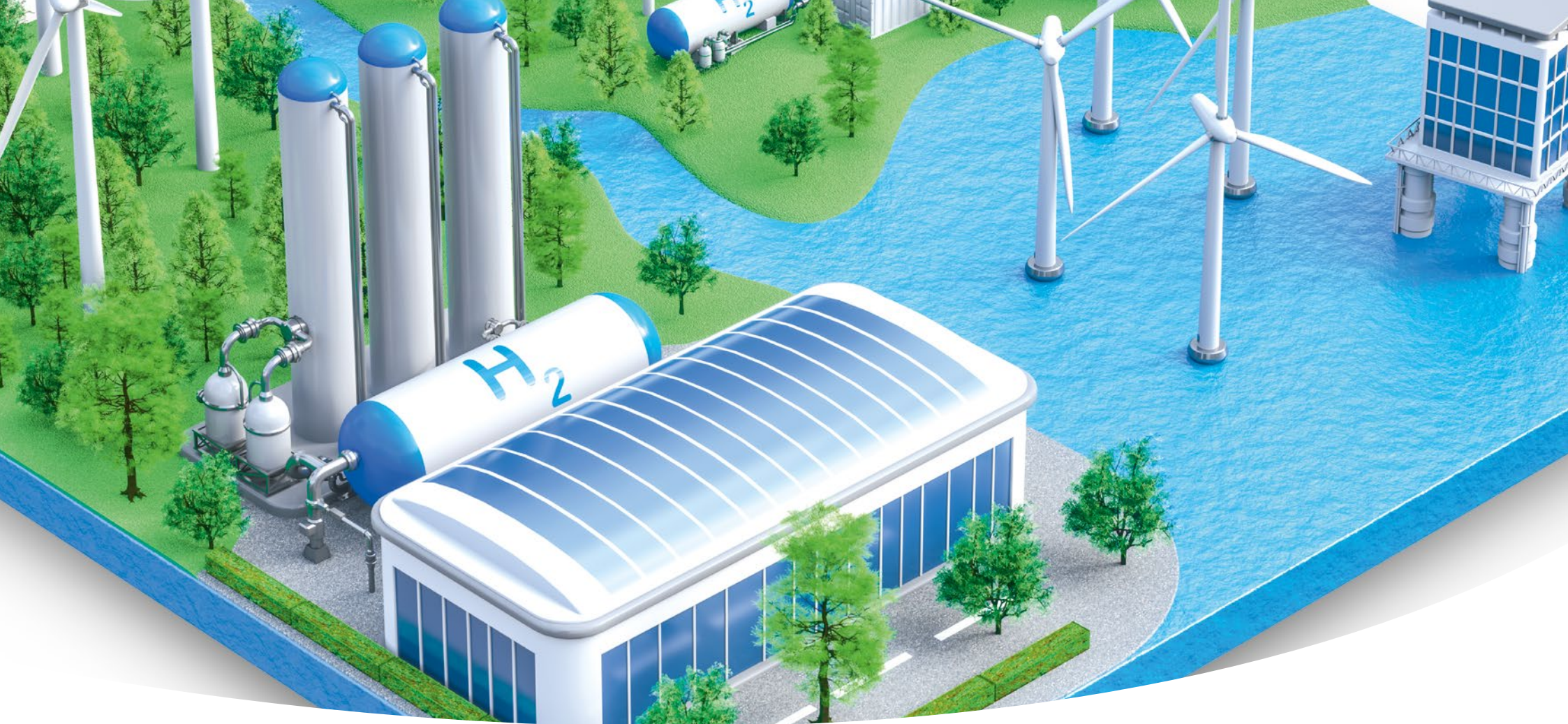




ELEKTROLYSEURE UND WASSERSTOFF: WELCHE ANFORDERUNGEN MÜSSEN DICHTUNGEN IN ERNEUERBAREN ENERGIEN ERFÜLLEN? EINE WHITEPAPER-REIHE

AUSGABE 2: ELEKTROLYSEURE UND WASSERSTOFF

	EXECUTIVE SUMMARY	2
1	EINLEITUNG	3
2	WELCHE ELEKTROLYSEVERFAHREN DOMINIEREN IN DER WASSERSTOFF-WIRTSCHAFT?	4
3	WELCHE DICHTUNGSANFORDERUNGEN GELTEN ENTLANG DER H ₂ -WERTSCHÖPFUNGS-KETTE?	5
4	WELCHE DICHTUNGEN WERDEN IN ELEKTROLYSEUREN BENÖTIGT?	8
5	WELCHE DICHTUNGEN WERDEN FÜR H ₂ -KOMPRESSOREN, -PUMPEN, -SPEICHER UND -TRANSPORT BENÖTIGT?	9
6	WELCHE DICHTUNGEN WERDEN FÜR DIE UMWANDLUNG VON ELEKTRISCHER ENERGIE IN SPEICHERBARE ENERGIETRÄGER BENÖTIGT?	10
7	WELCHE DICHTUNGEN WERDEN AN H ₂ -TANKSTELLEN (HRS) UND ZUR BETANKUNG BENÖTIGT?	11
8	FRAGE AN DEN BRANCHEN-EXPERTEN	12
9	GIBT ES EINE ÜBERSICHTSTABELLE FÜR APPLIKATIONEN UND TYPISCHE EINSATZGEBIETE SOWIE PASSENDE WERKSTOFFKLASSEN UND DICHTUNGSDESIGN?	14
10	WELCHE WERKSTOFFE EIGNEN SICH FÜR WELCHE DICHTUNGSART?	16
11	WELCHE DICHTUNGSGEOMETRIEN WERDEN WO IN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE BENÖTIGT?	17
12	WELCHE NORMEN UND STANDARDISIERUNGEN MÜSSEN DICHTUNGEN IM BEREICH DER WASSERSTOFF-WERTSCHÖPFUNGSKETTE ERFÜLLEN?	18
13	WO ERHALTE ICH BRANCHEN-NEWS IM BEREICH DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN?	26
14	WIE BLEIBE ICH AUF DEM LAUFENDEN?	29
15	EINE PRAXIS-CHECKLISTE	30
16	FAZIT UND AUSBLICK	31
17	GLOSSAR – WERKSTOFFKLASSEN UND MARKENNAMEN	32
18	IMPRESSUM	33

Die Wasserstoffwirtschaft entwickelt sich dynamisch und gilt als eines der Schlüsselemente der Energiewende. Getrieben wird diese Entwicklung vom Zwang zur Dekarbonisierung, dem Gewährleisten der Energiesicherheit sowie einer wachsenden Industrienachfrage. Gleichzeitig steigen die technischen und regulatorischen Anforderungen entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette – und Dichtungen sind eine sicherheitskritische Schlüsselkomponente in diesen Prozessen. Sie müssen Permeation minimieren, hohen Drücken widerstehen, explosive Dekompression (RGD) überstehen, Medien und Temperaturbeständigkeit gewährleisten und eine zuverlässige Abdichtung über lange Betriebszeiten sicherstellen.

Dieses Whitepaper bietet einen kompakten Überblick über Anforderungen, Werkstoff- und Designempfehlungen sowie Normen und bewährte Verfahren für H₂-Dichtungslösungen – spezifisch aufbereitet für:

- Elektrolyse (PEM, AEM, alkalisch, Solid-Oxide-Electrolyser-Cell-Elektrolyse (SOEC))
- H₂-Verarbeitung (Kompression, Reinigung)
- Transport und Speicherung (Gas, kryogen, Tankstellen)
- Nutzung (Brennstoffzelle, H₂ ICE)

Ergänzt werden diese Prozess-spezifischen Informationen durch eine Checkliste zur Dichtungsauswahl, ein Experten-Interview mit Artur Mähne sowie eine umfassende Übersichtstabelle zu Applikationen, Werkstoffen und Designs.

„Die Anforderungen an Dichtungen in Wasserstoff-Systemen unterscheiden sich fundamental von konventionellen Gas- und Flüssigkeitsanwendungen. Sie werden in einem Temperaturbereich von -253 °C (kryogen) bis zu Hochtemperatur-Umgebungen in Festoxid-Elektrolysezellen (Brennstoffzellen SOEC/SOFC) eingesetzt. Dabei fördert die geringe Molekülgröße des molekularen Wasserstoffs (H_2) die Permeation. Gleichzeitig bergen hohe Druckwechsel das Risiko der explosiven Dekompression (RGD – Rapid Gas Compression) und Medien wie Sauerstoff (O_2), Kaliumhydroxid (KOH) oder Schwefelsäure (H_2SO_4) beschleunigen die Alterung der eingesetzten Werkstoffe.

Freudenberg Sealing Technologies ist seit Jahrzehnten Innovationstreiber der globalen Dichtungsindustrie. In dieser Zeit haben wir gelernt, dass Wissen sich nur dann vermehrt, wenn man es teilt. Dadurch, dass wir bereits in frühen Phasen der Technologie- und Anlagenentwicklung eng mit unseren Kunden zusammenarbeiten, können wir die Werkstoffauswahl, Designauslegung, Fertigungs- und Prüfmethodik konsequent auf die jeweilige Prozessumgebung abstimmen und weiterentwickeln. Mit klarem Fokus auf Sicherheit, lange Lebensdauer und höchste Reinheitsanforderungen entstehen Werkstoff-Innovationen und Dichtungskonzepte, die sicher, normgerecht und nachhaltig sind.

Mit diesem Whitepaper adressieren wir die einsatzrelevanten Herausforderungen entlang der gesamten H_2 -Wertschöpfungskette – von materialgebundenen Präzisionsdichtungen in Elektrolyseuren über verschleißarme Dichtsysteme für Kompressoren, die ohne den Einsatz von PFAS hervorragende Dichtungseigenschaften bieten, bis hin zu integrierten Stack-Dichtungen in Brennstoffzellen. Wir zeigen auf, welche Werkstoffe wo eingesetzt werden, lassen einen Branchen-Experten zu Wort kommen und stellen Links zu weiterführenden Informationen bereit. Damit möchten wir Ihre professionelle Arbeit unterstützen und freuen uns über ein Feedback von Ihnen, um die Whitepaper-Reihe bedarfsgerecht zu erweitern.“

Marcel Schreiner

Global Segment Director, Energy bei Freudenberg Sealing Technologies



Marcel Schreiner

Welche Elektrolyseverfahren dominieren in der Wasserstoff-Wirtschaft?

Wasserstoff kann auf unterschiedliche Arten hergestellt werden. Der Vollständigkeit halber nennen wir hier die gängigen Verfahren der Dampfreformierung aus Erdgas (grauer Wasserstoff) und die Methanpyrolyse (türkiser Wasserstoff). Um einen zukunftsweisenden Beitrag zum Reduzieren der Treibhausgas-Emissionen zu

leisten, steht jedoch die Elektrolyse im Fokus der flächendeckenden H_2 -Produktion. Hierbei spaltet elektrischer Strom Wasser-Moleküle (H_2O) in seine Bestandteile: ein Sauerstoffmolekül (O_2) und zwei Wasserstoffmoleküle (H_2). Die vier derzeit wichtigsten Elektrolyseverfahren im Kurzüberblick:

Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse (PEM)

Die PEM-Elektrolyse spaltet Wasser unter Einsatz einer Protonenaustauschmembran in Wasserstoff und Sauerstoff. Dabei sind die Dichtungen in PEM-Elektrolyseuren extremen Bedingungen ausgesetzt: sie müssen in einer sauren Umgebung unter hohen Differenzdrücken bis ca. 35 bar, perspektivisch noch höheren Drücken im Stack dynamische Lasten standhalten. Zudem sind Reinheitsanforderungen (Metallionenfreiheit) kritisch für eine optimale Dichtungs-Performance. Die eingesetzten Werkstoffe müssen kontinuierlichen Druckwechseln und O_2 -Oxidation über einen langen Zeitraum widerstehen, um die Effizienz und Lebensdauer des Elektrolyseurs zu gewährleisten.

Anionen-Exchange-Membran-Elektrolyse (AEM)

Die AEM-Elektrolyse spaltet Wasser unter Einsatz einer Anionen-Austauschmembran elektrochemisch in Wasserstoff und Sauerstoff. Bei diesem Verfahren operieren die Dichtungen in alkalischer Umgebung (KOH). Hier sind die größten Herausforderungen für die Dichtungen das Sicherstellen der Langzeit-

stabilität in der korrosiven Umgebung bei erhöhten Temperaturen. Eine Zielsetzung in der AEM-Elektrolyse ist es, im Elektrolyseverfahren kostengünstige Platingruppen-Metallfreie Katalysatoren (PGM) einzusetzen. Das wiederum beeinflusst die Materialauswahl der Dichtungen.

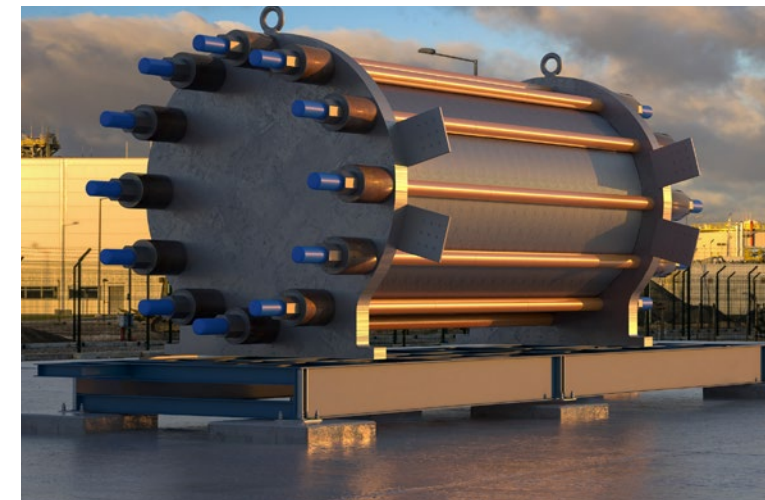
Alkalische Elektrolyse (AEL)

Auch die alkalische Elektrolyse (AEL) spaltet Wasser mittels elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff. AEL ist eine bewährte Technologie, die jedoch hohe Anforderungen an die Dichtungen stellt: AEL-Dichtungen müssen Sauerstoffdrücke bis 40 bar sowie typische Betriebstemperaturen bis 100 °C aushalten. Um eine höhere Effizienz der Anlagen zu erreichen, gibt es zudem einen Trend zum Steigern der Betriebstemperaturen auf bis zu 150 °C. Daraus ergeben sich unter anderem höhere Anforderungen an die Sauerstoff-Alterungsbeständigkeit sowie die Laugenresistenz der eingesetzten Werkstoffe.

Solid Oxide Electrolyser Cell-Elektrolyse (SOEC)

Die SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell) nutzt eine Hochtemperatur-Elektrolyse im Temperaturbereich

von 800-1000 °C zur Wasserspaltung. Hierdurch wird die Zersetzungsspannung reduziert und es können höhere Wirkungsgrade als im Niedertemperaturverfahren erzielt werden. Dieses Verfahren kann an Industriestandorten eingesetzt werden, an denen Wasserdampf bei hohen Temperaturen und in großen Mengen produziert wird. Die Herausforderung für hier benötigte Dichtungen: die Werkstoffe und Dichtungsdesigns müssen die thermische Korrosion und Relaxation sowie die kontinuierlichen Start-Stopp-Zyklen überstehen.



Elektrolyseur

Welche Dichtungsanforderungen gelten entlang der H₂-Wertschöpfungskette?

In der Produktion und Verarbeitung, dem Transport und der Speicherung sowie der Nutzung des Wasserstoffs definieren die eingesetzten Medien und Temperaturen die Anforderungen an die jeweiligen Dichtungslösungen. Hierbei reicht das Spektrum von unterschiedlichen Elektrolyseverfahren über die Kompression und Reinigung über den Transport und die Speicherung im gasförmigen oder flüssigen

Zustand (kryogen) sowie in Derivaten wie Methanol oder Ammoniak bis zur Nutzung in Brennstoffzellensystemen (FC – Fuel Cell) oder Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂ ICE – Hydrogen Internal-Combustion-Engine). Zoomen wir hinein:

Produktion: Elektrolyseure PEM, AEM, AEL und SOEC

Betriebsparameter und Risiken

Permeation

H₂-Permeation erhöht den Verlust des Energieträgers und stellt gleichzeitig ein Sicherheitsrisiko dar. Hier sind Werkstoffformulierungen mit reduzierter Permeabilität wirksam – beispielsweise CIIR (Chlor-Isobuten-Isopren-Kautschuk), HNBR (Hydrierter Nitril-Butadien-Kautschuk), EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) und FKM (Fluorkautschuk). Wichtig ist in diesem Kontext, dass die material-spezifischen Permeations-Koeffizienten der Dichtungen anwendungsspezifisch simuliert und validiert werden.

Explosive Dekompression (RGD)

Überall dort, wo schnell wechselnde Drücke vorherrschen – beispielsweise im Tank- oder Kompressoren Umfeld – ist der Einsatz von RGD-resistenten Werkstoffen erforderlich. Hierzu gehören unter anderem EPDM, FVMQ (Fluorsilikonkautschuk) und PVMQ (Phenyl Methyl Silikon). Die hier eingesetzten Materialien müssen über eine nachgewiesene RGD-Resistenz bis ffl 700 bar verfügen.

Medienbeständigkeit

In der PEM-Elektrolyse müssen Dichtungen verdünnter Schwefelsäure und einer kontinuierlichen O₂-Exposition standhalten. Zudem müssen hochreine Werkstoffe sicherstellen, dass keine Metallionen-Auslaugung erfolgen kann, die zu einer Ionenkontamination führen könnte.

In der AEL-Elektrolyse müssen Dichtungen einer 20-40-prozentigen Kalilauge standhalten. Zudem herrscht im konventionellen Temperaturbereich (Standard-AEL) eine Betriebstemperatur von 60 – 80 °C, im erhöhten Temperaturbereich (moderne/optimierte AEL) wird mit einer Betriebstemperatur von 80 – 90 °C gearbeitet und in der Hochtemperatur-alkalischen Elektrolyse (Advanced AEL) werden Betriebstemperaturen von 100 – 120 °C erreicht. In Forschungs- und Entwicklungsprojekten steigen die Betriebstemperaturen sogar bis auf 150 °C. Darüber hinaus herrscht hier ein Sauerstoffdruck von 35 – 40 bar. Für Dichtungsmaterialien bedeutet das, dass sie einer starken Oxidation mit daraus folgender beschleunigter Materialalterung ausgesetzt sind. Hier besitzt EPDM eine nachgewiesene Beständigkeit.

Temperaturbeständigkeit

Auch im Bereich der Temperaturbeständigkeit werden höchste Anforderungen an die eingesetzten Dichtungs-Werkstoffe gestellt. Die Umgebungsbedingungen reichen von <20 bis 80 °C beim Kaltstart eines PEM-Elektrolyseurs bis zu > 800 °C beim SOEC. Zudem müssen Temperprozesse optimiert werden, um das sogenannte „fuel cell poisoning“ zu vermeiden. Grundsätzlich ist auch die Geometrie der Dichtungen für eine perfekte Performance entscheidend. Sie müssen Druckverformungstests bestehen, die sämtliche Lastfälle inklusive der thermischen Zyklen berücksichtigen.

Werkstoff und Designempfehlungen

PEM-Stacks

- FKM ist ideal für die O₂-Druckbeständigkeit geeignet
- EPDM/FKM-Formulierungen werden in überformten Rahmen (Bonding-Systeme) für die robuste Montage und Dichtheit eingesetzt.
- Gut zu wissen: es gibt integrierte Stack-Rahmen-Dichtungen (L-/C-Querschnitt), die die Barrierewirkung unter Betriebsdruck verbessern. Bei der Montage hat der Querschnitt eine neuartige L-Form. Sobald der Elektrolyseur in Betrieb ist, steigt der Druck in seinem Inneren und aktiviert die Dichtung, die dann eine C-Form annimmt. So wird der Kontaktdruck der Dichtung erhöht und macht sie zu einer verlässlichen Barriere für Gase und Flüssigkeiten.

AEM-Stacks

- Hier liegt der Fokus auf Materialreinheit und Membranverträglichkeit
- EPDM bewährt sich beim Einsatz in der alkalischen Umgebung der AEM-Stacks

AEL-Stacks

- PTFE (Polytetrafluorethylen) und ePTFE-Dichtungen (expandiertes PTFE) halten dem anspruchsvollen Dauerkontakt mit Sauerstoff und Kaliumhydroxid stand.
- EPDM ist eine nachhaltige Alternative bei geeigneten Rahmenbedingungen.

Verarbeitung: Kompression, Reinigung und Aufbereitung

Komponenten und Parameterräume

Kolbenkompressoren (H₂)

Kolbenkompressoren arbeiten in einem Druckbereich von 50-500 bar sowie 350–1000 bar. Dabei haben kleine Aggregate ein Lebensdauerziel von mehr als 1000 Stunden und große Aggregate sollen zwischen 8000 und 24000 Stunden volle Leistung erbringen. Die hier eingesetzten Dichtungssysteme (Kolbenringe, Stangendichtungen, Packungen) müssen verschleißarm und absolut dicht sein und können dabei bereits auf den Einsatz von PFAS verzichten.

Scrollverdichter (Kompressoren und Vakuumpumpen)

Scroll-Kompressoren und Scroll-Vakuumpumpen arbeiten in Druckbereichen von 1 – 2 bar und in einem Temperaturbereich von -35–110 °C. Klassisch werden hier Scrollabdichtungen (Tip Seals) aus speziellem PTFE eingesetzt. Der Trend geht jedoch dahin, nach alternativen PFAS-freien Werkstoffen zu suchen.

Tribologie und Verschleiß

Um den reibungsbehafteten Wechselwirkungen zwischen den Oberflächen der Kompressoren, Reinigungs- und H₂-Aufbereitungs-Prozessen optimal entgegenzuwirken, werden umfassende Prüfmethoden eingesetzt, die die Reibkoeffizienten sowie die lineare Abnutzung unter realistischen Bedingungen testen und optimieren. In diesen Einsatzbereichen zeigen die faserverstärkten Thermoplaste PEEK (Polyetheretherketon) und PPS-Compounds (Hochleistungsthermoplaste) eine niedrige Reibung und bieten damit eine verschleißarme Performance.

Gut zu wissen: Designhinweise

Mehrstufige Druckabfälle von circa 50 Prozent je Packungsstufe und federbelastete Segmente sichern den Kontakt und optimieren den Spaltschluss. Zudem können Kühl- und Entfeuchtungskonzepte den Wärmeeintrag deutlich reduzieren.

Transport und Speicherung: Gas, LH₂ und Tankstellen

Komponenten und Parameterräume

Gas und Hochdruckspeicher

Für diese Elemente der H₂-Wertschöpfungskette gelten die Anforderungen aus dem UN-Regelwerk R134 hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften von mit Wasserstoff und Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen (HFCV) und Komponenten. Hier werden O-Ringe, Stützringe und Ventilstößel aus EPDM, FKM und NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk) eingesetzt, die über eine nachgewiesene RGD-Beständigkeit (Rapid Gas Decompression) verfügen.

H₂-Flüssiggastransport bei -253 °C (kryogen)

Hier ist von entscheidender Bedeutung, dass die eingesetzten Werkstoffe und Beschichtungssysteme auch bei sehr niedrigen Temperaturen duktil bleiben. Deshalb benötigen Magnetsysteme und Kupplungen wasserstoffkompatible Oberflächen, die sich einer Versprödung (Embrittlement) bestmöglich widersetzen.

Tankstellen und Betankung

Schnell wechselnde Druckprofile charakterisieren die Umgebungsbedingungen an Wasserstoff-Tankstellen und während der Betankung. Auch hier werden RGD-sichere Elastomere eingesetzt, die eine geringe Permeation sicherstellen. Für den reibungslosen Betrieb der Anlagen sollten regelmäßige Wartungsintervalle festgelegt werden.

Nutzung: Brennstoffzelle und Wasserstoff-Verbrennungsmotoren (H₂-ICE)

Komponenten und Parameterräume

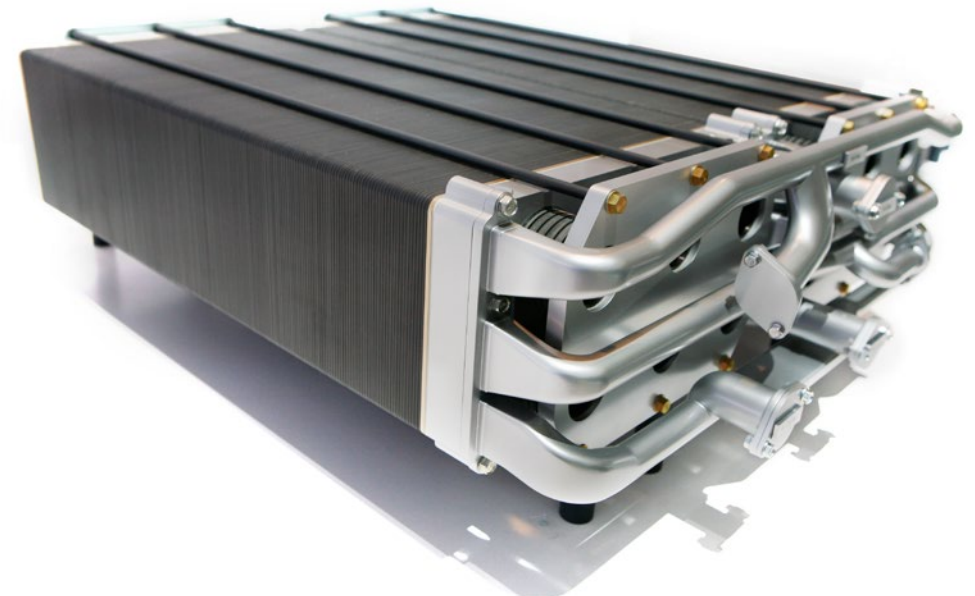
Brennstoffzellen – AFC, PEMFC, PAFC, DMFC, MCFC, SOFC

Zum aktuellen Zeitpunkt werden die obigen sechs Arten von Wasserstoff-Brennstoffzellen global eingesetzt. Sie unterscheiden sich in den verwendeten Gasen, den Elektrolyte-Arten, der Betriebstemperatur sowie ihrem Leistungsvermögen und können an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden. Die Betriebstemperaturen von LT-PEMFC liegen zwischen 60–80 °C, HT-PEMFC zwischen 120–180 °C, PAFC arbeitet mit 160–220 °C, MCFC arbeiten mit 620–650 °C und SOFC mit 800–1000 °C. Hier werden Stack-Dichtungen aus EPDM, FCPO, FKM und LSR eingesetzt. Dabei sind die jeweiligen Werkstoffe nach folgenden Eigenschaften auszuwählen: ihrem Compression Set, ihrer Permeation sowie ihrer Medienbeständigkeit.

Gut zu wissen: um eine optimale Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Brennstoffzellen zu erreichen, verbessern integrierte Dichtungen an der Grenzfläche zwischen der Bipolarplatte und der Gasdiffusionslage den Abtransport von Flüssigwasser aus den Reaktionszonen.

Wasserstoff-Verbrennungsmotor (H₂-ICE)

Der große Vorteil bei der Fertigung von H₂-Verbrennungsmotoren liegt in der robusten Technologie sowie der schnellen Markteinführung. Gleichwohl müssen für den sicheren Betrieb dieser Antriebssysteme die folgenden Herausforderungen gelöst werden: NH₃-Ausgasung, der Einsatz von Schmiersystemen sowie die Abnormale Verbrennung (Abnormal Combustion). Für die Wahl der passenden Dichtungssysteme muss zwingend der vorherrschende Temperaturbereich sowie das Zusammenspiel aller oben genannten Medien beachtet werden.



Welche Dichtungen werden in Elektrolyseuren benötigt?

Grundfunktionen und Einsatzorte im Stack

Rahmen- und Flachdichtungen werden zwischen den Zellrahmen und den Bipolarplatten eingesetzt. Sie dienen zur Gas- und Elektrolytabdichtung, zur elektrischen Isolation, zur Druckhaltung sowie zur Reinheitssicherung der sogenannten H_2/O_2 Trennung. Typischerweise werden die Dichtungen als Elastomer-Formteile gefertigt – beispielsweise aus EPDM oder FKM. Insbesondere in alkalischen Umgebungen werden aktuell auch Flachdichtungen aus PTFE und ePTFE verwendet.

Sub- und Rand-Dichtungen sowie Dichtungen auf dem Substrat sind randnahe Abdichtungen rund um die Membranelektrodeneinheit (MEA) herum sowie auf Kunststoffrahmen und Metallplatten. Für diese Dichtungen gibt es eine Vielzahl an Varianten: Dichtungen an Kunststoffrahmen, Dichtungen an Bipolarplatten und lose Dichtungen, die entweder randverklebt, umspritzt oder eingepresst werden. Zudem werden hier O-Ringe und extrudierte Dichtungsprofile eingesetzt. Die Auswahl richtet sich immer nach dem Automatisierungsgrad, dem zur Verfügung stehenden Bauraum und der Flächenpressung sowie den Vorgaben zur Lebensdauer der eingesetzten Komponenten.

Im PEM-Stack kommen auch Hochdruck-Spezialdichtungen (PEM) zum Einsatz. Diese Dichtungen sind beispielsweise Nut-geklemmt und mit Halte-Features versehen. Sie haben einen L-zu-C-aktivierenden Querschnitt, um die sichere Positionierung und Druckaktivierung bei steigenden Stack-Drücken zu gewährleisten.

Technologieabhängige Auswahlkriterien

Im PEM-Elektrolyseverfahren herrscht ein pH-Wert von 4–6, die Sauerstoff-Seite ist oxidativ, der Temperaturbereich liegt bei 60–120 °C und es herrschen Drücke bis 35 bar. Hier empfiehlt sich der Einsatz von FKM aufgrund seiner niedrigen H_2 -Permeation sowie seiner O_2 -Oxidations- und Temperaturbeständigkeit an der Stack-Seite. An Stellen mit geringer Schraubenlast und hohem Reinheitsbedarf wird üblicherweise PTFE eingesetzt. Wichtig ist es, bei der Montage auf höchste Sauberkeit zu achten, um die Ionenauslaugung zu minimieren.

In der AEL- und AEM-Elektrolyse definieren Kaliumhydroxid-Lösungen von 3–30 Prozent, Temperaturen von 60–150 °C und Drücke bis 35 bar die Anforderungen an eingesetzte Dichtungslösungen. Hier dominieren die Werkstoffgruppen EPDM aufgrund ihrer KOH-Beständigkeit und PTFE/ePTFE aufgrund ihrer Chemikalienbeständigkeit. Die elektrische Isolation kann gegebenenfalls über zusätzliche Rahmen oder über den Einsatz des geeigneten Dichtmaterials optimiert werden.

Wesentliche konstruktive Empfehlungen

- Klemmkraft gegen internen Druck abwägen. Dichtungsritzen (Sealing Groove) stellen einen Kraft-Bypass dar und reduzieren die Überpressung und Extrusion gegenüber flanschflächenbündigen Flachdichtungen.
- Profilierte Elastomer-Querschnitte senken die erforderliche Schraubenlast deutlich – im Gegensatz zu sogenannten Plattengeometrie (slab geometry)
- Finite Elemente-Analyse (FEA) und Prüfungen zur Bestätigung der Toleranz- und Druckfestigkeit durchführen.
- Frühzeitig an die Dichtung denken und die Dichtungen vor dem Festlegen des Bipolarplatten-Werkzeugs einplanen. Entschieden werden muss über die Geometrie, das geeignete Material, die Reinheit, respektive Auswaschung (Leaching) sowie der mögliche Automatisierungsgrad.
- Gut zu wissen: Standardteile reichen selten und applikationsspezifische Compounds und Designs sind die Regel.

Welche Dichtungen werden für H₂ Kompressoren, -Pumpen, -Speicher und -Transport benötigt?

Kompressoren

In Kolben- und Membrankompressoren werden Packungsdichtungen aus mit Grafit gefülltem PTFE eingesetzt. Für die Leckagereduktion an Stangen und Wellen kommen berührungsarme Labyrinthdichtungen zum Einsatz und Stützringe (Back-up-rings) aus PEEK werden als Extrusions-Schutzvorrichtungen bei hohen Drücken eingesetzt.

In Turbo- und Zentrifugalkompressoren bewähren sich berührungslose Trockengasdichtungen (Dry Gas Seals) aufgrund ihrer geringen Leckagerate und langen Standzeiten.

Grundsätzlich gilt: die Material- und Designkombination der eingesetzten Dichtungslösungen ist ausschlaggebend für die Performance der Verdichtungsprozesse.

Pumpen und Pumpen-Peripherie

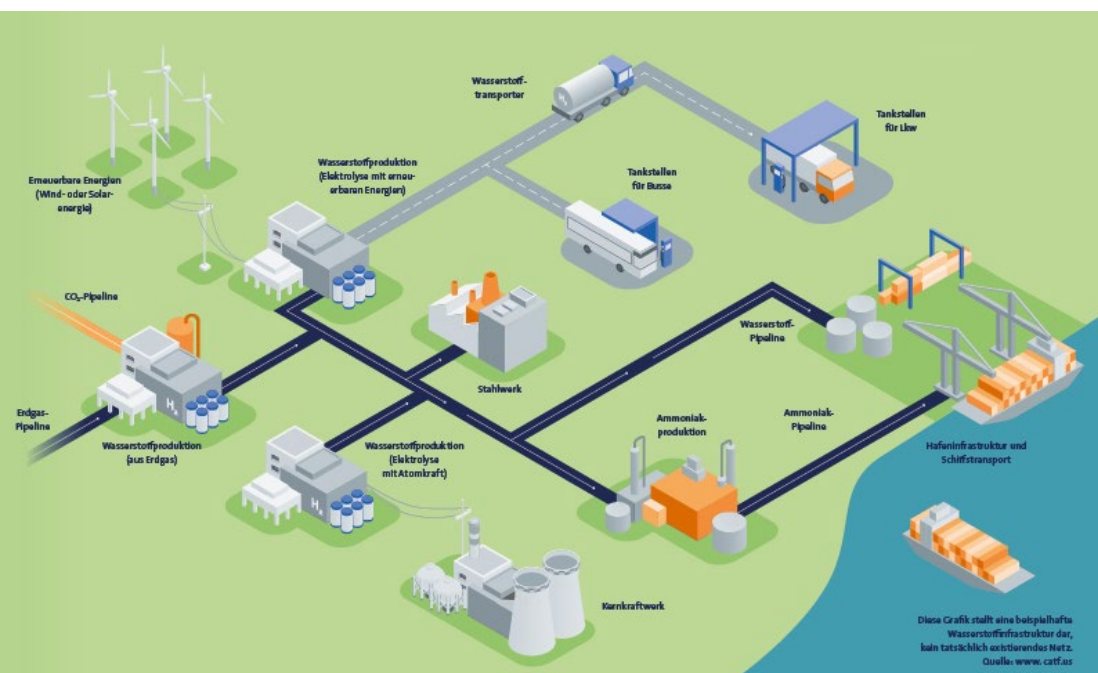
Hier werden Gleitringdichtungen entsprechend der Prozessmedien eingesetzt. Zudem werden Stopfbuchspackungen aus Grafit bei rotierenden Aggregaten benötigt. Die Dichtungen halten Wasser und Kühlmitteln sowie Kalilauge und CO₂-haltigen Strömen stand. Grafit-Packungen und -Lamine bewähren sich auch bei höheren Temperaturen und Drücken.

Speicherung und Transport

Neben der Permeation definieren Temperaturen zwischen -40 und +85 °C und bis zu 105 MPa die Umgebungs-Parameter für komprimierten gasförmigen Wasserstoff. Je nach Medium und Temperatur werden hier Coverseals, O-Ringe und O-Ring/Backing-Kombinationen aus EPDM, FKM und HNBR eingesetzt. Zudem kommen hier Feder energisierte PTFE Lippendichtungen sowie Metalldichtungen zum Einsatz.

Die Speicherung und der Transport von flüssigem Wasserstoff (LH₂) erfolgt bei -253 °C im kryogenen Zustand. In diesem Temperaturbereich sind Elastomere ungeeignete Werkstoffe. Bevorzugt eingesetzt werden Metall und Kunststoffdichtungen aus PTFE.

Rohr- und Fitting-Schnittstellen müssen ultradicht, hochrein und hochdruckfest abgedichtet werden. Hier kommen Edelstahl und Nickel-Legierungen in Form von VCR®-Verbindungen und Metall-Gleitringdichtungen (Metall-Face-Seal) zum Einsatz. Auch Konus/Gewindeschrauben (Cone & Thread) sind ideal für sehr hohe Drücke geeignet. Sie sind metallisch dichtend und diffusionsarm.



Welche Dichtungen werden für die Umwandlung von elektrischer Energie in speicherbare Energieträger benötigt?

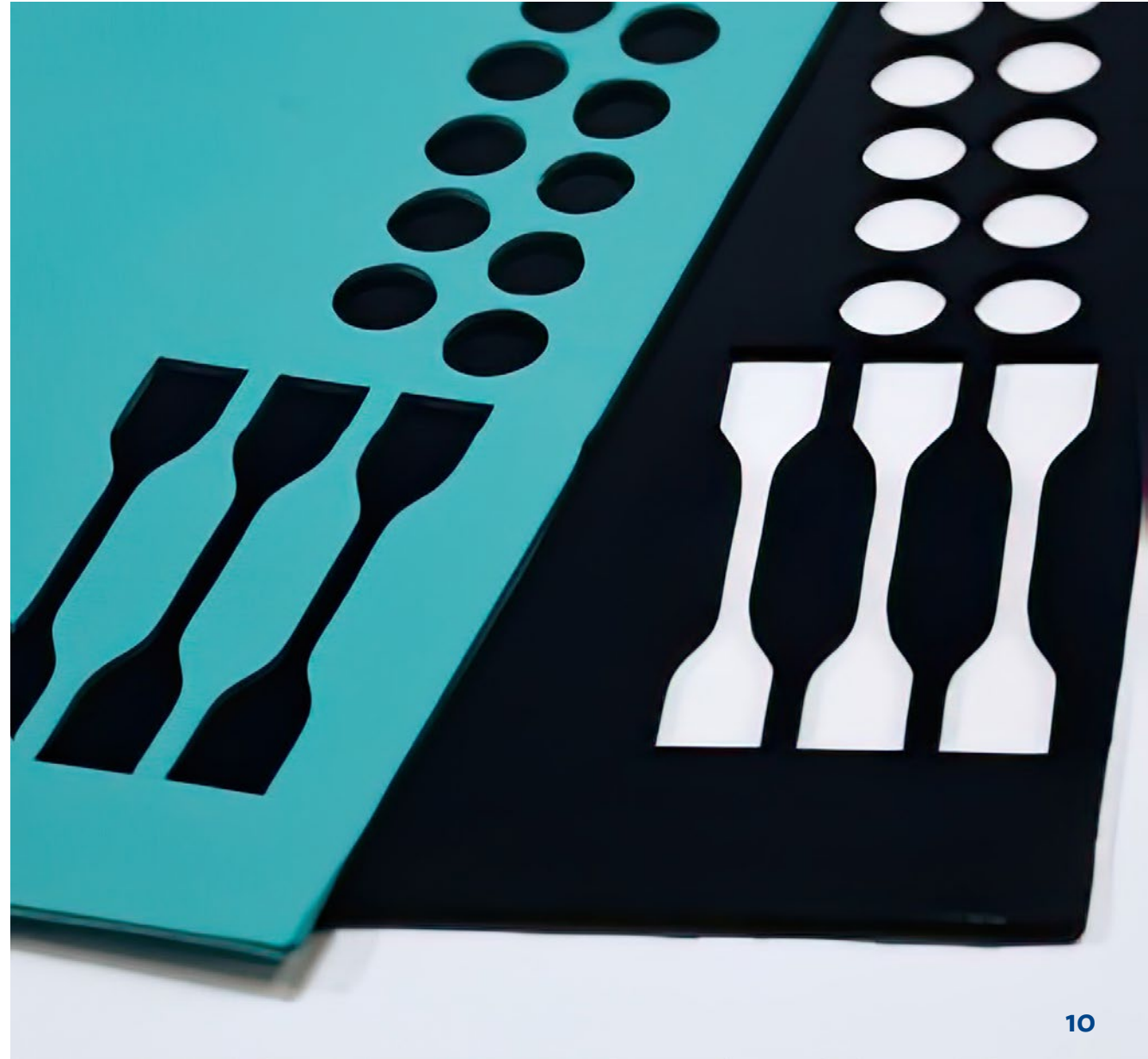
Dichtungslösungen für Power-to-X-Prozesse (PtX)

Synthesen und Medien

Bei den unterschiedlichen Verfahren zur Herstellung von Ammoniak (NH_3), Methanol, E-Fuels sowie der Methanisierung (CO/CO_2) herrschen teilweise hohe Temperaturen und Drücke sowie korrosive Umgebungen. Hier kommen statische Hochleistungsflachdichtungen zum Einsatz. In den stark korrosiven Prozessabschnitten werden PTFE-basierte Dichtwerkstoffe benötigt. Zudem bewähren sich hier spiralförmig gewickelte Dichtungen (Spiral Wound), Kammprofile und flexibles Grafit in Form von Grafitlaminaten.

Werkstoffauswahl

Die PtX-Relevanz der eingesetzten Werkstoffe ergibt sich vor allem aus der Prozesschemie: Grafit ist auch bei hohen Temperaturen chemisch beständig. PTFE und modifiziertes PTFE (PTFE/mod) weisen eine universelle Chemikalienbeständigkeit sowie gute Kriech- und Setzwerte in Spezialqualitäten auf.



Welche Dichtungen werden an H₂ Tankstellen (HRS) und zur Betankung benötigt?

Anforderungen und Standards

ISO 19880-1:2020 definiert die Mindestanforderungen an die Auslegung, den Betrieb, die Inspektions- und Servicemodalitäten an Wasserstofftankstellen, die über H35 und H70 Zapfventile verfügen. An den Tankstellen ist ein Betanken mit einer Vorkühlung bis -40 °C innerhalb weniger Minuten möglich.

Ventile und Sicherheitselemente für H70-Zapfventile

ISO 19880-3 definiert die geltenden Prüf- und Sicherheitsanforderungen für Rückschlag-, Überström-, Absperr- und Sicherheitsventile sowie die Nottrennkupplungen (Breakaways). Hier sehen die Dichtkonzepte häufig metallische Dichtelemente sowie RGD-robuste Hochleistungs-Elastomere vor.

Dispenser-Schläuche und Kupplungen

ISO 19880-5 und ANSI/CSA HGV 4.2 definieren die international geltenden Sicherheits-Anforderungen an Hochdruck-Schläuche mit niedriger Permeation, die bei -40 °C eingesetzt werden. Hier werden bevorzugt metallisch dichtende Dichtstellen verwendet.



Frage an den Branchen-Experten

Gibt es neue Fertigungsverfahren für Dichtungen im Bereich Wasserstoff und Elektrolyseure, Herr Mähne?

Artur Mähne ist Global Segment Manager, Hydrogen Technologies, bei Freudenberg Sealing Technologies. Er berichtet: „Ja – und zwar entlang der gesamten H₂-Wertschöpfungskette. Wir haben in den letzten Jahren mehrere seriennahe Fertigungs-Prozessketten für Elektrolyseur-Stacks, Peripherie und die H₂-Infrastruktur industrialisiert. Dabei haben wir unsere Fertigungs- und Prüfverfahren gezielt auf Skalierbarkeit, Medienreinheit, niedrige Permeation und Hochdruck-Tauglichkeit ausgelegt. Im Kern geht es um moderne Extrusionslinien, präzises Spritzgießen/Overmolding auf Träger sowie Großformat-Presskapazitäten – jeweils abgesichert durch unsere Material- und Prozesskompetenz. Sämtliche Rezepturen, Materialeigenschaften, das Bindungsverhalten und die Reinheitsbewertung der Dichtungslösungen werden bei uns gestützt durch die Finite-Elemente-Methode (FEA) entwickelt und analysiert. Gerne gehe ich tiefer ins Detail und stelle Ihnen unsere Fertigungsverfahren in drei Abschnitten vor.

Ich beginne mit einem Verfahren zum Spritzgießen (Injection Molding) und zum „Aufspritzen“ von Dichtungen auf Träger (Overmolding für Bipolarplatten sowie Metall- oder Thermoplast-Rahmen

Bei Freudenberg Sealing Technologies beherrschen wir das direkte Anspritzen der Dichtung auf metallische Bipolarplatten, metallische Rahmen oder thermoplastische Träger. Hierbei ist eine definierte Haftung hinsichtlich Adhäsion und Haftvermittler, eine kontrollierte Nutfüllung sowie die geometrische Aktivierung der Dichtung entscheidend.

Für PEM-Stacks haben wir ein hochdrucktaugliches Dichtungsdesign entwickelt, das bereits serienertüchtigt ist. Hierbei handelt es sich um eine Nutklemmung mit

Halte-Eigenschaften: einen L-förmigen Querschnitt, der unter Betriebsdruck in eine C-Barriere „aktiviert“. Dieses Design ist in der Regel spritzgießbasiert und demonstriert, wie Geometrie, Bindung und Prozess zusammenspielen. Der Nutzen für die H₂-Elektrolyse liegt in einer geringeren Bauteilzahl, einem gesteigerten Automatisierungsgrad, einer besseren Reproduzierbarkeit der Kompressionslage sowie einer niedrigen Leckage- beziehungsweise Permeation.

Großformat-Pressen für das Fertigen von XXL Gaskets und Groß-O-Ringen in allen Werkstoffklassen

Für große Zellformate mit einem Durchmesser von 0,3–2 m und Peripherie-Applikationen setzen wir starke Großpressen zum Herstellen großformatiger Rahmen und Flachdichtungen sowie Groß O-Ringen ein – passend zur aktuellen Skalierung von Elektrolyseuren in Richtung MW/GW-Fabriken. Dabei fertigen wir je nach Medienfenster und Schraubenlast EPDM- und FKM-Elastomer Formteile. Hier ermöglicht unsere Presskapazität die Serienfertigung in großen Stückzahlen. Der Nutzen für die H₂-Elektrolyse liegt darin, dass wir die skalierbare Flächenabdichtung großer Zellen und Deckel sowie eine robuste Toleranzaufnahme anbieten, die kompatibel mit Serien-Stacking und Gigafactory-Taktzeiten sind.

Extrusion inklusive einer LCM-Linie (Liquid Curing Method) für die Fertigung von Profil- und Rahmendichtungen

Unsere Profil-Extrusionstechnologie für Wasserstoff-Anwendungen haben wir gezielt ausgebaut. Beispielsweise haben wir eine neue Extrusionslinie auf Basis kontinuierlicher Produktionstechnologie für filigrane Querschnitte geschaffen. In einem Salzbad (molten salt) können wir eine Vulkanisation mit optimiertem Wärmeübergang unter Ausschluss von Luft durchführen. Hierdurch konnten wir die Auswahl an Werkstoffen und Vernetzungssystemen für große Dichtungen in Anwendungen im Wasserstoffumfeld speziell mit dem Fokus auf Beständigkeit

und Langzeit verbreitern. Gleichzeitig ist es uns gelungen, Fertigungstoleranzen aufgrund einer optimalen Prozesskontrolle deutlich zu reduzieren. Dieser Technologiebaukasten lässt sich in LCM-Setups (Liquid Curing Method) mit unterschiedlichen Extrudern adaptieren, sodass wir nun endlose Stack-Profile mit enger Toleranz, geringer Kriechneigung und hoher Chemikalienbeständigkeit herstellen können. So entstehen für die alkalische Elektrolyse (AEL) extrudierte Profile für Dichtungen im Durchmesserbereich bis 2 m und weit darüber hinaus. Der fundamentale Nutzen dieser Fertigungsverfahren für die H_2 -Elektrolyse liegt darin, dass wir nun große Dichtungen mit geringen Toleranzschwankungen und hoher Präzision in optimierten, maßgeschneiderten Hochleistungswerkstoffen fertigen können. Das ist wichtig für eine Stack-Lebensdauer von mehreren zehntausend Stunden.

Um es abschließend auf den Punkt zu bringen: Ja, es gibt neue Fertigungswege – und wir setzen auf vertikale Integration und Skalierung: Wir investieren in Standardisierung und globale Produktionskapazitäten an unseren Standorten in Europa, China und den USA. Das tun wir mit dem Ziel, H_2 -Dichtungen in großen Volumina zuverlässig, nachhaltig und lokal für lokal bereitzustellen. Unsere Material- und Prozesskompetenz macht die beschriebenen Konzepte und Verfahren serienfest – von AEL/AEM bis PEM, von Stack bis zur H_2 -Infrastruktur. Das zählt direkt auf die Sicherheit, Lebensdauer und Skalierbarkeit der Elektrolyseure ein. Bei uns zeigt sich täglich aufs Neue: Material- und Prozesskompetenz sind die „zweite Hälfte“ jeder Innovation.“



Artur Mähne

Gibt es eine Übersichtstabelle für Applikationen und typische Einsatzgebiete sowie passende Werkstoffklassen und Dichtungsdesign?

Jetzt ja – und zwar zur Fragestellung: welche Dichtungsdesigns optimieren die Sicherheit, Langlebigkeit und Effizienz der gesamten Wasserstoff-Prozesskette? Genau so dynamisch, wie sich die Technologien im Bereich der Wasserstoff-Erzeugung entwickelt haben, befindet sich auch die Lernkurve für Werkstoffe und Dichtungsdesigns in einer steilen Aufwärtsbewegung. Viele bewährte Werkstoffe

haben sich durch Spitzenleistungen in der Werkstoff-Forschung und spezielle H₂-Dichtungsdesigns zu hochsicheren Präzisions-Dichtungen weiterentwickelt. Durch neue Produktions- und Prüfverfahren werden sie kontinuierlich nachhaltiger, langlebiger und leistungstärker. Welche Kombination ist besonders zu empfehlen? Ein Überblick:

Applikation	Typische Einsatzbedingungen	Werkstoffklasse und Dichtungslösung
PEM Elektrolyseur – Stack (O ₂ Seite)	pH-Wert 4–6 (reines Wasser, ggf. leicht sauer), T < 60–150 °C, p bis ~35 bar hohe Oxidations- und Sauberkeitsanforderungen	FKM als Stack-Dichtung (O ₂ -Beständigkeit, niedrige H ₂ -Permeation) Seal on Plastic or Metal Frame/Plate Seal on Bipolar Plate (Overmolding)
PEM Elektrolyseur – Hochdruckdichtung	Hohe interne Drücke, sichere Nutposition Aktivierung unter Last	Innovative Dichtungsprofile (L-Shape) mit Halte-Features (Press-in-Place - PIP) oder auf einen Träger aufgespritzt (Overmolding)
AEL und AEM Elektrolyseur – Stack (KOH-Umgebung)	3–30 wt % KOH T < 60–150 °C p bis ~35 bar elektrische Isolation je nach Aufbau	Dichtungen aus EPDM mit Halte-Features (PIP) oder auf einen Träger aufgespritzt (Overmolding) Herstellung im Spritzguss oder Extrusion. PTFE-Flachdichtungen oder Folien mit geringer Kriechneigung aus mechanischer Herstellung Seal on Plastic or Metal Frame (automatisierungsabhängig)
Elektrolyseur – Peripherie und Flanschverbindungen	Niedrige Schraubenlast, Reinheit elektrische Isolation, variable T/P	EPDM und FKM O-Ringe PTFE-Flanschdichtungen
CGH ₂ Speicherung und Transport (Tanks und Leitungen)	T ≈ -50...+85 °C p bis ~105 MPa Permeation minimieren	O-Ringe (EPDM/FKM/HNBR je nach Medium und Temperatur) Je nach Anwendung mit Kunststoff-Backup-Ringen (PEEK, ..)
Ultra-High Purity und Hochdruck-Verbindungen	UHP-Anforderungen (rein, diffusionsarm) Vakuum (Druck, sehr geringe Leckage)	VCR® Metall-Face-Seal (Edelstahl/Ni-Legierungen) Metall-zu-Metall Dichtung für UHP-Leitungen und Komponenten
H ₂ -Kompressoren – Kolben und Membran	Hoher Druck, dynamische Bewegung, Verschleiß, Leckageminimierung	Packungsdichtungen (PTFE gefüllt, Grafit), Labyrinthdichtungen. PEEK-Back ups für Extrusionsschutz
H-Kompressoren – Zentrifugal	Kontinuierliche Rotation hoher Speed, energiearme Abdichtung	Dry Gas Seals (non contact, dünner Gasfilm sehr geringe Leckage, geringer Verschleiß)
Pumpen und Armaturen in PtX Prozessen	Korrosive Medien, hohe T/P, wechselnde Lasten	Mechanische Gleitringdichtungen, Grafit-Packungen, statische Spiral Wound/Kammprofile, PTFE je nach Medium/T
PtX-Synthesen (NH ₃ , Methanol, E-Fuels)	Aggressive Chemie, thermische Zyklen, hohe Drücke	Graphitlaminate/Spiral Wound/Kammprofil modifiziertes PTFE (chemische Beständigkeit, Setzverhalten)
Gewinde und Verschraubungen (Peripherie)	Bis 100 % H ₂ , sicherer Leckageschutz an Rohrgewinde	Hydrogen ready Gewindedichtungen (z. B. LOCTITE 55/567/577)
Werkstoffverhalten – Auswahlhinweise	Permeation (H ₂ diffundiert stark) RGD bei schnellen Druckwechseln	FKM tendenziell niedrigere H ₂ -Permeation als EPDM/NBR HNBR/FKM/FFKM Compounds zeigen RGD-Beständigkeit Profilquerschnitte/Sealing Groove /reduzieren Montagekraft und Extrusion



Weiß

Dies ist der natürliche Wasserstoff, der in unserer Umwelt existiert. Meist ist er in tief liegende Gesteinsschichten eingelagert. Er kann durch hydraulisches oder thermisches **Fracking** gewonnen werden.

CO₂-neutral: NEIN
Thermisches Fracking ist nur dann CO₂-neutral, wenn dafür ausschließlich erneuerbare Energien verwendet werden.



Gelb

Der Strom für die Elektrolyse dieses Wasserstoffs stammt aus dem derzeit verfügbaren **Strommix**.

CO₂-neutral: NEIN
Da der weltweite Strommix 2023 nur zu ca. 30 Prozent aus erneuerbaren Energien bestand, ist er (noch) nicht klimaneutral.



Orange

Für die Herstellung dieses Wasserstoffs wird **Biomasse** verwendet. Das geschieht auf zweierlei Arten. Entweder durch das Erhitzen der Biomasse, wobei der Wasserstoff aus den entstehenden Gasen gefiltert wird. Oder durch Elektrolyse, bei der ausschließlich Strom aus Müllverbrennungsanlagen verwendet wird.

CO₂-neutral: NEIN
Beim Verbrennen der Biomasse wird unter anderem CO₂ freigesetzt.



Violett

Auch dieser Wasserstoff wird durch Elektrolyse gewonnen. Dafür kommt ausschließlich **Atomstrom** zum Einsatz.

CO₂-neutral: NEIN
Zwar ist die Erzeugung von Atomstrom CO₂-neutral, jedoch werden im gesamten Lebenszyklus der Atomkraft, beispielsweise beim Uranabbau oder der Brennelementherstellung, CO₂-Emissionen verursacht.



Grün

Der Strom für die Elektrolyse stammt ausschließlich aus **erneuerbaren Energien** wie Photovoltaik oder Windkraft.

CO₂-neutral: JA
Der einzige Wasserstoff, der CO₂-neutral und umweltfreundlich hergestellt wird.



Türkis

Für die Herstellung dieses Wasserstoffs wird kein Wasser verwendet, sondern **Methangas**. Bei der Methanpyrolyse wird Methan unter hohen Temperaturen in festen Kohlenstoff und Wasserstoff zerlegt.

CO₂-neutral: JA
Anstelle von CO₂ entsteht fester Kohlenstoff, der anschließend weiterverwendet werden kann.



Blau

Dieser Wasserstoff entsteht durch die Dampfreduzierung von **Erdgas**. Dabei reagiert Methan mit Wasserdampf.

CO₂-neutral: NEIN
Das entstandene CO₂ wird nicht in die Atmosphäre geleitet, sondern in den Untergrund verpresst.



Braun

Für die Herstellung dieses Wasserstoffs wird **Braunkohle** unter hohen Temperaturen und kontrollierter Sauerstoffzufuhr in Synthesegas umgewandelt.

CO₂-neutral: NEIN
Das Synthesegas besteht im Wesentlichen aus H₂ und CO₂.



Grau

Dieser Wasserstoff wird aus **Erdgas** gewonnen. Mittels Dampfreformierung wird Methan in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgewandelt. So wird derzeit weltweit der meiste Wasserstoff hergestellt.

CO₂-neutral: NEIN
Das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoffdioxid im Erdgas ist 1:10, ebenso ist der Anteil an hergestelltem Wasserstoff und freigesetztem CO₂.



Schwarz

Ähnlich wie brauner Wasserstoff wird hier Kohle als Grundlage für die Herstellung des Wasserstoffs verwendet. Anstelle von Braunkohle wird hier jedoch **Steinkohle** verwendet, die vergast und in Wasserstoff und Kohlenmonoxid aufgespalten wird.

CO₂-neutral: NEIN
Genau wie brauner Wasserstoff setzt auch dieser Prozess erhebliche Mengen an CO₂ frei.

Der Wasserstoffregenbogen

Wasserstoff ist nicht gleich Wasserstoff. Obwohl er eigentlich farblos ist, unterscheiden wir ihn in verschiedene Farbklassen – und die richten sich nach der Herstellung. Ob grün, grau oder gelb: Wir erklären, was dahintersteckt.

Welche Werkstoffe eignen sich für welche Dichtungsart?

Die Werkstoffwahl folgt immer dem Medium-Temperatur-Druck-Zyklus und bezieht die Lebensdauer und Reinheit ein. Die folgende regelbasierte Orientierung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Elastomere für O-Ringe, Rahmen- und Formdichtungen sowie Profile

- EPDM: KOH- und Wasserbeständig, gute Tief-temperaturflexibilität; für AEL/AEM und die Peripherie im Elektrolyseumfeld; hat eine höhere H_2 -Permeation als FKM. Vorsicht ist geboten bei direktem Sauerstoffkontakt.
- FKM: O_2 -Oxidations- und Temperaturstabil; beständig gegen deionisiertes Wasser (DI-Wasser) und saure Umgebungen; für PEM-Stacks sowie Peripherie-Ventile und -Sitze; niedrige H_2 -Permeation. Für Anwendungen mit Druckschwankungen stehen RG-robuste Werkstoffe zur Verfügung.
- HNBR/NBR: gute mechanische Festigkeit; wird verbreitet für Gase eingesetzt; ölbeständig. Für Anwendungen mit Druckschwankungen stehen RGD robuste Werkstoffe zur Verfügung.
- FFKM: maximale Chemikalienbeständigkeit; für den Einsatz in kritischen PtX-Schritten und hohen Temperaturen geeignet.

Fluorpolymere und Thermoplaste für Flachdichtungen, Dichtlippen und Back ups

- PTFE und ePTFE sowie modifiziertes PTFE: nahezu universell chemikalienbeständig; neigen zum Kriechen (Creep), im Krafthauptschluss zu platzen; geringe Permeation. Damit sind sie ideal für KOH, CO_2 sowie Flanschdichtungen in Stacks und Armaturen geeignet.
- PEEK: ideal geeignet für Back-up Ringe und Spring Energizer. Diese Thermoplaste verfügen über eine hohe Steifigkeit und Temperatur-Festigkeit. Gleichzeitig bilden sie einen guten Extrusionsschutz bei Hochdruckanwendungen.

Welche Dichtungsgeometrien werden wo in der Wasserstofftechnologie benötigt?

Statische Dichtungsgeometrien für Flansche, Gehäuse und Stacks

Elektrolyse-Stacks

Hier erfolgt die Auswahl je nach dem Grad der Montage-Automatisierung, den Stückzahlen, der Flächenpressung sowie der Toleranzlage. Grundsätzlich kommen hier Dichtungsprofile für Rahmen und Bipolarplatten, PIP, O-Ringe und extrudierte Profile zum Einsatz. Dabei senken profilierte Elastomer-Querschnitte den Montageaufwand. In der PEM-Elektrolyse bieten Hochdruck-Geometrien mit Halte-Features und druckaktivierenden Querschnitten eine optimale Performance.

Prozess- und PtX-Anlagen

In diesen Einsatzbereichen liegt der Fokus auf spiral-gewickelten Dichtungen und Kammprofilen aus Grafitlaminat. Zudem werden PTFE Flachdichtungen für hohe Temperaturen und Drücke sowie für korrosive Medien eingesetzt.

Ultrareine und Hochdruck-Umgebungen

Hier sorgen metallische Dichtungsprofile mit hoher Formgenauigkeit für optimale Dichtungsleistungen. VCR® Metalldichtungen und RTJ-, C- und E-Ringe sorgen für eine minimale Leckage- und Permeationsrate.

Dynamische Dichtungsgeometrien für Kompressoren, Ventile und Regelorgane

Zentrifugalkompressoren

Kontaktfreie Trockengas-Dichtungsprofile sind bewährte Dichtungslösungen für diese Kompressorenart.

Kolben- und Membrankompressoren

Hier kommen Packungen, Labyrinth-Dichtungen und PEEK Back ups zum Einsatz.

Ventile und Regler

In diesen Einsatzbereichen dominieren Feder-energierte PTFE Lippendichtungen für Hochdruck und Niedrigtemperatur-Umgebungen. Sie werden ergänzt durch EPDM-, FKM- und HNBR-Profile mit Back-ups.

Wasserstofftankstellen

Für diese Einsatzorte eignen sich metallische, PTFE-sitzende Ventile, die die Norm ISO 19880-3 erfüllen sowie Schlauchsysteme, die bei Temperaturen bis zu -40 °C einsetzbar sind.

Welche Normen und Standardisierungen müssen Dichtungen im Bereich der Wasserstoff-Wertschöpfungskette erfüllen?

Die Normungslandschaft für Wasserstofftechnologien befindet sich aktuell in einer dynamischen Entwicklungsphase. Viele Standards werden derzeit überarbeitet oder neu entwickelt. Grundsätzlich sind globale Normen und Standardisierungen für die Wasserstoff-Wirtschaft essenziell, um die Integrität und Leistungsfähigkeit der Dichtungs-Systeme unter stark variierenden Druck- und Temperaturbedingungen sicherzustellen.

Welche rechtlichen Rahmenbedingungen gelten wo? Mit den folgenden Regelwerken decken Sie die wesentlichen regulatorischen und normativen Anforderungen an Dichtungen und abgedichtete Baugruppen entlang der gesamten H₂-Wertschöpfungskette ab – von Elektrolyseuren über Druckgeräte und Rohrleitungen, Transport und H₂-Betankung bis hin zu On-Board-Systemen. Da sich der chinesische Wasserstoff-Markt mit einer hohen Dynamik entwickelt, beginnen wir mit drei GB-Standards, die in China gelten und erweitern dann den Fokus auf globale Richtlinien. Hier kommt der Überblick:

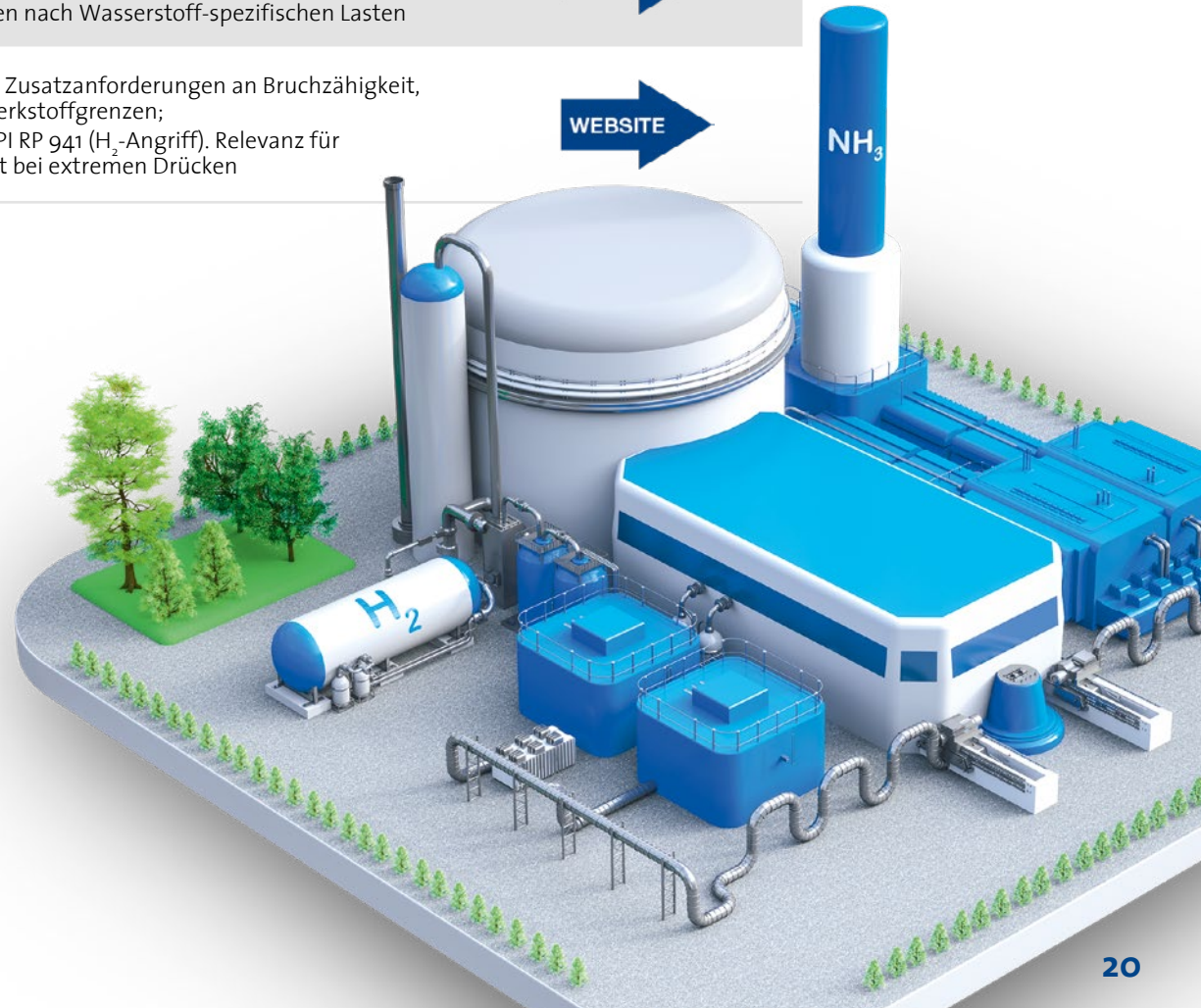
Segment	Norm/Regel	Region	Was regelt sie (Kurz) / Bezug zu Dichtungen	
H ₂ -Reinheitsklassen	GB/T 40060-2021	China	Reiner Wasserstoff, hochreiner Wasserstoff und ultrareiner Wasserstoff (englische Version)	WEBSITE
H ₂ -Speicherung/Lagerung	GB/T 37244-2018	China	Technische Anforderungen für die Lagerung und den Transport von flüssigem Wasserstoff (englische Fassung)	WEBSITE
H ₂ -als Kraftstoff	GB/T 3634.2-201	China	Kraftstoffspezifikation für Fahrzeuge mit Protonen-austauschmembran-Brennstoffzellen – Wasserstoff (englische Fassung)	WEBSITE

Normen und Regularien – EU und global

Segment	Norm/Regel	Region	Was regelt sie (Kurz) / Bezug zu Dichtungen	
Elektrolyseure (Sicherheit/Design)	ISO 22734 (aktuell durch ISO 22734 1:2025 abgelöst) „Hydrogen generators using water electrolysis“	Global	Konstruktions-, Sicherheits- und Leistungsanforderungen für Wasser-Elektrolyseure (PEM, AEM, alkalisch). Dichtungsthemen: Medien- und Druckfestigkeit, Leckage, Werkstoffverträglichkeit, Prüfungen in der Anlage	WEBSITE
H ₂ Anlagen in explosions- gefährdeter Umgebung	IEC 60079 Serie (z. B. 60079 o „Allgemeine Anforderungen“; ergänzt durch IECEx-Zertifizierungssystem	Global: (IEC/IECEx) EU: über EN IEC 60079	Grundanforderungen an Geräte in Ex-Zonen (Zündquellenvermeidung, Kennzeichnung) – relevant für in oder an Elektrolyseuren verbaute Komponenten/Armaturen/Dichtungen (Werkstoffe, Oberflächen und Temperaturklassen) IECEx liefert das Konformitätsbewertungsschema.	WEBSITE
Explosionsschutz – Produktrecht	ATEX Geräteschutz Richtlinie 2014/34/EU	EU/EWR	Konformität/CE für Geräte/Schutzsysteme in Ex Zonen – einschl. Dichtungssysteme und Gehäuse mit Ex-Schutzniveaus; harmonisierte EN-Normen in OJ gelistet. [eur-lex.europa.eu]	WEBSITE
Explosionsschutz – Arbeitsschutz	ATEX Betriebsrichtlinie 1999/92/EG	EU/EWR	Zoneneinteilung, Mindestanforderungen am Arbeitsplatz; wirkt auf Auswahl und Ausführung von Dichtungen/Armaturen im Anlagenumfeld	WEBSITE
Druckgeräte	Pressure Equipment Directive (PED) 2014/68/EU	EU/EWR	Grundlegende Sicherheitsanforderungen für Druckgeräte/-Baugruppen (Behälter, Rohrleitungen, Armaturen); Dichtungen sind druckbeaufschlagte Komponenten bzw. sicherheitsrelevant (Werkstoffanforderungen, Prüfungen, CE)	WEBSITE
Wasserstoff- Sicherheitsleitfaden	ISO/TR 15916 „Basic considerations for the safety of hydrogen systems“	Global	Sicherheitsgrundsätze für H ₂ Systeme (Eigenschaften, Gefahren, Risikothemen, Werkstoff-/Leckageaspekte) – hilfreich für die Auswahl und Spezifikation von Dichtwerkstoffen	WEBSITE
„Grünheits“-/Nachweis Rahmen (EU Import, RFNBO)	Delegierte VO (EU) 2023/1184 & 2023/1185 (RED II/III – RFNBO Zusatz, GHG Methode) RFNBO Zusatz, GHG Methode)	EU	Methodik & Kriterien für erneuerbaren H ₂ inkl. Additionality, Temporal and Geographical Correlation sowie GHG-Bilanzierung – beeinflusst Material-/Prozessanforderungen (z. B. Sauberkeit/Leckagen bei Dichtungen) für Zertifizierbarkeit	WEBSITE

Normen und Regularien für Rohrleitungen, Piping und Druckbehälter

Segment	Norm/Regel	Region	Relevanz
H ₂ Rohrleitungen und Piping	ASME B31.12 „Hydrogen Piping and Pipelines“	USA/international angewandt	Auslegung/Fertigung/Prüfung für gasförmigen und verflüssigten H ₂ (Industrierohre und Pipelines). Beinhaltet Regeln für Werkstoffe, Schweißnähte, Prüfung – Dichtungssysteme für Flansche und Kompensatoren nach Wasserstoff-spezifischen Lasten WEBSITE
Druckbehälter (H ₂ -Dienst)	ASME BPVC Sect. VIII; Div.3, Art. KD 10 (Sonderanforderungen H ₂)	USA/international angewandt	Hochdruck H ₂ : Zusatzanforderungen an Bruchzähigkeit, Ermüdung, Werkstoffgrenzen; Verweis auf API RP 941 (H ₂ -Angriff). Relevanz für Dichtintegrität bei extremen Drücken WEBSITE



Normen und Regularien für Speicher und Flaschen – stationär und mobil sowie Materialverträglichkeit

Segment	Norm/Regel	Region	Relevanz
Werkstoffverträglichkeit (Flaschen/Armaturen)	ISO 11114-1 (metallische Werkstoffe) ISO 11114-2 (nichtmetallische Werkstoffe) ISO 11114-4 (H ₂ -Versprödung – Auswahl- prüfungen)	Global	Bewertung der Verträglichkeit von Zylinder-/Ventil- werkstoffen mit H ₂ (Versprödung, chemische Interaktion). Wichtig für Dichtungen, Liner und Ventilsitze. 
Stahl- und Composite-Flaschen	ISO 9809-1 (nahtloser Stahl), ISO 11119 Reihe (Composite, Typ 2–4)	Global	Design/Herstellung/Prüfung von H ₂ -Druckbehältern; Anforderungen an Ventile/Dichtflächen und Prüfungen beeinflussen Dichtkonzepte 
Kryo-Behälter (LH ₂)	ISO 21009-1 (statisch vakuumisoliert – Design und Tests)	Global	Anforderungen an LH ₂ -Tanks (Stärke, Dichtheit, Prüfungen, Werkstoffe) – wesentlich für Dichtungen im kalten/vakuumisolierten Umfeld 



Normen und Regularien für Transport auf Straße und Schiene, auf See und in der Luft sowie transportierbare Druckgeräte

Segment	Norm/Regel	Region	Relevanz	
Straße (ADR)	ADR 2025 (UN ECE) – inkl. UN 1966 LH ₂ , Klasse 2	Europa/ weitere Vertrags- staaten	Einstufung, Verpackung, Tanks, Betrieb – technische Anforderungen und Prüfungen an Tanks, Anschlüssen und Dichtsysteme (Kälte, Schwingung, Druck)	WEBSITE
Transportierbare Druckgeräte	TPED 2010/35/EU	EU/EWR	Einheitlicher Rechtsrahmen für Bau, Konformität, wiederkehrende Prüfungen (Flaschen, MEGCs, Tanks) – inkl. Kennzeichnung „π“. Dichtkomponenten müssen Prüfintervalen/Standards genügen	WEBSITE



Normen und Regularien für H₂-Betankungsinfrastruktur (HRS) – Station, Komponenten, Kraftstoff

Segment	Norm/Regel	Region	Relevanz	
ISO 19880-1:2020	ISO 19880-1:2020	Global	Mindestanforderungen an Auslegung, Installation, Betrieb, Inspektion und Instandhaltung von HRS (Dispensing, Kompressor, Speicher, Vorkühlung). Kritisch: Leckagegrenzen, Dichtheitsprüfungen, Schlauch-/Ventil-Leistung	WEBSITE
ISO 19880-3:2018	ISO 19880-3:2018	Global	Sicherheitsleistung und Prüfmethode für Hochdruck-Gasventile (bis H70) – Dichtheit unter Druck-/Zyklusanforderungen	WEBSITE
ISO 19880-5 (2019; 2. Ausg. 2025)	ISO 19880-5 (2019; 2. Ausg. 2025)	Global	Anforderungen an Schläuche für bis 70 MPa (Material, Design, Prüfungen – Permeation, Zyklen, Biegewechsel). Parallel in NA: CSA/ANSI HGV 4.2	WEBSITE
Kraftstoffqualität H ₂	ISO 14687 (Ausg. 2019; Zweitauflage 2025) EN 17124:2022 (EU)	Global / EU	Spezifikation (Grenzwerte) für H ₂ Reinheit (PEM FC) – direkte Anforderungen an Materialreinheit/Leachables von Dichtungen, um Kontaminationen zu vermeiden	WEBSITE
Zapf-/Kupplungsnorm	ISO 17268 (2020; im Mehrteiler 2025), für 35/70 MPa	Global	Design-/Sicherheitsmerkmale von Nozzle und Receptacle inkl. Dichtflächen, Verriegelung, Werkstoffe, Testmethoden	WEBSITE
Betankungsprotokoll	SAE J2601 (LD, 35/70 MPa)	USA/International	Druck- und Temperatur-Profile, End-of-Fill-Ziele (T20/30/40); Anforderungen an Vorkühl-Dichtungssysteme, Schlauch-Dichtheit über schnelle Zyklen	WEBSITE
US-Schutznormen: Brandschutz	NFPA 2 (Hydrogen Technologies Code) & NFPA 55 (Gase/Kryo)	USA	Abstände, Belüftung, Not-Abschaltungen, Werkstoffe, Prüfungen – für Stationen, Speicher, Leitungen und Armaturen/Dichtungen [H ₂ tools.org]	WEBSITE

Normen und Regularien für Fahrzeuge und On-Board-Systeme

Segment	Norm/Regel	Region	Relevanz	
Fahrzeug-Kraftstoffsysteme	SAE J2579 (reaffirmed 2023)	USA/International	Anforderungen an Design, Betrieb und Verifizierung von H ₂ -Speicher- und Handlingsystemen im Fahrzeug (Dichtheit, Crash-Leak, Lebensdauer)	WEBSITE
On-Board-Behälter	ISO 19881 – Landfahrzeug Brennstoffbehälter, ergänzend	Global	Anforderungen an Druckbehälter/Verrohrung – Schnittstellen zu Fahrzeug-Kupplungen/Dichtflächen (Anmerkung: häufig in OEM-/Typgenehmigungsnormen verankert)	WEBSITE



Normen und Regularien für Querschnitte: Zertifizierung, Nachweise und globale Anerkennung

Segment	Norm/Regel	Relevanz	
H ₂ -Zertifizierung – Grundlagen	Hydrogen Certification 101 (IEA H ₂ TCP/ IPHE)	Begriffswelt, Rollen (Scheme Owner, Certification, Issuing, Accreditation Bodies), Chain of Custody (Mass Balance vs. Book&Claim), Mutual Recognition – wichtig für grenzüberschreitenden Handel und konsistente Anforderungen an Werkstoffe und Prozesse (z. B. Cleanliness von Dichtungen)	
Standardisierung und digitale Nachweise	H ₂ Global Policy Brief „Standardizing Hydrogen Certification“	Harmonisierungsschritte, Rolle ISO/WD/TS 19870 (GHG Methodik), Digital Product Passport/Block-chain zur Rückverfolgbarkeit – unterstützt Konformität von Komponenten/Materialien in Lieferketten	
GHG-Methodik für H ₂	ISO/TS 19870 (in Arbeit; aus IPHE Methodik hervorgegangen)	Einheitliche Methodik zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen von Produktion, Konditionierung und Transport – wichtig für Nachweise (RFNBO, CBAM) und damit indirekt für Material- und Prozesswahl (z. B. leacharme Dichtwerkstoffe)	

Wo erhalte ich Branchen-News im Bereich der Wasserstofftechnologien?

Das Angebot an Informationsmöglichkeiten im Bereich der Wasserstoff-Wertschöpfungskette ist immens und eine Kategorisierung ist dringend zu empfehlen. Wir listen drei Plattformen auf, die wir schätzen und fügen einen

strukturierten Überblick über eine Vielzahl weiterer Informationsmöglichkeiten an. Los geht's:

China Daily – Hydrogen Technology Section – Chinas Wasserstoffmarkt; technologische Fortschritte, Großprojekte und internationale Kooperationen; für ein internationales Fachpublikum aufbereitet.



CORDIS – EU-Forschungsnachrichten zu Wasserstoff

EU-Portal für Forschungsprojekte und Innovationen im Bereich Wasserstoff, inklusive Speicher- und Dichtungstechnologien.



International The Energy And Resources Institute – Führendes indisches Energieforschungsinstitut; regelmäßige Updates zu H₂-Technologien.



Tagesaktuelle Branchen-News – redaktionell kuratiert

Hydrogen Insight – tagesaktuelle Meldungen zu Projekten, Auktionen, Industrie-Offtakes, Regulatorik (EU/Global)



H₂-View – breite Abdeckung (Mobilität, Industrie, Politik) plus Monatsmagazin und Webinare; gute Europa- und Asien Abdeckung



FuelCellsWorks – sehr hohe Taktung (täglich, global), von OEM-Meldungen über Infrastruktur bis China-Wochenrückblick



Hydrogen Economist (PE Media) – Hintergrund/Analysen und „Outlook“-Stücke (Paywall, aber starke Einordnung)



Euronews – Hydrogen – EU-fokussierte Nachrichten mit Regulatorik -Signalwirkung (ACER, Markt-Realität)



Politik, Regulierung und Förderprogramme (Europa/Global)

IEA – Global Hydrogen Review 2025 inkl. neuem Hydrogen Tracker (Politik-Datenbank >1.000 Maßnahmen; Projekt und Kosten-Layer). Ideal für einen „Single-Source-of-Truth“-Blick

WEBSITE

Clean Hydrogen Partnership (EU) – offizielle News zu Calls, Projekten & Hydrogen Valleys; 2026-Call €105 M veröffentlicht

WEBSITE

European Hydrogen Bank (EHB) – Auktionsergebnisse & Learnings; zweite Runde: viele Rückzüge wegen Completion Guarantee & Nachfrage-Unsicherheit

WEBSITE

Hydrogen Europe – News/Analysen zur EU-Politik (EHB, Innovation Fund, Hydrogen Mechanism) – guter Lobby/Branchenblick

WEBSITE

IPHE – International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy – Regierungsnetzwerk; Governance-Updates & internationale Initiativen

WEBSITE

European Hydrogen Observatory – redaktionelle EU News (Projekte, H₂ Airports, Großanlagen).

WEBSITE

Marktpreise, Daten und Analysten

S&P Global Commodity Insights (Platts) – Preisindizes, Pump-Preis-Assessments, News/Analysen; zudem Akteur hinter World Hydrogen Leaders (Events)

WEBSITE

Argus Media – Hydrogen & Future Fuels – globale Preis-/Kosten-Modelle, Policy News, Offtake-Datenbanken

WEBSITE

BloombergNEF – realistische Supply-Outlooks (z. B. Anteil „wahrscheinlich realisierbarer“ Kapazität bis 2030) & Kosten-Trajektorien

WEBSITE

Projekt- und Technologie-Tracker – praktisch für Pipeline und Wettbewerbs-Monitoring

IEA Hydrogen Tracker & Projects Database – interaktive Karten, Projektstatus (von Konzept bis Betrieb), Infrastruktur & Kosten; CC BY nutzbar.

WEBSITE

IEA Projects Dataset @ KAPSARC – maschinenlesbarer Zugriff (Datenexporte), hilfreich für eigene Auswertungen

WEBSITE

Hydrogen Monitor (Hydrogen Europe) – jährlicher EU-Markt Status inkl. Förderlandschaft, Genehmigungen, Zielerreichung

WEBSITE

Offizielle Referenzberichte – erscheinen jährlich und halbjährlich?

IEA – Global Hydrogen Review 2025 – globaler Status zu Nachfrage, Angebot, Politik, Investitionen; ergänzt durch den online Tracker

WEBSITE

Hydrogen Council – Global Hydrogen Compass 2025 – Industrie-Sicht & Kapitalkurve; >500 reife Projekte, >\$110 Mrd. committed (Kontext & Case Studies)

WEBSITE



Wie bleibe ich auf dem Laufenden?

Um bei der Fülle an Informationsmöglichkeiten nicht den Überblick zu verlieren, empfehlen wir ein praktisches Setup:

1. Wöchentliche Strategie-Updates

- a. Lesen: IEA Hydrogen Tracker (Politik-/Projekt-Layer)
+ Hydrogen Council Compass (Industriesicht)

iea.org

hydrogencouncil.com

2. Tägliche Alerts (Outlook/RSS):

- a. Hydrogen Insight, H₂-View, FuelCellsWorks

Suchbegriffe:

- electrolyser FID
- offtake ammonia/methanol
- EHB, Hydrogen Bank
- Hydrogen Valleys

hydrogeninsight.com

H₂-view.com

3. Monatliche Preis/Markt-Sanity-Checks

- a. S&P + Argus (Preis/Methodik) und BNEF (Outlooks)

b. **<https://www.spglobal.com/energy/en/commodity/energy-transition/hydrogen>**

c. **<https://www.argusmedia.com/en/commodities/hydrogen>**

Eine Praxis-Checkliste:

Welche Informationen brauche ich für die Dichtungsauswahl entlang der Wasserstoff-Prozesskette?

Mit dieser Checkliste möchten wir Sie dabei unterstützen, systematisch alle relevanten Parameter für die optimale Dichtungsauswahl zu erfassen. Die einzelnen Fragestellungen betreffen die Umgebungs- und Betriebsbedingungen, beleuchten die Anforderungen an die Medienbeständigkeit, Dichtungsgeometrie und War-

tungsintervalle. Sie endet mit Fragen zu Sicherheitsanforderungen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Wir wünschen viel Erfolg beim Arbeiten mit unserer Checkliste!

CHECKLISTE

Medien

- ☐ Werden meine Dichtungen in einer sauren oder basischen Umgebung eingesetzt?
- ☐ Müssen meine Dichtungen Kaliumhydroxid/ Kalilauge standhalten?
- ☐ Liegt mein Wasserstoff gasförmig oder kryogen vor?
- ☐ Müssen die Dichtungen Ölen und Kühlmitteln widerstehen?
- ☐ Welche Reinheitsanforderungen gelten?
- ☐ Welche maximale Leckagerate ist zulässig?
- ☐ Welche maximale Permeationsrate ist zulässig?
- ☐ Welche Kompatibilitäten müssen sichergestellt sein?

Geometrie/Hardware

- ☐ Welche Flansch-Geometrien und -qualitäten sind optimal geeignet?
- ☐ Welche Nut- und Sitzgeometrien werden benötigt?
- ☐ Wie ist die Oberflächenqualität der abzudichtenden Flächen?
- ☐ Welches Fertigungsverfahren (Extrusion/LCM/ Overmolding) ist ratsam?

Leckage und Lebensdauer

- ☐ Wie ist die zulässige Leckrate definiert?
- ☐ Wie sind die CSR-Grenzen definiert?
- ☐ Was ist die Ziellebensdauer (z. B. 100.000 h in Elektrolyse)
- ☐ Welche Wartungsintervalle sind erforderlich?
- ☐ Wie ist die Ersatzteillogistik aufgebaut – wie schnell müssen Ersatzteile verfügbar sein?

Sicherheit und Normen

- ☐ Welche ATEX-Anforderungen (ATEX-Zonen) müssen erfüllt werden?
- ☐ Wie ist das RGD-Risiko definiert?
- ☐ Welche Prüfprotokolle sind erforderlich und wo werden sie abgelegt?
- ☐ Ist die ISO-22734-Konformität sichergestellt?
- ☐ Bei Fahrzeugen: wird UN R134 eingehalten?



Fazit und Ausblick

Die Branche der erneuerbaren Energien lebt von wegweisenden technischen Innovationen und die Wasserstoff-Wertschöpfungskette ist – wie in der Einleitung skizziert – in der Umsetzungsrealität angekommen. Auch wenn der Markthochlauf aktuell die Prognosen aus den 2020er Jahren nicht ganz erreicht, wachsen national und international die Nachfrage und der Infrastrukturausbau. Auch der weltweite Zuwachs in den Bereichen Solar- und Windenergie wirkt sich positiv auf ein Anziehen des Wasserstoff-Marktes aus.

Insbesondere im Energiesektor treibt experimentelle Neugierde die Entwicklung zukunftsweisender Lösungen voran. Dieser Erfindergeist führt auch zu einer stetigen Weiterentwicklung von Werkstoffen, Fertigungsverfahren und Dichtungslösungen bei Freudenberg Sealing Technologies. Denn eins ist klar: Dichtungen sind die entscheidenden Funktionsgaranten für die Effizienz, Sicherheit und kalkulierbaren Lebenszykluskosten in Wasserstoff-Systemen. Sie sind die Technologie-Treiber, mit denen die angestrebten Kosten- und Skaleneffekte realisiert werden können.

Dieses Whitepaper unterstützt Sie dabei, im Bereich der Dichtungen für die Wasserstoff-Prozesskette auf dem neuesten Stand zu bleiben. Gleichzeitig geben wir Ihnen wichtige Impulse, wie Sie mit innovativen Technologien Ihren Kurs in Richtung Klimaneutralität setzen können. Gerne möchten wir dieses Whitepaper gemeinsam mit Ihnen weiterentwickeln und freuen uns auf Ihr Feedback.

Marcel Schreiner

Global Segment Director Energy und Projektleiter H₂ bei Freudenberg Sealing Technologies

Marcel.Schreiner@fst.com

Artur Mähne

Global Segment Manager, Hydrogen Technologies bei Freudenberg Sealing Technologies

Artur.Maehne@fst.com



Glossar – Werkstoffklassen und Markennamen

ACER	Agency for the Cooperation of Energy Regulators
AEL-Elektrolyse	Alkalische Elektrolyse
AEM-Elektrolyse	Anionen-Austausch-Membran (Anion Exchange Membrane)
ASME	American Society of Mechanical Engineers - Normen und Standardisierung
ATEX	Explosionsschutz-Richtlinien
Brennstoffzellen-Stack	Modulare Anordnung einzelner standardisierter Brennstoffzellen
CCC	Component Cleanliness Code
CIIR	Chlor-Isobuten-Isopren-Kautschuk
DIAvent Light®	Druckausgleichselement
EHB	European Hydrogen Bank
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
ePTFE	Expandiertes Polytetrafluorethylen
FKM	Fluorkautschuk
FVMQ	Fluorsilikonkautschuk
H₂	Wasserstoff
H₂ ICE	Hydrogen Internal-Combustion-Engine
HFCV	Mit Wasserstoff und Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge
HNBR	Hydrierter Nitril-Butadien-Kautschuk
HRS	Wasserstoff-Tankstelle
Hydrogen Mechanism	EU Energy Platform

IEA	International Energy Agency
IECEX	Konformitätsbewertungsschema
KOH	Kaliumhydroxid,
KOH (aq)	Kalilauge
Kryogen	Extrem niedrige Temperaturen (-150 -- -273 °C)
L-/C-Querschnitt	Platten-Dichtung, verbessert die Barrierewirkung unter Betriebsdruck
LCM	Liquid Curing Method (Extrusionsverfahren)
LOCTITE	Gewindedichtung
NBR	Nitrilkautschuk – Nitril-Butadien-Rubber
NH₃	Ammoniak
PEM-Elektrolyse	Protonen-Austausch-Membran/Proton Exchange Membrane
PTFE	Polytetrafluorethylen
PtX	Power-to-X/Verfahren für die Umwandlung von elektrischem Strom in Brenn- oder Kraftstoffe
PVMQ	Phenyl Methyl Silikon
RGD	Explosive Dekompression
S&P	Standard & Poor's/Ratingagentur
SOEC-Elektrolyse	Solid Oxide Electrolyser Cell-Elektrolyse
TRL	Technology Readiness Level/Technologie-Reifegrad
UHP	Ultra-High-Performance

Impressum

Freudenberg FST GmbH
Corporate Communications
Mira Beck (verantwortlich für den Inhalt)

Höhnerweg 2 - 4
D-69469 Weinheim/Bergstraße

Telefon: + 49 (0) 6201 - 960-66 66
E-Mail: info@fst.com

Mai 2026