

dossier.

Die Energiewende beschleunigen

Ressourcenüberlegungen | Wie schnell das Energiesystem in Richtung Nachhaltigkeit transformiert wird, hängt von diversen Faktoren ab. Eine wichtige Frage kommt zunehmend in den Fokus: die erforderlichen Ressourcen.

Accélérer la transition

Réflexions à propos des ressources | La vitesse à laquelle le système énergétique évoluera pour devenir durable dépend de divers facteurs. Un élément essentiel est de plus en plus mis en avant: les ressources nécessaires pour la transition.



Bild: Figure: Shutterstock/Alexey Rezvykh

Rohstoffe

Bauxitmine für die Aluminium-
erzgewinnung bei der kasachischen
Stadt Arqalyq.

Matières premières

Extraction de minerai d'alumi-
nium dans une mine de bauxite
près de la ville d'Arkalyk, au
Kazakhstan.

HARALD DESING, HAUKE SCHLESIER

In den Jahren 2020 und 2021 verzögerte eine Siliziumknappheit den Solarausbau. Ironischerweise wurde diese Krise durch eine Überkapazität ausgelöst: Vier grosse chinesische Siliziumhersteller liessen ihre Produktion um 2019 derart wachsen, dass andere Hersteller unter diesem Wettbewerb aus dem Markt gedrängt wurden oder ihre Expansionspläne auf Eis legten [1]. Nach wenigen Monaten stagnieren der Nachfrage wegen der Corona-Krise liessen neue Siliziumwafer-Produzenten und der wieder in Fahrt gekommene Solarausbau die Nachfrage nach Silizium in die Höhe schnellen – aber es wurden kaum neue Produktionskapazitäten hinzugebaut. Durch den Engpass in der Siliziumproduktion stiegen die Preise stark an und die Wachstumsraten blieben hinter den Erwartungen zurück. Erst 2023 sanken die Preise wieder und der Engpass schien beseitigt [2].

Nun, im Jahr 2024, ist es mittlerweile Konsens, dass wir unsere Anstrengungen in Sachen Energiewende vervielfachen müssen, wenn wir die Klimarisiken minimieren wollen [3–5]. Für den Aufbau der erneuerbaren Infrastruktur – also Solaranlagen, Windparks, Netzbatterien, Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge usw. – werden jedoch Energie und Materialien benötigt [6–8]. Wenn wir den Ausbau beschleunigen, müssen auch die Lieferketten entsprechend wachsen. Und nicht nur das: Je länger wir warten, desto schneller müssen wir später die Energiewende vorantreiben und desto kritischer werden mögliche Engpässe in den Lieferketten. Angesichts der Dringlichkeit der Klimakrise und der zentralen Rolle von Materialien für die Energiewende sollten Lieferengpässe, wie sie 2020 beim für die Photovoltaik so wichtigen Silizium aufgetreten sind, unbedingt vermieden werden. Gefragt ist daher eine vorausschauende Materialstrategie, wie sie beispielsweise die EU für kritische Rohstoffe entwickelt hat [9].

Die Aluminium-Energie-Rückkopplung

Nehmen wir Aluminium als Beispiel. Dieses Leichtmetall wird heute in vielen erneuerbaren Technologien verwendet, unter anderem für die Rahmen von Solarmodulen und deren Befestigung auf dem Dach – etwa 4 kg pro Quadratmeter. Es braucht Zeit, neue Minen für Bauxit zu erschliessen, neue Raffinerien für Aluminiumoxid zu bauen oder Schmelzwerke für Aluminium auszubauen. Und die Herstellung von Aluminium ist energieintensiv. Diese Energie muss mit dem bereits bestehenden Energiesystem bereitgestellt werden.

Mehr Aluminium braucht also mehr Energie, und im Falle der Solarenergie bedeutet mehr Energiekapazität auch mehr Aluminium. Dieser Zusammenhang gilt generell für Materialien und Energie, wird aber in den gegenwärtig diskutierten Energiestrategien nicht ausreichend berücksichtigt. Ein hoher Energiebedarf führt zu einem verzögerten Ausbau der Infrastruktur für erneuerbare Energien, und damit insgesamt zu höheren Emissionen und Klimarisiken. Hinzu kommt, dass insbesondere die Primärproduktion von Materialien massive Umweltauswirkungen verursacht und soziale Gruppen beeinträchtigen

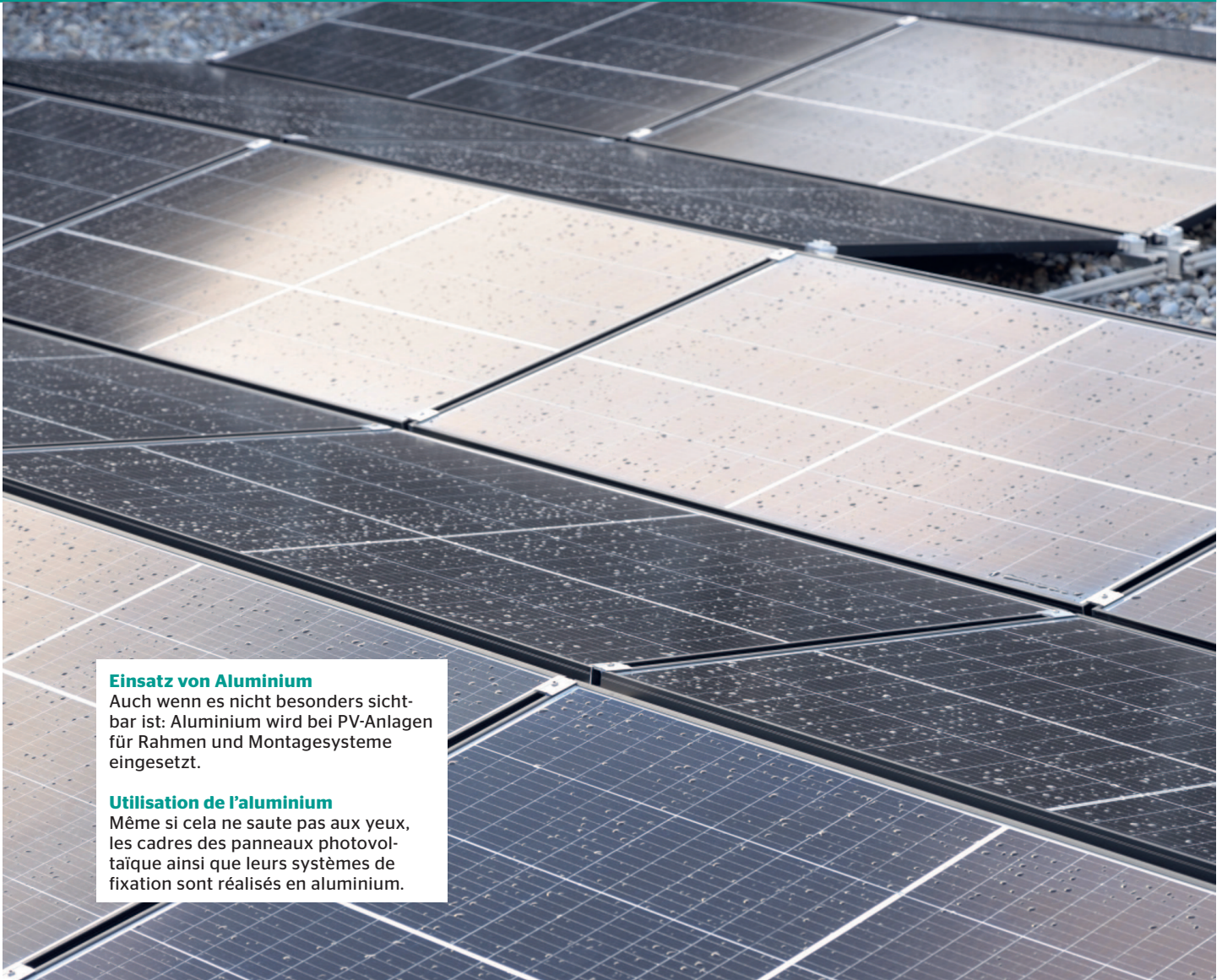
En 2020 und 2021, eine pénurie de silicium a retardé le développement du photovoltaïque (PV). Ironiquement, cette crise a été déclenchée par une surcapacité: aux alentours de 2019, quatre grands fabricants chinois de silicium ont augmenté leur production à tel point que d'autres fabricants ont été évincés du marché ou ont renoncé temporairement à leurs projets d'expansion [1]. Après quelques mois de stagnation de la demande en raison de la pandémie de Covid-19, les nouveaux producteurs de wafers de silicium et la reprise du développement du photovoltaïque ont provoqué une montée en flèche de la demande de silicium, sans que de nouvelles capacités de production ne soient ajoutées, ou presque. En raison de ce manque de production, les prix du silicium ont fortement augmenté et les taux de croissance n'ont pas été à la hauteur des attentes. Il a fallu attendre 2023 pour que les prix baissent à nouveau et que le goulot d'étranglement semble avoir disparu [2].

Aujourd'hui, en 2024, il est désormais évident que nous devons multiplier nos efforts en matière de transition énergétique si nous voulons minimaliser les risques climatiques [3–5]. Or, le développement des infrastructures renouvelables – c'est-à-dire les installations photovoltaïques, parcs éoliens, batteries de réseau, pompes à chaleur, véhicules électriques, etc. – nécessite de l'énergie et des matériaux [6–8]. Pour pouvoir accélérer ce développement, les chaînes d'approvisionnement doivent croître en conséquence. Et ce n'est pas tout: plus nous attendons, plus nous devons par la suite accélérer la transition énergétique, et plus les éventuels goulots d'étranglement dans les chaînes d'approvisionnement deviendront critiques. Compte tenu de l'urgence de la crise climatique et du rôle essentiel des matériaux dans la transition énergétique, il est absolument indispensable d'éviter les goulots d'étranglement dans l'approvisionnement, tels que celui qui s'est produit en 2020 pour le silicium, si important pour le photovoltaïque. Il est donc nécessaire de mettre en place une stratégie anticipative pour les matériaux, comme l'a fait notamment l'UE pour les matières premières critiques [9].

La rétroaction énergétique de l'aluminium

Prenons l'exemple de l'aluminium. Ce métal léger est aujourd'hui utilisé dans de nombreuses technologies renouvelables, notamment pour les cadres des panneaux solaires et leur fixation sur les toits – à raison d'environ 4 kg d'aluminium par mètre carré. Or, il faut du temps pour exploiter de nouvelles mines de bauxite, construire de nouvelles raffineries d'alumine ou augmenter la capacité des fonderies d'aluminium. Et la production d'aluminium nécessite beaucoup d'énergie, qui doit être fournie par le système énergétique déjà existant.

Produire plus d'aluminium nécessite donc plus d'énergie et, dans le cas de l'énergie solaire, plus de capacité énergétique signifie aussi plus d'aluminium. Cette relation s'applique généralement aux matériaux et à l'énergie, mais elle n'est pas suffisamment prise en compte dans les stratégies énergétiques discutées actuellement. Une forte



Einsatz von Aluminium

Auch wenn es nicht besonders sichtbar ist: Aluminium wird bei PV-Anlagen für Rahmen und Montagesysteme eingesetzt.

Utilisation de l'aluminium

Même si cela ne saute pas aux yeux, les cadres des panneaux photovoltaïque ainsi que leurs systèmes de fixation sont réalisés en aluminium.

kann. Ein grosser Teil der Lagerstätten von Mineralien, die für die Energiewende benötigt werden, wie Bauxit, Lithium, Kupfer und Silber, befindet sich unter dem Land indigener und anderer landgebundener Gemeinschaften [10] sowie in den letzten halbwegs intakten Ökosystemen unseres Planeten.

Wenn wir die Zusammenhänge zwischen den Teilsystemen – zum Beispiel Materialien, Energie, gesellschaftliche Nachfrage – untersuchen, können wir herausfinden, welche Strategien effektiv genug sind, um Klimaziele mit dynamisch verfügbaren Ressourcen zu erreichen. Sekundärmaterialien werden beispielsweise erst dann verfügbar, wenn Produkte oder Infrastrukturen nicht mehr genutzt werden. Autos mit Verbrennungsmotor enthalten grosse Mengen an Aluminium sowohl in der Karosserie als auch in den Motorblöcken. Recycling lässt sich also nicht beliebig skalieren, sondern hängt von der Nutzung dieser Materialien in der Gesellschaft ab. Die erneuerbare Infrastruktur kann nur dann mit recycelten Materialien aufgebaut werden, wenn diese in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung stehen.

demande en énergie entraîne un retard dans le développement des infrastructures pour les énergies renouvelables, et donc une augmentation globale des émissions et des risques climatiques. À cela s'ajoute le fait que la production primaire de matériaux, en particulier, a un impact considérable sur l'environnement et peut affecter certains groupes sociaux. Une grande partie des gisements de minéraux nécessaires à la transition énergétique, tels que la bauxite, le lithium, le cuivre et l'argent, se trouvent sous les terres de communautés indigènes et d'autres communautés liées à leurs terres [10], ainsi que dans les derniers écosystèmes à peu près intacts de notre planète.

En étudiant les relations entre les sous-systèmes – par exemple les matériaux, l'énergie, la demande sociétale –, nous pouvons déterminer quelles stratégies sont suffisamment efficaces pour atteindre les objectifs climatiques avec des ressources disponibles de manière dynamique. Les matériaux secondaires, par exemple, ne deviennent disponibles que lorsque des produits ou infrastructures ne sont plus utilisés. Les voitures dotées de moteur à combustion contiennent de grandes quantités d'aluminium,

Darüber hinaus gibt es weitere Möglichkeiten, um potenzielle Engpässe in den Lieferketten zu umgehen: Materialien können in vielen Anwendungen substituiert werden, und der Einsatz von Materialien lässt sich priorisieren. Betrachten wir das Beispiel Aluminium. Die Verwendung dieses Leichtmetalls nimmt in unserer Gesellschaft seit Jahrzehnten rasant zu. Es wird in grossen Mengen für Batterien, Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen, Kabel oder Solaranlagen verwendet. Für einige Anwendungen, zum Beispiel für Elektroden für Batterien, Wärmetauscher in Wärmepumpen, oder als elektrischer Leiter ist Aluminium essenziell und schwer zu ersetzen. Als Rahmen und Montagesystem für Solarpaneele lässt sich Aluminium hingegen gut ersetzen. Und das ist auch nötig, denn um die notwendige Terawattskala für PV zu erreichen, müssten wir die Menge an Aluminium, die wir heute bereits in der Gesellschaft haben, allein dafür mindestens verdoppeln. Der dafür nötige Ausbau der Aluminium-Lieferketten würde die Energiewende massiv verzögern. Studien haben kürzlich auf diesen möglichen Engpass bei Aluminium für PV hingewiesen [11,12]. Es ist also wichtig, frühzeitig Strategien zu erarbeiten, um solche möglichen Engpässe zu vermeiden.

Auf Aluminium in PV verzichten

Bereits heute sind Glas-Glas-PV-Paneele auf dem Markt, die ohne Aluminiumrahmen auskommen. Obwohl 20 % mehr Glas benötigt wird, sind sowohl der Rohstoff als auch der Produktionsprozess weniger kritisch als bei Aluminium. Auch die Ökobilanz ist vorteilhaft: Gegenüber gerahmten Varianten schneiden rahmenlose Paneele im direkten Vergleich bei der Klimawirkung um 10 % besser ab [13].

Hinzu kommt das Montagesystem, das standardmässig in Aluminium ausgeführt wird. Hier gab es bereits in den letzten Jahren eine massive Verbesserung der Materialeffizienz, vor allem durch den Einsatz von Monorail-Systemen, die keine gekreuzten Schienen mehr verwenden. Vorteilhaft sind auch Indachsysteme, die auf der bereits am Haus vorhandenen Holzlattung angebracht werden können. Es gibt auch Montagesysteme, die ganz ohne Aluminium auskommen. So werden beispielsweise Aufständerungen für die Montage auf Flachdächern bereits in verzinktem Stahlblech gefertigt oder die Paneele direkt auf die Dach- und Fassadenflächen geklebt.

Die Vermeidung von Aluminium in nicht wesentlichen Anwendungen, wie das Beispiel der Rahmen und Montagesysteme verdeutlicht, kann sich stark auf die Dynamik der Energietransition auswirken. Wenn die gesamte Lieferkette für Primäraluminium schnell und in grossem Umfang skaliert werden muss, braucht dies Zeit und hat negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Bevölkerung. Diese Verzögerungen führen unweigerlich zu einer langsameren Energiewende als sonst möglich. Und damit zu höheren kumulierten CO₂-Emissionen und Klimarisiken. Wenn wir hingegen die Energiewende mit Materialien vorantreiben, die leichter zu mobilisieren oder bereits in der Gesellschaft vorhanden sind, kann die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern deutlich schneller reduziert werden.

tant dans la carrosserie que dans les blocs moteurs. Le recyclage ne peut donc pas être échelonné à volonté, mais dépend de l'utilisation de ces matériaux au sein de la société. L'infrastructure renouvelable ne peut être construite avec des matériaux recyclés que si ceux-ci sont disponibles en quantité et qualité suffisantes.

Il existe en outre d'autres possibilités de contourner les goulets d'étranglement potentiels dans les chaînes d'approvisionnement: des matériaux peuvent être substitués à d'autres dans de nombreuses applications, et l'utilisation des matériaux peut être priorisée. Prenons à nouveau l'exemple de l'aluminium. Son utilisation augmente rapidement dans notre société depuis des décennies. Il est employé en grandes quantités pour les batteries, les véhicules électriques, les pompes à chaleur, les câbles ou les installations photovoltaïques. Pour certaines applications, par exemple pour les électrodes des batteries, les échangeurs de chaleur des pompes à chaleur ou comme conducteur électrique, l'aluminium est essentiel et difficile à remplacer. En revanche, il est facile à remplacer pour les cadres et les systèmes de fixation des panneaux solaires. Et ce sera aussi inévitable, car rien que pour atteindre l'échelle du térawatt nécessaire pour le PV, nous devrions au moins doubler la quantité d'aluminium déjà utilisée aujourd'hui dans la société. L'extension des chaînes d'approvisionnement en aluminium nécessaire à cet effet retarderait considérablement la transition énergétique. Des études ont d'ailleurs récemment attiré l'attention sur cette possible pénurie d'aluminium pour le PV [11,12]. Il est donc important d'élaborer à temps des stratégies pour éviter ces éventuels goulets d'étranglement.

Renoncer à l'aluminium dans le secteur du PV

Il existe déjà sur le marché des panneaux PV bi-verre qui se passent de cadre en aluminium. Bien qu'ils nécessitent 20 % de verre en plus, la matière première et le processus de production sont tous deux moins critiques que dans le cas de l'utilisation d'aluminium. Le bilan écologique est également avantageux: en comparaison directe, les panneaux sans cadre ont un impact climatique inférieur de 10 % à celui des variantes avec cadre [13].

À cela s'ajoute le système de fixation, qui est habituellement réalisé en aluminium. Dans ce domaine, il y a déjà eu une amélioration considérable de l'efficacité des matériaux au cours des dernières années, notamment grâce à l'utilisation de systèmes monorails qui n'utilisent plus de rails croisés. Les systèmes intégrés au toit, qui peuvent être montés sur les lattes en bois déjà présentes sur la maison, sont aussi avantageux. Il existe également des systèmes de fixation qui se passent totalement d'aluminium. Par exemple, les supports pour le montage sur les toits plats sont déjà fabriqués en tôle d'acier galvanisée, ou les panneaux sont directement collés sur les surfaces du toit et de la façade.

Éviter l'aluminium dans les applications non essentielles, comme l'illustre l'exemple des cadres et des systèmes de fixation, peut avoir un effet important sur la



Fossile Infrastruktur umnutzen

Ölraffinerie in den USA. Künftig können Komponenten oder Materialien der ausgedienten Infrastruktur für nachhaltigere Energieformen genutzt werden.

Réutiliser l'infrastructure fossile

Raffinerie de pétrole aux États-Unis. À l'avenir, des composants ou matériaux de l'infrastructure fossile en fin de vie pourront être réutilisés pour des formes d'énergie plus durables.

Die fossile Infrastruktur umnutzen

Eine weitere Strategie zur Beschleunigung der Transition kann die Nutzung der fossilen Infrastruktur sein. Mit fortschreitender Energiewende werden thermische Kraftwerke, Pipelines, fossil betriebene Fahrzeuge, Gas- und Ölheizungen obsolet. Die enthaltenen Materialien können prinzipiell für den Bau von Windparks, Solaranlagen, Elektrofahrzeugen, Wärmepumpen usw. verwendet werden. Nur ist die Zusammensetzung der fossilen und erneuerbaren Komponenten zum Teil sehr unterschiedlich. Dennoch kann man versuchen, möglichst viele der benötigten Komponenten aus Materialien herzustellen, die in der fossilen Infrastruktur ausreichend vorhanden sind. Türme für Windturbinen können direkt aus Stahl aus der fossilen Infrastruktur gebaut werden, wodurch die CO₂-Emissionen und der Energieaufwand um 25% reduziert werden können. Stahl kann auch für Montagesysteme von PV-Anlagen verwendet werden, sowohl auf Dächern als auch über Parkplätzen, Kläranlagen etc. Ersetzt man damit das Aluminium, welches heute noch überwiegend verwendet wird, sinken die CO₂-Emissionen und der Energieaufwand für Aufdach-PV-Systeme um beachtliche 30%. Der Grossteil dieser Einsparung kommt aus der Verwendung von Stahl anstelle von Aluminium; Recyclingstahl aus der fossilen Infrastruktur verbessert die Umweltbilanz aber zusätzlich, spart Primärressourcen und reduziert negative Auswirkungen auf die Gesundheit.

dynamique de la transition énergétique. Si une croissance rapide et considérable de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement en aluminium primaire devait devenir nécessaire, cela prendrait du temps et aurait un impact négatif sur l'environnement et la population. Ces retards conduiraient inévitablement à un ralentissement de la transition énergétique. Et donc à des émissions de CO₂ cumulées et à des risques climatiques plus élevés. En revanche, si nous faisons avancer la transition énergétique avec des matériaux plus faciles à mobiliser ou déjà disponibles au sein de la société, notre dépendance aux énergies fossiles peut être réduite beaucoup plus rapidement.

Réutiliser l'infrastructure fossile

Une autre stratégie pour accélérer la transition peut consister à utiliser l'infrastructure fossile existante. Au fur et à mesure de la progression de la transition énergétique, les centrales thermiques, les pipelines, les véhicules diesel ou à essence, ou encore les chauffages au gaz et au mazout, deviendront obsolètes. Les matériaux qu'ils contiennent peuvent en principe être réutilisés pour la construction de parcs éoliens, d'installations photovoltaïques, de véhicules électriques, de pompes à chaleur, etc. Seul inconvénient: la composition des composants fossiles et renouvelables est parfois très différente. On peut néanmoins essayer de fabriquer le plus grand nombre

Teile der heute fossilen Infrastruktur lassen sich auch so umbauen, dass sie direkt zur Energiewende beitragen können. Zum Beispiel können Stahlrohre von Gaspipelines für Fernwärmenetze verwendet werden, was bis zu 45% der Umweltauswirkungen beim Bau der Netze spart. Oder bestehende Dieselbusse im Stadtverkehr können zu Elektrobussen umgerüstet werden. Neu angeschaffte Elektrobusse können dann direkt zum Ausbau des öffentlichen Verkehrs beitragen, und die Flotte lässt sich viel schneller dekarbonisieren.

Weitere Forschung ist nötig

Um die Energiewende zu meistern, ist eine vorausschauende und ressourcenbasierte Planung unerlässlich. Dazu bedarf es angepasster und erweiterter Modelle, Methoden und Strategien, die die verschiedenen Teilsysteme miteinander verknüpfen. Obwohl dies noch Gegenstand der Forschung ist, ist bereits jetzt klar, dass Materialien in den nötigen schnellen Energiewende-Szenarien eine fundamentale Rolle spielen. Wir müssen daher versuchen, die dynamisch verfügbaren Materialien so einzusetzen, dass die Chancen erhöht werden, einen Klimakollaps zu vermeiden.

Referenzen | Références

- [1] www.canarymedia.com/articles/solar/whats-behind-solars-polysilicon-shortage-and-why-its-not-getting-better-anytime-soon
- [2] www.bernreuter.com/polysilicon/price-trend/
- [3] H. Desing, R. Widmer, «Reducing climate risks with fast and complete energy transitions: applying the precautionary principle to the Paris agreement», *Environmental Research Letters*, 16, S. 121002, 2021.
- [4] United Nations Environment Programme, *Emission Gap Report 2022: The Closing Window - Climate crisis calls for rapid transformation of societies*, 2022.
- [5] N. Wunderling et al., «Global warming overshoots increase risks of climate tipping cascades in a network model», *Nature Climate Change*, 13, S. 75-82, 2023.
- [6] S. Wang et al., «Future demand for electricity generation materials under different climate mitigation scenarios», *Joule*, 2023.
- [7] UNEP, *Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend - Pathways to a liveable planet as resource use spikes*. 2024, International Resource Panel: Nairobi.
- [8] H. Desing et al., «Mobilizing materials to enable a fast energy transition: A conceptual framework», *Resources, Conservation and Recycling*, S. 200, 2024.
- [9] single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en
- [10] E. Lèbre et al., «The social and environmental complexities of extracting energy transition metals», *Nat Commun*, 11, S. 4823, 2020.
- [11] A. Lennon et al., «The aluminium demand risk of terawatt photovoltaics for net zero emissions by 2050», *Nature Sustainability*, 5, S. 357-363, 2022.
- [12] J. C. Goldschmidt et al., «Technological learning for resource efficient terawatt scale photovoltaics», *Energy Environ. Sci.*, 14, S. 5147-5160, 2021.
- [13] A. Müller et al., «A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, S. 111277, 2021.

Autoren | Auteurs

Dr. **Harald Desing** forscht zu Themen der Ressourceneffizienz und Transformation an der Empa | effectue des travaux de recherche consacrés à l'efficacité des ressources et à la transformation à l'Empa.
→ Empa, 9014 St. Gallen
→ harald.desing@empa.ch

Hauke Schlesier doktoriert an der Empa über die Beschleunigung der Energiewende mit Kreislaufstrategien | effectue son doctorat, dédié à l'accélération de la transition énergétique grâce à des stratégies de recyclage, à l'Empa.
→ hauke.schlesier@empa.ch

possible de composants nécessaires à partir de matériaux disponibles en quantité suffisante dans l'infrastructure fossile. Les tours des éoliennes peuvent être construites directement avec de l'acier issu de l'infrastructure fossile, ce qui permet de réduire de 25% les émissions de CO₂ ainsi que les dépenses énergétiques. L'acier peut également être utilisé pour les systèmes de fixation des installations photovoltaïques, que ce soit sur les toits ou au-dessus des parkings, des stations d'épuration, etc. Si l'on remplace ainsi l'aluminium, encore majoritairement utilisé aujourd'hui, les émissions de CO₂ et les dépenses énergétiques pour les systèmes photovoltaïques installés sur les toits diminueraient de 30%, ce qui est considérable. La majeure partie de ces économies proviendraient de l'utilisation d'acier à la place d'aluminium; l'acier recyclé provenant de l'infrastructure fossile améliore non seulement le bilan environnemental, mais permet également d'économiser les ressources primaires et de réduire les effets négatifs sur la santé.

Certaines parties de l'infrastructure fossile actuelle peuvent aussi être transformées de manière à contribuer directement à la transition énergétique. Par exemple, les tuyaux en acier des gazoducs peuvent être exploités pour les réseaux de chauffage à distance, ce qui permet de réduire l'impact environnemental de la construction des réseaux de jusqu'à 45%. Ou encore, les bus diesel utilisés actuellement pour le transport urbain pourraient être convertis en bus électriques. Les bus électriques achetés neufs pourraient alors contribuer directement au développement des transports publics, et la flotte pourrait être décarbonée beaucoup plus rapidement.

Des travaux de recherche supplémentaires sont nécessaires

Pour réussir la transition énergétique, une planification anticipée en fonction des ressources est indispensable. Pour cela, il est nécessaire de disposer de modèles avancés ainsi que de méthodes et de stratégies adaptées reliant les différents sous-systèmes entre eux. Bien que ce sujet fasse encore l'objet de travaux de recherche, il est déjà clair que les matériaux joueront un rôle fondamental dans les scénarios élaborés pour la transition énergétique, qui est non seulement nécessaire, mais doit également être aussi rapide que possible. Nous devons donc essayer d'utiliser les matériaux disponibles de manière dynamique afin d'augmenter les chances d'éviter un effondrement du climat.