

Klaus Hancke • Stefan Wilhelm

# Wasseraufbereitung

Chemie und chemische Verfahrenstechnik

Sechste, aktualisierte und erweiterte Auflage  
mit 90 Abbildungen



Springer

# Inhalt

<b>I</b>	<b>Ausgewählte Kapitel der allgemeinen Chemie</b>	<b>1</b>
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	Elektronenhülle 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 Dipolmolekulan . . . . .	40
3.4.2	Wechselwirkung zwischen Ionen und Molekulan mit induziertem Dipolmoment . . . . .	41
3.4.3	Wechselwirkung zwischen zwei Dipolmolekulan . . . . .	41
3.4.4	Wechselwirkung zwischen Dipolmolekulan und Molekulan mit induziertem Dipolmoment . . . . .	42
3.4.5	Wechselwirkung zwischen Molekulan 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>	<b>75</b>
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 $c(\text{CO}_2)$ , $c(\text{HCO}_3^-)$ und $c(\text{CO}_3^{2-})$ . . . . .	82
8.2	Wasserhärte. . . . .	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	Calciumsättigung. . . . .	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	Filterruckspülung. . . . .	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 Spulphasen . . . . .	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	Kenngroßen 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	Enteisungs- 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 Enteisung und Entmanganung	.143
12.1.3	Chemische Enteisung	.143
12.1.4	Chemische Entmanganung	.147
12.1.5	Biologische Vorgänge bei der Enteisung und Entmanganung	.148
12.1.5.1	Biologische Entmanganung	.148
12.1.6	Empfehlungen zur Verfahrenwahl und zur Dimensionierung von Enteisungs- 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 Marmorsplitt	.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 dissoziierte Ionenaustauschharze. . . . .	199
12.5.3.2	Schwach dissoziierte 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 Harzschicht) 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	Behälterhydraulik. . . . .	218
12.6.1	Wasser- bzw. Chemikalienverteilung. . . . .	218
12.6.2	Toträume zwischen Diisen- und AbschlusBboden. . . . .	220
12.6.3	Harztransport . . . . .	221

12.7	Entcarbonisierung mit schwach sauren Kationenaustausch-	222
	harzen. . . . .	
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 verseuchter 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</b>	
	<b>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	Silberungsverfahren (Oligodynamie). . . . .	263
14.7	Wasserstoffperoxid. . . . .	263
15	MaBnahmen zur Verringerung der Nitrationenkonzentration	
	im Trinkwasser. . . . .	265
15.1	Ursachen der erhöhten Nitrationenbelastung des Grund-	
	wassers. . . . .	266
15.2	Denitrifikation im Grundwasserleiter. . . . .	267
15.3	Technische Reduktion der Nitrationenkonzentration in	
	Trinkwasser. . . . .	268
15.3.1	Wasserwirtschaftliche MaBnahmen. . . . .	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	Grundsatzlicher Aufbau der Anlagen zur Denitrifikation . . .	274
15.3.5	Diskussion einiger Fließbilder verschiedener Anlagenhersteller	276
<b>VI</b>	<b>Schwimmbadwasseraufbereitung</b> . . . . .	<b>281</b>
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>	<b>283</b>
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 Gußeisen. . . . .	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	Natürliche 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