

Anhang 1 HySkills Modul Exemplar

Modulbetrieb und Wartung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen

Inhalt

Modul	Betrieb und Wartung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen	1
	ERGEBNIS 1 - Beschreibung der Grundprinzipien von Elektrolyseuren und Brennstoffzellensystemen	3
	Elektrolyseur	3
	Was ist ein Elektrolyseur?	3
	Wie ein Elektrolyseur funktioniert	3
	Einsatzmöglichkeiten für Brennstoffzellen	4
	Wie werden Elektrolyseure zur Wasserstoffherzeugung kommerzialisiert?	5
	Brennstoffzelle	6
	Prinzip der Brennstoffzelle	7
	Brennstoffzellenstapel und elektrische	8
	Einsatz von Brennstoffzellen	9
	ERGEBNIS 2 - Beschreibung der grundlegenden Merkmale von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren sowie der Funktion ihrer Bestandteile	13
	Arten von Elektrolyseuren	13
	Alkalischer Elektrolyseur	13
	Protonenaustauschmembran-Elektrolyseur	13
	Festoxid-Elektrolysezelle (SOEC)	14
	Vergleich und Zusammenfassung der verschiedenen Wasserelektrolyseverfahren	15
	Brennstoffzelle	16
	Komponenten von Brennstoffzellen	16
	Typen von Brennstoffzellen	18
	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen	18
	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle	19
	Alkalische Brennstoffzelle	20
	Phosphorsäure-Brennstoffzellen	20
	Brennstoffzellen aus geschmolzenem Karbonat	21
	Festoxid-Brennstoffzellen	22

Reversible Brennstoffzellen	23
Vergleich und Zusammenfassung der verschiedenen Brennstoffzellen.....	23
Vor- und Nachteile von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen	23
Was sind die wichtigsten Vorteile.....	24
Was sind die Nachteile von Elektrolyseuren und Wasserstoffbrennstoffzellen?.....	27
ERGEBNIS 3 - Normen und Vorschriften für die Planung, Installation, Inbetriebnahme und Wartung von Elektrolyseur- und Brennstoffzellensystemen	29
Grundsätze für die Sicherheitsplanung.....	29
Sicherheitsplan.....	34
Checklisten für die Installation und Inbetriebnahme	36
Wartungs- und Instandhaltungspläne	37

ERGEBNIS 1 - Beschreibung der Grundprinzipien von Elektrolyseur- und Brennstoffzellensystemen

Elektrolyseur

Was ist ein Elektrolyseur?

Ein Elektrolyseur ist ein Gerät, das in der Lage ist, Wassermoleküle in ihre Bestandteile Sauerstoff- und Wasserstoffatome aufzuspalten. Die Bindungen zwischen den beiden Elementen sind sehr stabil, und für diese Aufspaltung in einem als Elektrolyse bezeichneten Prozess wird elektrische Energie benötigt. Effiziente Elektrolyseure werden der Schlüssel für die Verbreitung von Wasserstoff in der Industrie und die Einführung von Wasserstoff-Brennstoffzellen sein.

Wasserstoff-Brennstoffzellen verwenden Wasserstoff als Brennstoff in einem elektrochemischen Prozess, der Wasserstoff und Sauerstoff zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wasser kombiniert. Der umgekehrte Prozess der Elektrolyse, bei dem Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser gewonnen werden, kann z. B. eine Reihe von erneuerbaren Energiequellen wie Wind, Wellen oder Sonne nutzen, um Wasserstoff als Brennstoff für die erneuerbare Stromerzeugung zu erzeugen. Es besteht auch ein wachsendes Interesse an Wasserstoff als einer einzigartigen sauberen Energiequelle, die Wärme erzeugen kann und deren einzige Nebenprodukte Wasser sind.

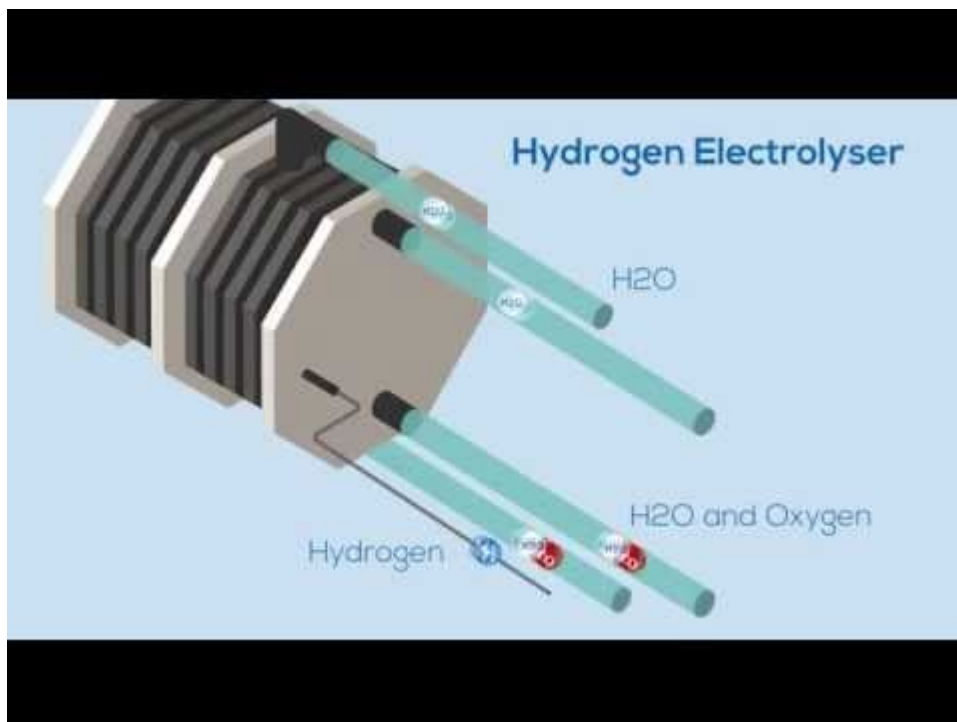
Einer der weltweit größten Elektrolyseure befindet sich in Fukushima, Japan, am Ort der bekannten Nuklearkatastrophe, und symbolisiert einen Paradigmenwechsel in der Energieerzeugung, da er mit Solarzellen betrieben **wird**. Erst kürzlich, im Januar 2021, wurde der japanische Elektrolyseur von dem in Bécancour, Kanada, weit übertroffen, der aus einer Polymermembrananlage mit einer Leistung von 8,2 Tonnen pro Tag besteht.

Wie ein Elektrolyseur funktioniert

Ein Elektrolyseur besteht aus einem leitenden Elektrodenstapel, der durch eine Membran getrennt ist und an den eine hohe Spannung und Stromstärke angelegt wird. Dadurch wird im Wasser ein elektrischer Strom erzeugt, der die Aufspaltung des Wassers in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff bewirkt. Das komplette System umfasst auch Pumpen, Strom

Elektronik, Gasabscheider und andere Hilfskomponenten wie Lagertanks. Die Elektrolyse wurde erstmals im Jahr 1800 entdeckt. Nach der Erfindung der elektrischen Batterie durch Alessandro Volta im selben Jahr versuchten andere Chemiker, ihre Pole in einem Behälter mit Wasser zu verbinden. Sie entdeckten, dass der Strom durch das Wasser floss und dass sich Wasserstoff und Sauerstoff an den Elektroden trennten.

Der parallel erzeugte Sauerstoff wird in die Atmosphäre abgegeben oder kann in einigen Fällen zur späteren Verwendung als medizinisches oder industrielles Gas gespeichert werden. Der Wasserstoff wird als komprimiertes Gas gespeichert oder für die Verwendung in der Industrie oder in Wasserstoff-Brennstoffzellen verflüssigt, die Verkehrsmittel wie Züge, Schiffe und sogar Flugzeuge antreiben können.



Einsatzmöglichkeiten für Brennstoffzellen

Wasserstoff ist ein sauberer Brennstoff, der bei der Verbrennung in einer Brennstoffzelle nur Wasser, Strom und Wärme erzeugt. Wasserstoff und Brennstoffzellen können eine wichtige Rolle in unserer nationalen Energiestrategie spielen, da sie in einem breiten Spektrum von Anwendungen in praktisch allen Sektoren eingesetzt werden können - im Verkehr, im Gewerbe, in der Industrie, in Privathaushalten und in mobilen Geräten. Wasserstoff- und Brennstoffzellen können Energie für verschiedene Anwendungen liefern, z. B. für dezentrale Anlagen oder Kraft-Wärme-Kopplung, Notstromversorgung, Systeme zur Speicherung und Nutzung erneuerbarer Energien, tragbare Energie, Hilfsenergie für Lkw, Flugzeuge, Züge und Schiffe, Spezialfahrzeuge wie Gabelstapler sowie Personen- und Lastkraftwagen, einschließlich Pkw, Lkw und Busse.

Aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads und ihres emissionsfreien oder nahezu emissionsfreien Betriebs haben Wasserstoff- und Brennstoffzellen das Potenzial, die Treibhausgasemissionen in vielen Anwendungen zu verringern. Die Forschung hat gezeigt, dass Wasserstoff- und Brennstoffzellen das Potenzial haben, die folgenden Emissionsminderungen zu erreichen:

- Leichte Straßenfahrzeuge: mehr als 50 % bis mehr als 90 % weniger Emissionen als bei heutigen Benzinfahrzeugen.
- Spezialfahrzeuge: Reduzierung der Emissionen um mehr als 35 % im Vergleich zu den derzeitigen diesel- und batteriebetriebenen Gabelstaplern.
- Nahverkehrsbusse: Die nachgewiesenen Kraftstoffeinsparungen sind etwa 1,5-mal höher als bei Bussen mit Dieselerbrennungsmotor (ICE) und etwa 2-mal höher als bei Bussen mit Erdgas-ICE.
- Hilfsaggregate (APUs): mehr als 60 % weniger Emissionen im Vergleich zum Leerlauf des Lkw-Motors.
- Systeme mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK): Verringerung der Emissionen um 35 % bis über 50 % im Vergleich zu herkömmlichen Wärme- und Stromquellen (wobei die Verringerung noch viel größer ist - über 80 % -, wenn Biogas oder Wasserstoff aus kohlenstoffarmen oder -freien Quellen in der Brennstoffzelle verwendet wird)

Die größte Herausforderung bei der Wasserstoffherzeugung, insbesondere aus erneuerbaren Ressourcen, ist die Bereitstellung von Wasserstoff zu geringeren Kosten. Für Brennstoffzellen im Verkehrswesen muss Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Kosten gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen und Technologien angeboten werden. Um die Gesamtkosten für Wasserstoff zu senken, konzentriert sich die Forschung auf die Verbesserung des Wirkungsgrads und der Lebensdauer von Wasserstoffproduktionstechnologien sowie auf die Senkung der Kosten für Investitionsgüter, Betrieb und Wartung.

Wie werden Elektrolyseure zur Wasserstoffherzeugung kommerzialisiert?

Elektrolyseure können im Wesentlichen auf vier Arten vermarktet werden:

Strom für die Mobilität: Wasserstoff kann als Kraftstoff an Tankstellen für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge wie Busse, Züge und Autos verwendet werden.

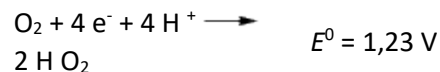
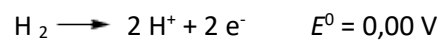
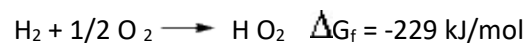
Power to Fuel: Wird in Raffinerien zur Entfernung von Schwefel aus fossilen Brennstoffen eingesetzt.

Energie für die Industrie: Kann direkt als Industriegas in der Stahlindustrie, in Flachglaswerken, in der Halbleiterindustrie usw. verwendet werden. Es kann auch direkt in die Erdgasnetze eingespeist werden, um kohlenstoffarme Heizungen und andere Erdgasanwendungen zu ermöglichen.

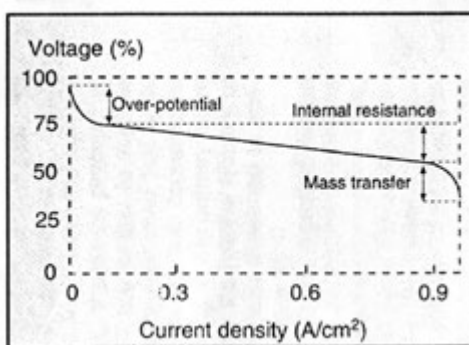
Power to Gas: Kann zur Herstellung von grünen Chemikalien wie Methanol, Düngemitteln (Ammoniak) und jedem anderen flüssigen Kraftstoff, sogar Flugzeugtreibstoff, verwendet werden!

Brennstoffzelle

Eine Wasserstoff-Brennstoffzelle ist eine elektrochemische Zelle, die eine spontane Redoxreaktion nutzt, um Strom zu erzeugen, der Arbeit verrichten kann. Die Nettoreaktion ist exotherm. Die Kombination der beiden Halbzellenpotentiale für die elektrochemische Reaktion ergibt ein positives Zellpotential.



Die theoretische Spannung einer Wasserstoff-Brennstoffzelle sollte 1,23 V betragen, die typischen Potentiale liegen jedoch bei 0,6 bis 0,7 und fallen mit dem Stromfluss. Warum?



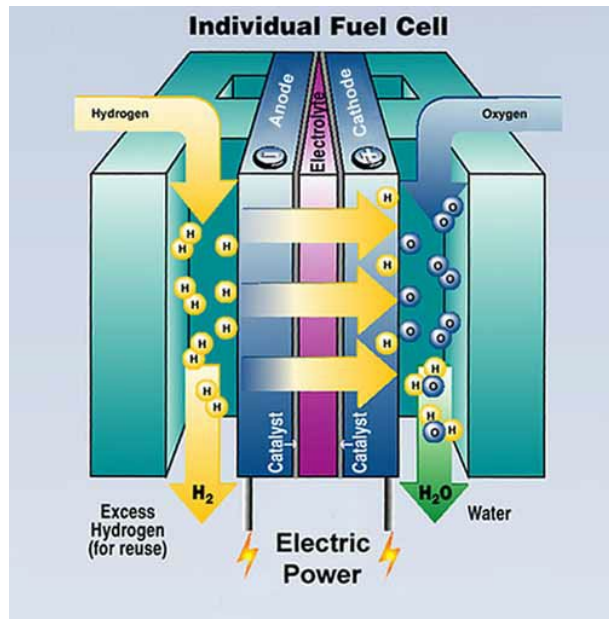
- Damit die Reaktion an der Kathode schnell genug abläuft, ist ein Überpotential erforderlich.
- Ladungsträger verlieren beim Durchströmen des Mediums Energie in Form von Wärme (Widerstand).
- Der Stofftransport zu den Elektroden ist langsam.

Prinzip der Brennstoffzelle

Der Wasserstoff fließt zu einem Platinkatalysator, der mit der Anode verbunden ist. Der molekulare Wasserstoff wird an der Metalloberfläche zu atomarem Wasserstoff dissoziiert und der atomare Wasserstoff wird oxidiert. Die Protonen wandern durch einen Festelektrolyten, die Polymerelektrolytmembran (PEM), und die Elektronen durch den externen Stromkreis. Der molekulare Sauerstoff wird an der Kathode reduziert und mit den Protonen zu Wasser verbunden.

Ein großes Problem bei Wasserstoff-

Brennstoffzellen ist die Quelle des Wasserstoffs. Die H_2 -Menge in der Atmosphäre ist sehr gering, so dass er hergestellt werden muss. Derzeit wird der meiste Wasserstoff aus Erdgas und Erdöl hergestellt. Er kann auch aus Kohle in der Wassergas- und Wassergasverschiebungsreaktion hergestellt werden. Bei all diesen Verfahren wird die in fossilen Brennstoffen gespeicherte Energie genutzt und CO_2 erzeugt. Mit Hilfe von Elektrizität, die auf andere Weise erzeugt wird (Kernkraft, Wasserkraft oder Sonnenenergie), kann Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt werden. Dies ist die Umkehrung der Wasserstoff-Brennstoffzellenreaktion. Es ist klar, dass H_2 eher ein Energieübertragungsmedium als ein Brennstoff ist.



Brennstoffzellenstapel und elektrische

Die erreichbare Spannung einer Brennstoffzelle kann mit Hilfe des Standardpotentials berechnet werden. Für die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff beträgt diese etwa 1,23 V. Reale Brennstoffzellen erreichen jedoch selten eine Leerlaufspannung von mehr als 1,0 V. Dies ist auf den

Innenwiderstand oder eine unzureichende Versorgung der Elektroden mit Wasserstoff zurückzuführen. Die Spannung ist unabhängig von der Größe der Brennstoffzelle, da sie nur von dem als Brennstoff verwendeten Wasserstoff abhängt. Die Größe der Brennstoffzelle ist jedoch entscheidend für die Stromstärke, d. h. die Anzahl der Elektronen, die pro Zeiteinheit erzeugt werden können. Werden höhere

Spannungen benötigt, so empfiehlt es sich, mehrere Brennstoffzellen zusammenzuschalten.

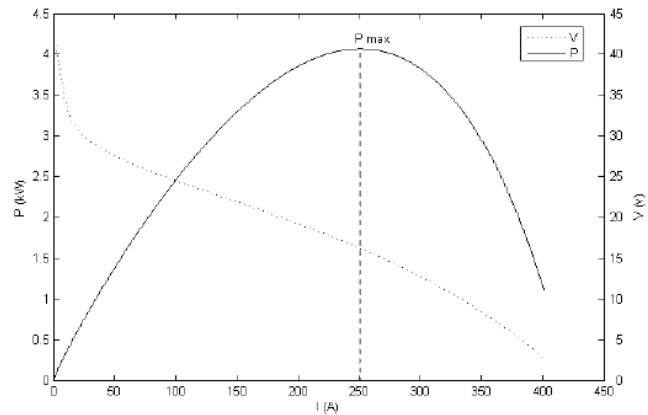


Abbildung 1: Ausgangsspannung und Leistung des Brennstoffzellenstapels im Vergleich zur Stromkurve - https://www.researchgate.net/figure/Fuel-cell-stack-output-voltage-and-power-vs-its-current-curves_fig1_267262048

Mit dem hier verwendeten Brennstoffzellenstapel können Parallel- und Reihenschaltungen ausprobiert werden. In der Untersuchung werden Kennlinien aufgenommen. Die Spannungskennlinie gibt die Spannung an, die die Brennstoffzelle bei einer definierten Stromaufnahme halten kann. Der definierte Strom wird über variable Widerstände eingestellt. Diese wandeln den Strom in Wärme um. Die Kennlinie der Leistung ist ebenfalls stromabhängig. Hier wird die Leistung der Brennstoffzelle, die das Produkt aus Spannung und Strom ist, gegen den Strom aufgetragen.

Eine Brennstoffzelle sollte möglichst nahe an ihrer maximalen Leistung betrieben werden. Um dies zu erreichen, wird der entnommene Strom geregelt. Bei der Aufnahme von Kennlinien ist es notwendig, eine ausreichende Menge an Wasserstoff zur Verfügung zu haben. Bei niedrigen Strömen wird nur sehr wenig Wasserstoff verbraucht. Je höher der entnommene Strom ist, desto mehr Wasserstoff wird benötigt. Bei sehr hohen Strömen kann es vorkommen, dass die Spannung abfällt, weil nicht genügend Wasserstoff an die Elektroden gelangt; die Reaktion wird "verhungert". Dies würde die Ergebnisse der charakteristischen Kurven verfälschen.

Eine einzelne Brennstoffzelle liefert normalerweise niedrige Spannungen und hohe Ströme. Typische Spannungs- und Strombereiche liegen zwischen 0,4 und 0,9 V bzw. zwischen 0,5 und 1 A/cm². So soll

die Brennstoffzelle beispielsweise etwa 0,7 V (nach Verlusten) und 0,6 A/cm² erzeugen. Um eine höhere Leistung zu erreichen

Leistung zu erreichen, müssen die Brennstoffzellen wie in der Abbildung unten dargestellt gestapelt werden. Je nach Leistung und Anwendung gibt es Brennstoffzellen in verschiedenen Formen und Größen.

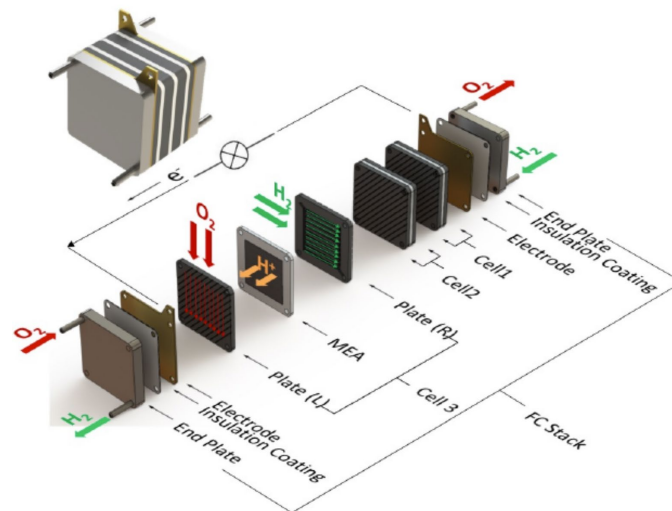


Abbildung 2 Schematische Darstellung des Betriebs und der Komponenten eines Brennstoffzellenstapels - https://www.researchgate.net/publication/309898224_A_review_on_prognostics_and_health_monitoring_of_proton_exchange_membrane_fuel_cell

Einsatz von Brennstoffzellen

Stationäre Brennstoffzellen erzeugen Strom durch eine elektrochemische Reaktion, nicht durch Verbrennung, und liefern sauberen, effizienten und zuverlässigen netzunabhängigen Strom für Haushalte, Unternehmen, Telekommunikationsnetze, Versorgungsunternehmen und andere. Stationäre Brennstoffzellen sind leise und haben sehr geringe Emissionen, so dass sie fast überall installiert werden können. Diese Systeme versorgen die Kunden direkt vor Ort mit Strom, ohne die Effizienzverluste, die bei der Übertragung über große Entfernungen entstehen.

Stromerzeugung

Stationäre Brennstoffzellensysteme benötigen im Vergleich zu anderen sauberen Energietechnologien auch viel weniger Platz. Eine 10-MW-Brennstoffzellenanlage kann zum Beispiel auf etwa einem Hektar Land aufgestellt werden. Im Vergleich dazu werden für ein MW Solarenergie etwa 10 Acres und für ein MW Windenergie etwa 50 Acres benötigt. Die meisten stationären Brennstoffzellen werden direkt an die Erdgasinfrastruktur unseres Landes angeschlossen und versorgen kritische Einrichtungen auch dann mit zuverlässiger Energie, wenn kein Netzstrom verfügbar ist.



Brennstoffzellen sind hocheffizient und erreichen in der Regel einen Wirkungsgrad von 60 Prozent, fast doppelt so hoch wie der Wirkungsgrad des heutigen Stromnetzes. Brennstoffzellen erzeugen auch Wärme, die, wenn sie aufgefangen wird, die Gesamtenergieeffizienz auf mehr als 90 % steigern kann. Die von Brennstoffzellen erzeugte Wärme kann über eine Turbine zusätzlichen Strom erzeugen, nahe gelegene Gebäude oder Einrichtungen direkt mit Wärme versorgen und mit einer zusätzlichen Absorptionskältemaschine sogar kühlen.

Im Gegensatz zur Stromerzeugung durch Verbrennung liefern stationäre Brennstoffzellen praktisch emissionsfreien Strom. Brennstoffzellen produzieren weder Feinstaub noch unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Gase, die sauren Regen verursachen. Sie stoßen weniger Kohlendioxid aus als andere, weniger effiziente Technologien, und wenn Brennstoff aus erneuerbaren Quellen wie Biomasse verwendet wird, sind Brennstoffzellen völlig kohlenstoffneutral.

Transport

Stellen Sie sich ein Auto, einen Geländewagen oder einen Lastwagen vor, das bzw. der sich wie ein herkömmliches Fahrzeug verhält, dessen Tank in drei bis fünf Minuten gefüllt werden kann und das außer Wasserdampf keine Emissionen ausstößt - das ist das heutige Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug (FCEV). Brennstoffzellen nutzen Wasserstoff, um an Bord des Fahrzeugs durch einen chemischen Prozess ohne Verbrennung Strom zu erzeugen.

Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEVs)

FCEVs können mit einer Wasserstofftankfüllung 300 bis 400 Meilen zurücklegen und lassen sich in drei bis fünf Minuten auftanken. Sie kombinieren das emissionsfreie Fahren eines Elektrofahrzeugs mit der Reichweite und dem Komfort eines herkömmlichen Verbrennungsmotors. FCEVs sind bis zu dreimal energieeffizienter als herkömmliche Fahrzeuge. Da sie keine beweglichen Teile im Inneren haben, sind FCEVs außerdem leise und äußerst zuverlässig.

FCEVs sind emissionsfreie Fahrzeuge - sie produzieren keine Abgase außer Wasserdampf. Darüber hinaus reduzieren FCEVs im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor die Treibhausgasemissionen erheblich, selbst wenn man den gesamten Lebenszyklus des Wasserstoffkraftstoffs berücksichtigt. Bei der Verwendung von Wasserstoff, der durch Solar- oder Windelektrolyse erzeugt wird, entfallen die CO₂-Emissionen im gesamten Lebenszyklus vollständig.



Brennstoffzellen-Busse

Mehrere Dutzend Brennstoffzellenbusse sind in Städten im Einsatz und bieten saubere und zuverlässige Transportalternativen für Pendler. Die emissionsfreien Brennstoffzellenbusse sind eine attraktive Option für städtische Gebiete, da sie leise fahren und die Wartungskosten senken. Brennstoffzellenbusse sind auch bei extremen Temperaturen vorteilhaft, insbesondere im Vergleich zu batteriebetriebenen Alternativen.

Schwere Lastkraftwagen

Ähnlich wie Brennstoffzellenbusse können auch schwere Lastkraftwagen Brennstoffzellen nutzen, um Emissionen zu reduzieren und zuverlässige Fahrzeuge für eine Vielzahl von Zwecken bereitzustellen. Mehrere Prototypen wurden bereits in Hafenanlagen in Südkalifornien eingesetzt, wo sie im Kurzstrecken-Transport eingesetzt werden. Zukünftige Anwendungen für Brennstoffzellen-Schwerlastkraftwagen umfassen auch Langstreckentransporte über Land. Weitere Informationen finden Sie in unserem Blogbeitrag *In Transitions* über brennstoffzellenbetriebene Hafenfahrzeuge.

Mittelschwere Lkw

Brennstoffzellenfahrzeuge werden in größeren Flotten von Lieferfahrzeugen eingesetzt und sorgen für einen sauberen und zuverlässigen Transport in lokalen Netzen. Ob als alleiniger Antrieb des Fahrzeugs oder in Kombination mit Batterien, Brennstoffzellen arbeiten zuverlässig und erhöhen die Reichweite des Fahrzeugs gegenüber rein batteriebetriebenen Fahrzeugen.

Materialhandhabung

Wenn Sie in einem Lager arbeiten, fahren Sie vielleicht schon heute ein Brennstoffzellenfahrzeug. Gabelstapler und andere Materialtransportgeräte haben sich als idealer Markt für die ersten Anwender von Brennstoffzellenfahrzeugen erwiesen. Viele große Unternehmen stellen fest, dass Flotten von Brennstoffzellen-Gabelstaplern die Produktivität in ihren Lagern und Vertriebszentren steigern und Geld sparen. Weitere Informationen finden Sie in unserem Merkblatt zum Materialtransport.

Unbemannte Luftfahrzeuge und Unterwasserfahrzeuge

Mehrere Modelle unbemannter Luftfahrzeuge (UAVs), oder "Drohnen", werden derzeit mit Brennstoffzellen betrieben. Diese ermöglichen den Drohnen im Vergleich zu herkömmlichen batteriebetriebenen Drohnen längere Flugzeiten und ein schnelleres Auftanken. Zwar sind derzeit nur brennstoffzellenbetriebene Drohnen im Handel erhältlich, doch wird auch an Unterwasserdrohnen mit Brennstoffzellen geforscht und entwickelt.

Schieneverkehr

Brennstoffzellen-Züge sind jetzt in Deutschland in Betrieb, und die Reisenden profitieren von der geringeren Lärmbelastung und Luftverschmutzung im Vergleich zu konventionellen, dieselbetriebenen Zügen. Außerhalb Deutschlands sollen Brennstoffzellenzüge in Zukunft auch in Japan und Südkorea eingesetzt werden. Zusammen mit der Elektrifizierung von Strecken sind Brennstoffzellenzüge vorteilhafte Optionen, um die Emissionen des Verkehrssektors zu reduzieren und den wachsenden Herausforderungen zu begegnen.

Seetransport

Auf Schiffen unterschiedlicher Größe werden derzeit Brennstoffzellen in neuen Kapazitäten auf dem Wasser getestet. Mehrere Fähren auf der ganzen Welt haben den Wasserstoffbetrieb aufgenommen, während größere Brennstoffzellenmodelle als Prototypen entwickelt und für Containerschiffe geprüft werden. Sowohl große als auch kleine Schiffe setzen auf Brennstoffzellen, um die Emissionsziele zu erreichen und Menschen und Fracht zu befördern.

ZIEL 2 - Beschreiben Sie die grundlegenden Eigenschaften von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren und die Funktion ihrer Bestandteile

Arten von Elektrolyseuren

Gegenwärtig gibt es verschiedene Arten von Elektrolyseuren, die sich in Größe und Funktion unterscheiden. Die am häufigsten verwendeten werden im Folgenden beschrieben. ¹

Alkalischer Elektrolyseur

Alkalische Elektrolyseure verwenden eine flüssige Elektrolytlösung, z. B. Kaliumhydroxid oder Natriumhydroxid, und Wasser. Der Wasserstoff wird in einer Zelle erzeugt, die aus einer Anode, einer Kathode und einer Membran besteht. Die Zellen werden in der Regel in Reihe geschaltet, um mehr Wasserstoff und Sauerstoff gleichzeitig zu erzeugen. Wenn Strom an den Elektrolysezellenstapel angelegt wird, bewegen sich Hydroxidionen durch den Elektrolyten von der Kathode zur Anode jeder Zelle und erzeugen Wasserstoffgasblasen auf der Kathodenseite des Elektrolyseurs und Sauerstoffgas an der Anode. Sie sind seit mehr als 100 Jahren im Einsatz und benötigen keine Edelmetalle als Katalysator. Allerdings handelt es sich um sperrige Geräte, die Wasserstoff mittlerer Reinheit erzeugen und nicht sehr flexibel einsetzbar sind.

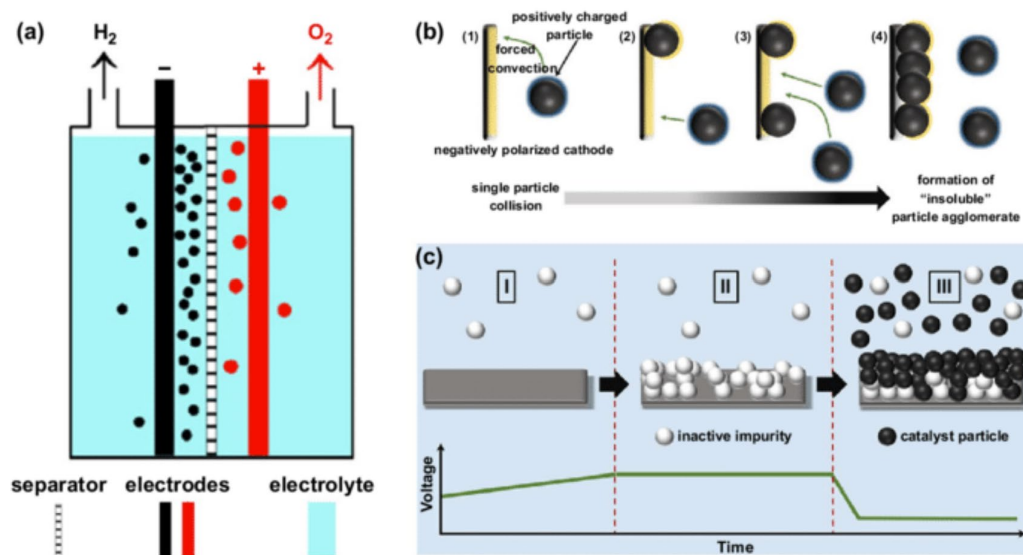
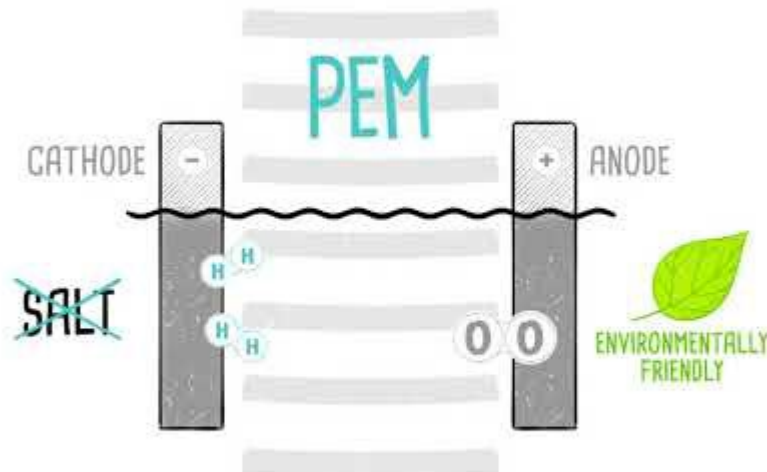


Abbildung 3 Schematische Darstellung eines herkömmlichen alkalischen Elektrolyseurs - Copyright 2012 Elsevier Inc

Protonenaustauschmembran-Elektrolyseur

PEM-Elektrolyseure verwenden eine Protonenaustauschmembran und einen festen Polymerelektrolyten. Wenn Strom an die Batterie angelegt wird, spaltet sich Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff, und die Wasserstoffprotonen passieren die Membran, um auf der Kathodenseite Wasserstoffgas zu bilden. Sie sind am weitesten verbreitet, weil sie hochreinen Wasserstoff erzeugen

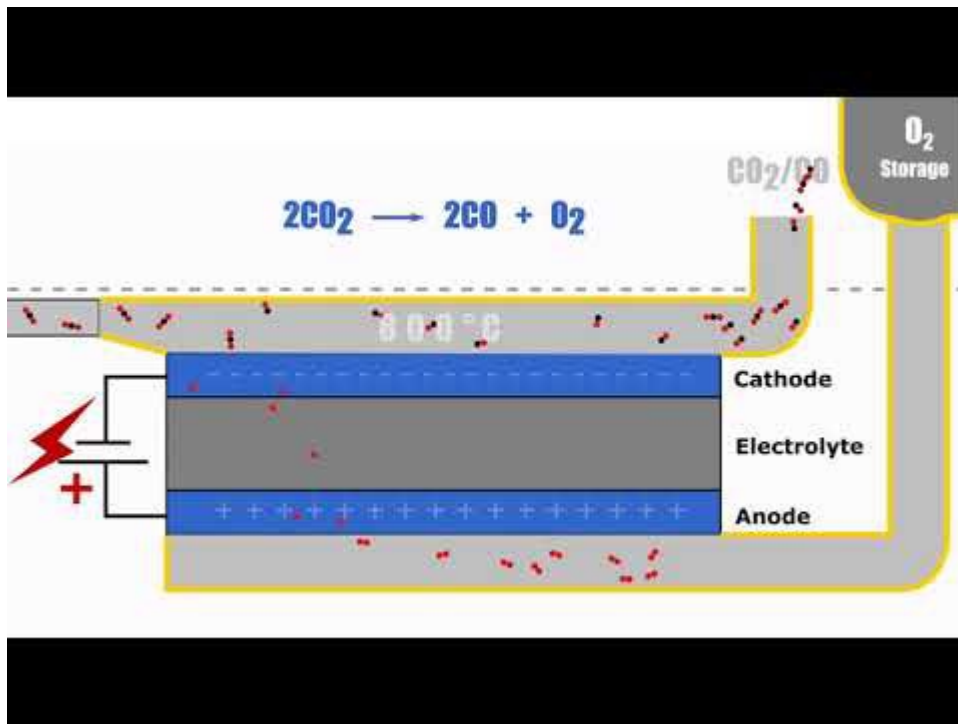
und leicht zu kühlen sind. Sie eignen sich am besten zur Anpassung an die Variabilität der erneuerbaren Energien, sind kompakt und erzeugen hochreinen Wasserstoff. Auf der anderen Seite sind sie etwas teurer, weil sie Edelmetalle als Katalysatoren verwenden.



Festoxid-Elektrolysezelle (SOEC)

SOECs arbeiten bei einer höheren Temperatur (zwischen 500 und 850 °C) und haben das Potenzial, wesentlich effizienter zu sein als PEMs und alkalische Elektrolyseure. Das Verfahren wird als Hochtemperaturelektrolyse (HTE) oder Dampfelektrolyse bezeichnet und verwendet ein festes keramisches Material als Elektrolyt. Elektronen aus dem externen Stromkreis verbinden sich an der Kathode mit Wasser und bilden Wasserstoffgas und negativ geladene Ionen. Der Sauerstoff dringt dann durch die gleitende Keramikmembran und reagiert an der Anode, um Sauerstoffgas zu bilden und Elektronen für den externen Kreislauf zu erzeugen.

Es gibt noch andere Arten von Elektrolyseuren, die noch nicht so effizient oder kostengünstig sind wie die oben genannten, aber ein großes Entwicklungspotenzial haben. Ein Beispiel ist die Photoelektrolyse, bei der nur das Sonnenlicht genutzt wird, um Wassermoleküle zu trennen, ohne dass Strom benötigt wird. Für dieses Gerät werden jedoch Halbleiter benötigt, die noch nicht ausreichend entwickelt sind.



Vergleich und Zusammenfassung der verschiedenen Wasserelektrolyse-Technologien

	Alkaline water electrolysis	PEM	SOEC	High temperature electrolysis
Technology status	Commercial	Commercial	R & D	R & D
Temperature [$^\circ\text{C}$]	<120	<80	700–1000	700–900
Pressure [bar]	1–200	1–350	1–5	<10
Electrolyte	20–30 % NaOH or KOH	Perfluoro-sulfonic acid	ZrO ₂ doped with Y ₂ O ₃	ZrO ₂ doped with Y ₂ O ₃
Cell separator	Diaphragm	Electrolyte membrane	Electrolyte membrane	Electrolyte membrane
Capacity [Nm^3h^{-1}]	1–700	1–100	1–10	0.6
Durability [h]	100 000	10 000–50 000	500–2000	No data available
Connectable to dynamic power system	No	Yes	No	No
Costs	$\sim 1250\text{ EUR kW}^{-1}\text{h}^{-1}$, $\sim 2\text{ EUR kg}^{-1}\text{H}_2$	$2000\text{ EUR kW}^{-1}\text{h}^{-1}$	$>2100\text{ EUR kW}^{-1}\text{h}^{-1}$	$>4\text{ EUR kg}^{-1}\text{H}_2$

Abbildung 4 https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-different-water-electrolysis-technologies-79-93-133-134-138_tbl4_337716604

Brennstoffzelle

Für die Umwandlung von Wasserstoff (H_2) in Elektrizität wird eine Brennstoffzelle benötigt; genau genommen handelt es sich um eine Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle. Oft wird sie auch einfach als "Wasserstoff-Brennstoffzelle" bezeichnet. Im Folgenden werden die Begriffe "Brennstoffzelle" und "Wasserstoffbrennstoffzelle" synonym verwendet. In Wasserstoff-Brennstoffzellen dient Wasserstoff als Brennstoff und Sauerstoff (O_2) als Oxidationsmittel. Durch die direkte Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie und Wärme haben Wasserstoff-Brennstoffzellen einen wesentlich höheren Wirkungsgrad als herkömmliche Kraftwerke.

In Kombination mit einem Brennstoffspeicher und Wasserstoffrecycling ermöglichen Brennstoffzellensysteme eine schadstofffreie Energieerzeugung. Das Leistungsspektrum von Wasserstoff-Brennstoffzellen reicht vom Sub-kW-Bereich einzelner Zellen bis in den MW-Bereich in Form von virtuellen Kraftwerken.

Das Einsatzgebiet von Wasserstoff-Brennstoffzellen reicht von der Wärme- und Stromversorgung in Gebäuden über netzferne Anwendungen bis hin zum Antrieb von Fahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen. Vor allem durch die Diskussion um die Rolle des Wasserstoffs in der Elektromobilität sind Brennstoffzellen zunehmend in den Fokus gerückt. Die Brennstoffzelle besteht aus einem Netzwerk von mehreren Zellen, die durch Separatoren getrennt und in einem Stapel angeordnet sind. Der Aufbau einer Brennstoffzelle ist schichtweise planar oder im Falle von Festoxid-Brennstoffzellen röhrenförmig als Rohrsystem.

Bestandteile von Brennstoffzellen

Für die Funktionsweise von Brennstoffzellen spielt die Elektrolyse eine entscheidende Rolle: Den Kern einer einzelnen Brennstoffzelle bildet ein flüssiger oder fester Elektrolyt, der beidseitig von bipolaren Elektrodenplatten (Anode und Kathode) umschlossen wird.

Diese Platten haben eine poröse Diffusionsschicht (GDL - Gasdiffusionsschicht), die die Reaktionsgase über eine edelmetallbeschichtete Katalysatoroberfläche (Nieder- und Mitteltemperaturbereich) oder über einen Katalysator aus Nickel, Keramik oder Stahl (Hochtemperaturbereich) leitet. Auf diese Weise wird bei den meisten Brennstoffzellentypen der Wasserstoff auf der Anodenseite aufgespalten und die Elektronen werden an den elektrischen Verbraucher abgegeben. Die Wasserstoffprotonen wandern durch den Elektrolyten zur Kathodenseite, wo sie sich mit dem zugesetzten Sauerstoff zu Wasser (H_2O) verbinden.

Brennstoffzellen werden in erster Linie nach der Art des verwendeten Elektrolyten unterschieden. Diese Klassifizierung bestimmt die Art der elektrochemischen Reaktionen, die in der Zelle ablaufen, die Art der erforderlichen Katalysatoren, den Temperaturbereich, in dem die Zelle arbeitet, den



erforderlichen Brennstoff und andere Faktoren. Diese Merkmale wirken sich wiederum auf die Anwendungen aus, für die diese Zellen am besten geeignet sind. Derzeit werden mehrere Arten von Brennstoffzellen entwickelt, die jeweils ihre eigenen Vorteile, Einschränkungen und Anwendungsmöglichkeiten haben.

Katalysator-Schichten

Auf beiden Seiten der Membran wird eine Katalysatorschicht aufgebracht - die Anodenschicht auf der einen und die Kathodenschicht auf der anderen Seite. Herkömmliche Katalysatorschichten bestehen aus nanometergroßen Platinpartikeln, die auf einem Kohlenstoffträger mit großer Oberfläche verteilt sind. Dieser Platinträgerkatalysator ist mit einem ionenleitenden Polymer (Ionomer) vermischt und zwischen der Membran und den GDLs eingebettet. Auf der Anodenseite ermöglicht der Platinkatalysator die Aufspaltung von Wasserstoffmolekülen in Protonen und Elektronen. Auf der Kathodenseite ermöglicht der Platinkatalysator die Sauerstoffreduktion durch Reaktion mit den von der Anode erzeugten Protonen, wobei Wasser entsteht. Das in die Katalysatorschichten eingemischte Ionomer ermöglicht es den Protonen, durch diese Schichten zu wandern.

Gasdiffusionsschichten

Die GDL sitzen außerhalb der Katalysatorschichten und erleichtern den Transport von Reaktanten in die Katalysatorschicht sowie die Entfernung von Produktwasser. Jede GDL besteht in der Regel aus einem Blatt Kohlepapier, bei dem die Kohlefasern teilweise mit Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtet sind. Gase diffundieren schnell durch die Poren in der GDL. Diese Poren werden durch das hydrophobe PTFE offen gehalten, das eine übermäßige Wasseransammlung verhindert. In vielen Fällen ist die innere Oberfläche der GDL mit einer dünnen Schicht aus mit PTFE vermishtem Kohlenstoff mit großer Oberfläche beschichtet, der so genannten mikroporösen Schicht. Die mikroporöse Schicht kann dazu beitragen, das Gleichgewicht zwischen Wasserrückhaltung (die zur Aufrechterhaltung der Leitfähigkeit der Membran erforderlich ist) und Wasserabgabe (die erforderlich ist, um die Poren offen zu halten, damit Wasserstoff und Sauerstoff in die Elektroden diffundieren können) herzustellen.

Hardware

Die Membran-Elektroden-Einheit MEA ist der Teil der Brennstoffzelle, in dem Strom erzeugt wird, aber für einen effektiven MEA-Betrieb sind Hardware-Komponenten erforderlich.

Bipolare Platten

Jede einzelne MEA erzeugt unter typischen Betriebsbedingungen weniger als 1 V, aber die meisten Anwendungen erfordern höhere Spannungen. Daher werden in der Regel mehrere MEAs in Reihe geschaltet, indem sie übereinander gestapelt werden, um eine nutzbare Ausgangsspannung zu erhalten. Jede Zelle im Stapel ist zwischen zwei Bipolarplatten eingebettet, um sie von den benachbarten Zellen zu trennen. Diese Platten, die aus Metall, Kohlenstoff oder Verbundwerkstoffen bestehen können, sorgen für die elektrische Leitung zwischen den Zellen und verleihen dem Stapel physische Festigkeit. Die Oberflächen der Platten enthalten in der Regel ein "Strömungsfeld", d. h. eine Reihe von Kanälen, die in die Platte gefräst oder gestanzt sind, damit Gase über die MEA fließen können. Zusätzliche Kanäle im Inneren jeder Platte können für die Zirkulation eines flüssigen Kühlmittels verwendet werden.

Dichtungen

Jede MEA in einem Brennstoffzellenstapel ist zwischen zwei bipolaren Platten eingebettet, aber um eine gasdichte Abdichtung zu erreichen, müssen Dichtungen um die Kanten der MEA herum angebracht werden. Diese Dichtungen sind in der Regel aus einem gummiartigen Polymer hergestellt

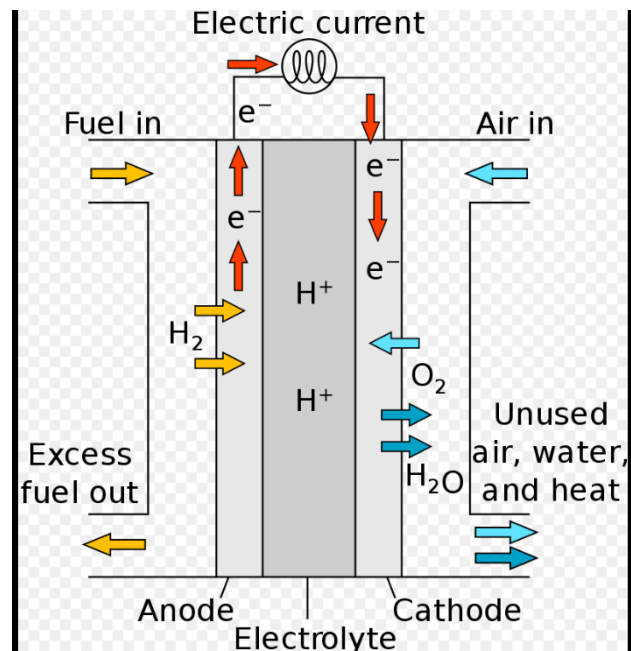
Typen von Brennstoffzellen

Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM) - auch Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen genannt - liefern eine hohe Leistungsdichte und bieten im Vergleich zu anderen Brennstoffzellen die Vorteile eines geringen Gewichts und Volumens. PEM-Brennstoffzellen verwenden ein festes Polymer als Elektrolyt und poröse Kohlenstoffelektroden, die einen Katalysator aus Platin oder einer Platinlegierung enthalten. Sie benötigen für ihren Betrieb nur Wasserstoff, Luftsauerstoff und Wasser. Sie werden in der Regel mit reinem Wasserstoff aus Speichertanks oder Reformern gespeist.

PEM-Brennstoffzellen arbeiten bei relativ niedrigen Temperaturen, etwa 80°C (176°F). Der Betrieb bei niedrigen Temperaturen ermöglicht ein schnelles Anfahren (geringere Aufwärmzeit) und führt zu einem geringeren Verschleiß der Systemkomponenten und damit zu einer längeren Lebensdauer.

Allerdings muss ein Edelmetallkatalysator (in der Regel Platin) verwendet werden, um die Elektronen und Protonen des Wasserstoffs zu trennen, was die Systemkosten erhöht. Der Platinkatalysator ist außerdem äußerst empfindlich gegenüber Kohlenmonoxidvergiftungen, so dass ein zusätzlicher Reaktor zur Reduzierung des Kohlenmonoxids im Brenngas erforderlich ist, wenn der Wasserstoff aus einem Kohlenwasserstoffbrennstoff stammt. Dieser Reaktor verursacht ebenfalls zusätzliche Kosten. PEM-Brennstoffzellen werden in erster



Linie für Verkehrsanwendungen und einige stationäre Anwendungen eingesetzt. PEM-Brennstoffzellen eignen sich besonders für den Einsatz in Fahrzeugen wie Autos, Bussen und Schwerlastkraftwagen.

Direkt-Methanol-Brennstoffzelle

Die meisten Brennstoffzellen werden mit Wasserstoff betrieben, der entweder direkt in das Brennstoffzellensystem eingespeist oder innerhalb des Brennstoffzellensystems durch Reformierung wasserstoffreicher Brennstoffe wie Methanol, Ethanol und Kohlenwasserstoffbrennstoffe erzeugt werden kann. Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) hingegen werden mit reinem Methanol betrieben, das in der Regel mit Wasser gemischt und direkt der Anode der Brennstoffzelle zugeführt wird.

Direkt-Methanol-Brennstoffzellen haben viele der für einige Brennstoffzellensysteme typischen Probleme mit der Brennstoffspeicherung nicht, da Methanol eine höhere Energiedichte als Wasserstoff hat - wenn auch weniger als Benzin oder Dieseldieselkraftstoff. Methanol ist auch einfacher zu transportieren und mit unserer derzeitigen Infrastruktur zu versorgen, da es sich wie Benzin um eine

Flüssigkeit handelt. DMFCs werden häufig zur Stromversorgung von tragbaren Brennstoffzellenanwendungen wie Handys oder Laptops eingesetzt.

Alkalische Brennstoffzelle

Alkalische Brennstoffzellen (AFCs) waren eine der ersten Brennstoffzellentechnologien, die entwickelt wurden, und sie waren der erste Typ, der in großem Umfang im US-Raumfahrtprogramm zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wasser an Bord von Raumfahrzeugen eingesetzt wurde. Diese Brennstoffzellen verwenden eine Lösung von Kaliumhydroxid in Wasser als Elektrolyt und können eine Vielzahl von Nicht-Edelmetallen als Katalysator an der Anode und Kathode verwenden. In den letzten Jahren wurden neuartige AFCs entwickelt, die eine Polymermembran als Elektrolyt verwenden. Diese Brennstoffzellen sind eng mit den herkömmlichen PEM-Brennstoffzellen verwandt, mit dem Unterschied, dass sie eine alkalische Membran anstelle einer sauren Membran verwenden. Die hohe Leistung der AFCs ist auf die Geschwindigkeit zurückzuführen, mit der die elektrochemischen Reaktionen in der Zelle ablaufen. Auch in der Raumfahrt haben sie Wirkungsgrade von über 60 % erreicht.

Eine der größten Herausforderungen für diesen Brennstoffzellentyp besteht darin, dass er anfällig für Vergiftungen durch Kohlendioxid (CO₂) ist. Tatsächlich kann schon eine geringe Menge CO₂ in der Luft die Leistung und Lebensdauer der Zelle aufgrund von Karbonatbildung drastisch beeinträchtigen. Alkalische Zellen mit flüssigen Elektrolyten können im Kreislaufbetrieb betrieben werden, was eine Regeneration des Elektrolyten ermöglicht, um die Auswirkungen der Karbonatbildung im Elektrolyten zu verringern, aber der Kreislaufbetrieb führt zu Problemen mit Nebenschlussströmen. Die Flüssigelektrolytsysteme leiden auch unter zusätzlichen Problemen wie Benetzbarkeit, erhöhter Korrosion und Schwierigkeiten bei der Handhabung von Differenzdrücken. Alkalische Membranbrennstoffzellen (AMFCs) gehen diese Probleme an und sind weniger anfällig für CO₂-Vergiftungen als AFCs mit flüssigem Elektrolyt. Allerdings beeinträchtigt CO₂ nach wie vor die Leistung, und Leistung und Haltbarkeit der AMFCs liegen noch hinter denen der PEMFCs zurück. AMFCs werden für Anwendungen im W- bis kW-Bereich in Betracht gezogen. Zu den Herausforderungen für AMFCs gehören die Toleranz gegenüber Kohlendioxid, die Leitfähigkeit und Haltbarkeit der Membran, der Betrieb bei höheren Temperaturen, das Wassermanagement, die Leistungsdichte und die Anodenelektrokatalyse.

Phosphorsäure-Brennstoffzellen

Phosphorsäure-Brennstoffzellen (PAFCs) verwenden flüssige Phosphorsäure als Elektrolyt - die Säure ist in einer teflongebundenen Siliziumkarbidmatrix enthalten - und poröse Kohlenstoffelektroden, die

einen Platinkatalysator enthalten. Die PAFC gilt als die "erste Generation" moderner Brennstoffzellen. Sie ist einer der ausgereiftesten Zellentypen und der erste, der kommerziell genutzt wird. Dieser Brennstoffzellentyp wird in der Regel für die stationäre Stromerzeugung verwendet, aber einige PAFCs wurden auch für den Antrieb großer Fahrzeuge wie z. B. Stadtbusse eingesetzt.

PAFCs sind toleranter gegenüber Verunreinigungen in fossilen Brennstoffen, die zu Wasserstoff reformiert wurden, als PEM-Zellen, die leicht durch Kohlenmonoxid "vergiftet" werden, da sich das Kohlenmonoxid an den Platinkatalysator an der Anode bindet und den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle verringert. PAFCs haben einen Wirkungsgrad von über 85 %, wenn sie für die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt werden, sind aber weniger effizient, wenn sie nur Strom erzeugen (37 %-42 %). Der Wirkungsgrad von PAFCs ist nur geringfügig höher als der von Verbrennungskraftwerken, die in der Regel mit einem Wirkungsgrad von etwa 33 % arbeiten. PAFCs sind bei gleichem Gewicht und Volumen auch weniger leistungsstark als andere Brennstoffzellen. Infolgedessen sind diese Brennstoffzellen in der Regel groß und schwer. PAFCs sind auch teuer. Sie erfordern eine viel höhere Beladung mit teurem Platinkatalysator als andere Arten von Brennstoffzellen, was die Kosten in die Höhe treibt.

Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen

Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFCs) werden derzeit für erdgas- und kohlebasierte Kraftwerke für Stromversorgungsunternehmen sowie für industrielle und militärische Anwendungen entwickelt. MCFCs sind Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die einen Elektrolyten verwenden, der aus einer geschmolzenen Karbonatsalzmischung besteht, die in einer porösen, chemisch inerten keramischen Lithiumaluminiumoxid-Matrix suspendiert ist. Da sie bei hohen Temperaturen von 650°C (ca. 1.200°F) arbeiten, können an der Anode und Kathode Nicht-Edelmetalle als Katalysatoren verwendet werden, was die Kosten senkt.

Der verbesserte Wirkungsgrad ist ein weiterer Grund dafür, dass MCFCs im Vergleich zu phosphorsauren Brennstoffzellen erhebliche Kosteneinsparungen ermöglichen. Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen können in Verbindung mit einer Turbine einen Wirkungsgrad von annähernd 65 % erreichen, was deutlich über dem Wirkungsgrad von 37 % bis 42 % einer phosphorsauren Brennstoffzellenanlage liegt. Wenn die Abwärme aufgefangen und genutzt wird, kann der Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffs bei über 85 % liegen.

Anders als alkalische, phosphorsaure und PEM-Brennstoffzellen benötigen MCFCs keinen externen Reformier, um Brennstoffe wie Erdgas und Biogas in Wasserstoff umzuwandeln. Bei den hohen Temperaturen, bei denen MCFCs arbeiten, werden Methan und andere leichte Kohlenwasserstoffe in

diesen Brennstoffen in der Brennstoffzelle selbst durch einen Prozess namens interne Reformierung in Wasserstoff umgewandelt, was ebenfalls die Kosten senkt.

Der Hauptnachteil der derzeitigen MCFC-Technologie ist die Haltbarkeit. Die hohen Temperaturen, bei denen diese Zellen arbeiten, und das verwendete korrosive Elektrolyt beschleunigen den Zusammenbruch der Komponenten und die Korrosion, was die Lebensdauer der Zellen verkürzt. Die Wissenschaftler erforschen derzeit korrosionsbeständige Materialien für Komponenten sowie Brennstoffzellenkonstruktionen, die die Lebensdauer der Zellen von derzeit 40.000 Stunden (~5 Jahre) verdoppeln, ohne dass die Leistung abnimmt.

Festoxid-Brennstoffzellen

Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) verwenden eine harte, nicht poröse Keramikverbindung als Elektrolyt. SOFCs haben einen Wirkungsgrad von etwa 60 % bei der Umwandlung von Brennstoff in Strom. Bei Anwendungen, die darauf ausgelegt sind, die Abwärme des Systems abzufangen und zu nutzen (Kraft-Wärme-Kopplung), könnte der Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffnutzung 85 % übersteigen.

SOFCs arbeiten bei sehr hohen Temperaturen - bis zu 1.000°C (1.830°F). Durch den Hochtemperaturbetrieb entfällt der Bedarf an Edelmetallkatalysatoren, wodurch die Kosten gesenkt werden. Außerdem können SOFCs Brennstoffe intern reformieren, was die Verwendung einer Vielzahl von Brennstoffen ermöglicht und die Kosten für den Einbau eines Reformers in das System reduziert. SOFCs sind auch der schwefelresistenteste Brennstoffzellentyp; sie können mehrere Größenordnungen mehr Schwefel vertragen als andere Zelltypen. Darüber hinaus werden sie nicht durch Kohlenmonoxid vergiftet, das sogar als Brennstoff verwendet werden kann. Dank dieser Eigenschaft können SOFCs Erdgas, Biogas und aus Kohle gewonnene Gase verwenden. Der Hochtemperaturbetrieb hat Nachteile. Er führt zu einem langsamen Anfahren und erfordert eine beträchtliche thermische Abschirmung, um die Wärme zurückzuhalten und das Personal zu schützen, was für Versorgungsanwendungen akzeptabel sein mag, aber nicht für den Transport. Die hohen Betriebstemperaturen stellen auch strenge Anforderungen an die Haltbarkeit der Materialien. Die Entwicklung kostengünstiger Materialien mit hoher Haltbarkeit bei den Betriebstemperaturen der Zellen ist die wichtigste technische Herausforderung für diese Technologie.

Derzeit erforschen Wissenschaftler das Potenzial für die Entwicklung von SOFCs mit niedrigeren Temperaturen, die bei oder unter 700 °C arbeiten, weniger Probleme mit der Haltbarkeit haben und weniger kosten. SOFCs für niedrigere Temperaturen haben jedoch noch nicht die Leistung der Systeme für höhere Temperaturen erreicht, und Stack-Materialien, die in diesem niedrigeren Temperaturbereich funktionieren, befinden sich noch in der Entwicklung.

Reversible Brennstoffzellen

Reversible Brennstoffzellen erzeugen Strom aus Wasserstoff und Sauerstoff und erzeugen Wärme und Wasser als Nebenprodukte, genau wie andere Brennstoffzellen. Reversible Brennstoffzellensysteme können jedoch auch Strom aus Sonnenenergie, Windenergie oder anderen Quellen nutzen, um Wasser durch einen als Elektrolyse bezeichneten Prozess in Sauerstoff und Wasserstoff aufzuspalten. Reversible Brennstoffzellen können bei Bedarf Strom liefern, aber in Zeiten hoher Stromerzeugung durch andere Technologien (z. B. wenn starke Winde zu einem Überschuss an verfügbarem Windstrom führen), können reversible Brennstoffzellen die überschüssige Energie in Form von Wasserstoff speichern. Diese Fähigkeit zur Energiespeicherung könnte eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von intermittierenden erneuerbaren Energietechnologien sein.

Vergleich und Zusammenfassung der verschiedenen Brennstoffzellen

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	Typical Stack Size	Electrical Efficiency (LHV)	Applications	Advantages	Challenges
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)	Perfluorosulfonic acid	<120°C	<1 kW - 100 kW	60% direct H ₂ ⁱ 40% reformed fuel ⁱⁱ	<ul style="list-style-type: none"> Backup power Portable power Distributed generation Transportation Specialty vehicles 	<ul style="list-style-type: none"> Solid electrolyte reduces corrosion & electrolyte management problems Low temperature Quick start-up and load following 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive catalysts Sensitive to fuel impurities
Alkaline (AFC)	Aqueous potassium hydroxide soaked in a porous matrix, or alkaline polymer membrane	<100°C	1 - 100 kW	60% ⁱⁱⁱ	<ul style="list-style-type: none"> Military Space Backup power Transportation 	<ul style="list-style-type: none"> Wider range of stable materials allows lower cost components Low temperature Quick start-up 	<ul style="list-style-type: none"> Sensitive to CO₂ in fuel and air Electrolyte management (aqueous) Electrolyte conductivity (polymer)
Phosphoric Acid (PAFC)	Phosphoric acid soaked in a porous matrix or imbedded in a polymer membrane	150 - 200°C	5 - 400 kW, 100 kW module (liquid PAFC); <10 kW (polymer membrane)	40% ^{iv}	<ul style="list-style-type: none"> Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> Suitable for CHP Increased tolerance to fuel impurities 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive catalysts Long start-up time Sulfur sensitivity
Molten Carbonate (MCFC)	Molten lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a porous matrix	600 - 700°C	300 kW - 3 MW, 300 kW module	50% ^v	<ul style="list-style-type: none"> Electric utility Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Suitable for CHP Hybrid/gas turbine cycle 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature corrosion and breakdown of cell components Long start-up time Low power density
Solid Oxide (SOFC)	Yttria stabilized zirconia	500 - 1000°C	1 kW - 2 MW	60% ^{vi}	<ul style="list-style-type: none"> Auxiliary power Electric utility Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Solid electrolyte Suitable for CHP Hybrid/gas turbine cycle 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature corrosion and breakdown of cell components Long start-up time Limited number of shutdowns

Abbildung 5 <http://energy.asu.edu.jo/index.php/2016-08-28-08-51-21/hydrogen-fuel-cells>

Vor- und Nachteile von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen

Grüner Wasserstoff, der durch Elektrolyse (ein energieintensives Verfahren) und aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird, ist eine kostenintensive Option, die nur etwa 5 % der gesamten H₂-Produktion ausmacht. Gegenwärtig stammt der größte Teil der weltweiten Wasserstoffproduktion aus fossilen Brennstoffquellen (Methangasreformierung) und wird dies auch in den nächsten Jahrzehnten tun. Mit dem Ausbau der Produktionskapazitäten für effizientere und kostengünstigere Elektrolyseure ist jedoch zu erwarten, dass die Produktionskosten parallel zur Einführung ausgereifter Technologien und Kapazitäten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien deutlich sinken werden.

Im Hinblick auf ein sicheres, widerstandsfähiges und dekarbonisiertes Energiesystem werden die Produktion und die Speicherung von Wasserstoff in großen Mengen eine wichtige Rolle spielen, um das intermittierende Angebot an Energie aus erneuerbaren Energiequellen mit dem Bedarf der Endverbraucher (d. h. für Netzstrom, Heizung in Haushalten und Industrie sowie Kraftstoff für den Verkehr) auszugleichen.

Die Debatten über die Vor- und Nachteile von Wasserstoff-Brennstoffzellen gehen weiter, aber trotz der derzeitigen Einschränkungen ist Wasserstoff immer noch eine umweltfreundliche Alternative zu fossilen Brennstoffen und kann mit Hilfe der Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie für eine breite Palette von Industrieanlagen und Verkehrsmitteln flexibel und mit hoher Dichte als Energiequelle und Antrieb genutzt werden.

Was sind die wichtigsten Vorteile

Die Wasserstoff-Brennstoffzellen- und Elektrolyseurtechnologie bietet mehrere Vorteile gegenüber anderen Energiequellen, darunter:

1. Erneuerbar und leicht verfügbar

Wasserstoff ist das am häufigsten vorkommende Element im Universum und trotz der Herausforderungen, die mit seiner Gewinnung aus Wasser verbunden sind, eine einzigartig reichhaltige und erneuerbare Energiequelle, die sich perfekt für unseren künftigen kohlenstofffreien Energiebedarf eignet.

2. Wasserstoff ist eine saubere und flexible Energie zur Unterstützung kohlenstofffreier Energiestrategien

Wasserstoff-Brennstoffzellen sind eine inhärent saubere Energiequelle, die während des Betriebs keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt hat, da als Nebenprodukte lediglich Wärme und Wasser anfallen. Im Gegensatz zu Biokraftstoff oder Wasserkraft sind für die Erzeugung von Wasserstoff keine großen Landflächen erforderlich. Die NASA arbeitet sogar daran, Wasserstoff als Ressource zu nutzen, wobei das als Nebenprodukt anfallende Wasser als Trinkwasser für die Astronauten verwendet wird. Dies zeigt, dass Wasserstoff-Brennstoffzellen eine ungiftige Brennstoffquelle sind und damit Kohle, Erdgas und Kernenergie, die alle entweder potenziell gefährlich oder schwer zu beschaffen sind, überlegen sind. Die Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff wird eine wichtige Rolle bei der weiteren Entwicklung der erneuerbaren Energien spielen, indem sie die intermittierenden Versorgungsmodalitäten mit den anspruchsvollen Anforderungen der Endverbraucher in Einklang bringt und so die Notwendigkeit erheblicher Anfangsinvestitionen in den Ausbau der Netzinfrastruktur vermeidet.

3. Leistungsstärker und energieeffizienter als fossile Brennstoffe

Die Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie bietet eine Energiequelle mit hoher Dichte und guter Energieeffizienz. Wasserstoff hat den höchsten Energiegehalt aller gängigen Kraftstoffe (nach Gewicht). Gasförmiger und flüssiger Hochdruck-Wasserstoff hat etwa die dreifache gravimetrische Energiedichte (etwa 120 MJ/kg) von Diesel und Flüssiggas und eine ähnliche volumetrische Energiedichte wie Erdgas. Diese

4. Hocheffizient im Vergleich zu anderen Energiequellen

Wasserstoff-Brennstoffzellen sind effizienter als viele andere Energiequellen, einschließlich vieler grüner Energielösungen. Diese Effizienz des Brennstoffs ermöglicht die Erzeugung von mehr Energie pro Pfund Brennstoff. Ein herkömmliches Verbrennungskraftwerk beispielsweise erzeugt Strom mit einem Wirkungsgrad von 33-35 %, während der Wirkungsgrad von Wasserstoffbrennstoffzellen bis zu 65 % beträgt. Dasselbe gilt für Fahrzeuge, bei denen Wasserstoff-Brennstoffzellen 40-60 % der Energie des Kraftstoffs nutzen und gleichzeitig den Kraftstoffverbrauch um 50 % senken.

5. Fast Null Emissionen

Wasserstoff-Brennstoffzellen erzeugen keine Treibhausgasemissionen wie fossile Brennstoffe, wodurch die Umweltverschmutzung verringert und die Luftqualität verbessert wird.

6. Reduziert den CO₂-Fußabdruck

Da Wasserstoff-Brennstoffzellen nahezu emissionsfrei sind, setzen sie keine Treibhausgase frei, was bedeutet, dass sie während ihres Einsatzes keinen Kohlenstoff-Fußabdruck hinterlassen.

7. Schnellladezeiten

Die Ladezeit für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Aggregate ist extrem schnell, ähnlich wie bei herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE) und deutlich schneller als bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Während Elektrofahrzeuge zwischen 30 Minuten und mehreren Stunden zum Aufladen benötigen, können Wasserstoff-Brennstoffzellen in weniger als fünf Minuten wieder aufgeladen werden. Diese schnelle Ladezeit bedeutet, dass wasserstoffbetriebene Fahrzeuge die gleiche Flexibilität bieten wie herkömmliche Autos.

8. Keine Lärmbelästigung



Wasserstoff-Brennstoffzellen verursachen keine Lärmbelastung wie andere erneuerbare Energiequellen, z. B. die Windenergie. Das bedeutet auch, dass wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, ähnlich wie Elektroautos, viel leiser sind als solche mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren.

9. Keine visuelle Verschmutzung

Einige kohlenstoffarme Energiequellen wie Windenergie- und Biobrennstoffkraftwerke können einen unschönen Anblick bieten, aber Wasserstoff-Brennstoffzellen haben nicht den gleichen Platzbedarf, so dass auch die optische Belastung geringer ist.

10. Lange Nutzungszeiten

Wasserstoff-Brennstoffzellen bieten einen höheren Wirkungsgrad in Bezug auf die Nutzungszeiten. Ein Wasserstofffahrzeug hat die gleiche Reichweite wie ein Fahrzeug, das mit fossilen Brennstoffen betrieben wird (etwa 300 Meilen). Diese ist höher als die von Elektrofahrzeugen, die zunehmend mit Brennstoffzellenaggregaten als "Reichweitenverlängerer" entwickelt werden. Wasserstoff-Brennstoffzellen werden auch nicht wesentlich von der Außentemperatur beeinflusst und verschlechtern sich nicht bei kaltem Wetter, wie dies bei Elektrofahrzeugen der Fall ist. Dieser Vorteil wird noch verstärkt, wenn man ihn mit den kurzen Ladezeiten kombiniert.

11. Ideal für den Einsatz in abgelegenen Gebieten

Wenn die örtlichen Gegebenheiten es zulassen, könnte sich die Verfügbarkeit von Wasserstoff durch lokale Erzeugung und Speicherung als Alternative zu Strom und Heizung auf Dieselbasis in abgelegenen Gebieten erweisen. Dadurch wird nicht nur die Notwendigkeit des Transports von Kraftstoffen verringert, sondern auch das Leben der Menschen in entlegenen Regionen verbessert, da ein umweltfreundlicher Kraftstoff aus einer leicht verfügbaren natürlichen Ressource gewonnen werden kann.

12. Vielseitigkeit der Nutzung

Mit dem Fortschritt der Technologie werden Wasserstoff-Brennstoffzellen in der Lage sein, Energie für eine Reihe von stationären und mobilen Anwendungen zu liefern. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge sind nur ein Beispiel dafür, aber sie könnten auch in kleineren Anwendungen wie Haushaltsgeräten und größeren Heizsystemen eingesetzt werden. Ähnlich wie bei Verbrennungsmotoren sind die Funktionen der Energiespeicherkapazität (d. h. des Kraftstofftanks) und der Motorgröße entkoppelt, im Gegensatz zu batteriegestützten Antrieben (bei denen die Leistung linear mit der Masse skaliert), was eine große Flexibilität bei der Konstruktion ermöglicht.

13. Demokratisierung der Energieversorgung

Wasserstoff-Brennstoffzellen haben das Potenzial, die Abhängigkeit einer Nation von fossilen Brennstoffen zu verringern, was zu einer Demokratisierung der Energie- und Stromversorgung auf der ganzen Welt beitragen wird. Diese größere Unabhängigkeit wird sich für viele Länder, die derzeit von der Versorgung mit fossilen Brennstoffen abhängig sind, als Vorteil erweisen. Natürlich wird dadurch auch das Problem steigender Preise für fossile Brennstoffe vermieden, wenn die Vorräte abnehmen.

Was sind die Nachteile von Elektrolyseuren und Wasserstoffbrennstoffzellen?

Trotz der vielen Vorteile gibt es noch einige Nachteile und Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt:

1. Wasserstoffextraktion

Obwohl Wasserstoff das am häufigsten vorkommende Element im Universum ist, existiert er nicht von selbst, sondern muss durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen oder von fossilen Brennstoffen aus Kohlenstoff getrennt werden. Beide Prozesse erfordern eine erhebliche Menge an Energie, um sie durchzuführen. Diese Energie kann höher sein als die aus dem Wasserstoff selbst gewonnene, und sie ist auch teuer. Darüber hinaus erfordert diese Gewinnung in der Regel die Verwendung fossiler Brennstoffe, was ohne CCS die Umweltfreundlichkeit von Wasserstoff untergräbt.

2. Investitionen sind erforderlich

Wasserstoff-Brennstoffzellen brauchen Investitionen, um so weit entwickelt zu werden, dass sie zu einer wirklich brauchbaren Energiequelle werden. Dazu ist auch der politische Wille erforderlich, Zeit und Geld in die Entwicklung zu investieren, um die Technologie zu verbessern und auszubauen. Vereinfacht ausgedrückt besteht die globale Herausforderung für die Entwicklung einer weit verbreiteten und nachhaltigen Wasserstoff-Energie darin, wie man am besten schrittweise und auf möglichst kosteneffiziente Weise die "Angebots- und Nachfragekette" aufbaut.

3. Kosten von Rohstoffen

Edelmetalle wie Platin und Iridium werden in der Regel als Katalysatoren in Brennstoffzellen und einigen Arten von Wasserelektrolyseuren benötigt, was bedeutet, dass die Anschaffungskosten für Brennstoffzellen (und Elektrolyseure) hoch sein können. Diese hohen Kosten haben einige davon abgehalten, in die Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie zu investieren. Diese Kosten müssen gesenkt werden, damit Wasserstoff-Brennstoffzellen zu einer realistischen Brennstoffquelle für alle werden.

4. Regulatorische Fragen

Es gibt auch Hindernisse im Zusammenhang mit regulatorischen Fragen bezüglich des Rahmens, der kommerzielle Einführungsmodelle definiert. Ohne klare rechtliche Rahmenbedingungen, die es kommerziellen Projekten ermöglichen, ihre Kosten- und Ertragsbasis zu verstehen, kann es für kommerzielle Projekte schwierig sein, eine finanzielle Investitionsentscheidung (FID) zu treffen.

5. Gesamtkosten

Die Kosten für eine Energieeinheit aus Wasserstoff-Brennstoffzellen sind derzeit höher als die anderer Energiequellen, einschließlich Solarzellen. Dies kann sich im Zuge des technischen Fortschritts ändern, aber derzeit sind diese Kosten ein Hindernis für die breite Nutzung von Wasserstoff, auch wenn er nach seiner Herstellung effizienter ist. Diese Kosten wirken sich auch auf spätere Kosten aus, z. B. auf den Preis wasserstoffbetriebener Fahrzeuge, so dass eine breite Einführung derzeit unwahrscheinlich ist.

6. Wasserstoffspeicherung

Die Speicherung und der Transport von Wasserstoff sind komplexer als bei fossilen Brennstoffen. Dies bedeutet, dass für Wasserstoff-Brennstoffzellen als Energiequelle zusätzliche Kosten zu berücksichtigen sind.

7. Infrastruktur

Da fossile Brennstoffe bereits seit Jahrzehnten verwendet werden, ist die Infrastruktur für diese Energieversorgung bereits vorhanden. Die großflächige Einführung der Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie für Automobilanwendungen wird eine neue Betankungsinfrastruktur erfordern, obwohl für Langstrecken Anwendungen wie LKWs und Lieferwagen wahrscheinlich die Betankung von Anfang bis Ende genutzt werden wird.

8. Leicht entflammbar

Wasserstoff ist ein leicht entzündlicher Brennstoff, was verständlicherweise zu Sicherheitsbedenken führt. Wasserstoffgas verbrennt in der Luft in Konzentrationen von 4 bis 75 %.

ERGEBNIS 3 - Normen und Vorschriften für die Planung, Installation, Inbetriebnahme und Wartung von Systemen der Elektrolyseur- und Brennstoffzellentechnologie

Grundsätze für die Sicherheitsplanung

Da Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien auf dem Markt immer mehr Fuß fassen, sind sichere Praktiken bei der Herstellung, Lagerung, Verteilung und Verwendung von Wasserstoff für sichere Demonstrationen, eine positive Wahrnehmung und eine breite öffentliche Akzeptanz und Vertrauen unerlässlich. Ein gründliches und integriertes Konzept für die Sicherheitsplanung, -überwachung und -berichterstattung von Projekten muss technische und organisatorische Ebenen berücksichtigen und alle betroffenen Parteien durch geeignete Kommunikation und Maßnahmen einbeziehen. Im Falle einer Systeminstallation würden zu den beteiligten Parteien beispielsweise Wasserstoff-/Brennstoffzellen-/Ausrüstungslieferanten, Anlagenbetreiber, Wartungs-/Reparaturdienstleister, Behörden, potenzielle Kunden, Sicherheitsingenieure und Ersthelfer gehören. Die folgenden kritischen Elemente tragen dazu bei, dass die Sicherheit in die Jahres- und Mehrjahresprogramme, Projekte, Systemdemonstrationen und andere Aktivitäten integriert wird.



Reactions of an Acid

Moist blue litmus

Detection of hydrogen [H₂]

Observation	Inference
1. Colourless gas	Cl ₂ and NO ₂ are not present
2. Odourless gas	Can be O ₂ , H ₂ , CO ₂ or water vapours
3. Neutral towards litmus	Can be O ₂ , H ₂ or water vapours
4. The burning wooden splint goes off and gas burns with pale blue flame producing pop sound	It is a combustible gas if burns explosively in air. Gas is hydrogen

* Click on each observation to know more

TutorVista.com™

Frühzeitige Identifizierung von Sicherheitsexpertise

In vielen Fällen kann wertvolle sicherheitsspezifische Erfahrung vorhanden sein, und daher ist es ein einfacher und wesentlicher Bestandteil der Sicherheitsplanung, dieses Fachwissen direkt zu ermitteln

und zu nutzen. Sicherheitstechnisches Fachwissen sollte bereits in einer frühen Phase eines Programms oder Projekts hinzugezogen werden, um sicherzustellen, dass sicherheitstechnische Konstruktionsmerkmale, Praktiken und Verfahren bei der Projektdurchführung konsequent angewandt werden. Der Arbeitsumfang könnte Folgendes umfassen, ist aber nicht darauf beschränkt:

- Überprüfung der Planungsdokumente, um sicherzustellen, dass Sicherheitsfragen angesprochen und budgetiert werden, um die wichtigsten Wissenslücken und technologischen Engpässe in den jeweiligen Projekten, dem bevorstehenden Jahresarbeitsplan (AWP) und in einer Aktualisierung des Mehrjahresarbeitsplans (MAWP) zu schließen.
- Überprüfung von Entwürfen mit der Absicht, ein Projekt zu genehmigen und/oder bei der Genehmigung eines Projekts mitzuwirken.
- Inspektion und Durchführung regelmäßiger Audits der Anlage, um eine sichere Ausführung des Projekts zu gewährleisten.
- Untersuchung der gewonnenen Erkenntnisse und Berichterstattung über Unfälle, Zwischenfälle und Beinaheunfälle, um die gewonnenen Erkenntnisse bei entsprechenden Aktualisierungen des Sicherheitsplans anzuwenden.
- Erarbeitung weiterer sicherheitsrelevanter Managementthemen.
- Formulierung von Wissenslücken und technologischen Engpässen, die im Rahmen eines Projekts identifiziert wurden und die in ähnlichen Projekten in Zukunft angegangen werden sollen. Das EHSP ist bereit, in dieser Hinsicht zu helfen und stellt sein Fachwissen zur Verfügung, falls das Projektkonsortium nicht über eigenes Sicherheitsfachwissen verfügt oder eine unabhängige Meinung zu den oben genannten Aspekten wünscht.

Einhaltung von Vorschriften, Codes und Normen Sicherheit

Einhaltung von Vorschriften, Kodizes und Normen Bei der Sicherheitsplanung müssen die einschlägigen Vorschriften, Kodizes und Normen (RCS) berücksichtigt werden, einschließlich internationaler, nationaler und regionaler Vorschriften. Vorschriften legen Mindestsicherheitsanforderungen fest und verlangen zumindest implizit die Einhaltung des Stands der Technik, der nicht nur über Normen definiert wird, sondern sich auch auf Leitlinien für bewährte Verfahren, Branchenkodizes, wissenschaftliche Veröffentlichungen usw. bezieht. Der Einsatz von RCS erfordert also von den Entwicklern und anderen Beteiligten die Nutzung neuer Erkenntnisse, die noch nicht in RCS enthalten sind, aber an anderer Stelle veröffentlicht wurden. So sind beispielsweise bewährte Sicherheitspraktiken und gelernte Lektionen, die eine Fülle von Erfahrungen mit neuen Erkenntnissen und Einsichten verbinden, wichtige Aspekte der kontinuierlichen und vorrangigen Beachtung der Sicherheit.

Die Einhaltung geltender Vorschriften und einschlägiger Normen ist von wesentlicher Bedeutung, um das Vertrauen der Öffentlichkeit in Wasserstoffprojekte zu gewährleisten, insbesondere bei der Demonstration oder Einführung neuer Technologien. Wenn eine strikte Einhaltung der Vorschriften für eine bestimmte Konstruktion, einen bestimmten Einbau und/oder Betrieb nicht möglich ist und Alternativen vorgeschlagen werden, sollte eine solide technische Grundlage von allen Beteiligten, einschließlich Interessengruppen und Behörden, formell vereinbart werden.

Die Projektteams sollten die lokalen Behörden bereits in einer frühen Phase des Projekts konsultieren. Eine frühzeitige Einbindung ermöglicht ein besseres Verständnis der lokalen Anforderungen, die in einigen Fällen restriktiver sein können als die europäischen oder nationalen Vorschriften. Andererseits hilft der frühzeitige Kontakt auch, die Behörden über die neuen Technologien zu informieren und ihnen genügend Zeit für die Beschaffung weiterer unabhängiger Informationen zu geben.

Potenzielle Gefahren, Fehlermechanismen und Zwischenfälle

Potenzielle Gefahren, Fehlermechanismen und damit zusammenhängende Vorfälle im Zusammenhang mit einem Arbeitsprozess oder einem System sollten immer identifiziert, analysiert, gemeldet (in einschlägigen Wissensdatenbanken, z. B. Handbüchern, Papieren usw., festgehalten) und im Rahmen einer soliden Sicherheitsplanung und eines umfassenden Wasserstoffsicherheits-Engineerings, das über die Empfehlungen dieses Dokuments hinausgeht, beseitigt oder gemildert werden. Alle relevanten Objekte oder Aspekte, die durch ein Versagen beeinträchtigt werden können, sollten berücksichtigt werden, auch Ereignisse mit geringer Häufigkeit und großen Auswirkungen.

Das allgemeine Schutzziel besteht also darin, potenzielle Gefahren und damit verbundene Risiken auszuschließen oder zumindest zu minimieren, um Auswirkungen auf die folgenden Bereiche zu verhindern:

- Menschen

Gefahren, die ein Verletzungs- oder Lebensrisiko für Menschen darstellen, müssen ermittelt und beseitigt oder gemindert werden. Eine vollständige Sicherheitsbewertung berücksichtigt nicht nur das Personal, das direkt an der Arbeit beteiligt ist, sondern auch andere, die durch diese Gefahren gefährdet sind.

- Eigentum.

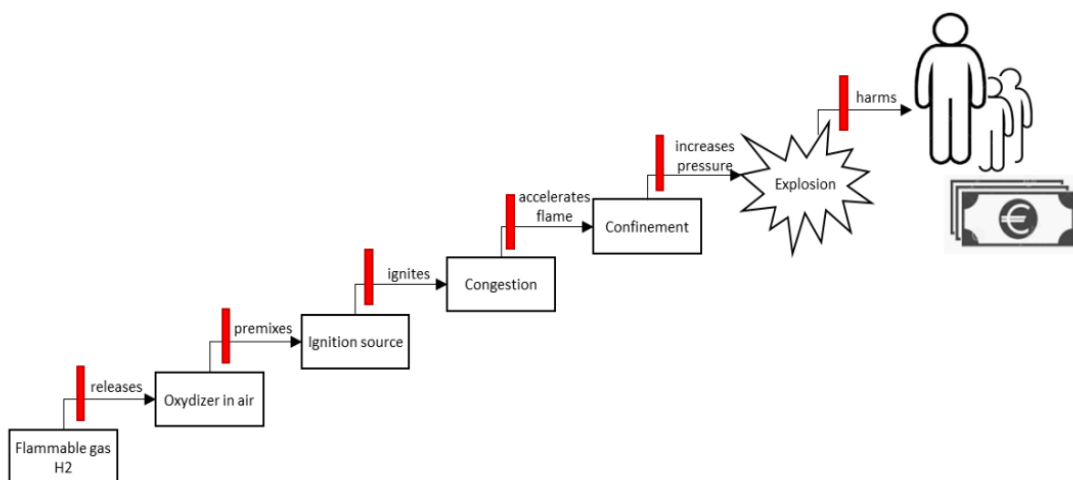
Die Beschädigung oder der Verlust von Ausrüstungen oder Einrichtungen muss verhindert oder minimiert werden. Schäden an Ausrüstungen können sowohl die Ursache von Zwischenfällen als auch die Folge von Zwischenfällen sein. Ein Anlagenausfall kann zu Kollateralschäden an nahe gelegenen Anlagen und Gegenständen führen, die dann weitere Ausfälle von Anlagen auslösen

oder sogar zu zusätzlichen Gefahren und Risiken führen können, z. B. durch den Dominoeffekt. Eine wirksame Sicherheitsplanung, -überwachung und -berichterstattung berücksichtigt und minimiert das ernsthafte Risiko von Anlagen- und Sachschäden.

- Umwelt

Eine Schädigung der Umwelt muss verhindert werden. Jeder Aspekt der natürlichen oder bebauten Umwelt, der durch den Ausfall eines Wasserstoffsystems oder einer Infrastruktur geschädigt werden kann, ist zu ermitteln und zu analysieren. Eine Qualifizierung der Fehlermöglichkeiten, die zu Umweltschäden führen können, muss in Betracht gezogen werden.

Bewährte Sicherheitspraktiken versuchen, wesentliche Elemente in dieser Kette von Ereignissen entweder zu beseitigen oder zumindest einzuschränken oder Barrieren an den Übergängen zu errichten. Das Eingreifen in einen einzelnen Block kann die Gefahren und die damit verbundenen Risiken verringern, die Folgen begrenzen oder sogar einen Unfall verhindern. Je früher jedoch der Eskalationspfad unterbrochen wird, desto zuverlässiger und kosteneffizienter sind die Abmilderungs- oder Präventionsmaßnahmen



Selbst wenn die Eskalation in einem frühen Stadium erfolgreich gestoppt werden kann, bleiben bestimmte Gefahren bestehen. Eine kleine, nicht entzündete Freisetzung oder ein Düsenbrand beispielsweise führt nicht zu Explosionsbelastungen, aber zu erheblichen physikalischen Gefahren oder thermischen Belastungen. Das Bersten einer unter Druck stehenden Leitung oder eines Behälters führt auch ohne chemische Reaktion zu schweren Explosionsbelastungen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die abgeleiteten Sicherheitsgrundsätze einfache Ziele formulieren, die allgemein

verständlich sind und als präventive Barrieren oder zumindest als risikomindernde Maßnahmen für die verschiedenen Elemente der Ereigniskette wirken.



Number	Safety Principle	Explosion Protection Tier
1	Limit hydrogen inventories, especially indoors, to what is strictly necessary.	1 st Tier
2	Avoid or limit formation of flammable mixture, by applying appropriate ventilation systems, for instance.	
3	Carry out ATEX zoning analysis.	
4	Combine hydrogen leak or fire detection and countermeasures.	2 nd Tier
5	Avoid ignition sources using proper materials or installations in the different ATEX zones, remove electrical systems or provide electrical grounding, etc.	
6	Avoid congestion, reduce turbulence promoting flow obstacles (volumetric blockage ratio) in respective ATEX zones.	3 rd Tier
7	Avoid confinement. Place storage in the free, or use large openings which are also supporting natural ventilation.	
8	Provide efficient passive barriers in case of active barriers deactivation by whatever reason.	
9	Train and educate staff in hydrogen safety.	Organisational Safety Principles
10	Report near misses, incidents and accidents to suitable databases and include lessons learned in your safety plan	

Diese Sicherheitsgrundsätze sollten sich im Sicherheitsplan, in jedem Verfahren zur Ermittlung von Sicherheitsschwachstellen oder Gefahren und in jedem Risikobewertungsverfahren widerspiegeln. Jeder mit einer Sicherheitsüberprüfung beauftragte Sachverständige muss diese Grundsätze im Hinterkopf haben. Sie ersetzen jedoch weder die gesetzlichen Anforderungen, noch die umfassende Wasserstoffsicherheitstechnik, noch die detaillierte Risikobewertung, die schließlich von RCS gefordert wird. Sie ermöglichen es den Beteiligten, die Sicherheit in den verschiedenen Phasen der Konzeption, der Durchführung und des Betriebs eines Verfahrens, bei dem Wasserstoff verwendet wird, auf sehr grundlegende Weise zu berücksichtigen.

Sicherheitsplan

Ein Sicherheitsplan befasst sich mit potenziellen Bedrohungen und Auswirkungen auf Menschen, Eigentum und die natürliche und gebaute Umwelt sowie mit den entsprechenden Präventions-, Abmilderungs- und Schutzmaßnahmen. Als integraler Bestandteil jedes Projekts, jeder

Wasserstoffanlage und jedes Brennstoffzellensystems sollte ein Sicherheitsplan fundierte und durchdachte Überlegungen zur Identifizierung und Analyse von Sicherheitslücken, zur Beseitigung oder Beherrschung von Gefahren und zu Maßnahmen zur Risikominderung enthalten, um das Risiko auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Eine angemessene Kommunikation ist ebenso wichtig und sollte im Sicherheitsplan beschrieben werden, einschließlich der Art und Weise, wie der Plan überwacht wird und wie über die Ergebnisse der Aktivitäten berichtet wird. Eine besondere Herausforderung für eine angemessene Kommunikation besteht bei Projekten, bei denen die Arbeiten in der Regel von mehreren Organisationen durchgeführt werden. Sicherheitspläne sollten "lebende Dokumente" sein, die die Art der durchgeführten Arbeiten, die Faktoren menschlichen Versagens und die Art der Lebensdauer der Ausrüstung berücksichtigen und den unvermeidlichen Änderungen Rechnung tragen, die bei der Projektentwicklung und -durchführung auftreten. Ein Sicherheitsplan sollte nach einem abgestuften Konzept erstellt werden, das auf dem Grad der Gefährdung, den damit verbundenen Risiken und der Komplexität basiert.

Der Plan sollte alle durchgeführten Arbeiten abdecken, einschließlich experimenteller/operativer Tätigkeiten, wobei der Schwerpunkt auf den Aspekten liegen sollte, die Kenntnisse über die Sicherheit von Wasserstoff, gefährliche Materialien, Druckgeräte, Besonderheiten des Wasserstoffsystems usw. betreffen. Es kann vorkommen, dass während der Projektantragsphase ein vorläufiger Sicherheitsplan erstellt wird, wie in einer Ausschreibung gefordert. In diesen Fällen sollten Elemente wie Gefahren und damit verbundene Risikoanalysen, Vorbeugungs- und Abschwächungstechniken allgemeiner behandelt werden, wobei der Schwerpunkt darauf liegen sollte, welche Gefahren und Risikoanalysen in der ersten Entwurfsphase nach Erteilung des Zuschlags für das Projekt durchgeführt werden sollen. Die Elemente eines guten Sicherheitsplans werden im Folgenden zusammengefasst, wobei dies nicht als erschöpfende und verbindliche Liste von Sicherheitsüberlegungen für alle Projekte angesehen werden sollte.

Ausführliche und verbindliche Liste von Sicherheitsaspekten für alle Projekte:

- Beschreibung der Arbeit
- Planung der Projektsicherheit
 - a. Politiken und verfügbare Erfahrungen
 - b. Sicherheitsüberprüfungen
 - c. Plan zur Risikominderung
 - d. Verfahren
 - e. Arbeitsschritte
 - f. Handhabung und Transport von Proben

- g. Ausrüstung und mechanische Integrität
- h. Dokumentation zur Projektsicherheit
- Betriebsmanagement
 - a. Ausbildung des Personals
 - b. Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung
 - c. Sicherheitsrelevante Ereignisse und gewonnene Erkenntnisse
 - d. Notfallmaßnahmen
 - e. Selbstkontrollen
 - f. Verwaltung von Änderungsverfahren
- Zusätzliche Dokumentation und Berichterstattung
 - a. Flussdiagramm mit Darstellung der Ausrüstung (z. B. PID) einschließlich Funktionsbeschreibung der einzelnen Komponenten
 - b. Vorläufiges Layout
 - c. Ausführliche Erörterung von RCS und im Falle einer detaillierten Leistungsanalyse zur Klärung der Frage, ob Vorschriften oder Normen Alternativen für vereinfachte Korrelationen oder Anforderungen zulassen, wie z. B. tabellarische Sicherheitsabstandsregeln usw.
 - d. Einzelheiten zur Sicherheitsplanung, deren Überwachung und Aktualisierung

Checklisten für Installation und Inbetriebnahme

Bei der Projektinbetriebnahme wird sichergestellt, dass alle Systeme und Komponenten eines Gebäudes oder einer Industrieanlage gemäß den betrieblichen Anforderungen des Eigentümers oder Endkunden geplant, installiert, getestet, betrieben und gewartet werden. Ein Inbetriebnahmeprozess kann nicht nur bei neuen Projekten, sondern auch bei bestehenden Einheiten und Systemen, die erweitert, renoviert oder modernisiert werden sollen, durchgeführt werden.

In der Praxis ist die Inbetriebnahme die integrierte Anwendung einer Reihe von technischen Techniken und Verfahren zur Überprüfung, Inspektion und Erprobung aller betrieblichen Komponenten des Projekts: von einzelnen Funktionen (z. B. Instrumente und Geräte) bis hin zu komplexen Zusammenschlüssen (z. B. Module, Teilsysteme und Systeme).

Wartungs- und Instandhaltungspläne

	Approach	Examples of Actions
Plan the Work	Recognize hazards and define mitigation measures	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Identify risks such as flammability, toxicity, asphyxiates, reactive materials, etc. <input type="checkbox"/> Identify potential hazards from adjacent facilities and nearby activities <input type="checkbox"/> Address common failures of components such as fitting leaks, valve failure positions (open, closed, or last), valve leakage (through seat or external), instrumentation drifts or failures, control hardware and software failures, and power outages <input type="checkbox"/> Consider uncommon failures such as a check valve that does not check, relief valve stuck open, block valve stuck open or closed, and piping or equipment rupture <input type="checkbox"/> Consider excess flow valves/chokes to limit the size of hydrogen leaks <input type="checkbox"/> Define countermeasures to protect people and property <input type="checkbox"/> Follow applicable codes and standards
	Isolate hazards	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Store hydrogen outdoors as the preferred approach; store only small quantities indoors in well ventilated areas <input type="checkbox"/> Provide horizontal separation to prevent spreading hazards to/from other systems (especially safety systems that may be disabled), structures, and combustible materials <input type="checkbox"/> Avoid hazards caused by overhead trees, piping, power and control wiring, etc.
	Provide adequate access and lighting	Provide adequate access for activities including: <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Operation, including deliveries <input type="checkbox"/> Maintenance <input type="checkbox"/> Emergency exit and response
	Approach	Examples of Actions
Keep the Hydrogen in the System	Design systems to withstand worst-case conditions	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Determine maximum allowable pressure considering abnormal operation, mistakes made by operators, etc., then design the system to contain or relieve the pressure <input type="checkbox"/> Contain: Design or select equipment, piping, and instrumentation that are capable of withstanding the maximum credible pressure using materials compatible with hydrogen service <input type="checkbox"/> Relieve: Provide relief devices that safely vent the hydrogen to prevent damaging overpressure conditions <input type="checkbox"/> Perform system pressure tests to verify integrity after initial construction, after maintenance, after bottle replacements, and before deliveries through transfer connections
	Protect systems	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Design systems to safely contain maximum allowable pressure or provide pressure relief devices to protect against burst <input type="checkbox"/> Mount vessels and bottled gas cylinders securely <input type="checkbox"/> Consider that systems must operate and be maintained in severe weather and may experience earthquakes and flood water exposures <input type="checkbox"/> De-mobilize vehicles and carts before delivery transfers or operation <input type="checkbox"/> Protect against vehicle or accidental impact and vandalism <input type="checkbox"/> Post warning signs
	Size the storage appropriately for the service	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Avoid excess number of deliveries/change-outs if too small <input type="checkbox"/> Avoid unnecessary risk of a large release from an oversized system

	Approach	Examples of Actions
	Provide hydrogen shutoff(s) for isolation	<input type="checkbox"/> Locate automatic fail-closed shutoff valves at critical points in the system (such as storage exit, entry to buildings, inlets to test cells, etc.) to put the system in a safe state when a failure occurs <input type="checkbox"/> Consider redundant or backup controls <input type="checkbox"/> Install manual valves for maintenance and emergencies
	Prevent cross-contamination	<input type="checkbox"/> Prevent back-flow to other gas systems with check valves, pressure differential, etc.
	Approach	Examples of Actions
Manage Discharges	Safely discharge all process exhausts, relief valves, purges, and vents	<input type="checkbox"/> Discharge hydrogen outdoors through a vent stack or into a laboratory ventilation system that assures proper dilution <input type="checkbox"/> Direct discharges away from personnel and other hazards <input type="checkbox"/> Secure/restrain discharge piping
	Prevent build-up of combustible mixtures in enclosed spaces	<input type="checkbox"/> Do not locate equipment or piping joints/fittings in poorly ventilated rooms or enclosed spaces. Use only solid or welded tubing or piping in such areas <input type="checkbox"/> Provide sufficient ventilation and/or space for dilution <input type="checkbox"/> Avoid build-up of hydrogen under ceilings/roofs and other partly enclosed spaces
	Remove potential ignition sources from flammable spaces/zones	<input type="checkbox"/> Proper bonding and grounding of equipment <input type="checkbox"/> No open flames <input type="checkbox"/> No arcing/sparking devices, e.g., properly classified electrical equipment
	Approach	Examples of Actions
Detect and Mitigate	Leak detection and mitigation	<input type="checkbox"/> Provide detection and automatic shutdown/isolation if flammable mixtures are present, particularly in enclosed spaces <input type="checkbox"/> Consider methods for manual or automatic in-process leak detection such as the ability for isolated systems to hold pressure <input type="checkbox"/> Periodically check for leaks in the operating system
	Loss of forced ventilation indoors	<input type="checkbox"/> Automatically shut off the supply of hydrogen when ventilation is not working
	Monitor the process and protect against faults	<input type="checkbox"/> Provide alarms for actions required by people, e.g., evacuation <input type="checkbox"/> Provide the capability to automatically detect and mitigate safety-critical situations <input type="checkbox"/> Consider redundancy to detect and mitigate sensor or process control faults <input type="checkbox"/> Provide the ability for the system to advance to a "safe state" if power failures or controller faults are experienced
	Fire detection and mitigation	<input type="checkbox"/> Appropriate fire protection (extinguishers, sprinklers, etc.) <input type="checkbox"/> Listed hydrogen specific flame detection <input type="checkbox"/> Automatic shutdown and isolation if fire is detected
Manage Operations	Establish and document procedures	<input type="checkbox"/> Responsibilities for each of the parties involved <input type="checkbox"/> Operating procedures <input type="checkbox"/> Emergency procedures <input type="checkbox"/> Preventive maintenance schedules for equipment services, sensor calibrations, leak checks, etc. <input type="checkbox"/> Safe work practices for maintenance such as lock-out/tag-out, hot work permits, and hydrogen line purging <input type="checkbox"/> Review and approval of design and procedural changes
	Approach	Examples of Actions
	Train personnel	<input type="checkbox"/> MSDS awareness for hydrogen and other hazardous materials <input type="checkbox"/> Applicable procedures and work instructions for bottle change-out, deliveries, operation, maintenance, emergencies, and safety work practices
	Monitor	<input type="checkbox"/> Track incidents and near-misses, and establish corrective actions <input type="checkbox"/> Monitor compliance to all procedures and work instructions