

Klaus Hancke • Stefan Wilhelm

# Wasseraufbereitung

Chemie und chemische Verfahrenstechnik

Sechste, aktualisierte und erweiterte Auflage  
mit 90 Abbildungen



Springer

# Inhalt

I	Ausgewählte Kapitel der allgemeinen Chemie . . . . .	.1
1	Stoffarten . . . . .	.2
1.1	Reine Stoffe. . . . .	.2
1.2	Homogene und heterogene Mischungen. . . . .	.2
1.3	Trennung von Stoffgemischen. . . . .	.4
1.4	Einteilung reiner Stoffe. . . . .	.5
1.5	Elemente. . . . .	.6
1.6	Verbindungen. . . . .	.6
2	Atomarer Aufbau der Materie. . . . .	.7
2.1	Aufbau der Elemente. . . . .	.7
2.1.1	Elementarteilchen. . . . .	.7
2.1.2	Atome. . . . .	.8
2.1.2.1	Atomkern und Nukleonen . . . . .	.8
2.1.2.2	Aufbau der Elemente - Kernreaktionen. . . . .	.9
2.1.2.3	Radioaktive Nuklide. . . . .	.13
2.2	Elektronenstruktur und Periodensystem . . . . .	.14
2.2.1	Bohrsches Atommodell. . . . .	.14
2.2.2	Quantenzahlen . . . . .	.15
2.2.3	Aufbau der Atome. . . . .	.17
2.2.3.1	Hauptquantenzahl $n = 1$ ; erste Periode. . . . .	.17
2.2.3.2	Hauptquantenzahl $n = 2$ ; zweite Periode. . . . .	.17
2.2.3.3	Hauptquantenzahl $n = 3$ ; dritte Periode. . . . .	.21
2.2.3.4	Hauptquantenzahl $n = 4$ ; vierte Periode. . . . .	.22
2.2.3.5	Hauptquantenzahl $n = 5$ ; fünfte Periode. . . . .	.23
2.2.3.6	Hauptquantenzahl $n = 6$ ; sechste Periode. . . . .	.23
2.2.3.7	Hauptquantenzahl $n = 7$ ; siebte Periode. . . . .	.24
2.2.4	Periodensystem der Elemente. . . . .	.24
2.2.4.1	Atom- und Ionenradien. . . . .	.26
2.2.4.2	Ionisierungsenergie. . . . .	.26
2.2.4.3	Elektronenaffinität . . . . .	.30
2.2.4.4	Wertigkeit . . . . .	.31

3	Chemische Bindung . . . . .	33
3.1	Ionenbindung . . . . .	33
3.2	Elektronenpaarbindung (Atombindung, Kovalenzbindung) . . . . .	36
3.3	Metallbindung . . . . .	38
3.4	Zwischenmolekulare Kräfte . . . . .	39
3.4.1	Wechselwirkung zwischen Ionen und Dipolmolekülen . . . . .	40
3.4.2	Wechselwirkung zwischen Ionen und Molekülen mit induziertem Dipolmoment . . . . .	41
3.4.3	Wechselwirkung zwischen zwei Dipolmolekülen . . . . .	41
3.4.4	Wechselwirkung zwischen Dipolmolekülen und Molekülen mit induziertem Dipolmoment . . . . .	42
3.4.5	Wechselwirkung zwischen Molekülen mit induziertem Dipolmoment . . . . .	42
3.5	Wasserstoffbrückenbindung . . . . .	43
4	SI-Einheiten der Wasserchemie . . . . .	45
4.1	Umrechnung von deutschen Hartegraden in andere MaB-einheiten . . . . .	49
4.2	Umrechnung amerikanischer, englischer und französischer Hartegrade in deutsche und internationale Einheiten . . . . .	53
5	Grundgesetze der allgemeinen Chemie (Auswahl) . . . . .	54
5.1	Gesetze der Stochiometrie . . . . .	54
5.2	Beispiele stochiometrischer Berechnungen . . . . .	56
5.3	Massenwirkungsgesetz . . . . .	59
5.3.1	Grundlagen . . . . .	59
5.3.2	Prinzip des kleinsten Zwanges von Le Chatelier und Braun . . . . .	61
5.4	Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht . . . . .	62
6	Typen anorganischer Reaktionen . . . . .	65
6.1	Saure-/Base-Gleichgewicht . . . . .	65
6.1.1	Starke von Säuren und Basen . . . . .	67
6.2	pH-Wert . . . . .	68
6.3	Redoxvorgänge . . . . .	70
6.3.1	Starke von Oxidations- und Reduktionsmitteln . . . . .	72
6.3.2	Beispiele für Redoxreaktionen in der Wasserchemie . . . . .	73
<b>II</b>	<b>Wasserchemie</b> . . . . .	75
7	Definition wichtiger Begriffe . . . . .	75
7.1	pH-Wert . . . . .	75
7.2	Puffersysteme . . . . .	77
7.3	Osmotischer Druck . . . . .	78
7.4	Elektrolytische Dissoziation . . . . .	80

8	Wasserchemische Berechnungen . . . . .	82
8.1	System Kohlensäure - Wasser - Calcium . . . . .	82
8.1.1	Berechnung der Stoffmengenkonzentrationen an $c(\text{CO}_2)$ , $c(\text{HCOj})$ und $c(\text{CO}_3^{2-})$ . . . . .	82
8.2	Wasserharte . . . . .	91
8.3	Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht . . . . .	92
8.3.1	Rechenverfahren C 10-R2 nach DIN 38404 Teil 10, Ausgabe 04.1995 . . . . .	94
8.3.1.1	Berechnung des Gleichgewichts-Kohlenstoffdioxids . . . . .	95
8.3.1.2	Berechnung des Sättigungs-pff-Wertes $pH_L$ . . . . .	98
8.3.2	Rechenverfahren C10-R3 nach DIN 38404, Teil 10, Ausgabe 04.1995 . . . . .	101
8.3.2.1	Grundlagen . . . . .	101
8.3.2.2	Calcitsättigung . . . . .	103
8.3.2.2.1	Massenbilanz . . . . .	104
8.3.2.2.2	Elektroneutralitätsbedingung . . . . .	106
8.3.2.2.3	Basisgleichung zur Bestimmung des Gleichgewichtssystems . . . . .	107
8.3.2.3	Anwendung der Basisgleichung . . . . .	108
8.4	Errechnen der Stoffmengen- bzw. der Massenkonzentration an Natriumionen . . . . .	110
III	Chemische Wasseraufbereitung . . . . .	113
9	Aufgabe der chemischen Wasseraufbereitung . . . . .	113
10	Mechanische Aufbereitungsverfahren . . . . .	113
11	Physikalische Aufbereitungsverfahren . . . . .	114
11.1	Filtration über chemisch inerte Materialien . . . . .	114
11.2	Praktische Hinweise zur Filtration über körnige Materialien . . . . .	118
11.2.1	Filtrationsarten . . . . .	118
11.2.2	Betriebs- und Dimensionierungsgroßen . . . . .	119
11.2.3	Wahl der Korngrößenverteilung . . . . .	120
11.2.4	Schmutzaufnahmevermögen . . . . .	120
11.2.5	Filtrerrückspülung . . . . .	121
11.2.5.1	Wasserspülung . . . . .	124
11.2.5.2	Luft-Wasser-Spülung . . . . .	124
11.2.5.3	Kombinierte Luft-Wasser-Spülung . . . . .	124
11.2.5.4	Zeitdauer der Spülphasen . . . . .	125
11.2.6	Mehrschichtfiltration . . . . .	125
11.2.7	Freibordhöhe . . . . .	125
11.3	Aufbau einer Monoschicht-Kiesfilteranlage . . . . .	128

11.4 Membranfiltration bei der Trinkwasseraufbereitung . . . . .	130
11.4.1 Umkehrosmose . . . . .	133
11.4.2 Nanofiltration . . . . .	133
11.4.3 Mikrofiltration . . . . .	133
11.4.4 Ultrafiltration . . . . .	134
11.4.4.1 Membranaufbau . . . . .	134
11.4.4.2 Kenngrößen der Ultrafiltration . . . . .	135
11.4.4.3 Betriebsweisen von Ultrafiltrationsanlagen . . . . .	137
11.4.4.4 Einsatz der UF in der Trinkwasseraufbereitung . . . . .	139
12       Chemische Aufbereitungsverfahren . . . . .	140
12.1     Enteisenungs- und Entmanganungsverfahren . . . . .	140
12.1.1   Entstehen von Eisen-und Manganverbindungen im Wasser . . . . .	140
12.1.1.1   Entstehen im Grundwasser . . . . .	141
12.1.1.2   Entstehen in oberirdischen Fließgewässern . . . . .	142
12.1.1.3   Entstehen in stehenden Oberflächengewässern . . . . .	142
12.1.2     Gründe für die Enteisenung und Entmanganung . . . . .	143
12.1.3     Chemische Enteisenung . . . . .	143
12.1.4     Chemische Entmanganung . . . . .	147
12.1.5     Biologische Vorgänge bei der Enteisenung und Entmanganung . . . . .	148
12.1.5.1   Biologische Entmanganung . . . . .	148
12.1.6     Empfehlungen zur Verfahrenswahl und zur Dimensionierung von Enteisenungs- und Entmanganungsanlagen . . . . .	149
12.1.6.1   Filterdimensionierung . . . . .	150
12.1.6.2   Sauerstoffanreicherung im Wasser . . . . .	150
12.2     Entsauerungsverfahren . . . . .	151
12.2.1     Entsauerung durch physikalische Verfahren . . . . .	151
12.2.2     Entsauerung durch Filtration über alkalische Filtermedien . . . . .	151
12.2.2.1   Filtration über Marmorsplit . . . . .	152
12.2.2.2   Filtration über halbgebrannten Dolomit . . . . .	152
12.2.3     Entsauerung durch Neutralisation mit Laugen . . . . .	153
12.3     Entcarbonisierungsverfahren . . . . .	154
12.3.1     Entcarbonisierung durch Saureimpfung . . . . .	154
12.3.1.1   Saureverbrauch . . . . .	154
12.3.1.2   Erhöhung der Anionenkonzentration im aufbereiteten Wasser . . . . .	155
12.3.2     Kalkentcarbonisierung . . . . .	155
12.3.2.1   Schnellentcarbonisierung . . . . .	158
12.3.2.1.1   Reaktoren zur Schnellentcarbonisierung . . . . .	160
12.3.2.1.2   Erzielbare Wasserqualität . . . . .	163
12.3.2.2   Langzeitentcarbonisierung . . . . .	164
12.3.2.2.1   Erzielbare Wasserqualität . . . . .	166

12.4	Flockung . . . . .	166
12.4.1	Flockungsmittel (FLOMI) . . . . .	170
12.4.2	Flockungshilfsmittel (FLOHIMI) . . . . .	172
12.4.2.1	Ionogene Polymere . . . . .	172
12.4.2.1.1	Anionische Polymere . . . . .	172
12.4.2.1.2	Kationische Polymere . . . . .	173
12.4.2.2	Nichtionogene Polymere . . . . .	173
12.4.3	Verfahrenstechnik der Flockung . . . . .	174
12.5	Ionenaustausch . . . . .	176
12.5.1	Skelettstruktur von Ionenaustauschharzen . . . . .	181
12.5.2	Gleichgewicht . . . . .	184
12.5.2.1	Stark saure Kationenaustauschharze in der Wasserstoffionenform . . . . .	190
12.5.2.1.1	Qualitat des aufbereiteten Wassers . . . . .	192
12.5.2.2	Schwach saure Kationenaustauschharze in der Wasserstoffionenform . . . . .	192
12.5.2.3	Stark basische Anionenaustauschharze in der Nicht-Hydroxidionenform . . . . .	194
12.5.2.4	Stark basische Anionenaustauschharze in der Hydroxidionenform . . . . .	194
12.5.2.4.1	Regeneration stark basischer Harze . . . . .	195
12.5.2.5	Mineralsaureabsorption durch schwach basische Harze . . . . .	196
12.5.2.6	Qualitat des aufbereiteten Wassers . . . . .	196
12.5.3	Reaktionsgeschwindigkeit . . . . .	198
12.5.3.1	Stark dissozierte Ionenaustauschharze . . . . .	199
12.5.3.2	Schwach dissozierte Ionenaustauschharze . . . . .	202
12.5.4	Regenerationsarten . . . . .	205
12.5.4.1	Gleichstromregeneration . . . . .	205
12.5.4.2	Gegenstromregeneration . . . . .	206
12.5.4.2.1	Gegenstromverfahren mit oben (in der Harzsicht) liegendem Chemikalienentnahmesystem . . . . .	207
12.5.4.2.2	Econex-Verfahren . . . . .	209
12.5.4.2.3	Schichtbettfilter . . . . .	210
12.5.4.2.4	Schwebebettverfahren . . . . .	211
12.5.5	Kurztaktverfahren . . . . .	213
12.5.6	Kontinuierliche Ionenaustauschverfahren . . . . .	215
12.5.7	Mischbettfilter . . . . .	216
12.6	Behalterhydraulik . . . . .	218
12.6.1	Wasser- bzw. Chemikalienverteilung . . . . .	218
12.6.2	Toträume zwischen Diisen- und AbschluBboden . . . . .	220
12.6.3	Harztransport . . . . .	221

12.7	Entcarbonisierung mit schwach sauren Kationenaustauschharzen . . . . .	222
12.8	Enthartungsverfahren . . . . .	226
12.8.1	Fallungsenthartung . . . . .	227
12.8.2	Enthartung durch Ionenaustausch . . . . .	227
12.9	Vollentsalzung durch Ionenaustausch . . . . .	229
12.10	Kondensatreinigungsanlagen . . . . .	246
12.10.1	Mechanische Filtration . . . . .	247
12.10.2	Chemische Aufbereitung . . . . .	249
12.11	Dekontaminierung radioaktiv verunreinigter Wasser . . . . .	251
<b>IV</b>	<b>Meerwasserentsalzung . . . . .</b>	<b>253</b>
13	Meerwasserentsalzungsanlagen . . . . .	253
13.1	Elektrodialyse . . . . .	253
13.2	Umgekehrte Osmose . . . . .	254
13.2.1	Vorreinigungsanlage . . . . .	255
13.2.2	Umkehrosmoseanlage . . . . .	256
13.3	Mehrstufige Entspannungsverdampfung . . . . .	257
<b>V</b>	<b>Verfahren zur Desinfektion und zur Verringerung der Nitrationenkonzentration des Trinkwassers . . . . .</b>	<b>259</b>
14	Desinfektion . . . . .	259
14.1	Langsamfiltration . . . . .	259
14.2	Abkochen . . . . .	260
14.3	Chlorung . . . . .	260
14.4	Ozonisierung . . . . .	262
14.5	UV-Strahlen . . . . .	263
14.6	Silberungenverfahren (Oligodynamie) . . . . .	263
14.7	Wasserstoffperoxid . . . . .	263
15	Maßnahmen zur Verringerung der Nitrationenkonzentration im Trinkwasser . . . . .	265
15.1	Ursachen der erhöhten Nitrationenbelastung des Grundwassers . . . . .	266
15.2	Denitrifikation im Grundwasserleiter . . . . .	267
15.3	Technische Reduktion der Nitrationenkonzentration in Trinkwasser . . . . .	268
15.3.1	Wasserwirtschaftliche Maßnahmen . . . . .	268
15.3.2	Physikalische Verfahren . . . . .	268
15.3.3	Chemische Verfahren . . . . .	269
15.3.3.1	Anionenaustausch . . . . .	269

15.3.3.2	Kombinierter Kationen- und Anionenaustausch . . . . .	270
15.3.3.3	Teilentsalzung nach dem CARIX-Verfahren . . . . .	271
15.3.4	Technische biochemische Verfahren. . . . .	272
15.3.4.1	Heterotrophe Denitrifikation. . . . .	273
15.3.4.2	Autotrophe Denitrifikation. . . . .	274
15.3.4.3	Grundsätzlicher Aufbau der Anlagen zur Denitrifikation . . . . .	274
15.3.5	Diskussion einiger Fließbilder verschiedener Anlagenhersteller	276
<b>VI</b>	<b>Schwimmbadwasseraufbereitung</b> . . . . .	281
16	Wasserkreislauf . . . . .	281
16.1	Desinfektion . . . . .	281
16.2	Filtration . . . . .	281
16.3	Wassererneuerung . . . . .	282
<b>VII</b>	<b>Korrosions- und sedimentationsfreier Transport von Trinkwasser</b> . . . . .	283
17	Korrosion in Trinkwassersystemen . . . . .	283
17.1	Einführung . . . . .	283
17.2	Korrosionstypen. . . . .	289
17.2.1	Wasserstoffkorrosionstyp. . . . .	289
17.2.2	Sauerstoffkorrosionstyp. . . . .	290
17.2.3	Sauerstoff-Konzentrationselement . . . . .	290
17.2.4	Schmutzteilchen-Korrosionstyp. . . . .	291
17.3	Korrosionsformen. . . . .	291
17.4	Instationäre Korrosion. . . . .	292
17.5	Erhöhte Korrosion in Warmwassersystemen . . . . .	293
18	Werkstoffe in der Trinkwasserversorgung . . . . .	295
18.1	Stahl. . . . .	295
18.2	Duktiles GuBeisen. . . . .	296
18.3	Kunststoffe. . . . .	297
18.4	Asbestzement. . . . .	298
18.5	Beton. . . . .	298
18.6	Verzinkter Stahl. . . . .	299
18.7	Kupfer. . . . .	300
18.8	Kupferhaltige Werkstoffe. . . . .	301
18.9	Kennwerte für Trinkwasser bei Einsatz verschiedener Werkstoffe. . . . .	302
18.10	Kontaktkorrosion. . . . .	302
19	Korrosionsschutz in Trinkwasserversorgungssystemen . . . . .	305
19.1	Naturliche Schutzschichten. . . . .	305
19.2	Künstliche Schutzüberzüge. . . . .	305

19.3	Korrosionsinhibitoren . . . . .	306
20	Hartestabilisierung . . . . .	307
21	Kathodischer Schutz . . . . .	308
	Anhang: Bundesgesetzblatt . . . . .	313
	Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung	
22	Literatur . . . . .	344
23	Sachwortverzeichnis . . . . .	345