

Verfahren zur Extraktion einer Metallspezies mittels flüssig-flüssig-Reaktivextraktion

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Extraktion einer Metallspezies aus einer wässrigen Lösung mittels flüssig-flüssig-Reaktivextraktion.

Extraktion bezeichnet allgemein jedes Trennverfahren, bei dem mit Hilfe eines Extraktionsmittels eine oder mehrere Komponenten aus einem Stoffgemisch herausgelöst wird. Bei der flüssig-flüssig-Extraktion wird durch ein flüssiges Extraktionsmittel ein gelöster Stoff aus einer Flüssigkeit extrahiert, wobei die verschiedenen Löslichkeiten der zu trennenden Komponenten in zwei nicht miteinander mischbaren Lösungsmitteln ausgenutzt werden. Als nicht miteinander mischbare Lösungsmittel dienen in der Regel eine hydrophile Phase wie Wasser und ein hydrophobes organisches Lösungsmittel. Eine Anwendung der flüssig-flüssig-Extraktion ist unter anderem die selektive Trennung von Metallionen, die im Rahmen der Elektromobilität und der Aufarbeitung verbrauchter Batterien immer mehr an Bedeutung gewinnt.

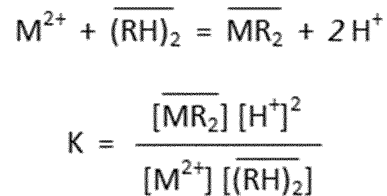
Allgemein liegt dem Prinzip der Reaktivextraktion die sogenannten Extraktionsisothermen zugrunde, die die Verteilung einer Metallspezies zwischen einer wässrigen Phase (AP) und einer organischen Phase (OP) zu einem dazugehörigen pH-Wert angibt. Der Extraktionsgrad E gibt den Anteil der Metallspezies M in der organischen Phase im Verhältnis zur Gesamtmenge der Metallspezies in beiden Phasen an, wobei E theoretisch alle Werte zwischen 0 und 1, beziehungsweise 0% und 100%, annehmen kann:

$$E = \frac{C_{OP} \cdot V_{OP}}{C_{OP} \cdot V_{OP} + C_{AP} \cdot V_{AP}}, E \in (0;1)$$

Gerade im Bereich des Batterierecyclings kommt der Trennung von Cobalt, Nickel und Mangan, sowie auch Lithium aus wässrigen Lösungen eine große Bedeutung zu. Im Stand der Technik sind eine Reihe von Ansätzen beschrieben, wie die Trennung optimiert werden kann.

Die Extraktion von Metallen beruht auf einer speziellen Form der Extraktion, der sogenannten Reaktivextraktion. Bei dieser Form der Solventextraktion wird die zu extrahierende Verbindung durch Reaktion mit einem im Extraktionsmittel gelösten Stoff in die andere Phase überführt. Die folgende Gleichung zeigt die

zugrundeliegende chemische Reaktion und die Verteilung der verschiedenen Spezies auf wässrige und organische Phase, wie üblich durch einen Überstrich gekennzeichnet.



wobei M das Metallion, R einen Säurerest und K die Gleichgewichtskonstante bezeichnet.

Wie aus der Formulierung der Gleichgewichtskonstanten ersichtlich, sind diese Gleichgewichte pH-Wert abhängig. Metalle mit hoher Affinität, repräsentiert durch hohe Werte der Gleichgewichtskonstanten K, werden demnach bereits bei niedrigen pH-Werten, also aus wässrigen Medien mit hoher Acidität extrahiert, während die Metalle mit niedriger Affinität nur bei höheren pH-Werten aus der wässrigen Phase extrahiert werden können. Die Einstellung des pH-Wertes kann beispielsweise durch Zugabe von alkalischen Verbindungen wie NaOH erfolgen, die die bei der Reaktion entstehenden Protonen abfangen, bewerkstelligt werden.

Die Reaktivextraktion zur Trennung von Metallionen ist generell bekannt. So beschreiben D. Darvishi *et al* in ihrem Aufsatz "Synergistic effect of Cyanex 272 and Cyanex 302 on separation of cobalt and nickel by D2EHPA", erschienen in *Hydrometallurgy* **77** (2005) 227-238, die Vorteile, die durch Aktivierung des Komplexbildners D2EHPA durch Cyanex 272 und Cyanex 302 in der Trennung von Cobalt und Nickel erzielt werden konnten.

P.K. Parhi *et al* berichten über die Trennung von Nickel und Cobalt in einer ammoniakalischen Sulfatlösung mit Hilfe von Cyanex 272. Ihre Ergebnisse sind in "Separation of cobalt and nickel from ammoniacal sulphate solution using Cyanex 272", *Separation and Purification Technology* **59** (2008), 310-317, erschienen.

In "Extraction/Separation of Cobalt by Solvent Extraction: A Review", *Appl. Chem. Eng.* **Vol. 26**, No. 6, 2015, 631-639, fassen B. Swain *et al* verschiedene Methoden zur Abtrennung von Cobalt zusammen.

K. Omelchuk *et al* beschreiben in ihrer Veröffentlichung "New Cationic exchangers for the recovery of cobalt(I), nickel(I) and manganese(I) from acidic chloride

solutions: Modelling of extraction curves", erschienen in *Hydrometallurgy* **180** (2018) 96-103, neuartige Extraktionsmittel zur Trennung der genannten Metallspezies.

N.B. Devi *et al* beschreiben die Trennung von Cobalt (II) und Nickel (II) mit Hilfe der Natriumsalze von D2EHPA, PC 88A und Cyanex 272 in "Separation and recovery of cobalt(II) and nickel(II) from sulphate solutions using sodium salt of D2EHPA, PC 88A and Cyanex 272", *Hydrometallurgy* **49** (1998) 47-61.

EP 2 614 868 offenbart die Verwendung einer Flüssig-Flüssig-Extraktionseinheit, um eine wässrige Phase mit einer organischen Phase zu kontaktieren, diese zu trennen und einen gewünschten Extrakt aus der so getrennten wässrigen Phase und/oder organischen Phase zu gewinnen.

G. Granata *et al* beschreiben in "Simultaneous recycling of nickel metal hydride, lithium ion and primary lithium batteries: Accomplishments of European Guidelines by optimizing mechanical pre-treatment and solvent extraction operations", erschienen in *Journal of Power Sources* 212 (2012) 205-211, die Solventextraktion von Co und Mn, wobei die Extraktion von Co Cyanex 272 bei einem Verhältnis von Cyanex/Co von 4 bei einem pH-Wert von 5 und die Extraktion von Mn D2EHPA bei einem Verhältnis von D2EHPA/Mn von 2 bei einem pH-Wert von 5-6 erfolgt.

In einer weiteren Veröffentlichung "Product recovery from Li-ion battery wastes coming from an industrial pre-treatment plant: Lab scale tests and process stimulations", erschienen in *Journal of Power Sources* 206 (2012) 393-401, beschreiben G. Granata *et al* die Rückgewinnung von Co und Li, unter Verwendung von Cyanex 272 und D2EHPA, die partiell mit NaOH verseift wurden.

I.R. Rodrigues *et al* beschäftigen sich in ihrem Aufsatz "Separation of cobalt and nickel via solvent extraction with Cyanes-272: Batch experiments and comparison of mixer-settlers an angitated column as contactors for continuous counter-current extraction", in *Separation and Purification Technology* 296 (2022) 121326, mit der Trennung von Co und Ni mittels Solventextraktion unter Verwendung von Cyanex-272, wobei ein pH-Wert von 6 eingestellt wurde.

US 3,666,446 offenbart ein pH-reguliertes Verfahren zur Trennung von Cu und Co, wobei die Regulierung des pH-Werts mittels Ionenaustauschreaktionen erfolgt.

US 4,353,883 beschreibt die Trennung von Co und Ni aus wässriger Lösung in Gegenwart eines Extraktionsmittels, wobei das Extraktionsmittel eine Phosphinsäure mit wenigstens 6 Kohlenstoffatomen ist.

Aus "Resource recovery of critically-rare metals by hydrometallurgical recycling of spent lithium ion batteries" von R. Sattar et al, erschienen in Separation and Purification Technology 209 (2019) 725-733, ist eine zweistufige Solventextraktion mit Cyanex 272 bei einem pH-Wert von 5.0 bekannt, wobei das Cyanex zu 50% verseift wurde.

Allen Ansätzen ist gemein, dass trotz der Unsicherheit, die mit der Aussagekraft des pH-Wertes einhergeht, die Trennung auf Basis von Extraktionsisothermen bei einem als "optimal" ermittelten pH-Wert durchgeführt wird, wobei dieser oft aufwendig eingestellt werden muss. Bei den bekannten Verfahren ist weiterhin nachteilig, dass in der Regel ein großer Überschuss an Extraktionsmittel nötig ist.

Der pH-Wert ist allgemein definiert als der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität einer gegebenen Lösung:

$$\text{pH} = -\lg_a(\text{H}^+)$$

Die beschriebene Technologie zur Trennung von Metallionen verwendet den pH-Wert als Regelgröße, was zwar generell anerkannt ist, allerdings ist die Messung des pH-Wertes in der Praxis mit sehr vielen Unsicherheiten behaftet.

Dies bedeutet insbesondere, dass aus einem gemessenen pH-Wert nicht auf die tatsächliche H^+ -Konzentration einer Lösung geschlossen werden kann, der pH-Wert also in dieser Hinsicht eine unbefriedigende, mit Unsicherheit behaftete spezifische Regelgröße im Zusammenhang mit der hier beschriebenen Reaktivextraktion darstellt, um den Prozess stabil zu führen. Dies gilt insbesondere, wenn der Arbeitsbereich nur maximal wenige Zehntel pH-Einheiten umfasst.

Vor diesem Hintergrund besteht daher der Bedarf nach einem verbesserten Verfahren zur Trennung von Metallspezies und deren Gewinnung in sehr reiner Form aus wässrigen Lösungen, das vorzugsweise ohne den pH-Wert als Regelgröße auskommt.

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wurde überraschend gefunden, dass die flüssig-flüssig-Reaktivextraktion von Metallspezies aus wässrigen Lösungen mit

Hilfe des aktivierten Extraktionsmittel und durch Einstellung eines definierten stöchiometrischen Verhältnisses zwischen dem aktivierten Extraktionsmittel und der zu extrahierenden Metallspezies ohne den pH-Wert als Regelgröße auskommt.

Daher ist ein erster Gegenstand der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur Extraktion einer Metallspezies aus einer wässrigen Lösung mittels flüssig-flüssig-Reaktivextraktion, das Verfahren umfassend die Schritte:

- a) Bereitstellen einer wässrigen Phase umfassend mindestens eine zu extrahierende Metallspezies;
- b) Bereitstellen einer organischen Phase umfassend ein Extraktionsmittel zur Extraktion der zu extrahierenden Metallspezies;
- c) Aktivierung des Extraktionsmittels in der organischen Phase mit einem Aktivierungsmittel;
- d) Kontaktieren der wässrigen Phase und der organischen Phase aus Schritt c);
- e) Trennen der wässrigen Phase und der organischen Phase umfassend mindestens einen Teil der extrahierten Metallspezies,

wobei das aktivierte Extraktionsmittel und die zu extrahierenden Metallspezies in einem definierten stöchiometrischen Verhältnis zueinander vorliegen,

dadurch gekennzeichnet, dass keine aktive Regelung des pH-Werts erfolgt.

Ohne an eine bestimmte Theorie gebunden zu sein, wird angenommen, dass durch das Extraktionsmittel der Übergang der Metallspezies von der wässrigen in die organische Phase gefördert wird. Dazu wird das Extraktionsmittel erfindungsgemäß aktiviert. Dadurch, dass ein vorgegebenes, dem Trennproblem angepasstes, stöchiometrisches Angebot an aktiviertem Extraktionsmittel in Bezug auf die zu extrahierende Metallspezies zur Verfügung gestellt wird, kann auf den pH-Wert als Regelgröße für den Arbeitspunkt verzichtet und die mit der Bestimmung des pH-Werts verbundene Unsicherheit vermieden werden. Das Verhältnis von aktiviertem Extraktionsmittel und zu extrahierender Metallspezies steht stellvertretend für das Verhältnis von Aktivierungsmittel, beispielsweise Na^+ , und der Menge an zu extrahierender Metallspezies, die erfindungsgemäß aufeinander abgestimmt werden.

Bei der Extraktion gilt es generell einen akzeptablen Kompromiss zwischen Qualität und Reinheit der zu extrahierenden Spezies und der Ausbeute zu finden. Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens hat sich überraschend gezeigt, dass durch die pH-Wert unabhängige Verfahrensführung die zu extrahierende Spezies in hoher Reinheit und Ausbeute gewonnen werden konnte.

Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens wird das Extraktionsmittel durch ein Aktivierungsmittel aktiviert. Die Aktivierung des Extraktionsmittels erfolgt vorzugsweise vor der Kontaktierung der wässrigen Phase und der organischen Phase. Das Aktivierungsmittel wird also vorzugsweise bereits in der benötigten, auf die Menge der zu extrahierenden Metallspezies abgestimmten, Menge der organischen Phase vor der Kontaktierung mit der wässrigen Phase beigelegt. Diese Vorkontaktierung kann sowohl kontinuierlich als auch im batch-Verfahren erfolgen.

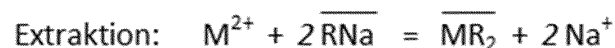
Das erfindungsgemäße Verfahren sieht vor, dass das aktivierte Extraktionsmittel in einem definierten Verhältnis zu der zu extrahierenden Metallspezies bereitgestellt wird. Es wurde überraschend gefunden, dass über die Einstellung dieses Verhältnisses die Trennleistung und Selektivität der Extraktion gesteuert werden kann und das Verfahren so vorzugsweise unabhängig von einer aktiven pH-Wertregelung durchgeführt werden kann. Daher umfasst das erfindungsgemäße Verfahren in einer bevorzugten Ausführungsform weiterhin einen Schritt, in dem das stöchiometrische Verhältnis von aktiviertem Extraktionsmittel zu der zu extrahierenden Metallspezies gemäß einem vorab definierten Verhältnis eingestellt wird.

Das Einstellen des definierten stöchiometrischen Verhältnisses kann beispielsweise auf Basis der Konzentration der zu extrahierenden Metallspezies vorgenommen werden. Daher ist eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens bevorzugt, in der in einem vorgeschalteten Schritt die Konzentration zumindest der zu extrahierenden Metallspezies in der wässrigen Phase bestimmt wird.

Das Extraktionsmittel ist vorzugsweise ausgewählt aus der Gruppe der Komplexbildner und flüssigen Ionentauscher und entsprechend in der Lage mit der zu extrahierenden Metallspezies einen Komplex auszubilden. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das Extraktionsmittel ausgewählt aus der Gruppe der Organophosphinsäuren, Organophosphonsäuren und Organophosphorsäuren. Ganz besonders bevorzugte Extraktionsmittel sind solche ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus (Bis-2-(ethyl-hexyl)-phosphorsäure

(D2EHPA), Bis(1,3-dibutoxypropan-2-yl)-phosphorsäure (Bidiopp), Bis(1,3-diisobutoxypropan-2-yl)-phosphorsäure (IPA), Bis(5,8,12,15-tetraoxanadecan-10-yl)-phosphorsäure (TPA), Bis(undecan-6-yl)-phosphorsäure (UPA), Bis(1,3-dioctyloxypropan-2-yl)-phosphorsäure (OPA), Bis(1,3-di-2-ethylhexyloxypropan-2-yl)-phosphorsäure (EHPA) und Bis(2,4,4-trimethylpentyl)-phosphinsäure (Cyanex 272). Als besonders vorteilhaft hat sich auch die Verwendung von Mischungen der soeben aufgezählten Extraktionsmittel erwiesen, sowie die Verwendung eines Gemischs verzweigter Monocarbonsäuren, sowie andere organische Säuren erwiesen, die entsprechend im Rahmen der vorliegenden Erfindung bevorzugt verwendet werden. Entsprechende Produkte sind beispielsweise unter der Bezeichnung Versatic™ Acid kommerziell erhältlich.

Das Aktivierungsmittel aktiviert das Extraktionsmittel, beispielsweise durch Deprotonierung desselben. Entsprechend wird das Aktivierungsmittel vorzugsweise auf das Extraktionsmittel abgestimmt. Dabei kann das Aktivierungsmittel beispielsweise ausgewählt sein aus der Gruppe der Alkalihydroxide und/oder Ammoniak. Insbesondere handelt es sich bei dem Aktivierungsmittel um Natriumhydroxid oder Lithiumhydroxid. In diesem Falle können die Aktivierung des Extraktionsmittels und die anschließende Extraktion des Wertmetalls entsprechend der beiden folgenden Gleichungen formuliert werden, wobei die Menge an aktiviertem Extraktionsmittel auf die Menge der extrahierenden Metallspezies abgestimmt wird.



Für diese Prozessführung wurde überraschend gefunden, dass bei der Aktivierung des Extraktionsmittels mit Natronlauge diese vollständig von der organischen Phase aufgenommen werden kann. Als besonders vorteilhaft hat sich die Verwendung von Natronlauge in einer Konzentration von mindestens 40 Ma-% oder mehr erwiesen. Gute Ergebnisse konnten bereits bei Verwendung von 20 Ma-% D2EPAH in Escaid™, wie beispielsweise von Exxon Mobil erhältlich, mit verdünnter Natronlauge von 20 Ma-% bei 50 °C erzielt werden, die Aktivierung mit 40 Ma-% Natronlauge führte darüber hinaus überraschend zu einer einzigen Phase, die auch nach Abkühlen auf Raumtemperatur stabil blieb. Dieses Verhalten

vereinfacht die technische Umsetzung bedeutend. Es entfällt eine Phasentrennung, die Aktivierungsstöchiometrie lässt sich genau definiert über exakte Massenflüsse einstellen, ohne auf pH-Wert oder andere Regelgrößen angewiesen zu sein. Der gewünschte Aktivierungsanteil des Extraktionsmittels kann direkt oder auch im Anschluss an die Aktivierung durch Zumischen von nichtaktivierter organischer Phase eingestellt werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren zielt auf die Trennung von Metallspezies ab, wobei insbesondere Übergangsmetalle und Seltenerdmetalle bevorzugt sind. Die Metallspezies sind vorzugsweise ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Cobalt, Nickel, Mangan, Eisen, Kupfer, Magnesium, Aluminium, und Lithium. Insbesondere handelt es sich bei der Metallspezies um Cobalt, Nickel, Mangan und Aluminium.

Die organische Phase ist mit der wässrigen Phase nicht mischbar. Daher werden als organische Phase im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens vorzugsweise aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Mischungen hiervon verwendet. Hier haben sich insbesondere Kerosin oder Escaid™ 120, wie von Exxon Mobile kommerziell erhältlich, als besonders geeignet erwiesen.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist hauptsächlich auf den groß-industriellen Maßstab ausgelegt und wird vorzugsweise im mehrstufigen Gegenstrom als kontinuierliches Verfahren durchgeführt. In einer alternativ bevorzugten Ausführungsform wird das erfindungsgemäße Verfahren im Batch-Betrieb ausgeführt.

Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt nicht nur die Extraktion einer Metallspezies aus einer wässrigen Lösung, sondern kann auch zur selektiven Trennung mehrerer Metallspezies voneinander eingesetzt werden. Daher ist eine Ausführungsform bevorzugt, in der die wässrige Phase wenigstens eine weitere Metallspezies umfasst, die zumindest teilweise in der wässrigen Phase verbleibt. Durch Einstellen eines entsprechenden stöchiometrischen Verhältnisses kann nicht nur die Trennleistung erhöht werden, sondern auch die Menge an weiterer Metallspezies, die mit in die organische Phase überführt wird, festgelegt werden, so dass ein gewünschtes Verhältnis der Metallspezies in der organischen Phase erreicht wird. Zur Gewährleistung der Reinheit der Hauptkomponente kann der Extraktion ein Waschschriff, besonders bevorzugt im Sinne einer Verstärkungsextraktion, angeschlossen werden, bei dem die beladene organische Phase beispielsweise mit reiner Lösung der Hauptkomponente und/oder

mineralischen Säuren, insbesondere Schwefelsäure, kontaktiert wird, wodurch die Nebenkomponten wieder aus der organischen Phase herausdrängt werden, wie z.B. bei der Trennung von Übergangsmetallen im Sulfatsystem. Entsprechend umfasst das erfindungsgemäße Verfahren weiterhin einen Waschschrift, der sich der Extraktion anschließt.

Das erfindungsgemäße Verfahren stellt eine Verbesserung zu herkömmlichen Trennverfahren da, die auf den pH-Wert als Regelgröße vertrauen. Entsprechend ist eine Ausführungsform bevorzugt, in der das Verfahren keiner pH-Wert abhängigen Regelung unterliegt. Zwar kann der pH-Wert im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens als Indikator gemessen werden, die benötigte Menge an Aktivierungsmittel wird allerdings vorzugsweise an den gewünschten Stellen über genaue gravimetrische Dosierungen, vorzugsweise Coriolis-Massedurchflussmesser, zudosiert. Insbesondere bei der Nutzung von Extraktionskolonnen ist der Ansatz mit aktiviertem Extraktionsmittel und definierten stöchiometrischen Verhältnissen zu bevorzugen.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann in Mixer-Settler-Batterien oder in Extraktionskolonnen durchgeführt werden, wobei die Durchführung in Extraktionskolonnen bevorzugt ist. Geeignete Extraktionskolonnen sind dem Fachmann bekannt und weisen vorzugsweise Stoffaustauschelemente zur Erhöhung der Kontaktfläche und Vermischung zwischen organischer und wässriger Phase auf.

Ein weiterer Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, wobei die Vorrichtung einen Reaktor zur Kontaktierung einer wässrigen mit einer organischen Phase umfasst und wobei der Reaktor mindestens einen Ablass zur Entnahme der wässrigen und/oder der organischen Phase aufweist.

Als Reaktoren in der erfindungsgemäßen Vorrichtung kommen insbesondere Mixer-Settler-Batterien und Extraktionskolonnen in Frage, wobei die Extraktionskolonnen bevorzugt sind. Durch den Einsatz einer Extraktionskolonne lässt sich der Platzbedarf deutlich reduzieren und die im Umlauf befindlichen Mengen an organischer und wässriger Phase können geringgehalten werden. Weiterhin wird durch den Einsatz der Extraktionskolonnen eine Kontinuität des Gegenstroms gewährleistet, wobei nur eine einzige Phasengrenze am Kolonnenkopf oder aber am Kolonnensumpf reguliert werden muss. Auch die

Erstellungskosten sind für eine Kolonne signifikant geringer als für große Mixer-Settler-Batterien.

In einer weiterhin bevorzugten Ausführungsform weist die erfindungsgemäße Vorrichtung weiterhin ein Modul zur Vorkontaktierung der organischen Phase mit dem Aktivierungsmittel auf.

Die vorliegende Erfindung wird anhand der folgenden Beispiele und Zeichnungen näher erläutert, wobei diese keinesfalls als Einschränkung des Erfindungsgedanken zu verstehen sind.

Figuren

Figur 1 zeigt schematisch einen beispielhaften Verlauf des Extraktionsgrads bei der Trennung von Mn-, Cu-, Co- und Ni-Ionen, wobei bei $E = 0$ die entsprechende Metallspezies vollständig in der wässrigen Phase verbleibt und $E = 1$ einen vollständigen Übergang in die organische Phase anzeigt. Abhängig von der Azidität der Lösung lässt sich so beispielsweise eine organische Phase erhalten, die einen Großteil der Cu- und Mn-Ionen enthält, sowie ein wässriges Raffinat, in welchem der Großteil der Co- und Ni-Ionen verbleibt. Je nach vorherrschender Azidität kann so gezielt die Trennung der unterschiedlichen Metallspezies voneinander gesteuert werden.

Figur 2 und 3 zeigen experimentell bestimmte Extraktionsisothermen für Cobalt und Nickel. Figur 2 zeigt die einzeln aufgenommen Isothermen, während Figur 3 die Extraktionsthermen von einer wässrigen Lösung, enthaltend beide Metalle in gleicher Konzentration zeigt. Deutlich ist ein Konkurrenzverhalten um das knapp angebotene Extraktionsmittel gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren zu beobachten. Aufgrund seiner höheren Affinität zum Extraktionsmittel drängt das Cobalt die Mitextraktion von Nickel zurück und die Isothermen schieben sich drastisch auseinander. Die auf diese Weise mit den beiden Metallen beladene organische Phase kann anschließend durch Kontakt mit einer nur Cobalt enthaltenden Waschlösung oder durch Waschen mit einer mineralischen Säure wie Schwefelsäure von den unerwünschten Nickelanteilen befreit werden. Zu beachten ist, dass hier eine einzige Extraktionsstufe gezeigt ist. Durch Gegenstromfahrweise sowohl für den Extraktionsprozess als auch für das Waschverfahren lassen sich dann hohen Ausbeuten bei gleichzeitig hoher Reinheit realisieren. Als Apparate kommen Mixer-Settler und Kolonnen in Frage.

Beispiele

Das erfindungsmäÙe Verfahren wurde in einem ersten Batch-Ansatz erprobt.

600 ml einer äquimolaren Co- und Ni-haltigen Lösung mit 40 g/L Co und 39,88 g/L Ni wurden aus den jeweiligen Chloridsalzen hergestellt und unter Röhren mit 1576 ml einer organischen Lösung kontaktiert, die 20 mol-% Bis-2-(ethyl-hexyl)-phosphorsäure (DEHPA) als Extraktionsmittel enthielt. Bei 40 °C wurden eine 50%-ige NaOH-Lösung als Aktivierungsmittel verwendet. Tabelle 1 zeigt das stöchiometrische Verhältnis von Extraktionsmittel, Natronlauge und dem zu extrahierenden Co. Nach erfolgter Phasentrennung wurde der Gehalt an Co und Ni jeweils in der organischen und der wässrigen Phase bestimmt. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der Analyse zusammen.

Tabelle 1:

Einsatzstoff	Mol
Co (in wässriger Phase)	0,407
DEHPA (in organischer Phase)	0,819
NaOH	0,876

Tabelle 2:

	Co	Ni
organische Phase	13,30 g/L	1,84 g/L
Wässrige Phase	2,78 g/L	30,31 g/L
D(M)*	4,77	0,060

* Verteilungskoeffizient: $D = M_{OP}/M_{AP}$ mit M = Co, Ni; OP: organische Phase; AP: wässrige Phase

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, wird durch das erfindungsgemäÙe Verfahren eine effiziente Trennung von Co und Ni durch Reaktivextraktion des Co aus der wässrigen Phase erreicht. Aus den auf Basis der gemessenen Konzentrationen bestimmten Verteilungskoeffizienten D ergibt sich ein Trennfaktor ($\omega = D_{Co}/D_{Ni}$) von 79. Vergleichbare Versuche bei einem pH-Wert von 3,5 mit gleichem Extraktionsmittel und unter den gleichen Extraktionsbedingungen legen einen Trennfaktor von 3 nahe. Durch das erfindungsgemäÙe Verfahren kann somit eine erhebliche Steigerung der Selektivität erreicht werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren stellt somit eine einfache und effiziente Alternative zur pH-Wert kontrollierten Extraktion dar, da lediglich die Menge der zu extrahierenden Metallspezies bekannt sein muss.

Durch eine kontinuierliche Verfahrensführung konnte die Trennleistung weiter erhöht werden. Der oben beschriebene Versuch wurde daher in einer kontinuierlich betriebenen Mixer-Settler-Anlage wiederholt. Der Versuch wurde mit 6 Mixer-Settler-Einheiten mit jeweils einem Volumen von 350 ml durchgeführt, wobei die organische Phase mit einer 200 g/L-NaOH-Lösung vorkontaktiert wurde.

Nach einer Versuchsdauer von 16 Stunden ließen sich gemäß den in Tabelle 3 gemessenen Konzentrationen von Co und Ni Verteilungskoeffizienten von $D(\text{Co}) = 20,77$ und $D(\text{Ni}) = 0,011$ berechnen. Basierend darauf ergibt sich ein Trennfaktor ($\omega = D_{\text{Co}}/D_{\text{Ni}}$) von 1888.

Tabelle 3:

	Co	Ni
organische Phase	13,50 g/L	0,3 g/L
wässrige Phase	0,65 g/L	28 g/L
$D(\text{M})^*$	20,77	0,011

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Extraktion einer Metallspezies aus einer wässrigen Lösung mittels flüssig-flüssig-Reaktivextraktion, das Verfahren umfassend die Schritte:
 - a) Bereitstellen einer wässrigen Phase umfassend eine zu extrahierende Metallspezies;
 - b) Bereitstellen einer organischen Phase umfassend ein Extraktionsmittel zur Extraktion der zu extrahierenden Metallspezies;
 - c) Aktivierung des Extraktionsmittels in der organischen Phase mit einem Aktivierungsmittel;
 - d) Kontaktieren der wässrigen Phase und der organischen Phase aus Schritt c);
 - e) Trennen der wässrigen Phase und der organischen Phase umfassend mindestens einen Teil der extrahierten Metallspezies,wobei das aktivierte Extraktionsmittel und die zu extrahierenden Metallspezies in einem definierten stöchiometrischen Verhältnis zueinander vorliegen,
dadurch gekennzeichnet, dass keine aktive Regelung des pH-Werts erfolgt.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Aktivierung des Extraktionsmittels vor der Kontaktierung der wässrigen und organischen Phase erfolgt.
3. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, das Verfahren weiterhin einen Schritt umfasst, in dem das stöchiometrische Verhältnis von aktiviertem Extraktionsmittel zu der zu extrahierenden Metallspezies eingestellt wird.
4. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in einem vorgeschalteten Schritt die Konzentration zumindest der zu extrahierenden Metallspezies in der wässrigen Phase bestimmt wird.

5. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Extraktionsmittel ausgewählt ist aus der Gruppe der Komplexbildner und flüssigen Ionentauscher.
6. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren weiterhin einen Waschschrift der abgetrennten organischen Phase umfasst.
7. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Extraktionsmittel ausgewählt ist aus der Gruppe der Organophosphinsäuren, Organophosphonsäuren und Organophosphorsäuren, insbesondere aus der Gruppe bestehend aus (Bis-2-(ethyl-hexyl)-phosphorsäure (D2EHPA), Bis(1,3-dibutoxypropan-2-yl)-phosphorsäure (Bidiopp), Bis(1,3-diisobutoxypropan-2-yl)-phosphorsäure (IPA), Bis(5,8,12,15-tetraoxanonadecan-10-yl)-phosphorsäure (TPA), Bis(undecan-6-yl)-phosphorsäure (UPA), Bis(1,3-dioctyloxypropan-2-yl)-phosphorsäure (OPA), Bis(1,3-di-2-ethylhexyloxypropan-2-yl)-phosphorsäure (EHPA), Bis(2,4,4-trimethylpentyl)-phosphinsäure (Cyanex 272); Gemische der genannten Extraktionsmittel sowie aus Gemischen verzweigter Monocarbonsäuren und anderer organischer Säuren.
8. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Aktivierungsmittel ausgewählt ist aus der Gruppe Alkalihydroxide und insbesondere Natriumhydroxid oder Lithiumhydroxid ist.
9. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Metallspezies ausgewählt sind aus der Gruppe der Übergangsmetalle und Seltenerdmetalle, insbesondere aus der Gruppe bestehend aus Cobalt, Nickel, Mangan, Eisen, Kupfer, Magnesium, Aluminium, und Lithium, insbesondere handelt es sich bei der Metallspezies um Cobalt, Nickel, Mangan und Aluminium.
10. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die organische Phase ausgewählt ist aus der Gruppe der aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffe sowie Mischungen hiervon.

11. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren als batch-Verfahren oder kontinuierliches Verfahren durchgeführt wird.
12. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die wässrige Phase mindestens eine weitere Metallspezies umfasst, wobei diese weitere Metallspezies wenigstens teilweise in der wässrigen Phase verbleibt.
13. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren keiner pH-Wert abhängigen Regelung unterliegt, insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass keine Messung des pH-Werts erfolgt.
14. Verfahren gemäß wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren in einer Extraktionskolonne durchgeführt wird.
15. Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, wobei die Vorrichtung einen Reaktor zur Kontaktierung einer wässrigen mit einer organischen Phase umfasst und wobei der Reaktor mindestens einen Ablass zur Entnahme der wässrigen und/oder der organischen Phase aufweist.
16. Vorrichtung gemäß Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei dem Reaktor um eine Extraktionskolonne handelt und/oder die Vorrichtung weiterhin Modul zur Vorkontaktierung der organischen Phase mit dem Aktivierungsmittel umfasst.