

Laura Sigg
Werner Stumm
Aquatische Chemie

Einführung
in die Chemie
natürlicher
Gewässer

v/dlf

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Inhalt

1 Einführung in die chemische Zusammensetzung natürlicher Gewässer	19
1.1 Gewässer als Ökosysteme	19
1.2 Globaler Wasserkreislauf	20
1.3 Chemische Prozesse in den Gewässern	21
1.3.1 Verwitterungsprozesse	22
1.3.2 Austausch zwischen Atmosphäre und Wasser	23
1.3.3 Wechselwirkungen zwischen Organismen und Wasser	24
1.3.4 Anthropogene Einträge in Gewässer	27
1.4 Typische Zusammensetzung verschiedener Gewässer	28
1.5 Wasser und seine einzigartigen Eigenschaften	31
Aquoionen	33
1.6 Wichtige Reaktionstypen in Gewässern	34
Literatur	35
Lehrbücher	35
Weiterführende Literatur	35
Übungen	37
Anhang Kapitel 1: Einheiten und Konstanten	38
Tab. A.1: Konzentrationseinheiten	38
Tab. A.2: Internationale Einheiten für physikalische Quantitäten	39
SI-Präfixe für Einheiten	40
Tab. A.3: Nützliche Umrechnungsfaktoren	40
Tab. A.4: Wichtige Konstanten	41
2 Säuren und Basen	43
2.1 Einleitung	43
2.2 Säure-Base-Theorie	44

2.3	<i>Die Stärke einer Säure oder Base</i>	46
2.3.1	Aciditätskonstante.....	46
2.3.2	Selbstionisation des Wassers.....	47
2.3.3	„Zusammengesetzte“ Aciditätskonstante	49
2.4	<i>Konzentrationen der einzelnen Spezies als Funktion des pH</i>	51
2.5	<i>Gleichgewichtsberechnungen</i>	52
2.5.1	Vorgehen beim Lösen von Gleichgewichtsproblemen	52
	Protonen-Balance anstelle der Ladungsbalance.....	55
2.5.2	Tableaux	55
	Beispiel 2.1: pH einer starken Säure	58
2.6	<i>pH als Mastervariable: grafische Lösung von Gleichgewichtsproblemen</i>	60
2.6.1	Einprotonige Säure	60
2.6.2	Zweiprotonige Säure.....	64
2.6.3	Weitere Rechnungsbeispiele	65
	Beispiel 2.2: Essigsäure bei verschiedenen Konzentrationen	65
	Beispiel 2.3: Ampholyt als Puffersystem: Hydrogenphthalat	67
	Beispiel 2.4: Mischung von Säure und konjugierter Base.....	69
	Beispiel 2.5: Ammoniak-Konzentration in Gewässern	70
2.7	<i>Säure-Base-Titrationskurven</i>	71
2.7.1	Titration einer einprotonigen Säure	71
2.7.2	Titration von multiprotonigen Säuren und Basen	73
2.7.3	Pufferintensität.....	73
2.8	<i>Säure- und Basen-Neutralisierungskapazität</i>	75
2.9	<i>pH- und Aktivitätskonventionen</i>	75
2.9.1	Referenz- und Standardzustände.....	76
2.9.2	pH-Skalen	78
2.9.3	Aktivitätskoeffizienten	78
2.9.4	Aciditätskonstanten, Gleichgewichtskonstanten	80
2.10	<i>Saure atmosphärische Niederschläge</i>	81
2.10.1	Zusammensetzung des Regenwassers	81
	Beispiel 2.6: pH im Regenwasser.....	83
2.10.2	Nebel.....	84
2.10.3	Saure atmosphärische Depositionen und Auswirkungen der Luftschadstoffe auf terrestrische und aquatische Ökosysteme.....	86
	<i>Weitergehende Literatur</i>	87
	<i>Übungen</i>	87

3	Carbonatgleichgewichte	91
3.1	<i>Carbonatgleichgewichte als Puffersystem der Gewässer.....</i>	91
3.2	<i>Offenes und geschlossenes Carbonatsystem; Modellsysteme</i>	93
3.2.1	Das offene System – Wasser im Gleichgewicht mit dem CO ₂ der Gasphase	94
	Modell für Regenwasser	94
	Konstruktion der Abbildung 3.2	96
	Tableau	97
3.2.2	Die Auflösung von CaCO ₃ (s)(Calcit) im offenen System:	98
	Modell für See- und Flusswasser	98
3.2.3	Grundwasser: erhöhter CO ₂ -Partialdruck.....	100
3.2.4	Vergleich mit der Zusammensetzung natürlicher Gewässer.....	101
3.2.5	Das geschlossene Carbonatsystem.....	103
	Konstruktion eines doppelt-logarithmischen Gleichgewichts- Diagramms für ein 10 ⁻³ M-Carbonatsystem.....	104
	Tableau für NaHCO ₃ -Lösung.....	106
3.3	<i>Alkalinität und Acidität</i>	106
3.3.1	Definitionen der Alkalinität und Acidität	106
3.3.2	Alternative Definition der Alkalinität.....	108
3.3.3	Einfluss von Fotosynthese und Respiration auf pH und Alkalinität	109
	Beispiel 3.1	109
3.3.4	Alkalinität im Ozean und p _{CO2} -Zunahme.....	110
3.4	<i>Pufferintensität des Carbonatsystems</i>	111
3.5	<i>Analytische Bestimmung der Alkalinität und der Acidität</i>	113
3.5.1	Bestimmung der Alkalinität	113
3.5.2	Bestimmung der Acidität.....	116
3.5.3	Potenziometrische und spektrophotometrische Methoden der Bestimmung von pH	118
	<i>Weiterführende Literatur</i>	119
	<i>Übungen</i>	120
4	Wechselwirkung Wasser–Atmosphäre	123
4.1	<i>Einleitung.....</i>	123
4.2	<i>Einfache Gas/Wasser-Gleichgewichte; Bedeutung in der Chemie des Wolkenwassers, des Regens und des Nebelwassers</i>	126
4.2.1	Offenes und geschlossenes System mit Gasphase und Wasser.....	126

	Beispiel 4.1: Geschlossenes System – Auflösung von Wasserstoffperoxid und von Ozon.....	128
	Beispiel 4.2: Geschlossenes System – Auflösung von HCl	129
4.2.2	Verteilung von SO ₂ zwischen Gasphase und Wasser.....	130
	Beispiel 4.3: Löslichkeit von SO ₂ in Gegenwart von Formaldehyd	135
4.2.3	Verteilung von NH ₃ zwischen Gasphase und Wasser.....	136
4.2.4	Auswaschung von Schadstoffen aus der Atmosphäre	140
4.3	<i>Die Genese eines Nebeltröpfchens</i>	142
	SO ₂ - und NH ₃ -Absorption	143
4.4	<i>Aerosole</i>	147
	Die Bildung von Sulfat- und Nitrataerosolen	147
	Beispiel 4.4: Auflösung von Aerosolen im Nebelwasser	149
4.5	<i>Ansäuerung und Erholung von Gewässern</i>	149
4.5.1	Effekte der sauren Niederschläge auf Gewässer	149
4.5.2	Ökologische Auswirkungen	151
4.5.3	Erholung saurer Gewässer durch Verminderung der sauren Einträge	152
	<i>Weiterführende Literatur</i>	153
	<i>Übungen</i>	154
5	Anwendung thermodynamischer Daten und kinetischer Grundlagen .	157
5.1	<i>Thermodynamische Daten</i>	157
5.2	<i>Freie Reaktionsenthalpie, chemisches Potenzial und chemisches Gleichgewicht</i>	157
	Beispiel 5.1: Berechnung der freien Reaktionsenthalpie ΔG^0 und der Gleichgewichtskonstante.....	162
	Beispiel 5.2: Vergleich des Reaktionsquotienten mit der Gleichgewichtskonstante (Q/K).....	163
5.3	<i>Umrechnung von Gleichgewichtskonstanten auf andere Temperaturen und Drucke</i>	164
5.3.1	Temperaturabhängigkeit.....	164
	Beispiel 5.3: K _{s0} von Calcit in Funktion der Temperatur.....	164
5.3.2	Druckabhängigkeit.....	165
5.4	<i>Kinetische Grundlagen</i>	165
5.4.1	Die Reaktionsgeschwindigkeit.....	167
5.4.2	Einfache Zeitgesetze für homogene Reaktionen	167

5.4.3	Prozesse in der Umwelt.....	169
	Anwendungsbeispiele.....	170
5.5	<i>Elementarreaktionen</i>	171
5.5.1	Zeitgesetze für einfache Elementarreaktionen.....	171
5.5.2	Konsekutive reversible Reaktionen.....	172
5.5.3	Konsekutive irreversible Reaktionen.....	172
5.5.4	Steady-State-Annahme.....	173
5.5.5	Enzym-Katalyse.....	174
	Beispiel 5.4: Bestimmung von K_m und v_{max} für Enzyme in Algen.....	176
5.5.6	Temperaturabhängigkeit.....	176
	Beispiel 5.5: Bestimmung der Aktivierungsenergie für die Reaktion von HSO_3^- mit H_2O_2	177
	Beispiel 5.6: Radioaktive Elemente als kinetische Hilfsmittel bei der Altersbestimmung.....	178
5.7	<i>Theorie des Übergangszustandes; der aktivierte Komplex</i>	179
5.8	<i>Fallbeispiel: Die Hydratisierung des CO_2</i>	181
5.9	<i>Fallbeispiel: Kinetik der Absorption von CO_2;</i> <i>Gas-Transfer Atmosphäre–Wasser</i>	184
	Beispiel 5.7: Gasaustausch mit Oberflächenwasser.....	185
	Beispiel 5.8: CO_2 -Transfer bei der pH-Erhöhung durch Fotosynthese Chemische Beschleunigung des CO_2 -Transfers.....	187
	<i>Weiterführende Literatur</i>	188
	Allgemeine Lehrbücher.....	188
	Anwendungen auf aquatische Systeme.....	188
	Datensammlungen.....	188
	<i>Übungen</i>	189
6	Metallionen in wässriger Lösung	191
6.1	<i>Einleitung</i>	191
	Speziierung.....	191
6.2	<i>Koordinationschemie und ihre Bedeutung für die Speziierung der Metallionen in natürlichen Gewässern</i>	192
6.2.1	Einteilung der Metallionen.....	192
6.2.2	Hydrolyse und die Bildung schwer löslicher Oxide und Hydroxide.....	193
	Beispiel 6.1: Hydrolyse von Al^{3+} ohne Bildung eines festen Hydroxids.....	195

Beispiel 6.2: Hydrolyse und Löslichkeit von Al^{3+} in Gegenwart von festem Aluminiumhydroxid $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$	196
6.2.3 Komplexbildung mit anorganischen und organischen Liganden in Lösung	197
6.3 Gleichgewichtsberechnungen der Spezierung von Metallionen	199
6.3.1 Vorgehen zur Berechnung von Komplexbildungsgleichgewichten.....	199
6.3.2 Beispiele für Berechnungen.....	200
Beispiel 6.3: Anorganische Spezierung von $\text{Cu}(\text{II})$	200
Beispiel 6.4: Spezierung von $\text{Cu}(\text{II})$ in Anwesenheit eines organischen Komplexbildners.....	203
Beispiel 6.5: Bindung von Ca^{2+} und Cu^{2+} durch NTA	204
6.3.3 Berechnungen mit Computerprogrammen	205
6.4 Einfache Modelle der Spezierung von Metallen in natürlichen Gewässern.....	206
Einfaches anorganisches Modell	206
6.5 Komplexbildung mit Humin- und Fulvinsäuren.....	209
6.6 Komplexbildung mit Kolloiden und Partikeln	214
6.7 Löslichkeit von Metallen	214
6.8 Kinetik der Komplexbildung.....	214
Beispiel 6.6: Kinetik der Komplexbildung von $\text{Co}(\text{II})$ mit F^-	216
Beispiel 6.7: Kinetik der Dissoziation stabiler Komplexe.....	218
6.9 Spezierung und analytische Bestimmung	218
6.10 Wechselwirkungen von Metallen mit Algen.....	220
6.10.1 Essenzielle und toxische Spurenmetalle	220
6.10.2 Modelle für die Metallaufnahme in Algen	221
6.10.3 Metallpuffer als Kulturmedien	223
6.10.4 Metallaufnahme in Periphyton	225
Weiterführende Literatur.....	226
Übungen	226
7 Fällung und Auflösung fester Phasen.....	231
7.1 Fällung und Auflösung fester Phasen als Mechanismus zur Regulierung der Zusammensetzung natürlicher Gewässer.....	231
Beispiel 7.1: Chemische Verwitterungsrate und Gewässerzusammensetzung.....	232
Löslichkeitsgleichgewicht.....	233

7.2	<i>Löslichkeitsgleichgewichte von Hydroxiden</i>	234
	Löslichkeit von $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ (Ferrihydrit) in Funktion des pH.....	235
7.3	<i>Löslichkeitsgleichgewichte von Carbonaten</i>	236
7.3.1	Löslichkeit von $\text{CaCO}_3(\text{s})$ im geschlossenen System ohne Gasphase	237
7.3.2	Löslichkeit von $\text{CaCO}_3(\text{s})$ und anderen Carbonaten im Gleichgewicht mit p_{CO_2}	239
7.3.3	Löslichkeit von Carbonaten im geschlossenen System mit $C_T = \text{konstant}$	241
7.4.	<i>Löslichkeit von Sulfiden</i>	242
7.5	<i>Löslichkeit von SiO_2 und Silikaten</i>	244
7.5.1	Löslichkeit von $\text{SiO}_2(\text{s})$	244
7.5.2	Löslichkeit von Kaolinit	245
7.5.3	Löslichkeit und Stabilität im System K-Feldspat / Muskovit / Kaolinit ..	246
7.5.4	Löslichkeit von Albit als Funktion des p_{CO_2}	248
7.6	<i>Abhängigkeit der Löslichkeit von Temperatur, Ionenstärke, Druck, Grösse der Partikel</i>	249
	Beispiel 7.2: Löslichkeit von $\text{CaCO}_3(\text{s})$ und von $\text{SiO}_2(\text{s})$ in Funktion der Temperatur	250
7.7	<i>Welche feste Phase kontrolliert die Löslichkeit?</i>	250
7.7.1	Löslichkeit und Stabilität verschiedener fester Phasen	250
	Beispiel 7.3: Stabilität von $\text{FeS}(\text{s})$ oder $\text{FeCO}_3(\text{s})$ in Gegenwart von Sulfid	252
	Beispiel 7.4: Löslichkeit von Cu in Gegenwart von Carbonat.....	255
7.7.2	Komponenten, Phasen und Freiheitsgrade	258
	Beispiel 7.5: Koexistenz verschiedener Phasen	259
7.8	<i>Sind feste Phasen im Löslichkeitsgleichgewicht?</i>	260
	Gleichgewichtskohlensäure, Sättigungs-pH und Sättigungs-Indizes ...	260
	Beispiel 7.6: Überprüfung der Sättigung mit Calciumcarbonat in einem Grundwasser.....	262
7.9	<i>Kinetik der Nukleierung und Auflösung fester Phase</i>	263
7.9.1	Theorie des Kristallwachstums	263
7.9.2	Nukleierung.....	265
7.9.3	Wachstumskinetik.....	265
7.9.4	Auflösungskinetik.....	267
	<i>Weiterführende Literatur</i>	267
	<i>Übungen</i>	267

8	Redoxprozesse	269
8.1	Einleitung	269
8.2	Definitionen – Oxidation und Reduktion	270
8.2.1	Oxidation und Reduktion	270
	Beispiel 8.1: Redox-Stöchiometrie	270
8.2.2	Die Oxidationszahl	271
8.3	Der globale Elektronenkreislauf (Fotosynthese, Respiration)	272
8.4	Redox-Gleichgewichte und Redoxintensität	274
8.4.1	Redoxintensität und Redoxpotenzial	275
	Beispiel 8.2: $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	277
8.4.2	Einfluss der Spezierung	278
8.5	Einfache Berechnungen von Redoxgleichgewichten	279
8.5.1	Doppeltlogarithmisches Diagramm	279
	Beispiel 8.3: $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	279
	Beispiel 8.4: $\text{SO}_4^{2-}/\text{HS}^-$	281
	Beispiel 8.5: Einfache p_E -(E_H)-Rechnungen	282
	Beispiel 8.6: Cl-Spezies	284
8.5.2	p_E -pH-Diagramme	286
8.5.3	Redox-Puffer	287
	Beispiel 8.7: p_E /pH-Diagramm für Fe, CO_2 , H_2O	288
8.6	Durch Mikroorganismen katalysierte Redoxprozesse	292
8.6.1	Sequenz der Redoxreaktionen unter dem Einfluss der Mikroorganismen	292
	i) Denitrifikation	294
	ii) Reduktion von Mangan- und Eisenoxiden	295
	iii) Sulfatreduktion	295
	iv) Methanbildung	296
	v) Fermentationsreaktionen	296
8.6.2	Oxidationsreaktionen durch Mikroorganismen	297
8.6.3	Einfluss von Redoxreaktionen auf Säure-Base-Verhältnisse	298
8.7	Kinetik von Redoxprozessen	298
8.7.1	Oxidation von Fe(II) zu Fe(III) durch O_2	298
8.7.2	Oxidation von Mn(II)	303
8.7.3	Oxidation von Schwefelwasserstoff mit Sauerstoff	304
	Beispiel 8.8: $k_{(S-II)}$ und Halbwertszeit von H_2S mit O_2 bei pH 7	305
8.8	Oxidation durch Sauerstoff	306
8.8.1	Thermodynamische Parameter der Sauerstoffreaktionen	306

8.8.2	Wasserstoffperoxid H_2O_2	307
8.8.3	Die Ein-Elektronenschritte bei der Reduktion von O_2	308
8.8.4	Das Fenton-Reagens.....	309
8.8.5	Singulett-Sauerstoff.....	309
8.8.6	Kann die Redox-Reaktivität mit Hilfe der Thermodynamik abgeschätzt werden?.....	309
8.9	<i>Fotochemische Redoxprozesse</i>	311
8.9.1	Fotochemische Reaktionen in Gewässern.....	311
8.9.2	Lichtabsorption.....	313
8.9.3	Indirekte fotochemische Umwandlungen: Produktion von reaktiven Sauerstoffspezies.....	314
8.9.4	Direkte fotochemische Umwandlungen.....	317
8.9.5	Eisenredoxkreislauf unter dem Einfluss von fotochemischen Reaktionen.....	317
8.10	<i>Die Messung des Redox-Potenzials in natürlichen Gewässern</i>	319
	Beispiel 8.9: Abschätzung von E_H oder p_e aus analytischer Information.....	322
8.11	<i>Glaselektrode; ionenselektive Elektroden</i>	323
	<i>Weiterführende Literatur</i>	324
	<i>Übungen</i>	325
9	Grenzflächenchemie	329
9.1	<i>Einleitung</i>	329
9.2	<i>Partikel in natürlichen Gewässern</i>	330
9.3	<i>Wechselwirkungen an der Grenzfläche zwischen fester Phase und Wasser</i>	333
9.3.1	Die koordinative Bindung: Oberflächenkomplexe.....	333
9.3.2	Elektrostatische und andere Wechselwirkungen.....	333
9.3.3	Wechselwirkungen nichtpolarer Verbindungen an Oberflächen.....	334
9.4	<i>Adsorption aus der Lösung</i>	335
9.4.1	Adsorptionsisothermen.....	335
9.4.2	Langmuir-Adsorptionsisotherme und Freundlich-Isotherme.....	335
9.4.3	Die Oberflächenspannung.....	338
9.5	<i>Oxidoberflächen: Säure-Base-Reaktionen, Wechselwirkung mit Kationen und Anionen</i>	339
9.5.1	Oberflächenkomplexe an Oxidoberflächen.....	339

9.5.2	Säure-Base- und Komplexbildungsreaktionen an Oxidoberflächen.....	341
9.6	<i>Elektrische Ladung auf Oberflächen</i>	345
9.6.1	Modelle der Oberflächenladung und der elektrischen Doppelschicht.....	345
9.6.2	pH_{PZC} (pH bei Oberflächenladung null).....	348
9.7	<i>Modelle für die Oberflächenkomplexbildung</i>	349
	Beispiel 9.1: Adsorption von Pb(II) auf einer Haematit-Oberfläche.....	349
9.8	<i>Tonmineralien</i>	351
9.8.1	Strukturen und funktionelle Gruppen an Oberflächen von Tonmineralien	351
	Die Siloxan di-trigonale Kavität.....	353
9.8.2	Oberflächenladung und Ionenbindungsvermögen	353
	Beispiel 9.2: Oberflächenladung von Kaolinit.....	353
9.8.3	Ionenaustauschgleichgewichte.....	354
	Ionenaustauschharze	355
9.9	<i>Spektroskopische Methoden zur Untersuchung der Strukturen an Oberflächen</i>	355
	Beispiel 9.3: Adsorption von Arsenat und Arsenit an Eisenoxidoberflächen	357
9.10	<i>Oberflächenchemie und Reaktivität; Kinetik der Auflösung</i>	359
9.10.1	Oberflächenreaktionen und Auflösung	359
9.10.2	Geschwindigkeitsgesetze	360
9.10.3	Auflösung von Aluminiumsilikaten	364
9.10.4	Katalyse von Redoxprozessen an Oxidoberflächen.....	365
9.10.5	Die Halbleiteroberfläche; ihr Einfluss auf lichtinduzierte Redoxprozesse	367
9.11	<i>Kolloidstabilität</i>	369
9.11.1	Physikalisches Modell der Kolloidstabilität	369
9.11.2	Die chemische Beeinflussung der Oberflächenladung.....	373
9.12	<i>Sorption hydrophober Verbindungen</i>	374
9.13	<i>Synthetische Nanopartikel</i>	377
	Weiterführende Literatur.....	378
	Übungen	378
10	Wassertechnologie; Anwendung oberflächenchemischer Prozesse...	381
10.1	<i>Einleitung</i>	381

10.2	<i>Flockung, Koagulation</i>	382
10.2.1	Definition der Koagulation	382
10.2.2	Al(III) und Fe(III) als Koagulationsmittel	383
10.2.3	Entfernung von Huminstoffen und huminähnlichen Verbindungen	384
10.2.4	Organische Polyelektrolyte	385
10.2.5	Phosphat-Elimination	387
10.2.6	Anwendungen der Koagulation in der Abwassertechnologie	387
10.2.7	Kinetik der Koagulation.....	388
	Beispiel 10.1: Koagulationskinetik	390
10.3	<i>Filtration</i>	391
10.3.1	Raumfiltration in porösem Medium.....	392
10.3.2	Membranfiltration	394
10.4	<i>Flotation</i>	395
10.5	<i>Aktivkohleadsorption</i>	396
10.5.1	Sorptionsisothermen.....	396
10.5.2	Die Durchbruchskurve	397
10.6	<i>Korrosion der Metalle als elektrochemischer Prozess</i>	398
10.6.1	Thermodynamische Aspekte	398
10.6.2	Kathodischer Schutz und anodische Aktivierung	399
10.6.3	Passivierung einer Metalloberfläche.....	401
	Die Kalkrostschuttschicht.....	401
	<i>Weiterführende Literatur</i>	402
	<i>Übungen</i>	402
11	Biogeochemische Kreisläufe einiger Elemente	405
11.1	<i>Verteilung von Stoffen in der Umwelt</i>	405
	Die verschiedenen Reservoirs der Umwelt	405
11.2	<i>Kohlenstoffkreislauf in den Gewässern</i>	407
11.2.1	Globaler Kohlenstoffkreislauf.....	407
11.2.2	Kohlenstoffkreislauf in Gewässern	408
11.2.3	Zusammensetzung des natürlichen organischen Materials (NOM)	409
11.3	<i>Stickstoffkreislauf in Gewässern und Atmosphäre</i>	416
11.3.1	Globaler Stickstoffkreislauf	416
11.3.2	Die wichtigsten Redoxprozesse im Kreislauf	
	$\text{N}_2(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2(\text{g})$	420
	i) N_2 -Fixierung	420
	ii) Nitrifikation	421

iii) Denitrifikation	421
iv) Stickoxide in der Atmosphäre	422
11.4 <i>Biogeochemischer Kreislauf des Phosphors</i>	423
11.5 <i>Kreisläufe von Metallen in Gewässern</i>	424
11.5.1 Einträge von Metallen in Gewässer.....	424
11.5.2 Bindung der Metalle an Liganden, an Partikeloberflächen und an Organismen	425
11.5.3 Regulierung von Metallen in Seen und Flüssen.....	426
11.5.4 Spurenmetalle in den Ozeanen	429
<i>Weiterführende Literatur</i>	431
<i>Übungen</i>	432
12 Anwendungen auf aquatische Systeme	433
12.1 <i>See</i>	433
12.1.1 Fotosynthetische Produktion und Eutrophierung.....	433
12.1.2 Redoxverhältnisse in eutrophen Seen.....	436
Rücklösung von Phosphat aus Sedimenten.....	439
12.1.3 Ausfällung von Calciumcarbonat in Seen.....	440
12.1.4 Sedimentation	441
12.2 <i>Fliessgewässer</i>	442
12.2.1 Belastungsquellen und Wasserqualität	442
12.2.2 Chemische und biologische Prozesse in Fliessgewässern	444
Fotosynthese und Respiration.....	444
Nitrifikation	445
Gasaustausch	447
Wechselwirkungen gelöst / partikulär.....	448
12.2.3 Abfluss und Stoffkonzentrationen in Fliessgewässern	450
Langfristige Konzentrationsänderungen in Fliessgewässern	452
12.3 <i>Grundwasser</i>	453
12.3.1 Grundwasser als Trinkwasserreservoir – Belastungsquellen.....	453
12.3.2 Biogeochemische Prozesse bei der Infiltration.....	455
12.3.3 Transport von Schadstoffen im Grundwasser	458
<i>Weiterführende Literatur</i>	463
See.....	463
Fliessgewässer	464
Grundwasser	464
<i>Übungen</i>	465

Referenzen	469
Übungslösungen	483
<i>Kapitel 1</i>	<i>483</i>
<i>Kapitel 2</i>	<i>483</i>
<i>Kapitel 3</i>	<i>484</i>
<i>Kapitel 4</i>	<i>485</i>
<i>Kapitel 5</i>	<i>486</i>
<i>Kapitel 6</i>	<i>487</i>
<i>Kapitel 7</i>	<i>487</i>
<i>Kapitel 8</i>	<i>488</i>
<i>Kapitel 9</i>	<i>489</i>
<i>Kapitel 10</i>	<i>490</i>
<i>Kapitel 11</i>	<i>490</i>
<i>Kapitel 12</i>	<i>491</i>
Anhang 1: Periodensystem der Elemente	492
Anhang 2: Anwendung von Computerprogrammen zur Lösung von chemischen Gleichgewichtsproblemen	493
<i>Anhang 2.1: Computerprogramme</i>	<i>493</i>
<i>Anhang 2.2: Allgemeines Vorgehen</i>	<i>493</i>
<i>Anhang 2.3: Beispiele</i>	<i>495</i>
Beispiel 1: Komplexbildung von Cu^{2+} mit OH^- und CO_3^{2-} (Tableau 6.2).....	495
Beispiel 2: Löslichkeit einer festen Phase	496
Beispiel 3: Adsorption an einer festen Phase.....	497
Anhang 3: Thermodynamische Daten	500
Index	512