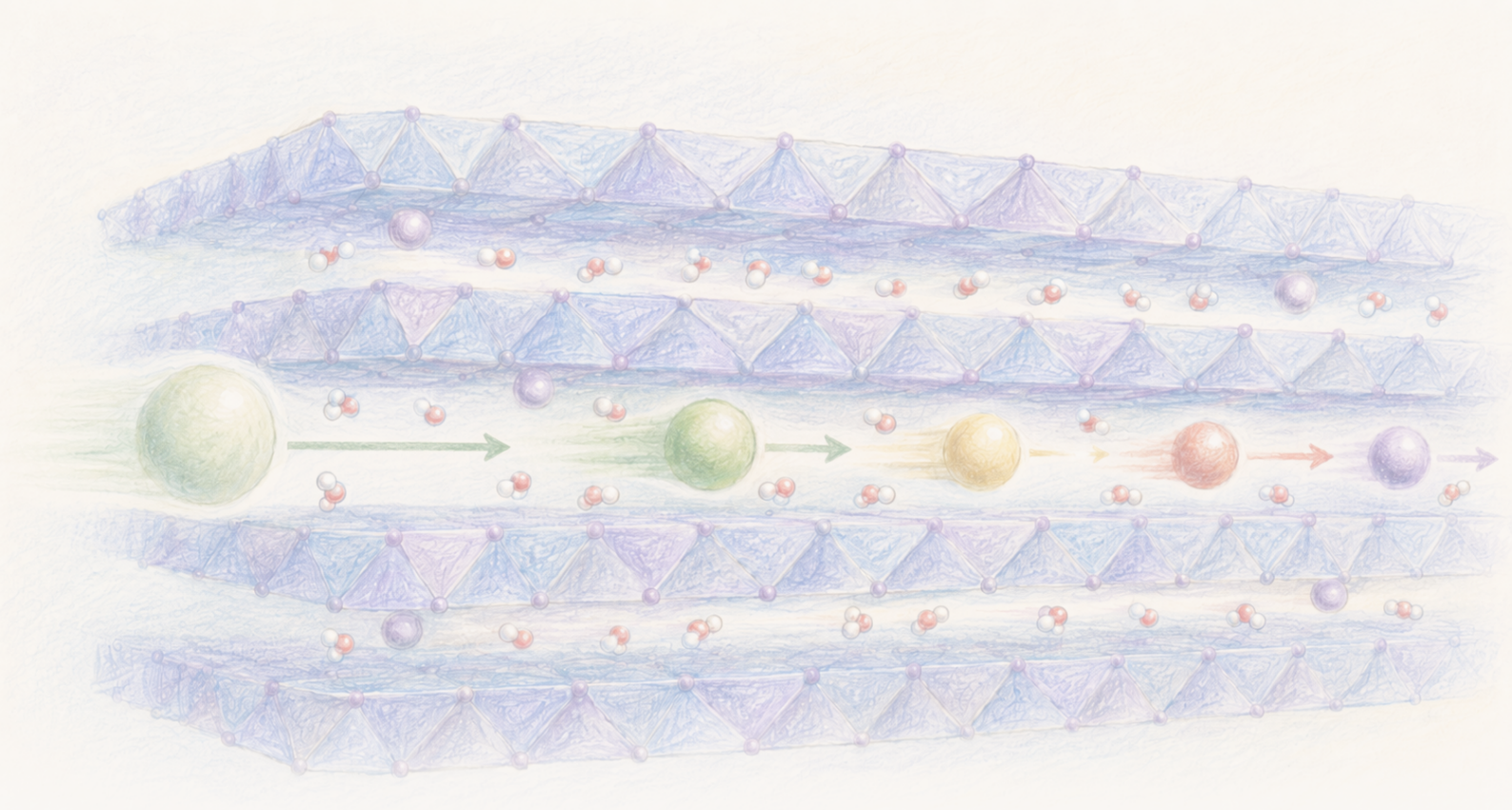


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Das Fixieren eines wassergefüllten Mineralkanals half, ähnliche Seltenerdionen zu trennen

Magnesium hielt einen hydratisierten Manganoxidspalt ungefähr auf der Breite der Wasserhülle eines Lanthanoidions und verbesserte in Labortests die Anreicherung ausgewählter Ionenpaare. Die gezeigten Versuche arbeiteten mit Millilitern Lösung und Milligramm Material; Durchflussbetrieb, lange Zyklenfestigkeit und die kommerzielle Umweltbilanz sind noch nicht belegt.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

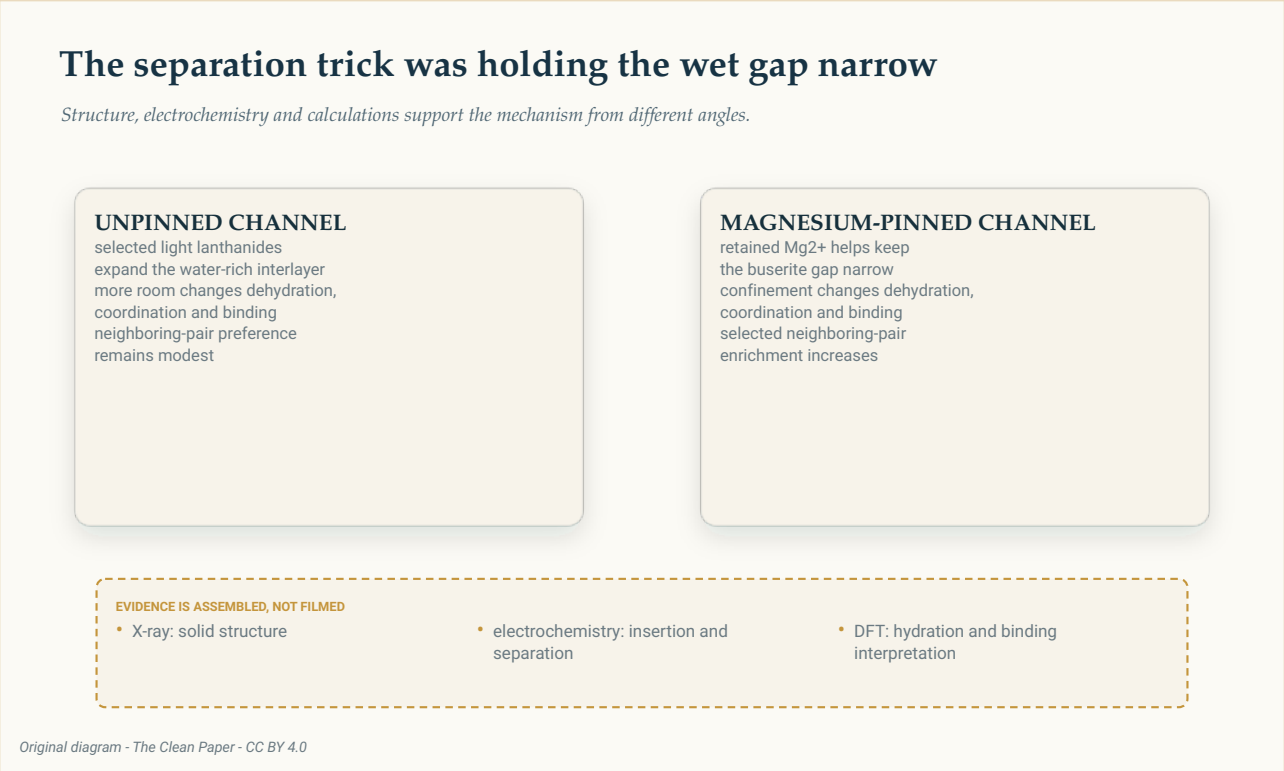
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Das Fixieren eines wassergefüllten Mineralkanals half, ähnliche Seltenerdionen zu trennen

Seltenerdionen sind aus demselben Grund schwer zu trennen, aus dem sich Geschwister aus der Ferne schwer unterscheiden lassen: Die Unterschiede sind real, aber klein.

Die Lanthanoide stehen im Periodensystem nebeneinander und bilden meist Ionen mit derselben Ladung. Ihre Größen ändern sich über die Reihe hinweg allmählich, während ihr chemisches Verhalten ähnlich bleibt. Die industrielle Raffination benötigt deshalb viele wiederholte Trennschritte.

Eine neue Laborstudie ging dieses Problem über räumliche Einschließung an. Die Forschenden verwendeten gestapelte Manganoxidschichten mit einem wassergefüllten Spalt dazwischen. Ein Seltenerdion nähert sich diesem Spalt von Wassermolekülen umgeben. Ohne Verstrebung können sich die Schichten auseinanderbewegen und ihm Platz machen. Magnesiumionen wirkten wie eine Verstrebung: Wenn sie zwischen den Schichten verblieben, halfen sie, den Spalt schmal zu halten. Verschiedene Seltenerdionen mussten dann unterschiedlich viel Energie aufbringen, um einen Teil ihres Wassers abzugeben, in den Kanal einzutreten und an Sauerstoffatome im Feststoff zu binden.



Der nicht fixierte und der magnesiumfixierte Kanal sind mechanistische Deutungen, die durch Strukturmessungen, Elektrochemie und Berechnungen gestützt werden. Kein einzelnes Experiment beobachtete die vollständige molekulare Abfolge.

The Clean Paper CC BY 4.0

Bei einem getesteten Paar, Lanthan und Neodym, erhöhte diese **Fixierung** den Anreicherungsfaktor von 1,6 auf **5,4**. Für Lanthan und Praseodym stieg er von 1,5 auf **4,2**. Ein Anreicherungsfaktor vergle-

icht das Verhältnis der beiden Ionen nach der Trennung mit ihrem Verhältnis davor. Ein Wert von 1 würde keine Bevorzugung bedeuten; 5,4 heißt, dass das aufgenommene Material Neodym gegenüber Lanthan 5,4-mal stärker bevorzugte als das Ausgangsgemisch.

Das sind aussagekräftige, paarspezifische Laborergebnisse. Sie belegen nicht, dass nun jede Seltene Erde sauber getrennt werden kann, dass ein Durchflussverfahren demonstriert wurde oder dass die Lösungsmittelextraktion ersetzt werden kann.

Die stärkste Idee der Arbeit ist kleiner als eine Raffinerie: einen nassen Mineralspalt daran hindern, sich zu öffnen.

Ein Ion in Wasser ist größer als das nackte Atom

Zu den Seltenerdelementen gehören die Lanthanoide sowie Scandium und Yttrium. Die Studie untersuchte zwölf positiv geladene Lanthanoidionen von Lanthan bis Ytterbium. Cer wurde ausgeschlossen, weil es seinen Oxidationszustand leicht ändert, und das radioaktive Promethium ebenfalls.

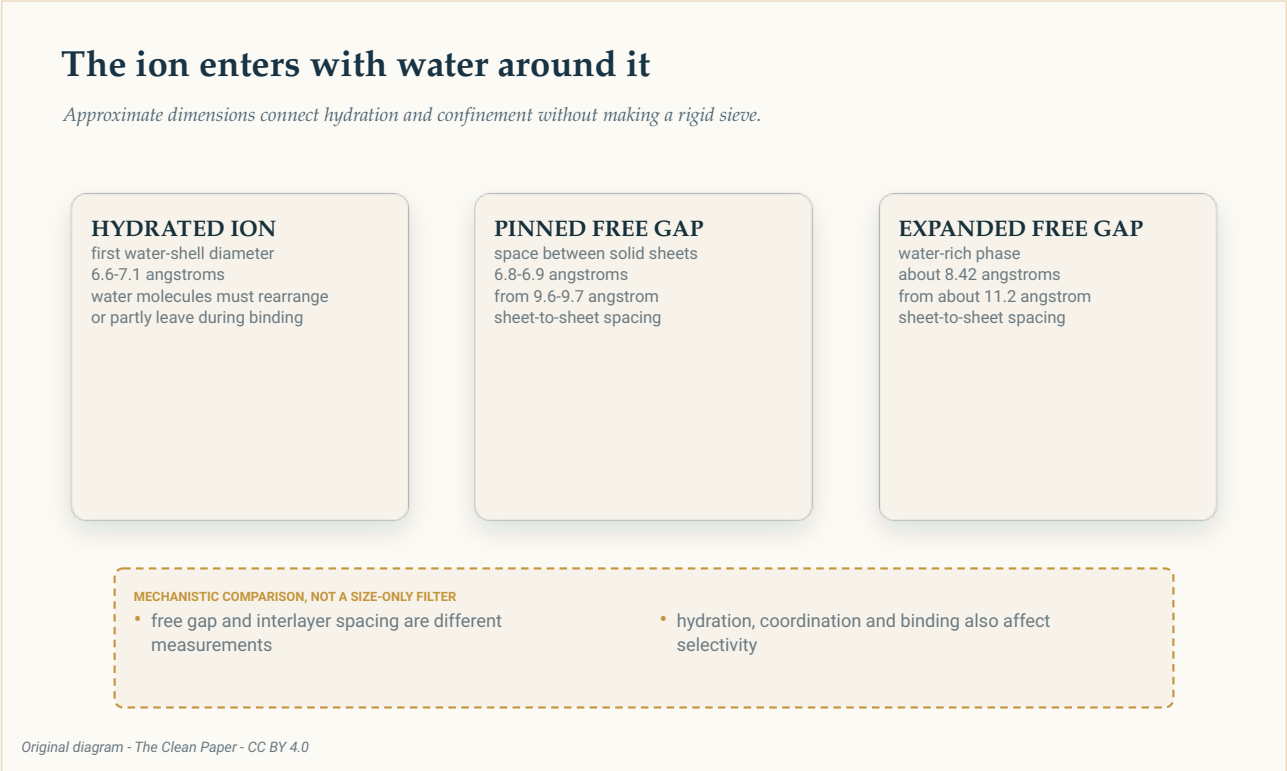
Im Wasser bewegt sich ein Ion nicht allein. Wassermoleküle ordnen sich um seine Ladung an und bilden eine **Hydrathülle**. Um in einen schmalen Kanal einzutreten und an einen Feststoff zu binden, muss das Ion möglicherweise einen Teil dieser Wasserschicht neu anordnen oder abstreifen. Die Energiekosten hängen sowohl vom Ion als auch von seiner Umgebung ab.

Die Abmessungen werden in **Ångström (Å)** angegeben. Ein Ångström ist ein Zehnmilliardstel Meter (**1 Å =** 10^{-10} **m**). Für die ersten Hydrathüllen der untersuchten Lanthanoide wurden Durchmesser von ungefähr **6,6 bis 7,1 Å** angegeben.

Die Forschenden verwendeten ein hydratisiertes, geschichtetes Manganoxid namens Buserit. Seine gestapelten Schichten lagen etwa **9,6 bis 9,7 Ångström** auseinander, gemessen von einer sich wiederholenden Schichtposition zur nächsten. Doch die Schicht selbst nimmt Raum ein. Der freie wassergefüllte Spalt zwischen den Schichten betrug nur etwa **6,8 bis 6,9 Ångström**.

Diese Unterscheidung ist wichtig. Ein Zwischenschichtabstand von 9,7 Ångström ist kein 9,7 Ångström breiter offener Kanal.

Einige leichtere Lanthanoide ließen die Struktur in eine wasserreichere Phase aufquellen. Dort betrug der Abstand von Schicht zu Schicht etwa **11,2 Ångström** und der geschätzte freie Spalt etwa **8,42 Ångström**. Eine schmalere verwandte Struktur, Birnessit, hatte einen freien Spalt von ungefähr **4,42 Ångström**.



Verglichen werden der ungefähre Durchmesser der Hydrathülle und der freie wassergefüllte Spalt, nicht ein nacktes Ion und der gesamte Abstand von Schicht zu Schicht. Die Größe ist Teil des Mechanismus, aber nicht die ganze Erklärung.

The Clean Paper CC BY 4.0

Das Mineral kann sich an das Ion anpassen

Ohne Magnesiumfixierung ist der Kanal kein starres Sieb: Seine gestapelten Schichten können sich bewegen. In den Experimenten ließen die leichteren Ionen Lanthan, Praseodym und Neodym das Material mehr Wasser aufnehmen und sich weiter öffnen. Die schwereren Ionen von Europium bis Ytterbium ließen den schmaleren Kanal eher unverändert. Samarium lag zwischen diesen beiden Reaktionen.

Die Arbeit nennt die erste Reaktion **Gruppe I** und die zweite **Gruppe II**. Das sind Bezeichnungen dafür, wie die Ionen dieses spezielle Material reagieren ließen, keine Gruppennummern des Periodensystems. Unter anderen Versuchsbedingungen könnte sich auch die Grenze verschieben.

Dieser strukturelle Unterschied half bei Paaren aus verschiedenen Gruppen. Beim direkten Ionenaustausch lag der angegebene Anreicherungsfaktor bei **7,8** für Lanthan gegenüber Dysprosium, **5,7** für Praseodym gegenüber Dysprosium, **4,5** für Neodym gegenüber Dysprosium und **2,6** für Neodym gegenüber Europium.

Die meisten benachbarten Paare waren erheblich schwieriger, mit Anreicherungsfaktoren nahe 1,1. Ein Faktor nahe 1 bedeutet nur geringe Bevorzugung. Das Material konnte leichter unterscheiden,

wenn die beiden Ionen unterschiedliche Kanalstrukturen begünstigten, als wenn sie innerhalb derselben Reaktionsgruppe dicht beieinanderlagen.

Magnesium fixiert den Kanal

Anschließend nutzten die Forschenden **elektrochemische Interkalation**: eine elektrische Reaktion, die Ionen zwischen Feststoffschichten einlagert. Magnesiumionen blieben im Kanal, während Seltenerdionen eintraten. Das zurückgehaltene Magnesium half, eine Aufweitung des Buseritabstands zu verhindern.

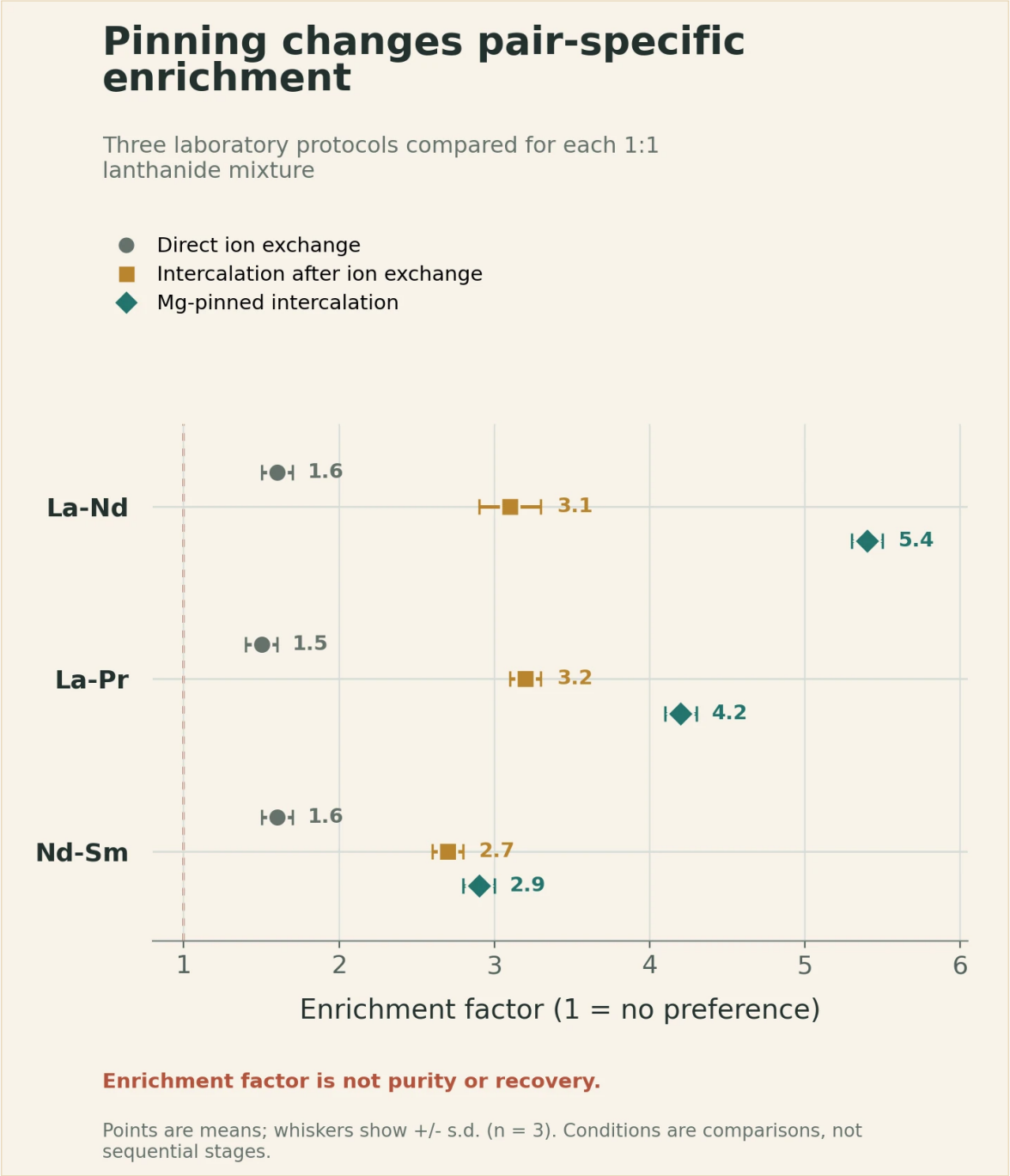
In diesem schmaleren nassen Spalt hat ein eintretendes hydratisiertes Ion weniger Platz. Der vorgeschlagene Mechanismus verbindet räumliche Einschließung, partielle Dehydratisierung, Koordination und Bindung. **Koordination** bezeichnet die benachbarten Atome, häufig Sauerstoff, die das Ion direkt umgeben und mit ihm wechselwirken.

Die Evidenz stammt aus mehreren Arten von Untersuchungen. Röntgenmessungen verfolgten die Feststoffstruktur. Elektrochemische Experimente maßen Einlagerung und Trennung. Die **Dichtefunktionaltheorie**, eine quantenmechanische Rechenmethode, verglich Strukturen, Hydratisierung und Bindung. Die Berechnungen helfen, den Mechanismus zu deuten; sie sind kein direkter Film eines einzelnen Ions auf seinem Weg durch den Kanal.

Der Mechanismus lautet auch nicht einfach: „Kleinere Ionen passieren, größere werden gestoppt.“ Die Wasserhülle, die Reaktion der Schichten, die Energiekosten der Dehydratisierung und die Koordination des Ions mit dem Feststoff tragen alle bei.

Die Fixierung verbesserte ausgewählte benachbarte Paare

Die größte hervorgehobene Veränderung betraf Lanthan und Neodym: Die Anreicherung stieg von **1,6 +/- 0,1** ohne Fixierung auf **5,4 +/- 0,1** mit Magnesiumfixierung. Lanthan gegenüber Praseodym stieg von **1,5 +/- 0,1** auf **4,2 +/- 0,1**. Neodym gegenüber Samarium stieg von **1,6 +/- 0,1** auf **2,9 +/- 0,1**.



Jede Zeile vergleicht drei getrennte Laborprotokolle, nicht aufeinanderfolgende Stufen eines einzigen Verfahrens. Ein Faktor von 1 bedeutet keine Bevorzugung; höhere Werte zeigen eine stärkere paarspezifische Anreicherung. Punkte zeigen Mittelwerte, Fehlerbalken +/- Standardabweichung (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Bei pH 2 lag der Lanthan-Neodym-Wert bei **5,6 +/- 0,2**. Eine Verfünffachung der elektrischen Rate von 0,1C auf 0,5C senkte ihn von **5,4 +/- 0,1** auf **4,3 +/- 0,4**. Die C-Rate setzt den angelegten elektrischen Strom ins Verhältnis zur Kapazität des Materials. Eine höhere Rate lässt den Ionen und dem Feststoff weniger Zeit zu reagieren.

Kein einzelner Wert beschreibt das Material allgemein. Die Anreicherung hängt vom Ionenpaar, der Feststoffstruktur, der Acidität und der Betriebsrate ab.

Die Arbeit prüfte das Material außerdem gegen häufige Nicht-Seltenerdionen. Die Ausgangsgemische enthielten ein Seltenerdion auf je 1.000 konkurrierende Ionen. Die angegebenen Selektivitätswerte lagen bei ungefähr **1.200** gegenüber Natrium, **6.500** gegenüber Calcium und **1.700** gegenüber Magnesium.

Das ist ein nützlicher Hinweis darauf, dass häufige Ionen die Trennung unter diesen Laborbedingungen nicht automatisch überwältigen. Es ist kein Test einer vollständigen, aus Erz gewonnenen Flüssigkeit mit all ihren Metallen, ihrer Acidität und ihren Verunreinigungen.

Anreicherung, Trennung, Reinheit, Abreicherung und Rückgewinnung sind verschiedene Ergebnisse

In der Arbeit erscheinen mehrere Leistungsmaße, die nicht gegeneinander ausgetauscht werden können.

Ein **Anreicherungsfaktor** vergleicht das Verhältnis zweier Ionen nach der Trennung mit ihrem Verhältnis davor. Ein Wert von 5,4 bedeutet, dass das aufgenommene Material einen Partner dieses Paars 5,4-mal stärker bevorzugte als das Ausgangsgemisch.

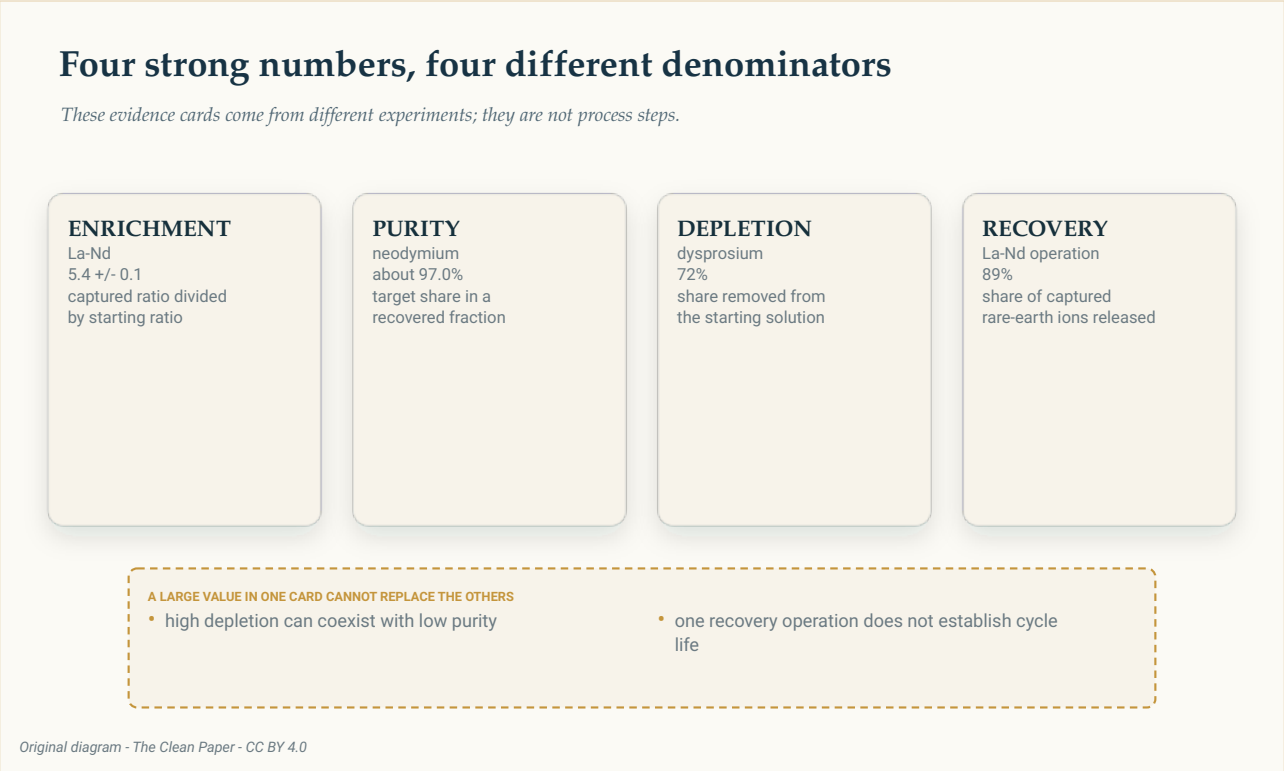
Ein **Trennfaktor** berücksichtigt zusätzlich, was in der Flüssigkeit verbleibt: Er vergleicht für jedes Ion die aufgenommene mit der nicht aufgenommenen Menge und stellt anschließend diese beiden Bilanzen gegenüber. Er kann deshalb steigen, wenn mehr Material entfernt wird, selbst wenn der Anreicherungsfaktor einem anderen Muster folgt.

Reinheit ist der Anteil eines ausgewählten Ions in einer zurückgewonnenen Fraktion. Zweistufige Demonstrationen erreichten in ihren festgelegten Prozesswegen ungefähr **97,0 % Neodymreinheit** und **92,3 % Dysprosiumreinheit**.

Abreicherung ist der Anteil, der aus der Ausgangslösung entfernt wird. Acht aufeinanderfolgende Zugaben von je 10 Milligramm Pulver entfernten in einem Neodym-Dysprosium-Test **72 % des Dysprosiums** und ergaben einen kumulierten Trennfaktor von 10,8.

Rückgewinnung fragt, wie viel eines aufgenommenen Ions später wieder freigesetzt werden kann. Umgekehrter Ionenaustausch gewann bei einem Neodym-Dysprosium-Versuch **80 %** zurück. Elektrochemische Entfernung gewann bei einem Lanthan-Neodym-Versuch **89 %** zurück.

Rückgewinnung zeigt Reversibilität. Sie belegt nicht, wie oft eine Elektrode bei erhaltener Leistung wiederverwendet werden kann.



Vier angegebene Kennzahlen verwenden unterschiedliche Nenner und stammen aus verschiedenen Experimenten. Sie sind Evidenzkarten, keine aufeinanderfolgenden Stufen eines einzigen Verfahrens.

The Clean Paper CC BY 4.0

Warum können zwei beeindruckende Prozentwerte Verschiedenes bedeuten?

Angenommen, ein Verfahren entfernt 90 % eines Ions aus der Ausgangsflüssigkeit. Das ist eine hohe Abreicherung. Wenn dabei viele unerwünschte Ionen mitkommen, kann das zurückgewonnene Material dennoch eine geringe Reinheit haben. Umgekehrt kann eine sehr reine kleine Fraktion eine schlechte Rückgewinnung bedeuten, wenn der Großteil des Zielions zurückblieb. Eine Prozessbewertung braucht all diese Bilanzen, nicht nur die größte Zahl.

Die demonstrierte Apparatur ist weiterhin ein Bechergласversuch

Die maßstabsorientierten elektrochemischen Tests begannen mit **5 Millilitern** Lösung, die von jedem Ion 25 Millimol pro Liter enthielt. Die Elektroden trugen ungefähr **25 bis 40 Milligramm** aktives Material.

Eine Elektrode entfernte etwa 40 % des Neodyms. Drei in Reihe eingesetzte Elektroden erreichten ungefähr **90 % Abreicherung** und einen kumulierten Trennfaktor von **16,6 +/- 0,4**. Je nach Betriebsrate dauerten die Reaktionen **200 Minuten bis 13 Stunden**.

Diese Größen und Zeiten gehören in die Hauptgeschichte, weil sie festlegen, was tatsächlich demonstriert wurde.

Das Supplement benennt außerdem eine Stofftransportgrenze. Für ein höher konzentriertes Becherglasziel wurde geschätzt, dass für eine Gesamt-Abreicherung von 50 % eine **266-Milligramm-Elektrode** beziehungsweise **532 Milligramm aktives Material pro Quadratzentimeter** nötig wären. So viel Material auf die kleine Elektrode zu packen, würde gelösten Ionen den Zugang zu allen Bereichen erschweren. Deshalb wechselten die Autoren für den Becherglasversuch zu einer stärker verdünnten Lösung.

Eine hypothetische Durchflusszelle erscheint nur als Projektion. Für eine angenommene 1,25-Milliliter-Zelle mit einer 5 mal 5 Zentimeter großen Elektrode schätzt das Supplement etwa **20 Minuten bei 1C** oder **40 Minuten bei 0,5C** für ungefähr 90 % Abreicherung. Ein solches Durchflusszellenexperiment wird nicht berichtet.

Die Leiter endet an einer Grenze: Binäre und gestufte Laborevidenz liegt vor, während Durchflusszeiten und Umweltleistung projiziert beziehungsweise szenariobasiert bleiben und nicht im Anlagenmaßstab demonstriert wurden.

The Clean Paper CC BY 4.0

Der Umweltvergleich ist ein Szenario, kein Anlagenergebnis

Die ergänzende Lebenszyklusanalyse vergleicht Trennschritte, die bei Seltenerdoxiden enden, und gibt Inputs pro **1 Kilogramm Neodymoxid** an.

Sie umfasst weder Bergbau noch Erzvorbehandlung oder eine vollständige kommerzielle Raffinationskette. Der Laborprozess wird anhand von Annahmen dargestellt, die aus mehreren Quellen zusammengestellt wurden. Elektrodenlebensdauern von **10, 20 und 100 Zyklen** sind Szenario- und Sensitivitätswerte, keine in dieser Studie gemessene Haltbarkeit. Das Modell nimmt an, dass die Magnesium-Rückgewinnungslösung wiederverwendet werden kann, bis sich ihre Konzentration um 10 % ändert, setzt **95 % Wasserrecycling** voraus und berücksichtigt eine Kalzinierung bei 450–600 Grad Celsius für zwei Stunden, obwohl die Kalzinierung hier nicht experimentell demonstriert wurde.

Eine **Lebenszyklusanalyse** bilanziert Umweltbelastungen innerhalb einer festgelegten Systemgrenze. Ihre Aussage ist nur so umfassend wie diese Grenze und nur so zuverlässig wie ihr Inventar und ihre Skalierungsannahmen.

Die Analyse kann zeigen, wo Energie, Materialien und Wiederverwendung wichtig sind. Sie kann nicht beweisen, dass eine kommerzielle Version geringere Umweltauswirkungen hätte als die industrielle Lösungsmittelextraktion.

Ein Mechanismus, eine Plattform und ein langer ingenieurtechnischer Weg

Die Arbeit zeigt, dass sich Abstand und chemische Umgebung eines hydratisierten Schichtfeststoffs gezielt steuern lassen, um ausgewählte Lanthanoidtrennungen zu verbessern. Die Magnesiumfixierung fügte nicht bloß eine weitere chemische Bindungsstelle hinzu: Sie begrenzte die Struktur, durch die sich wasserumhüllte Ionen bewegen mussten.

Dieses Ergebnis wirft praktische Fragen auf. Hält die Leistung in realen, aus Erz gewonnenen Gemischen stand? Lassen sich Elektroden mit praktikabler Massenbeladung herstellen? Wie stabil ist das Manganoxid über viele Einlagerungs- und Freisetzungszyklen? Kann eine kontinuierliche Zelle Selektivität, Durchsatz und Wasserbilanz aufrechterhalten? Wie sieht der Umweltvergleich mit gemessenen Inventardaten aus dem Pilotmaßstab aus?

Das Experiment beantwortet diese Fragen nicht. Es macht sie konkreter.

Die Leistung ist keine fertige Seltenerdraffinerie. Sie ist ein Beleg dafür, dass wenige Ångström kontrollierten, wassergefüllten Raums eine schwierige Trennung verändern können.

Kurz zusammengefasst

Forschende verwendeten hydratisiertes, geschichtetes Manganoxid, um ausgewählte Lanthanoidionenpaare in Wasser zu trennen. Der freie Spalt des Materials betrug ungefähr 6,8–6,9 Ångström und lag damit nahe am angegebenen Durchmesser von 6,6–7,1 Ångström der ersten Hydrathüllen der Ionen. Zurückgehaltenes Magnesium half, den Kanal zu fixieren, und verbesserte die paarspezifische Anreicherung, darunter Lanthan-Neodym von 1,6 auf 5,4 und Lanthan-Praseodym von 1,5 auf 4,2. Die Studie berichtete außerdem Prüfungen mit häufigen Ionen sowie gestufte Reinheits-, sequenzielle Abreicherungs- und Rückgewinnungsversuche. Der demonstrierte Maßstab blieb auf 5-Milliliter-Becherglastests mit 25–40 Milligramm aktivem Material und Reaktionszeiten von 200 Minuten bis 13 Stunden beschränkt. Durchflusszellenzeiten wurden projiziert, eine Wiederverwendung über viele Zyklen wurde nicht getestet, und der Lebenszyklusvergleich beruhte auf Annahmen aus dem Labormaßstab. Die Arbeit stützt einen Einschlussmechanismus und eine Laborplattform, nicht den industriellen Ersatz der Lösungsmittelextraktion.

Nüchtern geprüft

Was die Arbeit zeigt: Das Halten eines hydratisierten Manganoxidspalts bei etwa 6,8–6,9 Ångström durch zurückgehaltenes Magnesium veränderte die Trennung ausgewählter Lanthanoidpaare. Strukturmessungen, Elektrochemie und Berechnungen stützen einen Mechanismus aus räumlicher Einschließung, Dehydratisierung, Koordination und Bindung.

Was am besten abschnitt: Unter den angegebenen Bedingungen erreichte die Lanthan-Neodym-Anreicherung 5,4 +/- 0,1 und Lanthan-Praseodym 4,2 +/- 0,1. Andere Paare ergaben andere Werte. Separate Experimente berichteten Reinheit, Abreicherung und Rückgewinnung, jeweils mit unterschiedlichen Nennern.

Was sie nicht zeigt: Einen universellen Separator für alle Seltenen Erden; Betrieb mit einem vollständigen Erzstrom; eine demonstrierte kontinuierliche Durchflusszelle; Elektroden mit nachgewiesener Haltbarkeit über viele Zyklen; den Ersatz der Lösungsmittelextraktion; oder eine belegte kommerzielle Umweltüberlegenheit.

Wichtigste Maßstabsgrenzen: Die demonstrierten Tests verwendeten 5 Milliliter Lösung, ungefähr 25–40 Milligramm aktives Material und 200 Minuten bis 13 Stunden. Ein höher konzentriertes Ziel führte zu einem Beladungsproblem von 532 Milligramm pro Quadratzentimeter. Durchflusszeiten wurden extrapoliert. Elektrodenlebensdauer und wichtige Recyclinginputs der Lebenszyklusanalyse waren Annahmen.

Wie viel Vertrauen sollte ein allgemeines Publikum haben? Hohes Vertrauen in die berichteten Labormessungen für die genannten Paare und Bedingungen. Mittleres Vertrauen in die vorgeschlagene molekulare Deutung, weil sie direkte Struktur- und Elektrochemiedaten mit Berechnungen verbindet. Geringes Vertrauen darin, dass die derzeitigen Daten industriellen Durchsatz, Lebensdauer oder Umweltleistung vorhersagen.

Quellen

Zou et al., Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026)
https://doi.org/10.1038/s44286-026-00418-8