

dossier.

Metalle als Energiespeicher

Kreislaufsysteme | Künftig könnten gewisse Metalle das Energiesystem dekarbonisieren, indem sie zur Energiespeicherung eingesetzt werden. Um Wärme freizusetzen, lassen sie sich statt fossiler Energieträger verbrennen oder mit Wasser oxidieren.

Stocker l'énergie à l'aide de métaux

Systèmes circulaires | Certains métaux pourraient, à l'avenir, aider à décarboner le système énergétique en étant utilisés pour stocker de l'énergie. Ils peuvent fournir de la chaleur en étant brûlés à la place de combustibles fossiles ou oxydés avec de l'eau.



RADOMÍR NOVOTNÝ

In unserer Alltagserfahrung ist das Verbrennen von Metallen kaum präsent. Dies könnte zur Schlussfolgerung verleiten, dass Metalle unbrennbar sind. In pulverförmigem Zustand brennen aber gewisse Metalle gut, ja manchmal sogar explosionsartig. Neu ist dies nicht, denn schon seit dem Mittelalter wird Metallpulver in der Pyrotechnik verbrannt, um farbiges Licht zu erzeugen. Beispielsweise färbt das chemische Element Barium die Flamme grün, Natrium gelb und Lithium rot.

Mit Metallen, die im Wasser oxidieren, sind wir eher vertraut – und denken dabei beispielsweise an alte Schiffe oder Hafenanlagen, deren Rostschutz in die Tage gekommen ist. Oder, was dem hier vorgestellten Prinzip näher kommt, an Natriumklümpchen, die der Chemielehrer auf der Wasseroberfläche in einer Glasschale tanzen liess. Dabei entstand auch Wasserstoff, der sich manchmal entzündete. Mit diesem Redox-Prozess kann neben dem Wasserstoff auch Wärme erzeugt werden, denn die chemische Reaktion ist exotherm. Auch diese Art der chemischen Reaktion ist nicht neu, denn sie wurde beispielsweise bereits genutzt, um den Wasserstoff für den ersten bemannten Gasballonflug am 1. Dezember 1783 in Paris zu liefern. Dazu wurden Eisenspäne in Schwefelsäure aufgelöst. Drei Tage dauerte damals das Auffüllen des Ballons.

Neues Einsatzgebiet für die Energiespeicherung

Diese beiden schon länger bekannten chemischen Reaktionen, bei denen das Metall entweder an der Luft verbrannt oder in Wasser oxidiert wird, sind kürzlich ins Blickfeld der Energieforschung gerückt, weil sie eine elegante Lösung für die Langzeit-Energiespeicherung darstellen. Diese gewinnt mit dem Wandel des Energiesystems von fossilen hin zu erneuerbaren Energieträgern zunehmend an Bedeutung.

Um die chemisch gebundene Energie gewisser Metalle zu nutzen, können diese durch Oxidation mit Luft, Dampf oder Wasser in Metalloxide überführt werden («Entladen»). Diese lassen sich anschliessend wieder reduzieren, d. h. in die metallische Form zurückführen, womit erneuerbare Energie gespeichert wird («Laden»).

In Metalloxiden ist der Sauerstoff fest gebunden. Die Oxide können im Prozess eingesammelt und rezykliert werden. Dadurch ist die Materialeffizienz hoch, denn im Unterschied zum Verbrennen fossiler Brennstoffe, bei denen die Verbrennungsgase wie CO₂ in die Luft entweichen und wegen der Verdünnung nur mit hohem Aufwand wieder eingesammelt werden können, ist hier das Einsammeln viel einfacher.

Bei metallbasierten Energiespeichern kommt auch Wasserstoff vor, einerseits zum Reduzieren von Metalloxiden und andererseits als Produkt, wenn die Metalle mit Wasser bzw. Wasserdampf oxidiert werden. Der bei der Oxidation entstehende entzündliche und extrem flüchtige Wasserstoff muss dabei nicht langfristig in Druckbehältern gespeichert oder über grosse Distanzen transportiert und verteilt werden, denn er kann direkt vor Ort genutzt werden. Metalle als Energiespeicher ermöglichen somit eine

Dans la vie de tous les jours, il est plutôt rare d'entendre parler de la combustion des métaux. Cela pourrait inciter à penser que ces éléments sont incombustibles. Pourtant, sous forme de poudre, certains métaux brûlent bien, parfois même de manière explosive. Il ne s'agit là de rien de nouveau, puisqu'au Moyen Âge déjà, de la poudre métallique était brûlée pour produire des lumières de différentes couleurs dans le domaine de la pyrotechnie. Le baryum colore par exemple la flamme en vert, le sodium en jaune et le lithium en rouge.

Nous sommes, par contre, plus souvent confrontés aux métaux qui s'oxydent dans l'eau, comme c'est par exemple le cas pour les vieux navires ou les installations portuaires dont la protection anti-rouille ne remplit plus sa fonction. Ou alors – et nous nous rapprochons ici davantage du principe présenté dans cet article –, nous nous souvenons des morceaux de sodium que notre professeur de chimie faisait danser à la surface de l'eau dans une coupelle de verre. Cette expérience produisait également de l'hydrogène, qui parfois s'enflammait. Cette oxydoréduction permet de produire non seulement de l'hydrogène, mais aussi de la chaleur, cette réaction étant exothermique. Rien de nouveau non plus avec ce type de réaction chimique puisqu'il a déjà été utilisé, par exemple, pour fournir l'hydrogène nécessaire au premier vol habité en ballon à gaz, le 1^{er} décembre 1783, à Paris. Pour ce faire, des copeaux de fer avaient été dissous dans de l'acide sulfurique. Il avait fallu, à l'époque, trois jours pour remplir le ballon.

Un nouveau domaine d'application pour le stockage d'énergie

Bien que connues depuis longtemps, ces deux réactions chimiques – dans lesquelles le métal est soit brûlé à l'air, soit oxydé dans l'eau – ont récemment attiré l'attention des chercheurs dans le domaine de l'énergie, car elles constituent une solution élégante pour le stockage d'énergie à long terme. Or, celui-ci prend de plus en plus d'importance dans le contexte de la transition énergétique, avec le remplacement des énergies fossiles par des énergies renouvelables.

Afin d'utiliser l'énergie contenue dans leurs liaisons chimiques, certains métaux peuvent être transformés en oxydes métalliques, que ce soit par oxydation à l'air, à la vapeur ou à l'eau (processus de « décharge »). Ces derniers peuvent ensuite être réduits, c'est-à-dire ramenés à leur forme métallique, par le biais d'une réaction de réduction, ce qui permet de stocker de l'énergie renouvelable (processus de « charge »).

Dans les oxydes métalliques, l'oxygène est solidement lié. De plus, ces oxydes peuvent être collectés et recyclés au cours du processus. L'efficacité des matériaux est ainsi élevée, car contrairement à la combustion de combustibles fossiles, où les gaz de combustion tels que le CO₂ s'échappent et ne peuvent être récupérés qu'à grands frais en raison de leur dilution dans l'air, la collecte est ici beaucoup plus facile.



Pilotprojekt mit Aluminium

Der Reaktor mit Natronlauge (schwarz) erzeugt aus Aluminiumgranulat Wärme und Wasserstoff.

Projet pilote avec de l'aluminium

Le réacteur (cylindre noir) permet de produire de la chaleur et de l'hydrogène à partir de granulés d'aluminium et de soude caustique.



1



2



3

1 Aluminiumpellets, die im Forschungsprojekt Reveal der OST in Rapperswil eingesetzt werden.

Granulés d'aluminium utilisés dans le projet de recherche Reveal de l'OST, à Rapperswil.

2 Endprodukt Aluminiumhydroxid, aus dem anschliessend wieder Aluminium hergestellt werden kann.

Le produit final : de l'hydroxyde d'aluminium, à partir duquel il est ensuite possible de produire à nouveau de l'aluminium.

3 Jeder der drei Stahlkessel am Campus Hönggerberg hat ein Volumen von 1,4 m³ und kann mit bis zu 3 t Eisenerz befüllt werden.

Chacune de ces trois cuves en acier utilisées à l'ETH Zurich, sur le site du campus de Hönggerberg, a un volume de 1,4 m³ et peut contenir jusqu'à 3 t de minerai de fer.

vorteilhafte Nutzung von Wasserstoff, denn sie lassen sich einfach lagern und über die bestehende Strassen- bzw. Bahninfrastruktur transportieren. Der aufwendige Bau neuer Pipelines erübrigt sich.

Die Nutzung von Metallen wurde in diesem Kontext zwar beispielsweise schon in den 1970er-Jahren erforscht, als die Herstellung von Wasserstoff mit dem Oxidieren von Aluminium in Wasser untersucht wurde [1]. In den 1980er-Jahren wurde am Paul-Scherrer-Institut mit der Verbrennung von Aluminium zur Wärmegewinnung experimentiert [2]. Aber erst etwa vor einem Jahrzehnt nahm mit dem intensiveren Ausbau der erneuerbaren Energien das Interesse an sogenannten «Metal Fuels» als Energiespeicher zu, weil erneuerbar erzeugter Strom eine nachhaltige Herstellung der benötigten Metalle ermöglicht. Eigentlich zieht die Forschungsgemeinschaft gemäss Yvonne Bäuerle, Projektleiterin in diesem Bereich an der OST in Rapperswil, für diese Metalle den Begriff «Renewable Metal Energy Carrier» vor, da Fuel bei Nichtfachleuten mit Verbrennungsprozessen assoziiert wird, was bei der Metalloxidation nur eine der vielen Optionen zur Freisetzung der Energie ist.

Bei konventionellen Prozessen zur Herstellung reiner Metalle – sei es in Hochöfen oder durch Elektrolyse – entsteht CO₂, da Kohlenstoff als Reduktionsmittel eingesetzt wird. Solche Verfahren lassen sich somit nicht nutzen, um Metalle für die dekarbonisierte Energiespeicherung zu produzieren.

Welche Metalle?

Um geeignete Metalle für die Energiespeicherung zu finden, müssen bestimmte Kriterien berücksichtigt werden: Die chemischen Elemente sollten eine hohe Energiedichte aufweisen, nicht giftig und ausreichend reaktiv sein, aber nicht so reaktiv, dass sie ein Sicherheitsrisiko darstellen. Zudem müssen sie in grossen Mengen verfügbar sein, damit das neue Prinzip skalierbar und somit für die Energiewende geeignet ist. Mögliche Kandidaten sind Silizium, Eisen, Zink, Magnesium, Lithium, Bor und Aluminium.

Die wichtigsten Kandidaten für die Energiespeicherung sind Eisen und Aluminium. Die Herstellung von «grünem» Eisen geschieht in einem Ofen, in den von oben Eisenoxid-Pellets eingebracht und bei hohen Temperaturen mit Wasserstoff reduziert werden. Dabei entsteht Eisenschwamm (sponge iron). «Grünes» Aluminium wird hingegen mit einer Schmelzflusselektrolyse hergestellt. Dazu müssen erneuerbar erzeugter Strom und inerte Anoden, bei denen kein CO₂ frei wird, statt den im Hall-Héroult-Prozess üblichen Kohleanoden verwendet werden. Inerte Anoden haben den zusätzlichen Vorteil, dass sie einen weitgehend unterbrechungsfreien Prozess ermöglichen, da sie bei Weitem nicht so schnell wie Kohleanoden abgebaut werden. Die neuen Elektrolysezellen sind zudem wesentlich kleiner als bisherige, und der Prozess ist insgesamt effizienter.

Aluminium in Rapperswil

Hierzulande wird Aluminium in einer Forschungsanlage an der OST in Rapperswil genutzt. Dort wird Aluminiumgranulat in Wasser oxidiert, um Wärme und Wasserstoff zu

Les systèmes de stockage d'énergie à base de métaux utilisent également de l'hydrogène, d'une part pour réduire les oxydes métalliques, et d'autre part en tant que produit lorsque les métaux sont oxydés avec de l'eau ou de la vapeur d'eau. Inflammable et extrêmement volatil, l'hydrogène produit lors de l'oxydation n'a pas besoin d'être stocké à long terme dans des réservoirs sous pression, ni transporté et distribué sur de longues distances, car il peut être employé directement sur place. Les métaux utilisés en tant que systèmes de stockage d'énergie permettent ainsi une exploitation avantageuse de l'hydrogène, car ils sont faciles à stocker et à transporter via les infrastructures routières et ferroviaires existantes. La construction onéreuse de nouveaux pipelines n'est donc plus nécessaire.

L'utilisation de métaux dans ce contexte a, par exemple, déjà fait l'objet de recherches dans les années 1970, lorsque la production d'hydrogène par oxydation de l'aluminium dans l'eau a été étudiée [1]. Dans les années 1980, des expériences ont aussi été menées à l'Institut Paul Scherrer sur la combustion de l'aluminium pour produire de la chaleur [2]. Mais ce n'est qu'il y a une dizaine d'années, avec le développement intensif des énergies renouvelables, que l'intérêt pour les «metal fuels» (combustibles métalliques) en tant que systèmes de stockage d'énergie s'est accru, l'électricité produite à partir de sources renouvelables permettant une production durable des métaux nécessaires. Selon Yvonne Bäuerle, responsable de projet dans ce domaine à la Haute école de la Suisse orientale (OST), à Rapperswil, la communauté scientifique préfère utiliser le terme «Renewable Metal Energy Carrier» (vecteur énergétique métallique renouvelable) pour ces métaux, car le terme «fuel» est associé par les non-spécialistes aux processus de combustion, qui ne constituent que l'une des nombreuses options disponibles pour libérer de l'énergie lors de l'oxydation des métaux.

Les procédés conventionnels de production de métaux purs, que ce soit dans de hauts fourneaux ou par électrolyse, génèrent du CO₂, du carbone étant utilisé pour la réduction. Ces procédés ne peuvent donc pas être exploités pour produire des métaux destinés au stockage d'énergie décarbonée.

Quels sont les métaux qui peuvent être utilisés ?

Pour trouver des métaux adaptés au stockage d'énergie, certains critères doivent être pris en compte: les éléments chimiques adéquats doivent présenter une densité énergétique élevée, être non toxiques et suffisamment réactifs, mais pas au point de présenter un risque pour la sécurité. Ils doivent également être disponibles en grandes quantités, afin que ce nouveau principe puisse être évolutif, et donc adapté à la transition énergétique. Les candidats potentiels sont le silicium, le fer, le zinc, le magnésium, le lithium, le bore et l'aluminium.

Les deux principaux candidats pour le stockage d'énergie sont le fer et l'aluminium. La production de fer «vert» s'effectue dans un four, dans lequel des gra-



Pilotprojekt mit Eisen

Steuerung des Eisen-Dampf-Prozesses am Campus Höngerberg der ETH.

Projet pilote avec du fer

Contrôle du procédé fer-vapeur sur le site du campus de Höngerberg de l'ETH Zurich.

erzeugen [3,4]. Das vom EU Horizon Europe Projekt Reveal unterstützte System hat eine Leistung von 4 kW: 1 kW elektrisch und 3 kW thermisch. Es ist somit leistungsfähig genug, um ein Einfamilienhaus im Winter mit der nötigen Energie zu versorgen.

Im Zentrum der Anlage steht der Hauptreaktionsbehälter, der unter einem leichten Überdruck von 2 bar steht und Natronlauge enthält. Diese entfernt die Oxidschicht vom zugeführten Aluminiumgranulat, damit das Aluminium mit dem Wasser reagieren kann. Das bei der Reaktion von Aluminium mit dem Wasser entstehende Aluminiumhydroxid setzt sich als Schlamm im Sedimentationsbehälter ab und kann künftig bei der Anlieferung des Granulats für die Aufbereitung abtransportiert werden. Mit dem entstehenden Wasserstoff wird in einer Brennstoffzelle vor Ort Strom erzeugt. Die bei der exothermen Reaktion im Reaktionsbehälter entstehende Wärme von 65 bis 70°C und die Wärme der Brennstoffzellenreaktion können ausgekoppelt und genutzt werden. Um den Speicherkreislauf zu schliessen, muss Aluminiumhydroxid zu Aluminiumoxid gebrannt werden, aus dem anschliessend in einer Schmelzflusselektrolyse Aluminium gewonnen werden kann.

Aus diesem Forschungsprojekt der OST ist das Start-up Apricot366 hervorgegangen, das nun daran arbeitet, eine grössere Anlage mit 10 kW Leistung für Mehrfamilienhäuser auf den Markt zu bringen.

nulés d'oxyde de fer sont introduits par le haut et réduits à haute température avec de l'hydrogène pour obtenir du fer spongieux (sponge iron). L'aluminium « vert » est quant à lui produit par électrolyse en sel fondu, avec de l'électricité provenant de sources renouvelables ainsi que des anodes inertes, qui ne libèrent pas de CO₂, au lieu des anodes en carbone habituellement employées dans le procédé Hall-Héroult. Les anodes inertes présentent l'avantage supplémentaire de permettre un processus pratiquement ininterrompu, car elles se dégradent beaucoup moins rapidement que les anodes en carbone. Les nouvelles cellules d'électrolyse sont également beaucoup plus petites que les précédentes, et le processus est globalement plus efficace.

L'aluminium à Rapperswil

En Suisse, de l'aluminium est utilisé dans une installation de recherche à la haute école OST, à Rapperswil pour stocker de l'énergie. Des granulés d'aluminium y sont oxydés dans de l'eau afin de produire de la chaleur et de l'hydrogène [3,4]. Soutenu par le projet européen Reveal du programme Horizon Europe, ce système dispose d'une puissance de 4 kW: 1 kW électrique et 3 kW thermiques. Il est donc suffisamment puissant pour fournir l'énergie nécessaire à une maison individuelle en hiver.

Eisen am Höggerberg

Bei einem Pilotprojekt der ETH am Campus Höggerberg wird statt Aluminium Eisen als Energiespeicher eingesetzt – in einem Eisen-Dampf-Verfahren, das bereits im 19. Jahrhundert bekannt war [5]. Der gesamte Prozess von Strom zu Strom kann hier vor Ort stattfinden. Im Prozess wird Wasserstoff aus einem vor Ort installierten Elektrolyseur in die Kessel geführt, um das Eisenerz zu Eisen zu reduzieren. Bei Bedarf lässt sich das Eisen wieder oxidieren, indem heisser Wasserdampf in die Kessel geleitet wird. Dabei entstehen Eisenoxid und Wasserstoff. Letzterer lässt sich anschliessend mit einer Gasturbine oder einer Brennstoffzelle zu elektrischer Energie umwandeln. Dabei wird der Wasserdampf mit der Abwärme der Entladereaktion erzeugt.

Langfristig kann diese Pilotanlage rund 10 MWh Wasserstoff speichern. Wird das Gas später verstromt, erhält man je nach Verfahren und Wärmedämmung 4 bis 6 MWh zurück. Den Technologiereifegrad gibt der am Projekt beteiligte ETH-Wissenschaftler Samuel Heiniger mit 6 bis 7 an.

Dieses Prinzip, das nun vom Start-up IronEnergy weiterentwickelt wird, unterscheidet sich in mancherlei Hinsicht vom Rapperswiler Verfahren: Der Prozess findet in grossen Edelstahlkesseln unter deutlich höherer Temperatur (400 bis 500 °C) statt, und das Eisenerz kann für viele Zyklen genutzt werden, ohne ausgetauscht zu werden. Regelmässige Materialtransporte zu einer grossen Schmelzanlage wie beim Aluminium erübrigen sich. Zudem kann das Eisenerz relativ einfach beschafft und muss nicht vorher aufbereitet werden. Die Speicherkapazität lässt sich mit grösseren Kesseln und zusätzlichem Eisenoxid erhöhen.

Offene Fragen

Der Ansatz, Metalle zur Speicherung von grünem Wasserstoff zu nutzen, hat zahlreiche Vorteile, birgt aber auch Herausforderungen, die je nach Verfahren – Verbrennung oder Oxidation mit Wasser oder Wasserdampf – in einem anderen Bereich liegen. Da solche saisonalen Energiespeichersysteme skalierbar sind, sind sie auf grosse Mengen an Rohstoffen angewiesen, die erneuerbar produziert werden müssen, damit eine Dekarbonisierung möglich ist. Auch die erforderliche Transportlogistik muss möglichst ohne CO₂-Emissionen auskommen. Es gibt also noch zahlreiche Herausforderungen, die parallel gelöst werden müssen, um das Gesamtsystem nachhaltig zu gestalten und im Markt einführen zu können.

Diese Fragen haben einerseits das grosse Ganze im Blick, unter anderem die nachhaltige Herstellung und den emissionsfreien Transport der benötigten Metalle. Andererseits wird auch an zahlreichen Detailfragen geforscht, beispielsweise im Kontext der kontinuierlichen Verbrennung von Metallpulver. Eine Einführung solcher Systeme in der Praxis wird nur möglich sein, wenn die entsprechenden Antworten gefunden werden.

Es lohnt sich, diese Antworten zu finden, denn das Potenzial für kohlenstofffreie Energie- und Material-

Au centre de l'installation se trouve le réacteur principal qui, sous une légère surpression de 2 bar, contient de la soude caustique. Cette dernière élimine la couche d'oxyde des granulés afin que l'aluminium puisse réagir avec l'eau. L'hydroxyde d'aluminium produit lors de la réaction de l'aluminium avec l'eau se dépose sous forme de boue dans le réservoir de sédimentation: il pourra à l'avenir être évacué pour être traité, lors de la livraison des granulés. L'hydrogène produit est quant à lui utilisé sur place pour générer de l'électricité dans une pile à combustible. La chaleur de 65 à 70 °C produite dans le réacteur lors de la réaction exothermique et la chaleur de la réaction dans la pile à combustible peuvent être récupérées et utilisées. Pour boucler le cycle de stockage, l'hydroxyde d'aluminium doit être brûlé pour former de l'oxyde d'aluminium, à partir duquel l'aluminium peut ensuite être extrait par électrolyse en sel fondu.

Ce projet de recherche de l'OST a donné naissance à la start-up Apricot366, qui travaille actuellement à la mise sur le marché d'une installation plus grande, d'une puissance de 10 kW, destinée aux immeubles résidentiels.

Le fer à Höggerberg

Dans le cadre d'un projet pilote de l'ETH Zurich mené sur le site du campus de Höggerberg, c'est du fer qui est utilisé comme vecteur de stockage d'énergie, et ce, au moyen d'un procédé fer-vapeur déjà connu au XIX^e siècle [5]. L'ensemble du processus, de l'électricité à l'électricité, peut se dérouler sur le site. Dans ce processus, l'hydrogène provenant d'un électrolyseur installé sur place est acheminé vers les cuves afin de réduire le minerai de fer en fer. Si nécessaire, le fer peut être réoxydé en introduisant de la vapeur d'eau chaude dans les cuves. Cela produit de l'oxyde de fer et de l'hydrogène. Ce dernier peut ensuite être converti en énergie électrique à l'aide d'une turbine à gaz ou d'une pile à combustible. La vapeur d'eau est produite à partir de la chaleur résiduelle de la réaction de décharge.

À long terme, cette installation pilote pourra stocker environ 10 MWh d'hydrogène qui, le cas échéant, permettront à leur tour de produire 4 à 6 MWh d'électricité, selon le procédé utilisé et l'isolation thermique. Samuel Heiniger, scientifique de l'ETH impliqué dans le projet, estime que le degré actuel de maturité de cette technologie se situe entre 6 et 7.

Ce principe, qui est désormais perfectionné par la start-up IronEnergy, diffère à plusieurs égards du procédé de Rapperswil: le processus se déroule dans de grandes cuves en acier inoxydable à une température nettement plus élevée (400 à 500 °C), et le minerai de fer peut être utilisé pendant de nombreux cycles sans être remplacé. Il n'est donc pas nécessaire de transporter régulièrement les matériaux vers une grande installation de fusion, comme c'est le cas pour l'aluminium. De plus, il est possible de se procurer relativement facilement du minerai de fer, et celui-ci ne nécessite aucun traitement préalable. La capacité de stockage peut être augmentée simplement en utilisant des cuves plus grandes et plus d'oxyde de fer.



Strom aus Wasserstoff

Die Brennstoffzelle (schwarz) des ETH-Pilotprojektes.

De l'électricité à partir d'hydrogène

La pile à combustible (élément noir) du projet pilote de l'ETH Zurich.

Questions en suspens

L'approche consistant à utiliser des métaux pour stocker l'hydrogène vert présente de nombreux avantages, mais comporte également des défis qui, selon le procédé utilisé (combustion ou oxydation avec de l'eau ou de la vapeur d'eau), se situent dans des domaines différents. Comme ces systèmes de stockage d'énergie saisonniers sont évolutifs, ils nécessitent de grandes quantités de matières premières qui doivent être produites de manière renouvelable pour permettre une décarbonation. La logistique de transport nécessaire doit également éviter autant que possible d'émettre du CO₂. Il reste donc de nombreux défis à relever en parallèle pour aboutir à un système durable dans son ensemble, et pour pouvoir le commercialiser.

D'une part, les questions relatives à la production durable et au transport sans émissions des métaux nécessaires, par exemple, s'inscrivent dans une perspective globale. D'autre part, de nombreuses questions plus spécifiques font également l'objet de recherches, par exemple dans le contexte de la combustion continue de poudre métallique. L'introduction de tels systèmes dans la pratique ne sera possible que si des réponses appropriées sont trouvées.

Il vaut toutefois la peine de trouver ces réponses, car le potentiel des cycles décarbonés des matériaux et de l'énergie est considérable. Les années à venir montreront lesquels de ces procédés trouveront leur place dans le système énergétique de demain.

kreisläufe ist beträchtlich. Die kommenden Jahre werden zeigen, welche dieser Verfahren den Weg ins künftige Energiesystem finden werden.

Referenzen | Références

- [1] D. Belitskus, «Reaction of Aluminum with Sodium Hydroxide Solution as a Source of Hydrogen», J. Electrochem. Soc. 117, 1097, 1970; I. E. Smith, «Hydrogen generation by means of the aluminum/water reaction», Journal of Hydronautics, April 1972.
- [2] J. Wochele, Chr. Ludwig, «Aluminium als Brennstoff und Speicher», BFE-Schlussbericht, Juni 2004.
- [3] M. Y. Haller et al., «Combined heat and power production based on renewable aluminium-water reaction», Renewable Energy, 174, 879-893, 2021. doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.104.
- [4] Y. I. Baeuerle et al., «PeakMetal - Covering Winter Peaks of Heat and Electricity Demand by «Renewable Metal Fuels»», BFE-Schlussbericht SI/502545-01, 2024.
- [5] Christoph Elhardt, «Eisen als günstiger Wasserstoffspeicher», ETH Zürich, 28.8.2024.

Links | Liens

- www.reveal-storage.eu
- www.apricot366.ch
- www.ironenergy.ch



Autor | Auteur

Radomir Novotný ist Chefredaktor des Bulletins Electrosuisse. |

Radomir Novotný est rédacteur en chef du Bulletin Electrosuisse.

→ Electrosuisse, 8320 Fehraltorf

→ radomir.novotny@electrosuisse.ch