

Energiewende im Verkehr: Welche Auswirkungen haben Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge auf das Energiesystem?

Turning around the transport sector: What effects do battery and fuel cell vehicles have on our energy system?

Oliver Arnhold, Hanna Decker, Birgit Schachler, Marlon Fleck, Dr. Kathrin Goldammer

Die Energiewende im Verkehrssektor steckt noch in den Kinderschuhen. Die möglichen Antriebskonzepte reichen von Batterie- (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) bis hin zu synthetischen Kraftstoffen. Die Analysen des Reiner Lemoine Institutes zeigen, dass die zwei wichtigsten Technologien – batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge – jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben. In einem (lokalen) Zukunftsszenario mit 100 % BEV sind die Mobilitätskosten niedrig, während die Netz-Anschlussleistung sehr hoch ist, im Szenario mit 100 % FCEV ist es eher umgekehrt. Auf ganz Deutschland bezogen fällt der Strommehrbedarf im ersten Szenario deutlich geringer aus als im zweiten Szenario, was sich aus der Effizienz der FCEV-Technologie ergibt. Zu beachten ist jedoch, dass hier deutlich weniger zusätzliche Speicher erforderlich sind; FCEV ist somit die flexiblere Technologie. Eine Koexistenz beider Fahrzeugtechnologien scheint daher für die Einbindung des Verkehrssektors in ein Erneuerbares Energiesystem vorteilhaft.

The transition of the transport sector is still at its beginning. There are various possible driving concepts, for instance battery electric vehicles (BEV), fuel cell electric vehicles or synthetic fuels. Investigations by Reiner Lemoine Institut (RLI) show that all of these technologies have specific advantages and disadvantages. In local future scenarios with 100 % BEV, mobility costs are low, but the net power of grid connection is high. In a scenario with 100 % FCEV, mobility costs are high and the net power of grid connection is low. Furthermore, in a national analysis, the additional demand of power is much smaller in the first than in the second scenario, resulting from the FCEV's efficiency. Nevertheless, the need for additional storage is much smaller in the 100 % FCEV scenario, demonstrating this technology's flexibility. Consequently, it seems useful to integrate both technologies into a future transport system.

1 Einleitung

In der politischen Diskussion um die Zukunft der Mobilität tut sich gerade einiges. Politikerinnen und Politiker aller Länder sind mit Blick auf den Klimaschutz vorgeprescht und haben sich in Paris das ehrgeizige 1,5-Grad-Ziel gesetzt. In der konkreten Umsetzung sieht es jedoch noch ganz anders aus: Der Klimaschutzplan 2050 – Vorzeigeprojekt von Bundesumweltministerin Barbara Hendricks – wird in der Abstimmung zwischen den Ministerien aufgeweicht. Ein konkretes Ziel bezüglich mehr Elektrofahrzeuge ist nicht mehr vorhanden [1]. Auch andere Klimaziele für einzelne Sektoren wie Industrie, Gebäude, Verkehr oder Landwirtschaft sind gestrichen worden.

Doch allein die Stromerzeugung auf Erneuerbare Energien umzustellen, reicht nicht aus: Bei der Transformation unseres Energiesystems müssen sämtliche Sektoren – darunter auch Verkehr und Wärme – berücksichtigt werden, wenn das 1,5-Grad-Ziel der Vereinten Nationen und die Klimaschutzziele der Bundesregierung erreicht werden sollen.

Wir wollen in diesem Beitrag einen Blick auf den Verkehrssektor richten. Knapp 30 Prozent des nationalen Endenergiebedarfs entfallen auf den Verkehrssektor – davon basieren mehr als 90 Prozent auf Erdöl [1]. Die Energiewende im Verkehrssektor steckt also noch in den Kinderschuhen. Und die einzige sichtbare Maßnahme der Bundesregierung, der sogenannte „Umweltbonus“ für den Kauf von Elektrofahrzeugen, Plug-In-Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen, ist eher ein Tropfen auf den heißen Stein: Seit seiner Einführung Anfang Juli wurde der Umweltbonus nur 3.000 Mal beantragt [2]. Im gleichen Zeitraum wurden in Deutschland mehr als 520.000 neue PKW zugelassen [3].

Die Dekarbonisierung des Verkehrs kann durch verschiedene Technologien erreicht werden, die sich in Kraftstoffart und Tankverhalten unterscheiden. Im Folgenden werden wir aufzeigen, welchen Einfluss batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) auf den nötigen Ausbau Erneuerbarer Energien, Speicher und Netze haben. In einer lokalen Analyse wird zunächst per Computersimulation eine Autobahntankstelle betrachtet, an der Fahrzeuge beider Technologien tanken. In einem Optimierungsverfahren werden dann Kombinationen von Tankstellentopologie, Energiebezug, Betriebsstrategie sowie demjenigen Anteil an FCEV identifiziert, deren Stromnetzbelastung und Treibstoffkosten minimal sind. Im Anschluss werden in einer nationalen Analyse die Auswirkungen der Verkehrswende im Individualverkehr auf den Ausbaubedarf an Erneuerbaren Energien und Speichertechnologien bei einer vollständig auf regenerativen Energien basierenden Stromversorgung untersucht.

2 Lokale Analyse: die Tankstelle der Zukunft

2.1 Methodik

Aus realen Messdaten des Kraftstoffabsatzes einer Autobahntankstelle wird eine Abschätzung über das Aufkommen an Autos über ein gesamtes Jahr in halbstündlicher Auflösung

generiert. Die Fahrzeuge teilen sich auf in BEV und FCEV. In einem Optimierungsprozess wird das Tankstellensystem ausgelegt, der Anteil an FCEV an den zu betankenden Fahrzeugen ist dabei Teil der Optimierung. Der Wasserstoff für die FCEV wird vor Ort durch Elektrolyse erzeugt. Die zu optimierenden Komponenten der Tankstelle sind jeweils die Größe von Elektrolyseur, Wasserstoffspeicher und Batterie. Die zugebaute Leistung an Photovoltaik (PV)- und Windkraftanlagen ist ebenfalls variabel. Die Komponenten der Tankstelle sind in Abbildung 1 dargestellt. Außerdem werden Parameter für die Betriebsstrategie der Tankstelle optimiert, welche in Abhängigkeit vom Strompreis und der Speicherfüllstände Kosten reduziert und das Stromnetz entlastet.

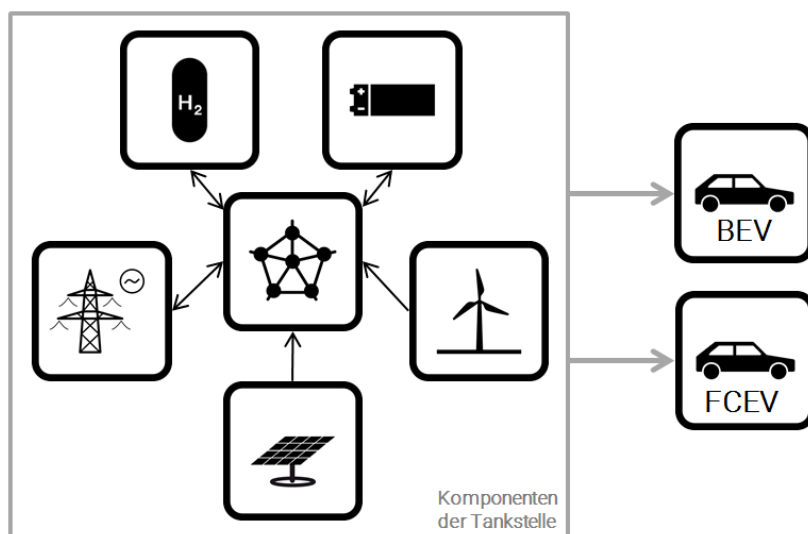


ABBILDUNG 1 Die Tankstelle der Zukunft besteht aus Wind- und PV-Anlagen, stationären Batterien, Elektrolyseuren sowie einem Netzanschluss.

2.2 Ergebnis: BEV bieten niedrige Mobilitätskosten, FCEV geringe Leistungsspitzen im StromnetzDauer der tVK

Da die Optimierungsziele Kosten und Netzbelastung in Konflikt zueinander stehen, bildet sich eine Paretofront aus. Die Punkte auf der Paretofront können in einem Optimierungsziel nicht verbessert werden, ohne sich in mindestens einem anderen zu verschlechtern. Es gibt folglich nicht ein einziges Optimum, sondern eine weitere Betrachtung ist notwendig, um geeignete Punkte für die Auslegung einer Tankstelle zu identifizieren.

Eine Gegenüberstellung der Optimierungsziele „Mobilitätskosten“ und „Lastspitze des Stromnetzes“ (siehe Abbildung 2) zeigt, dass die niedrigsten Mobilitätskosten für ein Szenario mit ausschließlich BEV erreicht werden (3,48 €/100 km). Gleichzeitig ist hier die benötigte Anschlussleistung des Stromnetzes jedoch sehr hoch (7,16 MW). Eine leichte Erhöhung der Mobilitätskosten (4,26 €/100 km) erlaubt den Zubau von stationären Batteriespeichern, in der Folge können die Lastspitzen des Stromnetzes deutlich reduziert werden (4,48 MW). Sollen ab diesem Punkt die Lastspitzen weiter reduziert werden, bildet der Aufbau von Wasserstoffkomponenten das Kostenoptimum. In einem Übergangsgebiet lassen sich mit steigendem Anteil von FCEV die Lastspitzen weiter reduzieren. Bei einem Anteil von 59 % FCEV ergeben sich Mobilitätskosten von 5,65 €/100 km und eine Lastspitze von 4,16 MW. Die niedrigste Lastspitze (2,06 MW) wird bei einem Anteil von 100 % FCEV erreicht – die Mobilitätskosten betragen dann 7,06 €/100 km.

Sowohl hohe Leistungen am Netzanschluss von mehr als 7 MW als auch hohe Mobilitätskosten von mehr als 7 €/100 km (ohne Margen für den Betreiber und Steuern) sind in der Praxis vermutlich nicht relevant. Eine hybride Autobahntankstelle mit Schnellladesäulen für Batteriefahrzeuge sowie einer Onsite-Wasserstoffproduktion zur Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen kann sich effizient in ein Erneuerbares Energiesystem einbinden.

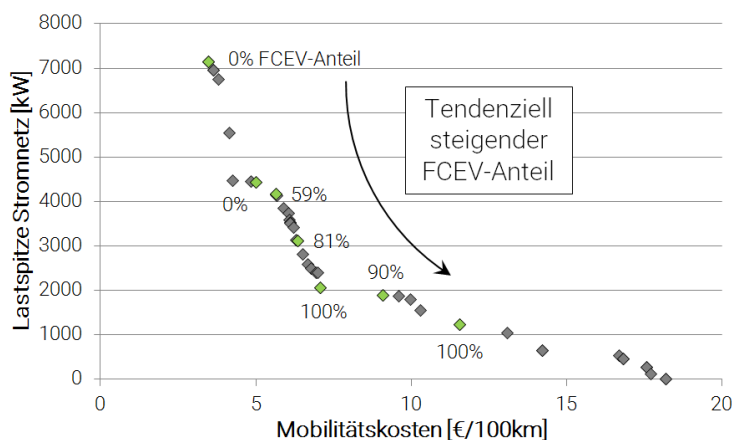


ABBILDUNG 2 Paretofront der Optimierungsziele "Mobilitätskosten" und "Lastspitze Stromnetz": 100 % BEV bieten die niedrigsten Mobilitätskosten, 100 % FCEV die geringste Lastspitze. Eine hybride Tankstelle für die Batterie- und Wasserstoffmobilität scheint einen guten Kompromiss zu bilden.

3 Nationale Analysen

3.1 Methodik

In der nationalen Analyse werden die Auswirkungen der Verkehrswende im Individualverkehr auf den Ausbaubedarf an Erneuerbaren Energien und Speichertechnologien bei einer vollständig auf regenerativen Energien basierenden Stromversorgung untersucht. Das verwendete Modell führt dazu eine gekoppelte Betrachtung der Sektoren Strom und Mobilität in Deutschland durch. Der Ausbau sowie Einsatz der Erzeugungsanlagen und Speicher werden für verschiedene Marktdurchdringungen von Elektro- und Wasserstoffmobilität auf geringste volkswirtschaftliche Gesamtkosten hin optimiert. In der Berechnung werden Photovoltaik-, Windkraft-, Laufwasser-, Geothermie- und Biomassekraftwerke sowie Batterie- und Pumpspeicher als auch die Power-to-Gas-Technologien berücksichtigt. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien ist dabei durch Potenzialgrenzen beschränkt. Restriktionen des Stromnetzes werden zunächst nicht berücksichtigt.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Stromnachfrage ohne Sektorkopplung nicht ändert. Die durch die BEV und FCEV stündlich anfallende Last muss prognostiziert werden. Ladeprofile der BEV werden dazu auf der Basis von Annahmen zu jährlich durchschnittlich zurückgelegten Kilometern, Lademöglichkeiten, Wegzweck und damit einhergehend Fahrtdauer, Geschwindigkeit und Distanz etc. erstellt. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass die Ladung der BEV eine gewisse zeitliche Verschiebung von maximal vier Stunden erlaubt. Grundlage für die Tankprofile der FCEV sind die Tankstellenprofile aus dem lokalen Szenario.

3.2 Ergebnisse: FCEV-Fahrzeuge verringern Bedarf an Speichern

Eine vollständige Durchdringung mit BEV hat einen zusätzlichen Strombedarf von etwa 90 TWh zur Folge. Dem gegenüber steht ein Mehrbedarf an Strom von 253 TWh bei einem vollständigen Einsatz von FCEV. Dieses Ergebnis ist durch den geringeren Wirkungsgrad der Brennstoffzellen und Umwandlungsverluste bei der Elektrolyse zu erklären und hat einen stärkeren Ausbaubedarf an Erzeugungskapazitäten zur Folge. Interessant ist jedoch, dass die zusätzliche Erzeugung nicht proportional mit dem Bedarf ansteigt, sondern, wie in Abbildung 3 verdeutlicht, trotz eines 2,8-fachen Mehrbedarfs an Energie der FCEV gegenüber den BEV nur um das 1,8-fache (130 TWh für BEV und 233 TWh für FCEV) ansteigt. Dies begründet sich dadurch, dass die Wasserstoffherzeugung und -abnahme durch günstige und effiziente Wasserstoffspeicherung zeitlich verschoben werden können, während der Bedarf der BEV lediglich zeitlich begrenzt verschoben werden kann. Für die Elektrolyse können somit zu einem großen

Anteil Überschüsse aus Erneuerbaren Energien genutzt werden, während BEV auch in Zeiten negativer Residuallast eine Must-run-Kapazität darstellen. Die zusätzliche Flexibilität der Wasserstoffmobilität kann einen so großen Einfluss auf das Energiesystem haben, dass die benötigte Leistung stationärer Speicher unter das Niveau in einer reinen „Stromwende“ ohne Verkehr sinkt (siehe Abbildung 3).

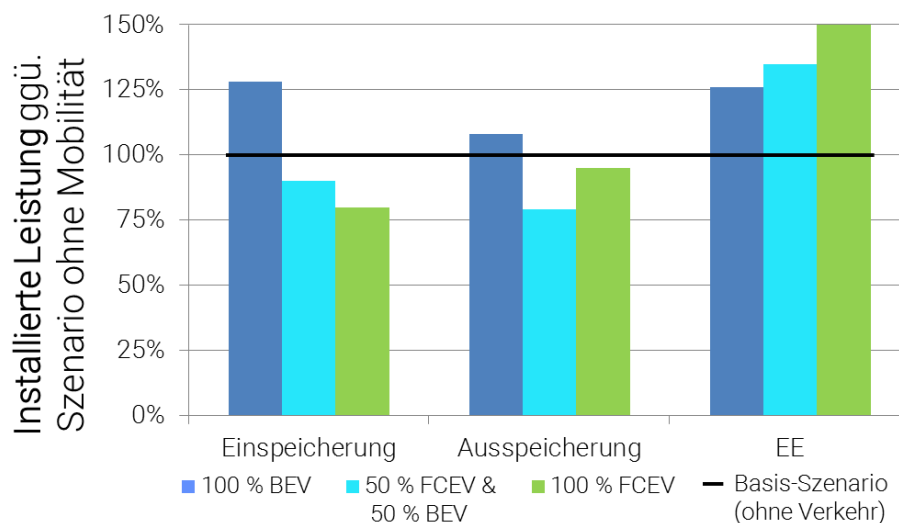


ABBILDUNG 3 Ein 100%-BEV-Szenario benötigt den geringsten Zubau Erneuerbarer Energien, benötigt jedoch zusätzliche stationäre Speicher im Energiesystem. Sowohl im Szenario mit 100 % FCEV als auch im gemischten Szenario werden deutlich weniger zusätzliche Speicher benötigt als im Base-Szenario.

Dem Vorteil der größeren zeitlichen Flexibilität und damit geringeren Backup-Leistungsbedarf der FCEV steht allerdings der Nachteil der geringen Effizienz gegenüber. Entscheidend für eine technisch und volkswirtschaftlich sinnvolle Verkehrswende ist daher die optimale Nutzung der Vorteile beider Technologien. Dass dies möglich ist, zeigt das Szenario mit einem Anteil von 50 % BEV sowie 50 % FCEV. Die benötigte Leistung aus Erneuerbaren Energieanlagen nimmt gegenüber dem Szenario mit 100 % BEV lediglich geringfügig zu, während der Speicherbedarf deutlich gesenkt werden kann (siehe Abbildung 3). Auch die Überschüsse und Verluste werden gegenüber dem Szenario ohne Mobilität verringert (siehe Abbildung 4).

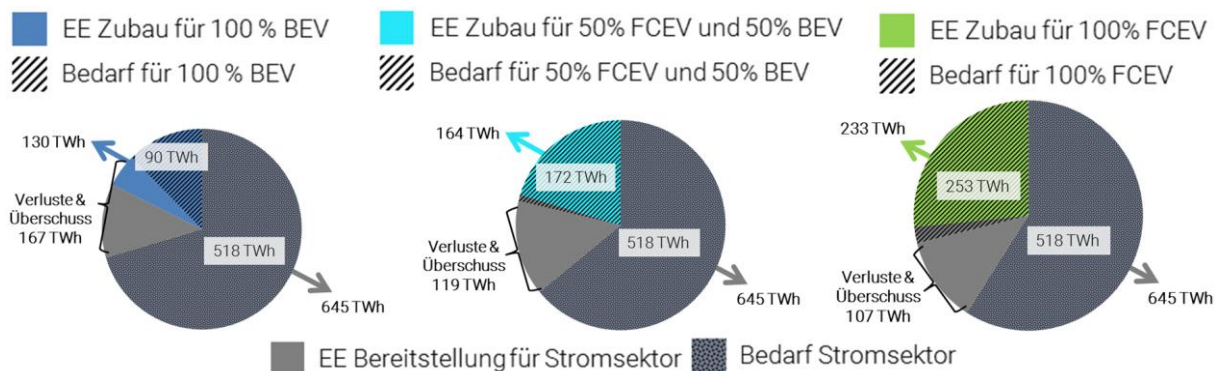


ABBILDUNG 4 Der zusätzliche Energiebedarf steigt bei 100 % BEV um 90 TWh, bei 100 % FCEV um 253 TWh.

4 Fazit und Ausblick

Die Analysen des Reiner Lemoine Institutes zeigen, welche Auswirkungen die beiden untersuchten Technologien – batterieelektrische und Wasserstofffahrzeuge – auf das Energiesystem haben. In einer lokalen Analyse an einer Autobahntankstelle sind im Szenario mit 100 % BEV die Mobilitätskosten niedrig, während die Netz-Anschlussleistung sehr hoch ist, im Szenario mit 100 % FCEV ist es eher umgekehrt. Eine hybride Tankstelle zur gleichzeitigen Versorgung von BEV und FCEV scheint daher ein guter Kompromiss zu sein, weil beide Technologien ihre Vorteile in einem Erneuerbaren Energiesystem ausspielen können.

FCEV benötigen deutlich mehr Energie als BEV, was sich aus der geringeren Effizienz der FCEV-Technologie sowie der Wasserstoffherstellung ergibt. Volkswirtschaftlich gesehen wird dieser technische Nachteil durch die Möglichkeit, sonst ungenutzte Überschüsse der Erneuerbaren Energie verwerten zu können, reduziert. Außerdem werden durch die zeitlich flexiblen Einsatzmöglichkeiten der Wasserstofftechnologie weniger Speicher im Stromsystem benötigt.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass es einen betriebs- und volkswirtschaftlich optimalen Anteil an BEV- und FCEV-Fahrzeugen gibt, bei dem die Kosten für alle Beteiligten am geringsten sind. Das RLI bereitet dazu aktuell ein entsprechendes Forschungsprojekt mit dem Titel „Zukünftiger Straßenverkehr im Kontext des Energiesystems (ZUSE)“ vor. Wie anfangs erwähnt, müssen für eine gelungene Transformation unseres Energiesystems alle Sektoren berücksichtigt werden. Der Wärmesektor muss zukünftig also ebenfalls in den Fokus von Analysen rücken.

Literaturhinweise

[1] Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. BMUB-Hausentwurf vom 06.09.2016. S. 38. <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/klimaschutzplan-2050/>

[2] Breitinger, Matthias: Ach, Sie wollen gar keine Kaufprämie? In: ZEIT Online vom 02.09.2016. <http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-09/elektroauto-kaufpraemie-amt-fehlendes-interesse>

[3] Kraftfahrt-Bundesamt, Pressemitteilung Nr. 23/2016 - Fahrzeugzulassungen im Juli 2016. http://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2016/Fahrzeugzulassungen/pm23_2016_n_07_16_pm_komplett