



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Mobilität

Bericht vom 10. Juli 2017

Ökobilanz von Wasserstoff als Treibstoff



Datum: 10. Juli 2017

Ort: Bern

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

treeze Ltd.

Kanzleistrasse 4, CH-8610 Uster

www.treeze.ch

Autoren:

Laura Tschümperlin, treeze Ltd., tschuemperlin@treeze.ch

Rolf Frischknecht, treeze Ltd., frischknecht@treeze.ch

BFE-Projektbegleitung: Stephan Walter, Fachspezialist Mobilität, stephan.walter@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Christoph Schreyer, Leiter Mobilität, christoph.schreyer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/402689-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------|---|
| a | annum (year) |
| CH | Switzerland |
| GLO | global average |
| GWP | global warming potential |
| H ₂ | Wasserstoff |
| KBOB | Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes |
| kWh | Kilowattstunde |
| LCA | Ökobilanz (engl. life cycle assessment) |
| LCI | Sachbilanz (engl. life cycle inventory analysis) |
| LCIA | Wirkungsabschätzung (engl. life cycle impact assessment) |
| MJ | Megajoule |
| MoeK | Methode der ökologischen Knappheit |
| PEM | Protonen-Austausch-Membran (engl. proton exchange membrane) |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| RER | Europe |
| SMR | Methan-Dampfreformierung (engl. Steam-Methane-Reforming) |
| tkm | Tonnenkilometer, Einheit für Transport |
| UBP | Umweltbelastungspunkte; engl. eco-points |

Zusammenfassung

In dieser Studie werden die Umweltkennwerte der Herstellung und der Bereitstellung von Wasserstoff aktualisiert. Die berechneten Umweltkennwerte dienen als Grundlage für die Energieetikette für Personenwagen. Für die Berechnung der Umweltkennwerte wird der aktuellste und von den Bundesämtern genutzte KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 verwendet.

Die Herstellung von Wasserstoff wird für zwei verschiedene Produktionsverfahren (Elektrolyse und Methan-Dampfreformierung) bilanziert. Bei der Wasserstoffproduktion via Elektrolyse wird zudem zwischen verschiedenen Stromprodukten (PV-, Wasserkraft- und Lieferanten-Strom) sowie zwischen zentraler und dezentraler (vor Ort der Tankstelle) Produktion unterschieden.

Ebenfalls werden die Umweltkennwerte des Wasserstoffmix für Pkw ab Schweizer Tankstelle anhand der heutigen Wasserstoff-Betankungsmöglichkeiten von Pkw an öffentlichen Schweizer Tankstellen berechnet. Aktuell werden schätzungsweise 15 % des Wasserstoffs für Pkw an der Tankstelle der EMPA und die restlichen 85 % an der Tankstelle von Coop in Hunzenschwil getankt. Damit besteht der Wasserstoffmix, der heute in der Schweiz getankt wird, zu 85 % aus zentral und zu 15 % aus dezentral mit Elektrolyse aus 100 % Wasserkraft-Strom hergestelltem Wasserstoff. Dieser Wasserstoffmix ab Schweizer Tankstelle weist einen Primärenergiebedarf von 290 MJ-eq/kg Wasserstoff mit einem erneuerbaren Anteil von 92.2 %, einen Primärenergiefaktor von 2.41 MJ-eq./MJ und ein Primärenergie-Benzinäquivalent von 0.60 L/m³ auf. Die Bereitstellung von Wasserstoff ab Schweizer Tankstelle verursacht Kohlendioxidemissionen von 76.0 g CO₂/m³.

Résumé

Cette étude met à jour les indicateurs environnementaux de la production et de la mise à disposition d'hydrogène. Les indicateurs environnementaux calculés servent de base pour l'étiquette-énergie des voitures de tourisme. La liste actualisée des données des écobilans KBOB (DQRv2:2016) utilisée par les offices fédéraux sert de base de calcul pour les indicateurs environnementaux

Le bilan de la production d'hydrogène est établi pour deux processus de production différents (électrolyse et reformage à la vapeur du méthane). Pour la production d'hydrogène par électrolyse, une distinction est encore faite entre divers produits électriques (courant PV, courant hydraulique et courant des fournisseurs) ainsi qu'entre production centralisée et décentralisée (sur le site de la station-service).

Par ailleurs, les indicateurs environnementaux du mix d'hydrogène pour voitures de tourisme délivré par les stations-service suisses sont calculés sur la base des possibilités de ravitaillement en hydrogène des voitures de tourisme aux stations-service publiques suisses. Actuellement, près de 15% d'hydrogène pour voitures de tourisme sont achetés auprès de la station-service de l'EMPA et les 85% restants à la station-service Coop de Hunzenschwil. Dès lors, le mix d'hydrogène acheté aujourd'hui en Suisse se compose d'hydrogène produit – à 85% de manière centralisée et à 15% de manière décentralisée – par électrolyse et issu à hauteur de 100% du courant hydraulique. Ce mix d'hydrogène délivré par les stations-service suisses affiche une demande d'énergie primaire de 290 MJ-éq/kg d'hydrogène avec une part renouvelable de 92,2%, un facteur d'énergie primaire de 2,41 MJ-éq./MJ et un équivalent essence d'énergie primaire de 0,60 l/m³. La mise à disposition d'hydrogène délivré par les stations-service suisses provoque des émissions de dioxyde de carbone de 76,0 g CO₂/m³.

Sintesi

Nel presente studio vengono aggiornati gli indicatori ambientali relativi alla produzione e alla messa a disposizione dell'idrogeno. Gli indicatori costituiscono dati di base per l'etichetta Energia per automobili. Per il loro calcolo sono stati utilizzati i dati più recenti dell'ecobilancio KBOB DQRv2:2016, utilizzati dagli Uffici federali.

Il bilancio della produzione di idrogeno è calcolato per due diversi processi di produzione (elettrolisi e reazione di reforming del metano con vapore). Nella produzione di idrogeno per elettrolisi, si differenzia inoltre tra diversi prodotti elettrici (energia fotovoltaica, energia idroelettrica ed energia di fornitori), nonché tra produzione centralizzata e decentrata (presso le stazioni di rifornimento).

Anche gli indicatori ambientali del mix di idrogeno per le automobili messo a disposizione nelle stazioni di rifornimento svizzere sono calcolati tenendo conto delle attuali possibilità di rifornimento d'idrogeno per le automobili presso i distributori pubblici svizzeri. Si stima che attualmente il 15 per cento del rifornimento di idrogeno per automobili è effettuato presso il distributore dell' EMPA e il restante 85 per cento presso il distributore della Coop a Hunzenschwil. Pertanto, il mix di idrogeno utilizzato oggi per il rifornimento in Svizzera è composto da idrogeno prodotto interamente con energia idroelettrica per elettrolisi, per l'85 per cento in modo centralizzato e per il 15 per cento in modo decentrato. Questo mix di idrogeno distribuito nelle stazioni di rifornimento svizzere presenta un fabbisogno di energia primaria di 290 MJ-eq/kg di idrogeno con una quota rinnovabile del 92,2 per cento, un fattore di energia primaria di 2,41 MJ-eq./MJ e un equivalente benzina per l'energia primaria pari a 0,60 l/m³. La messa a disposizione di idrogeno nelle stazioni di rifornimento svizzere causa emissioni di biossido di carbonio pari a 76 g CO₂/m³.

Inhalt

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | EINFÜHRUNG | 1 |
| 1.1 | Ausgangslage | 1 |
| 1.2 | Gegenstand der Aktualisierung | 1 |
| 1.3 | Datengrundlage | 2 |
| 2 | SYSTEMBESCHRIEB | 2 |
| 2.1 | H ₂ -Herstellung | 3 |
| 2.1.1 | H ₂ -Herstellung mit dem Wasserelektrolyse-Verfahren | 3 |
| 2.1.2 | H ₂ -Herstellung mit dem Methan-Dampfreformierungs-Verfahren | 4 |
| 2.2 | Bau und Betrieb der Tankstelle | 5 |
| 3 | H ₂ -TANKSTELLEN FÜR PKW IN DER SCHWEIZ | 7 |
| 4 | ERGEBNISSE | 9 |
| 5 | GESAMTBETRACHTUNG | 11 |
| | LITERATUR | 13 |

1 Einführung

1.1 Ausgangslage

Das Bundesamt für Energie aktualisiert jährlich die Grundlagendaten für die Energieetikette für Personenwagen. Teil der diesjährigen Aktualisierung sind die Sachbilanzdaten der Wasserstoff-Herstellung.

1.2 Gegenstand der Aktualisierung

Die Herstellung von Wasserstoff mit Dampfreformierung von Methan beruht neu auf Sachbilanzdaten des Paul Scherrer Instituts (Simons & Bauer 2011). Bei der Wasserstoff-Elektrolyse mit Schweizer Strom, der Methan-Dampfreformierung und für den Betrieb der Tankstelle wird neu der Lieferanten-Strommix 2014 gemäss Messmer & Frischknecht (2016) verwendet. Die Wasserstoff Tankstelle sowie dessen Betrieb wurden mit Sachbilanzdaten aus der Ökobilanzstudie von Wasserstoff, die der VUE naturmade in Auftrag gab, aktualisiert. Die dazu verwendeten Daten stammen zu einem grossen Teil von Herrn Dietrich der H₂ Energy AG.

Ebenfalls wird neu ein Wasserstoffmix ab Schweizer Tankstelle erstellt. Dafür müssen die Anteile des Wasserstoff-Absatzes der einzelnen Wasserstoff-Tankstellen an Pkw geschätzt und die Produktionsweise des Wasserstoffes eruiert werden. In der Schweiz gibt es zurzeit nur eine öffentlich zugängliche Wasserstoff-Tankstelle¹. Diese gehört Coop und befindet sich in Hunzenschwil². Der dort verkaufte Wasserstoff wird via PEM-Elektrolyse beim Wasserkraftwerk in Aarau erzeugt und dann mit einem Wasserstoff-Trailer zur Tankstelle transportiert². Da in diesem Fall die Herstellung von Wasserstoff nicht dezentral erfolgt, wird im Falle von Wasserstoff aus 100 % Wasserkraft neu zusätzlich zur dezentralen Herstellung ebenfalls die Herstellung direkt beim Kraftwerk mit anschliessendem Transport zur Tankstelle modelliert. Des Weiteren gibt es eine halb-öffentliche Wasserstoff-Tankstelle der EMPA in Dübendorf, wo Wasserstoff via Elektrolyse hergestellt und auf das Druckniveau von 700 bar für Pkw komprimiert wird und drei weitere Wasserstoff-Tankstellen, an denen zurzeit keine privaten Benützer Wasserstoff tanken³.

¹ Persönliche Mitteilung, Philipp Dietrich, H₂ Energy AG, 21. April 2017

² Factsheet Elektrolyse: http://www.coop.ch/pb/site/medien/node/84732590/Lde/index.html#http://www.coop.ch/pb/site/medien/get/params_Dattachment/84734082/DSC_9359_g.jpg, abgerufen am 21. April 2017

³ <https://www.netinform.de/H2/H2Stations/Default.aspx>, abgerufen am 8. Mai 2017; Persönliche Mitteilung, Rachel Debros, SwissHydrogen SA, 8. Mai 2017; Persönliche Mitteilung, Bruno Suter, Messer AG, 27. April 2017; Persönliche Mitteilung, Heron Vrubel, LEPA – STEP Martigny, 11. Mai 2017

1.3 Datengrundlage

Datengrundlage bildet der aktuellste KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 (KBOB et al. 2016), welcher auf dem ecoinvent-Datenbestand v2.2 basiert. Die Modellierung erfolgt gemäss den Bilanzierungsregeln des vorgenannten ecoinvent Datenbestands. Die Umweltbewertung wird mit folgenden Indikatoren durchgeführt:

- Primärenergiefaktoren, gesamt (Frischknecht et al. 2015)
- Treibhausgasemissionen mit den aktuellsten Treibhauspotenzialen des IPCC (2013, Kapitel 8)
- Gesamtumweltbelastung gemäss den Ökofaktoren Schweiz 2013 der Methode der ökologischen Knappheit (Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013)

2 Systembeschreibung

Die Herstellung von Wasserstoff (H_2) via Elektrolyse wird mit der konventionellen Herstellung (Methan-Dampfreformierung, engl. Steam-Methane-Reforming, SMR) verglichen. Als funktionelle Einheit dient „1 kg bzw. 1 Liter Wasserstoff ab Tankstelle“. Berücksichtigt sind dabei die Umweltauswirkungen von der Herstellung des Wasserstoffes bis und mit Betankung der Pkw an einer H_2 -Tankstelle. Dabei wird die H_2 -Produktion via Elektrolyse mit drei verschiedenen Stromprodukten untersucht. Bei Strom aus Wasserkraft wird zudem zwischen einer dezentralen Herstellung (Herstellung bei der Tankstelle) und einer Herstellung direkt beim Kraftwerk (Strom ab Klemme) unterschieden. Auch eine H_2 -Produktion vor Ort mit geringerer Kapazität wäre mit dem Methan-Dampfreformierungs-Verfahren möglich (Simons & Bauer 2011). Die von Simons und Bauer (2011) modellierte Produktion ist jedoch repräsentativ für eine grössere, zentralisierte Produktionsanlage und steht deshalb nicht am Ort der Tankstelle.

Für Wasserstoff, welcher nicht direkt bei der Tankstelle produziert wird, wird aus Gründen der Vergleichbarkeit derselbe Transportaufwand angenommen, unabhängig davon, wie der Wasserstoff hergestellt wird (Elektrolyse mit 100 % Strom aus Wasserkraft oder Methan-Dampfreformierung). Auch in der Schweiz wird Wasserstoff mit der Methan-Dampfreformierung produziert; zum Beispiel von der Messer AG, einem der grössten Wasserstoffproduzenten der Schweiz⁴. Die Messer AG besitzt zudem eine halb-öffentliche Wasserstofftankstelle auf dem Firmengelände in Lenzburg, wo Wasserstoff zentral produziert wird⁵. Jedoch wird die Tankstelle seit der Eröffnung der Coop

⁴ http://www.messer.ch/produkte_loesungen/Metallurgie/Industrie_Wasserstoffantrieb/index.html, abgerufen am 25. April 2017

⁵ <https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/kanton-aargau/steht-die-wasserstoff-revolution-bevor-der-markt-koennte-explodieren-130286350>, abgerufen am 21. April 2017

Tankstelle in Hunzenschwil nicht mehr von Privatpersonen benutzt und die Messer AG hat kein Interesse daran H₂-Tankstellen zu betreiben⁶.

Bei beiden Produktionsverfahren (Elektrolyse und Methan-Dampfreformierung) wird der Wasserstoff anschliessend an der Tankstelle komprimiert, sodass ein Druck im voll befüllten Pkw-Tank von 700 bar gewährleistet ist (Bünger et al. 2014).

Die Sachbilanzen unterscheiden sich somit nur in der Herstellung des Wasserstoffs, der Stromquelle für den Betrieb der Tankstelle und dem zusätzlichen Transportaufwand, sofern die H₂-Produktion nicht vor Ort geschieht.

2.1 H₂-Herstellung

2.1.1 H₂-Herstellung mit dem Wasserelektrolyse-Verfahren

Bei der Wasserelektrolyse wird Wasser mit Hilfe von Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. In den Sachbilanzen (siehe Tab. 2.1) wurde neu bei der Variante „Schweizer Strommix“ der Schweizer-Lieferanten-Strommix 2014 verwendet. Die Daten zur Herstellung von Wasserstoff basieren auf Daten eines führenden Herstellers von Anlagen zur vor Ort Herstellung von Wasserstoff (Proton 2013). Als Anlagemodell dient der Elektrolyseur Hogen C30 von Proton OnSite. Dieses Modell ist ebenfalls repräsentativ für die zentrale H₂-Produktion in der Schweiz, da es sich beim Elektrolyseur beim Wasserkraftwerk in Aarau um exakt denselben Elektrolyseur (Hogen C30 von Proton OnSite) handelt⁷.

Inputs:

- Strombedarf 64.5 kWh/kg Wasserstoff (gedeckt durch 3 verschiedene Stromprodukte)
- deionisiertes Wasser: 17.1 kg pro kg Wasserstoff
- Kühlbedarf: 108 MJ/kg Wasserstoff
- Kälte ab Kaltwassersatz R134a (Strombedarf 0.028 kWh/MJ abgeführte Wärme)
- Herstellung der Anlage (modelliert mit „metal working machine, unspecified, at plant, RER“, 15 Jahre Betrieb, 4'000 Volllaststunden pro Jahr, Gesamtgewicht gemäss Bünger et al. 2014)
- Abwärme (gemäss Strombedarf)

⁶ <https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/kanton-aargau/steht-die-wasserstoff-revolution-bevor-der-markt-koennte-explodieren-130286350>, abgerufen am 25. April 2017

⁷ Factsheet Elektrolyse: http://www.coop.ch/pb/site/medien/node/84732590/Lde/index.html#http://www.coop.ch/pb/site/medien/get/params_Dattachment/84734082/DSC_9359_g.jpg, abgerufen am 21. April 2017

Dieses Verfahren erzeugt Wasserstoff mit einem Druck von 30 bar (Proton 2013). Der zur Herstellung von Wasserstoff verwendete Strom wird mit den drei folgenden unterschiedlichen Stromprodukten modelliert:

- 100 % Photovoltaik (Itten & Frischknecht 2014)
- 100 % Wasserkraft, ab Netz für dezentrale H₂-Produktion und ab Klemme für zentrale H₂-Produktion (Itten & Frischknecht 2014)
- Schweizer-Lieferanten-Strommix (Messmer & Frischknecht 2016), das heisst Schweizer Strommix inklusive zertifizierte Stromprodukte.

Tab. 2.1: Sachbilanzdaten für Wasserstoff ab Elektrolyse unter Verwendung der drei verschiedenen Stromprodukte 100 % Solarstrom, 100 % Wasserkraft (ab Netz und ab Klemme) und Schweizer-Lieferanten-Strommix gemäss BFE-Erhebung 2014

| Name | Location Infrastructure-Process | Unit | hydrogen, from 100% PV, at electrolysis | hydrogen, from 100% hydropower at grid, at electrolysis | hydrogen, from 100% hydropower at plant, at electrolysis | hydrogen, from consumer mix, at electrolysis | uncertainty type | Standard Deviations |
|--|---------------------------------|-------|---|---|--|--|------------------|--|
| | | | CH | CH | CH | CH | | |
| | | | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | kg | kg | kg | kg | | |
| Outputs | | | | | | | | |
| hydrogen, from 100% PV, at electrolysis | CH | 0 kg | 1 | | | | | |
| hydrogen, from 100% hydropower at grid, at electrolysis | CH | 0 kg | | 1 | | | | |
| hydrogen, from 100% hydropower at plant, at electrolysis | CH | 0 kg | | | 1 | | | |
| hydrogen, from consumer mix, at electrolysis | CH | 0 kg | | | | 1 | | |
| technosphere | | | | | | | | |
| electricity, low voltage, production from photovoltaic, at grid | CH | 0 kWh | 6.45E+1 | | | | 1 | 1.24 (1,4,1,2,1,5,BU:1.05); Gemäss Hersteller-Angaben von Proton OnSite zu Elektrolyseur Hogen C30 |
| electricity, low voltage, production from hydro power, at grid | CH | 0 kWh | | 6.45E+1 | | | 1 | 1.24 (1,4,1,2,1,5,BU:1.05); Gemäss Hersteller-Angaben von Proton OnSite zu Elektrolyseur Hogen C30 |
| electricity, hydropower, at run-of-river power plant without reservoir | CH | 0 kWh | | | 6.45E+1 | | 1 | 1.24 (1,4,1,2,1,5,BU:1.05); Gemäss Hersteller-Angaben von Proton OnSite zu Elektrolyseur Hogen C30 |
| electricity, low voltage, consumer mix, at grid | CH | 0 kWh | | | | 6.45E+1 | 1 | 1.24 (1,4,1,2,1,5,BU:1.05); Gemäss Hersteller-Angaben von Proton OnSite zu Elektrolyseur Hogen C30 |
| water, deionised, at plant | CH | 0 kg | 1.71E+1 | 1.71E+1 | 1.71E+1 | 1.71E+1 | 1 | 1.24 (1,4,1,2,1,5,BU:1.05); Gemäss Hersteller-Angaben von Proton OnSite zu Elektrolyseur Hogen C30 und der H2 Produktionsmenge pro Stunde gemäss Email von Urs Cabalzar vom 27.05.2015 |
| cooling, at cold water aggregate, R134a with 100% PV | CH | 0 MJ | 1.08E+2 | | | | 1 | 1.30 (3,3,1,1,1,5,BU:1.05); Gemäss Email von Urs Cabalzar vom 27.05.2015 |
| cooling, at cold water aggregate, R134a with 100% hydro power at grid | CH | 0 MJ | | 1.08E+2 | | | 1 | 1.30 (3,3,1,1,1,5,BU:1.05); Gemäss Email von Urs Cabalzar vom 27.05.2015 |
| cooling, at cold water aggregate, R134a with 100% hydro power at plant | CH | 0 MJ | | | 1.08E+2 | | 1 | 1.30 (3,3,1,1,1,5,BU:1.05); Gemäss Email von Urs Cabalzar vom 27.05.2015 |
| cooling, at cold water aggregate, R134a with consumer mix | CH | 0 MJ | | | | 1.08E+2 | 1 | 1.30 (3,3,1,1,1,5,BU:1.05); Gemäss Email von Urs Cabalzar vom 27.05.2015 |
| metal working machine, unspecified, at plant | RER | 1 kg | 2.71E-2 | 2.71E-2 | 2.71E-2 | 2.71E-2 | 1 | 3.05 (1,1,2,2,1,5,BU:3); Gemäss Büniger et al. 2014 und der H2 Produktionsmenge pro Stunde gemäss Email von Urs Cabalzar |
| emission air, high population density | | | | | | | | |
| Heat, waste | - | - MJ | 2.32E+2 | 2.32E+2 | 2.32E+2 | 2.32E+2 | 1 | 1.24 (1,4,1,2,1,5,BU:1.05); wegen Elektrizitätsverbrauch |

2.1.2 H₂-Herstellung mit dem Methan-Dampfreformierungs-Verfahren

Bei der Methan-Dampfreformierung wird Erdgas, welches primär aus Methan besteht, und Wasserdampf, in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgewandelt. Die Sachbilanz dazu wurde neu vollständig von Simons und Bauer (2011) übernommen. Da die Produktion in der Schweiz stattfindet, wird der Strombedarf mit dem Schweizer-Lieferanten-Strommix abgebildet. Der so hergestellte Wasserstoff wird mit einem Druck von 30 bar bereitgestellt. Der Umwandlungswirkungsgrad bezogen auf den oberen Heizwert beträgt gemäss Simons und Bauer (2011) 79.2 % und der entstehende

Dampf wird nicht weiterverwendet. Weitere Informationen zu diesem Verfahren können der Studie von Simons und Bauer (2011) entnommen werden.

2.2 Bau und Betrieb der Tankstelle

Die Sachbilanz der Infrastruktur der H₂-Tankstelle wurde vollständig und die Sachbilanz des Betriebs der Tankstelle teilweise aus der Ökobilanzstudie von Wasserstoff, die vom VUE naturemade in Auftrag gegeben wurde, übernommen. Die Sachbilanzen beruhen zu einem grossen Teil auf Daten, die von Herrn Dietrich der H₂ Energy AG zur Verfügung gestellt wurden.

Wo vor Ort H₂ mit Strom aus 100 % Wasserkraft beziehungsweise 100 % Photovoltaik produziert wird, wird auch die Tankstelle mit Strom aus 100 % Wasserkraft beziehungsweise Photovoltaik betrieben. H₂-Tankstellen, die mit dem Wasserstoff-Trailer beliefert werden, werden mit dem Schweizer-Lieferanten-Strommix 2014 betrieben.

Zusätzlich wird bei H₂-Tankstellen Strom für die Komprimierung des Wasserstoffs von 30 bar auf 880 bar für die Betankung von Pkws benötigt. Ein Druck von 880 bar wird benötigt, um einen Druck von 700 bar bei 15°C im voll befüllten Pkw-Tank in jedem Fall zu gewährleisten (Bünger et al. 2014). Gemäss Bünger et al. (2014) beträgt der Stromverbrauch einer H₂-Tankstelle über Elektrolyse vor Ort inklusive Komprimierung und Vorkühlung des Wasserstoffs 0.079 MJ pro MJ Wasserstoff, respektive 2.63 kWh/kg H₂. Da bei der Methan-Dampfreformierung ebenfalls Wasserstoff mit einem Druck von 30 bar bereitgestellt wird, wird für diesen Wasserstoff der gleiche Stromverbrauch für den Tankstellenbetrieb angenommen. Der Sachbilanz zugrunde gelegte Strombedarf liegt damit knapp unter den 2.7 kWh/kg H₂, welche in Hunzenschwil alleine für die Verdichtung von H₂ an der Tankstelle benötigt werden⁸.

Des Weiteren wurde bei zentral hergestelltem Wasserstoff (mit Elektrolyse und SMR) noch ein Transportaufwand in die Bilanz aufgenommen, da Wasserstoff in beiden Fällen mit einem Trailer zur Tankstelle geliefert wird. Der Trailer wiegt 32 Tonnen und kann maximal 338 kg Wasserstoff transportieren⁹. In Anlehnung an die reale Situation der H₂-Tankstelle in Hunzenschwil wurde eine Transportdistanz von 10 km angenommen. Derselbe Transportaufwand wird für Wasserstoff hergestellt mit SMR ab der Tankstelle verwendet.

⁸ Factsheet Tankstelle: http://www.coop.ch/pb/site/medien/node/84732590/Lde/index.html#http://www.coop.ch/pb/site/medien/get/params_Dattachment/84734082/DSC_9359_g.jpg, abgerufen am 21. April 2017

⁹ Factsheet Elektrolyse: http://www.coop.ch/pb/site/medien/node/84732590/Lde/index.html#http://www.coop.ch/pb/site/medien/get/params_Dattachment/84734082/DSC_9359_g.jpg, abgerufen am 21. April 2017

Inputs (vgl. Tab. 2.2):

- Wasserstoff ab Elektrolyse (Annahme: keine Verluste zwischen Herstellung und Abgabe)
- Wasserstoff ab SMR gemäss Datensatz von Simons und Bauer (2011)
- Infrastruktur und Betrieb (ohne Stromverbrauch) der H₂-Tankstelle (vertraulicher Datensatz¹⁰)
- Strombedarf für die Komprimierung und Betrieb der Tankstelle (gedeckt mit 3 verschiedenen Stromprodukten)
- Lkw Transport von Wasserstoff zur Tankstelle bei zentral hergestelltem Wasserstoff
- Abwärme gemäss Strombedarf

In Tab. 2.2 werden alle erstellten Sachbilanzen für Wasserstoff mit Elektrolyse und SMR ab Tankstelle aufgezeigt. Die Sachbilanzdaten beziehen sich immer auf 1 kg betankten Wasserstoff mit einem Druck von 700 bar.

¹⁰ Beruht auf Daten von Herrn Philipp Dietrich, H₂ Energy AG, welche im Rahmen der Ökobilanzstudie zu Wasserstoff für den VUE naturemade zur Verfügung gestellt wurden, 12. September 2016

Tab. 2.2: Sachbilanzdaten für Wasserstoff produziert an Ort (dezentral) ab Tankstelle Schweiz unter Verwendung der drei verschiedenen Stromprodukte 100 % Solarstrom, 100 % Wasserkraft und Schweizer-Lieferanten-Strommix gemäss BFE-Erhebung 2014 und für zentral produzierten Wasserstoff ab Tankstelle aus 100 % Strom aus Wasserkraft und mittels Methan-Dampfreformierung produziert.

| Name | Location | Infrastructure | Process | Unit | hydrogen, from 100% PV, production on site, 700 bar, at service station | hydrogen, from 100% hydropower, production on site, 700 bar, at service station | hydrogen, from consumer mix, production on site, 700 bar, at service station | hydrogen, from 100% hydropower, 700 bar, at service station | hydrogen, steam methane reforming (SMR), 700 bar, at service station | uncertaintyType | StandardDeviation95% | GeneralComment |
|-------------------------------|---|----------------|---------|------|---|---|--|---|--|-----------------|----------------------|--|
| | | | | | CH | CH | CH | CH | CH | | | |
| Location | Infrastructure | Process | Unit | CH | CH | CH | CH | CH | CH | | | |
| Outputs | hydrogen, from 100% PV, production on site, 700 bar, at service station | CH | 0 | kg | 1 | | | | | | | |
| | hydrogen, from 100% hydropower, production on site, 700 bar, at service station | CH | 0 | kg | | 1 | | | | | | |
| | hydrogen, from consumer mix, production on site, 700 bar, at service station | CH | 0 | kg | | | 1 | | | | | |
| | hydrogen, from 100% hydropower, 700 bar, at service station | CH | 0 | kg | | | | 1 | | | | |
| | hydrogen, steam methane reforming (SMR), 700 bar, at service station | CH | 0 | kg | | | | | 1 | | | |
| technosphere | hydrogen, from 100% PV, at electrolysis | CH | 0 | kg | 1.00E+0 | | | | | 1 | 2.00 | (2,1,1,2,1,5,BU:1.05); |
| | hydrogen, from 100% hydropower at grid, at electrolysis | CH | 0 | kg | | 1.00E+0 | | | | 1 | 2.00 | (2,1,1,2,1,5,BU:1.05); |
| | hydrogen, from consumer mix, at electrolysis | CH | 0 | kg | | | 1.00E+0 | | | 1 | 2.00 | (2,1,1,2,1,5,BU:1.05); |
| | hydrogen, from 100% hydropower at plant, at electrolysis | CH | 0 | kg | | | | 1.00E+0 | | 1 | 2.00 | (2,1,1,2,1,5,BU:1.05); |
| | Hydrogen,30 bar, from steam methane reforming of natural gas, at plant | CH | 0 | MJ | | | | | 1.20E+2 | 1 | 1.00 | (1,1,1,2,1,5,BU:1.05); Datensatz zur Wasserstoffherstellung durch die Methan-Dampfreformierung gemäss Simons & Bauer (2011) |
| | electricity, medium voltage, production from photovoltaic, at grid | CH | 0 | kWh | 2.63E+0 | | | | | 1 | 1.00 | (1,1,1,2,1,5,BU:1.05); Stromverbrauch einer H2-Tankstelle inklusive Komprimierung und Vorkühlung des Wasserstoffs gemäss Büniger et al. 2014, Seite 103 |
| | electricity, medium voltage, production from hydro power, at grid | CH | 0 | kWh | | 2.63E+0 | | | | 1 | 1.00 | (1,1,1,2,1,5,BU:1.05); Stromverbrauch einer H2-Tankstelle inklusive Komprimierung und Vorkühlung des Wasserstoffs gemäss Büniger et al. 2014, Seite 103 |
| | electricity, medium voltage, consumer mix, at grid | CH | 0 | kWh | | | 2.63E+0 | 2.63E+0 | 2.63E+0 | 1 | 1.00 | (1,1,1,2,1,5,BU:1.05); Stromverbrauch einer H2-Tankstelle inklusive Komprimierung und Vorkühlung des Wasserstoffs gemäss Büniger et al. 2014, Seite 103 |
| emission air, high population | Heat, waste | - | - | MJ | 9.48E+0 | 9.48E+0 | 9.48E+0 | 9.48E+0 | 9.48E+0 | 1 | 1.00 | (1,1,1,2,1,5,BU:1.05); wegen Elektrizitätsverbrauch |
| technosphere | hydrogen service station and operation | CH | 0 | unit | 1.00E+0 | 1.00E+0 | 1.00E+0 | 1.00E+0 | 1.00E+0 | 1 | 1.00 | (1,1,1,2,1,5,BU:1.05); vertraulicher Datensatz aus der Ökobilanzierungsstudie von Wasserstoff des VUE naturemade, basiert auf Informationen von Herrn Philipp Dietrich, H2-Energy AG |
| | transport, lorry >28t, fleet average | CH | 0 | tkm | | | | 2.90E-1 | 2.90E-1 | 1 | 1.00 | (1,4,1,2,1,5,BU:2); Gemäss Coop Factsheet Elektrolyse: erste Coop-Wasserstofftankstelle |

3 H₂-Tankstellen für Pkw in der Schweiz

Wie in Unterkapitel 1.2 erwähnt, gibt es in der Schweiz zurzeit nur eine öffentliche H₂-Tankstelle und zwar diejenige von Coop in Hunzenschwil, deren H₂ zentral beim Wasserkraftwerk Aarau produziert wird^{11,13}.

Der Gasehersteller Messer Schweiz AG in Lenzburg, welcher vor Ort Wasserstoff mittels Dampfreformierung herstellt, besitzt eine halb-öffentliche H₂-Tankstelle (vgl. Kapitel 2)¹². Diese wird als halb-öffentlich bezeichnet, da sich die H₂-Tankstelle hinter

¹¹ Persönliche Mitteilung, Philipp Dietrich, H₂ Energy AG, 21. April 2017

¹² <https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/kanton-aargau/steht-die-wasserstoff-revolution-bevor-der-markt-koennte-explodieren-130286350>, abgerufen am 25. April 2017

dem Firmentor befindet und sich Privatpersonen im Voraus bei der Messer Schweiz AG für eine H₂-Betankung anmelden müssen¹³. Vor der Eröffnung der Coop H₂-Tankstelle wurden bei der Messer Schweiz AG jährlich zwischen 20 bis 30 Betankungen¹⁴ vorgenommen, was weniger als 1 % der jährlich hergestellten Wasserstoffmenge der Messer Schweiz AG entspricht¹³. Seit der Eröffnung der Coop H₂-Tankstelle tanken diese 5 bis 6 Privatpersonen ihre Fahrzeuge nicht mehr bei der Messer Schweiz AG¹³. Bei der Tankstelle in Hunzenschwil handelt es sich um die erste komplett öffentliche Wasserstofftankstelle, die im November 2016 eröffnet wurde¹⁵.

Weiter können Privatpersonen an der halb-öffentlichen H₂-Tankstelle der Empa in Dübendorf tanken. Die Tankstelle ist halb-öffentlich, da zuerst ein Badge von Privatpersonen beantragt werden muss, um tanken zu können¹⁶. Der Wasserstoff für Pkw der Tankstelle an der Empa wird ebenfalls durch Elektrolyse mit einem PEM-Elektrolyseur, wie beim Wasserkraftwerk Aarau und für die Elektrolyse-Sachbilanzen dieser Studie verwendet, produziert¹⁷. Der Wasserstoff wird mit Strom mit Herkunftsnachweis aus dem Wasserkraftwerk in Eglisau produziert. Es handelt sich also um dezentral produzierten Wasserstoff mit Strom aus 100% Wasserkraft¹⁴. An der Tankstelle der Empa wird ein der Empa eigener Pkw, ein Kehrfahrzeug (welches hinsichtlich Verbrauch ungefähr 5 Pkw entspricht) und noch einige private Pkw getankt, welche zusammen zwischen 1'400 kg – 2'400 kg Wasserstoff von der Tankstelle beziehen (bei einem H₂-Verbrauch von 1 kg / 100 km mit mittleren Laufleistungen von 15'000 km pro Jahr)¹⁴. Ohne Berücksichtigung des Kehrfahrzeugs entspricht dies einem H₂-Verbrauch pro Jahr von 700 kg – 1'200 kg alleine für die Pkw.

Die EPFL besitzt eine H₂-Tankstelle in Martigny mit zwei Elektrolyseuren (Chloralkali und PEM Elektrolyseur), welche jedoch noch nicht in Betrieb sind¹⁸. Der Chloralkali Elektrolyseur sollte im Verlauf von diesem Jahr und der PEM Elektrolyseur Ende 2017 in Betrieb genommen werden¹⁸. Beide werden mit dem lokalen Strommix Wasserstoff produzieren¹⁸. Sobald an der Tankstelle Wasserstoff dezentral hergestellt wird, kann Wasserstoff auf dem Druckniveau von 700 bar getankt werden. Jedoch verläuft die Bereitstellung von Wasserstoff mit 700 bar nicht gemäss SAE Protokoll ab¹⁸. Die EPFL besitzt seit März 2016 ein Hyundai ix35 Brennstoffzellenauto, welches zurzeit noch mit

¹³ Persönliche Mitteilung, Bruno Suter, Messer AG, 27. April 2017

¹⁴ Bei einer Volltankung werden circa 6 kg H₂ getankt (gemäss Factsheet der Coop H₂-Tankstelle), was einem bisherigen H₂-Jahresverbrauch der Tankstelle der Messer Schweiz AG von 120 kg – 180 kg entspricht.

¹⁵ <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-64048.html>, abgerufen am 25. April 2017

¹⁶ Persönliche Mitteilung, Christian Bach, Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme, Empa, 4. Mai 2017

¹⁷ <https://www.empa.ch/de/web/s604/fuel-cell-conference>, abgerufen am 26. April 2017

¹⁸ Persönliche Mitteilung, Heron Vrabel, Site Manager, LEPA – STEP Martigny, 11. Mai 2017

Wasserstoff von Carbagas getankt wird. Sinergy, ein Projektpartner der EPFL, besitzt bald einen Kangoo mit Brennstoffzellen-Range-Extender Antriebssystem¹⁸. Die Tankstelle ist und bleibt auch nicht öffentlich, aber es besteht die Möglichkeit für Privatpersonen durch eine vorhergehende Reservierung, zu tanken¹⁸.

Nicht zuletzt gibt es noch eine H₂-Tankstelle in Freiburg von SwissHydrogen SA. Diese Tankstelle produziert Wasserstoff dezentral mit einem Elektrolyseur und einer eigenen Photovoltaikanlage auf dem Firmendach¹⁹. Die Tankstelle stellt H₂ nur auf dem Druckniveau von 350 bar zur Verfügung. Normalerweise betanken Busse, Lastwagen und Kehrriichtabfuhrwagen Wasserstoff mit 350 bar. Betankt werden an der Tankstelle in Freiburg jedoch nur zwei firmeneigene Brennstoffzellen-Range-Extender Antriebssystem-Pkw, ein Fiat und ein Kangoo, welche SwissHydrogen selbst (um)gebaut hat¹⁹. Damit ist die Tankstelle nicht öffentlich, aber auf Verlangen könnten auch andere Benutzer Wasserstoff tanken¹⁹.

In der Schweiz gibt es gemäss dem European Alternative Fuels Observatory 36 Brennstoffzellen-Pkw (Stand Ende 2016)²⁰ und bei allen Pkw handelt es sich um den Hyundai ix35 fuel cell. Coop selbst besitzt 12 davon²¹. Bei der Tankstelle der EMPA tanken ungefähr 5 Pkw¹⁶. Dadurch deckt die Tankstelle der EMPA rund 15 % des Wasserstoffs von 700 bar der an Schweizer Tankstellen abgesetzt wird ab. Die restlichen 85 % werden durch die Tankstelle von Coop in Hunzenschwil abgedeckt. Damit besteht der Wasserstoffmix, der heute in der Schweiz getankt wird, zu 85 % aus zentral und zu 15 % aus dezentral mit Elektrolyse aus 100 % Wasserkraftstrom hergestelltem Wasserstoff.

4 Ergebnisse

Tab. 4.1 zeigt die Umweltkennwerte der Bereitstellung von Wasserstoff ab Tankstelle Schweiz, bezogen auf 1 kg beziehungsweise 1 Liter Wasserstoff. Wasserstoff aus der konventionellen Produktion weist zwar den geringsten Primärenergiebedarf pro kg Wasserstoff auf (58 % geringer als dezentral mit dem Lieferanten-Strommix produzierter H₂), hat jedoch auch den geringsten Anteil erneuerbarer Primärenergie und verursacht die höchsten Treibhausgasemissionen (um 42 % höhere Treibhausgasemissionen als dezentral mit dem Lieferanten-Strommix produzierter H₂). Bei konventionellem Wasserstoff ab Tankstelle verursacht die Methan-

¹⁹ Persönliche Mitteilung, Rachel Debros, SwissHydrogen SA, 8. Mai 2017

²⁰ <http://www.eafo.eu/vehicle-statistics/fcev>, abgefragt am 11. Mai 2017

²¹ Factsheet Tankstelle: http://www.coop.ch/pb/site/medien/node/84732590/Lde/index.html#http://www.coop.ch/pb/site/medien/get/params_Dattachment/84734082/DSC_9359_g.jpg, abgerufen am 21. April 2017

Dampfreformierung 90.7 %, die Tankstelle 1.8 %, der Stromverbrauch an der Tankstelle 6.9 % (Strombedarf gedeckt mit dem Lieferanten-Strommix) und der Transport zur Tankstelle 0.6 % der Gesamtumweltbelastung.

Zentral mit Wasserkraft produzierter Wasserstoff ab Tankstelle Schweiz verursacht eine um 40 % tiefere Umweltbelastung, 13 % tiefere Treibhausgasemissionen und weist einen um 6 % tieferen Primärenergiebedarf auf als dezentral mit Wasserkraft produzierter Wasserstoff. Die um 40 % tiefere Umweltbelastung rührt daher, dass bei der zentralen H₂-Herstellung der Strom direkt ab Kraftwerk noch vor der Einspeisung ins Netz genutzt wird. Damit entfallen die Netzaufwände und -verluste, was durch die unmittelbare Nähe des Elektrolyseurs an das Wasserkraftwerk ermöglicht wird. Diese damit verbundene geringere Umweltbelastung macht die höhere Belastung des Transports von H₂ zur Tankstelle und die mit dem Schweizer-Lieferanten-Strommix anstelle von 100 % Wasserkraftstrom betriebene Tankstelle bei weitem wett. So verursacht die Herstellung von zentral hergestelltem Wasserstoff mit Strom aus 100 % Wasserkraft 62 %, der Stromverbrauch an der Tankstelle 28 % (Strombedarf gedeckt mit dem Lieferanten-Strommix), die Tankstelle 7.6 % und der Transport an die Tankstelle 2.4 % der Umweltbelastung aus.

Tab. 4.1: Umweltauswirkungen der Bereitstellung von Wasserstoff ab Tankstelle, inklusive Betankung von dezentral und zentral hergestelltem Wasserstoff via Wasserelektrolyse und Methan-Dampfreformierung und dem Wasserstoffmix ab Schweizer Tankstelle. Die Dichte von Wasserstoff beträgt 0.0000899 kg/L und der untere Heizwert 120 MJ/kg.

| Treibstoffe | Gesamtumweltbelastung | | Primärenergie | | Anteil Primärenergie erneuerbar % | Primärenergiefaktor MJ-eq/MJ | Treibhausgasemissionen | | Kohlendioxidemissionen | |
|---|-----------------------|-------|---------------|---------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| | UBP/kg | UBP/L | MJ-eq/kg | MJ-eq/L | | | kgCO ₂ -eq/kg | kgCO ₂ -eq/L | kgCO ₂ /kg | kgCO ₂ /L |
| Wasserstoff (Lieferanten-Strommix, dezentral) | 21'943 | 1.97 | 644 | 0.0579 | 25.4 | 5.37 | 11.3 | 0.00102 | 9.97 | 0.000896 |
| Wasserstoff (PV-Strom, dezentral) | 13'179 | 1.18 | 397 | 0.0357 | 77.6 | 3.31 | 7.58 | 0.000681 | 5.90 | 0.000530 |
| Wasserstoff (Wasserkraft-Strom, dezentral) | 4'043 | 0.363 | 306 | 0.0275 | 96.2 | 2.55 | 1.69 | 0.000152 | 0.858 | 0.0000771 |
| Wasserstoff (Wasserkraft-Strom, zentral) | 2'433 | 0.219 | 287 | 0.0258 | 91.5 | 2.39 | 1.47 | 0.000132 | 0.843 | 0.0000757 |
| Wasserstoff (Methan-Dampfreformierung, zentral) | 9'753 | 0.877 | 270 | 0.0243 | 2.88 | 2.25 | 15.2 | 0.00136 | 14.2 | 0.00127 |
| Wasserstoffmix, ab Tankstelle Schweiz | 2'675 | 0.240 | 290 | 0.0260 | 92.2 | 2.41 | 1.50 | 0.000135 | 0.845 | 0.0000760 |

Bei dezentral hergestelltem Wasserstoff mit Strom aus 100 % Wasserkraft macht die Elektrolyse selbst 94.4 %, die Tankstelle 4.4 % und der Stromverbrauch an der Tankstelle 1.2 % (Strombedarf gedeckt mit Wasserkraft) der Umweltbelastung aus. Der Wasserstoffmix ab Tankstelle Schweiz weist Umweltkennwerte nahe jenen des zentral hergestellten Wasserstoffs mit 100 % Wasserkraftstrom auf.

Unter den dezentral mit Strom hergestellten Wasserstoffprodukten weist H₂ produziert mit Strom aus 100 % Wasserkraft bei allen Indikatoren die kleinsten und H₂ produziert mit dem Schweizer-Lieferanten-Strommix die grössten Umweltauswirkungen auf. Der Anteil erneuerbarer Primärenergie bei der dezentralen Herstellung von H₂ mittels Strom liegt bei rund 96 % (Herstellung mit Wasserkraftstrom) beziehungsweise bei 78 % (Herstellung mit Solarstrom) und 25 % (Herstellung mit Lieferanten-Strommix).

Tab. 4.2 zeigt die Primärenergiefaktoren der Bereitstellung von Wasserstoff ab Tankstelle von dezentral und zentral hergestelltem Wasserstoff via Wasserelektrolyse und Methan-Dampfreformierung und jenen vom Wasserstoffmix ab Schweizer

Tankstelle im Vergleich zu anderen Treibstoffen auf (siehe Stolz & Frischknecht (2017)). Ein tieferer Primärenergiefaktor (bzw. Primärenergiebedarf oder Primärenergie-Benzinäquivalent) bedeutet, dass weniger Energie für die Bereitstellung eines Treibstoffs bis zur Tankstelle aufgewendet wird. Je näher der Primärenergiefaktor eines Treibstoffs bei 1.0 liegt, desto weniger Primärenergie wurde zusätzlich zu seinem Energieinhalt für die Bereitstellung aufgewendet. Der Primärenergiefaktor von konventionell hergestelltem Wasserstoff ist tiefer als jener von Ethanol sowie Elektrizität und um knapp 6 % tiefer als jener von dezentral mit Strom aus Wasserkraft hergestelltem Wasserstoff. Wasserstoff via Elektrolyse weist nur im Falle von zentral hergestelltem Wasserstoff mit 100 % Wasserkraftstrom einen tieferen Primärenergiefaktor auf als Elektrizität (Lieferanten-Strommix 2014 gemäss Messmer & Frischknecht (2016)). Deshalb ist auch der Wasserstoffmix ab Schweizer Tankstelle leicht unter dem Primärenergiefaktor von Elektrizität. Dezentral produzierter Wasserstoff mit 100 % PV-Strom oder mit dem Schweizer-Lieferanten-Strommix weisen beide einen höheren Primärenergiefaktor als jener von Ethanol auf.

Tab. 4.2: Primärenergiefaktoren der Bereitstellung von Wasserstoff ab Tankstelle, konventionell und mit dem Wasserelektrolyse-Verfahren dezentral und zentral hergestellt sowie des Wasserstoffmixes ab Tankstelle Schweiz im Vergleich mit den Primärenergiefaktoren anderer Treibstoffe (siehe Stolz & Frischknecht (2017)).

| Treibstoff | Spezifischer Heizwert | Primärenergiefaktor | Spezifische Primärenergie | | Anteil Primärenergie erneuerbar | Primärenergie-Benzinäquivalent |
|--|-----------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | | MJ Öl-eq/kg | MJ Öl-eq/L | | |
| Benzin | 42.6 MJ/kg | 1.37 MJ Öl-eq/MJ | 58.4 MJ Öl-eq/kg | 43.1 MJ Öl-eq/L | 0.3 % | 1.00 L/L |
| Diesel | 43.0 MJ/kg | 1.30 MJ Öl-eq/MJ | 55.7 MJ Öl-eq/kg | 46.3 MJ Öl-eq/L | 0.3 % | 1.07 L/L |
| CNG / 10% Biogas | 46.5 MJ/kg | 1.11 MJ Öl-eq/MJ | 51.6 MJ Öl-eq/kg | 36.0 MJ Öl-eq/m ³ | 1.9 % | 0.84 L/m ³ |
| LPG (85% C ₃ H ₈) | 46.3 MJ/kg | 1.19 MJ Öl-eq/MJ | 55.3 MJ Öl-eq/kg | 29.9 MJ Öl-eq/L | 0.3 % | 0.69 L/L |
| E85 | 29.0 MJ/kg | 3.05 MJ Öl-eq/MJ | 88.6 MJ Öl-eq/kg | 69.3 MJ Öl-eq/L | 82.0 % | 1.61 L/L |
| Elektrizität | * | 2.54 MJ Öl-eq/MJ | * | 9.14 MJ Öl-eq/kWh | 25.6 % | 0.21 L/kWh |
| Wasserstoff | | | | | | |
| - Lieferanten-Strommix, dezentral | 120 MJ/kg | 5.37 MJ Öl-eq/MJ | 644 MJ Öl-eq/kg | 57.9 MJ Öl-eq/m ³ | 25.4 % | 1.35 L/m ³ |
| - PV-Strom, dezentral | 120 MJ/kg | 3.31 MJ Öl-eq/MJ | 397 MJ Öl-eq/kg | 35.7 MJ Öl-eq/m ³ | 77.8 % | 0.83 L/m ³ |
| - Wasserkraft-Strom, dezentral | 120 MJ/kg | 2.55 MJ Öl-eq/MJ | 306 MJ Öl-eq/kg | 27.5 MJ Öl-eq/m ³ | 96.2 % | 0.64 L/m ³ |
| - Wasserkraft-Strom, zentral | 120 MJ/kg | 2.39 MJ Öl-eq/MJ | 287 MJ Öl-eq/kg | 25.8 MJ Öl-eq/m ³ | 91.4 % | 0.60 L/m ³ |
| - Methan-Dampfreformierung, zentral | 120 MJ/kg | 2.25 MJ Öl-eq/MJ | 270 MJ Öl-eq/kg | 24.3 MJ Öl-eq/m ³ | 2.9 % | 0.56 L/m ³ |
| - Mix ab Schweizer Tankstelle | 120 MJ/kg | 2.41 MJ Öl-eq/MJ | 290 MJ Öl-eq/kg | 26.0 MJ Öl-eq/m ³ | 92.2 % | 0.60 L/m ³ |

5 Gesamtbetrachtung

Es stellt sich die Frage, ob mit Elektrolyse produzierter Wasserstoff einen relevanten Anteil des Schweizer Treibstoffbedarfs decken können. Dazu werden die Auswirkungen einer Substitution von 10 % des heutigen Schweizer Personenwagenbestandes durch Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Stromverbrauch der Schweiz abgeschätzt.

In der Schweiz gibt es 4'524'029 Personenwagen²² und die mittlere Fahrleistung pro Personenwagen beträgt 11'828 km pro Jahr (Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung 2017). Der NEFZ Wasserstoffverbrauch des Toyota Mirai beträgt 0.76 kg H₂/100 km (Toyota Motor Europe 2015) und jener des Hyundai ix35 fuel cell 0.95 kg H₂/100 km²³. Beim Realverbrauchszuschlag für Wasserstoffautos gehen die Meinungen auseinander und repräsentative und belastbare Erfahrungswerte liegen derzeit nicht vor. Herr Bach, Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme der EMPA geht von einem um 25 % geringeren Realverbrauchszuschlag bei Wasserstoffautos als bei Elektroautos aus, da der Energieverbrauch für die Heizung mittels Abwärme und nicht wie bei Elektroautos mit zusätzlicher Energie gedeckt werden muss²⁴. Da Althaus und Gauch (2010) für das Elektroauto einen Realverbrauchszuschlag von 70 % annehmen, ergibt sich damit ein Realverbrauchszuschlag für Wasserstoffautos von 52 %. Somit beträgt der Wasserstoffverbrauch eines durchschnittlichen H₂-Personenwagens insgesamt 1.3 kg H₂/100 km. Pro Jahr werden so rund 154 kg H₂ pro Fahrzeug respektive 69'591 Tonnen H₂ schweizweit getankt. Für die H₂-Produktion und -Bereitstellung an der Tankstelle (inkl. Verdichtung) werden rund 67 kWh Strom pro kg Wasserstoff benötigt. Hochgerechnet führt dies zu einem Anstieg des Stromverbrauchs der Schweiz um knapp 4.7 TWh pro Jahr. Das sind gut 8 % des heutigen Stromverbrauchs der Schweiz und rund 12 % der Jahresstromproduktion der Schweizer Wasserkraft.

²² https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr.html?dyn_pageIndex=0, abgerufen am 26. Mai 2017

²³ <http://www.hyundai.de/Modelle/ix35-Fuel-Cell.html>, abgerufen am 26. Mai 2017

²⁴ Persönliche Mitteilung, Christian Bach, Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme, EMPA, 11. Juli 2016

Literatur

- Althaus & Gauch 2010 Althaus H.-J. and Gauch M. (2010) Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität - Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Technologie und Gesellschaft, Empa, Dübendorf.
- Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung 2017 Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung (2017) Verkehrsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015., Neuchâtel und Bern.
- Bünger et al. 2014 Bünger U., Landinger H., Pschorr-Schoberer E., Schmidt P., Weindorf W., J. J., Lambrecht U., Naumann K. and Lischke A. (2014) Power-to-Gas (PtG) im Verkehr: Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), München, Heidelberg, Leipzig, Berlin.
- Frischknecht & Büsler Knöpfel 2013 Frischknecht R. and Büsler Knöpfel S. (2013) Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 1330. Bundesamt für Umwelt, Bern, retrieved from: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=de>.
- Frischknecht et al. 2015 Frischknecht R., Wyss F., Buesser S., Lützkendorf T. and Balouktsi M. (2015) Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. In: Int J LCA, online first, pp., DOI: 10.1007/s11367-015-0897-4.
- IPCC 2013 IPCC (2013) The IPCC fifth Assessment Report - Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.
- Itten & Frischknecht 2014 Itten R. and Frischknecht R. (2014) Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, Version 2.2+, Stand April 2014. Im Auftrag des Bundesamt für Umwelt BAFU und der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, Uster, CH, retrieved from: www.treeze.ch.
- KBOB et al. 2016 KBOB, eco-bau and IPB (2016) KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, retrieved from: www.lc-inventories.ch.
- Messmer & Frischknecht 2016 Messmer A. and Frischknecht R. (2016) Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014. treeze Ltd., Uster.
- Proton 2013 Proton (2013) C Series Hydrogen Generation Systems. Proton Energy Systems Inc., Wallingford, USA.

- Simons & Bauer 2011 Simons A. and Bauer C. (2011) Life cycle assessment of hydrogen production. In: Transition to Hydrogen; Pathways Toward Clean Transportation (Ed. Wokaun A. and Wilhelm E.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Stolz & Frischknecht 2017 Stolz P. and Frischknecht R. (2017) Energieetikette für Personenkraftwagen: Umweltkennwerte 2017 der Strom- und Treibstoffbereitstellung. treeze Ltd., Uster, CH.
- Toyota Motor Europe 2015 Toyota Motor Europe (2015) Toyota Mirai. Product Communications Division, Brussels.