

Wasserstoff-basierte Mobilität – Konzeptionierung einer nachhaltigen Supply Chain

Mark Pychal, Prof. Dr. Eric Sucky

Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Produktion und Logistik,
Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Feldkirchenstr. 21, 96052 Bamberg,
eric.sucky@uni-bamberg.de

1	Einleitung	6
2	Vorgehen der Analyse	8
3	Das Tankstellennetz	10
4	Standortlösungen für Tankstellen.....	14
5	Produktion von Wasserstoff zur Versorgung der Tankstellen	16
6	Transport von Wasserstoff zur Versorgung der Tankstellen	29
7	Fazit	32
8	Literatur	34

Abstract:

Während einige europäische Länder konkrete Pläne zum Ausstieg aus der Verbrennungstechnologie im Straßenverkehr vorlegen, wird dies in Deutschland noch kontrovers diskutiert. Trotz des Dieselskandals wird weiter daran festgehalten, dass Deutschland seine Klimaziele ohne Diesel-Autos nicht erreicht, da diese gegenüber Benzin-angetriebenen Fahrzeugen einen geringeren CO₂-Ausstoß aufweisen würden. Aktuelle Studien zeigen nun jedoch, dass Diesel-Fahrzeuge während ihrer Lebensdauer ca. 10 % mehr CO₂ ausstoßen als Benzin-Autos. Angesichts der aktuellen Entwicklungen fokussiert der vorliegende Beitrag auf eine Antriebstechnik, welche in der Diskussion um Diesel-, Benzin- und Elektroautos noch vernachlässigt wird: Wasserstoff als Antrieb. Es wird die Machbarkeit einer nachhaltigen Supply Chain für eine Wasserstoff-basierte Mobilität analysiert. Auch wenn sehr restriktive Annahmen zugrunde gelegt werden liefert dieser Beitrag eine erste Einschätzung der Machbarkeit einer Wasserstoff-basierten Mobilität, sowohl aus Kostensicht als auch anhand von Umweltgesichtspunkten.

JEL Klassifikation: Q01, Q42

Keywords: Nachhaltige Supply Chain, Wasserstoff-basierte Mobilität, Nachhaltige Antriebstechnik

Wasser ist die Kohle der Zukunft

Jules Verne, 1874

Wasserstoff ist das neue Öl

Dieter Zetsche, 2011

1 Einleitung

Aufgrund der umweltschädigenden Wirkung von CO₂ (Kohlenstoffdioxid) und anderen Treibhausgasen, der Belastung durch Feinstaub, der Einschränkung von Mobilität durch Staus und Unfälle sowie aufgrund der Lärmbelästigung verursacht insbesondere der Straßenverkehr negative externe Effekte. Diese sind mit (sozialen) Kosten verbunden, die nicht (oder nur unzureichend) in Preisen (z. B. Ökosteuern auf Benzin oder Diesel¹) erfasst werden. Die Beschäftigung mit einer nachhaltigen Mobilität zeigt, dass diese negativen externen (Umwelt-) Effekte zu Fehlallokationen und Marktversagen führen, da Mobilitätsanbieter und -nachfrager die negativen Umweltauswirkungen ihres Handelns nicht (oder nur unzureichend) in ihre Entscheidungen einbeziehen. Es werden dann zu viele Leistungen angeboten und nachgefragt, bzw. die Leistungen sind nicht nachhaltig. In diesem Sinne stellt Stern klar: „Climate change is the greatest market failure the world has ever seen.“² Und von Weizsäcker et al. folgern, dass die „[...] radikale Marktwirtschaft [...] die Gemeingüter wie das Klima, die Ozeane, die Biodiversität, die Süßwassersysteme und vieles andere dem Wettbewerb der effizientesten Ausbeuter überlassen und damit im Kern gefährdet [hat].“³ Bezüglich negativer externer Effekte ist daher ein staatliches Eingreifen nötig, insbesondere auch, weil gerade bezüglich der Nachhaltigkeit ein langfristiges Denken erforderlich ist: „Unregulated markets have no long term perspective.“⁴

Im Kontext der Maßnahmen zur Reduzierung des Klimawandels rückt immer mehr ein staatliches Verbot der Verbrennungstechnologie im Straßenverkehr in den Fokus. So hat sich Großbritannien bereits festgelegt: Ab 2040 wird der Verkauf von Neufahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren verboten. Selbst Hybridfahrzeuge, die sowohl einen elektrischen als auch einen Verbrennungsmotor besitzen, werden von dem Verbot betroffen sein. Auch in Norwegen werden ab 2025 nur noch emis-

¹ Der Tatbestand, dass der besonders umweltschädigende Luftverkehr in Deutschland bislang das Privileg besitzt, mit steuerfreiem Kerosin indirekt subventioniert zu werden, muss ökologisch gesehen als Skandal bezeichnet werden. Vgl. Bretzke (2014), S. 207.

² Vgl. Stern (2007)

³ Vgl. von Weizsäcker et al. (2009), S.372.

⁴ Vgl. Giddens (2009), S. 128.

sionsfreie Autos zugelassen und Frankreichs Umweltministerium kündigte an, dass Diesel- und Benzinmotoren im Jahr 2040 von der französischen Regierung verboten werden.⁵

Während einige europäische Länder konkrete Pläne zum Ausstieg aus der Verbrennungstechnologie im Straßenverkehr vorlegen, wird dies in Deutschland noch kontrovers diskutiert. So beruft sich die (derzeitige) Bundesregierung auch auf wissenschaftliche Studien, wonach die Klimabilanz von Elektroautos schlechter sei als die moderner Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.⁶ So erläutert beispielsweise Prof. Dr. Thomas Spengler von der TU Braunschweig: „E-Autos bieten derzeit keinen ökologischen Vorteil.“⁷ Und trotz des Dieselskandals wird weiter daran festgehalten, dass Deutschland seine Klimaziele ohne Diesel-Autos nicht erreicht, da diese gegenüber Benzin-angetriebenen Fahrzeugen einen geringeren CO₂-Ausstoß aufweisen würden. Aktuelle Studien zeigen nun jedoch, dass es nicht nur 2015 weltweit 38.000 vorzeitige Todesfälle durch Stickoxide gab, sondern dass Diesel-Fahrzeuge während ihrer Lebensdauer ca. 10 % mehr CO₂ ausstoßen als Benzin-Autos.⁸ Angesichts dieser aktuellen Entwicklungen fokussiert der vorliegende Beitrag auf eine Antriebstechnik, welche in der Diskussion um Diesel-, Benzin- und Elektroautos noch vernachlässigt wird: Wasserstoff als Antrieb (siehe Abb. 1).

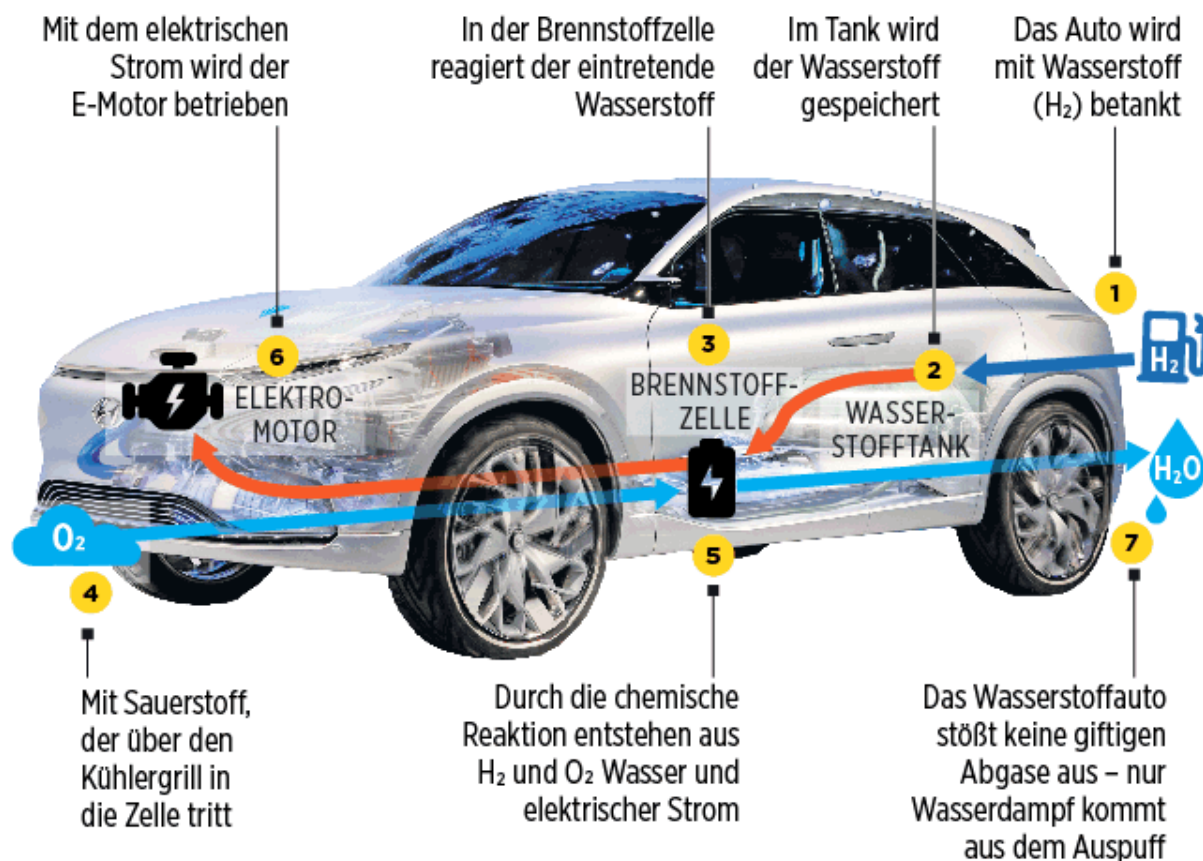
Es wird die Machbarkeit einer nachhaltigen Supply Chain (von der Produktion über den Transport bis zum Absatz) für eine Wasserstoff-basierte Mobilität analysiert. Auch wenn sehr restriktive Annahmen zugrunde gelegt werden – beispielsweise die vollständige Ersetzung aller Fahrzeuge durch Wasserstoff-Fahrzeuge sowie die Vernachlässigung von potenziellen, zukünftigen Effekten des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) oder von Car-Sharing-Modellen auf Zulassungszahlen – liefert dieser Beitrag eine erste Einschätzung der Machbarkeit einer Wasserstoff-basierten Mobilität, sowohl aus Kostensicht als auch anhand von Umweltgesichtspunkten.

⁵ Vgl. Vetter et al. (2017).

⁶ Eine Zusammenfassung der aktuellen Diskussion findet sich z. B. in der AUTO ZEITUNG vom 29.08.2017 (www.autozeitung.de)

⁷ Vgl. Schweiger (2017).

⁸ Vgl. z. B. manager magazin (2017), Stuttgarter Nachrichten (2017) oder Focus online (2017).

Abbildung 1: Wasserstoff-basierter Fahrzeugantrieb⁹

2 Vorgehen der Analyse

Der Bestand an Benzin- und Dieselaautos in Deutschland beträgt 45,8 Mio. Stück, wohingegen der Anteil an Hybridautos mit 165.405 einen Anteil von 0,36 Prozent bezüglich der Gesamtanzahl aller Pkws ausmacht.¹⁰ Noch kleiner ist der Bestand von 314 Wasserstoff-Autos.¹¹ Gründe dafür finden sich in gesellschaftlichen Gewohnheiten, der noch nicht zu 100 Prozent ausgereiften Technologie und dem Fehlen einer geeigneten Infrastruktur.¹² Während in Deutschland rund 14.272 Tankstellen für Diesel- & Benzinantriebe vorhanden sind, bieten nur wenige Standorte ebenfalls eine Betankung mit Wasserstoff an.¹³ Mehrere Unternehmen haben jedoch Projekte bezüglich der Einführung einer wasserstoffbasierten Mobilität begonnen, beispielsweise das Projekt „Hydrogen Council“. Die Unternehmen Air Liquide, Al-

⁹ Quelle: Ring (2017).

¹⁰ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2017). In diesem Kontext ist folgende Aussage der noch amtierenden Bundeskanzlerin Angela Merkel im September 2013 doch als äußerst optimistisch einzustufen: „Das Ziel ist und bleibt: Wir wollen bis 2020 eine Million Elektroautos auf Deutschlands Straßen bringen. [...] Jetzt müssen wir nur gucken, wie wir die Dinger in den Verkehr kriegen.“

¹¹ Vgl. Gerster/Wimmelbücker (2014).

¹² Vgl. Krieg (2012), S. 2.

¹³ Vgl. Statista (2017).

stom, Anglo American, BMW GROUP, Daimler, ENGIE, Honda, Hyundai Motor, Kawasaki, Royal Dutch Shell, The Linde Group, Total und Toyota haben sich zusammengeschlossen und setzen sich für die Einführung von Wasserstoff im globalen Straßenverkehr ein.¹⁴ Neben dem technologischen Voranschreiten der Brennstoffzellen-Technologie müssen auch Versorgungs- und Transportaspekte näher beleuchtet werden. Ein Schritt in diese Richtung ist die Ausarbeitung eines geeigneten Infrastrukturnetzes, um weitere Planungsebenen zu schaffen. Da Tankstellen einen wichtigen Bestandteil für wasserstoffbasierte Mobilität darstellen, bietet es sich an, das deutsche Tankstellennetz näher zu betrachten. Dies beinhaltet die Frage, inwieweit bereits ein Tankstellennetz für Wasserstoff vorhanden und inwieweit das vorhandene Tankstellennetz umrüstbar auf eine solche Betankung ist. Bei einer tatsächlichen Umstrukturierung der Mobilität müssen vor allem Tankstellenbetreiber auf solche Trends adäquat reagieren. Daher ist es wichtig, auf charakteristische Merkmale einer Wasserstoff-Tankstelle einzugehen. Diese unterscheiden sich von traditionellen Tankstellen. Eine Analyse dieser Unterschiede ist für potentielle Wasserstoff-Tankstelleneinhaber wichtig und trägt zu besserem Know-how bei. Das beinhaltet auch die Betrachtung verschiedener Varianten von Wasserstoff-Tankstellen. Neben dem überwiegend technischen Aspekt der Umrüstung stellt sich die Frage, wie ein dazugehöriges Produktions- und Logistiknetzwerk beschaffen sein muss. Einhergehend damit ist eine Analyse nach der potentiell absetzbaren Menge von Wasserstoff nötig.

Brennstoffzellenfahrzeuge verursachen keine direkten CO₂-Emissionen. Jedoch wird Energie benötigt, um Wasserstoff in ungebundener Form herzustellen. Zu beantworten ist also die Frage, ob die Wasserstoff-Produktion in der Lage ist, einen positiven Beitrag zum Klimaschutz zu leisten und ob genügend Energieressourcen für die Herstellung von Wasserstoff vorhanden sind. Folglich wirft das die Frage nach den Versorgungsmöglichkeiten für Wasserstoff-Tankstellen auf: Welche Transportlösungen gibt es, um Wasserstoff von der Produktionsquelle bis zur Tankstelle zu befördern? Wie muss ein Transportnetzwerk geschaffen sein, um Tankstellen mit genügend Wasserstoff zu versorgen?

Es existieren erst wenige wissenschaftlich ausgearbeitete Konzepte in der wasserstoffbasierten Mobilität. Zudem ist zu konstatieren, dass ein zugehöriges Produktions- und Logistiknetzwerk in der Praxis nicht existiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden neben den existierenden Publikationen mehrere Datenbanken wie z. B. die zentrale Datenbank der Bundesregierung herangezogen, um den Ist-Zustand des deutschen Tankstellennetzes aufzuzeigen. In der Frage der Umrüstbarkeit bietet es sich an, verschiedene Publikationen teils von Tankstellenbetreibern, teils von Automobilherstellern heranzuziehen. Aufgrund der über viele Jahre bereits bestehen-

¹⁴ Vgl. Hydrogen Council (2017).

den Tankstellen und der daraus generierten Erfahrung, kann die Frage der Umrüstbarkeit durch einen solchen Abgleich sehr gut beantwortet werden. Auf der Basis der relevanten Literatur und geeigneter Praxisbeispiele werden die Ergebnisse überprüft. Expertenmeinungen liefern zudem qualitative Prognosen für einen zukünftigen Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes. Für eine sehr junge, noch nicht ausgereifte Technologie stellen solche qualitativen Prognoseverfahren eine gute Möglichkeit dar, potentielle Produktions- und Absatzmengen zu erarbeiten. Die Shell-Studie präsentiert mehrere Standortlösungen für Wasserstoff-Tankstellen.¹⁵ Diese ergeben mithilfe von innovativen Lösungsvorschlägen verschiedener Automobilanbieter eine gute Auflistung möglicher Varianten von Wasserstoff-Tankstellen. Die Analyse der Wasserstoffproduktion basiert hauptsächlich auf der Publikation von Wulf und Kaltschmitt.¹⁶ Sie beleuchten verschiedene Aspekte von Wasserstoff als Kraftstoff im deutschen Verkehrssektor. Zusammen mit aktuellen Daten zur CO₂-Verursachung werden Szenarien entwickelt, um ökologische Aspekte in der Wasserstoffproduktion näher zu beleuchten. Hier werden vereinfachende Annahmen bzgl. einer möglichen Wasserstoffproduktion getroffen, da die Produktion bislang lediglich in anderen Sektoren Anwendung findet. Mit den Daten zum Energieverbrauch, öffentlich zugänglich über das Bundesumweltamt, soll das theoretische Ausmaß einer Wasserstoffproduktion im Gesamttraum Deutschland folglich charakterisiert werden. Zudem werden die Erdgasreformierung, die alkalische Elektrolyse und die Verwendung von Biomasse als Herstellmethoden vorgestellt und miteinander verglichen. Im Anschluss geht dieser Artikel, gestützt auf eine Publikation des Forschungszentrums Jülich, auf Aspekte des Transports von Wasserstoff ein.¹⁷ Hier wird das dort vorgestellte Pipelinesystem skizziert. Zuletzt soll auf die Gefahrguteigenschaft von Wasserstoff eingegangen werden, welche durch das Gefahrgutbeförderungsgesetz in Deutschland geregelt wird.¹⁸

3 Das Tankstellennetz

Im Jahr 2016 sind in Deutschland 14.531 Tankstellen registriert.¹⁹ 7.400 Tankstellen versorgen deutsche Autos mit Autogas.²⁰ Für Elektroautos, welche überwiegend Energie aus Akkumulatoren schöpfen, sind 6.888 Ladestationen in Deutschland errichtet worden.²¹ Wasserstoff-Fahrzeuge benötigen besondere Tankstellen, an denen Wasserstoff entweder in Form von Gas oder in flüssiger Form getankt werden

¹⁵ Vgl. Adolf et al. (2017), S. 51f.

¹⁶ Vgl. Wulf/Kaltschmitt (2013).

¹⁷ Vgl. Krieg (2012).

¹⁸ Vgl. Deutscher Bundestag (1975).

¹⁹ Vgl. Mineralölwirtschaftsverband e.V. (2017).

²⁰ Vgl. Deutscher Verband Flüssiggas (2017); Gas24 (2017).

²¹ Vgl. Statista (2017).

kann.²² Da mehrere Autohersteller die Produktion und Erforschung von Flüssigtanks aufgegeben haben, sind momentan vermehrt Tankstellen zur Gas-Betankung in Planung.²³

Neben den für konventionelle Tankstellen benötigten Komponenten wie Zapfpunkt, Park- und Verkaufsfläche, können folgende charakteristische Merkmale einer Wasserstoff-Tankstelle festgehalten werden: Spezielle Anlagen für die Anlieferung und Speicherung des Wasserstoffs sowie eine eigene Betankungsvorrichtung werden benötigt. Dazu gehört – unabhängig von der Versorgung der Tankstelle – anfangs ein Niederdruckspeicher, um Wasserstoff über mehrere Tage hinweg lagern zu können. Wasserstoff wird hier aufgrund seiner geringen Dichte bei 300 bar gespeichert. Da Wasserstofffahrzeuge den Kraftstoff nur in sehr komprimierter Form nutzen können, wird Wasserstoff bei der Betankung über einen Kompressor in einen Mittel- bzw. Hochdruckspeicher überführt. Autos benötigen einen Druck von 350 oder von 700 bar. Im Hochdruckspeicher entsteht ein Druck von bis zu 1000 bar. Druckverluste beim Tankvorgang führen dann wieder zu dem angestrebten Druck von 350 bzw. 700 bar. Ein solcher Prozess ist zwangsläufig mit Wärmebildung verbunden. Deswegen ist eine Kühlvorrichtung, um die vorgeschriebene Maximalwärme von 85 Grad Celsius im Fahrzeugtank nicht zu überschreiten, unabdingbar. Der Kunde kann dann mittels eines Dispensers je nach Beschaffenheit seines Fahrzeugs tanken. Charakteristische Merkmale für eine Wasserstoff-Tankstelle sind somit: Niederdruckspeicher, Kompressor, Mittel- bzw. Hochdruckspeicher, Vorkühler sowie Dispenser.

Aktuell gibt es zirka 30 Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland, welche vor allem in den Metropolregionen Deutschlands liegen. Weitere 31 Wasserstoff-Tankstellen befinden sich momentan im Bau.²⁴ Darunter auch in weniger dicht besiedelten Gebieten, wie z. B. in Geiselwind. Mit dem Ausbau des Tankstellennetzes in Deutschlands beschäftigt sich die Initiative Clean Energy Partnership.²⁵ Hier sind 20 Industriepartner, das Bundesverkehrsministerium und weitere politische Institutionen vertreten. Sie wollen einen Grundstein für eine wasserstoffbasierte Mobilität legen. Im Konkreten sieht die Clean Energy Partnership-Initiative einen Ausbau von 400 Wasserstoff-Tankstellen bis 2023 vor. Sie sollen den Anfang einer flächendeckenden Versorgung darstellen. Dabei setzt sie den Schwerpunkt auf die Errichtung von Wasserstoff-Tankstellen vor allem in Metropolregionen, wie z. B. Hamburg, Berlin oder dem Ruhr-Gebiet, sowie eine Schaffung von Verbindungskanälen zwischen

²² Vgl. Eichlseder/Klell (2010), S. 51.

²³ Vgl. Adolf et al. (2017), 52f.

²⁴ Vgl. TÜV Süd (2017).

²⁵ Vgl. Clean Energy Partnership (2017d).

diesen. Eine erste Veranschaulichung dieses Konzepts ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Visualisierung eines Wasserstoff-Tankstellennetzes²⁶

Für eine Einführung von Wasserstoff-Tankstellen in Metropolregionen sprechen mehrere Gründe.²⁷ Laut GermanHy besteht hier ein größeres Nachfragepotential aufgrund von Einkommen und einer höheren Bevölkerungszahl. Solche Ballungszentren ermöglichen zudem Kostenersparnisse, denn Tankstellen können aufgrund einer potentiell höheren Kundenzahl eher mit einer hohen Auslastung betrieben werden. Zudem muss nicht in ein geeignetes Straßennetz investiert werden, da dieses meistens durch die innerstädtische Infrastruktur als gegeben angesehen werden kann. Dadurch wird für Kunden die Erreichbarkeit einer Wasserstoff-Tankstelle sichergestellt. Ein Beispiel für die Umsetzung einer Wasserstoff-Tankstelle im

²⁶ Quelle: H²-Mobility (2017).

²⁷ Vgl. GermanHy (2009), S. 36.

größtstädtischen Bereich stellt die Berliner „TOTAL“-Tankstelle dar.²⁸ Sie bietet neben den konventionellen Kraftstoffen seit 2006 auch Wasserstoff an. Ökologisch betrachtet werden Großstädte durch hohe CO₂-Emissionen sowie weitere Schadstoffe (Feinstaub etc.) belastet. Die Hauptursache dafür findet sich im Verkehrssektor. Überschreitungen des Tagesmittelwerts von 50µg/m³ Feinstaub werden vor allem in Stuttgart und München regelmäßig gemessen.²⁹ Der Handlungsbedarf ist hier im Gegensatz zu weniger besiedelten Regionen, in denen Feinstaubbelastungen vergleichsweise gering sind, stärker ausgeprägt.³⁰ Die direkten Emissionen eines Brennstoffzellenautos, welches mit Wasserstoff betrieben wird, betragen Null.³¹ Unabhängig von der Herstellung kann durch eine wasserstoffbasierte Mobilität der Schadstoffgehalt zumindest in deutschen Großstädten gemindert und die Lebensqualität dadurch gesteigert werden. Jedoch wird der Treibhauseffekt, betrachtet aus der Gesamtperspektive, dadurch nicht zwangsweise abgemildert. Hier können vor allem in der Herstellung von Wasserstoff erhebliche CO₂-Emissionen entstehen und die Treibhausgas-Problematik lediglich regional verschieben bzw. negativ beeinflussen.

Wasserstoff-Fahrzeuge haben eine maximale Reichweite von 700 km und sind innerhalb 5 Minuten schnell zu betanken.³² Die vorgestellten Kanäle der Clean Energy Partnership-Initiative bezwecken, längere Fahrten zwischen Ballungszentren zu ermöglichen und somit der Gefahr des Liegenbleibens aufgrund von Kraftstoffmangel vorzubeugen.³³ In Form einer bedarfsorientierten Wasserstofftankstellenentwicklung soll eine hohe Auslastung erzielt werden. Dabei variiert die Tankstellengröße je nach Nachfrage. Die Kanäle werden mit einer Erschließung des Autobahn-Netzes umgesetzt. Ein konkreter Vorschlag sieht bis 2020 ein Netz von 180 Autobahntankstellen, welches einen großen Teil deutscher Autobahnkilometer abdecken soll, vor. Zu beachten ist jedoch, dass diesem theoretischen Szenario eine eher schleppende Einführung der wasserstoffbasierten Mobilität entgegensteht. Bisher ausgerufene Ziele hinsichtlich der Anzahl an Brennstoffzellenfahrzeugen und Wasserstoff-Tankstellen wurden nicht erreicht bzw. verzögern sich zum Teil.³⁴ Der bürokratische Aufwand verlangsamt die Einführung der wasserstoffbasierten Mobilität zudem. Grund hierfür ist auch, dass Wasserstoff ein Gefahrgut ist und daher besonde-

²⁸ Vgl. Energieportal24 (2004).

²⁹ Vgl. Umweltbundesamt (2016b).

³⁰ Vgl. GermanHy (2009), S. 36.

³¹ Vgl. Salchenegger (2006), S. 13.

³² Vgl. Geitmann (2013), S. 148.

³³ Vgl. GermanHy (2009), S. 37.

³⁴ Vgl. Finanztreff (2017).

ren Richtlinien folgen muss.³⁵ Das beeinflusst wiederum wesentliche Prozesse in der Entstehung einer Tankstelle und muss von Tankstellenbetreibern berücksichtigt werden.

4 Standortlösungen für Tankstellen

Im Folgenden soll näher beleuchtet werden, ob das vorhandene Tankstellennetz umrüstbar ist und inwieweit es als sinnvoll erscheint, neue Tankstellen aufzubauen. Dabei gibt es mehrere Standortlösungen. Die Shell-Publikation unterscheidet drei Arten von Standortlösungen: Die Integration des Wasserstoffangebots in eine bestehende Tankstelle, eine Neuerrichtung von Wasserstoff-Tankanlagen (sog. „Stand-alone“) sowie mobile Tankstellen.³⁶ Letztere dienen frühen Phasen der Markteinführung sowie zu Demonstrationszwecken. Da der Bedarf an Wasserstoff abhängig vom betrachteten Standort ist, sind mobile Standortlösungen in solchen Gebieten sinnvoll, in denen die Wasserstoff-Fahrzeugflotte sehr klein ist. Praxisbeispiele für mobile Wasserstoff-Tankstellen sind der „Linde trailH TM“³⁷ und die mobile Tankstelle der GHR Hochdruck-Reduziertechnik.³⁸ Während die mobile Tankstelle der Linde AG ein modifizierter Lastkraftwagen (Lkw) mit Tankvorrichtung ist, wird die Tankstelle der GHR Hochdruck Reduziertechnik GmbH auf einem Anhänger transportiert und vor Ort installiert. Beide Varianten ermöglichen ein Tanken an jedem beliebigen Ort. Sie sind jedoch abhängig von stationären (Versorgungs-)Tankstellen, da auch ihr Tank nachgefüllt werden muss. Anwendung finden mobile Tankstellen in Gebieten, bei welchen sich der Aufbau einer stationären bzw. integrierten Tankstelle nicht lohnt. Bei einer überschaubaren und nahezu gleichbleibenden Anzahl an Fahrzeugen ist eine mobile Standortlösung ebenfalls sinnvoll. So findet die mobile Standortlösung der GHR Hochdruck-Reduziertechnik an Flughäfen Anwendung, wenn kleine Fahrzeuge eingesetzt werden, um schnelle Transporte innerhalb des Flughafens zu tätigen.

Die integrierte Wasserstoff-Tankstelle ist momentan die häufigste Standortlösung. Es wird eine bereits bestehende Tankstelle um ein Wasserstoffangebot erweitert. Hierzu werden neben den bereits bestehenden Anlagen spezielle weitere zur Speicherung, Lieferung, Versorgung und Betankung benötigt. Kostentechnisch beinhaltet eine Integration Investitionen im niedrigen 7-stelligen Eurobereich. Damit gemeint sind laut Schätzungen Investitionen zwischen 1 und 2 Mio. Euro.³⁹ Hinzu kommt der Aspekt der Flächenverfügbarkeit. Tankstellen, welche sich inmitten ei-

³⁵ Vgl. Deutscher Bundestag (1975).

³⁶ Vgl. Adolf et al. (2017), S. 51–57.

³⁷ Vgl. Clean Energy Partnership (2017a).

³⁸ Vgl. HA Hessen Agentur GmbH (2011).

³⁹ Vgl. Bonhoff (2017), S. 9.

ner Stadt befinden, können nur bedingt weitere Flächen für eine Wasserstoffbetankung bereitstellen. Darüber hinaus stellen Genehmigungsverfahren, welche sich je nach Bundesland unterscheiden, weitere Anforderungen dar.⁴⁰ In der Stadt Hamburg wurden bereits drei Wasserstofftankstellen errichtet. Die jüngste existiert seit dem 16.03.2015. Hier wurde eine bereits bestehende Tankstelle um eine Wasserstoff-Tankanlage erweitert. Der Kraftstoff wird hier per Elektrolyse eigens vor Ort aus 50% Regelstrom und 50% aus regenerativ erzeugtem Strom produziert.⁴¹ In Fürholzen befindet sich eine neue Raststätte in Bau, welche alle Kraftstoffe in großen Mengen vorrätig haben soll.⁴² Die Linde AG arbeitet hier an einem Wasserstoffherzeuger. Das Großprojekt beinhaltet Investitionen von rund 9 Mio. Euro. Eine Stand-Alone-Tankstelle benötigt neben der integrierten Lösung eine noch nicht erschlossene Fläche sowie weitere Serviceeinrichtungen für Kunden. Die spezifischen Merkmale einer Wasserstofftankstelle besitzt sie ebenfalls wie die integrierte Lösung. Eine Entscheidung für oder gegen eine Stand-Alone-Tankstelle hängt überwiegend von Investitionsmöglichkeiten ab.

Neben den drei gängigen Standortlösungen werden auch weitere, spezielle Vorrichtungen erforscht. Der Automobilhersteller Honda arbeitet an einem Konzept, Tankstellen für Privatpersonen anzufertigen, welche theoretisch in jeder Garage errichtet werden können.⁴³ So soll Wasserstoff ohne Zwischenspeicherung direkt in den Fahrzeugtank gefüllt werden. Der benötigte Wasserstoff wird mit Solarenergie vor Ort hergestellt. Es soll lediglich der tägliche Fahrbedarf abgedeckt werden. Eine Betankung von 0,5 Kilogramm Wasserstoff dauert 8 Stunden. Honda schlägt vor, die Betankung nachts durchzuführen, wenn zuvor der durch Solarenergie erzeugte Strom in das eigene Stromnetz eingespeist wurde.

Ausgehend von den Standortlösungen einer Wasserstoff-Tankstelle und verschiedener Praxisbeispiele kann das heutige Netz an Tankstellen somit als weitestgehend umrüstbar angesehen werden. Entscheidend für eine jeweilige Standortlösung sind überwiegend betriebswirtschaftliche Aspekte. Laut Bachmeier, Leiter der Hydrogen Solutions der Linde AG, werden die Zulassungszahlen für Wasserstoff-Autos erst mit dem flächendeckenden Aufbau von Wasserstofftankstellen signifikant steigen.⁴⁴ Mit einem Aufbau von 50 Tankstellen soll der Bedarf an Kraftstoff für 4.000 Fahrzeuge abgedeckt werden. Aus Kundenperspektive unterstreicht Bachmeier Erwartungen, jederzeit genügend, qualitativ hochwertigen und mit Sicherheit verbundenen Kraftstoff tanken zu können.

⁴⁰ Vgl. Clean Energy Partnership (2017c).

⁴¹ Vgl. HZwei (2015).

⁴² Vgl. Süddeutsche Zeitung (2017).

⁴³ Vgl. Pluta (2010).

⁴⁴ Vgl. Bachmeier (2016).

5 Produktion von Wasserstoff zur Versorgung der Tankstellen

Statistiken zufolge ist die Anzahl der konventionellen Tankstellen in den letzten Jahrzehnten gesunken.⁴⁵ Deswegen stellt sich die Frage, wie viele Tankstellen umgerüstet werden müssen. An diesen werden Kraftstoffmengen von 1.500 kg/d abgesetzt. Umgesetzt auf Wasserstoff-Tankstellen ergibt sich hier ein Tankstellenbedarf von 9.800 Tankstellen.⁴⁶ Es müssten somit nicht alle Tankstellen umgerüstet werden. Auch braucht es mit diesem Wert weniger investitionsreiche Stand-Alone-Tankstellen. Werden Kosten zwischen 1 und 2 Mio. Euro pro Tankstelle zugrunde gelegt, ergeben sich hier Gesamtkosten zwischen 9,8 Mrd. und 19,6 Mrd. Euro. Um 9.800 Tankstellen erfolgreich umzurüsten und zu nutzen, müssen diese bedarfsgerecht versorgt werden. Nur wenn genügend Kapazitäten nachhaltig aufgebaut werden können, kann der Bedarf des Kunden gedeckt werden.

5.1 Erdgasreformierung

Eine Tankstelle muss zuverlässig und zu jeder Zeit die angebotenen Kraftstoffe vorrätig haben. Bei der Versorgung einer Tankstelle ist daher darauf zu achten, bedarfsorientiert zu ermitteln, wie viel Kraftstoff benötigt wird.⁴⁷ Grund hierfür ist, dass es sich bei Wasserstoff um ein flüchtiges Gas handelt.⁴⁸ Denn Wasserstoff ist das kleinste bekannte Element und kann somit durch nahezu alle Stoffe hindurch diffundieren. Um der Verflüchtigung des Gases entgegenzuwirken, werden spezielle und kostenintensive Anlagen benötigt. Bei der Speicherung von Wasserstoff entsteht beim heutigen Stand der Technik ein Verlust von etwa 1% der Tankfüllung pro Tag.⁴⁹

In der Herstellung von Wasserstoff kann auf bereits bestehende Verfahren wie der Erdgasreformierung oder der Vergasung von Kohle bzw. Biomasse zurückgegriffen werden. Weniger Anwendung finden Herstellmethoden wie die alkalische Elektrolyse oder Wasserstoffgewinnung aus Algen. Im Folgenden sollen die Verfahren der Erdgasreformierung, Elektrolyse und der Verwendung von Biomasse einzeln vorgestellt werden, sowie mögliche Einsatzgebiete festgehalten werden. Eine Betrachtung der ökologischen Nachhaltigkeit folgt jeweils im Anschluss.

Die Erdgasreformierung ist in der Wasserstoffherstellung ein bereits etabliertes Verfahren.⁵⁰ Großer Bedarf in der chemischen Industrie wird hauptsächlich durch die Erdgasreformierung gedeckt. In dieser wird aus Alkoholen bzw. Kohlenwasserstoff-

⁴⁵ Vgl. Statista (2017).

⁴⁶ Vgl. Krieg (2012), S. 134.

⁴⁷ Vgl. Adolf et al. (2017), S. 53.

⁴⁸ Vgl. Rühle (2012), S. 74.

⁴⁹ Vgl. Lehmann/Luschtinetz (2014), S. 91.

⁵⁰ Vgl. Helms et al. (2011), S. 68f.

fen reiner Wasserstoff gewonnen. Als Nebenprodukt entstehen Kohlenstoffdioxid und Methan. Die Verwendung von Erdgas als Kohlenwasserstoff wird begünstigt durch eine gute Verfügbarkeit und einem im Vergleich zu anderen Kohlenwasserstoffen niedrigeren CO₂-Ausstoß. Folgende Daten werden der Erdgasreformierung zugrunde gelegt und dienen als erste Orientierung für weitere Berechnungen:

Parameter der Erdgasdampfreformierung nach Pehnt (2002)	
Technische Daten	
Lebensdauer	20 a
Produktionskapazität	720 kg/h
Volllaststunden	8 000 h/a
Betriebsmittel	
Elektrische Energie	0,005 kWh/kWhH ₂
Erdgas	1,39 kWh/kWhH ₂
Dampf, Exportgutschrift	0,153 kWh/kWhH ₂
Direkte Emissionen	
CO ₂	0,29 kg/kWhH ₂
CH ₄	5,76×10 ⁻⁵ kg/kWhH ₂

Tabelle 1: Parameter der Erdgasdampfreformierung⁵¹

Aus der obigen Tabelle kann eine Gesamtanzahl an Wasserstoffproduktionsstätten dieser Art abgeleitet werden. Abgeleitet aus den Angaben zur Produktionskapazität und Volllaststunden kann für eine Anlage der Wert für die maximal produzierbare Menge an Wasserstoff pro Jahr errechnet werden:

$$\text{Produktionskapazität} * \text{Volllaststunden} = \text{Maximale Produktionsmenge}$$

$$720 \text{ kg/h} \quad * \quad 8000 \text{ h/a} \quad = \quad 5.760.000 \text{ kg/a}$$

Eine Produktionsanlage mit gegebenen Volllaststunden besitzt eine maximale Produktionsmenge von 5.760.000 Kilogramm Wasserstoff pro Jahr. In Deutschland sind bislang 314 Wasserstoff-Autos zugelassen.⁵² Eine Versorgung dieser mit Kraftstoff stellt noch einen sehr überschaubaren Rahmen dar. Je nach Anzahl und Standort der Tankstellen wären wenige Erdgasreformierungs-Anlagen nötig, um hier eine permanente Versorgung sicherzustellen. Um die Daten der Erdgasreformierung in einem sinnvollen Zusammenhang zu interpretieren, soll ein Szenario erstellt werden. Für weitere Berechnungen werden folgende Annahmen getätigt:

- Die gesamte Menge an produziertem Wasserstoff durch Erdgasreformierung soll für die Versorgung eines Tankstellennetzes verwendet werden.

⁵¹ Quelle: Wulf/Kaltschmitt (2013), S. 133.

⁵² Vgl. Gerster/Wimmelbücker (2014).

- Der Transport von Wasserstoff wird zunächst nicht betrachtet.
- Die Menge an zugelassenen Pkws wird komplett durch Brennstoffzellenfahrzeuge ausgetauscht.
- Für den Verbrauch von Wasserstoff werden Durchschnittswerte (in kg/km) betrachtet und es wird nicht zwischen Lang- und Kurzstrecken unterschieden.

Die Gesamtanzahl an Pkws in Deutschland beträgt 43.000.000 Stück.⁵³ Eine Versorgung der Tankstellen richtet sich zudem nach der Größe der jeweiligen Fahrzeugflotte. Mit dem Trend, dass die Fahrzeugflotte an Wasserstoffautos weiterwächst, braucht es zunehmend weitere Versorgungsanlagen. Der Literatur zufolge haben Brennstoffzellenfahrzeuge eine Reichweite von maximal 700 Kilometern.⁵⁴ Herstellerangaben liegen jedoch im Durchschnitt etwas unter diesem Wert. Zum Beispiel stellt Toyota in einem Pilotprojekt seine Fahrzeugreihe „Mirai“ vor. Brennstoffzellenfahrzeuge wie der Toyota Mirai haben eine Wasserstoff-Tankkapazität von fünf Kilogramm und versprechen damit eine Reichweite von 550 Kilometern.⁵⁵ Das geht aus mehreren Fahrzeugtests mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 90 km/h hervor. Daraus ergibt sich pro Kilogramm Wasserstoff eine Reichweite von 110 km. Das liegt 10% über der durchschnittlichen Reichweite, welche in der Literatur angegeben wird. Die Durchschnittsreichweite der Clean Energy Partnership-Fahrzeugflotte liegt im Pkw-Bereich bei 495,7 Kilometern.⁵⁶ Hier wird pro Kilogramm Wasserstoff eine Reichweite von 100 km zu Grunde gelegt. Dieser Wert kann somit nach erster Prüfung weiterverwendet werden. Die bereits errechnete Produktionskapazität an Wasserstoff pro Jahr könnte also folgende Mobilität sicherstellen:

$$\begin{aligned} & \textit{Maximale Produktionskapazität} * \textit{Reichweite in km pro kg Wasserstoff} \\ & = \textit{Maximal mögliche Reichweite pro Anlage} \end{aligned}$$

$$5.760.000 \frac{\textit{kg}}{\textit{a}} * 100 \frac{\textit{km}}{\textit{kg}} = 576.000.000 \frac{\textit{km}}{\textit{a}}$$

Eine Produktionsanlage nach Art der Erdgasreformierung stellt Kraftstoff für 576.000.000 km/a her. Um herauszufinden, wie viele Produktionsanlagen benötigt werden, kann die tatsächlich gefahrene Gesamtkilometeranzahl in Deutschland errechnet werden. Ein Pkw legt laut Bundesverkehrsamt im Jahr durchschnittlich

⁵³ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2017).

⁵⁴ Vgl. Clean Energy Partnership (2017b).

⁵⁵ Vgl. Toyota.de (2017).

⁵⁶ Vgl. Angaben aus Clean Energy Partnership (2017b).

14.015 Kilometer zurück.⁵⁷ Bei einer Pkw-Anzahl von 43.000.000 Stück ergibt sich folgende Gesamtkilometeranzahl:

$$\begin{aligned} & \text{Anzahl der Pkws} * \text{durchschnittlich gefahrene Kilometer} \\ & = \text{Gesamtkilometeranzahl} \end{aligned}$$

$$43.000.000 \text{ Stk.} * 14.015 \text{ km} = 602.645.000.000 \text{ km}$$

Insgesamt legen Pkws in Deutschland 602.645.000.000 Kilometer im Jahr zurück. Werden diese durch die Mobilität dividiert, welche eine Anlage zur Erdgasreformierung maximal herstellen kann, ergibt sich die Anzahl der Anlagen, welche benötigt werden, um genügend Wasserstoff für das gesamte Tankstellennetz bereitzustellen:

$$\frac{602.645.000.000 \text{ km}}{576.000.000 \text{ km}} = 1.046,26 \text{ Stk.}$$

Ein Modell mit diesen Annahmen ergibt eine Gesamt-Anzahl von 1.047 Anlagen zur Erdgasreformierung. Mögliche Transportwege wurden noch nicht in Betracht gezogen. Bei einer theoretischen Umrüstung von 9.800 Tankstellen macht es Sinn, Anlagen zur Erdgasreformierung als zentrale Lager (Offsite-Herstellung) zu nutzen. Via Pipelinenetz oder Lkw-Transport können Tankstellen versorgt werden.

Erdgas ist ein fossiler Brennstoff bzw. wird er bei der Nutzung von fossilen Brennstoffen als Nebenprodukt gewonnen. Deshalb muss für eine nachhaltige Infrastruktur die Umweltbelastung, welche die Erdgasreformierung verursacht, betrachtet werden. Hier können wiederum die Angaben aus obiger Tabelle herangezogen werden.

Beim hergestellten Wasserstoff fallen Kohlenstoffdioxid und Methan als Schadstoffe an. Um diese sinnvoll in der gleichen Einheit zu bilanzieren, wurden CO₂-Äquivalente eingeführt. Je nach Schädlichkeit besitzen umweltschädliche Stoffe einen Faktor, welcher sie auf eine geeignete und vergleichbare Einheit zu Kohlenstoffdioxid stellt. Für Methan ist dieser Faktor 23.⁵⁸ Die Werte für direkte Emissionen werden in Kilowattstunde Wasserstoff angegeben. Damit sind die Kilowattstunden gemeint, welche durch Wasserstoff bereitgestellt werden können. Ein Kilogramm Wasserstoff speichert ungefähr 33 Kilowattstunden Energie.⁵⁹ Nun lässt sich die maximale Produktionsmenge in Kilowattstunde Wasserstoff angeben. Für 1.058 Anlagen und eine maximale Produktionskapazität von 5.760.000 kg/a ergeben sich demnach folgende direkte Emissionen:

⁵⁷ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2016).

⁵⁸ Vgl. Bahmann (2008), S. 5.

⁵⁹ Vgl. Bürke (2008), S. 81.

$$CO(2): 5.760.000 \frac{kg}{a} * 33 \frac{KWh H(2)}{kg} * 1.046Stk.* 0,29 \frac{kg}{kWh H(2)}$$

$$= 5,77 * 10^{10} \frac{kg}{a}$$

$$CH(4): 5.760.000 \frac{kg}{a} * 33 \frac{KWh H(2)}{kg} * 1.046Stk.* 5,76 * 10^{-5} \frac{kg}{kWh H(2)}$$

$$= 11.452.243,97 \frac{kg}{a}$$

$$CO(2)\text{Äquivalent (für Methan)}: 11.452.243,97 \frac{kg}{a} * 23 = 263.401.611,3 \frac{kg}{a}$$

$$\sum = 5,77 * 10^{10} \frac{kg}{a} + 263.401.611,3 \frac{kg}{a} = 5,8 * 10^{10} \frac{kg}{a}$$

Direkte Emissionen betragen bei der kompletten Versorgung des Tankstellennetzes durch Erdgasreformierung 58,0 Mrd. Kilogramm CO₂-Äquivalente. Das Umweltbundesamt datiert momentan eine Umweltbelastung durch Pkws bei rund 160,8 Mrd. Kilogramm CO₂-Äquivalente.⁶⁰ Dieser Wert bezieht sich auf die gesamten CO₂-Emissionen von der Energiequelle bis zum Rad (Well to Wheel). Da Brennstoffzellenfahrzeuge beim Fahren kein CO₂ emittieren, spielt für die Umweltbetrachtung der wasserstoffbasierten Mobilität vor allem eine Well to Tank-Betrachtung eine Rolle. Ob die Bereitstellung von Wasserstoff mittels Erdgasreformierung eine Verbesserung der Umweltbelastung darstellt, hängt jedoch nicht nur von der Produktion ab. Zum einen fehlt es im oben beschriebenen Szenario an einem Transportnetzwerk, welches mit zusätzlichem Energiebedarf und direkten als auch indirekten CO₂-Emissionen in Verbindung gebracht werden muss. Zum anderen gibt es noch keine genauen Angaben zur seriellen Herstellung von Brennstoffzellenfahrzeugen. Hier müssen ebenfalls umwelttechnische Aspekte beleuchtet werden, z. B. wie viel CO₂-Äquivalente die Herstellung von Brennstoffzellenfahrzeugen verursacht. Trotzdem kann der errechnete CO₂-Wert als erste Einschätzung herangezogen werden. Grund hierfür ist, dass 95% der Emissionen im Verkehrssektor durch den Straßenverkehr direkt verursacht werden.⁶¹ Bei Brennstoffzellenfahrzeugen würden diese größtenteils wegfallen, wohingegen die Werte für die Produktion von Wasserstoff herangezogen werden müssten. Diese läge mit 52,73% unterhalb der jetzigen Emissionswerte. Für eine tatsächliche Senkung der Umweltbelastung im Verkehrssektor dürften Transport, Fahrzeugherstellung und Umrüstung der Tankstellen nicht über 43,9 Mrd. CO₂-Äquivalente verursachen. Eine Fokussierung auf andere Herstellmethoden könnte unter den richtigen Umweltbedingungen zu

⁶⁰ Vgl. Umweltbundesamt (2017).

⁶¹ Vgl. Umweltbundesamt (2016a).

anderen CO₂-Werten führen. Im Vergleich zur Erdgasreformierung wird ein Szenario mit gleichen Annahmen zur alkalischen Elektrolyse vorgestellt.

5.2 Alkalische Elektrolyse

Eine weitere Möglichkeit, Wasserstoff herzustellen, bietet die alkalische Elektrolyse. Hier wird Wasserstoff meistens direkt vor Ort hergestellt und bedarf üblicherweise keiner Transportleistungen.⁶² Durch De-Ionisation von Wasser und anschließender Versetzung mit Kaliumhydroxid entsteht Wasserstoff. Für die Verwendung in einer Brennstoffzelle bedarf es zudem einer Komprimierung des Wasserstoffes auf 3,1 Mega-Pascal (MPa).⁶³ Ein Brennstoffzellenfahrzeug kann Wasserstoff als Kraftstoff nur dann effizient nutzen, wenn dieser mit einer Reinheit von 99,99999 % vorliegt.⁶⁴ Deswegen muss der Wasserstoff zudem noch gereinigt werden. Als Nebenprodukt entsteht ungenutzter Sauerstoff, welcher in die Umgebung abgegeben wird. Zum anderen fallen bei der alkalischen Elektrolyse keine direkten CO₂-Emissionen an. Diese hängen hauptsächlich vom verwendeten Strom ab. Der alkalischen Elektrolyse liegen folgende Daten zugrunde:

Elektrolyse nach Pehnt (2002)	
Technische Daten	
Lebensdauer	20 a
Lebensdauer Stack	7
Produktionskapazität	18-36 kg/h
Volllaststunden	8000 h/a
Leistung	8 x 240 + 35 kVA
Wirkungsgrad	53%
Betriebsmittel	
Elektrische Energie	1,9 kWh/kWh WASSERSTOFF
Verluste Peripherie	4,10%
Wasser, deionisiert	0,3336 l/kWh H ²
Kaliumhydroxid	25,5 mg/kWh H ²

Tabelle 2: Parameter der Elektrolyse⁶⁵

Eine Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse unterscheidet sich von der Erdgasreformierung in mehreren Punkten. Zum einen ist die Produktionskapazität geringer, welche je nach Anlagengröße zwischen 18 und 36 kg Wasserstoff pro Stunde liegt.

⁶² Vgl. Helms et al. (2011), 69f.

⁶³ Vgl. Wulf/Kaltschmitt (2013), S. 131.

⁶⁴ Vgl. Lehmann/Lushtinetz (2014), S. 95.

⁶⁵ Quelle: Wulf/Kaltschmitt (2013), S. 132.

*Produktionskapazität * Volllaststunden = Maximale Produktionsmenge*

$$18 \frac{kg}{h} \quad * \quad 8.000 \frac{h}{a} \quad = \quad 144.000 \frac{kg}{a}$$

bzw.

$$36 \frac{kg}{h} \quad * \quad 8.000 \frac{h}{a} \quad = \quad 288.000 \frac{kg}{a}$$

Aus Tabelle 2 kann zunächst wieder die maximale Produktionsmenge für eine Elektrolyse-Anlage im Jahr errechnet werden. Bei 8.000 Volllaststunden im Jahr nimmt die maximale Produktionsmenge einen Wert zwischen 144.000 und 288.000 $\frac{kg}{a}$ an.

Weiter sollen wieder aktuelle Herstellerangaben für die Berechnung der benötigten Reichweite (1 Kilogramm Wasserstoff entspricht 100 Kilometer Reichweite)⁶⁶ herangezogen werden. Die Gesamtanzahl an gefahrenen Kilometern in Deutschland liegt, wie bereits bei den Berechnungen zur Erdgasreformierung, bei 602.645.000.000 Kilometer. Nun kann daraus die Anzahl der benötigten Elektrolyse-Anlagen errechnet werden, um alle Brennstoffzellenfahrzeuge in diesem Szenario zu versorgen:

$$\frac{602.645.000.000 km}{\frac{100 km}{kg} * 144.000 kg} = 41.850,35$$

bzw.

$$\frac{602.645.000.000 km}{\frac{100 km}{kg} * 288.000 kg} = 20.925,17$$

Zur Versorgung der Tankstellen ausschließlich mittels Elektrolyse, werden bei einer Fahrzeugflotte von 43.000.000 Brennstoffzellenfahrzeugen zwischen 20.926 und 41.851 Anlagen benötigt. Mithilfe der Betriebsmittel kann die benötigte Energie für die Herstellung von Wasserstoff errechnet werden. Wieder ist davon auszugehen, dass 1 Kilogramm Wasserstoff 33 kWh speichert.⁶⁷ Die erzeugte Energie für 144.000 Kilogramm Wasserstoff errechnet sich wie folgt:

*Produktionsmenge * Energiespeicherkapazität von Wasserstoff
= Erzeugter Strom*

$$144.000 \frac{kg}{a} * 33 \frac{kWh H(2)}{kg} = 4.752.000 kWh H(2)$$

⁶⁶ Vgl. Angaben aus Clean Energy Partnership (2017b).

⁶⁷ Vgl. Bürke (2008), S. 81.

Um eine Menge für die gesamte Fahrzeugflotte herzustellen, wird dieser Wert mit der Anzahl der Elektrolyse-Anlagen multipliziert. In diesem Zusammenhang spielt die Größe der Produktionskapazität keine Rolle, da sie in Abhängigkeit der Anlagenanzahl zum gleichen Ergebnis der gesamten erzeugbaren Energie kommen muss. Unten errechneter Wert würde sich ebenfalls bei doppelter Produktionskapazität und der Hälfte der Elektrolyse-Anlagen ergeben:

$$\begin{aligned} & \textit{Erzeugbare Energie pro Anlage} * \textit{Anzahl der Anlagen} \\ & = \textit{Gesamte erzeugbare Energie} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 4.752.000 \textit{ kWh H(2)} * 41.851 \textit{ Stk.} \\ & = 1,98875952 * 10^{11} \textit{ kWh H(2)} \sim 198,88 \textit{ TWh} \end{aligned}$$

Aus den Betriebsmitteln folgt nun die gesamte elektrische Energie, welche benötigt wird, um genügend Wasserstoff-Energie herzustellen:

$$\begin{aligned} & \textit{Wasserstoffenergie} * \textit{benötigte elektrische Energie pro kWh H(2)} \\ & = \textit{benötigte gesamte elektrische Energie} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 1,98875952 * 10^{11} \textit{ kWh H(2)} * 1,9 \frac{\textit{kWh H(2)}}{\textit{kWh}} \\ & = 3,778643088 * 10^{11} \sim 377,86 \textit{ TWh} \end{aligned}$$

Es wird in diesem Szenario Energie von 377,86 TWh benötigt, um eine ausreichende Versorgung von Wasserstoff sicherzustellen. Das Bundesumweltamt gibt in seiner Datenbasis zur Energieeffizienz an, dass im Verkehrssektor momentan ein Endenergieverbrauch von 725 TWh im Jahre 2014 bilanziert wurde.⁶⁸ Der Anteil an mechanischer Energie lag hier über 95%. Jedoch wurde diese zu 54% aus fossilem Dieselkraftstoff und zu zirka 30% aus Benzin gewonnen. Der Anteil an Strom betrug 1,7%, was einen absoluten Wert von 12,325 TWh ergibt.

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass bei genügend Versorgungsquellen der Endenergieverbrauch verringert werden kann. Die CO₂-Belastung des durch Elektrolyse hergestellten Wasserstoffs hängt jedoch überwiegend von den Quellen der Energien ab.⁶⁹ Für die Umweltbelastung birgt der niedrigere Verbrauch in diesem Szenario sowohl Chancen als auch Risiken. Als Chance werden vor allem regenerativ erzeugte Quellen gesehen. Dazu zählen überwiegend Wind- und Wasserkraftwerke, Stromerzeugung aus Biomasse und Solarzellenenergie. Je nach geographischer Lage sind diese in unterschiedlich hohem Ausmaß nutzbar. So befinden sich z. B. in Norddeutschland mehrere Windkraftwerke, welche Strom mittels der regenerativen Quelle Wind erzeugen. Ein Transport dieses Stroms nach Süd-

⁶⁸ Vgl. Kemmler et al. (2017), S. 235.

⁶⁹ Vgl. Helms et al. (2011), S. 69.

deutschland wäre aufgrund der hohen Verluste ineffizient.⁷⁰ Wird der Strom durch regenerative Energie erzeugt, ist der CO₂ Gehalt verschwindend klein. Da also mehrere geographische Abhängigkeiten der Energiequellen bestehen, soll für weitere Berechnungen vereinfacht ein Durchschnittswert herangezogen werden. Einen guten Richtwert gibt der deutsche Strom-Mix an, welcher in Abbildung 3 dargestellt ist. Dieser zeigt den prozentualen Anteil der Endenergieträger an der Bruttostromerzeugung.

Es gibt in Deutschland verschiedene Energiequellen, die Strom bereitstellen: 54,1% des Stroms werden durch Kohle- und Kernenergie bereitgestellt. Der Anteil an regenerativen Quellen beträgt 28,5%, während restliche Energiequellen sich überwiegend auf übrige Energieträger, Kernenergie und Mineralölprodukte aufteilen. Hier entstehen Treibhausgase. Vor allem Braun- und Steinkohle haben im Vergleich zu anderen Kraftstoffen große Emissionsfaktoren. Bis zum Jahr 2050 will die Bundesregierung einen Strom-Mix, welcher bis zu 80% aus regenerativen Quellen besteht, etablieren.⁷¹

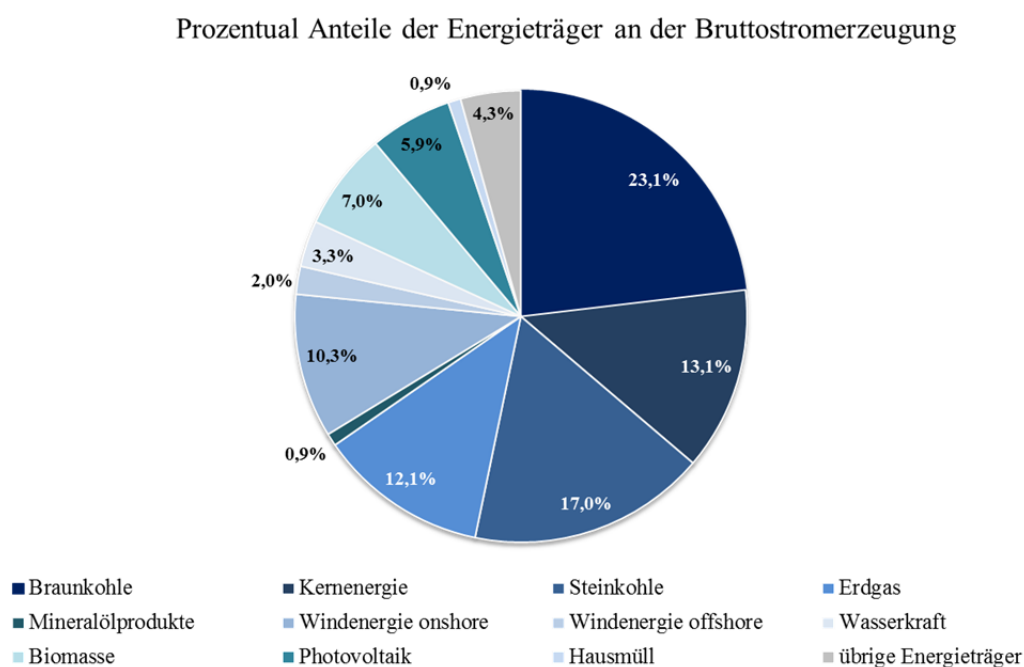


Abbildung 3: Der Strommix in Deutschland 2017⁷²

Während sich für jede einzelne Energiequelle ein Emissionsfaktor finden lässt, veröffentlicht die Stromauskunft im Auftrag der Bundesregierung Emissionsfaktoren für den gesamten Strom-Mix. Diese eignen sich als erste Einschätzung der Umweltbelastungen der verwendeten Energien und somit auch für die Energie, welche nötig

⁷⁰ Vgl. Quaschnig (2013), S. 188.

⁷¹ Vgl. Bundesregierung (2010).

⁷² Quelle: Stromauskunft.de (2017).

ist, um Wasserstoff mittels alkalischer Elektrolyse herzustellen. Für das Jahr 2016 gibt es vorerst lediglich einen Schätzwert von 527 g CO₂/kWh. Das Jahr 2015 beinhaltet nur ein vorläufiges Ergebnis, weswegen für folgende Rechnungen der verifizierte Wert aus dem Jahr 2014 herangezogen wird. Der CO₂-Emissionsfaktor beträgt hier 564 g CO₂/kWh. Mit den oben errechneten Werten für den Gesamtenergiebedarf kann die CO₂-Belastung nun konkret ausgerechnet werden:

$$\text{Energiebedarf} * \text{Emissionsfaktor}(2014) = \text{CO}(2)\text{Emissionen pro Jahr}$$

$$377,86 * 10^9 \text{ kWh} * 564 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \text{ CO}(2) = 213.113.040.000 \text{ kg CO}(2)$$

Bei der Verwendung des Strom-Mixes aus dem Jahr 2014 verursacht die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse ca. 213.113.040.000 kg CO₂. Zur momentanen Umweltbelastung durch den Verkehrssektor, welcher bei 160,8 Mrd. kg CO₂ liegt, ist das eine Zunahme 32,53 % an CO₂-Emissionen.⁷³ Eine Verwendung des deutschen Strom-Mix ist demnach aus ökologischer Sicht abzulehnen. Um die alkalische Elektrolyse sinnvoll zu verwenden, besteht weiterer Handlungsbedarf. Eine Möglichkeit, welche bereits angestrebt wird, ist die Bereitstellung von regenerativ erzeugtem Strom, z. B. der Ausbau der Offshore-Windkraftanlagen.⁷⁴ Dadurch sinkt die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen und diese können erfolgreich substituiert werden. Solche Investitionen tragen sukzessive dazu bei, den Emissionsfaktor des dazugehörigen Strom-Mix zu senken. Ein Hauptziel der wasserstoffbasierten Mobilität ist es, Emissionen des Verkehrssektors zu senken. Mittels einer Break-Even-Analyse kann gezeigt werden, welcher Emissionsfaktor notwendig ist, um nach dem derzeitigen Stand der Technik Wasserstoff nachhaltig mittels Elektrolyse herzustellen.

$$377,86 * 10^9 \text{ kWh} * \text{Emissionsfaktor} < 160.800.000.000 \text{ kg CO}(2)$$

$$\Rightarrow \frac{160.800.000.000.000 \text{ g CO}(2)}{377,86 * 10^9 \text{ kWh}} > \text{Emissionsfaktor}$$

$$425,55 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} > \text{Emissionsfaktor}$$

Ab einem Emissionsfaktor von 425,55 g/kWh lohnt sich aus ökologischer Sicht eine Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse. Inwieweit der Emissionsfaktor derart gesenkt werden kann, hängt vom Ausbau regenerativer Energiequellen ab. Erste Hochrechnungen ziehen sogar Energie-Importe aus geographisch gesehen günstigeren Ländern wie Norwegen und Island in Betracht.⁷⁵ Da die Elektrolyse an sich ein sehr junges Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff darstellt, werden neben der alkalischen Elektrolyse auch weitere Varianten der Elektrolyse getestet. Je höher

⁷³ Vgl. Umweltbundesamt (2017).

⁷⁴ Vgl. Quaschnig (2013), S. 200f.

⁷⁵ Vgl. Krieg (2012), S. 64.

der Wirkungsgrad einer Elektrolyse ist, desto eher kann sie umweltfreundlich betrieben werden, da aus weniger benötigter Energie die gleiche Menge an Strom erzeugt werden kann. Erste Praxisversuche gibt es bereits in Form einer Elektrolyse, welche verschiedene Membrane zur besseren Wasserstoff-Produktion verwendet.⁷⁶

5.3 Biomasse

Ein hohes Potenzial bei der Herstellung von Wasserstoff wird der Biomasse zugeeilt. Sie ist in großen Mengen verfügbar und setzt sich aus bereits abgestorbenen Pflanzen sowie weiteren Reststoffen zusammen.⁷⁷ Abhängig vom Wassergehalt kann Biomasse in ein Gasgemisch überführt werden. Bestandteile dieses Gasgemisches sind Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. Dabei ist der Kohlenstoffdioxidgehalt nur so groß, wie der Anteil, welchen die Pflanze zuvor für das Wachstum benötigt hat. Biomasse wird deshalb trotz CO₂-Emissionen als CO₂-neutral angesehen. Biomasse kann sowohl als Wärmelieferant, als auch zur Stromerzeugung und zur Wasserstoffherstellung genutzt werden. Der Grund für das hohe Potential in der Verwendung von Biomasse findet sich in der erzeugbaren Menge an Energie durch Biomasse. Wegen komplexer Abhängigkeiten, welche Pflanzen genau verwendet werden, geht diese Arbeit auf gegebene Minimal- und Maximalwerte ein.⁷⁸ Um Vergleichbarkeit zur Erdgasreformierung und zur alkalischen Elektrolyse herzustellen, müssen diese Angaben jedoch von Petajoule und Gigawattstunde umgerechnet werden. Daran anschließend erfolgt die jeweilige Minimal- und Maximalbetrachtung:

$$1PJ = 10^{15}J = 287 \text{ GWh}$$

$$\text{Minimalbetrachtung: } 853 \frac{PJ}{a} * 278 \frac{GWh}{PJ} = 237,13 \frac{TWh}{a}$$

$$\text{Maximalbetrachtung: } 1670 \frac{PJ}{a} * 278 \frac{GWh}{PJ} = 464,26 \frac{TWh}{a}$$

Die Verwendung von Biomasse kann zwischen 237,13 und 464,26 TWh Strom erzeugen. Das entspricht großen Teilen bis zu einem Überschuss an benötigtem Strom für das Elektrolyseverfahren. Wie viel Energie tatsächlich aus Biomasse gewonnen werden kann, hängt von verschiedenen komplexen Verhältnissen ab. So muss z. B. ein bestimmtes Korn-/Stroh-Verhältnis im Anbau der Pflanzen herrschen.⁷⁹ Diese und noch weitere Abhängigkeiten müssen also in der Herstellung von Wasserstoff durch Biomasse und Elektrolyse berücksichtigt werden. Die Produktion durch die Verwendung von Biomasse ist für kurzfristige Szenarien ausgelegt. Grund dafür ist,

⁷⁶ Vgl. Farah (2014), S. 48.

⁷⁷ Vgl. Griessacher/Antrekowitsch (2011), S. 14f.

⁷⁸ Vgl. GermanHy (2009), S. 54.

⁷⁹ Vgl. Kaltschmitt et al. (2016), S. 88.

dass diese Technologie schon in der Herstellung von Biodiesel verwendet wird.⁸⁰ Mit dem drastischen Anstieg der Nachfrage nach CO₂-neutralen Energieträgern kommt es zudem zu „[...] Preisschwankungen und Preissteigerungen von Nahrungs- und Futtermitteln und Energieträgern [...]“⁸¹. Auch langfristig werden der Biomasse negative Folgen zugeschrieben. Die erhöhte Nachfrage führt zu einer drastischen Anpassung der Landnutzung und birgt viele Gefahren für die Umwelt. Laut Umweltbundesamt sind Folgen „[...] in Form des Verlusts von Arten- und Habitatvielfalt durch Konversion oder Eutrophierung von Ökosystemen, der Zerstörung der für die Klimaregulation wichtigen Kohlenstoffsensensysteme wie Mooreböden und Wälder oder der Verdrängungen von indigenen Siedlungsgemeinschaften und traditionellen extensiven Landnutzungen [...]“⁸² möglich. Zwar wird Biomasse als CO₂-neutraler Energieträger gehandelt, jedoch kann sie aus ökologischer Perspektive nicht für die langfristige Wasserstoffproduktion in Betracht gezogen werden. Sinnvoll erscheint die Verwendung von Biomasse in der Einführungsphase, wenn weitere Energiequellen einen aufkommenden Bedarf nicht schnell genug decken können. Auch als Ersatz für umweltschädlichere Verfahren, wie die Elektrolyse mittels aktuellen Strom-Mix, bietet Biomasse als etablierte Technologie für die Herstellung von Biodiesel eine Alternative. Biomasse kann vor allem Regionen versorgen, welche von anderen Energiequellen nicht beliefert bzw. versorgt werden können. Es dürfen hier jedoch nicht Anbauflächen genutzt werden, welche zu einer Verschlechterung der Gesamtsituation – wie bereits oben zitiert – führen. Eine quantitative Szenario-Analyse der direkten und indirekten Emissionen der Biomasse-Verwendung wäre im Rahmen dieses Beitrags wenig aussagekräftig. Sie kann lediglich zu bestehenden, geographisch abgestimmten Szenarien hinzugefügt werden. Grund hierfür sind die bereits erwähnten, verschieden abhängigen Faktoren in der Verwendung spezifischer Biomasse. Szenarien wie für die Erdgasreformierung und Elektrolyse können somit nicht getätigt werden. Qualitativ gesehen trägt die Verwendung von Biomasse kurzfristig zu einer ökonomischen Verbesserung der Wasserstoffproduktion bei. Mittel- und langfristig sollte sie jedoch nicht in Betracht gezogen werden, da sie ein Risiko für das Erreichen einer ökologischen Produktion darstellt.

5.4 Vergleich der Produktionsverfahren

Es wurden drei Verfahren zur Wasserstoff-Herstellung vorgestellt und in beispielhaften Szenarien weiter veranschaulicht. Bei der Verwendung von Biomasse entstehen zu viele Abhängigkeiten, um ein aussagekräftiges Szenario zu analysieren. Selbstverständlich ist eine Wasserstoff-Produktion ausschließlich aus einem einzi-

⁸⁰ Vgl. Kaltschmitt et al. (2016), S. 10.

⁸¹ Vgl. Jering et al. (2013), S. 52.

⁸² Vgl. Jering et al. (2013), S. 52.

gen Herstellungsverfahren unrealistisch. Zudem führt eine solche Betrachtung zu einer ineffizienten Ressourcenallokation. Darunter ist zu verstehen, dass Unternehmen nicht ihr volles Potential ausschöpfen.⁸³ Neben den dargestellten Verfahren existieren noch weitere, wie z. B. die Wasserstoffherstellung aus Kohlevergasung oder aus Algen. Für die Erdgasreformierung und die alkalische Elektrolyse wurden folgende Werte errechnet:

	Einheit	Wasserstoffproduktion Werte	
		Erdgasreformierung	Elektrolyse
Produktionskapazität	kg/a	5.760.000	144.000-288.000*
CO ₂ + Äquivalente pro Anlage	kg CO ₂	55.396.371	5.092.185
CO ₂ in kg bei jetziger Mobilität	kg CO ₂	5,8*10 ¹⁰	21,3*10 ¹⁰
Anzahl der Prod.Anlagen für jetzige Mobilität	Stk.	1.047	41.851
*Weitere Werte beziehen sich auf eine Produktionskapazität von 144.000 Kilogramm Wasserstoff pro Jahr			

Tabelle 3: Erdgasreformierung und Elektrolyse

Die Erdgasreformierung ist ein bereits etabliertes Verfahren und kann auf ausgereifte Technologien zurückgreifen. Sie eignet sich vor allem in der Einführungs- und Übergangsphase der wasserstoffbasierten Mobilität. So kann sie durch eine Anlage gleich mehrere Tankstellen versorgen. Wenn eine heutige Tankstelle Kraftstoff von 1.500 kg/d absetzt, könnte eine Anlage zur Erdgasreformierung rund 10 Tankstellen versorgen.⁸⁴ Außerdem kann auf bestehende Anlagen zurückgegriffen werden, solange keine Verluste für andere Industriesegmente folgen. Das bestehende Pipeline-netz für den deutschlandweiten Erdgastransport bietet zudem eine Infrastruktur für mögliche Produktionsstätten. Bei maximaler Auslastung solcher Anlagen kann die CO₂-Bilanz des Verkehrssektors verbessert werden. Auf Dauer löst sie jedoch die CO₂-Problematik nicht, weswegen langfristig gesehen auf andere Herstellmethoden zurückgegriffen werden muss. Chancen werden hier der Elektrolyse eingeräumt. Bei einem Strom-Mix, welcher überwiegend aus regenerativen Energiequellen besteht, verursacht die Elektrolyse nahezu keine CO₂-Emissionen. Bei einer geringen Produktionskapazität von 144.000 bis 288.000 Kilogramm können nur sehr wenige Tankstellen versorgt werden. Bei einer Absatzmenge von 1.500 kg/d bräuchte es bis

⁸³ Vgl. Simon (2007), S. 225.

⁸⁴ Vgl. Krieg (2012), S. 134.

zu vier Elektrolyseanlagen vor Ort, um die abgesetzte Menge einer Tankstelle zu decken.⁸⁵ Ein großflächiger Elektrolyse-Park hingegen bedarf eines ausgearbeiteten Transportnetzwerkes, damit Verluste, wie zum Beispiel beim Komprimieren des Wasserstoffgases, möglichst gering sind. Deswegen macht es Sinn, Elektrolyseure vorerst an Wasserstoff-Tankstellen zu integrieren. Elektrolyseure, welche an den deutschen Strom-Mix gebunden sind, tragen zu einer Verschlechterung der CO₂-Bilanz bei. Jedoch wird momentan nicht das volle Potential an regenerativer Energie genutzt. So müssen z. B. Windkraftwerke abgeschaltet werden, weil es durch den überschüssig erzeugten Strom zu einer Überlastung des Stromnetzwerks kommt.⁸⁶ Dieser überschüssig erzeugte Strom könnte für das Verfahren der Elektrolyse eingesetzt werden, damit diese nicht zur CO₂-Belastung beiträgt. Der eingespeicherte Strom würde in Form von Wasserstoff das Stromnetz nicht überlasten und könnte bei Flaute in dieses eingespeist werden. Eine Bedingung an die Elektrolyse ist, dass sie bei Verwendung regenerativer Energien keine Engpässe in der Energieversorgung verursacht. Industrien, welche auf Strom angewiesen sind, müssten dann auf überwiegend umweltschädliche Stromquellen zurückgreifen und würden die Einsparungen der Elektrolyse wieder aufheben. Mit dem Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2050 Strom aus bis zu 80% regenerativen Stromquellen zu erzeugen, entsteht für die Elektrolyse eine Chance. Die Erdgasreformierung kann bei einem Erreichen dieser Werte langfristig abgebaut werden.

6 Transport von Wasserstoff zur Versorgung der Tankstellen

Bislang wurden in dieser Arbeit nur der Aufbau eines Tankstellennetzes sowie die Erzeugung von Wasserstoff an sich betrachtet. Eine entscheidende Rolle in Bezug auf wasserstoffbasierte Mobilität spielt der Transport des Wasserstoffs von der Produktionsstätte bis zur Wasserstoff-Tankstelle. Bei Wasserstoff handelt es sich um ein Gefahrgut. Gefahrgüter obliegen den Richtlinien des Gefahrenbeförderungsgesetzes.⁸⁷ So ist Wasserstoff hochentzündlich und kann bei Erwärmung explodieren. Zudem wird Wasserstoff unter hohem Druck gespeichert. Wasserstoff bedarf deshalb sowohl bei Transport als auch bei Speicherung der Sicherheitskennzeichnungen von Hazard statements (H-Sätze) und Preculatory statements (P-Sätze):

⁸⁵ Vgl. Krieg (2012), S. 134.

⁸⁶ Vgl. Frankfurter Rundschau (2011).

⁸⁷ Vgl. Bundesregierung (2017).

H220	Extrem entzündbares Gas
H280	Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren
P210	Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen und anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen
P377	Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann
P381	Alle Zündquellen entfernen, wenn gefahrlos möglich
P403	An einem gut belüfteten Ort aufbewahren

Tabelle 4: H- und P-Sätze für Wasserstoff⁸⁸

Solche Sicherheitskennzeichnungen werden je nach Land unterschiedlich behandelt. Deswegen zeichnet sich der Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes durch unterschiedlich hohen bürokratischen Aufwand aus, der sich auch auf den Transport auswirkt und notwendig ist, um Sicherheit zu garantieren.

Der Transport von Wasserstoff kann durch mehrere Wege erfolgen. Hauptsächlich stehen Transporte via Pipeline oder Lkw zur Verfügung.⁸⁹ Zudem ist eine dezentrale Versorgung einzelner Tankstellen ebenfalls möglich. Wasserstoff kann vor Ort hergestellt werden und benötigt in diesen Fällen keinen Transport. Solche Optionen sind vor allem in den anfänglichen Phasen sinnvoll, da bereits ein kleines Produktionsprogramm ausreicht, um den Bedarf der jetzigen Fahrzeugflotte an Brennstoffzellenautos zu decken. Für spätere, größere Fahrzeugflotten sind Transporte jedoch unabdingbar. Eine einzelne dezentrale Elektrolyseanlage könnte Wasserstoff in Höhe von jetzigen Absatzmengen an Tankstellen nicht herstellen. Durchschnittlich betragen diese 1.500 kg/d und so könnte erst mit vier Elektrolyseanlagen eine minimale Produktionskapazität von 144.000 kg/a gedeckt werden. Langfristig lohnt es sich, zentrale Lager zu errichten. Bestehende Transportmöglichkeiten, wie z. B. der Erdgas-Transport via Pipeline, können als Vorlagen dienen und ausgebaut werden.⁹⁰

Die Einführung von wasserstoffbasierter Mobilität hängt zum großen Teil auch von dem Anschluss der Wasserstoff-Tankstellen an ein Transportnetzwerk ab. Wie eingangs bereits erwähnt, gibt es die Möglichkeit, Tankstellen an ein Rohrleitungssystem anzuschließen. Beispiele für solche Tankstellen finden sich in der Erdgasbranche.⁹¹ Für Tankstelleneinhaber sind in diesem Zusammenhang vor allem jene Kosten, die auf den Transport des Kraftstoffes entfallen, ausschlaggebend. Für Was-

⁸⁸ Vgl. Etikettenwissen.de (2017).

⁸⁹ Vgl. Krieg (2012), S. 120.

⁹⁰ Vgl. Schumacher (2011), S.66.

⁹¹ Vgl. Schumacher (2011), S. 66.

Wasserstoff gibt es mehrere Faktoren, die sich auf die Kosten auswirken. Dazu gehören, bezogen auf den Aufbau eines Pipelinesnetzwerks, spezifische Kosten für Wasserstoffrohre und -kompressoren. Des Weiteren hängen die Kosten für ein Pipelinesystem vor allem von dessen Länge ab.⁹² Diese wiederum steht in Abhängigkeit zu Wasserstoffquellen und -tankstellen. Transporte via Lkw sind in Einführungsphasen unabdingbar. Solange Tankstellen wie auch mögliche Pipelines nicht mit hohen Durchsatzraten betrieben werden können, stellen sie die kostengünstigere Alternative dar.⁹³ Langfristig zeichnet sich jedoch ein Trend zum Aufbau eines Pipelinesnetzwerks ab, da Skaleneffekte erzielt werden können.⁹⁴ Diese wirken sich positiv auf die Kostenminimierung aus. Die momentanen Kosten an einer Wasserstoff-Tankstelle betragen 0,95 Euro pro 100 Gramm Wasserstoff.⁹⁵ Diese könnten in Zukunft gesenkt werden und sich positiv auf die Nachfrage auswirken. Wasserstoffbasierte Mobilität kann von der Transportlösung eines Pipelinesnetzwerks am meisten profitieren. Langfristig folgt für die dezentrale Herstellung von Wasserstoff, dass diese nur in wenigen Fällen benötigt wird. Erste Berechnungen führen zu Kostenvorteilen der dezentralen Produktion gegenüber der Transportlösung erst bei weiten Entfernungen. Für die Erdgasreformierung rentiert sich die On-site-Herstellung ab 280 km Entfernung und bei der Elektrolyse ab 500 km Entfernung.⁹⁶ Eine erste Ausarbeitung der Infrastruktur, basierend auf den Studien von GermanHy, findet sich in der Studie des Jülicher Zentrums anhand einer Simulation. Abbildung 4 zeigt „[...] eine Deutschlandkarte, in der die Pipeline (rote und gelbe Linien) [...] und die Tankstellen (gelbe Punkte) aufgeführt sind.“⁹⁷ Erkennbar sind hier die geographischen Schwerpunkte, welche bei der Simulation deutlich werden. Diese befinden sich überwiegend in Westdeutschland und reichen von dort aus bis nach Berlin und München. Ebenfalls simuliert wurden Werte bzgl. der Kosten und Länge des Pipelinesnetzwerks. Diese können als Grundlage für Hypothesen bzgl. des Ausbaus eines solchen Netzes dienen. Insgesamt beinhaltet Abbildung 4 ein Wasserstoff-Pipelinesnetzwerk von zirka 48.000 km und erwartete Kosten von 23 Mrd. Euro. Zusätzlich fallen für die Distribution 0,79 €/kg an. Der Rahmen, in dem sich die Kosten für den Wasserstoff-Transport bewegen werden, kann aus diesen Werten schlussgefolgert werden. Das wirft zum einen die Frage auf, inwieweit und wann solche Investitionen getätigt werden, um großflächig ein Tankstellennetz zu versorgen; zum anderen, ob die Anzahl an Wasserstoffautos eine Menge erreichen wird,

⁹² Vgl. Krieg (2012), S. 169.

⁹³ Vgl. Krieg (2012), S. 195.

⁹⁴ Vgl. Krieg (2012), S. 143.

⁹⁵ Vgl. Clean Energy Partnership (2017c).

⁹⁶ Vgl. Krieg (2012), S. 195.

⁹⁷ Krieg (2012), S. 168.

bei der sich ein solches Transportnetzwerk rechnet. In Konkurrenz zu Brennstoffzellenfahrzeugen stehen Elektroautos mit Akkumulatoren.⁹⁸

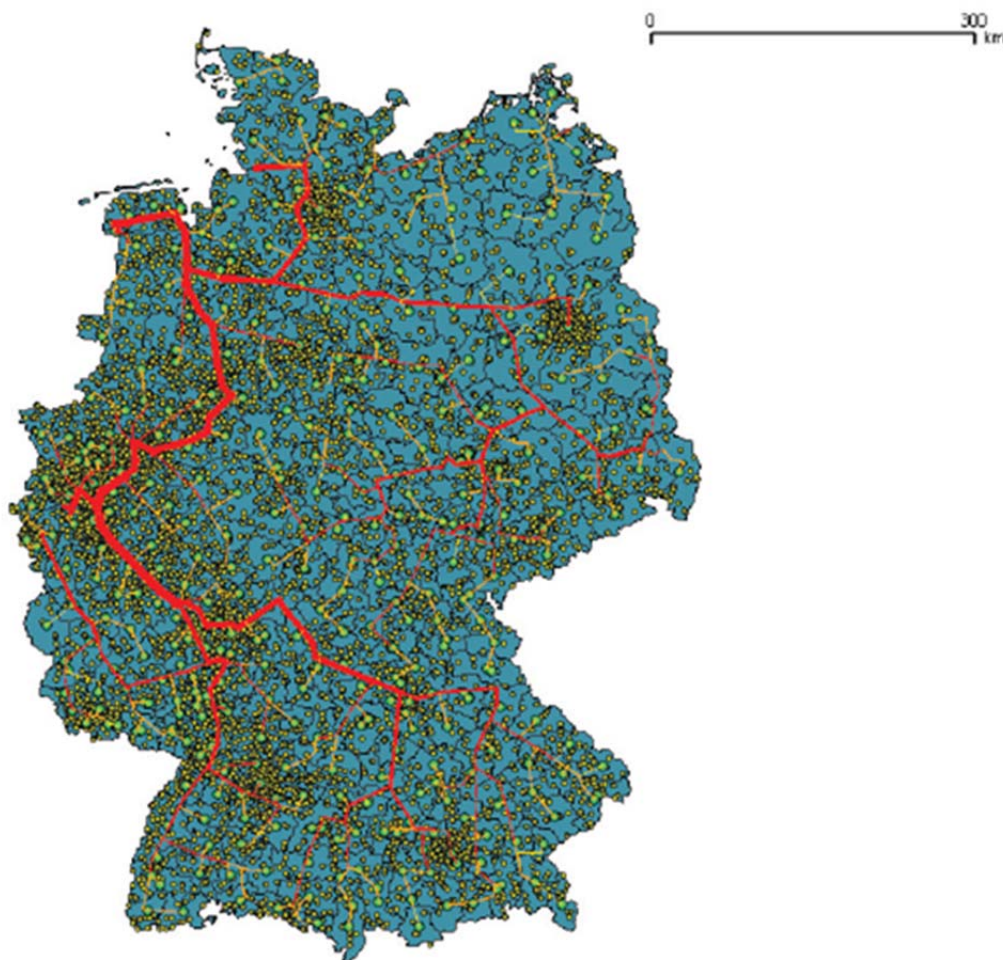


Abbildung 4: Pipelinenetz für Deutschland⁹⁹

7 Fazit

Wasserstoffbasierte Mobilität birgt durch die spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff sowohl Chancen als auch Risiken. Ziel dieser Arbeit war es, durch Analysen der jetzigen Situation und eigener Szenarien einen Rahmen abzustecken. Dieser Rahmen soll vor allem Grenzen und erste CO₂-Emissionen markieren. Für Wasserstoff-Autos dieser Art existieren momentan – inklusiver derer, welche sich im Aufbau befinden – 61 Wasserstoff-Tankstellen. Weitere Tankstellen werden für rein betriebliche bzw. forschungsrelevante Zwecke genutzt und sind der Öffentlichkeit nicht zugänglich. Das momentane Tankstellennetz für Fahrzeuge, die mit Ottokraftstoffen oder anderen fossilen Brennstoffen fahren, kann technisch gesehen für eine

⁹⁸ Vgl. Yay (2010), S. 11.

⁹⁹ Quelle: Krieg (2012), S. 168.

Betankung von Wasserstoff-Fahrzeugen umgerüstet werden. Die Höhe der Kosten für eine Umrüstung betragen laut Literaturangaben bis zu 2 Mio. Euro pro Tankstelle. In einzelnen Fällen wird diese Grenze jedoch überschritten – siehe Bsp. Hamburg mit 2,8 Mio Euro.¹⁰⁰ Charakteristische Merkmale einer Wasserstoff-Tankstelle sind verschiedene Druckspeicher, mindestens eine Kühlvorrichtung sowie je mindestens ein Kompressor und Dispenser. Unter Umrüstung wird die Integration einer Wasserstoff-Tankvorrichtung in eine bestehende Tankstelle verstanden. Dies erscheint auch die gängigste Lösung. Neben der Integration gibt es verschiedene weitere Varianten. Dazu gehört zum einen die Stand-alone-Wasserstoff-Tankstelle, welche komplett neu erbaut werden muss, zum anderen aber auch mobile Lösungen, für die eine Errichtung einer Wasserstoff-Tankstelle unrentabel erscheint. Neben den drei gängigen Variantenlösungen forscht die Honda Aktiengesellschaft zudem an einer Lösung für eine private Wasserstoff-Tankstelle. Diese soll durch Solarenergie eine Betankung in der eigenen Garage ermöglichen. Das Produktions- und Logistiknetzwerk umschließt wesentliche Punkte in der Einführung von wasserstoffbasierter Mobilität. Neben den einzelnen Standorten für Wasserstoff-Tankstellen müssen zudem Versorgungsquellen vorhanden sein. Diese wiederum benötigen verschiedene Energiequellen, aus denen sie Wasserstoff herstellen können. Ein geeignetes Transportnetzwerk muss jeweilige Standorte miteinander verbinden. Dabei steht die ökologische Nachhaltigkeit im Vordergrund, da diese vorrangig zur Idee von wasserstoffbasierter Mobilität geführt hat. Aus dem jetzigen Stand an Pkws auf deutschen Straßen und der durchschnittlichen Absatzmenge der Tankstellen an Kraftstoff wird eine potentielle Absatzmenge von ungefähr 5,67 Mrd. Kilogramm Wasserstoff prognostiziert. Die tatsächliche Absatzmenge ist in jedem Fall kleiner, da hier von der Annahme ausgegangen wurde, dass alle bestehenden Pkws durch Brennstoffzellenfahrzeuge ersetzt werden können und das jetzige Tankstellensystem Wasserstoff mit den jetzigen Mengen an Kraftstoff absetzen kann. Dieser Wert dient als eine obere Grenze und soll die Größenverhältnisse veranschaulichen. Die Energie, um eine solche Menge an Wasserstoff herzustellen, kann in der Quantität als gegeben angesehen werden. Jedoch hängt vieles von der Art der Energie ab. So finden sich im Gebrauch von regenerativen Energiequellen Engpässe, welche in Zukunft sukzessive aufgelöst werden müssten. Dabei dürfen keine Engpässe in anderen Industriebereichen entstehen, sonst werden positive Effekte auf die Umweltbilanz neutralisiert. Neben den vorgestellten Versorgungsmöglichkeiten der Erdgasreformierung, der alkalischen Elektrolyse und der Verwendung von Biomasse, gibt es noch weitere Lösungsansätze. Dazu gehören vor allem Kohlevergasung und Wasserstoffproduktion aus Algen. Letztere erscheint unter wissenschaftlicher Betrachtung als relevant. Denn die Frage, in welchem Ausmaß Wasser-

¹⁰⁰ Vgl. HZwei (2015).

stoff durch Algen hergestellt werden kann und inwieweit dies zur ökologischen Nachhaltigkeit beiträgt, ist noch nicht ausreichend beantwortet.

Der Transport von Wasserstoff kann per Lkw und Pipelines erfolgen. Dabei wird der dezentralen Wasserstoffproduktion nur eine geringe Rentabilität zugesprochen. Erste Simulationen ergeben für ein Pipelinennetzwerk eine Länge von 48.000 km und Kosten in Höhe von 23 Mrd. Euro. Dabei ist vor allem auf die Gefahrguteigenschaft von Wasserstoff und die erhöhten Kosten für Stahlrohre zu achten. Ferner wird davon ausgegangen, dass nicht alle Tankstellen umgerüstet werden müssen, um eine flächendeckende Wasserstoffversorgung zu realisieren.

Diese Arbeit konnte keine zwingenden, ökologisch fraglichen Gründe gegen die Einführung von wasserstoffbasierter Mobilität in Deutschland finden. Um einen nachhaltigen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, ist eine globale Betrachtung unabdingbar. In weiterer Forschung müssten die Auswirkungen einer nationalen Einführung von Wasserstoff auf internationale Märkte untersucht werden. Anfangspunkt hierbei könnten Energieimporte aus geographisch günstigen Regionen sein. Als Beispiel könnten hier Island und Norwegen angeführt werden, welche durch ihre geographisch günstige Lage Windenergie bereitstellen können. Um Stromnetze nicht zu überlasten, könnte per Elektrolyse Energie in Form von Wasserstoff gespeichert werden und per Pipeline in andere Regionen transportiert werden. Insofern ist zu hoffen, dass sich in Zukunft auch mehrere Länder der Einführung von ökologisch nachhaltigen Mobilitätslösungen annehmen und somit eine globale Lösung gefunden wird. Aufgrund der Verantwortung gegenüber nachfolgenden Generationen kann es auf den Punkt gebracht werden: Wir müssen heute in den sauren Apfel beißen, um zukünftig noch Äpfel essen zu können. Oder, um es mit Kermit dem Frosch zu sagen: „Es ist nicht einfach, grün zu sein“.¹⁰¹

8 Literatur

Adolf, J./Balzer, C. H./Louis, J./Schabla, U./Fischedick, M./Arnold, K./Pastowski, A./Schüwer, D. (2017): Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂, Hamburg.

Auto Zeitung (2017): Verbot von Benzin- und Dieselaautos, Merkel gibt Verbrennern noch "viele, viele Jahre", <http://www.autozeitung.de/zev-benziner-diesel-verbot-bis-2050-116894.html>, abgerufen am 09.10.2017.

Bahmann, M. (2008): Die Bilanzierung und Besteuerung von Emissionszertifikaten, Hamburg.

¹⁰¹ „Bein’ Green“ (oder auch „It’s Not Easy Bein’ Green“) ist ein bekannter Song, geschrieben von Joe Raposo, gesungen von Jim Henson als „Kermit der Frosch“ sowohl in der Sesamstraße als auch in der Muppet Show.

- Bonhoff, K. (2017): Supporting market ramp-up of hydrogen and fuel cell technologies. Plenary Session 2: Hydrogen and Fuel Cells National Initiatives, Strategies and Legislation, NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Zaragoza.
- Bretzke, W.-R. (2014): Nachhaltige Logistik, Zukunftsfähige Netzwerk- und Prozessmodelle, 3. Auflage, Berlin u.a.
- Bührke, T. (Hrsg.) (2008): Erneuerbare Energie. Alternative Energiekonzepte für die Zukunft ; [mit Informationen zu aktuellen Förderprogrammen], Weinheim.
- Bundesregierung (2010): Das Energiekonzept 2050.
- Bundesregierung (2017): Umsteigen auf Elektrofahrzeug. Eine Million E-Autos bis 2020.
- Clean Energy Partnership (2017a): H₂-Infrastruktur. CEP Tankstellen.
- Clean Energy Partnership (2017b): H₂-Mobilität. CEP Fahrzeugflotte.
- Clean Energy Partnership (2017c): Wasserstoff-Infrastruktur. Was kostet Wasserstoff an der Tankstelle?
- Clean Energy Partnership (2017d): Wer ist die CEP?
- Deutsche Post DHL Group, Elektromobilität.
- Deutscher Bundestag (1975): Gefahrenbeförderungsgesetz Deutschland. GGBefG.
- Deutscher Verband Flüssiggas (2017): Tankstellenfinder: Wo kann Autogas getankt werden?
- Eichlseder, H./Klell, M. (2010): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung, 2. Aufl., Wiesbaden.
- Energieportal24 (2004): Weltweit größte Wasserstofftankstelle in Berlin eröffnet.
- Etikettenwissen.de: H- und P-Sätze.
- Farah, F. (2014): Wirtschaftlichkeitsszenarien von Speichermöglichkeiten als Grundlage für Geschäftsmodelle von Energieversorgern, Hamburg.
- Finanztreff (2017): Daimler sieht immer geringere Vorteile der Brennstoffzelle, in: <http://www.finanztreff.de/news/daimler-sieht-immer-geringere-vorteile-der-brennstoffzelle/11993498>, abgerufen am 9. 8. 2017.
- Focus online (2017): Angeblich mehr CO₂ durch Dieselaautos als Benziner - Umweltverband fordert Steuererhöhung, http://www.focus.de/auto/news/abgas-skandal/studie-angeblich-mehr-co2-durch-dieselaautos-als-benziner-umweltverband-fordert-steuererhoehung_id_7607660.html, abgerufen am 09.10.2017.

- Frankfurter Rundschau (2011): Windräder werden immer häufiger abgeschaltet, Frankfurter Rundschau, 2011. Jg.
- Gas24 (2017): Erdgastankstellenübersicht.
- Geitmann, S. (2013): Wasserstoff-Autos. Was uns in Zukunft bewegt, Hydrogeit.
- GermanHy (Hrsg.) (2009): Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland 2050.
- Gerster, M./Wimmelbücker, S. (2014): Wasserstofffahrzeuge in Deutschland. Warum bisher erst 314 Brennstoffzellenautos zugelassen wurden, in: <http://www.automobilwoche.de/article/20170118/NACHRICHTEN/170119880/wasserstofffahrzeuge-in-deutschland-warum-bisher-erst--brennstoffzellenautos-zugelassen-wurden>, abgerufen am 01.08.2017.
- Giddens, A. (2009): The politics of climate change, Cambridge.
- Griessacher, T./Antrekowitsch, J. (2011): Biomasse – Ein Ausweg aus der CO₂-Problematik im Metall-recycling! ?, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 156. Jg., Nr. 1, S. 14–21.
- H₂-Mobility, undefined, in: <http://h2-mobility.de/h2-stationen/>, abgerufen am 26.06.2017.
- HA Hessen Agentur GmbH (Hrsg.) (2011): Wasserstoff-Tankstellen. Ein Leitfaden für Anwender und Entscheider, Wiesbaden.
- Helms, H./Jöhrend, J./Hanusch, J./Höpfner, U./Lambrecht, U./Pehnt, M. (Hrsg.) (2011): UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht.
- Hydrogen Council, Hydrogen Council. New „Hydrogen Council“ launches in Davos.
- HZwei (2015): Neue Wasserstoff-Tankstelle in Hamburg eingeweiht, Hydrogeit, 2015. Jg.
- Jering, A./Klatt, A./Seven, J./Ehlers, K./Günther, J./Andreas, O./Mönch, L. (2013): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen.
- Kaltschmitt, M./Hartmann, H./Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren, 3. Aufl.
- Kemmler, A./Straßburg, S./Seefeldt, F./Anders, N./Rohde, C./Fleiter, T./Aydemir, A./Kleeberger, H./Hardi, L./Geiger, B. (2017): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014. Endbericht, Dessau-Roßlau.
- Kerkhoff, H. J./Dahlmann, P. (2015): Stahl und Nachhaltigkeit. Eine Bestandsaufnahme in Deutschland, 13. Aufl.

- Kraftfahrt-Bundesamt, Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2017. Zahlen zum 1. Januar 2017 im Überblick.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2016): Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2016. Gesamtkilometer steigen um 1,4 Prozent.
- Krieg, D. (2012): Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff, Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2012, Jülich.
- Kurzweil, P./Scheipers, P. (2010): Chemie. Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente, 8. Aufl., Wiesbaden.
- Lehmann, J./Luschtinetz, T. (2014): Wasserstoff und Brennstoffzellen. Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff, Berlin.
- Manager Magazin (2017): Zentrales Argument der Autoindustrie wankt - Dieselautos sind laut Studie klimaschädlicher als Benziner, <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/abgasskandal-diesel-stossen-laut-studie-mehr-co2-aus-als-benziner-a-1168560.html>, abgerufen am 09.10.2017.
- Markus Bachmeier (2016): H2-Tankstellen, Hannover.
- Mineralölwirtschaftserband e.V. (2017): Tankstellenbestand.
- Pluta, W. (2010): Honda entwickelt Wasserstofftankstelle für daheim. Anlage in der Garage soll über Nacht das Auto für den nächsten Tag betanken, in: <https://www.golem.de/1001/72716.html>, abgerufen am 05.08.2017.
- Quaschnig, V. (2013): Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie - Energiewende, 3. Aufl., München.
- Rammer, B./Millner, R./Boehm, C. (2017): Comparing the CO2 Emissions of Different Steelmaking Routes, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 162. Jg., Nr. 1, S. 7–13.
- Ring, C. (2017): Spült Wasserstoff die E-Autos von der Straße? Mit neuen Modelle und Milliarden-Investitionen kann H2 zum Treibstoff von morgen werden, <http://www.bild.de/auto/auto-news/wasserstoff/spuelt-wasserstoff-die-e-autos-von-der-strasse-50890734.bild.html>, abgerufen am 09.10.2017.
- Rühle, A.-S. (2012): Wasserstoff und Wirtschaft. Investieren in eine saubere Zukunft.
- Salchenegger, S. (2006): Emissionen von Wasserstofffahrzeugen. Abschätzung der Emissionen von wasserstoff- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen, Wien.

- Schumacher, T. (2011): Vertikale Integration im Erdgasmarkt. Eine industrieökonomische Betrachtung, Wiesbaden.
- Schweiger, A. (2017): E-Autos bieten derzeit keinen ökologischen Vorteil, Braunschweiger Zeitung, <http://www.braunschweiger-zeitung.de/mitreden/antworten/article211879555/E-Autos-bieten-derzeit-keinen-oekologischen-Vorteil.html>, abgerufen am 09.10.2017.
- Simon, M. C. (2007): Der Internationalisierungsprozess von Unternehmen.
- Statista, Anzahl der Ladestationen für Elektroautos in Deutschland bis Q2 2017
PREMIUMAnzahl der Ladestationen und der Anschlüsse für Elektrofahrzeuge in Deutschland im Zeitraum 4. Quartal 2015 bis 2. Quartal 2017 (Stand: 1. Juni 2017).
- Statista, Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2017.
- Statista (2017): Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2017.
- Stern, N. (2007): The economics of climate change – the Stern review, Cambridge.
- Stromauskunft.de (2017): Stromerzeugung in Deutschland. Strommix in Deutschland 1990-2016, in: <https://www.stromauskunft.de/strompreise/strommix-in-deutschland/>, abgerufen am 09.08.2017.
- Stuttgarter Nachrichten (2017): Feinstaub-Studie – 5000 Europäer sterben jährlich durch Dieselmotoren, <http://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.feinstaubstudie-5000-europaeer-sterben-jaehrlich-durch-dieselmotoren.4a7c2857-1aad-40b1-be63-4a5224e61e6a.html>, abgerufen am 09.10.2017.
- Süddeutsche Zeitung (2017): In Fürholzen entsteht die "Raststätte der Zukunft". Umweltschützer kritisieren den großen Flächenverbrauch, Süddeutsche Zeitung, 2017. Jg.
- Töpler, J./Lehmann, J. (2014): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven, Berlin.
- Toyota.de (2017): Der Toyota Mirai. Die erste Wasserstoff-Limousine in Großserie.
- Trzesniowski, M. (2014): Rennwagentechnik. Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme, 4. Aufl., Wiesbaden.
- TÜV Süd (2017): Hydrogen Refuelling Stations Worldwide, in: <https://www.netinform.de/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU&StationID=-1>, abgerufen am 05.07.2017.
- Umweltbundesamt (2016a): Emissionsquellen. Verkehrsemissionen belasten Luft und Klima, in: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen>, abgerufen am 09.08.2017.

Umweltbundesamt (2016b): Feinstaubwerte 2015. Grenzwerte, Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt (2017): Treibhausgasemissionen 2015 im zweiten Jahr in Folge leicht gesunken. Energiewende beginnt zu wirken – Emissionen des Verkehrs stagnieren aber weiter.

Vetter, P./Wanner, C./Wüpper, G. (2017): Europas Abkehr vom Verbrennungsmotor, <https://www.welt.de/wirtschaft/article167086871/Europas-Abkehr-vom-Verbrennungsmotor.html>, abgerufen am 09.10.2017.

Von Weizsäcker, E. U.; Hargroves, K.; Smith, M. (2009): Faktor Fünf – Die Formel für nachhaltiges Wachstum, München.

Wulf, C./Kaltschmitt, M. (2013): Wasserstoff als Kraftstoff im Deutschen Verkehrssektor, *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 37. Jg., Nr. 2, S. 127–141.

Yay, M. (2010): Elektromobilität. Theoretische Grundlagen, Herausforderungen sowie Chancen und Risiken der Elektromobilität, diskutiert an den Umsetzungsmöglichkeiten in die Praxis, Frankfurt M., Wien u.a.