ARBEITSMETHODEN DER MODERNEN NATURWISSENSCHAFTEN

IONENAUSTAUSCHER

Eigenschaften und Anwendungen

von

DR. PHIL. KONRAD DORFNER

Diplom-Chemiker

WALTER DE GRUYTER & CO.

vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung — J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung — Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp.

Berlin 1963

©

Copyright 1962 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung — J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung — Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp., Berlin 30, Genthiner Str. 13 — Alle Rechte, auch die des auszugweisen Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe, der Herstellung von Mikrofilmen und der Übersetzung, vorbehalten — Printed in Germany —
Archiv-Nr. 57 22 62 1 — Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., Berlin 30
Umschlaggestaltung: Ulrich Hanisch, Berlin

Vorwort

Ionenaustauscher haben seit geraumer Zeit in Labor und Betrieb, in Forschung und Technik breite Anwendung gefunden. An den ersten zur Verfügung stehenden Austauschermaterialien wurden eine Reihe grundlegender Phänomene des Ionenaustausches untersucht, bis diese neue Arbeitsrichtung, nach der grundlegenden Entdeckung von ADAMS und HOLMES zur Herstellung von Ionenaustauschern auf Kunstharzbasis, allgemein bekannt wurde.

Andererseits ist aber die vielseitige Anwendung so verwirrend, daß sowohl bei Studierenden als auch bei Praktikern nach einer kurzen auf die praktische Anwendung zugeschnittenen Übersicht ein Bedürfnis spürbar wurde. Deshalb hat der Autor versucht, im vorliegenden Buch eine Zusammenstellung aller den Ionenaustausch betreffenden Fragen zu geben und seiner im Akademie-Verlag, Berlin, erschienenen Monographie über die Ionenaustausch-Chromatographie eine unabhängige allgemeine Einführung hinzuzufügen.

Der Autor verbindet damit die Hoffnung, allen, die vor der Aufgabe stehen, praktisch mit Ionenaustauschern zu arbeiten, langwierige Sucharbeit und damit wertvolle Zeit zu sparen. Die angestrebte Übersicht kann bei der großen Anzahl der Originalarbeiten nicht vollständig sein, aber es wird gehofft, auf alle Arbeitsgebiete hingewiesen zu haben. Für Zuschriften und Hinweise, die der weiteren Ausgestaltung dienlich sein können, gilt allen an diesem Arbeitsgebiet interessierten Fachkollegen der Dank im voraus.

Ludwigshafen, Winter 1962 KONRAD DORFNER

Inhalt

Seite

Vorwort V

A. Einführung 1

I. Geschichte 1
II. Grundbegriffe 3
III. Arbeitsverfahren 7
a) Satz-Betrieb 7
b) Säulenverfahren 7
c) Kontinuierliche Verfahren 14

B. Ionenaustauschertypen 14

I. Kunstharz-Ionenaustauscher 15
II. Mineralische und künstliche anorganische Ionenaustauscher 30
III. Kohle-Ionenaustauscher und andere Stoffe mit ionenaustauschenden Eigenschaften 33
IV. Cellulose-Ionenaustauscher 34
V. Ionenaustauscher-Membranen 37
VI. Flüssige Ionenaustauscher 40

C. Eigenschaften 41

I. Korngröße 41
II. Vernetzung 45
III. Quellung 48
IV. Kapazität 51
a) Bestimmung der Kapazität eines Kationenaustauschers 53
b) Bestimmung der Kapazität eines Anionenaustauschers 54
V. Selektivität und Spezifität 57
VI. Stabilität und Verschleiß 62
VII. Verhalten in nichtwässerigen Lösungsmitteln 64

D. Ionenaustauscher als präparative Hilfsmittel 68

I. Ionenumtausch 69
a) Darstellung von Säuren 69
b) Darstellung von Basen und Salzen 70
c) Herstellung von Normallösungen 71

Seite

II. Reinigung von Lösungen und Substraten 72
III. Konzentrierung von Lösungen 76
IV. Ionenaustauscher-Katalyse 80

E. Ionenaustauscher in der Pharmazie und Medizin 85
I. Pharmazie 86
II. Medizin 90

F. Ionenaustauscher in der analytischen Chemie 92
I. Vorbehandlung von Analysenlösungen 93
II. Verfahren der Analyse mit Ionenaustauschern 94
a) Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes 94
b) Trennung von Ionen entgegengesetzten Ladungssinnes 96
c) Ionenaustausch-Chromatographie 98
1. Grundlagen 98
2. Theorie 109
3. Anwendungen 115
III. Spezielle Anwendungen von Ionenaustauschern in der analytischen Chemie 129

G. Ionenaustauscher in der Technik 131
I. Allgemeine Technologie 131
a) Der Satz-Betrieb 132
b) Das Säulenverfahren (Festbettverfahren) 133
c) Kontinuierliche Verfahren 139
II. Wasseraufbereitung 140
a) Enthärtung 143
b) Teilentsalzung 144
c) Vollentsalzung 146
d) Mischbettaufbereitung 150
III. Weitere technische Anwendungen von Ionenaustauschern 152

H. Namenregister 158

I. Sachregister 161

A. Einführung

I. GESCHICHTE

Im Jahre 1850 berichteten THOMPSON[1]) und WAY[2]) über die Beobachtung, daß Ackerboden die Fähigkeit besitzt, verschiedene Ionen wie Ammoniumionen gegen Calcium- oder Magnesiumionen auszutauschen. SPENCE, ein Apotheker aus York, hatte im Auftrag Thompsons in einer Glassäule Erde aufgeschichtet und durch diese eine Lösung von Ammoniumsulfat laufen lassen. Im Durchlauf erhielt er anstelle des Ammoniumsulfats Calciumsulfat. Diese zunächst als Basenaustausch bezeichnete Erscheinung konnte von HENNEBERG und STOHMANN[3]) 1858 als chemischer Vorgang gedeutet werden, als es ihnen gelang, die Reversibilität und Äquivalenz derartiger Ionenaustauschvorgänge nachzuweisen. LEMBERG[4]) konnte schließlich 1870 zeigen, daß eine ganze Reihe natürlicher Mineralien, vor allem die Zeolithe, zum Ionenaustausch befähigt sind, wobei es ihm unter anderem gelang Leucit in Analcim umzuwandeln. Diese und ähnliche Beobachtungen blieben etwa fünfzig Jahre lang der Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen bis 1905 GANS[5]) auf synthetischem Wege anorganische Ionenaustauscher herstellte, von denen der Natriumpermutit praktische Anwendung in der Wasserreinigungstechnik fand.

Eine der wichtigsten Stationen innerhalb der Geschichte der Ionenaustauscher stellt die von ADAMS und HOLMES[6]) 1935 gemachte Entdeckung dar, daß Kunstharze ionenaustauschende Eigenschaften

---

[1]) H. S. THOMPSON, J. Roy. Agr. Soc. Engl. **11**, 68 (1850).
[2]) J. T. WAY, J. Roy. Agr. Soc. Engl. **11**, 313 (1850).
[3]) W. HENNEBERG und F. STOHMANN Am. Chem. Pharm. **107**, 152 (1858).
[4]) J. LEMBERG, Z. dtsch. geol. Ges. **22**, 355 (1870), **28**, 519 (1876).
[5]) R. GANS, Jahrb. Preuß. Geol. Landesanstalt **26**, 179 (1905); Chem. Ind. **32**, 197 (1909).
[6]) B. A. ADAMS und E. L. HOLMES E. P. 450 308/9 vom 13. 11. 1934, 553, 233 vom 13. 5. 1943, J. Soc. Chem. Ind. T **54**, 1 (1935) Chem. Age **38**, 117 (1938).

besitzen. Die IG-Farbenindustrie AG erwarb in Erkenntnis der Tragweite der Erfindungen von Adams und Holmes die diesbezüglichen Patente und führte ab 1936 die Entwicklung auf diesem Gebiet weiter mit dem Ziel, systematisch Ionenaustauscherharze mit gewünschten Eigenschaften herzustellen (GRIESSBACH[7]).

Die zunächst durch Polykondensation gewonnenen Ionenaustauscher wurden nach 1945 mehr und mehr durch Polymerisationsprodukte abgelöst, nachdem es D'ALELIO[8]) gelungen war, in ein vernetztes Polystyrolharz Sulfonsäuregruppen einzubauen. Die weitere Entwicklung beschäftigte sich mit der Verbesserung der Ionenaustauscherharze und mit der Herstellung von Spezialharzen mit spezifischen Ionenaustauschereigenschaften. SKOGSEID[9]) entwickelte einen kaliumspezifischen Austauscher und CASSIDY[10]) stellte, wie schon von GRIESSBACH, LAUTH und MEIER[11]) beschrieben, reduzierend und oxydierend wirkende Austauscher her. Welch stürmische Entwicklung das Arbeiten mit Ionenaustauschern nach 1945 genommen hat, geht aus der graphischen Darstellung der Abbildung 1 hervor, in der die Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen in Abhängigkeit vom Erscheinungsjahr auf-

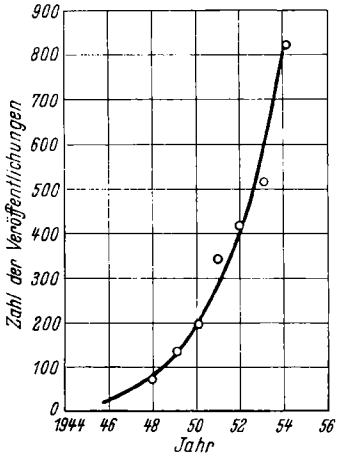

Abb. 1. Anzahl der Veröffentlichungen über Ionenaustausch als Funktion der Zeit (KUNIN und MCGARVEY, Ind. Eng. Chem. **47**, 565 [1955])

[7]) R. GRIESSBACH, Über die Herstellung und Anwendung neuerer Austauschadsorbentien, insbesondere auf Harzbasis, Angew. Chem. **52**, 215 (1939), Z. Ver. Deutscher Chem. Beiheft **31**, 1 (1939).

[8]) G. F. D'ALELIO, USP 2 366 007, 1945 (General Electric Co).

[9]) A. SKOGSEID, Dissertation, Oslo 1948.

[10]) H. G. CASSIDY, Electron Exchange-Polymers, J. Am. Chem. Soc. **71**, 402 (1949).

[11]) R. GRIESSBACH, H. LAUTH und E. MEIER, Dt. Patentanmeldung I 75 869 IV b, I 77 574 (1944).

getragen ist[12]). Die Methode des Ionenaustausches hat somit als wichtiges modernes Arbeitsverfahren Eingang in Labor und Technik gefunden[13]).

II. GRUNDBEGRIFFE

Ionenaustauscher sind feste und in geeigneter Weise unlöslich gemachte hochmolekulare Polyelektrolyte, die ihre gebundenen Ionen gegen Ionen gleicher Ladung aus dem umgebenden Medium austauschen können. Der dadurch zustandekommende Ionenaustausch ist reversibel und stöchiometrisch, wobei eine Ionenart durch eine andere am Austauscher verdrängt wird. Anders gesehen können Ionenaustauscher als hochmolekulare Säuren oder hochmolekulare Basen betrachtet werden und sind demnach zu H^+-Austausch oder OH^--Austausch befähigt. Wird eine derartige Festsäure aber mit einer Base zum Salz abgesättigt, so können die zunächst an den Polyelektrolyten gebundenen Kationen wiederum von anderen Kationen verdrängt werden und der resultierende Vorgang wird als Kationenaustausch und der Polyelektrolyt als Kationenaustauscher bezeichnet. Im zweiten Fall ergibt sich eine Festbase, die zum OH^--Austausch befähigt ist und mit einer Säure abgesättigt werden kann, wobei wiederum das zunächst gebundene Anion von einem anderen Anion verdrängt werden kann, ein Vorgang, der dann als Anionenaustausch und der Polyelektrolyt, an dem dieser Vorgang stattfindet, als Anionenaustauscher bezeichnet wird.

Die heute hauptsächlich verwendeten Ionenaustauscher sind synthetische organische Austauscher auf Kunstharzbasis. An ihnen lassen sich die grundlegenden Vorgänge am leichtesten darstellen und verstehen und andererseits können von dieser Grundlage aus alle später zu besprechenden auch allgemeinen Erscheinungen des Ionenaustausches leichter verstanden werden. In Abbildung 2 sind einige Ionenaustauschertypen wiedergegeben. Das Makromolekül des Ionenaustauschers stellt im allgemeinsten Fall ein dreidimensionales Netzwerk dar, an der eine große Zahl ionisierbarer Gruppen hängt. In Abbildung 3 ist ein derartiges Netzwerk eines stark saueren

[12]) R. KUNIN und F. MCGARVEY, Ion Exchange, Ind. Eng. Chem. **47**, 565 (1955).

[13]) H. DEUEL und F. HOSTETTLER, Hundert Jahre Ionenaustausch, Experientia **6**, 445 (1950).

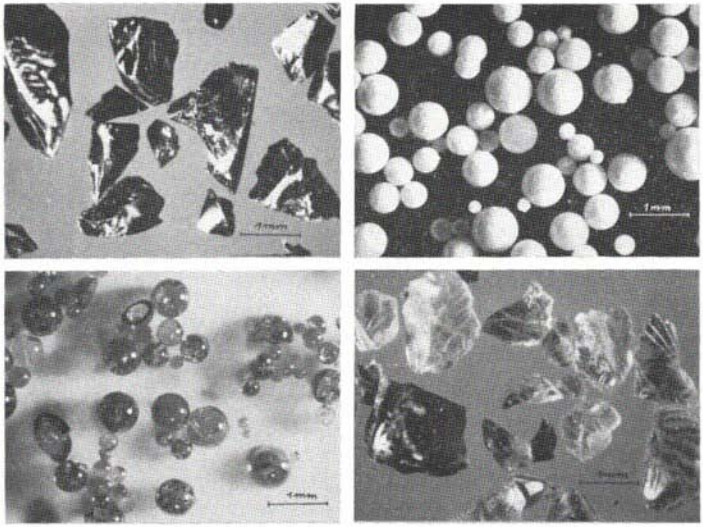

Abb. 2. Einige gebräuchliche Ionenaustauschertypen

a) schwach saurer Kationenaustauscher als Granulat
b) schwach basischer Anionenaustauscher in Kugelform
c) stark saurer Kationenaustauscher in Kugelform;
d) stark basischer Anionenaustauscher als Granulat

Kationenaustauschers, der als wirksame Zentren Sulfonsäuregruppen trägt, schematisch dargestellt.

Die Nomenklatur des Ionenaustausches umfaßt einige grundlegende Ausdrücke. Als Matrix bezeichnet man das aus verschiedenen Bauelementen aufgebaute hochmolekulare Gerüst, an dem die sogenannten Ankergruppen fest und chemisch gebunden sitzen; man bezeichnet diese als Festionen. Die heteropolar gebundenen austauschbaren Ionen werden als Gegenionen bezeichnet. Unter Coionen versteht man im Gegensatz dazu alle diejenigen Ionensorten, die sich in einem Austauscher befinden können, aber die gleiche Ladung besitzen wie die Festionen, also die von seinem Gegenion befreite Ankergruppe.

Als polyfunktionelle Ionenaustauscher bezeichnet man Austauscher, die Ankergruppen verschiedener Art aufweisen, während

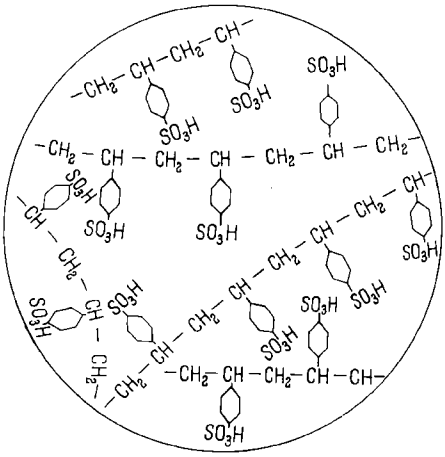

Abb. 3. Struktur eines stark sauren Polystyrolsulfonsäureharzes (unvernetzt)

monofunktionelle Ionenaustauscher nur eine Art von Ankergruppen enthalten. Die Gänge, die das Gerüst des Ionenaustauschers umschließen, heißen üblicherweise Poren.

Verwenden wir als Symbol für einen aus einer beliebigen Matrix mit beliebiger, n negative Ladungen tragenden Ankergruppe bestehenden Kationenaustauscher das Zeichen KA^{-n} und für ein einwertiges Kation das Zeichen G_1^+, so läßt sich ein Kationenaustausch allgemein folgendermaßen formulieren

$$KA^{-n} \cdot nG_1^+ + nG_2^+ \cdot nX^- \longrightarrow KA^{-n} \cdot nG_2^+ + nG_1^+ \cdot nX^-$$

der sich für den schon einen Spezialfall darstellenden Wasserstoffionenaustausch vereinfacht zu

$$KA^{-n}nH^+ + nG^+nX^- \longrightarrow KA^{-n}nG^+ + nH^+nX^-$$

und der zu einem der Neutralisation analogen Vorgang wird, wenn das für den Austausch vorgesehene Kation in der Hydroxydform also als Base zur Anwendung kommt

$$KA^{-n}nH^+ + nG^+nOH^- \longrightarrow KA^{-n}nG^+ + nH_2O\,.$$

In gleicher Weise verwenden wir für einen Anionenaustauscher als Symbol das Zeichen AA^{+m} und erhalten so für den Anionenaustausch die allgemeine Formulierung

$$AA^{+m}mG_1^- + mG_2^-mX^+ \longrightarrow AA^{+m}mG_2^- + mG_1^-mX^+$$

für den ebenfalls einen speziellen Fall darstellenden Hydroxylaustausch

$$AA^{+m}mOH^- + mG^-mX^+ \longrightarrow AA^{+m}mG^- + mOH^-mX^+$$

und wiederum für den der Neutralisation analogen Vorgang

$$AA^{+m}mOH^- + mG^-mH^+ \longrightarrow AA^{+m}mG^- + mH_2O\,.$$

Diese grundlegenden Formulierungen lassen sich, wie wir später sehen werden, auf alle Ionenaustauschervorgänge anwenden und können dann als verallgemeinerndes Schema von Nutzen sein, wenn bestimmte Vorgänge als Ionenaustauschvorgänge gedeutet werden sollen.

Damit Ionenaustauschvorgänge ablaufen können, bedarf es noch eines vermittelnden Agens, im allgemeinen Wasser, in dem die zum Austausch kommenden Ionen gelöst sind. Der in Wasser befindliche Ionenaustauscher enthält in seinen Poren Wasser, sodaß im gleichen Augenblick, in dem der Austauschvorgang eingeleitet wird, die gelösten Ionen in die Poren eindringen, mit den vorhandenen Gegenionen sozusagen Platz tauschen und, da die Elektroneutralität aufrecht erhalten werden muß, sich den vorher mit eingewanderten Coionen zugesellen. Physikalisch-chemisch gesehen ist also ein wichtiger Vorgang beim Ionenaustausch die Diffusion. Überläßt man das so geschaffene System seinem Schicksal, so stellt sich schließlich ein Gleichgewicht ein. Aus diesem kurz entworfenen Bild ist auch leicht einzusehen, daß Ionenaustauschvorgänge stöchiometrisch verlaufen.

Vielfach ist der Ionenaustausch mit einer Adsorption verglichen worden, was aber aus der erwähnten Stöchiometrie sofort als falsch erkannt werden kann, wenn auch Ionenaustauscher adsorbierende Eigenschaften besitzen können und auch besitzen und andererseits als Adsorbentien bezeichnete Stoffe, wie etwa Aluminiumoxyd oder Silicagel als Ionenaustauscher wirken können. Die Grenze ist hierbei nicht immer leicht zu ziehen.

III. ARBEITSVERFAHREN

Zur praktischen Durchführung des Ionenaustausches werden drei Verfahren angewendet: 1. der Satz-Betrieb, 2. das Säulenverfahren und 3. kontinuierliche Verfahren.

a) Satz-Betrieb

Der Satz-Betrieb ist das einfachste Ionenaustauschverfahren. Der Ionenaustauscher wird mit der Elektrolytlösung in einem beliebigen Gefäß solange in Berührung gebracht, bis sich ein Austauschgleichgewicht zwischen den Gegenionen des Austauschers und den Ionen gleicher Ladung der Elektrolytlösung eingestellt hat.

$$IA - G_1 + G_2X \rightleftharpoons IA - G_2 + G_1X$$

Bis zu welchem Grad dieser Vorgang stattfindet, hängt von der Gleichgewichtskonstante des Ionenaustauschsystems ab. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes wird der Ionenaustauscher abfiltriert. Sollen weitere Ionen durch den Austauscher aus der Elektrolytlösung eingetauscht werden, so muß neuer Ionenaustauscher zugefügt und nach Einstellung des Gleichgewichts wieder abfiltriert werden. Dieses Verfahren ist somit vergleichbar den diskontinuierlichen Ausschüttel- und Adsorptionsverfahren.

Die Anwendbarkeit des Satz-Betriebes ist beschränkt auf Austauschvorgänge, bei denen das Gleichgewicht stark auf der rechten Seite obiger Gleichung liegt. Dies ist immer gegeben, wenn ein Kationenaustauscher in der H-Form mit einer Metallsalzlösung und ein Anionenaustauscher in der OH-Form mit einer Säurelösung in Berührung gebracht wird. Bei beiden Vorgängen entsteht nach dem Ionenaustausch Wasser.

b) Säulenverfahren

Das Säulenverfahren ist das wichtigste und im Laboratorium am meisten angewendete Verfahren. Der Ionenaustauscher wird in einer Glassäule aufgeschichtet und in der dadurch geschaffenen Packung werden alle notwendigen Operationen durchgeführt. Grundsätzlich können dabei zwei Techniken unterschieden werden und zwar die der absteigenden und die der aufsteigenden Flüssigkeitsschicht. Im ersten Fall durchströmt eine Flüssigkeit die Ionenaustauscher-

packung von oben nach unten und im zweiten Fall von unten nach oben.

Liegt in einer Austauschersäule der Ionenaustauscher mit dem Gegenion G_1 vor, so hat man die apparative Anordnung vor sich, wie sie schematisch im Teil I der Abbildung 4 gezeigt ist. Das

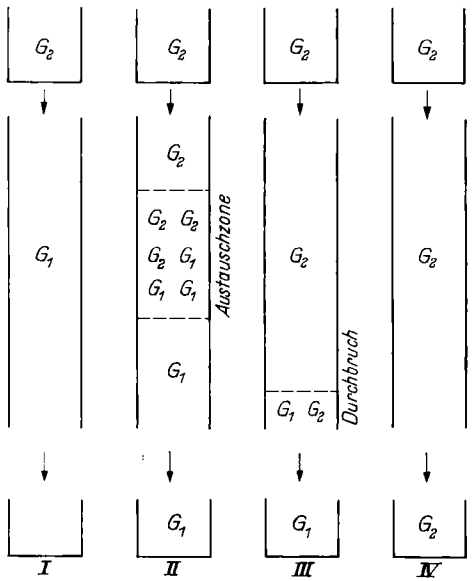

Abb. 4. Ionenaustausch im Säulenverfahren

Gegenion G_1 eines Austauschers soll gegen das Gegenion G_2 der in einem darüberliegenden Gefäß enthaltenen Lösung ausgetauscht werden. Sobald Lösung mit G_2 in die Austauscherpackung eingedrungen ist (Abb. 4, II) werden die Ionen G_2 vom Austauscher eingetauscht. Nach kurzer Zeit ist der Austauscher im oberen Teil der Säule ganz mit G_2 als Gegenionen beladen. Weitere Ionen G_2 durchlaufen diesen Teil der Packung ungehindert und kommen weiter unten in die sogenannte Austauschzone, wo die Gegenionen G_1 quantitativ mit den Ionen G_2 ihren Platz tauschen. Die Ionen G_1,

die dadurch frei werden, treten am unteren Ende im stöchiometrischen Verhältnis aus der Säule aus. Wird dieser Vorgang weitergeführt, so wandert die Austauschzone in der Säule weiter bis sie das untere Ende erreicht und der Gesamtvorgang an den Punkt angelangt ist, an dem gleichzeitig Ionen G_1 und G_2 aus der Säule austreten. Es erfolgt der Durchbruch, von dem ab die Konzentration der Ionen G_2 im Durchlauf stark ansteigt bis sie schließlich dieselbe Konzentration erreicht hat wie in der Lösung, die ursprünglich auf die Säule gegeben wurde (Abb. 4, III). Bei nochmaliger Aufgabe von G_2-Ionen (Abb. 4, IV) kann kein Ionenaustausch mehr stattfinden, da sich der gesamte Austauscher bereits in der G_2-Form befindet; die Ionen G_2 durchlaufen ungehindert die Säule.

Beim Durchwandern der Säule kommen die einzutauschenden Ionen immer wieder mit neuem Ionenaustauscher in Berührung, wodurch das Gleichgewicht mehr und mehr in die gewünschte Richtung verschoben wird. Der Ionenaustausch wird dadurch im Vergleich zum Satz-Betrieb auf einfache Weise vollständig.

In der Ionenaustausch-Literatur sind zahlreiche Säulen beschrieben worden, sei es, daß praktische Erwägungen zu neuen Konstruktionen führten oder daß bestimmte Verfahren diese notwendig machten. Grundsätzlich sollen die Abmessung von Durchmesser zur Höhe 1 : 10 bis 1 : 20 betragen. Sie müssen auf jeden Fall so gebaut sein, daß die Flüssigkeiten ungehindert durchfließen können.

Eine einfache Ionenaustausch-Säule kann man sich aus den gewöhnlichen in jedem Labor vorhandenen Hilfsmitteln selbst bauen. Wie Abbildung 5 zeigt, besteht sie aus einem einfachen Glasrohr, das an beiden Enden einen durchbohrten Stopfen trägt. Der untere ist mit einem Glasrohr versehen, an das über eine Schlauchverbindung eine Glasspitze als Tropfansatz angesetzt ist. Der Quetschhahn erlaubt, die Tropfgeschwindigkeit zu regulieren. Am oberen Ende trägt sie einen gewöhnlichen Tropftrichter als Vorratsgefäß. An den beiden Enden der Ionenaustauscher-Packung eingesetzte Wattebäusche (man verwendet Cellulosewatte, Kunstfaserwatte, Quarz- oder Glaswolle) verhindern einerseits die Verstopfung des Auslaufrohres durch Ionenaustauscher-Körner und andererseits das ständige Aufwirbeln der Ionenaustauscher-Packung. Ebenso läßt sich von einem Glasbläser eine mit Schliffen versehene Säule anfertigen (Abb. 6), auf die Vorratsgefäße verschiedener Größe aufge-

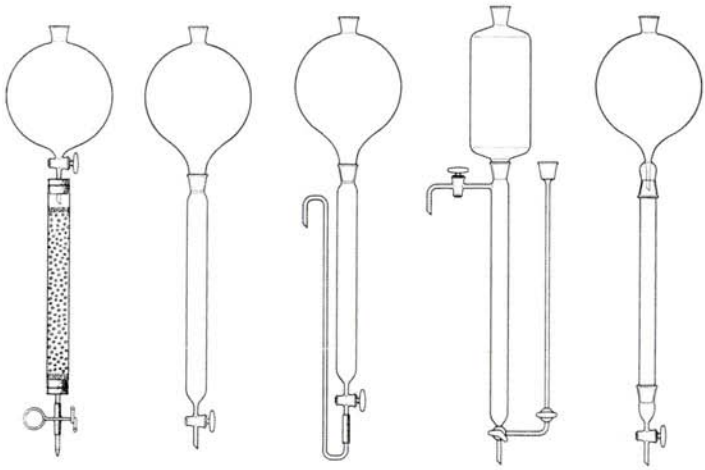

Abb. 5 Abb. 6 Abb. 7 Abb. 8 Abb. 9

Abb. 5. Einfache selbstgebaute Ionenaustauschersäule
Ab. 6. Ionenaustauschersäule mit Schliff
Abb. 7. Ionenaustauschersäule mit Überlaufrohr
Abb. 8. Gegenstromsäule
Abb. 9. Umkehrsäule nach WICKBOLD

setzt werden können. Durch die unter dem Auslaufhahn angebrachte Schlauchverbindung kann ein Überlaufrohr angesetzt werden (Abb. 7), wodurch das Leerlaufen der Säule verhindert wird. Manche Vorteile bietet eine sogenannte Gegenstromsäule (Abb. 8) die in einfacher Weise mit absteigender Flüssigkeitsschicht benutzt werden kann, zum anderen aber gestattet, auch mit aufsteigender Flüssigkeitsschicht zu arbeiten. Dies erreicht man durch entsprechende Stellung des Dreiweghahnes. Dabei durchströmt die Flüssigkeit die Säule aus dem rechten Ansatzstück und tritt über den linken oberen Hahn aus. Der dadurch erzielte Effekt wird bei Adsorptions- und Austauschverfahren als Rückspülung bezeichnet. Die Stoffe, die am oberen Ende der Säule ausgetauscht worden sind, müssen nicht erst den Weg durch die ganze Säulenpackung zurücklegen und