

1. Papier zu Forschungs- und Entwicklungsbedarfen der Materialverfügbarkeit im Bereich Wasserstoff – Verfügbarkeit von Iridium

VORWORT

Das folgende Papier ist das erste aus einer Serie zum Thema Materialverfügbarkeit im Bereich Wasserstoff und der daraus resultierenden notwendigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe. Zum Auftakt wird die Verfügbarkeit von Iridium behandelt.

1 EINLEITUNG

Iridium gehört zur Gruppe der Platinmetalle (engl. PGM) und wird aufgrund seiner Eigenschaften (hart, korrosions- und säurebeständig, gute elektrische Leitfähigkeit) hauptsächlich als Katalysatorkomponente in chemischen und elektrochemischen Prozessen eingesetzt. Abnehmer finden sich vor allem in der Elektrochemie und im Automobilbereich, wo das Edelmetall wegen seiner besonderen Beschaffenheit schwierig zu substituieren ist. Die Verwendung von Iridium für Wasserstoffanwendungen macht zurzeit noch einen kleinen Teil aus, wird aber in den nächsten Jahren mit dem geplanten Markthochlauf stark ansteigen (Verweis Entwicklung H₂-Bedarfe der Branchen NWR-Papier).

Wenngleich Iridium so vielfältig zum Einsatz kommt, ist sein Vorkommen sehr selten. Das liegt u. a. daran, dass Iridium nicht selbst gefördert wird, sondern als Beiprodukt bei der Platinförderung anfällt. Derzeit findet die Förderung vor allem in Südafrika und Simbabwe statt (90 %), der Rest entfällt auf Russland und Nordamerika. Da Iridium nicht direkt gefördert wird und bei der Platinförderung nur etwa 4 % der Fördermenge ausmacht, ist das Angebot stark an das von Platin gekoppelt. Zurzeit beträgt die jährliche Fördermenge von Iridium etwa 8–9 t und liegt damit deutlich unter der Fördermenge von Platin von 190 t. Eine gezielte Förderung lohnt sich aufgrund des schlechten Umsatzes im Vergleich zu Platin nicht, außerdem ist ein Ausbau der Platinförderung in den nächsten Jahren nicht zu erwarten. Ergänzend zur Primärförderung von Iridium ist auch die Verwendung von recyceltem Iridium möglich und durchaus ökologisch sinnvoll. Bislang werden jedoch nur 25 % des in der Industrie verwendeten Iridiums durch Recycling dem Sekundärkreislauf zugeführt. Grund dafür ist einerseits die Schwierigkeit der Abtrennung des Stoffes in Anwendungen mit geringer Iridium-Konzentration, welche nicht wirtschaftlich ist. Andererseits findet Recycling vornehmlich als Servicegeschäft statt, bei dem gemeinsam mit dem Kunden Iridium aus den eigenen Anwendungen wiederaufbereitet wird. Einen eigenständigen Recyclingmarkt für reines Iridium gibt es derzeit nicht.

Aufgrund des steigenden Materialbedarfs zeichnet sich in den kommenden Jahren eine Materialknappheit ab, die weder durch die Primärförderung noch durch den Sekundärkreislauf aufgefangen werden kann. Zusätzlich ist der Markt für Iridium aufgrund des begrenzten Angebots und der geringen Anzahl der Marktteilnehmer illiquide und damit anfällig für unvorhergesehene Preisschwankungen. Wenn die Verfügbarkeit von den benötigten Mengen an Iridium oder ergänzend die frühzeitige Entwicklung und Skalierung entsprechender Alternativen mittelfristig nicht gewährleistet werden kann, hätte das drastische Auswirkungen auf industrielle Prozesse in verschiedenen Bereichen – und vor allem beim Markthochlauf im schnell wachsenden Wasserstoffsektor.

2 ANWENDUNG IN DER PEM-ELEKTROLYSE

Aufgrund der stofflichen Eigenschaften kann zwischen zwei Wasserstoffelektrolyseverfahren unterschieden werden: Elektrolyse mit Edelmetall-Elektroden (PGM) und Elektrolyse ohne Edelmetall-Elektroden (Non-PGM). Die PEM- („Proton Exchange Membran“-)Elektrolyse gehört zur ersten Kategorie, da die Elektroden mit den Edelmetallen Platin und Iridium beschichtet sind. Sie gilt als schnell wachsende Technologie, und Schätzungen zufolge wird ihr Marktanteil bis 2030 auf 40 % steigen. Dass die PEM-Elektrolyse auf dem Vormarsch ist, liegt an ihren vielen Vorteilen gegenüber Alternativtechnologien, die sie besonders für die Herstellung grünen Wasserstoffs prädestinieren: (1) dynamisches Arbeiten bei einem breiten Stromaufnahmebereich und bei höheren Stromdichten; (2) schnelle Aufheiz- und Abkühlzeit und dadurch flexibler mit volatillem Strom von erneuerbaren Energien; (3) Wasserstofflieferung bei höherem Druck; (4) geringer Platzbedarf. Iridium findet in Ausnahmefällen auch in der alkalischen Elektrolyse Anwendung, weshalb die alkalische Elektrolyse somit bei weiteren Entwicklungen auch zu berücksichtigen wäre.

Bei der PEM-Elektrolyse werden die Elektroden durch eine Protonenaustauschmembran getrennt, was einen Betrieb ohne flüssige Elektrolyte ermöglicht. Durch das Einsetzen von Edelmetallen können die Katalysatoren höhere Stromdichten bei moderaten Zellspannungen ermöglichen. Dies erhöht für diese hohen Stromdichten die Effizienz wie auch die Beständigkeit im Vergleich zu anderen Katalysatoren, die für solche Stromdichten höhere Zellspannungen benötigen. Iridium kommt in diesem Prozess die Rolle des Katalysators der Sauerstoffbildung zu. Dabei handelt es sich um einen Kernprozess, welcher einen effizienten Elektrolyseablauf gewährleistet. Aufgrund seiner elektrochemischen Aktivität und Stabilität ist Iridium für diesen Prozess bestens geeignet und lässt sich praktisch nicht durch andere Edelmetalle substituieren. Grundsätzlich ist jedoch eine Reduktion der Iridium-Belegung denkbar und bereits Gegenstand einiger Forschungsarbeiten. Dabei ist in Richtung Stabilität, Langzeitverhalten und Leistungserhöhung weiterer Entwicklungsbedarf gegeben. Iridium macht derzeit, je nach Hersteller, etwa 20–25 % der Stack-Kosten aus. Pro Gigawatt PEM-Elektrolysekapazität bedarf es beim aktuellen Stand der Technik etwa 300–400 kg Iridium. Weltweit wurden Elektrolysekapazitäten i. H. v. 170 GW bis 2030 verkündet. Geht man davon aus, dass 40 % davon über PEM-Elektrolyse abgebildet werden, ergäbe sich bis 2030 ein Iridium-Bedarf von etwa 27 t.

Mit der aktuellen Abbau- und Recyclingmenge von Iridium lässt sich dieser Bedarf mittelfristig nicht decken. Die produzierten Mengen werden gegenwärtig in anderen Anwendungen genutzt (Medizintechnik, Chemiekatalysatoren, Elektronikindustrie, Zündkerzen etc.), sodass nur eine gewisse Menge an Iridium für die PEM-Elektrolyse verfügbar sein wird (vermutlich etwa 12 t bis 2030). Somit ist mit einem signifikanten Preisanstieg sowie mit Verteilungsengpässen zu rechnen, welche den anvisierten Markthochlauf global verzögern würden.

3 FORSCHUNGSBEDARF UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Da aus oben genannten Gründen ein Hochlauf der Fördermenge nicht möglich ist, gibt es vor allem zwei Stellschrauben, um Engpässe zu vermindern und bestenfalls zu vermeiden. Diese sind Erhöhung der Recyclingquote von Iridium und Verminderung des Iridium-Bedarfs im Elektrolysesystem durch Effizienzsteigerung oder Alternativtechnologien. Eine Rohstofflagerhaltung von Iridium hätte verzerrende Auswirkungen auf den bereits illiquiden Markt und kommt deshalb nicht infrage.

3.1 AUSBAU RECYCLINGKAPAZITÄT

Bisher gestaltet sich das Recycling von Iridium sehr aufwendig und ist nur bedingt wirtschaftlich, wodurch sich die aktuell geringe Recyclingquote erklärt. Eine gezielte Förderung zum Aufbau einer nachhaltigen Recyclingstrategie könnte den notwendigen Entwicklungsprozess zum einen beschleunigen, bei welchen von Beginn an die wirtschaftlichen Aspekte betrachtet werden sollten. In Großbritannien gibt es bereits entsprechende Förderprogramme, in China werden diese gerade aufgebaut. In Deutschland gehört das zu recycelnde Iridium derzeit einem Anwender und ist nicht für den freien Markt vorgesehen. Daher sollte auch insbesondere das Recycling aus End-of-Life-Materialien, die aktuell nicht dem Sekundärkreislauf zugeführt werden, ausgeweitet werden. So könnten bereits jetzt ca. 200–300 kg Iridium pro Jahr durch Zündkerzen und Elektroden zurückgewonnen werden.

Ab 2030 ist mit einem Gleichgewicht aus neuen PEM-Elektrolyseanlagen (neue Iridium-Nachfrage) sowie aus alten/zurückgebauten Anlagen (= neues Iridium-Angebot aus dem Recycling) zu rechnen. In der Zwischenzeit sollten Strategien durch Förderprogramme und Mittel für das Recycling von Iridium zeitnah aufgebaut und die Umsetzung zügig gestartet werden. Neben der Bereitstellung von ungenutzten Recyclingströmen (inkl. Kosten-Nutzen-Analyse) sollten dafür entsprechende Mittel zum Aufbau eines „Closed Loop“-Recyclings zur Verfügung gestellt werden.

3.2 REDUZIERUNG IRIDIUM-BEDARF

Um eine Materialknappheit in den kommenden Jahren zu vermeiden, muss bei der PEM-Elektrolyse die Iridium-Beladung um den Faktor 4 reduziert werden. Gleichzeitig müssen Stromdichte, Temperatur und Stabilität gesteigert werden. Dafür müssen neue Elektroden- und Zellkonzepte für Katalysatoren und poröse Transportschichten für Hochleistungs-PEM-Elektrolyseure mit optimierter Iridium-Packungsdichte erforscht (Ströme bis mindestens 4 A/cm^2 , $\sim 0.1 \text{ gIr/kW}$ bis 2030, $< 0.1 \text{ gIr/kW}$ bis 2040) und zügig ins Skale-up überführt werden. Für PEM-Elektrolyseure gibt es erste erfolgreiche Entwicklungen hinsichtlich niedrig beladener Katalysatoren, aber es mangelt an Prüf- und Validierungsmöglichkeiten von Material- bis Systemqualifikation.

Um die niedrig beladenen PEM-Elektrolyseure zu erproben, ist es ratsam, neben einem langfristigen Forschungsprogramm ein Top-Runner-Programm aufzusetzen. Dieses Programm sollte Hersteller unterstützen, die eine reduzierte Iridium-Beladung (2. Generationsmaterial) in die Anwendung bringen. Auch bedarf es entsprechender Förderprogramme für PEM-Elektrolyseure zur Entwicklung und Industrialisierung von Lösungen mit nachhaltigen Alternativmaterialien. Dabei müssen eine schnellere Anschlussförderung an die wissenschaftlichen Projekte und die Überführung der wissenschaftlichen Ergebnisse in den industriellen Maßstab gewährleistet werden. Dies ist mit der Fragestellung zu PFAS-Materialien¹ sinnvoll zu koppeln, um frühzeitig Synergien bei der Entwicklung der nächsten Generationen zu erzeugen.

¹ NWR-Stellungnahme „Auswirkung des Verbots der per- und polyfluorierten Chemikalien (PFAS)“ vom 1. Februar 2023

3.3 WEITERENTWICKLUNG ALTERNATIVER ELEKTROLYSEURKONZEPTE

Eine echte Alternative zu Iridium gibt es derzeit nicht; nur Legierungen, die ebenfalls zum Teil aus Iridium bestehen. Für den Hochlauf des Wasserstoffmarktes sind diese Alternativen jedoch noch nicht ausgereift genug, ein Einsatz wäre erst in 10–15 Jahren denkbar.

Die Förderung der alkalischen Membrantechnologie als Übergangstechnologie/-projekt sollte fortlaufen. Die Materialverfügbarkeit von Rohstoffen sollte dabei stärker in den Mittelpunkt rücken. Es wird ein technologieoffener Ansatz gefordert. Dies ist auch aufgrund der PFAS-Problematik² förderlich. Dazu ist eine Investition in die Grundlagenforschung zu Degradationsmechanismen von PGM- und PGM-freien Katalysatoren unter Extrembedingungen nötig (1. AEM WE bei pH 7; 2. PEM/AEM WE bei höheren Strömen und Temperaturen; 3. PEM/AEM WE bei Betrieb mit Brauch-/Meer-/Brackwasser). Um zeitnah serientaugliche Lösungen bereitstellen zu können, sind gemeinsame Aktivitäten von Industrie, Forschung und Politik notwendig. Dazu ist es erforderlich, die Player zusammenzubringen und Diskussionen sowie Wissensaustausch zu fördern.

² Siehe Fußnote 1.



DER NATIONALE WASSERSTOFFRAT

Mit der Verabschiedung der Nationalen Wasserstoffstrategie hat die Bundesregierung am 10. Juni 2020 den Nationalen Wasserstoffrat berufen. Der Rat besteht aus 26 hochrangigen Expertinnen und Experten der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft, die nicht Teil der öffentlichen Verwaltung sind. Die Mitglieder des Wasserstoffrats verfügen über Expertise in den Bereichen Erzeugung, Forschung und Innovation, Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr und Gebäude/Wärme, Infrastruktur, internationale Partnerschaften sowie Klima und Nachhaltigkeit. Der Nationale Wasserstoffrat wird geleitet durch Katherina Reiche, Parlamentarische Staatssekretärin a. D.

Aufgabe des Nationalen Wasserstoffrats ist es, den Staatssekretärsausschuss für Wasserstoff durch Vorschläge und Handlungsempfehlungen bei der Umsetzung und Weiterentwicklung der Wasserstoffstrategie zu beraten und zu unterstützen.

◆ **Kontakt: info@leitstelle-nws.de, www.wasserstoffrat.de**