

Dieter Mauer

Die VE-Anlage

Vollentsalzung mit Ionenaustauschern

Eine umfassende Darstellung einschließlich einiger
angrenzender Verfahrenstechniken



Die VE-Anlage

Vollentsalzung mit Ionenaustauschern

Eine umfassende Darstellung einschließlich einiger
angrenzender Verfahrenstechniken

211 Abbildungen und Tabellen

Dieter Mauer

1. Auflage

2013 © MionTec-Consulting Dieter Mauer, Leverkusen

Umschlagfotos mit freundlicher Genehmigung der Schaller WTI GmbH

Printed in Germany ISBN 978-3-00-041572-2

1	Einleitung	11
1.1	Zielgruppen des Buches	11
1.2	Hinweise zum Lesen.....	11
1.3	Der rote Faden.....	12
2	Einige wichtige Grundlagen aus der Wasserchemie	13
2.1	Mit pH-Werten kann man rechnen!	13
2.2	Dissoziation und Assoziation in Lösungen, Hydratisierung.....	19
2.3	Verhalten von Kohlensäure, von Säuren allgemein.....	23
2.4	Normierung und Gliederung der Wasseranalyse	31
2.4.1	Blockdarstellung der Wasseranalyse mit Härte > HCO_3	31
2.4.2	Blockdarstellung der Wasseranalyse mit Härte < HCO_3	34
2.4.3	Der Übergang von der gemessenen Analyse zum Blockdiagramm durch Normierung	35
3	Funktion der gängigen Ionenaustauscherklassen	39
3.1	Kationenaustauscher	39
3.1.1	Starksaure Kationenaustauscher (SAC)	39
3.1.2	Schwachsaure Kationenaustauscher (WAC).....	42
3.2	Anionenaustauscher	44
3.2.1	Starkbasische Anionenaustauscher (SBA, Typ I).....	44
3.2.2	Schwachbasische Anionenaustauscher (WBA)	45
3.2.3	Das „Königskinder“-Phänomen der schwachbasischen Typen.....	48
3.2.4	Gemischtbasische Anionenaustauscher (GBA).....	49
3.2.5	Starkbasische Anionenaustauscher des Typs II (SBA, Typ II).....	52
3.3	Harzdaten und -eigenschaften	55
3.3.1	Matrixstrukturen	55
3.3.2	Volumenveränderungen	59
3.3.3	Kapazitätsdefinitionen.....	63
3.3.4	Dichtedefinitionen	64
4	Entsalzungsverfahren mit Ionenaustauschern	67
4.1	Stufen der Vollentsalzung	67
4.1.1	Entbasung.....	67
4.1.2	Entcarbonisierung	68
4.1.2.1	Entcarbonisierung innerhalb der VE-Straße.....	68
4.1.2.2	Entcarbonisierung als eigenständige Anlage	70
4.1.3	Entgasung.....	73
4.1.4	Entsäuerung.....	74
4.1.5	Restentsäuerung, Entkieselung	75
4.1.6	Das 4-Quadranten-Modell.....	76
4.2	Verfahrenstechnische Gestaltung von VE-Anlagen	79
4.2.1	Kleine VE-Anlagen bis ca. $10 \text{ m}^3/\text{h}$	79

4.2.2	Große VE-Anlagen für chemisch unbehandeltes Rohwasser	80
4.2.3	Große VE-Anlagen für entcarbonisiertes Rohwasser	80
4.3	Verfahren zur Restentsalzung	82
4.3.1	Gründe für Restleitfähigkeit	82
4.3.2	K – A – K –Schaltung	84
4.3.3	Multistep-Verfahren	84
4.3.4	Mischbett	85
4.3.4.1	Funktionsweise	85
4.3.4.2	Regenerierweisen und Trennschichtlagen	88
4.4	Kondensatreinigung	95
4.4.1	Konditioniermittel des Kesselkreislaufes	95
4.4.2	KRA bei Phosphat-konditioniertem Speisewasser	98
4.4.3	KRA bei Amin-konditioniertem Speisewasser	99
4.5	Entfernung organischer Stoffe	100
4.5.1	Generelle Unterschiede zwischen Ionenaustausch und Adsorption	100
4.5.2	Eigenschaften von Adsorbentien und der Adsorption	101
4.5.3	Klassifizierung von organischen Molekülen	105
4.5.4	Vorbehandlungsmethoden und ihre TOC-Reduktion	109
4.5.4.1	Flockung	110
4.5.4.2	Biofilter	112
4.5.4.3	Adsorption	114
4.5.5	Aufnahme von Organik auf Ionenaustauschern in der VE-Straße ..	117
4.6	Mechanische Vorreinigung durch Zweischichtfilter	121
5	Weiterführende chemische Grundlagen	125
5.1	Zusammenhang zwischen pKs-Wert, Eigen-pH-Wert und Puffer-pH-Wert	125
5.2	Vergleich der Entcarbonisierungsmethoden	127
5.3	Chemie der Kieselsäure und ihre Aufnahme in VE-Anlagen	130
5.3.1	Die speziellen Eigenarten von Kieselsäure	130
5.3.1.1	Vorkommensweisen	130
5.3.1.2	Dissoziation, pKs-Werte	133
5.3.1.3	Löslichkeit	133
5.3.2	Bindungsmechanismen auf Ionenaustauschern	134
5.3.2.1	Abhängigkeiten des Kieselsäureschlupfes	135
5.3.2.2	Das paradoxe Isothermen-Verhalten	135
5.3.2.3	Dreifache Aufnahme in der SBA-Säule und im Verbund	136
5.3.3	Folgen der Alterung von Anionenaustauschern auf die SiO ₂ -Aufnahme	140
5.3.4	Regeneration von Kieselsäure	141
6	Konzeption und Planung von Ionenaustauscheranlagen	144
6.1	Manche Begriffe sind etwas verwirrend	144
6.2	Anlagenschaltungen, Beladung	146

6.2.1	2 x 100 %-Straßenschaltung	146
6.2.2	Multi-Straßenschaltung.....	146
6.2.3	Reihen-Wechsel-Schaltung	149
6.3	Gleichstromregeneration, Rückspülung	151
6.3.1	Luftwirbelung vor der Rückspülung	152
6.3.2	Rückspülung und Bettstreckungsgleichgewicht	153
6.4	Gegenstromregeneration	158
6.4.1	Kompaktionsgeschwindigkeit	158
6.4.2	Schwebebett.....	161
6.4.3	Up.Co.Re.....	162
6.4.4	Gegenstrom-Gegendruck / Rinsebett	163
6.5	Verbundregeneration	166
6.5.1	Verfahrensprinzip	166
6.5.2	Risiken der Verbundregeneration.....	167
6.5.2.1	Fällung von Kieselsäure bei der Regeneration	168
6.5.2.2	Ausgasung von Kohlensäure bei der Regeneration	169
6.6	Wäsche	172
6.6.1	Verdrängung	173
6.6.2	Vorwäsche.....	173
6.6.3	Feinwäsche.....	174
6.6.3.1	Kreislaufwäsche	174
6.6.3.2	Waschwasserrückführung.....	175
6.7	Einzuplanende Asymmetrie von KAT- und AN-Seite	176
6.8	Unterschiede zwischen verschiedenen Entgasern	178
6.8.1	Vergleich der Entgasungsverfahren.....	178
6.8.2	Funktion eines Membranentgasers.....	180
6.8.3	Typische Messergebnisse der Membranentgasung	182
6.8.4	Anwendungsbeispiele.....	183
6.8.4.1	Einsparung von Dampf für die thermische Entgasung im Kraftwerk	183
6.8.4.2	Geschlossene Anlage ohne Verkeimungspotential.....	184
6.8.4.3	Kostensenkung und pH-Stabilisierung im Spülwasser der Metalloberflächentechnik.....	185
6.9	Berechnung verschiedener gängiger Vollentsalzungsverfahren	187
6.9.1	Regeneriermitteleinsatz, -überschuss, -angebot; Begriffsdefinitionen	187
6.9.2	Kurven der Nutzbaren Kapazität.....	195
6.9.2.1	NK von starksauren Typen.....	195
6.9.2.2	NK von starkbasischen Typen.....	198
6.9.2.3	NK von schwachsauren Typen.....	199
6.9.2.4	NK von schwach- und gemischtbasischen Typen.....	201
6.9.2.5	Konstanten zur weiteren Berechnung	204
6.9.3	Einfache Berechnung von einzelnen Anlagenstufen	204
6.9.4	SAC-SBA-Schaltung	207
6.9.4.1	Auslegung des KAT	208

6.9.4.2	Auslegung des AN	208
6.9.4.3	Symmetrie, Planung der Asymmetrie	208
6.9.4.4	Übertragung der normierten auf die absolute Auslegung	209
6.9.5	Verbundschaltung	209
6.9.5.1	WAC-SAC	210
6.9.5.2	WBA-SBA	213
6.9.5.3	Symmetrie, Planung der Asymmetrierung	214
6.9.5.4	Übertragung der normierten auf die absolute Auslegung	215
6.9.5.5	Sinn und Anwendung der Überföhrung	215
6.9.6	SAC-(WBA-SBA)-Schaltung	217
6.9.7	Neutralitöt des Regeneratablaufes	217
6.9.8	Erreichbare Durchflussdynamik im Schwebebett	218
6.10	Harzauswahl	223
6.10.1	WAC	223
6.10.2	SAC	223
6.10.3	WBA und GBA	223
6.10.4	SBA	224
6.10.5	MB	226
6.11	Mess- und Regeltechnik	228
6.11.1	Durchflussregelung	228
6.11.2	Rezirkulationsmischung	229
6.11.3	Leitföhmigkeitsmessungen	230
6.11.4	Probennahmestellen	230
6.12	Beispielhafte RI-Bilder	231
6.12.1	VE-StraÖe mit Rieseler	231
6.12.1.1	RI-Schema	231
6.12.1.2	Beladung	232
6.12.1.3	Beladung mit Rezirkulation	233
6.12.1.4	Regeneration	233
6.12.1.5	Kreislaufwöschel	234
6.12.2	VE-StraÖe mit Membrantengöser	235
6.12.2.1	RI-Schema für Rohwasser unter Vordruck	235
6.12.2.2	RI-Schema für druckloses Rohwasser	235
7	Kostenbetröchtungen	237
7.1	Bestandteile der Gesamtkosten	237
7.2	Chemikalienpreise	240
7.3	Kosteneinfluss der Wasseranalyse	244
7.4	Kosteneinfluss der Verfahrenstechnik	248
7.4.1	Vergleich von Gegenstrom- und Verbundgegenstromregeneration	248
7.4.2	Vergleich verschiedener Entcarbonisierungen	250
7.4.3	Vergleich einer Bestöckung mit Typ I oder Typ II-Anionenaustauschern	252
7.4.4	Auswirkungen zu hoher Waschgrenzen	253

7.5	Wann Ionenaustausch, wann Umkehrosrose?	257
7.5.1	Kombinationen aus Umkehrosrose und Ionenaustausch	257
7.5.2	Kostenvergleich zwischen Umkehrosrose und Ionenaustausch	259
7.6	Kostenrelevanz und Kompensation von Harzalterung	263
7.6.1	Kostensteigerung durch Harzalterung	263
7.6.2	Unterschiedliche Alterungseffekte verschiedener Harzklassen	265
7.6.3	Veränderung der Asymmetrierung	266
7.6.4	Strategie bei Harzalterung durch bewusste NK-Veränderung	267
7.6.4.1	Zielsetzung	267
7.6.4.2	Kapazitätsveränderbarkeit je nach Regenerierverfahren	269
8	Messmethoden, Wasseranalytik, Harzanalytik	272
8.1	Titration von Säure- und Basekapazitäten	272
8.1.1	HCO ₃ im Rohwasser	273
8.1.2	CO ₂ im Rohwasser	274
8.1.3	FMA-Summe im Rohwasser	275
8.1.4	CO ₂ nach Entgaser	275
8.2	Online-Messverfahren	277
8.2.1	LF nach SBA	277
8.2.2	pH nach WBA/GBA und SBA	277
8.2.3	LF nach SAC	278
8.2.4	Kieselsäure, Photometrie	279
8.2.5	Organik (DOC)	279
8.3	Spezielle Berechenbarkeiten in VE-Anlagen	280
8.3.1	Abschätzung des Salzgehaltes über die Rohwasserleitfähigkeit	280
8.3.2	Leitfähigkeitsquotient über dem Kationenaustauscher	281
8.3.3	pH-Wert im Rieseler	284
8.3.4	Die Verbindung von LF und pH nach SBA - Die „Guru-Korrelation“	285
8.4	Alterungsmechanismen von Ionenaustauschern	288
8.4.1	Bedeutung der Harzalterung für eine VE-Anlage	288
8.4.2	Entnetzung der Ionenaustauscher-Matrix	288
8.4.3	Anionenaustauscher	289
8.4.3.1	Hofmann-Abbau	289
8.4.3.2	SBA, Typ II	289
8.4.3.3	Deutliche Unterschiede bei verschiedenen SBA I, mp	291
8.4.3.4	Das „Lebenslinienkonzept“ von VE- und KRA-ANs	293
8.4.4	Kationenaustauscher	295
8.4.4.1	Konstanz der gewichtsbezogenen TK _w	295
8.4.5	Überblick über Alterungsfolgen	301
8.4.6	Probleme bei der Altersfestlegung durch z.B. Top-Up-Strategie oder Teillastbetrieb	301
8.5	Laboranalytik von Harzmustern	303
8.5.1	Motivation zur Harzanalyse	303
8.5.2	Probennahme	303

8.5.3	Messung chemischer Harzdaten	305
8.5.4	Messung dynamischer Harzdaten und des Foulingzustandes	307
8.5.5	Messung mechanischer Harzdaten.....	310
9	Anlagenanalyse, Fehlersuche und -behebung	312
9.1	Fehlersuche in einer VE-Anlage	312
9.1.1	Nachrechnung der Regeneriermittelmengen	312
9.1.2	Mechanische Verschmutzung, Kanalbildung, Tromben.....	313
9.1.3	Mess- und Probenorte an einer VE-Anlage	314
9.1.4	Checkliste zur Interpretation abweichender Messdaten	314
9.1.5	Titrationen, Überprüfung des Rieselers	318
9.1.6	Abweichungen von der „Guru-Korrelation“.....	319
9.1.7	Crosskontamination.....	321
9.2	Sonderbehandlungen.....	324
9.2.1	Sonderregeneration von Organik mit warmer alkalischer Kochsalzlösung.....	325
9.2.2	Kreuzregeneration	328
9.2.3	Desinfektion	330
9.2.3.1	Rohwasser-betriebene VE-Anlagen	330
9.2.3.2	Rohwasser-betriebene Enthärtungsanlagen	331
9.2.3.3	Spülwasser-Kreislaufanlagen in der Metalloberflächentechnik.....	331
9.2.3.4	Unterschiedliche Desinfektionsmittel.....	332
10	Anhang.....	334
10.1	Abbildungsverzeichnis.....	334
10.2	Index.....	339
10.3	Ergänzende Quellen	347
10.4	Dank	348

1 Einleitung

Willkommen in der Welt der Ionenaustauscher. Schön, dass Sie sich für dieses Thema interessieren. Es ist seit fast 20 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 vor und ich könnte mir vorstellen, dass auch die Themen aus der Metalloberflächentechnik und benachbarten Branchen mit spezielleren Aufgabenstellungen einen zweiten Band wert sind. Wir werden sehen...

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 Allgemeinwissen einsortiere.

Die Position der Quellenangaben ist jeweils das Ende des Kapitels erster Ordnung, 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.

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.

Die letzten beiden Kapitel 8 und 9 gehen 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 vier Richtungen entsprechend fortgesetzt denken.

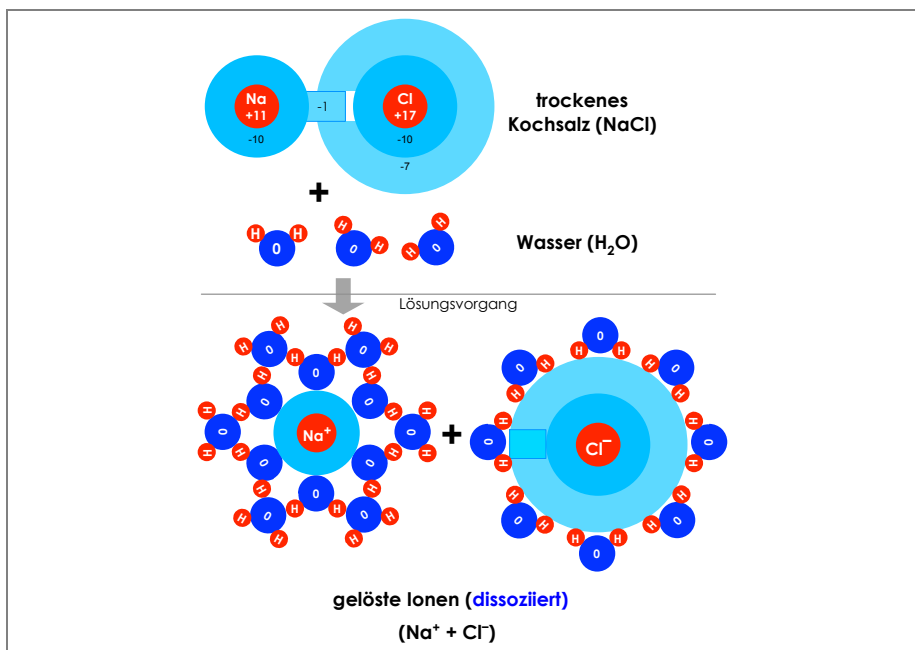


Abb. 2–4

Vorgänge bei der Lösung von Kochsalz in Wasser

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) sehr elektronegativ ist und damit 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 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. 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^+ .

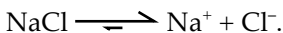
Diese Situation ist in Abb. 2–4 unten gezeigt. Allerdings ist dort noch eine weitere Eigenart bei der Entstehung von Ionen in Wasser gezeigt. Sie erkennen, dass sich einige Wassermoleküle um die Ionen gruppiert haben. Dies liegt daran, dass wiederum ein physikalisches Gesetz besagt, dass sich eine Punktladung (z.B. ein Ion) und ein Dipol (z.B. das Wassermolekül) stark anziehen, noch stärker, als die 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 quadratisch mit steigendem Abstand vom Zentrum der Punktladung. Ein

großes Ion (wie Cl^-) hat also eine niedrigere Anziehungskraft auf die Wasserdipole an seinem Rand als das kleinere Na^+ -Ion.

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).

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

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 einer Seite:



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

Wie modifizieren das Bild von oben nun, indem wir statt Kochsalz eine gut bekannte Säure in Wasser auflösen wollen, die Salzsäure, oder besser gesprochen 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 drängt sich zwischen die HCl -Verbindung und trennt sie auf; das HCl -Molekül wird durch das Wasser dissoziiert.

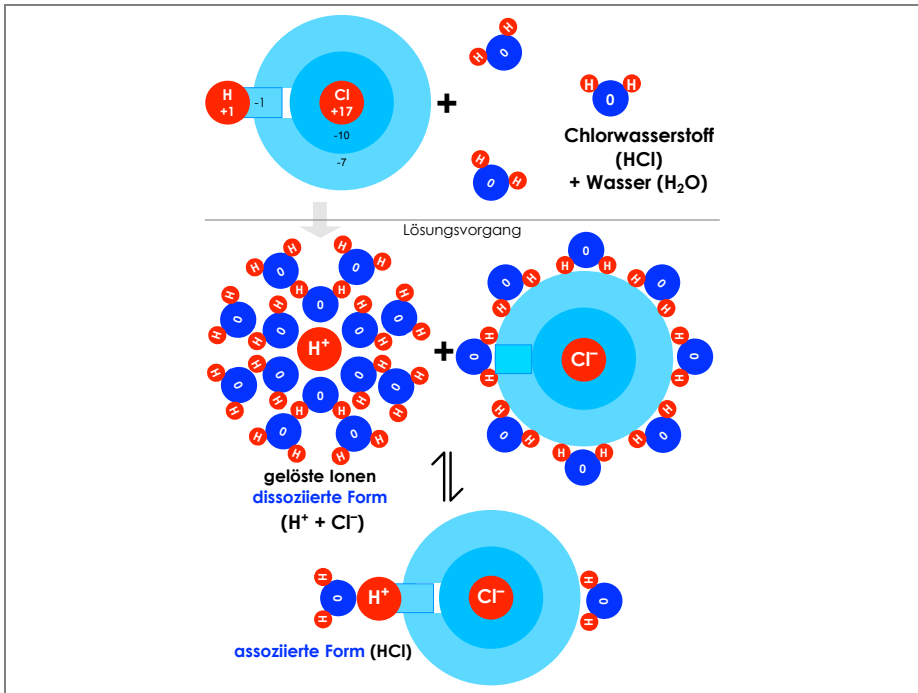


Abb. 2-5

Vorgänge bei der Lösung von Chlorwasserstoffgas in Wasser

Das ist doch alles genauso wie beim Salz, werden Sie nun einwenden. Stimmt soweit 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 *assoziierte* 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 **assoziierten Form** links noch die **einfach** und die **zweifach** dissoziierten Formen in der Mitte und rechts entstehen können.

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

Auf der X-Achse der Grafik sehen wir eine pH-Skalierung. Stellen Sie Sich bitte einmal vor, Sie hätten einen Drehknopf an Ihrer Wasserprobe, mit dem Sie den pH-Wert einer Probe nach Ihrem Wunsch und Willen 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 bunten 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 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 vier 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).

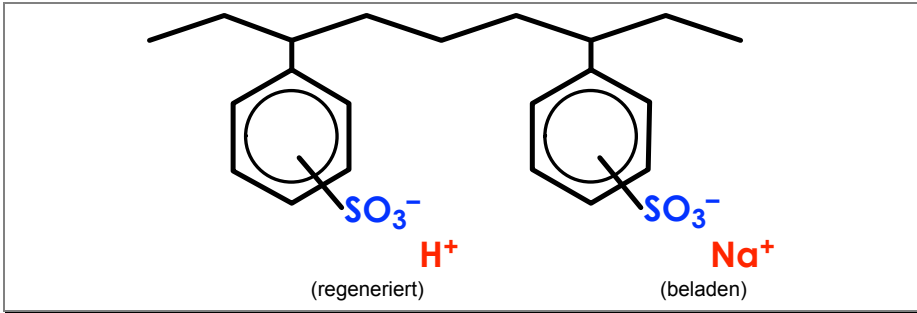


Abb. 3-1

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. Beide Formen sind meist 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 knapp unter 0 (siehe Kap. 2.1, S. 13) 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 freie 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 bedingt die Unterschreitung des pKs-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 pKs-Wert der Gruppe liegen sollte. Stellen Sie sich nun einmal einen hypothetischen „superstarken“ Kationenaustauscher mit einem pKs-Wert um 0 vor. Der hätte wahrscheinlich sehr gute Beladeeigenschaften (z.B. niedrigen Na-Schlupf), aber zur Regeneration wäre eine Säure mit pH ≈ -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 pKs-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...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.

4 Entsalzungsverfahren mit Ionenaustauschern

4.1 Stufen der Vollentsalzung

Im üblichen Fall besteht eine Ionenaustauscher-Entsalzung aus einer kationischen und einer anionischen Seite. Ob die beiden Seiten aus einer oder zwei Stufen bestehen, ist eine verfahrenstechnische und kaufmännische Entscheidung. Die verschiedenen Schaltungsvarianten, die je nach Rohwasseranalyse und Anlagengröße geplant werden können, sind weiter unten 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 kaufmännisch zu treffen sind.

Über Mischbetten werden wir allerdings 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 mehr oder weniger willkürlich für die Variante 1 mit Härte > HCO_3^- entschieden, da sie etwas häufiger vorkommt.

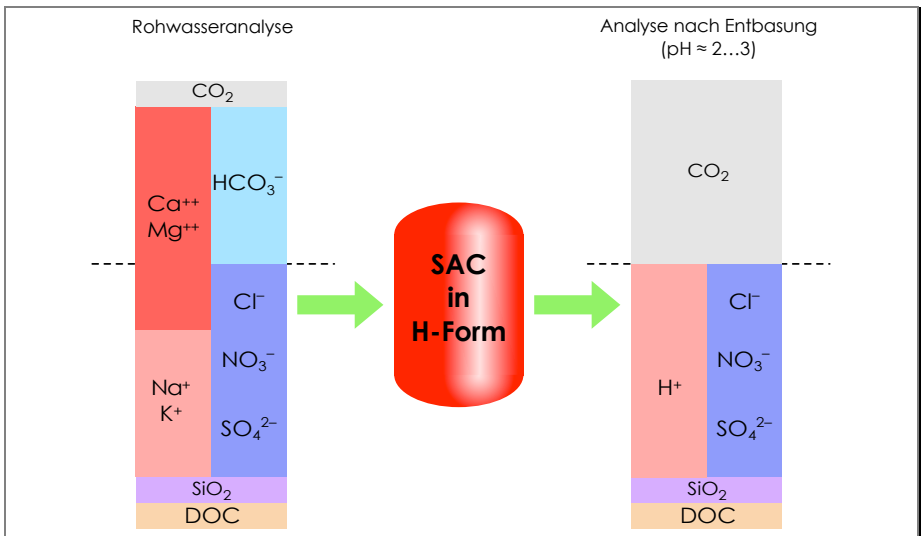


Abb. 4-1

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 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...3 (wenn keine Rezirkulation läuft). Das ist deutlich unterhalb des pKs-Wertes der Kohlensäure von 6,3 (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 vorher 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 die 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 die schwachsaure Stufe. Das Rohwasser ist wie im vorigen Abschnitt gewählt.

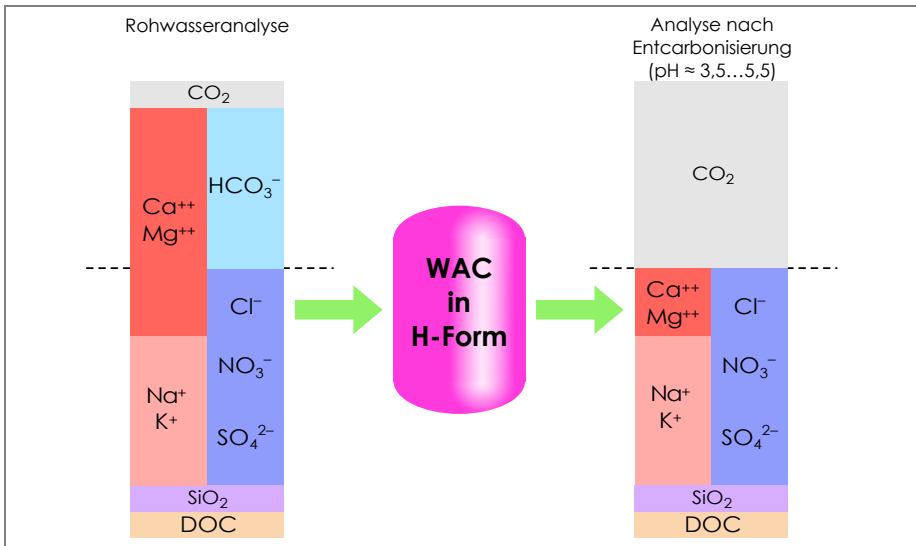


Abb. 4–2

Funktion der Entcarbonisierung durch einen WAC

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 Kesselspeisewasser-erzeugung, die Kieselsäure auf kleinstmögliche Werte zu reduzieren.

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, aber auch kann. Entfernungsraten von 99,9 % sind ein ganz beachtliches Ergebnis, was von kaum einem anderen Reinigungs- oder Behandlungsverfahren erreicht wird!

Da die Restwertanforderungen an die Kieselsäure aber nichts desto trotz 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. 5–4 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 nicht in Wasser 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 H_2O und ein verbindendes O. Auch diese Verbindungen besitzen vier Einfachbindungen aus Sicht des Siliziums und sind daher recht stabil.

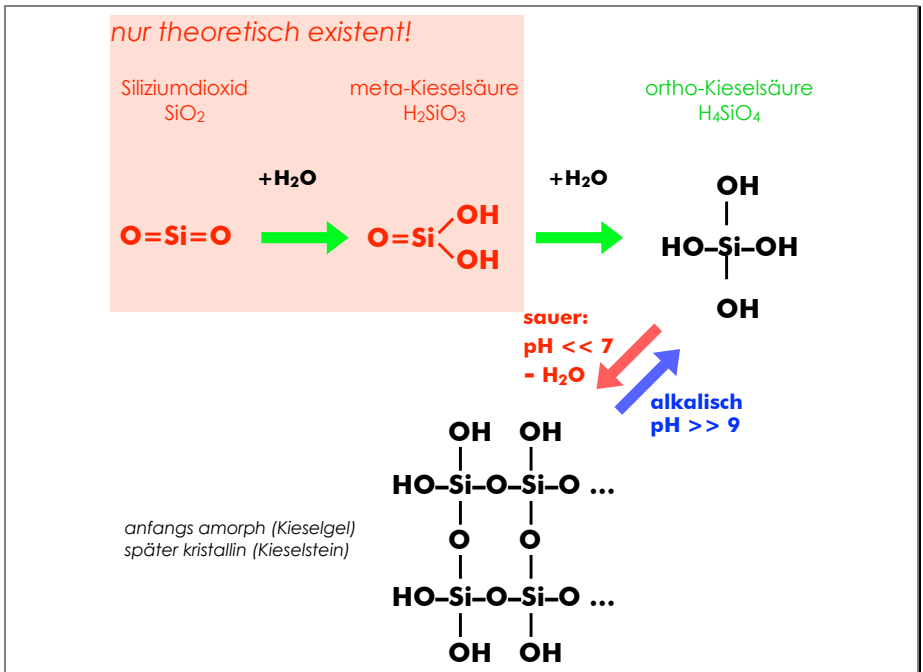


Abb. 5-4

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.

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 Regenerierrichtung, 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*).

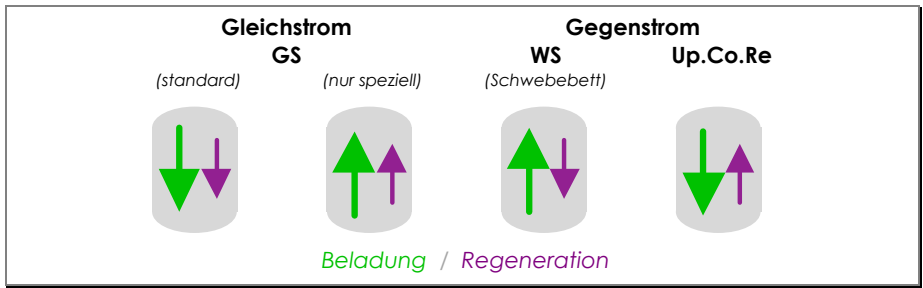


Abb. 6-1

Mögliche Strömungsrichtungen je nach Verfahren

Die vier möglichen Kombinationen sind in Abb. 6-1 gezeigt. Für VE-Anlagen gängig sind natürlich die Gegenstromverfahren 3 und 4. Das Gleichstromverfahren (1) ist bei Abwasseranlagen gängig. Es taucht auch in sehr alten VE-Anlagen noch auf. Die zweite Variante 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 wenn häufige Rückspülung notwendig ist, wenn Konditionierung und /oder Harzmischung notwendig ist

Wenn Verfahren = Gleichstrom:

Beladerichtung fast immer im Abstrom

Wenn Verfahren = Gegenstrom:

b) Beladerichtung:

- Aufstrom immer, wenn Durchflussdynamik $\approx 10 \dots 100 \%$ reicht \Rightarrow WS
- Abstrom nur, wenn $F = 0$ oft und lange möglich sein muss \Rightarrow Up.Co.Re

c) Regenerierrichtung:

- 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 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 Anlagen 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.

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. (Wird oft fälschlich für den Volumenstrom benutzt)	–
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	–
Regeneriermittelangebot	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	Regeneriermittelangebot (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 Wert unter Abzug dieses gemittelten Eigenwasserbedarfs der Anlage, der dem Verbrauch zur Verfügung steht. Üblicherweise hat eine gute Verbundgegenstromanlage einen Eigenwasserverbrauch von 3...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 $BV = l_{\text{Flüssigkeit}} / L_{\text{Harz}}$. 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 $l_{\text{Flüssigkeit}}/h / L_{\text{Harz}}$.
- 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 $g_{100\%ig} / L_{\text{Harz}}$ 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 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** ($R\ddot{U}$) wird es jetzt spannend, da hier eine ganz wesentliche Größe erscheint. Bei jeder Regeneration wird mehr H^+ oder OH^- in die Stufe hineinregeneriert, als bei der nächsten Beladung als NK genutzt wird. Dieses Verhältnis $R\ddot{U} = RA/NK$ 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 soviel vorweg nehmen, dass letztlich alle Auslegungsrechnungen von der Größe $R\ddot{U}$ 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 **Regenerier-**

mittelverlust (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. 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...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...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, welche in diesem Buch konsistent genutzt werden und welche 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. 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 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 angeglichene 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.

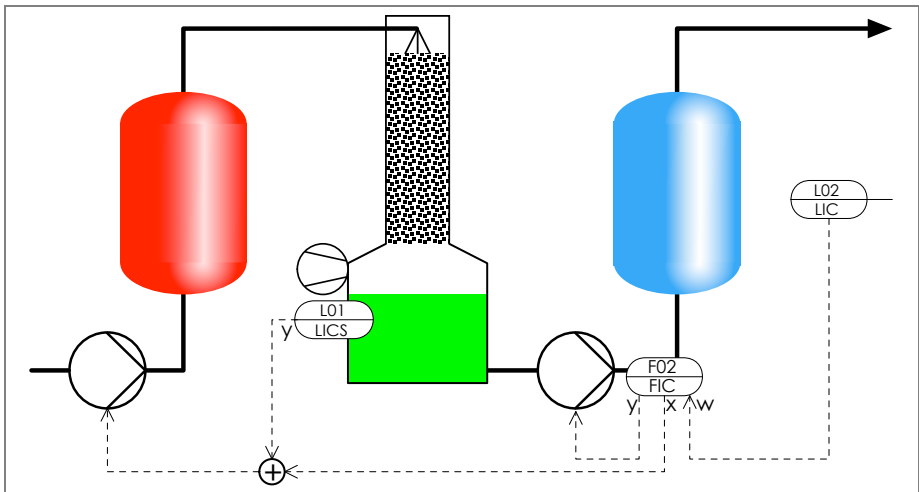


Abb. 6-51

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.

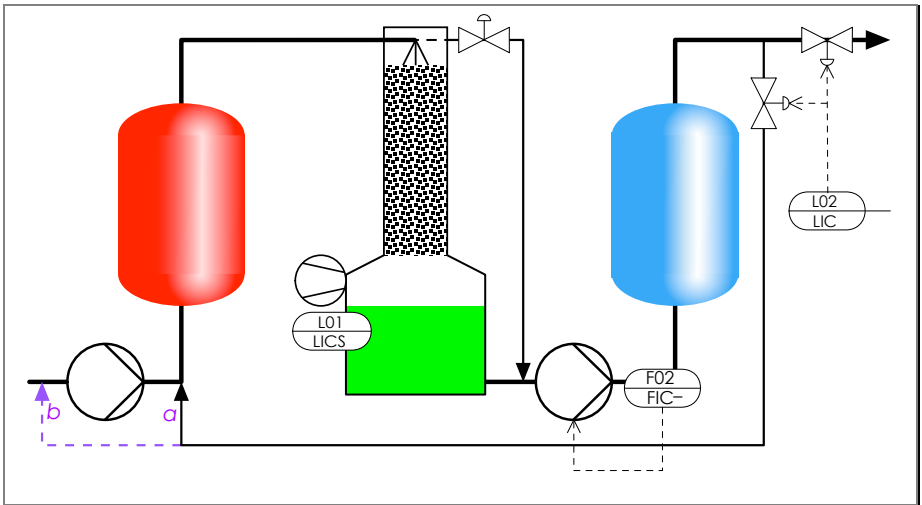


Abb. 6-52

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 Membranentgaser anstelle des Rieselers 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 Membranentgasern preiswerter zu bauen sein als mit Rieseler, Rieselersumpfstandregelung und zweitem Pumpenpaar.

8.4.5 Überblick über Alterungsfolgen

Wie stark sich die Haltbarkeit der fünf gängigen Harzklassen unterscheidet, ist in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Harztyp	Alterungsfolge	TKvol.	TKgew.	≈ Lebensdauer
WAC	Entnetzung der Matrix	sinkt etwas	konstant	30...50 a
SAC	Entnetzung der Matrix	sinkt etwas	konstant	10...15 a
WBA	Verlust funkt. Gruppen	sinkt !	sinkt	8...12 a
SBA, Typ I	Verlust funkt. Gruppen, tlws. Dequarternierung	sinkt !!	sinkt	6...10 a
SBA, Typ II	Dequarternierung	sba: sinkt !!! wba: steigt ges: ≈ konst.	ges.: fast konstant	4...8 a

Abb. 8-22

Unterschiedliche Lebensdauer verschiedener Harzklassen

In der Tabelle finden Sie die wesentlichen Vorgänge, die wir in den vorherigen Abschnitten detailliert besprochen haben, in Kürze zusammengefasst. Ganz entscheidend ist die Spalte rechts, die die ungefähre Lebensdauer

Eine wichtige Schlussfolgerung aus dieser Tabelle ist, dass jedenfalls nicht immer eine ganze Straße gewechselt werden muss, wenn eine einzelne Stufe am Lebensdauerende angekommen ist oder Probleme verursacht.

Hier ist ein Optimum der Betriebskosten durch angepasste Wechselintervalle der Einzelstufen zu suchen.

8.4.6 Probleme bei der Altersfestlegung durch z.B. Top-Up-Strategie oder Teillastbetrieb

Zur Ermittlung von Lebensdauerkurven ist die Angabe des Alters der Füllung notwendig. Dies ist aus zwei Gründen oft nicht repräsentativ. Zum einen werden manchmal sogenannte Top-Up-Nachfüllstrategien verwendet, indem hin und wieder Teilnachfüllungen durchgeführt werden. Wie eine solche Füllung nach einiger Zeit im Färbefeld aussieht, ist im folgenden Foto gezeigt:

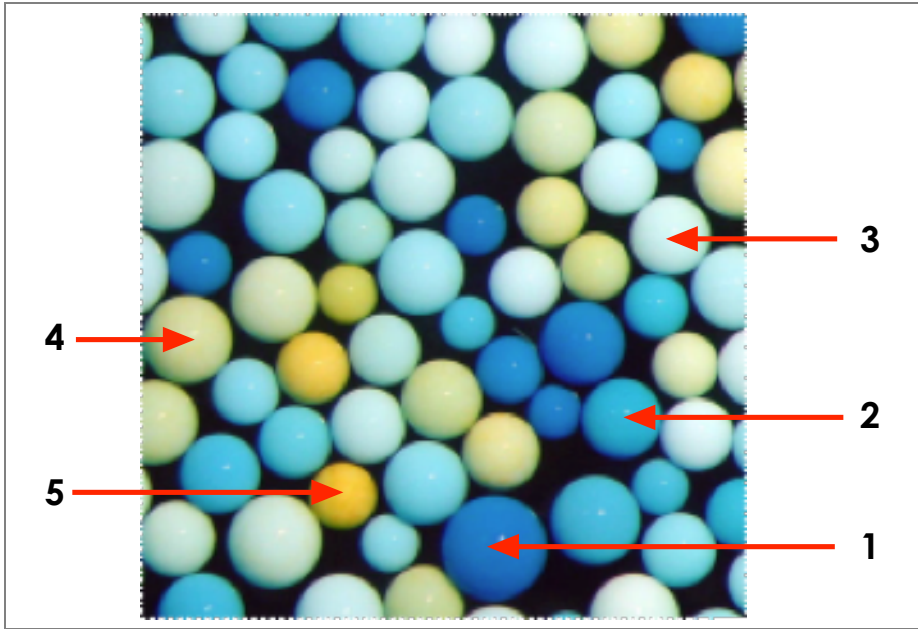


Abb. 8-23 Erkennbarkeit mehrerer Harzgenerationen nach mehrfachen Teilnachfüllungen

Die neuesten Perlen (1) sind tiefblau. Der zur Färbung verwendete mittelgroße organische, anionische blaue Farbstoff dringt gut in alle Poren ein. Die etwas älteren Perlen färben noch hellblau (2, schon blasser; 3 deutlich blass) und die schlechtesten Perlen (4 & 5) nur noch beige bis braun-gelb. Die letzteren nehmen überhaupt keinen Farbstoff mehr auf und nehmen am Ionenaustausch auch nur kaum noch teil (Foulingsschaden). In diesem Foto sind insgesamt 5 Generationen von Harz erkennbar (Beispielperlen mit 1...5 nummeriert).

Letztlich wird durch die Top-Up-Strategie die Anlage bei einer konstanten Teilleistungsfähigkeit betrieben und erfüllt die Auslegungsanforderungen eigentlich nie mehr richtig. Insbesondere wird eine Füllung mit Teilleistungsfähigkeit ständig regeneriert, als wäre sie neu, was natürlich eine größere Verschwendung von Regeneriermittel ist.

Solche Nachfüllstrategien sind meist die Ursache, wenn Anionenaustauscherfüllungen mit > 10 Jahren Alter angegeben werden. In statistischen Auswertungen werde ich solche Proben also aussortieren oder sehr kritisch betrachten.

Der zweite Grund für statistische Verfälschungen ist Teillastbetrieb. Z.B. in einem Spitzenlastkraftwerk ist die VE-Anlage oft nur einen Bruchteil ihres Lebens in Betrieb. Solche Harze erreichen tatsächlich auch ohne Top-Up-Strategie Lebensdauern von > 20 Jahren sogar in der SBA-Stufe. Auch solche Muster nehme ich aus den Statistiken heraus, da ich nach Möglichkeit Standardfälle bewerten möchte.

10 Anhang

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	<i>H⁺-Konzentration je nach pH-Wert (saurer Bereich << 7)</i>	14
Abb. 2-2	<i>Tabelle der kopfrehbaren pH-Konzentrations-Beziehung innerhalb einer pH-Einheit</i>	17
Abb. 2-3	<i>OH⁻-Konzentration je nach pH-Wert (alkalischer Bereich >> 7)</i>	18
Abb. 2-4	<i>Vorgänge bei der Lösung von Kochsalz in Wasser</i>	19
Abb. 2-5	<i>Vorgänge bei der Lösung von Chlorwasserstoffgas in Wasser</i>	22
Abb. 2-6	<i>Dissoziationsdiagramm der Kohlensäure</i>	24
Abb. 2-7	<i>Dissoziationsübergänge verschiedener Säuren</i>	29
Abb. 2-8	<i>Blockdarstellung der Wasseranalyse für Fall 1: Härte > HCO₃⁻</i>	31
Abb. 2-9	<i>Blockdarstellung der Wasseranalyse für Fall 2: Härte < HCO₃⁻</i>	34
Abb. 2-10	<i>Tabelle zur Umrechnung verschiedener Einheiten für die Härte im Wasser</i>	38
Abb. 3-1	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von starksauren Kationenaustauschern</i>	40
Abb. 3-2	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von schwachsauren Kationenaustauschern</i>	42
Abb. 3-3	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von starkbasischen Anionenaustauschern des Typs I</i>	44
Abb. 3-4	<i>Regeneriergrad bei SBAs in Abhängigkeit vom NaOH-Angebot</i>	45
Abb. 3-5	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von WBAs, Di-Methyl-Amin</i>	46
Abb. 3-6	<i>Keine Aufnahme schwacher Säuren auf schwachbasischen Anionenaustauschern</i>	49
Abb. 3-7	<i>Volumenveränderung in Abhängigkeit vom Quaternierungsgrad</i>	50
Abb. 3-8	<i>Aufbau und funktionelle Gruppe von starkbasischen Anionenaustauschern des Typs II</i>	52
Abb. 3-9	<i>Unterschied der nutzbaren Kapazität zwischen Typ I- und Typ II-Anionenaustauschern</i>	53
Abb. 3-10	<i>Räumliche Skizze eines mit Di-Vinylbenzol vernetzten Polystyrols</i>	55
Abb. 3-11	<i>Skizze einer gelförmigen Polymerstruktur und ihre Porengröße (nicht maßstäblich)</i>	56
Abb. 3-12	<i>Beispielhafter Ausschnitt eines Huminsäuremoleküls</i>	57
Abb. 3-13	<i>Skizze einer makroporösen Polymerstruktur und ihre Porengröße (nicht maßstäblich)</i>	58
Abb. 3-14	<i>Volumenveränderung in Abhängigkeit vom Quaternierungsgrad</i>	61
Abb. 3-15	<i>Trennung der Einflüsse von TK-Verlust und Entnetzung auf die Volumenveränderung</i>	62
Abb. 3-16	<i>Schematische Darstellung der Dichtedefinitionen</i>	66
Abb. 4-1	<i>Funktion der Entbasung durch einen SAC</i>	67
Abb. 4-2	<i>Funktion der Entcarbonisierung durch einen WAC</i>	68
Abb. 4-3	<i>Aufzeichnung von +m-Wert (online und offline) sowie LF nach Entcarbonisierung</i>	72
Abb. 4-4	<i>Übereinstimmung von +m--Titrationen und der Henderson-Hasselbalch-Gleichung</i>	72
Abb. 4-5	<i>Funktion der Entgasung durch einen Rieseler</i>	73
Abb. 4-6	<i>Funktion der Entsäuerung durch einen WBA</i>	74
Abb. 4-7	<i>Funktion der Restentsäuerung mit einem SBA</i>	76
Abb. 4-8	<i>Das 4-Quadranten-Modell</i>	77
Abb. 4-9	<i>Schaltungen für kleine Anlagen</i>	79
Abb. 4-10	<i>Schaltung für kohlendioxidhaltiges Rohwasser (Doppelstock-Verbund-Schwebbett)</i>	80
Abb. 4-11	<i>Schaltungen für entcarbonisiertes Wasser ohne und mit Doppelstockaufbau</i>	81
Abb. 4-12	<i>Entstehung von Na-Schlupf in einer KAT-Stufe</i>	82
Abb. 4-13	<i>Entstehung von Natronlauge durch Na-Schlupf des KAT</i>	83
Abb. 4-14	<i>Senkung des Na-Schlupf durch einen Folge-KAT</i>	84

Abb. 4-15	Nachschtaltung eines SAC nach der VE-Straße	84
Abb. 4-16	Schema des Multistep-Verfahrens (Zustand bei Beladung im Aufstrom)	85
Abb. 4-17	Näherung der K – A – K –Schaltung zum Mischbett	86
Abb. 4-18	Konstruktion einer Mischbettsäule	87
Abb. 4-19	Optimale Lage der Harztrennschicht relativ zur Drainage bei Synchronregeneration	88
Abb. 4-20	Ablauf eines Regenerierzyklus bei synchroner Regeneration von KAT und AN	89
Abb. 4-21	Ablauf eines Regenerierzyklus bei asynchroner Regeneration von KAT und AN	91
Abb. 4-22	Das „schlafende Mischbett“	92
Abb. 4-23	Verklumpung durch elektrostatische Anziehung im hochregenerierten Mischbett	93
Abb. 4-24	Vermeidung von Verklumpung durch mikroskopische Polyelektrolyte	94
Abb. 4-25	Dissoziationsdiagramm der Phosphorsäure	96
Abb. 4-26	Vergleich von Konditioniermittel-pH-Werten mit der Henderson-Hasselbalch-Gleichung	97
Abb. 4-27	Schema einer Kondensatreinigung mit gemeinsamer Mischbett-Funktion	98
Abb. 4-28	Schema einer Kondensatreinigung mit doppeltem Mischbett für erhöhte Sicherheit	98
Abb. 4-29	Schema einer Kondensatreinigung mit KAT und MB für Amine	99
Abb. 4-30	Einteilung von Adsorbentien über ihre Porengeometrie	101
Abb. 4-31	Verschiedene Isothermentypen	103
Abb. 4-32	Isotherme von Intrasol-RI mit Beladedurchsätzen bei variabler Konzentration	104
Abb. 4-33	Klassifizierung von Organik über Summenparameter	105
Abb. 4-34	Darstellung von beispielhaften Chromatogrammen nach der LC-OCD-Methode	106
Abb. 4-35	Eigenschaften der verschiedenen Molekülklassen bzgl. Adsorption und Ionenaustausch	107
Abb. 4-36	LC-OCD-Messergebnisse nach zwei verschiedenen Flockungen	111
Abb. 4-37	LC-OCD-Messergebnisse nach biologisch bewachsener Aktivkohle	112
Abb. 4-38	LC-OCD-Messergebnisse nach Aktivkohle und VE-Stufen	114
Abb. 4-39	Adsorptionsisothermen einzelner Stoffgruppen auf A-Kohle	115
Abb. 4-40	Gemessene Adsorptivitäten der vier Stoffgruppen	116
Abb. 4-41	Bindungsmechanismen je nach Position in der VE und Beladefortschritt	117
Abb. 4-42	TOC-Verläufe innerhalb des Beladelaufes der VE-Straße	118
Abb. 4-43	Zusammenhang zwischen Organik- und Kohlensäuredurchbruch	119
Abb. 4-44	Zusammenhang zwischen Organik- und Kohlensäuredurchbruch	120
Abb. 4-45	Schema eines Zweischichtfilters	122
Abb. 4-46	Optimierung der Körnungen im Zweischichtfilter über die Druckverlustprofile	123
Abb. 4-47	Druckverlustprofil mit zu feiner Körnung oben	124
Abb. 4-48	Druckverlustprofil mit zu grober Körnung oben	124
Abb. 5-1	Grafische Darstellung der Henderson-Hasselbalch-Gleichung	126
Abb. 5-2	Vergleich zwischen Kalkentcarbonisierung und Entcarbonisierung per Ionenaustausch	127
Abb. 5-3	Veränderung der Rohwasseranalyse bei der Kalkentcarbonisierung	128
Abb. 5-4	Vorkommensweisen von Kieselsäure	131
Abb. 5-5	Dissoziationsdiagramm der Kieselsäure	133
Abb. 5-6	Kieselsäurelöslichkeit in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert	134
Abb. 5-7	Isothermen für die Bindung von Kieselsäure auf SBAs im Mischbett	136
Abb. 5-8	Aufteilung der Kieselsäurebindung im AN-Verbund	137
Abb. 5-9	Duale Natur der Bindung von monomerer Kieselsäure auf dem SBA	139

Abb. 5–10	<i>Zusammenfassung der Bindungsmechanismen</i>	139
Abb. 5–11	<i>Folgen von Kapazitätsalterung im Anionenaustauscher</i>	140
Abb. 5–12	<i>Fällung von Kieselsäure bei der Verbundregeneration</i>	142
Abb. 6–1	<i>Mögliche Strömungsrichtungen je nach Verfahren</i>	145
Abb. 6–2	<i>Ungenutzte Anlagenteile und Zeiten bei der 2 x 100 %-Straßenschaltung</i>	146
Abb. 6–3	<i>3 x 50 %-Straßenschaltung mit pausenloser Konzeption</i>	147
Abb. 6–4	<i>Ältere Bauweise einer Multi-Straßen-Großanlage</i>	147
Abb. 6–5	<i>Moderne und betriebskostengünstigste Bauweise einer Multi-Straßen-Großanlage</i>	148
Abb. 6–6	<i>Prinzip der Reihen-Wechsel-Schaltung</i>	149
Abb. 6–7	<i>Reihen-Wechsel-Schaltung mit Verbundtechnik in der Vollentsalzung</i>	150
Abb. 6–8	<i>Bauweise einer Gleichstromsäule</i>	152
Abb. 6–9	<i>Anfahrtsituation beim Rückspülen der Harzschicht</i>	153
Abb. 6–10	<i>Einstellung eines stabilen Rückspülgleichgewichts</i>	154
Abb. 6–11	<i>Bettstreckungen und Bettstreckungsfaktoren verschiedener Harzklassen</i>	155
Abb. 6–12	<i>Anfahrt der Rückspülung bei dicht liegendem Bett</i>	156
Abb. 6–13	<i>Anfahrt der Rückspülung mit zu hoher Geschwindigkeit</i>	157
Abb. 6–14	<i>Bauweise einer Gegenstromsäule</i>	159
Abb. 6–15	<i>Anfahrtsituation beim Kompaktieren der Harzschicht (SAC, gelförmig)</i>	160
Abb. 6–16	<i>Mindest-Kompaktionsgeschwindigkeit von SAC-gel-Typen vs. Wassertemperatur</i>	160
Abb. 6–17	<i>Mindest-Kompaktionsgeschwindigkeit anhand der Bettstreckungsfaktoren</i>	161
Abb. 6–18	<i>Schaltung einer Straße im Schwebbettverfahren (Beladungsphase, Verbundschaltung)</i>	162
Abb. 6–19	<i>Schaltung einer Straße im Up.Co.Re-Verfahren (Beladungsphase, Verbundschaltung)</i>	163
Abb. 6–20	<i>Bauweise einer Gegenstromsäule für das Gegenstrom-Gegendruck-Verfahren</i>	164
Abb. 6–21	<i>Bauweise einer Gegenstromsäule für das Rinsebett-Verfahren</i>	165
Abb. 6–22	<i>Bauweise einer Doppelstocksäule für das Verbundschwebbett-Verfahren</i>	167
Abb. 6–23	<i>Kieselsäurefällung im WBA</i>	168
Abb. 6–24	<i>Ausgasung von Kohlensäure im WBA</i>	170
Abb. 6–25	<i>Regeneration, Verdrängung, Vorwäsche und Kreislaufwäsche in einer Schwebebettanlage</i>	172
Abb. 6–26	<i>Regeneration, Verdrängung, Vorwäsche und Kreislaufwäsche in einer Up.Co.Re-Anlage</i>	172
Abb. 6–27	<i>Auftrennung der Ablauf-Leitfähigkeit in KAT- und AN-Schlupf</i>	176
Abb. 6–28	<i>Rieseler zur klassischen Entgasung in der VE-Straße</i>	178
Abb. 6–29	<i>Vakuumentgaser für geschlossene Anlagen</i>	179
Abb. 6–30	<i>Membranentgaser zur kombinierten Entgasung innerhalb der VE-Straße</i>	180
Abb. 6–31	<i>Schnittbild eines Membranentgasungsmoduls (Hohlfasern viel dicker als real dargestellt)</i>	181
Abb. 6–32	<i>Unterschiede der Fahrweisen des Membranentgasers</i>	181
Abb. 6–33	<i>Typische CO₂-Restwerte (aus einer Pilotanlage)</i>	182
Abb. 6–34	<i>Typische O₂-Restwerte (aus einer Pilotanlage)</i>	183
Abb. 6–35	<i>Einsparmöglichkeit von Strippdampf in der thermischen Entgasung im Speisewasser</i>	183
Abb. 6–36	<i>Beispiel einer geschlossenen Anlage zur Pharmawasservorproduktion</i>	184
Abb. 6–37	<i>Stabilisierung des pH-Wertes durch CO₂-Entfernung ohne SBA</i>	185
Abb. 6–38	<i>Bereiche von Regeneriermittelangebot und -überschusses im Gegenstrom (Beispiel SAC)</i>	191
Abb. 6–39	<i>Modell der Regeneriereffektivität im Gegenstrom</i>	192
Abb. 6–40	<i>Verzögerte Folge unzureichender Regeneriermittelmenge</i>	194

Abb. 6-41	<i>Kurven der Nutzbaren Kapazität vs. Regeneriermitteleinsatz nach Langmuir-Formalismus</i>	196
Abb. 6-42	<i>Zusammenhang der Kurven NK(RA), RÜ(RA) und NK(RÜ) für SACs</i>	197
Abb. 6-43	<i>Die Kurven NK(RA) und RÜ(RA) für Typ I- und Typ II-SBAs</i>	198
Abb. 6-44	<i>Zusammenhang der Kurven NK(RA), RÜ(RA) und NK(RÜ) für SBAs</i>	199
Abb. 6-45	<i>Berechnung der NK für WAC-Typen anhand des Ionenangebotes</i>	200
Abb. 6-46	<i>Korrekturfaktor für die NK durch variablen Härteanteil</i>	201
Abb. 6-47	<i>Berechnung der NK für GBA-Typen anhand des Ionenangebotes</i>	202
Abb. 6-48	<i>Korrekturfaktor für die NK durch variablen Sulfat-Anteil</i>	203
Abb. 6-49	<i>Korrekturfaktor für die NK durch variable Temperatur</i>	203
Abb. 6-50	<i>Entscheidungswege für die starkbasische Stufe einer VE-Straße</i>	226
Abb. 6-51	<i>Symmetrische Durchflussregelung über Störgrößenaufschaltung</i>	228
Abb. 6-52	<i>Kontinuierlich arbeitende Rezirkulationsmischung</i>	229
Abb. 6-53	<i>Kontinuierlich arbeitende Rezirkulationsmischung mit Membranentgaser</i>	230
Abb. 6-54	<i>RI-Schema einer 4-stufigen VE-Straße</i>	231
Abb. 6-55	<i>Beladung der Muster-VE-Anlage</i>	232
Abb. 6-56	<i>Beladung der Muster-VE-Anlage mit gleichzeitiger teil-Rezirkulation</i>	233
Abb. 6-57	<i>Regeneration und Kreuzregeneration in der Muster-Anlage</i>	234
Abb. 6-58	<i>Die Kreislaufwäsche in der Muster-Anlage</i>	234
Abb. 6-59	<i>Straße mit Membranentgaser und Rohwasservordruck</i>	235
Abb. 6-60	<i>Straße mit Membranentgaser ohne Rohwasservordruck</i>	236
Abb. 7-1	<i>Geschätzte Investitionskosten für beide VE-Anlagen-Grundtypen</i>	237
Abb. 7-2	<i>Betriebskostenanteile für beide VE-Anlagen-Grundtypen</i>	238
Abb. 7-3	<i>Chemikalienkosten, AfA und IH-Kosten über eine Betriebszeit von 30 Jahren (40 m³/h)</i>	239
Abb. 7-4	<i>Dissoziationsdiagramm der Schwefelsäure</i>	240
Abb. 7-5	<i>Vergleich der Regenerierwirkung von Salz- und Schwefelsäure</i>	241
Abb. 7-6	<i>Entwicklung der Chemikalienkosten in den letzten Jahren</i>	243
Abb. 7-7	<i>Verschiedenartigkeit der Säure-/Laugeverbräuche bei beispielhaften Anlagen</i>	244
Abb. 7-8	<i>Normierung der Säure-/Laugeverbräuche über den Gesamtsalzgehalt</i>	244
Abb. 7-9	<i>Aufteilung der Wasseranalyse bei Rohwasserspeisung (mit Rieseler)</i>	245
Abb. 7-10	<i>Aufteilung der Wasseranalyse bei vorheriger Kalkentcarbonisierung</i>	245
Abb. 7-11	<i>Vergleich des verlorenen Überschusses bei Gegenstrom- vs. Verbund-Gegenstromtechnik</i>	248
Abb. 7-12	<i>Erhöhung des Washwasserbedarfs durch Alterung (für SBA I gel Typen)</i>	254
Abb. 7-13	<i>Erhöhung des Washwasserbedarfs durch Alterung bei zwei festen Abschaltgrenzen</i>	255
Abb. 7-14	<i>Einfachste Form der Umkehrosiose in Kleinanlagen</i>	257
Abb. 7-15	<i>Verschiedene Vorbehandlungen vor der Umkehrosiose</i>	257
Abb. 7-16	<i>Verschiedene Feinreinigungen nach der Umkehrosiose</i>	258
Abb. 7-17	<i>Ergebnis des Vergleichs zwischen IA- (links) und UO-Verfahren (rechts)</i>	260
Abb. 7-18	<i>Wasserkosten von IA- und UO-Verfahren im Vergleich</i>	261
Abb. 7-19	<i>Gesamtkostenvergleich zwischen IA- und UO-Verfahren</i>	262
Abb. 7-20	<i>Kostensteigerung einer AN-Stufe durch Harzalterung</i>	264
Abb. 7-21	<i>Unterschiedliche Alterung der Kapazität bei SAC- und SBA-Typen</i>	265
Abb. 7-22	<i>Drehung der Asymmetrierung durch Abfall der AN-Kapazität (startend bei 120 %)</i>	266
Abb. 7-23	<i>Konstante Regeneriermittelüberschüsse bei sinkendem Durchsatz durch Säureabsenkung</i>	268

Abb. 7–24	Durch Regeneriermittelvariation veränderbare NK	269
Abb. 7–25	Trotz Regeneriermittelvariation unveränderbare NK im Verbund	270
Abb. 8–1	Titration von Säure- und Basekapazitäten	272
Abb. 8–2	Abhängigkeit des LF/TDS-Faktors vom FMA-Anteil	280
Abb. 8–3	Übersicht über Ionenleitfähigkeitsbeiträge im Rohwasser Konzentrationsbereich	281
Abb. 8–4	Konstanz des Quotienten $LF_{\text{Rohwasser}}/LF_{\text{SAC}}$ trotz LF-Schwankungen	282
Abb. 8–5	Erkennung des Durchbruchs einer SAC-Stufe	283
Abb. 8–6	Zusammenhang zwischen LF-Erhöhung über SAC und FMA-Anteil am TDS	284
Abb. 8–7	Berechnung des pH-Wertes nach SAC / Rieseler aus der Summe der Mineralsäureanionen	285
Abb. 8–8	Die „Guru“-Korrelationskurve und das Wertepaar pH 8,8 und 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	286
Abb. 8–9	Vorhersagbare pH-Werte anhand der Leitfähigkeit bei alleinigem Na-Schlupf	287
Abb. 8–10	Entnetzung des Ionenaustauscher-Matrix	288
Abb. 8–11	Hofmann-Abbau von Anionenaustauschern (SBA, Typ I und Typ II)	289
Abb. 8–12	Messung der Alterung durch Vorsorgeuntersuchungen (z.B. SBA II)	290
Abb. 8–13	Unterschiede im Kapazitätsabbau verschiedener makroporöser SBA I-Typen	291
Abb. 8–14	Unterschiede im Quellwasserhaltsanstieg verschiedener makroporöser SBA I-Typen	292
Abb. 8–15	Zusammenfassung der Alterung der funktionellen Gruppen von Anionenaustauschern	293
Abb. 8–16	„Lebenslinien“ von ANs je nach Anwendung	294
Abb. 8–17	Alterung der Kapazitäten von WAC-Typen	295
Abb. 8–18	Häufigkeitsverteilung von TK-Messwerten	296
Abb. 8–19	Alterung der Kapazitäten von SAC-Typen	297
Abb. 8–20	Verlust der Vernetzung eines einzelnen Harztyps	299
Abb. 8–21	Entnetzungsrate bei unterschiedlichen Herstellverfahren und Anwendungen	299
Abb. 8–22	Unterschiedliche Lebensdauer verschiedener Harzklassen	301
Abb. 8–23	Erkennbarkeit mehrerer Harzgenerationen nach mehrfachen Teilnachfüllungen	302
Abb. 8–24	Methode zur schonenden Entnahme einer Harzprobe	304
Abb. 8–25	Färbebilder neuer gel-SACs	308
Abb. 8–26	Färbebilder neuer mp-SACs	308
Abb. 8–27	Färbebilder neuer WACs (gel und mp)	308
Abb. 8–28	Färbebilder neuer SBAs (gel und mp)	309
Abb. 8–29	Färbebilder gebrauchter KAT-Proben	309
Abb. 8–30	Färbebilder gebrauchter AN-Proben	310
Abb. 9–1	Mess- und Probenorte an einer VE-Anlage	314
Abb. 9–2	Uneindeutigkeit der Laufzeitverkürzung	315
Abb. 9–3	LF- und pH-Kurven für ordnungsgemäßen und fehlerhaften AN	317
Abb. 9–4	LF- und pH-Kurven für ordnungsgemäßen und fehlerhaften KAT	317
Abb. 9–5	Auswirkung von KAT-Regeneriergrad und Asymmetrierung auf die Durchbruchskurve	320
Abb. 9–6	Fouling durch organische Säuren auf Anionenaustauschern	322
Abb. 9–7	Organikdesorption von Kat- und Anionenaustauschermustern	325
Abb. 9–8	Reinigungserfolg verschiedener Behandlungslösungen auf Anionenaustauschern	326
Abb. 9–9	Wirksamkeit der Maßnahmen, Temperatur, Zeit und Alkalität	327
Abb. 9–10	Möglichkeiten zur einfachen Anwendung von Sonderlösungen	329

10.2 Index

- 4-Quadranten-Modell, 77, 215, 245
Abschaltkriterium, 148
Abschaltleitfähigkeit der Vorwäsche, 173
absolute Auslegung, 215
Abstrom, 144
Abwasseranlagen, 151
Abwasserkosten, 261
Acrylat-basierte Anionenaustauscher, 224
Adsorberpolymere, 100
Adsorption, 101, 114
Adsorptionsisothermen einzelner Stoffgruppen, 115
adsorptive Bindungsmechanismen, 107
AfA, 238
Aktivkohle, 100
Alkalimetalle, 32
Alkalisierungssystem, 96
Alterung, 254, 263, 288, 294
Alterungsmechanismus der Typ II-Gruppe, 53
Alterungsverhalten, 140
Amine, 96
Ammonium/ Ammoniak, 96
Anfahrbetriebs, 184
Anfahrsgeschwindigkeit, 160, 221
Anion, 20
Anionen der starken Säuren, 32
Anionenaustauscher, 44
Anionensumme, 35
Anlagenauslegung, 187
Anlagenpreis, 237
Ansäuerung, 111
Anteil der HCO_3^- am Gesamtsalzgehalt, 37
Arbeitssäule, 149
Assoziation der funktionellen Gruppe, 41
assoziierte Form, 24
Asymmetrie, 208
Asymmetrierung, 148, 177, 267
Aufenthaltswahrscheinlichkeit, 20, 39
Aufkonzentrierung, 15
Aufstrom, 144, 158
Aufstrom-Regeneration, 164
Ausbalancierung, 37
Ausfällung, 25
Ausgasung von Kohlensäure, 169
Auslegung des AN, 208
Auslegung des KAT, 208
Auslegungsrechnung, 78
Basekapazität, 273
Behältergeometrie, 187
Beladung mit Kieselsäure, 213
Berechnung, 206
Berechnung als Verbundschaltung, 217
Berechnung der NKs, 204
Bettstreckungsfaktor, 155
Bettstreckungsgleichgewicht, 153
Bettvolumen, 189
Bicarbonat, 32
Bindungsmechanismen, 100
Biofilm, 332
Biofilter, 112
Biopolymere, 109
biostatische Wirkung, 331
Bio-Verschmutzung, 179
biozide Wirkung, 331
Blasenbildung, 170
Blockdarstellung der Wasseranalyse, 31, 34
Blockdiagramm, 35
Booster-Pumpen, 163, 172
Brønsted-Säuremodell, 30
Brown'sche Molekularbewegung, 107
Bruchkraft, 311
Bruchstabilität, 310
Brutto-Durchfluss, 188
Bruttodurchsatz, 188
BV, 189
 Ca^{2+} -Form, 42
 CaCO_3 , 25

-
- Carbonat, 24
Carbonathärte, 33, 34
Carbonat-Restwerte, 25
Carbonsäure, 42
Channeling, 168, 313
Chatillon-Verfahren, 311
Chemikalienkosten, 209, 238, 243, 268
Chemikalienüberhang, 218
Chemisorption, 138
Chlormethylierungs-Verfahren, 49
Cl-Form, 61
CO₂, 24, 32, 68, 73, 178, 273, 274
CO₂-Entfernung, 73
CO₂-Partialdruck, 178
CO₂-Pufferkurve, 274
CO₂-Restwerte, 182
CO₃²⁻, 23
Crosskontamination, 318, 321
CSB, 106
CSB-Desorption, 325
Dampflichkeit, 96
Dampfverbrauch, 184
Deckschichtbildung, 123
Dequaternierung, 53, 140, 289, 306
Desinfektionsaktion, 333
Dicke der Hydrathülle, 20
Differenzdruckmanometer, 313
Dipolmoment, 20
Dissoziation, 19, 21
Dissoziationsdiagramm, 23, 48, 240
Dissoziationsgleichgewicht, 21, 22
Dissoziationsgrad, 23
Dissoziationskurve, 126
Dissoziationszustände, 27
dissoziierte Form, 24
Di-Vinylbenzol, 55
Divinylbenzol, 288
DOC, 106
Doppelabsperrungen mit
 Zwischenentlastung, 323
Doppelregeneration, 193
Doppelstock, 215
Doppelstockaufbau, 81
Doppelstocksäule, 166
Drainage, 88
Drainageebene, 163
Druckhaltung, 171
Druckverlustprofil, 122
 dual base, 50
Durchbruchindikator, 71
Durchfluss, 188
Durchflussdynamik, 221
Durchflussregelung, 228
Durchlaufentcarbonisierungen, 25
Durchsatz, 188, 313
Düsen gebrochen, 322
DVB, 55, 288
Dynamikanforderungen, 162
EDI, 259
Effektivität der Entcarbonisierung, 25
Eigenwasserbedarf, 255, 261
Eigenwasserverbrauch, 173, 188
Einheiten für die Härte, 38
Elastizität, 311
elektrische Feldstärke, 20
Elektrodeionisation, 259
Elektronegativität, 20
Entbasung, 67
Entcarbonisierung, 70, 71, 127, 258
Entfernung organischer Stoffe, 100
Entgaser, 73, 275
Entgaser einer VE-Anlage, 25
Entgasungsverfahren, 178
Enthärtungsanlagen, 330, 331
Enthärtungsstufe, 258
Entkieselung, 75
Entmischung, 227
Entnetzung, 62, 288, 305
Entsalzung, 79
Entsäuerung, 74
Erdalkalimetalle, 32
Erhöhung der Regeneriereffektivität, 43
externe Crosskontamination, 322
externe Rückspülung, 321

- fb/OH-Form, 61
Fehlerursache, 314
Feinreinigungsstufen, 258
Feinreinigungszone, 64, 151, 158
Feinwäsche, 172
Festbett, 144
Festionen, 39
Feststofffiltration, 152
Filterkohle, 121
Flockung, 110
Flockungsmittel, 110
Flusssäure, 30
FMA, 32, 208
FMA-Summe, 68, 75, 275, 285, 312
Folge-KAT, 84
Fouling, 52, 59, 224, 263, 316
Fouling auf Anionenaustauschern, 109
Free Mineral Acids, 32
Freibord, 151, 159
freie-Base-Form, 45, 60, 61
Freundlich-Formalismus, 103
Freundlich-Isotherme, 135
Freundlich-Isothermen, 115
Funktionalisierungsdichte, 39, 63
funktionelle Gruppe, 39
Gasblasen, 170
GBA, 49, 202
Gegenstrom-Gegendruck-Verfahren, 164
Gegenstromregeneration, 158, 167, 248
Gegenstromverfahren, 144
gelförmig, 56, 224
Gemischtbasische Anionenaustauscher, 49
gepulste Reinigung, 328
Gesamthärte, 32, 34
Gesamtkosten, 261
Gesamtkostenoptimierung, 240
Gesamtsalzgehalt, 33, 36
gewichtbezogene Totalkapazität, 63
GH, 32
Gleichstromsäule, 151
Gleichstromverfahren, 144, 151
Größenausschluss, 102
Guru-Korrelation, 285, 318, 320
H⁺-Form, 42
H⁺-Konzentration, 14, 17
H₂CO₃, 23
H₂O₂, 332
H₂SiO₃, 130
H₃SiO₄⁻, 130
H₄SiO₄, 30, 130
Haltegeschwindigkeit, 219, 221
Härtebildner, 32
Härteeinheiten, 37
Harzalterung, 263, 288
Harzanalyse, 303
Harzsplitter, 313
Harzvolumina, 187, 215
Harzwechselintervalle, 301
Harzwechseltermine, 290
HCl/Cl-Form, 61
HCl-Form, 47
HCl-Molekül, 21
HCO₃⁻, 23, 32, 69, 273
HCO₃⁻-Gehalt, 312
Henderson-Hasselbalch-Gleichung, 71, 125
Henry-Konstanten für CO₂, 178
HNO₃, 29
Hofmann-Abbau, 289
Huminsäure, 57
Huminsäuren, 109
Hungerregeneration, 192, 270, 320
Hydrathülle, 20, 59, 108
Hydrazinium / Hydrazin, 97
Hydrogencarbonat, 24, 32, 69
Hydrogencarbonat-
Restkonzentrationen, 25
IH, 239
Indikatoren, 26
Inertmaterialschiicht, 227
innere Oberfläche, 101
innere Rissbildung, 300
Instandhaltungskosten, 239
interne Crosskontamination, 322

- Investitionskosten, 260
 Ionenaustauscherklassen, 39
 Ionengehalte, 272
 Ionenkonzentrationen, 13
 ionische Bindungsmöglichkeiten, 107
 Isothermentypen, 103
 K-A-K-Schaltung, 84
 kalkentcarbonisiertes Rohwasser, 80
 Kalk-Entcarbonisierung, 110
 Kalkentcarbonisierung, 25, 127, 238
 Kammervolumen, 51
 Kanalbildung, 168, 313
 Kapazität, 63
 Kapazitätsabfall, 266
 Kapazitätsmessung, 305
 Kapazitätsverhältnis der KAT- zur AN-
 Seite, 176
 Kapazitätsverlust, 263, 316
 Kation, 20
 Kationenaustauscher, 39
 Kationensumme, 35
 KAT-Splitter, 322
 KB 8,2, 273, 274
 Keime, 330
 Kesselspeisewasser, 183
 Kieselsäure, 30, 48, 75, 130, 279
 Kieselsäurefällung, 167
 Kieselsäurefällungen, 141
 Kieselsäurekapazität, 135
 Kieselsäuremonitor, 279
 Kieselsäurepartikel, 142
 Kieselsäurerückhaltung, 54
 Kieselsäureschlupf, 177
 Kieselsteinablagerungen, 169
 Kinetikabschlag, 64
 kinetisches Problem, 316
 Klassiereffekt, 152
 Klassierung, 90
 Kohlensäure, 23
 Kohlensäureanhydrid, 24
 kolloidale Kieselsäure, 130, 142
 Kompaktion, 158, 221
 Kondensationsreaktion, 131
 Kondensatreinigung, 95
 Kondensatreinigungs-MB, 227
 Konditioniermittel, 95
 Konstanz der gewichtsbezogenen
 Kapazität, 265
 Konstanz der gewichtsbezogenen TK_w ,
 295
 Kontaktoberfläche, 180
 Konzentration aus pH, 16
 Konzentrationsraum, 13
 Korrosionsrate, 95
 Kostenarten, 238
 KRA, 95
 Kreislaufwäsche, 174, 230, 253, 321
 Kreuzregeneration, 233
 KS 4,3, 273, 274
 Ladungskonzentration, 35
 Langmuir-Formalismus, 103
 Langmuir-Isotherme, 135, 195
 Laufzeiteinbuße, 313
 LC-OCD, 106
 Lead-Lag-Anordnung, 149
 Lebensdauer, 52, 301
 Lebensdauer von Acrylattypen, 225
 Lebenslinien, 62
 Lebenslinien von ANs, 294
 Leerrohrgeschwindigkeit, 154
 Leitfähigkeitsbuckel, 229
 Leitfähigkeitsquotient, 150
 LF-Anfahrbuckel, 321
 LF-Differenz, 278, 282
 LF-Durchbruch, 277
 LF-Messung, 230
 LF-Messung am Regenerierausgang,
 255
 LF-Quotient, 148, 278, 283
 Lieferform, 61
 lineare Geschwindigkeit, 154, 189, 221
 Löslichkeit der Kieselsäure, 168
 Lösung von Chlorwasserstoffgas, 22
 Lösungsvorgang, 19
 Luftwirbelung, 151, 152

- Makropore, 58, 322
 makroporös, 58, 224
 makroreticular, 58
 Massenkonzentration, 35
 Massenprozent, 15
 Matrixstrukturen, 55
 Maximalfluss, 218
 Maximalleistung, 219
 MB-Regeneration, 90
 Membranentgaser, 74, 178, 180, 229, 235
 mesoporöse Adsorber, 102
 meta-Kieselsäure, 130
 Methylo-range, 26, 273
 Mikroporen, 58
 mikroporöse Adsorber, 102
 Mindestanfahr-geschwindigkeit, 219
 Mindestdurchfluss, 218
 Mindestleistung, 221
 Mineralisierung, 332
 Mineralsäureanionen, 16
 Mineralsäuren, 75
 Mineralsäuresumme, 68, 275
 Mischbett, 86, 258
 Mischung, 90
 mittelbasisch, 50
 mixed base, 50
 Molalität, 35
 Molarität, 35
 Molekülgröße, 102
 Molekülklassen, 106
 Molmasse, 35
 Monomer-Polymer-Gleichgewicht, 138
 Multistep-Anordnung, 258
 Multistep-Verfahren, 85
 Multi-Straßenschaltung, 146
 m-Wert, 273
 Na⁺-Form, 42
 Na₃PO₄, 95
 Nachdissoziationsreaktion, 25
 Na-Konzentrationsmessung, 148
 NaOH-Konzentration, 18
 Na-Schlupf, 285
 Na-Schlupf des KAT, 277
 Nenndurchfluss, 212, 214
 Nennleistung, 219
 Netto-Durchfluss, 188
 Nettodurchsatz, 188
 Neutralität, 217
 Neutralstoffe, 109
 nicht-Carbonathärte, 33
 NK, 53, 190, 195, 198, 199, 269
 NK-Absenkung, 271
 NK-Vergleich, 51
 normierte Auslegung, 209, 212, 214
 Normierung, 31
 Normierung der Wasseranalyse, 35
 Normierung einer Wasseranalyse, 36
 nutzbare Kapazität, 63, 190, 307
 Oberfläche, 58
 Oberflächenwässern, 59
 OH⁻-Form, 61
 OH⁻-Konzentration, 17
 OH-Radikal, 332
 online-Messverfahren, 277
 online-Titrator, 71
 Organikentfernung vor der VE-Straße, 110
 Organik-Toleranz, 59
 organisches Fouling, 324
 Oxidationsmittel, 294
 oxidative Desinfektionsmittel, 332
 oxidativer Angriff, 332
 p- und m-Werte, 26
 permanente Härte, 33, 71
 Pharmawasserproduktion, 179
 pH-Bereich während der Regeneration, 40
 Phenolkondensationsharze, 55
 Phenolphthalein, 26, 273
 pH-LF-Profil, 277
 pH-Neutralität, 218
 Phosphatkonditionierung, 98
 Phosphorsäure, 30, 96
 pH-Pufferung, 95
 Phtalimid-Verfahren, 49

- pH-Wert, 13, 71
pH-Wert nach starksaurem KAT, 16
pH-Wert während der Regeneration, 15
pKa, 26
pKs-Wert, 27, 40, 125
pKs-Wert der Carbonsäuren, 117
pKs-Wert der funktionellen Gruppe, 40
POC, 105
Polisher-Säule, 149
Polykondensate, 131
polymere Kieselsäure, 137
Polysaccharide, 109
Porengröße, 56, 58, 101
Probennahme, 303
Probennahmestellen, 230, 314
progressive Regeneration, 142
Protonierungsreaktion, 46
Prozentangaben, 15
Pufferlösung, 125
p-Wert, 273
Qualität des entsalzten Wassers, 79
Quaternierungsgrad, 49, 50, 61, 202, 290
Quaternierungsgrade für die VE-
Anwendung, 50
Quellung, 62
Quellungsdrucks, 60
Quellverhalten, 50
Quellwassergehalt, 289, 294
RA, 195, 267, 269
RA-Absenkung, 270
Regeneratablauf, 218
Regeneration von
Kationenaustauschern, 15
Regenerierbarkeit, 47
Regeneriereffektivität, 47, 53
Regeneriergrad, 45, 63, 190
Regenerierkriterium, 43
Regenerierlauge, 18
Regeneriermechanismus, 40, 42, 47
Regeneriermittelabsenkung, 320
Regeneriermittelangebot, 53, 189, 267,
269
Regeneriermitteleinsatz, 43, 189
Regeneriermittelmenge, 43, 151
Regeneriermittelmengen, 187
Regeneriermittelüberschuss, 43, 44, 189,
191, 248
Regeneriermittelverlust, 190, 249, 270
Regeneriersäure für
Kationenaustauscher, 29
Reihen-Wechsel-Schaltung, 149, 278
Reinigungslösung, 325
Reinigungsmittel, 324
Reinstwassererzeugung, 179
Resistenzbildung, 331
Restenthärtung, 259
Restentsalzung, 82
Restleitfähigkeiten, 82
Rezirkulation, 162
Rezirkulationsbeimischung, 221
Rezirkulationsmischung, 229
Rezirkulationsschaltung, 221
RI-Bild, 231
Rieseler, 73, 178
Rieselerschlupf, 208, 276
Rieselersumpfstandregelung, 228
Rinsebett, 165
Rohwasseranalyse, 35, 187
Rohwasserkosten, 261
Rohwasservorwärmung, 136
RÜ, 191, 196, 198, 209, 267
Rückspülbehälter, 322
Rückspülgeschwindigkeit, 156
Rückspülung, 145, 151, 153
RV, 270
SAC, 37, 68, 77, 198
Salpetersäure, 29
Salzsäure, 30
Salzspaltung, 47
Sandfilter, 121
Säulendarstellung der Wasseranalyse,
31
Säureadsorber, 46
Säurekapazität, 273
Säuren, 23
Säureschlupf, 286

- Säurestärke, 23, 26
 Säureverlust, 218
 SBA, 37, 76, 77, 198
 Scaling, 258, 259
 Scavenger, 102, 116
 Schaltungen, 79
 scheinbare Dichte, 65
 Schichtfilter, 121
 Schichthöhe, 215
 Schmutzaustrag, 152
 Schüttdichte, 64
 Schwachbasische Anionenaustauscher, 45
 schwachsauer, 23
 Schwachsaure Kationenaustauscher, 42
 Schwanenhals, 152
 Schwebebett, 144
 Schwebebettverfahren, 162
 Schwefelsäure, 30, 240
 Selbstadsorption, 110
 Selektion, 331
 Selektivität, 39
 Silikat, 130
 Silikat-Anion, 30
 Sinkgeschwindigkeit, 65, 154
 SiO₂, 130
 SiO₂-Gehalt, 213
 SiO₂-Gehalte, 130
 SiO₂-Schlupf, 135
 Sonderbehandlung, 324
 Sonderregeneration, 225
 Sperrwasser, 91
 spezifische Belastung, 189
 spezifische Leitfähigkeit, 82
 spezifischer Durchsatz, 189
 Spitzenlasterzeugung, 220
 Spülwasser-Kreislaufanlagen, 330
 Stabilität, 55
 Starkbasische Anionenaustauscher des Typs II, 52
 starksauer, 23
 Starksaure Kationenaustauscher, 39
 Stoffgehalt, 106
 Stoffgruppen, 107
 Straßenschaltung, 146
 Stripppgas, 181
 Stromkosten, 259
 Strömungsrichtung, 144
 strong acid cationic resin, 37
 strong base anionic resin, 37
 Styrol-basierte Typen, 225
 Sulfonsäureanion, 39
 Sulfonsäuregruppe, 40
 Summe organischer Stoffe, 105
 Symmetrie, 208
 Tabelle der pKs-Werte, 28
 TC, 105
 TDS, 36, 208
 Teilchenkonzentration, 35
 Teilnachfüllung, 266
 Temperatureinfluss, 203
 Temperaturkoeffizient der Kieselsäureaufnahme, 136
 temporäre Härte, 33, 71
 tertiäres Amin, 45
 thermische Entgasung, 183
 TIC, 105
 Titration, 272
 Titration von Kohlensäure, 26
 TK, 190
 TK-Messung, 305
 TK_v, 296, 298, 305, 306
 TK_w, 296, 297, 305, 306
 TOC, 105
 TOC-Belastung, 224
 TOC-Monitor, 279
 Top-Up-Strategie, 301, 310
 Totalkapazität, 51, 63, 190
 Trenn- und Regeneriersäule, 87
 Trennbarkeit, 227
 Trennschicht, 227
 Trennschichtlage, 88
 Trennung, 89
 Trio-Bed, 89, 227
 Trockenmasse, 63

- Trocken-TK, 63
Typ I-Anionenaustauscher, 252
Typ II, 52
Typ II-Anionenaustauscher, 225, 252, 291
Überfahung, 215
Umkehrosmose, 257, 259
UO, 257
Up.Co.Re-Verfahren, 162
Vakuumtgasler, 178
Valenz, 35
van der Waals-Kräfte, 107
VE-Puffertank, 220
Verbrauchskosten, 260
Verbundgegenstromregeneration, 248
Verbund-Gegenstrom-Schaltung, 80
Verbund-Gegenstromtechnik, 166
Verbundregeneration, 48, 166
Verbundschaltung, 209, 215
Verdrängung, 172
Verkeimungspotential, 330
Verklumpung, 93
Vernetzung, 288
Vernetzungsgrad, 55
Vernetzungsverlust, 299
vier Quadranten, 76
Vollentsalzung, 67
Vollentsalzungsanlage, 79
Volumen in Lieferform, 51
volumenbezogene Totalkapazität, 63
Volumenkapazität, 63
Volumenprozent, 15
Volumenstrom, 188
Volumenveränderung, 50, 59, 61
Volumenveränderung von Ionenaustauschern, 21
Volumenvergrößerung, 60
Vorkommensweisen der Kieselsäure, 130
Vorsorgeuntersuchungen, 290
Vorwäsche, 172, 253
WAC, 37, 42, 69, 77, 200
WAC-SAC-Verbund, 211
Wahre Dichte, 64
warme alkalische Kochsalzlösung, 326
Wäsche, 172
Waschwasserbedarf, 254
Waschwasserrückführung, 175
Waschwasserverbrauch, 173, 263
Wasseranalyse, 31, 205, 207, 312
Wassergehalt, 295, 305
Wassergeschwindigkeit, 154
Wasserstoffperoxid, 332
WBA, 37, 45, 75, 77
weak acid cationic resin, 37
weak base anionic resin, 37
Wertigkeit, 35
Wirbelbett, 144
Zentralströmung, 313
zweibasisch, 26
Zweischichtfilter, 121
Zweistraßige Maximallast, 220
Zweistraßige Nennleistung, 219
Zwischenausschleusung, 329
Zwischenkornvolumen, 154