

Fällungsvorgänge als Ursache chromatographischer Fixierung anorganischer Ionen

Von

E. Hayek, F. Lorenz, H. Schimann und H. Ude

Aus dem Institut für Anorganische und Analytische Chemie der Universität
Innsbruck

(Eingegangen am 24. Dezember 1958)

Die Vorgänge bei der Chromatographie anorganischer Schwermetall-Kationen an Al_2O_3 und ähnlichen Adsorbentien erscheinen formal meist als Ionenaustausch oder molekulare Adsorption. Sie lassen sich jedoch vielfach auf Fällungsreaktionen zurückführen. Argumente für und gegen diese Erklärung werden diskutiert und neue Versuchsergebnisse beigebracht, welche diese Ansicht stützen, insbesondere der Vergleich der pH-Charakteristik im Suspensions- und Säulenversuch und die Reihung an verschiedenen Adsorbentien, welche wie Al_2O_3 durch Pufferung ein pH-Gebiet einstellen, das Fällung verursachen muß.

Neben den vielseitig angewandten und theoretisch gut fundierten Methoden der Ionenaustauscher- und der Verteilungschromatographie anorganischer Ionen, diese meist als Papierchromatographie durchgeführt, sind in den letzten 20 Jahren zahlreiche Publikationen¹ erschienen, welche chromatographische Vorgänge betreffen, die sich nicht eindeutig einer dieser Gruppen zuordnen lassen. Sie werden vielmehr meist durch Adsorptions- oder Austauschvorgänge gedeutet, seltener wird versucht, sie durch Fällungsreaktionen zu erklären, wobei mangels klarer Begriffsbildungen die widersprechendsten Ergebnisse aufscheinen.

Im folgenden werden aus der Literatur diejenigen Versuchsergebnisse und Beweisgründe, welche gegen und für das Vorliegen von Fällungs-

¹ Vgl. Sammelreferat über Adsorptions- und Fällungschromatographie anorganischer Verbindungen. *E. Hayek, J. Chromatogr.* (im Druck), auf welches in bezug auf Vollständigkeit der Literatur ausdrücklich verwiesen wird.

reaktionen sprechen, diskutiert und durch eigene Versuchsergebnisse ergänzt, um eine weitergehende Beurteilung dieses verwickelten Problems zu ermöglichen.

I. Gegen Fällung als Ursache der Fixierung

von Schwermetall-Kationen an der Al_2O_3 -Säule wird angeführt:

I. 1. Die Reihenfolge der Fixierung entspricht nicht der Hydroxylöslichkeit².

Gegenargumente:

- a) Wenn Fällung als Ursache der Fixierung anzunehmen ist, wird meist mit dem Kation auch Anion festgehalten. Es fallen also nicht immer Hydroxyde, sondern häufig Basische Salze, deren Fällung nicht mit der Hydroxylöslichkeit parallel gehen muß.
- b) Im speziellen Fall der Lanthanide geht die Reihung parallel der Hydroxylöslichkeit³.

I. 2. Basische Salze können nicht Ursache der Fixierung sein⁴, weil die zu erwartende Beeinflussung⁵ ihrer Reihung durch verschiedene Anionen nicht eintritt.

Gegenargumente:

- a) Die Beeinflussung, z. B. die Stabilitätserhöhung durch Zusatz von Sulfat an Stelle von Nitrat, geht im allgemeinen bei allen Kationen in gleiche Richtung. Sie verursacht daher keine Änderung der Reihung, sondern nur eine Änderung der Zonenlänge und Eluierbarkeit.
- b) Eine Beeinflussung der Zonenlänge² tritt auch bei der gleichzeitigen Chromatographie mehrerer Kationen ein, wobei nur die Zonenlänge der tiefer fixierten Kationen verkürzt erscheint. Dies ergibt sich aus der Anreicherung der abfließenden Flüssigkeit an Anionen, wenn nach $\text{MeX}_2 + \text{OH}^- = \text{Me}(\text{OH})\text{X} + \text{X}^-$ ein Teil des dem ersten Kation zugehörigen Anions in der durch Aufsaugen eines Teiles des Wassers konzentrierten Lösung verbleibt (Na^+ -haltiges Al_2O_3 vorausgesetzt). Es kann nun die Ausfällung des folgenden Kations als Basisches Salz gegenüber einer anionärmeren basischen Verbindung — oder einem Gemisch — durch X^- begünstigt werden, so daß weniger OH^- -Ion, aus einer kürzeren Al_2O_3 -Zone, völlige Fixierung der gleichen Kationmenge bewirkt. Vgl. ferner II. 1.

² G. M. Schwab und K. Jockers, Angew. Chem. **50**, 546 (1937).

³ W. Fischer, Angew. Chem. **62**, 413 (1950).

⁴ G. M. Schwab in Böttger, Phys. Meth. Analyt. Chem. III, 60 (1939).

⁵ E. Hayek, Mh. Chem. **65**, 233 (1935).

- c) Eine Beeinflussung der Reihung tritt durch solche Anionen ein, die besonders schwer lösliche Verbindungen liefern⁶; diese müssen jedoch keine basischen Salze sein (vgl. Versuchsteil III).

I. 3. Basische Salze können nicht die Ursache sein, weil das pH-Gebiet, in dem die Fixierung stattfindet, zu sauer ist⁷.

Gegenargumente:

- a) Basische Salze sind in der Regel nur im sauren Gebiet stabil. Schon die im anschließenden Gebiet höheren pH-Wertes beständigen Hydroxyde fallen meist bei $\text{pH} < 7$. Die Grenze auf der sauren Seite ist durch den pH-Wert der Salzlösung charakterisiert, welcher z. B. bei folgenden Werten liegt⁸ (in n/10 Lösung): CuSO_4 4,3, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 4,2, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 3,6.
- b) Statische Versuche, welche obigen Einwendungen zugrunde liegen, sind nur in gewissen Grenzen geeignet, Rückschlüsse auf die Zustände an der Säule zu gestatten, da sich an dieser extremere pH-Werte als im Suspensionsversuch ausbilden; vgl. *Hayek*⁹ und Versuchsteil III.

I. 4. Die Untersuchung des Systems Al_2O_3 -Metallsalzlösung unter dem Gesichtspunkt der Phasenregel ergibt, daß die Existenz einer eigenen festen Phase Basisches Salz nicht möglich erscheint⁷.

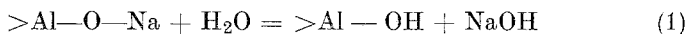
Gegenargument:

Wie zu I. 3. b.

I. 5. Die Umsetzungen auf der Al_2O_3 -Säule erweisen sich analytisch als Austauschreaktion des Metalls gegen Natrium (vgl. 1).

Gegenargument:

Das aus der Herstellung in den käuflichen Al_2O_3 -Präparaten enthaltene Na^+ -Ion ist dort im wesentlichen als Aluminat gebunden und wird leicht zu NaOH hydrolysiert. Die chromatographische Reaktion läßt sich in folgende Stufen zerlegen:



Sie erscheint formal als Austausch, ist aber eine Fällungsreaktion. Die Umsetzung ist dabei keineswegs auf die Stellen lokalisiert, an denen das Na^+ -Ion ursprünglich saß.

⁶ *E. Hayek* und *F. Lorenz*, Mh. Chem. **84**, 647 (1953).

⁷ *J. D'Ans* und *D. Jänchen*, Chemiker-Ztg. **79**, 605 (1955) und andere.

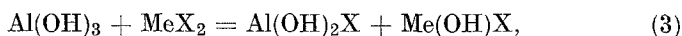
⁸ *H. F. Brown* und *J. A. Cranston*, J. Chem. Soc. [London] **1940**, 578.

⁹ *E. Hayek* und *H. Schimann*, Mh. Chem. **88**, 686 (1957).

I. 6. Die Umsetzungen von (Schwer-)Metallsalzlösungen auf reinen Al_2O_3 -Säulen erweisen sich analytisch als äquivalente Fixierung von Kation und Anion, sie sind daher als molekulare Adsorption oder auf Grund elektrostatischer Kräfte zu erklären¹.

Gegenargument:

An reinem Al_2O_3 , ebenso am Na^+ -hältigen über die Reaktion nach Gl. (1) und Gl. (2) hinaus, geht eine Umsetzung vor sich nach Gl. (3):



welche formal einen Ionenaustausch darstellt, analytisch eine „äquivalente Adsorption“ ist. Wenn sich so an der Oberfläche zwei neue Verbindungen bilden, werden diese entsprechend der zwar kleinen, aber doch nicht unerheblichen Löslichkeit von $\text{Al}(\text{OH})_3$ und der Reaktionsprodukte nicht auf bestimmte Zentren der Oberfläche lokalisiert, jedoch weitgehend von diesen bestimmt sein. Eine absolut strenge Lokalisierung des Austausches jeweils nur einer Ionenart findet nur bei vollkommen unlöslichen Substanzen statt, welche ein hochmolekulares Gitter (Kationen- oder Anionengitter) bilden und die Gegenionen austauschen können. Beispiele für einen solchen idealen *strukturkonstanten Austausch* sind die Austauschharze und die Zeolithe. Beim Al_2O_3 ist hingegen der Fällungsvorgang die wesentliche Reaktion, sie stellt einen nur formalen, *strukturvarianten Austausch* dar. Eine andere strukturvariante Austauschreaktion wäre die Oberflächenreaktion oder völlige Umwandlung von Silberchlorid, in Kaliumbromidlösung suspendiert, zu Silberbromid.

I. 7. Die in äquivalenten Beträgen an der Al_2O_3 -Säule adsorbierten Salze lassen sich als solche eluieren, es handelt sich daher um molekulare oder ionische Adsorption¹.

Gegenargument:

Wenn eine Fixierung an der Säule nach Gl. (3) stattgefunden hat und dann mit Wasser nachgewaschen wird, ändert sich der pH-Wert der das Adsorbat umgebenden Lösung, und $\text{Me}(\text{OH})\text{X}$ ist unter diesen Umständen nicht mehr stabil, sondern erleidet eine Hydrolyse, z. B. nach



(Die Bezeichnung „Hydrolyse“ für solche Reaktionen erscheint durchaus sinnvoll, obwohl Wasser in der Reaktionsgleichung nicht in Erscheinung tritt, da eine Spaltung in eine mehr sauer reagierende Lösung und einen der Zusammensetzung nach alkalischeren Bodenkörper eintritt. Die Bezeichnung Hydrolyse ist daher der manchmal in solchen Fällen gebrauchten „Disproportionierung“ vorzuziehen.)

MeX_2 wird ausgewaschen, $\text{Al(OH)}_2\text{X}$ reagiert mit Me(OH)_2 , wahrscheinlich über hydrolytisch gebildetes HX , nach



welches wieder nach Gl. (4) sich weiter umsetzt, so daß in weiterer Folge alles Me^{2+} -Ion als MeX_2 eluiert werden kann, wenn auch, wie das Experiment zeigt, erst durch längeres Auswaschen. Eine unter gewissen Umständen auftretende Löslichkeit Basischer Salze, wie des $\text{Al(OH)}_2\text{Cl}$, kompliziert die Vorgänge und macht sie weniger übersichtlich. Äquivalente Adsorption ist aber jedenfalls nicht unbedingt gleichbedeutend mit physikalischer (ionischer oder molekularer) Adsorption.

II. Experimentelle Ergebnisse aus der Literatur

welche bisher nicht oder nur unvollständig im Sinne von Fällungsreaktionen gedeutet werden.

II. 1. Verwendung von Sulfat als Anion verkürzt die Zonen gegenüber den aus Nitraten oder Chloriden erhaltenen².

Mögliche Erklärung:

Sulfate bilden im allgemeinen gegen Hydrolyse stabilere und oft auch weniger stark basische Salze als Nitrate und Chloride¹⁰. Infolgedessen genügt eine geringere Menge von OH^- -Ion, also abgespalten von einer schmäleren Al_2O_3 -Zone, zur Fixierung der gleichen Menge Kation. Im gleichen Sinne ist die Feststellung von *Schwab*⁴ zu deuten, daß die Kationenadsorption um so dichter ist, je adsorbierbarer das mitadsorbierte Anion ist. Nach *Umland*¹¹ wird Cu^{2+} , aus einer Sulfatlösung adsorbiert, langsamer eluiert als das aus einer Chloridlösung adsorbierte.

II. 2. Zusatz von Alkalisalzen verursacht allgemein Verkürzung der Zonen der Schwermetallsalze auf Al_2O_3 .

Mögliche Erklärung:

- a) Aus der Reaktion $\text{Al(OH)}_3 + \text{KCl} = \text{Al(OH)}_2\text{Cl} + \text{KOH}$ wird Hydroxylyon gebildet, welches zusätzlich fällend wirkt¹².
- b) Außerdem kann eine Beeinflussung der Löslichkeit eines gebildeten Basischen Salzes durch Vergrößerung der Anionenkonzentration entsprechend dem Löslichkeitsprodukt eine Rolle spielen.

II. 3. Ag^+ und Tl^+ werden durch Zusätze löslicher Alkalisalze im Gegensatz zu den mehrwertigen Schwermetallsalzen nicht in der Zonenlänge beeinflusst.

¹⁰ *E. Hayek*, Mh. Chem. **77**, 58 (1948).

¹¹ *F. Umland*, Z. Elektrochem. **60**, 689 (1956).

¹² *W. Noddack* und *E. Bankmann*, Z. Elektrochem. **58**, 725 (1954).

Erklärung:

Die einwertigen Schwermetalle bilden keine Basischen Salze¹⁰, daher kann eine Beeinflussung nach II. 2. b. nicht erfolgen.

II. 4. Temperatursteigerung erhöht die pro Volumeinheit am Al_2O_3 fixierte Schwermetallmenge^{13, 14} (Versuchsteil III).

Erklärung:

Die Tatsache spricht gegen jede Adsorption auf Grund elektrostatischer Kräfte, welche mit steigender Temperatur abnehmen müßte, ist aber mit Zunahme der Hydrolyse und dadurch verursachter Fällung vereinbar.

II. 5. Eine Verdrängung bereits an Al_2O_3 fixierter Kationen ist auch durch solche Ionen, die bei gleichzeitiger Aufgabe auf die Säule ober diesen festgehalten werden, nicht oder nur unvollkommen möglich, sie wird nur durch relativ stark saure Lösungen bewirkt.

Erklärung:

Die Verdrängung durch Metallsalze findet nur entsprechend der hydrolytisch gebildeten H^+ -Ionenkonzentration statt, und zwar durch einen Lösungsvorgang, welcher jedoch im allgemeinen nicht die nötige Geschwindigkeit erreicht, um während des chromatographischen Durchflusses völlige Verdrängung zu bewirken; nur stark saure Lösungen (stark hydrolysierte Metallsalze oder Säuren) können dies.

II. 6. Die gleiche Reihung der Kationen wird erhalten an Na-hältigem sowie reinem Al_2O_3 ¹, ebenso an MgO ^{14, 15}, Glaspulver, La_2O_3 und am Na-Salz eines Carbonsäureaustauschers (s. Versuchsteil III) und an einem stark basischen Anionenaustauscher oder einer anderen „Festbase“¹⁵.

Erklärung:

Das Gemeinsame aller dieser Adsorbentien ist nur die Fähigkeit, die H^+ -Ionenkonzentration der aufgegebenen Lösung herabzusetzen und dadurch die Hydrolyse der Metallsalzlösungen zu begünstigen sowie pH-bedingte Fällungen⁶ zu verursachen.

III. Experimenteller Teil

Zu I. 2. Beeinflussung der Kationen-Reihung durch Anionen

Wie erwähnt, beeinflussen solche Anionen, die in bezug auf die Schwerlöslichkeit der entstehenden Verbindungen mit dem OH^- -Ion konkurrieren

¹³ L. Sacconi, Discuss. Faraday Soc. 7, 173 (1949).

¹⁴ G. Heinrich, Naturwiss. 39, 257 (1952).

¹⁵ H. Schäfer und W. Neugebauer, Z. Anorg. Allgem. Chem. 274, 114 (1953).

können, die Kationenreihung. So werden auf reinem ZnS Sulfide gefällt. Sobald ZnS aber an Luft erhitzt wurde und dadurch einen gewissen ZnO-Gehalt aufweist, ändert sich die Reihung: Am reinen Sulfid steht schwarzes CuS oben, während Fe^{3+} nur schlecht darunter festgehalten wird, zum größeren Teil aber abfließt. An oxydiertem ZnS steht die braune $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Zone ober der schwarzen CuS-Zone.

In ähnlicher Weise ist die Reihung Cu-Fe auf einer Zinkkaliumferrocyanid-Säule⁶ abhängig von dem bei der Herstellung herrschenden pH-Wert. Ein bei pH 5,1 hergestelltes Präparat zeigt Cu als braune Zone ober der blauen Eisenzone, das bei pH 8,1 hergestellte Adsorbens zeigt, auch wenn es sehr gut ausgewaschen ist, eine braune Eisenzone ober der des Kupferferrocyanides.

Die Stellung des Silbers an Al_2O_3 oder Glaspulver wird durch Phosphat-Ion und verschiedene pH-Werte so beeinflusst, daß verschieden breite Zonen von gelbem Silberphosphat und grauem Silberoxyd entstehen, die bei gleichzeitiger Anwesenheit von Cu^{2+} durch dessen blaue Zone getrennt werden.

Zu I. 3. und I. 6. Vergleich der pH-Werte in Suspensions- und Säulenversuch

Nach *Hesse*¹⁶ wurden durch Schütteln steigender Mengen verschiedener Aluminiumoxydpräparate in gleicher Menge Wasser die pH-Endwerte solcher Suspensionen ermittelt:

		g Al_2O_3 /100 ml Wasser				
		1	2	3	5	10
Al_2O_3	Merck, nach <i>Brockmann</i>	7,2	7,9	8,0	8,1	8,1
Al_2O_3	basisch, Woelm	7,4	8,2	8,4	8,5	8,5
Al_2O_3	sauer, Woelm	5,8	5,5	5,3	4,9	4,8

Andererseits wurde jeweils 1 g der gleichen Adsorbentien in Chromatographieröhrchen von 5 mm l. W. eingefüllt und der pH-Wert des aufgegebenen Wassers nach dem Durchfluß je 2 ml-weise bestimmt:

		2	4	6	10	20	30	40	60	80 ml
Al_2O_3	Merck	8,7	8,4	8,1	7,2	6,8	6,6	—	—	—
Al_2O_3	bas. Woelm	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,1	8,1	8,1	7,2
Al_2O_3	sauer Woelm	4,0	4,6	4,8	5,2	5,8	5,8	5,8	6,0	6,0

Es zeigt sich, daß die beiden ersten Milliliter des Präparates Merck um 0,6 pH-Einheiten basischer erscheinen, als sich aus dem Suspensionsversuch ergibt, beim Woelmschen Präparat ist der Unterschied nur 0,2 Einheiten, erstreckt sich aber über 20 ml. Das sauer formierte Adsorbens zeigt einen um 0,8 pH-Stufen niederen Wert als in Suspension, deren Wert wird auch erst nach 20 ml erreicht. Die pH-Verhältnisse im Säulenversuch sind also deutlich extremer als im statischen System.

Zu II. 4. und II. 6. Kationenchromatographie an Glas und Temperaturabhängigkeit der Belegungsdichte

Wie bereits kurz berichtet⁶, eignet sich auch Glaspulver zur chromatographischen Fixierung von Kationen. Verwendet wurde weißes Flaschenglas in der Korngröße von etwa 0,06 mm.

¹⁶ *G. Hesse* und *O. Sauter*, *Angew. Chem.* **61**, 24 (1949).

Im Suspensionsversuch nach *Hesse* zeigt dieses Glaspulver hohe pH-Werte, welche durch Waschen mit Salzsäure herabgedrückt werden können.

	g/100 ml Wasser					
	1	2	3	5	7	10
Ungewaschenes Glaspulver	9,2	9,6	9,9	10,1	10,2	10,4
mit 2n HCl gewaschen	6,3	8,3	8,9	9,1	9,2	9,3

Gute Zonenbildung wurde nur bei sehr langsamer Durchlaufgeschwindigkeit erzielt oder bei Präparaten besonders ausgewählter Korngröße und mittlerer Alkalität. Die Zonen erwiesen sich kurz nach der Bildung als eluierbar mit Wasser, nach längerem Stehen wird dies jedoch unmöglich. Steigende Temperatur begünstigt die einheitliche Zonenbildung und ihre Stabilität wesentlich. Die mitgebundene Anionmenge (Chlorid) ist von der Alkalität des Säulenmaterials und der Temperatur abhängig, nämlich mit ihr abnehmend. Dies deutet wiederum auf hydrolytische Fällungsvorgänge hin. Die Reihung stimmt mit der an Al_2O_3 bekannten überein, nur verteilen sich Silber und Blei mehr über die ganze Säule als am Aluminiumoxyd.

Zu II. 6. Kationenchromatographie an La_2O_3

Das Adsorbens wurde hergestellt durch Fällung von LaCl_3 -Lösung mit NaOH, Waschen bis zur Cl⁻-Freiheit, Trocknen und Glühen bei 600°. Durch Sieben wurde eine Korngröße von 0,1—0,06 mm abgetrennt und nach mehrmaligem Waschen bei 100° getrocknet. Die chromatographischen Versuche wurden in Celluloseröhrchen von 3 mm l. W. durchgeführt mit je 0,5 ml 0,05 m Salzlösungen, Nachwaschen mit 1 ml Wasser und Anfärben mit den üblichen Reagentien.

Die Ionen Cr^{3+} , Fe^{3+} , Hg^{2+} , UO_2^{2+} , Pb^{2+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Ag^+ , Ni^{2+} wurden paarweise auf die Säule gebracht und trennten sich im allgemeinen gut in der angegebenen Reihung, welche der bekannten Anordnung am Al_2O_3 völlig gleicht.

Zu II. 6. Kationenchromatographie an Carbonsäure- und Sulfonsäure-Austauscherharz

Es wurde Amberlite IRC 50 verwendet, die Umwandlung in die Na-Form erfolgte in verschiedener Weise durch Behandeln mit NaOH, NaCl oder Na_2HPO_4 .

Die Umwandlung geht mit NaOH am raschesten vor sich, ist jedoch verbunden mit starker Quellung. Durch Auswaschen kann das NaOH nicht ganz entfernt werden. Aufgegebenes Schwermetallsalz gibt wegen zu hoher Alkalität vielfach schlechte Zonentrennungen, da die OH⁻-Ionen zu rasch und in zu großer Menge zur Verfügung stehen. Immerhin ergibt sich wieder die vom Al_2O_3 bekannte Reihung, nur scheint Cr^{3+} tiefer zu stehen und Hg^{2+} mit Fe^{3+} Platz zu tauschen.

Die Herstellung der Na-Form mit NaCl wurde durch mehrfach wiederholtes Suspendieren in 10-proz. NaCl-Lösung bis zur Einstellung eines konstanten pH-Wertes über dem Harz durchgeführt. Die pH-Charakteristik dieses Präparates im Suspensionsversuch ergibt, unabhängig vom Mengenverhältnis, den pH-Wert 6,6, im Säulenversuch zeigten hingegen die ersten 2 ml Wasser pH = 5,4, die nächsten 6,4 und dann erst stellte sich 6,6 konstant ein. Die niederen Anfangswerte könnten durch geringe Mengen Säure, die durch die Trocknung bei 100° in Freiheit gesetzt wurden, entstanden sein. Die Zonentrennung war scharf, doch die Belegungsdichte wesentlich geringer

als bei dem mit NaOH behandelten Präparat. Die Reihung war mit Ausnahme des Tausches Fe^{3+} - Hg^{2+} dieselbe wie an Al_2O_3 .

Die besten Ergebnisse wurden an dem mit Na_2HPO_4 hergestellten Na-Salz des Carbonsäureaustauschers erhalten, aus welchen das PO_4^{3-} -Ion durch Waschen mit Wasser völlig entfernt war. Es verband hohe Belegungsdichte ohne wesentliche Quellung mit scharfer Zonentrennung bei gleicher Reihung wie das NaCl-Präparat.

Zum Vergleich wurde auch die Reihung an einem Sulfonsäureharzaustauscher, Dowex 50 W — X, überprüft. Sie ergab sich erwartungsgemäß in der H- und Na-Form gleich, aber mehrfach verschieden vom Carbonsäureaustauscher: .

Sulfonsäureharz: Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Hg^{2+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Ag^+ , UO_2^{2+}

Carbonsäureharz: Hg^{2+} , Fe^{3+} , UO_2^{2+} , Pb^{2+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Ag^+ , Ni^{2+}

Offensichtlich verursacht der verschiedene Mechanismus, Austausch bzw. Fällung, die verschiedene Reihung.

Auch beim Sulfonsäureharz ergeben sich wesentliche Unterschiede zwischen der pH-Charakteristik in Suspension und an der Säule:

pH-Wert im Suspensionsversuch:

	H-Form	Na-Form
1 g/100 ml Wasser	5,8	6,0
2 g	5,8	6,1
3 g	5,6	6,1
5 g	5,5	6,2
10 g	5,4	6,3

pH-Wert im Säulenversuch:

1 ml Wasser ablaufend	4,4	6,3
3	5,0	6,2
5	5,4	6,2
7	5,6	6,1
11	5,9	6,0
15	5,9	6,0