

Teil 3

Der Wasserstoffkreislauf

POWERFUEL WEEK – VERKEHRSHAUS LUZERN

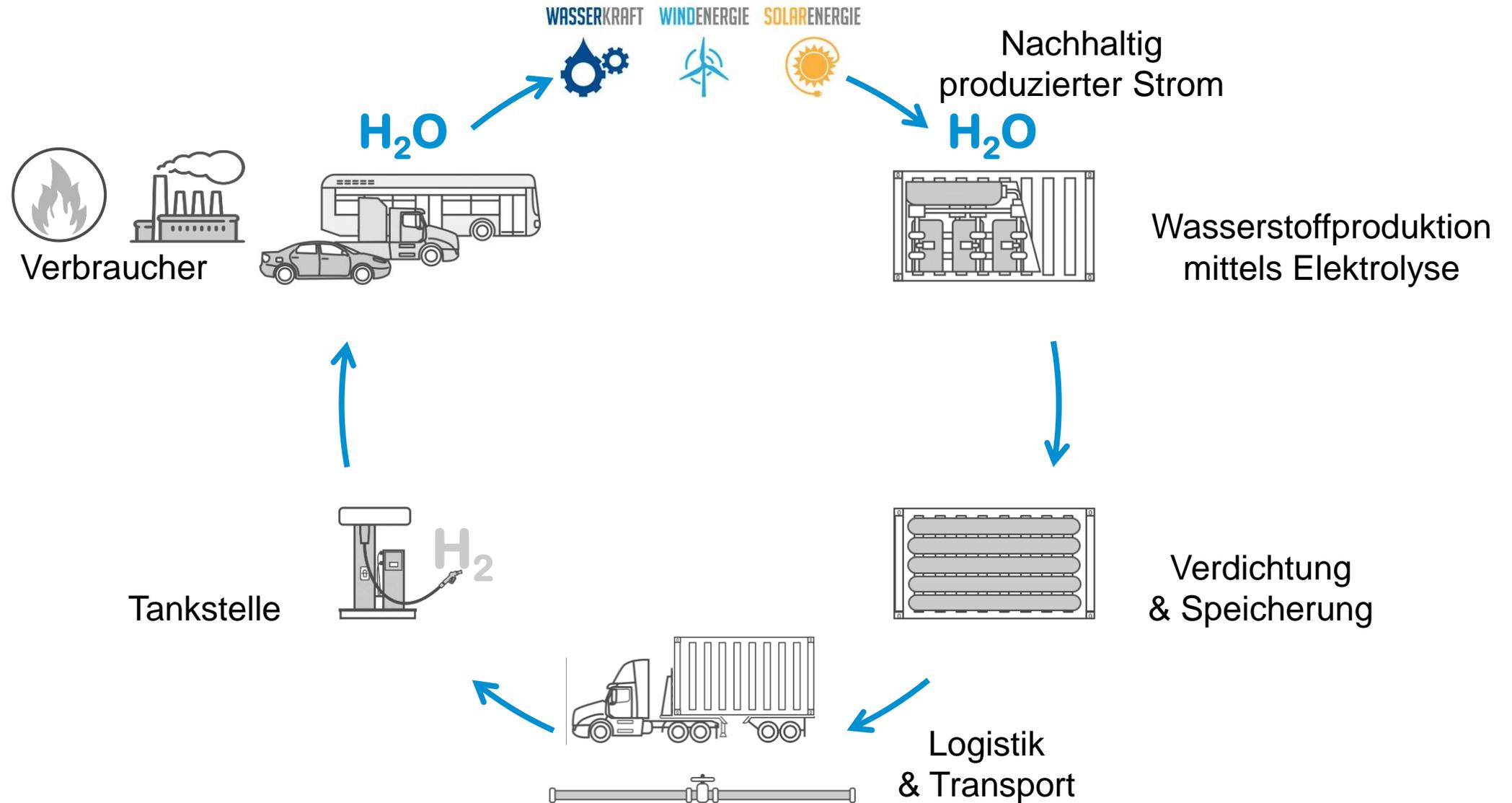
Informationsthemen

- **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

DER WASSERSTOFFKREISLAUF



DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Welche Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung gibt es?

Wasserstoff ist unter Umgebungsbedingungen gasförmig, stellt das Element mit der geringsten Dichte im Periodensystem dar, hat aber eine sehr hohe gravimetrische Energiedichte (kWh/kg). Er verhält sich bei hoher Verdichtung nicht wie ein ideales Gas, d.h. bei einer Verdoppelung des Druckes von 350 bar auf 700 bar erhöht sich die Dichte nur um ca. 2/3.

BRENNSTOFF	ENERGIE DICHT <i>kWh/kg</i>	*SPEICHER DRUCK <i>bar</i>	DICHTE <i>kg/m³</i>
Diesel	12.6	1	850
Benzin	13.0	1	740
Methan/Erdgas	13.9	1	0.717
Methan/Erdgas	13.9	200	162
LNG Liquide Natural Gas (-161°C)	13.9	1	424
Wasserstoff	33.3	1	0.089
Wasserstoff	33.3	350	24
Wasserstoff	33.3	700	40
Wasserstoff liquefied Hydrogen (-253 °C)	33.3	1	70

*Absolutdruck

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Welche Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung gibt es?

Wasserstoff kann heute grundsätzlich in gasförmigem oder flüssigem Zustand, aber auch in chemisch gebundener Form gespeichert werden.

- **Speicherung gasförmig (CGH₂)**
- **Speicherung flüssig (LH₂)**
- **Speicherung in Metallhydrid**
- **Speicherung in flüssigem Trägermedium**
- **Speicherung in Kavernen**



DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Warum ist die Wasserstoffspeicherung so wichtig?

Starke Schwankungen der Erzeugungsleistung sind ein bestimmender Faktor vieler erneuerbarer Energiequellen. Dies trifft vor allem auf Windkraft und Photovoltaik zu. Auswertungen von historischen Wetterdaten zeigen, dass es in West- und Mitteleuropa beinahe jedes Jahr zu zweiwöchigen Dunkelflauten kommt und die fehlende Leistungen wieder durch den Einsatz von konventionellen Kraftwerken unter CO₂-Emissionen kompensiert werden müssen.

Weht nun aber hingegen kräftiger Wind und dazu scheint auch noch die Sonne, kommt es zu einer erheblichen Überproduktion an elektrischer Energie. Dies führt dazu, dass Kraftwerke aller Art heruntergefahren oder gar abgeschaltet und Strom teilweise für negative Preise verkauft werden muss. Es liegt nun klar auf der Hand, dass ein leistungsfähiges, flexibles und günstiges Speichersystem zur Nutzung dieser Überproduktionen in Zeiten von Energiemangel durch Dunkel- oder Windflauten notwendig ist.

Stromspeicher in Form von Wasserstoff nehmen elektrische Energie aus einem Netz für die allgemeine Versorgung auf und speichern sie, auch langfristig als saisonale Speichermöglichkeit. Bei Bedarf speisen sie die gespeicherte elektrische Energie über die Brennstoffzelle wieder in ein Netz für die allgemeine Versorgung ein. Somit kann das Netz stabilisiert werden und wirtschaftlich nutzbare Energie geht nicht verloren.

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Welche Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung gibt es? (1)

Speicherung gasförmig

Gasförmiger Wasserstoff lässt sich nach dem Verdichten bei hohem Druck in einem Tank speichern. Im Verkehr hat sich beispielsweise ein Druckniveau von 350 bar für Nutzfahrzeuge und 700 bar für PKW durchgesetzt. Bei 700 bar beträgt die Dichte rund 40 kg/m³ (bei 350 bar, 24 kg/m³). Die Speicherung in Hochdrucktanks bietet für kleine Speichermengen eine günstige Lösung (Platzbedarf, Gewicht, Kosten) und wird daher hauptsächlich in mobilen Anwendungen, wie PKW, LKW und Bussen eingesetzt.

Speicherung flüssig

Eine Alternative stellt die Verflüssigung von Wasserstoff dar. In dieser Phase besitzt Wasserstoff zwar eine wesentlich höhere Dichte von rund 70kg/m³, muss aber unter hohem Energieaufwand verflüssigt und bei -253° C gespeichert werden. Diese Speichermöglichkeit bietet sich für grössere Speichermengen an und wird hauptsächlich für den Transport über weite Strecken genutzt (Transport per Schiff). Der Nachteil ist die Abdampftrate, welche durch den Wärmeeintrag während der Lagerdauer auftritt.

Die Kryokompression (CCH₂) bietet die Möglichkeit, die bereits beschriebenen Speichermethoden zu kombinieren und damit die Speicherdichte weiter zu erhöhen. Die niedrigen Temperaturen bei hohem Druck erfordern jedoch noch die weitere Forschung an diversen Fahrzeug- und Wasserstofftankstellenkomponenten.

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Welche Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung gibt es? (2)

Speicherung in Metallhydrid

Metallhydride absorbieren gasförmigen Wasserstoff. Beim Kontakt des Wasserstoffgases mit der Feststoffoberfläche der Speichermaterialien zerfallen die Wasserstoffmoleküle in atomaren Wasserstoff und lagern sich in den sogenannten Zwischengitterplätzen ein. Das Metall und das Gas gehen eine Verbindung ein → Metallhydrid.

- Hydrierung (Anlagerung) exotherm (Wärmeabgabe)
- Dehydrierung (Auslagerung) endotherm (Wärmeaufnahme, Wärmezufuhr)

Metallhydridspeicher haben eine hohe volumetrische Speicherdichte und benötigen einen niedrigen Speicher- und Befülldruck. Die Speicher sind schwer und aufgrund der hohen Materialkosten sehr teuer. Sie werden in der stationären Speicherung oder in U-Booten eingesetzt.

Vorteile:

- Hohe Sicherheit in der Handhabung (Normaldruck)
- Keine Abdampfverluste, langhaltende Speicherung
- Langlebigkeit

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Welche Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung gibt es? (3)

Speicherung in flüssigem Trägermedium

Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) speichern den Wasserstoff in einem flüssigen Trägermedium. Dieses Thermalöl (Dibenzyltoluol) bindet Wasserstoff chemisch durch eine katalytische Reaktion. Das so mit Wasserstoff „beladene“ LOHC (Perhydrodibenzyltoluol) kann gefahrlos in normalen Tanks transportiert werden. Beim Empfänger angekommen, wird das LOHC dehydriert (Abspaltung der chemischen Verbindung)

Speicherung in Kavernen

Eine typische Kaverne ist das Resultat der Produktion von Salz. Wasser wird durch den Salzstock gespült und kommt, mit gelösten Salz angereichert, als Sole an die Oberfläche. Unter der Erde bildet sich somit ein Hohlraum, der dann später als Speicher von Gas genutzt werden kann. Die meisten Kavernen (Deutschland/Polen) liegen in einer Tiefe von zwischen 500 und 2500 m, haben einen Durchmesser von 50 bis 100 m und eine Länge von 100 bis 500 m. Je nach Tiefe und geologischen Parametern sind Speicherdrücke von 150 bis 200 bar üblich. Die Speicherfähigkeiten einer Kaverne ist gewaltig. Eine typische Speicheranlage besteht aus mehreren Kavernen.

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Welche Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung gibt es? (4)

Die Firma VNG Gasspeicher rüstet derzeit in Bad Dürrenberg (BRD) eine bisher als Erdgasspeicher genutzte Salzkaverne für die Speicherung von Grünem Wasserstoff um. Viele Kavernen werden schon heute zur Speicherung von Erdöl und Erdgas genutzt. Um diese Speicher nun auch für Wasserstoff nutzen zu können, müssen Materialien, Komponenten, der Betrieb und Nutzeranforderungen von Spezialisten untersucht und optimiert werden. In einem grosstechnischen Power-to-Gas-Projekt der HYPOS-Initiative soll der Einsatz des Grünen Wasserstoffs in industriellem Massstab untersucht werden. Damit entsteht dort der weltweit grösste Kavernenspeicher für Grünen Wasserstoff.



DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Wasserstofftransport

Bereits heute existiert eine funktionsfähige und vor allen Dingen sichere Wasserstoffinfrastruktur, denn für die Chemie- und Petrochemieindustrie ist Wasserstoff ein wichtiger Rohstoff. In Europa sind bereits 1'600 km Wasserstoffrohrleitungen verbaut. Eine Vision ist, das bestehende dichte Erdgasnetz mit wachsenden Anteilen von zugemischtem Wasserstoff aus Power-to-Gas-Anlagen und die regionalen Wasserstoffnetze zusammenwachsen zu lassen. Denn bei aller Dezentralisierung wird auch zentral erzeugter, erneuerbarer Strom, u.a. aus On- und Offshore Windparks oder grossen Photovoltaikanlagen über Wochen für Windflauten oder sonnenarme Zeiten in Grossspeicher gespeichert und zum Verbraucher transportiert werden wollen.

Wasserstoff ist über weite Strecken nahezu verlustfrei transportierbar. Nach der Erzeugung kann er entweder in Rohrleitungen, sogenannte Pipelines eingespeist oder direkt anteilig in die bestehende Erdgasinfrastruktur überführt werden. Pipelines unterschiedlicher Länge sind für den Transport grosser Mengen geeignet und werden vor allem im industriellen Kontext genutzt. Im Gegensatz zu Erdgas-Pipelines ist die Energietransportfähigkeit einer Wasserstoff-Pipeline enorm. In Zukunft könnten Pipelinenetze auch ausgebaut werden und dem Transport von Wasserstoff für den Verkehrssektor (Tankstellen) dienen.

In der Schweiz werden die Wasserstofftankstellen bereits heute mit Container sicher und unauffällig per LKW bedient. Der Grüne Wasserstoff wird direkt im Laufwasserkraftwerk in Niedergösgen produziert.

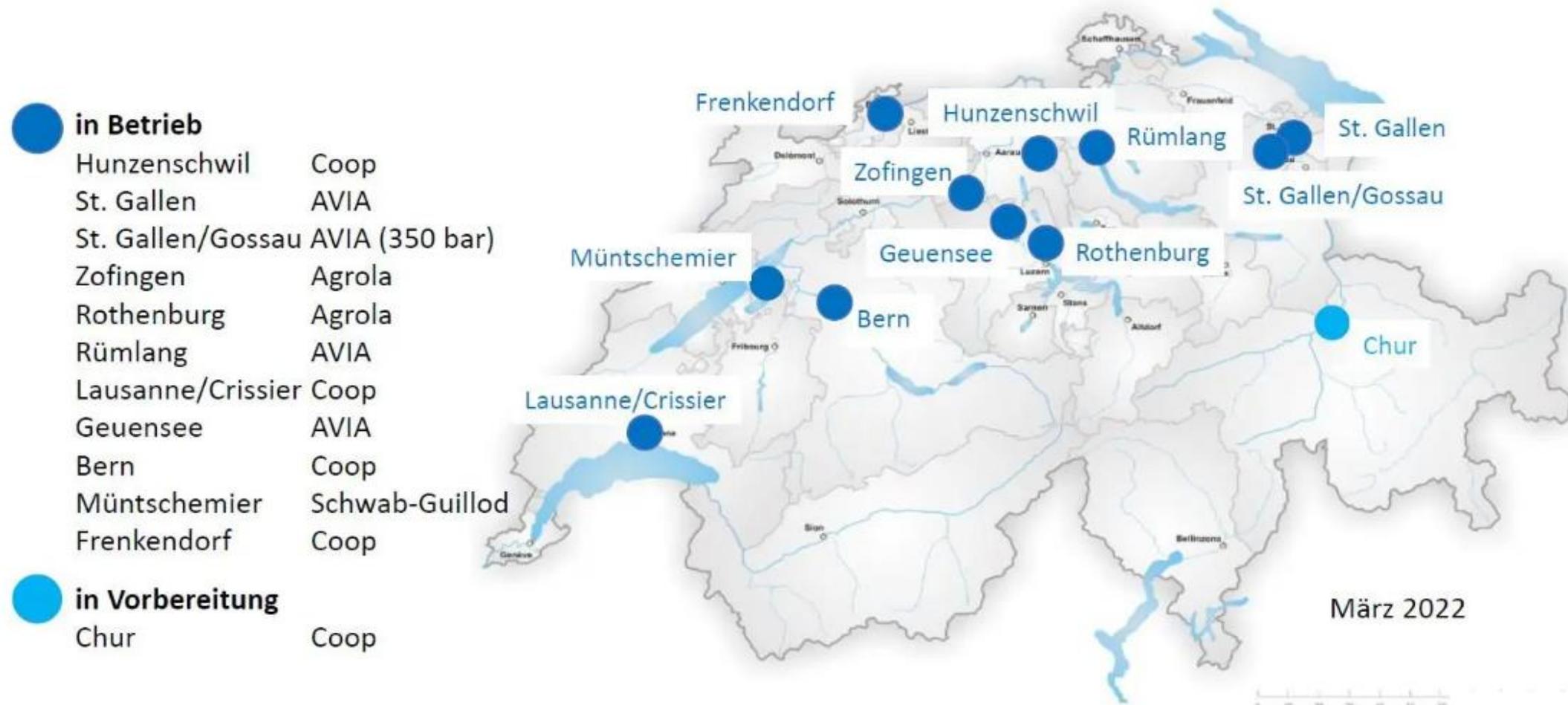
Quelle: HYDROSPIDER AG



DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Wasserstofftankstellen

Aktuell sind schweizweit 11 öffentliche Wasserstofftankstellen in Betrieb. Das Tankstellennetz wird laufend weiter ausgebaut.



März 2022

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Was sind die Vorteile bei der Betankung mit Wasserstoff?

Das Betanken eines wasserstoffbetriebenen PKW dauert nur rund 5 Minuten. Selbst LKW, Busse und Bahnen sind innerhalb kürzester Zeit betankt und stehen dem Nutzer für die Weiterfahrt wieder zur Verfügung.

Lange Ladezeiten, wie bei rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen entfallen. Im Vergleich zur Handhabung wie beim Verbrennungsmotor (ICE) entstehen damit kaum längere Betankungszeiten.

Während sich also der batterieelektrische Antrieb (BEV) vor allem für leichte Fahrzeuge und kurze Distanzen eignet, überzeugt der Brennstoffzellenantrieb (FCEV) bei schweren Fahrzeugen und langen Strecken.

Beispiel Vergleich Betankungsvorgang LKW (Reichweite ~400 km)



Tankzeit
140 lt

ICE Diesel
<5 min



Tankzeit
32 kg

FCEV
~20 min



Ladezeit
740 kWh

BEV
~ 296 min

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Warum ist eine Energiewende so notwendig?

Die Energiewende bedeutet einen Umbau der Energieversorgung durch den Ersatz von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energieträger. Unsere aktuelle Energieversorgung hängt zu einem Grossteil von fossilen Energieträgern wie Erdöl, Kohle und Erdgas ab. Diese sorgen dafür, dass grosse Mengen an schädlichem Kohlenstoffdioxid (CO₂) in die Atmosphäre ausgestossen werden und so den Klimawandel weiter vorantreiben.

Ziele der Energiewende

- Begrenzung des Klimawandels und seiner Folgen (Treibhausgasemissionen)
- Reduktion der hohen Importabhängigkeiten bei fossilen Brennstoffen
- Förderung von Wachstum und Beschäftigung durch eine wettbewerbsfähige Energieversorgung

Massnahmen

- Massiver Ausbau der erneuerbaren Energieträger
- Senkung der Treibhausgasemissionen
- Sektorenkoppelung

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Der Treibhausgaseffekt

Die Lufthülle unseres Planeten besteht aus verschiedenen Gasen, die über vielfältige Funktionen und Prozesse zu einem komplexen chemischen System verknüpft sind. Durch Menschen verursachte (anthropogene) Emissionen bedrohen das atmosphärische Gleichgewicht vor allem in zweierlei Hinsicht:

- **Treibhausgasemissionen** führen zu einem Anstieg der globalen Temperaturen
- Klassische **Luftschadstoffe** sind für Versauerung und Eutrophierung (gesteigerte Nährstoffanreicherung) von Ökosystemen, aber auch für eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit verantwortlich.

Die Bereitstellung von Primärenergieträgern (Erdöl, Kohle, Erdgas u.s.w) und ihre Umwandlung in Nutzenergie (Strom, Wärme) verursacht Emissionen. Bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen vor allem Kohlendioxidemissionen. Die Emissionsbelastung von festen Brennstoffen ist höher als bei Öl oder Gas.

Auch wenn der Mensch unterwegs ist, ob mit PKW, Bahn, Schiff oder Flugzeug, verursacht er immer Emissionen. Auch der intensive Gütertransport rund um die Welt belastet Luft und Klima. Einsparungen durch emissionsarme Fahrzeugtechnologien werden durch den Anstieg des Kraftstoffverbrauches infolge gesteigerter Mobilitätsleistungen überkompensiert.

Rauchende und russende Fabrikamine sind dank moderner Anlagetechnik selten geworden. Dennoch ist die Industrie nach der Energieindustrie die zweitgrösste Emissionsquelle.

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Wie dient Wasserstoff der Sektorenkopplung?

Die Sektorenkopplung ist eines der Schlüsselkonzepte der Energiewende. Darunter wird die Vernetzung der drei Sektoren der Energiewirtschaft verstanden:

- **Elektrizität**
- **Wärmeversorgung**
- **Mobilität**

Durch diese Kopplung wird in Zukunft der Austausch zwischen den heute noch weitgehend getrennt agierenden Sektoren ermöglicht.

Laut Klimaschutzplan sollen bis zum Jahre 2050 die Treibhausgasemissionen um 80 bis 95% reduziert werden. Dazu muss die volatile erneuerbare Energie sinnvoll genutzt werden. Zur Speicherung und zum Transport der erzeugten Energie bieten sich verschiedene Nutzungspfade innerhalb der verschiedenen Sektoren an. Ziel dabei ist es, die vorhandenen Strom- UND Gasinfrastrukturen effizient zu nutzen. So kann die Belastung des Stromsektors verringert und die Gesamtkosten lassen sich erheblich senken. So kann beispielsweise ein übermässiger Ausbau von stromerzeugenden Anlagen oder Übertragungsnetzen vermieden werden.

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Beispiel Wasserstoff Anwendung – Industrie: Grüner Stahl

In der Stahl- und Eisenproduktion, dem energieintensivsten Industriesektor, kann Grüner Wasserstoff die klassischen Kohlehochöfen überflüssig machen und eine klimaneutrale Stahlherstellung ermöglichen. Hochöfen, die mit Kohle betrieben werden verursachen eine erhebliche Menge an CO₂-Emissionen. Durch die Technologie der Direktreduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff hat der grüne Energieträger das Potenzial, diese Industrie klimaschonend umzustrukturieren. Bei diesem Prozess entsteht kein flüssiges Roheisen mehr, sondern ein fester Eisenschwamm, der in einem Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl veredelt wird. Dabei können bis zu 97 % der beim Herstellungsprozess anfallenden CO₂ –Emissionen eingespart werden.

Erklärvideo: <https://youtu.be/5OSWefZ8SNE>

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Beispiel Wasserstoff Anwendung – Strom-/Wärmesektor: Rückverstromung von Wasserstoff

Überschüssiger, nicht bedarfsgerecht erzeugter Strom aus erneuerbaren Energiequellen kann in Form von Grünem Wasserstoff direkt nutzbar gemacht werden. Die Rückverwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie ermöglicht die Nutzung von erneuerbarem Strom und Wärme für den privaten Endverbrauch und die Industrie.

Die bei der Rückverstromung entstehende Wärme kann zudem in Wärmenetze eingespeist werden.

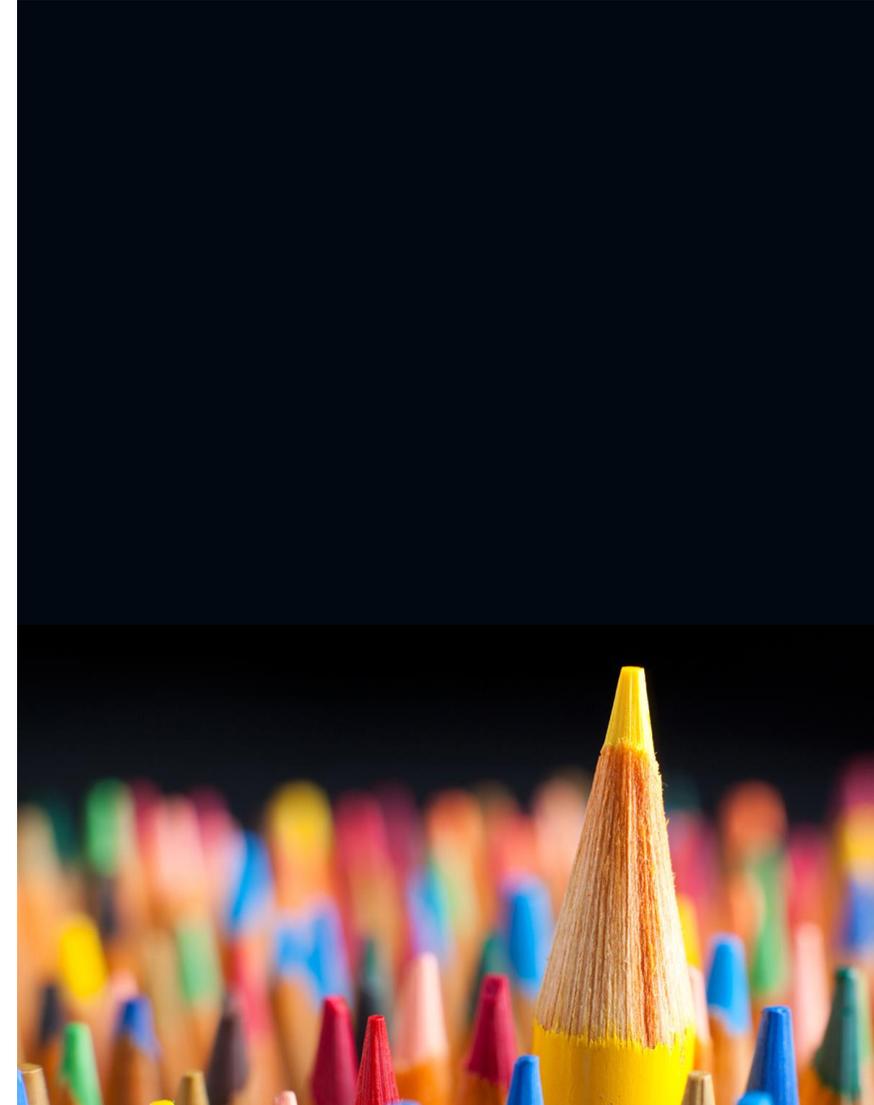
Bei der Anwendung von Grünem Wasserstoff gehen auf dem Weg zwischen regenerativem Strom und den Verbrauchern mindestens 50 Prozent der Energie «verloren» oder müssen für Kompression, Verflüssigung, Transport, Umfüllung, Kühlung u.s.w. aufgewendet werden. Erfolgt die Rückverstromung über die effiziente Brennstoffzellentechnologie, stehen am Schluss nur etwa 25 Prozent des erneuerbaren Stroms zur Nutzung zur Verfügung.

Bei der direkten Verteilung des Wasserstoffs über die Einspeisung in das Erdgasnetz oder über den Transport durch H₂-Pipelines können die Verbraucher jedoch etwa 90 Prozent des grünen Stroms in Form von Wärme (Verbrennung) nutzen.

DER WASSERSTOFFKREISLAUF

Zusammenfassung Teil 3

- Wasserstoff ist unter Umgebungsbedingungen gasförmig, stellt das Element mit der geringsten Dichte im Periodensystem dar, hat aber eine sehr hohe gravimetrische Energiedichte (33.3 kWh/kg).
- Wasserstoff kann heute grundsätzlich in gasförmigem oder flüssigem Zustand, aber auch in chemisch gebundener Form gespeichert werden.
- Wasserstoff kann Energie speichern und wieder freigeben, ohne dabei CO₂-Emissionen freizusetzen.
- Wasserstoff kann in der volatilen Stromerzeugung das Netz stabilisieren.
- Wasserstoff ist über weite Strecken nahezu verlustfrei transportierbar.
- Energiewende bedeutet einen Umbau der Energieversorgung durch den Ersatz von fossilen Energieträgern. Sektorenkopplung ist eines der Schlüsselkonzepte.
- Die Bereitstellung und Umwandlung von fossilen Primärenergieträgern verursachen Treibhausgasemissionen und führen zu einem Anstieg der globalen Temperaturen.



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 Rechteinhabern. Für die Reproduktion jeglicher Elemente ist die schriftliche Zustimmung der Urheberrechtsträger im Voraus einzuholen.