



Gefördert durch die
ADAC Stiftung

Infrastrukturbedarf E-Mobilität

**Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von
Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland**

Kurzbericht zum Forschungsprojekt der Ludwig-Bölkow-Stiftung
gefördert durch die ADAC Stiftung

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht den Infrastrukturbedarf sowie die Rückwirkungen auf das deutsche Energiesystem und die Stromverteilnetze, die durch eine Einführung von insgesamt 40 Millionen Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw bis 2050 entstehen. Dafür werden drei Szenarien mit unterschiedlichen Anteilen von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw betrachtet. Im Szenario Fokus BEV werden 80 % der 40 Millionen Nullemissions-Pkw batterieelektrisch angetrieben und 20 % verfügen über einen Brennstoffzellenantrieb. Im Szenario Fokus FCEV sind es 80 % Brennstoffzellen- und 20 % Batterie-Pkw. Eine Gleichverteilung beider Technologien wird in einem dritten Szenario Mix zugrunde gelegt.

Im Rahmen der Studie werden einzelne Bestandteile des Energiesystems zunächst getrennt voneinander mit einer jeweils dafür geeigneten Methodik betrachtet. Die separaten Analysen der Lade- und Betankungsinfrastruktur, des Nieder- und Mittelspannungs-Stromverteilnetzes und des übrigen Energiesystems für Energieerzeugung, -wandlung, -speicherung und -transport werden für eine Einordnung der ökonomischen Einzelergebnisse anschließend in einer Gesamtbetrachtung zusammengeführt.

Lade- und Betankungsinfrastruktur

Zunächst wurde der Bedarf an Lade- und Betankungsinfrastruktur zur Versorgung der Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge ermittelt und ökonomisch bewertet. Für die batterieelektrischen Fahrzeuge werden basierend auf den Annahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) bis zum Jahr 2050, abhängig vom Szenario, zwischen 9,6 Millionen (Fokus FCEV) und 38,4 Millionen (Fokus BEV) Ladepunkte benötigt. Die damit verbundenen jährlichen Kosten für Wartung, Instandhaltung und Investitionsabschreibung liegen zwischen 2 Mrd. € im Fokus FCEV Szenario und knapp 9 Mrd. € im Fokus BEV Szenario. Die Szenarien basierte Abschätzung zur Versorgung der Brennstoffzellen-Pkw ergibt einen Bedarf von rund 2.000 (Fokus BEV) bis rund 6.000 (Fokus FCEV) Wasserstofftankstellen, im letzteren Szenario mit höherer Betankungskapazität. Die entsprechend ermittelten jährlichen Kosten für die Wasserstoffbetankungsinfrastruktur inklusive der Anlieferung des Wasserstoffs betragen zwischen 1 Mrd. € (Fokus BEV) und 3,7 Mrd. € (Fokus FCEV).

Nieder- und Mittelspannungsnetz

Die Betrachtung der Rückwirkungen der jeweiligen Lade- und Betankungsvorgänge auf das Stromverteilnetz zeigt, dass sowohl eine große Anzahl an Batterie- als auch an Brennstoffzellen-Pkw grundsätzlich integriert werden können. Dazu müssen aber Teile der Mittel- und Niederspannungsnetze für die Aufnahme einer hohen Anzahl an Batterie-Pkw rechtzeitig und systematisch überprüft und ertüchtigt werden. Dieser Aufwand kann ggf. durch innovative Ansätze, wie z.B. ein geeignetes Management der Ladepunkte, verringert werden, wenn diese Maßnahmen ebenfalls zeitgerecht und in ausreichendem Umfang umgesetzt werden.

Der erforderliche Ertüchtigungsbedarf unterscheidet sich sowohl regional aufgrund unterschiedlicher Netzstrukturen im Bestand wie auch zwischen den Spannungsebenen. Beispiele möglicher Maßnahmen reichen dabei vom klassischen Netzausbau durch Verstärkung von Leitungen und Transformatoren bis zur Einführung von Lademanagementsystemen. Insgesamt ist der Handlungsbedarf in der Niederspannungsebene höher als in der Mittelspannungsebene, kann in den Szenarien Mix und Fokus FCEV aber generell geringer angesetzt werden als im Fokus BEV Szenario. Folgen unzureichender Anpassungsmaßnahmen können thermische Überlastungen von Transformatoren oder Kabeln, Verletzungen des Spannungsbandes und des (N-1)-Kriteriums oder Phasenunsymmetrien sein. Die Ursachen für die notwendige Ertüchtigung und die benötigten Maßnahmenumfänge hängen jeweils von den lokalen Rahmenbedingungen, insbesondere von der bestehenden Stromnetzstruktur ab. Des Weiteren haben die Ladeleistung der Batterie-Pkw, die Gleichzeitigkeit der einzelnen Ladevorgänge sowie die Entwicklung des sonstigen Strombedarfs (z.B. auch durch den zunehmenden Einsatz elektrischer Wärmepumpen) einen Einfluss auf den Netzertüchtigungsbedarf. In

Summe ergibt sich ein umfassender Aufwand für die Ableitung und Analyse von Maßnahmen zum Ausbau und zur Optimierung der Netze, der von den Verantwortlichen frühzeitig zu veranlassen ist.

Die Analysen erfolgten für ausgewählte Netzstrukturen und unter Verwendung von Daten der beteiligten Regionen. Die Erkenntnisse können zwar prinzipiell auf ähnliche Netzstrukturen übertragen werden, eine individuelle Netzanalyse und -planung ist aber in jedem Fall unverzichtbar und eine Skalierung auf größere Netzstrukturen erfordert weitere Untersuchungen. Die Auswirkungen von Lade- und Betankungsinfrastrukturen auf das Stromverteilnetz sowie der tatsächliche Ertüchtigungsbedarf müssen daher frühzeitig für jedes Netz individuell ermittelt werden und erfordern jeweils eine fallspezifische Betrachtung der lokalen Gegebenheiten. Fehlen solche individuellen Analysen, ist eine verzögerte, ungenügende oder nicht bedarfsgerechte Netzertüchtigung wahrscheinlich. Mögliche Folgen wären erhöhte Kosten durch zu späte oder ineffiziente Maßnahmen und eine Verzögerung bei der Verbreitung emissionsfreier Batterie-Pkw. Um zielgerichtete Analysen effizient zu ermöglichen, sind verlässliche Rahmenbedingungen vor allem auch bezüglich der Verbreitungsgeschwindigkeit und der jeweiligen Anteile von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen eine wichtige Grundlage. Der Betrieb von Wasserstofftankstellen (ohne Elektrolyse vor Ort) hat dabei keinen entscheidenden Einfluss auf das Stromverteilnetz. Bei entsprechender Planung und rechtzeitiger Ertüchtigung stellt der daraus resultierende Aufwand im Stromverteilnetz insgesamt kein grundsätzliches Hindernis bei der konsequenten Verbreitung von Nullemissions-Pkw dar. Im Gegenzug kann Wasserstoffmobilität sogar dazu beitragen, die Ausbauanforderungen zu reduzieren.

Übriges Energiesystem

Eine Betrachtung des übrigen deutschen Energiesystems, d.h. Energieerzeugung, -wandlung, -speicherung und -transport, zeigt, dass in etwa vergleichbare Kosten für die Energieversorgung sowohl für eine hohe Anzahl an Batterie- als auch an Brennstoffzellenfahrzeugen anfallen. Im Fall einer hohen Zahl von Brennstoffzellenfahrzeugen (Szenario Fokus FCEV) entstehen gegenüber dem Szenario mit dem Schwerpunkt Batteriefahrzeuge (Szenario Fokus BEV) zusätzliche Kosten für die zur Wasserstoffherstellung erforderlichen erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten. Der erzeugte Wasserstoff kann dann aber perspektivisch kostengünstig gespeichert und in Rohrleitungen transportiert werden. Im Gegensatz dazu reduziert eine hohe Anzahl an Batteriefahrzeugen (ggü. Brennstoffzellenfahrzeugen) aufgrund der höheren Fahrzeugeffizienz die direkte Energienachfrage aus dem Pkw-Sektor. Um elektrische Energie und Leistung auch zukünftig weitgehend wetterunabhängig, und damit unabhängig von der Stromerzeugung aus Wind und Sonne, für Batteriefahrzeuge bereitzustellen, sind in diesem Fall aber zusätzliche stationäre Speicherkapazitäten in Form von Batteriespeichern für Leistungsspitzen und von Wasserstoffspeichern für die Bereitstellung entsprechender Energiemengen notwendig. Dies wiederum führt hier zu zusätzlichen Kosten. Die unterschiedliche Effizienz von Brennstoffzellenfahrzeugen und Batteriefahrzeugen spielt also aus Sicht des übrigen Energiesystems für die hier resultierenden Kosten keine entscheidende Rolle.

Gesamtbetrachtung

Mittelfristig zeigt die Gesamtbetrachtung von Lade- und Betankungsinfrastruktur, Stromverteilnetzen und dem übrigen Energiesystem in Summe leichte Kostenvorteile für das Szenario mit hohem Anteil an Batterie-Pkw (Fokus BEV). Langfristig (ab etwa 2040) führt ein relevanter Anteil an Brennstoffzellen-Pkw unter den getroffenen Annahmen insgesamt zu geringeren Gesamtkosten als bei einem hohen Anteil batterieelektrischer Pkw, bei welchen vor allem die Kosten für die Errichtung einer Vielzahl an (privaten) Ladepunkten maßgeblich zu den höheren Gesamtkosten beitragen.

Die Zusammenhänge der einzelnen Infrastrukturen im deutschen Energiesystem sind vielschichtig und komplex. Weitere Detailanalysen auch unter Berücksichtigung weiterer Aspekte, wie z.B. Infrastrukturen zur Versorgung weiterer Fahrzeugklassen oder die Nutzung bestehender Gasverteilnetze für die Distribution von Wasserstoff, sind daher unerlässlich.

Handlungsempfehlungen

Im Rahmen dieser Studie wurden die Auswirkungen der Lade- und Betankungsinfrastruktur zur Versorgung von 40 Millionen Nullemissions-Pkw auf das Energiesystem, insbesondere auch auf die Nieder- und Mittelspannungsnetze, untersucht. Es wurde gezeigt, dass sich die untersuchten Infrastrukturen für die Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw grundsätzlich in das bestehende Energiesystem integrieren lassen. Um eine möglichst reibungslose und effiziente Integration der Lade- und Betankungsinfrastruktur und damit eine massenhafte Nutzung von Nullemissions-Pkw zu ermöglichen, wurden die im Folgenden kurz erläuterten Handlungsbedarfe identifiziert. Wesentliche Voraussetzung für einen reibungslosen, effizienten und zielgerichteten Ausbau der Versorgungsinfrastruktur für Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw ist, dass **die jeweiligen Akteure über eine möglichst hohe Planungssicherheit verfügen.**

Ausbaustrategie Lade- und Betankungsinfrastruktur

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Betrachtung der Batterielade- bzw. Wasserstoff-tankstelleninfrastruktur hat gezeigt, dass es für Deutschland derzeit keine koordinierte langfristige (bis 2050) Entwicklungsstrategie für die Einführung der Batterie- oder Brennstoffzellenelektromobilität gibt. **Diese gilt es in einem konsolidierten nationalen Strategierahmen zu entwickeln.** Dieses umso mehr, als die hier näher untersuchte Batterielade- bzw. Wasserstoffbetankungsinfrastruktur für Pkw integraler Bestandteil einer Gesamtinfrastruktur zur Versorgung aller Verkehrssektoren sein sollte.

Die Zusammenführung der unterschiedlichen Kostenelemente für die Energiebereitstellung, Energieverteilung sowie Lade- und Betankungsinfrastruktur zeigt, dass insbesondere die Kosten für die Errichtung privater Ladepunkte das ökonomische Gesamtergebnis beeinflussen. **Die Rahmenbedingungen für deren Errichtung sollten daher so ausgestaltet werden, dass eine möglichst kosteneffiziente Installation realisierbar ist.** Dazu sollte beispielsweise eine vorausschauende Planung mit entsprechenden Reserven beim Ausbau privater Stromleitungen in größeren Wohneinheiten gehören, für die entsprechende Regelungen zur Kostenumlage erforderlich sind.

Anpassung Verteilnetze

Die Ergebnisse zeigen, dass sich in den betrachteten Nieder- und Mittelspannungsnetzen die Belastungssituation bei einer steigenden Anzahl an Batterie-Pkw relevant erhöht. Die Auswirkungen müssen nicht in allen Fällen in einer tatsächlichen Überlastung der Betriebsmittel oder einer Überschreitung von technischen Grenzwerten resultieren. Eine Erhöhung der Belastung führt aber prinzipiell immer zu einer Reduzierung der Betriebsreserven der entsprechenden Netzstrukturen und verringert somit die Spielräume des Netzbetreibers bei Planung und Betrieb der Verteilnetzstrukturen, welche insbesondere bei der Umstellung weiterer Sektoren auf vermehrte erneuerbare Stromnutzung relevant sind. Die Studie analysiert ausgewählte Netze und die erhaltenen Erkenntnisse können auf ähnliche Netzstrukturen übertragen werden. Inwiefern die für die Analyse der Verteilnetze ausgewählten Netzstrukturen aber repräsentativ für andere deutsche Regionen sind, muss noch untersucht werden. Eine individuelle Netzanalyse und -planung ist daher in jedem Fall unverzichtbar. **Die Auswirkungen von Lade- und Betankungsinfrastrukturen auf das Stromverteilnetz sowie ggf. der Ertüchtigungsbedarf sollten daher frühzeitig für jedes Netz individuell ermittelt werden.**

Zusätzlich wird bei fortschreitender Kopplung der Energiesektoren Strom und Gas z.B. durch Wasserstoff-tankstellen mit Onsite-Elektrolyse, durch dezentrale Stromerzeugungseinheiten oder durch elektrische Hybridwärmepumpen¹ eine gleichzeitige Betrachtung von Strom- und Gasnetzen erforderlich und sinnvoll sein. **Demzufolge sollten lokale Strom- und Gasverteilnetze (ggf. auch Fernwärmenetze) zukünftig zu-**

¹ Elektrische Luft-Wärmepumpe mit Gaskesselunterstützung bei kalten Außentemperaturen

nehmend abgestimmt analysiert und geplant werden. Dazu sind entsprechende Vorgaben und Rahmenbedingungen zu entwickeln. Zudem sollten mögliche Analysen durchgeführt werden, wie die jeweiligen wirtschaftlichen Optima bei der parallelen bzw. abgestimmten Weiterentwicklung der beiden Netze gesichert bleiben können.

Die Untersuchungen ausgewählter Netzstrukturen der Nieder- und Mittelspannungsebene ergaben Belastungssituationen, die unterstützende Maßnahmen zur Integration von Ladepunkten in die Verteilnetze erfordern. **Dabei sollten Handlungsoptionen zur Integration von Batterie-Pkw in die Verteilnetze im Vordergrund stehen, die einen ökonomisch aufwändigen und mit langen Planungs- und Realisierungszeiten verbundenen klassischen Netzausbau reduzieren helfen.**

Zu den Handlungsoptionen, die bereits in der Planungsphase betrachtet werden sollten, zählt die optimale Verteilung einphasiger Ladeanschlüsse im Niederspannungsnetz über die drei Phasen, um dadurch zusätzliche Unsymmetrien im Netz zu vermeiden. Um die **Verteilung solcher Ladepunkte z.B. durch den jeweiligen Verteilnetzbetreiber überwachen und beeinflussen zu können, müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen entsprechend angepasst werden.** Ein weiterer Ansatz zur Vermeidung zusätzlicher Unsymmetrien kann der verstärkte Einsatz dreiphasiger Ladepunkte mit 11 kW Anschlussleistung sein.

Als nächste Gruppe von Optionen ist die Etablierung von Lademanagementsystemen zu nennen, die einen Betrieb der Ladeinfrastruktur im öffentlichen und privaten Bereich nach Vorgaben der Verteilnetzbetreiber erlauben. **Es wird empfohlen, die rechtlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen derart zu gestalten, dass die Errichtung wirksamer netzdienlicher Lademanagementsysteme im Verteilnetz ermöglicht wird. Eine Pflicht, ausgewählte Ladepunkte für eine entsprechende Steuerung nachrüstbar zu gestalten, ist in Erwägung zu ziehen.**

Weitere Möglichkeiten zur Reduzierung der Belastung der Netzinfrastruktur, sowohl im öffentlichen als auch privaten Bereich, stellen Kombinationen mit Speichersystemen dar. Dies kann vor allem für die öffentliche (Schnell-) Ladeinfrastruktur relevant sein. **Es ist daher zu prüfen, ob Anreize bzw. Rahmenvorgaben für entsprechende Anlagen-Kombinationen sinnvoll und/oder notwendig sind.**

Insgesamt ist es wichtig, Anreize für eine frühzeitige Analyse des erwarteten Ertüchtigungsbedarfs der Stromverteilnetze zu schaffen, die Voraussetzung für eine proaktive Planung und deren rechtzeitige Umsetzung sind.

Transport und Verteilung von Wasserstoff

Bei der Betrachtung der Verteilung von Wasserstoff zu den Tankstellen wurde angenommen, dass die dafür erforderliche Infrastruktur neu errichtet werden muss. Dies ist jedoch nicht zwingend die kostenoptimale Lösung. Nicht berücksichtigt wurde die gegebenenfalls mögliche und potenziell kostengünstigere Nutzung bestehender Infrastrukturen, insbesondere des Erdgasverteilnetzes. **Teile des Netzes könnten im Zuge des stetig sinkenden Bedarfs an fossilem Erdgas beispielsweise im Wärmesektor für die Verteilung von Wasserstoff ertüchtigt werden. Dafür müssen die zukünftig benötigten und möglicherweise freiwerdenden Gasnetzkapazitäten analysiert werden.**

Wasserstoff könnte dadurch kostengünstig nicht nur für den Verkehr, sondern auch für die Nutzung im Wärme- und Industriesektor bereitgestellt werden. Sich dadurch ergebende Skaleneffekte und Synergien führen dann auch zu Kostensenkungen bei der Versorgung von Pkw. **Die Machbarkeit einer vollständigen, teilweisen oder sektionsweisen Umwidmung bestehender Erdgasrohrleitungen sollte untersucht und resultierende wirtschaftliche Chancen im zukünftigen Energiesystem ermittelt werden.** Die zukünftige Nutzung des Gastransportnetzes kann z.B. den Bedarf neuer Stromtransportleitungen reduzieren. **Darüber hinaus wird angeregt, eine übergeordnete deutsche bzw. europäische Wasserstoff-Gasnetzstrategie zu entwickeln, um eine sinnvolle zeitliche und geographische Koordination bei Umstellung und Ausbau der**

Infrastruktur sicherzustellen. Dies ermöglicht es, ggf. bevorstehende Ersatzinvestitionen im Erdgasnetz möglichst zukunftsfähig zu gestalten.

Die Integration eines hohen Anteils fluktuierender Stromerzeugungskapazitäten in das deutsche Energiesystem erfordert in allen drei betrachteten Mobilitätsszenarien die flexible Erzeugung und großtechnische Speicherung von Wasserstoff. **Rahmenbedingungen um dafür erforderliche Technologien, Konzepte und Geschäftsmodelle rechtzeitig zu entwickeln und zu erproben, sollten geschaffen werden.**