

Teil 4

Grüner Wasserstoff in der Mobilität

POWERFUEL WEEK – VERKEHRSHAUS LUZERN

Informationsthemen

- Teil 1 | Nachhaltigkeit – Energieträger der Energiewende
- Teil 2 | Grüner Wasserstoff – Energieträger der Zukunft
- Teil 3 | Der Wasserstoffkreislauf
- **Teil 4 | Grüner Wasserstoff in der Mobilität**



agvs.ch
autoagtruck.ch
autoberufe.ch

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Mobilität als Emissionsquelle

Ob mit dem PKW, der Bahn, mit Schiff oder Flugzeug – ist der **Mensch unterwegs**, verursacht er Emissionen. Auch der intensive **Gütertransport** rund um die Welt belasten Luft und Klima.

Der Verkehrssektor wird in Strassen-, Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr unterteilt. Treibhausgase und Luftschadstoffe, die durch die verschiedenen Verkehrsträger freigesetzt werden sind: Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid, flüchtige organische Verbindungen und Feinstaub. Der steigende Emissionstrend wird fast ausschliesslich durch den Strassenverkehr dominiert, welcher rund 95 % der Verkehrsemissionen (CH) ausmacht. Einsparungen durch eine **emissionsarme Fahrzeugtechnik** wurden durch den **Anstieg der Fahrleistung** und dem entsprechenden Kraftstoffmehrverbrauch wieder **überkompensiert**.



GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Zero-Emission Technologien (Tank to Wheel)

In Zukunft werden mehrere Technologien notwendig sein um die CO₂ Zielsetzungen zu erreichen. Die Auswahl der geeigneten Technologie ist unter anderem stark abhängig vom spezifischen Arbeitsprofil des Antriebes.



Batterieelektrischer Antrieb



Batterieelektrischer Antrieb mit Brennstoffzelle (Hybridsystem)



Wasserstoff Verbrennungsmotor (u.a. LIEBHERR, DEUTZ, TOYOTA, KEYOU, INNIO JENBACHER)



Verbrennungsmotor mit CO₂ neutralem Kraftstoff (eFuels)

Der Einsatz definiert die Technologie

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Mobilität

Weltweit erfolgt der **Transport** von **Personen** und **Gütern** hauptsächlich durch verbrennungsmotorische PKW, Busse und LKW. Mit diesen Fahrzeugtypen sind die wichtigsten Märkte benannt, in denen Brennstoffzellen konventionelle Antriebe ersetzen können. Die Märkte für Flurförderfahrzeuge, Schiffe und Schienenfahrzeuge sind deutlich kleiner, aber bereits heute kommerziell relevant, da sie unmittelbare operative und wirtschaftliche Vorteile bieten.

Auf dem Weg in eine **umweltfreundliche Zukunft** spielen aber auch **innovative** und **intelligente Verkehrskonzepte** eine bedeutende Rolle.

Der **Mobilitätsbereich** ist also ein wichtiges Anwendungsfeld für Wasserstoff. **Transportable Energieträger** sind hier eine Voraussetzung. Hier können flüssige oder gasförmige Kraftstoffe aus **regenerativer Energie** als sinnvolle Ergänzung zur reinen batterieelektrischen Mobilität angesehen werden. Der Anwendungsfokus liegt dabei auf dem Strassengüterverkehr, dem Schienenverkehr oder der Binnenschifffahrt.

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Wasserstoff im Strassen-, Luft- und Schienenverkehr

Für den öffentlichen **Personennahverkehr** (ÖV), dazu gehören Busse und nicht-elektrifizierte Bahnstrecken, ist Wasserstoff eine interessante Alternative. Weite, topografisch anspruchsvolle Strecken können emissionsfrei zurückgelegt werden.

Im Strassenverkehr werden voraussichtlich zuerst die schweren Nutzfahrzeuge, die für den **Transport von Gütern** über weite Strecken eingesetzt werden, die Wirtschaftlichkeit erreichen. Ganze Nutzfahrzeugflotten können so effizient betrieben werden. Mit dezentralen Erzeugungsanlagen und einer Tankstelle vor Ort, ganz ohne fossile Treibstoffe. Die Brennstoffzellenfahrzeuge sind innerhalb kurzer Zeit betankt, lange Ladezeiten, wie bei rein batterieelektrischen betriebenen Fahrzeugen, entfallen. Während sich also der reine Batterieantrieb vor allem für leichte Fahrzeuge und kurze durchschnittliche Strecken eignen, überzeugt der Brennstoffzellenantrieb bei schweren Fahrzeugen und langer Strecke.

Ähnliches gilt für **Züge im Personen- und Güterverkehr**. Zwischen Bremerhaven (BRD) und Bremervörde verkehren bereits Wasserstoffzüge. Im Schienenverkehr besteht aber eine interessante Logistikooption für den Transport von Wasserstoff.

Auch für den **Flugverkehr** ist der Einsatz von Wasserstoff beziehungsweise von wasserstoffbasierten flüssigen Kraftstoffen eine Option, selbst wenn dies für Linienflüge anwendungstechnisch noch in weiter Ferne liegt. Eine Kooperation von Airbus, Siemens und Rolls Royce hat das Ziel formuliert, ein Hybridmotor-Flugzeug zu entwickeln. Bereits heute gibt es Start-ups, die sich mit der Anwendung der Brennstoffzellentechnologie in Lufttaxis befassen.

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Wie funktioniert ein Wasserstofffahrzeug mit Brennstoffzelle?

In einem Fahrzeug, das mit Wasserstoff betankt wird, wird der für den Elektromotor nötige **Strom direkt an Bord produziert**. Das passiert in der sogenannten **Brennstoffzelle**, die Sauerstoff und Wasserstoff mittels einer chemischen Reaktion in elektrische Energie umwandelt. Ein Brennstoffzellenfahrzeug ist also ein **Elektrofahrzeug**. Die Energie wird aber nicht in einer grossen Batterie gespeichert, sondern in Form von Wasserstoff in einem Tank mitgeführt.

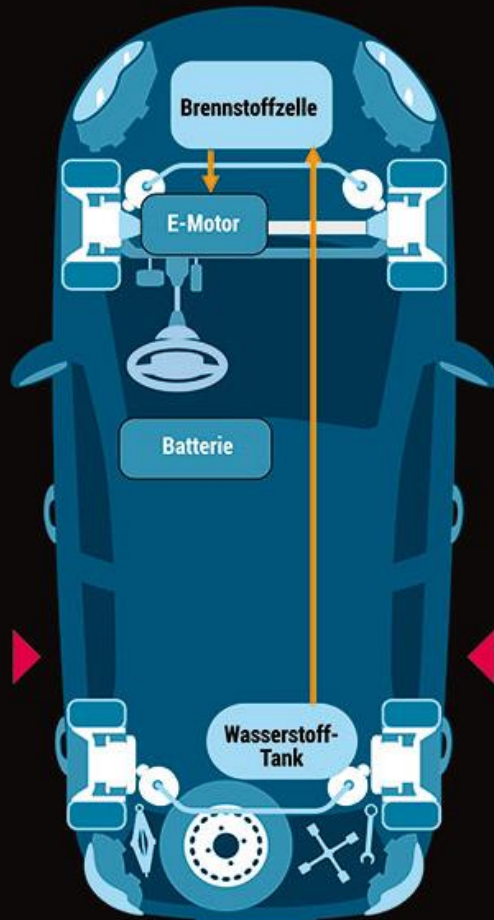
Ohne Batterie geht es auch hier nicht! In Brennstoffzellenfahrzeugen kann die erzeugte Energie direkt über einen Umwandler an den Elektromotor abgegeben, oder in einer im Vergleich zu einem BEV in viel **kleineren Batterie** gespeichert werden – die Brennstoffzelle ist somit ein Range-Extender und führt zu einer deutlichen Vergrösserung der Reichweite. Die Traktionsbatterie speichert die Energie aus der Brennstoffzelle, liefert die Energie für Leistungsspitzen beim Anfahren und lädt sich überdies teilweise durch Rekuperation beim Bremsen und der Bergabfahrt auf.

Hier die **4 Modi**, die im Einsatz möglich sind:

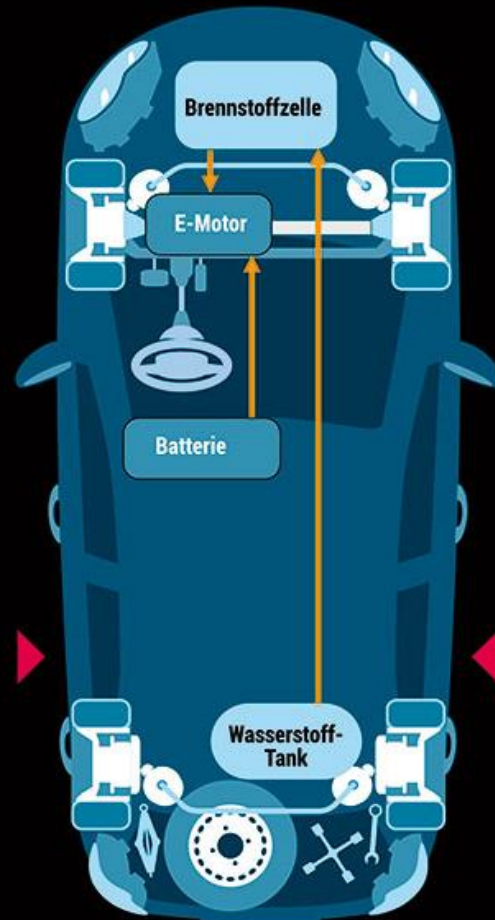
- **Brennstoffzellen-Modus:** die Energie aus Brennstoffzelle fliesst direkt in den Elektromotor
- **Unterstützungs-Modus:** die gespeicherte Energie aus der Pufferbatterie hilft bei der Beschleunigung
- **Lade-Modus:** die Batterie wird durch die Brennstoffzelle aufgeladen (im Stand fliesst kein Strom zum Elektromotor)
- **Rekuperations-Modus:** der E-Motor wird beim Bremsen zum Generator und speist die Batterie

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

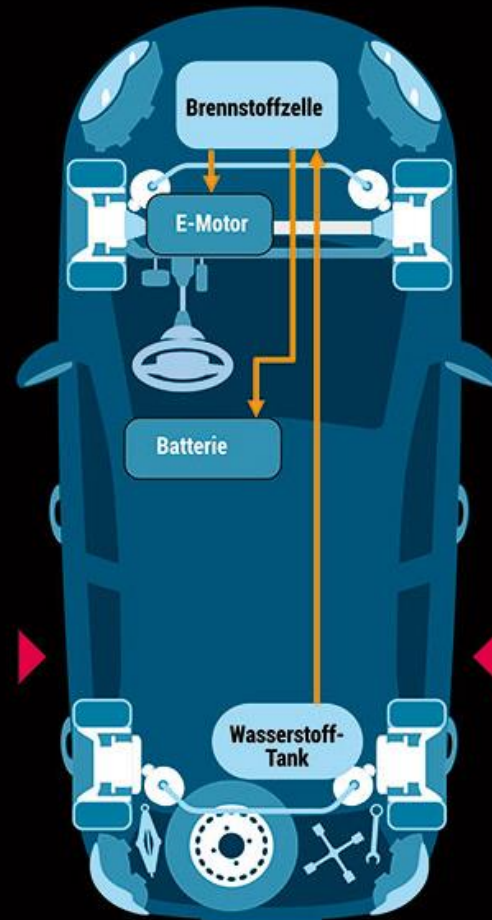
Quelle: e-engine



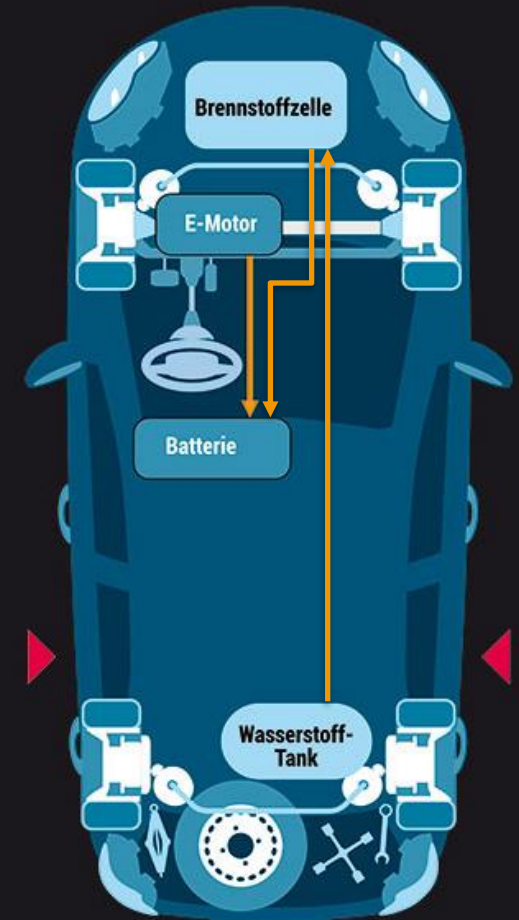
Brennstoffzellen-Modus



Unterstützungs-Modus



Lade-Modus



Rekuperations-Modus

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Die Brennstoffzelle

Bei der Elektrolyse spaltet Strom Wasser (H_2O) in seine Elemente Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2). Die zugeführte elektrische Energie wird dabei in Form chemischer Energie im Wasserstoff gespeichert.

In der Brennstoffzelle verläuft der Prozess genau umgekehrt zur Elektrolyse ab. Die chemisch gebundene Energie wird nicht hauptsächlich, wie im Wärmekraftprozess (Verbrennungsmotor ICE), in Wärmeenergie, sondern direkt in **elektrische Energie umgewandelt**. Dies wird als «**kalte Verbrennung**» bezeichnet.

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Stromerzeuger. Wasserstoff wird zu **Strom, Wärme und Wasser**. Der erzeugte Strom kann in das Stromnetz eingespeist, oder im Fahrzeug für den Antrieb über einen Elektromotor und die Batterieladung genutzt werden. Die Wärme wird ebenfalls genutzt oder kann in eine Wärmenetz eingespeist werden.

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Die Funktionsweise der Brennstoffzelle

Bereits 1839 wurde das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle von dem Engländer William Grove zum ersten Mal in der Praxis umgesetzt.

Sie besteht im Wesentlichen aus der **Anode** und der **Kathode**, sowie dem dazwischen angeordneten **Elektrolyten**. Der Wasserstoff wird der Anode zugeführt. Jedes Wasserstoffatom (H) gibt dort ein **Elektron** (e-) ab und wird dadurch zum positiv geladenen Wasserstoffion. Es verbleiben Protonen. Die **Protonen** wandern von der Anodenseite durch die Membrane (Elektrolyten) zur Katodenseite.

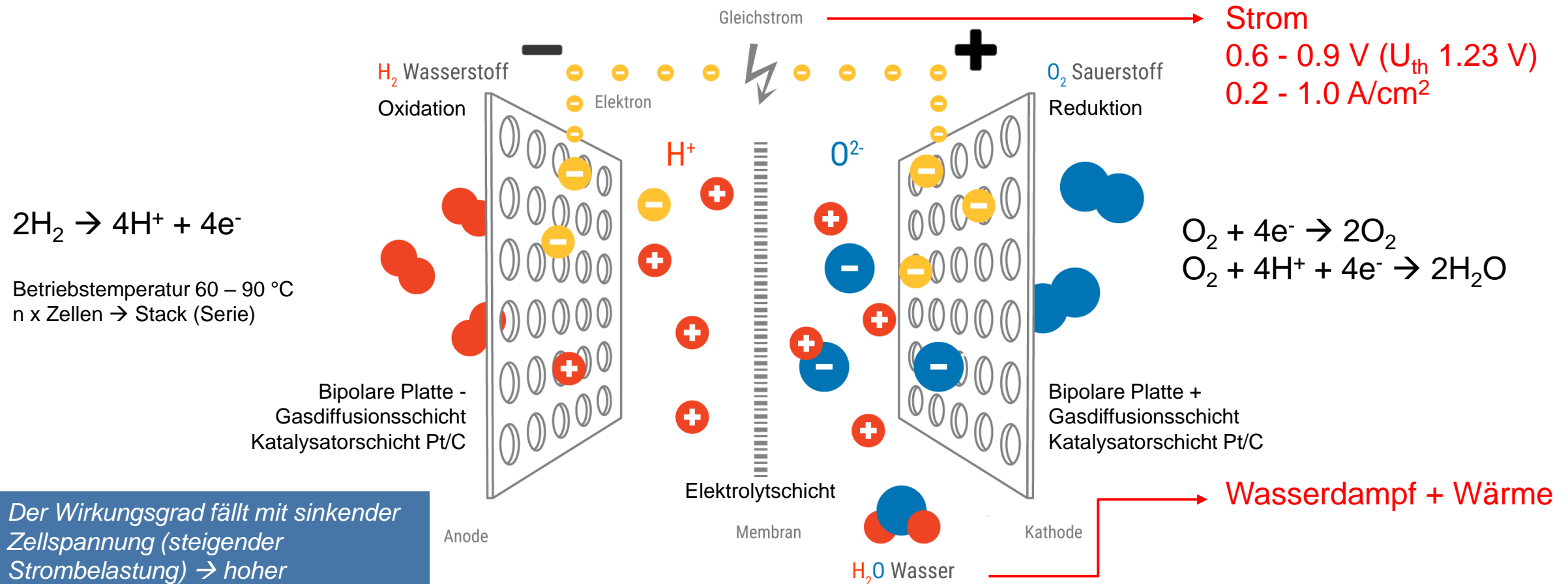
Die abgegebenen Elektronen (**Oxidation**) fließen über einen elektrischen Leiter als Strom (nutzbare elektrische Energie) von der Anode zur Kathode. An der Kathode nimmt der eintretende Sauerstoff (O) je Atom zwei Elektronen auf (**Reduktion**) und wird dadurch zum negativ geladenen Sauerstoffion. Die Sauerstoffionen reagieren mit jeweils zwei positiv geladenen Wasserstoffionen aus der Membrane und werden zu Wasser (H₂O), welches anschliessend die Brennstoffzelle verlässt.

Theoretisch lässt sich mit einer Zelle 1.23 V Gleichspannung erzeugen. Da es aber in der Zelle wie in jedem anderen Stromkreis zu Verlusten kommt, fällt Wärmeenergie als Nebenprodukt an. In der Praxis werden Spannungen zwischen 0.6 und 0.9 Volt erreicht.

Für technisch nutzbare Spannungen werden die **Zellen in Serie** geschaltet. Aus Einzelzellen werden **Zellstapel**, den sogenannten **Stacks**, die Spannungen bis etwa 200 Volt erreichen.

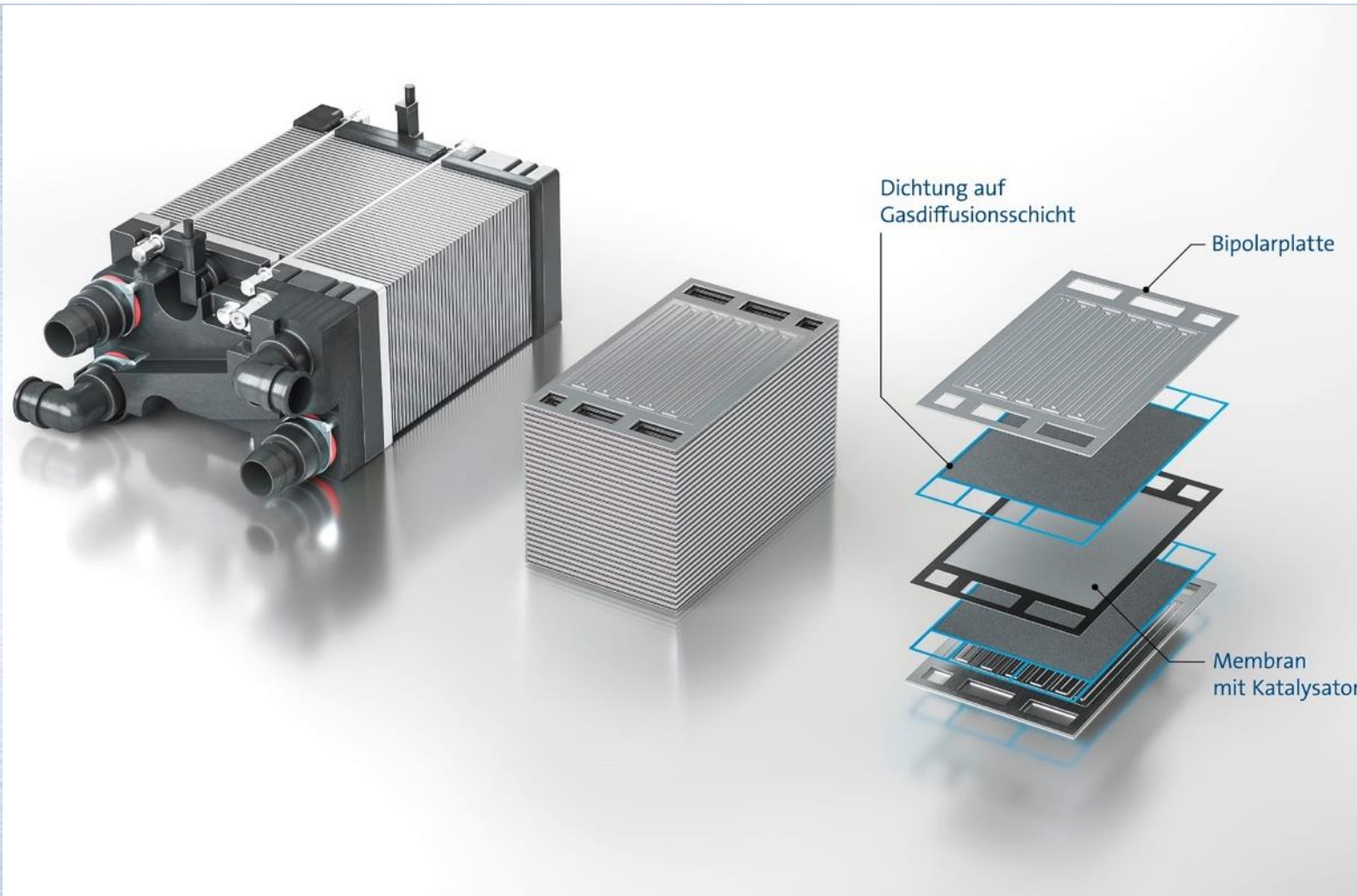
GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Die Funktionsweise der Brennstoffzelle



Der Wirkungsgrad fällt mit sinkender Zellspannung (steigender Strombelastung) → hoher Wirkungsgrad im Teillastbereich

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT



Beispiel von einer Brennstoffzelle zum Stack

- **Bipolarplatten** aus Metall oder Graphit
- **Gasdiffusionsschicht** dient als optimaler Verteiler der Gase an die Elektroden, Ableitung der Reaktionswärme und der Elektronen an der Anode
- **Polymer-Membran** als Elektrolyt, geringfügige Platinbeladung als **Katalysator** zur Beschleunigung der Reaktion (Zerlegung Wasserstoffatome in Elektronen und Protonen)

Quelle: FREUDENBERG

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Brennstoffzellen - Typen

TYP	BEZEICHNUNG	ANODE	KATHODE	T (°C)	P (W/kg)	P (W/l)
PEMFC	Polymerelektrolyt Brennstoffzelle	H ₂	O ₂ , Luft	80	400-1000	500-1600
AFC	Alkalische Brennstoffzelle	H ₂	O ₂	80	90-240	100
PAFC	Phosphorsäure Brennstoffzelle	H ₂	O ₂ , Luft	200	90	90
MCFC	Karbonatschmelz Brennstoffzelle	H ₂ , CO	CO ₂ , O ₂ , Luft	650	40	40
SOFC	Festoxid Brennstoffzelle	H ₂ , CO	O ₂ , Luft	1000	100	140

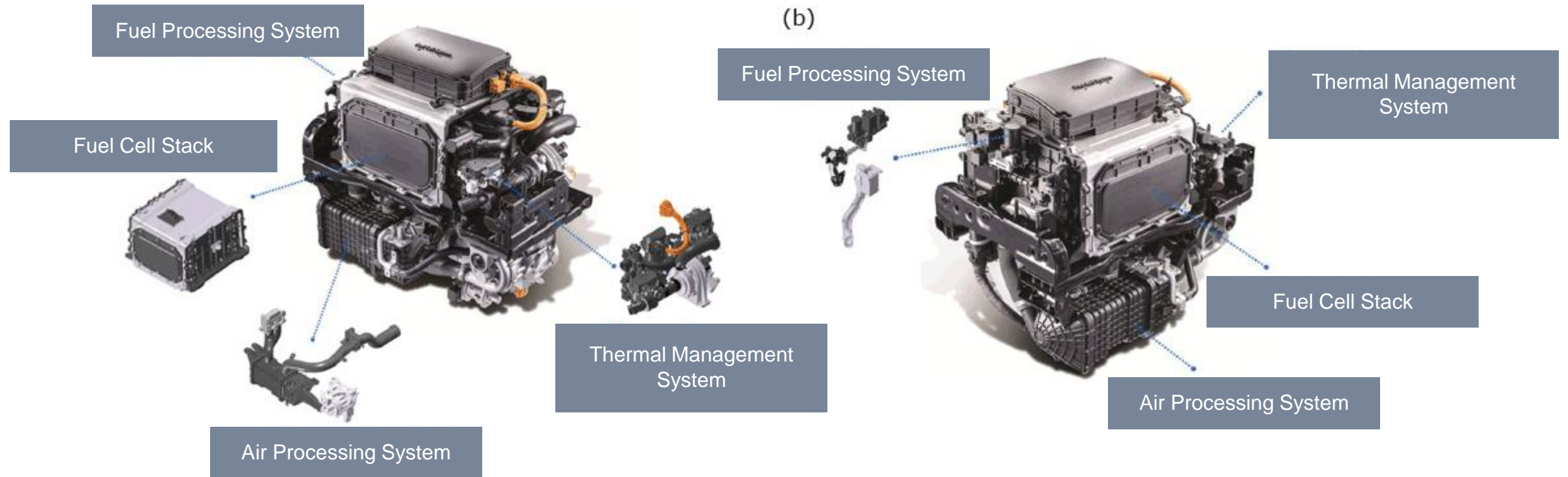
In der Mobilität werden fast ausschliesslich **PEM Brennstoffzellen** (en: Proton-Exchange-Membran, de: Protonenaustauschmembran) eingesetzt.

Sie kann in **zwei Richtungen** arbeiten, entweder als:

- **Elektrolyseur** – aus Wasser wird Wasserstoff und Sauerstoff produziert
- **Brennstoffzelle** – Wasserstoff wird in elektrische Energie umgewandelt

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Brennstoffzellen - Subsysteme



Quelle: HYUNDAI

Systeme/Leistungselektronik

- Das Zusammenspiel der Systeme ist hochkomplex

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Wasserstoff Verbrennungsmotor

- Geringe CO2 Emissionen (< 1g/kWh)
- Niedrige Nox Emissionen (abhängig vom Lastbereich)
- Schnittstellen analog ICE* Diesel
- Leistungsverhalten ähnlich ICE* Diesel
- Motorwirkungsgrad vergleichbar ICE* Diesel
- Hohe Lastzyklen und plötzliche Laststufen
- Restistent gegen Hitze, Staub, Vibrationen
- Herausforderungen
 - Motorklopfen, vorzeitige Zündungen, ineffiziente Verringerung des Verdichtungsverhältnis
 - stabile, präzise und leckagefreie Einblasung



Saugrohr Einblasung

- Vorkammerzündung
- Wasserstoff-Luft-Gemisch hoch verdichtet
- Hoher Luftüberschuss
- Effiziente, stabile Vorkammer-Zündung
- Gasplasma wird dann durch kleine Öffnungen in die Hauptbrennkammer geleitet und kann dort durch seinen hohen Energiegehalt das eingeblasene Gasgemisch schnell und gleichmässig entzünden.



Direkte Einblasung

- Hoher Füllungsgrad der Zylinder
- Hoher Wirkungsgrad im Vergleich zur Saugrohr Einblasung
- Mehrere Einblasungen pro Arbeitsspiel möglich
- Stabiler Motorlauf
- Einblasung unter hohem Druck
- Höhere spezifische Leistung

* ICE (Internal Combustion Engine – Verbrennungsmotor)

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Der Wirkungsgrad

Moderne Brennstoffzellen erreichen einen Wirkungsgrad von rund 60 Prozent (BoL –EoL), ohne Nutzung der Abwärme – das rein batterieelektrische Fahrzeug rund 90 Prozent. Verluste entstehen hier vor allem beim Schnellladen – dann kann der Wirkungsgrad auch hier auf 75 Prozent sinken.

Über die ganze Kette von der Wasserstofferzeugung bis zur Umwandlung in elektrische beziehungsweise kinetische Energie, kommt das Brennstoffzellenfahrzeug auf einen Wirkungsgrad von nur noch 29 bis 32 Prozent. Damit ist es immer noch besser als ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (Benzin 22 % - Diesel 25 %). Auch das Elektroauto kann bei einer «**Well-to-Wheel**»-Betrachtung, je nach Stromherkunft, nur wenig besser sein als das Brennstoffzellenauto. Aber die **Brennstoffzelle als Energiewandler** kann nie genauso effizient sein wie eine **Batterie als blosser Energiespeicher**. Aber die Abwärme der Brennstoffzelle kann für die Beheizung der Fahrzeuge genutzt werden, was bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen und **tiefen Temperaturen** wiederum viel **Energie und Reichweite** kostet.

Insgesamt ist das Brennstoffzellenfahrzeug trotz eigener – vergleichsweise kleinerer – Batterie mindestens so CO₂-arm wie das rein batterieelektrische Auto. Aber mit Wasserstoff lässt sich innert **kürzester Zeit grosse Reichweiten** nachtanken, ohne grosse und somit schwere Batterien mitzuführen. Damit eignet sich die Brennstoffzelle besonders für Nutzfahrzeuge.

Im Grunde ist die Wirkungsgrad-Diskussion hinfällig, denn wichtiger ist die **CO₂-Bilanz** von der Produktion des Fahrzeuges über die Herstellung der Energie bis zum Recycling des Fahrzeuges.

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Grüne Mobilität – Ausstieg aus dem «Henne-Ei-Prinzip»

Grüne Mobilität ist also nicht die Entscheidung zwischen entweder E-Mobilität oder Wasserstoff-Mobilität, sondern muss die Frage beantworten, welche Energienutzung für welche Anwendung am sinnvollsten ist. Dabei zeichnet sich ab: Kurzstrecken mit geringen Lasten eignen sich für die E-Mobilität, die Langstrecke und Schwerlasten für den Wasserstoff-Antrieb. So sind in der Schweiz bereits 47 Brennstoffzellen LKW von Hyundai erfolgreich im Einsatz.

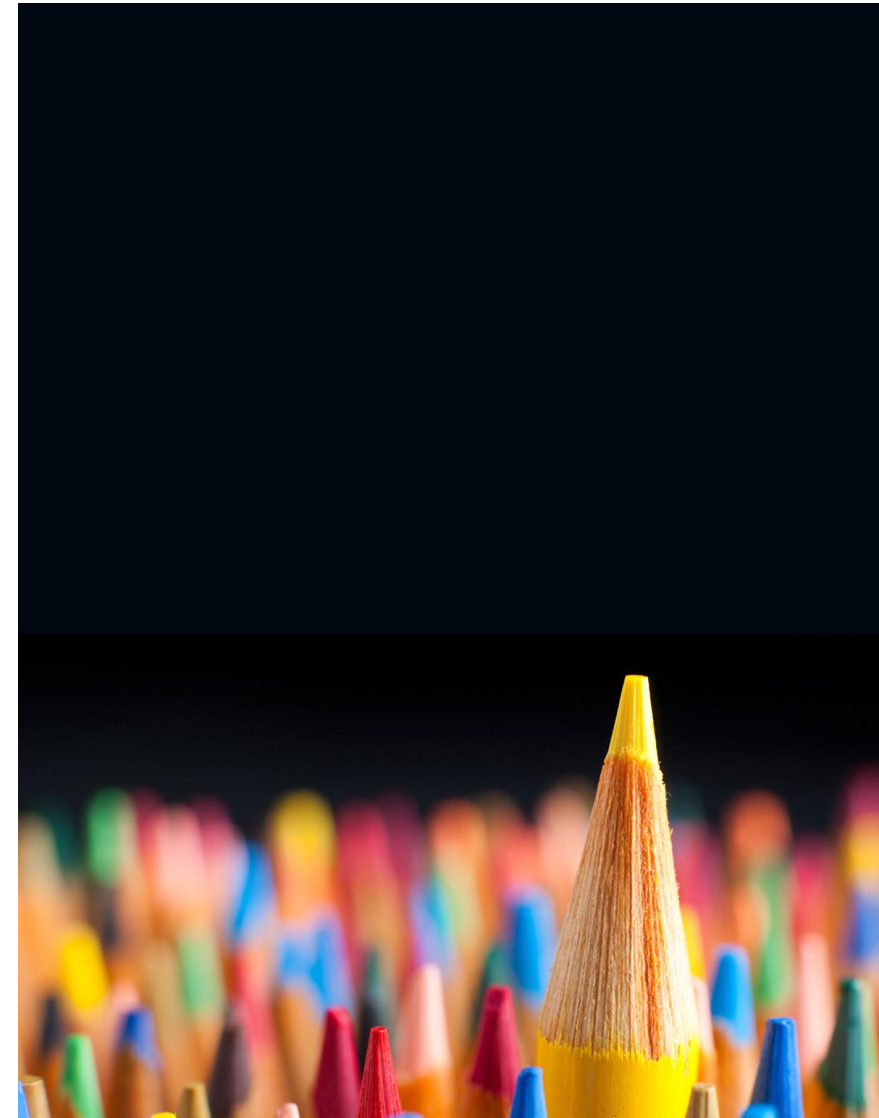
Die **Wasserstoff-Technologie** muss noch einige Hürden meistern:

- Im **Vergleich** zum **Dieselmotorkraftstoff** ist sie aktuell noch recht **teuer**.
- Solange es zu wenig **massentaugliche Fahrzeuge** auf dem Markt gibt, wird wenig in den **Ausbau** der **Tankstelleninfrastruktur** investiert. Die fehlenden Tankstellen wiederum verhindern, dass Brennstoffzellenfahrzeuge gekauft werden. Der **Aufbau gewerblicher Fahrzeugflotten** mit **großem Verbrauch** bietet eine exzellente Möglichkeit, Wasserstofftechnologie zu etablieren und damit weiter voranzutreiben (Ausstieg aus dem «Henne-Ei-Prinzip»).
- Um mit Wasserstoff in Fahrzeugen auf den Energiegehalt und die Reichweite von konventionellen Treibstoffen zu kommen, muss das Gas entweder bei sehr **hohen Drücken** von bis zu 700 bar oder **flüssig** bei minus 253 Grad gespeichert werden. Beides sind extreme Werte, die lange Zeit mit entsprechenden Herausforderungen verbunden waren. Heute sind die Tanks **technisch ausgereift** und so **sicher** wie konventionelle Treibstofftanks.

GRÜNER WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT

Zusammenfassung Teil 4

- ist der Mensch unterwegs, verursacht er Emissionen. Der steigende Emissionstrend wird fast ausschliesslich durch den Strassenverkehr dominiert.
- In Zukunft werden mehrere Technologien notwendig sein um die CO2 Zielsetzungen zu erreichen (Technologieoffenheit).
- Auf dem Weg in eine umweltfreundliche Zukunft spielen innovative und intelligente Verkehrskonzepte eine bedeutende Rolle.
- Ein Brennstoffzellenfahrzeug ist ein Elektrofahrzeug. Die Energie wird aber nicht in einer grossen Batterie gespeichert, sondern in Form von Wasserstoff.
- Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Stromerzeuger. Wasserstoff wird zu Strom, Wärme und Wasser.
- Der Wirkungsgrad hat aktuell keine Priorität, wichtiger ist die gesamte CO2-Bilanz.
- Grüne Mobilität ist nicht eine Entscheidung zwischen E-Mobilität oder Wasserstoff-Mobilität.



POWERFUEL WEEK 2022 - IMPRESSUM

Kontaktadresse

Auto Gewerbe Verband Schweiz
Sektion Zentralschweiz
Ebenastrasse 14
CH-6048 Horw
Schweiz

info@agvs-zs.ch
+41 41 349 00 20
CHE-112.378.983

Diese Informationen werden ohne kommerzielle Interessen zur Verfügung gestellt.

Haftungsausschluss

Der Autor übernimmt keinerlei Gewähr hinsichtlich der inhaltlichen Richtigkeit, Genauigkeit, Aktualität, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der Informationen.

Haftungsansprüche gegen den Autor wegen Schäden materieller oder immaterieller Art, welche aus dem Zugriff oder der Nutzung bzw. Nichtnutzung der veröffentlichten Informationen, durch Missbrauch der Verbindung oder durch technische Störungen entstanden sind, werden ausgeschlossen.

Alle Angebote sind unverbindlich. Der Autor behält es sich ausdrücklich vor, Teile der Seiten oder das gesamte Angebot ohne gesonderte Ankündigung zu verändern, zu ergänzen, zu löschen oder die Veröffentlichung zeitweise oder endgültig einzustellen.

Haftung für Links

Verweise und Links auf Webseiten Dritter liegen ausserhalb unseres Verantwortungsbereichs. Es wird jegliche Verantwortung für solche Webseiten abgelehnt. Der Zugriff und die Nutzung solcher Webseiten erfolgen auf eigene Gefahr des Nutzers oder der Nutzerin.

Urheberrechte

Die Urheber- und alle anderen Rechte an Inhalten, Bildern, Fotos oder anderen Dateien auf der Website gehören ausschliesslich dem Betreiber dieser Webseite oder den speziell genannten Rechtsinhabern. Für die Reproduktion jeglicher Elemente ist die schriftliche Zustimmung der Urheberrechtsträger im Voraus einzuholen.