. Hauptsatz	128

4 Die kinetische Theorie

1. Atome	131
2. Moleküle	132
3. Die kinetische Theorie der Wärme	134
4. Die Barometerformel	135
5. Die BROWNSche Bewegung, Bestimmung der AVOGADRO-Konstante nach PERRIN	136
6. Der Gasdruck	138
7. Gasmischungen und Partialdrücke	141
8. Kinetische Energie und Temperatur	142
9. Skalare Molekelgeschwindigkeiten	143
10. Molekulare Effusion	144
11. Reale Gase, die VAN-der-WAALssche Gleichung	146
12. Zwischenmolekulare Kräfte, die Zustandsgleichung	147

13. Vektorielle Molekelgeschwindigkeiten	150
14. Wandstöße von Gasmolekeln	152
15. Verteilung der Molekelgeschwindigkeiten	154
16. Eindimensionale Geschwindigkeitsverteilung	159
17. Geschwindigkeitsverteilung in zwei Dimensionen	162
18. Geschwindigkeitsverteilung in drei Dimensionen	163
19. Experimentelle Bestimmung von Molekelgeschwindigkeiten	166
20. Die Gleichverteilung der Energie	167
21. Rotation und Schwingungen zweiatomiger Molekeln	168
22. Innere Freiheitsgrade polyatomiger Molekeln	171
23. Gleichverteilungssatz und Wärmekapazitäten	173
24. Zusammenstöße zwischen Molekeln	174
25. Strenge Ableitung der Stoßhäufigkeit	176
26. Die Viskosität eines Gases	179
27. Kinetische Theorie der Gasviskosität	182
28. Molekeldurchmesser und zwischenmolekulare Wechselwirkungskonstanten	185
29. Wärmeleitfähigkeit	187
30. Diffusion	188
31. Lösungen der Diffusionsgleichung	191

5 Statistische Mechanik

1. Die statistische Methode	195
2. Entropie und Unordnung	196
3. Entropie und Information	200
4. Die STIRLING-Formel für $N!$	202
5. LUDWIG BOLTZMANN	203
6. Definitionen für den Zustand eines Systems	204
7. Gesamtheiten	207
8. LAGRANGE-Multiplikatoren	210
9. Das BOLTZMANNSCHE Verteilungsgesetz	212
10. Statistische Thermodynamik	219
11. Die Entropie in der statistischen Mechanik	223
12. Der III. Hauptsatz in der statistischen Mechanik	225
13. Berechnung von Z für unabhängige Teilchen	228
14. Zustandssumme der Translation	231
15. Zustandssummen für innere Molekularbewegungen (Rotationen und Schwingungen)	233
16. Die klassische Zustandssumme	236

6 Phasengleichgewichte

1. Phasen	238
2. Komponenten	239
3. Freiheiten	241
4. Allgemeine Theorie des Gleichgewichts: Das chemische Potential	243
5. Bedingungen für das Gleichgewicht zwischen Phasen	244
6. Das Phasengesetz	246
7. Das Phasendiagramm für Einkomponentensysteme	248
8. Thermodynamische Analyse eines PT -Diagramms, Ableitung der Gleichung von CLAUSIUS-CLAPEYRON	250

9. Umwandlungen zweiter Art; Helium-I und Helium-II	253
10. Dampfdruck und äußerer Druck	255
11. Statistische Theorie der Phasenumwandlungen	257
12. Umwandlungen in Festkörpern; Der Schwefel	262
13. Untersuchungen bei hohen Drücken	263

7 Lösungen

1. Konzentrationsmaße	269
2. Partielle molare Größen: Partielles Molvolumen	271
3. Aktivitäten und Aktivitätskoeffizienten	274
4. Die Bestimmung partieller molarer Größen	275
5. Die ideale Lösung: Das RAOUULTsche Gesetz	278
6. Thermodynamik idealer Lösungen	281
7. Die Löslichkeit von Gasen und Flüssigkeiten: Das HENRYSche Gesetz	283
8. Mechanismus der Anästhesie	284
9. Zweikomponentensysteme	286
10. Abhängigkeit des Dampfdrucks von der Zusammensetzung eines Systems	287
11. Abhängigkeit der Siede- und Kondensationstemperatur von der Zusammensetzung	289
12. Fraktionierte Destillation	290
13. Flüssige Lösungen von Festkörpern	291
14. Der osmotische Druck	296
15. Osmotischer Druck und Dampfdruck	299
16. Abweichungen vom Idealverhalten	300
17. Siedepunktskurven	302
18. Gegenseitige Löslichkeit von Flüssigkeiten, partielle Mischbarkeit	304
19. Thermodynamische Bedingung für eine Phasentrennung	306
20. Thermodynamik nichtidealiger Lösungen	307
21. Gleichgewichte zwischen flüssiger und zwei festen Phasen: Einfache eutektische Diagramme	309
22. Verbindungsbildung	311
23. Feste Lösungen	314
24. Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	316
25. Statistische Mechanik von Lösungen	318
26. Das Modell von BRAGG-WILLIAMS	322

8 Chemische Affinität

1. Das dynamische Gleichgewicht	326
2. Freie Enthalpie und chemische Affinität	328
3. Standardwerte für freie Reaktionsenthalpien: Normalaffinitäten	330
4. Freie Enthalpie und Gleichgewicht bei Reaktionen idealer Gase	334
5. Die in Konzentrationen ausgedrückte Gleichgewichtskonstante	336
6. Die Messung von Gasgleichgewichten	337
7. Die Druckabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten	339
8. Die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten	342
9. Das Prinzip von LE CHATELIER und BRAUN	345
10. Gleichgewichtskonstanten aus Entropien (nach dem III. Hauptsatz) und Reaktionsenthalpien	346

11. Statistische Thermodynamik der Gleichgewichtskonstanten	347
12. Beispiel einer statistischen Berechnung von K_P	350
13. Gleichgewichte in nichtidealnen Systemen: Fugazität und Aktivität	351
14. Nichtideale Gase: Fugazität und Standardzustand	352
15. Verwendung der Fugazität in Gleichgewichtsberechnungen	356
16. Standardzustände für Komponenten in Lösungen	358
17. Bestimmung der Aktivitäten eines Solvens und eines nichtflüchtigen Solvendums aus dem Dampfdruck einer Lösung	360
18. Gleichgewichtskonstanten in Lösungen	364
19. Thermodynamik biochemischer Reaktionen	366
20. Die freie Bildungsenthalpie biochemischer Stoffe in wässriger Lösung	368
21. Die Druckabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten in Lösungen	372
22. Der Einfluß des Drucks auf die Aktivität von Stoffen in kondensiertem Zustand	374
23. Chemische Gleichgewichte in heterogenen Systemen mit fester Phase	375

9 Die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen

1. Die Geschwindigkeit einer chemischen Veränderung	377
2. Experimentelle Methoden der chemischen Kinetik	379
3. Reaktionsordnung	382
4. Reaktionsmolekularität	385
5. Reaktionsmechanismen	387
6. Gleichungen für Reaktionen erster Ordnung	389
7. Gleichungen für Reaktionen zweiter Ordnung	390
8. Gleichungen für Reaktionen dritter Ordnung	392
9. Die Bestimmung der Reaktionsordnung	393
10. Umkehrbare Reaktionen	396
11. Das Prinzip des »Detailed Balancing«	398
12. Geschwindigkeits- und Gleichgewichtskonstanten	400
13. Aufeinanderfolgende Reaktionen	403
14. Parallelreaktionen	405
15. Kettenreaktionen mit niedermolekularen Produkten	407
16. Erzeugung von Radikalen, Radikalketten	411
17. Kettenverzweigung, Explosionen	414
18. Detonationen, Stoßwellen	417
19. Kettenreaktionen mit makromolekularen Produkten: Polymerisationen	418
20. Dreierstöße	420
21. Messung sehr schneller Reaktionen: Chemische Relaxation, Blitzlicht- und Pulsradiolyse	421
22. Reaktionen in Fließsystemen	429
23. Der stationäre Zustand in Fließsystemen, Dissipationsvorgänge	432
24. Ungleichgewichtsthermodynamik	436
25. Die ONSAGERSche Methode	439
26. Entropieerzeugung in Ungleichgewichtssystemen	442
27. Stationäre Zustände	443
28. Einfluß der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit, die ARRHENIUSsche Aktivierungsenergie	444
29. Stoßtheorie der Gasreaktionen	446
30. Reaktionsgeschwindigkeiten und Reaktionsquerschnitte	450
31. Berechnung von Geschwindigkeitskonstanten aus der Stoßtheorie	452

32. Experimentelle Nachprüfung der einfachen Stoßtheorie (Modell starrer Kugeln)	454
33. Die Reaktion zwischen H-Atomen und H ₂ -Molekülen	457
34. Die Energiefläche für das System H + H ₂	460
35. Die Theorie des aktivierte Komplexes	465
36. Thermodynamisch formulierte Theorie des Übergangszustandes	470
37. Chemische Dynamik, Monte-Carlo-Methoden	473
38. Reaktionen in Molekularstrahlen	475
39. Theorie der unimolekularen Reaktionen	478
40. Reaktionen in Lösung	484
41. Nichtkatalysierte Reaktionen in heterogenen Systemen, Grenzflächenprozesse	487
42. Reaktionen an der Grenzfläche zwischen fester und flüssiger Phase, Kinetik der diffusionskontrollierten Auflösung	488
43. Reaktionen an der Grenzfläche zwischen fester und Gasphase	491
44. Katalyse	493
45. Homogenkatalyse	494
46. Enzymatische Katalyse	496
47. Kinetik der enzymatischen Reaktionen	497
48. Hemmung der enzymatischen Wirkung	502
49. Die Acetylcholinesterase als typisches Beispiel für eine Enzymreaktion	503

10 Elektrochemie I: Ionen

1. Elektrizität	506
2. Die FARADAYSchen Gesetze und das elektrochemische Äquivalent	508
3. Coulometer	510
4. Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit	510
5. Molare Leitfähigkeit	512
6. Die ARRHENIUSSCHE Theorie der elektrolytischen Dissoziation	515
7. Die elektrolytische Dissoziation des Wassers	517
8. Hydrolyse von Salzen, Pufferlösungen	519
9. Löslichkeitskonstante und Löslichkeitsprodukt	521
10. Die Solvatisierung von Ionen	522
11. Überführungszahlen und Beweglichkeiten	524
12. Messung von Überführungszahlen nach HITTORF	525
13. Die Bestimmung von Überführungszahlen aus der Verschiebung von Grenzflächen	526
14. Ergebnisse von Überführungsversuchen	528
15. Beweglichkeiten des solvatisierten Protons und des Hydroxylions	529
16. Diffusion und Ionenbeweglichkeit	531
17. Unzulänglichkeiten der ARRHENIUSSEN Theorie bei starken Elektrolyten	533
18. Aktivitäten und Standardzustände	534
19. Ionenaktivitäten	535
20. Bestimmung der Aktivitätskoeffizienten von Elektrolyten aus der Gefrierpunktserniedrigung	537
21. Die Ionenstärke	538
22. Experimentell bestimmte Aktivitätskoeffizienten	539
23. Einige Grundprinzipien der Elektrostatik	541
24. Die DEBYE-HÜCKEL-Theorie	541
25. Die POISSON-BOLTZMANN-Gleichung	541
26. Das Grenzgesetz von DEBYE-HÜCKEL	551

27. Theorie der Leitfähigkeit	555
28. Ionenassoziation	556
29. Einfluß hoher Feldstärken und hoher Wechselfrequenzen auf die Leitfähigkeit von Elektrolytlösungen	560
30. Kinetik der Ionenreaktionen	562
31. Der Einfluß von Salzen auf die Kinetik von Ionenreaktionen	564
32. Säure-Base-Katalyse (acidalkalische Katalyse)	567
33. Allgemeine Gesichtspunkte der Säure-Base-Katalyse	569

11 Grenzflächen

1. Oberflächen- oder Grenzflächenspannung	573
2. Die Gleichung von YOUNG und LAPLACE	574
3. Mechanische Arbeit in einem Kapillarsystem	575
4. Kapillareffekte	576
5. Erhöhter Dampfdruck kleiner Tröpfchen, die KELVINSche Gleichung	579
6. Die Oberflächenspannung von Lösungen	581
7. Thermodynamik von Grenzflächen; die GIBBSSche Adsorptionsisotherme	583
8. Relative Adsorptionen	585
9. Unlösliche Oberflächenfilme	587
10. Struktur von Oberflächenfilmen	589
11. Dynamische Eigenschaften von Grenzflächen	592
12. Adsorption von Gasen an Festkörpern	594
13. Die LANGMUIRSche Adsorptionsisotherme	597
14. Adsorption an uneinheitlichen Oberflächen	599
15. Grenzflächenkatalyse (heterogene Katalyse)	601
16. Aktivierte Adsorption	603
17. Statistische Mechanik der Adsorption	604
18. Elektrokapillareffekte	611
19. Struktur der elektrischen Doppelschicht	613
20. Elektrokinetische Effekte	617

12 Elektrochemie II: Elektroden und Elektrodenreaktionen

1. Definitionen für Potentiale	621
2. Die Differenz der elektrischen Potentiale (Spannung) einer galvanischen Zelle	624
3. Die elektromotorische Kraft (EMK) und ihre Messung	625
4. Die Polarität einer Elektrode	628
5. Reversible Zellen	629
6. Freie Energie und reversible EMK	630
7. Entropie und Enthalpie von Zellenreaktionen	631
8. Verschiedene Arten von Halbzellen (Elektroden)	632
9. Einteilung elektrochemischer Zellen	634
10. Die Normalspannung (Standard-EMK) von Zellen	635
11. Normalpotentiale (Standard-Elektrodenpotentiale)	637
12. Berechnung der EMK einer Zelle	640
13. Berechnung von Löslichkeitsprodukten	641
14. Standardwerte der Entropie und der freien Enthalpie von Ionen in wäßriger Lösung	642
15. Elektrodenkonzentrationszellen	644
16. Elektrolytkonzentrationszellen	645

17. Nichtosmotisches Membrangleichgewicht	647
18. Osmotische Membrangleichgewichte	649
19. Membranpotentiale bei stationären Zuständen	651
20. Nervenleitfähigkeit	656
21. Elektrodenkinetik	660
22. Polarisation	661
23. Diffusionsüberspannung	662
24. Diffusion ohne stationären Zustand: Polarographie	664
25. Durchtrittsüberspannung	669
26. Kinetik der Entladung von Wasserstoffionen	673
27. Brennstoffzellen	675

13 Teilchen und Wellen

1. Einfache harmonische Bewegung	679
2. Die Wellenbewegung	681
3. Stehende Wellen	683
4. Interferenz und Beugung	688
5. Strahlung eines schwarzen Körpers	689
6. Das Energiequantum	692
7. Das PLANCKSche Strahlungsgesetz	693
8. Der photoelektrische Effekt	694
9. Atomspektroskopie	696
10. Die Deutung von Spektren	699
11. Die Arbeit von BOHR über Atomspektren	700
12. Das BOHRSche Modell am Beispiel des Wasserstoffatoms; Ionisationspotentiale	702
13. Teilchen und Wellen	707
14. Elektronenbeugung	710
15. Die HEISENBERGSche Unschärferelation	711
16. Die Nullpunktssenergie	716
✓ 17. Wellenmechanik, die SCHRÖDINGER-Gleichung	717
18. Interpretation der ψ -Funktionen	719
19. Lösung der SCHRÖDINGER-Gleichung; das freie Teilchen	720
20. Lösung der Wellengleichung: Das Teilchen im Kasten	721
21. Durchdringung eines Potentialwalls	726

14 Quantenmechanik und Atomstruktur

1. Postulate der Quantenmechanik	732
2. Diskussion der Operatoren	733
3. Erweiterung auf drei Dimensionen	735
4. Der harmonische Oszillator	736
5. Wellenfunktionen des harmonischen Oszillators	742
6. Zustandssumme und Thermodynamik des harmonischen Oszillators	743
7. Der starre, zweiatomige Rotator	746
8. Zustandssumme und Thermodynamik des zweiatomigen, starren Rotators	749
9. Das Wasserstoffatom	750
10. Der Drehimpuls	753
11. Drehimpuls und magnetisches Moment	756

12. Die Quantenzahlen	757
13. Die radialen Wellenfunktionen	759
14. Winkelabhängigkeit der Wasserstofforbitale	762
15. Der Elektronenspin	767
16. Spinpostulate	769
17. Das PAULISCHE Ausschließungsprinzip (Pauliverbot)	770
18. Spin-Bahn-Wechselwirkung	772
19. Das Spektrum des Heliums	774
20. Vektormodell des Atoms	778
21. Atomorbitale und Energieniveaus: Die Variationsmethode	782
22. Das Heliumatom	784
23. Schwerere Atome, das selbstkonsistente Feld	786
24. Energieniveaus der Atome, das Periodensystem	790
25. Die Störungstheorie	793
26. Störung eines entarteten Zustandes	795

15 Die chemische Bindung

1. Die Valenztheorie	796
2. Ionische Bindung und Ionenbeziehung	798
3. Das Wasserstoff-Molekelion	800
4. Einfache Variationstheorie des H_2^+ -Molekelions	803
5. Die kovalente Bindung im H_2	807
6. Die Valenz-Bindungs-Methode	812
7. Der Einfluß des Elektronenspins	813
8. Ergebnisse der Methode von HEITLER und LONDON	814
9. Vergleich der MO- und der VB-Methode	816
10. Chemie und Mechanik	817
11. Molekelorbitale für homonukleare zweiatomige Molekeln	819
12. Das Korrelationsdiagramm	823
13. Heteronukleare zweiatomige Molekeln	826
14. Elektronegativität	828
15. Dipolmomente	830
16. Dielektrische Polarisation	831
17. Die induzierte Polarisation (Verschiebungspolarisation)	834
18. Die Bestimmung von Dipolmomenten	835
19. Dipolmomente und Molekelstruktur	839
20. Polyatomige Molekeln	841
21. Bindungsabstände, Bindungswinkel und Elektronendichten	847
22. Elektronenbeugung an Gasen	848
23. Deutung der Elektronenbeugungsdiagramme	853
24. Delokalisierte Molekelorbitale: Das Benzol	854
25. Die Ligandenfeldtheorie	858
26. Andere Symmetrien	861
27. Elektronenüberschußverbindungen	863
28. Die Wasserstoffbrückenbindung	864

16. Symmetrie und Gruppentheorie

1. Symmetrioperationen und Symmetrieelemente	867
2. Kurze Einführung in die gruppentheoretischen Grundlagen	869

3. Molekulare Punktgruppen	872
4. Mathematische Beschreibung von Symmetrieeoperationen	877

17 Molekelspektroskopie

1. Molekelspektren	885
2. Lichtabsorption	888
3. Quantenmechanik der Lichtabsorption	890
4. Die Einsteinkoeffizienten	893
5. Rotationsniveaus, Spektren im fernen Infrarot	896
6. Bestimmung von Kernabständen aus Rotationsspektren	899
7. Rotationsspektren polyatomiger Moleküle	900
8. Mikrowellenspektroskopie	903
9. Innere Rotationen	907
10. Rotationsschwingungsspektren und Schwingungsniveaus	909
11. Rotationsschwingungsspektren zweiatomiger Moleküle	911
12. Schwingungsspektrum des Kohlendioxids	914
13. Laser	916
14. Normalschwingungen (normal modes)	918
15. Molekelsymmetrie und Normalschwingungen	924
16. Ramanspektren	927
17. Die Berechnung von Molekelkonstanten aus spektroskopischen Daten	934
18. Elektronische Bandenspektren	935
19. Angewandte Schwingungsspektroskopie	939

18 Photochemie

1. Definitionen und Mechanismen	948
2. Grundlagen der Photochemie	950
3. Aufteilung der Anregungsenergie in einer Molekel	952
4. Lumineszenz	955
5. Photochemisch ausgelöste Kettenreaktionen	957
6. Photolyse in Flüssigkeiten	959
7. Energieübertragung in kondensierten Systemen	960
8. Photosynthese in Pflanzen (Assimilation)	961

19 Strahlenchemie

1. Einführung	966
2. Arten der Wechselwirkung zwischen ionisierender Strahlung und Materie	967
3. Physikalisch-chemische und chemische Folgeprozesse	970
4. Strahlenchemische Ausbeute und Dosimetrie	971
5. Wasser und wäßrige Lösungen	972
6. Organische Stoffe	975
7. Kettenreaktionen	978

20 Magnetismus und magnetische Resonanzspektroskopie

1. Magnetismus und Elektrizität in Materie	980
2. Phänomenologie des Dia- und Paramagnetismus	983

3. Atomtheoretische Deutung des Dia- und Paramagnetismus	984
4. Kernmomente	987
5. Paramagnetismus der Kerne	988
6. Verhalten eines Kerns im Magnetfeld	989
7. Übergang zum makroskopischen System	991
8. Relaxation und Linienbreite	996
9. Resonanzspektroskopie	998
10. Elektronenspinresonanz (ESR)	1000
11. Kernspinresonanz	1003
12. Hochauflösende Kernspinresonanz	1004
13. Chemische Verschiebung und Spin-Spin-Kopplung	1006
14. Austauschphänomene	1017
15. Mikrostrukturanalyse von Polymeren	1020

21 Der feste Zustand

1. Wachstum und Form der Kristalle	1025
2. Kristallebenen und ihre Orientierung	1028
3. Kristallsysteme	1029
4. Geometrische Gitter und Kristallstrukturen	1030
5. Symmetrieeigenschaften	1031
6. Raumgruppen	1034
7. Kristallographie durch Röntgenbeugungsdiagramme	1036
8. Die BRAGGSche Methode	1037
9. Beweis der BRAGGSchen Beziehungen und ihrer Grundannahme	1039
10. FOURIER-Transformationen und reziproke Gitter	1040
11. Kristallstruktur des NaCl und KCl	1043
12. Die Pulvermethode	1050
13. Die Methode des rotierenden Kristalls	1052
14. Die Bestimmung von Kristallstrukturen	1054
15. FOURIERSynthese einer Kristallstruktur	1058
16. Neutronenbeugung	1061
17. Dichteste Kugelpackungen	1064
18. Bindung in Kristallen	1066
19. Das Bindungsmodell	1067
20. Elektronengastheorie der Metalle	1072
21. Quantenstatistik	1073
22. Die Gitterenergie der Metalle	1075
23. Wellenfunktionen für Elektronen in Festkörpern	1078
24. Halbleiter	1081
25. Dotierung von Halbleitern	1082
26. Nichtstöchiometrische Verbindungen	1084
27. Punktdefekte	1085
28. Lineare Defekte: Versetzungen	1087
29. Auf Versetzungen zurückzuführende Effekte	1089
30. Ionenkristalle	1093
31. Gitterenergie von Ionenkristallen	1096
32. Der BORN-HABERSche Kreisprozeß	1100
33. Statistische Thermodynamik der Kristalle: Das EINSTEINSche Modell	1101
34. Das DEBYESche Modell	1103

22 Zwischenmolekulare Kräfte und der flüssige Zustand

1. Ordnung und Unordnung im flüssigen Zustand	1108
2. Röntgenbeugung von Flüssigkeiten	1109
3. Flüssige Kristalle	1113
4. Gläser	1116
5. Der Schmelzvorgang	1117
6. Kohäsionskräfte in Flüssigkeiten, der Binnendruck	1111
7. Zwischenmolekulare Kräfte	1120
8. Zustandsgleichung und zwischenmolekulare Kräfte	1122
9. Theorie der Flüssigkeiten	1123
10. Fließeigenschaften von Flüssigkeiten	1131

23 Kolloidchemie, Makromoleküle

1. Kolloide	113
2. Kolloidale Verteilungen	113
3. Geschichtliche Entwicklung der Makromolekularchemie	114
4. Polymere, Makromoleküle und Polyreaktionen	114
5. Konfiguration und Konformation	114
6. Die Makromolekel in Lösung	115
7. Mittelwerte des Molekulargewichts	115
8. Der osmotische Druck von Polymerlösungen	115
9. Das RAYLEIGHSche Gesetz der Lichtstreuung	115
10. Lichtstreuung durch Makromoleküle	115
11. Sedimentationsmethoden: Die Ultrazentrifuge	116
12. Viskosität von Polymerlösungen	116
13. Gummielastizität	116
14. Glaszustand	116
15. Kristallinität	116

24 Anhang

1. Internationale physikalische Einheiten (Auszug)	11
2. Physikalische Konstanten in SI-Einheiten	11
3. Definierte Konstanten	11
4. Energieumrechnungsfaktoren	11
5. Umrechnungsfaktoren für Energie/mol oder Energie/Molekel	11
Sachregister	1
Namenregister	1