

Dieter Mauer

Die VE-Anlage

Vollentsalzung mit Ionenaustauschern
2. erweiterte Auflage

Eine umfassende Darstellung einschließlich einiger
angrenzender Verfahrenstechniken



Die VE-Anlage

Vollentsalzung mit Ionenaustauschern

Eine umfassende Darstellung einschließlich einiger
angrenzender Verfahrenstechniken

322 Abbildungen, Formeln und Tabellen

2. deutlich erweiterte Auflage

Dieter Mauer

2. erweiterte Auflage

2025 © Dieter Mauer, MionTec-Consulting, Leverkusen

Umschlagfotos mit freundlicher Genehmigung der Schaller WTI GmbH

Printed in Germany, ISBN 978-3-00-080334-5

1	Einleitung	12
1.1	Zielgruppen des Buches	13
1.2	Hinweise zum Lesen	14
1.3	Der rote Faden	15
2	Einige wichtige Grundlagen aus der Wasserchemie.....	16
2.1	Mit pH-Werten kann man rechnen!	17
2.2	Dissoziation und Assoziation in Lösungen, Hydratisierung	23
2.3	Verhalten von Kohlensäure, von Säuren allgemein	28
2.4	Normierung und Gliederung der Wasseranalyse	36
2.4.1	Blockdarstellung der Wasseranalyse mit Härte > HCO_3	36
2.4.2	Blockdarstellung der Wasseranalyse mit Härte < HCO_3	39
2.4.3	Der Übergang von der gemessenen Analyse zum Blockdiagramm durch Normierung	40
3	Funktion der gängigen Ionenaustauscherklassen.....	44
3.1	Kationenaustauscher.....	45
3.1.1	Starksaure Kationenaustauscher (SAC)	45
3.1.2	Schwachsaure Kationenaustauscher (WAC)	47
3.2	Anionenaustauscher.....	51
3.2.1	Starkbasische Anionenaustauscher (SBA, Typ I)	51
3.2.2	Schwachbasische Anionenaustauscher (WBA)	52
3.2.3	Das „Königskinder“-Phänomen der schwachbasischen Typen	55
3.2.4	Doppelbasische Anionenaustauscher (DBA)	56
3.2.5	Starkbasische Anionenaustauscher des Typs II (SBA, Typ II)	59
3.3	Harzdaten und -eigenschaften	62
3.3.1	Matrixstrukturen.....	62
3.3.2	Volumenveränderungen.....	66
3.3.3	Kapazitätsdefinitionen	70
3.3.4	Dichtedefinitionen.....	72
3.3.5	Selektivität	74
3.4	Alterungsmechanismen von Ionenaustauschern	79
3.4.1	Bedeutung der Harzalterung für eine VE-Anlage.....	79
3.4.2	Entnetzung der Ionenaustauscher-Matrix	79
3.4.3	Anionenaustauscher	80
3.4.3.1	Hofmann-Abbau	80
3.4.3.2	SBA, Typ II.....	80
3.4.3.3	Deutliche Unterschiede bei verschiedenen SBA I, mp	82
3.4.3.4	Das „Lebenslinienkonzept“ von VE- und KRA-ANs	84
3.4.4	Kationenaustauscher	86
3.4.4.1	Konstanz der gewichtsbezogenen TK_w	86
3.4.5	Überblick über Alterungsfolgen	92
3.4.6	Probleme bei der Altersfestlegung durch z.B. Top-Up-Strategie oder	

Teillastbetrieb	92
4 Entsalzungsverfahren mit Ionenaustauschern.....	95
4.1 Stufen der Vollentsalzung	95
4.1.1 Entbasung	95
4.1.2 Entcarbonisierung.....	96
4.1.2.1 Entcarbonisierung innerhalb der VE-Straße	96
4.1.2.2 Entcarbonisierung als eigenständige Anlage	99
4.1.3 Entgasung	102
4.1.4 Entsäuerung	103
4.1.5 Restentsäuerung, Entkieselung	104
4.1.6 Das 4-Quadranten-Modell	105
4.2 Verfahrenstechnische Gestaltung von VE-Anlagen	108
4.2.1 Kleine VE-Anlagen bis ca. 10 m ³ /h.....	108
4.2.2 Große VE-Anlagen für chemisch unbehandeltes Rohwasser.....	109
4.2.3 Große VE-Anlagen für entcarbonisiertes Rohwasser	109
4.3 Verfahren zur Restentsalzung.....	111
4.3.1 Gründe für Restleitfähigkeit	111
4.3.2 K – A – K –Schaltung	113
4.3.3 Multistep-Verfahren.....	114
4.3.4 Mischbett.....	114
4.3.4.1 Funktionsweise	114
4.3.4.2 Regenerierweisen und Trennschichtlagen.....	117
4.3.4.3 Verklumpungen im Mischbett	121
4.3.4.4 Das Mischbett als „Glättungsfilter“	125
4.4 Kondensatreinigung.....	128
4.4.1 Konditioniermittel des Kesselkreislaufes	128
4.4.2 KRA bei Phosphat-konditioniertem Speisewasser	131
4.4.3 KRA bei Amin-konditioniertem Speisewasser	132
4.5 Entfernung organischer Stoffe	136
4.5.1 Generelle Unterschiede zwischen Ionenaustausch und Adsorption 136	
4.5.2 Eigenschaften von Adsorbentien und der Adsorption.....	137
4.5.3 Klassifizierung von organischen Molekülen	141
4.5.4 Vorbehandlungsmethoden und ihre TOC-Reduktion.....	146
4.5.4.1 Flockung	146
4.5.4.2 Biofilter	148
4.5.4.3 Adsorption.....	150
4.5.5 Aufnahme von Organik auf Ionenaustauschern in der VE-Straße ..	153
4.6 Mechanische Vorreinigung durch Zweischichtfilter	157
5 Weiterführende chemische Grundlagen.....	161
5.1 Zusammenhang zwischen pKs-Wert, Eigen-pH-Wert und Puffer- pH-Wert.....	161
5.2 Vergleich der Entcarbonisierungsmethoden	164

5.3	Chemie der Kieselsäure und ihre Aufnahme in VE-Anlagen	169
5.3.1	Die speziellen Eigenarten von Kieselsäure.....	169
5.3.1.1	Vorkommensweisen.....	169
5.3.1.2	Dissoziation, pKs-Werte	171
5.3.1.3	Löslichkeit	172
5.3.2	Bindungsmechanismen auf Ionenaustauschern	173
5.3.2.1	Abhängigkeiten des Kieselsäureschlupfes.....	174
5.3.2.2	Das paradoxe Isothermen-Verhalten	174
5.3.2.3	Dreifache Aufnahme in der SBA-Säule und im Verbund	175
5.3.3	Folgen der Alterung von Anionenaustauschern auf die SiO ₂ - Aufnahme	179
5.3.4	Regeneration von Kieselsäure	181
6	Konzeption und Planung von Ionenaustauscheranlagen.....	184
6.1	Manche Begriffe sind etwas verwirrend	184
6.2	Anlagenschaltungen, Beladung	186
6.2.1	2 x 100 %-Straßenschaltung.....	186
6.2.2	Multi-Straßenschaltung	186
6.2.3	Reihen-Wechsel-Schaltung	189
6.3	Gleichstromregeneration, Rückspülung.....	192
6.3.1	Luftwirbelung vor der Rückspülung	193
6.3.2	Rückspülung und Bettstreckungsgleichgewicht.....	194
6.4	Gegenstromregeneration.....	199
6.4.1	Kompaktionsgeschwindigkeit	199
6.4.2	Schwebebett	202
6.4.3	Up.Co.Re	203
6.4.4	Gegenstrom-Gegendruck / Rinsebett.....	204
6.5	Verbundregeneration.....	208
6.5.1	Verfahrensprinzip	208
6.5.2	Risiken der Verbundregeneration, Modifikationen	209
6.5.2.1	Fällung von Kieselsäure bei der Regeneration	210
6.5.2.2	Ausgasung von Kohlensäure bei der Regeneration.....	211
6.6	Wäsche	214
6.6.1	Verdrängung	215
6.6.2	Vorwäsche	215
6.6.3	Feinwäsche	216
6.6.3.1	Kreislaufwäsche.....	216
6.6.3.2	Waschwasserrückführung	217
6.7	Einzuplanende Asymmetrie von KAT- und AN-Seite	219
6.8	Unterschiede zwischen verschiedenen Entgasern	221
6.8.1	Vergleich der Entgasungsverfahren	221
6.8.2	Funktion eines Membranentgasers	223
6.8.3	Typische Messergebnisse der Membranentgasung.....	225
6.8.4	Anwendungsbeispiele	226
6.8.4.1	Einsparung von Dampf für die thermische Entgasung im Kraftwerk.....	226

6.8.4.2	Geschlossene Anlage ohne Verkeimungspotential	227
6.8.4.3	Kostensenkung und pH-Stabilisierung im Spülwasser der Metalloberflächentechnik	228
6.9	Berechnung verschiedener gängiger Vollentsalzungsverfahren	230
6.9.1	Regeneriermitteleinsatz, -überschuss, -angebot; Begriffsdefinitionen 231	
6.9.2	Kurven der Nutzbaren Kapazität	238
6.9.2.1	NK von starksauren Typen	238
6.9.2.2	NK von starkbasischen Typen	241
6.9.2.3	NK von schwachsauren Typen	242
6.9.2.4	NK von schwach- und doppelbasischen Typen	245
6.9.2.5	Konstanten zur weiteren Berechnung	247
6.9.3	Einfache Berechnung von einzelnen Anlagenstufen	247
6.9.4	SAC-SBA-Schaltung	250
6.9.4.1	Auslegung des KAT	251
6.9.4.2	Auslegung des AN	251
6.9.4.3	Symmetrie, Planung der Asymmetrie.....	251
6.9.4.4	Übertragung der normierten auf die absolute Auslegung	252
6.9.5	Verbundschaltung	252
6.9.5.1	WAC-SAC	253
6.9.5.2	WBA-SBA.....	256
6.9.5.3	Symmetrie, Planung der Asymmetrierung.....	257
6.9.5.4	Übertragung der normierten auf die absolute Auslegung	258
6.9.5.5	Sinn und Anwendung der Überföhrung	258
6.9.6	SAC-(WBA-SBA)-Schaltung.....	260
6.9.7	Neutralität des Regeneratablaufes	260
6.9.8	Erreichbare Durchflussdynamik im Schwebebett.....	262
6.9.9	Zusammenfassung der Argumentation zwischen Schwebebett und Up.Co.Re-Verfahren.....	266
6.9.9.1	Prinzipielle Notwendigkeiten für alle Gegenstromverfahren	266
6.9.9.2	Unterschiede bei der Kompaktion.....	267
6.9.9.3	Unterschiede bei Druckverlust, Leistungsreserve, Dynamik, Unterbrechungen.....	269
6.9.9.4	Unterschiede beim Regeneriermittelverbrauch.....	270
6.9.9.5	Unterschiede bei Verdrängung und Wäsche	271
6.9.9.6	Wann aber doch Up.Co.Re.?	271
6.9.9.7	Fazit	272
6.10	Harzauswahl.....	273
6.10.1	WAC	273
6.10.2	SAC	273
6.10.3	WBA und DBA	273
6.10.4	SBA	274
6.10.5	MB276	
6.11	Mess- und Regeltechnik	279
6.11.1	Durchflussregelung.....	279
6.11.2	Rezirkulationsmischung.....	280

6.11.3	Leitfähigkeitsmessungen.....	281
6.11.4	Probennahmestellen.....	281
6.12	Die verfahrenstechnische Führung der VE-Straße.....	282
6.12.1	Die Idee der Regelung	282
6.12.2	Ergebnisse der Simulationssektion	285
6.12.3	Ergebnisse der analytischen Sektion	286
6.12.4	Aufbau.....	288
6.13	Beispielhafte RI-Bilder.....	290
6.13.1	VE-Straße mit Rieseler.....	290
6.13.1.1	RI-Schema	290
6.13.1.2	Beladung.....	291
6.13.1.3	Beladung mit Rezirkulation	292
6.13.1.4	Regeneration.....	292
6.13.1.5	Kreislaufwäsche.....	293
6.13.2	VE-Straße mit Membranentgaser	294
6.13.2.1	RI-Schema für Rohwasser unter Vordruck	294
6.13.2.2	RI-Schema für druckloses Rohwasser.....	294
7	Kostenbetrachtungen	296
7.1	Bestandteile der Gesamtkosten.....	296
7.2	Chemikalienpreise	301
7.3	Kosteneinfluss der Wasseranalyse	305
7.4	Kosteneinfluss der Verfahrenstechnik	308
7.4.1	Vergleich von Gegenstrom- und Verbundgegenstromregeneration 308	
7.4.2	Vergleich verschiedener Entcarbonisierungen	310
7.4.3	Vergleich einer Bestückung mit Typ I oder Typ II- Anionenaustauschern.....	313
7.4.4	Auswirkungen zu hoher Waschgrenzen.....	314
7.5	Wann Ionenaustausch, wann Umkehrosiose?	318
7.5.1	Kombinationen aus Umkehrosiose und Ionenaustausch.....	318
7.5.2	Kostenvergleich zwischen Umkehrosiose und Ionenaustausch	321
7.6	Kostenrelevanz und Kompensation von Harzalterung	325
7.6.1	Kostensteigerung durch Harzalterung	325
7.6.2	Unterschiedliche Alterungseffekte verschiedener Harzklassen	327
7.6.3	Veränderung der Asymmetrierung	328
7.6.4	Strategie bei Harzalterung durch bewusste Regeneriermittel- Veränderung.....	330
7.6.4.1	Zielsetzung.....	330
7.6.4.2	Kapazitätsveränderbarkeit je nach Regenerierverfahren	331
8	Messmethoden, Wasseranalytik, Harzanalytik.....	335
8.1	Titration von Säure- und Basekapazitäten	336
8.1.1	HCO ₃ im Rohwasser	337

8.1.2	CO ₂ im Rohwasser	338
8.1.3	FMA-Summe im Rohwasser	340
8.1.4	CO ₂ nach Entgaser	341
8.2	Online-Messverfahren	342
8.2.1	LF nach WBA/DBA und nach SBA	342
8.2.2	pH nach SBA	343
8.2.3	LF nach SAC	343
8.2.4	Kieselsäure, Photometrie	344
8.3	Spezielle Berechenbarkeiten in VE-Anlagen.....	348
8.3.1	Abschätzung des Salzgehaltes über die Rohwasserleitfähigkeit.....	349
8.3.2	Leitfähigkeitsquotient über dem Kationenaustauscher	350
8.3.3	pH-Wert im Entgaser	355
8.3.4	Die Verbindung von LF und pH nach SBA - Die „Guru-Korrelation“ ..	356
8.3.5	Die Erweiterung der Guru-Korrelation zum Korrelationsdiagramm – Die neue Sprache der VE-Anlage	359
8.3.5.1	Die genaue Guru-Kurve	360
8.3.5.2	Der verbotene Bereich	361
8.3.5.3	Die HCO ₃ ⁻ Korrelation	363
8.3.5.4	Messwerte nach SBA in der Korrelationsdarstellung	365
8.3.5.5	Messwerte nach WBA in der Korrelationsdarstellung – Der Entgaserschlupf 368	
8.3.5.6	Feinkalibration von pH-Messungen mit dem Korrelationsdiagramm.....	372
8.3.6	Messung der Organik (TrueTOC, TOC-).....	376
8.3.6.1	Gängige Methoden zur TOC-Messung	378
8.3.6.2	Schon bekannt: Die Korrelationsfunktion	379
8.3.6.3	Beispiel: Kleinanlage mit Tag-Nacht-Variationen.....	381
8.3.6.4	Beurteilung der Messunsicherheit – Der entscheidende Trick.....	383
8.3.6.5	Beispiel: Großanlage.....	385
8.3.6.6	Beispiel: Eine Bestätigung in unserer Kleinanlage.....	389
8.4	Laboranalytik von Harzmustern	391
8.4.1	Motivation zur Harzanalyse	391
8.4.2	Probennahme.....	391
8.4.3	Messung chemischer Harzdaten	393
8.4.4	Messung dynamischer Harzdaten und des Foulingzustandes	395
8.4.5	Messung mechanischer Harzdaten	398
9	Anlagenanalyse, Fehlersuche und -behebung.....	400
9.1	Fehlersuche in einer VE-Anlage	400
9.1.1	Nachrechnung der Regeneriermittelmengen.....	400
9.1.2	Mechanische Verschmutzung, Kanalbildung, Tromben	403
9.1.3	Mess- und Probenorte an einer VE-Anlage	403
9.1.4	Checkliste zur Interpretation abweichender Messdaten	404
9.1.5	Titrationen, Überprüfung des Rieselers	408
9.1.6	Abweichungen von der „Guru-Korrelation“	409
9.1.7	Crosskontamination	411
9.2	Sonderbehandlungen	415

9.2.1	Sonderregeneration von Organik mit warmer alkalischer Kochsalzlösung	416
9.2.2	Kreuzregeneration.....	420
9.2.3	Desinfektion.....	421
9.2.3.1	Rohwasser-betriebene VE-Anlagen.....	422
9.2.3.2	Rohwasser-betriebene Enthärtungsanlagen	423
9.2.3.3	Spülwasser-Kreislaufanlagen in der Metalloberflächentechnik	423
9.2.3.4	Unterschiedliche Desinfektionsmittel	424
10	Anhang.....	426
10.1	Abbildungsverzeichnis.....	426
10.2	Tabellenverzeichnis	432
10.3	Formelverzeichnis	433
10.4	Index	434
10.5	Ergänzende Quellen.....	443
10.6	Dank	446

1 Einleitung

Willkommen in der Welt der Ionenaustauscher. Schön, dass Sie sich für dieses Thema interessieren. Es ist seit 30 Jahren auch mein beruflicher Inhalt und fasziniert mich immer mehr. Ich möchte sogar sagen, es ist eins der Themen, die für einen an Naturwissenschaft und Forschung interessierten Menschen ein Leben lang spannend bleiben. Nach der Lösung einer Frage ergeben sich sofort drei neue...

Seit vielen Jahren halte ich Seminare zu diesem Thema und musste einerseits feststellen, dass nur extrem wenig Literatur zu finden ist. Andererseits wurde ich immer neugieriger, die vielen interessanten Zusammenhänge, auf die ich in dieser Zeit gestoßen bin, zu verstehen. Selbst die Beschreibung vieler Zusammenhänge in die Hand zu nehmen, war ein fruchtbarer Boden. Dadurch wurden die Seminare inhaltlich immer umfangreicher. Manch ein Seminarteilnehmer fragte mich zum Schluss, wo er denn all die Dinge nachlesen könnte, die in den Unterlagen enthalten sind. Ich habe mit einem Lächeln immer geantwortet: „Das Buch gibt’s nicht, das muss ich noch schreiben“. Zumindest der Teilbereich der Vollentsalzungsanlagen (VE-Anlagen) mit Ionenaustauschern liegt nunmehr bereits in der zweiten Auflage vor und ich konnte eine Menge neue Erkenntnisse gegenüber der ersten Auflage unterbringen. Wahrscheinlich wird dieses Lernen nie zu Ende sein. Ich freue mich darauf...

Die vorliegende zweite Auflage enthält Aktualisierungen natürlich im Bereich der Kostenrechnungen aber insbesondere auch der modernen Messtechnik und Anlagenführung von VE-Straßen. Hier hat sich in den letzten 10 Jahren enorm viel verändert. Einige Veränderungen in der Didaktik entstammen Erfahrungen aus den vielen Seminaren, die inzwischen in der MionTec-Academy von 3 Personen gehalten werden.

Ich wünsche Ihnen nun viel Spaß bei der Lektüre, egal, ob Sie sich einmal von vorne bis hinten durchbeißen oder ob Sie eher punktuell nachschlagen wollen.

1.1 Zielgruppen des Buches

Schon in den Seminaren habe ich mich recht früh dazu entschlossen, die Planer, Ingenieure und Anlagenbauer von den Betreibern, Betriebsingenieuren und Betriebsleitern, Laboranten und Laborleitern zu trennen. Die Fragen und Sichtweisen sind doch oft unterschiedlich, auch wenn sich bei allen Beteiligten alles um das Thema Vollentsalzung mit Ionenaustauschern dreht. Dieses Buch ist aber für alle genannten Personenkreise gleichermaßen gedacht und ein jeder mag das für wichtiger nehmen, was ihn am meisten interessiert. Die Suche nach tieferem Verständnis für die Hintergründe wird Sie alle gleichermaßen antreiben und hierzu ist für jeden etwas enthalten.

1.2 Hinweise zum Lesen

Einen Hinweis möchte ich zum Beginn sofort geben: Die späteren Kapitel bauen stark auf den ersten vier auf. Es ist also möglich, dass punktuelles Nachschlagen nicht ausreichend Ihre Fragen löst. Mir geht es sehr stark darum, dass Sie Ursachen und Wirkungen in Zusammenhang bringen und nicht Phänomene auswendig lernen. Es kann also sinnvoll sein, dass Sie die ersten vier Kapitel zumindest prüfend in Angriff nehmen, um zu sehen, inwieweit Sie diese Zusammenhänge schon kennen. Die folgenden Kapitel lassen sich dann isoliert betrachten. Sie bauen auf die ersten vier auf. Ich habe darin aber öfters Querverweise eingebaut, damit Sie im Zweifelsfall mit etwas Blättern schnell zum Ziel kommen.

Manch einer von Ihnen wird mit wenigen Antworten bereits zufrieden sein, ein anderer aber gründlicher nach Lösungen suchen. Daher habe ich im Text hin und wieder Passagen als Exkurs gekennzeichnet. Diese Inhalte sind für das weitere Verständnis nicht wesentlich, aber für Interessierte wahrscheinlich sehr hilfreich. Entscheiden Sie selbst, wie weit Sie gehen wollen.

In unseren heutigen Zeiten werden Zitationen und Literaturverweise immer wichtiger. Doch worauf soll ich verweisen, wenn es nichts gibt? Im Literaturverzeichnis habe ich einige ältere Werke aufgeführt, die Sie gerne hinzuziehen können. Leider sind sie meistens aus den 1950er bis 1960er Jahren und viele der hier beschriebenen Techniken und Zusammenhänge sind darin noch nicht enthalten.

Das Literaturverzeichnis ist also tatsächlich sehr mager. Sie werden aber eine Fülle von Messdaten und Grafiken finden, die gar keine Quellenangaben aufweisen. Sie dürfen dann annehmen, dass es sich um Messdaten aus meiner eigenen Messpraxis oder um Labordatenauswertungen der MionTec GmbH handelt. Bei einigen Formeln habe ich auch auf Quellenangaben verzichtet, da ich sie aufgrund ihrer Einfachheit in das naturwissenschaftliche Allgemeinwissen einsortiere.

Die Position der Quellenangaben ist jeweils das Ende eines Hauptkapitels, damit Sie nicht immer bis nach hinten blättern müssen.

1.3 Der rote Faden

Mein Ziel bei der Zusammenstellung des Materials war die umfassende Darstellung der naturwissenschaftlichen Grundlagen und Techniken rund um die VE-Anlage. Wenn Sie eine Frage haben, sollten Sie hier die Antwort finden. Das ist natürlich ein hoher Anspruch, aber aus meiner langjährigen Tätigkeit gehe ich schon von einer höherprozentigen Erfolgsquote in der Beantwortung Ihrer Fragen aus. Über Ihre Rückmeldung und Kommentare freue ich mich aber ganz besonders, da ich selbst darüber auch eine ganze Menge gelernt habe.

Es gibt sogar einen roten Faden! Wir wollen uns nach der Behandlung der Grundlagen (Kapitel 1 bis 3) durch die Funktionsweise der Ionenaustauscher bewegen und dann den Normalbetrieb der Einzelkomponenten von VE-Anlagen genauer klären (Kapitel 4). Dann wissen Sie, was Sie im Normalfall zu erwarten haben.

Danach kommen einige Kapitel mit ergänzenden Informationen zur Chemie (Kapitel 5), zur Technik (Kapitel 6) und zu Verursachung und Einsparung von Kosten (Kapitel 7), die sich immer noch bis auf wenige Ausnahmen am Normalfall orientieren.

Das Kapitel 8 über die Messtechnik ist in großen Teilen neu geschrieben, da hier die meisten neuen Erfahrungen vorliegen.

Im letzten Kapitel 9 gehen wir dann eher davon aus, dass nicht mehr alles so zufriedenstellend läuft. Sie werden also Analysetechniken kennenlernen, um mit der richtigen Fehlersuchstrategie Ihr Problem möglichst systematisch angehen und sicher auch lösen zu können.

Dazu wünsche ich Ihnen natürlich viel Erfolg!

2.2 Dissoziation und Assoziation in Lösungen, Hydratisierung

Wir haben im vorigen Kapitel Inhaltsstoffe von Lösungen wie H^+ und OH^- benutzt, ohne genauer darauf einzugehen, was das denn nun genau ist. Das möchte ich nun nachholen. Es geht dabei um die Entstehung von Ionen durch einen Lösungsvorgang in Wasser.

Ich möchte hierzu ein bekanntes Beispiel, das Kochsalz, $NaCl$ benutzen. Es liegt als fester Kristall vor, in dem die beiden beteiligten Atome Natrium und Chlor immer abwechselnd regelmäßig angeordnet sind. Ein Ausschnitt aus diesem Kristall ist in Abb. 2–4 oben gezeigt. Sie können sich das in alle Richtungen entsprechend fortgesetzt denken.

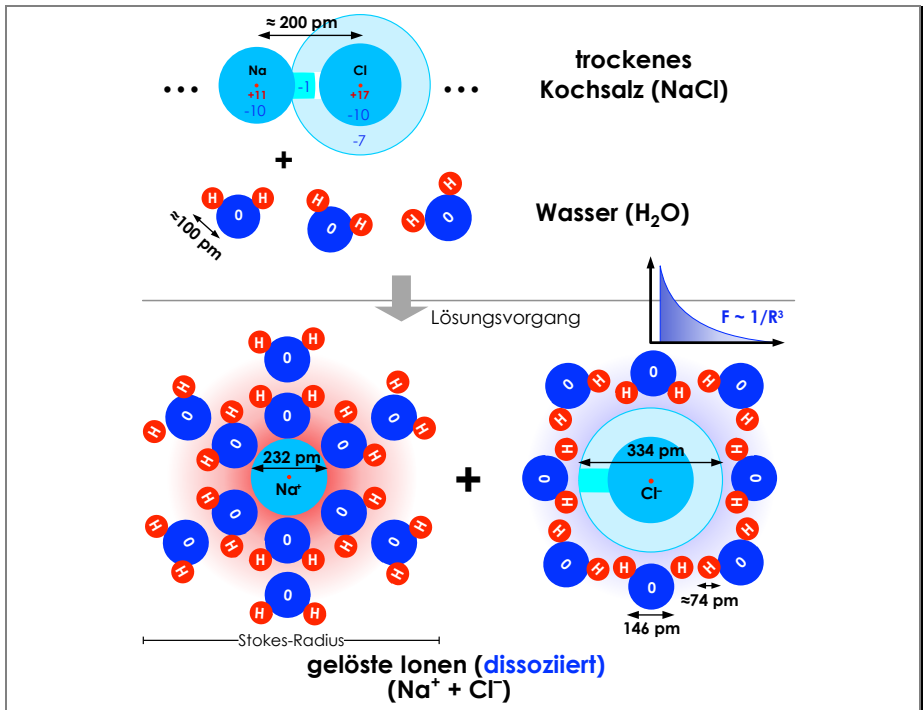


Abb. 2–4 Vorgänge bei der Lösung von Kochsalz in Wasser, Ionen in maßstäblicher Darstellung

Die beiden Atome Natrium (Na) und Chlor (Cl) passen gut zueinander, da dem Cl -Atom genau ein Elektron in der äußersten Schale fehlt. Volle Schalen sind das „Ziel“ vieler Atome auf dem Weg zum niedrigsten Energiezustand und damit stabilsten Zustand. Das Na -Atom empfindet das umgekehrt. Es hat ein einzelnes Elektron auf der äußersten Schale und würde das ganz gerne loswerden. Wenn nun Cl und Na zusammen kommen, können sich beide gleichermaßen ihre Wünsche erfüllen und eine recht stabile Verbindung entsteht.

Eine ganz besondere Eigenschaft einer solchen Verbindung zwischen einem Alkalimetall – wie Natrium – und einem Halogen – wie Chlor – ist die stark in Richtung des Cl verschobene Aufenthaltswahrscheinlichkeit des übertragenen Elektrons. Es ist ja fast schon in die äußere Schale des Cl eingereicht. Man spricht hier von einer starken Elektronegativität des Cl. Diese örtliche Verschiebung des negativ geladenen Elektrons in Richtung des Cl-Atoms verursacht dabei ein elektrisches Dipolmoment im Molekül; die negative Seite des Dipols beim Cl, die positive Seite beim Na.

Jetzt wäre die Welt soweit in Ordnung, wenn wir nicht auf die Idee kämen, ein Lösungsmittel in die Nähe dieser Verbindung zu bringen, welches selbst auch eine stark polare Elektronenbindung besitzt. Wasser ist ein solch polares Lösungsmittel, da das Sauerstoff-Atom (O) wie das Cl auch sehr elektronegativ ist und sogar bis zu zwei Elektronen anzieht, während beide Wasserstoff-Atome (H) ihr einziges Elektron gerne abgeben würden. Auch hier liegt also ein elektrischer Dipol vor mit der positiven Seite bei den beiden H-Atomen und der negativen Seite beim Sauerstoff-Atom.

Es gibt nun ein einfaches Gesetz aus der Physik, dass sich zwei elektrische Dipole elektrostatisch anziehen. Diese Anziehungskraft zwischen der NaCl-Bindung und dem Wassermolekül führt nun dazu, dass bei ausreichender Konzentration der Wassermoleküle sich diese in die Verbindung hinein drängeln, solange, bis die Verbindung auseinander gedrückt wird. Das Salz löst sich. Aufgrund der Tatsache, dass sich das eine „fremde“ Elektron fast immer beim Cl aufhält, wird es sich im Moment der Aufspaltung der Verbindung mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder beim Cl aufhalten und das Cl-Atom nimmt es einfach mit, während es sich vom Na entfernt.

Die Elektronenhülle des Cl besteht aber danach aus den eigenen Elektronen zuzüglich diesem einen fremden Elektron. Es resultiert also eine negative Überschussladung gegenüber den positiven Protonen im Kern. Das Atom wird zu einem einfach negativ geladenen Anion, dem Chlorid, Cl⁻.

Das Umgekehrte passiert mit dem Na-Atom. Seiner Hülle fehlt ein Elektron, so dass eine positive Gesamtladung verbleibt. Das Atom wird zu einem einfach positiv geladenen Kation, dem Na⁺.

Diese Situation ist in Abb. 2–4 unten gezeigt. Allerdings ist dort noch eine weitere Eigenart bei der Entstehung von Ionen in Wasser gezeigt. Sie erkennen, dass sich einige Wassermoleküle um die Ionen gruppiert haben. Dies liegt daran, dass wiederum ein physikalisches Gesetz besagt, dass sich eine Punktladung (z.B. ein Ion) und ein Dipol (z.B. das Wassermolekül) stark elektrostatisch anziehen, noch stärker als die elektrostatische Anziehung zwischen zwei Dipolen. Durch diese Anziehungskraft entsteht also bei allen Ionen in Wasser eine Hydrathülle wie in der Abbildung gezeigt. Wenn Sie genau hinschauen, sehen Sie zum einen, dass sich die Wassermoleküle bei Kat- und Anionen unterschiedlich ausrichten und zum zweiten, dass die Dicke der Hydrathülle unterschiedlich sein kann. Die Ausrichtung liegt einfach daran, dass Plus und Minus sich anziehen, also zueinander drehen. Auch das zweite hat einen Grund.

Die elektrische Feldstärke erzeugt die Anziehungskraft und diese sinkt mit der dritten Potenz mit steigendem Abstand vom Zentrum der Punktladung. Dies ist durch die Intensität der roten und blauen Schattierungen rund um die Ionen angedeutet. Ein großes Ion (wie Cl^-) hat also eine niedrigere Anziehungskraft auf die Wasserdipole an seinem Rand als das kleinere Na^+ -Ion. Der Durchmesser des Na^+ Ions einschließlich seiner Hydrathülle (Stokes-Radius) ist also größer als der des Cl^- -Ions incl. Hydrathülle.

So uninteressant dieses Phänomen der Hydrathüllenbildung von Ionen Ihnen im Moment erscheinen mag, ist es doch verantwortlich für viele Dinge, wie z.B. unterschiedliche Selektivitäten von Ionen zu Ionenaustauschern. Löslichkeit und Adsorptivität von organischen Molekülen (Kapitel 4.4.1) und die Volumenveränderung von Ionenaustauschern je nach ionischer Form (Kapitel 3.3.2).

Ebenso interessant ist der Einfluss auf die spezifischen Leitfähigkeiten der einzelnen Ionen. Diese hängt maßgeblich von der Beweglichkeit der Ionen in Wasser, also insbesondere der Größe oder der Masse dieser Ionen ab. Wenn jetzt Na^+ incl. Hydrathülle schwerer und größer als Cl^- incl. Hydrathülle ist, sollten wir erwarten, dass die spezifische Leitfähigkeit des Na^+ kleiner als die von Cl^- ist. Das ist tatsächlich so: 45 zu 66 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)/(meq/l). Das ist auch verallgemeinerbar.

An der Tatsache, dass diese Dinge in mehreren folgenden Kapiteln wieder aufgegriffen werden, können Sie erkennen, dass es sich hier wohl offenbar doch um ein wichtiges Phänomen handelt.

Exkurs: Die Maßstäblichkeit der Darstellung in Abb. 2–4

In diesem kleinen Exkurs möchte ich eine überraschende aber für das Folgende nicht unbedingt notwendige Betrachtung durchführen. Für solche Zwecke sind diese Exkurse gedacht.

Ich habe in der Zeichnung Maßangaben eingezeichnet, die der Realität entsprechen. Die Einheit pm (Pikometer = 10^{-12} m = 1 Tausendstel Nanometer) ist vielleicht etwas ungewohnt, aber hier sinnvoll.

Die zu behandelnde Frage sei: Wie kann man Löslichkeit quantitativ formulieren?

Jeder weiß um unterschiedliche Löslichkeiten von Stoffen. Wir wollen die These aufstellen, dass Löslichkeit nichts anderes bedeutet als die Möglichkeit eines Partikels, Hydrathüllen zu bilden. Diese Formulierung wird im weiteren Verlauf des Buches immer wieder genutzt werden. Im Bild Abb. 2–4 sind eine ganz bestimmte Zahl von Wassermolekülen um das Na^+ und das Cl^- -Ion gezeichnet. Das ist die Hydrathülle aus ca. 8...12 Wassermolekülen.

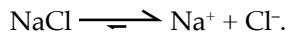
Wir wollen diese Zahl genauer untersuchen. Dazu stelle ich eine merkwürdige Frage: Was ist die Konzentration von Wasser? Nein, nicht die eines Stoffes in Wasser, sondern die des Wassers selbst. Eigentlich ist das einfach, nur ungewohnt. Ein Mol Wassermoleküle wiegt 18 g. In einem kg Wasser haben wir also $1000 \text{ g}/(18 \text{ g/mol}) = 55,6 \text{ mol}$ Wassermoleküle. Das ist die molare Konzentration von Wasser.

Jetzt wollen wir die Löslichkeit von NaCl betrachten. Sie liegt bei $\approx 360 \text{ g/l}$. Bei der Molmasse von NaCl sind das ca. 6 mol/l . Da wir zwei Teilchen haben, ist die

Grenzlöslichkeit also bei ca. 12 mol hydratisierter Teilchen pro l Wasser erreicht. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass diese Grenzlöslichkeit von NaCl erreicht ist, wenn im Mittel nur noch ca. 4...5 Wassermoleküle pro Teilchen für die Hydratisierung verfügbar sind. Und interessant ist dann, dass die gesamte Menge der Wassermoleküle theoretisch in Form von Hydrathüllen um die gelösten Ionen vorliegt. Man spricht dann auch gerne von einer Wassermangelsituation, da kaum noch freie Wassermoleküle vorliegen. Höhere Salzmengen können dann nicht mehr mindestens 4...5-fach hydratisiert werden und kristallisieren aus.

In der Zeichnung ist die Zahl der Wassermoleküle ca. doppelt so hoch wie die gerade berechnete Zahl für die Grenzlöslichkeit, da wir uns ja typischerweise bei verdünnten Lösungen weit unter der Löslichkeitsgrenze bewegen. Das ist eine Vermutung, die jedoch nicht weit von der Realität entfernt liegen wird.

Das erste Beispiel für die Entstehung von Ionen ist also das Kochsalz, welches in das Kation Na^+ und das Anion Cl^- aufgetrennt wird. Diesen Vorgang, der bei der Lösung in Wasser stattfindet, nennt man *Dissoziation*. Man kann in guter Näherung davon sprechen, dass die Dissoziation im Fall von NaCl vollständig abläuft. Das Dissoziationsgleichgewicht befindet sich weitestgehend auf der rechten Seite:



Jetzt wollen wir eine Stoffklasse besprechen, für die genau diese Eindeutigkeit nicht gilt: Die Säuren.

Wir modifizieren das Bild von oben nun, indem wir statt Kochsalz eine gut bekannte Säure in Wasser auflösen wollen, die Salzsäure, oder genauer gesagt Chlorwasserstoff, ein Gas.

Wie beim Kochsalz auch liegt in der HCl-Verbindung wieder eine sehr stark in Richtung des Cl-Atoms verschobene Elektronenbindung vor. Das Molekül ist also sehr polar und besitzt ein hohes Dipolmoment. Wenn wir dieses Molekül mit unserem polaren Lösungsmittel Wasser in Kontakt bringen, werden sich die beteiligten Moleküle elektrostatisch anziehen, das Wasser drängelt sich zwischen die HCl-Verbindung und trennt sie auf; das HCl-Molekül wird durch das Wasser dissoziiert. Dabei entsteht das bereits bekannte Cl^- -Anion und das Wasserstoffion, (H^+ oder auch Proton).

Manche kennen die Bindung eines einzelnen Wassermoleküls mit einem Proton als H_3O^+ . Dieses Molekül ist tatsächlich existent, aber die Abb. 2-5 zeigt, dass das Proton von viel mehr als nur einem Wassermolekül umhüllt ist. Diese einzelne Proton tauscht sich daher ständig mit den Protonen der umgebenden Wassermoleküle aus und die Lebensdauer der individuellen H_3O^+ -Verbindung ist nicht lange, aber immerhin so lange, dass es Schwingungsspektren zeigt.

Dieses ständige Springen von Protonen innerhalb der Hydrathülle ist übrigens der Grund für die sehr hohe spezifische Leitfähigkeit der Protonen. Nicht das ganze Aggregat von Proton + Hydrathülle bewegt sich (schwerfällig) im elektrischen Feld, sondern nur das Proton springt zielgerichtet von Molekül zu Molekül, was viel schneller geht (Grothus-Mechanismus).

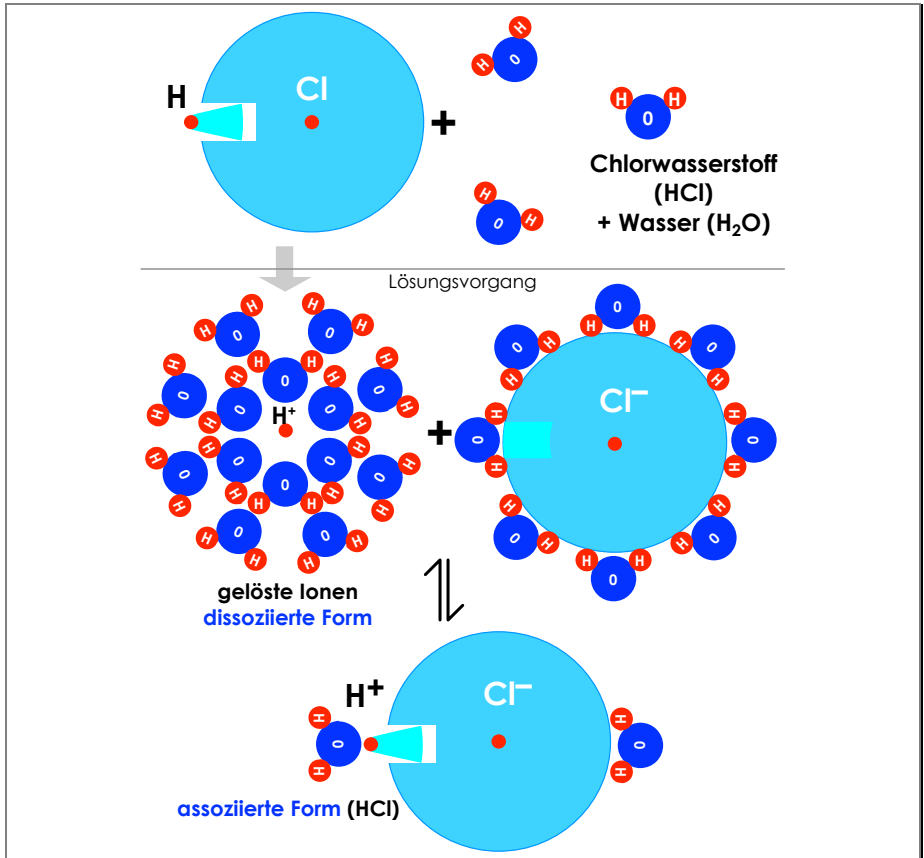


Abb. 2-5

Vorgänge bei der Lösung von Chlorwasserstoffgas in Wasser

Das ist doch alles genauso wie beim Salz, werden Sie nun einwenden. Stimmt so weit auch. Der Unterschied liegt nur darin, dass der Vorgang der Dissoziation bei Säuren nicht so vollständig abläuft wie bei Salzen. Es liegen beide Zustände, der *dissoziierte* und der noch vereinigte, der *assozierte Zustand* in einem Gleichgewicht, dem *Dissoziationsgleichgewicht*, vor. Die Kenntnis, welche der beiden Formen der Säure – die dissoziierte oder die assoziierte – in der zu betrachtenden Flüssigkeit nun vorliegt, ist von grundlegender Bedeutung für unser Thema. Wer diese Zusammenhänge versteht, *hat ungefähr 80 % der Ionenaustauschtechnologie verstanden!* Wir werden dieses Thema also sofort noch etwas vertiefen.

2.3 Verhalten von Kohlensäure, von Säuren allgemein

Wir werden bei der Behandlung dieses Themas einen äußerst wichtigen Zusammenhang kennenlernen, dessen Verständnis Ihnen in vielen Fragen rund um Ionenaustausch sehr gut weiter helfen kann und den ich Ihnen ganz besonders ans Herz legen möchte.

Ich möchte Ihnen eine Frage vorab stellen: Was kennzeichnet Ihrer Meinung nach eine starke Säure? Die Bezeichnungen „starksauer“ oder „schwachsauer“ sind uns ja für Kationenaustauscher möglicherweise schon geläufig. Aber was heißt das denn? Wodurch ist denn die Säurestärke definiert?

Eine – neben anderen – oft genannte Antwort ist dann „durch einen hohen Dissoziationsgrad“. Das klingt logisch, aber ich möchte Ihnen anhand des Beispiels einer bekanntermaßen schwachen Säure – der Kohlensäure – vorführen, dass der Dissoziationsgrad weder eine Konstante ist, noch die Säurestärke kennzeichnet.

Kohlensäure hat die Summenformel H_2CO_3 . Prinzipiell kann sie also 2 H-Atome abdissoziieren



wodurch neben der nichtionischen, ungeladenen assoziierten Form links noch die **einfach** und die **zweifach** dissoziierten Formen in der Mitte und rechts entstehen können.

Manch einer von Ihnen kennt vielleicht die Bezeichnung *Bicarbonat* für das HCO_3^- . Ich halte gar nichts davon und nutze diese Bezeichnung überhaupt nicht mehr, denn die Vorsilbe Bi- hat ja etwas mit 2 zu tun. HCO_3^- ist aber gerade das einwertige Anion der Kohlensäure. Wie konnten solche Fehler passieren...

Wann liegen denn nun diese verschiedenen Formen vor? Die Antwort darauf erhalten wir über das *Dissoziationsdiagramm* der Kohlensäure (Hägg-Diagramm). Aus diesem Diagramm kann abgelesen werden, wie die Säure auf einen von außen aufgezwungenen pH-Wert reagiert und ihren Dissoziationsgrad ändert.

Auf der X-Achse der Grafik sehen wir eine pH-Skalierung. Stellen Sie Sich bitte einmal vor, Sie hätten einen Drehknopf an einer Wasserprobe, mit dem Sie den pH-Wert einer Probe nach Ihrem Wunsch und Wollen verstellen könnten. Dieser von außen eingestellte pH-Wert ist auf der X-Achse dargestellt.

Die Y-Achse ist in % skaliert und Sie erkennen, dass die Summe aller drei Kurven immer 100 % ergibt. Auf die absolute Konzentration kommt es also offensichtlich nicht an. Es wird nur angenommen, dass die Konzentration *gering* ist und damit die Kohlensäure den pH-Wert nicht selbst bestimmt und auch nicht der einzige Bestandteil im Wasser ist. Für typische Rohwässer ist diese Annahme gut erfüllt.

3 Funktion der gängigen Ionenaustauscherklassen

In diesem Kapitel werden Sie die funktionellen Gruppen der im VE-Bereich benutzten Ionenaustauscherklassen kennen lernen. Die funktionellen Gruppen sind selber meist auch Ionen, die im Kunststoffgerüst der Kügelchen fest verankert sind. Sie heißen deshalb auch *Festionen*. Es gibt auch Austauscher mit Nichtionen als funktioneller Gruppe. Der Begriff Festion ist also nicht allgemeingültig. Besonderes Augenmerk lege ich bei der Beschreibung der Wirkungsweise auf das Verhalten der funktionellen Gruppen je nach äußerem pH-Wert, da es sowohl für die Beladung als auch für die Regeneration von entscheidender Bedeutung ist.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werde ich dann auf verschiedene mechanische Eigenschaften der Austauscher eingehen. Sie werden sehen, dass diese aber auch wieder entscheidend von den Eigenschaften der funktionellen Gruppen geprägt werden.

3.1 Kationenaustauscher

Kationenaustauscher besitzen immer ein in der Polymermatrix fixiertes Säureanion als funktionelle Gruppe. Zur Erhaltung der ionischen Neutralität kann dann jedes beliebige Kation in den Austauscher eintreten und sich in der Nähe der Gruppe aufhalten.

Kationenaustausch bedeutet, dass ein höher selektives Kation eine höhere Aufenthaltswahrscheinlichkeit in der Nähe der funktionellen Gruppe besitzt als ein weniger selektives.

In der Entsalzung werden Kationenaustauscher grundsätzlich durch Anwendung von starken Säuren in die H^+ -Form regeneriert. Das H^+ -Ion hat auf den Kationenaustauscher bezogen nahezu die geringste Selektivität aller Kationen. Es wird während der Beladung durch alle im Rohwasser enthaltenen Kationen (im wesentlichen Na^+ , K^+ , Ca^{++} und Mg^{++}) von den funktionellen Gruppen verdrängt. Am Ende der Beladung liegt dann eine Mischbeladung mit den genannten Kationen vor. Die Schlusszone des Bettes (Feinreinigungszone) enthält allerdings immer noch weitgehend H^+ , da typischerweise nur bis zum Durchbruch von $\approx 1...2\%$ der Zulaufkonzentration beladen wird. Der nächste Zyklus beginnt dann wieder mit der Regeneration mit Säure in hoher Konzentration zurück in die H^+ -Form.

3.1.1 Starksaure Kationenaustauscher (SAC)

Fangen wir mit den am einfachsten zu verstehenden Austauschern, den starksauren Kationenaustauschern, an.

Starksaure Kationenaustauscher besitzen ein *Sulfonsäureanion* als funktionelle Gruppe, welches in den aromatischen Ringen der Polystyrolmatrix angebunden ist.

Durchschnittlich wird bei der Herstellung eine Gruppe pro Ring chemisch bevorzugt, wodurch die Funktionalisierungsdichte (= auf die Masse des trockenen Kunststoffes bezogene Kapazität) aller starksauren Austauscher sehr ähnlich liegt. Ausnahmen durch andere Funktionalisierungsverfahren gibt es (z.B. lösungsmittelfrei sulfonierte Typen für die Trinkwasser- und Lebensmittelindustrie).

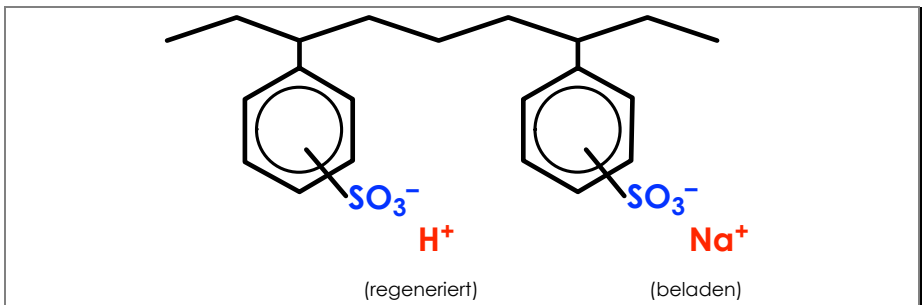


Abb. 3-1

Aufbau und funktionelle Gruppe von starksauren Kationenaustauschern

Nach der Regeneration befindet sich der größte Teil der Gruppen in der links in Abb. 3-1 dargestellten H^+ -Form; nach der Beladung u.a. in der rechts gezeigten Na^+ -Form. Diese beiden Formen sind auch als Lieferform erhältlich.

Der pK_s -Wert dieser Sulfonsäuregruppe liegt bei ca. 1. Das ist nach unserer im Kapitel 2.3 beschriebenen Einteilung der Säurestärken nicht wirklich als stark zu bezeichnen. Sie werden jedoch gleich sehen, dass dieser Wert sowohl aus Sicht der Beladung als auch aus Sicht der Regeneration optimal liegt.

Nehmen wir nun einmal an, dass das Harzbett im beladenen Zustand vorliegt und regeneriert werden soll. Hier liegt also die Aufgabe vor, durch ein eigentlich schwach selektives Kation wie H^+ die deutlich stärkeren anderen Kationen zu verdrängen. Dies kann nur durch eine sehr hohe Konzentration an H^+ , also eine ausreichend hoch konzentrierte Säure geschehen. Um diesen „Gewalt-Regenerationseffekt“ zu erreichen, ist eine Konzentration von $> 4\%$ HCl allerdings schon durchaus ausreichend. Üblicherweise angewandte Konzentrationen von 5...6% bewirken diesen ersten Regeneriermechanismus also schon gut.

Wir werden jetzt allerdings einen zweiten Effekt erkennen, der zum einen recht unbekannt, zum zweiten nach dem bisher Gelernten aber vollkommen logisch ist. Dieser Effekt kommt uns sehr gelegen: Der pH-Bereich während der Regeneration liegt ja bei ca. -0,2 (siehe Kap. 2.1, S. 17) und damit mehr als eine pH-Einheit unter dem pK_s -Wert der funktionellen Gruppe. Diese funktionelle Gruppe tendiert also in dem Moment der Regeneration, in dem der pH-Wert im Harzbett deutlich unter 1 fällt dazu, mit dem H^+ zu assoziieren und die nichtionische Säure zu bilden. Diese Tendenz ist bei so niedrigem pH-Wert so stark, dass die Selektivität des H^+ -Ions zur funktionellen Gruppe bei Unterschreitung des pK_s -Wertes der funktionellen Gruppe sprunghaft ansteigt, so als ob man einen Selektivitäts-Schalter umlegt. Damit fällt es dem H^+ -Ion nun gleichzeitig wesentlich leichter, Ca^{++} , Mg^{++} oder Na^+ durch diese Assoziationsreaktion zu verdrängen.

Eine – vielleicht etwas ungewöhnliche – Kurzfassung dieses zweiten Regenerationsmechanismus lautet also: „Regeneration eines Kationenaustauschers bedeutet die Unterschreitung des pK_s -Wertes der funktionellen Gruppe um mindestens eine Einheit“. Dieser zweite Mechanismus macht mehr als die Hälfte der Regenerierwirkung aus. Diesen Zahlenwert werden Sie im ersten Moment kaum nachvollziehen wollen, aber ich werde bei der Besprechung der starkbasischen Gruppe die Begründung dafür nachreichen.

Wir halten also fest, dass die Regeneriersäure mindestens eine pH-Einheit unter dem pK_s -Wert der funktionellen Gruppe liegen sollte. Stellen Sie sich nun einmal einen hypothetischen „superstarken“ Kationenaustauscher mit einem pK_s -Wert um 0 vor. Der hätte wahrscheinlich sehr gute Beladeeigenschaften (z.B. niedrigen Na-Schlupf), aber zur Regeneration wäre eine Säure mit $pH \approx -1$ notwendig. Im Falle von HCl wäre das ungefähr die 36%ige! Dies wäre weder praktisch noch wirtschaftlich. Hier zeigt sich also das erste Mal, dass der zuerst als eher hoch eingestufte pK_s -Wert der starksauren Gruppe von ca. 1 wohl doch

ziemlich brauchbar liegen könnte. Aus Gründen einer *effektiven Regeneration sollte er also bei ca. 1 oder auch höher* liegen.

Diese Assoziation der funktionellen Gruppe hat jetzt allerdings erst einmal auch einen Nachteil. Solange der Austauscher noch in diesem niedrigen pH-Milieu steht, wäre er nicht in der Lage, während einer beginnenden Beladung irgendwelche Kationen aufzunehmen, da die momentan noch sehr hohe „Selektivität“ zum H^+ die assoziierte Situation aufrecht erhält. Der Selektivitätsschalter muss erst wieder zurückgelegt werden. Dies geschieht auch tatsächlich, indem die Säure aus dem Harzbett verdrängt und mit VE-Wasser ausgewaschen wird. Dabei steigt der pH-Wert recht schnell auf Wert um 2 und dann auch langsam höher. Wenn während des Auswaschens also der pH den pKs-Wert bei 1 überschreitet, beginnt die funktionelle Gruppe wieder zu dissoziieren und das H^+ wird wieder freigesetzt. Die Gruppe wird wieder anionisch, damit aktiv und die nächste Beladung kann beginnen.

Sie sehen also, dass eine saure funktionelle Gruppe grundsätzlich in dissoziierter Form vorliegen muss, um eine Beladung zu ermöglichen.

Das bedingt also verallgemeinert die Situation, dass der starksaure Austauscher nur in Lösungen mit pH-Werten > 1 beladen werden kann (das gilt für die in der VE eingesetzten Typen). Glücklicherweise ist dies im Bereich der Entsalzung auch kein Problem. Ich nehme vorweg, was Sie im Kapitel 4.1.1 lernen werden, nämlich dass der pH-Wert im starksauren Kationenaustauscher bei 2,5...3 liegt und damit > 1 Einheit über dem pKs-Wert. Somit gilt also, dass aus Sicht der Beladung der pKs-Wert der Gruppe bei ≤ 1 liegen muss. Zusammen mit der Notwendigkeit für wirtschaftliche Regenerierbarkeit bei pKs-Werten von ≥ 1 bleibt also als *optimaler pKs-Wert der Gruppe genau 1* übrig, wie eingangs dieses Abschnitts angekündigt.

3.1.2 Schwachsaure Kationenaustauscher (WAC)

Die funktionelle Gruppe des schwachsauren Kationenaustauschers ist die Carbonsäure, deren pKs-Wert bei ungefähr 4 liegt. Damit ist sie also wirklich eine mittelstarke bis schwache Säure.

Auch schwachsaure Gruppen werden vor der Beladung mit Säure in die H^+ -Form regeneriert.

Abb. 3–2 zeigt links unten die H^+ -Form, die regenerierte und rechts die Na^+ -Form als eine der möglichen beladenen Formen. Oben ist die Ca^{2+} -Form gezeigt. Dabei wird erkennbar, dass das zweiwertige Ca^{2+} -Kation auch zwei funktionelle Gruppen belegt.

4 Entsalzungsverfahren mit Ionenaustauschern

Im Kapitel 2 haben wir uns über das Verhalten einzelner Stoffe im Wasser unterhalten und im Kapitel 3 das Wesen der funktionellen Gruppen in wässrigen Lösungen. In diesem Kapitel bringen wir diese beiden Dinge jetzt in Kontakt und schauen, wie die funktionellen Gruppen die Wasseranalyse verändern.

4.1 Stufen der Vollentsalzung

Im üblichen Fall besteht eine Ionenaustauscher-Entsalzung aus einer kationischen und einer anionischen Seite. Ob die beiden Seiten aus je einer oder zwei Stufen bestehen, ist sowohl eine verfahrenstechnische als auch eine kaufmännische Entscheidung. Die verschiedenen Schaltungsvarianten, die je nach Rohwasseranalyse und Anlagengröße geplant werden können, sind in Kapitel 4.2 beschrieben. Die kaufmännischen Kriterien folgen im Kapitel 7.

Im Folgenden werden die Funktionsweisen der maximal fünf Stufen der VE-Straße beschrieben, damit Sie verstehen, warum die Entscheidungen je nach Rohwasser manchmal verfahrenstechnisch zwingend, manchmal aber auch kaufmännisch genauso zwingend zu treffen sind.

Über Mischbetten werden wir danach in einem eigenständigen Abschnitt im Kapitel 4.3.4 sprechen.

4.1.1 Entbasung

In vielen Anlagen besteht die kationische Seite aus nur einem starksauren Kationenaustauscher (SAC). Als Zulauf soll unser Rohwasser aus Kapitel 2.4.1 dienen. Ich habe mich für die Variante 1 mit Härte $> \text{HCO}_3^-$ entschieden, da sie insbesondere in Europa deutlich häufiger vorkommt als die mit Härte $< \text{HCO}_3^-$.

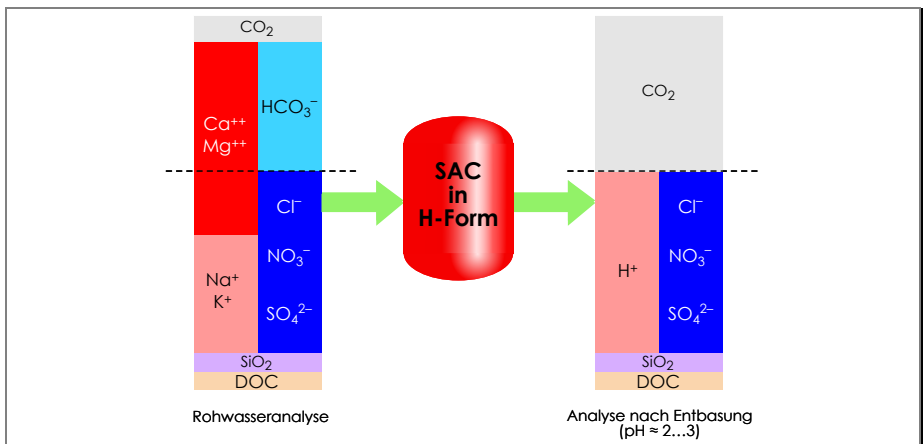


Abb. 4-1

Funktion der Entbasung durch einen SAC

Wir lassen dieses Rohwasser über den in die H-Form regenerierten

Kationenaustauscher laufen. Er nimmt bestimmungsgemäß Kationen auf und gibt Protonen ab. Fast genau so sieht es auf der Ergebnisseite rechts im Bild auch aus.

Eine Abweichung zur Erwartung findet sich aber im oberen Teil der Ergebnisanalyse. Wieso ist das Hydrogencarbonat entfernt worden, obwohl es sich um ein Anion handelt? Sie sehen, dass ziemlich viele Protonen im linken unteren Quadranten (kationische Seite unterhalb der gestrichelten Linie) zu erkennen sind, die den pH-Wert nach unten ziehen. Fast immer liegt der pH-Wert im SAC bei 2.5...3 (insbesondere, wenn keine Rezirkulation läuft). Das ist deutlich unterhalb des pKs-Wertes der Kohlensäure von 6,4 (siehe Abb. 2–6). Das im Rohwasser noch vorhandene HCO_3^- wird also bei diesem niedrigen pH-Wert vollständig zu CO_2 assoziieren müssen. Der große graue Block in der Ergebnisanalyse ist dann die Summe aus dem HCO_3^- und dem CO_2 von der Zulaufseite und es ist nicht mehr unterscheidbar, ob ein Kohlensäuremolekül im Rohwasser als CO_2 oder als HCO_3^- vorlag.

Im rechten unteren Quadranten, der Mineralsäuresumme (FMA-Summe), gibt es keine Veränderung, da ein Kationenaustauscher darauf keinen Einfluss nehmen kann. Dieser FMA-Summe stehen immer die H^+ gegenüber, so dass direkt der Schluss gezogen werden kann, dass der pH-Wert nach SAC direkt aus der FMA-Summe berechnet werden kann. Dies ist tatsächlich so und wir werden auf diese Messung in Kapitel 8.3.3 noch eingehen.

4.1.2 Entcarbonisierung

4.1.2.1 Entcarbonisierung innerhalb der VE-Straße

Wir nehmen jetzt an, dass die kationische Seite der VE-Straße aus *zwei* Stufen besteht. Dann kommt immer zuerst in der Beladerichtung die schwachsaure Stufe. Das Rohwasser ist wie im vorigen Abschnitt gewählt.

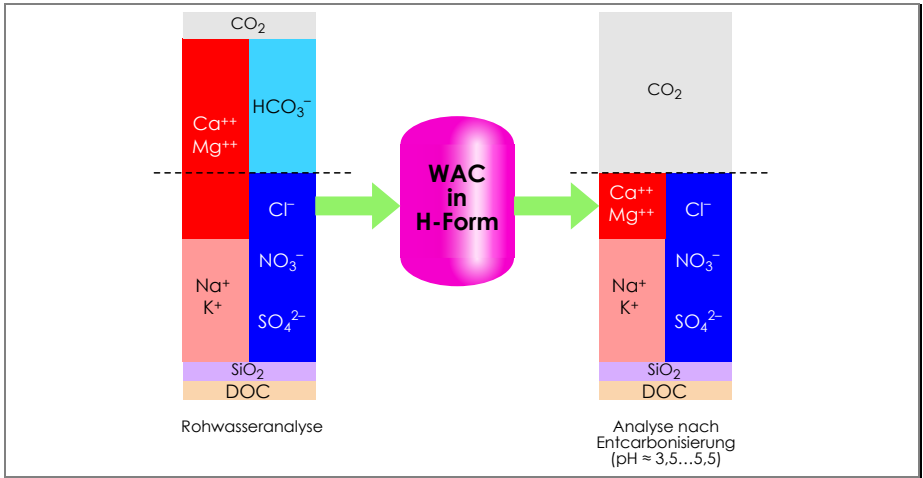


Abb. 4-2

Funktion der Entcarbonisierung durch einen WAC

Auch ein schwachsaurer Kationenaustauscher (WAC) nimmt Rohwasserkationen auf und gibt Protonen ab. Wir erwarten also prinzipiell die gleiche Ergebnisanalyse wie beim SAC. Vergleichen Sie jetzt einmal die rechten Seiten in der Abb. 4-1 und in der Abb. 4-2. Sie stellen fest, dass fast alles gleich ist, bis auf den linken unteren Quadranten. Dort befinden sich beim SAC nur H⁺, beim WAC noch Salz-Kationen. Wie konnte das passieren?

Erinnern Sie sich zuerst noch einmal an den pKs-Wert der funktionellen Gruppe des WAC, der bei ca. 4 liegt. Wir hatten gesagt, dass saure funktionelle Gruppen dissoziiert vorliegen müssen, damit die Beladung möglich ist. Dies ist für WAC-Typen also bei pH-Werten ≥ 4 der Fall.

Wir nehmen jetzt unsere Rohwasseranalyse und beginnen, die Kationen durch den WAC gegen H⁺ auszutauschen. Durch die freigesetzten Protonen sinkt der pH-Wert. Nach der Abb. 2-6 auf Seite 29 wird das im Rohwasser vorhandene HCO₃⁻ bei sinkendem pH-Wert immer mehr die H⁺-Ionen assoziieren und sich über H₂CO₃ zum CO₂ umsetzen. Während dieser Vorgang läuft, wird der pH-Wert in dem Bereich etwas unterhalb des pKs-Wertes der Kohlensäure von 6,4 gepuffert. Damit ermöglicht das puffernde Verhalten des Hydrogencarbonates also, dass der WAC gut arbeiten kann.

Wir nehmen einmal an, dass schon 90 % der gesamten Kohlensäure in CO₂ Form vorliegt und nur 10 % als HCO₃⁻ welche noch nicht umgesetzt wurde. Welcher pH-Wert liegt vor? Das Kohlensäure-Dissoziationsdiagramm in der Abb. 2-6 auf Seite 29 zeigt uns einen pH von 1 Einheit niedriger als der pKs von 6,4. Kann der WAC bei pH 5,4 noch gut arbeiten? Ja, kann er, denn wir liegen 1,4 Einheiten oberhalb seines pKs von 4. Das funktioniert also gut. Jetzt nehmen wir an, dass bereits 99 % der gesamten Kohlensäure zu CO₂ umgesetzt wurden und 1 % HCO₃⁻ Schlupf vorliegen. Der pH liegt dann 2 Einheiten unterhalb des pKs von

6,4, also bei 4,4. Kann der WAC noch arbeiten? Ja, kann er immer noch ganz gut. Vielleicht kommt er langsam an seine Grenzen, aber 99 % Umsetzung ist schon sehr gut.

Jetzt stellen Sie sich vor, dass das letzte Hydrogencarbonat in einem durchlaufenden Wassertropfen zum CO_2 assoziiert wurde, die Hydrogencarbonat-Pufferkapazität also vollständig aufgebraucht ist. Das nächste freigesetzte H^+ wird jetzt kein HCO_3^- mehr zum Assoziieren finden und bleibt frei. Der pH-Wert fällt ab dann schlagartig ab. Er würde dies im Extremfall bis in den Bereich von 2,5...3 auch tun, wie wir beim SAC gesehen hatten.

Jetzt kommt der pKs-Wert der funktionellen Gruppe von ca. 4 wiederum ins Spiel. Sobald der pH-Wert der Flüssigkeit den Bereich um 4 unterschreitet, wird ein Teil der WAC-Gruppen reagieren, indem die freien H^+ wieder vom Austauscher aufgenommen werden. Er wird an diesen Stellen also wieder regeneriert. Ein Teil der Gruppen versucht, H^+ freizusetzen und ein anderer Teil nimmt sie wieder auf; netto passiert also nichts mehr und der Ionenaustausch befindet sich in einem Gleichgewicht zwischen Beladung und Regeneration. Dieses Gleichgewicht ist in dem Moment erreicht, in dem der pH-Wert den Wert von 4 unterschreitet.

Wir haben es also nacheinander mit den Auswirkungen von zwei Puffersystemen zu tun. Zum einen der Kohlensäurepuffer in der Flüssigkeit mit einem pKs-Wert von 6,4 und zum anderen der pKs-Wert der schwachsauren Gruppe in der Austauscherphase von ca. 4.

Ich möchte also zusammenfassend formulieren: „Der WAC kann gerade so viele Kationen aufnehmen, wie auf der rechten Seite der Rohwasseranalyse HCO_3^- als Puffer vorhanden ist“. Genau dies ist in der Abbildung Abb. 4-2 auch dargestellt. Die Höhe des rechten oberen Quadranten wird gerade durch die hellblaue HCO_3^- -Menge definiert (und durch die gestrichelte Linie nach unten begrenzt) und die Kationen des linken *oberen* Quadranten werden durch den WAC zu Protonen ausgetauscht. Kationen des linken *unteren* Quadranten bleiben unverändert stehen. Der rechte untere Quadrant wird, wie beim SAC auch, nicht verändert.

Die kationische Seite einer Vollentsalzung kann also nie durch eine alleinige schwachsaure Stufe gebildet werden. Danach muss immer noch die SAC-Stufe kommen. Diese hat dann die Aufgabe, die unter der gestrichelten Linie noch vorhandenen Kationen gegen H^+ auszutauschen.

Nach dem SAC wird dann letztendlich wieder genau die gleiche Ergebnisanalyse erscheinen, als ob der SAC alleine geschaltet wäre. Es ist also vom Ergebnis her gesehen unerheblich, ob ein- oder zweistufig gebaut wird. Der Unterschied der beiden Varianten liegt einzig darin, dass der WAC ungefähr die doppelte Volumenkapazität des SAC besitzt und dann auch noch sehr leicht regeneriert werden kann. Daher ist sein Einsatz aus wirtschaftlichen Gründen geraten. Allerdings muss der Hydrogencarbonatanteil im Rohwasser ausreichend hoch sein, damit sich die Investition für die zusätzliche Stufe lohnt.

Bei HCO_3^- -Anteilen am TDS von $> 40\%$ ist das immer gegeben. Wenn z.B. kalkentcarbonisiertes Rohwasser verwendet wird, ist der Einsatz des WAC oft unwirtschaftlich, da ja nur noch sehr wenig HCO_3^- -Pufferkapazität mehr vorhanden ist (typisch $0,2 \dots 0,6 \text{ mmol/l}$). Wenn allerdings der Gesamtsalzgehalt (TDS) gleichzeitig ziemlich niedrig liegt, ist auch bei entcarbonisiertem Wasser eine Anlage mit einer WAC-Stufe sinnvoll, da dann der *relative* HCO_3^- -Anteil doch wieder $> 40\%$ liegen wird. Nicht der *absolute* HCO_3^- -Restanteil zählt, sondern der *relative*! Diese letzte Schlussfolgerung ist ziemlich interessant und widerspricht in ihrer Konsequenz manchmal der allgemeinen Schulmeinung, dass nach Kalkentcarbonisierung kein WAC kommt.

Die zweistufige Anordnung erlaubt darüber hinaus durch die dann mögliche Verbundregeneration auch eine sehr effektive Regeneriermittelausnutzung. Diese Funktion werden wir im Kapitel 6.5 besprechen.

Sie sehen, dass die Entscheidung pro oder contra WAC fast ausschließlich über den Vergleich der Abschreibung der einmaligen Mehrinvestition mit den in den Jahren ersparten Regeneriermittelkosten gefällt wird. Dies wird bei großen Anlagen ($> 25 \text{ m}^3/\text{h}$) schon bei geringeren HCO_3^- -Anteilen als 40% zum Einsatz des WACs führen. Bei sehr kleinen Anlagen ($< 5 \text{ m}^3/\text{h}$) wird dagegen leider oft darauf verzichtet. Der Betreiber hat dann während der Betriebszeit der Anlage den Kostennachteil und dieser ist in der Regel erheblich höher als die einmalig gesparte Investition.

Kommen wir noch einmal zurück auf die Aufteilung der beiden linken Quadranten auf die schwach- und starksaure Stufe. Erinnern Sie sich noch an die Normierungsrechnung der Rohwasseranalyse aus Kapitel 2.4.3. Dort hatten wir zum einen die Kürzel WAC und SAC das erste mal kennengelernt und zum anderen die Höhen der beiden linken Quadranten berechnet und willkürlich den beiden Harztypen zugeordnet, ohne dies näher zu begründen. Ich hatte Ihnen die Begründung allerdings für später versprochen, was an dieser Stelle nunmehr nachgeholt ist.

4.1.2.2 Entcarbonisierung als eigenständige Anlage

Es gibt den Verfahrensschritt der Entcarbonisierung auch als eigenständige Anlage um eine Veränderung der Wasseranalyse zu bewirken, ohne sie komplett zu entsalzen. Dies wird in der Getränkeindustrie oft eingesetzt. Dieser Verfahrensschritt setzt also grundsätzlich das gesamte HCO_3^- in CO_2 um und entfernt Kationen in gleicher Menge. Der WAC zieht aufgrund seiner Selektivitätsabfolge die zweiwertigen Härtebildner (Erdalkalimetalle Ca, Mg usw.) deutlich den einwertigen Alkalimetallen (Na, K usw.) vor, so dass vorrangig eine Enthärtung stattfindet. Ob diese Enthärtung vollständig oder unvollständig ist, hängt davon ab, welcher Teil der Rohwasseranalyse größer ist, die Härte auf der linken Seite oder das HCO_3^- auf der rechten Seite. Bei der Wasseranalyse nach Fall 1 (Härte $> \text{HCO}_3^-$) wird nicht die gesamte Härte entfernt, sondern nur der dem HCO_3^- entsprechende Anteil, der carbonatzugehörige Anteil (auch *temporäre Härte* genannt). Dieser Fall ist in Abb. 4–2 gezeigt. Man spricht dann von einer Teilenthärtung. Der Anteil, der

5.3 Chemie der Kieselsäure und ihre Aufnahme in VE-Anlagen

Die Kieselsäure ist einer der „Erbfeinde“ der Turbinenbetreiber, da sie Beläge auf den Turbinenschaufeln hervorrufen kann, die den Wirkungsgrad herabsetzen. Es ist also eine der wichtigsten Aufgaben der Kesselspeisewassererzeugung, die Kieselsäure auf kleinstmögliche Werte zu reduzieren. Wir werden auch sehen, dass tatsächlich die VE-Straße hauptverantwortlich für SiO_2 auf der Turbine ist und nicht das Mischbett oder die Kondensatreinigungsanlage.

Typischerweise werden SiO_2 -Gehalte unter $10 \mu\text{g/l}$ (oder ppb) als unkritisch angesehen. Manchmal enthält das produzierte VE-Wasser jedoch zeitweise 100 oder mehr ppb, weshalb viele Betreiber auf diesen Parameter zum einen ein besonderes Augenmerk legen, zum anderen aber auch oft auf die VE-Anlage oder die Harze „schimpfen“. Sie sollten allerdings bedenken, dass im Rohwasser typische SiO_2 -Gehalte von 10...20 mg/l (ppm) vorliegen, so dass die Ionenaustauschanlage die Kieselsäuregehalte auf ca. 1/1000 ihres Eingangswertes reduzieren muss, dies aber auch kann. Entfernungsraten von 99,95 % sind ein ganz beachtliches Ergebnis, was von kaum einem anderen Reinigungs- oder Behandlungsverfahren erreicht wird!

Da die Restwertanforderungen an die Kieselsäure aber nichtsdestotrotz sehr streng sind, möchte ich ihr im Folgenden ein ganzes Kapitel widmen. Es enthält Hinweise, wodurch die Restwerte verschlechtert, oder auch verbessert werden können. Schon bei der Planung gibt es Einflussmöglichkeiten, aber insbesondere während des Betriebs der Anlagen gibt es auch noch einiges zu beachten.

5.3.1 Die speziellen Eigenarten von Kieselsäure

Nach weit verbreiteter Betrachtungsweise wird Kieselsäure in Form des Anions Silikat (H_3SiO_4^-) auf dem starkbasischen Anionenaustauscher (SBA) gebunden. Viele kennen auch die sogenannte „kolloidale Kieselsäure“, die aufgrund ihrer schlechten photometrischen Messbarkeit schon immer gut vom Silikat unterscheidbar war. Die Realität ist ein bisschen komplizierter. Aber der Reihe nach...

5.3.1.1 Vorkommensweisen

In Abb. 5–5 sind die verschiedenen Vorkommensweisen der Kieselsäure dargestellt. Der verbreitete Begriff „ SiO_2 “ kennzeichnet die kleinste Kieselsäurezelle, die gleichzeitig das Säureanhydrid der meta-Kieselsäure H_2SiO_3 ist. Dieses Anhydrid entsteht (theoretisch) durch Wasserabspaltung aus der Meta-Kieselsäure. Letztere wiederum ist das (ebenso theoretische) Anhydrid der ortho-Kieselsäure H_4SiO_4 .

Die Bildung eines Säureanhydrids ist uns bereits in Kapitel 2.3 bei der Kohlensäure (H_2CO_3) begegnet, die unter Wasserabspaltung zum Kohlensäureanhydrid CO_2 umgebildet wird. Diese Reaktion hat ihr Gleichgewicht auf der Anhydridform, so dass im Wasser fast immer nur CO_2

existiert.

Bei der Kieselsäure ist es genau umgekehrt. Nur das ortho-Kieselsäuremolekül ist in wässriger Lösung stabil. Deren Anhydrid meta-Kieselsäure bildet sich nicht freiwillig. Wenn überhaupt finden nur die Umkehrreaktionen statt, so dass die Formen SiO_2 und H_2SiO_3 in Wasser gar nicht existieren. Dies liegt an der Tatsache, dass in Wasser die Doppelbindungen $\text{Si}=\text{O}$ nicht stabil sind, beide Anhydridformen aber solche Doppelbindungen besitzen. Die Form mit 4 Einfachbindungen ist stabiler.

Andererseits gibt es doch eine Reaktion, die unter Wasserabspaltung stattfindet. Es ist die Kondensationsreaktion, eine spezielle Form der Polymerisation. Moleküle mit endständigen OH-Gruppen sind oft zu dieser Reaktion in der Lage und bilden dann Polykondensate. Je zwei OH bilden zusammen H_2O und verbinden sich über das O. Auch diese Verbindungen besitzen vier Einfachbindungen aus Sicht des Siliziums und sind daher recht stabil.

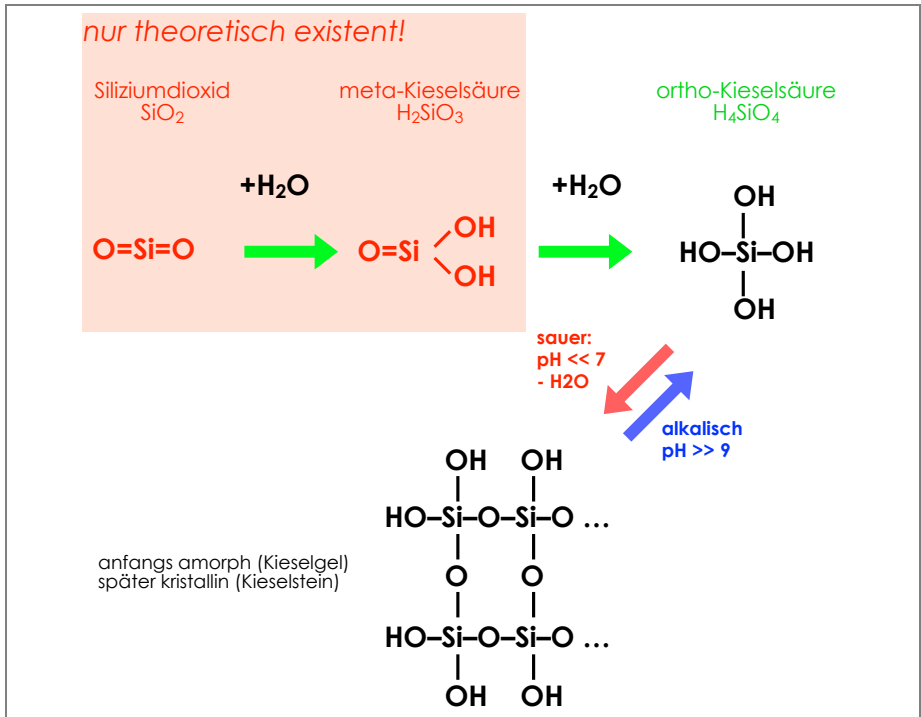


Abb. 5-5

Vorkommensweisen von Kieselsäure

Die Abbildung zeigt aber noch eine weitere ganz wesentliche Tatsache: Die Kondensationsreaktion findet nur in Anwesenheit von Protonen, also im eher sauren pH-Bereich statt. Je niedriger der pH-Wert, umso schneller und größer wachsen die Polykondensate. Bei Angebot von Hydroxylionen im Alkalischen

lösen sich diese Polykondensate dagegen wieder auf. Der Kondensationsvorgang ist also reversibel und eine Wiederauflösung von Ablagerungen mit z.B. warmer Natronlauge ist oft möglich.

Wir können die Kieselsäurevorkommen also wie folgt zusammenfassen:

Art	Si-Anzahl	Größe	Zustand
ortho-Kieselsäure	Einzelmolekül		Monomer
kondensierte Form	≈ 2...10 Si-Atome	1...3 nm	Olligomer
Kolloide	≈ 10e3...10e9	≈ 10 nm...1 μm	Polymer
Kieselgel, -sol, -stein		sichtbar	Polymer

Tabelle 5-1 Vorkommensweisen von Kieselsäure bei unterschiedlichen Polymerisatgrößen

Die oft gehörte Aufteilung der Kieselsäure in zwei getrennte Anteile, in gelöste und kolloidale, ist also nicht ausreichend, da eine breite Partikelgrößenverteilung vorliegt, deren Schwerpunkt mit dem pH-Wert wandert. Die vier Zeilen der Tabelle stellen also keine trennbaren Arten dar. Einzig die Trennung in Monomer/Olligomer und die Gruppe der Polymere ist sinnvoll.

Der Schwerpunkt der Partikelgröße ist nicht nur vom pH-Wert, sondern auch von der Konzentration der Kieselsäure, genauer vom Gesamtsalzgehalt, abhängig. Sehr hohe Salzgehalte bedingen Wassermangelsituationen, die die Kondensation zum Polymer begünstigen. Bei hohen Elektrolytkonzentrationen (wesentlich höher als im Trinkwasser) wandert der Schwerpunkt also zu den größeren Partikelgrößen.

Die kondensierten und kolloidalen Formen sind Nano-Teilchen mit Größen von $< 1 \mu\text{m}$ ($= < 1000 \text{ nm}$). Sie sind also nur sehr schwer mechanisch filtrierbar.

5.3.1.2 Dissoziation, pKs-Werte

Kieselsäure hat als vierbasische Säure 4 pKs-Werte. Praktisch wichtig ist nur der Erste bei 9,66, vielleicht noch der Zweite bei 11.

6 Konzeption und Planung von Ionenaustauscheranlagen

6.1 Manche Begriffe sind etwas verwirrend

Gleichstrom, Gegenstrom, Abstrom, Aufstrom, Festbett, Schwebebett, Wirbelbett ... Wer soll da noch durchblicken?

Leider werden im „Technikerjargon“ Begriffe auch noch oft fehlerhaft oder zumindest uneindeutig benutzt, so dass man wirklich leicht in Verwirrung geraten kann. Dies wollen wir zu Beginn also erst einmal klären.

Zuerst werden Begriffspaare den *Strömungsrichtungen* zugeordnet. Ein einzelner Schritt innerhalb eines Verfahrens kann entweder im *Aufstrom* oder im *Abstrom* ablaufen. Die Flüssigkeit läuft dann *aufwärts* oder *abwärts* durch das Bett. Weitere Schlussfolgerungen oder Nebenbedingungen gibt es nicht.

Der nächste Schritt charakterisiert den Zustand des Harzbettes. Jedes gängige Ionenaustauschverfahren benötigt ein *Festbett*. Das heißt, dass die Schichtung des Harzbettes während eines Schrittes im Verfahren nicht verändert oder gestört werden soll. Dies ist notwendig, damit die Beladefront während dieses Schrittes gleichmäßig durch das Bett voranschreiten kann. Das Gegenteil ist das *Wirbelbett*, welches nur in sehr speziellen Fällen erwünscht ist. Fast immer ist es ein unbedingt zu vermeidender Zustand, weil dadurch die Schichtung des Harzbettes zerstört wird und der gewünschte Säuleneffekt nicht zustande kommt.

Das *Schwebebett* ist eine Form des Festbettes. Der Begriff wurde in den 1970er Jahren von der damaligen Bayer AG zur Beschreibung des im Aufstrom beladenen Festbettes eingeführt. So richtig verwirrend wurde es allerdings erst mit der Abkürzung „WS“ für dieses Verfahren. Das setzte jeder mit dem Begriff *Wirbelschicht* gleich, was es ja nun ganz und gar nicht sein soll. Schwebebett und WS als Bezeichnungen haben sich aber gehalten und wir können uns nur sorgfältig deutlich machen, worum es geht, damit die Verwirrung begrenzt bleibt.

Damit sind wir schon beim letzten Begriffspaar. Es geht um die Bezeichnung von Verfahren, welche ja Abfolgen von Schritten sind. Jeder einzelne Schritt darin kann im Auf- oder im Abstrom erfolgen. Typischerweise kombiniert man nun eine bestimmte Beladungsrichtung mit einer speziellen Regenerierichtung, um ein *Verfahren* zu charakterisieren. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Beladung und Regeneration erfolgen in *derselben* Richtung (*Gleichstromverfahren*), oder Beladung und Regeneration erfolgen in *gegensätzlicher* Richtung (*Gegenstromverfahren*).

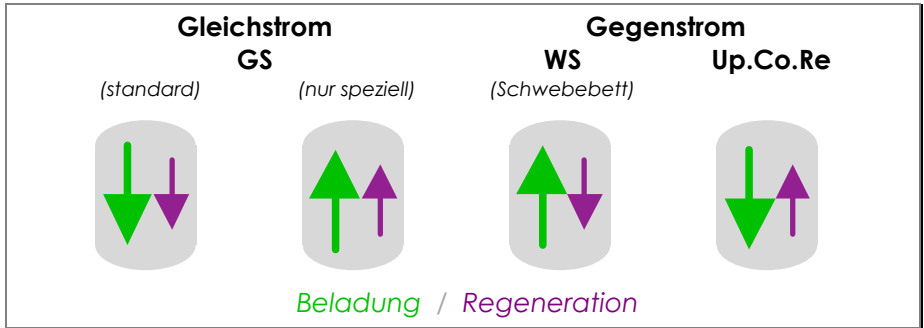


Abb. 6-1

Mögliche Strömungsrichtungen je nach Verfahren

Die vier möglichen Kombinationen sind in Abb. 6-1 gezeigt. Für VE-Anlagen gängig sind natürlich die Gegenstromverfahren rechts. Das Gleichstromverfahren (links) ist bei Abwasseranlagen gängig. Es taucht auch in sehr alten VE-Anlagen noch auf. Die zweite Gleichstromvariante wird im Wasserbereich nicht genutzt. Sie bietet sich nur für Prozesslösungen mit sehr hoher Dichte an (größer als die Dichte von Ionenaustauschern).

Als Einleitung zu den folgenden Abschnitten seien die grundlegenden Verfahrensentscheidungen in kurzer Form zusammengefasst:

a) Verfahren:

- Gegenstrom immer wenn möglich
- Gleichstrom nur, wenn häufige Rückspülung notwendig ist oder wenn Konditionierung und/oder Harzmischung notwendig ist

Wenn Verfahren = Gleichstrom:

Beladerichtung fast immer im Abstrom

Wenn Verfahren = Gegenstrom:

b) Beladerichtung:

- Aufstrom immer, wenn Durchflussdynamik $\approx 5 \dots 40$ reicht \Rightarrow WS
- Abstrom nur, wenn $F = 0$ oft und lange möglich sein muss \Rightarrow Up.Co.Re

c) Regenerierichtung:

- Abstrom immer wenn möglich \Rightarrow WS
- Aufstrom nur, wenn Abstrombeladung zwingend ist \Rightarrow Up.Co.Re

Weitere Entscheidungsgrundlagen zwischen den beiden Gegenstromverfahren sind in den Kapiteln 6.4.2 und 6.4.3, aber vor allem im Kapitel 6.9.9 aufgeführt.

6.9 Berechnung verschiedener gängiger Vollentsalzungsverfahren

Das Ziel der Anlagenauslegung ist

- die Festlegung der sinnvollen Harzstufen,
- die Ermittlung der geeigneten Harzvolumina und
- die Berechnung der notwendigen Regeneriermittelmengen.
- die Berechnung von Druckverlusten und möglichen Durchflüssen sowie
- die Festlegung der Behältergeometrie.

Grundsätzlich steht am Anfang die Rohwasseranalyse. Bei größeren Veränderungen dieser Auslegungsanalyse wird sich die optimale Anlagendimensionierung dann immer mit verändern.

Als zweite wichtige Anmerkung zum Beginn möchte ich festhalten, dass fast immer ein gewisser Spielraum besteht und nicht nur genau eine Auslegung „stimmt“. Manchmal gibt es Nebenbedingungen, an die Sie sich halten müssen. Ein Betreiber möchte z.B. bei vorgegebenem Nenndurchfluss einen Mindestdurchsatz zwischen zwei Regenerationen haben. Das kann je nach Wasseranalyse manchmal recht unsinnig sein, aber versuchen Sie mal als Anlagenbauer einen Kraftwerksbetreiber davon zu überzeugen, dass eine kleinere Anlage mit geringerem Durchsatz zwischen den Regenerationen technisch oder wirtschaftlich besser für ihn ist... Genau genommen ergibt sich der Durchsatz für die gut gestaltete Anlage immer aus der Berechnung und kann nicht beliebig frei gewählt werden.

Es gibt noch ein wichtiges Argument, wodurch unterschiedliche Anlagenkonzepte bei gleicher Rohwasseranalyse verursacht werden und das sind Vergleiche zwischen Investitions- und Chemikalienkosten, die jeder Betreiber unterschiedlich bewerten kann. Aufgrund der sehr großen Bedeutung dieses Themas ist hierzu ein eigenes Hauptkapitel (7) vorgesehen.

Meiner Meinung nach ist das häufigste Problem, dass Anlagen zu groß geplant werden. Jeder Ingenieur legt 10 % Sicherheit oben drauf und am Ende ist die Anlage 50 % zu groß. Dann waren das wohl 5 beteiligte Ingenieure... Aber ob es gute waren?

Wie hier ein sinnvolles Optimum mit genügend großem Maximaldurchfluss und ausreichend kleinem Minimaldurchfluss gefunden werden kann, werde ich im Kapitel 6.9.8 aufzeigen, in dem es um die Maximierung der Durchflussdynamik geht.

Auch ganz wichtig ist an dieser Stelle der Hinweis, dass alles Folgende nur für im Gegenstrom regenerierte Anlagen gilt. Gleichstromverfahren werden nicht behandelt.

Noch ein Wort zum Schluss der Einleitung: Naturgemäß geht es ab hier nicht ohne Rechnen und Formeln, auch wenn ich in diesem Buch nach Möglichkeit darauf verzichtet habe. Sie werden aber feststellen, dass sich dabei alles sehr im Rahmen hält und keine höhere Mathematik nötig ist.

6.9.1 Regeneriermitteleinsatz, -überschuss, -angebot; Begriffsdefinitionen
 In dieser Kapitelüberschrift stehen drei beispielhafte Begriffe, die eine sehr präzise Bedeutung haben. Zum Einstieg in das Kapitel der Berechnung habe ich die für das Folgende notwendigen Definitionen zusammengestellt:

Größe	Abk.	Einheit	Beschreibung	alternativ
Harzvolumen	HV	L Harz	Harzvolumen in einer Stufe	m ³ Harz
Durchfluss	F	m ³ /h	Manchmal auch als Leistung bezeichneter Volumenstrom durch eine Harzstufe oder durch die gesamte Anlage	–
Durchsatz	M	m ³	Volumen produziertes VE-Wasser zwischen zwei Regenerationen. <i>(Wird oft fälschlich für den Volumenstrom benutzt)</i>	–
Spezifischer Durchsatz	D	BV	Durch das Harzvolumen dividierter Durchsatz (Normierung)	l Flüssigk. / L Harz
Spezifische Belastung	SB	BV/h	Durch das Harzvolumen dividierter Durchfluss (Normierung)	l Flüssigk. / L Harz /h
Lineare Geschwindigkeit	V _{lin}	m/h	Leerrohrgeschwindigkeit durch die Harzschicht	–
Regeneriermittelanbot	RA	g 100 %ig/L Harz	Regeneriermittelmenge pro Liter Harz	mol/L Harz
" –einsatz	RE	kg 100 %ig	Regeneriermittelmenge für die gesamte Harzstufe	mol
" –überschuss	RÜ	% der NK	Regeneriermittelanbot (in mol/L Harz) dividiert durch die erhaltene NK	–
" –verlust	RV	% der NK	Der 100 % übersteigende Anteil des Regeneriermittelüberschusses	mol
Totalkapazität	TK	eq/L Harz	Zahl der funktionellen Gruppen pro Liter Harz	–
Nutzbare Kapazität	NK	eq/L Harz	Von TK und RA abhängige Kapazität, die im Säulenverfahren bis zum Durchbruch genutzt werden kann	–

Tabelle 6–1

Definitionen von Größen zum Rechnen

- Das **Harzvolumen** ist das kompaktierte – im Laborjargon auch „eingerüttelte“ – Gesamtvolumen einer Harzschicht.
- Der **Durchfluss** oder **Fluss** ist der Volumenstrom durch die Harzstufe oder die Anlage bei der Beladung. Häufig wird hier beim Beladevolumenstrom von „Durchsatz“ gesprochen, was aber leicht zu verwechseln ist. Manchmal wird auch „Leistung“ benutzt, was zumindest etwas zweideutig ist. Aufgrund der Tatsache, dass meist zweistraßig gebaut wird, steht dieser Durchfluss kontinuierlich zur Verfügung. Auch die Reihenwechsel-Schaltung produziert dies kontinuierlich.
 Es ist zu bedenken, dass mit diesem Durchfluss der VE-Tank befüllt wird, aus dem auch die Regenerier- und Waschwässer entnommen werden. Der Durchfluss durch die Anlage wird dann als **Brutto-Durchfluss** bezeichnet. Der **Netto-Durchfluss** ist dementsprechend der gemittelte Fluss unter Abzug dieses gemittelten Eigenwasserbedarfs der Anlage, der dem Verbrauch zur Verfügung steht. Üblicherweise hat eine gute Verbundgegenstromanlage einen Eigenwasserverbrauch von 1...5 %.
- Das produzierte VE-Wasservolumen zwischen zwei Regenerationen ist der **Durchsatz**. Genau wie eben ist dies der **Bruttodurchsatz** pro Zyklus, da für die Regeneration auch noch VE-Wasser gebraucht wird. Dieser

Eigenwasserbedarf muss von der Bruttoproduktion noch abgezogen werden, wodurch man den **Nettodurchsatz** erhält.

- Der **spezifische Durchsatz** ist eine normierte Größe. Er hat die Einheit Bettvolumen (BV). Diese Einheit BV entsteht durch Division des über die Harzstufe gefahrenen Flüssigkeitsvolumens durch das Harzvolumen, hat also die Einheit $BV = I_{\text{Flüssigkeit}} / L_{\text{Harz}}$. Die unterschiedliche Schreibung des Liters einmal klein für die Flüssigkeit und einmal groß für das Harzvolumen ist in diesem Buch konstant beibehalten, so dass Sie sich für Unterscheidungszwecke durchaus daran gewöhnen können. Normierte Größen haben den entscheidenden Vorteil, dass sie für alle Anlagengrößen gleich sind. Sie können also mit der Zeit ein gutes Gefühl für diese Größen erhalten, auch wenn Sie mit unterschiedlichsten Anlagengrößen zu tun haben. Wenn Sie Anlagenplaner sind, werden Sie dies zu schätzen wissen.
- Die **spezifische Belastung** ist ebenso eine der normierten Größen. Sie erhalten sie durch Division des Durchflusses durch das Harzvolumen. Die Einheit ist BV/h oder $I_{\text{Flüssigkeit}}/h / L_{\text{Harz}}$.
- Auch die **lineare Geschwindigkeit** ist eine normierte Größe, auch wenn in Ihrer Einheit m/h der Teil BV gar nicht auftritt. Sie ist als Leerrohrgeschwindigkeit definiert, so als ob kein Harz in der Säule wäre.
- Das **Regeneriermittelangebot** ist auch normiert, da es das pro L Harz angebotene Regeneriermittel in $g100\%ig/L_{\text{Harz}}$ darstellt. Zum Beispiel sind $55\text{ g HCl }100\%ig / L_{\text{Harz}}$ für SAC-Typen gängig. Eigentlich wäre die Umrechnung auf $\text{Mol H}^+ / L_{\text{Harz}}$ für das Verständnis besser. Das ist aber leider nicht so üblich.
- Als **Regeneriermitteleinsatz** wird die Regeneriermittelmenge für eine gesamte Harzstufe bezeichnet. Er hat also die Einheit $\text{kg }100\%ig$. Die Wahl der Säure- oder Laugemenge als $100\%ig$ gerechnet eliminiert den Einfluss der bei der Verdünnung wirklich erreichten Konzentration. Ob die HCl $5\%ig$ oder $6\%ig$ ist, spielt keine wesentliche Rolle, solange eine gewisse Masse $32\%iger$ HCl verbraucht wurde. Wenn zum Beispiel 100 kg der $32\%igen$ HCl verbraucht wurden, entspricht dies $32\text{ kg HCl }100\%ig$. Entsprechend sind $100\text{ kg NaOH }45\%ig$ genau $45\text{ kg NaOH }100\%ig$. Volumina müssen anhand ihrer Dichte entsprechend umgerechnet werden.
- Mit der Definition des **Regeneriermittelüberschusses** (RÜ) wird es jetzt spannend, da hier eine ganz wesentliche Größe erscheint, deren grundlegende Bedeutung nicht unbedingt bekannt ist. Bei jeder Regeneration wird mehr H^+ oder OH^- in die Stufe hineinregeneriert, als bei der nächsten Beladung als NK genutzt wird. Dieses Verhältnis $RÜ = RA/NK$ muss damit auch immer $\geq 100\%$ sein. Bei dieser Berechnung muss RA in $\text{Mol H}^+ / L_{\text{Harz}}$ eingesetzt werden. Ich will an dieser Stelle nur so viel vorweg nehmen, dass letztlich alle Auslegungsrechnungen von der Größe RÜ abhängig gemacht werden können.

- Da der Regeneriermittelüberschuss $> 100\%$ der NK ist, muss die überschüssige Säure oder Lauge in die Neutra verloren gehen. Deshalb wird der 100% übersteigende Anteil des Überschusses als **Regeneriermittelverlust** (RV) bezeichnet. Die Verfahren, die diesen prozentualen Wert minimieren, sind letztlich die ökonomischsten.
- Für das Verständnis des Folgenden ist noch die **Totalkapazität** (TK) eine wichtige Größe. Sie gibt an, wie viele funktionelle Gruppen in einem Liter Harz zur Verfügung stehen. Für Neuharz gelten hier die Katalogangaben der Hersteller. Bei in Gebrauch befindlichen Füllungen kann die Totalkapazität durch Verlust funktioneller Gruppen aber stark sinken.
- Die **Nutzbare Kapazität** (NK) ist eine Größe, die als Produkt von drei Größen zu sehen ist:

$$NK = TK \times \text{Kinetikfaktor} \times \text{Regeneriergrad.}$$

Die TK ist für Neuharze als vorgegeben anzusehen und steht im Datenblatt.

Der Kinetikfaktor gibt an, wie groß der Anteil des Harzbettes ist, der in beladener Form vorliegt, wenn die Stufe durchbricht. Der Zahlenwert hierfür liegt in der Größenordnung von $80\ldots 85\%$. Das bedeutet umgekehrt, dass ca. 15% des Harzvolumens aufgrund begrenzter Steilheit des Durchbruchprofils nie genutzt werden können.

Der Regeneriergrad ist der Anteil des Harzbettes, der nach der Regeneration in der regenerierten Form vorliegt. Sie dürfen nicht annehmen, dass ein Harzbett immer vollständig in die regenerierte Form gebracht wird. Das würde bei SAC- und insbesondere SBA-Typen ein unwirtschaftlich hohes Regeneriermittelangebot erfordern. Typische Regeneriergrade zum Beladebeginn liegen bei $70\ldots 90\%$. Bei schwachen Stufen ist er naturgemäß eher höher, bei starken Stufen ohne Verbundregeneration auch geringer.

Einige dieser Definitionen können womöglich auch anders genutzt werden und sind so wie ich sie hier eingeführt habe, nicht als der Weisheit letzter Schluss zu sehen. Ich habe an dieser Stelle einfach ein System von Begriffen aufgestellt, die in diesem Buch konsistent genutzt werden und möglichst breit in Verwendung sind.

Nach diesen vorbereitenden Definitionen wollen wir nun einen Schritt weiter gehen. Die für die Anlagenauslegung maßgebliche Größe ist die NK bis zum Durchbruch von z.B. $2\ldots 5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ oder $50\ \text{ppb}\ \text{SiO}_2$ nach SBA. Diese Größe wird im Wesentlichen nicht vom Harzhersteller verantwortet, sondern von Anlagenbauer und Betreiber. Sie hängt nämlich in erster Linie vom eingestellten Regeneriermittelangebot (RA) ab. Deshalb geben Harzproduzenten oft in ihren technischen Schriften Kurven für die für einen bestimmten Harztyp normalerweise erreichbare NK in Abhängigkeit von RA an.

Die folgende Abbildung gilt für einige SAC-Typen und ist etwas über den üblicherweise angegebenen Rahmen hinaus „illustriert“. Die grüne Kurve, die grüne X-Achse und die linke grüne Y-Achse werden meist vom Harzhersteller vorgegeben:

6.11 Mess- und Regeltechnik

6.11.1 Durchflussregelung

Bei Anlagen mit atmosphärisch betriebem Rieselentgaser wird immer eine Rieselersumpfpumpe notwendig sein. Damit besteht die Anlage aus zwei druck- und durchfluss-entkoppelten Seiten. Diese müssen über eine Regelung im Durchfluss aneinander angeglichen werden. Typischerweise geschieht dies über eine führende Regelung für den Durchfluss durch eine Seite (KAT- oder AN-Seite ist dabei egal; die Seite kann auch freilaufend ohne Regelungseingriff betrieben werden) und einen Stelleingriff auf die zweite Seite mit dem Rieselersumpfstand als Führungsgröße.

Stellen Sie sich nun vor, dass der Rieselersumpf etwas klein bemessen ist. Dann wird eine Standregelung mit Eingriff auf den Fluss der zweiten Seite oftmals viel zu langsam reagieren und plötzlich ist der Rieselersumpf leer (oder voll) und die Anlage schaltet ab. Ich finde es erstaunlich, dass nur in wenigen Anlagen die Sollwerte beider Seiten der Anlage synchron hochgefahren werden. Dies kann z.B. über eine Störgrößenaufschaltung geschehen. Der F02-Istwert X wird auf den Stellwert der KAT-Pumpe mit einem geeigneten Faktor aufaddiert, wodurch beide Seiten nahezu synchron hochfahren. Die kleine, aber unvermeidliche Differenz im Durchfluss wird dann über eine wesentlich langsamer eingestellte Sumpfstandregelung langfristig ausgeglichen. Eine so geregelte Anlage wird einen stabilen Sumpfstand zeigen.

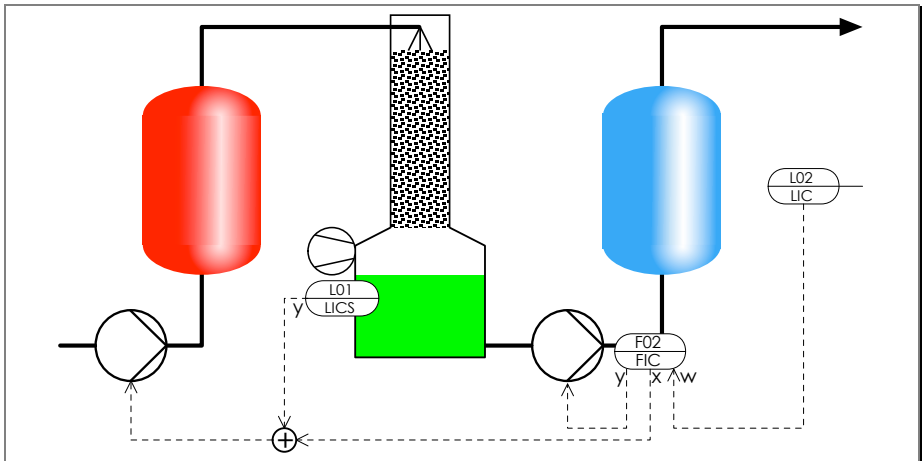


Abb. 6-53

Symmetrische Durchflussregelung über Störgrößenaufschaltung

Ich habe grundsätzlich Pumpenbetrieb über Frequenzumrichter angenommen, da diese Technik heutzutage üblich ist. Die Drosselung über Regelventile mit Pumpen unter Volllast sollte aufgrund der schlechten Effizienz grundsätzlich vermieden werden. Insbesondere kosten heutige Umrichter je nach Größe oft schon weniger als Regelventile.

6.11.2 Rezirkulationsmischung

Bei sehr billigen Anlagen wird der Durchfluss der VE-Straße über eine schaltende Zweipunkt-Regelung am VE-Tank zwischen 0 und F_{Max} hin und her geschaltet. Das führt aber oft dazu, dass nach einigen Stunden Rezirkulationsbetrieb die Straße bei erneuter Lastanfahrt einen Leitfähigkeitsbuckel produziert, der im schlimmsten Fall die Straße abschaltet. Dies kann vermieden werden, wenn die Rezirkulation als analog arbeitende Mischung ausgeführt wird. Damit kann der Durchfluss durch die Straße bis zur Halteleistung der Harzbetten herunter gedrosselt werden. Zur weiteren Drosselung wird zwar der Netto-Produktionsfluss weiter gesenkt, aber gleichzeitig ein Rezirkulationsstrom dazu gemischt, der mit dem Netto-Strom zusammen addiert die Halteleistung nicht unterschreitet.

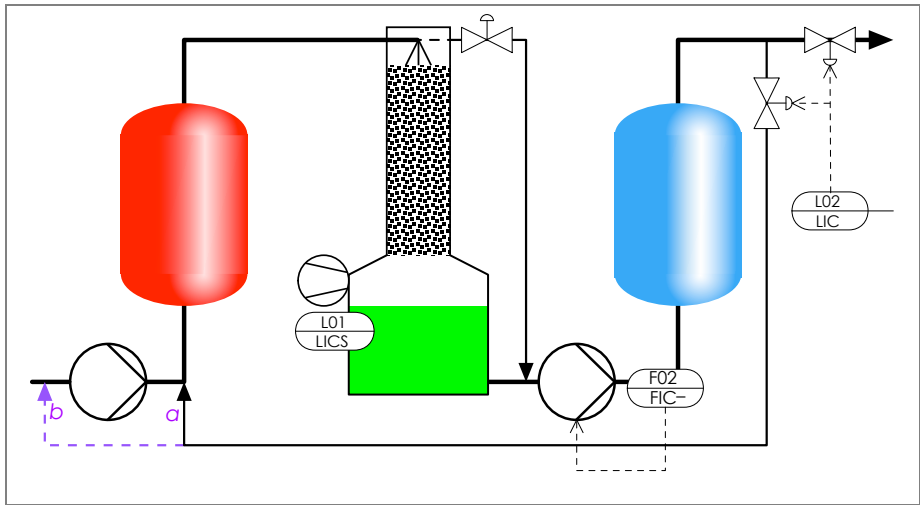


Abb. 6-54

Kontinuierlich arbeitende Rezirkulationsmischung

Die beiden Ventile im Ausgang sind im Split-Range-Modus angesteuert, so dass jede beliebige Mischung aus Nettoproduktion und Rezirkulationsstrom möglich ist. Die Summe der Ströme wird dann über den Umrichter der AN-Pumpe nachgestellt, um den Haltefluss nicht zu unterschreiten.

Im Fall, dass ein Membrantgasler anstelle des Rieseler eingesetzt wird, gestaltet sich die Regelungstechnik sehr einfach, da keine Anpassung beider Seiten mehr nötig ist. Es wird nur noch die Split-Range-Anordnung am Ausgang und die Durchfluss-Begrenzerregelung benötigt. Sofern das Rohwasser unter \geq ca. 2 bar ansteht, ist sogar nur noch eine Pumpe notwendig. Bei kleinen bis mittleren Anlagen kann damit die Technik mit Membrantgaslern preiswerter zu bauen sein als mit Rieseler, Rieselersumpfstandregelung und zweitem Pumpenpaar.

8.3 Spezielle Berechenbarkeiten in VE-Anlagen

Dieses Thema hat sich in den letzten Jahren extrem interessant entwickelt. Es sind inzwischen fantastische Möglichkeiten bekannt, die Leistung, Plausibilität und Performance von VE-Straßen zu beurteilen. Im Literaturverzeichnis finden Sie einige neuere Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge zu diesem Thema.

Ich gehe inzwischen so weit, dass fast alle Titrationsen, die ich – historisch bedingt zuerst – aufgeführt habe, in einer modernen VE-Straße nicht mehr notwendig sind. Ich bin immer etwas bekümmert, wenn ich höre, dass heutzutage tatsächlich noch laufend Titrationsen betriebsmäßig durchgeführt werden.

Ich gehe inzwischen noch einen Schritt weiter. Selbst photometrisch oder titrimetrisch arbeitende online-Analysengeräte können heutzutage trickreich durch Leitfähigkeits- und pH-Messungen ergänzt oder sogar ersetzt werden.

Der Höhepunkt dieser neueren Forschungen ist sicherlich das **Mi-Vision**-System, welches eine seit wenigen Jahren im Einsatz befindliche und inzwischen recht ausgereift funktionierende Mess- und Auswertetechnologie enthält. Damit ist das Ziel der sich selbst autonom steuernden VE-Anlage tatsächlich erreicht worden. Wir werden an verschiedenen Stellen auf die erstaunlichen Erfolge dieser Technologie noch zu sprechen kommen.

Doch zuerst wollen wir uns mit einigen nicht so bekannten Gesetzmäßigkeiten befassen, die zwar im **Mi-Vision**-System genutzt werden, die aber auch für dieses System nicht enthaltende Anlagen von Bedeutung sind.

Es gibt einige Paarungen von Messwerten in einer VE-Anlage, die sich gegenseitig bedingen. Dazu gehören Analysenwerte im Rohwasser, die bestimmte pH- oder Leitfähigkeitswerte in der VE-Straße festlegen. Oder zu bestimmten pH-Werten müssen bestimmte Leitfähigkeitswerte auftreten. Wenn diese Paarungen nicht erfüllt sind, deutet dies ziemlich direkt auf eine Fehlfunktion. Solche Berechenbarkeiten sind für die Inbetriebnahme- oder Analysetätigkeit an VE-Anlagen also sehr wichtig.

Wenn Sie von pH-Messungen lesen, werden Sie aufgrund der bisher bekannten Wartungsintensität mit einer gewissen Berechtigung skeptisch reagieren. Wenn ich Ihnen aber berichte, dass wir Kalibrierintervalle in der Größenordnung eines Jahres erreicht haben und inzwischen sogar Möglichkeiten bestehen, per Software nach jedem Beladelauf Nachkalibrationen auf wenige Hundertstel pH Einheiten genau durchführen zu lassen, sind Sie vielleicht doch neugierig, wozu man diese Messungen denn so sinnvoll einsetzen kann.

Ich würde empfehlen, diese Kapitel in Folge zu lesen, da das wesentliche Sortierkriterium der Erkenntnisfortschritt ist. Spätere Argumentationen benötigen die Ergebnisse vorhergehender Abschnitte.

8.3.1 Abschätzung des Salzgehaltes über die Rohwasserleitfähigkeit
 Ein überraschend einfacher Zusammenhang besteht zwischen der Rohwasserleitfähigkeit und dem Gesamtsalzgehalt. Zwischen beiden liegt für übliche Rohwässer ein Faktor von ca. 100. Dies lässt sich als „Daumenregel“ für erste Abschätzungen des Salzgehaltes nutzen, wenn keine Analysedaten vorliegen.

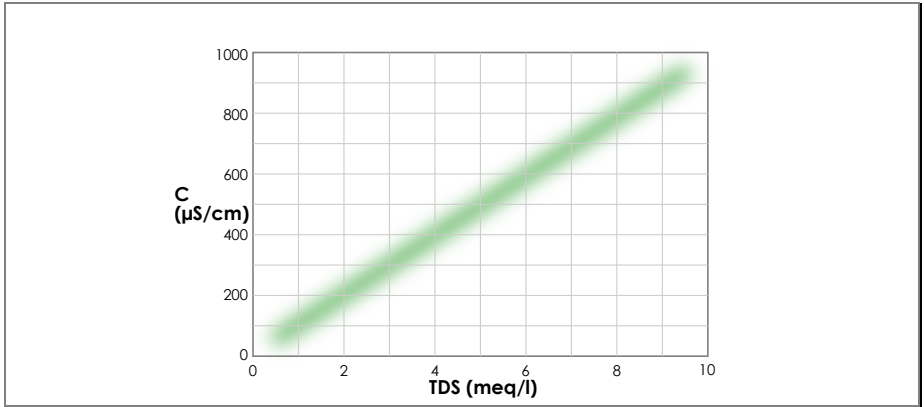


Abb. 8–4 „Daumenregel“ zwischen der Leitfähigkeit des Rohwassers und dessen TDS

Für HCO_3^- -Anteile um knapp 50 % des TDS ist das sogar recht genau. Ich habe einmal für ein synthetisches Rohwasser mit variablem HCO_3^- -Anteil den wirklichen LF-Quotienten ausgerechnet und aufgetragen. Zwischen 35 und 65 % HCO_3^- liegen Sie mit dieser Daumenregel also bei < 5 % Unsicherheit.

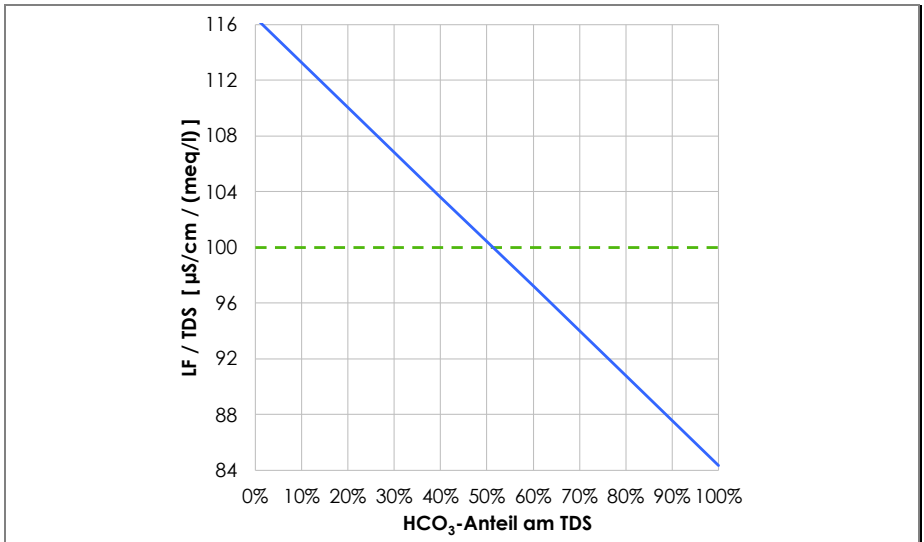


Abb. 8–5 Abhängigkeit des LF/TDS-Faktors vom HCO_3^- -Anteil

Der Grund für diese einfache Umrechnungskonstante liegt an den spezifischen Leitfähigkeitsbeiträgen der Einzelionen, die innerhalb ca. 15 % alle sehr ähnlich liegen (jeweils innerhalb der Kat- und Anionen verglichen). Ich habe sie zusammen mit ihren kat- und anionischen Mittelwerten in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Diese Ähnlichkeit bedeutet, dass die Aufteilung innerhalb der Kat- und Anionen auf Einzelstoffe nur geringfügige Unterschiede in der Summe verursacht. Unten habe ich für das willkürliche Beispiel von 51,3 % HCO_3^- -Anteil (= 48,7 % FMA) den Mittelwert aller Anionen errechnet. Die Gesamtleitfähigkeit ergibt sich dann als Summe der kationischen und der anionischen LF mit genau 100. Das genau ist unser „Daumenfaktor“, der also bei 51,3 % HCO_3^- -Anteil am TDS tatsächlich genau $100 (\mu\text{S}/\text{cm})/(\text{meq}/\text{l})$ ist.

Ion	spez. LF $[(\mu\text{S}/\text{cm})/(\text{meq}/\text{l})]$	typ. Anteil	
Na^+	45	30%	(im Konzentrationsbereich von Rohwasser)
K^+	64,6	10%	
Mg^{++}	45	10%	
Ca^{++}	51	50%	
gew. Ø Kationen		49,96	
H^+	336		
OH^-	180		
Cl^-	65,5	40%	"
NO_3^-	61,7	10%	
SO_4^{2-}	68,3	50%	
gew. Ø FMA	66,5		
HCO_3^-	34,4		eigene Messung
Ø Anionen		50,04	bei 51,3% HCO_3^-
Summe K+A		100,00 $(\mu\text{S}/\text{cm})/(\text{meq}/\text{l})$	

Abb. 8-6 Übersicht über Ionenleitfähigkeitsbeiträge im Rohwasserkonzentrationsbereich

Die ionalen Leitfähigkeiten (Λ) zeigen eine Konzentrationsabhängigkeit insbesondere im sehr kleinen und sehr hohen Konzentrationsbereich und daher weichen Konstanten in der Literatur oft voneinander ab. Sie müssen aber auch immer aufpassen, ob $(\mu\text{S}/\text{cm})/(\text{mmol}/\text{l})$ oder $(\mu\text{S}/\text{cm})/(\text{meq}/\text{l})$ als Einheit benutzt wurden und ob nicht der theoretische Grenzwert Λ_0 bei unendlich kleinem Salzgehalt gemeint ist. Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für übliche Wässer im Bereich von 10...1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Leitfähigkeit. Mit ihrer Hilfe lassen sich die Leitfähigkeiten echter Wasseranalysen fast immer auf besser als $\pm 10\%$ Genauigkeit errechnen.

8.3.2 Leitfähigkeitsquotient über dem Kationenaustauscher

Manchmal wollen Sie die ordnungsgemäße Funktion des KAT überprüfen. Dies kann z.B. gelegentlich zu Analysezwecken sein. Bei einer Reihen-Wechsel-Schaltung mit zwei SACs in Reihe, muss jedoch auch während des normalen

Betriebs der Durchbruch online erkannt werden. In der Vergangenheit wurde zu diesem Zweck meist eine Leitfähigkeitsdifferenz gebildet. Im günstigsten Fall war das die Differenz über dem jeweils zweiten SAC, eventuell aber auch die Differenz über dem ersten. Im Folgenden werde ich Ihnen zeigen, dass zum einen die Differenzbildung als Durchbruchindikator oft sehr nachteilig ist und dass eine andere Methode sehr viel bessere Ergebnisse auch für die Anlagenanalyse ermöglicht und dass wir mit dieser Methode noch eine ganz spannende zusätzliche Möglichkeit besitzen: Wir können die Wasseranalyse aus zwei Leitfähigkeiten ermitteln!

Bei den meisten VE-Anlagen ist die Leitfähigkeit im Rohwasser nicht konstant. Dies kann z.B. durch eine ungünstig geregelte Entcarbonisierung oder auch variable Rohwassermischungen verursacht werden, oder die VE-Straße wird im Schwebbettverfahren betrieben und geht hin und wieder teilweise in die Rezirkulation. Dabei verdünnt sich das Rohwasser und die Leitfähigkeit vor KAT schwankt im Extremfall zwischen knapp über 0 und der maximalen Rohwasserleitfähigkeit.

Wenn solche starken LF-Schwankungen im Zulauf der Straße vorliegen, werden auch die Differenzen entsprechend schwanken. Die Abb. 8-7 zeigt für schwankende Rohwasserleitfähigkeit (orange) Messdaten der LF nach SAC (rot) und die errechnete Kurve der Differenz (lila). Einen geeigneten Abschaltgrenzwert zu definieren, der möglichst präzise bei Beladungsende unterschritten wird, fällt unter Anbetracht der lila Kurve schwer. In diesem Beispiel tauchen eher LF-Spitzen auf, die für eine Abschaltung nicht einmal so störend wirken. Bei Rezirkulation z.B. würde die lila Kurve aber immer wieder gegen 0 gehen, ohne dass die Abschaltung erfolgen dürfte!

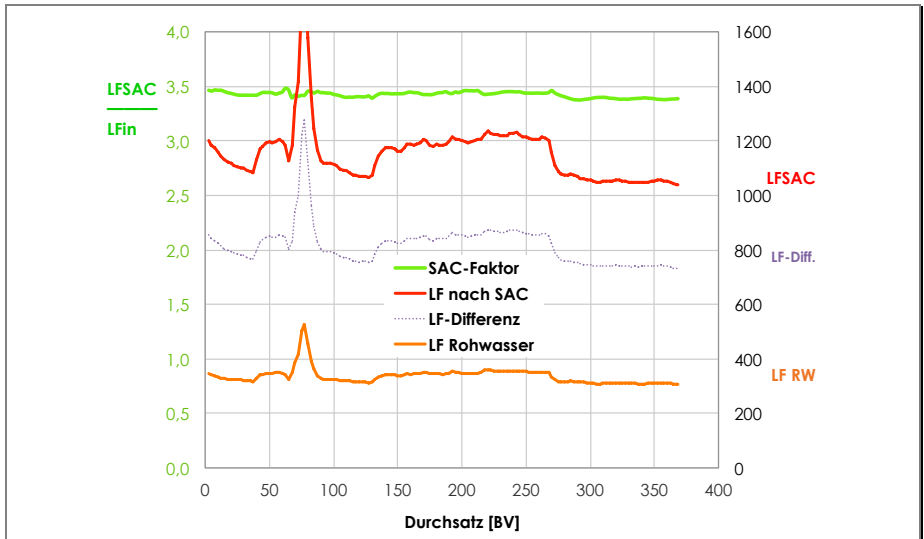


Abb. 8-7

Konstanz des Quotienten $LF_{\text{Rohwasser}}/LF_{\text{SAC}}$ trotz LF-Schwankungen

In der Abbildung ist zusätzlich in grün auch der *Quotient aus LF nach SAC und Rohwasser-LF* aufgetragen. Dieser ist offensichtlich nicht abhängig von der Rohwasserleitfähigkeit und kann daher als Maß der Leistung des KAT benutzt werden. Wir werden sehen.

Ich hatte ja die Schwierigkeit erwähnt, die die LF-Differenz bei der Erkennung des Durchbruchs verursacht. Genau diese erste Aufgabe lässt sich über den Quotienten sehr elegant lösen. Dies ist in Abb. 8–8 dargestellt. „Leider“ ist in diesem Beispiel die Zulauf-LF sehr konstant (orange), so dass nicht beide Effekte – Stabilität des Rechenergebnisses gegenüber Zulaufschwankungen *und* Empfindlichkeit im Durchbruch – sichtbar sind.

An der grünen Kurve des Quotienten ist der Durchbruch mit sehr gutem Signal-Rausch-Verhältnis erkennbar. Sie werden jetzt möglicherweise einwenden, dass das an der roten Kurve der LF nach SAC genau so gut ablesbar wäre. Ich erinnere aber an die vorige Abbildung, in der die LF-nach SAC sehr geschwankt hat, während der Quotient immer stabil bleibt. Die grüne Kurve würde also auch in diesem Beispiel bei möglicherweise schwankender Zulauf-LF bis zum Durchbruch sehr schön gerade verlaufen.

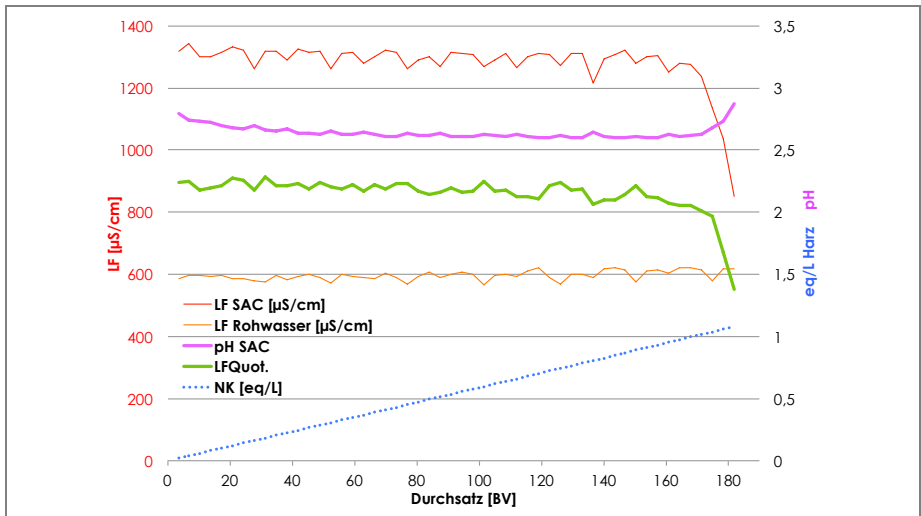


Abb. 8–8

Erkennung des Durchbruchs einer SAC-Stufe

Eine letzte Frage bleibt noch offen: Wovon hängt denn dieser so konstante Quotient zwischen LF nach SAC und Rohwasser-LF ab? Im ersten Beispiel war er $3,45 \pm 0,04$ und im zweiten $2,2 \pm 0,05$. Ich erinnere an dieser Stelle an die Abb. 8–6, in der die LF-Beiträge der Ionen aufgetragen waren. Durch die Entbasung durch den KAT wird in der Wasseranalyse die kationische Seite gegen H^+ ausgetauscht, was die LF deutlich erhöht. Der HCO_3^- -Anteil setzt einen Teil des H^+ in nicht leitfähiges CO_2 um, was diesen LF-Anstieg verringert. Die FMA-Anteile bleiben vor und nach KAT gleich. Es liegt also mit einer gewissen

Fantasiebegabung nahe, den LF-Quotienten gegen den HCO_3^- -Anteil im Rohwasser aufzutragen. Dies ist im Folgenden für eine ganze Reihe von echten Rohwassersituationen dargestellt:

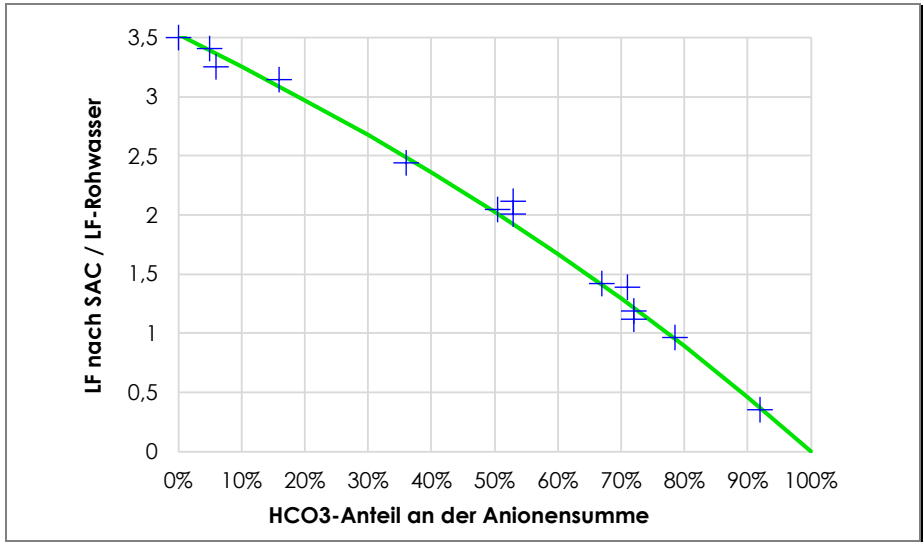


Abb. 8-9

Zusammenhang zwischen LF-Erhöhung über SAC und FMA-Anteil am TDS

Es ist wenig erstaunlich, dass sich ein klarer Zusammenhang in dieser zugegebenermaßen fantasievollen Darstellungsweise ergibt. Die durchgezogene Linie ist nicht etwa nur ein Fit der Punkte, sondern die Kurvendarstellung einer Modellrechnung, die künstliche Rohwassersituationen mit FMAs und HCO_3^- in unterschiedlichem Mischungsverhältnis enthält. Als LF-Beiträge der KATs wurden darin der in Abb. 8-6 bereits erwähnte Mittelwert von $49,96 \mu\text{S}/(\text{meq}/\text{l})$, für die FMAs der Wert $66,52 \mu\text{S}/(\text{meq}/\text{l})$ und für HCO_3^- $34,4 \mu\text{S}/(\text{meq}/\text{l})$ eingesetzt. Als ionale LF von H^+ wurde $336 \mu\text{S}/(\text{meq}/\text{l})$ verwendet. Es ist doch immer wieder schön, wie die Messungen der Realität die theoretischen Vorhersagen so schön widerspiegeln, wie in dieser Grafik die Identität der blauen Kreuze der Messungen mit der grünen theoretischen Kurve.

Zum Schluss noch ein praktischer Tip für Programmierer: Es ist noch zu beachten, dass der Leitfähigkeitsquotient am genauesten berechnet werden kann, wenn die Messwerte für die Rohwasserleitfähigkeit um die Laufzeit des Wassers durch den KAT verzögert werden. Der Quotient wird dann mit der aktuellen Leitfähigkeit nach dem KAT und dem verzögerten Rohwasserwert berechnet. Die Verzögerungszeit lässt sich leicht berechnen, indem man das Hohlraumvolumen in der Säule (etwa 0,4...0,8 BV) und den Durchfluss (in BV/h) nimmt. Am Ende ist es nur noch eine Softwareaufgabe.

Nun aber zu der Ankündigung, dass die Rohwasseranalyse mit dieser Methode *genau* ermittelt werden kann. Sie mögen sich gefragt haben, was das denn

10 Anhang

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	<i>H⁺-Konzentration je nach pH-Wert (saurer Bereich << 7)</i>	17
Abb. 2-2	<i>Tabelle der kopfrechenbaren pH-Konzentrations-Beziehung innerhalb einer pH-Einheit</i>	20
Abb. 2-3	<i>OH⁻-Konzentration je nach pH-Wert (alkalischer Bereich >> 7)</i>	21
Abb. 2-4	<i>Vorgänge bei der Lösung von Kochsalz in Wasser, Ionen in maßstäblicher Darstellung</i>	23
Abb. 2-5	<i>Vorgänge bei der Lösung von Chlorwasserstoffgas in Wasser</i>	27
Abb. 2-6	<i>Dissoziationsdiagramm der Kohlensäure</i>	29
Abb. 2-7	<i>Dissoziationsübergänge verschiedener Säuren</i>	34
Abb. 2-8	<i>Blockdarstellung der Wasseranalyse für Fall 1: Härte > HCO₃⁻</i>	36
Abb. 2-9	<i>Blockdarstellung der Wasseranalyse für Fall 2: Härte < HCO₃⁻</i>	39
Abb. 2-10	<i>Tabelle zur Umrechnung verschiedener Einheiten für die Härte im Wasser</i>	43
Abb. 3-1	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von starksauren Kationenaustauschern</i>	45
Abb. 3-2	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von schwachsauren Kationenaustauschern</i>	48
Abb. 3-3	<i>Zusammenfassung des optimalen Arbeitsbereiches von Kationenaustauschern</i>	49
Abb. 3-4	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von starkbasischen Anionenaustauschern des Typs I</i>	51
Abb. 3-5	<i>Regeneriergrad bei SBAs in Abhängigkeit vom NaOH-Angebot</i>	52
Abb. 3-6	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von WBAs, Di-Methyl-Amin</i>	53
Abb. 3-7	<i>Keine Aufnahme schwacher Säuren auf schwachbasischen Anionenaustauschern</i>	56
Abb. 3-8	<i>Volumenveränderung in Abhängigkeit vom Quaternierungsgrad</i>	57
Abb. 3-9	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von starkbasischen Anionenaustauschern des Typs II</i>	59
Abb. 3-10	<i>Unterschied der nutzbaren Kapazität zwischen Typ I- und Typ II-Anionenaustauschern</i>	60
Abb. 3-11	<i>Räumliche Skizze eines mit Di-Vinylbenzol vernetzten Polystyrols</i>	62
Abb. 3-12	<i>Skizze einer gelförmigen Polymerstruktur und ihre Porengröße (nicht maßstäblich)</i>	64
Abb. 3-13	<i>Beispielhafter Ausschnitt eines Huminsäuremoleküls</i>	64
Abb. 3-14	<i>Skizze einer makroporösen Polymerstruktur und ihre Porengröße (nicht maßstäblich)</i>	65
Abb. 3-15	<i>Volumenveränderung in Abhängigkeit vom Quaternierungsgrad</i>	69
Abb. 3-16	<i>Trennung der Einflüsse von TK-Verlust und Entnetzung auf die Volumenveränderung</i>	70
Abb. 3-17	<i>Schematische Darstellung der Dichtedefinitionen</i>	74
Abb. 3-18	<i>Tabelle der Selektivitätskonstanten für starksaure Kationenaustauscher</i>	75
Abb. 3-19	<i>Abfolge der Selektivitäten für Anionenaustauscher</i>	77
Abb. 3-20	<i>Abfolge der Selektivitäten für Anionenaustauscher vs. pKs-Wert</i>	78
Abb. 3-21	<i>Entnetzung der Ionenaustauscher-Matrix</i>	79
Abb. 3-22	<i>Hofmann-Abbau von Anionenaustauschern (SBA, Typ I und Typ II)</i>	80
Abb. 3-23	<i>Messung der Alterung durch Vorsorgeuntersuchungen (z.B. SBA II)</i>	81
Abb. 3-24	<i>Unterschiede im Kapazitätsabbau verschiedener makroporöser SBA I-Typen</i>	82
Abb. 3-25	<i>Unterschiede im Quellwassergehaltsanstieg verschiedener makroporöser SBA I-Typen</i>	83
Abb. 3-26	<i>Zusammenfassung der Alterung der funktionellen Gruppen von Anionenaustauschern</i>	84
Abb. 3-27	<i>„Lebenslinien“ von ANs je nach Anwendung</i>	85
Abb. 3-28	<i>Alterung der Kapazitäten von WAC-Typen</i>	86
Abb. 3-29	<i>Häufigkeitsverteilung von TK-Messwerten</i>	87
Abb. 3-30	<i>Alterung der Kapazitäten von SAC-Typen</i>	88

Abb. 3–31	Verlust der Vernetzung eines einzelnen Harztyps	90
Abb. 3–32	Entnetzungsrate bei unterschiedlichen Herstellungsverfahren und Anwendungen	90
Abb. 3–33	Unterschiedliche Lebensdauer verschiedener Harzklassen	92
Abb. 3–34	Erkennbarkeit mehrerer Harzgenerationen nach mehrfachen Teilnachfüllungen	93
Abb. 4–1	Funktion der Entbasung durch einen SAC	95
Abb. 4–2	Funktion der Entcarbonisierung durch einen WAC	97
Abb. 4–3	Aufzeichnung von +m-Wert (online und offline) sowie LF nach Entcarbonisierung	101
Abb. 4–4	Übereinstimmung von +m-Titrationen und der Henderson-Hasselbalch-Gleichung	101
Abb. 4–5	Funktion der Entgasung durch einen Rieseler	102
Abb. 4–6	Funktion der Entsäuerung durch einen WBA	103
Abb. 4–7	Funktion der Restentsäuerung mit einem SBA	105
Abb. 4–8	Das 4-Quadranten-Modell	106
Abb. 4–9	Schaltungen für kleine Anlagen	108
Abb. 4–10	Schaltung für kohlenstoffhaltiges Rohwasser (Doppelstock-Verbund-Schwebbett)	109
Abb. 4–11	Schaltungen für entcarbonisiertes Wasser ohne und mit Doppelstockaufbau	110
Abb. 4–12	Entstehung von Na-Schlupf in einer KAT-Stufe	111
Abb. 4–13	Entstehung von Natronlauge durch Na-Schlupf des KAT	112
Abb. 4–14	Senkung des Na-Schlupf durch einen Folge-KAT	113
Abb. 4–15	Nachschtaltung eines SAC nach der VE-Straße	113
Abb. 4–16	Schema des Multistep-Verfahrens (Zustand bei Beladung im Aufstrom)	114
Abb. 4–17	Näherung der K – A – K –Schaltung zum Mischbett	115
Abb. 4–18	Konstruktion einer Mischbettsäule	116
Abb. 4–19	Optimale Lage der Harztrennschicht relativ zur Drainage bei Synchronregeneration	117
Abb. 4–20	Ablauf eines Regenerierzyklus bei synchroner Regeneration von KAT und AN	119
Abb. 4–21	Ablauf eines Regenerierzyklus bei asynchroner Regeneration von KAT und AN	121
Abb. 4–22	Das „schlafende Mischbett“	122
Abb. 4–23	Verklumpung durch elektrostatische Anziehung im hochregenerierten Mischbett	123
Abb. 4–24	Vermeidung von Verklumpung durch mikroskopische Polyelektrolyte	124
Abb. 4–25	Das Mischbett als „Glättungsfilter“	125
Abb. 4–26	Dissoziationsdiagramm der Phosphorsäure	129
Abb. 4–27	Vergleich von Konditioniermittel-pH-Werten mit der Henderson-Hasselbalch-Gleichung	130
Abb. 4–28	Schema einer Kondensatreinigung mit gemeinsamer Mischbett-Funktion	131
Abb. 4–29	Schema einer Kondensatreinigung mit doppeltem Mischbett für erhöhte Sicherheit	131
Abb. 4–30	Schema einer Kondensatreinigung mit KAT und MB für Amine	132
Abb. 4–31	Durchbruchskurven einer Kondensatreinigung in Abhängigkeit von der vorherigen Na-Restbeladung ($[\text{NH}_3/4]=6,2 \text{ mg/l}$ und $[\text{Na}]=3,4 \text{ ppb}$)	133
Abb. 4–32	Höhe des Na-Schlupfes nach dem Blib je nach vorheriger Na-Restbeladung	134
Abb. 4–33	Durchbruchskurven nach Regeneration mit $(\text{NH}_4^+)_2\text{SO}_4^{2-}$ -Lösung ($[\text{NH}_3/4]=4,6 \text{ mg/l}$ und $[\text{Na}]=3,1 \text{ ppb}$)	135
Abb. 4–34	Isothermen für die erreichbaren Beladedurchsätze je nach Regeneriermittelmenge (Beladekonzentrationen: $\text{NH}_3/4^+ \approx 5 \dots 6 \text{ ppm}$ und $\text{Na}^+ \approx 2,5 \dots 3,5 \text{ ppb}$)	135
Abb. 4–35	Einteilung von Adsorbentien über ihre Porengeometrie	137
Abb. 4–36	Verschiedene Isothermentypen	139
Abb. 4–37	Isotherme von Intrasol-RI mit Beladedurchsätzen bei variabler Konzentration	140

Abb. 4–38	Klassifizierung von Organik über Summenparameter	141
Abb. 4–39	Darstellung von beispielhaften Chromatogrammen nach der LC-OCD-Methode	142
Abb. 4–40	Eigenschaften der verschiedenen Molekülklassen bezüglich Adsorption und Ionenaustausch	143
Abb. 4–41	LC-OCD-Messergebnisse nach zwei verschiedenen Flockungen	147
Abb. 4–42	LC-OCD-Messergebnisse nach biologisch bewachsener Aktivkohle	148
Abb. 4–43	LC-OCD-Messergebnisse nach Aktivkohle und VE-Stufen	150
Abb. 4–44	Adsorptionsisothermen einzelner Stoffgruppen auf A-Kohle	151
Abb. 4–45	Gemessene Adsorptivitäten der vier Stoffgruppen	152
Abb. 4–46	Bindungsmechanismen je nach Position in der VE und Beladefortschritt	153
Abb. 4–47	TOC-Verläufe innerhalb des Beladelaufes der VE-Straße	155
Abb. 4–48	Zusammenhang zwischen Organik- und Kohlensäuredurchbruch	156
Abb. 4–49	Schema eines Zweischichtfilters	158
Abb. 4–50	Optimierung der Körnungen in Zweischichtfilter über die Druckverlustprofile	159
Abb. 4–51	Druckverlustprofil mit zu feiner Körnung oben	160
Abb. 4–52	Druckverlustprofil mit zu grober Körnung oben	160
Abb. 5–1	Grafische Darstellung der Henderson-Hasselbalch-Gleichung	162
Abb. 5–2	Vergleich zwischen Kalkentcarbonisierung und Entcarbonisierung per Ionenaustausch	164
Abb. 5–3	Veränderung der Rohwasseranalyse bei der Kalkentcarbonisierung	165
Abb. 5–4	Kostenberechnung der VE-Produktion in Abhängigkeit vom Entcarbonisierungs-pH	166
Abb. 5–5	Vorkommensweisen von Kieselsäure	170
Abb. 5–6	Dissoziationsdiagramm der Kieselsäure	172
Abb. 5–7	Kieselsäurelöslichkeit in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert	173
Abb. 5–8	Isothermen für die Bindung von Kieselsäure auf SBAs im Mischbett	175
Abb. 5–9	Aufteilung der Kieselsäurebindung im AN-Verbund	176
Abb. 5–10	Duale Natur der Bindung von monomerer Kieselsäure auf dem SBA	178
Abb. 5–11	Zusammenfassung der Bindungsmechanismen	178
Abb. 5–12	Durchbruchskurven für Kieselsäure nach zwei verschiedenen Messprinzipien	179
Abb. 5–13	Folgen von Kapazitätsalterung im Anionenaustauscher	180
Abb. 5–14	Fällung von Kieselsäure bei der Verbundregeneration	182
Abb. 6–1	Mögliche Strömungsrichtungen je nach Verfahren	185
Abb. 6–2	Ungenutzte Anlagenteile und Zeiten bei der 2 x 100 %-Straßenschaltung	186
Abb. 6–3	3 x 50 %-Straßenschaltung mit pausenloser Konzeption	187
Abb. 6–4	Ältere Bauweise einer Multi-Straßen-Großanlage	187
Abb. 6–5	Moderne und betriebskostengünstigste Bauweise einer Multi-Straßen-Großanlage	188
Abb. 6–6	Prinzip der Reihen-Wechsel-Schaltung	189
Abb. 6–7	Reihen-Wechsel-Schaltung mit Verbundtechnik in der Vollentsalzung	191
Abb. 6–8	Geschachtelte Reihen-Wechsel-Schaltung in K–A–K–A -Anordnung	191
Abb. 6–9	Bauweise einer Gleichstromsäule	193
Abb. 6–10	Anfahrtsituation beim Rückspülen der Harzschicht	194
Abb. 6–11	Einstellung eines stabilen Rückspülgleichgewichts	195
Abb. 6–12	Bettstreckungen und Bettstreckungsfaktoren verschiedener Harzklassen	196
Abb. 6–13	Anfahrt der Rückspülung bei dicht liegendem Bett	197
Abb. 6–14	Anfahrt der Rückspülung mit zu hoher Geschwindigkeit	198

Abb. 6–15	<i>Bauweise einer Gegenstromsäule</i>	200
Abb. 6–16	<i>Anfahrssituation beim Kompaktieren der Harzschicht (SAC, gelförmig)</i>	201
Abb. 6–17	<i>Mindest-Kompaktionsgeschwindigkeit von SAC-gel-Typen vs. Wassertemperatur</i>	201
Abb. 6–18	<i>Mindest-Kompaktionsgeschwindigkeit anhand der Bettstreckungsfaktoren</i>	202
Abb. 6–19	<i>Schaltung einer Straße im Schwebebettverfahren (Beladungsphase, Verbundschaltung)</i>	203
Abb. 6–20	<i>Schaltung einer Straße im Up.Co.Re-Verfahren (Beladungsphase, Verbundschaltung)</i>	204
Abb. 6–21	<i>Bauweise einer Gegenstromsäule für das Gegenstrom-Gegendruck-Verfahren</i>	205
Abb. 6–22	<i>Bauweise einer Gegenstromsäule für das Rinsebett-Verfahren</i>	206
Abb. 6–23	<i>Bauweise einer Split-Flow-Säule</i>	207
Abb. 6–24	<i>Bauweise einer Doppelstocksäule für das Verbundschwebebett-Verfahren</i>	209
Abb. 6–25	<i>Kieselsäurefüllung im WBA</i>	210
Abb. 6–26	<i>Ausgasung von Kohlensäure im WBA</i>	212
Abb. 6–27	<i>Regeneration, Verdrängung, Vorwäsche und Kreislaufwäsche in einer Schwebebettanlage</i>	214
Abb. 6–28	<i>Regeneration, Verdrängung, Vorwäsche und Kreislaufwäsche in einer Up.Co.Re-Anlage</i>	214
Abb. 6–29	<i>Auftrennung der Ablauf-Leitfähigkeit in KAT- und AN-Schlupf</i>	219
Abb. 6–30	<i>Rieseler zur klassischen Entgasung in der VE-Straße</i>	221
Abb. 6–31	<i>Vakuumentgaser für geschlossene Anlagen</i>	222
Abb. 6–32	<i>Membrantgaser zur kombinierten Entgasung innerhalb der VE-Straße</i>	223
Abb. 6–33	<i>Schnittbild eines Membrantgasungsmoduls (Hohlfasern viel dicker als real dargestellt)</i>	224
Abb. 6–34	<i>Unterschiede der Fahrweisen des Membrantgasers</i>	224
Abb. 6–35	<i>Typische CO₂-Restwerte (aus einer Pilotanlage)</i>	225
Abb. 6–36	<i>Typische O₂-Restwerte (aus einer Pilotanlage)</i>	226
Abb. 6–37	<i>Einsparmöglichkeit von Stripddampf in der thermischen Entgasung im Speisewasser</i>	226
Abb. 6–38	<i>Beispiel einer geschlossenen Anlage zur Pharmawasservorproduktion</i>	227
Abb. 6–39	<i>Stabilisierung des pH-Wertes durch CO₂-Entfernung ohne SBA</i>	228
Abb. 6–40	<i>Bereiche von Regeneriermittelangebot und -überschusses im Gegenstrom (Beispiel SAC)</i>	234
Abb. 6–41	<i>Modell der Regeneriereffektivität im Gegenstrom für SACs</i>	235
Abb. 6–42	<i>Verzögerte Folge unzureichender Regeneriermittelmenge</i>	237
Abb. 6–43	<i>Kurven der Nutzbaren Kapazität vs. Regeneriermitteleinsatz nach Langmuir-Formalismus</i>	239
Abb. 6–44	<i>Zusammenhang der Kurven NK(RA), RÜ(RA) und NK(RÜ) für SACs</i>	240
Abb. 6–45	<i>Die Kurven NK(RA) und RÜ(RA) für Typ I- und Typ II-SBAs</i>	241
Abb. 6–46	<i>Zusammenhang der Kurven NK(RA), RÜ(RA) und NK(RÜ) für SBAs</i>	242
Abb. 6–47	<i>Berechnung der NK für WAC-Typen anhand des Ionenangebotes</i>	243
Abb. 6–48	<i>Korrekturfaktor für die NK durch variablen Härteanteil</i>	244
Abb. 6–49	<i>Berechnung der NK für DBA-Typen anhand des Ionenangebotes</i>	245
Abb. 6–50	<i>Korrekturfaktor für die NK durch variablen Sulfat-Anteil</i>	246
Abb. 6–51	<i>Korrekturfaktor für die NK durch variable Temperatur</i>	246
Abb. 6–52	<i>Entscheidungswege für die starkbasische Stufe einer VE-Straße</i>	276
Abb. 6–53	<i>Symmetrische Durchflussregelung über Störgrößenaufschaltung</i>	279
Abb. 6–54	<i>Kontinuierlich arbeitende Rezirkulationsmischung</i>	280
Abb. 6–55	<i>Kontinuierlich arbeitende Rezirkulationsmischung mit Membrantgaser</i>	281
Abb. 6–56	<i>Die Idee des autonomen Betriebs einer VE-Straße</i>	282
Abb. 6–57	<i>Chemisch-mathematisches Prinzip der Anlagensimulation</i>	283

Abb. 6–58	Zuteilung der Rohwasseranalysenbestandteile auf die 5 Stufen einer VE-Straße	284
Abb. 6–59	Vergleich zwischen Simulation und Realität der Leitfähigkeiten	285
Abb. 6–60	Vergleich zwischen Simulation und Realität der pH-Werte	286
Abb. 6–61	SiO ₂ -Kurve im Vergleich mit einem handelsüblichen analytischen Silikometer	287
Abb. 6–62	Aufbau des Mi-Vision -Messsystems	288
Abb. 6–63	Foto des Mi-Vision -Messsystems	289
Abb. 6–64	RI-Schema einer 4-stufigen VE-Straße	290
Abb. 6–65	Beladung der Muster-VE-Anlage	291
Abb. 6–66	Beladung der Muster-VE-Anlage mit gleichzeitiger teil-Rezirkulation	292
Abb. 6–67	Regeneration und Kreuzregeneration in der Muster-Anlage	293
Abb. 6–68	Die Kreislaufwäsche in der Muster-Anlage	293
Abb. 6–69	Straße mit Membrantgasler und Rohwasservordruck	294
Abb. 6–70	Straße mit Membrantgasler ohne Rohwasservordruck	295
Abb. 7–1	Investitionskosten vs. Anlagengröße, 2 Straßen, inflationsbereinigt für 2024	297
Abb. 7–2	Spezifische Investitionskosten vs. Anlagengröße, inflationsbereinigt für 2024	297
Abb. 7–3	Investitionskostenentwicklung incl. Infrastruktur für verschiedene Anlagengrößen	298
Abb. 7–4	Betriebskostenanteile für eine 4-stufige VE-Anlage	298
Abb. 7–5	Chemikalienkosten, AfA und IH-Kosten über eine Betriebszeit von 30 Jahren (40 m ³ /h)	299
Abb. 7–6	Dissoziationsdiagramm der Schwefelsäure	301
Abb. 7–7	Vergleich der Regenerierwirkung von Salz- und Schwefelsäure	302
Abb. 7–8	Entwicklung der Chemikalienkosten in den letzten Jahren	304
Abb. 7–9	Verschiedenartigkeit der Säure-/Laugeverbräuche bei beispielhaften Anlagen	305
Abb. 7–10	Normierung der Säure-/Laugeverbräuche über den Gesamtsalzgehalt	305
Abb. 7–11	Aufteilung der Wasseranalyse bei Rohwasserspeisung (mit Rieseler)	306
Abb. 7–12	Aufteilung der Wasseranalyse bei vorheriger Kalkentcarbonisierung	306
Abb. 7–13	Vergleich des verlorenen Überschusses bei Gegenstrom- vs. Verbund-Gegenstromtechnik	308
Abb. 7–14	Erhöhung des Waschwasserbedarfs durch Alterung (für SBA I gel Typen)	315
Abb. 7–15	Erhöhung des Waschwasserbedarfs durch Alterung bei zwei festen Abschaltgrenzen	316
Abb. 7–16	Einfachste Form der Umkehrosmose in Kleinanlagen	318
Abb. 7–17	Verschiedene Vorbehandlungen vor der Umkehrosmose	319
Abb. 7–18	Verschiedene Feinreinigungen nach der Umkehrosmose	320
Abb. 7–19	Ergebnis des Vergleichs zwischen IA- (links) und UO-Verfahren (rechts) ohne Wasserkosten 322	
Abb. 7–20	Wasserkosten von IA- und UO-Verfahren im Vergleich	323
Abb. 7–21	Gesamtkostenvergleich zwischen IA- und UO-Verfahren	324
Abb. 7–22	Kostensteigerung einer AN-Stufe durch Harzalterung	326
Abb. 7–23	Unterschiedliche Alterung der Kapazität bei SAC- und SBA-Typen	328
Abb. 7–24	Drehung der Asymmetrierung durch Abfall der AN-Kapazität (startend bei 120 %)	329
Abb. 7–25	Durch Regeneriermittelvariation veränderbare NK	332
Abb. 7–26	Trotz Regeneriermittelvariation unveränderbare NK im Verbund	333
Abb. 8–1	Titration von Säure- und Basekapazitäten	336
Abb. 8–2	SiO ₂ -Durchbruchskurven aus derselben Straße über zwei verschiedene Messverfahren	345
Abb. 8–3	SiO ₂ -Isothermen im MB nach Freundlich-Formalismus	346

Abb. 8–4	„Daumenregel“ zwischen der Leitfähigkeit des Rohwassers und dessen TDS	349
Abb. 8–5	Abhängigkeit des LF/TDS-Faktors vom HCO_3^- -Anteil	349
Abb. 8–6	Übersicht über Ionenleitfähigkeitsbeiträge im Rohwasserkonzentrationsbereich	350
Abb. 8–7	Konstanz des Quotienten $\text{LF}_{\text{Rohwasser}}/\text{LF}_{\text{SAC}}$ trotz LF-Schwankungen	351
Abb. 8–8	Erkennung des Durchbruchs einer SAC-Stufe	352
Abb. 8–9	Zusammenhang zwischen LF-Erhöhung über SAC und FMA-Anteil am TDS	353
Abb. 8–10	Rechenweg zur Ermittlung des 4-Quadranten-Modells aus zwei Leitfähigkeiten	355
Abb. 8–11	Berechnung des pH-Wertes nach SAC / Rieseler aus der Summe der Mineralsäureanionen	356
Abb. 8–12	Die „Guru“-Korrelationskurve und das Wertepaar pH 8,64 und $1 \mu\text{S}/\text{cm}$	357
Abb. 8–13	Vorhersagbare pH-Werte anhand der Leitfähigkeit bei alleinigem Na-Schlupf	358
Abb. 8–14	Nachrechnung des Leitfähigkeitsdips	359
Abb. 8–15	Die „Guru“-Korrelationskurve in linearisierter Darstellung	360
Abb. 8–16	Guru-Linien für verschiedene Kationen	362
Abb. 8–17	Das Korrelationsdiagramm der VE-Straße	364
Abb. 8–18	Grenzlinien für verschiedene Kat- und Anionen	365
Abb. 8–19	Ablaufwerte einer Straße nach SBA in der Korrelationsdiagramm-Sprache	365
Abb. 8–20	Ablaufwerte einer Straße nach SBA in der Korrelationsdiagramm-Sprache	366
Abb. 8–21	Ablaufwerte einer Straße nach SBA in der bekannten Zeitdarstellung	367
Abb. 8–22	Ablaufwerte einer Straße nach WBA in der bekannten Zeitdarstellung	369
Abb. 8–23	Ablaufwerte einer Straße nach WBA in der Korrelationsdarstellung	370
Abb. 8–24	Beispiellauf zur Beschreibung der SW-Kalibration an der Messstelle nach SBA	373
Abb. 8–25	Beispiellauf zur SW-Kalibration an der Messstelle nach Mess-Kationenaustauscher	374
Abb. 8–26	Beispiellauf zur SW-Kalibration an der Messstelle nach UV-Oxidation	375
Abb. 8–27	Kurvensatz zur Bestimmung des TOC	377
Abb. 8–28	TOC-Messung über katalysierte Oxidation mit spektroskopischem Nachweis von CO_2	378
Abb. 8–29	Delta-Leitfähigkeit mit Nachweis von HCO_3^- und Umrechnung auf Kohlensäure gesamt	379
Abb. 8–30	Berechnungsmethode für die gesamte Kohlensäure in nur Kohlensäure-haltigem Wasser	380
Abb. 8–31	Grafische Darstellung der Henderson-Hasselbalch-Gleichung für Kohlensäure (Schritt 3)	381
Abb. 8–32	Vergleich der zwei Referenzgeräte untereinander	382
Abb. 8–33	Vergleich der Mi-Vision -TrueTOC-Kurve mit den zwei Referenzgeräten ① und ②	383
Abb. 8–34	Problematik der unberechenbaren Beimischung von NaOH nach SBA-Stufe	384
Abb. 8–35	Vergleich der Mi-Vision -TrueTOC-Kurven (grün) mit dem Referenzgerät ③ (orange)	386
Abb. 8–36	Erreichte Zuverlässigkeit der Mi-Vision -TOC-Messergebnisse	387
Abb. 8–37	Das Referenzgerät ③ spiegelt nur die Leitfähigkeit. Eine TOC-Messung ist das nicht!	388
Abb. 8–38	Vergleich der Mi-Vision -TrueTOC-Kurve mit den zwei Referenzgeräten ② und ④	389
Abb. 8–39	Methode zur schonenden Entnahme einer Harzprobe	392
Abb. 8–40	Färbebilder neuer gel-SACs	396
Abb. 8–41	Färbebilder neuer mp-SACs	396
Abb. 8–42	Färbebilder neuer WACs (gel und mp)	396
Abb. 8–43	Färbebilder neuer SBAs (gel und mp)	397
Abb. 8–44	Färbebilder gebrauchter KAT-Proben	397
Abb. 8–45	Färbebilder gebrauchter AN-Proben	398

Abb. 9-1	Mess- und Probenorte an einer VE-Anlage	403
Abb. 9-2	Uneindeutigkeit der Laufzeitverkürzung	404
Abb. 9-3	LF- und pH-Kurven für ordnungsgemäßen und fehlerhaften AN (letztes Drittel der Beladung) 405	
Abb. 9-4	LF- und pH-Kurven für ordnungsgemäßen und fehlerhaften KAT	406
Abb. 9-5	Auswirkung von KAT-Regeneriergrad und Asymmetrierung auf die Durchbruchskurve	408
Abb. 9-6	Fouling durch organische Säuren auf Anionenaustauschern	411
Abb. 9-7	Organikdesorption von Kat- und Anionenaustauschermustern	414
Abb. 9-8	Reinigungserfolg verschiedener Behandlungslösungen auf Anionenaustauschern	415
Abb. 9-9	Wirksamkeit der Maßnahmen, Temperatur, Zeit und Alkalität	416
Abb. 9-10	Möglichkeiten zur einfachen Anwendung von Sonderlösungen	418

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Beispielhafte pH-Werte im sauren Bereich	18
Tabelle 2-2	Kopfrechenbare pH-Konzentrations-Beziehung mit halbzahligem pH-Werten	20
Tabelle 2-3	Beispielhafte pH-Werte im alkalischen Bereich	22
Tabelle 2-4	Tabelle der pKs-Werte vieler anorganischer Säuren	33
Tabelle 2-5	Molmassen und Valenzen der wichtigsten Rohwasserionen und Inhaltsstoffe	41
Tabelle 2-6	Beispiel für die Normierung einer Wasseranalyse	41
Tabelle 2-7	Teilsummenbildung zum 4-Quadranten-Modell der Beispielanalyse	42
Tabelle 3-1	NK-Vergleich in gegebener Kammergröße je nach Quaternierungsgrad	58
Tabelle 3-2	Volumenveränderung von DBA-Typen	68
Tabelle 3-3	Übersicht über Kapazitätsangaben	72
Tabelle 4-1	Übersicht über erreichbare Entfernungsraten der SBA-Stufe einer VE-Straße	105
Tabelle 4-2	Unterschiedliche Qualität der Entsalzung je nach letzter Stufe in der Anlage	108
Tabelle 4-3	Unterschiede zwischen den drei gängigen Adsorbentien	136
Tabelle 4-4	Einteilung des gesamten DOC in Stoffgruppen	143
Tabelle 5-1	Vorkommensweisen von Kieselsäure bei unterschiedlichen Polymerisatgrößen	171
Tabelle 6-1	Definitionen von Größen zum Rechnen	231
Tabelle 6-2	Beispiele für Harzkonstanten zur Berechnung der NKs	247
Tabelle 6-3	Verteilung der Rohwasserinhaltsstoffe je nach Anlagenstruktur	248
Tabelle 6-4	Einfache Berechnung einer SAC-Stufe in einer 2- oder 3-stufigen Schaltung	249
Tabelle 6-5	Die benutzten Zulaufanalysen (Rohwasser und kalkentcarbonisiertes Wasser)	250
Tabelle 6-6	Berechnungsbeispiel für einen WAC-SAC-Verbund	254
Tabelle 6-7	Schritte zur Auslegung der WAC-SAC-Stufe	255
Tabelle 6-8	Berechnungsbeispiel für einen WBA-SBA-Verbund	256
Tabelle 6-9	Schritte zur Auslegung der WBA-SBA-Stufe	257
Tabelle 6-10	Zusammenfassung der Überfahungssituationen	259
Tabelle 6-11	Durchflussdynamik der VWS-Auslegung aus Tabelle 6-6 und Tabelle 6-8	265
Tabelle 7-1	Beispielhafte Chemikalienpreise in unterschiedlichen Einheiten	303
Tabelle 7-2	Die zum Rechnen benutzten Zulaufanalysen	307
Tabelle 7-3	Lauge-Kostenvergleich zwischen 1-stufigem AN und AN-Verbund	309
Tabelle 7-4	Gesamtkostenvergleich je nach Entcarbonisierungsmethode	312

Tabelle 7-5	Vergleich der Gesamtkosten einer Füllung mit Typ I und Typ II-ANs	314
Tabelle 7-6	Rechengrundlage des Vergleichs zwischen IA- und UO-Verfahren ohne Wasserkosten	321
Tabelle 7-7	Vorgaben für die Kostenbetrachtung bei Alterung	325
Tabelle 7-8	Kostensteigerung einer AN-Stufe durch Harzalterung (Zahlenwerte)	326
Tabelle 8-1	Statische chemische Messdaten für einen gel-SAC	393
Tabelle 8-2	Statische chemische Messdaten für einen 5 Jahre alten gel-SBA auf Acrylatbasis	394
Tabelle 8-3	Statische chemische Messdaten für einen 7 Jahre alten gel-SBA auf Styrolbasis	394
Tabelle 9-1	Checkliste zur Fehlerlokalisierung	405
Tabelle 9-2	Reinigungsmöglichkeiten für Ionenaustauscher je nach Verschmutzung	413
Tabelle 9-3	Ablauf einer gepulsten Reinigung	417

10.3 Formelverzeichnis

Formel 2-1	$pH = -\log([H])$	18
Formel 2-2	$[H] = 10^{(-pH)}$	18
Formel 2-3	$pH = 14 + \log([OH])$	21
Formel 2-4	Teilchenkonzentration mmol/l = Massenkonzentration [mg/l] Molmasse [mg/mmol]	40
Formel 2-5	Ladungskonzentration = Teilchenkonzentration · Valenz oder in Einheiten: meq/l = mmol/l · [meq/mmol]	40
Formel 3-1	$VS = K \cdot \rho K - \rho W \rho W \cdot D$	73
Formel 3-2	$QCaQNa = FCaNa \cdot CCaCNa$	74
Formel 4-1	$Q = QSättigung \cdot CC + C50\%$	139
Formel 4-2	$Q = Q1 \cdot CK$	139
Formel 5-1:	$pH = pKs + \log A-HA$ oder $\log A-HA = pH - pKs$	161
Formel 6-1	Bettstreckung = Bettstreckungsfaktor x Rückspülgeschwindigkeit und in Einheiten: % = %mhx [mh]	196
Formel 6-2	$NK(RA) = NKmax \cdot RA / (RA50 + RA)$	238
Formel 6-3	$NKIA = NK0 + IA \cdot KIA$	243
Formel 6-4	$NK_{unc} = 3,1 - 0,01 \cdot \text{Ionenangebot}$	247
Formel 6-5	$Qi = 0tmaxCi \cdot F \cdot dt$	284
Formel 8-1	$Q = C0 \cdot CK$	347
Formel 8-2	$pH = 14 + \log(LF/225.000)$	360
Formel 8-3	$pH = \text{Log}(10 - 7 + (LF - 0,055)/225.000)$	361
Formel 8-4	$pH = -\log(LF/372.000)$	363
Formel 8-5	$H += LF372.000 = [HCO3-]$	370
Formel 8-6	$(CO2 + HCO3-) = (10(pKs - pH) + 1) \cdot HCO3-$	371

10.4 Index

- 4-Quadranten-Modell* 40, 105, 106, 258, 283, 306, 354
 Abschaltkriterium 189
 Abschalt-Leitfähigkeit der Wäsche 317
 absolute Auslegung 258
 Abstrom 184
 Abwasseranlagen 192
 Abwasserkosten 322
 Acrylat-basierte Anionenaustauscher 274
 Adsorberpolymere 136
 Adsorption 137, 150
 Adsorptionsisothermen einzelner Stoffgruppen 151
 adsorptive Bindungsmechanismen 143
 AfA 299
 Aktivkohle 136
 Alkalimetalle 37
 Alkalisierungssystem 129
 Alterung 63, 79, 85, 179, 315, 325
 Alterungsmechanismus der Typ II-Gruppe 60
 Amine 129
 Ammonium/Ammoniak 129
 Anfahrbetrieb 227
 Anfahrsgeschwindigkeit 201, 264
 Anforderungen an Gegenstromverfahren 266
 Anion 24
 Anionen der starken Säuren 37
 Anionenaustauscher 51
 Anionensumme 40
 Anlagenauslegung 230
 Anlagenpreis
 Entwicklung 297
 Skalierung 296
 spezifisch 297
 Ansäuerung 148
 Anteil der HCO_3^- am Gesamtsalzgehalt 42
 Arbeitspunkt 234
 Arbeitspunkt von Kationenaustauschern 49
 Arbeitssäule 189
 Argumentation zwischen Schwebebett und Up.Co.Re-Verfahren 266
 Assoziation der funktionellen Gruppe 47
 assoziierte Form 29
 Asymmetrie 188, 251
 Asymmetrierung 220, 329
 Aufkonzentrierung 19
 Aufstrom 184, 199
 Aufstrom-Regeneration 205
 Ausbalancierung 42
 Ausfällung 30
 Ausgasung von Kohlensäure 211
 Auslegung des AN 251
 Auslegung des KAT 251
 Auslegungsrechnung 107
 Basekapazität 337
 Behältergeometrie 230
 Beladebereich 49
 Beladekapazität
 Ermittlung von 282
 Beladung
 Ermittlung 286
 Beladung mit Kieselsäure 256
 Berechnung 249
 Berechnung als Verbundschaltung 260
 Berechnung der NKs 247
 Betriebskostenarten 298
 Bettstreckungsfaktor 196
 Bettstreckungsgleichgewicht 194
 Bettvolumen 232
 Bicarbonat 37
 Bindungsmechanismen 136
 Biofilm 421
 Biofilter 148
 Biopolymere 145
 biostatische Wirkung 420
Bio-Verschmutzung 222

- biozide Wirkung 420
 Blasenbildung 212
 Blockdarstellung der Wasseranalyse 36, 39
 Blockdiagramm 40
 Booster-Pumpen 203, 214
 Brønsted-Säuremodell 35
 Brown'sche Molekularbewegung 144
 Bruchkraft 399
 Bruchstabilität 398
 Brutto-Durchfluss 231
 Bruttodurchsatz 231
 BV 232
 Ca²⁺-Form 47
 CaCO₃ 30
 Carbonat 29
 Carbonathärte 38, 39
 Carbonat-Restwerte 30
 Carbonsäure 47
 Channeling 210, 402
 Chatillon-Verfahren 399
 Chemikalienkosten 252, 299, 304, 331
 Chemikalienüberhang 261
 Chemisorption 177
 Chlormethylierungs-Verfahren 56
 Cl-Form 68
 CO₂ 29, 37, 96, 102, 221, 337, 338
 CO₂-Entfernung 102
 CO₂-Partialdruck 221
 CO₂-Pufferkurve 337
 CO₂-Restwerte 225
 CO₃²⁻ 28
 Crosskontamination 367, 407, 409
 CSB 142
 CSB-Desorption 414
 Dalton 138
 Dampfflüchtigkeit 129
 Dampfverbrauch 227
 Daumenregel für den TDS 349
 DBA 56, 245
 Deckschichtbildung 159
 Delta-Leitfähigkeits-Messverfahren für TOC 376
 Dequaternierung 60, 80, 179, 394
 Desinfektionsaktion 422
 Dicke der Hydrathülle 24
 Differenzdruckmanometer 402
 digitaler Zwilling 285
 Dipolmoment 24
 Dissoziation 23, 26
 Dissoziationsdiagramm 28, 55, 161, 301
 Dissoziationsgleichgewicht 26, 27
 Dissoziationsgrad 28
 Dissoziationskurve 162
 Dissoziationszustände 32
 dissoziierte Form 29
 Divinylbenzol 79
 Di-Vinylbenzol 62
 DOC 142, 378
 Doppelabsperrungen mit Zwischenentlastung 292
 Doppelbasische Anionenaustauscher 56
 Doppelregeneration 236
 Doppelstock 258
 Doppelstockaufbau 110
 Doppelstocksäule 208
 Drainage 117
 Drainageebene 205, 207
 Druckhaltung 213
 Druckverlust 269
 Druckverlustprofil 158
 dual base 57
 Durchbruch
 der Straße 358
 Durchbruchserkennung der SiO₂ 345
 Durchbruchsindikator 100
 Durchbruchsprofile 284
 Durchfluss 231
 Durchflussdynamik 264
 Durchflussregelung 279
 Durchlaufentcarbonisierungen 30
 Durchsatz 231, 401
 Düsen gebrochen 410
 DVB 62, 79
 Dynamikanforderungen 203
 EDI 320

- Effektivität der Entcarbonisierung 30
Eigendissoziation von Wasser 361
Eigenleitfähigkeit 361
Eigenwasserbedarf 215, 231, 316, 323
Einheiten für die Härte 43
Elastizität 399
elektrische Feldstärke 25
Elektrodeionisation 320
Elektronegativität 24
Entbasung 95
Entcarbonisierung 99, 100, 164, 319
Entfernung organischer Stoffe 136
Entgaser 30, 102, 221, 341
Entgaserschlupf 368
Enthärtung 319, 419, 420
Entkieselung 104
Entmischung 277
Entnetzung 70, 79, 393
Entsalzung 108
Entsäuerung 103
Erdalkalimetalle 37
Erhöhung der Regeneriereffektivität 49
externe Crosskontamination 410
externe Rückspülung 410
fB/OH-Form 68
Fehlerursache 402
Feinreinigungsstufen 320
Feinreinigungszone 71, 192, 199, 267
Feinwäsche 214
Festbett 184
Festionen 44
Feststofffiltration 193
Filterkohle 157
Flockung 146
Flockungsmittel 146
Flussdynamik 269
Flusssäure 35
FMA 37, 250
FMA -Durchbruch 343
FMA-Summe 96, 104, 340, 356, 400
Folge-KAT 113
Formiatschlupf der VE-Straße 378
Fouling 59, 66, 145, 274, 325, 404
Free Mineral Acids 37
Freibord 192, 200, 266
freie-Base-Form 52, 67, 68
Freundlich-Isotherme 139, 151, 174, 347
Funktionalisierungsdichte 45, 71
funktionelle Gruppe 45
Gasblasen 212
Gegenstrom-Gegendruck-Verfahren 206
Gegenstromregeneration 199, 209, 308
Gegenstromverfahren 184
gelförmig 63, 274
gepulste Reinigung 417
Gesamthärte 37, 39
Gesamtkosten 323
Gesamtkostenoptimierung 300
Gesamtsalzgehalt 38, 41
gewichtszugeordnete Totkapazität 71
GH 37
Gleichgewichtsbeladung von
Kieselsäure 125
Gleichstromsäule 192
Gleichstromverfahren 184, 192
Größenausschluss 138
Grothus-Mechanismus 26
Guru-Korrelation 356, 406, 409
Guru-Kurve 372
H⁺-Form 47
H⁺HCO₃⁻-Kurve 375
H⁺-Konzentration 17, 21
H₂CO₃ 28
H₂O₂ 421
H₂SiO₃ 169
H₃SiO₄⁻ 169
H₄SiO₄ 35, 169
Hägg Diagramm 28
Haltegeschwindigkeit 262, 264, 266
Härtebildner 37
Härteeinheiten 42
Harzalterung 79, 127, 285, 325
Harzanalyse 391
Harzsplitter 402

- Harzvolumina 230, 258
 Harzwechselintervalle 81, 92
 HCl/Cl-Form 68
 HCl-Form 54
 HCl-Molekül 26
 HCO_3^- 28, 37, 96, 97, 337
 HCO_3^- -Durchbruch 343
 HCO_3^- -Gehalt 400
 Henderson-Hasselbalch-Gleichung 100, 161, 339, 371
 Henry-Konstanten für CO_2 221
 HNO_3 34
 Hofmann-Abbau 80
 Huminsäuren 65, 145
 Hungerregeneration 235, 332, 408
 Hydrathülle 24, 67, 145
 Hydrazinium / Hydrazin 129
 Hydrogencarbonat 29, 37, 96, 98
 Hydrogencarbonat-
 Restkonzentrationen 30
 IH-Kosten 299
 Indikatoren 31, 336
 Inertmaterialschiicht 277
 innere Oberfläche 137
 innere Rissbildung 91
 Instandhaltungskosten 299
 interne Crosskontamination 411
 interne Rezirkulation 356
 Investitionskosten 296, 321
 Ionenaustauscherklassen 44
 Ionenkonzentration 17, 336
 ionische Bindungsmöglichkeiten 143
 Isotherme
 SiO_2 125
 SiO_2 im MB-AN 346
 Typen 139
 K-A-K-Schaltung 113
 Kalibration einer pH-Messung 372
 Kalibriergenauigkeit 372
 Kalibrierintervalle 348
 Kalkentcarbonisierung 30, 109, 146, 164
 Kalk-Entcarbonisierung
 Kosten 166
 Kalkmilchkosten 166
 Kammervolumen 58
 Kanalbildung 210, 402
 Kapazität 70
 Messung 393
 Kapazitätsalterung 325, 327, 404
 Ermittlung 282
 Kapazitätsverhältnis der KAT- zur AN-
 Seite 219
 Kation 24
 Kationenaustauscher 45
 Kationensumme 40
 KAT-Splitter 411
 KB 8,2 337, 338
 KCl-gestützte pH-Glaszellen 372
 KEC 166
 Keime 419
 Kesselspeisewasser 226
 Kieselsäure 35, 55, 104, 169, 344
 Kieselsäuredurchbruch 126, 286, 344
 Kieselsäurefällung 181, 209
 Kieselsäurekapazität 174
 Kieselsäurepartikel 181
 Kieselsäurerückhaltung 61
 Kieselsäureschlupf 220
 Kieselsteinablagerungen 211
 Kinetikabschlag 71
 kinetisches Problem 404
 Klassierung 120, 193, 268
 Kochsalz 23
 Kohlensäure 28
 pKs-Wert 339
 Kohlensäureanhydrid 29
 kolloidale Kieselsäure 169, 181
 Kompaktion 199, 264, 266
 Kompaktionsgeschwindigkeit 266
 Kondensationsreaktion 170
 Kondensatreinigung 128
 Kondensatreinigungs-MB 277
 Konditioniermittel 128
 Konstanz der gewichtsbezogenen
 Kapazität 327
 Konstanz der gewichtsbezogenen TK_w
 86
 Kontaktoberfläche 223

- Konzentration aus pH 19
Konzentrationsraum 17
Korrelationsdiagramm 365, 379
Korrelationskurve
HCO₃- 379
Korrosionsrate 128
Kostenarten 298
Kostenbetrachtung 296
KRA 128
Kreislaufwäsche 216, 281, 315, 409
Kreuzregeneration 292
KS 4,3 337, 338
Ladungskonzentration 41
Lambda₀ 361
Langmuir-Isotherme 139, 174, 238
Laufzeiteinbuße 402
LC-OCD 142
Lead-Lag-Anordnung 189
Lebensdauer 60, 92
Lebensdauer von Acryltypen 275
Lebenslinien 70
Lebenslinien von ANs 85
Leerrohrgeschwindigkeit 195
Leitfähigkeit
Abschaltung der Vorwäsche 215
Absenkung durch Organik 377
Anfahr buckel 59, 410
Buckel 280
Differenz 343, 351
Dip 359
Durchbruch 342
Eigen- 361
ionale 350
Messung 281
Messung am Regenerierausgang 316
nach WBA 342
Quotient 188, 190, 343, 350
spezifische 25, 111
von Protonen 26
Lieferform 68
lineare Geschwindigkeit 195, 232, 264,
266
Löslichkeit 25
Löslichkeit der Kieselsäure 210
Lösung von Chlorwasserstoffgas 27
Lösungsvorgang 23
Luftwirbelung 192, 193
Makropore 66, 411
makroporös 65, 274
makroreticular 65
Massenkonzentration 40
Massenprozent 19
Matrixstrukturen 62
Maximalfluss 262
Maximalleistung 263
MB-Beladedauer 347
MB-Regeneration 120
Membrantengaser 103, 221, 223, 280,
294, 369
mesoporöse Adsorber 138
Messkationenaustauscher 374
Messunsicherheit der Titration 339
meta-Kieselsäure 169
Methylorange 31, 337
Mikroporen 66
mikroporöse Adsorber 138
Mindestanfahrsgeschwindigkeit 262
Mindestdurchfluss 262
Mindestleistung 265
Mineralisierung 421
Mineralsäureanionen 19
Mineralsäuren 104
Mineralsäuresumme 96, 340
Mischbett 115, 320
Mischung 120
mittelbasisch 57
Mi-Vision 282, 344, 348, 369, 401
TOC-Messtechnik 377
TrueTOC-Messung 381, 385
mixed base 57
Molalität 40
Molarität 40
Molekülgröße 138
Molekülklassen 143
Molmasse 40
Monomer-Polymer-Gleichgewicht 177
Multistep-Verfahren 114, 320
Multi-Straßenschaltung 186
m-Wert 337
Na⁺-Form 47

- Na₃PO₄ 128
Nachdissoziationsreaktion 30
Na-Konzentrationsmessung 188
NaOH-Konzentration 22
Na-Schlupf 357
Na-Schlupf des KAT 342
Nenndurchfluss 255, 257
Nennleistung 262
Netto-Durchfluss 231
Netto-Durchsatz 232
neue Sprache der VE-Anlagen 365
Neutralität 260
Neutralstoffe 145
nicht-Carbonathärte 38
NK 61, 233, 238, 241, 242, 284, 332
 Absenkung 334
 in Abhängigkeit von RÜ 239
 Vergleich 58
normierte Auslegung 252
Normierte Auslegung 255, 257
Normierung 36
Normierung der Wasseranalyse 40
Nutzbare Kapazität 71, 233, 284, 395
Oberfläche 66
Oberflächenwässern 66
OH⁻-Form 68
OH⁻-Konzentration 21
OH-Radikal 421
online-Messverfahren 342
online-Titrator 100
Organikentfernung vor der VE-Straße 146
Organik-Toleranz 66
organisches Fouling 413
Oxidationsmittel 85
oxidative Desinfektionsmittel 421
oxidativer Angriff 421
p- und m-Werte 31
Packed-Bed-Verfahren 266
permanente Härte 38, 100
Pharmawasserproduktion 222
Phenolkondensationsharze 62
Phenolphthalein 31, 337
pH-LF-Profil 343
Phosphatkonditionierung 131
Phosphorsäure 35, 129
Phtalimid-Verfahren 56
pH-Wert 17, 100
 Messung nach SBA 343
 nach starksaurem KAT 19
 Neutralität 261
 Pufferung 128
 während der Regeneration 19, 46
pKa 32
pKs-Überschreitung bei der Beladung 50
pKs-Unterschreitung bei der Regeneration 50
pKs-Wert 32, 33, 46, 161
pKs-Wert der Carbonsäuren 154
pKs-Wert der funktionellen Gruppe 46
POC 141
Polisher-Säule 189
Polykondensate 170
polymere Kieselsäure 176
Polysaccharide 145
Porengröße 64, 66, 137
Probennahme 391
Probennahmestellen 281, 288, 402
progressive Regeneration 182
Protonierungsreaktion 53
Prozentangaben 19
Pufferlösung 161
p-Wert 337
Qualität des entsalzten Wassers 108
Quaternierungsgrad 56, 57, 68, 81, 245
Quellung 57, 69
Quellungsdruck 67
Quellwassergehalt 80, 85
RA 50, 238, 330, 332
RA-Absenkung 332
Regelung der Anlage 282
Regeneratablauf 260
Regeneration
 doppelte 236
 von Kationenaustauschern 19
Regenerierbarkeit 54

- Regenerierbereich 49
 Regeneriereffektivität 50, 54, 60
 Regeneriergrad 52, 71, 233
 Regenerierkriterium 48
 Regenerierlauge 22
 Regeneriermechanismus 46, 48, 54
 Regeneriermittelabsenkung 409
 Regeneriermittelangebot 50, 60, 232, 330, 332
 Regeneriermitteleinsatz 49, 232
 Regeneriermittelkonzentrationen 22
 Regeneriermittelmenge 48, 192, 230, 330, 409
 Ermittlung 282
 Nachrechnung 400
 Regeneriermittelüberschuss 49, 50, 51, 232, 234, 308, 330
 Regeneriermittelverlust 233, 309, 332
 Regeneriersäure für
 Kationenaustauscher 34
 Reihen-Wechsel-Schaltung 189, 343
 geschachtelt 191
 Reinigungslösung 414
 Reinigungsmittel 413
 Reinstwassererzeugung 222
 Resistenzbildung 420
 Restenthärtung 320
 Restentsalzung 111
 Restkonzentration jeder Einzelstufe 284
 Restleitfähigkeiten 111
 Rezirkulation 203, 269
 Mischung 264, 269, 280
 Schaltung 264
 RI-Bild 290
 Rieseler 102, 221, 369
 Rieselerschlupf 250, 341
 Rieselersumpfstandregelung 279
 Rinsebett 206
 RO 318
 Rohwasseranalyse 40, 230
 Rohwasserkosten 322
 Rohwasservorwärmung 175
 RÜ 50, 232, 234, 239, 241, 252, 330
 in Abhängigkeit von RA 239
 Rückspülbehälter 410
 Rückspülung 185, 192, 194
 Geschwindigkeit 196, 197
 RV 332
 SAC 42, 96, 106, 241
 Salpetersäure 34
 Salzsäure 35
 Salzpaltung 54
 Sandfilter 157
 Säulendarstellung der Wasseranalyse 36
 Säureadsorber 53
 Säuredurchbruch 368
 Säurekapazität 337
 Säuren 28
 Säureschlupf 357
 Säurestärke 28, 31
 Säureverlust 260
 SBA 42, 104, 106, 241
 Scaling 319, 320
 Scavenger 138, 152
 Schaltungen 108
 scheinbare Dichte 73
 Schichtbett 207
 Schichtfilter 157
 Schichthöhe 258
 Schmutzaustrag 193
 Schüttdichte 72
 Schwachbasische Anionenaustauscher 52
 schwachsauer 28
 Schwachsaurer Kationenaustauscher 47
 Schwanenhals 193
 Schwebebett 184
 Schwebebettverfahren 202, 266
 Schwefelsäure 35, 301
 Selbstadsorption 146
 Selbstlern-Modus 285
 Selektion 420
 Selektivität 45, 46, 74
 Selektivitätskonstante 74
 Silikat 169
 Silikat-Anion 35
 Silikomometer 286, 344, 359

- Simulationsverfahren 283
Sinkgeschwindigkeit 73, 195
SiO₂ 169
 photometrisch 344
SiO₂-Durchbruchserkennung 127
SiO₂-Gehalt 169, 256
SiO₂-Schlupf 126, 174
Sonderbehandlung 413
Sonderregeneration 275
Sperrwasser 120
spezifische Belastung 232
spezifischer Durchsatz 232
Spitzenlasterzeugung 264
Split-Flow-Verfahren 207
Spülwasser-Kreislaufanlagen 419
Stabilität 62
Starkbasische Anionenaustauscher des
 Typs II 59
starksauer 28
Starksaure Kationenaustauscher 45
Stoffgehalt 142
Stoffgruppen 143
Stokes-Radius 25
Straßenschaltung 186
Strippgas 224
Stromkosten 321
Strömungsrichtung 184
strong acid cationic resin 42
strong base anionic resin 42
Styrol-basierte Typen 275
Sulfonsäureanion 45
Sulfonsäuregruppe 46
Summe organischer Stoffe 141
SW-Feinkalibration 374
Symmetrie 251
Synchronisierung der Simulation 284
TC 141
TDS 41, 250
Teilchenkonzentration 40
Teilnachfüllung 328
Temperatureinfluss 246
Temperaturkoeffizient der
 Kieselsäureaufnahme 175
temporäre Härte 38, 99
tertiäres Amin 52
thermische Entgasung 226
TIC 141, 385
Titration 336
 CO₂-Rieselerschlupf 339
 Kohlensäure 31
 Messunsicherheit 339
TK 233
TK-Messung 393
TK_v 87, 89, 393, 394
TK_w 87, 88, 393, 394
TOC 141, 378
 Delta-Leitfähigkeits-Methode 142
 Messmethode über die Leitfähigkeit 384
TOC⁻ 368
TOC⁻ 376
TOC-Belastung 274
Top-Up-Strategie 92, 398
Total Inorganic Carbon 385
Totalkapazität 58, 70, 233
Trenn- und Regeneriersäule 116
Trennfaktor 74
Trennschichtlage 117, 277
Trennung 119, 277
Trio-Bed 118, 277
Trockenmasse 71
Trocken-TK 71
TrueTOC 376
TrueTOC-Messung 382, 385
Typ I-Anionenaustauscher 313
Typ II-Anionenaustauscher 59, 82, 276,
 313
Überfahung 243, 258
 des WBA 342
Überfahung des WBA 369, 401
Umkehrosiose 318, 321
UO 318
Up.Co.Re-Verfahren 203, 266
UV-Oxidationslampe 375
Vakuumentgaser 221
Valenz 40
van der Waals-Kräfte 144
VE-Puffertank 263

- verbotener Bereich 361, 364
Verbrauchskosten 321
Verbund-Gegenstromregeneration 109, 208, 308
Verbundregeneration 208
Verbundschaltung 55, 252, 258
Verdrängung 214, 314
Verfahrensführung 282
Verkeimungspotential 419
Verklumpung 123
Vernetzung 79
Vernetzungsgrad 62
Vernetzungsverlust 90
Verwirbelung 267
Vollentsalzung 95
Vollentsalzanlage 108
Volumen in Lieferform 58
volumenbezogene Totkapazität 71
Volumenkapazität 70
Volumenprozent 19
Volumenstrom 231
Volumenveränderung 25, 57, 66, 67, 68
Vorkommensweisen der Kieselsäure 169
Vorsorgeuntersuchungen 81
Vorwäsche 214, 314
WAC 42, 47, 97, 106, 243
WAC-SAC-Verbund 254
Wahre Dichte 72
warme alkalische Kochsalzlösung 414
Wäsche 214
Waschwasserbedarf 315
Waschwasserrückführung 217
Waschwasserverbrauch 215, 325
Wasseranalyse 36, 248, 250, 400
Ermittlung in Echtzeit 283
Wassergehalt 86, 393
Wassergeschwindigkeit 194
Wassermangelsituation 26
Wasserstoffperoxid 421
WBA 42, 52, 104, 106
weak acid cationic resin 42
weak base anionic resin 42
Wegdriften der pH-Messung 372
Wertigkeit 40
Wirbelbett 184
Wirbelbettanteil 267
Zeitdarstellung 367
Zentralströmung 402
Zulaufkonzentration des Mischbett-ANs 125
zweibasisch 31
Zwei-Punkt-Nachkalibration 375
Zweischichtfilter 157
Zweistraßige Maximallast 263
Zweistraßige Nennleistung 262
Zwischenausschleusung 418
Zwischenkornvolumen 195