

PRESSEINFORMATION

PRESSEINFORMATION

27. November 2025 || Seite 1 | 6

Wasserstoff-Leitprojekt »H₂Giga«

Der Weg ist frei für Elektrolyseure aus Massenproduktion

Von der Produktion bis zum Recycling: Im Wasserstoff-Leitprojekt »H₂Giga« arbeiten Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen an der serienmäßigen Herstellung leistungsstarker Elektrolyseure. An fünf Teilprojekten sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Fraunhofer IPA beteiligt. Ihre Ergebnisse liegen jetzt vor.

Wenn energieintensive Industrieunternehmen und der Schwerlastverkehr klimaneutral werden sollen, helfen selbst die leistungsfähigsten Batterien nicht weiter. Die beiden Branchen müssen ihren Energiebedarf also anderweitig decken – mit grünem Wasserstoff. Doch der ist nicht ohne Weiteres verfügbar.

Wasserstoff ist zwar auf der Erde reichlich vorhanden, aber meist in Molekülen gebunden, in Wasser (H₂O) zum Beispiel. Wer das gasförmige Element als emissionsfreie Energiequelle nutzen möchte, muss den Wasserstoff also zunächst aus dem Wassermolekül herauslösen. Dafür gibt es Elektrolyseure. Sie spalten Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O) auf. Brennstoffzellen können den Wasserstoff dann in elektrischen Strom umwandeln, der Elektromotoren antreibt. Oder der Wasserstoff wird in Hochöfen verbrannt.

Doch Elektrolyseure sind in Deutschland bisher noch knapp und teuer. Im Wasserstoff-Leitprojekt »H₂Giga« des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt forschen deshalb seit 2021 zahlreiche Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen an der serienmäßigen Herstellung leistungsstarker Elektrolyseure. An fünf Teilprojekten ist das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA beteiligt. Die letzten gehen dieser Tage zu Ende; die Ergebnisse liegen vor.

Roboter stapeln Elektrolyseure in Sekundenschnelle

Bisher werden Elektrolyseure noch weitgehend von Hand gefertigt. Das kostet nicht nur viel Zeit, sondern ist auch teuer und fehleranfällig. Im Teilprojekt »Industrialisierung der PEM-Elektrolyse-Produktion« (PEP.IN) haben Forscherinnen und Forscher zusammen mit Partnern aus der Industrie deshalb eine automatisierte Fertigungslinie bei der Firma Quest One im schleswig-holsteinischen Braak aufgebaut. Dabei übernehmen nun Roboter das sogenannte Stacking, also das Stapeln der einzelnen Komponenten eines Elektrolyseurs. Ein Elektrolyseur besteht mindestens aus zwei Elektroden – der positiv geladenen Anode und der negativ geladenen Kathode – und einer Protonen-Austausch-Membran (PEM) dazwischen. Um die Leistung zu steigern, werden viele dieser Elektrolysezellen zu einem sogenannten Stack gestapelt.

Pressekommunikation

Dr. Karin Röhricht | Telefon +49 711 970-3874 | presse@ipa.fraunhofer.de

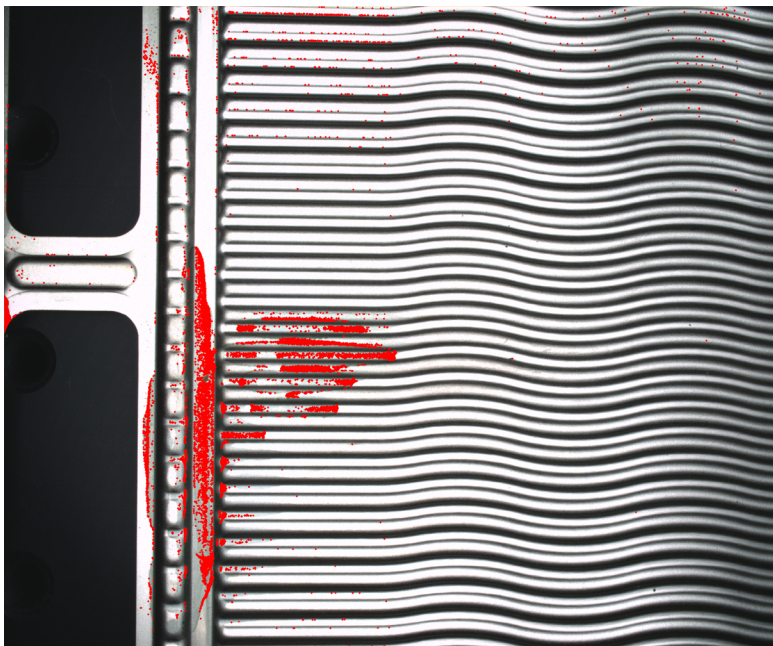
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA | Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart | www.ipa.fraunhofer.de

»Eine Sekunde brauchen die Roboter, um eine Komponente auf die andere zu legen«, sagt Nicolas Mandry vom Forschungsteam Wasserstofftechnologien am Fraunhofer IPA. Die dazu nötigen Greifer hat das Forschungsteam eigens entwickelt. Auch die Qualitätssicherung läuft jetzt automatisch ab: Kameras und eine Bildverarbeitungssoftware prüfen die einzelnen Komponenten und sortieren fehlerhafte aus, bevor sie verbaut werden. Kleine Abweichungen lässt die Software aber zu, wenn sie zu dem Schluss kommt, dass sie sich nicht auf die Leistungsfähigkeit des fertigen Elektrolyseurs auswirken.

Auch sämtliche dem Stacking vor- und nachgelagerte Produktionsprozesse wurden untersucht. Entstanden ist so eine Elektrolyseurfabrik im Gigawatt-Maßstab. »Die hier innerhalb eines Jahres produzierten Elektrolyseure haben also eine aufaddierte Nominalleistung von mindestens einem Gigawatt – ein Vielfaches von dem, was erreicht wurde, als Elektrolyseure noch mit viel Handarbeit gefertigt wurden«, erklärt Mandry.

PRESSEINFORMATION

27. November 2025 || Seite 2 | 6



Kameras und eine Bildverarbeitungssoftware prüfen die einzelnen Komponenten eines Elektrolyseurs, bevor sie verbaut werden. In diesem konkreten Fall sind die rot markierten Verschmutzungen auf der Bipolarplatte zu groß. Sie wird aussortiert.

Quelle: Fraunhofer IPA

Digitaler Zwilling bildet Elektrolyseur-Produktion in Echtzeit ab

Doch eine automatisierte PEM-Elektrolyseur-Produktion im Gigawatt-Maßstab muss nicht nur schnell, sondern auch effizient sein. Grundlage dafür ist eine standortübergreifende, serviceorientierte Produktions-IT-Plattform, in der die Daten jedes einzelnen Produktionsmoduls gesammelt und in Echtzeit ausgewertet werden. So entsteht ein virtuelles Abbild der Produktion, ein sogenannter Digitaler Zwilling, der dabei hilft, Fehler und Optimierungspotenziale in der Produktion zu erkennen. Genau das haben Forscherinnen und Forscher vom Fraunhofer IPA im Teilprojekt »Referenzfabrik für hochratenfähige Elektrolyseur-Produktion« (FRHY) realisiert – jedenfalls teilweise.

»Kurz vor Ende des Forschungsprojekts sind noch immer nicht alle Produktionsanlagen, die auf insgesamt fünf Fraunhofer-Institute verteilt sind, fertiggestellt oder in Betrieb genommen«, sagt Henry Himmelstoß vom Forschungsteam Einführungs- und Umsetzungsmethoden für IT-Lösungen am Fraunhofer IPA, »und auch die fertigen Anlagen sind noch nicht alle miteinander vernetzt.« Lange Lieferzeiten für Maschinen und Anlagen wirbelten den Zeitplan durcheinander. Die Leerstellen füllen einstweilen sogenannte Emulatoren aus, also Software, die die Funktion eines Produktionsmoduls nachahmt und vergleichbare Daten produziert.

Um den entstandenen Rückstand aufholen und doch noch eine durchgängig vernetzte hochratenfähige Modellproduktion für PEM-Elektrolyseure aufbauen zu können, hoffen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nun auf ein Folgeprojekt.

Beschichtet mit einem der seltensten Elemente überhaupt

Die Anode eines PEM-Elektrolyseurs ist mit Iridium beschichtet. 0,67 Gramm des silberweißen Edelmetalls werden derzeit pro Kilowatt Leistung benötigt. Das Problem dabei: Iridium ist mit einem Vorkommen von 0,000003 Parts per million und einer weltweiten jährlichen Fördermenge von neun Tonnen (2020) eines der seltensten und teuersten Elemente überhaupt. Ein Forschungsteam um Stefan Kölle vom Fraunhofer IPA hat deshalb gemeinsam mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern vom Leibniz-Institut für Katalyse nach Wegen gesucht, wie sich der Iridiumanteil in PEM-Elektrolyseuren reduzieren lässt.

Zwei Möglichkeiten hat das interdisziplinäre Team im Teilprojekt »Iridium-reduzierte Anodenkatalysatoren für die PEM-Wasserelektrolyse« (IREKA) näher betrachtet: »Nur das Material direkt an der Oberfläche ist aktiv an der Aufspaltung von Wasser beteiligt«, sagt Kölle. »Die darunterliegenden Schichten sind ohne Funktion.« Mit Hilfe der Galvanotechnik hat der Forscher deshalb hauchdünne Iridiumbeschichtungen erzeugt. Dass sie genauso gut funktionieren wie die deutlich dickeren bisherigen Schichten, ist bereits nachgewiesen. Allerdings ist noch offen, ob die elektrochemisch abgeschiedenen Iridiumbeschichtungen auch genauso stabil sind.

Die zweite Möglichkeit, den Iridiumanteil in PEM-Elektrolyseuren zu reduzieren, sind Legierungen, die neben Iridium noch weitere Metalle enthalten, etwa Nickel, Zinn oder Ruthenium. Die elektrochemische Abscheidung der iridiumhaltigen Legierungen stellt dabei eine Herausforderung mit großem Forschungsbedarf dar. Im Ergebnis erwiesen sich Legierungen mit Nickel jedoch als zu instabil. Sie lösten sich schon nach kurzer Zeit elektrochemisch auf. Mit Zinn und Ruthenium hingegen ließen sich sehr aktive Legierungen herstellen. Allerdings: Ruthenium ist selbst ein Edelmetall und ähnlich selten wie Iridium. »Es sind aktuell keine edelmetallfreien PEM-Elektrolyseure in Sicht«, fasst Kölle die Ergebnisse zusammen. Umso wichtiger sei deshalb die Kreislaufwirtschaft sowie die Entwicklung von Katalysatorschichten mit minimiertem Edelmetalleinsatz – ohne Verlust bei der Leistungsfähigkeit.

PRESSEINFORMATION

27. November 2025 || Seite 3 | 6



PRESSEINFORMATION27. November 2025 || Seite 4 | 6

Iridium-beschichtetes Titanfilz, aufgenommen mit einem 3D-Laserscanning-Mikroskop.

Quelle: Fraunhofer IPA

Quantencomputer ermittelt die besten Materialien für die Elektrolyse

Um die Frage, mit welchen Materialien die Elektrolyse möglichst lange stabil läuft, ging es im Teilprojekt »Entwicklung von hybriden Quantum Computing Methoden für die Degradationsmodellierung von alkalischen Elektrolyseuren« (DEGRAD-EL3-Q). »Bevor man Geld für mitunter teure Rohstoffe ausgibt, sollte man mithilfe einer Computersimulation klären, wie sich die Materialien bei der Elektrolyse verhalten«, sagt Jan Schnabel vom Forschungsteam Quantencomputing am Fraunhofer IPA. »Abhängig von den Materialeigenschaften können klassische Simulationsmethoden jedoch an ihre Grenzen stoßen. Denn um ein Material in allen Details zu verstehen, muss es bis auf die Molekülebene genau betrachtet und simuliert werden. Hier versprechen Quantencomputing-Methoden perspektivisch einen erheblichen Vorteil gegenüber klassischen Computern.« Das Forschungsteam konzentrierte sich auf methodische Entwicklungsarbeiten. Dabei gewann es wichtige Einblicke in die grundlegenden Mechanismen verschiedener Quantenalgorithmen und konnte so bisherige Methoden verbessern.

Geht es hingegen darum, Lebensdaueranalysen von Elektrolyseuren besser zu verstehen, eignen sich klassische KI-Modelle hervorragend für die Modellbildung und Vorhersage. Das Degradationsverhalten eines Elektrolyseurs war bisher noch nicht bis in alle Einzelheiten bekannt. Klar war nur, dass viele Betriebsparameter berücksichtigt werden müssen und dass jeder einzelne die Lebensdauer negativ beeinträchtigen kann. Basierend auf experimentellen Messdaten der Projektpartner hat das Forschungsteam um Schnabel nun ein fortschrittliches Machine-Learning-Modell entwickelt, das in der Lage ist, das Degradationsverhalten eines Elektrolyseurs vorherzusagen.

Robotergestützte Demontage für die Kreislaufwirtschaft

Es ist wichtig, mit dem Hochlaufen der Wasserstoffproduktion und -nutzung eine automatisierte und kreislaforientierte Strategie zu etablieren. Denn erstens enthalten Elektrolyseur- und Brennstoffzellenstacks häufig große Mengen Edelmetalle und seltene Erden, die wertvolle Rohstoffe sind. Zweitens erfordern auch die ökologischen, wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen diese Kreislaufwirtschaft.

Weil bisher nur wenige Elektrolyseur- und Brennstoffzellenstacks im Umlauf waren, wurden diese noch manuell demontiert. Wissenschaftler um Anwar Al Assadi, Leiter des Forschungsteams Roboterprogrammierung für kraftgeregelte (De-)Montage am Fraunhofer IPA, haben nun im Teilprojekt »Recycling – Nachhaltige Ressourcennutzung« (ReNaRe) einen robotergestützten Ansatz zur Demontage von Stacks entwickelt. Initial erfolgte eine Produktanalyse, die eine hohe Varianz der auf dem Markt vorhandenen Stacks zeigte. Auch der End-of-Life-Zustand der Stacks kann abhängig von der Nutzungsdauer variieren.

PRESSEINFORMATION

27. November 2025 || Seite 5 | 6



Ein Industrieroboter demontiert einen Elektrolyseurstack.

Quelle: Fraunhofer IPA / Foto: Rainer Bez

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG IPA

Auf Basis dieser Analyse hat das Forschungsteam die Anforderungen und Prozesse identifiziert, die sich für eine automatisierte Demontage eignen. Es folgte die Entwicklung spezieller Roboterskills, mit denen Stacks robust gehandhabt und Schrauben demontiert werden können. Um die Positionsungenauigkeiten von Roboterarm, Vorrichtung, Werkzeug und Bildverarbeitungseinheit zu überwinden, haben Al Assadi und sein Team einen Reinforcement-Learning-Agenten darauf trainiert, beim Lösen von Schraubverbindungen einen sicheren Formschluss herzustellen. Die entstandenen Roboterskills integrierte das Forschungsteam in einen Hardware-Demonstrator, der industriellen Kunden als Versuchsträger zur Verfügung steht.

Parallel dazu entwickelte Bernhard Malicek vom Forschungsteam Wasserstofftechnologien am Fraunhofer IPA einen Digitalen Zwilling, der die Anpassung des Demontageprozesses an unterschiedliche Stackdesigns ermöglicht. Indem der Energieverbrauch einzelner Prozessschritte digital erfasst wird, sind Demontageabläufe für verschiedene Produktvarianten energieoptimiert planbar. Dies unterstützt die Entwicklung einer wirtschaftlich tragfähigen Kreislaufwirtschaft trotz der absehbar hohen Produktvarianz auf dem Markt.

PRESSEINFORMATION27. November 2025 || Seite 6 | 6

Fachliche Kontakte

Anwar Al Assadi | Telefon +49 711 970-1264 | anwar.alassadi@ipa.fraunhofer.de | Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA | www.ipa.fraunhofer.de

Henry Himmelstoß | Telefon +49 711 970-1438 | henry.himmelstoss@ipa.fraunhofer.de | Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA | www.ipa.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Stefan Kölle | Telefon +49 711 970-1786 | stefan.koelle@ipa.fraunhofer.de | Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA | www.ipa.fraunhofer.de

Nicolas Mandry | Telefon +49 711 970-3523 | nicolas.mandry@ipa.fraunhofer.de | Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA | www.ipa.fraunhofer.de

Dr. Jan Schnabel | Telefon +49 711 970-1408 | jan.schnabel@ipa.fraunhofer.de | Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA | www.ipa.fraunhofer.de

Pressekommunikation

Dr. Karin Röhricht | Telefon +49 711 970-3874 | karin.roehricht@ipa.fraunhofer.de

Hannes Weik | Telefon +49 711 970-1664 | hannes.weik@ipa.fraunhofer.de

Das **Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA**, kurz Fraunhofer IPA, ist mit ca. 1150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern eines der größten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft. Der gesamte Haushalt beträgt 100 Mio. €. Organisatorische und technologische Aufgaben aus der Produktion bilden unsere Entwicklungs- und Forschungsschwerpunkte in 11 Forschungsbereichen. Methoden, Komponenten und Geräte bis hin zu kompletten Maschinen und Anlagen werden von uns entwickelt, erprobt und umgesetzt. In 11 Geschäftsbereichen setzen wir unsere Forschungsergebnisse gemeinsam mit kleinen und großen Unternehmen um. Dabei fokussieren wir uns insbesondere auf die Branchen Automotive, Maschinen- und Anlagenbau, Elektronik und Mikrosystemtechnik, Energie, Medizin- und Biotechnologie sowie Prozessindustrie.