

Implications of emerging energy technologies on supply and demand of scarce metals

Doctoral Thesis

Author(s):

Stamp, Anna

Publication date:

2014

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010284200>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 21907

***Implications of emerging energy technologies on
supply and demand of scarce metals***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Anna Stamp

Master of Sciences ETH

born on *October 4, 1982*

citizen of Zürich, Switzerland, and Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stefanie Hellweg, examiner

Dr. Patrick Wäger, co-examiner

Prof. Dr. Daniel J. Lang, co-examiner

Prof. Dr. Armin Reller, co-examiner

2014

SUMMARY

Energy provision is associated with negative consequences such as global warming, damage to landscapes and ecosystems, or health impacts due to pollution. Energy can be provided by different technologies, and energy consuming services can often be fulfilled by various technologies and products. A mitigation strategy is therefore to replace current technologies with new, potentially more sustainable ones. Each technology is composed of a distinct set of materials or resources. Shifting from one technology to another therefore means that a different set and/or a different amount of materials needs to be mobilized. Some emerging energy technologies that are associated with a higher degree of environmental sustainability are based on geochemically scarce metals that have an average abundance in the Earth's crust below 0.01%. This fostered a number of concerns such as the surge of demand for metals with previously limited fields of application, increasing product complexity that complicates recycling, declining quality of primary deposits, rising environmental impacts of resource provision, and also potentially declining discoveries of new deposits. A debate on the potential scarcity of these metals emerged, as this may impair the prospects of the new technologies.

The guiding question of this thesis reads: *How would a transition towards currently emerging and potentially more sustainable technologies in the energy sector affect the supply and demand for geochemically scarce metals?* The previous debate has mainly focused on the threat of resource scarcity. The environmental impacts associated with geochemically scarce metals production are often higher than those associated with classic industry metals, and environmental impacts associated with resource provision could generally rise in the future. However, the role of environmental impacts in the debate on resource scarcity has hardly been assessed. This is where the *first study* of this thesis contributes. Life cycle assessment, the method to quantify environmental impacts, is challenged by the strong interlinkages of metal supply chains – in primary as well as secondary production. *The second study* is concerned with these methodological challenges. In order to assess the potential pressure on the supply system of a geochemically scarce metal, its potential future demand needs to be modeled. This quantitative modeling has often been based on static model parameters. Furthermore, reliable estimations on resource availability are lacking, which impedes a sound interpretation on possible supply restrictions. *The third study* contributes to this by presenting a dynamic material flow model, and a structured discussion to assess implications for the supply system. In the following these three studies are presented in more detail.

In the first study, present and potential future environmental impacts of lithium, a metal essential for the functionality of lithium-ion batteries, were assessed. Lithium-ion batteries would increasingly be implemented if electric vehicles based on this particular energy

storage device started to replace internal combustion engine vehicles. It is assessed if the environmental benefits expected from a transition to this new technology could be outweighed by higher impacts on the resource provision level. Environmental impacts on the resource level were quantified for production from different deposit types (brines, ores, and seawater) with different deposit quality (favorable, unfavorable). The upstream supply chain was kept constant (*ceteris paribus*). This approach proved useful for assessing – early in technology implementation – how changes on the resource provision level affect environmental impacts on the product and service levels. According to the results of the study, the supply of lithium carbonate for lithium-ion batteries should not compromise the environmental benefit of electric vehicles.

In the second study, the methodological challenges associated with life cycle inventory modeling in the metal sector were addressed by taking the example of the integrated smelter-refinery of Umicore Precious Metals Refining in Hoboken, Belgium. From this production technology, 17 different metals are produced from various feed materials. In the attributional life cycle inventory model developed, the highly interconnected and dynamic system was dealt with by distinguishing many subprocesses and by allocating inventory data based on different rationales. It was found that a) that the choice of the allocation rationale can change the result for a metal by up to two orders of magnitude, which renders it a decisive methodological step, and b) that no allocation rationale whatsoever can fully reflect the industrial reality. Parameterized models could reduce the influence of the allocation rationale choice, but require considerably more data, which is difficult to acquire in a competitive industry environment. For the time being, it is suggested to minimize allocation by distinguishing as many subprocesses as possible in order to capture the different efforts for refining the individual metals. Also, value based allocation might be preferable to mass based allocation for representing economic relevance, as the price differences between metals are huge.

In the third study, the development of primary indium demand from Copper-Indium-Gallium-Diselenide (CIGS) solar cells was modeled, by linking to various energy scenarios that describe the potential future electricity provision from photovoltaics. The dynamic model showed that with appropriate measures the same amount of primary indium “invested” can sustain considerably higher installed capacities of CIGS solar cells. Prerequisites are higher efforts in reducing indium demand in the technology and in keeping the indium in the anthropogenic cycle with good recycling systems for end-of-life material as well as for production scrap. It was discussed how and if the increased indium demand could be met by the supply system, i.e. which changes are necessary and how these could influence environmental impacts. Possible changes include, for instance, increasing the extraction efficiency of indium as a by-product of zinc production in order to decrease dependency on future zinc demand development. In the case of indium, there is some optimism regarding securing the supply for an increased CIGS solar cell implementation in the medium term, although prices may rise.

Conclusively, the thesis highlights various implications for the supply and demand system of geochemically scarce metals, in case the implementation rates for emerging energy technologies increase. Specifically, the environmental dimension was added to the debate, which currently mainly targets the threat of resource scarcity. The thesis also adds to approaching methodological challenges associated with assessing environmental impacts of metal provision. Improving the understanding on a technical level is an important prerequisite to a sound consideration of environmental impacts in the scarcity debate. In view of the increasing complexity of primary and secondary material that is accessed for metal provision, understanding how these processes can be represented in life cycle assessment might become even more relevant in the future. The thesis also provides a link from projected developments on the service level to a quantitative metal demand model. The demand model developed is dynamic, which has only been done in a few studies on geochemically scarce metals so far. Including dynamic parameters is especially suitable for systems at an early development stage, where parameters are expected to significantly change over time. In particular, the approach could serve as an addendum to scenario exercises in energy systems, which currently focus mainly on costs and/ or CO₂ mitigation. The thesis ends with a critical reflection on the methods applied and recommendations to overcome some of these limitations in future research.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Bereitstellung von Energie ist mit negativen Folgen verbunden, zum Beispiel globale Erwärmung, Zerstörung von Landschaften und Ökosystemen, oder Gesundheitsgefährdungen durch Umweltverschmutzung. Um den Energieverbrauch möglichst gering zu halten und die negativen Folgen zu mindern, ist es geboten, die heute angewandten Technologien durch möglichst nachhaltige zu ersetzen. Jede Technologie beruht auf einer anderen Materialzusammensetzung. Der Wechsel von einer Technologie zu einer anderen erfordert darum die Bereitstellung unterschiedlicher Arten oder Mengen von Materialien. Einige der neu entwickelten Technologien zur nachhaltigen Energiegewinnung und -nutzung erfordern den Einsatz von geochemisch seltenen Metallen, deren mittleres Vorkommen in der Erdkruste unter 0.01% liegt. Bisher wurden diese nur begrenzt eingesetzt, aber in den letzten Jahrzehnten stieg deren Nachfrage abrupt an. Dies hat eine Reihe von Bedenken ausgelöst: Die erhöhte Komplexität der neuen Produkte erschwert das Recycling, die Auswirkungen auf die Umwelt durch die Bereitstellung dieser Ressourcen könnten steigen und die Qualität der Lagerstätten könnte sinken. Momentan wird debattiert, ob das seltene Vorkommen dieser Metalle irgendwann limitierend sein könnte für die weitere Verbreitung davon abhängiger Technologien.

Die Leitfrage dieser Arbeit ist: *Wie kann der Wechsel zu neuen und potentiell nachhaltigeren Technologien im Energiesektor die Bereitstellung von und die Nachfrage nach geochemisch seltenen Metallen beeinflussen?* Die öffentliche Debatte fokussierte bisher auf die Gefahr der Ressourcenknappheit. Die Umweltauswirkungen bei der Produktion geochemisch seltener Metalle sind oft grösser als jene, die bei der Produktion der klassischen Industriemetalle auftreten. Diese Umweltauswirkungen könnten in Zukunft noch zunehmen. Dennoch wurde die Rolle der Umwelteinflüsse in der bisherigen Debatte über die Ressourcenverknappung erst wenig berücksichtigt. Dies ist der Fokus der *ersten Studie* dieser Arbeit. Ökobilanzierung, die Methode, um Umweltauswirkungen zu quantifizieren, ist dabei mit der Schwierigkeit konfrontiert, wie die stark vernetzten Produktionsketten von Metallen abgebildet werden können. Dies betrifft sowohl die Primär- wie auch die Sekundärproduktion. Die Erarbeitung der daraus entstehenden Herausforderungen für die Ökobilanzierungen war das Thema der *zweiten Studie*. Um beurteilen zu können, wie stark der Druck auf das Angebotssystem in Zukunft sein wird, muss man die zukünftige Nachfrageentwicklung abschätzen. Diese quantitative Modellierung beruht heute oft auf statischen Modellparametern. Zusätzlich fehlen verlässliche Schätzungen zur Verfügbarkeit, was eine Interpretation der Voraussagen über eine mögliche künftige Verknappung erschwert. Im dritten Teil dieser Arbeit wird deshalb ein dynamisches Nachfragemodell entwickelt und dessen Ergebnisse strukturiert diskutiert bezüglich der möglichen Auswirkungen auf das Angebotssystem. Im Folgenden werden die Studien genauer vorgestellt.

In der **ersten Studie** werden heutige und mögliche zukünftige Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit der Produktion von Lithium quantifiziert. Lithium ist ein geochemisch seltenes Metall, das in Lithium Ionen Akkus genutzt wird. Diese Akkus werden in Elektrofahrzeugen verwendet, die zukünftig von Verbrennungsmotoren angetriebene Fahrzeuge ablösen könnten, um die Umweltauswirkungen der individuellen Mobilität zu verringern. In der Studie wurde analysiert, ob durch einen Anstieg der Umweltbelastung bei der Bereitstellung von Lithium dieser Vorteil zunichte gemacht werden könnte. Dafür wurden die Umweltauswirkungen der Lithiumproduktion von verschiedenen Lagerstättentypen und -qualitäten quantifiziert. Die Prozesse der restlichen Versorgungskette bis zum Elektrofahrzeug wurden konstant gehalten (*ceteris paribus*). Dieser Ansatz erwies sich als nützlich, um schon zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung und Anwendung abzuschätzen, wie sich die Umweltauswirkungen der Ressourcenbereitstellung auf jene des Endprodukts und der Anwendung auswirken. Die Resultate dieser Studie weisen darauf hin, dass auch bei höheren Umweltbelastungen in der Lithiumproduktion der positive Umwelteffekt eines Wechsels zu Elektrofahrzeugen nicht aufgehoben wird.

Die **zweite Studie** beschäftigt sich mit den methodischen Herausforderungen der Sachbilanz der Metallproduktion. Als Beispiel dient die integrierte Metallhütte von Umicore Precious Metals Refining in Hoboken, Belgien. In diesem Werk werden 17 verschiedene Metalle aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien produziert. Es wurde ein attributives Inventarmodell entwickelt, bei dem das stark vernetzte und hochdynamische System in viele Prozesseinheiten heruntergebrochen wurde. Für die Allokation wurden verschiedene Regeln angewendet. Zwei wichtige Schlussfolgerungen waren: a) die Wahl der Allokationsregel kann das Resultat für ein Metall um bis zu zwei Größenordnungen verändern, was zeigt, dass dies eine wesentliche Entscheidung bei der Modellierung ist, und b) keine Allokationsregel kann die industrielle Wirklichkeit komplett abbilden. Dynamische und parametrisierte Modelle würden das Allokationsproblem entschärfen, sind aber noch wesentlich datenaufwändiger. In der kompetitiven Industriesparte sind diese Daten schwer zu bekommen. Solange solche Modelle nicht verfügbar sind, sollte Allokation soweit es geht vermieden werden durch die Aufteilung des Gesamtprozesses in viele Prozessschritte, die einzeln bilanziert werden. Dies erlaubt auch, den unterschiedlichen Aufwand bei der Produktion verschiedener Metalle zu erfassen. Angesichts der erheblichen Preisunterschiede der Metalle ist die ökonomische der massenbasierten Allokation vorzuziehen.

In der **dritten Studie** wird die Entwicklung der Nachfrage nach Indium von CIGS Solarzellen im Rahmen von verschiedenen Energieszenarien modelliert, die den potentiellen zukünftigen Beitrag von Photovoltaik an die Elektrizitätserzeugung beschreiben. Das Modell zeigt, dass mit entsprechenden Verbesserungen z.B. bezüglich Materialeffizienz und Recyclingtechnologie, die gleiche Menge an primärem Indium für erheblich grössere installierte Kapazitäten von CIGS Solarzellen reichen könnte. Die

quantitative Nachfragemodellierung wurde ergänzt durch eine hauptsächlich qualitative Diskussion bezüglich möglicher Entwicklungen im Angebotssystem, die eine Sicherung der Nachfrage ermöglichen könnten. Zusätzlich werden mögliche Änderungen der Umweltauswirkungen in der Indiumproduktion angesprochen. Die diskutierten möglichen Entwicklungen umfassen z.B. eine Erhöhung der Extraktionseffizienz von Indium als Nebenprodukt der Zinkproduktion, um die Abhängigkeit von einer zukünftig im gleichen Masse steigenden Zinknachfrage zu verringern. Mittelfristig ist die Bereitstellung von genügend Indium für eine erhöhte CIGS Solarzellen Produktion zwar möglich, allerdings zu einem allenfalls höheren Indiumpreis.

In dieser Arbeit werden verschiedene Auswirkungen auf die Bereitstellung und Nachfrage von geochemisch seltenen Metallen thematisiert, die bei der Implementierung von neuen Energietechnologien auftreten können. Dabei wurde insbesondere der Umweltaspekt in die Debatte eingebracht, die sich bislang hauptsächlich mit der drohenden Ressourcenknappheit befasste. Diese Arbeit leistet zudem einen Beitrag, um besser mit den Schwierigkeiten der Bewertung von Umweltauswirkungen umzugehen. Das technische Verständnis ist eine Grundvoraussetzung für eine sorgfältige Berücksichtigung der Umwelteinflüsse bei der Knappheitsdebatte. In Anbetracht der zunehmende Komplexität des Ausgangsmaterials bei der Primär- und Sekundärproduktion, könnte das Verständnis darüber, wie diese Prozesse in einer LCA am besten darzustellen sind, in Zukunft noch wichtiger werden. Zudem wurde eine Verbindung zwischen der prognostizierten Entwicklung der Technologienachfrage und der quantitativen Modellierung der Metallnachfrage hergestellt. Das vorgestellte Nachfragemodell ist dynamisch, während in früheren Studien zu seltenen Metallen meist statisch modelliert wurde. Eine dynamische Modellierung erscheint besonders angebracht für Systeme, die sich in einer frühen Entwicklungsphase befinden, wenn Parameterwerte noch stark variieren. Der entwickelte Ansatz kann Szenarioanalysen im Energiesektor ergänzen, die bislang meist lediglich die Entwicklungen von Kosten oder CO₂ Ausstoss quantifizieren. Abschliessend werden die angewandten Methoden kritisch hinterfragt und Ansätze vorgestellt, um festgestellte Mängel in Zukunft zu beheben.