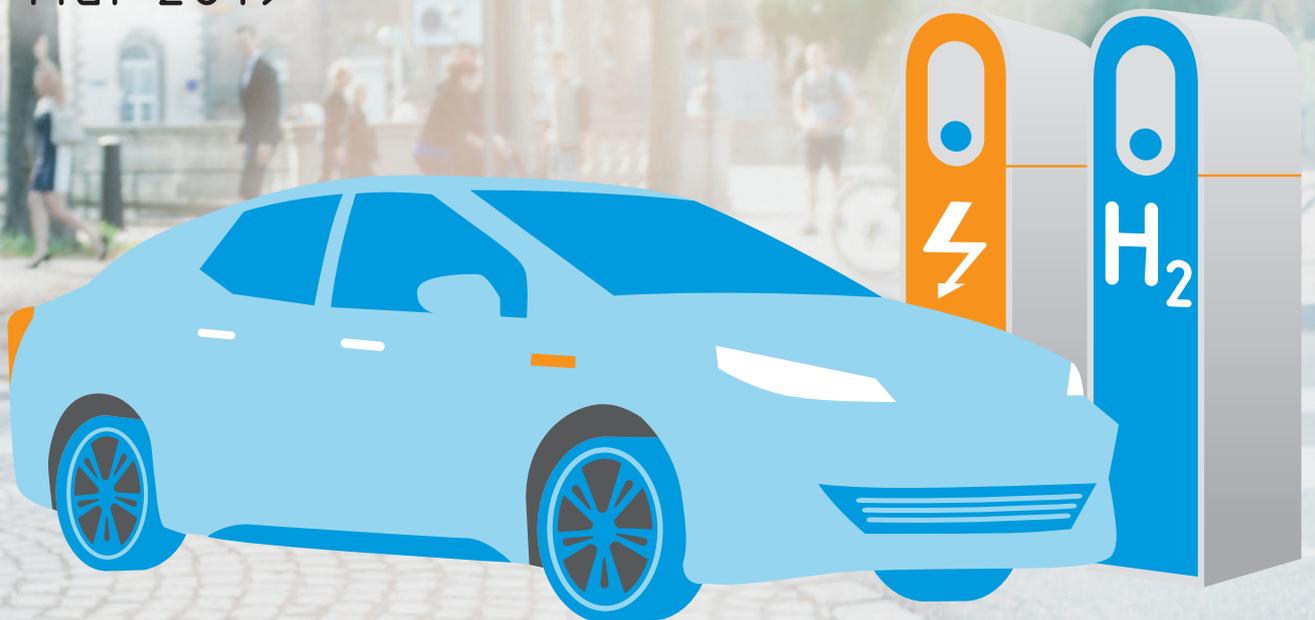


# Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge

Bedeutung für die Elektromobilität

VDI/VDE-Studie  
Mai 2019





# Vorwort

Die Elektromobilität stellt zweifelsohne einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor dar. Die derzeit in Politik, Medien und Öffentlichkeit geführte Diskussion zur zukünftigen Elektromobilität lässt jedoch aus Sicht der VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (VDI-GEU) und der VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik (VDI-FVT) sowie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (VDE/ETG) eine Ausgewogenheit in Bezug auf die Eigenschaften der einzelnen Systeme vermissen. Der Schwerpunkt der Diskussion konzentriert sich vorrangig auf Anwendungen von Batteriefahrzeugen.

Aktuell unterstützt die Bundesregierung die Elektromobilität mit Kaufprämien und dem Aufbau einer Ladeinfrastruktur. So sollen gemäß Koalitionsvertrag bis 2020 mindestens 100.000 Ladepunkte für Elektrofahrzeuge zusätzlich verfügbar gemacht und die Errichtung von privaten Ladesäulen gefördert werden. In Bezug auf Wasserstoff und Brennstoffzellen sieht der Koalitionsvertrag derzeit nur eine Förderung der Sektorenkopplung sowie eine Anpassung des regulativen Rahmens zur Einführung von „grünem Wasserstoff“ vor.

Es ist die Auffassung von VDI-GEU, VDI-FVT und VDE/ETG, dass die brennstoffzellenbasierte Elektromobilität ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen leisten kann. Dies ist auch die Einschätzung der Bahnbetreiber und neben Kostenaspekten ein gewichtiger Grund für deren Entscheidung, neben Batteriezügen auch in Brennstoffzellenzüge zu investieren.

Düsseldorf im Mai 2019



Dipl.-Ing. Martin Pokojski  
Vorsitzender des VDI/VDE-Fachausschusses  
„Wasserstoff und Brennstoffzellen“

Eine sachgerechte Diskussion erfordert zudem die Berücksichtigung aller Einflussgrößen. Neben den speziellen Nutzerinteressen, insbesondere der Wirtschaft mit ihren speziellen Anforderungen und der Stärkung des Standorts Deutschland, zählen hierzu auch Aussagen zu den systemtechnischen Aspekten. Gleichfalls sind die verfügbaren Rohstoffe zu bewerten sowie die ökologischen Konsequenzen zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist auch der technische und wirtschaftliche Aufwand für Herstellung und Betrieb der neuen Infrastrukturen zu thematisieren.

VDI-GEU, VDI-FVT und VDE/ETG haben im Rahmen einer interdisziplinären Arbeitsgruppe aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Industrie versucht, den derzeitigen Entwicklungsstand von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) und batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) darzustellen. Durch Einbindung von vielfältigem Sachverstand sollen relevante technische, ökologische und ökonomische Aspekte beider Technologien angemessen bewertet werden.

Die Analysen konzentrieren sich vorrangig auf den Pkw-Bereich; der Lkw-Sektor bleibt trotz seiner energie- und klimapolitischen Relevanz ausgespart genauso wie andere Optionen, z. B. synthetische Kraftstoffe.

Ziel dieser Studie ist ein möglichst objektiver Vergleich der Vor- und Nachteile, um Vertretern aus Politik, Medien und interessierter Öffentlichkeit die Möglichkeit zu geben, sich ausgewogen zu informieren.

# Autoren

An dieser Studie haben folgende Personen aus den Arbeitskreisen der VDI-GEU und VDI-FVT sowie der VDE/ETG mitgearbeitet:

Frank Belmer, Shell New Energies, Hydrogen Operations Coordinator Europe, Hamburg

Dr.-Ing. Boris Bensmann, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)

Torsten Brandt, Siemens AG, Process Industries and Drives Division, Erlangen

Dr. Carsten Cremers, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal

Monika Derflinger, Ford Research & Innovation Center Aachen, Aachen

Prof. Richard Hanke-Rauschenbach, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)

Dr.-Ing. Thomas Grube, Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich

Prof. Dr. Angelika Heinzl, ZBT GmbH – Zentrum für BrennstoffzellenTechnik, Duisburg

Dipl.-Ing. Willi Horenkamp, Technische Universität Dortmund, Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft, Dortmund

Dipl.-Ing (FH) Thomas Jungmann, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Abteilung Brennstoffzellensysteme, Freiburg

Stefan Kaimer, Ford Research & Innovation Center Aachen, Aachen

Paul Karzel, Shell Hydrogen Operations, Hamburg

Dr. Martin Kleimaier, Essen

Dr. Philipp Lettenmeier, Siemens AG, Hydrogen Solution, Erlangen

Dipl.-Ing. Martin Pokojski, Inecs GmbH, Berlin

Dr. Gerd Sandstede, Frankfurt am Main

Dr. sc. ETH Zürich Michel Suermann, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)

Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth, Fakultät Maschinenbau Technische Universität Chemnitz, Chemnitz

Erik Wolf, Siemens AG, Hydrogen Solutions, Erlangen

# Inhalt

Abkürzungen	4
Kernaussagen	6
Handlungsempfehlungen	8
Zusammenfassung	9
1 Einführung	12
2 Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen	13
2.1 Anwendungspotenziale	13
2.2 Absatzentwicklung	13
3 Bewertungskriterien der Elektromobilität-Technologien	15
4 Elektromobilität – Kernaussagen und Argumente	16
4.1 Politische Zielstellungen	16
4.2 Tanken und Reichweite	19
4.3 Infrastruktur	30
4.4 Energiebeschaffung	36
4.5 Kritische Rohstoffe	40
4.6 Kosten Pkw (TCO)	43
5 Forschungsbedarf	46
Literatur	47

## Abkürzungen

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
CEP	Clean Energy Partnership
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
CGH <sub>2</sub>	Compressed Gaseous Hydrogen (Druckwasserstoff gasförmig)
CNG	Compressed Natural Gas
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DC	Direct Current (Gleichstrom)
U.S. DOE	United States Department of Energy
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EPA	Environmental Protection Agency
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FCH-JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HEV	Hybrid Electric Vehicles (Hybrid-Elektrofahrzeuge)
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungskraftmaschine)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LH <sub>2</sub>	Liquid Hydrogen (Flüssig-Wasserstoff)
LPG	Liquied Petroleum Gas (Flüssiggas)
MEA	Membrane Electrode Assembly (Membran-Elektroden-Anordnung)
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (Japan)
MKS	Mobilitäts-/Kraftstoffstrategie
MSRP	Manufacturer's Suggested Retail Price
NFZ	Nutzfahrzeuge
PGM	Platinum Group Metals

PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicles (Plug-in-Hybridfahrzeuge)
RED II	Renewable Energy Directive
REEV	Range Extended Electric Vehicles (Elektrische Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung)
SOC	State of Charge (Batteriekapazität)
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkosten des Betriebs)
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
TWh	Terrawattstunde
WACC	Weighted Average Cost of Capital (Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten)
ZEV	Zero Emission Vehicle (Null-Emissions-Fahrzeug)

# Kernaussagen

## Politische Zielstellungen

- Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) und Batteriefahrzeuge (BEV) sind lokal emissionsfrei. Darüber hinaus haben sie das Potenzial, die politischen Zielsetzungen der Bundesregierung in Bezug auf die Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu unterstützen, wenn regenerativer Strom zum Einsatz kommt.
- Die Elektromobilität fördert den Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehr und unterstützt die Bemühungen zur Sektorenkopplung.
- Mit der Herstellung von Brennstoffzellen und Brennstoffzellensystemen inklusive zugehöriger Komponenten könnte die Wertschöpfung in Deutschland gesteigert werden.

## Tanken und Reichweite

- Wasserstoff erlaubt schnelles Tanken bei weltweit einheitlichen Tanksystemen.
- Die Wasserstoffvollbetankung von FCEV ist mit 3 min bis 5 min vergleichbar mit der heutigen Fahrzeugbetankung. Auch bei Einsatz von Schnellladestationen dauert das Nachladen von BEV ca. 20 min bei einer Begrenzung der Ladung auf 80 % der Batteriekapazität (SOC).
- FCEV verfügen nach aktuellem Entwicklungsstand gegenüber BEV über eine größere Reichweite bei gleichzeitig größerer Nutzlast und ermöglichen das Heizen im Winter ohne signifikante Reichweitenreduzierung.
- Batteriefahrzeuge nutzen derzeit die eingesetzte Primärenergie mindestens um etwa den Faktor 2 effizienter als Brennstoffzellenfahrzeuge. Die Speicherwirkung von Wasserstoff und der damit möglicherweise deutlich geringeren Abregelung von Stromquellen aus erneuerbaren Energien wird dabei nicht berücksichtigt.

## Infrastruktur

- Durch Nutzung von großtechnisch produziertem Wasserstoff und Erweiterung bestehender Tankstellenanlagen ist eine schnelle Anpassung der Wasserstoff-Infrastruktur möglich. Mittel- bis langfristig ist, wie bei der Ladeinfrastruktur für

BEV, von einem sukzessiven Ausbau der Erzeugungs- und Transportsysteme auszugehen.

- Durch die Vor-Ort-Speicherung von großen Mengen Wasserstoff an der Tankstelle sind Nachfragespitzen mit Vollausslastung der Tankstelle unproblematisch.
- Bei geringer Marktdurchdringung sind die Infrastrukturinvestitionen für BEV geringer. Bei einer hohen Marktdurchdringung ist je nach Annahmen von geringeren Kosten für die H<sub>2</sub>-Infrastruktur auszugehen.
- Der H<sub>2</sub>-Transport erfolgt in der Regel mit Lkw. Für die Zukunft bietet es sich bei einer größeren Nachfrage an, vorhandene Erdgasleitungen durch Umrüstung für den exklusiven H<sub>2</sub>-Transport zu nutzen.
- Die Bereitstellung von Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) führt zu technisch einfacheren Tankstellen, da die aufwendige Gasverdichtung, Vorkühlung und Qualitätsanalysen entfallen können. Die beförderte H<sub>2</sub>-Menge in einem Trailer lässt sich auf 4 t (Faktor 3 bis 3,5 im Vergleich zu druckförmigen Gastransport) steigern.

## Energiebeschaffung

- Die Wasserstoffbeschaffung ist von der Markteinführung über den Markthochlauf bis hin zum Massenmarkt generell als unkritisch hinsichtlich Verfügbarkeit und Kosten (dieseläquivalenter Preisbereich) einzuschätzen. Dennoch ist derzeit in Deutschland die Versorgung von Tankstellen mit grünem Wasserstoff sowohl in ausreichender Menge als auch zu angemessenen Marktpreisen mit Problemen verbunden und benötigt deshalb einen weiteren Ausbau von Erzeugungskapazität für grünen Wasserstoff.
- Wasserstoff entwickelt sich zu einem globalen Handelsgut. Durch Bezug des Energieträgers aus Ländern mit günstigen Stromkosten lassen sich die H<sub>2</sub>-Beschaffungskosten verringern.
- Wasserstoff als chemischer Energieträger lässt sich ohne Verluste längerfristig speichern. In Verbindung mit geeigneten Speichersystemen (z. B. Kavernen) ist eine Entkopplung von Erzeugung und Nachfrage möglich. Hierzu zählt auch eine saisonale Speicherung sowie die Schaffung

strategischer Reserven, vergleichbar mit den heutigen fossilen Bevorratungen.

- In Zukunft sollte sich mit Elektrolyseuren und Nutzung des steigenden Stromangebots aus erneuerbaren Energien eine weitgehend emissionsfreie sowie wirtschaftlich konkurrenzfähige Wasserstoffherzeugung realisieren lassen.
- Der Einsatz von Elektrolyseuren, aber auch FCEV und BEV, bietet das Potenzial zur Optimierung der Stromversorgung. Durch gezielten Einsatz der Systeme ist ein netzdienlicher Betrieb möglich. Des Weiteren kann die Abwärme der Elektrolyse in Wärmesysteme integriert und der Sauerstoff technisch genutzt werden.
- Wasserstoff lässt sich in unterschiedlichen Bereichen (Strom, Wärme, Verkehr und Industrie) verwenden. Wasserstoff bietet damit Potenzial für die von der Politik gewünschte Sektorenkopplung.

### Kritische Rohstoffe

- Eine Diversifizierung der (Elektromobilitäts-) Technologien reduziert das Risiko von Rohstoffverknappungen.
- Als kritische Rohstoffe gelten bei der Batterie Lithium, Nickel, Kobalt und bei der Brennstoffzelle Platin mit abnehmender Tendenz. Die Förderkapazitäten dieser Rohstoffe müssen ausgebaut werden, bevorzugt durch Steigerung der Recyclingrate.

### Kosten

- Die Kosten für die Nutzung von BEV und FCEV werden derzeit von den Anschaffungskosten dominiert.
- Die Serienfertigung von Batteriesystemen ist weiter fortgeschritten als die von Brennstoffzellen. Entsprechend ist die Kostenreduktion bei Batterien aktuell deutlich ausgeprägter als bei Brennstoffzellensystemen.
- Bei höheren Energie- bzw. Reichweitenanforderungen ergeben sich Kostenvorteile für das FCEV gegenüber dem BEV. Mit der Aufnahme der Serienfertigung verstärkt sich dieser Effekt.

### Sozioökonomische Faktoren

- Brennstoffzellenfahrzeuge enthalten einen Teil an Komponenten, die vom konventionellen Verbrennungsmotor bekannt sind; sie können übernommen oder adaptiert werden. Damit ergeben sich neue Geschäftsfelder, Arbeitsplätze entstehen.
- Brennstoffzellenfahrzeuge werden auch in Zukunft mit (kleinen) Batterien hybridisiert sein. Die Entwicklungen im Batteriebereich kommen damit auch dem FCEV in Hinsicht auf Serienfertigung und Kosten zugute.

## Handlungsempfehlungen

Die Brennstoffzellentechnologie kann wie die Batterietechnologie bei Nutzung erneuerbarer Energien einen nachhaltigen Beitrag zur Erreichung der politischen Ziele im Verkehrsbereich leisten. Die sich ergänzenden Technologien ermöglichen die Substitution von konventionellen Verbrennern ohne Komforteinschränkungen. Mittel- bis langfristig können sie dazu beitragen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Mobilität im Vergleich zum Status quo zu senken. Voraussetzung ist die Schaffung der erforderlichen Rahmenbedingungen. Hierzu zählen:

- Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur für den öffentlichen Personen- und Güterverkehr: Der öffentliche Nahverkehr stellt einen Schlüsselsektor zur Einführung von innovativen Verkehrssystemen dar und liefert einen entscheidenden Beitrag zur angestrebten Luftreinhaltung. Die hierbei geschaffene Infrastruktur beschleunigt den Markthochlauf im Individualverkehr, da sie der Einsatzfähigkeit von Elektrofahrzeugen zugutekommt.
- Realisierung der geplanten 400 Wasserstofftankstellen: Das bestehende Tankstellennetz ist für einige Anwendungen ausreichend. Jedoch erst bei Vorhandensein einer ausreichenden Infrastruktur sind aus Sicht des Privatkunden die Voraussetzungen gegeben, um Wasserstofffahrzeuge ohne Einschränkungen zu nutzen.
- Überprüfung der Regularien zur schnelleren Realisierung von Tankstellen: Die Realisierung von Wasserstofftankstellen ist mit diversen Auflagen verbunden, die die Umsetzung verzögern. Zur Beschleunigung des Genehmigungsprozesses sind bundesweit einheitliche standardisierte Verfahren unter Beibehaltung der entwickelten hohen Sicherheitsstandards einzuführen. Die Notwendigkeit der Genehmigung nach BImSchG bei Einsatz von Elektrolyseuren ist zu überprüfen und sinnvolle Ausnahmen sind zu definieren.
- Einbeziehung des Energieträgers Wasserstoff in die sektorenübergreifende Langzeitstrategie für eine sichere Energieversorgung: Dies trägt zur Planungssicherheit der Industrie bei und zieht zusätzliche Investitionen nach sich.
- Umstellung auf Elektromobilität: Zur Unterstützung des Markthochlaufs empfiehlt sich die Umstellung der Fahrzeugflotten im privaten wie öffentlichen Bereich.
- Begleitende Forschung zum Markthochlauf: Sowohl für Batterien als auch Brennstoffzellen herrscht im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennern Forschungsbedarf in den Bereichen Nebensysteme, Lebensdauer bzw. Degradationsverhalten im Realbetrieb sowie Lebenszyklusanalysen.
- Wertschöpfung in Deutschland: Ein großer Anteil der Wertschöpfung für Batterien liegt heute nicht in Europa, die Batteriezellenproduktion findet überwiegend in Asien statt. Zur Unterstützung der Wettbewerbsfähigkeit sollte die Politik durch Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen den Aufbau von Produktionseinrichtungen/Arbeitsplätzen für Brennstoffzellen und Batterien in Deutschland unterstützen.
- Serienproduktion von Komponenten elektrischer Antriebssysteme: Im Bereich Elektromotor und Batterien haben serientaugliche Herstellprozesse Einzug gehalten. Für Brennstoffzellen, -komponenten und Wasserstoffspeicher muss weiter an solchen gearbeitet werden, auch um die erforderliche Kostendegression zu erreichen.
- Rahmenbedingungen für Elektromobilität: Es sind diskriminierungsfreie politische Rahmenbedingungen zu schaffen. Die Anrechenbarkeit nach RED II (Vorgabe des Europäischen Parlaments) ist für FCEV und BEV gleichzustellen.
- Kosten der Energiebeschaffung: Die Kosten der Elektromobilität durch EEG-Umlagen, Netzentgelte sowie Steuern sind zu überprüfen.

# Zusammenfassung

## Politik

Die führenden Industrienationen unterstützen die Einführung der Elektromobilität. Für Europa insbesondere forciert die Europäische Kommission mit ihren Klimazielen die Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen im Verkehrsbereich.

Die deutsche Regierung unterstützt die Elektromobilität mit Kaufprämien und dem Ausbau einer Ladeinfrastruktur. In Bezug auf Wasserstoff und Brennstoffzellen sieht der Koalitionsvertrag eine Förderung der Sektorenkopplung sowie eine Anpassung des regulativen Rahmens zur Einführung von „grünem Wasserstoff“ vor.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) und Batteriefahrzeuge (BEV) können bei Nutzung erneuerbarer Energien gleichermaßen Beiträge zur Unterstützung der umweltpolitischen Ziele leisten. Brennstoffzellenelektrische Antriebe bieten darüber hinaus für Deutschland und Europa das Potenzial, einen hohen Anteil der Wertschöpfung darzustellen.

## Tanken und Reichweite

Tankverhalten und Tankdauer von FCEV sind mit dem konventioneller Fahrzeuge auf Mineralöl- und Erdgasbasis vergleichbar. Der Tankvorgang liegt bei 3 min bis 5 min und entspricht dem eines konventionellen – mit Flüssigkraftstoff auf Mineralölbasis betriebenen – Fahrzeugs. Zum Vergleich hierzu beträgt die Ladezeit bei BEV für eine Vollladung abhängig von der Ladeleistung bis zu mehreren Stunden. Mittels Schnellladestationen ist eine Ladezeit (bei einer Begrenzung auf 80 % der Batteriekapazität (SOC)) von ca. 20 min erreichbar.

Die mechanische Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Zapfsäule sowie der Betankungsprozess sind beim Tanken von Wasserstoff weltweit einheitlich. Im Gegensatz dazu gibt es für das Laden von BEV unterschiedliche Stecksysteme und Ladeleistungen. Des Weiteren ist die Anpassung der Netzinfrastruktur eine wesentliche Voraussetzung für die Installation von DC-Schnellladestationen.

Bei BEV korreliert die Leistung der Batterie mit der Kapazität. Mit zunehmender Reichweite, das heißt zunehmender Kapazität, erhöhen sich auch die Leistung und das Gewicht der Batterie. Demgegenüber sind bei FCEV Energiewandlung und -speicherung, und damit Leistung und Kapazität, entkoppelt. Eine Vergrößerung der Reichweite, das heißt Kapazität,

lässt sich allein über die Vergrößerung des Tanks erreichen. Der Gewichtszuwachs ist gering. Dies gilt es bei der Anwendung der Fahrzeuge zu berücksichtigen. BEV besitzen heute Vorteile im Kurzstreckenbereich, während sich FCEV insbesondere im Nutzlast- und Langstreckenverkehr empfehlen.

Bei konventionellen Fahrzeugen erfolgt die Beheizung der Fahrgastzelle durch Nutzung der Motorenabwärme. Bei FCEV reicht die Brennstoffzellenabwärme im Allgemeinen aus. Im Unterschied hierzu ist bei BEV eine Beheizung nur über die Batterie möglich. Dies kann bei niedrigen Umgebungstemperaturen die Reichweite deutlich verringern.

Die Umwandlung des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle in elektrische Energie ist mit Wirkungsgradverlusten verbunden. FCEV weisen deshalb im Vergleich zu BEV eine deutlich geringere Effizienz auf. Im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor besitzt ein FCEV jedoch vor allem im Teillastbereich, dem überwiegenden Betriebsbereich der Pkw, einen wesentlich höheren Wirkungsgrad.

Die Energiebilanz von FCEV lässt sich abhängig von der Nutzung mittels zusätzlicher Batterien (plug-in) verbessern. Hierbei erfolgt eine Ladung der Batterie sowohl über das Netz als auch während der Fahrt über die Brennstoffzelle oder während der Rekuperation der Bremsenergie, sodass die Vorteile beider Systeme (BEV und FCEV) zum Tragen kommen.

## Infrastruktur

BEV- und FCEV-Infrastrukturen stellen wichtige Bausteine für den Verkehrsbereich dar. Sie bieten die Möglichkeit, klimaverträgliche, saubere und erneuerbare Verkehrskonzepte zu realisieren.

Vorteilhaft in Bezug auf Wasserstoff ist die leichtere Umsetzung, da vorhandene Strukturen genutzt werden können. Bestehende Tankstellen lassen sich entsprechend erweitern.

Die Verweildauer von FCEV am Ort der Betankung ist vergleichbar mit dem heutigen Standard für Benzin oder Diesel bzw. LPG/CNG (Flüssigwasserstoff/komprimiertes Erdgas). Entsprechend erfolgt die Kapazitätsauslegung von Wasserstofftankstellen in einem zu heutigen Tankstellen vergleichbaren Vorgehen. An einer Tanksäule können also in einer gewissen Zeitdauer viele Fahrzeuge nacheinander tanken. Zum Vergleich hierzu wird bei BEV eine Vielzahl von Ladesäulen benötigt, um das gleichzeitige Laden

einer vergleichbaren Anzahl von Fahrzeugen während dieser Zeitdauer zu ermöglichen. Dies gilt auch bei Einsatz von DC-Schnellladesäulen. Sie verkürzen zwar die Ladezeiten, dennoch ist auch hier im Vergleich zu FCEV von 3-mal bis 5-mal längeren Ladezeiten bei einer Begrenzung auf 80 % der Batteriekapazität auszugehen. Deshalb ist eine entsprechend größere Zahl an Stellplätzen mit Ladeeinrichtungen vorzusehen, um die gleiche Betankungskapazität zu erreichen. Dies gilt insbesondere für Lademöglichkeiten entlang der Autobahnen. Zusätzlich kann aufgrund des in diesem Fall nicht steuerbaren Ladens ein Netzausbau in den vorgelagerten Netzebenen erforderlich sein.

Der Platzbedarf von Wasserstoffzapfsäulen weicht nicht wesentlich von dem heutiger Benzin- und Dieselpapfsäulen ab. Je nach Anlieferungskonzept ist jedoch von einem erhöhten Platzbedarf für den erforderlichen H<sub>2</sub>-Speicher am Tankstellenort auszugehen.

Das Tanken ist wie bisher als eigenständiger Vorgang zu betrachten, die Tankstellen müssen hierzu angefahren werden. Dies kann, insbesondere in der Einführungsphase von Wasserstofftankstellen, mit längeren Anfahrtstrecken verbunden sein.

Der Transport von H<sub>2</sub> erfolgt in der Regel mit Lkw. Für die Zukunft bietet es sich bei einer größeren Nachfrage an, vorhandene Erdgasleitungen durch Umrüstung für den H<sub>2</sub>-Transport zu nutzen.

Analysen zum Nutzerverhalten von BEV zeigen, dass BEV überwiegend zu Hause und am Arbeitsplatz geladen werden. Dennoch werden auch für BEV-Nutzer ohne eigene Garage Lösungen benötigt, die das Nachladen sicherstellen. Hierzu zählen unter anderem öffentliche Ladesäulen. In der Diskussion ist derzeit auch das sogenannte „Laternenladen“.

Beim Übernachten kann bei einem gesteuerten Laden von einer Reduzierung des Ausbaubedarfs an Netzkapazität gegenüber dem ungesteuerten Ladevorgang ausgegangen werden. Die Umsetzung dieses Konzepts ist jedoch in hohem Maße von für Batteriefahrzeuge reservierten Stellplätzen abhängig, da diese mit unterschiedlich hohem Aufwand mit Lademöglichkeiten ausgestattet werden müssen.

Die Infrastrukturinvestitionen für BEV sind bei einer geringen Marktdurchdringung geringer als für FCEV. Bei einer größeren Marktdurchdringung ist von geringeren Investitionen für die H<sub>2</sub>-Infrastruktur auszugehen. Eine Mischung beider Systeme – BEV für die kürzeren Strecken und FCEV für die Langstrecke – könnte ein Kostenoptimum ergeben. Dies zu belegen, erfordert jedoch noch detaillierte weiterführende Studien.

Eine Szenarienanalyse des Forschungszentrums Jülich und der RWTH Aachen zum Infrastrukturbedarf von BEV und FCEV zeigt, dass für große Fahrzeugflotten von 20 Mio. Pkw die Investitionen in ein H<sub>2</sub>-Versorgungssystem geringer ausfallen als für eine Batterie-ladeinfrastruktur; die spezifischen Kosten je gefahrenen Kilometer sind hingegen vergleichbar. Die Investition für die H<sub>2</sub>-Versorgung berücksichtigt hierbei neben den Tankstellen und Logistikkomponenten auch saisonale Speicher mit einer Gesamtkapazität von 60 Tagesverbräuchen. Als Speicheroption für den Wasserstoff bieten sich Salzkavernen an, mit deren Hilfe die Speicherung großer Mengen (einige 10 TWh) an erneuerbaren Energien besonders kostengünstig darstellbar ist. Die Investition für das Laden von Batteriefahrzeugen umfasst die Kosten der Ladesäulen sowie des Netzausbaubedarfs in Verteilnetzen. Ein eventuell notwendiger Netzausbau im Übertragungsnetz sowie saisonale Speicher sind dabei bislang nicht berücksichtigt worden. Ein Vergleich sollte jedoch auch für BEV den Aufwand für einen Langzeitspeicher für erneuerbare Energien berücksichtigen.

## Energiebeschaffung

Die Wasserstoffbeschaffung ist in jeder Phase der Markteinführung als unkritisch hinsichtlich Verfügbarkeit und Kosten einzuschätzen. Während kurzfristig vor allem Nebenprodukt-Wasserstoff aus Industrieprozessen sowie Wasserstoff aus der Methandampfreformierung zur Verfügung gestellt werden kann, sollten mittel- bis langfristig nach Möglichkeit nur erneuerbare Primärenergien zur H<sub>2</sub>-Produktion eingesetzt werden.

Wasserstoff entwickelt sich zu einem globalen Handelsgut. Untersuchungen zu einer weltweit angelegten H<sub>2</sub>-Logistik zeigen zudem, dass Wasserstoff in Regionen mit besonders hohem Aufkommen an erneuerbaren Energien kostengünstig produziert und beispielsweise per Schiff zu den Verbrauchszentren transportiert werden kann.

Unter Einbeziehung der erforderlichen Infrastrukturkomponenten lässt sich nachweisen, dass die H<sub>2</sub>-Kosten an der Tankstelle gegenüber heutigen Kraftstoffkosten wettbewerbsfähig sind (jeweils ohne Steuern und Abgaben). Im Vergleich mit Batteriefahrzeugen ist aber zu berücksichtigen, dass in dem Strompreis für Batteriefahrzeuge Abgaben und Steuern enthalten sind, was gegenüber wasserstoffversorgten Fahrzeugen eine Benachteiligung darstellt.

Wasserstoff als chemischer Energieträger lässt sich ohne Verluste kostengünstig längerfristig speichern, hat jedoch höhere Umwandlungsverluste. In Verbindung mit geeigneten Speichersystemen (z. B. Kaver-

nen) ist eine Entkopplung von Erzeugung und Bedarf bis hin zur saisonalen Speicherung möglich.

Wasserstoff bietet die Möglichkeit, in unterschiedlichen Bereichen (Strom, Wärme, Verkehr und Industrie) zum Einsatz zu kommen. Der Energieträger bietet damit das Potenzial für die von der Politik gewünschte Sektorenkopplung.

Der Einsatz von Elektrolyseuren zur Wasserstoffherzeugung ermöglicht eine emissionsfreie Energiebereitstellung, sofern diese mit Erneuerbaren-Energien-Strom betrieben werden. Ein wirtschaftlich konkurrenzfähiger Einsatz setzt aber günstige Strompreise voraus.

Elektrolyseure für die Versorgung von FCEV und BEV bieten das Potenzial zur Optimierung der Stromversorgung. Durch gezielten Einsatz der Systeme ist ein netzdienlicher Betrieb möglich.

### Kritische Rohstoffe

Im Bereich „Elektromobilität“ gelten Lithium, Nickel und Kobalt für die Batterie und Platin für die Brennstoffzelle sowie Seltenerdmetalle für den Elektromotor als sogenannte kritische Rohstoffe.

Zur Vermeidung von Rohstoffverknappungen oder Preissteigerungen müssen die Förderkapazitäten aller genannten kritischen Rohstoffe erhöht werden, insbesondere die für Lithium und Kobalt. Dies erfolgt bestenfalls in Form einer gesteigerten Recyclingrate, die besonders für Lithium de facto im technischen Maßstab noch nicht existiert.

Auch würde ein verstärktes Recycling insbesondere das Risiko von strukturellen Verknappungen mindern, die vor allem bei Sekundärmetallen auftreten können, da deren Minenproduktionsmenge nur vom Primärmetall abhängt. Dies betrifft vor allem Kobalt und teilweise Platin. In gleicher Weise würden monopolartige Strukturen in den Bereichen „Minenproduktion“ und „Rohstoffreserven“, wie es sie z. B. für Seltenerdmetalle (China), für Platin (Südafrika) und für Kobalt (Kongo) gibt, abgemildert und langfristig aufgebrochen.

Nach heutigem Stand würden, wenn überhaupt, nur die Rohstoffreserven an Kobalt und Nickel für eine

prognostizierte Elektromobilität bis zum Jahr 2050 und unter Einbeziehung aller weiteren Anwendungen nicht ausreichen, jedoch aber deren Rohstoffressourcen. Daher sind Preissteigerungen und temporäre Verknappungen durchaus vorstellbar, sofern nicht in gleichem Maße neue Bergwerk- und Recyclingkapazitäten geschaffen werden. Dagegen sind absolute Verknappungen eher unwahrscheinlich, da üblicherweise entweder zuvor neue Rohstoffvorkommen gesichtet und erschlossen oder Rohstoffsubstitutionen eingeleitet werden. So gibt es bereits erste erfolgreiche Entwicklungen, diese kritischen Rohstoffe deutlich effizienter zu nutzen oder sogar komplett zu substituieren.

### Kosten

Die Kosten für die Nutzung von BEV und FCEV werden derzeit von den Anschaffungskosten dominiert. Da die Kostenreduktion durch Serienfertigung für Batteriesysteme weiter fortgeschritten ist als für Brennstoffzellensysteme, sind diese aufgrund der späteren Markteinführung zurzeit wirtschaftlich benachteiligt.

Mit Aufnahme der Serienfertigung auch bei Brennstoffzellensystemen sind für Fahrzeuge mit höheren Energie- bzw. Reichweitenanforderungen bei der Anschaffung Kostenvorteile für das Brennstoffzellenfahrzeug zu erwarten. Größere FCEV-Fahrzeuge wie SUVs sollten hierbei anfangs Kostenvorteile haben, da vergleichbare BEV entsprechend große Batterien benötigen. Bei kleineren Fahrzeugen ist von einer etwas späteren Kostenparität auszugehen.

### Offene Punkte

Die Analysen im Rahmen dieser Studie zeigen, dass zu verschiedenen Punkten nicht ausreichende Informationen vorliegen oder vorliegende Informationen teilweise nicht konsistent sind. Dies spricht für einen weitergehenden Forschungsbedarf. Insbesondere sind hiervon die Themenblöcke „Nebensysteme“, „Lebenszyklusanalysen“, „Lebensdauer der Systeme“ sowie „Serienproduktionsprozesse für deren Komponenten“ betroffen.

# 1 Einführung

Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist oberstes Ziel der globalen Klimapolitik. Fossile Energieträger müssen hierzu in allen Sektoren durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Im Verkehrssektor sind elektrische Antriebe ein wichtiger Lösungsweg. Sie zeichnen sich durch die im Vergleich zum Verbrennungsmotor sehr hohe Effizienz aus und ermöglichen den Einsatz von Strom aus Windkraft und Photovoltaik. Dies ist von großer Bedeutung, da der Anteil der biogenen Energieträger begrenzt ist und die hierfür erforderlichen Agrarflächen mit der Nahrungsmittelherstellung im Wettbewerb stehen. Weiterhin ist beim Straßenverkehr die lokale Emissionsfreiheit der elektrischen Antriebe von großer Bedeutung. Nur so lassen sich die lokalen Emissionen – einschließlich Lärm – nachhaltig reduzieren und die Lebensqualität in den Ballungszentren deutlich verbessern.

Zur Elektromobilität zählen grundsätzlich alle Fahrzeugsysteme mit elektrischen Antriebssystemen. Sie sind in unterschiedlicher technischer Ausprägung verfügbar. Neben den derzeit intensiv diskutierten Batteriefahrzeugen, insbesondere solche mit Lithium-Ionen-Batterien, zählen hierzu auch Systeme, die Wasserstoff als Energieträger nutzen. Wasserstoff kann per Elektrolyse – vorzugsweise mit erneuerbarem Strom – gewonnen und mittels Brennstoffzellen (typischerweise Niedertemperatur-Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen, kurz PEMFC) an Bord der Fahrzeuge wieder in elektrische Energie umgewandelt werden. Im Unterschied zu Batteriefahrzeugen, bei denen die elektrische Energie in Batterien gespeichert wird, wird bei Brennstoffzellenfahrzeugen der Wasserstoff heute üblicherweise in Druckbehältern bei hohen Drücken gespeichert. Diese Technik hat sich gegenüber früher angedachten Speichersystemen mit tiefkaltem flüssigem Wasserstoff oder Methanol basierten Systemen mit H<sub>2</sub>-Reformer durchgesetzt.

Parallel zu den Elektrofahrzeugen arbeitet die Öl- und Kraftfahrzeugindustrie an Systemen, die synthetische Kraftstoffe – flüssig oder gasförmig – als Energieträger für Verbrennungsmotoren nutzen. Sie dienen als Ersatz der fossilen Produkte und werden über regenerativ gewonnenen Wasserstoff sowie Kohlendioxid z. B. aus der Luft, biogenen Quellen oder industriellen Prozessen gewonnen. Da bei der Verbrennung an

Bord gerade die Menge Kohlendioxid freigesetzt wird, die bei der Herstellung benötigt wird, gelten diese Kraftstoffe als klimaneutral. Als vorteilhaft ist hierbei zu werten, dass das vielfältig diskutierte Reichweitenproblem, insbesondere in Verbindung mit Batteriesystemen, aufgrund der mit den heutigen Kraftstoffen vergleichbaren Energiedichte nicht mehr zur Diskussion stehen würde. Nachteilig ist jedoch der schlechtere Wirkungsgrad der gesamten Kette durch die zusätzlichen Wandlungsverluste bei der Herstellung dieser Kraftstoffe sowie durch den schlechteren Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren. Außerdem bleiben die lokalen Emissionen erhalten. Darüber hinaus sind die Produktionsanlagen für synthetische Kraftstoffe mit hohen Investitionen verbunden, da sie eine CO<sub>2</sub>-Bereitstellung, Wasserstoffproduktion und Produktsynthese umfassen.

Das Thema klimaneutrale Mobilität spielt (in naher Zukunft) eine wichtige Rolle sowohl im Luft-, Schienen-, Schiff- als auch Straßenverkehr. Der Straßenverkehr beinhaltet hierbei die Bereiche Personen- und Lastkraftwagen (Pkw und Lkw), Busse, Fahrräder sowie im weiteren Sinne auch Flurförderfahrzeuge und Gabelstapler.

Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf batterieelektrische Fahrzeuge sowie Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb. Ziel ist es aufzuzeigen, welche Konsequenzen aus der Nutzung der unterschiedlichen Technologien resultieren können. Dabei werden, dem Kenntnisstand entsprechend, die Vor- und Nachteile der einzelnen Entwicklungen dargestellt.

Neben der bereits angesprochenen Möglichkeit, erneuerbare Energien nutzen zu können, ist von Relevanz, dass sich insbesondere Elektrolyseure, mit denen der Wasserstoff aus erneuerbarem Strom gewonnen wird, für eine umfassende Systemintegration eignen. Neben der Nutzung von Strom- und Gasnetzen zum Transport von elektrischer Energie und Wasserstoff zählen hierzu auch Maßnahmen, die die Nutzung dieser Systeme zur Flexibilisierung des Energieangebots als auch der Energienachfrage ermöglichen. Auch bietet sie die Möglichkeit, bei lokal vorhandenem Bedarf Wärme bereitzustellen, die bei der Elektrolyse als Nebenprodukt anfällt.

## 2 Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen

H<sub>2</sub> als Energieträger und Brennstoffzellen als Energiewandler für den mobilen Bereich wurden in zahlreichen Projekten untersucht, bewertet und realisiert. Hierbei hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenlösungen erhebliche Marktanteile bis 2050 erreichen können [1]. Begründet liegt dies in der leichten Handhabung der Fahrzeuge, der großen Reichweite sowie der Erfüllung der technischen Herausforderungen.

### 2.1 Anwendungspotenziale

Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge gibt es einen großen Markt. So werden bereits heute beispielsweise im Schichtbetrieb von Logistikunternehmen elektrisch- oder gasbetriebene Gabelstapler genutzt. Um dort die Auslastung noch weiter zu erhöhen, werden heutzutage bereits sehr schnell wieder zu betankende Brennstoffzellen-Gabelstapler eingesetzt. So wird der größte Marktanteil von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen mit ca. 65 % bei Gabelstaplern im Jahr 2050 gesehen [1]. Brennstoffzellen-Gabelstaplern wird bereits heute die vollständige technische Reife, TRL 9, und Massenmarktneignung attestiert [1]. Allein in den USA wurden seit 2009 über 16.000 [2] Brennstoffzellen-Gabelstapler beschafft bzw. bestellt und bei verschiedensten Endkunden kommerziell erfolgreich eingesetzt [3; 4]. Gegenüber batteriebetriebenen Gabelstaplern ergeben sich klare Vorteile aufgrund der längeren Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks, der größeren Reichweite, deutlich schnelleren Betankungszeiten und geringeren Betriebskosten [5]. Daneben überzeugen die Brennstoffzellen-Gabelstapler auch durch ein unproblematisches und sicheres Handling [5].

Auch Brennstoffzellen-Autos (FCEV) haben eine vollständige technische Reife erreicht [6]. Dies bestätigen praktische Erfahrungen: Bereits 2011 hatten im Rahmen der F-Cell World Drive drei B-Klasse F-Cell von Mercedes Benz in 125 Tagen rund um die Welt erfolgreich 30.000 km zurücklegen können [7; 8]. Mittlerweile sind Brennstoffzellenautos auch von Honda, Toyota und Hyundai [6] kommerziell erhältlich.

Im Vergleich zu Brennstoffzellen-Autos wird für Brennstoffzellen-Busse zukünftig ein höherer Marktanteil erwartet. Zudem ist mit TRL 8 nahezu die vollständige technische Reife bestätigt [6]. Im realen Fahrbetrieb konnten Brennstoffzellen-Busse bereits DOE (U.S. Department of Energy)-Ziele von 20.000

Fahrstunden [9] bzw. 25.000 Fahrstunden [10] erreichen, und bei zahlreichen Projekten konnte ein positives Fazit gezogen werden: „All of these projects have proven that fuel cell buses can operate with the same flexibility as diesel buses without compromising the productivity of public transport“ [11]. Eine deutliche Reduzierung der Anschaffungskosten ist in den letzten Jahren ebenso zu verzeichnen [12; 13].

Aufgrund der zahlreichen Anwendungsfälle ist es nicht verwunderlich, dass die Bedeutung der Brennstoffzellentechnologie, insbesondere im mobilen Bereich in Nordamerika und Asien, deutlich wächst [14]. Diese Wachstumsraten werden auch zu einem Anstieg der Beschäftigten im Brennstoffzellenbereich führen.

### 2.2 Absatzentwicklung

In den letzten Jahren ist ein stark wachsender Absatz für sämtliche Elektromobilitätsvarianten zu verzeichnen (Bild 1). Er beläuft sich derzeit auf etwa 1 % des globalen Markts [15]. Verglichen untereinander liegen die BEV-Pkw-Neuzulassungen mit gut 750.000 Fahrzeugen alleine im Jahr 2017 im Vergleich zu PHEVs und FCEVs um den Faktor 2 bzw. 230 höher. Den größten Absatzmarkt bildet die Volksrepublik China, in dem bereits jedes zweite BEV verkauft wird.

Die große Absatzdiskrepanz im Bereich der Null-Emissionen-Fahrzeuge (engl. zero emission vehicles (ZEVs)) ist auf einen früheren (Massen-)Markteintritt der reinen Batteriefahrzeuge im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen, deutlich mehr Fahrzeugmodellen und einen tendenziell besseren Ausbaugrad der Ladeinfrastruktur zurückzuführen. Dennoch haben auch die FCEV-Neuzulassungen in den derzeit drei Absatzmärkten USA (Kalifornien), Japan und Europa rasant zugenommen (Bild 1).

Aus Verbrauchersicht spielen die Anschaffungskosten eine entscheidende Rolle. In Bezug auf die Marktentwicklungen von BEV, PHEV und FCEV kommt der Umstand zum Tragen, dass Batteriefahrzeuge kleiner und kostengünstiger gebaut werden können. Die sinkenden Kosten für Li-Ionen-Batterien unterstützen dies; mit unter 200 €/kWh nähern sie sich inzwischen den Rohstoffkosten an. Beigetragen zu dieser Kostensenkung haben die Anstrengungen verschiedener Hersteller (Tesla, Samsung, LG etc.), die Batteriezellen für Elektromobile auf den Markt bringen.

Was die derzeitige Preissituation bei ZEV betrifft, sind in Tabelle 1 Indikatoren für die drei Hauptmärkte Deutschland, USA und Japan aufgezeigt. In den USA ist beispielsweise der Toyota Mirai mit 58.365 US\$ bei einer Reichweite von knapp 620 km gelistet und der Tesla Model S (75 kWh) bei einer Reichweite von

490 km mit einem Preis von 74.500 US\$ (unverbindliche Preise der Hersteller). Dies entspricht einer Kaufpreisersparnis von rund 16.000 US\$ bzw. 160.000 km Fahrstrecke (bei 10 \$/kg<sub>H2</sub>), etwa vergleichbar mit einer typischen Pkw-Lebensdauer.

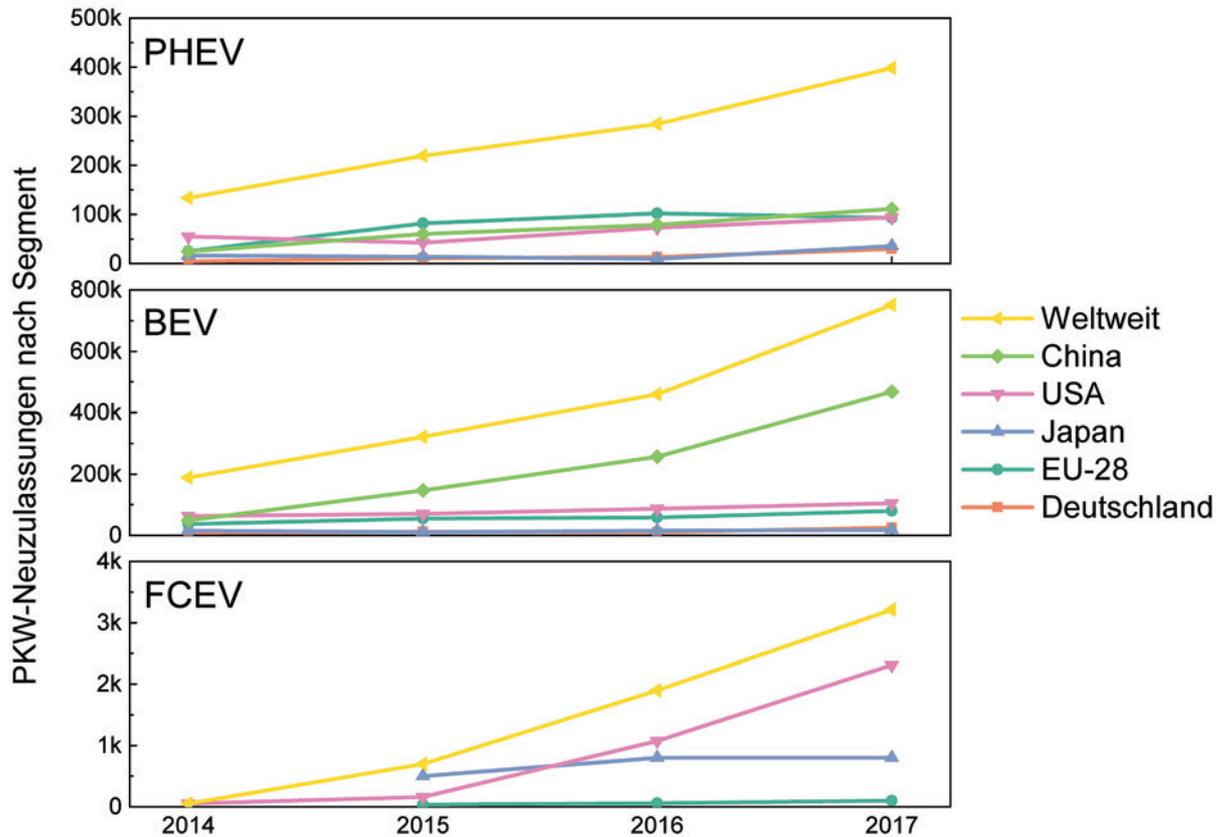


Bild 1. BEV, FCEV und PHEV Neuzulassungen von 2014 bis 2017 [16; 17] (Quelle: Universität Hannover)

Tabelle 1. Aktuelle Listenpreise für drei repräsentative ZEV [18] (Quelle: Fraunhofer ISE)

	Deutschland	USA		Japan	
	€	USD	€	Jap. Yen	€
Toyota Mirai	78.600	MSRP of 58.365 (+ 895 for delivery)	48.923 (49.652)	7.236.000	55.500
Tesla Model S75	69.999 (71.999 ohne Umweltprämie)	74.500	62.319	9.600.000	73.632
Nissan Leaf 40 kWh (Ausstattung ZE1)	31.950	29.900 (22.490 after federal tax credit)	25.136 (18.850)	3.150.360	24.195

## 3 Bewertungskriterien der Elektromobilität-Technologien

Eine objektive Bewertung der Technologien erfordert die Erfassung aller wesentlichen Einflussgrößen. Hierzu zählen neben den politischen Zielstellungen und der Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland die Marktentwicklung, technische Aspekte, Fragen zur Infrastruktur, Möglichkeiten der emissionsfreien Mobilität, die Verfügbarkeit von Rohstoffen, Lebensdaueranalysen (Life Cycle Cost) sowie der Kundennutzen. Dieser Studie liegen deshalb die in Bild 2 aufgeführten Bewertungskriterien zugrunde. Sie werden in Abschnitt 4 erläutert und soweit möglich detailliert bewertet.



Bild 2. Bewertungskriterien der Elektromobilität

Auf der Basis dieser Kriterien wurden für die Kategorien

- politische Zielstellungen,
- Tanken und Reichweite,
- Infrastruktur,
- Energiebeschaffung,
- kritische Rohstoffe und
- Kosten (TCO)

unter Berücksichtigung des Kundennutzens Kernaussagen erarbeitet, die in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter ausgeführt werden.

## 4 Elektromobilität - Kernaussagen und Argumente

### 4.1 Politische Zielstellungen

#### Kernaussagen

- FCEV und BEV sind lokal emissionsfrei. Darüber hinaus haben sie das Potenzial, die politischen Zielsetzungen der Bundesregierung in Bezug auf die Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu unterstützen, wenn regenerativer Strom zum Einsatz kommt.
- Die Elektromobilität fördert den Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehr und unterstützt die Bemühungen zur Sektorenkopplung.
- Mit der Herstellung von Brennstoffzellen und Brennstoffzellensystemen inklusive zugehöriger Komponenten könnte die Wertschöpfung in Deutschland gesteigert werden.

#### Ökologie/emissionsfreie Mobilität

Die Einführung der Elektromobilität wird durch die führenden Industrienationen unterstützt. Die Politik forciert dies durch Gestaltung entsprechender Rahmenbedingungen.

Die Europäische Kommission unterstützt mit ihren Klimazielen die Verringerung der Treibhausgasemissionen im Verkehrsbereich. Der Umwelt- und Energieplan, den die Kommission im Jahr 2014 vorgestellt hat, sieht bis zum Jahr 2030 eine Verringerung des Ausstoßes an Treibhausgasen um 40 % vor (ausgehend vom Stand im Jahr 1990). Der Anteil der erneuerbaren Energien soll bis dahin um 27 % gesteigert und eine Verbesserung der Energieeffizienz (z. B. Verringerung von thermischen Verlusten) um ebenfalls 27 % erreicht werden [19].

Speziell für den Verkehrsbereich fördert die EU die Einführung innovativer Antriebssysteme durch ihr Weißbuch und entsprechende Richtlinien:

- Das Weißbuch Verkehr [20] geht davon aus, dass sich mittels Elektromobilität der Anteil konventioneller Fahrzeuge in der Stadtlogistik halbieren lässt. Bis 2030 sollte sich eine CO<sub>2</sub>-freie städtische Logistik erreichen lassen.

- Die Verordnung 333/2014 [21] fordert bis 2021 eine Reduktion der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neuwagenflotten auf 95 g CO<sub>2</sub> pro km. Dies entspricht einem Benzinverbrauch von etwa vier Litern pro 100 Kilometer.
- Die Richtlinie 2014/94 „Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ [22] sieht die stärkere Verbreitung von umweltverträglichen, alternativen Kraftstoffen vor. Für teil- und vollelektrische Fahrzeuge ist die Infrastruktur mit nicht diskriminierendem Zugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur auszubauen.

Diese Zielstellungen spiegeln sich in unterschiedlichen Aktivitäten der EU-Mitgliedsländer wider. Unter anderem haben Großbritannien [23] und Frankreich [24] angekündigt, bis 2040 den Verkauf von Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen zu verbieten. Der schwedische Autohersteller Volvo plant, ab 2019 nur noch Hybrid- oder Elektroautos zu produzieren und anzubieten [111]. Auch VW hat im Dezember 2018 angekündigt ab 2026 die letzte Produktion auf einer Verbrenner-Basis zu starten [112].

Speziell für Deutschland sieht die Bundesregierung in der Elektromobilität einen Beitrag zur Vereinigung von technologischem Fortschritt und Umwelt-/Klimaschutz. Sie bietet die Chance, die Spitzenposition der deutschen Unternehmen auf dem Weltmarkt zu stärken und den wirtschaftlichen Aufschwung in Deutschland zu unterstützen. Großflächige Fahrverbote in den Städten könnten sich auf diese Weise vermeiden lassen [25]. Sie unterstützt deshalb die Einführung der Elektromobilität u.a. mit Kaufprämien für den Erwerb von Elektrofahrzeugen, mit der Förderung des Ausbaus einer Ladeinfrastruktur sowie der Beschaffung von Elektrofahrzeugen für den öffentlichen Bereich [26].

Aussagen im Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung [27] unterstützen dies. Die Regierung fühlt sich hiernach mit ihrer Mobilitätspolitik dem Pariser Klimaabkommen und dem deutschen Klimaschutzplan 2050 verpflichtet. In Bezug auf Wasserstoff und Brennstoffzellen sollen das Nationale Innovationsprogramm und die Mobilitäts-/Kraftstoffstrategie (MKS) technologieoffen weiterentwickelt und die Mittel zu deren Umsetzung erhöht werden. Die Sektorenkopplung soll vorangebracht und der regulative Rahmen so verändert werden, dass „grüner Wasserstoff“ und Wasserstoff als Nebenprodukt von industriellen Prozessen als Kraftstoff genutzt oder für die Herstellung

konventioneller Kraftstoffe (z. B. Erdgas/CH<sub>4</sub>) verwendet werden kann.

In Bezug auf die Elektromobilität (batterieelektrisch, Wasserstoff und Brennstoffzelle) sollen bestehende Förderprogramme, soweit erforderlich, über das Jahr 2020 hinaus aufgestockt und ergänzt werden. Der Aufbau einer flächendeckenden Lade- und Tankinfrastruktur soll intensiviert werden. Bis 2020 sollen mindestens 100.000 Ladepunkte für Elektrofahrzeuge zusätzlich zur Verfügung stehen, hiervon mindestens ein Drittel als DC-Schnellladesäulen. Für eine nachhaltige Umstellung der Busflotten auf alternative Antriebe sind neben den Fahrzeugen auch geeignete Ladeinfrastrukturen sowie Betriebsmanagementsysteme geplant. In Bezug auf Wasserstoff hat die Bundesregierung bereits 2016 das zweite Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 bis 2026 beschlossen. Das Programm ist Bestandteil der Innovationsstrategie der Bundesregierung und Baustein eines nachhaltigen Energiesystems [29].

Der Blick auf andere Regionen bestätigt das globale Interesse an der Elektromobilität:

- In **Europa** sind die Aktivitäten der französischen Regierung erwähnenswert [29]. Der Wasserstoffentwicklungsplan soll die Industrie in die Lage versetzen, im globalen Wettbewerb eine führende Rolle zu spielen. Bis 2023 sollen bis zu 5.000 H<sub>2</sub>-Fahrzeuge auf die Straße gebracht werden (derzeit 250 Fahrzeuge). Für die H<sub>2</sub>-Versorgung der Fahrzeuge ist die Errichtung von 100 Tankstellen vorgesehen, verglichen mit derzeit 20. Zielmarkt für die H<sub>2</sub>-Anwendung ist vorrangig der kommerzielle Sektor. Angestrebt wird der Einsatz von Wasserstoff in Taxis, Baumaschinen, Stadtbussen, Reisebussen, Lastwagen und Eisenbahnen.
  - Insbesondere **China** strebt eine schnelle Elektrifizierung des Verkehrssektors an. Bereits 2016 verfügt China über 500.000 Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybride [30]. Bis 2025 will die chinesische Regierung den Anteil an E-Fahrzeugen auf 7 Mio. steigern. Laut dem Vorstandsvorsitzenden von BYD, Wang Chuanfu, will China den Verkehr im Land bis 2030 vollständig elektrifizieren. Öffentliche Busse könnten bis 2020 vollständig elektrifiziert sein, Lkw und Sonderfahrzeuge bis 2025. Als problematisch könnten sich die derzeit fehlenden Batterien herausstellen. Experten erwarten hier bis 2020 einen Engpass.
  - Japan hat bei der Weltklimakonferenz 2015 in Paris verkündet, bis 2030 einen Marktanteil von 20 % bis 30 % für Elektroautos und Plug-in-Hybride anzustreben.
- Ein Schwerpunkt der japanischen Aktivitäten liegt bei der Einführung von Wasserstoffantrieben. Schon frühzeitig hat Japan Bestrebungen unterstützt, Wasserstoff als Energieträger zu fördern. Unter anderem will die Regierung von Tokyo, das Tokyo Metropolitan Government (TMG), mit einem Investitionsvolumen von 348 Mio. US\$ die Errichtung von Tankstellen und anderer H<sub>2</sub>-Infrastrukturelemente bis 2020, dem Jahr der olympischen Spiele, fördern [31].
- Aus Sicht des japanischen METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) bestehen bei den Käufern drei Vorbehalte gegen Elektroautos: der hohe Preis, die geringe Reichweite und die niedrige Zahl von Ladestationen. Hier setzt die staatliche Förderung an. Der hohe Preis wird durch den teilweisen bis vollständigen Verzicht auf Steuern für Elektroautos verringert. Durch Subventionen sinkt der Kaufpreis um durchschnittlich 5 %.
- Zur Steigerung der Reichweite werden die Autohersteller ermutigt, leistungsfähigere Batterien zu entwickeln. Der Staat unterstützt dies, indem die Subvention für den Kaufpreis mit der Reichweite steigt. Für jeden Kilometer Reichweite zahlt der Staat 1.000 Yen (7,40 Euro).
- In Bezug auf die Ladeinfrastruktur fördert die Regierung den Bau von Ladestationen mit über 55 Mrd. Yen (407 Mio. Euro). Die regionalen Präfekturen stellen ebenfalls Gelder dafür bereit. Ende März 2017 waren bereits rund 40.000 Ladestationen verfügbar [32]. Zusätzlich will die Stadtregierung der Hauptstadt Tokio ab diesem Jahr den Bau von Ladestationen für Apartmentblocks und Hochhäuser subventionieren.
- **USA:** Obwohl die Administration unter Präsident Donald Trump den Klimawandel bezweifelt und höhere CO<sub>2</sub>- und Stickoxidemissionen für US-Neuwagen zwischen 2022 und 2025 erlaubt [33], sprechen sich dutzende US-Städte für die Reduktion der Treibhausgasemissionen und für mehr Klimaschutz aus.
- Dreißig Städte, darunter auch New York City und Chicago wollen in den kommenden Jahren insgesamt 114.000 Elektrofahrzeuge im Wert von 10 Milliarden US-Dollar für den städtischen Einsatz anschaffen. Dazu zählen Polizeifahrzeuge, Straßenkehrmaschinen oder Müllwagen. Die Zahl der Bestellungen entspricht rund drei Viertel des gesamten Elektroautoabsatzes in den USA im vergangenen Jahr.
- Nach Aussagen des Umweltbeauftragten von Los Angeles werden die Städte weiterhin führend sein beim Umgang mit dem Klimawandel, unabhän-

gig von Entscheidungen der US-Regierung. Los Angeles begann bereits Ende 2015 im Verbund mit drei anderen Städten mit den Anfragen nach Elektroautos. Ursprünglich lautete die Anfrage auf 24.000 Elektroautos, seither haben sich 26 andere Städte angeschlossen.

Weitere Unterstützung erhält die Elektromobilität durch eine Kampagne von 16 Autoherstellern und 7 US-Bundesstaaten [34]. Sie investieren 1,5 Mio. US\$ für Anzeigen wie „Drive Change, Drive Electric“, mit denen die Vorzüge von Elektroautos herausgestellt werden. Zu den Autobauern gehören Daimler, BMW, Volkswagen, Toyota und General Motors, zu den Bundesstaaten zählen u.a. Connecticut, Massachusetts und New York. Trotz hoher Investitionen der Autobauer läuft der Absatz bisher aber eher zögerlich.

## Wertschöpfung

Deutschland ist in der Automobilindustrie mit extrem hoher Fertigungstiefe und kompletter Wertschöpfungskette vertreten. Diese Situation könnte sich beim Einsatz von BEV tiefgreifend ändern, da derzeit die Batteriefertigung vorrangig in den USA und in asiatischen Ländern etabliert ist.

Im Bereich der elektrotechnischen Komponenten hat auch Deutschland hervorragende Kompetenzen. Offen ist die Situation bei der Fertigung von Brennstoffzellen. Hier hat die Automobilindustrie lange auf kanadisches Know-how zurückgegriffen, dabei aber auch stets parallele Entwicklungen vorangetrieben. In Nordamerika und Japan haben sich Hersteller von Brennstoffzellenstapeln schon etablieren können, in Deutschland wird mit „Autostack Industrie“ ein Projekt zur Vorbereitung der Massenfertigung im Rahmen des NIP gefördert (Daimler, VW, Ford und andere Partner).

Brennstoffzellenelektrische Antriebe umfassen im Wesentlichen die Baugruppen elektrische Antriebe mit Elektromotor, Leistungselektronik, Pufferbatterie, Stromerzeugung mit dem Brennstoffzellenstapel, Peripheriekomponenten für Anodenversorgung (Wasserstoff), Kathodenversorgung (Luft), Kühlung und Stromeinspeisung in den Fahrzeugzwischenkreis sowie den Wasserstoffspeicher einschließlich Sicherheits- und Betankungsvorrichtungen.

Jede dieser Baugruppen umfasst wiederum eine größere Zahl von Bauteilen, für deren Herstellung zum Teil spezielle Materialien benötigt werden, sodass sich analog zur heutigen Antriebstechnik eine strukturierte Wertschöpfungskette aufbauen lässt. Dabei gibt es gerade im Bereich der Material- und Komponentenzulieferer schon eine Reihe aktiver Unternehmen

in Deutschland und Europa. Für Europa zeigt dies z. B. die vom „Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking“ recherchierte Übersicht zur Wertschöpfungskette von Brennstoffzellensystemen [35]. In der Erhebung gaben fast 50 Unternehmen an, im Bereich Brennstoffzellenfahrzeuge außer Brennstoffzellenbusse aktiv zu sein, davon ca. 15 als Fahrzeugintegrator. Im Bereich der Brennstoffzellenbusse gibt es mit insgesamt mehr als 80 aktiven Firmen sogar noch mehr Marktteilnehmer, wovon sich mehr als 30 als Fahrzeugintegratoren bezeichnen.

Der Brennstoffzellenbranchenführer Deutschland 2018 der Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellen im VDMA [36] listet insgesamt 57 aktive Unternehmen und Einrichtungen im Bereich der Brennstoffzellen unabhängig von der Anwendung. Diese haben gemäß den dort aufgeführten Ergebnissen einer Industriebefragung im Jahr 2017 einen Umsatz in Deutschland von 190 Mio. Euro erzielt.

Besonders stark sind Deutschland und Europa im Bereich der Komponenten und Materialien aufgestellt. So hat eines der führenden Unternehmen für Elektrokatalysatoren seinen Hauptsitz in Europa und zwei weitere bedeutende Hersteller sitzen in Deutschland. Ebenso sitzt ein weltweit führender Hersteller von Elektrolytmembranen in Europa. Europaweit gibt es weiterhin mehrere Hersteller von Membran-Elektrodeneinheiten, von denen ein führender Hersteller seinen Sitz in Deutschland hat. Gleiches gilt für Bipolarplatten und Dichtungstechnik. In den letzten Jahren haben sich in Europa darüber hinaus mehrere Zulieferer für Brennstoffzellenstapel für den automobilen Antrieb etabliert. Maßgeblich waren hier sicherlich die Autostack- und Auto-Stack-Core-Aktivitäten des „Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking“ (FCH-JU), die aktuell im Rahmen des von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanzierten Vorhabens „Autostack Industrie“ weitergeführt werden. Gleichfalls stark vertreten ist die Industrie im Bereich Tank- und Hochdrucktechnologie.

Insgesamt bieten brennstoffzellenelektrische Antriebe für Deutschland und Europa das Potenzial, einen hohen Anteil der Wertschöpfung darstellen zu können, mit entsprechenden Auswirkungen z. B. auf den Arbeitsmarkt. Derzeit sind keine Bauteile oder Komponenten bekannt, für die bereits eine marktdominierende Stellung nicht europäischer Firmen etabliert wäre. Allerdings ist die Produktionskapazität weltweit auch noch sehr beschränkt, da es im Gegensatz zur Batterie, wo Zellen z. B. auch im großen Umfang für den IKT- und Verbrauchermarkt produziert werden, für die meisten Brennstoffzellenkomponenten keine alternativen Absatzmärkte gibt.

## 4.2 Tanken und Reichweite

### Kernaussagen

- Wasserstoff erlaubt schnelles Tanken bei weltweit einheitlichen Tanksystemen.
- Die Wasserstoffvollbetankung von FCEV ist mit 3 min bis 5 min vergleichbar mit der heutigen Fahrzeugbetankung. Auch bei Einsatz von Schnellladestationen dauert das Nachladen von BEV ca. 20 min bei einer Begrenzung der Ladung auf 80 % der Batteriekapazität (SOC).
- FCEV verfügen nach aktuellem Entwicklungsstand gegenüber BEV über eine größere Reichweite bei gleichzeitig größerer Nutzlast und ermöglichen das Heizen im Winter ohne signifikante Reichweitenreduzierung.
- Batteriefahrzeuge nutzen derzeit die eingesetzte Primärenergie um etwa den Faktor 2 effizienter als Brennstoffzellenfahrzeuge. Die Speicherwirkung von Wasserstoff und der damit möglicherweise deutlich geringeren Abregelung von Stromquellen aus erneuerbaren Energien wird dabei nicht berücksichtigt.

Den grundsätzlichen Aufbau von Batterie- (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) beschreibt Bild 3. Wie aus der Darstellung hervorgeht, besitzen auch Brennstoffzellenfahrzeuge Batterien, wenn auch mit deutlich kleinerer Kapazität. Sie ermöglichen u.a. eine Rückgewinnung der Bremsenergie [37].

Für eine Entscheidung zu Gunsten eines der beiden Systeme sind neben den Anschaffungskosten Ladeprozess, Reichweite, Effizienz der gesamten Ener-

giekette, Haltbarkeit sowie Betriebsfähigkeit in extremen Bedingungen (Frost, Hitze) relevant. Für eine Gesamtbetrachtung sind zusätzlich der Aufwand für die benötigte Infrastruktur und eine Lebenszyklusbetrachtung von Bedeutung.

### Wasserstoffbetankung im Vergleich zur Batterieladeinfrastruktur besser mit heutigen Tankgewohnheiten vereinbar

In Bezug auf den Tank- bzw. Ladeprozess weisen FCEV und BEV deutliche Unterschiede auf:

- Der Tankvorgang von FCEV-Pkw ist innerhalb von 3 min bis 5 min abgeschlossen, bei Nutzfahrzeugen sind ca. 10 min zu veranschlagen. Gegenüber dem gewohnten Tankprozess ergeben sich damit nur minimale Unterschiede (Bild 4) [38].
- Im Vergleich zur H<sub>2</sub>-Betankung werden bei BEV selbst beim Schnellladen an Batterieladeeinrichtungen 3-mal bis 5-mal längere Ladezeiten erwartet. Je Ladestandort ist deshalb eine größere Zahl an Stellplätzen mit Ladeeinrichtungen vorzusehen, um die gleiche Betankungskapazität zu erreichen. Zusätzlich kann aufgrund des in diesem Fall nicht steuerbaren Ladens und der hohen notwendigen Anschlussleistungen ein Netzausbau erforderlich sein.
- Beim Übernachten ist bei einem gesteuerten Laden von einer Reduzierung des Ausbaubedarfs an Netzkapazität auszugehen. Die Integration ist in diesem Falle in hohem Maße von reservierbaren Stellplätzen für Batteriefahrzeuge abhängig, da diese mit unterschiedlich hohem Aufwand an Lademöglichkeiten ausgestattet werden müssen.

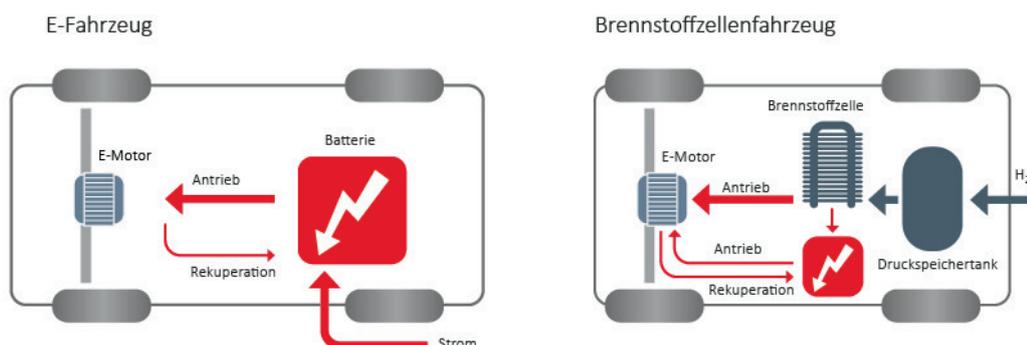


Bild 3. Prinzip von BEV (links) und FCEV (rechts) (Quelle: Forschungszentrum Jülich)

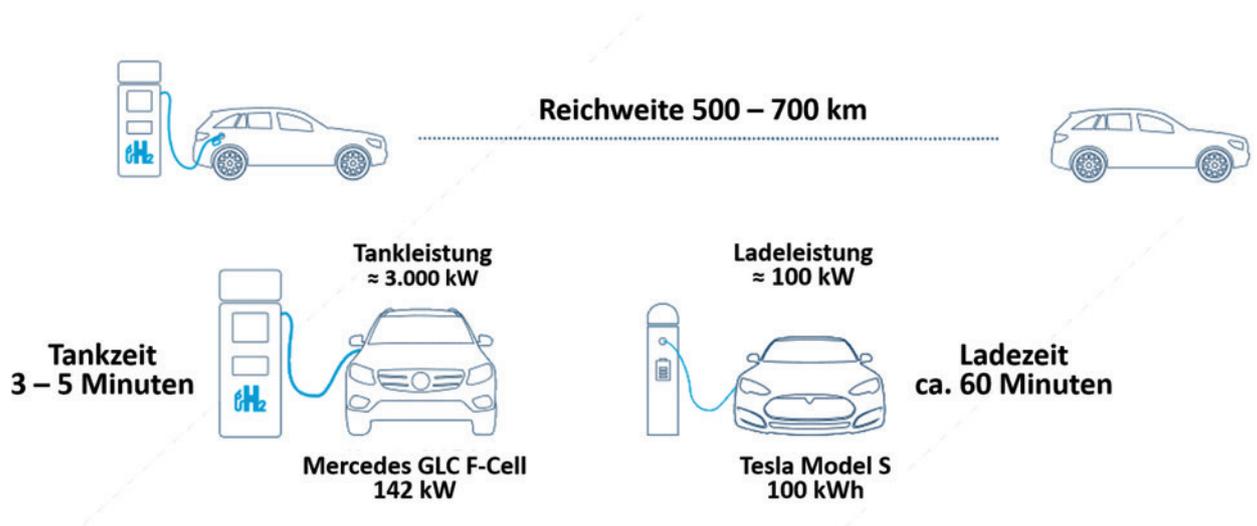


Bild 4. H<sub>2</sub>-Betankung und Laden von Elektrofahrzeugen (Quelle: H2Mobility)



Bild 5. H<sub>2</sub>-Betankung (Quelle: H2Mobility)

### FCEV

Das Tankverhalten von FCEV entspricht dem konventioneller Fahrzeuge. Der Tankprozess erfolgt mithilfe spezieller Zapfvorrichtungen, vergleichbar mit Benzin- oder Diesel-Tanksystemen (Bild 5) [39].

Die Tankstellenkonzeptionen für FCEV gehen von einer Bevorratung des Wasserstoffs bei Drücken von 900 bar bis zu 1000 bar aus; für die Fahrzeuge selbst ist ein Speicherdruck von ca. 700 bar vorgesehen. Die erforderlichen Füllrichtungen (Dispenser, Bild 5) haben im Rahmen größerer Demonstrationsvorhaben ihre Alltagstauglichkeit bewiesen, u.a. beim HyFLEET:CUTE Projekt der Europäischen Kommission [40] und im Rahmen der Clean Energy Partnership (CEP) [41]. Zu berücksichtigen ist, dass bei der Betankung ein kleinerer Teil des Gases (Gasaufkommen im Tankrohr) nach Abschluss des Tankvor-

gangs abgelassen wird. Dieser Verlust hängt von der jeweiligen Bauart des Dispensers ab und beträgt typischerweise 7 g bis 10 g, das heißt rund 0,3 kWh (0,07 %).

Die H<sub>2</sub>-Speicherung an Bord der Fahrzeuge erfolgt in der Regel gasförmig (CH<sub>2</sub>), bei Pkw bei einem Druck von 700 bar, bei Zügen, Lkw, Bussen und Gabelstaplern hauptsächlich bei 350 bar. Für Schiffe, Flugzeuge, Züge oder auch Lkws scheint alternativ auch eine Wasserstoffspeicherung in flüssiger Form (LH<sub>2</sub>) möglich, was der Reichweite zu Gute käme (Bild 6) [42].

### BEV

Im Gegensatz zu FCEV ist bei BEV von einer deutlich längeren Ladezeit auszugehen. Diese ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur, der im Fahrzeug verbauten Batteriekapazität und dem

Ladeumrichter im Fahrzeug bei AC-Ladung bzw. DC-Schnellladung. Das vollständige Laden dauert, je nach Ladeleistung, zwischen 20 min (DC-Schnellladung bis 80 % Batteriekapazität) und mehreren Stunden.

Die Ladung von BEV erfolgt entweder mit AC- oder DC - Ladestationen. Bei AC-Ladestationen sind die Ladegeräte in den Fahrzeugen verbaut, wobei bei 1-phasigen Systemen die Ladeleistung max. 3,7 kW beträgt, bei 3-phasigen Systemen bis zu 22 kW. Als Ladeeinrichtungen kommen entweder einfache Ladestationen wie Wallboxen oder Ladesäulen infrage. Die Ladezeiten variieren hierbei abhängig von der Ladeleistung und dem Aufladungsgrad sowie der Batteriekapazität.

Bei Hausanschlüssen und Ladeleistungen von bis zu 11 kW ist selbst bei relativ kleinen Batteriekapazitäten (z. B. Nissan Leaf mit 30 kWh-Akku) von etlichen Stunden Ladezeit für eine Vollladung auszugehen. Wie Bild 7 für das Tesla Modell S zeigt, ist bei einer 85-kWh-Batterie bei Einsatz von Wallboxen und Ladesäulen und kleinen Ladeleistungen (2,3 kW bis 3,7 kW) für eine Vollladung von einer Ladezeit von 37 h bis 23 h auszugehen. Bei größeren Ladeleistungen (11 kW bis 22 kW) liegt sie immer noch bei 8 h bis 4,5 h. Im Vergleich hierzu liegt die H<sub>2</sub>-Tankzeit bei Pkw zwischen 3 min und 5 min. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang, dass Pkw in Deutschland im Schnitt 95 % ihrer Zeit stehen und dort, wo sie stehen, oftmals ein Netzanschluss zur Verfügung steht.

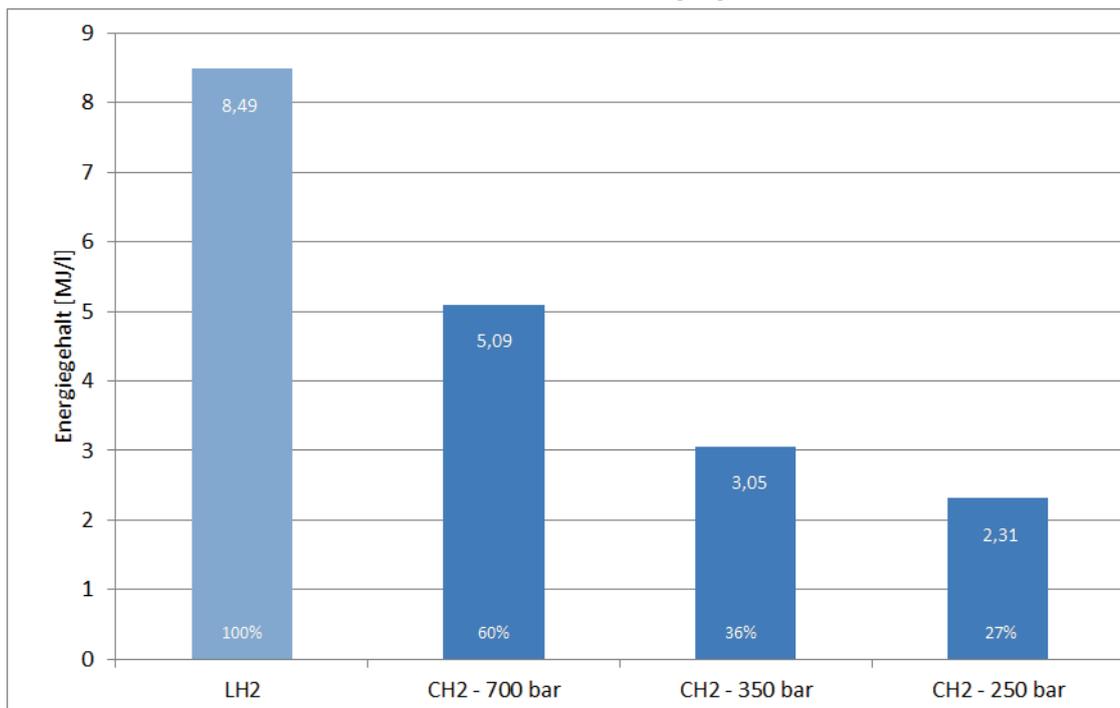


Bild 6. Energiegehalt (MJ/l) von flüssigem und gasförmigem Wasserstoff bei unterschiedlichen Drücken (Quelle: ZBT GmbH)

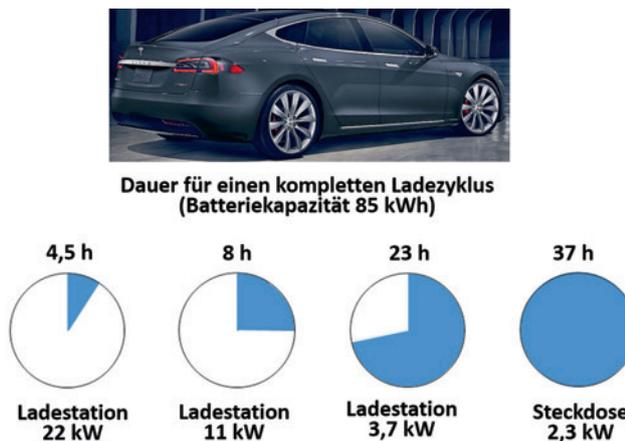


Bild 7. Dauer eines kompletten Ladezyklus' (Batteriekapazität 85 kWh) für Tesla Modell S (Quelle: Inecs GmbH in Anlehnung an [44])

Größe und Gewicht sprechen gegen Onboard-Ladeleistungen größer 22 kW. Daher kommen zunehmend öffentliche DC-Schnellladestationen zum Einsatz. Sie stehen z. B. an Autobahntankstellen und verfügen über verschiedene Anschlussmöglichkeiten (Triple-Charger), sodass sowohl AC-Ladung und DC-Schnellladung gleichermaßen möglich sind (Bild 8) [45].



Bild 8. Ladestation Typ 2 (AC) - CHAdeMO (DC) - Combo-2 (DC) (Quelle: DEW21)

Bei hohem Reichweitenbedarf sprechen die langen Ladezeiten für die Errichtung von DC-Schnellladeeinrichtungen, mit denen sich die Ladezeiten drastisch reduzieren lassen. Das weltweite Aufkommen an Ladeinrichtungen spiegelt dies wider. 2016 gab es weltweit über 200.000 öffentliche Standardladestationen und über 100.000 Schnellladeeinrichtungen, da-

von knapp 17.000 bzw. 1.500 in Deutschland [15]. Zu berücksichtigen ist, dass höhere Entlade- und Laderaten sowie höhere Entladetiefen tendenziell zu erhöhten Degradationsraten der Batterien führen, die wiederum eine Vergrößerung der Batteriekapazität nach sich ziehen kann [46].

Die Ladeleistung von DC-Schnellladestationen beträgt derzeit 50 kW oder auch mehr, in Zukunft sollen bis zu 350 kW verfügbar sein. Das entspricht einem Ladestrom von 350 A bei einer Ladespannung von 1000 V. Die hohen Ladeströme führen zu einer höheren Erwärmung des Ladekabels. Eine Möglichkeit zur Reduzierung des daraus resultierenden Wirkungsgradverlusts besteht in der Kühlung des Ladekabels. Nicht zu vernachlässigen ist die Handhabbarkeit des Ladekabels aufgrund des für die hohen Ströme erforderlichen hohen Leiterquerschnitts.

Bei Ladezeiten von ca. 20 min und 350 kW Ladeleistung wären damit Reichweiten von mindestens 300 km möglich. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die maximal mögliche Ladeleistung vom aktuellen Ladezustand (SOC, engl. state of charge), von der Alterung (state of health), der Zelltemperatur und weiteren Faktoren der Batterie und des Fahrzeugs abhängt. So wird die Ladeleistung oberhalb von 80 % SOC gedrosselt, um die Batterie zu schonen.

Tabelle 2 beschreibt für verschiedene Elektrofahrzeuge die AC- und DC-Ladeleistungen und Ladeverfahren [47]. Zu berücksichtigen ist, dass die hier angegebenen Ladeleistungen, abhängig vom Ladezustand der Batterien und Netzanschluss, nicht immer erreicht werden. Weiterhin ist zu beachten, dass die Angaben zu 1-phasigen Ladeleistungen von 6,6 kW und mehr nur für den amerikanischen und asiatischen Markt gültig sind.

Tabelle 2. Batteriekapazitäten sowie AC- und DC-Ladeleistungen und Ladeverfahren verschiedener Batteriefahrzeuge (BEV) [47]

Fahrzeug/Hersteller	Reichweite (NEFZ <sup>a)</sup> /WLTP <sup>a)</sup>	Kapazität in kWh	Verbrauch in kWh	AC-Laden in kW	AC (Phasen)	DC-Laden in kW
Tesla Model S 100D <sup>d)</sup>	632	100	n.A.	11 (16,5 <sup>c)</sup> )	3	120
Tesla Model X 100D <sup>d)</sup>	565	100	n.A.	11 (16,5 <sup>c)</sup> )	3	120
Opel Ampera-e	520	60	n.A.	7,2	1	50
Renault Zoe Z.E. 40 <sup>d)</sup>	400	41	n.A.	22 (4,3 <sup>c)</sup> )	3	-
VW e-Golf	300	35,8	12,7	3,6 (7,2)	1 (2)	40
BMW i3 (94 Ah)	290	33	13,6	3,6 (11 <sup>c)</sup> )	1 (3)	50
BMW i3s (94 Ah)	280	33	14,3	3,6 (11 <sup>c)</sup> )	1 (3)	50
Hyundai Ioniq	280	28	11,5	6,6	1	70
Renault Kangoo <sup>b)</sup>	270	33	n.A.	7	1	-

Tabelle 2. Batteriekapazitäten sowie AC- und DC-Ladeleistungen und Ladeverfahren verschiedener Batteriefahrzeuge (BEV) [47] (Fortsetzung)

Fahrzeug/Hersteller	Reichweite (NEFZ <sup>a)</sup> /WLTP <sup>a)</sup> )	Kapazität in kWh	Verbrauch in kWh	AC-Laden in kW	AC (Phasen)	DC-Laden in kW
Nissan Leaf	285 (WLTP)	40	19,4	6,6	1	50
Ford Focus	225	33	16,4	6,6	1	50
Kia Soul EV	250	30	14,3	6,6	1	70
Mercedes B250 e	200	28	16,6	11	3	-
Citroen Berlingo L1 <sup>b)</sup>	170	22,5	17,7	3,6	1	50
Nissan e-NV200 Evalia	280	40	16,5	6,6	1	50
Peugeot Partner Tepee	170	22,5	n.A.	n.A.	1	50
Peugeot Partner L1 <sup>b)</sup>	170	22,5	17,7	3,6	1	50
Nissan e-NV200 <sup>b)</sup>	280	40	16,5	6,6	1	50
smart ed fortwo	160	17,6	12,9	4,6 (22 <sup>c)</sup> )	1 (3)	-
VW e-up!	160	18,7	11,7	3,6	1	40
Mitsubishi EV	160	16	13,5	3,6	1	50
smart ed forfour	155	17,5	13,1	4,6 (22 <sup>c)</sup> )	1 (3)	-
Citroen C-Zero	150	14,5	12,6	3,6	1	50
Peugeot iOn	150	14,5	12,6	3,6	1	50
Renault Twizy	100	6,1	n.A.	2	1	-
Citroen Berlingo Multispace	170	22,5	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
e.GO Life 60 <sup>d)</sup>	194	23,9	11,1	3,6	1	-
smart ed fortwo cabrio	155	17,6	13,1	4,6 (22 <sup>c)</sup> )	1 (3)	-
Citroen E-Mehari	195	30	n.A.	n.A.	1	-
Jaguar I-Pace	480 (WLTP)	90	21,2	7	1	100
Hyundai Kona Bektro <sup>d)</sup>	482 (WLTP)	64	14,3	7,2	1	-

<sup>a)</sup> NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus; WLTP: Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure

<sup>b)</sup> Transporter/Gewerbefahrzeuge (bisher Ausnahme) – Kangoo und Partner mit größerem Ladevolumen verfügbar im Konfigurator

<sup>c)</sup> optional/aufpreispflichtig, Renault in DE nicht verfügbar

<sup>d)</sup> größere Batterie ausgewählt

n.A. nicht angegeben

Neben kabelgebundenen Ladeeinrichtungen wird die Entwicklung induktiver Ladeeinrichtungen in Erwägung gezogen. Zwei Spulen – je eine in der Parkfläche und im Fahrzeugboden – werden hierzu benötigt, wobei eine exakte Positionierung der Fahrzeuge über der Primärspule in der Parkfläche für eine effiziente Übertragung erforderlich ist. Ziel ist, bei der Energieübertragung einen Wirkungsgrad von > 95 % zu erreichen. Zukünftig könnte auch eine Ladung während der Fahrt, z. B. über eine gesonderte Spur auf der Straße, möglich sein [49]. Dies setzt jedoch erhebliche Investitionen in den Ausbau der Straßen voraus.

## Weltweit einheitliche Steckverbindung

Eine breite Nutzerakzeptanz der Elektromobilität setzt einheitliche Standards voraus. Dies ist zumindest für die reine batterieelektrische Mobilität derzeit noch nicht in allen Bereichen gegeben.

### FCEV

Für die H<sub>2</sub>-Betankung besteht weltweit ein einheitlicher Standard. Auf Basis der Druckstufen von 350 bar und 700 bar sind für die Betankung der FCEVs welt-

weit gleiche Tanksysteme verfügbar. Landesspezifische Anpassungen in Bezug auf die Ausführung der Tank- und Zapfstellen sind nicht erforderlich.

**BEV**

In Bezug auf BEV sind die Ladeanschlüsse bisher nicht einheitlich. Unterschiede im BEV- und PHEV-Segment bestehen sowohl im Bereich der Ausgangs- bzw. Ladeleistung als auch des elektrischen Anschlusses (Steckertyp). Von der EU wurde im Rahmen einer Richtlinie das Combined Charging System (CCS) als Standard verbindlich festgelegt (in Deutschland in der Ladesäulenverordnung festgeschrieben). Daneben gibt es noch den CHAdeMO-Standard, insbesondere japanische und französische Fahrzeuge sind mit diesem System ausgerüstet. Der Nachteil ist, dass diese Systeme untereinander nicht kompatibel sind. Daher werden die öffentlichen Ladestationen heute mit mehreren Stecksystemen ausgerüstet (Bild 9).

Allein für AC-Ladestationen gibt es drei unterschiedliche Steckertypen. Die zulässige Ladeleistung variiert

vom AC-Hausanschluss (230 V oder Drehstrom) zum DC-Schnelllader. Weiterhin unterscheiden sich die Typen nach den Absatzmärkten sowie in Bezug auf die Hersteller (Bild 9).

**FCEV verfügen über größere Reichweiten bei gleichzeitig größerer Nutzlast**

Der Kraftstoffverbrauch bei Elektrofahrzeugen wird analog zum Verbrennungsmotor in der Regel pro 100 km Fahrstrecke angegeben. Diese Kennzahl wird auch in dieser Studie für die FCEVs und BEVs verwendet.

**FCEV**

Kennzeichnend für FCEV ist der Umstand, dass Leistung und Energiespeicherung entkoppelt sind. Mit der Größe des Tanks nimmt die Reichweite zu. FCEV sind entsprechend in Bezug auf die Reichweite vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen. Mit normalen 700 bar H<sub>2</sub>-Tanks lassen sich Distanzen von 800 km überbrücken [50].



Bild 9. Überblick über die verschiedenen BEV - Steckertypen und zugehörigen Standards (Quelle: PHOENIX CONTACT)

<sup>1)</sup> Der Typ-1-Standard für Nordamerika sieht keinen infrastrukturseitigen Ladestecker vor. In Europa wird für diesen Fall ein Adapterkabel eingesetzt, das fahrzeugseitig aus einem Typ-1-Ladestecker und infrastrukturseitig aus einem Typ-2-Ladestecker besteht.

## BEV

Die Reichweite von BEVs ist von der Kapazität der Batterie abhängig: Je größer die Kapazität der Batterie ist, desto größer ist die Reichweite in km [51]. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im Unterschied zu FCEVs bei BEVs die in der Batterie gespeicherte Energie mit der Leistung korreliert.

### Typische Reichweite

FCEV und BEV haben ihre technische Alltagstauglichkeit vielfach bewiesen. Das Fahrverhalten ist mit dem konventioneller Automatikfahrzeuge vergleichbar. Die Kaltstartfähigkeit ist bei allen ZEV kein Problem. Für FCEV gehen die Hersteller davon aus, dass eine Außentemperatur von mindestens  $-20\text{ °C}$  kein Problem darstellt. Für die Fahrzeuge von Toyota und Hyundai werden sogar  $-28\text{ °C}$  genannt.

Im Rahmen des Schaufensters Elektromobilität der Bundesregierung wurden diverse Fahrzeuge verglichen. Hierbei zeigte sich, dass Fahrzeuge der Oberklasse mit einer Batteriekapazität von 85 kWh Distanzen von 390 km überbrücken können. Bei Kleinwagen mit überwiegender Nutzung im Stadtverkehr werden deutlich kleinere Batteriekapazitäten verbaut. Die erreichbare Distanz liegt dann üblicherweise bei etwa 100 km.

Insbesondere bei Fernstrecken bieten wasserstoffversorgte Systeme Reichweitevorteile, da andernfalls sehr große und schwere Batterien erforderlich wären. Vergleichbares gilt auch für die Fähigkeit, Nutzlast zu transportieren. Weiterhin verlieren FCEV bei größeren und schwereren Fahrzeugen mit einem höheren Energieverbrauch weniger Nutzlastkapazität als die

BEV. Ab einem bestimmten Energiebedarf sind auch die Gesamtkosten für Energiespeicher und -wandler bei FCEV niedriger. Grund hierfür ist, dass sowohl Gewicht als auch Kosten des Wasserstofftanksystems mit steigendem Energieinhalt nicht so steil ansteigen wie Gewicht und Kosten der Batterien [52].

Als Herausforderung in Bezug auf BEV und FCEV ist bei den Speichersystemen die Zunahme der gravimetrischen Energiedichte (speicherbare Energiemenge bezogen auf das Tankgewicht in %) zu werten. Bezogen auf einen typischen 700-bar-Tank für 4 kg  $\text{H}_2$  bis 5 kg  $\text{H}_2$  liegt heute die gravimetrische Energiedichte bei 7 % [53], entsprechend einem Tankgewicht von 57 kg bis 72 kg. Zum Vergleich hierzu liegen für die in Pkws üblichen Lithium-Ionen-Batteriesysteme die volumetrischen und gravimetrischen Energiedichten bei ca. 100 Wh/l bis 250 Wh/l bzw. 60 Wh/kg bis 140 Wh/kg [52]. Bild 10 unterstreicht den Unterschied zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren [54]. Trotz Effizienzvorteilen der Brennstoffzelle und insbesondere der Batterie gegenüber herkömmlichen Verbrennern ist bei gleicher Reichweite für das komplette Energiespeichersystem (Batterie oder  $\text{H}_2$ -Tank) von einem höheren Gewicht auszugehen. Dies gilt insbesondere für Batteriesysteme.

Ein direkter Vergleich der reinen Verbrauchskennzahlen von BEV und FCEV erscheint schwierig, da die am Markt verfügbaren Batterie-Fahrzeugmodelle wie das meistverkaufte BEV, der Nissan Leaf, tendenziell eher dem klein- bis mittelgroßen Fahrzeugbereich zuzuordnen sind, die Brennstoffzellen-Fahrzeugmodelle dagegen eher dem (mittel-)großen bis SUV-Bereich. Ferner sind die Umwandlungsverluste – insbesondere bei der Wasserstoffherstellung – zu berücksichtigen, um die gesamte Effizienzketten abzubilden.

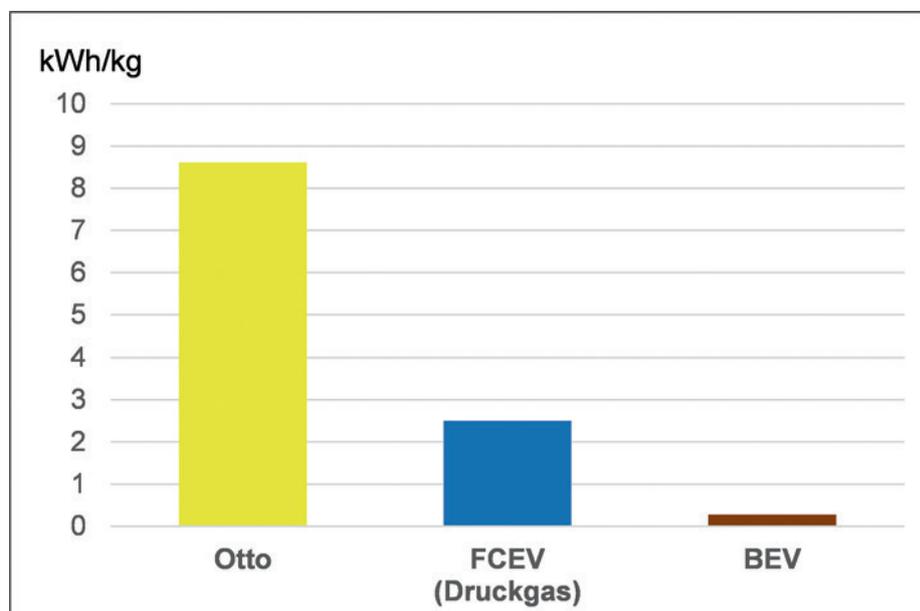


Bild 10. Gravimetrische Energiedichte von verschiedenen Tanksystemen (Quelle: Shell)

Tabelle 3. Vergleich typischer Kennzahlen repräsentativer FCEV und BEV [55] (Quelle: Universität Hannover)

	Größenklasse	Motor in kW	Tank-volumen	Leergewicht in kg	Reichweite in km nach EPA	Verbrauch PKW in kWh/100km	Verbrauch in kWh/100km bezogen auf das Stromnetz
Toyota Mirai	mittel	113	H <sub>2</sub> : 165 kWh <sub>H<sub>2</sub></sub> Batt.: 1,6 kWh <sub>el</sub>	1850	502	33,33 kWh <sub>H<sub>2</sub></sub>	56-67
Tesla Model S	groß	235	Batt.: 75 kWh <sub>el</sub>	2108	401	21,12 kWh <sub>el</sub>	24-27
Nissan Leaf	mittel	80	Batt.: 30 kWh <sub>el</sub>	1573	172	16,77 kWh <sub>el</sub>	19-22

Tabelle 3 vergleicht drei typische ZEVs, wobei der Berechnung der Verbrauchswerte die Effizienzwerte aus Bild 12 zugrunde liegen. Von den Produkteigenschaften, allen voran Reichweite und Komfort, sind am ehesten der Toyota Mirai und der Tesla Model S (75 kWh) vergleichbar, obwohl der Mirai wie alle anderen FCEVs bisher nur im Kleinserienmaßstab gefertigt wird. Die Verbrauchswerte machen deutlich, dass die Belastungen auf Stromerzeugerseite für die FCEVs inklusive Wasserstoffherstellung mit 56 kWh bis 67 kWh pro 100 km (EPA-Fahrzyklus) in etwa 2,3-mal so hoch sind wie für die reinen Batteriefahrzeuge. Eine Nutzung von Elektrolyseur- und Brennstoffzellenabwärme würde sich positiv auf die Bilanz der Wasserstoffoption auswirken und einen Teil des Effizienzvorteils der Batterie kompensieren.

### Reichweite von FCEV weitgehend unabhängig von Umweltbedingungen und nahezu konstant über die Lebensdauer des Fahrzeugs

Als positiver Faktor von FCEV ist der geringere Einfluss von Umweltbedingungen auf die Reichweite zu werten. Hohe oder niedrige Temperaturen haben nur geringe Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Brennstoffzelle. Niedrige Temperaturen bedingen lediglich längere Aufheizzeiten bis zur optimalen Betriebstemperatur und gegebenenfalls einen höheren Verbrauch der Nebenaggregate. Ein Fahrzeug der Energieagentur NRW (Daimler B-Klasse F-Cell) z. B. hat tendenziell im Winter einen Mehrverbrauch von 10 %, im Sommer –10 % relativ zum Mittelwert von 1,09 kg H<sub>2</sub>/100 km bei 85.000 gefahrenen km.

Im Unterschied hierzu reagieren Lithium-Ionen-Batterien auf niedrige und höhere Temperaturen (< 10 °C und > 40 °C) sensibel, sodass einerseits die nutzbare Kapazität sinkt und andererseits von einem beschleunigten Alterungsverhalten auszugehen ist.

Für die praktische Eignung eines Systems sind weiterhin Aussagen zur Lebensdauer von Interesse. Da bei Batterien und Brennstoffzellen elektrochemische Prozesse zum Tragen kommen, stellt sich in beiden Fällen eine Alterung (Degradation) ein.

### FCEV

Bei Brennstoffzellen kommt es abhängig von der Betriebszeit u.a. als Folge von Verunreinigungen der Katalysatorschichten der MEA (Membrane Electrode Assembly) zu einem Abfall der Effizienz, das heißt zu einer Degradation. Mit neuen Luftfiltertechnologien und intelligenten Betriebsstrategien soll dieser Effekt weiter reduziert werden. Aus heutiger Sicht ist von mindestens 4.000 Betriebsstunden für marktgängige Systeme auszugehen. Entwicklungsziel ist eine mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Lebensdauer von etwa 7.000 Betriebsstunden. Im realen Fahrbetrieb konnten Brennstoffzellen-Busse bereits DOE-Ziele von 20.000 Fahrstunden [9] bzw. 25.000 Fahrstunden [10] erreichen.

Die Leistung der Brennstoffzelle degradiert im Fahrzeugbetrieb mit steigender Betriebszeit. Dadurch verschlechtert sich der Verbrauch zum Ende der Lebensdauer. Eine aussagekräftige Datenbasis für eine quantitative Aussage zu dieser Verbrauchserhöhung ist aufgrund der geringen Flottengrößen (noch) nicht vorhanden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

### BEV

Die Reichweite der BEV ist eine Funktion der Lebensdauer der Batterie. Da es elektrochemisch bedingt zu einer Alterung der Batterie über die Laufzeit kommt, wird hierdurch die Batteriekapazität negativ beeinflusst. Die Reichweite nimmt entsprechend ab.

Batterien weisen ein komplexes Alterungsverhalten auf. Bei hohen und niedrigen Temperaturen, hohen

Ladezuständen sowie Lade- und Entladeraten ist von einer beschleunigten Alterung und damit von einer geringeren Lebensdauer auszugehen. Vermeiden lässt sich dies zum Teil durch Kühleinrichtungen an Bord, wie sie z. B. bei Tesla zum Einsatz kommen. Zum Erhalt der Batterieeigenschaften ist deshalb ein Batterie-Thermomanagement an Bord des BEV unerlässlich. Weiterhin werden zur Optimierung des Betriebsverhaltens intelligente Batteriemanagementsysteme für die unterschiedlichen Batterietypen entwickelt.

Belastbare Aussagen zum Alterungsverhalten von Batterien sind nur von wenigen Herstellern verfügbar. Nach Aussagen des japanischen Herstellers Nissan soll der Akku des Elektroautos in den ersten fünf Jahren oder über die ersten 100.000 Kilometer mindestens 70 % seiner Ursprungskapazität behalten. Fällt der Wert unter diese Grenze, ist die Batterie zu ersetzen oder zu überholen [56]. Für manche Nutzer wird vermutlich auch eine entsprechend reduzierte Reichweite für den täglichen Mobilitätsbedarf ausreichen.

Betriebserfahrungen sprechen dafür, dass der Ladeprozess großen Einfluss auf das Betriebsverhalten der Batterien hat. Insbesondere wirkt sich häufiges Aufladen der Batterie bei tiefen Temperaturen negativ auf die Lebensdauer von Li-Batterien aus. Auch eine Kompletentladung und anschließende Vollladung der Batterie (Durchführung von Volllastzyklen) hat einen negativen Einfluss auf das Alterungsverhalten. Vorteilhaft für die Lebensdauer ist stattdessen ein Betrieb der Batterie im mittleren Ladezustandsbereich, was praktisch gesehen eine stark verringerte Reichweite bedeuten würde [57].

### Heizen im Winter und Kühlen im Sommer bei FCEV ohne Batterieunterstützung möglich

Die Beheizung und Kühlung von Elektrofahrzeugen erfordert im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen besondere Maßnahmen:

- BEV beziehen die zum Heizen benötigte Energie aus der Batterie, was die Reichweite beeinträchtigt. Im Winter wird wegen der elektrisch versorgten Fahrzeugheizung ein Mehrverbrauch von 30 % beobachtet [58]. Inwieweit sich dies mit innovativen Lösungen – z. B. bessere Scheiben, Wärmeisolierung, effizientere Heizsysteme, Wärmepumpen [59] – kompensieren lässt, ist derzeit noch in der Diskussion.
- Bei FCEV reicht die verfügbare Abwärme der Brennstoffzelle für die Beheizung des Fahrzeugs im Normalbetrieb aus. Bei Bedarf kommt ergänzend ein Heizsystem zum Einsatz.

- In Bezug auf die Kühlung erfolgt bei FCEV und BEV der Antrieb des Klimaaggregats elektrisch. FCEV beziehen hierzu die Energie zum Antrieb der Kälteanlage über die Brennstoffzelle aus dem Wasserstofftank. Eine Einschränkung der Fahrmöglichkeiten, wenn bemerkbar, ist mit der heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor vergleichbar. BEV beziehen demgegenüber die Energie zum Antrieb der Kälteanlage aus der Batterie, sodass auch hier die Reichweite tangiert ist.

### Effizienz von BEV größer als die von FCEV

Der grundsätzliche Aufbau von FCEV und BEV wurde bereits zu Beginn von Abschnitt 4.2 angesprochen. Da FCEVs wie BEVs über Batterien verfügen, ist auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen eine Rückgewinnung der Bremsenergie möglich.

In Bezug auf die Ladeverluste bei BEV gilt, dass sie u. a. von den Onboard-Ladegeräten oder den DC-Schnellladestationen sowie der Batterietemperatur abhängig sind.

Laut Siemens ist bei einer DC-Schnellladestation von einem Wirkungsgrad von > 94 % bei einer Bemessungsleistung von 417 V/120 A auszugehen [62]. ABB gibt ebenfalls einen Wirkungsgrad von 94 % bei Nennausgangsleistung an [63]. Allerdings sind bei diesen Angaben nicht die Ladeverluste in Abhängigkeit von der momentanen Ladeleistung und der Batterietemperatur berücksichtigt. Bei Onboard-Ladegeräten kann ebenfalls von einem Wirkungsgrad von ca. 94 % bei Nennleistung ausgegangen werden.

Zusätzlich sind bei DC-Schnellladestationen noch die Stand-by-Verluste zu berücksichtigen. Wie von PricewaterhouseCoopers [60] dargestellt, sind die Ladeverluste mit durchschnittlich 20 % des Energieeinsatzes zu veranschlagen, nach dem Wuppertal-Institut [61] mit 10 % bis über 30 %.

Bild 11 zeigt die Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Ladeleistung eines Onboard-Ladegeräts mit einer Nennleistung von 22 kW [64]. Inwieweit bei DC-Schnellladestationen von einem ähnlichen Verlauf ausgegangen werden kann, muss weiteren Erfahrungen vorbehalten bleiben. Bei sehr hohen Ladeleistungen muss ggf. die Batterie gekühlt werden, was sich negativ auf die Gesamtenergiebilanz auswirkt.

Für einen Effizienzvergleich von FCEV und BEV finden die in Bild 12 dargestellten schematischen Prozessabläufe Verwendung. Sie beschreiben die komplette Prozesskette von der elektrisch bereitgestellten Energie (hier aus erneuerbaren Quellen) bis zum Pkw-Endverbrauch für typische BEV- und

FCEV-Pkws. Bei der Bewertung der Effizienzketten ist zu berücksichtigen, dass zusätzliche Einflussgrößen wie Energiespeicher, Sektorenkopplung etc. (Abschnitt 4.3 und Abschnitt 4.4) hier keine Berücksichtigung finden. Diese können die Effizienz des FCEV-Systems verbessern.

Die in der Darstellung unterstellten Werte basieren auf [65] und eigenen Annahmen/Erfahrungen. Zudem sind die jeweiligen Spannungsbereiche einiger relevanter Prozesse zur besseren Veranschaulichung hinzugefügt, die sich aus verschiedenen Technologien, Anwendungen, Rahmenbedingungen (z. B. Außentemperatur) sowie Annahmen und Quellen ergeben. Auf BEV-Seite gibt es vor allem relativ große Spannbreiten zwischen tendenziell effizienteren Langsam- zu Schnellladestationen. Auf Wasserstoffseite gilt dies für die Bereiche Elektrolyse sowie Komprimierung und Transport.

Für Batterien sprechen die höhere Effizienz und der einfachere Aufbau der Systeme. Elektrische Energie wird über Ladestationen direkt in die Batterien geladen und bei Bedarf zum Fahren abgerufen. Die Gesamteffizienz des Fahrzeugs (ohne Berücksichtigung der Stromerzeugung und vorgelagerten Netze) wird damit nur von den Verlusten in der Batterie beim

Laden und Entladen dominiert sowie von den Verlusten des jeweils eingesetzten Stromrichters. Die o.g. Netzverluste (Transmission) lassen sich bei Nutzung von lokal erzeugtem EE-Strom (PV oder Wind) noch deutlich reduzieren.

In Bild 12 werden typische Werte für die Verluste beim Stromtransport, der Energieumwandlung und der Antriebstechnik berücksichtigt. Genauer und individueller sind fahrzeugspezifische Verbräuche, die sehr stark vom Typ und vom gewählten Fahrzyklus abhängen. Dennoch lassen sich bereits Korrelationen z. B. mit dem Fahrzeuggewicht erkennen, wie sie anhand von repräsentativen Modellen bereits in Tabelle 3 dargestellt sind. Größenklasse, Reichweite und Verbrauch beziehen sich hierbei auf EPA [66], Tankvolumen und Batteriekapazität entsprechend den Herstellerangaben.

Diese Zusammenhänge spiegeln die folgenden Abbildungen zu Fahrzeugverbräuchen wider. Für verschiedene Weglängen, Temperaturen und geclustert sind die Verbräuche für ein BEV-Ford Focus Electric (Bild 13) sowie für ein FCEV-Toyota Mirai (Bild 14) dargestellt. Die Ergebnisse bestätigen, dass der Energieverbrauch von BEV in hohem Maße von der Außentemperatur abhängig ist.

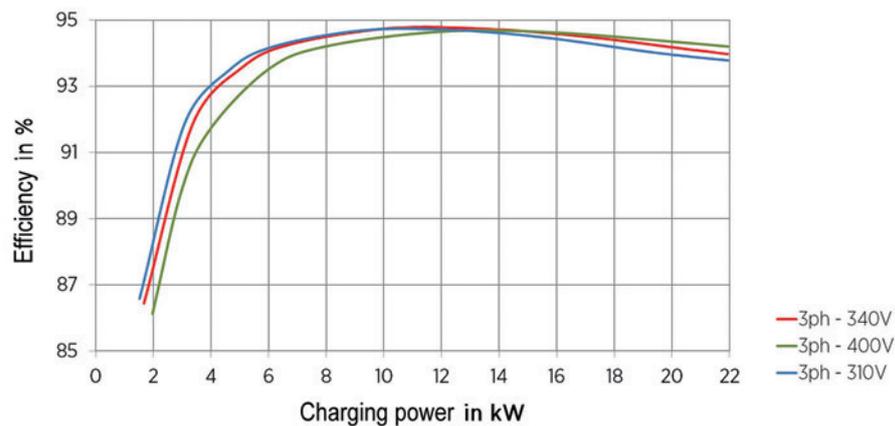


Bild 11. Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Ladeleistung (Quelle: BRUSA Elektronik AG)

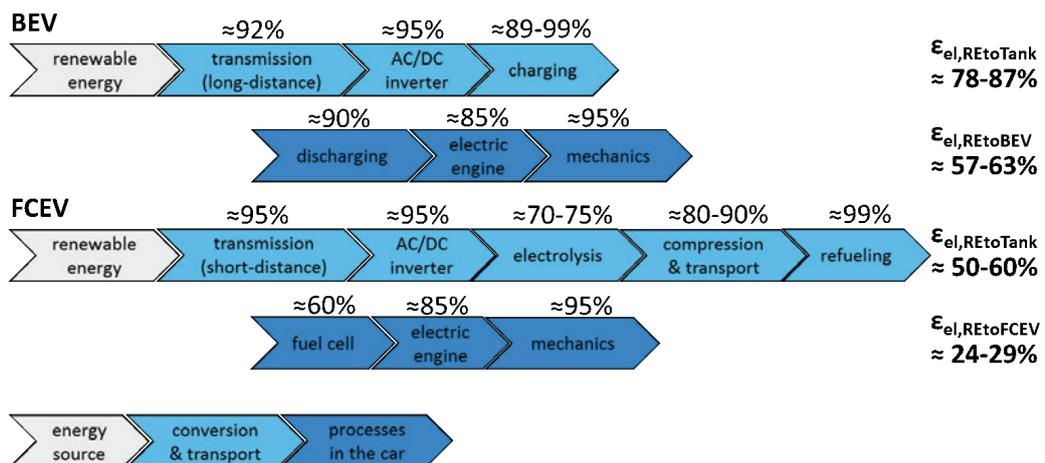


Bild 12. Elektrische Effizienzketten (Quelle: Universität Hannover)

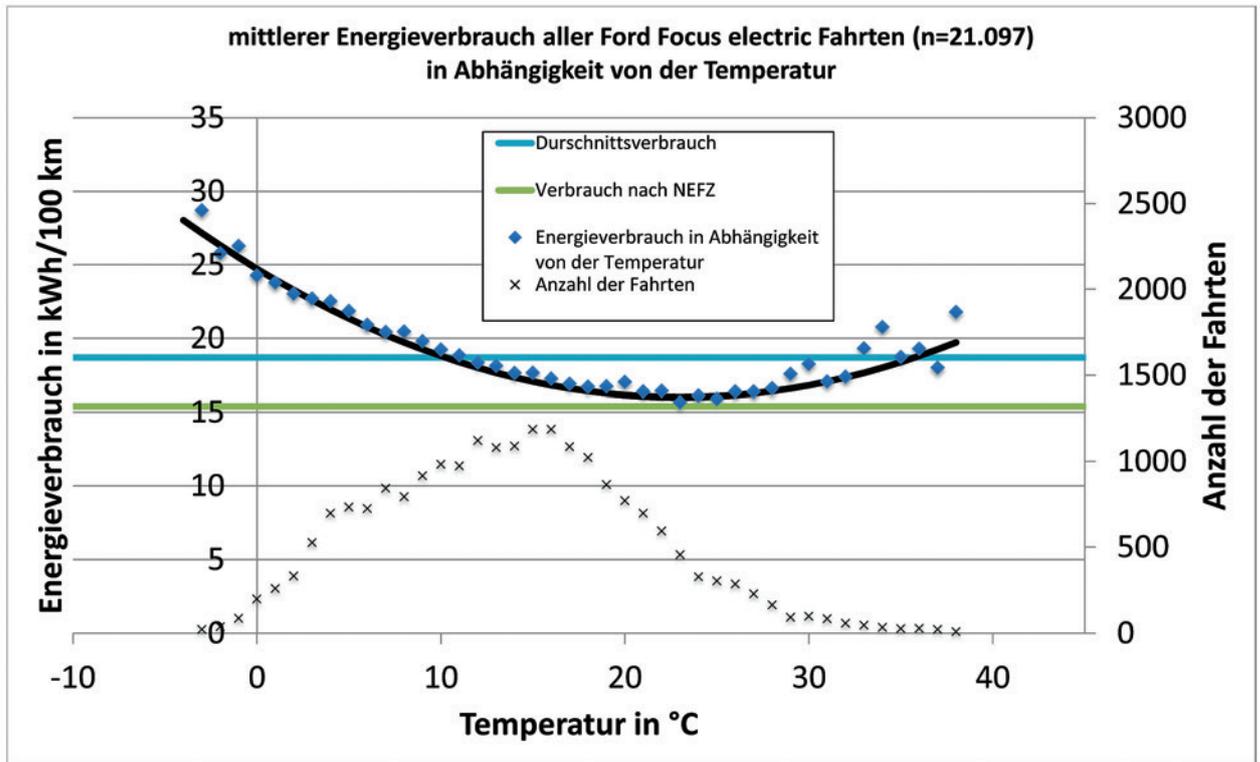


Bild 13. Mittlerer Energieverbrauch aller Ford-Focus-Electric-Fahrten ( $n = 21.097$ ) in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Quelle: CologneEmobil II [67])

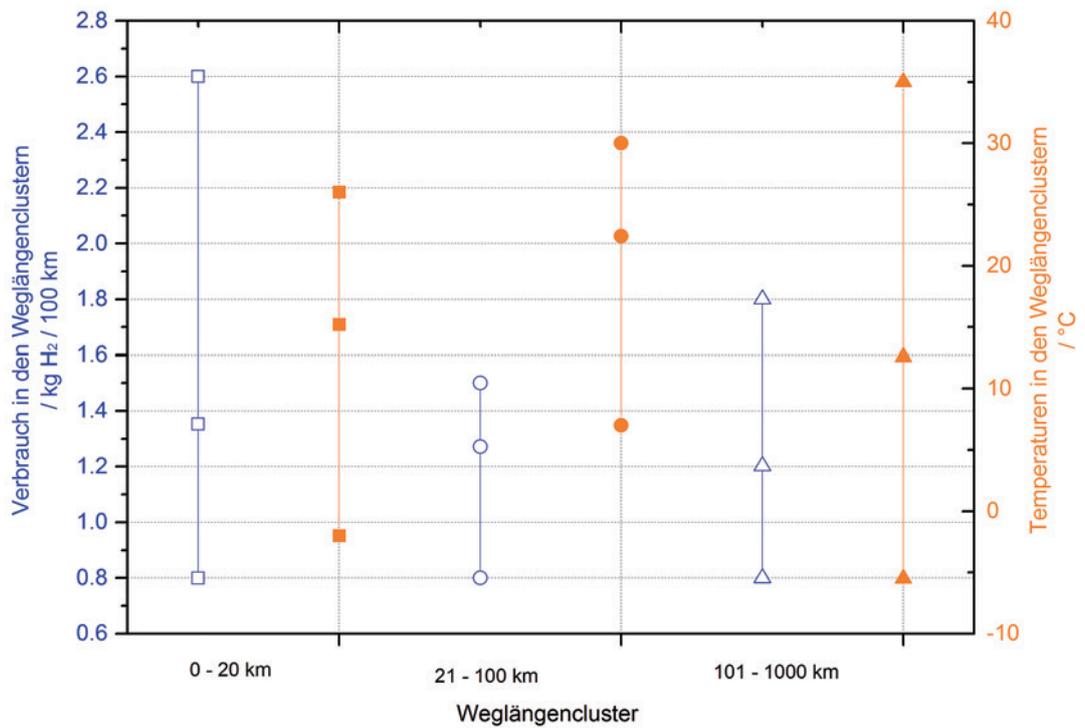


Bild 14. Toyota-Mirai-Übersicht Realverbrauch und Umgebungstemperatur (Quelle: Fraunhofer ISE)

### 4.3 Infrastruktur

#### Kernaussagen

- Durch Nutzung von großtechnisch produziertem Wasserstoff und Erweiterung bestehender Tankstellenanlagen ist eine schnelle Anpassung der Wasserstoff-Infrastruktur möglich. Mittel- bis langfristig ist, wie bei der Ladeinfrastruktur für BEV, von einem sukzessiven Ausbau der Erzeugungs- und Transportsysteme auszugehen.
- Durch die Vor-Ort-Speicherung von großen Mengen Wasserstoff an der Tankstelle sind Nachfragespitzen mit Vollausslastung der Tankstelle unproblematisch.
- Bei geringer Marktdurchdringung sind die Infrastrukturinvestitionen für BEV geringer. Bei einer hohen Marktdurchdringung ist je nach Annahmen von geringeren Kosten für die H<sub>2</sub>-Infrastruktur auszugehen.
- Der H<sub>2</sub>-Transport erfolgt in der Regel mit Lkw. Für die Zukunft bietet es sich bei einer größeren Nachfrage an, vorhandene Erdgasleitungen durch Umrüstung für den exklusiven H<sub>2</sub>-Transport zu nutzen.
- Die Bereitstellung von Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) führt zu technisch einfacheren Tankstellen, da die aufwendige Gasverdichtung, Vorkühlung und Qualitätsanalysen entfallen können. Die beförderte H<sub>2</sub>-Menge in einem Trailer lässt sich auf 4 t (Faktor 3 bis Faktor 3,5 im Vergleich zu druckförmigen Gastransport) steigern.

Die flächendeckende Einführung der Elektromobilität setzt den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur voraus. Dies gilt im gleichen Maße für FCEV und BEV.

Kennzeichnend für FCEV ist, dass dem Tanken ein Umwandlungsprozess vorgelagert ist. Er dient zur Gewinnung des Wasserstoffs aus erneuerbarem Strom mittels Wasserelektrolyse. Dieser Umwandlungsprozess kann zentral erfolgen oder dezentral mittels kleinerer Elektrolyseure im Tankstellenbereich.

Bei Batteriefahrzeugen ist demgegenüber die direkte Nutzung von elektrischer Energie aus dem öffentlichen Stromnetz möglich. Alternativ bietet sich zur Netzentlastung der Einsatz stationärer Speicher an, aus denen die BEV ihre Energie beziehen. Dies ist aber mit Wirkungsgradeinbußen verbunden.

#### Verwendung von Wasserstoff erlaubt schnelle Anpassung der Infrastruktur

Der flächendeckende Einsatz elektrischer Fahrzeuge setzt zum Erreichen der Klimaziele die Nutzung erneuerbarer Energien voraus. Mit der Entscheidung zur Energiewende hat Deutschland hierfür die Voraussetzungen geschaffen. Neben der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien und dem Ausbau der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), die den Stromtransport aus dem Norden in den Süden Deutschlands ermöglicht, betrifft dies die Entwicklung eines intelligenten Stromnetzes (Smart Grid).

Der Pfad über den chemischen Energieträger Wasserstoff ermöglicht die Einbindung einer weiteren essenziellen Infrastruktur, die des Gasnetzes. Mit ca. 20 GW Übertragungsleistung pro Leitung im Hochdrucknetz ist sie deutlich höher als die des Stromnetzes.

Mittels umfangreicher Informationssysteme, die den Verbrauchern über die jeweilige Strombeschaffungssituation informieren, wird es möglich, auch nachfrageoptimierte Stromangebote zur H<sub>2</sub>-Erzeugung und zum Laden der Fahrzeuge zu nutzen. Dies setzt jedoch neben entsprechenden Ladeeinrichtungen (Wallboxen und Schnellladeeinrichtungen) geeignete Abrechnungsverfahren voraus.

#### FCEV

Der Vergleich von H<sub>2</sub>-Tankstellen und Ladestationen zeigt, dass die Tankleistung mit fast 3 MW<sub>H<sub>2</sub></sub> deutlich höher ist als die von Schnellladestationen mit ca. 350 kW<sub>el</sub>. In einer bestimmten Zeitdauer können deutlich mehr FCEV pro Zapfsäule als BEV pro Ladepunkt versorgt werden. An einer Zapfsäule (Dispenser) können also in einer gewissen Zeitdauer viele Fahrzeuge nacheinander tanken. Zum Vergleich hierzu wird bei BEV eine Vielzahl von Ladesäulen benötigt, um das gleichzeitige Laden einer vergleichbaren Anzahl von Fahrzeugen während dieser Zeitdauer zu ermöglichen. Dies gilt auch bei Einsatz von DC-Schnellladesäulen. Sie verkürzen zwar die Ladezeiten, dennoch ist auch hier im Vergleich zu FCEV von 3-mal bis 5-mal längeren Ladezeiten bei Beschränkung auf 80 % der Batteriekapazität auszugehen. Deshalb ist eine entsprechend größere Zahl an Stellplätzen mit Ladeeinrichtungen vorzusehen, um die gleiche Betankungskapazität zu erreichen.

Der Ausbau von H<sub>2</sub>-Tankstellen lässt sich relativ einfach gestalten, da sich entsprechende Betankungssysteme im Umfeld konventioneller Tankstellen realisieren lassen. Aus realisierten Projekten (siehe Beispiel Berlin Heerstraße) [68] liegen Erfahrungen vor, die dafür sprechen, H<sub>2</sub>-Tankeinrichtungen durch Er-

weiterung bestehender Tankstellen herzustellen. Dies böte den Vorteil, dass die Standortsuche teilweise entfallen kann und ein Teil der an der Tankstelle verfügbaren Infrastruktur auch für die H<sub>2</sub>-Betankung genutzt werden könnte.

Die Kapazitätsauslegung von Wasserstofftankstellen folgt einem zu heutigen Tankstellen vergleichbaren Vorgehen. Auch der Platzbedarf von H<sub>2</sub>-Zapfsäulen weicht nicht wesentlich von dem heutiger Benzin- und Dieselpapfsäulen ab. Je nach H<sub>2</sub>-Anlieferungskonzept muss allerdings von einem erhöhten Platzbedarf durch den erforderlichen H<sub>2</sub>-Speicher am Tankstellenort ausgegangen werden. Während der Markteinführung kann die H<sub>2</sub>-Belieferung mithilfe von Lkw erfolgen. Bei hoher regionaler Abnahmedichte bietet die Pipelineanlieferung Vorteile.

Die heute vorhandene Wasserstoffinfrastruktur erlaubt noch keinen großflächigen Einsatz von FCEV. Aufgrund der hohen Investitionskosten und der kleinen Flottengrößen erfolgt der Ausbau derzeit nur zögerlich. Durch eine Erweiterung des Tankstellennetzes könnte der Markthochlauf und schließlich die Marktdurchdringung von FCEV unterstützt werden.

Für die Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen standen im Februar 2018 weltweit 328 Wasserstofftankstellen zur Verfügung, hiervon über 250 öffentlich zugänglich. Sie verteilen sich hauptsächlich auf Europa mit 139 (insbesondere Deutschland mit 45), gefolgt von Asien mit 118 (insbesondere Japan mit 91) und Nordamerika mit 68 (insbesondere USA bzw. Kalifornien mit 40). Da allein in Deutschland bis Anfang November 2018 mehr als zehn neue Tankstellen in Betrieb gegangen sind, China bis 2020 hundert Tankstellen in Betrieb nehmen will (derzeit 12), ist die Zahl der Tankstellen weltweit heute bereits deutlich größer.

Der Ausbau von H<sub>2</sub>-Tankstellen in Deutschland wurde mit Unterstützung der Clean Energy Partnership (CEP) bis 2015 vorangetrieben. In diesem Konsortium arbeiteten Partner aus Industrie und öffentlicher Hand im Sinne einer nachhaltigen Energiewende an der Marktvorbereitung der Mobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle zusammen. 2015 wurde das Joint Venture „H<sub>2</sub> Mobility“ gegründet, das seitdem den Großteil der in Deutschland existierenden öffentlichen Pkw-Tankstellen übernommen hat und mit zunehmender Geschwindigkeit weitere Tankstellen in Deutschland errichtet (Bild 15). Ziel ist eine flächendeckende Verbreitung einer Basis-Wasserstoff-Infrastruktur zur Versorgung von Pkw mit Brennstoffzellenantrieb in Deutschland. Bis 09. November 2018 waren bereits 52 öffentliche Tankstellen in

Deutschland verfügbar und 42 weitere im Bau [69; 70]. Bis zu 400 Wasserstofftankstellen sollen in einer zweiten Ausbauphase bis Ende 2023 errichtet werden [113]. Voraussetzung hierfür ist aber eine steigende Nachfrage nach Brennstoffzellenfahrzeugen. Bild 16 zeigt den regionalen Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur [71].

Der Ausbau von H<sub>2</sub>-Tankstellen in Deutschland wird ergänzt durch Aktivitäten in Nachbarländern, insbesondere in Dänemark. Auch hier sind bereits zehn Tankstellen verfügbar und weitere in Planung. Ebenfalls haben Österreich und die Schweiz bereits mehrere Wasserstoff-Tankstellen im Betrieb. Weitere sind auch dort geplant, sodass bereits jetzt die Voraussetzungen gegeben sind, auch größere Distanzen ohne Tankprobleme zu überbrücken.

## BEV

Mit der Bereitstellung einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur geht eine Beeinflussung der Netzlasten der Stromnetze einher. Wenn an einer Ortsnetzstation viele BEV gleichzeitig geladen werden, kann es bei ungesteuertem Laden zu lokalen Überlastungen im Niederspannungsnetz kommen [72]. Durch gesteuertes Laden – auch mit höheren Ladeleistungen – kann jedoch der Bedarf selbst bei hoher Durchdringung von BEV in der Regel auch ohne flächendeckenden Netzausbau abgedeckt werden.

Zur Versorgung der Ladestationen werden derzeit freie Kapazitäten der Verteilnetze genutzt. Mit einer weiteren Marktdurchdringung, größeren Ladeleistungen aufgrund größerer Batteriekapazitäten und schnelleren Ladevorgängen wird der Leistungsbedarf zunehmen. Dazu müssten u.a. möglichst flächendeckend DC-Schnellladestationen an Autobahnraststätten sowie Einkaufszentren und bei Parkplätzen installiert werden. An Orten mit hohem erwartetem Gleichzeitigkeitsfaktor, z. B. bei Theatern, Konzerthallen oder Sportstätten, ist ein Netzausbau im Nieder- und Mittelspannungsnetz erforderlich.

Die Ladeleistungen der DC-Schnellladestationen werden zukünftig 100 kW bis 350 kW erreichen und an mehreren Standorten zur Verfügung stehen. Dies setzt Mittelspannungsanschlüsse (MS-Anschluss) voraus, die in vielen Fällen erhebliche Investitionen für den Leitungsausbau und gegebenenfalls auch den Bau neuer Umspannanlagen erforderlich machen. Eine Abschätzung der Kosten für eine Ladestation, insbesondere für DC-Schnellladestationen, ist jedoch nur schwer möglich. Neben den Kosten für die Ladestation spielt hier die vorhandene Netzinfrastruktur eine wesentliche Rolle.

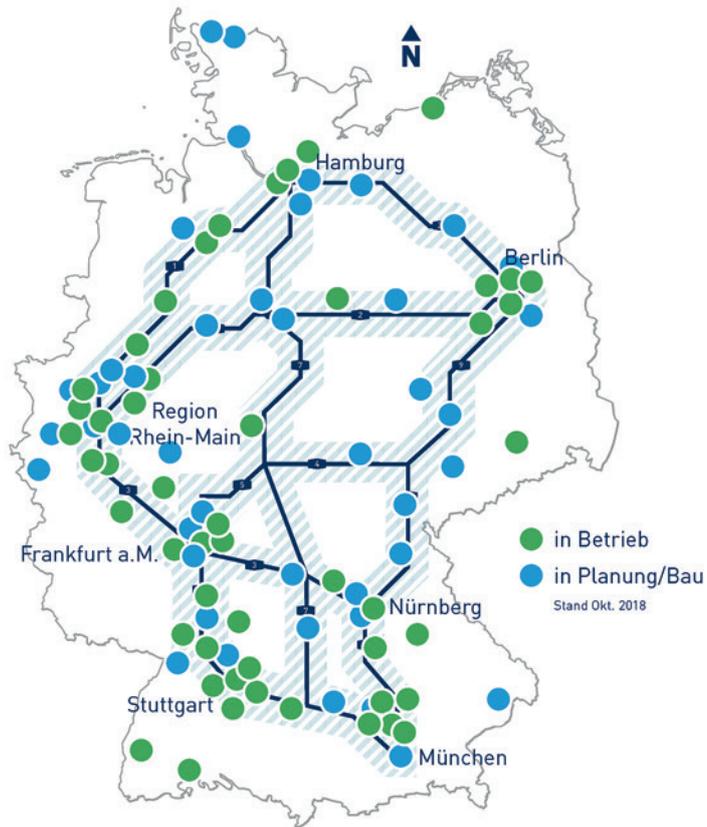


Bild 15. Bestehende (grün) und geplante (blau) H<sub>2</sub>-Tankstellen in Deutschland (Quelle:H2Mobility, <https://h2.live>)



Bild 16. Aufbau der H<sub>2</sub>-Infrastruktur in Deutschland (Quelle: H2Mobility)

Eine Möglichkeit zur Netzentlastung liegt im gesteuerten Laden. Voraussetzung ist jedoch die Akzeptanz der Fahrzeugnutzer hinsichtlich der Steuerung der Ladevorgänge durch den Netzbetreiber. Weiterhin fehlen die regulatorischen Voraussetzungen hinsichtlich Leistungs- und Zeitsteuerung durch den Netzbetreiber [73].

Über das bidirektionale Laden und Entladen der Fahrzeugbatterien (Vehicle-to-Grid – V2G) ist die Möglichkeit gegeben, den Lastfluss zu optimieren. Dies setzt aber eine technische Erweiterung der heutigen Ladestationen und Fahrzeuge voraus.

Als interessanter Bereich für die Realisierung von Ladeeinrichtungen sind Park&Ride-Parkplätze zu werten. Gerade hier ergeben sich Möglichkeiten für ein gesteuertes Laden, da die Standzeiten der Fahrzeuge relativ zuverlässig abgeschätzt werden können.

Beim Laden der Fahrzeuge ist sicherzustellen, dass ein Nutzer den Strom von einem Lieferanten seiner Wahl beziehen kann. Dies setzt geeignete Abrechnungsverfahren („Roaming“) voraus, die derzeit in Deutschland und anderen europäischen Ländern entwickelt werden.

### Investitionskosten für H<sub>2</sub>-Infrastruktur geringer als für BEV-Versorgung

Im Rahmen einer Studie des Instituts für Elektrochemische Verfahrenstechnik des Forschungszentrums Jülich und des Lehrstuhls für Brennstoffzellen, RWTH Aachen [74] wurde versucht, über eine Szenarienanalyse den Aufwand zum Aufbau einer H<sub>2</sub>-Tank- und Stromladeinfrastruktur zu bewerten. Vergleichskriterien sind Investitionen, Kosten, Wirkungsgrade und Emissionen der jeweiligen Infrastrukturen, wobei zwischen der Versorgung von einigen Hunderttausend und mehreren Millionen Fahrzeugen für Strom oder Wasserstoff unterschieden wurde. Bei der Wasserstoffvariante wurden insbesondere auch Optionen zur Integration und Speicherung von Stromüberschüssen berücksichtigt, die zukünftig in von erneuerbaren Energien dominierten Energiesystemen entstehen werden (Bild 17).

#### Szenarienannahmen

- Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung beläuft sich auf 80 %.
- In Bezug auf Wasserstoff erfolgt in der Übergangsphase die Umstellung der Gaserzeugung von fossiler Energie auf die Nutzung von regenerativem Überschuss-Strom. Er wird flankiert durch den Bau von saisonalen Wasserstoffspeichern zur Überbrückung von 60 Tagen. In der Anfangsphase sind hierfür höhere

Investitionen erforderlich als bei der Ladeinfrastruktur.

- Bei geringeren Fahrzeugbeständen bis hin zu einigen Hunderttausend wurden für das Laden die Kosten der Ladesäulen sowie des Netzausbaubedarfs in Verteilnetzen berücksichtigt. Ein eventuell notwendiger Netzausbau im Übertragungsnetz sowie saisonale Speicher wurden vernachlässigt.
- Bei dem Szenario mit großen Beständen an ZEV (20 Mio. Fahrzeuge) umfasst die H<sub>2</sub>-Versorgung neben den Tankstellen und Logistikkomponenten auch saisonale Speicher mit einer Gesamtkapazität von 60 Tagesverbräuchen. Als Speicheroption wurden Salzkavernen zur H<sub>2</sub>-Speicherung angenommen, mit deren Hilfe eine Speicherung großer Mengen (einige 10 TWh) an erneuerbaren Energien besonders kostengünstig (0,2 bis 1 €/kWh) darstellbar ist.

#### Ergebnisse der Szenarienanalysen

- Bei geringen Fahrzeugbeständen (bis hin zu einigen Hunderttausend) sind die Investitionen in den Infrastrukturausbau für beide Technologiepfade nahezu gleich.
- Bei einer hohen Marktdurchdringung (20 Mio. Fahrzeuge) liegen die Investitionen für eine Ladeinfrastruktur mit rund 51 Mrd. € deutlich höher im Vergleich zur Wasserstoffinfrastruktur mit rund 40 Mrd. € (Bild 18)

Die spezifischen Kosten je gefahrenem Kilometer sind bei hohen Marktdurchdringungen für beide Versorgungskonzepte annähernd gleich. Sie liegen im Durchschnitt bei 4,5 ct/km für das elektrische Laden und bei 4,6 ct/km für den Wasserstoff. Da die Möglichkeit der Zwischenspeicherung des Wasserstoffs eine flexiblere Nutzung der elektrischen Energie aus erneuerbaren Quellen ermöglicht, kann die geringere energetische Effizienz des Wasserstoffpfads annähernd dadurch ausgeglichen werden, dass die Erzeugung des Wasserstoffs zu Zeiten generell geringer Nachfrage an elektrischer Energie erfolgt und diese daher günstiger bezogen werden kann.

Für das Szenario mit 20 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeugen werden jährlich 87 TWh Strom zu Schwachlastzeiten für die Elektrolyse und zusätzlich 6 TWh Strom aus dem Netz (Transport und Verteilung des Wasserstoffs) benötigt. Das Laden von 20 Mio. Batteriefahrzeugen erfordert 46 TWh/a Strombezug aus dem Verteilnetz. Das Stromangebot zu Zeiten geringer Nachfrage mit 220 TWh bis

270 TWh übersteigt im unterstellten Energieversorgungsszenario mit hohen erneuerbaren Anteilen (80 % veranschlagt) den Bedarf zur Versorgung von 20 Mio. Fahrzeugen in beiden Infrastrukturfäden um den Faktor drei bis sechs. Da die Versorgung von BEV auch während der sogenannten Dunkelflaute (üblicherweise zwei bis drei Wochen) gewährleistet sein muss, sind hierfür steuerbare Kraftwerke – mit entsprechenden Brennstoffreserven (gegebenenfalls auch Wasserstoff oder synthetisches Methan) – vorzuzulassen.

Kennzeichnend für BEV ist die höhere Effizienz der Ladeinfrastruktur und der Fahrzeuge im Vergleich zu H<sub>2</sub> und FCEV. Zu berücksichtigen ist aber, dass bei BEV die Flexibilität der Stromnachfrage auf kürzere Zeiträume begrenzt ist.

Durch die Nutzung von erneuerbaren Stromüberschüssen und Netzstrom mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien sind die kilometerspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für beide Versorgungsoptionen gering im Vergleich zur Nutzung von fossilen Kraftstoffen (Bild 19). Die Wasserstoffinfrastruktur mit inhärenter saisonaler Speicherung kann höhere Anteile überschüssiger, erneuerbarer Energien integrieren und ist daher bei der CO<sub>2</sub>-Reduktion im Vorteil. Jedoch kann eine auf die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom

ausgerichtete Ladestrategie der Batteriefahrzeuge deren CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter mindern.

### Ausbau des H<sub>2</sub>-Netzes durch Umwidmung von Erdgasleitungen

Für die Gasversorgung von H<sub>2</sub>-Tankstellen bieten sich folgende Optionen:

- Der Wasserstoff wird mittels im Tankstellenbereich errichteter Elektrolyseure lokal erzeugt, nachverdichtet und anschließend in Hochdruckspeichern bei Drücken bis zu 1.000 bar gespeichert.
- Die Produktion des Wasserstoffs erfolgt in größeren Fabriken, der Transport zu den Verteilzentren (Tankstellen) per Lkw. Hierbei empfiehlt sich wegen der größeren Energiedichte der Transport in flüssiger Form (Lkw-Transportkapazität von 4.000 kg H<sub>2</sub> flüssig). Denkbar ist aber auch die Anlieferung im gasförmigen Zustand (Transportkapazität abhängig von der Druckstufe bis zu 1.000 kg).
- Der Transport von Wasserstoff erfolgt per Pipeline.

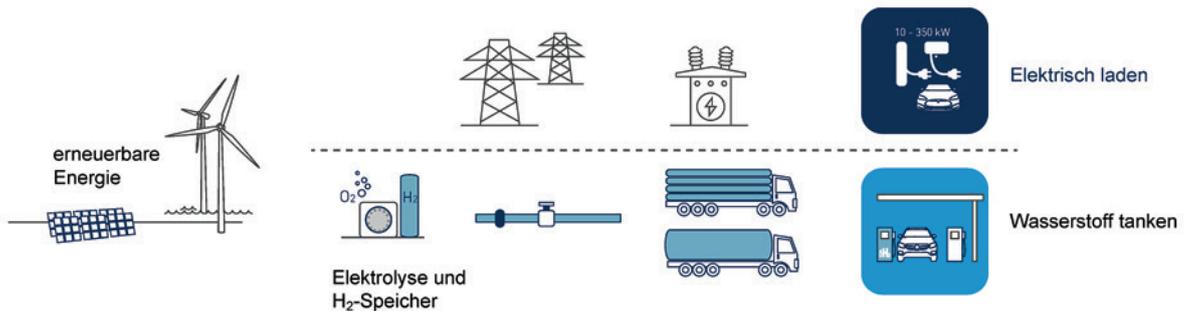


Bild 17. Schematische Darstellung der untersuchten Versorgungsinfrastrukturen (Quelle: H2Mobility)

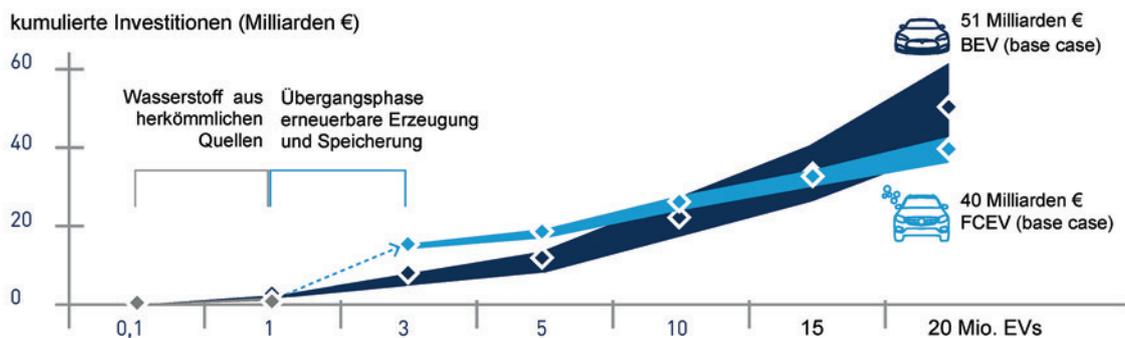


Bild 18. Vergleich der kumulierten Investitionen für den Infrastrukturaufbau (Quelle: H2Mobility)

Generell gilt in der Energiewirtschaft, dass bei großen Energiemengen der Transport per Leitung dem auf der Straße in Bezug auf Kosten und Leistung überlegen ist. Dies wirft die Frage auf, wie sich für H<sub>2</sub> mit geringem Aufwand eine Leitungsversorgung realisieren ließe.

Neben der Nutzung vorhandener H<sub>2</sub>-Leitungen sowie einem Neubau bietet sich als weitere Option an, vorhandene Erdgasleitungen zu nutzen. Als einfache technische Möglichkeit ist die Zumischung von H<sub>2</sub> zum Erdgas in der Diskussion. Der Anteil ist laut DVGW-Arbeitsblätter G 260 und G 262 auf ca. 10 % der Erdgasmenge begrenzt, größere Energiemengen wären damit nicht übertragbar. Untersuchungen des DVGW-EBI sprechen demgegenüber dafür, dass auch Zumischungen bis 30 % möglich sind [75].

Die Zumischung bedingt, dass am Abnehmerstandort Wasserstoff und Erdgas zu trennen sind, was mit einem größeren Aufwand verbunden wäre. Über Membranverfahren wäre eine Aufkonzentrierung auch von wenigen Prozent H<sub>2</sub> bis zu reinem H<sub>2</sub> möglich. Inwieweit dies ökonomisch sinnvoll ist, muss weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben. Alternativ wäre eine direkte Nutzung des Mischprodukts in Betracht zu ziehen.

Alternativ steht zur Diskussion, vorhandene Erdgasleitungen auf H<sub>2</sub> umzurüsten. Wichtige Pionierarbeiten werden hierzu im Rahmen des ostdeutschen Hypo-Projekts [76] geleistet. Unter anderem betrifft dies die konzeptionelle Entwicklung, Strukturierung und Umsetzung einer technischen Verteilnetzinfrastruktur mit Hausanschlussleitungen zur Durchführung von Forschung und Entwicklung im Rahmen der Pilotversorgung eines geplanten Standorts („Wasserstoffdorf“).

### Thesen zur Infrastrukturentwicklung für die wasserstoffbasierte Mobilität

Die nachfolgenden Thesen sind nicht durch Studien mit belastbaren Daten und Fakten untermauert. Insbesondere können eine Vielzahl externer Faktoren, wie die öffentliche Akzeptanz (subjektive Risikobewertung), regulatorische Aspekte, aber auch die Durchsetzungsmacht einzelner Hersteller zu signifikanten Abweichungen von den erwarteten Lösungspfaden führen.

#### 1. Hypothese: Druckwasserstofflogistik in den kommenden fünf Jahren – 350 bar- und 500 bar-Sattelaufleger

Die extrem kleine Flotte an wasserstoffnutzenden Mobilitätssystemen (Pkw, Lkw, Züge) wird in den kommenden fünf Jahren mit vorverdichtetem CGH<sub>2</sub> (engl. compressed gaseous hydrogen) versorgt. Wasserstofftankstellen besitzen Druckspeicher verschiedener Druckstufen, bis hin zu 1.000 bar und eigene aufwendige H<sub>2</sub>-Verdichter und Tieftemperaturvorkühler. Die Fahrzeuge wiederum führen den Wasserstoff bei hohem Druck, zwischen 350 bar und 700 bar mit sich. Möglicherweise werden im Pkw-Bereich noch höhere Drücke realisiert, um Reichweiten > 500 km auch unter ungünstigen Bedingungen sicher zu realisieren.

#### 2. Hypothese: Mit zunehmender Flottenstärke wird Druckwasserstofflogistik (CGH<sub>2</sub>) durch verflüssigten Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) substituiert.

Die Nachfrage wird anfänglich durch bestehende Großverflüssiger bedient. Ergänzend werden an den bestehenden Standorten Elektrolyseanlagen betrieben.

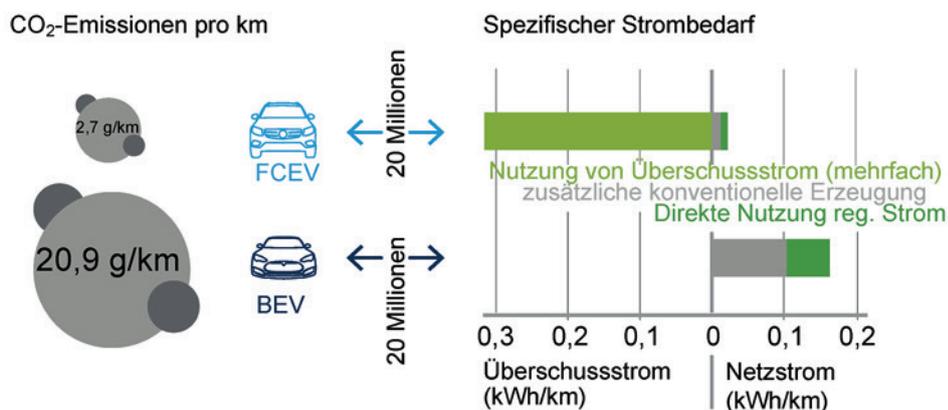


Bild 19. Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Strombedarfe je Kilometer (Quelle: H2Mobility)

Der zunehmende Wasserstoffbedarf steigert die Logistikaufwendungen. Typische Sattelaufleger transportieren je nach Druckstufe zwischen 300 kg bis etwas mehr als 1.000 kg gasförmigen Wasserstoff pro Fahrzeug mit einem Bruttogewicht um die 40.000 kg ( $\text{CGH}_2$ ). Im Gegensatz dazu können bis zu 4.000 kg flüssiger Wasserstoff ( $\text{LH}_2$ ) pro Fahrzeug transportiert werden (Bild 20).

Ein weiterer Aspekt ist die recht hohe Komplexität und der Energiebedarf einer  $\text{CGH}_2$ -Tankstelle sowie der Umstand, dass bei hohen Tankfrequenzen der aus technoökonomischen Gründen klein dimensionierte Höchstdruckspeicher limitierend wirkt.

Im Vergleich hierzu sind  $\text{LH}_2$ -Tankstellen deutlich einfacher aufgebaut und können kurze Betankungszeiten bis zur Erschöpfung des Speichertanks gewährleisten. Abdampfverluste treten bei hinreichend hoher Nachfrage nicht oder nur in untergeordnetem Maß auf. Der Wasserstoff an Bord des FCEV kann weiterhin gasförmig gespeichert werden. Denkbar ist aber auch, dass im Nutzfahrzeugbereich (Lkw/Zug) mit seiner hohen Auslastung auch der flüssige Wasserstoff wieder Einzug hält und das durch BMW vorgestellte  $\text{CCH}_2$ -Cryocompressed Hydrogen Storage (BMW  $\text{CCH}_2$ ) mit seinen energetischen und technischen Vorteilen zum Einsatz kommt.

### 3. Hypothese: Die Erzeugung von $\text{LH}_2$ erfordert große zentrale Verflüssiger, da aktuell keine kosten- und energieeffiziente Verflüssigung in Kleinanlagen bekannt ist.

Das sich entwickelnde  $\text{LH}_2$ -System könnte Ähnlichkeiten mit dem der heutigen Raffinerien aufweisen, beziehungsweise solche Standorte sogar bevorzugt entwickeln. Logistisch bereits erschlossen, benötigen sie jedoch eine deutlich verstärkte Anbindung an den neuen Rohstoff „erneuerbare Energien“.

Wird  $\text{LH}_2$  zu einem gut verfügbaren Produkt, können weitere Nutzer wie die Luftfahrt oder chemische Industrie als Abnehmer hinzukommen.

### 4. Hypothese: Langfristig wird neben dem Stromnetz als Transport- und Verteilsystem für erneuerbare Energien auch das vorhandene Gasnetz eingebunden oder erweitert.

Bereits heute wird dem Erdgas Wasserstoff mit bis zu 10 % Volumenanteil zugemischt. Höhere  $\text{H}_2$ -Konzentrationen würden allerdings Anpassungsmaßnahmen bei einer Vielzahl von Verbrauchern erfordern. Sie sind jedoch nur innerhalb eines schmalen Bands nutzbar und wären bei weiterer Konzentrationserhöhung erneut durchzuführen. Für die Elektromobilität wäre dieses Mischgas nicht geeignet.

Gasnetzbetreiber untersuchen deshalb Möglichkeiten, in bestehenden Leitungen 100 % Volumenanteil Wasserstoff zu transportieren. Vorteilhaft wäre hierbei, dass der Wasserstoff in seiner Reinform mit seinen zahlreichen Einsatzmöglichkeiten erhalten bliebe, insbesondere für die Mobilität, die ausschließlich reinen Wasserstoff nutzen kann. Mit zunehmender Absatzmenge wird dabei auch der Neubau von Rohrleitungen für den gasförmigen Wasserstofftransport wirtschaftlich.

## 4.4 Energiebeschaffung

### Kernaussagen

Die Wasserstoffbeschaffung ist von der Markteinführung über den Markthochlauf bis hin zum Massenmarkt generell als unkritisch hinsichtlich Verfügbarkeit und Kosten (dieseläquivalenter Preisbereich) einzuschätzen. Dennoch ist derzeit in Deutschland die Versorgung von Tankstellen mit grünem Wasserstoff sowohl in ausreichender Menge als auch zu angemessenen Marktpreisen mit Problemen verbunden und benötigt deshalb einen weiteren Ausbau von Erzeugungskapazität für grünen Wasserstoff.



Bild 20. Straßentransport von Wasserstoff (Quelle: Shell)

- Wasserstoff entwickelt sich zu einem globalen Handelsgut. Durch Bezug des Energieträgers aus Ländern mit günstigen Stromkosten lassen sich die H<sub>2</sub>-Beschaffungskosten verringern.
- Wasserstoff als chemischer Energieträger lässt sich ohne Verluste längerfristig speichern. In Verbindung mit geeigneten Speichersystemen (z. B. Kavernen) ist eine Entkopplung von Erzeugung und Nachfrage möglich. Hierzu zählt auch eine saisonale Speicherung sowie die Schaffung strategischer Reserven, vergleichbar mit den heutigen fossilen Bevorratungen.
- In Zukunft sollte sich mit Elektrolyseuren und Nutzung des steigenden Stromangebots aus erneuerbaren Energien eine weitgehend emissionsfreie sowie wirtschaftlich konkurrenzfähige Wasserstofferzeugung realisieren lassen.
- Der Einsatz von Elektrolyseuren, aber auch FCEV und BEV, bietet das Potenzial zur Optimierung der Stromversorgung. Durch gezielten Einsatz der Systeme ist ein netzdienlicher Betrieb möglich. Des Weiteren kann die Abwärme der Elektrolyse in Wärmesysteme integriert werden und der Sauerstoff technisch genutzt werden.
- Wasserstoff lässt sich in unterschiedlichen Bereichen (Strom, Wärme, Verkehr und Industrie) verwenden. Wasserstoff bietet damit das Potenzial für die von der Politik gewünschte Sektorenkopplung.

Im Rahmen einer nachhaltigen Dekarbonisierung ist die Art der Energiebeschaffung für die Elektromobilität von großer Relevanz. Voraussetzung für eine emissionsfreie Mobilität ist daher, dass sowohl das Laden als auch die Produktion von H<sub>2</sub> mit „Überschussstrom“ aus erneuerbaren Energien, der nicht für

die allgemeine Stromversorgung genutzt werden kann, erfolgt. In einer Übergangsphase sollte jedoch auch die Nutzung von sog. „grauem“ Strom bzw. „grauem“ Wasserstoff toleriert werden, sofern sich damit noch eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen darstellen lässt.

Eine grobe Abschätzung zum durchschnittlichen Jahresverbrauch von BEV bei unterschiedlichem Energiebedarf und Energieeinsatz sowie reiner AC-Ladung (Onboard-Ladesysteme) liefert Tabelle 4. Bei einem Anteil von 50 % BEV in Deutschland (derzeit ca. 46,5 Mio. Pkw zugelassen) wäre von ca. 52 TWh bis 104 TWh zusätzlichem Stromverbrauch auszugehen. Die Erzeugung beliefe sich auf etwa 56 TWh bis 113 TWh.

Bei Einsatz von FCEV und gleicher Marktdurchdringung würde sich die Erzeugung aufgrund des um den Faktor 2,3 höheren Energiebedarfs (Bild 12) auf ca. 130 TWh bis 260 TWh belaufen. Dies bedeutet, dass im Vergleich zur Stromerzeugung 2017 mit etwa 550 TWh bei BEV von einer um 21 %, bei FCEV von einer um rund 50 % größeren Erzeugung auszugehen wäre [77]. Dies entspricht bei einem Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung von 80 % dem zu erwartenden Stromüberschuss von 220 TWh bis 270 TWh (siehe oben „Ergebnisse der Szenarienanalysen“).

### Wasserstoffbeschaffung in jeder Phase der Markteinführung als unkritisch hinsichtlich Verfügbarkeit und Kosten einzuschätzen

Aufgrund zahlreicher, klimafreundlicher Produktionsmöglichkeiten sollte eine H<sub>2</sub>-Beschaffung in jeder Phase der Markteinführung kostengünstig und in ausreichender Menge sowie überwiegend auf Basis heimischer Energiequellen realisierbar sein. Dennoch zeigen die Erfahrungen in Deutschland, dass derzeit die Versorgung mit grünem Wasserstoff sowohl in ausreichender Menge als auch zu angemessenen Marktpreisen mit Problemen verbunden ist.

Tabelle 4. Bedarf an zusätzlicher Stromerzeugung als Funktion des spezifischen Stromverbrauchs und Fahrleistung von BEV

Verbrauch im Fahrzeug in kWh/100 km	Fahrleistung pro Jahr in km	Jahresverbrauch in kWh	BEV in Mio.	Strombedarf in TWh	Erforderliche zusätzliche Jahresstromerzeugung in TWh
15	15.000	2.250	23	51,75	56,25
20	15.000	3.000	23	69,00	75,00
25	15.000	3.750	23	86,25	93,75
30	15.000	4.500	23	103,50	112,50

Kurzfristig lässt sich vor allem Restwasserstoff aus Industrieprozessen sowie Wasserstoff aus der Methandampfreformierung nutzen, mittel- bis langfristig sind erneuerbare Primärenergien zur H<sub>2</sub>-Produktion einzusetzen. In der Übergangsphase ist dabei im Vergleich zu Batterieladeinfrastrukturen mit höheren Kosten zu rechnen, die im weiteren Verlauf durch eine bessere Infrastrukturauslastung deutlich sinken. Die Option erneuerbarer Stromnutzung ist komplementär zum Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, der aufgrund steigender, netzseitig nicht nutzbarer Strommengen effiziente und kostengünstige Möglichkeiten zur Speicherung und Nutzung erfordert. Unter Einbeziehung der erforderlichen Infrastrukturkomponenten kann gezeigt werden, dass die H<sub>2</sub>-Kosten an der Tankstelle wettbewerbsfähig gegenüber heutigen Kraftstoffkosten sind (jeweils ohne Steuern und Abgaben). Untersuchungen zu einer weltweit angelegten H<sub>2</sub>-Logistik haben gezeigt, dass Wasserstoff in Regionen mit besonders hohem Aufkommen an erneuerbaren Energien kostengünstig produziert und z. B. per Schiff zu den Verbrauchszentren transportiert werden kann.

### Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse reduziert CO<sub>2</sub>-Aufkommen (Power2Hydrogen)

In Bezug auf Wasserstoff ist seine Herstellung eine der Kernfragen. Über 95 % der heutigen Wasserstoffproduktion basiert auf fossilen Energieträgern. Etwa 90 % des jährlichen Wasserstoffbedarfs von derzeit ca. 40 Mio. t bis 60 Mio. t werden für industrielle Anwendungen benötigt. Dort ist Wasserstoff eine unverzichtbare Chemikalie, die sowohl als Energieträger, Additiv oder als Reduktionsmittel dient. In erster Linie wird der Wasserstoff als Basischemikalie für die Synthese von Ammoniak und anderer Düngemittel wie Harnstoff, die Synthese von Methanol, verschiedener Polymere oder Harze verwendet. Weitere Großverbraucher der heutigen Wasserstoffindustrie sind Raffinerien, die Metallindustrie aber auch die Halbleiter-, Glas- und Lebensmittelindustrie. Die restlichen 10 % werden im Energiesektor und ein verschwindend kleiner Prozentsatz für den Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen verwendet. Dabei gilt vor allem diese Mobilität als ein lukrativer Markt für die Nutzung von nachhaltig produziertem Wasserstoff.

Bei der Bewertung der H<sub>2</sub>-Beschaffungskosten ist zu berücksichtigen, dass Wasserstoff als weltweites Handelsprodukt zu betrachten ist. Damit ist die Möglichkeit gegeben, günstige Bezugsmöglichkeiten zu nutzen, um die Energiekosten zu senken. Für die H<sub>2</sub>-Produzenten bedeutet dies, dass sie sich Wettbewerbern stellen müssen, die teilweise sehr günstige Strompreise nutzen können. Beispielfhaft sei hier der

Bezug von Wasserstoff aus Kanada [78] oder Norwegen zu nennen.

Derzeit erfolgt die H<sub>2</sub>-Produktion vorrangig über die Dampfreformierung, die Kohlevergasung sowie die partielle Oxidation. Hierbei entstehen im Schnitt ca. 10 kg CO<sub>2</sub> pro kg H<sub>2</sub> bis 15 kg CO<sub>2</sub> pro kg H<sub>2</sub> (Bild 21), die, vor allem in der Reformierung, wieder in den Stoffkreislauf eingebunden und weiterverwertet werden.

In Bezug auf die emissionsfreie Elektromobilität werden Alternativen für die H<sub>2</sub>-Gewinnung benötigt. Sie bestehen in Form der Biomassevergasung sowie der Wasserstoffelektrolyse auf Basis erneuerbarer Energien.

Die Technologie mit dem höchsten CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial sowie auf lange Sicht (2030) mit dem höchsten technischen Reifegrad (TRL) ist die Wasserstoffelektrolyse (Power2Hydrogen) [80]. Mithilfe von elektrischem Strom wandelt sie Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff um, ohne CO<sub>2</sub> zu emittieren. Voraussetzung hierfür ist die Nutzung von regenerativem Strom, der nicht für den konventionellen Bedarf eingesetzt werden kann. Wie Bild 21 zeigt, ist dagegen bei einer H<sub>2</sub>-Gewinnung per Elektrolyse und einer Zuordnung der Emission desjenigen Kraftwerks, das den Strom für die Elektrolyse bereitstellt, im Vergleich zur Reformierung von deutlich höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen auszugehen [79]. Wenn stattdessen erneuerbare Energien zum Einsatz kommen, kommt es zu einer entsprechenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Errichtung und Inbetriebnahme eines Elektrolyseurs ist derzeit, unabhängig von Größe oder Aufstellort, an eine Genehmigung nach BImSchG gebunden. Sie ist kompliziert und kostspielig. Aufgrund der Emissionen der Anlage (geringe Mengen Sauerstoff und aufgereinigtes Wasser) empfiehlt sich die Überprüfung der Genehmigungspflicht für Elektrolyseure nach BImSchG oder die Schaffung einer Ausnahmeregelung für Elektrolyseure. Es wäre denkbar, eine Ausnahme an den Aufstellort zu knüpfen oder an die maximal speicherbare Menge von Wasserstoff auf der Anlage. Dies wäre dann eine Lösung analog zu anderen gasförmigen Kraftstoffen an der Tankstelle, die bis zu einer Speichermenge von 3 Tonnen nicht unter BImSchG fallen.

Die Wasserstoffgestehungskosten werden durch die Investitionskosten der Elektrolyseure, hauptsächlich aber durch die Stromkosten und die Betriebszeit definiert [81; 82]. Wegen hoher Investitionen lässt sich die Wasserstoffproduktion mittelfristig allein durch Überschussstrom nicht wirtschaftlich gestalten.

TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER WASSERSTOFFBEREITSTELLUNG

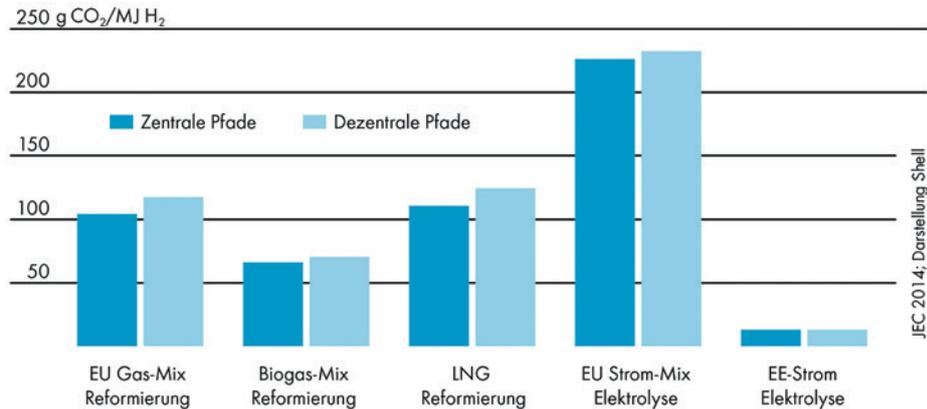


Bild 21. Spezifische Treibhausgasemissionen der Wasserstoffbereitstellung (Quelle: Shell)

Bild 22 beschreibt die H<sub>2</sub>-Gestehungskosten mittels Wasserelektrolyse (Annahmen: CAPEX der Elektrolyse 450 US\$/kW bei Large-scale water electrolyser, mit e.g. 400 MW WACC 7 %, Abschreibung über 30 Jahre, Wirkungsgrad 70 %). Die Gestehungskosten sind hierbei nur als Anhaltswerte zu betrachten und nur unter den hier genannten Prämissen, das heißt Strombezug ohne Netzkosten und EEG-Abgaben etc., gültig. Gleichfalls finden kostensteigernde Effekte, z. B. spezielle Qualitätsanforderungen an die Reinheit von H<sub>2</sub>, keine Berücksichtigung. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ab einer Betriebszeit von ca. 4.000 Stunden pro Jahr die Wasserstoffgestehungskosten hauptsächlich durch den Strompreis bestimmt werden. Diese 4.000 Stunden (das heißt fast sechs Betriebsmonate pro Jahr) sind jedoch allein über die Ausschöpfung von EE-Erzeugungsspitzen („Überschussstrom“) nicht erreichbar. Mit weiter sinkenden Investitionskosten werden sich die für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlichen Volllaststunden weiter verringern.

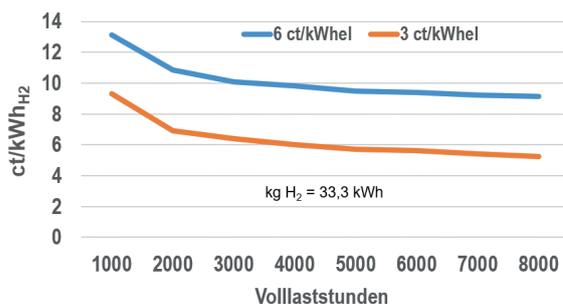


Bild 22. Wasserstoffgestehungskosten als Funktion der Volllaststunden des Elektrolyseurs und der Stromkosten (Quelle: inecs in Anlehnung an [83])

Die H<sub>2</sub>-Gestehungskosten von Vergasungsprozessen liegen heute in der Größenordnung von 2 €/kg ± 30 € ct) (entsprechend etwa 6 € ct/kWh bezogen auf den Heizwert). Ziel sollte es sein, diese Werte auch für H<sub>2</sub> aus Elektrolyseuren zu erreichen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Wasserstoff als weltweites Handelsprodukt zu betrachten ist.

Einsatz von Wasserstoff für den saisonalen Energieausgleich und zur Unterstützung der Sektorenkopplung

Wasserstoff ist ein idealer Energiespeicher für die Herausforderungen der Energiewende. Er könnte in der Stromversorgung für den mittelfristigen, aber auch saisonalen Energieausgleich zur Anwendung kommen. Während sogenannter „dunkler Flauten“ – Zeitspannen von bis zu sechs Wochen – in denen kein oder nur ein geringes Aufkommen an Wind- und Fotovoltaikstrom zu verzeichnen ist, ließe sich mittels Rückverstromung des während Perioden mit EE-Überschüssen erzeugten Wasserstoffs Perioden ohne nennenswerte EE-Stromerzeugung überbrücken.

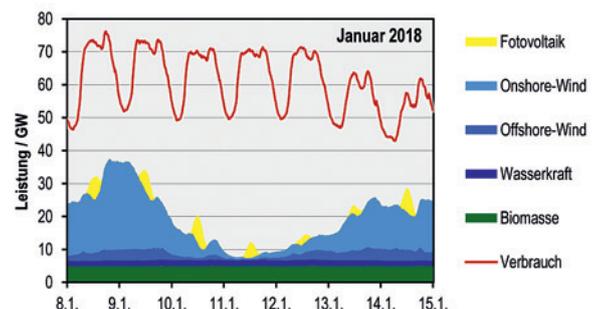


Bild 23. Einspeisung aus erneuerbaren Energien und Lastverlauf in Deutschland (Datenquelle: Bundesnetzagentur/SMARD.de)

Als Speicher eignen sich Salz-Kavernen (Wasserstoff oder Methan), Untertage-Porenspeicher (Methan) aber auch Behälter für Flüssigkeiten, wobei der Wasserstoff in eine speicherbare Trägerflüssigkeit eingebunden wäre.

Der größte volkswirtschaftliche Nutzen von Power2Hydrogen resultiert aus der sogenannten Sektorenkopplung. Sie beschreibt die Synergieeffekte, die aus der Nutzung der Elektrolyse zur Dekarbonisierung der Industrie, Mobilität auf Basis von Wasserstoff sowie Netzstabilisierung entstehen. Hierbei ist insbesondere von Vorteil, dass durch die chemische Speicherung der elektrischen Energie die Wasserstoffherstellung für die Mobilität zeitlich vom Bedarf (z. B. für die Mobilität) entkoppelt werden kann. Dies kann zu einer signifikanten Einsparung beim stromseitigen Infrastrukturausbau führen. Dem steht allerdings der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur entgegen (siehe Abschnitt 4.3 „Investitionskosten für H<sub>2</sub>-Infrastruktur ähnlich groß wie für BEV-Versorgung“).

### Bausteine der Elektromobilität ermöglichen netzdienlichen Betrieb

Wasserelektrolyse und Batterie-Speichersysteme bieten das Potenzial, im Sinne der Stromversorgung vorteilhaft zum Einsatz zu kommen. Denkbar sind folgende Anwendungsbereiche:

Die Wasser-Elektrolyse bietet durch ihre flexible Betriebsweise das Potenzial, einen stetig steigenden Anteil erneuerbarer Energien in das Stromnetz zu integrieren. Lastspitzen durch übermäßige Produktion von Wind- und Sonnenenergie können so abgefangen und müssen nicht abgeregelt werden. Allein in den Jahren 2015 und 2016 mussten in Deutschland 4,7 TWh (2015) bzw. 3,7 TWh (2016) abgeregelt werden. Für 2016 resultierte hieraus eine Entschädigungszahlung in Höhe von rd. 370 Mio. Euro [85]. Die Elektrolyse könnte auch das Potenzial bieten, einen Teil der durch Redispatch und Einspeisemanagement<sup>1</sup> entstehenden Kosten einzusparen. Allein 2017 beliefen sich diese auf 1,4 Mrd. € [86]. Da der Großteil der EE-Abregelungen durch aktuell bestehende Netzengpässe verursacht wurde, müssten Elektrolyseure also „vor“ dem Netzengpass installiert werden. Auf die Problematik der hierbei auch mittelfristig noch zu erwartenden geringen Betriebs- bzw. Volllaststunden für die erforderlichen Elektrolyseure wurde oben bereits hingewiesen.

<sup>1</sup> Anpassung der Leistungseinspeisung von Kraftwerken durch den Übertragungsnetzbetreiber, um auftretende regionale Überlastungen einzelner Betriebsmittel im Übertragungsnetz zu vermeiden.

Durch gezieltes Steuern von Elektrolyseuren bieten sich Optionen für den Regelenergiemarkt. Da sich diese Systeme bei Bedarf schnell regeln bzw. ein- und ausschalten lassen, könnten sie im Sinne des Regelenergiemarkts zum Einsatz kommen [87].

Fahrzeugbatterien bieten sich in Verteilnetzen zur Netzlastoptimierung an. Durch gesteuertes Laden könnte es möglich sein, eine bessere Auslastung der betroffenen Netzbereiche zu erreichen; durch Reduktion der Ladeleistung ließen sich Netzüberlastungen in den Ortsnetzbereichen vermeiden sowie durch Einspeisung aus der Batterie Engpässe in vorgelagerten Netzteilen ausgleichen (Vehicle-to-Grid). Auch Anwendungen zur Bereitstellung von Blindleistung sind denkbar.

Für FCEV kommen Anwendungen in der Hausenergieversorgung infrage [88]. Indem das System nach Erreichen des Wohngebäudes zur Hausenergieversorgung zugeschaltet wird, lässt es sich ergänzend zur Strombereitstellung nutzen, sodass der Strombezug aus dem öffentlichen Netz reduziert werden kann. Da der gemittelte Leistungsbedarf eines Haushalts in der Regel 1 kW nicht überschreitet sowie die Leistung der Brennstoffzelle mit etwa 50 kW zu veranschlagen ist, könnte im Notfall sogar zeitweise eine Vollversorgung möglich sein.

## 4.5 Kritische Rohstoffe

### Kernaussagen

- Eine Diversifizierung der (Elektromobilitäts)Technologien reduziert das Risiko von Rohstoffverknappungen.
- Als kritische Rohstoffe gelten bei der Batterie Lithium, Nickel, Kobalt und bei der Brennstoffzelle Platin mit abnehmender Tendenz. Die Förderkapazitäten dieser Rohstoffe müssen ausgebaut werden, bevorzugt durch Steigerung der Recyclingrate.

Ist eine (R)Evolution zur Elektromobilität aus Rohstoffsicht überhaupt möglich? Dieser Frage soll hier unter globalen und langfristigen Aspekten nachgegangen werden.

Rohstoffe werden für jede Technologiemarktdurchdringung und -aufrechterhaltung benötigt. Diese stammen entweder aus Primärquellen wie dem Erzbergbau oder, meist zeitlich verzögert, (auch) aus Sekundärquellen wie dem Recycling. Hierbei kann es zu einer Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage kommen, wobei zwischen absoluten, temporären und strukturellen Verknappungen unterschieden wird.

Während die Erschließung neuer Förderquellen und auch deren Substitutionen bisher die absolute Verknappung eines Rohstoffs verhinderten, sind bereits temporäre Verknappungen vorgekommen, z. B. vor einigen Jahren für Seltenerdmetalle, maßgeblich hervorgerufen durch Chinas Monopolstellung. Strukturelle Verknappungen treten meist auf, wenn die Nachfrage keine direkte Förderung nach sich zieht, dies gilt insbesondere für sog. Sekundärmetalle, deren Produktionsmenge nur von Primärmetallen abhängt. Diese Unterscheidung ist letztlich rein ökonomischer Natur [89; 90].

Speziell für die Elektromobilität bezieht sich dieses Papier in erster Linie auf eine von der Agora Verkehrswende in Auftrag gegebene Studie [91]. Diese wiederum stützt sich im Wesentlichen auf Studien der International Energy Agency (IEA) [92] zu heutigen und zukünftigen Fahrzeugverkaufszahlen sowie auf eine U.S. Geological Survey (USGS)-Studie [93] zu den derzeitigen Rohstofffördermengen und -reserven, also derzeit ökonomisch zu fördernde Mengen sowie -ressourcen, d. h. derzeit bekannte Vorkommen. Kurzum wird ein Mobilitätsszenario betrachtet, das das Minimalziel des Pariser Klimaabkommens zur Begrenzung des globalen und durchschnittlichen Temperaturanstiegs auf (deutlich) unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau erreicht. Es werden sämtliche Straßenfahrzeuge (Pkws, Lkws, Busse, Krafträder, Pedelecs) berücksichtigt, wobei der Fokus auf den Pkws mit einem Rohstoffbedarfsanteil von über 80 % liegt [91]. Ferner wird von einem global wachsenden Fahrzeugabsatzmarkt ausgegangen, der sich bis 2030 auf 131 Mio. in etwa verdoppelt (Bild 24) [92]. Neben der Elektromobilität wird auch der Bedarf sämtlicher weiterer Anwendungen (Stahl, Keramik, Schmuck usw.) prognostiziert und berücksichtigt.

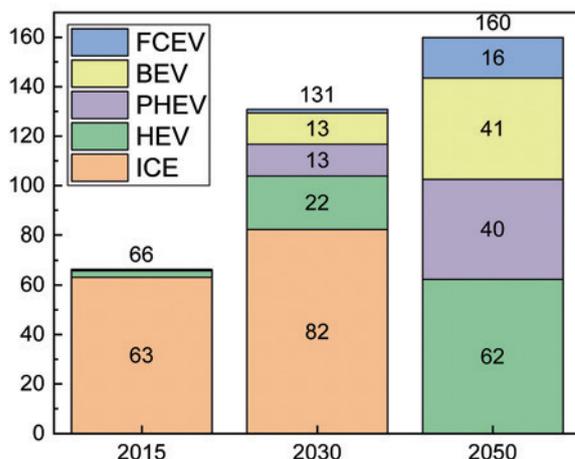


Bild 24. Jährliche Pkw-Verkaufszahlen (in Mio. Fahrzeugen) 2015, 2030 und 2050 für verschiedene Fahrzeugtypen mit Elektroantrieb (Quelle: Universität Hannover in Anlehnung an [92])

Gleichermaßen steigen auch die Batteriekapazitäten zur Erhöhung der Reichweite für BEV-Pkw von 30 kWh Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide (NMC111) im Jahr 2015 auf 50 kWh (NMC622) in den nachfolgenden Stichjahren. Für die anderen Antriebstypen werden konstante Batteriekapazitäten angenommen: HEV mit 1 kWh, PHEV mit 10 kWh, FCEV mit 2 kWh [91].

Unter Berücksichtigung des heutigen Stands der Technik und der absehbaren Entwicklungen wurden für die Elektromobilität Seltenerdmetalle für den Elektromotor, Lithium (Li), Kobalt (Co), Nickel (Ni) und Grafit für die Batterie sowie Platin (Pt) für die Brennstoffzelle als kritische Rohstoffe identifiziert [91]. Einzig Grafit kann bereits heutzutage aus synthetischen Quellen hergestellt werden. Zwar ist der synthetisch hergestellte Grafit teurer als das natürliche Pendant, aber dafür qualitativ hochwertiger. Folglich kann für Grafit von einer sehr unkritischen Rohstoffverfügbarkeit ausgegangen werden [91].

In Elektromotoren werden meist Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten eingesetzt, welche zu ~ 30 % Masse aus Seltenerdmetallen wie Neodym, Dysprosium und Terbium bestehen, die eine vergleichsweise hohe Koerzitivfeldstärke und Wärmebeständigkeit aufweisen [94]. Bei der Förderung von Seltenerdmetallen stellt die Volksrepublik China mit einem monopolartigen Anteil von über 90 % den Hauptlieferanten dar [93], was wiederum bereits zu temporären Verknappungen und gravierenden Preisschwankungen führte [91]. Dies wird durch eine extrem geringe Recyclingrate von nur 10 % unterstützt [95]. Demgegenüber stehen bereits erfolgreich umgesetzte Entwicklungen neuer Magnete mit einer vollständigen Substitution von Dysprosium und Terbium sowie einer Reduzierung von Neodym durch weniger kritische Seltenerdmetalle wie Lanthan und Cer um bis zu 50 % [96]. Ferner wurde bereits eine vollständige Substitution der Seltenerdmetalle in Asynchronmotoren und elektrisch erregten Synchronmotoren in Elektroautos erfolgreich demonstriert [97; 98].

Für alle weiteren oben genannten kritischen Rohstoffe sind die Produktionskapazitäten aus Primär- und Sekundärquellen sowie der jeweilige Bedarf für das Referenzjahr 2015 und die prognostizierten Stichjahre 2030 und 2050 in Bild 25 zusammengefasst.

Allen Rohstoffen gemein ist, dass die derzeitigen Fördermengen den prognostizierten Bedarf nicht decken können. Während für Nickel und Platin langfristig die Fördermengen in etwa verdoppelt werden müssen, entsprechen die prognostizierten Mengen für Lithium und Kobalt bereits einer Erhöhung um den Faktor 17 bzw. 6. Maßgeblich verantwortlich ist der zunehmend dominierende Batteriebedarf.

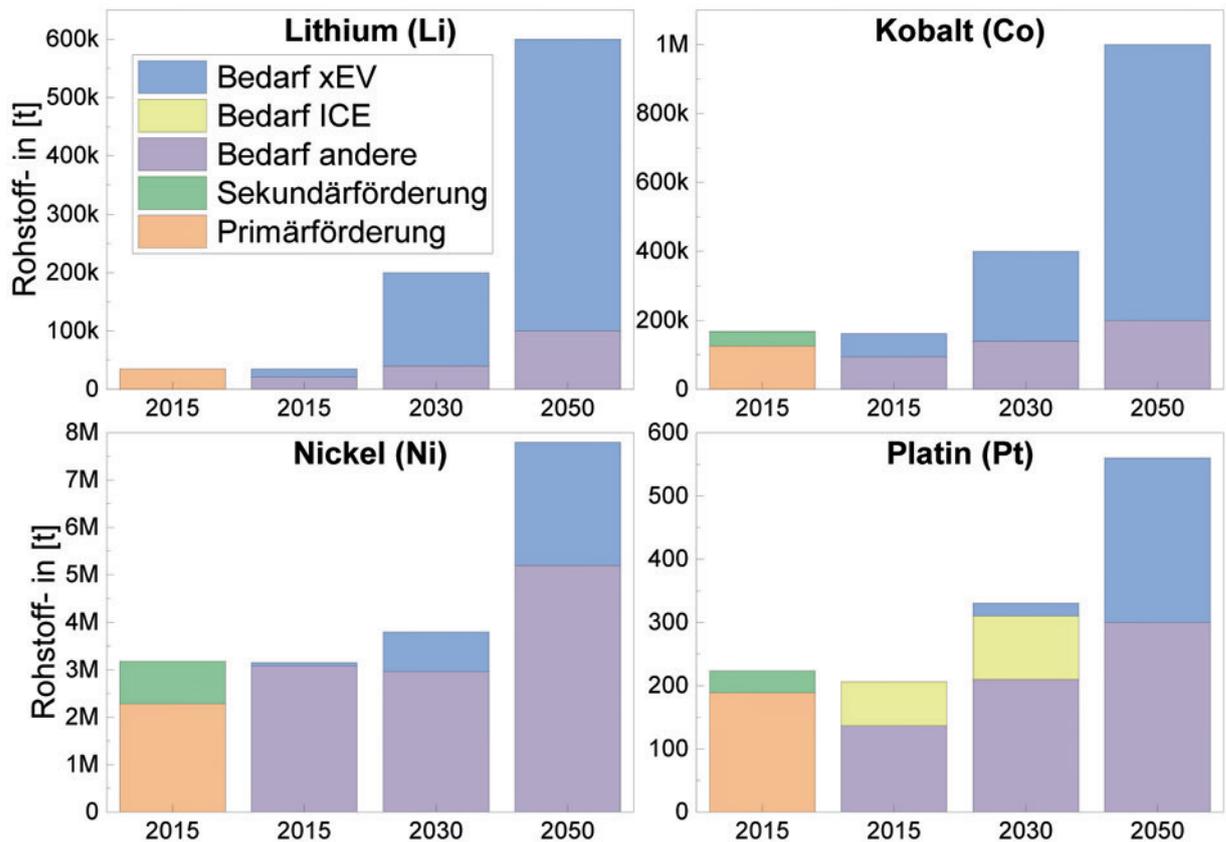


Bild 25. Primär- und Sekundärförderung sowie Bedarf (ICE, xEV und andere Anwendungen) an Li, Co, Ni und Pt im Jahr 2015, 2030 und 2050 (Prognosen nur für Bedarf). (Quelle: Universität Hannover)

Speziell für Lithium kommt erschwerend hinzu, dass es derzeit aus ökonomischen Gründen de facto kein Recycling gibt und sich die Förderung auf die Länder Australien, Chile und Argentinien mit einem Anteil von rund 90 % konzentriert [89; 93].

Kobalt wird zu ~ 98 % als Sekundärmetall bei der Nickel- und Kupferförderung gewonnen, wobei mehr als die Hälfte der Minenproduktion unter teilweise inhumanen Produktionsbedingungen aus der Demokratischen Republik Kongo stammt [93]. Diese beiden Faktoren sorgen tendenziell für ein höheres Risiko an strukturellen und temporären Verknappungen, die sich anscheinend bereits in einem deutlichen Preisanstieg von 50 €/kg auf 75 €/kg innerhalb des letzten halben Jahres widerspiegeln [99]. Im Gegensatz zu Lithium liegt die Recyclingrate für Kobalt bereits auf einem relativ hohen Niveau von über 50 % [95].

Derzeit spielt der Nickel-Bedarf für die Batterieanwendung nur eine untergeordnete Rolle im Vergleich zum dominierenden Edelstahlbereich. Auch wirkt sich eine eher breite, weltweite Verteilung in puncto Primärförderung und Rohstoffreserven sowie eine bereits erreichte Recyclingrate von über 50 % positiv auf die Angebot-Nachfrage-Situation aus [91; 93; 95].

Interessanterweise wird die Rohstoffverfügbarkeit an Platin bzw. Platingruppenmetallen (PGM), inklusive

Palladium und Rhodium, üblicherweise nur im Zusammenhang mit Brennstoffzellen thematisiert, nicht jedoch mit Verbrennungsmotoren (ICEs). Doch werden in der Abgasaufbereitung in einem Otto-Pkw rund 5 g an PGMs (6 % Pt, 89 % Pd, 6 % Rh) bzw. in einem Diesel-Pkw rund 10 g an PGMs (74 % Pt, 22 % Pd, 4 % Rh) verwendet [100]. Dagegen werden in den heute verfügbaren Vorserien- und Kleinserienbrennstoffzellen-Pkws pro Fahrzeug „nur“ 10 g bis 20 g Platin (Pt oder Pt-Legierungen), mit fallender Tendenz, als Elektrokatalysatoren eingesetzt [52; 101]. Als nachteilig bzw. risikobehaftet kann die Konzentrierung sowohl bei der Primärförderung als auch bei den Rohstoffreserven an Platin (und die weiterer PGMs) zu ~ 70 % bzw. ~ 90 % auf Südafrika gesehen werden [93]. Diese monopolartige Stellung wird jedoch durch eine sehr hohe Recyclingrate von über 50 % abgemildert [95].

Bisher lag der Fokus dieser Zusammenfassung auf den Förder- und Bedarfsmengen und soll nun um die jeweiligen Rohstoffreserven und -ressourcen ergänzt werden. In Bild 26 sind die prognostizierten Bedarfsmengen aller Anwendungen inklusive (Elektro-)Mobilität kumulativ bis zum Jahr 2050 gegenüber den Rohstoffreserven und -ressourcen im Referenzjahr 2016 dargestellt. Es zeigt sich, dass insbesondere für Kobalt und Nickel neue Rohstoffreserven erschlossen werden müssen, um Verknappungen vorzubeugen.

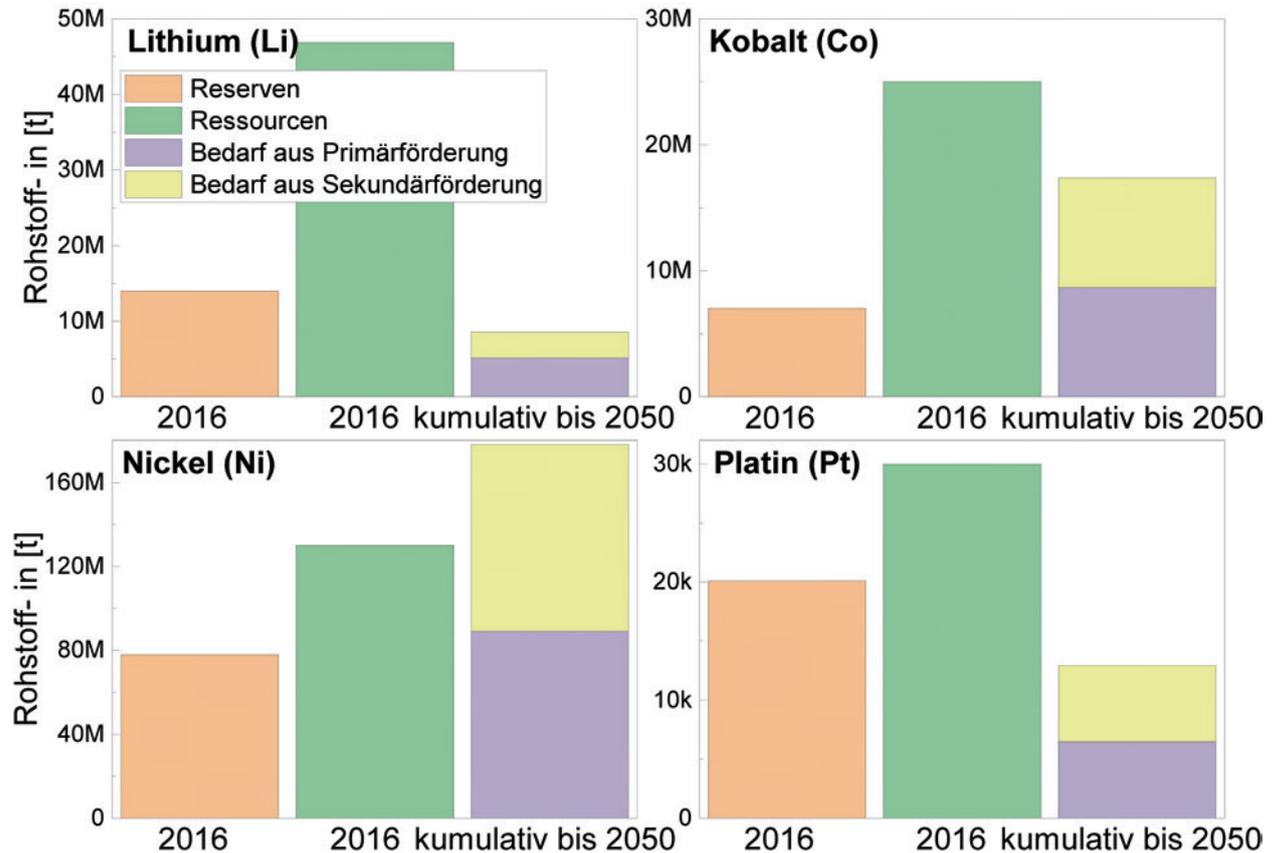


Bild 26. Rohstoffspezifische Reserven und Ressourcen (2016, nach [93]) und kumulativer Bedarf aller Anwendungen inklusive Elektromobilität bis 2050<sup>a)</sup> (Quelle: Universität Hannover)

<sup>a)</sup> abgeleitet von [91] mit heutigen Recyclingraten für Co, Ni und Pt von je 50 % [95] sowie abgeschätzte, zukünftige Recyclingraten für Li von 40 % [91]

Als kleiner Exkurs muss an dieser Stelle auch auf die Wasserstoffherstellung mithilfe der Wasserelektrolyse eingegangen werden. Während alkalische und Hochtemperatur-Elektrolyseure auf PGMs als Elektrokatalysatoren verzichten können, werden in der PEM-Variante Iridium und Platin eingesetzt. Iridium wird ausschließlich als Sekundärmetall zu ca. 4 t pro Jahr gefördert [89] zuzüglich Erzeugnissen aus dem Recycling (Ir-Recyclingrate beträgt 25 % bis 50 %) [95]. Zwar sind bisher keine Verknappungen bekannt, doch könnte sich dies unter Berücksichtigung der Primärförderung und des heutigen Stands der Technik ändern, sobald die Neuinstallationen von PEM-Elektrolyseuren pro Jahr vom derzeitigen zweistelligen MW-Bereich in den einstelligen GW-Bereich anwachsen [102; 103]. Zur langfristigen Vermeidung von Verknappungen sollten daher die Recyclingrate weiter erhöht, die Katalysatorbelastung weiter gesenkt und ultimativ eine Iridium-Substitution angestrebt werden.

#### 4.6 Kosten Pkw (TCO)

##### Kernaussagen

- Die Kosten für die Nutzung von BEV und FCEV als Pkw werden derzeit von den Anschaffungskosten dominiert.
- Die Serienfertigung für Batteriesysteme ist weiter fortgeschritten als die von Brennstoffzellen. Entsprechend ist die Kostenreduktion aktuell deutlich ausgeprägter als bei Brennstoffzellensystemen.
- Bei höheren Energie- bzw. Reichweitenanforderungen ergeben sich Kostenvorteile für das FCEV gegenüber dem BEV. Mit der Aufnahme der Serienfertigung verstärkt sich dieser Effekt.

Ein überschlägiger Vergleich der Nutzungskosten für die Fahrzeuge Toyota Mirai, Tesla Modell S 75 und Nissan Leaf zeigt in Tabelle 5 den derzeit hohen Einfluss der Investitionskosten. Die Anschaffungskosten beziehen sich hierbei auf Tabelle 1, die Verbrauchsdaten entsprechen dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Unter vereinfachenden Annahmen, dass das Fahrzeug über 10 Jahre abgeschrieben wird und ohne Batterie- oder Brennstoffzellenersatz in dieser Zeit 100.000 km fährt, ergeben sich bei einer Fahrleistung von 10.000 km pro Jahr jährliche Kosten zwischen 3.620 Euro und 8.580 Euro. Wie die Tabelle weiterhin zeigt, wäre bei günstigeren Anschaffungskosten für den Toyota Mirai und den hier unterstellten Energiekosten bereits heute annähernd von Kostenparität mit dem Tesla S 75 auszugehen.

Für die Energiekosten des Toyota Mirai wurden in der Vergleichsrechnung ein relativ hoher Wert von 9,5 €/kgH<sub>2</sub> (0,285 €/kWh) unterstellt. Er entspricht den derzeit bestehenden Bezugsbedingungen der Energieagentur NRW für die Betankung an den H<sub>2</sub>-Tankstellen. Wie in Abschnitt 4.4 dargestellt, belaufen sich die H<sub>2</sub>-Gestehungskosten bei Vergasungsprozessen auf nur 2 € / kg ± 30 Cct. Auch unter Berücksichtigung von Handelsspannen sollte sich damit bei einer breiteren Markteinführung ein günstigerer Energiepreis für FCEV erzielen lassen.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass der in der Tabelle 5 genannte H<sub>2</sub>-Preis außer der Mehrwertsteuer keine weiteren Steuern und Abgaben enthält. Inwieweit dieser Ansatz auch bei einer größeren Verbreitung dieser Technik gerechtfertigt ist, muss im Rahmen dieser Untersuchung offen bleiben.

Der genannte Strompreis hingegen entspricht in etwa dem aktuellen Preis für Haushaltskunden. Er beinhaltet alle Steuern und Abgaben.

### Kostenentwicklung

Abschätzungen zeigen, dass ab einer nennenswerten Stückzahl bei FCEV von geringeren Herstellungskosten als bei BEV auszugehen ist. Für Batteriesysteme haben sich die Kosten von 600 €/kWh im Jahr 2010 auf aktuell ca. 200 €/kWh verringert. Die Zellpreise nähern sich damit dank Massenfertigung den Materialpreisen an [104] (Bild 27).

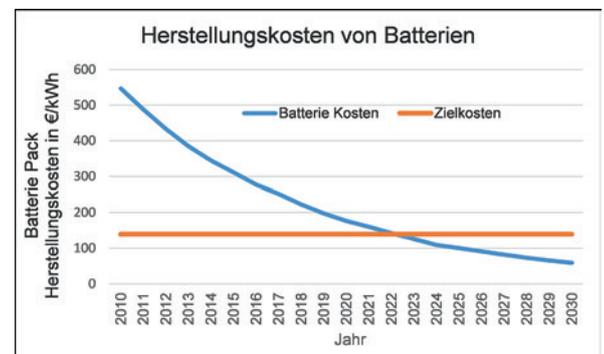


Bild 27. Herstellungskosten von BEV (Quelle: inecs in Anlehnung an [105])

#### Anmerkung

Neuere Informationen aus der Industrie – nicht durch Quellenangaben abgesichert – sprechen dafür, dass die Zellpreise von Batteriekosten heute schon deutlich unter 200 €/kWh liegen. Dies käme einer beschleunigten Markteinführung zugute.

Tabelle 5. Vergleich Jahreskosten von FCEV und BEV (Quelle: Fraunhofer ISE)

	Anschaffung in €	Abschreibung (10 Jahre) in €	Energiekosten in €/kWh	Verbrauch in kWh je 100 km	Energiekosten (10.000 km) in €	Kosten pro Jahr in €
Toyota Mirai	78.600	7.860	0,285 (H <sub>2</sub> )	25,308 (H <sub>2</sub> )	722	8.582
Toyota Mirai (preisreduziert)	71.999	7.200	0,285 (H <sub>2</sub> )	25,308 (H <sub>2</sub> )	722	7.922
Tesla S 75	71.999	7.200	0,296 (el.)	18,500 (el.)	548	7.748
Nissan Leaf	31.950	3.195	0,296 (el.)	14,600 (el.)	432	3.627

Die Kosten für Brennstoffzellensysteme werden laut einer USDOE Analyse bis 2020 auf 47 US\$/kW sinken, wobei eine Aggregatgröße von 80 kW und ein Produktionsvolumen von 100.000 Einheiten pro Jahr unterstellt wird [106]. Für den Wasserstofftank Typ IV – bestehend aus einer inneren Kunststoff-Blase (Liner) zur Gasdichtigkeit mit Composite-Umwicklung, um die Last aus dem Innendruck aufzunehmen – ausgelegt für 700 bar mit einer Kapazität von 5,6 kg (entsprechend etwa 185 kWh) werden in einer anderen Studie weniger als 16 US\$/kWh (also etwa 3000 US\$ für diesen Wasserstofftank) veranschlagt [107].

Wenn für die Komponenten Wandler und Elektromotor von identischen Kosten bei BEV und FCEV ausgegangen wird, lassen sich die Kosten des Batteriesystems mit den Kosten des Wasserstoffsystems vergleichen. Ein 80-kW-Antriebssystem mit einem 5,6 kg Wasserstoffspeicher würde bei einer Produktion von 100.000 Stück pro Jahr 6.744 (US DOE) bzw. 8.000 € an Kosten verursachen, wobei das Fahrzeug über eine Reichweite von mindestens 500 km verfügen würde. Ein gleichwertiges Batteriesystem (vergleichbare Reichweite) würde bei einem Verbrauch von 20 kWh/100 km eine Batteriekapazität von etwa 100 kWh erfordern und bei angenommenen Batteriekosten von 200 €/kWh ca. 20.000 € kosten. Bei einer Reichweite von 200 km würden beide Antriebe die gleichen Kosten haben.

#### Anmerkung

Informationen aus der Industrie stützen diese Abschätzungen. Hiernach ist ab Mitte 2020 von Kostenparität zwischen BEV und FCEV auszugehen. Dies gilt auch unter der Annahme, dass die Batteriekosten weiter abnehmen werden. Bei Hochbodenfahrzeugen wie SUVs wäre aufgrund des höheren spezifischen Energiebedarfs je km und der somit hierfür erforderlichen größeren Batterie die Kostenparität schon bei geringeren Reichweiten erreicht. Bei Flachbodenfahrzeugen (z. B. Coupés) ist wegen der kleineren Batterie im Fahrzeug von einem späteren Zeitpunkt für die Kostenparität auszugehen. Dies unterstützt die Aussage, dass BEV insbesondere im Kurzstreckenverkehr in Ballungsräumen vorteilhafter wären, wohingegen sich FCEV für die Langstrecke qualifizieren.

Für eine umfassende belastbare und vergleichbare Lebenszyklusanalyse, die neben den Kosten auch die Emission oder abiotische Umweltfaktoren berücksichtigt, ist die verfügbare Datenbasis derzeit nicht ausreichend. Energieverbräuche, CO<sub>2</sub>-Emissionen [108] und Kosten für die Herstellung von Li-Ionen-Batterie sind zwar in verschiedenen Publikationen zusammengetragen, über das Recycling ist aber wenig publiziert. Da sich die Annahmen innerhalb der Studien aber teils stark unterscheiden, ist eine Vergleichbarkeit nicht gegeben.

## 5 Forschungsbedarf

Die Analysen im Rahmen der Studie zeigen, dass zu diversen Fragestellungen noch keine ausreichenden Informationen vorliegen oder auch vorliegende Informationen teilweise nicht konsistent sind. Dies spricht für weitergehenden Forschungsbedarf zu folgenden Themen:

- **Peripherie und Antriebsstrang:** BEV genauso wie FCEV verfügen neben dem Antriebsstrang über eine Vielzahl von Nebensystemen (z. B. Ventile, Pumpen), die noch Sonderanfertigungen sind und für die nur wenige Informationen zur Verfügung stehen. Hierzu zählt auch die Herstellung elektrotechnischer Komponenten wie Wandler und Elektromotoren für den Elektroantrieb. Weitere Analyseaktivitäten könnten hierzu Klärung bringen.
- **Batterie:** Die Herstellung von Li-Ionen-Batterien ist relativ aufwendig und der ökologische Vorteil relativiert sich, wenn die bei der Herstellung der Batterie entstehenden Emissionen Berücksichtigung finden. Hierbei sind aber ein Recycling der Batterie sowie technologische Fortschritte – z. B. die Nutzung regenerativer Energiequellen bei der Produktion – noch nicht berücksichtigt. Die Datenlage ist zudem lückenhaft, sodass vorhandene Aussagen nicht gesichert sind. Weitere Untersuchungen zur Verifizierung der Datenlage empfehlen sich.
- **Lebensdauer:** Die Angaben zu den Lebensdauern von BEV und FCEV sind zum Teil noch nicht konsistent. Hier besteht weiterer Bedarf an Forschung und Praxiserfahrungen.
- **Lebenszyklusanalyse:** Es wurden bereits mehrere große Studien zur Analyse des Lebenszyklus bzw. der entsprechenden Betriebskosten von BEV oder FCEV erstellt, die im Rahmen dieser Studie ausgewertet wurden [1; 109; 110]. Die Analyse der Studien hat gezeigt, dass der Fokus der Studien zumeist auf dem Vergleich von BEV oder FCEV mit einem konventionellen Antrieb liegt. Ein direkter Vergleich der beiden Technologien erfolgt nur selten. Hinzu kommt, dass die Studien bei den wichtigen Kenngrößen, z. B. Ermittlung der Treibhausgas-Emissionen und der abiotischen Verarmung, sowie vor allem bei den Betriebskosten zu quantitativ und qualitativ unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Dies liegt hauptsächlich in der Verwendung unterschiedlicher Datenbanken begründet, die für die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse ein wichtiger Baustein sind. Für einen aussagekräftigen Vergleich der Studien müsste eine Angleichung der in den Studien getroffenen Annahmen und verwendeten Datenbanken erfolgen. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass anhand der bestehenden Analysen kein fundierter Vergleich stattfinden kann und hier Forschungsbedarf besteht.
- **Kostensenkung:** Aufgrund des noch bestehenden Optimierungspotenzials und der noch geringen Stückzahlen besteht weiterhin Forschungsbedarf beispielsweise in den Bereichen Materialauswahl, Fertigungstechnologien und Katalysatorbelastung (Platin bei FCEV und Co bei BEV) hinsichtlich einer effizienten Kostensenkung bei Skalierungseffekten.

# Literatur

- [1] Hydrogen scaling up - A sustainable pathway for the global energy transition, HydrogenCouncil November 2017
- [2] Industry Deployed Fuel Cell Powered Lift Trucks, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 17003, 30.04.2017
- [3] Argonne National Laboratory ANL-17/08, The Business Case for Fuel Cells: Delivering Sustainable Value, 7th Edition, 06/2017
- [4] Northeast Electrochemical Energy Storage Cluster NEESC, Webinar Fuel Cells for Forklifts, 20.04.2017
- [5] Connecticut Center for Advanced Technology Inc., Commercialization of Fuel Cell Electric Material Handling Equipment, 04.01.2018
- [6] [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171127\\_FCH2JU\\_BCs%20Regions%20Cities\\_Consolidated%20Tech%20Intro\\_Rev.%20Final%20FCH\\_v11%20%28ID%202910585%29.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171127_FCH2JU_BCs%20Regions%20Cities_Consolidated%20Tech%20Intro_Rev.%20Final%20FCH_v11%20%28ID%202910585%29.pdf)
- [7] Dr. G. Frank: Brennstoffzellentechnologie bei Daimler, Seminar erneuerbare Energien, Uni Karlsruhe, 10.05.2017
- [8] [http://www.fuelcelltoday.com/media/949148/av\\_11-06-08\\_the\\_mercedes\\_f-cell\\_world\\_drive.pdf](http://www.fuelcelltoday.com/media/949148/av_11-06-08_the_mercedes_f-cell_world_drive.pdf)
- [9] [http://www.apta.com/mc/bus/previous/bus2017/presentations/Presentations/Peoples\\_HE%20Christian%20and%20Fecteau\\_Roland.pdf](http://www.apta.com/mc/bus/previous/bus2017/presentations/Presentations/Peoples_HE%20Christian%20and%20Fecteau_Roland.pdf)
- [10] [http://hydrogenvalley.dk/wp-content/uploads/2017/09/FCB-CPH17\\_ELEMENT-ENERGYZero-emission-transportation-for-Europe.pdf](http://hydrogenvalley.dk/wp-content/uploads/2017/09/FCB-CPH17_ELEMENT-ENERGYZero-emission-transportation-for-Europe.pdf)
- [11] [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/2017\\_FCH%20Book\\_webVersion%20%28ID%202910546%29.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/2017_FCH%20Book_webVersion%20%28ID%202910546%29.pdf)
- [12] [http://www.elliptic-project.eu/sites/default/files/PARALLEL\\_1\\_JIVE\\_Enrique%20Giron.pdf](http://www.elliptic-project.eu/sites/default/files/PARALLEL_1_JIVE_Enrique%20Giron.pdf)
- [13] [http://www.cte.tv/wp-content/uploads/2016/12/2\\_Jenne.pdf](http://www.cte.tv/wp-content/uploads/2016/12/2_Jenne.pdf)
- [14] E4tech: The Fuel Cell Industry Review 2017
- [15] International Energy Agency (IEA), Global EV Outlook 2017 – Two million and counting, 2017
- [16] Daten für Deutschland aus Kraftfahrtbundesamt,  
[https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatl\\_neuzulassungen\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatl_neuzulassungen_node.html)  
1, Stand 27.02.2018 (hier: BEV = ZEV), FCEV-Daten teilweise auch aus  
<https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/20966057.html>, Stand 27.02.2018; EU-28 PHEV und BEV (inkl. FCEV) aus  
The International Council on Clean Transportation (ICCT), European vehicle market statistics - Pocketbook 2017/18.
- [17] IEA Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification
- [18] Quellen jeweilige Landeshomepages der Hersteller (Toyota, Nissan) bzw. Zentrale Homepage (Tesla). Währungsrechner:  
<http://www.umrechnungeuro.com/>, Stand 04.05.2018
- [19] Europäisches Parlament, Informationsbüro in Deutschland
- [20] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:DE:PDF>, 20.02.2015
- [21] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2014:103:FULL>, 20.02.2015
- [22] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32014L0094>, 20.02.2015
- [23] <https://www.technik-einkauf.de/news/maerkte-unternehmen/grossbritannien-plant-verkaufsverbot-fuer-diesel-benziner-ab-2040/>
- [24] ZEIT ONLINE, 6. Juli 2017, 16:58 Uhr
- [25] Sofortprogramm Saubere Luft 2017-2020, 28. November 2017
- [26] Elektromobilität - Baustein einer nachhaltigen klima- und umweltverträglichen Mobilität, BMWi, Auguste 2017
- [27] Koalitionsvertrag 2018
- [28] Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 bis 2026 beschlossen, 28. November 2016
- [29] <https://www.gouvernement.fr/en/hydrogen-plan-making-our-country-a-world-leader-in-this-technology-0>

- [30] <https://www.asiafundmanagers.com/china-elektroauto/> (24. September 2017)
- [31] [https://www.japan.go.jp/tomodachi/2016/spring2016/tokyo\\_realize\\_hydrogen\\_by\\_2020.html](https://www.japan.go.jp/tomodachi/2016/spring2016/tokyo_realize_hydrogen_by_2020.html)
- [32] <https://www.smart-energy.com/features-analysis/analysis-ev-charging-stations-japan/>
- [33] <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/elektromobilitaet-us-staedte-koedern-mit-riesen-bestellplan-fuer-e-autos-a-1138940.html>, 16. März 2017
- [34] <https://www.n-tv.de/wirtschaft/kurznachrichten/Autobauer-und-US-Bundesstaaten-werben-fuer-Elektromobilitaet-article20360137.html>, 29. März 2018
- [35] <https://www.fch.europa.eu/page/FCH-value-chain>
- [36] [https://bz.vdma.org/documents/266669/26136325/VDMA%20AG%20BZ%20Branchenf%C3%BChrer%20D%202018\\_1524652028283.pdf/efaeb2d9-90b1-3010-d58f-c9fa9f84fb10](https://bz.vdma.org/documents/266669/26136325/VDMA%20AG%20BZ%20Branchenf%C3%BChrer%20D%202018_1524652028283.pdf/efaeb2d9-90b1-3010-d58f-c9fa9f84fb10)
- [37] <https://www.elektromobilitaet.nrw.de/elektromobilitaet/fahrzeugtechnik>, Elektromobilität NRW, Projektträger ETN
- [38] Wasserstoff im Tank – Sonne im Herzen, H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG
- [39] <https://cleanenergypartnership.de/h2-infrastruktur/betankung>
- [40] [www.planungsgemeinschaft.de/de/planet/Projekte/hyfleetcute.html](http://www.planungsgemeinschaft.de/de/planet/Projekte/hyfleetcute.html)
- [41] <https://cleanenergypartnership.de/home/>
- [42] Michael Stefan, From prototype to serial production - manufacturing hydrogen fuelling stations. In: 20th world hydrogen energy conference. KDJ convention center Gwangju; South Korea; committee of WHEC2014; 615-622, 2014
- [43] Shell Studie, H2 volumetrische Energiedichte
- [44] <http://www.mobilityhouse.com/de/technisches-grundwissen/>, Graphik modifiziert
- [45] Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH (DEW21), eigene Aufnahme
- [46] M. R. Palacín und A. De Guibert, Batteries: Why do batteries fail? Science 351, 1253292 (2016). DOI: 10.1126/science.1253292
- [47] [https://docs.google.com/spreadsheets/d/16kV-\\_d05K9v-VYU8vgnigzvyBuwPwkPFAGSKrtmzw2E/edit#gid=0](https://docs.google.com/spreadsheets/d/16kV-_d05K9v-VYU8vgnigzvyBuwPwkPFAGSKrtmzw2E/edit#gid=0) (Stand 02.2017)
- [48] <https://industrieanzeiger.industrie.de/themen/elektromobilitaet/der-ladestecker-hat-viele-gesichter/#slider-intro-1>
- [49] [https://www.phoenixcontact.com/assets/images\\_ed/global/web\\_content\\_graph/pic\\_con\\_a\\_0047568\\_de.jpg](https://www.phoenixcontact.com/assets/images_ed/global/web_content_graph/pic_con_a_0047568_de.jpg), Stand 14.05.2018
- [50] Hyundai bringt Brennstoffzellen-SUV mit 800 km Reichweite, Ingenieur.de VDI Verlag, 08.03.2017
- [51] Schaufenster Elektromobilität, Fragen rund um das Elektrofahrzeug: Wie kommen die Angaben über den Stromverbrauch und die Reichweite von Elektrofahrzeugen zustande?
- [52] Oliver Gröger, Hubert A. Gasteiger, Jens-Peter Suchsland, Review - Electromobility: Batteries or Fuel Cells?, Journal of The Electrochemical Society, 162 (14) A2605-A2622, 2015.
- [53] Wt.% = Gewichtsprozent, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles>, 2018
- [54] In Anlehnung an Shell Deutschland Oil GmbH, Shell Hydrogen Study – Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2, 2017.
- [55] Quelle: EPA Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2017; Tankvolumen u. Batteriekapazität aus Herstellerangaben Verbrauch berechnet, Tankvolumen (Herstellerang.) – Effizienzwerte aus C. E. Thomas, Fuel cell and battery electric vehicles compared, International Journal of Hydrogen Energy 34, 15, 6005-6020, 2009. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.06.003
- [56] <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/elektromobilitaet/wie-lange-lebt-die-batterie-122421.html>, Detlef Hoffmann, 18.08.2015
- [57] P. Keil, S. Schuster, C.von Lüders, H. Hesse, R. Arunachala, A. Jossen „Lifetime Analyses of Lithium-Ion Batteries“ 3rd Electromobility Challenging Issues Conference, Singapore, 1.-4. December 2015, Peter Keil\*, Andreas Jossen, “Charging

- protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells” *Journal of Energy Storage* 6 (2016) 125–141
- [58] Quellen: G. M. Fetene, S. Kaplan, S. L. Mabit, A. F. Jensen, C. G. Prato, “Harnessing big data for estimating the energy consumption and driving range of electric vehicles“, *Transportation Research D* 54 (2017) 1-11, Abschlussbericht des Projektes CologNE-mobil II der Universität Duisburg-Essen.)
- [59] Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen Article in *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 113(5):396-402 · May 2011 with 22 Reads
- [60] PricewaterhouseCoopers: “Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf die Stromwirtschaft“
- [61] Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie: “Elektromobilität und erneuerbare Energie“
- [62] Siemens: “Technische Schriftenreihe Ausgabe 9“
- [63] [https://www.connect-gp-joule.de/fileadmin/Content/PDF/ABB\\_Datenblatt.pdf](https://www.connect-gp-joule.de/fileadmin/Content/PDF/ABB_Datenblatt.pdf)
- [64] [<https://www.brusa.biz/produkte/ladetechnik/ladegeraete-400-v/nlg664.html>]
- [65] C. E. Thomas, Fuel cell and battery electric vehicles compared, *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 15, 6005-6020, 2009. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.06.003; <https://www.energy.gov/eere/vehicles/avta-electric-vehicle-charging-equipment-evse-testing-data>, Stand 2. Mai 2018; Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. Analyse: »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems, ISBN: 978-3-9817048-9-1
- [66] US-Zyklus EPA steht für Environmental Protection Agency
- [67] CologNE-mobil II, Elektromobilitätslösungen für NRW, Schlussbericht, Fördervorhaben 03EM0610, Modellregion Elektromobilität, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, NOW, Universität Duisburg-Essen
- [68] [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/broschuere-clean-energy-partnership.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/broschuere-clean-energy-partnership.pdf?__blob=publicationFile)
- [69] In Anlehnung an <https://h2.live/>, Stand 14.05.2018, <https://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx>
- [70] <https://h2.live/>, <https://ecomento.de/2018/02/16/wasserstoff-elektroauto-tankstellen-2017-deutschland-europa-welt/>
- [71] H<sub>2</sub> MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, Broschüre „H<sub>2</sub> bringt mich weiter - vorne die Welt hinten nur Wasserstoff“
- [72] Information TU Dortmund, Belastung der Stromnetze durch Elektromobilität, P Nobis, S Fischhaber - Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 2015
- [73] Positionspapier: Elektromobilität braucht Netzinfrastruktur; Netzanschluss und -integration von Elektromobilität; BDEW; Berlin 15.Juni 2017
- [74] Comparative-Analysis-of-Infrastructures, Hydrogen Fuelling and Electric Charging of Vehicles, FZ Jülich, Oktober 2017
- [75] Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz, DVGW-EBI DVGW energie | wasser-praxis, 11/ 2016
- [76] <http://www.hypos-eastgermany.de>
- [77] [https://www.energy-charts.de/energy\\_pie\\_de.htm?year=2017](https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2017)
- [78] Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHPPP), gestartet in 1989
- [79] Shell Wasserstoff-Studie, Energie der Zukunft?, Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzellen und Wasserstoff, Hamburg 2017, [www.shell.de](http://www.shell.de)
- [80] Study on Hydrogen from renewable resources in the EU, Final Report, July 2015
- [81] DLR-PlanDelyKad, Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck, 2014
- [82] IEA Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, 2015 ([www.iea.org](http://www.iea.org))
- [83] IEA Renewable Energy for Industry
- [84] Vattenfall Europe, Stromübertragung im ostdeutschen Verbundnetz der 50Hertz AG
- [85] Monitoringbericht 2017 der Bundesnetzagentur und des Bundeskartellamts
- [86] Bundesnetzagentur: Zahlen zu Redispatch und Einspeisemanagement für 2017, 18.6.2018
- [87] Demonstration im Energiepark Mainz, Kopp et al., *International journal of hydrogen energy* 42 (2017) 13311-13320

- [88] Amory Lovins, The Hydrogen-Powered Future - Harvard Magazine, January-February 2004
- [89] Vogel Business Media, Precious Materials Handbook, Umicore 2013
- [90] Peter C. K. Vesborg, Thomas F. Jaramillo, Addressing the terawatt challenge: scalability in the supply of chemical elements for renewable energy, RSC Advances, 2, 7933–7947, 2012.
- [91] Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, 2017
- [92] International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspectives, 2016
- [93] U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (USGS), Mineral Commodity Summaries 2017, 2017
- [94] Oeko-Institut e.V., Recycling critical raw materials from waste electronic equipment, 2012
- [95] United Nations Environmental Program (UNEP), Recycling rates of metals – a status report, 2011
- [96] Toyota, Development of “Nd-reduced heat-resistant magnet” - 20-50% reduction of neodymium. Präsentation vom 20.02.2018
- [97] European Commission, Joint Research Centre, Directorate for Energy, Transport & Climate and Oeko-Institut e.V., Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies: lighting, wind turbines and electric vehicles, 2016
- [98] Honda, Pressemitteilung vom 12. Juli 2016, Daido Steel and Honda Adopt World's First Hybrid Vehicle Motor Magnet Free of Heavy Rare Earth Elements, <http://world.honda.com/news/2016/4160712eng.html>, Stand: 02.03.2018
- [99] <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/cobalt/6-month/>, Stand 25.04.2018
- [100] U.S. Department of Energy (DOE), DOE EERE Program Record, Platinum Group Metals (PGM) for light-Duty Vehicles, 2016
- [101] Automotive Fuel Cell Cooperation (AFCC), <https://www.afcc-auto.com/company/about-us/>, Stand 02.03.2018
- [102] U. Babic, M. Suermann, F. N. Büchi, L. Gubler, T J. Schmidt, Journal of The Electrochemical Society, 164 (4) F387-F399 (2017)
- [103] M. Bernt, A. Siebel, H. A. Gasteiger, Journal of The Electrochemical Society, 165 (5) F305-F314 (2018)
- [104] L. Ellingsen, b. Singh, G. Majeau-Bettez, A. Srivastava, „Life cycle assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack“, Journal of Industrial Ecology, October 2013, DOI: 10.1111/jiec.12072
- [105] <https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/electric-cars-battery-life-materials-cost#.W2ARKcIyXyN> (Union of concerned scientists), Download 27.7.2017
- [106] [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007\\_fuel\\_cell\\_system\\_cost\\_2017.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007_fuel_cell_system_cost_2017.pdf)
- [107] <https://www.osti.gov/servlets/purl/1343975>
- [108] Opportunities and challenges for electric mobility: an interdisciplinary assessment of passenger vehicles;
- [109] THELMA project; Final report. ETH-Zürich, EMPA, PSI; Nov. 2016
- [110] Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen, IFEU, 2016
- [111] Cradle-to-Grave Lifecycle analysis of U.S. light-duty vehicle-fuel pathways, Argonne National Laboratory, 2016
- [112] <https://www.volvocars.com/at/volvo/unsere-innovationen/drive-e>
- [113] <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/auto-von-morgen/handelsblatt-autogipfel-volkswagen-kuendigt-das-ende-des-verbrennungsmotors-an/23715746.html?ticket=ST-72440-Waoae4ImWpPQOjNoUED2-ap5>
- [114] NOW-GmbH (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (<https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/minister-dobrindt-unterstuetzt-ausbau-des-tankstellennetzes-in-deutschland>), abgerufen 21.01.2019

## Der VDI

### **Sprecher, Gestalter, Netzwerker**

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 150.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Als Sprecher der Ingenieure und der Technik gestalten wir die Zukunft aktiv mit. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.





VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.  
Technik und Gesellschaft  
Dr.-Ing. Eleni Konstantinidou  
Tel. +49 211 6214-219  
[geu@vdi.de](mailto:geu@vdi.de)  
[www.vdi.de](http://www.vdi.de)

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Energietechnische Gesellschaft (ETG)  
Dr.-Ing. Thomas Benz  
Telefon: +49 69 6308-346  
[etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)  
[www.vde.com/etg](http://www.vde.com/etg)