



Lehr- und Handbuch  
Wasserversorgung Bd. 6

---

# Wasseraufbereitung – Grundlagen und Verfahren

---

Herausgeber  
DVGW Deutsche Vereinigung des  
Gas- und Wasserfaches e.V.

---

Schriftleitung  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Gimbel  
Prof. Dr.-Ing. Martin Jekel  
Dipl.-Ing. Rainer Ließfeld

---

Wissenschaftliche Leitung  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Gimbel  
Prof. Dr.-Ing. Martin Jekel

## Inhalt

<b>Anforderungen an Trinkwasser und an die Trinkwasseraufbereitung .....</b>	<b>1</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Jekel</i>	
1	Ein historisches Exkurs .....
2	Der Begriff „Trinkwasser“ .....
3	Qualitative Anforderungen an Trinkwasser .....
3.1	Allgemeine Anforderungen .....
3.2	Die neue Trinkwasserverordnung .....
4	Anforderungen an die Trinkwasseraufbereitung .....
4.1	Ziele und Verfahren im Überblick .....
4.2	Gesetzliche Anforderungen an die Aufbereitung von Rohwässern zu Trinkwasser .....
4.3	Technische Anforderungen .....
4.4	Wirtschaftliche und betriebliche Aspekte .....
4.5	Grenzen der Wasseraufbereitungstechnik .....
<b>Gasaustausch .....</b>	<b>23</b>
<i>Dipl.-Ing. Arthur Bächle und Dr.-Ing. Horst Wingrich</i>	
1	Einleitung .....
2	Theoretische Grundlagen des Austausches von gasförmigen Stoffen zwischen den Phasen Luft und Wasser .....
2.1	Gleichgewicht des Gasaustausches .....
2.2	Geschwindigkeit des Gasaustausches .....
3	Gasaustauschapparate in der Trinkwasseraufbereitung .....
3.1	Charakterisierung von Apparatetypen .....
3.2	Technische Beschreibung von Gasaustauschapparaten .....
3.2.1	Offene Belüftung .....
3.2.2	Geschlossene Belüftung .....
3.3	Bevorzugte Apparatetypen für bestimmte Einsatzzwecke .....
3.3.1	Entsäuerung .....
3.3.2	Anreicherung mit Sauerstoff .....
3.3.3	Entfernung von flüchtigen Schadstoffen .....
3.3.4	Eintrag von Ozon .....
4	Auslegung von Gasaustauschapparaten .....
4.1	Berechnung der Apparatöhehe .....
4.2	Ermittlung von spezifischen Apparatedaten .....
5	Betriebsergebnisse .....

6	Einsatzgrenzen der Verfahren .....	58
7	Zusammenfassung .....	59
8	Literaturverzeichnis .....	60

## **Flockung, Sedimentation und Flotation .....** 63

*Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Jekel*

1	Einleitung .....	63
2	Flockung .....	65
2.1	Ziele der Flockung .....	66
2.2	Begriffe und Definitionen .....	66
2.3	Grundlagen .....	67
2.3.1	Oberflächenkräfte .....	67
2.3.2	Flockungskemikalien .....	71
2.3.3	Flockungsmechanismen .....	74
2.3.4	Kinetik der Flockung .....	78
2.4	Verfahrenstechnik und Flockung .....	80
2.4.1	Mischung und Entstabilisierung .....	80
2.4.2	Flockenbildung .....	82
2.4.3	Flockungs- und Flockenabtrennanlagen .....	83
2.5	Flockung und Wasserqualität .....	89
2.6	Störungen der Flockung und Abhilfemaßnahmen .....	91
2.7	Rückstände aus der Flockung .....	92
2.8	Planungsgrundlagen für die Flockung .....	93
3	Sedimentation .....	95
3.1	Sedimentation einzelner Partikel .....	95
3.2	Absetzen von konzentrierten Suspensionen .....	98
3.3	Technische Sedimentation .....	100
3.3.1	Dimensionierung eines Sedimentationsbeckens .....	100
3.3.2	Technische Ausführungen von Sedimentationsanlagen .....	101
4	Flotation .....	106
4.1	Flotationsverfahren .....	106
4.2	Grundlagen der Druckentspannungsflotation .....	107
4.3	Flotationsanlagen .....	109
5	Parameterliste .....	112
6	Literatur .....	113

## **Grundlagen der Tiefenfiltration .....** 115

*Prof. Dr.-Ing. habil. R. Gimbel und Dr.-Ing. A. Nahrstedt*

1	Allgemeines .....	115
---	-------------------	-----

2	Betrieb und Bauweise von Tiefenfiltern .....	117
2.1	Langsamfilter (Langsamsandfilter) .....	117
2.2	Feinfilter .....	118
2.3	Schnellfilter .....	122
2.3.1	Bauweise .....	122
2.3.2	Einsatz und Betriebsweise .....	128
2.3.3	Filterspülung .....	132
3	Makroskopische Beschreibung des Verhaltens von Schnellfiltern als Optimierungsgrundlage .....	136
3.1	Grundsätzliches .....	136
3.2	Konzentrationsverlauf im Filter in der Anfangsphase der Filtration .....	140
3.2.1	Betrachtung der Transportwirksamkeit $\gamma_{0,T}$ .....	140
3.2.2	Betrachtung der Partikelhaftwahrscheinlichkeit $\gamma_{0,H}$ .....	146
3.3	Konzentrations- und Beladungsverlauf im Filter mit fortschreitender Filterlaufzeit .....	151
3.4	Druckverlauf im Filter mit fortschreitender Filterlaufzeit .....	154
4	Kriterien der Filterauslegung und des Betriebs von Schnellfiltern .....	157
4.1	Ermittlung der optimalen Filterschichthöhe .....	157
4.2	Veränderung der Filterwirksamkeit durch Polymerzusatz .....	160
4.3	Einfluss der geometrischen Oberflächenstruktur der Filtermaterialien auf das Filterverhalten .....	165
4.4	Ansätze zur Berechnung der Filterspülung .....	171
5	Neue Ansätze zur Leistungssteigerung der Tiefenfiltration .....	174
6	Zusammenfassung .....	182
7	Technische Regeln .....	183
8	Literatur .....	184
<b>Membranverfahren .....</b>		<b>193</b>
<i>Dr.-Ing. Georg Hagemeyer</i>		
1.1	Einleitung .....	193
1.1.1	Gemeinsame Grundlagen .....	193
1.2	Membranfiltrationsverfahren .....	194
1.2.1	Umkehrosmose und Nanofiltration .....	197
1.2.1.1	Osmotischer Druck .....	197
1.2.1.2	Membranen und Module .....	198
1.2.1.3	Vorbehandlung des Zulaufs zur Vermeidung von Fouling und Scaling ..	203
1.2.1.4	Nachbehandlung .....	206
1.2.1.5	Näherungsgleichungen für die Auslegung von Umkehrosmose und Nanofiltrationsanlagen .....	206

1.2.1.6 Trennverhalten von Umkehrosmosemembranen .....	208
1.2.1.7 Trennverhalten von Nanofiltrationsmembranen .....	210
1.2.1.8 Anwendungen zur Trinkwasseraufbereitung .....	213
1.2.2 Ultra- und Mikrofiltration .....	216
1.2.2.1 Membranen und Module .....	218
1.2.2.2 Ansätze zur Beschreibung des Filtratflusses .....	222
1.2.2.3 Betriebsbedingungen .....	223
1.2.2.4 Trennverhalten und Kontrolle der Membranintegrität .....	226
1.3 Elektrodialyse .....	228
1.3.1 Grundlagen der Elektrodialyse .....	228
1.3.2 Anwendungen zur Trinkwasseraufbereitung .....	232
1.4 Formelzeichen .....	233
1.5 Literaturverzeichnis .....	234
1.5.1 Zitatstellen .....	234
1.5.2 Weiterführende Literatur .....	237
<b>Ionenaustausch .....</b>	<b>239</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang H. Höll</i>	
1 Ionenaustauscher .....	239
1.1 Allgemeines .....	239
1.2 Eigenschaften von Kunstharzionenaustauschern .....	240
1.2.1 Synthese, Aufbau, Struktur, Dichte .....	240
1.2.2 Dissoziationsverhalten und Einsatzbereiche .....	241
1.2.3 Austauschkapazität .....	242
1.2.4 Austauschgleichgewicht und Selektivität .....	243
1.2.5 Austauschkinetik .....	245
1.3 Stabilität von Austauscherharzen .....	246
1.4 Durchbruchverhalten .....	247
2 Ionenaustauscher in der Trinkwasseraufbereitung .....	249
3 Ionenaustauschverfahren .....	250
3.1 Allgemeines .....	250
3.2 Teilenthärtung durch Neutralaustausch .....	251
3.3 Teilenthärtung mit Entcarbonisierung .....	253
3.4 Nitratentfernung .....	256
3.5 Teilentsalzung .....	258
3.5.1 Konventionelle Verfahren .....	258
3.5.2 CARIX-Verfahren .....	259
3.6 Verminderung des gelösten organischen Kohlenstoffes (DOC) .....	262
3.7 Elimination von Schwermetallen .....	263

4	Ionenaustauschtechnologie .....	265
4.1	Allgemeines .....	265
4.2	Festbettverfahren .....	266
4.3	Kontinuierliche Ionenaustauschverfahren .....	268
5	Betriebliche Erfordernisse .....	269

<b>Adsorption</b> .....	274
-------------------------	-----

*Dr.-Ing. Ralph Hobby und Prof. Dr.-Ing. Rolf Gimbel*

1	Einleitung und Übersicht .....	274
1.1	Anwendungsgebiete von Aktivkohle .....	275
1.2	Begriffe der Adsorption .....	276
2	Herstellung und Eigenschaften von Aktivkohle .....	276
3	Das Gleichgewicht der Adsorption .....	280
3.1	Allgemeines .....	280
3.2	Adsorptionsgleichgewichte von Einzelstoffen .....	280
3.3	Adsorptionsgleichgewicht von Mehrstoffsystemen .....	287
4	Die Kinetik des Adsorptionsvorganges .....	293
4.1	Allgemeines .....	293
4.2	Äußerer Stofftransport (Filmdiffusion) .....	293
4.3	Innerer Stofftransport (Oberflächendiffusion) .....	296
5	Verfahrenstechnische Möglichkeiten zum Einsatz von Adsorptionsverfahren in der Wassertechnik .....	298
5.1	Allgemeines .....	298
5.2	Einsatz pulverförmiger Aktivkohle (Pulverkohle) .....	298
5.3	Einsatz körniger Aktivkohle (Kornkohle) .....	303
5.4	Spezielle Verfahrenstechniken mit Pulverkohle .....	309
6	Formelzeichen .....	311
7	Literatur .....	313

<b>Chemische Oxidation</b> .....	315
----------------------------------	-----

*Dr. Ernst Gilbert*

1	Einleitung .....	315
2	Oxidation, Reduktion, Redoxpotential, Redoxspannung .....	315
3	Chlor, Chlordioxid .....	317
4	Ozon .....	319
4.1	Zugabe und Grenzwert .....	319
4.2	Reaktionsprodukte des Oxidationsmittels .....	320
4.3	Eigenschaften des Ozons .....	320
4.4	Reaktionen von Ozon mit Wasserinhaltsstoffen .....	321

4.4.1	Reaktionswege des Ozons in wäßrigen Lösungen .....	321
4.4.2	Reaktionen mit anorganischen Inhaltstoffen .....	322
4.4.3	Reaktionen mit organischen Inhaltstoffen .....	324
4.4.4	Einfluß der Ozonung auf die Summenparameterwerte .....	326
4.5	Die Ozonungsstufe in der Trinkwasseraufbereitung .....	328
5	Wasserstoffperoxid, Natriumperoxidisulfat, Kaliummonopersulfat .....	329
5.1	Zugabe und Grenzwerte .....	329
5.2	Reaktionsprodukte des Oxidationsmittels .....	330
5.3	Reaktionen von Wasserstoffperoxid mit Wasserinhaltsstoffen .....	330
5.3.1	Anorganische Inhaltstoffe .....	330
5.3.2	Organische Inhaltstoffe .....	331
6	Kombinierter Einsatz von Ozon und Wasserstoffperoxid .....	331
7	Kaliumpermanganat .....	333
7.1	Zugabe und Grenzwerte .....	333
7.2	Reaktionsprodukte des Oxidationsmittels .....	333
7.3	Reaktionen von Kaliumpermanganat mit Wasserinhaltsstoffen .....	334
7.3.1	Anorganische Inhaltstoffe .....	334
7.3.2	Organische Inhaltstoffe .....	334
7.3.3	Algizide Wirkung .....	335
8	Sauerstoff .....	335
8.1	Zugabe, Grenzwerte, Verwendungszweck .....	335
8.2	Reaktion mit Wasserinhaltsstoffen .....	335
9	Literatur .....	336
<b>Biologische Verfahren der Trinkwasseraufbereitung .....</b>		<b>339</b>
<i>Dr.-Ing. Wolfgang Uhl und Prof. Dr. Horst Overath</i>		
1	Vorbemerkung .....	339
2	Grundlagen .....	339
2.1	Prinzipien biologischer Aufbereitungsverfahren .....	339
2.2	Einteilung und Eigenschaften von Mikroorganismen .....	340
2.3	Stoffumsetzungen durch Bakterien .....	342
2.3.1	Stöchiometrie .....	342
2.3.2	Stickstofflimitierung .....	345
2.3.3	Phosphatlimitierung .....	346
3	Biologische Entfernung organischer Wasserinhaltsstoffe .....	346
3.1	Ausnutzung biologischer Abbauprozesse in Schnell- und Aktivkohle- filtern .....	346
3.2	Mikrobielle Besiedelung von Wasseraufbereitungsfiltern .....	349
3.2.1	Besiedelungsmechanismen .....	349

3.2.2	Bakterienkonzentrationen und Artenspektrum im Zulauf und Ablauf von Aktivkohlefiltern .....	350
3.2.3	Besiedelungsdichte und Artenspektrum sessiler Bakterien in Aktivkohlefiltern .....	351
3.2.4	Verhalten pathogener Mikroorganismen in Aktivkohlefiltern .....	353
3.2.5	Besiedelung der Filter durch Protozoen und Metazoen .....	354
3.3	Einfluss vorgeschalteter Aufbereitungsschritte auf die biologische Entferungsleistung .....	355
3.3.1	Flockung, Fällung, Flotation, Sedimentation .....	355
3.3.2	Ozonung .....	355
3.4	Einfluss von Betriebsparametern auf die Entferungsleistung .....	356
3.4.1	Wassertemperatur .....	356
3.5	Durchflußgeschwindigkeit .....	358
3.6	Einfluss von Schüttungsmaterialien auf die Entferungsleistung .....	359
4	Biologische Ammoniumentfernung (Nitrifikation) .....	360
4.1	Grundlagen .....	360
4.1.1	Stöchiometrie der mikrobiellen Oxidation von Ammonium und Nitrit ....	360
4.1.2	Kinetik .....	361
4.1.3	Temperatur- und pH-Abhängigkeit .....	361
4.1.4	Einfluß der Phosphat-Konzentration .....	363
4.1.5	Einfluß des Trägermaterials .....	365
4.2	Ammonium-Durchbruch in Tiefenfiltern der Trinkwasseraufbereitung als dynamisches Problem .....	365
5	Biologische Nitratentfernung .....	367
5.1	Einleitung .....	367
5.2	Verfahren der biologischen Entfernung von Nitrat .....	368
5.2.1	Nitratabbau .....	369
5.2.2	Sauerstoffabbau .....	370
5.2.3	Denitrifikationsreaktor .....	371
5.2.4	Nachbehandlung .....	373
5.2.4.1	Be- und Entgasungsstufe .....	373
5.2.4.2	Filtration .....	373
5.2.4.3	Desinfektion .....	373
5.3	Stand der Entwicklung der Denitrifikationstechnologie in Deutschland .....	374
5.3.1	Kurze Beschreibung der technischen Anlagen mit heterotropher Denitrifikation .....	375
5.3.1.1	Das Neusser Verfahren .....	375
5.3.1.2	Das DENIPOR-Verfahren .....	377
5.3.1.3	Das PERMAPORR-Verfahren .....	378

5.3.1.4	Denitrifikation im Wirbelschichtreaktor .....	380
5.3.1.5	Das NITRAZUR-Verfahren .....	382
5.3.1.6	Das DENI-TEC-Verfahren .....	384
5.3.1.7	Das NEBIO-Rohrreaktor-Verfahren .....	385
5.3.1.8	Das DENIPLANT-Verfahren .....	386
5.3.2	Kurze Beschreibung der technischen Anlagen mit autotropher Denitrifikation .....	388
5.3.2.1	Das DENITROPUR-Verfahren .....	388
5.3.2.2	Das Berko-MFT-Verfahren .....	389
5.4	Verfahren zur Entfernung von Nitrat mit Ionenaustauschern .....	390
5.4.1	Grundlagen .....	390
5.4.2	Technische Durchführung .....	392
5.5	Verfahren zur Entfernung von Nitrat mit dem Membranverfahren .....	393
5.6	Entscheidungshilfen für die Planung, den Bau und den Betrieb einer Anlage zur Entfernung von Nitrat .....	394
5.6.1	Nennleistung der Anlage .....	394
5.6.2	Entwicklungsstand des Verfahrens .....	395
5.6.3	Betriebsweise der Anlage .....	395
5.6.4	Nachbehandlung .....	395
5.6.5	Behandlung des Schlammwassers .....	396
5.7	Schlussbemerkung .....	397
6	Literatur .....	398

## **Künstliche Grundwasseranreicherung und Untergrundpassage .....** 403

*Dipl.-Geograph Ulrich Schulte-Ebbert*

1	Einführung .....	403
2	Infiltrationstechniken .....	405
2.1	Oberirdische Infiltration .....	405
2.1.1	Infiltration durch bewachsenen Boden .....	405
2.1.2	Infiltrationsbecken (Langsamsandfiltration) .....	407
2.1.3	Mulden / Mulden-Rigolen .....	409
2.2	Unterirdische Infiltration .....	410
2.2.1	Infiltrationsbrunnen .....	410
2.2.2	Horizontalfilterbrunnen .....	411
2.2.3	Sickerschlitzgräben .....	411
2.3	Uferfiltration .....	412
3	Reinigungsmechanismen .....	414
3.1	Reinigungsmechanismen .....	414
3.2	Biologie des Filterkörpers .....	416

3.2.1	Sandfilter .....	416
3.2.2	Untergrundpassage .....	418
3.3	Redoxabfolge bei Infiltration und Untergrundpassage .....	421
4	Reinigungsleistung .....	423
4.1	Partikuläre/kolloidale Substanzen .....	424
4.2	Mikroorganismen und pathogene Keime .....	426
4.3	Organische Substanz .....	428
4.4	Spuren- und xenobiotische Stoffe .....	430
5	Einsatzmöglichkeiten und Randbedingungen .....	432

**Die folgenden Beiträge sind nur auf der beiliegenden CD-Rom vorhanden**

<b>Partikelentfernung – Teil 1 .....</b>	<b>440</b>
--	------------

*Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Jekel*

1	Aufbereitungsziele der Partikelentfernung .....	440
2	Anforderungen an die Flockung .....	441
3	Optimierung der Flockung .....	442
3.1	Meß- und Zielparameter der Flockung .....	442
3.2	Flockungstestverfahren .....	444
3.3	Chemische Parameter der Optimierung .....	444
3.4	Physikalische Parameter der Optimierung .....	448
4	Häufige Fehler bei der Flockung .....	449
5	Rückstände der Partikelentfernung .....	450

<b>Partikelentfernung – Teil 2 .....</b>	<b>454</b>
--	------------

*Dr.-Ing. Günther Baldauf*

1	Einleitung .....	454
2	Anforderungen an Aufbereitungsanlagen .....	454
3	Verfahren zur Partikelelimination .....	454
4	Einsatzbereiche verschiedener Verfahren .....	455
4.1	Langsandsandfiltration .....	456
4.2	Uferfiltration .....	457
4.3	Mikrosiebung .....	458
4.4	Vorfiltration .....	458
4.4.1	Fallbeispiel – Zweistufige Filtration .....	459
4.5	Zweischichtfiltration .....	460
4.6	Flockungsmittel-, Flockungshilfsmitteldosierung .....	462
4.7	Einfluss der Ozonung auf den Partikelrückhalt .....	463

4.8	Einfluss des Trübstoff- und Huminstoffgehaltes auf die Filterlaufzeit ....	464
4.9	Kontrolle von Filteranlagen .....	465
4.10	Flockenfiltration unter Druck .....	466
5	Auslegung von Filteranlagen .....	466
6	Filterspülung .....	467
7	Spülwasserbehandlung und -entsorgung .....	469
8	Membranfiltration .....	469
8.1	Membranspezifische Kenndaten .....	470
8.2	Abwassersituation .....	472
8.3	Fallbeispiel – Ultrafiltration zur Aufbereitung eines Quell- und Talsperrenwassers .....	472
8.3.1	Aufbereitungstechnik .....	473
8.3.2	Verfahrenstechnische Kenndaten .....	473
8.3.3	Kosten .....	475
9	Literatur .....	476

## **Enteisung und Entmanganung .....** 478

*Dr. rer. nat. Peter Groth und Dr. rer. nat. Christoph Czekalla*

1	Einführung .....	478
2	Eisen und Mangan in natürlichen Wässern .....	478
2.1	Physikalisch-chemische, physikalische und mikrobiologische Randbedingungen .....	478
2.1.1	Die Redoxspannung .....	479
2.1.2	Der pH-Wert .....	480
2.1.3	Temperatur und Fremdionenkonzentration .....	481
2.1.4	Das Konzept der $E_H$ -pH-Diagramme .....	481
2.1.5	Die Schlüsselfunktion der Mikroorganismen .....	483
2.2	Mikroorganismen, Stoffkreisläufe und Gewässertypen .....	484
3	Oxidation und Abscheidung von Eisen und Mangan in Aufbereitungsanlagen .....	490
3.1	Physikalisch chemische Randbedingungen und chemische Prozesse ..	490
3.1.1	Allgemeine Randbedingungen und Anforderungen .....	490
3.1.2	Die Reaktionsgeschwindigkeit .....	491
3.1.3	Die katalytische Oxidation .....	494
3.1.4	Oxidation durch Dosierung von Oxidationsmitteln .....	495
3.2	Die Rolle der Mikroorganismen in Aufbereitungsanlagen .....	495
3.2.1	Eisen- und Manganbakterien .....	495
3.2.2	Steuerung und Betrieb .....	498
4	Verfahren der Enteisung und Entmanganung .....	499

4.1	Allgemeines .....	499
4.2	Aufbereitungszielwerte .....	500
4.3	Verfahrenstechnische Auswahlkriterien .....	501
4.4	Bemessung und Aufbereitungsversuche .....	503
4.5	Oberirdische Verfahren .....	504
4.5.1	Gewässer nach Typ A .....	505
4.5.2	Gewässer nach Typ B .....	506
4.5.3	Gewässer nach Typ C .....	508
4.6	Unterirdische Verfahren .....	509
5	Betriebliche Aspekte .....	511
5.1	Einarbeitung des Filtermaterials .....	511
5.2	Filtrationsbetrieb .....	511
5.3	Filterspülung .....	513
5.4	Betriebsstörungen .....	513
5.5	Rückstandsentsorgung .....	514
<b>Enthärtung und Entkarbonisierung .....</b>		<b>517</b>
<i>Dipl.-Ing. Dieter Stetter .....</i>		<i>517</i>
1	Einleitung .....	517
2	Verfahren zur Enthärtung und Entsalzung .....	518
2.1	Einteilung der Verfahren und Begriffsbestimmungen .....	518
2.2	Auswirkungen der Enthärtung, Entkarbonisierung und Entsalzung auf die Trinkwasserzusammensetzung .....	519
3	Gründe für die zentrale Enthärtung und Entkarbonisierung .....	521
3.1	Direkte Vorteile für den Verbraucher .....	521
3.2	Korrosionschemische Aspekte .....	521
3.3	Auswirkungen auf die Umwelt .....	522
3.4	Stellung des DVGW zur zentralen Enthärtung und Entkarbonisierung ..	523
4	Chemismus der Enthärtung und Entkarbonisierung mittels Fällungsverfahren .....	523
4.1	Allgemeines .....	523
4.2	Chemische Enthärtung und Entkarbonisierung mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und/oder NaOH .....	524
4.3	Physikalische Enthärtung und Entkarbonisierung .....	526
5	Ziele der Aufbereitung und Auswahl der Verfahren .....	526
6	Verfahrenstechnik der chemischen Enthärtung und Entkarbonisierung .....	529
6.1	Grundlagen .....	529
6.2	Randbedingungen bei der Schnellentkarbonisierung .....	531

6.3	Kalkmilch- und Kalkwasserbereitung .....	532
6.3.1	Herkömmliche Verfahren .....	532
6.3.2	Bereitstellung von Kalkmilch mit hoher Lösegeschwindigkeit .....	534
6.4	Schnellentkarbonisierungsanlagen .....	537
6.5	Weiterentwicklungen bei der Schnellentkarbonisierung .....	539
6.6	Langsamentkarbonisierungsanlagen .....	541
6.7	Filteranlagen .....	544
6.8	TEIVAC-Verfahren .....	545
7	Verwertung der Rückstände .....	546

<b>Entfernung anorganischer Mikroverunreinigungen und von Radionukli-</b>		
<b>den .....</b>		<b>551</b>

*Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Jekel und Prof. Dr.-Ing. Klaus Haberer*

1	Einleitung .....	551
2	Die chemische Spezifikation der Spurenmetalle .....	553
3	Verfahren zur Entfernung von Spurenmetallen .....	555
3.1	Fällung und Flockung .....	555
3.2	Ionenaustausch .....	557
3.3	Sorptionsverfahren .....	558
3.4	Oxidation und Reduktion .....	559
3.5	Umkehrosmose/Elektrodialyse .....	559
3.6	Langsamsandfilter und Bodenpassage .....	560
4	Erfahrungen anhand von wichtigen Fallbeispielen .....	560
4.1	Aluminium .....	560
4.2	Arsen .....	562
4.2.1	Oxidation des As(III) .....	562
4.2.2	Fällungs-/Flockungsverfahren .....	563
4.2.3	Adsorptionsverfahren .....	564
4.2.4	Sonderverfahren .....	568
5	Nickel .....	568
6	Übersicht zu anorganischen Spurenstoffen .....	569
7	Radionuklidentfernung bei der Wasseraufbereitung .....	572
7.1	Einleitung .....	572
7.2	Abscheidungsprozesse .....	573
7.3	Entfernung wichtiger Radionuklide bei der Trinkwasseraufbereitung ....	576
7.3.1	Radon .....	576
7.3.2	Radium .....	577
7.3.3	Uran .....	578
7.4	Künstliche Radionuklide .....	579
7.5	Zusammenfassung .....	582

<b>Entfernung organischer Stoffe – Teil 1 .....</b>	<b>588</b>
<i>Dr.-Ing. Günther Baldauf</i>	
1 Einleitung .....	588
2 Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Entfernung organischer Stoffe .....	590
2.1 Strippverfahren .....	591
2.1.1 Stoffspezifische Eigenschaften .....	591
2.1.2 Apparattypen .....	592
2.1.3 Wirkungsgrade von Strippanlagen .....	593
2.1.4 Begleitprozesse beim Einsatz von Strippverfahren .....	596
2.1.5 Zu- und Abluftbehandlung .....	596
2.2 Flockung .....	597
2.2.1 Entfernung organischer Wasserinhaltsstoffe .....	597
2.2.2 Fallbeispiel – DOC-Elimination durch Flockung .....	599
2.2.3 Werkstoffauswahl .....	599
2.2.4 Spülwasserbehandlung .....	600
2.2.5 Entfernung niedermolekularer Verbindungen .....	600
2.3 Adsorption an Aktivkohle .....	600
2.3.1 Aktivkohletypen .....	600
2.3.2 Adsorptionsverhalten von Einzelstoffen .....	601
2.3.3 Durchbruchverhalten von organischen Störstoffen .....	601
2.3.4 Einfluss der Aktivkohletypen auf das Durchbruchverhalten eines Störstoffes .....	606
2.3.5 Biologische Vorgänge in Aktivkohlefiltern .....	606
2.3.6 Betriebsweise von Adsorbern .....	607
2.3.7 Fallbeispiel – Strippen/Aktivkohle .....	608
2.3.8 Aktivkohlewechsel .....	609
2.3.9 Korrosionsschutz .....	611
2.4 Adsorptive Entfernung von Huminstoffen .....	611
2.4.1 Kostenbetrachtung .....	612
 <b>Entfernung organischer Stoffe – Teil 2 .....</b>	 <b>616</b>
<i>Dr.-Ing. Ralph Hobby, Dr.-Ing. Wolfgang Uhl, Dr.-Ing. Georg Hagmeyer,</i>	
<i>Dipl.-Ing. Pete Berg und Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Gimbel</i>	
1 Einleitung .....	616
2 Adsorptionsverfahren mit Pulveraktivkohle .....	616
2.1 Allgemeines .....	616
2.2 Auswahl der Pulveraktivkohle .....	618

2.3	Verfahrenstechnische Möglichkeiten zum Einsatz von Pulveraktivkohle .....	620
2.3.1	Konventionelle Pulveraktivkohleanlage .....	620
2.3.2	Alternative Verfahrenstechniken zum Einsatz von Pulveraktivkohle .....	625
2.4	Entsorgungsmöglichkeiten gebrauchter Pulveraktivkohlen .....	629
3	Biologische Verfahren ohne und mit Vorzönung .....	629
3.1	Bodenpassage .....	635
3.1.1	Einsatzmöglichkeiten einer Untergrundpassage .....	636
3.1.2	Vorgänge in einer Untergrundpassage .....	640
3.2	Langsamsandfilter .....	643
3.3	Biologisch wirksame Kornaktivkohlefilter .....	645
4	Membranverfahren .....	650
4.1	Allgemeines .....	650
4.2	Verfahrensprinzip der Membranfiltration .....	652
4.3	Membranen und Module .....	655
4.3.1	Mikro- und Ultrafiltration .....	655
4.3.2	Nanofiltration .....	657
4.4	Anwendungen der Nanofiltration .....	660
4.5	Verfahrenstechnische Ausführungen von Nanofiltrationsanlagen .....	664
5	Literatur .....	666

## **Stabilisierung – Grundlagen .....** 671

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Klaus Johannsen*

1	Einleitung .....	671
1.1	Begriffe und Definitionen .....	671
1.2	Stabilisierungsverfahren .....	672
2	Das System Kohlenstoffdioxid/Wasser .....	673
2.1	Wasserchemische Beurteilungsgrößen .....	673
2.2	Anforderungen an die Trinkwasserqualität .....	675
2.3	Grundlagen .....	676
2.4	Berechnung des pH-Wertes .....	682
2.5	m- und p-Wert .....	683
2.6	Auswirkung von Zusätzen .....	683
2.7	Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht .....	685
2.7.1	Sättigungsindex .....	685
2.7.2	Tillmanskurve .....	686
2.7.3	pH <sub>A</sub> -Wert .....	687
2.7.4	Calcitlösekapazität D <sub>C</sub> .....	688
2.7.5	pH-Wert für D <sub>C</sub> = 5 mg/L .....	690

2.7.6	Überprüfung der Anforderungen an den pH-Wert .....	691
3	Mischung von Wässern .....	692
4	Entsäuerung .....	695
5	Literatur .....	696
<b>Stabilisierung – Praxis .....</b>		<b>709</b>
<i>Dipl.-Ing. Werner Nissing</i>		
1	Einleitung .....	709
2	pH-Wert-Einstellung (Entsäuerung) .....	709
2.1	Grundlegende Betrachtungen .....	709
2.2	Aufbereitungsziel .....	710
2.3	Verfahren .....	712
2.4	Physikalische Entsäuerungsverfahren .....	717
2.4.1	Einsatzbereiche .....	717
2.4.2	Wirkungsgrad .....	717
2.4.3	Apparate .....	718
2.5	Filterverfahren .....	720
2.5.1	Calciumcarbonat .....	721
2.5.2	Halbgebrannter Dolomit .....	725
2.6	Dosierverfahren .....	727
2.7	Verfahrenskombinationen .....	731
2.8	Überwachung .....	732
3	Versorgung mit Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit .....	732
3.1	Definition der Unterschiedlichkeit von Wässern .....	735
3.2	Beispiele für die Versorgung mit unterschiedlichen Wässern .....	743
3.3	Technische Maßnahmen bei der Verteilung unterschiedlicher Wässer .....	747
3.3.1	Zonentrennung .....	748
3.3.2	Mischung .....	748
3.3.3	Aufbereitungsmaßnahmen .....	749
4	Dosierung von Chemikalien zur Stabilisierung .....	749
4.1	Werkstoffe und Korrosion .....	750
4.2	Wirkung von Korrosionsinhibitoren .....	751
4.3	Vorbereitete Maßnahmen .....	757
4.4	Begleitende Maßnahmen .....	758
4.5	Dosieranlagen .....	759
4.6	Nebenwirkungen .....	760
4.7	Grundsätzliche Anmerkungen zur zentralen Inhibitor-Zugabe .....	761
5	Literatur .....	761

<b>Desinfektion</b> .....	765
<i>Dipl.-Chem. Ottmar Hofmann, Dipl.-Chem. Oluf Hoyer, Prof. Dr. med. Dirk Schoenen und Dr.-Ing. B. Wricke</i>	
1 Einleitung .....	765
2 Grundlagen der Desinfektion .....	766
3 Desinfektion von Trinkwasser .....	769
3.1 Desinfektion mit chemischen Stoffen .....	771
3.1.1 Chlor .....	771
3.1.2 Chlordioxid .....	776
3.1.3 Ozon .....	779
3.2 Desinfektion mit UV-Strahlung .....	780
4 Desinfektion von Wasseerversorgungsanlagen .....	785
5 Literatur .....	786
<b>Rückstände aus der Wasseraufbereitung</b> .....	791
<i>Prof. Dr.-Ing. Knut Wichmann</i>	
1 Einleitung .....	791
2 Rechtliche Begriffe und Regelungen .....	792
3 Mengen, Beschaffenheit, Behandlung .....	793
3.1 Mengen .....	793
3.2 Beschaffenheit .....	794
3.2.1 Chemische Beschaffenheit .....	795
3.2.2 Physikalische Beschaffenheit .....	795
3.3 Behandlung .....	797
4 Vermeidung .....	798
5 Vermarktungs- und Entsorgungswege .....	798
5.1 Vermarktung als Nebenprodukt .....	798
5.2 Einleitung als Abwasser .....	799
5.3 Verwertungsmöglichkeiten .....	800
5.4 Beseitigung als Abfall .....	802
6 Problembereiche .....	803
6.1 Physikalische Eigenschaften der Schlämme .....	803
6.2 Umstellung auf neue Entsorgungswege .....	803
7 Entsorgungslogistik .....	804
8 Kosten .....	806
9 Literatur .....	806
<b>Aufbereitung natürlicher und anthropogen belasteter Grundwässer</b> .....	808
<i>Prof. Dr.-Ing. Knut Wichmann</i>	
1 Einleitung .....	808
2 Beschaffenheit natürlicher Grundwässer .....	811

2.1	Milieu-Bedingungen und Prozesseässer .....	811
2.2	Grundwassertypen .....	812
3	Aufbereitung natürlicher Grundwässer .....	816
3.1	Allgemeines .....	816
3.2	Verfahrenskombinationen .....	818
3.2.1	Grundwassertyp A1 .....	819
3.2.2	Grundwassertyp A2 .....	820
3.2.3	Grundwassertyp B2 .....	822
3.2.4	Grundwassertyp B2 .....	823
3.2.5	Mischwasser der Typen A + B .....	824
3.2.6	Grundwassertyp C 2 – stark reduziertes Grundwasser / Normaltyp .....	825
3.2.7	Grundwassertyp C 2 – stark reduziertes Grundwasser / Extremtyp .....	826
3.2.8	Mischwassertyp B + C .....	827
3.2.9	Mischwassertyp B + C mit Entcarbonisierung .....	827
3.2.10	Grundwassertyp D .....	828
3.2.11	Übersicht Verfahrenskombinationen .....	831
4	Anthropogene Belastungen im Grundwasser .....	831
5	Maßnahmen im Vorfeld der Grundwassergewinnung .....	834
5.1	Bioabbau von Schadstoffen in Enteisenungsfiltern .....	836
6	Aufbereitung belasteter Wässer im Wasserwerk .....	840
7	Literatur .....	842
<b>Kombinierte Verfahren der Oberflächenwasseraufbereitung .....</b>		<b>844</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Jekel</i>		
1	Grundprinzipien der Kombinationsverfahren .....	844
2	Aufbereitung von Wasser aus Talsperren und Seen .....	846
3	Flusswasseraufbereitung .....	850
3.1	Direkte Flusswasseraufbereitung .....	851
3.2	Indirekte Flusswasseraufbereitung .....	852
3.2.1	Uferfiltration und Nachaufbereitung .....	852
3.2.2	Künstliche Grundwasseranreicherung mit Vor- und/oder Nachbehandlung .....	853
<b>Planung und Konzeption von Aufbereitungsanlagen .....</b>		<b>857</b>
<i>Dr. Frank Urban</i>		
1	Wann muss über Veränderungen an der Aufbereitungsanlage nachgedacht werden? .....	857
2	Phasen der Planung .....	859
2.1	Basis der Einteilung der Projektphasen .....	859

2.2	Grundlagenermittlung – Begutachtungen .....	859
2.2.1	Begutachtungen durch das Ingenieurbüro .....	860
2.2.2	Begutachtungen durch Institute .....	865
2.2.3	Begutachtungen durch eigene Kräfte des Wasserversorgers .....	866
2.2.4	Gemeinsame Voruntersuchungen .....	866
2.3	Vorplanung .....	867
2.4	Entwurfs- und Genehmigungsplanung .....	869
2.5	Ausführungsplanung .....	873
2.6	Vorbereitung und Mitwirkung bei der Vergabe .....	874
2.7	Örtliche Bauleitung und Objektüberwachung .....	876
3	Leitsätze für den Planer .....	881

### **Steuerung und Automatisierung in der Trinkwasseraufbereitung .....** 884

*Dr.-Ing. Ilka Teermann, Dr. rer. nat. Rudolf Irmischer*

1	Einleitung .....	884
2	Aufbau von Automatisierungsstrukturen in Wasserwerken .....	885
2.1	Kurzer Abriss zur Historie der Wasserwerksautomatisierung .....	886
2.2	Automatisierungsaufgaben .....	887
2.2.1	Erfassen des Anlagenzustands und der Wasserqualität .....	889
2.2.2	Steuern und Regeln .....	895
2.3	Ebenen der Automatisierung .....	899
3	Planung von Automatisierungsaufgaben .....	901
3.1	Projektstudie .....	901
3.2	Projektplanung .....	902
3.3	Lastenheft .....	904
3.4	Ausschreibung und Auswertung .....	905
3.5	Pflichtenheft .....	905
4	Betrieb und Instandhaltung der Automatisierungsanlagen .....	905
5	Zusammenfassung .....	907
6	Literatur .....	907

### **Wasseraufbereitung und Verteilung aus Sicht der Verkeimungsneigung ....** 609

*Prof. Dr.-Ing. Knut Wichmann*

1.	Einleitung .....	909
2	Mikrobiologische Vorgänge in der Verteilung .....	909
2.1	Milieubedingungen .....	909
2.2	Was ist Verkeimung? .....	910
2.3	Herkunft der Indikator-Organismen („Verkeimung“) .....	912
2.4	Entwicklung der Indikator-Organismen .....	913

2.5	Untersuchungsmethoden .....	914
3	Vermeidung der Indikatororganismen („Verkeimung) .....	918
3.1	Wasseraufbereitung .....	919
3.1.1	Substratentfernung bzw. Abbau .....	919
3.1.2	Substratbildung vermeiden/minimieren .....	920
3.1.3	Beispiel Enteisung .....	920
3.2	Wasserverteilung .....	922
3.2.1	Substratbildung minimieren .....	922
3.2.2	Biofilme minimieren .....	923
4	Beispiel einer Wasseraufbereitung und Verteilung mit mikrobiologischen Milieuveränderungen .....	923
5	Literatur .....	926

## **Korrosion und Korrosionsschutz in Wasseraufbereitungsanlagen .....** 928

*Dipl.-Ing. Werner Nissing*

1	Einleitung .....	928
2	Korrosion, Korrosionserscheinung und Korrosionsschaden .....	929
3	Korrosionsschutzmaßnahmen .....	932
3.1	Einführung .....	932
3.2	Werkstoffauswahl .....	933
3.2.1	Nichtrostende Stähle .....	934
3.2.2	Aluminium und Aluminiumlegierungen .....	934
3.2.3	Kupfer und Kupferlegierungen .....	935
3.3	Kunststoffe .....	936
3.4	Metallische Überzüge .....	937
3.4.1	Feuerverzinkung .....	939
3.5	Organische Beschichtungen .....	939
3.5.1	Organische Beschichtungen auf metallischen Werkstoffen .....	940
3.5.2	Beschichtung auf Feuerverzinkung und thermisch gespritzten Zink- oder Aluminium-Überzügen (Duplex-System) .....	943
3.5.3	Organische Beschichtungen auf zementgebundenen Werkstoffen .....	944
3.6	Zementmörtelauskleidungen .....	944
3.7	Emaillierung .....	945
3.8	Kathodischer Innenschutz von Behältern und Filtern .....	946
3.9	Anwendung von Korrosionsinhibitoren .....	947
4	Beispiele für Arten und Einflußgrößen von Korrosionsschäden und ihre Vermeidung .....	947
4.1	Unbeschichtete metallische Werkstoffe .....	947
4.1.1	Gleichförmiger Flächenabtrag .....	947

4.1.2	Ungleichförmiger Flächenabtrag (Dickenabtrag) mit Muldenbildung und Lochfraß .....	948
4.1.3	Schutzmaßnahmen .....	948
4.2	Metallische Werkstoffe mit organischen Beschichtungen .....	948
4.2.1	Durchrosten der Beschichtung .....	948
4.2.2	Abblättern .....	948
4.2.3	Blasenbildung .....	948
4.2.4	Lochfraß an Poren und Verletzungen .....	949
4.2.5	Unterwanderung und Unterrostung im Bereich von Fehlstellen .....	949
4.2.6	Spaltkorrosion .....	950
4.3	Zementgebundene Werkstoffe mit organischen Beschichtungen .....	950
4.3.1	Quellung, Aufweichung, Zersetzung .....	950
4.3.2	Blasenbildung .....	950
5	Werkstoffe für Anlagen der Wasseraufbereitung .....	951
5.1	Wassergewinnung .....	951
5.1.1	Entnahmebauwerke für Oberflächenwässer .....	951
5.1.2	Quellfassungen .....	951
5.1.3	Brunnen .....	951
5.2	Wasseraufbereitung .....	951
5.2.1	Anlagen zum Abtrennen grobdisperser Stoffe .....	951
5.2.2	Anlagen zum Gasaustausch .....	952
5.2.3	Chemische Entsäuerungsanlagen .....	952
5.2.4	Anlagen zur Fällung und Flockung .....	955
5.4.2.1	Aluminiumchlorid .....	956
5.4.2.2	Aluminiumsulfat .....	957
5.4.2.3	Eisen(III)-chlorid .....	958
5.4.2.4	Eisen(III)-sulfat .....	958
5.4.2.5	Eisen(II)-sulfat .....	958
5.4.2.6	Natriumaluminat .....	958
5.4.3	Filteranlagen .....	958
5.4.4	Anlagen zur Oxidation und Desinfektion .....	959
5.4.4.1	Ozon .....	959
5.4.4.2	Chlor .....	959
5.4.4.3	Natriumhypochlorit .....	959
5.4.4.4	Chlordioxid .....	959
6	Gewährleistung und Wartung .....	960
7	Literatur .....	961

**Die Zukunft der Wasseraufbereitung .....** 965

*Prof. Dr.-Ing. Rolf Gimbel*

1	Einleitung und Problemstellung .....	965
2	Liberalisierung des Wassermarktes und Trinkwasseraufbereitung .....	967

---

3	Gewässerschutz und Trinkwasseraufbereitung .....	969
4	Stand der Trinkwasseraufbereitung in Deutschland .....	972
5	Aktuelle Forderungen an die Trinkwasseraufbereitung .....	974
6	Ausblick auf die zukünftige Trinkwasseraufbereitung .....	976
7	Literatur .....	979
	Autorenverzeichnis .....	982