

Ist die Versorgung mit kritischen Rohstoffen ein Hindernis für die Energiewende?



GFZ

Prof. Dr. Sarah Gleeson
sarah.gleeson@gfz-potsdam.de

Dr. Christof Kusebauch
c.kusebauch@gfz-potsdam.de

DBFZ

Dr. Steffi Formann
steffi.formann@dbfz.de
formann@biogasundenergie.de

Prof. Dr. Ingo Hartmann
ingo.hartmann@dbfz.de

DLR

Dr. Tobias Naegler
tobias.naegler@dlr.de

FZ Jülich

Dr. Petra Zapp
p.zapp@fz-juelich.de

KIT

Dr. Manuel Baumann
manuel.baumann@kit.edu

Dr. Marcel Weil
marcel.weil@kit.edu

Einleitung

Die Energiewende und die dafür notwendigen Zukunftstechnologien werden große Mengen an kritischen und strategischen Metallen benötigen. Schon jetzt verbraucht jeder Europäer zwischen 17 und 25 Tonnen Metalle und mineralische Produkte pro Jahr [1]. Die Erzeugung erneuerbarer Energien und die Elektrifizierung des Verkehrssektors werden die zukünftige Nachfrage noch deutlich erhöhen. Windturbinen, Solarpaneele, Wärmepumpen, Stromleitungen, Batterien: sie alle benötigen sehr große Mengen verschiedener Metalle [2, 3] (► *Abbildung 1*).

Recycling wird dabei nur einen Bruchteil des künftigen Bedarfs decken können, und das auch nur für einige Metalle [4]. Für die sichere Versorgung mit notwendigen zum Teil kritischen Metallen bedeutet das, dass auch weiterhin die primäre Gewinnung durch Bergbau einige Zeit andauern wird. Da sich Lagerstätten durch seltene Ereignisse in der Erdgeschichte bilden, sind sie nur in bestimmten Regionen und Ländern der Welt zu finden, was wiederum ein geopolitisches Risiko für Lieferketten darstellen kann. Darüber hinaus gilt, selbst wenn ein potenzielles Mineralvorkommen gefunden wird, kann es aufgrund von Umwelt-, Sozial- und Governance-Restriktionen dazu kommen, dass es nie in Produktion geht.

In diesem Beitrag diskutieren wir Szenarien für die zukünftige Versorgung mit Metallen, neue Ansätze für das Auffinden von „klassischen“ Lagerstätten, Methoden für die Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Bergbau sowie das Potenzial unkonventioneller Ressourcen und Materialsubstitutionen. Die vorgestellten Forschungsergebnisse können dazu beitragen, die zukünftige Versorgung mit Rohstoffen zu verbessern und dadurch die Resilienz eines zukünftigen Energiesystems zu stärken.

Szenarien deuten auf Rohstoff-Engpässe hin

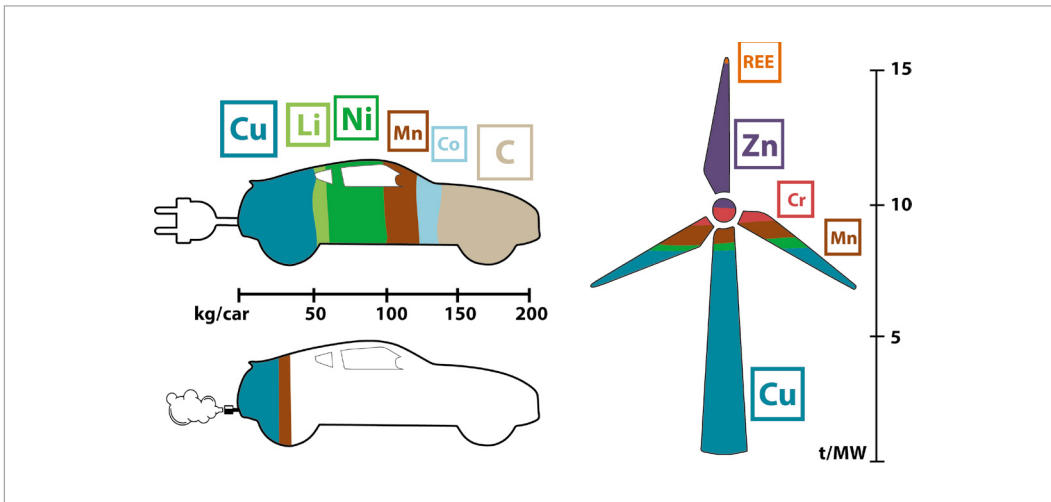
Der globale Bedarf vieler Rohstoffe, die in Technologien der Energie- und Verkehrswende verwendet werden, wird voraussichtlich in den kommenden Jahren deutlich ansteigen. Dies hat einerseits zur Folge, dass globale Produktionskapazitäten für bestimmte Rohstoffe in sehr kurzer Zeit zum Teil deutlich ausgeweitet werden müssen, andererseits steht zu erwarten, dass zeitnah Lagerstätten abgebaut werden, die heute noch nicht wirtschaftlich zu betreiben sind. In beiden Fällen ist mit kurz- bis mittelfristigen Versorgungsengpässen zu rechnen, die sich in entsprechenden Preisanstiegen der betroffenen Rohstoffe widerspiegeln werden.

► *Abbildung 2* zeigt potenzielle Engpässe für viele Rohstoffe auf, die für die Energiewende relevant sind: Die nötige Ausweitung der Produktion wird auf der y-Achse, der Abbau neuer Lagerstätten auf der x-Achse dargestellt.

Die blauen Punkte berücksichtigen ausschließlich den Rohstoffbedarf für Energie- und Verkehrstechnologien in einem ambitionierten globalen Transformations-Szenario, die roten Punkte darüber hinaus eine (grobe) Abschätzung des gesamten Bedarfs aller Anwendungen [5].

Aus diesem Angebots-/Nachfrage-Szenario geht hervor, dass zentrale Technologien der Energie- und Verkehrswende wie Batterien (Lithium, Kobalt, Nickel), Permanentmagnete in Elektromotoren und getriebelosen Windkraftanlagen (Neodym, Dysprosium), bestimmte Typen von Dünnschicht-PV-Modulen (Tellur, Selen, Gallium, Indium) und Elektrolyseuren (Iridium) von potenziellen Engpässen betroffen sein werden.

Eine Abmilderung dieser Engpässe ist prinzipiell durch Erhöhung der Materialeffizienz bei Herstellung der Anlagen, eine Verlängerung der Lebensdauer und - zumindest langfristig - durch deutlich erhöhte Recycling-Raten möglich. Zudem spielt Substitution auf der Material-, aber auch der Technologie-Ebene eine große Rolle. So könnte z.B. der Bedarf vieler Materialien, die aktuell in Batterien Verwendung



► Abbildung 1

Verbrauch kritischer und strategischer Metalle:

- für ein Elektroauto
- für ein konventionelles Auto
- für ein off-shore Windrad

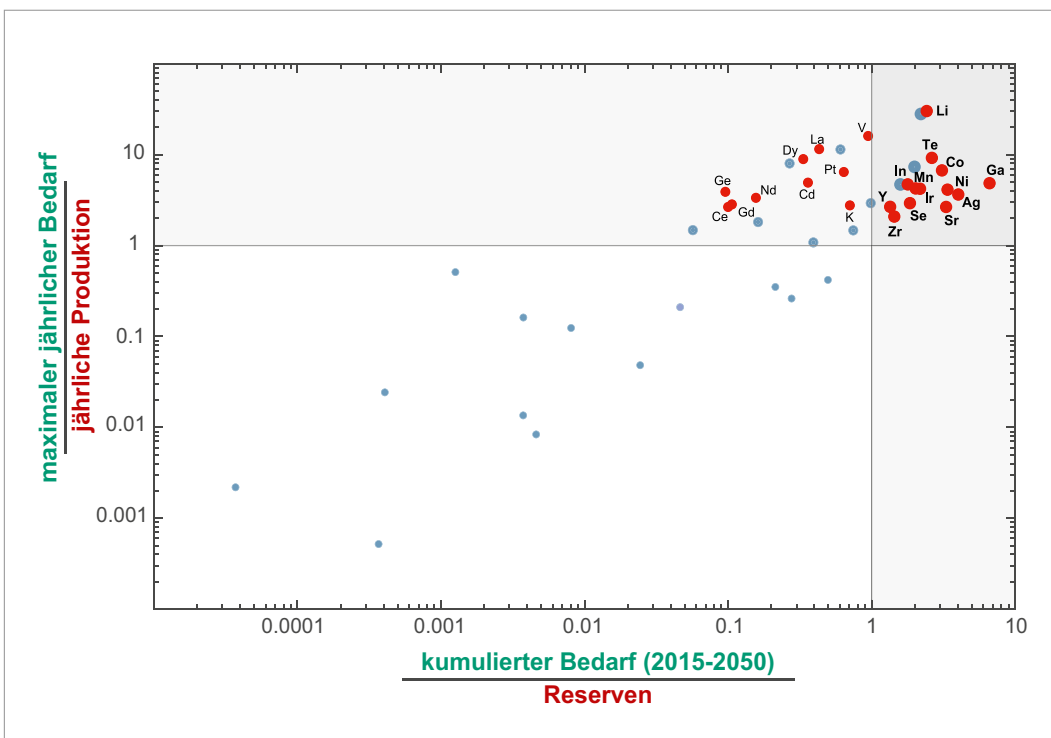
(Quelle: [4])

finden, durch die Marktreife neuer Batterie-Technologien deutlich reduziert werden. Da der motorisierte Individualverkehr einen starken Treiber des Bedarfs darstellt, könnten Mobilitäts-Konzepte, die den Verzicht auf eigene Pkw und den Umstieg auf öffentlichen Transport erleichtern, ebenfalls den Rohstoffbedarf reduzieren. Dennoch steht zu erwarten, dass neue und insbesondere auch unkonventionelle Lagerstätten gefunden und erschlossen werden müssen, die mit entsprechend höheren Kosten sowohl monetärer, aber auch ökologischer und sozialer Natur einhergehen können.

**Primäre Rohstoffe:
Wie bilden sich Lagerstätten und wie können wir sie finden?**

Große Metallvorkommen sind selten und bilden sich nur in bestimmten geologischen Umgebungen und zu bestimmten Zeiten der Erdgeschichte, daher findet man sie nur in bestimmten Gegenden auf der Erde. Auch findet man nicht alle Metalle in der gleichen Lagerstätte, sondern jedes Metall (bzw. Metallgruppe) bildet sein eigenes separates Vorkommen.

Da es 10-15 Jahre dauern kann, bis eine Lagerstätte nach ihrer Entdeckung in Produktion geht, müssen



► Abbildung 2

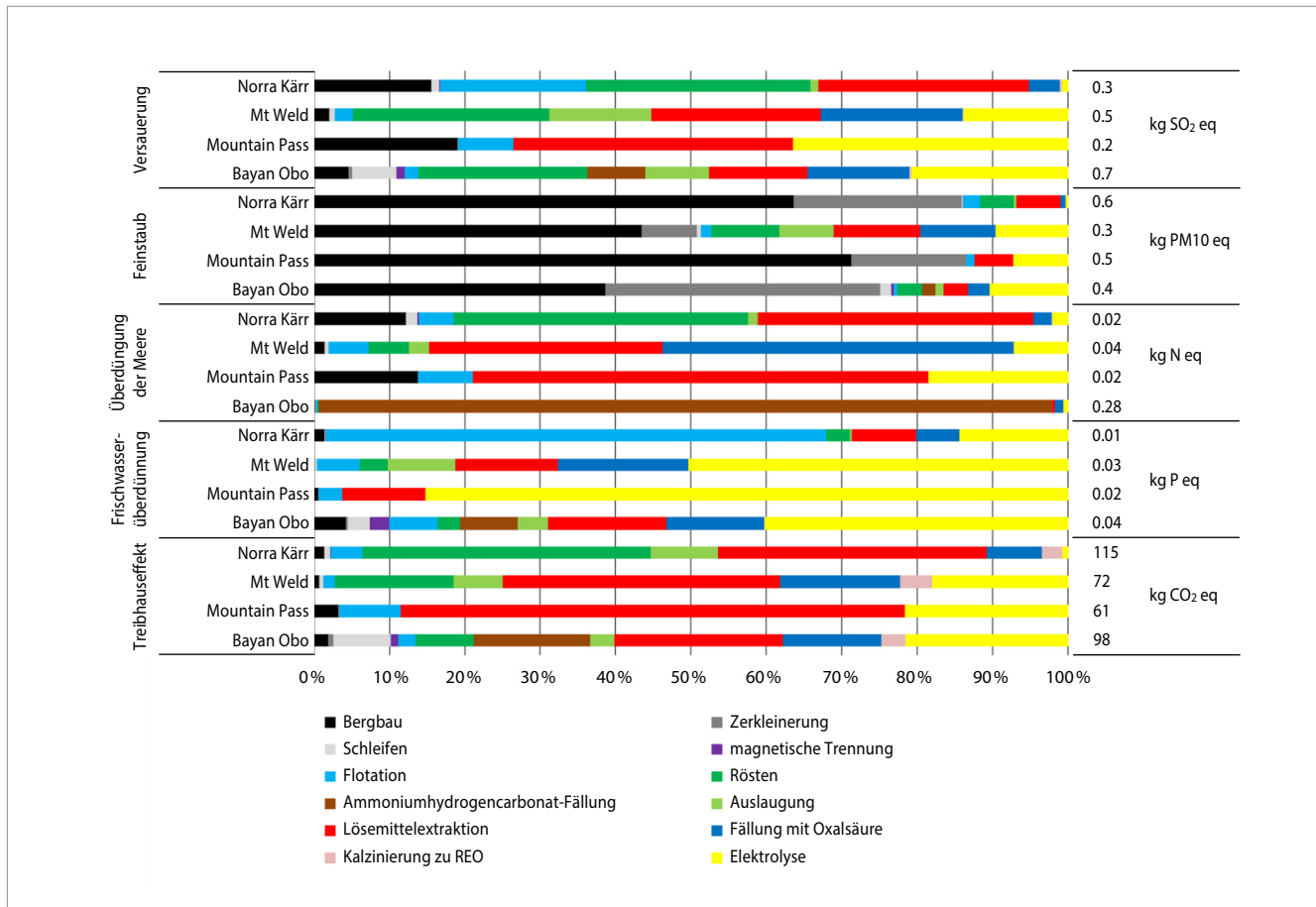
Potenzielle Engpässe für relevante Rohstoffe in Energie- und Verkehrs-Technologien

Die Achsen zeigen den jährlichen Bedarf im Verhältnis zur jährlichen Produktion (y-Achse) bzw. im Verhältnis zu den Reserven (x-Achse):

Werte oberhalb der 1-Linie zeigen Rohstoffe, deren Bedarf die Produktion übertrifft. Werte rechts der 1-Linie zeigen Rohstoffe, deren Bedarf die Reserven übertrifft.

- Blau:** Bedarf für Energie- und Verkehrs-Technologien
- Rot:** Gesamtbedarf (grobe Abschätzung)

(Quelle: [5])



► **Abbildung 3**
Umwelteffekte bei der Neodymherstellung:
 Anteile der verschiedenen Prozessstufen für verschiedene Rohstoffketten an verschiedenen Umwelteffekten

(Quelle: [9])

wir wissen, wo diese Ressourcen sind, bevor wir sie benötigen. Deshalb beschäftigt sich die aktuelle Rohstoffforschung mit der Frage, wie und wo die größten Lagerstätten der Welt entstehen und liefert grundlegende Daten für die Suche in der Tiefe. Dabei wird der "Mineral Systems"-Ansatz verfolgt, der Feldarbeit, Experimente und Modellierung kombiniert, um zu erforschen, welche Prozesse notwendig sind, um Metalle in Gesteinen anzureichern [6]. Darüber hinaus sind viele Lagerstätten an der Erdoberfläche schon abgebaut, sodass sich aktuell die Erkundung auf Vorkommen im Untergrund fokussiert, was eine große technische Herausforderung darstellt. Die Entwicklung neuer Explorationstechniken wird dabei immer wichtiger und neue Anwendungen von umweltfreundlichen geophysikalischen Methoden für die Rohstoffexploration wie Magnetotellurik und passive Seismik werden erforscht [7]. Ziel der Forschung ist dabei, Lagerstätten zu untersuchen und zu finden, die nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch bestmöglich nutzbar sind.

Umweltrisiken quantifizieren

Umweltrisiken spielen bei der Gewinnung von Primärrohstoffen eine große Rolle und müssen daher bei Abbau und Verarbeitung von Metallerzen minimiert werden. Um verschiedene Umweltauswirkungen einer ganzen Prozesskette zu bewerten, wird die Methode des „Life Cycle Assessments (LCA)“ angewendet. Wie im folgenden Beispiel zu Seltenen Erden dargestellt (► **Abbildung 3**), kann LCA dabei helfen, ökologische Risiken zu quantifizieren und dadurch einen Beitrag für die nachhaltige Gewinnung von Rohstoffen für die Energiewende leisten.

Bei der Gewinnung und Produktion von Seltenen Erden werden Techniken eingesetzt, die häufig nicht umweltverträglich sind. Mögliche Umwelteffekte hängen vor allem von der Geologie einer Lagerstätte, der Art und Zusammensetzung der Mineralien, den Abbaumethoden, der örtlichen Versorgung mit Energie und Betriebsstoffen sowie mit (umwelt) rechtlichen Rahmenbedingungen zusammen. Daher können die Umweltauswirkungen je nach Lagerstätte, Förderland und Ort der weiteren Verarbeitung sehr unterschiedlich ausfallen und

müssen für jede Lieferkette individuell untersucht werden [8]. Einige Umweltauswirkungen können durch Prozessanpassungen oder Reinigungstechniken verringert werden, andere sind durch die Mineralzusammensetzung unvermeidbar [9]. Hauptursachen, die für die verschiedenen Umwelteffekte identifiziert werden konnten, sind zum einen große Mengen an Chemikalien, die für die Separierung der Seltenen Erden benötigt werden, sowie zum anderen große Rückstandsmengen, die bei der Aufbereitung, dem Abbau und der Trennung anfallen. In den Erzen vorkommende radioaktive Begleitelemente können über die Luft und das Abwasser in die Umwelt gelangen.

Neben den Verbesserungspotenzialen bei der Primärerzeugung, durch Emissionsminderungstechniken und Recycling der Betriebsstoffe, könnte eine Erhöhung der Recyclingquoten aus sekundären Rohstoffen die Umweltauswirkungen deutlich reduzieren.

Unkonventionelle Ressourcen

Neben den bekannten „klassischen“ Erzlagerstätten stellen „unkonventionelle“ Ressourcen eine neue, möglicherweise umweltschonendere, Quelle für benötigte Metalle dar. Ein Forschungsschwerpunkt liegt hierbei auf der kombinierten Gewinnung von Energie und Rohstoffen. Wissenschaftler/innen von GFZ und KIT erforschen in verschiedenen Projekten, die Möglichkeit kritische und strategische Rohstoffe aus geothermischen Fluiden zu extrahieren, die schon jetzt zur Energiegewinnung genutzt werden. Hierbei steht vor allem Lithium im Fokus. Ein aktuelles Demonstrator-Projekt untersucht innovative Technologien zur Gewinnung dieses Schlüsselmetalls der Batterietechnik aus heißen Wässern.

Daneben kann die kombinierte stofflich-energetische Aufbereitung von Biomassereststoffen und landwirtschaftlichen Nebenprodukten durch umweltverträgliche Bioökonomie-Technologien einen Beitrag zu einer nachhaltigen und effizienten Ressourcennutzung leisten [10]. Während Pflanzen verschiedene bioverfügbare Elemente in Form von Ionen aus dem Boden aufnehmen, können diese Spuren- und Wertelemente im zellulären Gewebe angereichert werden. Diese natürliche Fähigkeit kann gezielt angewandt werden um über den Prozess des Phytomining Wertelemente zu gewinnen. Aktuell vorhandene grundlegende Kenntnisse über Phytomining-Verfahren und Phytoremediationsstrategien ermöglichen weitere Schritte zur stofflichen Verwertung elementangereicherter Biomasse. Kontinuierlich hohe Ernteerträge mit

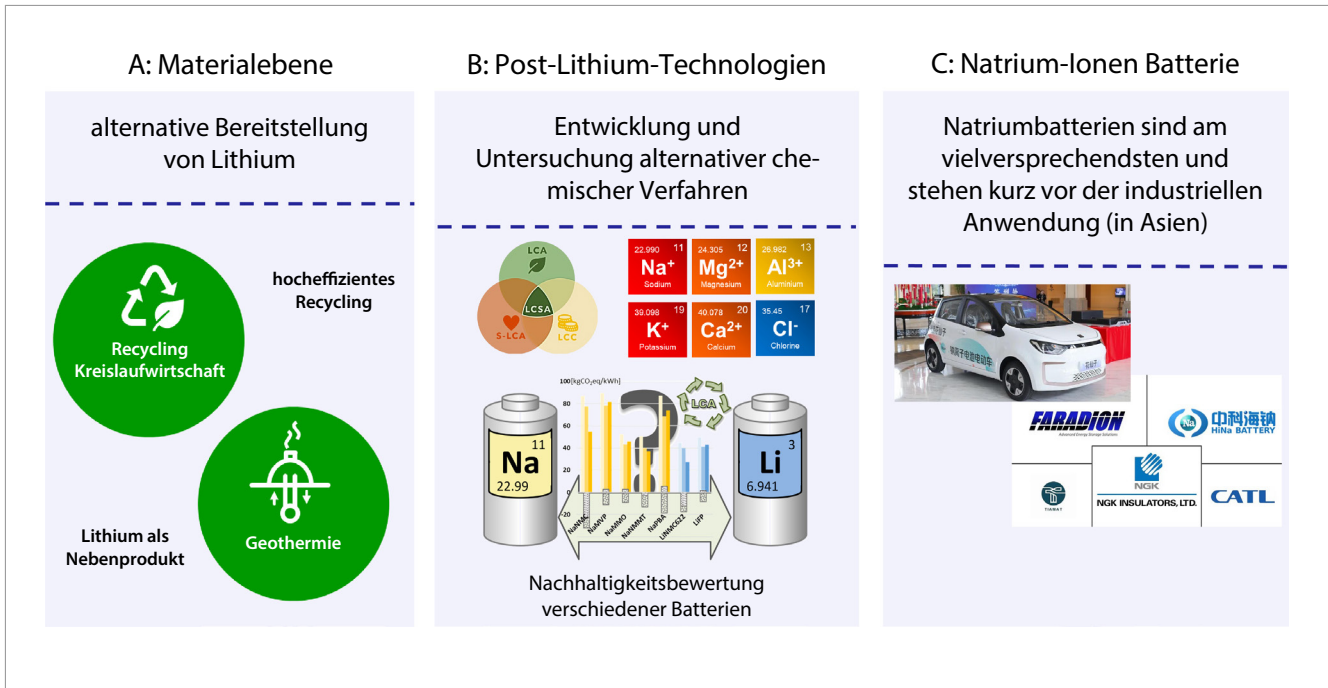
hoher Reststoffbildung erlauben dabei eine qualitative Betrachtung von Verwertungs-technologien für biogene Wertelemente und liefern Ansätze für das Management von Biomasse aus Phytominingprozessen [11].

Durch eine gezielte Verwertungsstrategie der gekoppelten stofflich-energetischen Nutzung von Biomasse, als Quelle für metallische oder mineralische Rohstoffe und Energie, können diese aus verschiedenen Biomassen zurückgewonnen und für eine Kaskadennutzung in Technologieanwendungen aufbereitet werden [12]. In einem interdisziplinären Team wird am DBFZ die Gewinnung von Metallen, vor allem von Silizium (Si), Germanium (Ge) und Seltenen Erden (REE), auf Basis einer gezielten Analyse der Biomasserohstoffe und deren Eigenschaften, erforscht. Durch Nutzung einer etablierten stofflich-energetischen Prozesskette mit den Teilschritten Vorbehandlung, Aufkonzentration, Extraktion und Nachbehandlung können über diesen Weg biogene Ressourcen einen Teil des zukünftigen Bedarfs an wertvollen Rohstoffen abdecken [13].

Die Nutzung von Wertstoffen und Rohstoffen aus Biomasse ist eine attraktive und umweltfreundliche Versorgungsquelle und kann daher langfristig einen Beitrag zu einer nachhaltigen, ressourcenschonenden und kreislauforientierten Nutzung von Ressourcen leisten.

Alternative Technologien und Materialsubstitutionen

Die Entwicklung alternativer Technologien und die Substitution von kritischen Metallen stellen eine weitere Möglichkeit dar, um Engpässe bei der zukünftigen Versorgung mit bestimmten Rohstoffen für die Energiewende zu minimieren. Lithium-Ionen-Batterien (LIB) gelten derzeit als meistversprechende Technologie für die Speicherung von erneuerbaren Energien und Umsetzung der Elektromobilität. Mit der Nutzung dieser Technologien ergeben sich aber auch Herausforderungen hinsichtlich Umweltauswirkungen und die Nutzung kritischer und knapper Ressourcen wie Kobalt, Lithium und Naturgraphit. Der steigende weltweite Bedarf an Batterien im Mobilitäts- und Energienetzsektor kann je nach Szenario, die derzeit bekannten Reserven für viele Metalle, wie Co, Li, aber auch Ni, Cu und Naturgraphit übersteigen [14]. Dies erfordert einerseits die Implementierung effizienter Recyclingansätze (hydrometallurgische Verfahren) sowie das Erschließen unkonventioneller Lagerstätten. Andererseits müssen alternative Batteriechemien untersucht werden, um potenzielle Einschränkungen existierender LIB zu überwinden.



► *Abbildung 4*
Beispiele alternativer Technologien
 (Quelle: [4])

Hierfür wird ein breites Spektrum verschiedener Anoden-Kathoden-Kombinationen, sogenannte Post-Lithium-Technologien in Form von Natrium-Ionen-, Magnesium-Ionen-, Lithium-Schwefel-, Lithium-Luft- und Zink-Luft-Batterien erforscht (► *Abbildung 4*).

Unter den derzeitigen Post-LIB-Entwicklungen gelten Natrium-Ionen-Batterien (SIB) als die am weitesten fortgeschrittene Technologie, mit einer Vielzahl an Start-ups und größeren Batterieherstellern, die eine zeitnahe Markteinführung dieser Zellchemie anstreben. Die größten Stärken von SIB sind die Verwendung billigerer und häufiger vorkommender Materialien (vor allem Aluminium anstelle von Kupfer für den Stromkollektor, Natrium anstelle von Lithium im aktiven Kathodenmaterial und im Elektrolytsalz sowie die Verwendung von kobaltfreien Kathodenmaterialien) [15]. Die Verwendung von unkritischen Materialien führt jedoch nicht automatisch zu einer nachhaltigeren Technologie, weshalb eine gründliche Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen und Ressourcenfragen notwendig ist [16]. Nichtsdestotrotz sind SIB ein vielversprechender Kandidat für unterschiedliche Anwendungen als stationäre Energiespeicher oder ausgewählten Elektromobilitätsformen und können so helfen, zukünftige Engpässe bei der Rohstoffversorgung zu beheben.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Versorgung mit kritischen Rohstoffen wird ein Hindernis für die Energiewende sein, und prognostizierte Engpässe müssen auch im Sinne der Resilienz betrachtet werden. Für grüne Technologien werden große Mengen an Metallen benötigt, die über die derzeitige und geplante Minenproduktion hinausgehen. Das Recycling von kritischen und strategischen Rohstoffen muss verbessert werden, wird aber kurz- und mittelfristig nicht reichen, um den künftigen Bedarf zu decken. Die Erfolgsquoten eine Lagerstätte zu finden sind gering, da die einfachen, an der Erdoberfläche vorkommenden, Metallerze schon abgebaut werden. Nun sind neue Explorationstechniken erforderlich, um Metalle unter der Erdoberfläche zu finden. Selbst wenn diese gefunden werden, kann es über ein Jahrzehnt dauern, bis eine neue Mine in Betrieb genommen werden kann. Zusätzlich zu den technischen Herausforderungen, die mit der Suche nach Mineralvorkommen verbunden sind, ist die gesellschaftliche Akzeptanz des Bergbaus in vielen Ländern, insbesondere in Europa, gering. Das bedeutet, dass selbst wenn eine riesige, ökonomisch sinnvolle Lagerstätte gefunden wird, Umwelt-, Sozial- und Governance-Fragen (ESG) einen Abbau verhindern können [17]. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, zukünftig sowohl die technischen als auch die gesellschaftlichen Aspekte von Mineralvorkommen zu berücksichtigen. Darüber hinaus können Rohstoffe aus unkonventionellen Ressourcen sowie technische Innovationen und

Materialsubstitutionen einen Beitrag leisten, Engpässe bei der Versorgung zu vermindern und stabile Versorgungsketten zu gewährleisten. Da die Versorgung mit Rohstoffen essenziell für ein Gelingen der Energiewende ist, sollten zukünftig die Verfügbarkeit und die Kosten von Rohstoffen in Energiesystemmodelle einbezogen werden.

Literatur

1. United Nations, The Sustainable Development Goals Report. 2019: New York.
2. Vidal, O., B. Goffé, and N. Arndt, Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, 2013. 6(11): p. 894-896.
3. Arndt, N.T., et al., Future Global Mineral Resources. *Geochemical Perspectives*, 2017. 6(1): p. 1-171.
4. IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. 2021: Paris.
5. Schlichenmaier, S. and T. Naegler, May material bottlenecks hamper the global energy transition towards the 1.5 °C target? *Energy Reports*, 2022. 8: p. 14875-14887.
6. Magnall, J.M., et al., Wie Wasser Lagerstätten bildet. *System Erde*, 2023. 13: p. 30 - 35.
7. Ryberg, T., et al., Ambient seismic noise analysis of LARGE-N data for mineral exploration in the Central Erzgebirge, Germany. *Solid Earth*, 2022. 13(3): p. 519-533.
8. Schreiber, A., J. Marx, and P. Zapp, Life Cycle Assessment studies of rare earths production- Findings from a systematic review. *Science of the Total Environment*, 2021. 791.
9. Zapp, P., et al., Environmental impacts of rare earth production. *Mrs Bulletin*, 2022. 47(3): p. 267-275.
10. Formann, S., et al., Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities Through Sugarcane Residues. *Frontiers in Energy Research*, 2020. 8.
11. Schliermann, T., et al., High quality biogenic silica from combined energetic and material utilization of agricultural residues. *Proceedings, 7th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venedig*, 2018.
12. Prempeh, C.O., et al., Extraction and Characterization of Biogenic Silica Obtained from Selected Agro-Waste in Africa. *Applied Sciences-Basel*, 2021. 11(21).
13. Formann, S., Schliermann, T., Value Element Recovery from Biomass Resources. *eebionews - EERA Bioenergy Newsletter*, 2023, issue 19:12.
14. Weil, M.; Peters, J. F. und Baumann, M., Stationary battery systems: Future challenges regarding resources, recycling, and sustainability, 2020. *The Material Basis of Energy Transitions*. Ed.: A. Bleicher, 71–89, Academic Press.
15. Baumann, M., et al., Prospective Sustainability Screening of Sodium-Ion Battery Cathode Materials. *Advanced Energy Materials*, 2022. 12(46).
16. Peters, J.F., et al., On the environmental competitiveness of sodium-ion batteries under a full life cycle perspective - a cell-chemistry specific modelling approach. *Sustainable Energy & Fuels*, 2022. 6(2): p. 512-513.
17. Jowitt, S.M., G.M. Mudd, and J.F.H. Thompson, Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production. *Communications Earth & Environment*, 2020. 1(1).