Iridium-reduzierte Anodenkatalysatoren für die PEM-Wasserelektrolyse: Technische Ansätze und Herausforderungen zur Kostensenkung

Einführung

Die Transformation zur Wasserstoffwirtschaft stellt eine zentrale strategische Säule der Dekarbonisierung energieintensiver Sektoren dar. Insbesondere in der Industrie und im Verkehrssektor kann Wasserstoff als Energieträger maßgeblich zur Reduktion von CO_2-Emissionen beitragen, sofern seine Erzeugung auf erneuerbaren Energien basiert. Die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEMEL) gilt hierbei als Schlüsseltechnologie, da sie schnelle Lastwechsel, hohe Leistungsdichten und eine hohe Produktgasreinheit ermöglicht. Ein wesentliches Hemmnis für die wirtschaftliche Skalierung der PEMEL stellen jedoch die Kosten und die Verfügbarkeit von Iridium als unverzichtbarem Bestandteil der Anodenkatalysatoren dar. Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt IREKA widmet sich daher der Entwicklung von Anodenkatalysatoren mit signifikant reduziertem Iridiumeinsatz bei Erhalt der elektrochemischen Leistungsfähigkeit.

1. Technologische Grundlagen und Herausforderungen der PEM-Elektrolyse

Die PEM-Wasserelektrolyse zeichnet sich gegenüber anderen Elektrolyseverfahren durch ihre hohe dynamische Betriebsfähigkeit und spezifische Vorteile hinsichtlich Kompaktheit, Reinstoffgasproduktion sowie der Möglichkeit hoher Betriebsdrücke aus. Dem stehen jedoch Nachteile gegenüber, die vor allem aus dem Einsatz teurer und seltener Materialien auf Zellebene resultieren. Insbesondere die Anode ist aufgrund der extrem korrosiven Bedingungen auf Edelmetall-basierte Katalysatoren angewiesen, wobei Iridiumoxid aktuell als einzig standfestes Material gilt. Der globale Iridiumbedarf für den angestrebten Hochlauf der Wasserstoffproduktion übersteigt die heute verfügbare Fördermenge deutlich. Die Kosten für Iridium und die Limitierung der Jahresproduktion begrenzen somit direkt die Skalierbarkeit dieser Technologie. Stand der Technik ist eine Katalysatorbeladung von 2–3 mg Iridium pro cm^2 Elektrodenfläche. Für einen PEMEL-Stack im MW-Maßstab bedeutet dies einen Iridiumeinsatz von mehreren hundert Gramm, was angesichts der Preisentwicklung und Verfügbarkeit nicht nachhaltig darstellbar ist.

2. Ansätze zur Reduktion des Iridiumgehalts in Anodenkatalysatoren

Die Reduzierung des Iridiumgehalts ohne signifikante Einbußen bei katalytischer Aktivität und Langzeitstabilität erweist sich technisch als hoch anspruchsvoll. Literatur und Vorarbeiten zeigen, dass eine reine Absenkung des Katalysatormassenanteils mit deutlichen Verlusten in Leitfähigkeit und Aktivität einhergeht. Lösungsansätze fokussieren sich daher auf die Steigerung der spezifischen aktiven Oberfläche durch Nanostrukturierung, die gezielte Wahl und Modifikation von Trägermaterialien sowie die Entwicklung optimierter Legierungskonzepte. Durch galvanische und nasschemische Abscheidung können Iridiumlegierungs- und Mischoxidstrukturen erzeugt werden, die auf Substrate wie Titanblech, Titanstreckmetall oder Titanfilz aufgebracht werden. Die Einführung von Platin-

Zwischenschichten verbessert die Haftung und elektrische Anbindung der Iridiumschicht, was sich positiv auf die katalytische Performance auswirkt. Die iterative Entwicklung und Optimierung der Schichtmorphologie und Prozessparameter erfordert einen komplexen Experimentieraufbau, der im Projekt IREKA zunächst im Labormaßstab umgesetzt wird. Neben der reinen Iridiumabscheidung werden auch Mikrogalvanoformung und gezielte Dotierungen zur weiteren Verringerung des Edelmetallverbrauchs untersucht.

3. Ergebnisse zur Schichtentwicklung und elektrochemischen Charakterisierung

Die experimentellen Arbeiten zeigen, dass durch gezielte Optimierung der Vorbehandlung und Beschichtungsprozesse auf Titanbasismaterialien elektrochemisch aktive Iridiumoxidschichten realisiert werden können. Die Stromdichte und Überspannung lassen sich durch die Wahl geeigneter Prozessparameter und den Einsatz von Platin-Zwischenschichten signifikant beeinflussen. Der Zusammenhang zwischen Iridiumbeladung und elektrochemischer Aktivität ist dabei nicht linear: Bereits bei deutlicher Reduktion des Iridiumeinsatzes können, abhängig von der Schichtmorphologie, noch akzeptable Überpotenziale und Stromdichten erzielt werden. Die Übertragbarkeit der Schichtentwicklung von planaren Titanblechen auf strukturierte Substrate wie Streckmetall und Filz gelang im iterativen Verfahren. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Oberflächenvorbehandlung für die Haftung und die elektrochemische Performance der Schichten entscheidend ist. Erste Langzeituntersuchungen unter Betriebsbedingungen von bis zu zwei Stunden deuten auf eine grundsätzlich ausreichende Stabilität hin, weisen jedoch teilweise noch hohe Streuungen und Materialverluste auf, sodass weitere Optimierungs- und Verifizierungsarbeiten notwendig sind.

4. Ausblick und Anwendungspotenziale

Die im Projekt IREKA entwickelten Ansätze zur Iridiumreduktion in Anodenkatalysatoren eröffnen neue Wege für eine nachhaltige Skalierung der PEM-Wasserelektrolyse. Die Übertragung der entwickelten Beschichtungsprozesse auf großflächige und poröse Trägersubstrate ist ein wesentlicher Schritt für die industrielle Umsetzung. Langzeitstabilität und Materialeffizienz bleiben zentrale Herausforderungen, deren Lösung maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit der Wasserstoffproduktion ist. Die erzielten Fortschritte bilden die Grundlage, um PEMEL-Systeme künftig mit deutlich geringerem Edelmetalleinsatz und damit zu wettbewerbsfähigeren Kosten herzustellen. Die industrielle Beschichtungstechnik spielt somit eine Schlüsselrolle für die Zukunft der Wasserstoffwirtschaft und deren Beitrag zur Dekarbonisierung zentraler Wirtschaftssektoren.