

Sontheimer
Spindler
Rohmann



© 2008 [AGI-Information Management Consultants](#)
May be used for personal purposes only or by
libraries associated to [dandelion.com](#) network.

Wasserchemie für Ingenieure

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-
Institut der Universität Karlsruhe (TH)

Inhaltsverzeichnis

1. Der Kreislauf des Wassers

1.1.	Bedeutung und Beschreibung des Wasserkreislaufs	15
1.2.	Vorgänge beim Wasserkreislauf	17
1.3.	Wasserchemie und Wassertechnologie	18
1.4.	Literatur	19

2. Physikalische und chemische Grundlagen

2.1.	Das Wassermolekül	21
2.2.	Die Assoziation von Wassermolekülen	24
2.2.1.	Die Wasserstoffbrückenbindung	25
2.2.2.	Die Struktur des Eises	26
2.3.	Die Struktur des Wassers	28
2.3.1.	Ergebnisse der Röntgen-Strukturanalyse	28
2.3.2.	Modellvorstellungen zur Wasserstruktur	30
2.3.2.1.	Übersicht	30
2.3.2.2.	Oligomerenmodell	31
2.3.2.3.	Clustermodell	32
2.4.	Die Eigenschaften des Wassers	36
2.4.1.	Physikalische Eigenschaften	36
2.4.1.1.	Zustandsdiagramm	36
2.4.1.2.	Dichte des Wassers	38
2.4.1.3.	Isotherme Kompressibilität	39
2.4.1.4.	Viskosität des Wassers	41
2.4.1.5.	Oberflächenspannung des Wassers	43
2.4.1.6.	Dielektrizitätskonstante des Wassers	45
2.4.2.	Thermodynamische Eigenschaften	46
2.4.2.1.	Schmelz- und Siedetemperatur	46
2.4.2.2.	Spezifische Wärmekapazität	47
2.4.2.3.	Schmelz- und Verdampfungsenthalpie	48
2.4.3.	Isotopenzusammensetzung des Wassers	49
2.5.	Wasser als Lösungsmittel	51
2.5.1.	Lösevorgänge	51
2.5.1.1.	Lösung von Nichtelektrolyten	51
2.5.1.2.	Lösung von Elektrolyten (Hydratation)	52
2.5.2.	Konzentrationsangaben von gelösten Stoffen	54
2.5.3.	Lösung von Gasen	57

2.5.4.	Lösung von Salzen	61
2.5.4.1.	Löslichkeit	61
2.5.4.2.	Elektrische Leitfähigkeit	63
2.5.5.	Physikalische Eigenschaften wäßriger Lösungen	67
2.5.5.1.	Viskosität	67
2.5.5.2.	Dielektrizitätskonstante	69
2.5.5.3.	Oberflächenspannung	69
2.5.5.4.	Siedepunkterhöhung und Gefrierpunktniedrigung	72
2.6.	Chemisches Gleichgewicht in wäßrigen Elektrolyt- lösungen	73
2.6.1.	Elektrolytische Dissoziation	73
2.6.2.	Säure-Base-Begriff	74
2.6.3.	Protolysegleichgewichte	76
2.6.3.1.	Protolyse des Wassers	76
2.6.3.2.	Säure/Base-Reaktionen	77
2.6.4.	Anwendung des Massenwirkungsgesetzes	78
2.6.4.1.	Definition	78
2.6.4.2.	Aktivität und Ionenstärke	80
2.6.4.3.	Ionenprodukt des Wassers, pH-Wert	84
2.6.4.4.	Dissoziationskonstanten	87
2.6.4.5.	Löslichkeitsprodukt	90
2.6.5.	Elektroneutralität (Ladungsbilanz)	94
2.6.6.	Hydrolyse von Salzen	96
2.6.7.	Pufferung	99
2.7.	Redoxvorgänge	101
2.7.1.	Begriff der Oxidation und Reduktion	101
2.7.2.	Beschreibung von Redoxreaktionen	102
2.7.2.1.	Redoxpaare	102
2.7.2.2.	Oxidationszahl und Redoxäquivalent	103
2.7.2.3.	Formulierung von Redoxgleichungen	106
2.7.2.4.	Redoxpotential und Redoxreihe	108
2.7.2.5.	Potential/pH-Diagramm	116
2.7.3.	Elektrolyse	118
2.8.	Literatur	120

3. Inhaltsstoffe natürlicher Wässer

3.1.	Art und Beschreibung der Wasserinhaltsstoffe	122
3.1.1.	Allgemeines	122
3.1.2.	Suspendierte Wasserinhaltsstoffe	124
3.1.3.	Kolloidale Wasserinhaltsstoffe	125
3.1.4.	Gelöste anorganische Verbindungen	127
3.1.4.1.	Kationen	127
3.1.4.2.	Anionen	130
3.1.4.3.	Gelöste Gase	132
3.1.5.	Gelöste organische Verbindungen	133

3.2.	Analytik der Wasserinhaltsstoffe	136
3.2.1.	Allgemeines	136
3.2.2.	Analytik kolloidaler und suspendierter Stoffe	136
3.2.2.1.	Trübung	136
3.2.2.2.	Elektrophoretische Beweglichkeit	140
3.2.3.	Analytik anorganischer Inhaltsstoffe	142
3.2.3.1.	Gravimetrie (Gewichtsanalyse)	142
3.2.3.2.	Maßanalyse (Titrimetrie)	143
3.2.3.3.	Spektralphotometrie	145
3.2.3.4.	Atomabsorptionsspektroskopie	149
3.2.3.5.	Flammen-Emissions-Spektroskopie	152
3.2.3.6.	Polarographie	152
3.2.3.7.	pH-Messung	154
3.2.3.8.	Ionensensitive Elektroden	161
3.2.3.9.	Leitfähigkeitsmessung	162
3.2.4.	Analytische Erfassung organischer Wasserinhaltsstoffe	162
3.2.4.1.	Unterteilung der analytisch erfaßbaren Größen	162
3.2.4.2.	Summarische Parameter	163
3.2.4.3.	Gruppenparameter	173
3.2.4.4.	Analyse von Einzelverbindungen	181
3.2.4.5.	Charakterisierungsmethoden	185
3.2.4.6.	Hinweise zur Bedeutung der einzelnen Analysemethoden	190
3.3.	Literatur	191

4. Das Gleichgewichtssystem der Kohlensäure und ihrer Ionen

4.1.	Grundlagen	194
4.1.1.	Definition der Dissoziationskonstanten	194
4.1.2.	Größe der Konstanten	197
4.1.3.	Massenbilanz und Ladungsbilanz	198
4.2.	Anwendung von Massen- und Ladungsbilanz	199
4.2.1.	Definition von m-Wert und p-Wert	199
4.2.2.	m-Wert und p-Wert von Modell-Lösungen	201
4.3.	Anwendung der Dissoziationsgleichgewichte	203
4.3.1.	Die Verteilung der Kohlensäureformen	204
4.3.2.	Der Äquivalenzfaktor φ	208
4.3.3.	Die Eigendissoziation des Wassers	209
4.3.4.	Berechnung des pH-Wertes aus m-Wert und Kohlensäuresumme [C]	210
4.3.5.	Graphische Darstellung des Zusammenhanges m-Wert, p-Wert, pH-Wert	215
4.3.5.1.	Allgemeines	215
4.3.5.2.	„Reine Lösungen“	217
4.4.	Das Pufferungsverhalten kohlenensäurehaltiger Lösungen	219
4.4.1.	Titrationenkurven	219

4.4.2.	Die Pufferungsintensität	220
4.4.3.	Säure- und Basekapazitäten	224
4.4.4.	Berechnung von m-Wert und p-Wert aus den Säure- und Basekapazitäten	225
4.5.	Praktische Berechnungen zum Gleichgewichtssystem der Kohlensäure	228
4.5.1.	Tabellierung und Darstellung der wesentlichen Faktoren	230
4.5.1.1.	Der Äquivalenzfaktor	230
4.5.1.2.	Die Größe Δ	238
4.5.1.3.	Faktoren zur Berechnung der Kohlensäureformen	241
4.5.1.4.	Beitrag der Ionen aus der Dissoziation der Kohlensäure und des Wassers zur Gesamtionenstärke	248
4.5.2.	Weitere Iterationsverfahren zur Berechnung des pH-Wertes aus m-Wert und p-Wert	250
4.5.2.1.	Herleitung der Iterationsverfahren und Untersuchungen zur Konvergenz	250
4.5.2.2.	Anwendungsbeispiele	254
4.5.3.	Auswirkung von Zusätzen	258
4.5.3.1.	Berücksichtigung der Verdünnung	258
4.5.3.2.	Vernachlässigung der Verdünnung	262
4.5.3.3.	Graphische Darstellungen	270
4.5.4.	Fehlerbetrachtung	271
4.5.4.1.	Ableitungen	271
4.5.4.2.	Anwendungsbeispiele	276
4.6.	Literatur	277
5.	Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	
5.1.	Grundlagen	278
5.1.1.	Das Löslichkeitsprodukt von Calciumkarbonat	278
5.1.2.	Größe der Konstanten	278
5.2.	Der Sättigungsindex	279
5.2.1.	Definition	279
5.2.2.	Der Gleichgewichts-pH-Wert	281
5.2.3.	Andere Gleichgewichtskonzentrationen	282
5.2.4.	Praktische Berechnungen des Sättigungsindex	282
5.3.	Graphische Darstellungen	285
5.3.1.	Die TILLMANS-Kurve	285
5.3.2.	Darstellungen unter Verwendung von Größen, die bei Zusätzen konstant bleiben	289
5.4.	Berechnungsbeispiel für die Auswirkung von Zusätzen	293
5.5.	Literatur	295

6.	Chemie der natürlichen Wässer	
6.1.	Allgemeines	298
6.2.	Inhaltsstoffe von Regenwässern	298
6.3.	Vorgänge bei der Versickerung und im Untergrund	300
6.3.1.	Konzentrationserhöhung durch Verdunstung	300
6.3.2.	Lösen von anorganischen Salzen	300
6.3.3.	CO ₂ -Aufnahme in der Humusschicht	301
6.3.4.	Chemische Umsetzungen im Boden	301
6.3.5.	Ionenaustauschvorgänge	304
6.3.6.	Adsorption und Desorption	304
6.3.7.	Biologische Umsetzungen im Boden	305
6.3.8.	Beispiele für die Zusammensetzung von Grundwässern	306
6.4.	Grundwasser als Rohstoff für die Trinkwasser- aufbereitung	307
6.5.	Oberflächenwasser als Rohstoff für die Trinkwasser- gewinnung	308
6.5.1.	Allgemeines	308
6.5.2.	Wasserqualitätsprobleme an stehenden Gewässern	308
6.5.2.1.	Einfluß der Zuläufe	308
6.5.2.2.	Einfluß der Schichtung und Eutrophierung	309
6.5.2.3.	Gewässerschutzmaßnahmen an Seen und Talsperren	312
6.5.3.	Wasserqualitätsprobleme in Fließgewässern	313
6.5.3.1.	Allgemeines	313
6.5.3.2.	Abwasserbelastung und Selbstreinigung	313
6.5.3.3.	Andere Qualitätsprobleme mit Fließgewässern	318
6.6.	Vergleichende Beurteilung von verschiedenen Roh- wässern für die Trinkwassergewinnung	320
6.7.	Literatur	321

7. Anforderungen an die Trinkwasserqualität

7.1.	Hygienische Anforderungen	323
7.1.1.	Allgemeine Überlegungen	323
7.1.2.	Allgemeine Anforderungen an die Trinkwasserqualität	325
7.1.3.	Mikrobiologische Anforderungen	326
7.1.4.	Chemische Anforderungen	328
7.2.	Bedeutung verschiedener Wasserinhaltsstoffe	329
7.2.1.	Trübstoffe	329
7.2.2.	Gelöste anorganische Stoffe	330
7.2.2.1.	Spurenmehalle	330
7.2.2.2.	Andere anorganische Spurenstoffe	334
7.2.2.3.	Anorganische Hauptbestandteile	335
7.2.3.	Gelöste organische Stoffe	337
7.2.3.1.	Allgemeines	337

7.2.3.2.	Bedeutung und Aussage epidemiologischer Untersuchungen	337
7.2.3.3.	Bedeutung toxikologischer Untersuchungen	340
7.3.	Andere Anforderungen	342
7.4.	Anforderungen an das Rohwasser vor der Trinkwasseraufbereitung	343
7.4.1.	Allgemeines	343
7.4.2.	DVGW-Arbeitsblatt W 151 und IAWR-Memorandum	343
7.4.3.	Beurteilung der Fließgewässerqualität aus der Sicht der Trinkwasserversorgung	345
7.4.3.1.	Allgemeine Gesichtspunkte	345
7.4.3.2.	Ermittlung der repräsentativen Konzentrationen	346
7.4.3.3.	Ermittlung von Qualitätskennzahlen	350
7.5.	Zusammenfassende Folgerungen	353
7.6.	Literatur	353
8.	Korrosion und Korrosionsschutz	
8.1.	Allgemeines	356
8.2.	Korrosion und Wasserqualität	356
8.3.	Vorgänge bei der Korrosion von Metallen	357
8.3.1.	Unterteilung der Korrosionsvorgänge	357
8.3.2.	Die Spannungsreihe der Metalle	358
8.3.3.	Die Wasserstoffkorrosion	362
8.3.4.	Die Graphitierung (Spongiose)	363
8.3.5.	Die Sauerstoffkorrosion	364
8.3.6.	Die Lochkorrosion	367
8.3.7.	Andere Korrosionsarten	368
8.4.	Korrosionsschutz durch Deckschichten	370
8.4.1.	Korrosionsstrom und Polarisation	370
8.4.2.	Korrosionskinetik	372
8.4.2.1.	Möglichkeiten zur Erfassung der Korrosionskinetik	372
8.4.2.2.	Messung des korrosionschemischen Sauerstoffbedarfs	373
8.4.2.3.	Beschreibung des Schichtwachstums	376
8.4.3.	Einfluß der Wasserzusammensetzung auf das Korrosionsverhalten	378
8.4.3.1.	Einfluß der Pufferungsintensität	378
8.4.3.2.	Einfluß des Sättigungsindex	380
8.4.4.	Untersuchungen alter Rohre	381
8.4.5.	Deutung der Vorgänge bei der Schutzschichtbildung auf Eisenwerkstoffen	383
8.4.5.1.	Die „Kalk-Rost-Schutzschicht“	383
8.4.5.2.	Siderit als Zwischenstufe bei der Ausbildung günstiger Deckschichten	384
8.4.5.3.	Calciumkarbonat und Siderit	387

8.5.	Auswirkungen weiterer Parameter	389
8.5.1.	Einfluß von Neutralsalzen	389
8.5.2.	Einfluß von Phosphaten und von organischen Substanzen	390
8.5.3.	Einfluß der Fließgeschwindigkeit	395
8.5.4.	Entsäuerung und Korrosion	398
8.5.5.	Verteilung von Wässern mit unterschiedlicher Zusammensetzung (Mischwasserprobleme)	401
8.5.6.	Physikalische und biologische Einflüsse	402
8.6.	Folgerungen für die Praxis	403
8.6.1.	Allgemeines	403
8.6.2.	Schutzschichtbildung und Mindestkonzentrationen	403
8.6.3.	Sättigungsindex und Pufferungsintensität	404
8.6.4.	Korrosionsinhibitoren	406
8.6.5.	Zusätzliche Einflußgrößen	407
8.7.	Verhalten von verzinkten Stahlrohren bei der Korrosion	408
8.7.1.	Probleme bei der Hausinstallation	408
8.7.2.	Das verzinkte Stahlrohr	408
8.7.3.	Die Zinkkorrosion	409
8.7.4.	Deckschichtbildung bei verzinkten Stahlrohren	411
8.8.	Verhalten von anderen Installationsmaterialien	412
8.8.1.	Kupferrohre als Installationsmaterial	412
8.8.2.	Andere Rohrmaterialien	413
8.9.	Korrosionsfragen bei der Ausführung der Installation und den Betriebsbedingungen	414
8.9.1.	Allgemeine Forderungen	414
8.9.2.	Die verzinkte Hausinstallation	415
8.9.3.	Die Hausinstallation in Kupfer	415
8.9.4.	Einsatz von Geräten zur Nachbehandlung von Trinkwasser	416
8.10.	Korrosionsverhalten von Beton	416
8.10.1.	Allgemeines	416
8.10.2.	Lösevorgänge bei zementgebundenen Werkstoffen	416
8.10.3.	Zerstörung zementgebundener Werkstoffe	419
8.11.	Literatur	420
9.	Aufgabenstellung und Verfahren zur Wasseraufbereitung	
9.1.	Überblick über die Aufgaben der Wasseraufbereitung	422
9.2.	Entfernung von Verunreinigungen	422
9.3.	Stabilisierung von Wässern	424
9.4.	Verfahren zur Desinfektion und Schönung von Wässern	425
9.5.	Anwendung von Verfahrenskombinationen	426

9.6.	Kriterien zur Verfahrenswahl bei der Trinkwasser- aufbereitung	427
9.6.1.	Allgemeines	427
9.6.2.	Beispiele zur Anwendung von Verfahrenskombinationen	428
9.7.	Verfahrenskombinationen und Zielvorstellungen der Trinkwasseraufbereitung	432
9.8.	Literatur	434

Anhang

A	Tabellen, Wassereigenschaften	436
B	Programme für Berechnungen zum Kalk- Kohlensäure-Gleichgewicht	439
B 1.	Grundprogramme	439
B 2.	Eingabeprogramme	446
B 3.	Ausgabeprogramme	451
B 4.	Beispiele für zusammengesetzte Programme	452
B 4.1.	Berechnung des pH-Wertes aus den Werten p und m	452
B 4.2.	Berechnung des Zusatzes, der für einen gegebenen pH-Wert erforderlich ist	453
B 4.3.	Erforderlicher Zusatz für einen gegebenen Sättigungsindex	455
B 5.	Programme und Rechenbeispiele für das Rechnermodell HP 97	457
C	Berechnungsformulare zum Gleichgewichts- system der Kohlensäure	458
	Sach- und Namensverzeichnis	477