

Inhaltsverzeichnis

1	Thermodynamik der Mischungen und Mischphasengleichgewichte	1
1.1	Das chemische Potential als partielle molare Größe der thermodynamischen Potentiale	1
1.2	Phasen- und Phasengrenzflächengleichgewichte in heterogenen Systemen . . .	5
1.3	Das chemische Potential in Mischphasen	10
1.4	Exzessgrößen und partielle molare Größen in Mischungen	16
1.5	Allgemeines Verfahren zur Berechnung von Fugazitäten	21
1.6	Fugazitätskoeffizienten in fluiden Mischungen für die v. d. Waals-Gleichung . .	24
1.7	Dampf-Flüssigkeits-Phasengleichgewichte binärer Nichtelektrolytmischungen .	27
1.8	Das Henry'sche Grenzgesetz	34
1.9	Azeotropie in binären Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichten	37
1.10	Flüssig-Flüssig-Phasengleichgewicht in binären Mischungen	41
1.11	Stoffbilanz binärer Mischungen im 2-Phasengleichgewicht - Das Hebelgesetz .	51
1.12	Dampfdruckdiagramme flüssiger Mischungen mit Mischungslücken	54
1.13	Fest-Flüssig-Phasengleichgewichte	56
1.14	Löslichkeit schwerflüchtiger Feststoffe in überkritischen Fluiden	67
1.15	Osmotisches Gleichgewicht	71
1.16	Ternäre und quaternäre Phasengleichgewichte – Verteilungsgleichgewichte . .	73
1.17	Thermodynamische Theorie der Chromatographie	78
1.18	Verallgemeinerte Theorie der chemischen Potentiale flüssiger Mischungen . .	85
1.19	Thermodynamik von Grenzflächen und Nanopartikeln	92
1.19.1	Die Gibbs-Duhem-Gleichung für Grenzflächenphasen – Grenzflächen- spannung und Gibbs'sche Adsorptionsisotherme	92
1.19.2	Kapillarität	96
1.19.3	Thermodynamik und Stabilität kleiner Flüssigkeitstropfen	98
1.19.4	Schmelzverhalten von Nanopartikeln	102
1.20	Aufgaben zu Kapitel 1	104
1.20.1	Dissipierte Arbeit und Entropieproduktion beim Mischen fluider Stoffe .	104
1.20.2	Zusammensetzung von „Methanseen“ auf dem Saturnmond Titan . . .	106
1.20.3	Berechnung der Höhe der Phasengrenze bei einer Flüssig-Flüssig-Ent- mischung im Standzylinder	107
1.20.4	Molare Exzessenthalpie der realen Gasmischung Trimethylamin + Me- thanol	109
1.20.5	Berechnung von kritischen Entmischungstemperaturen	110

1.20.6	Fugazitätskoeffizient eines v. d. Waals-Fluides am kritischen Punkt . .	110
1.20.7	Fugazitätskoeffizienten in multinären realen Gasmischungen nach der. v. d. Waals-Theorie	110
1.20.8	Exzessgrößen der flüssigen Mischung Ar + CH ₄	111
1.20.9	Voraussage einer oberen kritischen Entmischungstemperatur der flüssi- gen Mischung Xe + CF ₄ bei erhöhtem Druck	112
1.20.10	Druck- und Temperaturabhängigkeit des Nernst'schen Verteilungskoeff- fizienten eines Alkohols zwischen Heptan und DMSO	113
1.20.11	Ableitung der Definition des molaren Exzessvolumens aus der Gibbs- Duhem-Gleichung	115
1.20.12	Anwendungen der Gefrierpunktniedrigung	116
1.20.13	Bestimmung der Summenformel von molekularem Schwefel aus der Siedepunkterhöhung von CS ₂	117
1.20.14	Konzentrationsausgleich durch Dialyse	118
1.20.15	Ein gasosmotischer Entmischungsprozess	119
1.20.16	Berechnung der Temperaturabhängigkeit von V^E aus der Druckabhän- gigkeit von H^E am Beispiel Isopropanol + Heptan	121
1.20.17	Thermodynamik der „Taucherkrankheit“	122
1.20.18	Fugazitätskoeffizient in unendlicher Verdünnung von Dimethylether in CO ₂	122
1.20.19	Künstliche Beatmung in perfluorierten Kohlenwasserstoffen	123
1.20.20	Beispiel für die Berechnung des Aktivitätskoeffizienten γ_2 aus γ_1 in ei- ner binären flüssigen Mischung	124
1.20.21	Aktivitätskoeffizienten einer flüssigen Mischung von Metallen am eu- tektischen Punkt	124
1.20.22	Schmelzenthalpie und Schmelzentropie von Phenantren und Anthrazen aus Löslichkeitsdaten in Benzol	125
1.20.23	Berechnung des Verteilungskoeffizienten und der theoretischen Boden- zahl aus Retentionszeiten in der Gas-Flüssig-Chromatographie	126
1.20.24	Auflösung chromatographischer Peaks	126
1.20.25	Temperaturabhängigkeit azeotroper Punkte	127
1.20.26	Zusammensetzung und Molzahlbilanz von flüssigen Mischungen am eu- tektischen Punkt	128
1.20.27	Freie molare Exzessenthalpie \bar{G}^E und obere kritische Entmischungstem- peratur nach van Laar	129
1.20.28	Aktivitätskoeffizienten am azeotropen Punkt	130
1.20.29	Azeotroper Punkt eines Kühlmittelgemisches	132
1.20.30	Lösungsenthalpien von Gasen in Wasser	132
1.20.31	Integrale Verdünnungsenthalpie einer Polymerlösung	133
1.20.32	Alternative Schreibweise des chemischen Potentials nach der FH- Theorie für binäre Mischungen	134
1.20.33	Berechnung partieller molarer Volumina aus dem molaren Volumen ei- nes ternären Gemisches	135
1.20.34	Seifenblasen	136
1.21	Weiterführende Beispiele und Anwendungen zu Kapitel 1	137

1.21.1	Nachweis der Äquivalenz verschiedener Formeln für den Fugazitätskoeffizienten einer Mischungskomponente	137
1.21.2	Erniedrigung des thermodynamischen Wirkungsgrades von Kraftwerken bei CO ₂ -Entsorgung durch das CCS-Verfahren	138
1.21.3	Die Osmose als irreversibler Prozess (Pfeffer'sche Zelle)	140
1.21.4	Modellierung der Gelpermeationschromatographie (GPC)	143
1.21.5	Bioakkumulation von Schadstoffen in der Nahrungskette	145
1.21.6	Thermodynamik und Ökonomie beim Recycling von Schadstoffen und Wertstoffe	147
1.21.7	Umkehrosmose	150
1.21.8	Ermittlung von Aktivitätskoeffizienten in binären flüssigen Mischungen aus Dampfdruckmessungen (Barker-Verfahren)	152
1.21.9	Ein Konsistenztest für Messdaten binärer Dampf- Flüssigkeitsgleichgewichte	154
1.21.10	Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewicht des ternären Systems CH ₄ + N ₂ + C ₂ H ₆ bei 93 K als Modell der Titan-Atmosphäre	155
1.21.11	Mischungsenthalpien aus der Temperaturabhängigkeit von Aktivitätskoeffizienten	158
1.21.12	Einstufige Destillation binärer Gemische	159
1.21.13	Die Rektifikation als thermisches Trennverfahren	161
1.21.14	Optimierung der Extraktion von gelösten Schadstoffen aus wässrigen Lösungen	164
1.21.15	Zonenschmelzen	166
1.21.16	Hochdruckphasengleichgewichte fluider Mischungen.	169
1.21.17	Simulation von flüssigen Mischungslücken mit getrenntem oberen und unteren Entmischungsbereich	173
1.21.18	Berechnung eines binären Fest-Flüssig-Phasengleichgewichtes mit vollständiger Mischbarkeit in der festen Phase	173
1.21.19	Thermodynamik der Funktionsweise moderner Energiesparlampen	175
1.21.20	Flüssig-Flüssig-Entmischung von binären Systemen mit Molekülen unterschiedlicher Größe (Polymermischungen)	179
1.21.21	Superfluidchromatographie und die Bestimmung partieller molarer Volumina in komprimierten überkritischen Mischungen	182
1.21.22	Fest-Flüssig Phasengleichgewichte von Polymer-Lösemittel-Mischungen mit Eutektikum	184
1.21.23	Kondensation kleiner Nebeltropfen	186
1.21.24	Exzessenthalpie eines ternären Systems	187
1.21.25	Der Wasserläufer – ein Grenzflächenphänomen aus dem Tierreich	188
1.21.26	Auftrennung flüssiger Mischungen durch Pervaporation	192
2	Chemische Reaktionsgleichgewichte	196
2.1	Chemische Gleichgewichtsbedingungen	196
2.2	Homogene chemische Gleichgewichte in der idealen Gasphase	198
2.3	Temperaturabhängigkeit idealer Gasgleichgewichte	204

2.4	Homogene chemische Gleichgewichte in realen fluiden Systemen	209
2.5	Temperatur- und Druckabhängigkeit chemischer Gleichgewichtskonstanten . .	214
2.6	Gekoppelte chemische und biochemische Reaktionsgleichgewichte	217
2.7	Komplexe chemische Gleichgewichte in der homogenen Phase	221
2.7.1	Multiisomerengleichgewichte	221
2.7.2	Ligandenbindung an Makromolekülen	223
2.7.3	Kettenassoziationsgleichgewichte	226
2.8	Heterogene chemische Gleichgewichte	231
2.9	Anwendungsbeispiele und Aufgaben zu Kapitel 2	240
2.9.1	Chemisches Gleichgewicht als Kreisprozess. Der van't Hoff'sche „Reaktionskasten“	240
2.9.2	Chemische Gleichgewichte in nahekritischen Lösemitteln	243
2.9.3	Gleichgewicht der Mizellenbildung in Lösungen	244
2.9.4	Kooperatives chemisches Gleichgewicht am Beispiel des Sauerstoffspeichers Hämoglobin	246
2.9.5	Reversible isotherme Volumenarbeit eines dissoziierenden Gases . . .	248
2.9.6	Modellierung eines Vulkanausbruches	251
2.9.7	Vergleich experimenteller und vorausberechneter Konzentrationen des Moleküls COS in der Venusatmosphäre	252
2.9.8	Ist eine künstliche Biosphäre auf dem Mars möglich?	254
2.9.9	Molwärme eines chemischen Systems im Reaktionsgleichgewicht . . .	255
2.9.10	Energiespeicherung und Energienutzung durch chemische Gleichgewichtsprozesse. Das Beispiel $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2 \text{H}_2 + \text{CO}$	257
2.9.11	Ein einfaches Modell der Proteinumwandlung von der Helixform zur Knäulform	260
2.9.12	Peptid-Synthese bei höheren Temperaturen. Ein Beitrag zur Theorie der Entstehung des Lebens auf der Erde	263
2.9.13	Metallurgische Prozesse. Metallverhüttung	267
2.9.14	Solarthermische Wasserspaltung mit Hilfe von reaktiven Metalloxiden .	269
2.9.15	Thermodynamik der Produktion wichtiger Werkstoffe: Silizium und Titan	273
2.9.16	Herstellung von hochreinem ZnO für grüne Leuchtdioden	277
2.9.17	Die Auflösung von Gold in „Königswasser“	278
2.9.18	Adsorptionsisothermen und Adsorptionsenthalpien reiner Gase und Gas-mischungen	279
2.9.19	Vergiftung durch Kohlenmonoxid	283
2.9.20	Die Wasserstoffexplosion im Kernreaktor von Fukushima	284
2.9.21	Zwei Beispiele für kooperative und antikooperative molekulare Kettenassoziation	286
2.9.22	Isomeriegleichgewichte in verschiedenen Lösemitteln	289
2.9.23	Chemische Verschiebung des ^1H -NMR-Signals von OH-Protonen in Alkoholen. Das Alkohol-Thermometer in der NMR-Spektroskopie	291
2.9.24	Dissoziation der Ameisensäure im gesättigten Dampf	294
2.10	Übungsaufgaben zu Kapitel 2	296
2.10.1	Die Reaktion $\text{SF}_6 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{SO}_3 + 6 \text{HF}$	296

2.10.2	Bestimmung von K_p und $\Delta_R \overline{G}^0$ für $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2 \text{HI}$ aus Messdaten . . .	297
2.10.3	Reaktive Mischungszusammensetzung bei der Ethanol-Synthese aus Ethylen und Wasser	297
2.10.4	Synthesegleichgewicht von HCN aus N_2 und C_2H_2 unter idealen und realen Bedingungen	298
2.10.5	Chemischer Zerfall von Ameisensäure	301
2.10.6	Druckabhängigkeit und Reaktionsvolumen des Assoziationsgleichgewichtes von Dinitrophenol und Triethylamin in Chlorbenzol als Lösemittel	303
2.10.7	Chemische Gleichgewichtszusammensetzung der 4 Isomere von C_8H_{10} in der Dampfphase	304
2.10.8	Mittlere Kettenlänge von Benzylalkohol in Nitrobenzol aus Messungen der Gefrierpunktserniedrigung	305
2.10.9	Verteilungsgleichgewicht eines assoziierenden Stoffes zwischen 2 flüssigen Phasen	305
2.10.10	Heterogenes chemisches Gleichgewicht mit Interhalogenverbindungen	307
2.10.11	Gekoppeltes Gleichgewicht: Dehydrierungsreaktionen in Alkangemischen	309
2.10.12	Eine heterogenes chemisches Gleichgewichtssystem mit 4 Komponenten und 3 Phasen	312
2.10.13	Dampfdruckkurve und Dissoziation von Ammoniumchlorid und Ammoniumjodid	312
2.10.14	Bestimmung von $\Delta_R \overline{G}$ und $\Delta_R \overline{H}$ der Gasreaktion $\text{Br}_2 + 2 \text{NO} \rightleftharpoons 2 \text{NOBr}$ aus Druckmessungen	316
2.10.15	Thermodynamik der katalytischen Reinigung von Fahrzeugabgasen . .	319
2.10.16	Biothermodynamik anaerober bakterieller Prozesse	320
2.10.17	Aktiver Stofftransport von Glucose in der Niere durch chemische ATP-Spaltung	322
2.10.18	Deuterium-Verteilung im Gleichgewicht einer Mischung von $\text{H}_2\text{O} + \text{HDO} + \text{D}_2\text{O}$	323
2.10.19	Exzessenthalpie der Mischung einer kettenassoziiierenden mit einer nicht assoziierenden Flüssigkeit	325
2.10.20	Darstellung chemischer Gleichgewichte im Gibbs'schen Dreieck . . .	327
3	Thermodynamik der Elektrolytlösungen	329
3.1	Bezugszustand des chemischen Potentials in der Molalitätsskala	329
3.2	Das elektrochemische Potential von Einzelionen	330
3.3	Ionenladungsverteilung und elektrochemisches Potential von Einzelionen . . .	332
3.4	Aktivitäten und Aktivitätskoeffizienten von Einzelionen	334
3.5	Aktivitätskoeffizienten in Elektrolytlösungen aus Dampfdruckmessungen . . .	336
3.6	Aktivitätskoeffizienten in Elektrolytlösungen aus osmotischen Druckmessungen	337
3.7	Modell für Aktivitätskoeffizienten in Elektrolytlösungen nach Debye und Hückel	339
3.8	Thermodynamische Standardzustände in Elektrolytlösungen	346

3.9	Autoprotolyse des Wassers und Dissoziationsgleichgewichte	348
3.10	Titrationenkurven und Pufferkapazität	357
3.11	Amphotere Elektrolyte	360
3.12	Ionenkomplexgleichgewichte	364
3.13	Löslichkeit fester Elektrolyte – Das Löslichkeitsprodukt	369
3.14	Der Donnan-Effekt und der kolloidosmotische Druck	375
3.15	Übungsaufgaben zu Kapitel 3	379
3.15.1	Der pH-Wert von Wasser bei 80° C	379
3.15.2	Simultane Löslichkeit von CaF_2 und MgF_2	379
3.15.3	Das Wärmekissen – ein Beispiel für Salzlösungen als Wärmespeicher	380
3.15.4	Bestimmung des pK_S -Wertes von 2,4-Dinitrophenol	383
3.15.5	Modellierung des Dampfdruckdiagramms der flüssigen Mischung H_2O + HNO_3	384
3.15.6	Aktivitätskoeffizienten von Elektrolyten und pK_S -Werte in nichtwässrigen Lösemitteln	387
3.15.7	Aktivitätskoeffizienten und osmotische Koeffizienten in gemischten Elektrolytlösungen. Beispiel: Meerwasser	389
3.15.8	Abhängigkeit der Löslichkeit von AgCl von der Fremdsalzkonzentration	390
3.15.9	Enzymatische Desaminierung der Asparaginsäure in einer pH-Pufferlösung	391
3.15.10	Metallkomplexgleichgewichte mit Kronenethern	393
3.15.11	Ableitung des osmotischen Koeffizienten nach der erweiterten Debye-Hückel-Theorie	395
3.15.12	Aktivitätskoeffizienten einer Elektrolytlösung aus Messungen von osmotischen Koeffizienten	396
3.15.13	Berechnung von Löslichkeitsprodukten aus bekannten Standardgrößen	397
3.15.14	Berechnung des Henry-Koeffizienten von H_2S in Wasser aus $\Delta^\text{f}G$ - Werten von H_2S (g), HS^- (aq) und dem pK_S -Wert von H_2S	398
3.15.15	Löslichkeit von Blei in salinen Gewässern	399
3.15.16	Elektrolytaktivitäten in Nitrobenzol als Lösemittel	401
3.15.17	Chemisches Gleichgewicht von Quecksilber und seinen Ionen in wässriger Lösung	401
3.15.18	Dissoziationsgrad und pH-Wert einer Mischung von 2 mittelstarken Säuren	402
3.15.19	Mikroben im Toten Meer – Lebenskünstler unter extremen Bedingungen	403
3.16	Anwendungsbeispiele und Aufgaben zu Kapitel 3	404
3.16.1	pH-Abhängigkeit der Löslichkeit sauer oder basisch reagierender Gase	404
3.16.2	Titrationenkalorimetrie zur simultanen Bestimmung von chemischen Gleichgewichtskonstanten und Reaktionsenthalpien	406
3.16.3	Wie entstehen Tropfsteinhöhlen?	410
3.16.4	Isopiestic Messmethode zur Bestimmung von Aktivitätskoeffizienten und osmotischen Koeffizienten in Elektrolytlösungen	413
3.16.5	Warum enthält die Erdatmosphäre so wenig CO_2 ?	415

3.16.6	Temperaturmaximum der Protolyse von Essigsäure in Wasser	417
3.16.7	Kalkabscheidung in heißen Thermalquellen	418
3.16.8	Eine Methode zur Lithium-Gewinnung aus natürlichen Salzseen	419
3.16.9	Bestimmung von K_c für das chemische Gleichgewicht $I^- + I_2 \rightleftharpoons I_3^-$ in wässriger Lösung aus Messung des Verteilungsgleichgewichtes zwi- schen CS_2 und H_2O	422
3.16.10	Ein thermodynamisches Modell zur Entstehung von Karies	424
3.16.11	Eisenanreicherung in Bakterien durch Siderophore	426
4	Grundlagen der Elektrochemie im thermodynamischen und stationären Gleichgewicht	429
4.1	Elektrochemische Thermodynamik	429
4.1.1	Phasengrenzflächen elektrisch leitender Systeme und Galvani- spannungen	429
4.1.2	Elektrochemisches Gleichgewicht, Standardelektrodenpotentiale und gal- vanische Zellen	434
4.1.3	Temperatur und Druckabhängigkeit elektrochemischer Zellspannungen	443
4.1.4	Thermodynamische Standardgrößen von Ionen und Ionenreaktionen in wässriger Lösung	446
4.2	Anwendungen galvanischer Zellen im stromlosen Zustand	447
4.2.1	Gassensoren am Beispiel der Lambda-Sonde	447
4.2.2	Die pH-Glaselektrode als Beispiel für eine ionenselektive Elektrode	449
4.2.3	Potentiometrische Titration	451
4.2.4	Elektrochemische Messungen von Aktivitätskoeffizienten	453
4.2.5	Elektrokapillarität	457
4.3	Stationäre elektrochemische Systeme	460
4.3.1	Thermodynamik galvanischer Zellen im Batteriebetrieb	460
4.3.2	Entropieproduktion beim Lade- und Entladeprozess von Batterien	464
4.3.3	Der Bleiakкумулятор	466
4.3.4	Beispiele für moderne Batteriesysteme: Die Zink/Luft-Batterie, die Nickel/Cadmium-Batterie, die Li-Ionen-Batterie	470
4.3.5	Redox-Flow-Batterien	476
4.3.6	Brennstoffzellen und Wasserhydrolyse	481
4.3.7	Elektrochemische Aluminiumsynthese	485
4.3.8	Die Chlor-Alkali-Elektrolyse	488
4.4	Ionentransport in elektrochemischen Zellen	493
4.4.1	Stefan-Maxwell-Beziehungen. Stationäre Diffusion und elektrische Leit- fähigkeit	493
4.4.2	Die Nernst-Planck'sche Transportgleichung	498
4.4.3	Diffusionspotentiale in Elektrolytlösungen galvanischer Zellen mit Diaphragma-Separatoren	500
4.4.4	Ionentauschermaterial und das Donnanpotential bei Ionentauschermem- branen	503

4.4.5	Inneres Membranpotential. Selektivität von Ionentauschermembranen bei elektrischem Stromfluss	507
4.4.6	Biologische Membranen. Die Na/K-Pumpe	511
4.4.7	Elektrodialyse	516
4.5	Anwendungsbeispiele und Aufgaben zu Kapitel 4	522
4.5.1	Bestimmung des Löslichkeitsproduktes von AgCl aus EMK-Messungen	522
4.5.2	Thermospannung und Thermoelemente	523
4.5.3	Radionuklid-Batterien	524
4.5.4	Das Weston-Element als Standardspannungsquelle	526
4.5.5	Galvanische Vergoldung im Altertum	528
4.5.6	Elektrochemische Oberflächenreinigung von Silber	529
4.5.7	Wie hängt die Gleichgewichtsspannung vom Ladezustand einer Li-Ionen-Batterie ab?	531
4.5.8	Thermodynamischer Konsistenztest an einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie	533
4.5.9	Alternative Brennstoffzellen	534
4.5.10	Temperaturabhängigkeit der Zellspannung des Bleiakkumulators	536
4.5.11	Korrosion und Korrosionsschutz	537
5	Thermodynamik in äußeren Kraftfeldern	542
5.1	Elektrische Felder	542
5.1.1	Der Begriff der Arbeit in dielektrischer Materie – Dielektrische Suszeptibilität	542
5.1.2	Thermodynamische Zustandsgrößen dielektrischer Materie im homogenen elektrischen Feld	544
5.1.3	Elektrostriktion	549
5.1.4	Dielektrische Polarisierung fluider Materie in elektrischen Wechselfeldern	553
5.1.5	Dielektrische Energieabsorption in polarer fluider Materie	556
5.2	Magnetische Felder	558
5.2.1	Thermodynamische Zustandsgrößen in Magnetfeldern. Magnetische Suszeptibilität	558
5.2.2	Paramagnetische, ferromagnetische und antiferromagnetische Materialien	561
5.2.3	Adiabatische Entmagnetisierung zur Erzeugung tiefster Temperaturen	564
5.2.4	Thermodynamik der elektrischen Supraleitung in Magnetfeldern und Beispiele für Phasenübergänge erster und zweiter Ordnung	565
5.3	Planetare Gravitationsfelder	577
5.3.1	Das gravitationschemische Potential	577
5.3.2	Adiabatisches Verhalten dichter fluider Materie im Inneren von Planeten	580
5.3.3	Adiabatisches bzw. polytropes Verhalten idealer Gasatmosphären	583
5.3.4	Die Atmosphäre der Venus	586
5.3.5	Mögliche chemische Reaktionsgleichgewichte in Planetenatmosphären	587

5.3.6	Dichte- und Druckverlauf im Inneren der Erde	589
5.3.7	Fluide Mischungen im isothermen Gravitationsfeld	591
5.3.8	Thermodynamik in den äußeren Schichten der großen Gasplaneten am Beispiel des Jupiter	594
5.3.9	Thermodynamik und innere Struktur der „Eismonde“ des Jupiters und Saturns	598
5.4	Bildung und Thermodynamik stabiler Sterne	604
5.4.1	Das Jeans-Kriterium	604
5.4.2	Stationäre Struktur nicht brennender Sterne – Die Lane-Emden-Gleichung	607
5.4.3	Sterne mit Strahlungsenergietransport – Das Standardmodell von Eddington	611
5.4.4	Allgemeine zeitliche Entwicklung nicht brennender Sternen in der prä-nuklearen Kontraktionsphase	618
5.4.5	Stabilitätskriterium für den konvektiven Energietransport	623
5.4.6	Sterne im Stadium des nuklearen Wasserstoffbrennens	629
5.4.7	Entropiebilanz kontrahierender Sterne	634
5.5	Zentrifugalfelder	636
5.5.1	Thermodynamik fluider Mischungen in rotierenden Systemen	636
5.5.2	Phasentrennung realer flüssiger Mischungen in zylindrischen Zentrifugen	640
5.5.3	Polymerlösungen in der Ultrazentrifuge	642
5.5.4	Zentrifugalchromatographie (centrifugal partition chromatography = CPC)	645
5.5.5	Zentrifugalkraft und Grenzflächenspannung am Beispiel eines rotierenden Tropfens	650
5.5.6	Die rotierende Flüssigkeit im Schwerfeld der Erde	653
5.6	Anwendungsbeispiele und Aufgaben zu Kapitel 5	654
5.6.1	Konsistenztests thermodynamischer Größen im \vec{E} -Feld	654
5.6.2	Relaxationszeit einer dipolaren Flüssigkeit	655
5.6.3	Kondensation von Wasserdampf an elektrisch geladenen atmosphärischen Staubeilchen	655
5.6.4	Aufheizung einer dipolaren Flüssigkeit im Mikrowellenofen	657
5.6.5	Berechnung der magnetischen Volumenssuszeptibilität	657
5.6.6	Die „Gouy-Waage“ zur Messung magnetischer Suszeptibilitäten	658
5.6.7	Kondensation von gasförmigem Sauerstoff durch Magnetostriktion	659
5.6.8	Die korrekte Behandlung thermodynamischer Eigenschaften paramagnetischer Materie	662
5.6.9	Koexistenzkurve und Sprung der Molwärme beim Phasenübergang in Supraleitern	668
5.6.10	Der Übergang von der polytropen zur isothermen Atmosphäre eines idealen Gases als Grenzwertproblem	670
5.6.11	Die isotherme v.d. Waals-Atmosphäre	671
5.6.12	Eine stationäre Messstation in der Venusatmosphäre	672
5.6.13	Höhenkorrektur beim Ablesen eines Barometers	674

5.6.14	Wolkenbildung in der Jupiteratmosphäre	674
5.6.15	Gibt es eine obere Grenze der adiabatischen Atmosphäre?	676
5.6.16	Die ideale adiabatische Planetenatmosphäre als Grenzfall der realen van der Waals-Atmosphäre	677
5.6.17	Anomale Wärmeproduktion im Eismond Enceladus	678
5.6.18	Der Einfluss gelöster Stoffe auf die Dicke der Wasser- und Eisschicht am Beispiel des Saturnmondes Titan	679
5.6.19	Warum hat die Erde einen festen inneren Kern?	680
5.6.20	Analytische Lösungen der Lane-Emden-Gleichung	682
5.6.21	Dichteverlauf einer binären flüssigen Mischung im Gravitationsfeld der Erde	683
5.6.22	Isotopenmischung $^{12}\text{CH}_4$ / $^{14}\text{CH}_4$ in der Gaszentrifuge	684
5.6.23	Die Mischung Hexan + Squalan in der Ultrazentrifuge	686
A	Tabellen: Thermodynamische Stoffdaten (Auswahl)	689
A.1	Siedetemperaturen und kritische Daten	689
A.2	Molwärmen	690
A.3	Thermodynamische Standardbildungsgrößen	691
A.4	SI-Einheiten physikalischer Größen und Fundamentalkonstanten	702
B	Thermodynamisches Verhalten am oberen und unteren kritischen Entmischungspunkt	705
C	Druckabhängigkeit des kritischen Punktes bei flüssigen Entmischungen	708
D	Thermodynamische Stabilität chemischer Reaktionsgleichgewichte	710
E	Beweis der Gleichheit des chemischen Potentials von Gesamtelektrolyt	713
F	Gauß'scher Satz und Poissongleichung	714
G	Eine phänomenologische Ableitung der Debye-Hückel-Theorie für Elektrolyte	718
H	Herleitung des Einzelionen-Aktivitätskoeffizienten nach der Debye-Hückel-Theorie	723
I	Konzentrationsverteilung von Elektrolyten in der diffusen Grenzschicht	727
J	Differentialgleichungen für koexistierende Phasen – Die Gibbs-Konovalov- Beziehungen	730

K	Allgemeines Lösungsverfahren für inhomogene Differentialgleichungen . . .	737
L	Das Virial-Theorem	741
M	Stationäre Wärmeleitung bei Anwesenheit interner Wärmequellen	743
N	Potentielle Gravitationsenergie einer stellaren Gaskugel mit dem Adiabatenindex n	745
O	Ergänzende und weiterführende Literatur	748
	Sachverzeichnis	755

Thermodynamik der Mischungen
Mischphasen, Grenzflächen, Reaktionen,
Elektrochemie, äußere Kraftfelder

Heintz, A.

2017, XXI, 770 S. 313 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-49923-8