

---

## Kurzfassung

---

Name: Heiko Rahn

Thema: Analyse von Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen Energieversorgungssysteme für den Kraftfahrzeugverkehr

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Dipl.-Ing. Jürgen K. Wilke

M.Sc. Ferdinand Schöpp

---

Der Verkehrssektor stellt einen der größten Energieverbraucher in Deutschland dar. Die Energie stammt fast ausschließlich aus fossilen Energieträgern, durch die ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß von etwa 165 Mio. Tonnen pro Jahr entsteht (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 08.2018, S. 18, 22,39). Ein Umstieg auf CO<sub>2</sub> neutralere Antriebsformen erscheint notwendig, um die Klimaschutzziele 2050 zu erreichen. Durch den Einsatz von batterieelektrischen Antrieben lassen sich zwar lokale CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren, ihre Herstellung verbraucht aber eine große Menge an Rohstoffen. Mit der Förderung von Lithium und Seltenen Erden für die Produktion von leistungsfähigen Batterien geht eine erhebliche Umweltzerstörung einher (Seidler 16.10.2019). Daher hat es sich diese Arbeit zur Aufgabe gemacht, die Einsatzmöglichkeiten von Alternativen – im konkreten Fall von externen Energieversorgungssystemen – zu analysieren. Durch diese Systeme kann die benötigte Batteriegröße stark reduziert werden.

Zum 01.01.2019 waren in Deutschland insgesamt 57,3 Mio. Kraftfahrzeuge angemeldet, die entweder elektrisch, mit konventionellen oder alternativen Kraftstoffen angetrieben werden können (Kraftfahrt-Bundesamt 2019a),. Den größten Anteil am Bestand haben Fahrzeuge, die konventionelle Kraftstoffe nutzen; der Anteil von Fahrzeugen mit alternativen Antriebsarten wie Elektro-, Hybrid- oder Erdgasantrieb beläuft sich stets auf weniger als ein Prozent (Kraftfahrt-Bundesamt 2019b).

Auf der einen Seite bieten alternative im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen die Möglichkeit CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Dies liegt zum einen in der Speicherung von Emissionen in den Pflanzen, die als Grundlage für die Produktion dienen, sowie in dem energetisch effizienteren Produktionsprozess begründet. Auf der anderen Seite entstehen bei der Speicherung oder der Verteilung der Kraftstoffe große Energieverluste und durch den Anbau der Energiepflanzen entsteht eine Flächenkonkurrenz zum Anbau von Nahrungsmitteln. Alle Kraftstoffe und Antriebsarten sind technisch ausgereift. Die Ladeinfrastruktur für verschiedene Kraftstoffe oder Strom ist sehr unterschiedlich ausgebaut.

Unter externen Energieversorgungssystemen werden solche Systeme verstanden, die elektrischen Strom während der Fahrt in ein Kraftfahrzeug übertragen können. Dafür werden induktive Systeme, Oberleitungen oder Stromschienen verwendet. Die Zuleitung von Strom in die Systeme erfolgt immer durch Unterwerke, die entlang der elektrifizierten Straßenabschnitte verteilt sind. Die Übertragung des Stroms ins Fahrzeug erfolgt jedoch auf unterschiedliche Art und Weise. Bei induktiven Systemen befindet sich eine elektrische Spule in der Fahrbahn, die ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Durch eine zweite Spule im Fahrzeug kann das Magnetfeld in elektrischen Strom umgewandelt werden. Bei konduktiven Systemen mit Oberleitung oder Stromschiene werden elektrische Leiter, die sich über, auf in

---

oder neben der Fahrbahn befinden, von Stromabnehmern bestrichen. Dadurch entsteht eine durchgehende elektrische Verbindung zwischen Fahrzeug und externem System.

Alle drei Systeme werden aktuell umfassend erforscht und auf Testgeländen oder im öffentlichen Straßenverkehr untersucht. Die übertragbaren Leistungen der Systeme liegen zwischen 180 und 450 kW (KAIST 2013, S. 8; Tajima & Tanaka, S. 4). Dabei kann durch induktive Systeme die geringste Leistung übertragen werden. Grund hierfür ist unter anderem eine starke Erwärmung der Spulen, wenn große Leistungen innerhalb von kurzer Zeit übertragen werden (Mariano Esquillor Gómez 25.04.2017, S. 35). Die Kosten für die induktive Elektrifizierung eines Spurkilometers schwanken stark und werden in der Literatur mit 0,5 bis 6,15 Mio. Euro angegeben (Emre, et al. 12.12.2014; Jang 2018; Möller 2017; Onar, et al. 20.06.2016; Bateman, et al. 08.10.2018, S. 13). Bei Systemen mit Oberleitung ist die Kostenspanne geringer und liegt pro Spurkilometer zwischen 1,07 und 2,06 Mio. Euro (Emre, et al. 12.12.2014; SIEMENS AG 2015; SINGH; Bateman, et al. 08.10.2018, S. 15). Die Kosten für die Elektrifizierung eines Spurkilometers durch Stromschienen belaufen sich auf 0,39 bis 1,5 Mio. Euro und sind somit im Vergleich zu den beiden anderen Systemen verhältnismäßig gering (Boffey 12.04.2019; David Connolly 2016; SINGH; Bateman, et al. 08.10.2018, S. 15). Alle Systeme sind technisch noch nicht vollständig ausgereift. Es ist damit zu rechnen, dass noch vier bis sechs Jahre Entwicklungszeit vergehen, bis die Systeme vollständig erprobt sind (Bateman, et al. 08.10.2018, S. 31). Es ist davon auszugehen, dass die Kosten in dieser Zeit sinken werden.

Neben den Kosten hat die Akzeptanz der externen Systeme einen großen Einfluss auf deren Verbreitung. Es existieren aktuell kaum Untersuchungen über die Akzeptanz von externen Energieversorgungssystemen. Die wenigen existierenden Untersuchungen zeigen ein differenziertes Bild der Akzeptanz. Auf der einen Seite stehen Lkw-Hersteller und Spediteure Oberleitungssystemen kritisch gegenüber, weil sie Einbußen in der Zuladung und Flexibilität ihrer Fahrzeuge befürchten. Die gesellschaftliche und politische Akzeptanz von Oberleitungssystemen ist jedoch sehr hoch. Man erhofft sich so eine Verringerung von Feinstaub-, Lärm- und CO<sub>2</sub>-Emissionen (Scherrer & Burghard 7.-8.05.2019, S. 4).

Durch den Einsatz von externen Energieversorgungssystemen können, die dem Straßenbau zugrundeliegenden Gesetze und Verordnungen ergänzt, neu bewertet und verändert werden. So ist zum Beispiel vom Gesetzgeber festzulegen, ob die Mautsätze für elektrisch versorgte Lkw niedriger ausfallen als die von Lkw mit konventionellem Antrieb. Zudem kann durch externe Systeme Bremsenergie in elektrische Energie umgewandelt werden und in andere Fahrzeuge eingespeist werden. Die Form der Energiegewinnung kann nach dem „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ förderungsfähig sein.

Basierend auf den bisherigen Arbeitsergebnissen wurde in Kapitel 5 ein Bewertungsablauf entwickelt, um den Einsatz von externen Energieversorgungssystemen in möglichen Kontexten zu bewerten. Hierfür wird definiert, dass externe Systeme dieselben Anforderungen wie bereits bestehende Energieversorgungssysteme erfüllen sollen. Um vorstellbare reale Einsatzmöglichkeiten zu beschreiben wurden vier Merkmale erarbeitet und in einem morphologischen Kasten dargestellt.

Um für die Bewertung aus ihnen eine sinnvolle Auswahl zu treffen, wurden das Verkehrsnetz und die Fahrleistung in Deutschland genauer analysiert. Basierend auf dieser Analyse wurden 28 Einsatzmöglichkeiten ausgewählt. Zur Bewertung wurden drei Kategorien von Kriterien –

---

*Ausschlusskriterien, Bewertungskriterien und Rangfolgekriterien* – erarbeitet. Durch Ausschlusskriterien kann ermittelt werden ob der Einsatz eines externen Energieversorgungssystems generell möglich ist. Bewertungskriterien erlauben die Einteilung in eine entweder vollständig substituierende oder ergänzende Versorgung. Die abschließende Anwendung von Rangfolgekriterien gibt an, welches der drei betrachteten Energieversorgungssysteme in der jeweiligen Einsatzmöglichkeit am besten geeignet ist. Die Bewertungen führten zu einem sehr eindeutigen und homogenen Ergebnis. In der Mehrzahl der Einsatzmöglichkeiten ist die Stromschiene das System der ersten Wahl.

Um ein differenzierteres Ergebnis zu erhalten werden die Einzelergebnisse gruppiert nach Art des Fahrzeugs und des externen Systems gruppiert. Anschließend wurde untersucht unter welchen Bedingungen externe Systeme eingesetzt werden können. Um die Qualität der Bewertungsergebnisse zu evaluieren, wird der Einfluss einzelner Kriterien auf das Ergebnis untersucht. Zusätzlich werden Stärken und Schwächen des Bewertungsablaufs diskutiert. Der Bewertungsablauf ermöglicht es durch Anpassung der Kriterien und ihrer Gewichtung auch andere Fragestellungen zu untersuchen.

Basierend auf dem Wert der in der Wissenschaft angenommenen fahrzeugspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Fahrtstrecke sowie der Fahrleistung wurde der Kohlendioxidausstoß differenziert nach Fahrzeugart und Straßenart berechnet. Daraus werden Empfehlungen für die Elektrifizierung einzelner Straßenarten abgeleitet. Es wird empfohlen zuerst die größten CO<sub>2</sub>-Produzenten im Kraftfahrzeugverkehr, Lkw auf Autobahnen und Pkw auf Stadtstraßen und Sonstige, zu elektrifizieren, da diese das größte Einsparpotential aufweisen. Zusätzlich wird für alle Fahrzeug- und Straßenarten empfohlen eine größere Nutzung von alternativen Kraftstoffen anzustreben. Durch diese kann ebenfalls CO<sub>2</sub>-Ausstoß gemindert werden und Überproduktionen in der Stromproduktion gepuffert werden.

Damit ein klimafreundlicher Kraftfahrzeugverkehr nicht zu Lasten eines umweltfreundlichen Kraftfahrzeugverkehrs geht, wurden weitere Empfehlungen erarbeitet. Sie sollen eine möglichst ressourcenschonende Elektrifizierung des Kraftfahrzeugverkehrs ermöglichen.

Es wird dazu geraten Systeme zu verwenden, die mit möglichst vielen Fahrzeugarten kompatibel sind. Zusätzlich sollte die Speicherung von Überproduktionen bei der Stromerzeugung in alternativen Kraftstoffen ausgebaut werden. Weitere Empfehlungen, die nicht die Elektrifizierung direkt betreffen, zielen auf eine bessere Auslastung der Kraftfahrzeuge selbst ab, zum Beispiel in Form von Carsharing.

Aus der Bewertung von externen Energieversorgungssystemen und Zusammenstellung der Handlungsempfehlungen ergeben sich weitere Fragestellung. Unter anderem ist zu prüfen, ob externe Systeme den Austausch von Daten und die exakte Ermittlung der Verkehrsdichte ermöglichen können. Dadurch wäre unter anderem eine verbesserte Echtzeitnavigation oder die genauere Ermittlung der mechanischen Belastung von Straßen möglich. Dabei ist zu prüfen, ob sich dies mit den bereits genannten gesetzlichen Regelungen vereinbaren lässt.