

PHYSIKALISCHE CHEMIE

Physikalische
Chemie

Physikalische Chemie

Physikalische Chemie Band 1

von

Prof. em. Dr.-Ing. habil., Dr. rer. nat. h. c. Kurt Schwabe
Meinsberg

Mit 229 Abbildungen und 90 Tabellen



Y078813

AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1975

2., unveränderte Auflage

Erschienen im Akademie-Verlag, 108 Berlin, Leipziger Straße 3—4

© Akademie-Verlag, Berlin, 1975

Lizenznummer: 202 · 100/547/75

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 582 Bad Langensalza

EDV-Nummer: 762 153 3 (5656/1) · LSV 1214

Printed in GDR

EVP: 60,—

Kurt Schwabe

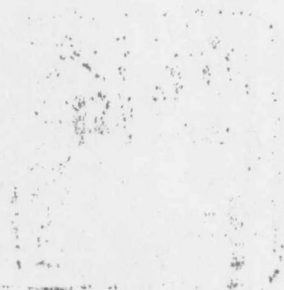
Physikalische Chemie

Physikalische Chemie

Band 1: Physikalische Chemie

Band 2: Elektrochemie

Band 3: Aufgabensammlung



Vorwort

Das vorliegende Buch ist aus einer Vorlesung „Physikalische Chemie“, die der Verfasser seit 1949 an der Technischen Hochschule Dresden, seit 1961 Technische Universität Dresden, für Chemiker und Verfahrenstechniker gehalten hat, und aus den Lehrbriefen für die Fernstudenten dieser Fachrichtungen hervorgegangen. Obwohl die Elektrochemie ein Teilgebiet der physikalischen Chemie darstellt, wurde entsprechend ihrer Bedeutung, die die Elektrochemie an der TH Dresden durch das Wirken von Fritz FOERSTER und Erich MÜLLER erlangt hat, eine getrennte Vorlesung „Elektrochemie“ abgehalten. Daher wird auch dieses Teilgebiet in einem besonderen Band behandelt, wobei aber die thermodynamischen und kinetischen Grundlagen der physikalischen Chemie vorausgesetzt werden.

Über die Frage, ob heute die physikalische Chemie noch als selbständige Lehrdisziplin behandelt werden kann oder ob nicht die gesamte Chemie immer mehr auf die physikalischen Grundlagen zu orientieren ist, so daß anorganische, organische, Biochemie usw. Spezialisierungsrichtungen einer auf physikalischen Grundlagen aufgebauten Chemie (allgemeinen Chemie) darstellen, ist viel diskutiert worden. Eine einheitliche Auffassung existiert offenbar weder international noch in der DDR. Vielfach wird eine elementare physikalische Chemie als allgemeine Chemie (general chemistry) bezeichnet, eine scharfe Abgrenzung läßt sich so natürlich kaum vornehmen. Da der Verfasser grundsätzlich die Verwendung neuer Bezeichnungen für Gebiete und Sachverhalte, die bisher mit geläufigen Namen versehen waren, für unzumutbar und eventuell irreführend ansieht, wurde der Titel „Physikalische Chemie“ gewählt, obwohl das vorliegende Buch nur die Grundlagen der physikalischen Chemie vermitteln kann und für das Studium von wichtigen Teilgebieten auf spezielle Lehrbücher und Monographien in einem Anhang verwiesen werden mußte.

Da sich das Buch in erster Linie an Studierende der Chemie und der Verfahrenstechnik wendet, die später einmal ihre Kenntnisse der physikalischen Chemie in der chemischen und verwandten Industrien anwenden sollen, sind die Gebiete, deren Kenntnis für eine solche Tätigkeit wesentlich erscheint (z. B. physikalisch-chemische Eigenschaften der Stoffe, chemische Thermodynamik) relativ ausführlich behandelt, während die theoretischen Grundlagen der chemischen Bindung, der Molekülstruktur usw. nur sehr elementar dargestellt sind. Von physikalischen Meßmethoden und -verfahren sind im allgemeinen nur die theoretischen Grundlagen angedeutet, sie sind aber nicht näher beschrieben, weil sonst der Umfang des Buches zu stark angeschwollen wäre, das gilt insbesondere für die modernen Methoden zur Untersuchung der Molekülstruktur. Darüber hinaus sind natürlich,

wie bei jedem Lehrbuch, die einzelnen Kapitel entsprechend dem Interessengebiet des Autors verschieden ausführlich.

Zum Verständnis der physikalischen Chemie trägt es ganz wesentlich bei, wenn der Studierende ihre Gesetze auf entsprechende Aufgaben und Beispiele selbst anwendet. Deshalb sind in einem gesonderten kleinen Band „Physikalisch-chemische Rechenaufgaben“ zusammengestellt und entsprechend der Stoffeinteilung des vorliegenden Buches gegliedert, eine Beilage enthält die Lösungen der Aufgaben.

Die Symbole für die verwendeten Größen und ihre Einheiten wurden im allgemeinen nach den IUPAC-Empfehlungen gewählt. Wenn dort Alternativvorschläge gemacht wurden, haben wir das Symbol verwendet, das nach unserer Kenntnis in der Literatur noch am häufigsten zu finden ist. Nur wenn die IUPAC-Vorschläge von der allgemein üblichen Symbolik abweichen und bisher kaum verwendet wurden, haben wir uns nicht danach orientiert; z. B. konnten wir uns nicht entschließen, bei der Temperatur auf die Bezeichnung $^{\circ}\text{K}$ zu verzichten und entsprechend der IUPAC-Empfehlung nur K zu schreiben.

Für Hinweise auf Fehler und Vorschläge zur Verbesserung der Darstellung ist der Verfasser jederzeit dankbar.

Er dankt seinen Mitarbeitern, insbesondere Frau *Dipl.-Chem. Giese*, Herrn Dozenten *Dr. Kammer*, Herrn Dozenten *Dr. Suschke*, Herrn *Dr. Steyer* und Herrn *Dipl.-Phys. Thomsch* für die vielseitige Unterstützung bei der Anfertigung des Manuskripts. Sein Dank gilt auch Herrn *Dipl.-Phys. Scheller* für die Kontrolle der Lösungen von etwa 550 Aufgaben im Band 3 für die Kapitel des 1. und 2. Bandes. Dem Akademie-Verlag ist er für die außerordentliche Geduld, die er bis zur Fertigstellung des Manuskripts aufgebracht hat, sowie für das verständnisvolle Eingehen auf verschiedene Wünsche und die Ausstattung des Buches zu großem Dank verpflichtet.

Dresden, im Sommer 1971

K. Schwabe

Einleitung

Aufgabengebiet und Arbeitsweise

Die physikalische Chemie nimmt — wie ihr Name sagt — eine Mittelstellung zwischen Chemie und Physik ein. Während sich die Physik bekanntlich mit Energieumwandlungen beschäftigt, werden in der Chemie die Umwandlungen der Stoffe erforscht. Eine scharfe Trennung der Naturerscheinungen nach diesen Gesichtspunkten ist natürlich nicht möglich, denn bei vielen Vorgängen treten gleichzeitig Stoff- und Energieumwandlungen auf. Gerade die Wechselwirkungen zwischen solchen Veränderungen stofflicher und energetischer Art sind aber der Hauptgegenstand der physikalischen Chemie.

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, den Stoff der physikalischen Chemie zu behandeln:

Einmal kann das Gebiet von einem mehr physikalischen Standpunkt aus betrachtet werden, das ist die Verfahrensweise der chemischen Physik (EUCKEN, GLASSTONE):

Alle materiellen Umwandlungen sind eine Folge der Energien, die zwischen den Bausteinen der Materie (den Molekülen, Atomen, Elektronen usw.) wirken. Bei genauer Kenntnis der Elementarbausteine der Materie und der Energieverhältnisse müßten sich im Prinzip auch die Eigenschaften und Umwandlungen der sichtbaren Materie (Flüssigkeiten, Kristalle usw.) bestimmen lassen. Bei dieser Betrachtungsweise müßte man von den Elementarbausteinen der Materie ausgehen und daraus immer größere Teilchen aufbauen, bis man schließlich zu makroskopischen Gebilden gelangt. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften dieser Gebilde müßten sich dann aus den Eigenschaften der Elementarbausteine unter Berücksichtigung der Baustruktur ableiten lassen. Danach könnte man z. B. aus den Eigenschaften der Neutronen, Protonen und Elektronen, ihrer Zahl und der Art ihrer Verkoppelung die Eigenschaften eines C-Atoms und schließlich die des Graphitkristalls bestimmen.

Tatsächlich reichen aber unsere heutigen physikalischen Kenntnisse nur in wenigen einfachen Fällen aus, um eine solche Betrachtung vorzunehmen.

Außerdem erfordert die exakte Beschreibung der Eigenschaften der Elementarbausteine und erst recht der Kräfte, die sie aneinander binden, einen großen mathematischen Aufwand und ein erhebliches Maß an Abstraktionsvermögen.

Demgegenüber steht eine zweite Verfahrensweise, die von den makroskopischen Erscheinungsformen der Materie ausgeht, ihre Veränderungen im Zusammenhang mit Energieänderungen (Wärmezufuhr usw.) betrachtet und schneller zu Erkenntnissen führt, die für die Praxis des Chemikers von großem Wert sind. Das ist die Verfahrensweise der sog. klassischen physikalischen Chemie, weil hierbei die chemische Betrachtungsweise im Vordergrund steht. Sie ist von W. Ost-

WALD (1853—1932) angewendet worden; er wird als der Begründer der physikalischen Chemie angesehen¹⁾.

Wir werden im folgenden aus den oben genannten Gründen diese Betrachtungsweise wählen. Das schließt nicht aus, daß wir bei der Untersuchung der makroskopischen Eigenschaften der Materie häufig ihren Aufbau aus Korpuskeln zur Erklärung mit heranziehen und auf die Eigenschaften dieser Korpuskeln kurz eingehen.

Der in diesem Band behandelte Stoff gliedert sich in drei große Abschnitte.

Im ersten,

I. Die stofflichen Zustände der Materie,

werden die allgemeinen Eigenschaften der Stoffe in den drei Aggregatzuständen, insbesondere das Volumen als Funktion von Druck und Temperatur (thermische Zustandsgleichung) dargestellt. Zum Verständnis des makroskopischen Verhaltens werden die Atom- und Molekülstruktur und die zwischenmolekulare Wechselwirkung in den Aggregatzuständen erklärt.

Im zweiten Abschnitt,

II. Chemische Energetik und Gleichgewichtslehre,

werden auf der Grundlage der Hauptsätze der Wärmelehre die bei stofflichen Veränderungen auftretenden Energiebeträge behandelt und die Phasengleichgewichte sowie das chemische Gleichgewicht besprochen. Neben den Methoden der klassischen Thermodynamik²⁾ werden auch die der statistischen Thermodynamik kurz erläutert. Die Wege zur Berechnung der Gleichgewichtskonstanten aus thermodynamischen Größen werden angegeben.

Der dritte Abschnitt,

III. Kinetik,

befaßt sich mit den Erscheinungen, bei denen Geschwindigkeiten als charakteristische Eigenschaften auftreten, während die beiden ersten Kapitel nur zeitinvariante Zustände beschreiben. So werden die Viskosität, die Diffusion, die Kinetik der Phasenumwandlung und vor allem die chemische Kinetik besprochen. Wegen der allgemeinen Bedeutung der Gesetze der „Thermodynamik irreversibler Prozesse“ für all diese Phänomene werden auch ihre Grundlagen kurz dargestellt.

Wegen des Zusammenhangs zwischen chemischer Kinetik und photochemischen sowie strahlenchemischen Prozessen sind zwei Kapitel Photochemie und Radiochemie angefügt.

Der Aufbau der Materie ist demnach nur insoweit behandelt, wie er zum Verständnis des makroskopischen Verhaltens der Stoffe erforderlich ist. Wer sich speziell dafür interessiert, findet ausführliche Darstellungen über dieses und andere Spezialgebiete in den im Anhang genannten Büchern und Monographien.

¹⁾ Bezeichnend für OSTWALDS Auffassung über die physikalische Chemie ist übrigens, daß er die Atomtheorie lange Zeit als unbeweisbar und unwesentlich abgelehnt hat.

²⁾ Treffender vielleicht als „Thermostatik“ bezeichnet (vgl. dazu *Teil III*).

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Teil I

A, a	Arbeit ¹⁾
A_m	maximale Arbeit
A	MADELUNGSche Konstante
a_0	BOHRScher Radius
a, b	Konstanten der VAN-DER-WAALSSchen Gleichung
C_p, c_p	Molwärme, Wärmekapazität bei konstantem Druck ¹⁾
C_v, c_v	Molwärme, Wärmekapazität bei konstantem Volumen ¹⁾
c	Geschwindigkeit
c	Lichtgeschwindigkeit
$\bar{c}$	mittlere Geschwindigkeit
$\bar{c}^2$	mittleres Geschwindigkeitsquadrat
c_B	Litermolarität
$c_{\text{Diff.}}$	Diffusionsgeschwindigkeit
c_h	häufigste Geschwindigkeit
D	Direktionskonstante
D	Diffusionskoeffizient
d	Netzebenenabstand
E	Energie
E_k	kinetische Energie
$\bar{E}_k$	mittlere kinetische Energie eines Moleküls
e_0	elektrische Elementarladung
H, h	Enthalpie ¹⁾
h	Höhe
h	PLANCKSches Wirkungsquantum
J	Trägheitsmoment
J	Impuls
j	Rotationsquantenzahl
K	Kraftkonstante
K_K	kritischer Koeffizient
k	BOLTZMANNsche Konstante
l	Nebenquantenzahl
l	Länge
M	Molmasse

¹⁾ Vgl. Fußnote S. XVIII

XVIII Verzeichnis der verwendeten Symbole

M_i	Molmasse des Stoffes i
$\bar{M}_s$	mittlere Molmasse
m	Masse
m_B	Kilomolarität
m_e	Masse des Elektrons
m_i	Masse des Stoffes i
m_l	Magnetquantenzahl
m_s	Spinquantenzahl
N	Teilchenzahl
1N	Teilchenzahl pro Volumeneinheit
N_0	LOSCHMIDTSche Zahl
N_E	Anzahl der Teilchen mit der Energie E
n	Molzahl
n	Hauptquantenzahl
n_i	Anzahl der Mole des Stoffes i
n_S	Schwingungsquantenzahl
$\mathcal{R}$	Kraft
p	Druck
p_i	Partialdruck der Komponente i
p_k	kritischer Druck
Q, q	Wärmemenge ¹⁾
q_B	Gewichtsverhältnis
R	Gaskonstante
R_H	RYDBERG-Konstante
$R(r)$	Radialverteilungsfunktion
r	Teilchenabstand
r_0	Normalabstand
r_M	Molekülradius
S, s	Entropie ¹⁾
T	absolute Temperatur
T_B	BOYLE-Temperatur
T_{sl}	Schmelztemperatur
T_k	kritische Temperatur
T_{lg}	Siedetemperatur
t	Zeit
U, u	innere Energie ¹⁾
V, v	Volumen ¹⁾
V_0	Molvolumen idealer Gase
V_k	kritisches Molvolumen
$\bar{V}_i$	partiell molares Volumen des Stoffes i ²⁾
v_M	Volumen eines Moleküls
v_k	Volumen der Komponente k
v_s	spezifisches Volumen
v_s	Gesamtvolumen einer Mischung

¹⁾ Molare Größen werden mit großen Buchstaben bezeichnet.

²⁾ Partielle molare Größen werden durch einen Querstrich über dem entsprechenden großen Buchstaben gekennzeichnet.

W	Wahrscheinlichkeit
x_i	Molenbruch der Komponente i
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	Geschwindigkeitskomponenten
Z	Kernladungszahl
$\bar{z}$	Kompressibilitätsfaktor $= \frac{p \cdot V}{RT}$
z	Solvatationszahl
z_+, z_-	Ionenladungszahl
α	Polarisierbarkeit
α	kubischer Ausdehnungskoeffizient
α_l	linearer Ausdehnungskoeffizient
α, β, γ	Winkel einer Elementarzelle
ε	Dielektrizitätskonstante
ε	Energie eines Quants
E	Feldstärke
η	thermodynamischer Wirkungsgrad
Θ	Einfallswinkel (BRAGGSche Reflexionsmethode)
ϑ	Celsiustemperatur
λ	Wellenlänge
μ	reduzierte Masse
μ	Dipolmoment
ν	Frequenz
$\tilde{\nu}$	Wellenzahl
π	osmotischer Druck
π	reduzierter Druck p/p_k
Π	Kohäsionsdruck
ρ	Dichte
ρ_k	kritische Dichte
ρ_m	Dichte der Mischung
τ	Relaxationszeit
τ	reduzierte Temperatur T/T_k
ΦV_i	scheinbares Molvolumen der Komponente i
φ	reduziertes Volumen V/V_k
χ	Kompressibilitätskoeffizient
ψ	Wellenfunktion
ω	Winkelgeschwindigkeit

Teil II

A	Affinität
A	Atommasse
a	Aktivität
b	Adsorbierbarkeit
E_p	potentielle Energie
E_{ig}	molare Siedepunktserhöhung (ebullioskopische Konstante)
E_{el}	molare Gefrierpunktniedrigung (kryoskopische Konstante)

1) vergl. Fußnote S. XVIII.

XX *Verzeichnis der verwendeten Symbole*

el	Index für Elektronenanregungsanteil
F, f	freie Energie ¹⁾
f	Anzahl der Freiheitsgrade
f_c	praktischer Aktivitätskoeffizient für Litermolaritäten
f_m	praktischer Aktivitätskoeffizient für Kilomolaritäten
f_x	rationaler Aktivitätskoeffizient
G, g	freie Enthalpie ¹⁾
g	rationaler osmotischer Koeffizient
g	Index für den gasförmigen Zustand
g_i	statistisches Gewicht
$\bar{I}_i$	relative partielle molare Enthalpie
K_a	Gleichgewichtskonstante bezogen auf Aktivität
K_c	Gleichgewichtskonstante bezogen auf Litermolarität
K_m	Gleichgewichtskonstante bezogen auf Kilomolarität
K_p	Gleichgewichtskonstante bezogen auf Partialdruck
K_x	Gleichgewichtskonstante bezogen auf Molenbruch
k	HENRYScher Lösungskoeffizient
k_0	Temperaturkoeffizient der molaren Oberflächenspannung
K_N	NERNSTscher Verteilungskoeffizient
l	Index für den flüssigen Zustand
L_i, l_i	integrale Lösungswärme ¹⁾
m	Index für maximal
m	Zahl der Mikrozustände
N_0	Anzahl der Moleküle im Grundzustand
N_i	Anzahl der Moleküle mit der Energie i
o	Index unten bei Größe für $T = 0^\circ\text{K}$
o	Index oben für Standardgröße
P_{ch}	Parachor
p_K	negativer dekadischer Logarithmus der Gleichgewichtskonstante
p^*	Fugazität
Q	Verteilungsfunktion
$\bar{Q}_{ad}$	partielle molare Adsorptionswärme
Q_i	partielle molare Mischungswärme
Q_{lg}	molare Verdampfungswärme
Q_{sg}	molare Sublimationswärme
Q_{sl}	molare Schmelzwärme
q_{lg}^s	spezifische Verdampfungswärme
q_{sl}^s	spezifische Schmelzwärme
R	Index für Rotationsanteil
rev	Index für reversibel
S	Index für Schwingungsanteil
S	Oberfläche
s	Index für festen Zustand
T_0	Normaltemperatur $298,16^\circ\text{K}$ (25°C)
Tr	Index für Translationsanteil
T_{lg}	Siedetemperatur

¹⁾ Vgl. Fußnote S. XVIII

T_{sl}	Schmelztemperatur
u	Zahl der Atome eines Moleküls
W_{Ad}	Adhäsionsarbeit
W_K	Kohäsionsarbeit
W_p	molare Reaktionswärme bei konstantem Druck
W_v	molare Reaktionswärme bei konstantem Volumen
$W_{pfT_{AB}}^0 \equiv H_{fT_{AB}}^0$	Standardbildungsenthalpie der Verbindung AB bei der Temperatur T
x, y, z	Indizes für Raumrichtungen
z	Anzahl der Zellen
ε_i	Energieüberschuß
Θ	charakteristische Temperatur
ϑ	Rand- oder Benetzungswinkel
μ	differentieller JOULE-THOMSON-Koeffizient
μ_i	chemisches Potential der Komponente i
σ	Symmetriezahl
σ	Oberflächenspannung
$\bar{\sigma}_i$	partielle molare Oberflächenspannung des Stoffes i
Φ	molarer osmotischer Koeffizient
φ	Fugazitätskoeffizient

Teil III

c_{AK}	Konzentration des Zwischenstoffes
c_i	Konzentration des Stoffes i
c_i^0	Konzentration des Stoffes i vor der Reaktion
c_K	Katalysatorkonzentration
E_A	Aktivierungsenergie
H	magnetische Feldstärke
H^*	Aktivierungsenthalpie
I	Lichtintensität
i	Stromstärke
J_D	Teilchenstrom
J_i	allgemeiner Strom
K	Katalysenkonstante
K	Gleichgewichtskonstante
k	Geschwindigkeitskonstante
k, k'	Extinktionskoeffizienten
k_n	Geschwindigkeitskonstante einer Reaktion n -ter Ordnung ($n = 0, 1, 2, \dots$)
k_{-n}	Geschwindigkeitskonstante einer Rückreaktion n -ter Ordnung ($n = 0, 1, 2, \dots$)
k_r	Geschwindigkeitskonstante einer katalysierten Reaktion
k_u	Geschwindigkeitskonstante einer unkatalysierten Reaktion
L_{ij}	phänomenologischer Koeffizient
q	Trennfaktor
q	Querschnitt
R_D	Diffusionswiderstand
r	Reaktionsgeschwindigkeit

XXII *Verzeichnis der verwendeten Symbole*

r	Teilchenradius
S	Oberfläche
S^*	Aktivierungsentropie
s	Sedimentationskoeffizient
u	Strömungsgeschwindigkeit
v	Reaktionsgeschwindigkeit
v_K	Reaktionsgeschwindigkeit einer katalysierten Reaktion
X_i	allgemeine Kraft der Sorte i
x	umgesetzte Menge
δ	Dicke der Diffusionsschicht
ε	molarer Extinktionskoeffizient
$\varepsilon_{\text{phot}}$	Energie eines Photons
η	Viskositätskoeffizient
Θ	Herstellungstemperatur eines Kontaktes
λ	Dialysenkoeffizient
$\tau_{1/2}$	Halbwertszeit
Φ	Dissipationsfunktion
Φ	Quantenausbeute
φ	elektrisches Potential
φ	Drehwinkel
α	Jahr
d	Tag
E_b	Bindungsanteil der Elektronen
f	Kraftkonstante
I_d	Strahlungsintensität nach Durchstrahlung einer Schicht der Dicke d
I_0	Intensität der ungeschwächten Strahlung
M_m	magnetisches Moment pro ml
n	Neutron
p	Proton
α	radioaktive Strahlung bestehend aus Heliumkernen
β	radioaktive Strahlung bestehend aus Elektronen
γ	radioaktive Strahlung bestehend aus elektromagnetischen Wellen
μ_n	permanentes magnetisches Moment
σ	Einfangquerschnitt
χ_M	molare Suszeptibilität

Inhalt

Einleitung	XV
Verzeichnis der verwendeten Symbole	XVII
Teil I: Die stofflichen Zustände der Materie	1
<i>Abschnitt A: Reine Stoffe</i>	1
1. Allgemeine Grundlagen und Definitionen	1
1.1. Zähl- und Meßgrößen	1
1.2. Zustandsgrößen	2
1.3. Die thermische Zustandsgleichung	2
2. Ideale Gase, empirische Betrachtung	6
2.1. BOYLE-MARIOTTESches Gesetz	6
2.2. Anwendung des BOYLE-MARIOTTESchen Gesetzes	8
2.3. GAY-LUSSACsches Gesetz	10
2.4. Definition der idealen gasthermometrischen Temperaturskala	13
2.5. AVOGADROScher Satz	15
2.6. Allgemeine Zustandsgleichung der idealen Gase	17
2.7. Zahlenwert der Gaskonstanten	18
2.8. Bestimmung der Molmasse	19
3. Ideale Gase, kinetische Betrachtung	22
3.1. Voraussetzungen für die Aufstellung einer kinetischen Theorie	22
3.2. Quantitative Schlußfolgerungen	24
3.3. Molekülgeschwindigkeit	28
3.4. Mittlere freie Weglänge	32
3.5. Regellose Geschwindigkeitsverteilung	34
4. Reale Gase und Flüssigkeiten, empirische Betrachtung	43
4.1. Abweichungen vom BOYLE-MARIOTTESchen Gesetz	43
4.2. VAN DER WAALSSche Gleichung	45
4.3. Analyse und physikalische Deutung der VAN DER WAALSSchen Gleichung	47
4.4. Kritische Daten	49
4.5. Berechnung der VAN DER WAALSSchen Konstanten aus den kritischen Daten	51
4.6. Andere Zustandsgleichungen	54
4.7. Reduzierte Zustandsgleichungen und das Theorem der übereinstimmenden Zustände	55

5.	Reale Gase und Flüssigkeiten, kinetische Betrachtung	60
5.1.	Kohäsionsdruck	60
5.2.	Volumenkorrektur b	62
5.3.	Wechselwirkungsenergie und VAN-DER-WAALS-Konstante a . .	64
5.4.	Natur der Wechselwirkungskräfte	67
6.	Der feste Zustand	72
6.1.	Allgemeine Eigenschaften des festen Körpers	72
6.2.	Idealer Festkörper	73
6.3.	Volumenänderung der festen Körper bei höheren Temperaturen	76
6.4.	Kinetische Behandlung des festen Körpers.	79
6.5.	Thermische Ausdehnung der festen Körper	81
6.6.	Berechnung der Schwingungsfrequenz der Teilchen aus der Kompressibilität des festen Körpers	82
7.	Atom- und Molekülstruktur	86
7.1.	Einführung	86
7.2.	Wasserstoff und wasserstoffähnliche Atome	94
7.3.	Elektronenenergie und chemische Bindung	106
7.4.	Ionenbindung	106
7.5.	Kovalente Bindung	109
7.6.	LCAO-Methode	111
7.7.	Die Anwendung der MO-Methode auf H_2 und mehratomige Moleküle	114
7.8.	Bindungen zwischen verschiedenen Atomkernen	116
7.9.	Doppelbindungen und konjugierte Systeme	120
7.10.	Einsame Elektronenpaare und Wasserstoffbrückenbindung . .	124
7.11.	Komplexverbindungen	126
7.12.	Zwischenmolekulare Bindungen	127
7.13.	Atomspektren	128
7.14.	Molekülspektren	130
7.14.1.	Rotationsspektren	131
7.14.2.	Rotations-Schwingungsspektren	133
8.	Bindungszustände im festen Körper und Kristallstruktur . .	135
8.1.	Bindungsverhältnisse im Festkörper	135
8.2.	Gitterenergie von Ionenkristallen	136
8.3.	Kovalente Gitter	137
8.4.	Metallische Bindung	138
8.5.	Energiebändermodell	140
8.6.	Eigenschaften des festen Körpers in Abhängigkeit von seinen Gitterstörungen	143
8.7.	Kristallsysteme	147
8.8.	MILLERSche Indizes	148
8.9.	Erzeugung von Röntgenstrahlen	149
8.10.	Kristallstrukturuntersuchungen mit Hilfe der BRAGGSchen Reflexionsmethode	150
8.11.	Anwendung der BRAGGSchen Methode zur Untersuchung kubi- scher Gitter	153
8.12.	DEBYE-SCHERRER-Verfahren	158
	<i>Abschnitt B: Mischphasen</i>	<i>160</i>
9.	Gasmischungen	160
9.1.	Verallgemeinerung des idealen Gasgesetzes	160
9.2.	Messung von Partialdrücken	162