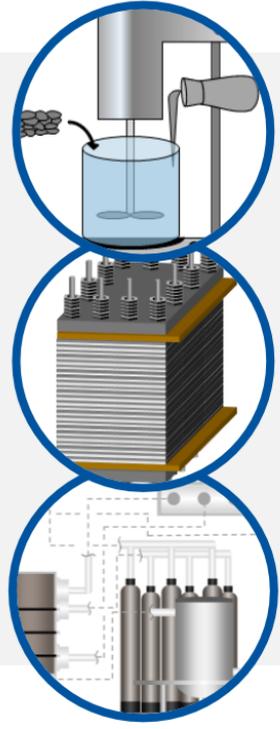
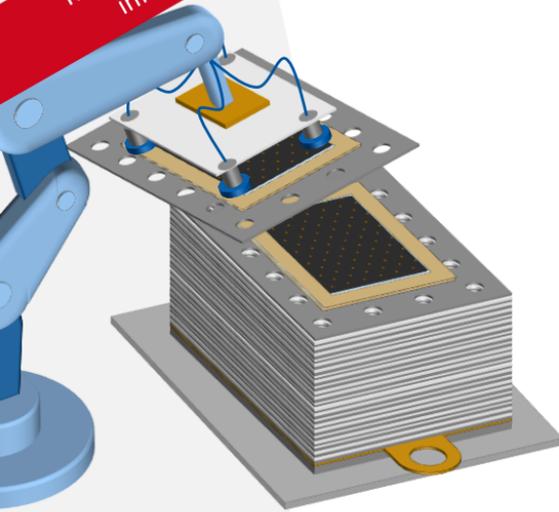


Auch als kostenfreie
Broschüre erhältlich
Kontaktieren Sie uns per E-Mail an
info@pem.rwth-aachen.de



PRODUKTION VON ELEKTROLYSEUR- SYSTEMEN



Power-to-X
for Applications



Brennstoffzellen



**RWTH AACHEN
UNIVERSITY**

Der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen forscht unter anderem zur Produktionstechnik der Brennstoffzelle. Die Aktivitäten erstrecken sich dabei im Maschinenbausektor von der kosteneffizienten Produktion der Komponenten des wasserstoffbetriebenen Antriebsstrangs über innovative Mobilitätslösungen bis hin zur gesamten Emissionsreduktion. Durch nationale und internationale Projekte in Unternehmen verschiedener Wertschöpfungsstufen sowie Beteiligungen in zahlreichen Forschungsprojekten bietet PEM fundierte Expertise.



Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen
Bohr 12
52072 Aachen

www.pem.rwth-aachen.de



Die VDMA-Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellen unterstützt Komponenten- und Systemhersteller in Deutschland beim Ausbau ihres Industriernetzwerks und vertritt die Interessen von mehr als 90 führenden, national und international aktiven Produzenten und Zulieferern.

„VDMA Power-to-X for Applications“ ist eine zentrale, branchenübergreifende Informations-, Kommunikations- und Kooperationsplattform für die P2X-Community, die alle wichtigen Stakeholder und Akteure von der Entwicklung der Fertigungsverfahren über die Herstellung synthetischer Kraft- und Rohstoffe mittels Power-to-X-Technologien bis hin zum Endabnehmer einbindet.



VDMA
Arbeitsgemeinschaft
Brennstoffzellen
Friedrichstraße 95
10117 Berlin

[www.vdma.org/
brennstoffzellen](http://www.vdma.org/brennstoffzellen)

VDMA
Power-to-X for
Applications
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main

[www.vdma.org/power-to-
x-for-applications](http://www.vdma.org/power-to-x-for-applications)

Autoren

PEM der RWTH Aachen



Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker
Gründer und Leiter des Lehrstuhls
a.kampker@pem.rwth-aachen.de



Prof. Dr.-Ing. Heiner Heimes
Mitglied der Institutsleitung
h.heimes@pem.rwth-aachen.de



Mario Kehrer, M. Sc.
Oberingenieur
m.kehrer@pem.rwth-aachen.de



Sebastian Hagedorn, M. Sc.
Gruppenleiter Fuel Cell
s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de



Niels Hinrichs, M. Sc.
Wiss. Mitarbeiter Fuel Cell
n.hinrichs@pem.rwth-aachen.de

VDMA



Jana Müller
Projektmanagerin Brennstoffzellen
jana.mueller@vdma.org



Dr.-Ing. Lucien Beisswenger
Power-to-X-Technologien und
Regulierung
lucien.beisswenger@vdma.org



Haben Sie Fragen?

Sprechen Sie uns gerne an!

Frankfurt am Main, September 2023
PEM der RWTH Aachen & VDMA
(Eigendruck), 1. Auflage
ISBN: 978-3-947920-41-9

Motivation

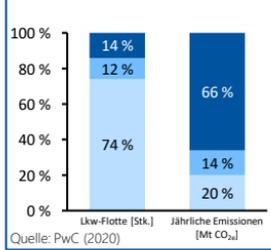
zur Nutzung von Wasserstoff in der Mobilität

Ein zentraler Verursacher der straßenbezogenen europäischen Emissionen ist mit etwa **40 %** der **Güterverkehr mit den Klassen N1, N2 und N3**.

Nutzfahrzeug (Nfz)-Klassen

- N1: leichte Nfz mit einer zGM < 3,5t
 - N2: mittelschwere Nfz mit einer zGM 3,5 - 12 t
 - N3: schwere Nfz mit einer zGM > 12 t
- zGM: zulässige Gesamtmasse

Lkw-Flotte & Emissionen in Deutschland



Prognose der europäischen Fahrleistungen

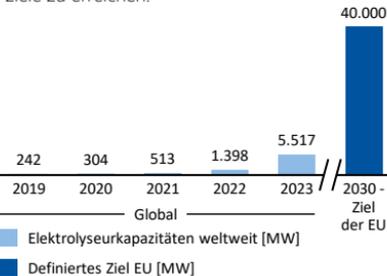


Leichte und schwere Nutzfahrzeuge tragen im Mobilitätssektor maßgeblich zum Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) bei. Um diese Emissionen zu reduzieren und die Klimaschutzziele im Mobilitätssektor zu erreichen, können Brennstoffzellen zum Einsatz kommen, die Wasserstoff elektrochemisch in elektrische Energie umwandeln. Da bei dieser Reaktion lediglich Wasser anfällt, stellt die Brennstoffzelle als Wandlungseinheit eine saubere Lösung innerhalb des elektrischen Antriebs dar. Um mit dem Einsatz „grünen“ Wasserstoffs im Verkehr zur Reduktion der klimaschädlichen CO₂-Emissionen beizutragen, wird der Einsatz von Elektrolyseuren notwendig, die den erforderlichen Wasserstoff bereitstellen können. Dieser lässt sich mit Hilfe eines Distributionssystems in eine Wasserstofftankstelle einspeisen.

Neben der Mobilität gelten etwa die chemische Industrie, die Stahlproduktion und die Gebäudeenergieversorgung als bedeutsame Absatzmärkte für Wasserstoff. Allen ist jedoch gemein, dass sie zur Erschließung dieser Absatzmärkte neben den erforderlichen Elektrolyseurkapazitäten auch Anlagen errichten müssen, die mit erneuerbarer Energie betrieben werden. Außerdem ist der Aufbau von Distributionssystemen notwendig, um den heute noch „grauen“ Wasserstoff durch die grüne Alternative zu ersetzen.

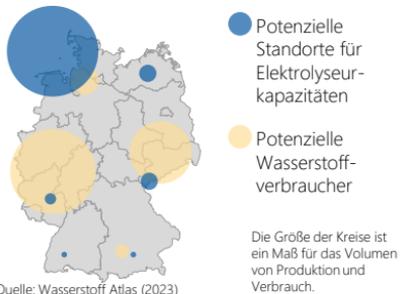
Installierte und geplante Elektrolyseurkapazitäten¹

In den nächsten Jahren ist ein Ausbau der Elektrolyseurkapazitäten erforderlich, um die Nachfrage zu decken und die Klimaschutzziele zu erreichen.



Qualitativer Vergleich von Wasserstoffproduzenten und -verbrauchern

Die räumliche Entkopplung der Produktion und der Nutzung von Wasserstoff in allen Sektoren macht den Einsatz von Transportleitungen notwendig.



Fazit: Ein Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur ist erforderlich.



Substitution des grauen durch grünen Wasserstoff



Ausbau der Elektrolyseur- und EE*-Kapazitäten um ein Vielfaches



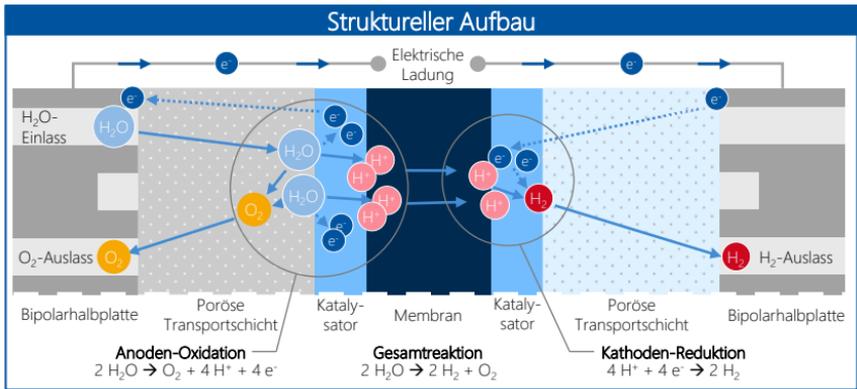
Errichtung von Infrastruktur für die Verteilung des Wasserstoffs

¹ Die Elektrolyseurkapazitäten für 2023 berücksichtigen auch geplante Kapazitäten für das Geschäftsjahr 2023.

*EE = Erneuerbare Energie

Funktionsprinzip

eines PEM-Elektrolyseurs



Der Umwandlung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe von elektrischer Energie liegt folgendes Funktionsprinzip zugrunde:

- Über die Strömungskanäle der **Bipolarhalbplatten** (engl.: „Bipolar Half Plate“, BPHP) erfolgt anodenseitig die Wasserzufuhr.
- Über die **poröse Transportschicht** (engl.: „Porous Transport Layer“, PTL) diffundiert das Wasser zur Anodenseite der **katalysatorbeschichteten Membran** (engl.: „Catalyst Coated Membrane“, CCM).
- Das Wasser wird katalytisch oxidiert, und unter Abgabe von Elektronen bilden sich Protonen (H⁺-Ionen), die über die befeuchtete Membran zur Kathodenseite gelangen.
- Die Elektronen werden über einen äußeren Stromkreis zur Kathodenseite geleitet und reagieren dort mit den Protonen zu Wasserstoff.
- Die hergestellten Gase – Wasserstoff und Sauerstoff – werden gereinigt und für die weitere Verwendung gespeichert.

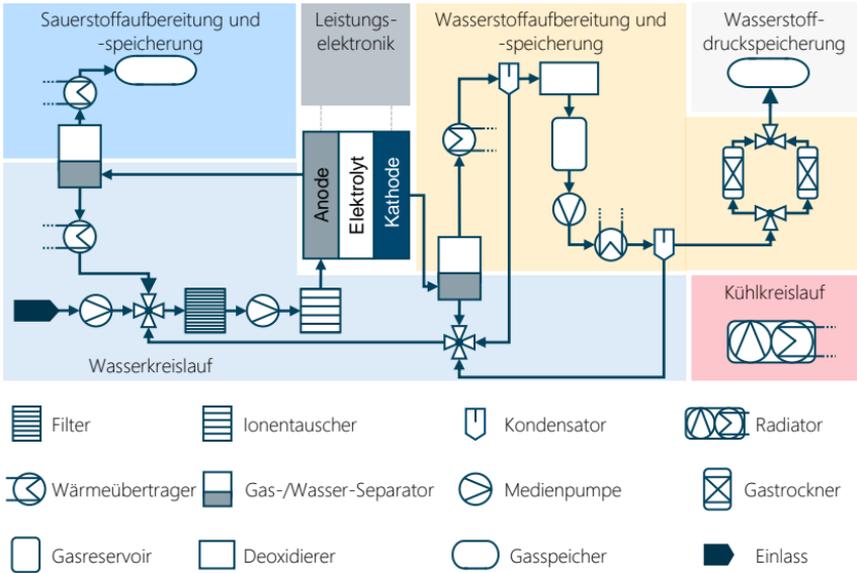
Elektrolyseurtypen

im Vergleich

Die folgende Darstellung zeigt eine Übersicht zu den in der Industrie und Forschung aktuell verfügbaren Elektrolyseurtypen, ihren Reaktionsmedien und der gängigen Betriebstemperatur. Während die SOEL und AEMEL noch weniger stark am Markt verfügbar sind, stellen die PEMEL und AEL etabliertere Technologien dar. Mit einem Anteil von 60 bis 70 Prozent der weltweit installierten Leistung ist die AEL das derzeit am meisten genutzte Verfahren. Jedoch ist die PEMEL diejenige Technologie, für die am Markt aktuell die meisten angebotenen Produkte existieren. Daher beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die PEMEL. Am Ende dieses Dokuments wird ein umfassender Vergleich aller vier Technologien vorgenommen.

Elektrolyseurtyp	Anode ein/aus	Ionentransport	Kathode aus/ein	Temp. [°C]
SOEL Solid Oxide Electrolyzer	Luft → O ₂	← O ²⁻	H ₂ → H ₂ O	800
AEL Alkaline Electrolyzer	KOH → O ₂	← OH ⁻	H ₂ → KOH	90
PEMEL Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer	H ₂ O → O ₂	→ H ⁺	H ₂ → H ₂	60
AEMEL Anion Exchange Membrane Electrolyzer	H ₂ O → O ₂	← OH ⁻	H ₂ → H ₂	60

Systemarchitektur eines PEM-Elektrolyseursystems

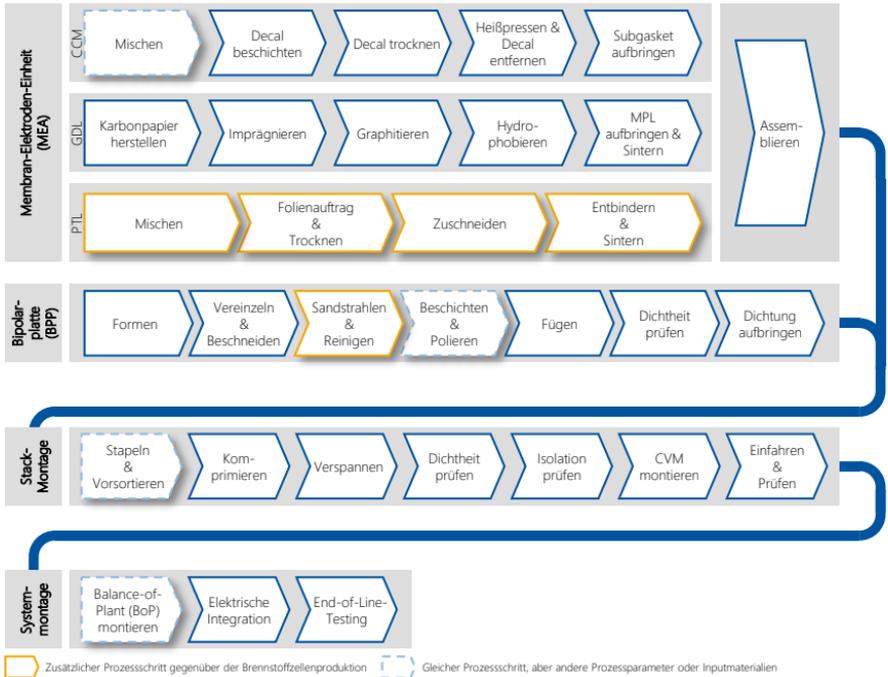


Die Systemarchitektur eines PEM-Elektrolyseurs lässt sich in sechs typische Bereiche unterteilen, wobei die praktische Ausgestaltung je nach System unterschiedlich ausfallen kann.

- Wasserkreislauf:** Der Wasserkreislauf speist sich primär aus der Frischwasserzufuhr mit deionisiertem Wasser. Da die Reaktion in der Zelle nicht vollständig abläuft, enthalten die Produkte der Reaktion – Sauerstoff und Wasserstoff – auch Anteile von Wasser. Durch die Separatoren und Kondensatoren wird es abgeschieden und dem Elektrolyseur wieder zugeführt. Bevor das Wasser in die Zelle eintritt, stellen der Wasserfilter und der Ionenaustauscher die notwendige Wasserqualität ein.
- Wasserstoffaufbereitung und -speicherung:** An der Kathodenseite tritt gemeinsam mit dem gewünschten Wasserstoff auch ein bestimmter Anteil von Wasser und Sauerstoff aus. Der Reinheitsgrad wird aus diesem Grund durch den Gas-/Wasser-Separator, die beiden Kondensatoren, den Deoxidator und zuletzt durch den Druckwechselabsorptions-Trockner (engl.: „Pressure Swing Adsorption“, PSA) erhöht. Mit den Kompressionspumpen und den Wärmetauschern wird unterdessen sichergestellt, dass der Wasserstoff unter hohem Druck und bei möglichst geringer Temperatur eingelagert wird.
- Sauerstoffaufbereitung und -speicherung:** Bei der Reaktion im Elektrolyseur entsteht hochgradig reiner Sauerstoff, der mit Hilfe des Gas-/Wasser-Separators aus dem Wasserkreislauf abgeschieden wird. Entnimmt man ihm die Prozesswärme, lässt er sich speichern und als Rohstoff verkaufen, beispielsweise für die Anwendung bei industriellen Fertigungsverfahren.
- Kühlkreislauf:** Der Kühlkreislauf entnimmt die Wärme des Elektrolyseurprozesses, die vor allem durch den Stack, aber auch durch die Kompressionspumpen entsteht, an den entsprechenden Wärmetauschern. Das im Kühlkreislauf befindliche Wasser zirkuliert durch eine Pumpe und gibt die aufgenommene Wärme an einen externen Wärmeübertrager ab.
- Leistungselektronik:** Die Leistungselektronik legt die benötigte Gleichspannung an den Stack an. Dafür wird im Transformator zunächst ein möglichst hoher Strom eingestellt und anschließend die Wechselspannung gleichgerichtet.

Produktionsprozess eines PEM-Elektrolyseursystems

In dem nachfolgend dargestellten Produktionsprozess wird die Herstellung eines PEM-Elektrolyseursystems derjenigen eines PEM-Brennstoffzellensystems vergleichend gegenübergestellt. Dabei wird zwischen zusätzlichen sowie abweichenden Produktionsschritten unterschieden.



Prozesskettenvergleich zwischen PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseursystem*

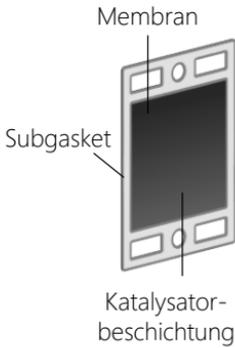
- Komponentenebene:** Im Vergleich zur PEM-Brennstoffzelle wird beim PEM-Elektrolyseur auf der Anodenseite ein Iridium-Katalysator verwendet. Dazu muss der Mischprozess angepasst werden. Außerdem ist aufgrund hoher elektrischer Potenziale auf der Anodenseite eines PEM-Elektrolyseurs eine poröse Transportschicht (engl.: „Porous Transport Layer“, PTL) einzusetzen. Auf der Kathodenseite ist analog zur PEM-Brennstoffzelle eine kohlenstoffbasierte Gasdiffusionslage (engl.: „Gas Diffusion Layer“, GDL) nutzbar. Im Folgenden werden beide Komponenten mit „PTL“ abgekürzt.
- Stack-Ebene:** Im Vergleich zur PEM-Brennstoffzelle weist der PEM-Elektrolyseur eine größere Zellfläche auf. Daher ist dessen Stapelprozess aus Sicht des Handlings herausfordernder.
- Systemebene:** Die Systemassemblierung einer PEM-Brennstoffzelle bildet einen klassischen Montageprozess im Sinne der Automobilindustrie, bei dem an aufeinanderfolgenden Stationen die einzelnen Systemelemente zusammengefügt werden. Die Systemassemblierung eines PEM-Elektrolyseurs hingegen ist vor allem bei großen Elektrolyseursystemen mit der Assemblierung großer verfahrenstechnischer Anlagen gleichzusetzen. Zudem werden bei Elektrolyseuren häufig Containerlösungen angewendet.

* In dieser Broschüre werden die Produktionsprozesse vorgestellt, die gegenüber der PEM-Brennstoffzellenfertigung abweichen. Diejenigen Produktionsprozesse, die in beiden Technologien nahezu gleich sind, werden in den Leitfäden „Produktion von Brennstoffzellenkomponenten und -systemen“ von den Herausgebern PEM und VDMA beschrieben.

Übersicht

der PEM-Elektrolysezellen-Komponenten

Katalysatorbeschichtete Membran



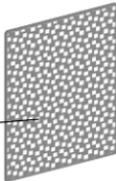
- Die mit dem Katalysator beschichtete Polymermembran wird als „CCM“ bezeichnet.
- An der Kathode wird Platin und an der Anode Iridium jeweils als Katalysatormaterial verwendet.
- Die Katalysatorschichten weisen unterschiedliche Beladungen auf und ermöglichen die elektrochemischen Reaktionen.
- Durch die semipermeable Membran werden die Protonen transportiert. Zusätzlich dient sie zur Trennung der Reaktionsgase.

Poröse Transportschicht

Karbonpapier oder
-gewebe

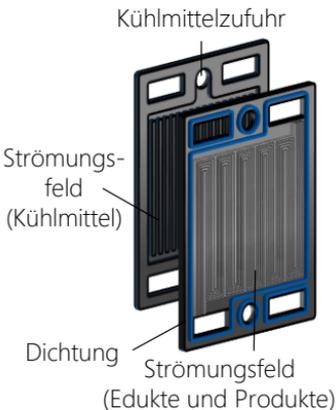


Bspw.
gesintertes
Titanpulver



- An der Wasserstoffseite kann eine kohlenstoff- oder titanbasierte PTL zwischen BPP und Katalysatorschicht verbaut werden.
- An der Anode wird eine titanbasierte PTL verwendet.
- Die PTL leiten die Elektronen, unterstützen das Thermomanagement und sorgen für einen effizienten Transport des Reaktionswassers sowie der Eduktgase.
- Aufgrund der mechanischen Stabilität verbessern die PTL das Handling im Assemblierungsprozess und stellen beim Druckbetrieb des Elektrolyseurs sicher, dass die Membran nicht beschädigt wird.

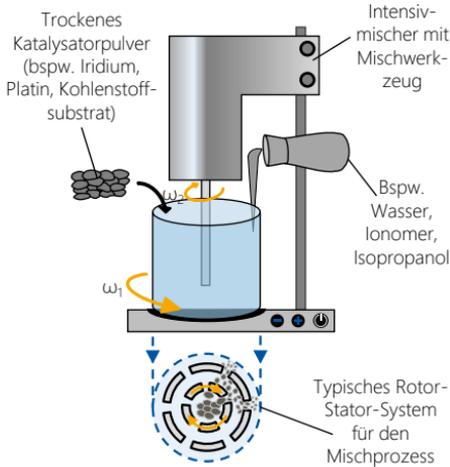
Bipolarplatte



- Die Bipolarplatte (engl.: „Bipolar Plate“, BPP) besteht aus zwei umgeformten und gefügten Halbplatten und stellt den Stofftransport der Edukte und Produkte innerhalb der Elektrolysezelle sicher.
- Über den Hohlraum, der durch das Fügen der beiden Halbplatten gebildet wird, lässt sich das Elektrolyseursystem kühlen, falls dies nicht über das Prozesswasser erfolgt.
- Typischerweise werden in einem PEM-Elektrolyseur Titanwerkstoffe oder rostfreier Stahl für die BPP eingesetzt, wobei etwa Titan-Silber, Ruthenium-Oxid, Platin- oder Goldbeschichtungen zum Einsatz kommen.

Mischen

CCM-Fertigung



Anodenrezeptur (Beispiel)

Katalysatorpulver:

Iridiumoxid IrO_2 (ca. 8 Gew.-%)

Lösungsmittel:

Isopropanol (ca. 42 Gew.-%) und Propylenglykol (ca. 42 Gew.-%)

Binder:

Ionomerlösung (ca. 8 Gew.-%)

Kathodenrezeptur (Beispiel)

Katalysatorpulver:

Kohlenstoffgetragertes Platin Pt/C (ca. 4 Gew.-%)

Lösungsmittel:

Isopropanol (ca. 33 Gew.-%) und Propylenglykol (ca. 33 Gew.-%)

Binder:

Ionomerlösung (ca. 30 Gew.-%)

Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Die Katalysatorfarbe für die Kathode besteht maßgeblich aus Kohlenstoffsubstrat (etwa „Carbon black“) und Katalysatormaterial (bspw. Platin).
- Auf der Anode wird wegen höherer Potentiale Iridiumoxid verwendet.
- Grundsätzlich gilt für beide Katalysatorfarben, dass sie durch die Zugabe von Additiven finalisiert werden.
 - Die Lösungsmittel tragen im Allgemeinen zur Homogenisierung und Verflüssigung der Farbe bei.
 - Der Binder ermöglicht den Transport der Protonen innerhalb der Katalysatorschicht zur Membran.
- Das Mischen der Katalysatorfarben für die Anoden- und die Kathodenschicht der CCM erfolgt getrennt voneinander.
- Für den Mischprozess werden in der Regel Rührwerke verwendet, mit denen sich eine homogene Viskosität der Farbe realisieren lässt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Katalysatorbeladung:
 - 1 - 2,5 mg/cm^2 (Anode)
 - 0,3 mg/cm^2 (Kathode)
- Mischdauer: 5 Min.
- Temperatur: 20 - 25 °C
- Mischgeschwindigkeit: ca. 20.000 U/Min.

Technologiealternativen

- Ultraschallbad
- Schaufelmischer
- Rotationskugelmischer

Qualitätseinflüsse

- Mischdauer, -intensität und -temperatur
- Verschleiß des Mischwerkzeugs
- Atmosphäre beim Mischvorgang (bspw. Stickstoff statt Luft)
- Verdampfungsverhalten von Lösemitteln

Qualitätsmerkmale

- Homogene Dispersion
- Viskosität
- Geringe Partikelagglomeration

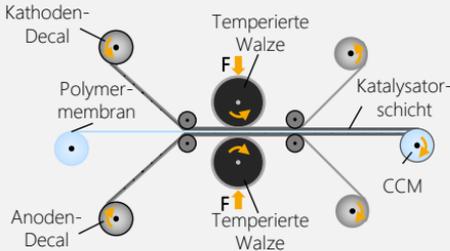
CCM-Herstellung

Beschichtungskonzepte und Forschungsansätze

Zur Herstellung der CCM existieren verschiedene Ansätze, die sich in indirekte und direkte Verfahren unterteilen lassen.

- **Indirekte Verfahren:** Beim Decal-Verfahren und Transferband wird die Katalysatorfarbe zunächst in einem Zwischenschritt auf ein anderes Material aufgetragen und getrocknet.
- **Direkte Verfahren:** Bei den direkten Verfahren wird die Katalysatorfarbe direkt auf eine der funktionalen Schichten, die Membran oder PTL appliziert.

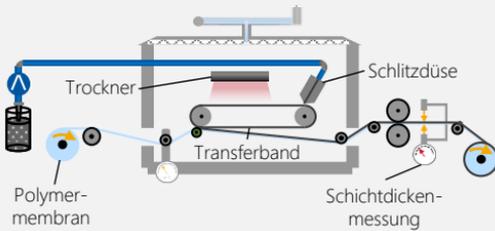
Decal-Verfahren



Beim **Decal-Verfahren** erfolgt die Beschichtung eines polymeren Transferbandes mit der Katalysatorfarbe, die anschließend getrocknet und via Heißpressprozess auf die Membran übertragen wird.

- + Stabiler Herstellungsprozess, der standardmäßig in der Industrie Anwendung findet
- Das benutzte Decal ist ein Abfallprodukt.

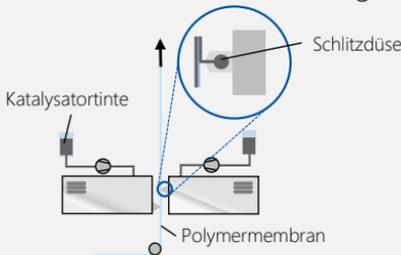
Transferband



Es erfolgt die **Beschichtung eines wiederverwendbaren Zwischenelements** (hier: Transferband) mit der Katalysatorfarbe und einer anschließenden (teilweisen) Trocknung. Der Übertrag findet mittels eines Heißpressprozesses statt.

- + Kein Anschwellen der Membran durch Kontakt mit Wasser
- Das Zwischenelement muss nach dem Übertrag gereinigt werden.

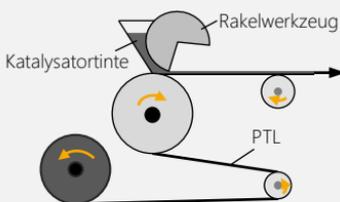
Membran-Direktbeschichtung



Bei der **Direktbeschichtung der Membran** kann sie mittels Schlitzdüse in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess direkt beschichtet werden.

- + Die Wertschöpfungskette kann um einen Prozessschritt reduziert und vereinfacht werden.
- Die Membran ist feuchteempfindlich und schwillt durch das Wasser in der Katalysatorfarbe an, was eine homogene Katalysatorschicht erschwert.

GDE-Ansatz

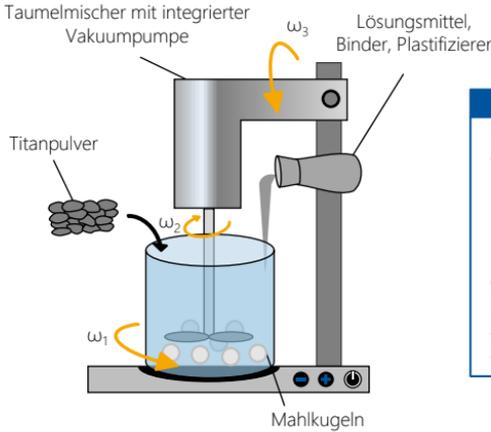


Beim **GDE-Ansatz** wird die PTL direkt beschichtet, so dass eine Gasdiffusionselektrode (engl.: „Gas Diffusion Electrode“, GDE) entsteht.

- + Die PTL oder GDE ist mit Blick auf das Handling ein vorteilhaftes Substrat.
- Die flüssige Katalysatorfarbe kann in die Poren der PTL eindringen und die Porosität durch Verstopfen reduzieren.

Mischen

PTL-Fertigung



Tintenrezeptur (Beispiel)

Sinterpulver:

Ti-HDH (hydriert-dehydriert) (69 Gew.-%)

Lösemittel:

Ethanol (28 Gew.-%)

Binder und Plastifizierer:

PVB-Harz, Triethylenglykol und Polyethylenglykol (3 Gew.-%)

Optional:

Zugabe eines „Poreformers“ (Porenbilder) zur Steigerung der Porosität

Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Für den Vermengungsprozess der Titan­tinte wird ein Mischwerkzeug eingesetzt, beispielsweise ein Taumelmischer.
- Darin werden zunächst der Binder und Plastifizierer mit dem Lösungsmittel verarbeitet, bis eine homogene Dispersion vorliegt.
- Anschließend wird das Metallpulver hinzugegeben. Zur Unterstützung des Mischvorgangs können Mahl­kugeln hinzugefügt werden.
- Eine integrierte Vakuumpumpe unterbindet in der erzeugten Dispersion das Bilden von Luft­einschlüssen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Korngröße Titanpulver: < 45 μm
- Mischdauer: ca. 24 Std.
- Druck: Umgebungsdruck
- Temperatur: Umgebungstemperatur, in der Regel ca. 22 $^{\circ}\text{C}$

Technologiealternativen

- Sinterpulver: sphärisches Titanpulver (Ti-GA)
- Lösungsmittel: Methyl­ethylketon, deionisiertes Wasser
- Binder: Polyvinylalkohol
- Plastifizierer: Benzylbutylphthalat

Qualitätseinflüsse

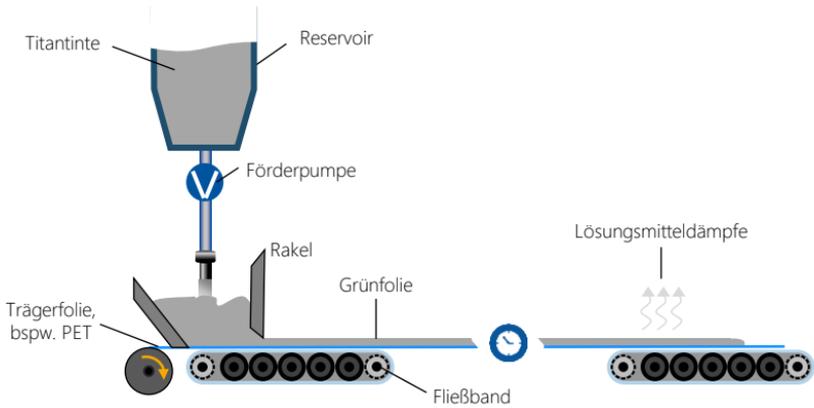
- Umgebende Atmosphäre
- Mischungsverhältnis der Komponenten
- Korngröße des Titanpulvers
- Dauer des Mischvorgangs

Qualitätsmerkmale

- Homogenität der Tinte
- Viskosität
- Bläschenfreiheit

Folienauftrag & Trocknen

PTL-Fertigung



Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Beim Foliengießen wird das Ziel verfolgt, die vorbereitete Titantinte homogen auf eine flächige Trägerfolie aufzutragen.
- Dafür wird die Titantinte aus einem Reservoir hinter einen Rakel gepumpt, dessen horizontaler Abstand zu der Trägerfolie die Schichtdicke einstellt.
- Indem das Förderband bewegt wird, bildet sich auf der Trägerfolie eine dünne Schicht der Titantinte aus, die auch als „Grünfolie“ (engl.: „Green Tape“) bezeichnet wird.
- Die entstandene Grünfolie trocknet auf dem Förderband unter ambienten Umgebungsbedingungen, bis der Großteil des Lösungsmittels verdampft ist.

Prozessparameter & -anforderungen

- Nassschichtdicke: $300 \pm 30 \mu\text{m}$
- Vorschubgeschwindigkeit: 250 mm/Min.
- Typische Porengröße: 15 - 20 μm
- Trocknungsdauer (in Abhängigkeit von der Trocknungsintensität, bspw. über beheiztes Förderband oder Heizelemente): 15 Min.

Technologiealternativen

- Additive Verfahren

Qualitätseinflüsse

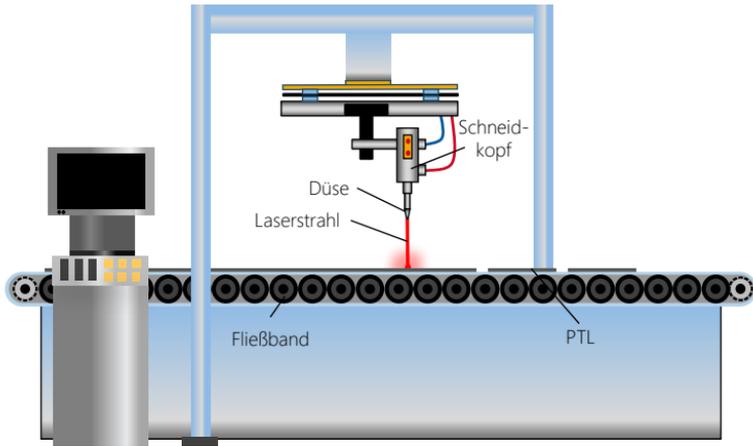
- Viskosität der Tinte
- Höhengenaueigkeit des Rakels
- Material der Trägerfolie
- Vorschubgeschwindigkeit
- Umgebungsbedingungen
- Trocknungsdauer

Qualitätsmerkmale

- Toleranz der Nassschichtdicke
- Trocknungsgrad der Grünfolie
- Homogenität der Oberfläche

Zuschneiden

PTL-Fertigung



Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Innerhalb des Schneidkopfes wird der Laserstrahl durch eine Linse fokussiert und auf die getrocknete Bandware projiziert.
- Die Schneidoptik ist auf einem sogenannten XY-Portal montiert, das die präzise Bewegung des Schneidkopfes innerhalb eines vorgegebenen Bereiches ermöglicht.
- Der hohe Energieeintrag führt zu einer Trennung des Materials entlang der vorgegebenen PTL-Geometrie.

Prozessparameter & -anforderungen

- PTL-Fläche: > 1.400 cm²
- Laserausgangsleistung: 500 - 2.000 W
- Vorschubgeschwindigkeit: 20 - 300 m/Min. bei 0,2 mm Wandstärke
- Genauigkeit: 10 - 50 µm

Technologiealternativen

- Scherschneiden
- Wasserstrahlschneiden

Qualitätseinflüsse

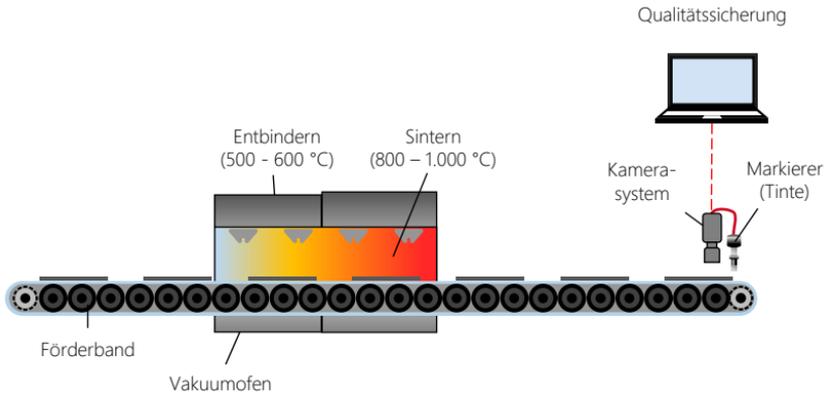
- Art des Lasers
- Schnittgeschwindigkeit
- Fokussierung
- Prozessbedingte Verunreinigungen

Qualitätsmerkmale

- Gratfreie Kanten
- Keine Beeinträchtigung der Porosität des Materials
- Verzugsfreier Beschnitt

Entbindern & Sintern

PTL-Fertigung



Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Um die Additive, die der Titantinte für den Gießprozess zugeführt wurden, aus dem Produkt zu entfernen, folgt ein Entbinderungsschritt.
- Dabei wird die Temperatur schrittweise so lange erhöht, bis die Zieltemperatur erreicht wird.
- Im Anschluss an das Entbindern erfolgt der eigentliche Sinterprozess, in dem die poröse Struktur der PTL eingestellt wird.
- Bei dem Vorgang kann es zu Schrumpfungen der PTL kommen, und je nach resultierender PTL-Größe kann ein erneutes Zuschneiden mittels Laserschneidprozess notwendig sein, um die Maßhaltigkeit sicherzustellen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Entbinderungstemperatur: 500 - 600 °C
- Sintertemperatur: 800 - 1.000 °C
- Dauer Gesamtprozess: 2,5 - 10 Std.

Technologiealternativen

- Variation von Sintertemperatur und -dauer

Qualitätseinflüsse

- Trocknungsdauer
- Restgehalt an Lösungsmittel
- Genauigkeit der Entbindungs- und Sinter-temperatur
- Dauer des Entbinderungs- und Sinterprozesses

Qualitätsmerkmale

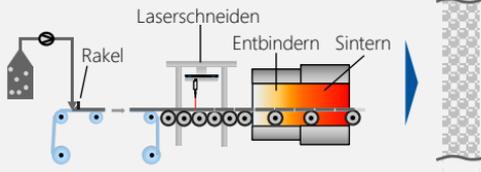
- Maßgenauigkeit nach dem Wärmeeintrag
- Homogene Oberflächenbeschaffenheit
- Planarität der PTL

PTL-Herstellung

Auszug wesentlicher Herstellungsarten

Im Elektrolyseur kommt anodenseitig (und optional auch kathodenseitig) eine titanbasierte poröse Transportschicht (engl.: „Porous Transport Layer“, PTL) zum Einsatz, um den Transport der Reaktanden sowie die elektrische Leitfähigkeit in der Zelle zu gewährleisten. In der Industrie haben sich besonders mit Blick auf die Verarbeitung des verwendeten Titans unterschiedliche Herstellungsarten durchgesetzt.

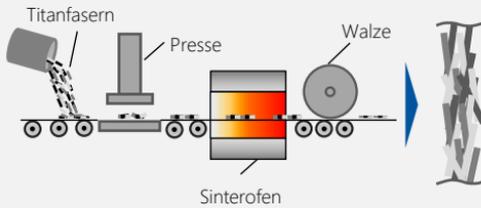
Gesintert aus Titanpulver



Eine fließfähige Mischung aus Titanpartikeln, Lösungs- und Bindemitteln sowie Plastifizierern wird gleichmäßig auf eine Folie aufgebracht und anschließend luftgetrocknet, zugeschnitten, vorgewärmt und gesintert.

- + Porosität und Porengröße kann durch die Auswahl von spezifischen Titanpartikeln und Sinterparameter eingestellt werden
- Vergleichsweise kostenintensive Herstellung

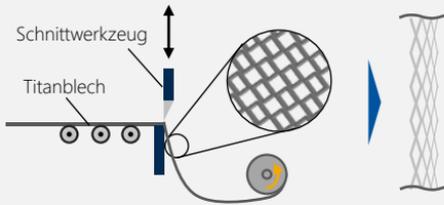
Titanvlies



Titanfasern werden gleichmäßig verteilt, gepresst und anschließend durch Sinterung zu einem unregelmäßig porösen Vlies verbunden, das abschließend per Walzglättung die gewünschte Dicke und Ebenmäßigkeit erhält.

- + Die vergleichsweise dicken Titanvliese weisen eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit auf
- Porosität (50 %) unterhalb des Optimums (70 - 80 %)

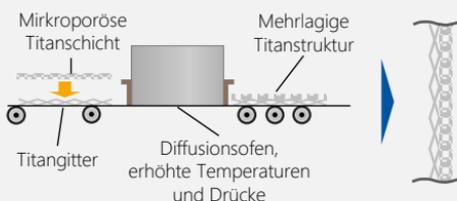
Streckmetallgitter



Aus einem Titanblech wird durch reihenweise aufeinanderfolgende versetzte Einschnitte ein Streckmetallgitter geformt. Streckmetallgitter verschiedener Maschengrößen werden flächig zu einer PTL verschweißt.

- + Kostengünstige Herstellung
- Unregelmäßige Oberfläche kann beim Verpressen die Membran beschädigen

Mehrlagige Titanstrukturen

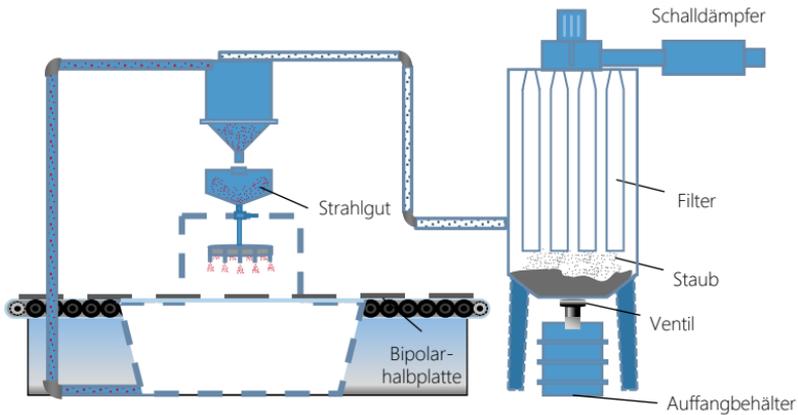


Eine mikroporöse Schicht aus gesintertem Titan oder Titanvlies wird per Diffusionsschweißen auf ein Titanblech aufgebracht. Diese Anordnung erlaubt den Einsatz von Bipolarplatten ohne Strömungsfelder.

- + Verbesserte Effizienz durch erhöhte Stromdichte, Temperatur und Betriebsdruck
- Noch im Übergang von Forschung zu Industrialisierung

Sandstrahlen

BPP-Fertigung



Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Das Sandstrahlen kann als vorbereitender Prozessschritt der Oberfläche der Bipolar-halbplatten verstanden werden.
- Das Ziel liegt darin, die Oberflächenrauheit zu erhöhen, wodurch die Adhäsion der Beschichtungsmaterialien verbessert wird.
- Der Produktionsschritt kann generell als optional erachtet werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Strahlgut: SiO_2 -Pulver
- Siebweite: bis 0,2 mm

Technologiealternativen

- Laserstrukturierung
- Keramik- oder Korund-Strahlgut

Qualitätseinflüsse

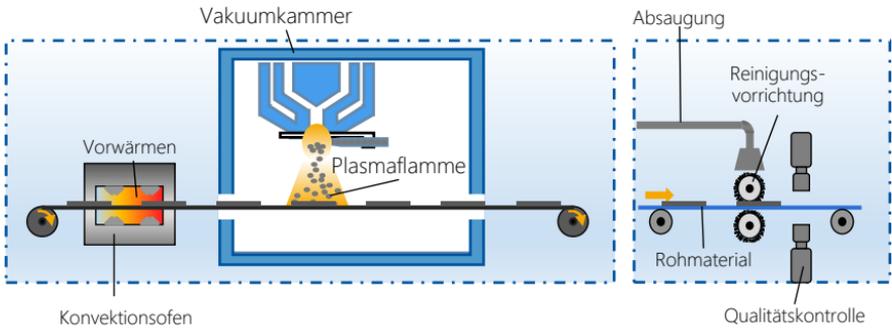
- Druck des Strahlgutauftrags

Qualitätsmerkmale

- Gleichmäßige Oberflächenrauheit
- Oberfläche frei von Verunreinigungen

Beschichten

BPP-Fertigung



Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Die Bipolarhalbplatten werden zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit beschichtet.
- „Vacuum Plasma Spraying“ eignet sich zur automatisierten Prozessgestaltung. Gleichzeitig lassen sich niedrige Herstellungskosten erzielen.
- Zunächst werden die Halbplatten zur Verbesserung der Adhäsion im Beschichtungsprozess erhitzt.
- Anschließend wird unter Vakuum in einem Plasma aus Argon, Stickstoff und Wasserstoff das Beschichtungsmetall – etwa Niob – auf die BPHP aufgetragen.
- Der Kammerunterdruck von 50 mbar verhindert dabei die Oxidation der Niob-Partikel, bevor sie auf die BPHP aufgetragen werden.
- Nach der Beschichtung werden die BPHP direkt poliert.

Prozessparameter & -anforderungen

- Plasmaenthalpie: 21,3 MJ/kg
- Kammerdruck: 50 mbar
- Düsenköpfe: 1 - 3: Geschwindigkeit: 350 mm/s
- Beschichtungsmaterial: Nb, Ti, Pt, Ag
- Anzahl Schichten: 32; Schichtdicke: 0,1 μm
- Produktionsvolumen: max. 168 Einheiten/Std.

Technologiealternativen

- Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)
- Arc Ion plating (AIP)
- Chemical Vapor Deposition (CVD)
- Electrophoretic deposition (EPD)
- Electrolytic deposition (ELD)
- Sputtern

Qualitätseinflüsse

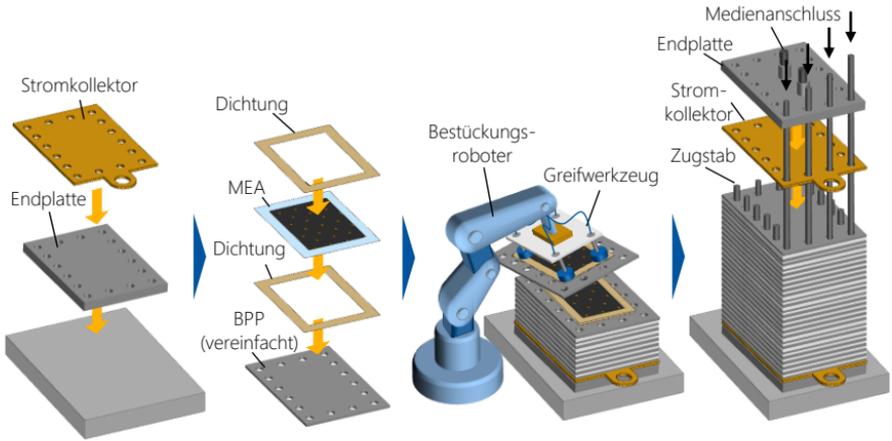
- Beschichtungsmaterial
- Morphologie des Beschichtungspulvers: möglichst sphärische Form
- Plasmazusammensetzung

Qualitätsmerkmale

- Gleichmäßige Beschleunigung und Temperatur der Plasmaflamme
- Beschichtungshomogenität
- Korrosionsbeständigkeit
- Elektrische Leitfähigkeit

Stapeln und Vormontieren

Stack-Fertigung



Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Zu Beginn der Fertigung des Elektrolyseur-Stacks werden die untere Endplatte und der untere Stromkollektor vormontiert.
- MEA (hier: 5-Lagen-MEA*), BPP und zwei Dichtungen werden in einer festgelegten Reihenfolge aufeinandergestapelt.
- Durch das anschließende Aufeinanderstapeln dieser Pakete zu einem Stack entstehen funktionsfähige Einzelzellen, die jeweils durch zwei Bipolarplatten begrenzt sind.
- Abschließend werden der obere Stromkollektor und die obere Endplatte samt Medienzugängen dem Stack hinzugefügt.
- Die exakte Ausrichtung der einzelnen Komponenten des Stapels lässt sich durch außen- und innenliegende Führungselemente gewährleisten.

Prozessparameter & -anforderungen

- Anzahl Elektrolysezellen: Je nach Stack-Größe werden mehrere hundert Einzelzellen gestapelt.
- Stapelgeschwindigkeit: 3-5 Sek./Komponente
- Positionsgenaueres Komponenten-Handling von ca. 0,1 mm

Technologiealternativen

- Manuelles Stapeln im F&E-Segment (< 100k MEAs/a)
- Halbautomatisches Stapeln durch Bahnsystem mit manueller Handhabung (100k - 700k MEAs/a)
- Vollautomatisches Stapeln durch Bahn- oder Zuführsysteme (> 700k MEAs/a)

Qualitätseinflüsse

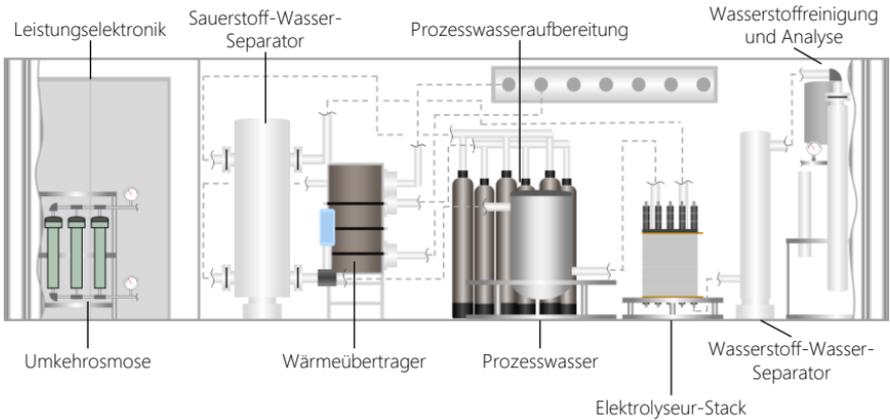
- Toleranzgenauigkeit der Komponentendicken: < 10 µm
- Positioniergenauigkeit $\approx \pm 0,1$ mm
- Reinraum-Umgebungsstufe: ISO 8
- Relative Position der Wiederholkomponenten zum Roboter

Qualitätsmerkmale

- Relative Positionierung der Zellen zueinander
- Zerstörungsfreiheit

Balance-of-Plant montieren

Systemfertigung



Komponentenfertigung

Stack-Fertigung

Systemfertigung

- Der Elektrolyseur-Stack stellt den Kern eines Elektrolyseur-Systems dar, der im Rahmen der Systemassemblierung mit allen weiteren Peripheriekomponenten zusammengesaltet wird.
- Diese erfolgt – je nach Größe des Elektrolyseurs – beispielsweise in einem 40 Fuß (zwölf Meter) großen Seecontainer.
- Aufgrund der Größe der zu montierenden Komponenten werden diese zunächst am Installationsort platziert, wobei Kransysteme zum Einsatz kommen können.
- Sobald alle Komponenten sich am Installationsort befinden, werden sie mit Rohrleitungen verbunden.
- Abschließend werden die Komponenten elektrisch integriert und ein End-of-Line-Testing vorgenommen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Montageanleitung samt Einteilung in Unterbaugruppen
- Montagegerechtes Komponentendesign
- Gewährleistung der Transportsicherheit

Technologiealternativen

- Aktuell nur manuelle Montage

Qualitätseinflüsse

- Systemdesign und Materialien
- Montageumgebung

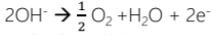
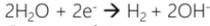
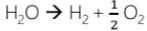
Qualitätsmerkmale

- Demontierbarkeit
- Erreichbarkeit der Komponenten und Systeme
- Äußere Unversehrtheit

Technologievergleich

Alkalischer Elektrolyseur

Reaktionsgleichungen

Anodenreaktion:**Kathodenreaktion:****Gesamtreaktion:**

Materialien

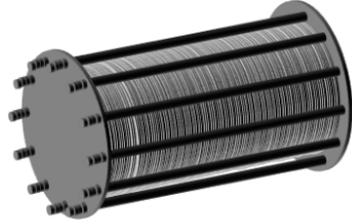
Katalysator:

Anode und Kathode: mit Nickel beschichtete Edelstahlplatten

Elektrolyt:

Kaliumhydroxid (KOH) (20 - 40 Gew.-%) oder Natriumhydroxid-Lösung

Typisches Stack-Design



AEL

PEMEL

SOEL

AEMEL

- Bei der alkalischen Elektrolyse sind die Anode und die Kathode in einem flüssigen Elektrolyten (Kaliumhydroxid-Lösung) eingetaucht.
- Die Anode und die Kathode werden durch ein Diaphragma voneinander getrennt.
- Kathodenseitig findet eine Oxidation statt, so dass Wasserstoff-Hydroxid-Ionen (OH^-) entstehen.
- Während die Hydroxid-Ionen durch das Diaphragma diffundieren können, wird der Wasserstoff zurückgehalten und aus der Zelle abgeleitet.
- Anodenseitig oxidieren die Hydroxid-Ionen zu Wasser und Sauerstoff.

Betriebsparameter und -charakteristika

- Druck: 1 - 30 bar
- Temperatur: 40 - 90 °C
- pH-Wert: 12 - 14
- Designvarianten: Mono- oder Bipolarplattendesign
- Wasserstoffreinheit: > 99,8 %

Vorteile

- Lebensdauer von bis zu 90.000 Betriebsstunden
- Technologie mit hohem Reifegrad
- Edelmetallfreie Katalysatoren (kostengünstig)

Entwicklungstrends

- Zero-Gap-Zellarchitektur
- Steigerung der Stromdichte auf 2 - 3 A/cm²
- Reduktion der Widerstände einzelner Zellkomponenten

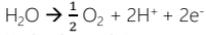
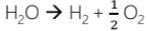
Anwendungsfelder

- Industrielle Wasserstoffproduktion
- Energiespeicherung
- Wasserstofftankstellen

Technologievergleich

PEM-Elektrolyseur

Reaktionsgleichungen

Anodenreaktion:**Kathodenreaktion:****Gesamtreaktion:**

Materialien

Katalysator:

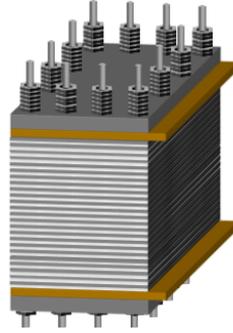
Anode: Iridium (IrO_2)

Kathode: Platin (Pt)

Elektrolyt:

Polymer-Elektrolyt-Membran

Typisches Stack-Design



AEL

PEMEL

SOEL

AEMEL

- Beim PEM-Elektrolyseur werden die Anode und die Kathode durch eine Polymer-Elektrolyt-Membran voneinander getrennt.
- Die Membran ist durchlässig für Protonen (H^+), die an der Anode entstehen.
- Protonen, Sauerstoff und Elektronen werden durch Oxidation von deionisiertem Wasser gebildet.
- Die Protonen diffundieren durch die Membran, wo sie auf der Kathodenseite zusammen mit Elektronen zu Wasserstoff reduziert und in Wasser gelöst aus der Zelle transportiert werden.

Betriebsparameter und -charakteristika

- Druck: < 70 bar
- Temperatur: 20 - 80 °C
- pH-Wert: 2
- Designvarianten: planares Design
- Wasserstoffreinheit: bis zu 99,999 %

Vorteile

- Kompaktes Zelldesign
- Dynamischer Betrieb
- Kaltstartzeit < 15 Min.
- Betrieb unter Differentialdruck

Entwicklungstrends

- Reduktion von Edelmetallbeladungen um 40 - 60 %
- Verbesserung der Lebensdauer auf bis zu 80.000 Betriebsstunden
- Skalierung der Produktion

Anwendungsfelder

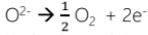
- In Kombination mit erneuerbarer Energie oder Wasserstofftankstellen
- Industrielle Wasserstoffproduktion
- Mobile Stromversorgungssysteme
- Power-to-Gas-Systeme

Technologievergleich

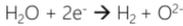
Festoxid-Elektrolyseur

Reaktionsgleichungen

Anodenreaktion:



Kathodenreaktion:



Gesamtreaktion:



Materialien

Katalysator:

Anode: Lanthan-Strontium-Manganat

Kathode: Nickel (Ni/GDC oder Ni/8YSZ)

Elektrolyt:

Y_2O_3 (YSZ)- oder Sc_2O_3 (ScSZ)-stabilisiertes

Zirkonium-Dioxid (ZrO_2)

Typisches Stack-Design



AEL

PEMEL

SOEL

AEMEL

- Beim Festoxid-Elektrolyseur werden die Anode und die Kathode durch einen keramischen Elektrolyten voneinander getrennt.
- Der Elektrolyt ist permeabel für Sauerstoff-Ionen (O^{2-}), die an der Kathode durch die Reduktion von Wasserdampf gebildet werden.
- Bei dieser Reaktion wird außerdem Wasserstoff gebildet, der anschließend aus dem System abgeführt wird.
- Anodenseitig oxidieren die Sauerstoff-Ionen zu Sauerstoff und Elektronen.
- Die hohen Betriebstemperaturen von bis zu 1.000 °C stellen hohe Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe sowie Dichtungen und führen zu langen Anfahrzeiten des Systems.

Betriebsparameter und -charakteristika

- Druck: 1 bar
- Temperatur: 600 - 1.000 °C
- Betriebsmodi: Co-Elektrolyse (gleichzeitige Produktion von zwei verschiedenen Gasen), reversibler Elektrolyse-Brennstoffzellen-Betrieb
- Designvarianten: Stack-Ebene (planar, tubular), Zellebene (elektrolyt-, elektrodengestützt)

Vorteile

- Hohe Reaktionsgeschwindigkeiten
- Verwendung edelmetallfreien Katalysatoren
- Hohe Effizienz in KWK-Anwendungen
- Ein Teil der benötigten Elektrizität kann durch Prozesswärme ersetzt werden, wodurch der Wirkungsgrad steigt.

Entwicklungstrends

- Reduzierung der Prozesstemperatur
- Verbesserung der Prozessbeständigkeit der Elektroden- und Elektrolytmaterialien
- Erhöhung der Lebensdauer
- Senkung der Fertigungskosten

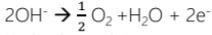
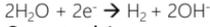
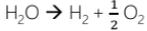
Anwendungsfelder

- In KWK-Anwendungen (Verwendung von hochwertiger Prozesswärme aus Industrieprozessen)
- Chemische Industrie
- Energiespeicherung
- Power-to-Gas-Anwendungen

Technologievergleich

AEM-Elektrolyseur

Reaktionsgleichungen

Anodenreaktion:**Kathodenreaktion:****Gesamtreaktion:**

Materialien

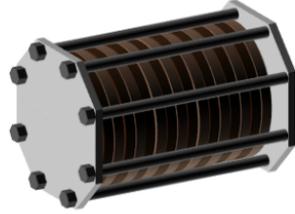
Katalysator:

Anode und Kathode: nickelbasierte Verbindungen

Elektrolyt:

Alkalische Anionen-Austauschmembran

Typisches Stack-Design



AEL

PEMEL

SOEL

AEMEL

- Der System- und Zellaufbau des AEM-Elektrolyseurs ähnelt dem eines PEM-Elektrolyseurs, jedoch werden dabei kostengünstigere Materialien verwendet.
- Diese Materialien sind teilweise aus der alkalischen Elektrolyse bekannt, weshalb der AEM-Elektrolyseur häufig auch als Kombination von AEL und PEMEL verstanden und bezeichnet wird.
- An der Kathode des AEM-Elektrolyseurs wird Wasser zu Wasserstoff, und Hydroxid-Ionen werden reduziert.
- Die Hydroxid-Ionen diffundieren durch die Anionen-Austauschmembran und oxidieren an der Anode zu Wasser- und Sauerstoff.

Betriebsparameter und -charakteristika

- Druck: < 35 bar
- Temperatur: 40 - 60 °C
- pH-Wert: 9 - 11
- Betriebsmodi: Druckbetrieb
- Designvarianten: planares Design

Vorteile

- Edelmetallfreie Katalysatoren und titanfreie Komponenten (kostengünstig)
- Betrieb unter Differentialdruck
- Geringe ohmsche Verluste

Entwicklungstrends

- Skalierung einzelner Stack-Module
- Erhöhung der chemischen und mechanischen Beständigkeit der Membran
- Entwicklung weiterer geeigneter Katalysatoren
- Weitere Industrialisierung

Anwendungsfelder

- Industrielle Wasserstoffproduktion
- Energiespeicherung
- Power-to-Gas-Anwendungen
- Carbon Capture and Utilization

Leitfäden

für die Elektrolyseur- und Brennstoffzellenproduktion

In der Beitragsreihe „Leitfäden für die Elektrolyseur- und Brennstoffzellenproduktion“ erläutert der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen gemeinsam mit dem VDMA die Prozessketten zur Herstellung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene.



Produktion von Brennstoffzellenkomponenten

Der Leitfaden „Produktion von Brennstoffzellenkomponenten“ gibt den Stand der Technik zur Produktion der Membran, Bipolarplatte und Gasdiffusionslage wieder. Ein Fokus liegt auf den am Markt verfügbaren Prozessalternativen, die einen Beitrag zur Kostenreduktion durch eine skalierte Produktion leisten.

2. Auflage
ISBN 978-3-947920-25-9

Hrsg.
PEM der RWTH Aachen & VDMA

Online verfügbar



Produktion von Brennstoffzellensystemen

Der Leitfaden „Produktion von Brennstoffzellensystemen“ beschreibt, wie Brennstoffzellensysteme in mobilen Anwendungen eingesetzt werden können. Aufbauend auf dem Komponenten-Leitfaden wird erläutert, wie diese zu einem Brennstoffzellenstapel und schließlich zu einem System weiterverarbeitet werden.

2. Auflage
ISBN 978-3-947920-13-6

Hrsg.
PEM der RWTH Aachen & VDMA

Online verfügbar



Produktion von Elektrolyseursystemen

Brennstoffzellen und Elektrolyseure weisen sowohl auf Komponenten- als auch auf Prozessebene Ähnlichkeiten auf, die im Leitfaden „Produktion von Elektrolyseursystemen“ herausgearbeitet werden. Die Übersicht schließt mit einem holistischen Vergleich der am Markt verfügbaren Elektrolyseurtechnologien ab.

1. Auflage
ISBN 978-3-947920-41-9

Hrsg.
PEM der RWTH Aachen & VDMA

Online verfügbar

