Working Paper Sustainability and Innovation
No. S 8/2010



Sebastian Schraven
Fabian Kley
Martin Wietschel

Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung

Fraunhofer ISI

Zusammenfassung

In den bisher diskutierten Konzepten zur Ladung von Elektrofahrzeugen ist die kabelgebundene (konduktive) Ladung vorherrschend, bei der der Nutzer das Kabel zur Ladung ein- bzw. wieder ausstecken muss. Häufige Ladevorgänge und insbesondere Kurzladungen lassen jedoch dieses Ein- und Ausstecken neben der reduzierten Reichweite des Elektrofahrzeugs unpraktisch in der Nutzung erscheinen. Demgegenüber bietet die induktive (kabellose) Energieübertragung das Laden ohne erforderlichen Nutzereingriff.

Der vorliegende Artikel versucht die Fragen zu beantworten, ob ein Einsatz der induktiven Energieübertragung bereits technisch zur Ladung von Elektrofahrzeugen realisierbar ist, und in welchen Bereichen diese eine wirtschaftlich attraktive Lösung für den Nutzer darstellt. Dazu werden zunächst die Ladetechnologien vor- und technisch gegenübergestellt. Auf Basis einer Kostenbetrachtung ist auch ein ökonomischer Vergleich der beiden Ladetechnologien möglich. Es zeigt sich, dass aus wirtschaftlicher Sicht aufgrund signifikanter Mehrkosten vorläufig kein weitverbreiteter Einsatz der induktiven Technik zu erwarten ist. Unter bestimmten Voraussetzungen ergibt sich aber ein begrenztes Anwendungsfeld als Nischentechnologie in bestimmten gewerblichen Bereichen, wie zum Beispiel bei Taxis.

Schlüsselwörter

Ladeinfrastruktur, Induktive Ladung, Elektrofahrzeuge/Elektromobilität, Elektromagnetische Verträglichkeit, Übertragungswirkungsgrad, Nutzerakzeptanz

Inhalt

Seite

1 Infrastruktur zum Laden von Elektrofahrzeugen 1

1.1 Anforderungen an die Ladeinfrastruktur 1

1.2 Verschiedene Ladetechnologien 2

1.3 Struktur des Artikels 4

2 Induktive Energieübertragung für Elektrofahrzeuge 4

2.1 Funktionsprinzip der induktiven Energieübertragung 4

2.2 Stand der Technik für den Einsatz in der Elektromobilität 5

2.3 Induktive Ladekonzepte 8

3 Ökonomische Analyse eines induktiven Ladekonzeptes 10

3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 10

3.2 Vergleich mit der konduktiven Ladung 13

3.3 Erste Anwendungsgebiete 14

4 Ganzheitliche Betrachtung 15

4.1 Akzeptanz der Nutzer 15

4.2 Ganzheitliche Betrachtung der induktiven Ladung 18

5 Zusammenfassung 20

6 Danksagung 21

7 Literatur 21

1 Infrastruktur zum Laden von Elektrofahrzeugen

1.1 Anforderungen an die Ladeinfrastruktur

Eine umfassende Markteinführung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, die am Stromnetz geladen werden müssen, erfordert den Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur. Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit konventionellen Antriebssystemen (Gas, Otto und Diesel) erfordern derzeit verfügbare Batterien für Elektrofahrzeuge mit ihren geringen Energiedichten häufigere Aufladungen und mehr Zeiteinsatz für den Ladevorgang, um theoretisch dieselbe Reichweite zu erreichen (Wietschel et al. 2009).

Nach Fahrtenanalysen von Biere et al. (2009) und anderen Mobilitätsstudien legt der heutige deutsche Durchschnittsfahrer selten längere Strecken als 70 km zurück. Dabei werden die Automobile in ihrer Nutzungsdauer nur 5 % der möglichen Fahrtzeit bewegt (MiD 2002). Für den Aufbau der Infrastruktur ist entscheidend, wo und wie lange die Fahrzeuge zwischen den einzelnen Fahrten geparkt werden. Hierbei unterscheidet man zwischen der Ladung am privaten Stellplatz, im halb-öffentlichen Bereich wie z.B. beim Arbeitgeber sowie dem Laden im öffentlichen Bereich durch Ladesäulen am Straßenrand.

Die Ladedauer der Batterie hängt im Wesentlichen von der Anschlussleistung des Ladepunktes ab. Einen Standardanschluss stellt die konventionelle Haushaltssteckdose dar, die eine Ladeleistung von bis zu 3,7 kW[1] bereitstellen kann. Unter Berücksichtigung der Grenzen der Steckernormung können an Drehstromanschlüssen Leistungen bis zu 50 kW bereitgestellt werden. Neben den wirtschaftlichen Grenzen beeinflussen diese aber nicht nur die Batterielebensdauer negativ, sondern werden bei einer hohen Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen auch zur Herausforderung für die nur beschränkt zur Verfügung stehende elektrische Leistung der bestehenden Stromnetze, insbesondere auf Ebene des Verteilnetzes (Brauner 2008).

Kley et al. (2010) betrachten die Standorte und verfügbaren Anschlussleistungen. Demnach werden Verbraucher zum Aufladen ihrer Batterie möglichst häufig die bestehende heimische Infrastruktur nutzen. Insbesondere ermöglichen lange Standzeiten zwischen den einzelnen Fahrten Ladungen an Anschlüssen

1 Bei einer unterstellten Ladeeffizienz von 100 %.

niedriger Leistung und die Anschlusskosten sind vergleichsweise niedrig. Für längere Strecken oder die Angst der Kunden liegen zu bleiben[2], existieren drei Konzepte: (i) eine Ladung an Schnellladestationen entlang der Wegstrecke[3], (ii) ein Austausch leerer Batterien sowie (iii) ein zusätzlicher Verbrennungsmotor als „range extender". Insbesondere Schnellladung und Batterietausch sind dabei ökonomisch herausfordernd und erfordern einen dichten Ausbau, um überall längere Strecken zuzulassen und Reichweitenängste abzubauen.

Daneben haben auch Forderungen hinsichtlich verschiedener Systemdienstleistungen wie z.B. Netzrückspeisung, Abrechnung und Sicherheit Einfluss auf den Aufbau der Ladeinfrastruktur.

1.2 Verschiedene Ladetechnologien

Mit der Diskussion um die Ladeinfrastruktur verbunden ist auch die Frage nach dem Übertragungsweg der elektrischen Energie vom Stromanschluss zum Fahrzeug. Die Möglichkeiten der Ladung per Kabel, Stecker und Buchse (konduktiv) ist den Menschen aus dem Haushalt bekannt. Die Handhabung gestaltet sich relativ einfach und die Ladung kann direkt an einer üblichen Haushaltssteckdose erfolgen. Daher ist die konduktive Ladung von Elektrofahrzeugen zunächst der naheliegende erste Schritt.

Als einheitlicher Standard für die Ladesteckvorrichtungen zeichnet sich in Deutschland der Normentwurf DIN IEC 61851-1 ab, der sich zurzeit allerdings noch in Abstimmung befindet (VDE 2008). Innerhalb Europas gibt es weitere Alternativen auf Basis der französischen und italienischen Normvorschläge. Allen zu eigen ist, dass auf Wechselstrombasis Leistungen von bis zu etwa 44 kW ermöglicht werden. Im amerikanischen und japanischen Raum werden auch die Möglichkeiten einer Gleichstromladung diskutiert.

Das konduktive Laden führt allerdings zu erheblichen Komforteinbußen und weiteren Einschränkungen: Der grundsätzlich erforderliche Nutzereingriff erweist sich als relativ umständlich und aufwendig (z.B. Kabel aus dem Kofferraum holen, Ein- und Ausstecken des Steckers, insbesondere bei Nässe und Kälte) und kann dazu führen, dass das Laden vergessen wird (Kiefer 2009). Zudem werden hohe Anforderungen an die Sicherheit gestellt. Zum Schutz vor

---

2 Im Englischen bekannt und von Tate et al. (2008) geprägter Term „range anxiety".

3 Anschlussleistungen von mehr als 100 kW notwendig für eine 50 %-Aufladung der Batterie in fünf Minuten.

offenen elektrischen Kontakten und auftretenden Kriechströmen über Nässefilme müssen Ladekabel, Ladestation und Ladebuchse am Fahrzeug resistent gegen Witterungseinflüsse ausgeführt werden (Wallerath u. Waffenschmidt 2004). Nicht zuletzt lässt sich ein offen hängendes Kabel nur schwer vor Vandalismus schützen[4].

Eine Alternative zur konduktiven Ladung ist die kabellose Energieübertragung (siehe Abbildung 1). Darunter wird eine Ladetechnik verstanden, bei der die Energie ohne elektrische Kontakte zwischen der Ladestation und dem elektrischen Verbraucher übertragen wird (Wiesspeiner 2005). Dazu gehören u.a. die induktive und die kapazitive Technik, die Übertragung mittels elektromagnetischer Wellen und die optische Übertragung. Unter Berücksichtigung der begrenzten Abmessungen der Elektrofahrzeuge und den mindestens notwendigen Luftspalten im Bereich einiger Zentimeter ist physikalisch aber nur die induktive Technik in der Lage, einige Kilowatt elektrischer Energie zu übertragen (Wiesspeiner 2005). Die induktive Technik ist zumindest theoretisch dazu in der Lage, Fahrzeuge dynamisch während der Fahrt zu laden; für den Individualverkehr kann ein baldiger Einsatz dieses Konzeptes aber ausgeschlossen werden (siehe Abschnitt 2.3).

Abbildung 1: Technologien zur Ladung von Elektrofahrzeugen

Ziel	Technische Optionen			Technisch umsetzbar	Wirtschaftlich attraktiv
Laden von Elektrofahrzeugen	Kabelgebunden			✓	✓
	Kabellos	Optisch		×	×
		Elektromagnetisch		×	×
		Kapazitiv		×	×
		Induktiv	Stationär	✓	×
			Dynamisch	O	×

Legende: × = Nein O = Eingeschränkt ✓ = Ja
Anmerkung: Betrachtung der technischen und wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit im weiteren Verlauf des Artikels

4 Insbesondere während des Ladevorgangs, aber auch wenn das Kabel fest an der Ladestation angebracht ist.

Interessant wird die induktive Energieübertragung für die Ladung von Elektrofahrzeugen insbesondere durch die Möglichkeit, die Fahrzeuge auch bei kurzen Stopps – ohne dass ein Nutzereingriff erforderlich ist – zu laden. Durch die Erdung der stationären Komponenten und einen Potentialausgleich über die Fahrzeugmasse wird die Technik berührungssicher und potentialfrei. Die Verlegung der primären Einheit unterhalb der Straßenoberfläche reduziert sowohl die Witterungseinflüsse auf die Komponenten als auch die Gefahr des Vandalismus. Da weder eine Kontaktbelastung zwischen primärer und sekundärer Einheit auftritt noch Kabelbrüche zu befürchten sind, entsteht gleichzeitig ein geringer Verschleiß, so dass sich der Wartungsaufwand im Vergleich zur konduktiven Ladung reduzieren lässt (Kiefer 2009).

1.3 Struktur des Artikels

Zur Beurteilung der Anwendbarkeit der induktiven Energieübertragung zur Ladung von Elektrofahrzeugen ist eine Analyse zum Stand der Technik sowie spezieller Anforderungen von Elektrofahrzeugen notwendig (siehe Kapitel 2). Hierbei sind insbesondere technische Defizite und ein daraus resultierender Weiterentwicklungsbedarf zu identifizieren.

Neben der technischen Realisierbarkeit müssen auch die Kosten einer induktiven Ladeinfrastruktur analysiert werden (siehe Kapitel 3). Im Wesentlichen sind die zukünftigen Kostenentwicklungen aufzuzeigen. Auf Basis dieser Erkenntnisse können erste Anwendungsfelder in der Elektromobilität erkannt und die Chancen zur Durchsetzung am Markt abgeschätzt werden (siehe Kapitel 4).

Als Grundlage der technischen Analyse dienen die Erkenntnisse aus einer Befragung relevanter Marktteilnehmer aus Industrie und Wissenschaft. Ein eigener kostenseitiger Nachbau des Systems ermöglicht sowohl eine ökonomische Bewertung hinsichtlich der Mehrkosten als auch eine ganzheitliche Bewertung der Technologie.

2 Induktive Energieübertragung für Elektrofahrzeuge

2.1 Funktionsprinzip der induktiven Energieübertragung

Abgesehen vom geschlossenen (Eisen-)Kreis beruht das Prinzip der induktiven Energieübertragung auf dem klassischen Transformator der Energietechnik: Ein zeitlich veränderlicher Strom in der *Primärspule* erzeugt ein zeitlich veränderli-

ches Magnetfeld, welches die in der Nähe befindliche *Sekundärspule* z.T. durchsetzt (Hu 2009). Dieses Magnetfeld erzeugt in der Sekundärspule eine Induktionsspannung sowie letztlich einen zeitlich veränderlichen Strom. Das durch den Strom wiederum erzeugte magnetische Feld überlagert sich mit dem der Primärspule.

Geringe Übertragungsfrequenzen um 50 Hz lassen allerdings keine Energieübertragung bei großen Luftspalten zu. Der Schlüssel zum breiten Einsatz der Technik ist die Transformation auf höhere Frequenzen im Bereich von 20–150 kHz (Hu 2009). Noch höhere Frequenzen können sich mit dem Radiofrequenzbereich überschneiden und werden durch die heute verfügbare Leistungselektronik begrenzt (Parspour 2010).

Die magnetische *Kopplung* der Spulen ist im Allgemeinen durch die Geometrie der Spulen gegeben. Je geringer das Verhältnis Luftspalt / Spulendurchmesser, desto besser ist die Kopplung. Praktisch ergibt sich die maximale Kopplung anhand zweier flächenmäßig möglichst deckungsgleicher Spulen mit geringem Luftspalt (Wiesspeiner 2005). Für insgesamt relativ klein ausgeführte Systeme bedeutet eine Verringerung des Abstands ab einem Luftspalt in der Größenordnung des Spulendurchmessers keine signifikante Verbesserung der Kopplung mehr (z.B. Abstände geringer als 15 cm bei Spulendurchmesser von 30 cm).

Folge der losen Kopplung der Spulen über den Luftspalt sind sogenannte Streuflüsse (Streuinduktivitäten), durch deren großen induktiven Widerstand die Anordnung Blindleistung aufnimmt, so dass sich nur eine geringe Spannung in der Sekundärspule einstellt. Zur Kompensation der Blindleistung werden primär- und/oder sekundärseitig hochwertige Kondensatoren so parallel oder in Serie geschaltet, dass ein Schwingkreis gebildet wird (Huwig u. Wambsganß 2010). Werden die Kapazitäten der Kondensatoren so gewählt, dass die Schwingkreise bei der Betriebsfrequenz in Resonanz sind, wird die Wirkung der Induktivitäten aufgehoben.

2.2 Stand der Technik für den Einsatz in der Elektromobilität

In der mobilen Fördertechnik und anderen Bereichen des Maschinenbaus haben sich induktive Systeme seit über 20 Jahren bewährt (Schedler 2009). Auch in der Medizintechnik bringt die induktive Energieübertragung Vorteile z.B. bei Implantaten oder Herzschrittmachern. Auf dem Markt der Konsumgüter werden elektrische Zahnbürsten schon seit Jahren induktiv geladen und auch zur Ladung von elektrischen Kleingeräten und Laptops zeichnen sich Lösungen ab

(Wiesspeiner 2005). Auch im Bereich der Elektromobilität befinden sich schon seit einigen Jahren Systeme zur Personenbeförderung in der Anwendung[5]. Laut Aussagen von Experten aus Industrie und Wissenschaft ist eine induktive Ladung von Elektrofahrzeuge mit gewissen Einschränkungen schon heute technisch realisierbar:

Die *Dimensionierung des Gesamtsystems* orientiert sich an den vorhandenen Abmessungen des Fahrzeugs, die übereinstimmenden Abmessungen der primären und sekundären Einheit liegen im Bereich von 60x60 cm[6]. Die in der Entwicklung befindlichen Systeme sind auf Luftspalte von 10–20 cm ausgelegt und das Gewicht der sekundären Einheit beträgt weniger als 15 kg. Werden die Systeme auf höhere Anschlussleistungen ausgelegt, können sich die Abmessungen und das Gewicht ändern.

Die *maximal übertragbare Leistung* eines induktiven Energieübertragungssystems wird durch die zulässige Wicklungsdurchflutung, die primär- und sekundärseitige Spulengüte sowie die Spulenkopplung begrenzt (Kürschner 2010). Die geplanten Konzepte sehen eine einphasige 230 V-Wechselspannung zur Bereitstellung von bis zu 3,7 kW vor[7]. Durch den Einsatz mehrerer Spulensysteme mit 3,7 kW sind Anschlüsse bis zu 11,1 kW ebenfalls technisch lösbar, stellen aber zum Einen erhebliche Anforderungen an die leistungselektronischen Komponenten und bedürfen zum Anderen einer sorgfältigen Abschirmung der elektromagnetischen Felder.

Der *realisierbare Übertragungswirkungsgrad* hängt stark von der Güte und Kopplung der Spulen sowie der verwendeten Übertragungsfrequenz ab. Aufgrund der zusätzlich notwendigen Energiewandlungsstufen ist der Übertragungswirkungsgrad geringer als bei einer kabelgebundenen Energieübertragung, die einen Gesamtwirkungsgrad von 95 %[8] erreicht (vgl. Mazza u. Hammerschlag 2005). Ziel für die induktive Übertragung ist ein Wirkungsgrad von

5 Ladung von Elektrobussen in Whakarewarewa, Neuseeland seit 1996, in Genua und Turin seit 2003.

6 Schedler, SEW-Eurodrive, Interview vom 05. Mai 2010.

7 Pavlidis, Vahle, Interview vom 18. Mai 2010.

8 Berücksichtigung des galvanisch trennenden DC/DC-Wandlers und ohmscher Verluste.

≥ 90 % gegenüber der konduktiven Ladung. Aktuell wird ein Gesamtwirkungsgrad[9] von bis zu 80 %[10] erreicht.

Für eine Sicherung der Netzstabilität und Partizipation an den Regelenergiemärkten bei einer signifikanten Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen ist eine *Netzrückspeisung von Energie* erforderlich. Diese ist grundsätzlich möglich durch eine Implementierung eines fahrzeugseitigen Senders, was mit erheblichem technischen Aufwand verbunden ist[5]. Im Hinblick auf den Gesamtwirkungsgrad ist eine Rückspeisung jedoch bisher nicht absehbar, da diese erst sinnvoll ist, wenn die induktive Übertragung insgesamt effizienter erfolgen kann. Eine Steuerung der Netzlast dagegen kann aufgrund geringer Anschlussleistungen und langer Standzeiten der Fahrzeuge an den Ladestationen auch mit der induktiven Ladung realisiert werden.

Für den Einsatz an für Menschen und andere Lebewesen frei zugänglichen Orten muss die Frage der *Sicherheit* eindeutig geklärt sein. In öffentlichen Bereichen sind wesentlich *strengere Grenzwerte* angegeben als in kontrollierten Industriebereichen, so dass die Abschirmung der magnetischen Wechselfelder eine besondere Berücksichtigung erfahren muss. Zudem muss eine *Beeinflussung anderer technischer Geräte* verhindert werden (Störaussendung). Neben der Verwendung von Ferriten[11] zur Feldlinienführung kann z.B. das Bodenblech des Fahrzeugs als Schutzschirm gegen das magnetische Feld dienen[5]. Dadurch können auch die Störaussendungen begrenzt werden.

Hinsichtlich Sicherheit und Ausführung ist ein *verbindlicher Standard* für die induktive Ladung festzulegen. Aktuell wird im Rahmen eines Arbeitskreises des DKE an einem offenen Standard gearbeitet[12].

In Bezug auf *Positionierungstoleranzen* bedeuten Abstände, die den Auslegungsluftspalt überschreiten, bislang eine deutliche Reduzierung des Übertragungswirkungsgrades. Auch bei einem lateralen Versatz sinkt die Effizienz

---

9 Analog zur konduktiven Ladung ist im Fahrzeug vor der Batterie ein DC/DC-Wandler erforderlich ($\eta \approx 0{,}95$). Zusätzlich wird die Übertragungsstrecke über den Luftspalt (≈ 0,90) sowie die Leistungselektronik und Blindleistungskompensation (≈ 0,90) berücksichtigt (siehe Angaben Experteninterviews). Damit bewegt sich der Gesamtwirkungsgrad zwischen 75-80%.

10 Wechlin, Conductix-Wampfler, Interview vom 11. Mai 2010.

11 Im Sinterprozess hergestellter ferromagnetischer Werkstoff aus elektrisch nicht leitenden Metalloxiden.

12 Kümmell, IAV, Interview vom 04. Mai 2010.

deutlich, wenn der Versatz größer ist als ein halber Durchmesser der Spulen (Imura et al. 2009). Hier gibt es verschiedene Konzepte, wie die Verwendung eines Fahrzeugassistenzsystems oder eine Konstruktion der Primäreinheit aus mehreren Spulen, von denen nur diejenige überträgt, die am besten abgedeckt wird.

Schließlich stellt insbesondere bei der Ladung im öffentlichen Bereich die *Gestaltung des Abrechnungssystems* eine Herausforderung dar. Die Realisierung des Abrechnungssystems wird komplexer als bei der kabelgebundenen Ladung, da die Kommunikation ebenfalls drahtlos erfolgen muss. Prinzipiell sind u.a. akustische, optische oder kapazitive Übertragungssysteme denkbar sowie eine induktive Kommunikation über das Spulensystem selbst[13].

2.3 Induktive Ladekonzepte

Für den Einsatz der induktiven Technik zur Ladung von Elektrofahrzeugen gibt es verschiedene Konzepte. Zum Einen kann die *Ladung stationär* an speziell dafür konstruierten „Ladestationen“ erfolgen, zum Anderen gibt es Konzepte für die *dynamische Ladung* während der Fahrt. Dazu werden lange Linienleiter so in der Fahrbahn verlegt, dass darüber fahrende Fahrzeuge geladen werden können.

Prinzipiell stellt die dynamische Ladung ein Konzept zur Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen dar, das parallel zu der stationären Ladung eingesetzt wird, die für kurze Wege und den Einsatz im innerstädtischen Bereich nach wie vor erforderlich ist. Zusätzlich zu den Kosten der stationären Ladestationen sowie der fahrzeugseitigen Einheiten entstehen hierbei Kosten für Material und Verlegung der Linienleiter, komplexe Abrechnungssysteme sowie den Anschluss der Fahrbahnen an das Stromnetz. Zudem sind in regelmäßigen Abständen Anordnungen für die Blindleistungskompensation anzubringen.

Die Reichweitenängste potentieller Nutzer lassen sich nur dann beheben, wenn ausreichend Strecken – insbesondere der Hauptautobahnen – elektrifiziert werden. Eine Umsetzung der dynamischen Ladung für alle längeren Strecken ist aus Kostengesichtspunkten gerade auf Bundes- und Landesstraßen nicht möglich. Hinzu kommt, dass eine konsekutive Umstellung der Fahrbahnen erst eine zeitversetzte Nutzung ermöglicht. Nur ein annähernd zeitgleicher Umbau meh-

13 Kürschner, ifak Magdeburg, Interview vom 30. April 2010.

rerer Streckenabschnitte, der allerdings deutlich höhere Anfangsinvestitionen mit sich bringt, bedeutet einen Mehrwert für den Nutzer. Wer die Kosten für einen forcierten Ausbau des Systems übernimmt ist unklar.

Ausgehend von der maximal übertragbaren Leistung in Abschnitt 2.2 müssen die Fahrzeuge bei einer vollständigen Versorgung durch die dynamische Ladung auf Geschwindigkeiten um die 25–70 km/h[14] gedrosselt werden, um genügend Energie für die Weiterfahrt aufnehmen zu können. Dadurch reduziert sich der Mehrwert der dynamischen Ladung erheblich und eine Durchsetzung auf Autobahnen ist nicht zu erwarten.

Für eine Versorgung mehrerer Fahrzeuge bei einer höheren Geschwindigkeit wären Anschlussleistungen im Bereich mehrerer 100 kW/km und entsprechende Anschlüsse an das Stromnetz erforderlich. Diese stellen bisher ein Problem dar sowohl für die Komponenten der Energieübertragung als auch für die beschränkte Kapazität der bestehenden Stromnetze. Außerdem erfordert eine Abstrahlung der Magnetfelder bei diesen Leistungen nicht nur eine geeignete Abschirmung der zu ladenden Elektrofahrzeuge sondern kann auch Einfluss haben auf andere Fahrzeuge, die sich auf der Strecke befinden. Ungeklärt sind bislang auch die Wirkungsgradverluste hinsichtlich einer ungenauen Positionierung der Fahrzeuge über den Linienleitern, verschiedenen Luftspalten unterschiedlicher Fahrzeugmodelle und etwaigen Fahrbahnunebenheiten.

Durch die Regelmäßigkeit der Streckenführung gibt es Überlegungen spurgeführte Systeme, wie z.B. Straßenbahnen, im Einzelfall aber auch Elektrobusse auf eine induktive Energieübertragung umzustellen. Inwieweit eine Umstellung dieser Systeme einen positiven Effekt auf die Möglichkeiten im PKW Bereich haben, wurde in dieser Studie nicht betrachtet. Aufgrund des Verhältnisses der Strecken, die der PKW parallel nutzen könnte, ist aber eher von kleinen Effekten auszugehen. Deshalb beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf Konzepte zur stationären induktiven Ladung.

Für die stationäre Ladung gibt es zwei Optionen zur Verlegung der primären Einheit (in oder auf der Straße) sowie verschiedene Konzepte, zur Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades den Abstand zwischen der primären und sekundären Einheit mit Hilfe einer mechanischen Konstruktion zu verringern. Eine Verringerung des Abstands zwischen den Spulen bewirkt allerdings nur bedingt

14 Aufladung von mind. 0,16 kWh/km erforderlich: $\frac{3{,}7\ kW}{0{,}16\ {}^{kWh}/_{km}} = 23{,}5\ km/h$ bzw. $\frac{11{,}1\ kW}{0{,}16\ {}^{kWh}/_{km}} = 69{,}4\ km/h$.

eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades, da sich die Kopplung bis zur Hälfte des Durchmessers der kleineren Spule kaum ändert. Daneben bedeuten bewegliche Komponenten ein komplexeres Gesamtsystem, eine größere Schmutz- und Verschleißanfälligkeit und erhöhen somit den Wartungsaufwand.

3 Ökonomische Analyse eines induktiven Ladekonzeptes

3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Neben der technischen Realisierbarkeit der induktiven Technologie ist für den Einsatz zur Ladung von Elektrofahrzeugen insbesondere die ökonomische Dimension von Interesse. Die folgenden Betrachtungen gehen zunächst vom einfachsten Fall einer stationären Ladung ohne mechanische Nachführung aus.

Laut Herstellerangaben bewegen sich die Anschaffungskosten für ein stationäres induktives Übertragungssystem mit 3,7 kW Anschlussleistung[15] inklusive Installation zwischen 3.500 € und 18.000 €. Aufgrund der Spanne der Datenerhebung und der verschiedenen Einflüsse der einsetzbaren Komponenten wurde eine eigene differenzierte Ermittlung der Kosten für vier Ladeszenarien in 2015 und 2030 durchgeführt.

Abbildung 2: Vorstellung der vier Ladeszenarien

<table>
<tr><th>Ladeszenarien</th><th>Zugangsart</th><th>Abrechnung</th><th>Netzanschluss</th><th>Spannung</th><th>Anschlussleistung (max.)</th></tr>
<tr><td>Szenario 1</td><td>Privat</td><td rowspan="2">Nein</td><td rowspan="2">Vorhanden</td><td>Einphasig</td><td>3,7 kW</td></tr>
<tr><td>Szenario 2</td><td rowspan="2">Halb-öffentlich</td><td rowspan="3">Dreiphasig</td><td rowspan="3">11 kW</td></tr>
<tr><td>Szenario 3</td><td rowspan="2">Ja</td></tr>
<tr><td>Szenario 4</td><td>Öffentlich</td><td>Nicht vorhanden</td></tr>
</table>

15 Bei einem bereits vorhandenen 230 V-Netzanschluss.

Die Szenarien unterscheiden sich nach Art der Zugänglichkeit, Anschlussleistung und der Art der Abrechnung (vgl. Abb. 2). Während in Szenario 1 die Ladung bei einer Anschlussleistung von bis zu 3,7 kW am privaten Stellplatz ohne separates Abrechnungssystem stattfindet, werden die Fahrzeuge in den Szenarien 2 – 4 im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich an Anschlüssen mit bis zu 11,1 kW geladen. Je nach Übereinkunft mit dem Betreiber der Ladestation kann dabei ein separates Abrechnungssystem erforderlich werden.

Die Anschaffungskosten für ein 3,7 kW-System mit vorhandenem Netzanschluss und ohne separate Abrechnung entsprechen mit 6.250–11.500 € der Tendenz der Herstellerangaben. Durch Mengeneffekte und Lernkurven lassen sich die Anschaffungskosten bis 2030 etwa halbieren, da bereits eine geringe Anzahl zusätzlicher Systeme bei dieser neuen Technologie eine deutliche Steigerung der Produktionsrate bedeutet. Dabei wurden die Lernkurven und Skaleneffekte für einzelne Komponenten aus anderen technischen Bereichen wie z.B. der PV-Industrie abgeleitet. Neben den Anschaffungskosten fallen Betriebskosten an, z.B. für Wartung, Nutzung des Mobilfunknetzes und im öffentlichen Bereich ggf. eine Stellplatzmiete. Die Anschaffungskosten, die sich bis 2030 durch Mengeneffekte und Lernkurven etwa halbieren lassen, sowie die über den Nutzungszeitraum diskontierten Betriebskosten werden zu den Gesamtkosten addiert. Durch den Bezug der Gesamtkosten auf den Energieverbrauch eines Referenzfahrzeugs[16] lassen sich die für den Nutzer zu tragenden Strommehrkosten angeben.

Während im privaten Bereich aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit des Ladepunktes nur ein Fahrzeug geladen werden kann, können aufgrund der höheren Anschlussleistung an den begrenzt verfügbaren Stellflächen im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich mehrere Fahrzeuge pro Station geladen werden. Unter Bezug auf das gewählte Referenzfahrzeug besteht bei einer angenommenen zeitlichen Vollauslastung der Ladestationen[17] für den halb-öffentlichen Bereich eine praktische Grenze von drei Fahrzeugen pro Ladestation (= ein Fahrzeug / Tag). Im öffentlichen Bereich ergibt sich ein Maximum von acht Fahrzeugen pro Ladestation.

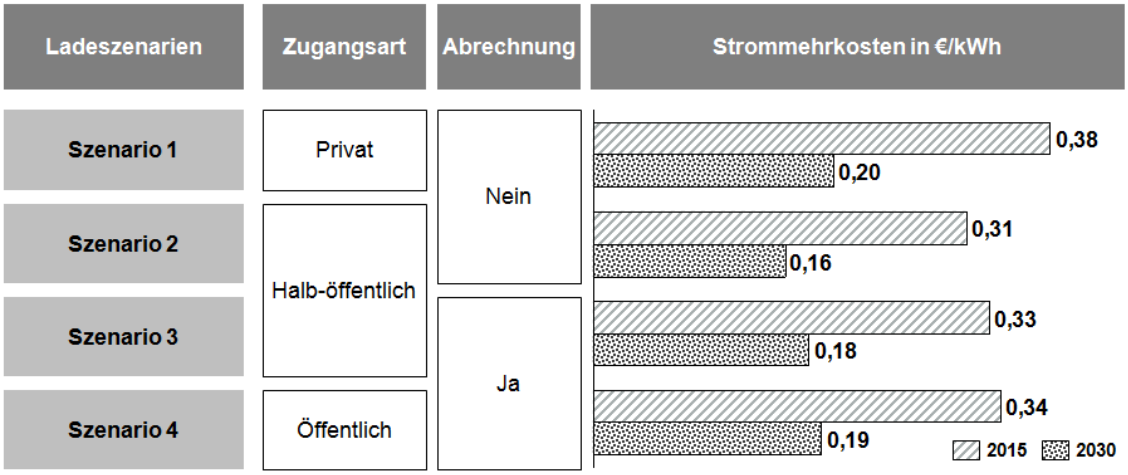
16 24 kWh Batteriegröße, 14.300 km/a Laufleistung, 0,16 kWh/km Verbrauch, DoD 75%.

17 12 h täglicher Betrieb: Berücksichtigung von Servicezeiten, z.T. nicht besetzten Ladestationen, längeren Standzeiten der Fahrzeuge als zur reinen Ladung notwendig.

Unter Berücksichtigung der durch den geringen Übertragungswirkungsgrad entstehenden Stromkosten, ergeben sich für eine Ladung am privaten Stellplatz in 2015 durchschnittliche Strommehrkosten von 0,38 €/kWh (vgl. Abb. 3). Durch die Aufteilung auf mehr als ein Fahrzeug können im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich die höheren Anschaffungs- und Betriebskosten so kompensiert werden, dass in 2015 im Vergleich zu Szenario 1 um 0,04–0,07 €/kWh geringere durchschnittliche Strommehrkosten entstehen.

Bis 2030 können die durchschnittlichen Strommehrkosten in allen Szenarien etwa halbiert werden. Die geringsten Strommehrkosten ergeben sich auch in 2030 für die Ladung ohne separates Abrechnungssystem im halb-öffentlichen Bereich (0,16 €/kWh). Die Ladung im privaten Bereich liegt mit 0,20 €/kWh nur noch 0,01 €/kWh über den Kosten der öffentlichen Ladung.

Abbildung 3: Durchschnittliche Strommehrkosten der induktiven Ladung für verschiedene Ladeszenarien



Durch eine Verlegung der primären Einheit auf der Straße lassen sich die Installationskosten soweit reduzieren, dass die durchschnittlichen Strommehrkosten im privaten Bereich um 0,03 €/kWh sinken. Dieses Ladekonzept bietet jedoch nur am privaten Stellplatz eine sinnvolle Option, da sich im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich die Gefahr des Vandalismus durch eine auf die Straße aufgelegte Ladeplatte erhöht. Zudem ist im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich der Einfluss der Installationskosten geringer, so dass die durchschnittlichen Strommehrkosten nur um jeweils 0,01 €/kWh reduziert werden können. In besonderen halb-öffentlichen und öffentlichen Bereichen lassen sich die Installationskosten z.T. durch die Verlegung mehrerer primärer Einhei-

ten an einer Station reduzieren, so dass mehrere Fahrzeuge gleichzeitig an einem Anschluss versorgt werden können.

Die Anwendung einer mechanischen Nachführung (primär oder sekundär) erhöht nicht nur die Komplexität des Gesamtsystems sondern verursacht auch zusätzliche Kosten. Zwar können die Übertragungsverluste durch die Nachführung begrenzt reduziert und damit auch die zusätzlichen Stromkosten gesenkt werden; monetäre Einsparungen ergeben sich allerdings nur dann, wenn die Kosten für ein mechanisches System die Grenzkosten von 260–510 € nicht überschreiten. Für Fahrzeuge mit sehr großem Abstand zwischen Fahrzeugboden und Straße kann dieses System in der Zukunft aber dennoch sinnvoll sein.

3.2 Vergleich mit der konduktiven Ladung

Analog zu den Kosten der induktiven Ladung können auch die Kosten für konduktive Ladestationen bestimmt werden (siehe dazu Kley et al. 2010). Im Vergleich zur induktiven Ladung können elektrisch angetriebene Fahrzeuge an konduktiven Ladestationen schneller geladen werden, da nur sehr geringe Übertragungsverluste entstehen[18].

Eine konduktive Ladung ohne Abrechnungssystem im privaten Bereich ist mit relativ geringen Strommehrkosten von 0,01 €/kWh verbunden, da am privaten Stellplatz für gewöhnlich bereits ein Netzanschluss mit der benötigten Leistung existiert. Die Ladung am Anschluss mit höherer Leistung im halb-öffentlichen Bereich weist durch eine aufwendigere Installation sowie höhere Betriebskosten durchschnittliche Strommehrkosten von moderaten 0,05 €/kWh auf. Ein zusätzliches Abrechnungssystem erhöht diese Kosten auf 0,07 €/kWh. Mit 0,11 €/kWh wird die Ladung an öffentlichen Ladestationen am teuersten, da hier aufwendige Sicherheitsmaßnahmen zu treffen sind und der Schutz vor Vandalismus berücksichtigt werden muss.

Ein Vergleich der durchschnittlichen Strommehrkosten der konduktiven Ladung mit denen der induktiven Ladung ist in Abb. 4 dargestellt. Unter Einbeziehung der zusätzlichen Stromkosten, die aufgrund der Effizienzverluste entstehen, ist die Differenz bei der privaten Ladung am größten. Bei einem Unterschied von 0,19–0,37 €/kWh erscheint ein Einsatz der induktiven Ladung im privaten Bereich unter ökonomischen Aspekten nicht realistisch.

---

18 Batterieladeeffizienz = 0,95 und Übertragungswirkungsgrad = 0,95 95 (vgl. Mazza u. Hammerschlag 2005).

Abbildung 4: Strommehrkostenvergleich verschiedener Ladeinfrastrukturkonzepte

Ladeinfrastruktur	Abrechnung	Anschlussleistung (max.)	Strommehrkosten (in c€/kWh)	
			Konduktiv	Induktiv
Privat	Nein	3,7 kW	1,0	20,0 – 38,0
		11 kW oder 22 kW	3,0 – 3,8	
	Ja		5,3 – 6,4	
Halb-öffentlich	Nein	11 kW oder 22 kW	3,3 – 5,1	16,0 – 31,0
	Ja		4,4 – 7,3	18,0 – 33,0
Öffentlich	Ja	11 kW oder 22 kW	4,2 – 10,8	19,0 – 34,0
		43 kW	6,1 – 13,2	

Angelehnt an Kley et al. (2010)

Anders ist die Situation im halb-öffentlichen und öffentlichen Bereich, wo eine größere Anzahl an Fahrzeugen pro Ladestation die zusätzlich anfallenden Kosten besser verteilt. Eine Verlegung mehrerer primärer Einheiten an einer Station wird an dieser Stelle nicht betrachtet, da diese auch im konduktiven Fall nicht gesondert ausgewiesen wird. Im halb-öffentlichen Bereich entstehen sowohl für Ladestationen mit als auch ohne Abrechnung Mehrkosten zwischen 0,11–0,24 €/kWh. Mit 0,08–0,23 €/kWh ist die Differenz zur konduktiven Ladung im öffentlichen Bereich am geringsten.

Analysen zur konduktiven Ladeinfrastruktur haben allerdings gezeigt, dass die Nutzer zunächst langsam am privaten Stellplatz laden werden, da dies zum Einen aufgrund der langen Standzeiten zwischen den Fahrten möglich ist, zum Anderen die Ladung im öffentlichen Bereich zu teuer ist. Im Vergleich zu den durchschnittlichen Strommehrkosten von 0,02 €/kWh für die konduktive Ladung im privaten Bereich ist die öffentliche induktive Ladung so teuer, dass nur eine begrenzte Anwendung in Nischen stattfinden kann, in denen Kunden der kabellosen Ladung einen beträchtlichen Mehrwert zuordnen.

3.3 Erste Anwendungsgebiete

Eigene Analysen zu Jahresfahrleistung und Batteriegröße haben gezeigt, dass die durchschnittlichen Strommehrkosten signifikant reduziert werden können, indem einige Fahrzeuge mit hoher Jahresfahrleistung die (öffentlichen) Ladestationen zeitlich besser auslasten. Demnach sind insbesondere Fahrzeugflotten interessant.

Neben Linienbussen bestehen ähnliche Voraussetzungen bei innerbetrieblichem Werksverkehr und in Bereichen des öffentlichen Nahverkehrs, wie z.B. bei Taxis und innerstädtischem Lieferverkehr. In diesen Fällen werden z.T. sehr lange und oft gleiche Strecken mit regelmäßigen kurzen Stopps zurückgelegt. Anders als beim privaten Nutzer, für den eine mehrmals tägliche Ladung als unpraktisch und nicht notwendig einzustufen ist, können die häufigen Standzeiten ohne umständliches Einstecken eines Steckers zur Ladung genutzt werden. Wird das Fahrzeug durch die häufigere Teilladung über einen Tag nicht vollständig aufgeladen, kann zusätzlich über Nacht eine Ladung am privaten Stellplatz oder auf dem Betriebsgelände erfolgen.

Die durchschnittlichen Fahrleistungen z.B. von Taxis liegen bei 50.000–60.000 km/a (L+K 2008). Damit ergeben sich bei einer angenommenen Vollauslastung der Ladestation durch regelmäßiges kurzes Laden einiger Fahrzeuge Strommehrkosten von 0,16–0,17 €/kWh. Die alternative konduktive Ladung für diesen Anwendungsfall verursacht zwar geringere Strommehrkosten von 0,13–0,14 €/kWh, ist aber durch das zum Ladevorgang notwendige Aussteigen wesentlich unpraktischer. Zudem ist der Umrüstungsaufwand einiger Taxistände für die induktive Ladung gut möglich, da lokal begrenzt und im Aufwand überschaubar.

4 Ganzheitliche Betrachtung

4.1 Akzeptanz der Nutzer

Während eine Durchsetzung gegenüber der konduktiven Ladung aus wirtschaftlicher Perspektive vorerst nicht zu erwarten ist, kann die Gegenüberstellung der Strommehrkosten mit der Zahlungsbereitschaft potentieller Nutzer ein Indikator dafür sein, ob diese die induktive Ladung annehmen oder ablehnen.

Die Bereitschaft potentieller Nutzer, Mehrkosten für die induktive Ladung zu akzeptieren, hängt damit zusammen, welcher (zusätzliche) Nutzen bzw. welche Nachteile dem Nutzer durch die Verwendung der induktiven Ladung entstehen. Zur Beurteilung der Nutzerakzeptanz gegenüber der induktiven Ladung werden spezifische Faktoren wie Nutzerfreundlichkeit, Lebensdauer, Sicherheit, Standard, Effizienz und Kupferbedarf herangezogen (vgl. Tab. 1).

Die *Nutzerfreundlichkeit* durch den Wegfall des Kabels sowie die zu erwartende lange *Lebensdauer* aufgrund der witterungs- und vandalismusresistenten Ver-

legung haben einen positiven Einfluss auf die Nutzerakzeptanz. Daneben erhöht sich die *Sicherheit* der Nutzer durch eine berührungssichere und potentialfreie Ausführung der Technik.

Ein Akzeptanzhemmnis kann die *Sicherheit* in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit darstellen: Vergangene Entwicklungen in Bereichen, in denen z.T. noch höhere Frequenzen verwendet werden (z.B. Mobilfunk, W-LAN, Bluetooth) haben aber gezeigt, dass die Technologien im Wesentlichen aus Komfortgründen genutzt werden. Eine unkontrollierte Abstrahlung der magnetischen Wechselfelder in die Umgebung muss dennoch verhindert werden und eine strenge Anpassung der existierenden Normen und Richtlinien ist zum Schutz des menschlichen Körpers zwingend erforderlich.

Schließlich wird die induktive Ladung nur akzeptiert werden, wenn die Kompatibilität der Ladestationen und fahrzeugseitigen Systeme verschiedener Hersteller gewährleistet ist. Während für die induktive Ladung ein solcher *Standard* bisher nicht besteht, ist die Standardisierung der konduktiven Ladung durch den Mennekes-Stecker bzw. die DIN IEC 61851-1 weiter fortgeschritten.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Einflussfaktoren auf die Nutzerakzeptanz

Nutzerfreundlichkeit	+ Wegfall des Kabels + Kein Nutzereingriff erforderlich
Lebensdauer	+ Resistenz gegen Witterungseinflüsse und Vandalismus + Geringer Verschleiß
Sicherheit	+ Berührungssicher und potentialfrei – Elektromagnetische Strahlung
Standard	– Kompatibilität Ladestation und mobile Einheit aufwändiger als im konduktiven Fall • Einheitlicher Standard in Arbeit
Energieeffizienz	+ Geringer Einfluss auf deutschen Gesamtstromverbrauch – Well-to-wheel-Wirkungsgrad konduktiv 30%, induktiv 26%
Kupferbedarf	– Relativ hoher zusätzlicher Bedarf von 75.000 t (4,4% des dt. Kupferbedarfs) – Dadurch möglicher Einfluss auf die Kosten

Daneben haben die bei der Übertragung entstehenden *Effizienzverluste* Einfluss auf den Gesamtstromverbrauch Deutschlands und auf den Gesamtwirkungsgrad eines Elektrofahrzeugs. Während der Einfluss auf den Gesamtstromverbrauch mit zusätzlichen 345 GWh[19] relativ gering ist, reduziert sich der Well-to-wheel-Wirkungsgrad[20] im Verhältnis zur konduktiven Ladung – unter Annahme des heutigen deutschen Strommixes – von 30 % auf 26 %. Im Vergleich dazu erreichen effiziente moderne Verbrennungsfahrzeuge Well-to-wheel-Wirkungsgrade von etwa 25 % (CONCAWE 2009). Allerdings ist der Gesamtwirkungsgrad der Elektrofahrzeuge sehr stark abhängig von dem verwendeten Energiemix.

Durch die Verwendung von Spulen, die im Wesentlichen aus Kupfer bestehen, ergibt sich auch ein Einfluss auf den *Kupferbedarf*. Der jährliche Kupferbedarf in Deutschland beträgt etwa 1,7 Mio. t (Angerer et al. 2010). Somit ist der maximale Kupferbedarf für die induktiven Ladesysteme[21] mit zusätzlichen 75.000 t bei einer breiten Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen signifikant.

Vergangene Entwicklungen und Erkenntnisse aus anderen technischen Bereichen lassen vermuten, dass die Bedeutung von Lebensdauer, Standard und Energieeffizienz den Aspekten der Nutzerfreundlichkeit und Sicherheit unterzuordnen ist. Insbesondere die Bewertung der Risiken durch potentielle Nutzer kann über Annahme oder Ablehnung der induktiven Ladung entscheiden. Allerdings hat sich in der Vergangenheit häufig gezeigt, dass Technologien erst dann akzeptiert werden, wenn sich eine Norm durchgesetzt hat (vgl. z.B. Videorecorder und Internet).

Bisher kann also aufgrund einiger Unsicherheiten und noch ausstehender Entscheidungen keine allgemein gültige Aussage zur Nutzerakzeptanz getroffen werden. Stattdessen werden die Erkenntnisse zur Akzeptanz der Nutzer im Folgenden für eine ganzheitliche Betrachtung der induktiven Ladung verwendet.

---

19 Vollständige Substitution der konduktiven Ladung bei 1 Million Elektrofahrzeuge in 2020. Gesamtstromverbrauch in Deutschland in 2009: 596 TWh (BDEW 2010).

20 Ganzheitlicher Ansatz zur Erfassung der Gesamtkette von der Kraftstoffbereitstellung („Well“) bis zur Verwendung in Fahrzeugen zur Bewegung der Reifen („Wheel“).

21 Rahmenbedingungen: 20% der Fahrzeuge elektr. = 8 Mio., 4 Fahrzeuge/Station, 7,5 kg Kupfer je Station und Mobilteil.

4.2 Ganzheitliche Betrachtung der induktiven Ladung

Zur Ladung von Elektrofahrzeugen ist aus wirtschaftlicher Sicht aufgrund deutlicher Mehrkosten gegenüber der konduktiven Ladung vorläufig *keine flächendeckende Durchsetzung der induktiven Technik zu erwarten*. Prinzipiell kann sich unter bestimmten Voraussetzungen aber eine *regional gebundene Nischenanwendung* ergeben.

Aus heutiger Sicht ist eine Substitution des Ladekabels durch eine induktive Energieübertragung zur Ladung von Elektrofahrzeugen für private Nutzer mit einer durchschnittlichen Fahrleistung vorerst nicht abzusehen. Insbesondere bei einer Ladung am eigenen Stellplatz, dem wahrscheinlich ersten Einsatzfall zur Ladung von Elektrofahrzeugen, ist gegenüber der Kabelladung *mit zusätzlichen Kosten von mindestens 6.000 € pro System* aus Ladestation und Fahrzeugerweiterung zu rechnen. Die Mehrkosten entstehen vorwiegend durch heute sehr teure leistungselektronische Bauelemente und Materialien zur Magnetfeldführung, die sowohl fahrzeugseitig als auch an der Ladestation benötigt werden. Darüber hinaus sind durch die geringere Übertragungseffizienz der induktiven Ladung noch *zusätzliche Stromkosten hinzuzurechnen*. Aufgrund von Defiziten bzw. Ungewissheiten in den Bereichen Energieeffizienz, elektromagnetische Verträglichkeit und Nutzersicherheit ist bisher nicht davon auszugehen, dass die Mehrkosten durch Vorteile in der Benutzerfreundlichkeit kompensiert werden können.

Für ein induktives Ladesystem am *privaten Stellplatz* ist infolge von Degressionseffekten *bis 2030* eine *Halbierung der Anschaffungskosten* zu erwarten. Im Vergleich zur konduktiven Ladung bestehen jedoch weiterhin deutliche Mehrkosten, so dass sich im privaten Bereich auch 2030 kein Einsatzpotential zeigt.

Für eine Ladung im *nicht-privaten Bereich* betragen die Mehrkosten pro Ladestation zwar mindestens 14.000 €, durch eine Aufteilung auf mehrere Fahrzeuge, die je Ladestation versorgt werden können, ergeben sich pro Fahrzeug jedoch nur *noch Differenzkosten von mindestens 2.000 €*. Diese lassen sich weiter reduzieren durch eine volle Auslastung der Ladestation anhand von Fahrzeugen mit überdurchschnittlich hoher Fahrleistung. Somit kann sich für den nicht-privaten Bereich unter bestimmten Voraussetzungen ein stark begrenztes Einsatzfeld zur Ladung von Fahrzeugflotten ergeben. Diese Kriterien erfüllen z.B. Taxis, Linienbusse, der innerstädtische Lieferverkehr oder der Verkehr auf einem Werksgelände.

Analog zur privaten Ladung besteht auch in diesem Bereich ein signifikantes Reduktionspotential der Anschaffungskosten. Dadurch heben sich die Kosten zwar weiterhin von den Kosten eines konduktiven Systems ab, nähern sich aber soweit an, dass ein *Einsatz in* den oben genannten *Nischen realistisch* wird.

Aufgrund einer limitierten Anschlussleistung ist die häufig für den nicht-privaten Bereich geforderte *Schnellladung nicht möglich*. Angesichts der komfortablen Bedienung ohne erforderlichen Eingriff des Nutzers können die Fahrzeuge aber bei regelmäßigen, kurzen Stopps auf langen und häufig gleichen Strecken geladen werden. Eine separate Infrastruktur für Taxis und Linienbusse besteht bereits und könnte mit geringem Aufwand umgerüstet werden.

Als *Vorteile* der induktiven Ladung sind die *nutzerfreundliche Bedienung* sowie der Wegfall spannungsführender Teile hervorzuheben. Dadurch reduziert sich nicht nur der Verschleiß und damit der Aufwand zur Wartung, sondern auch die Gefährdung der Nutzer. Durch die Verlegung in bzw. unter der Straße bietet sich ein *effektiver Schutz vor Vandalismus und Witterungseinflüssen*.

Neben den höheren Kosten entstehen gegenüber der kabelgebundenen Ladung auch technische *Nachteile*. Die Übertragung über den Luftspalt verursacht in Abhängigkeit von Abstand, Geometrie und Qualität der Spulen *energetische Verluste von derzeit 20 %*. Besteht ein Positionierungsversatz zwischen den Spulen können diese weiter ansteigen. Im Vergleich dazu beträgt der Übertragungswirkungsgrad eines konduktiven Systems 95 %. Zudem ist die übertragbare Leistung u.a. durch heute verfügbare Leistungselektronik und die Grenzwerte für elektromagnetische Felder auf maximal 11 kW begrenzt. Weiterhin ist eine Definition und Umsetzung eines einheitlichen Standards erforderlich.

Die häufig zur Netzstabilität und Partizipation an den Regelenergiemärkten geforderte *bidirektionale Energieübertragung* zur Rückspeisung in das Stromnetz ist ohne aufwendige Anpassung und Umgestaltung des induktiven Systems *nicht möglich*. Konduktive Systeme dagegen sind schon heute in der Lage, Energie in beide Richtungen zu transportieren. Zudem reduziert sich durch den geringen Übertragungswirkungsgrad der *Gesamtwirkungsgrad* eines Elektrofahrzeuges.

Angesichts der möglichen Reduktion der Kosten und einer gegebenenfalls höheren Zahlungsbereitschaft kann sich das induktive Laden als *Komfortoption in Nischen* durchsetzen. Dazu haben *Standardisierung* und *elektromagnetische Verträglichkeit* einen maßgeblichen Einfluss auf die Akzeptanz der Nutzer.

Grundsätzlich kann die induktive Technik die *konduktive Ladung ergänzen*: Als Ergänzung zu den „Erhaltungsladungen“ im Laufe des Tages kann eine vollständige Ladung der Fahrzeuge über Nacht stattfinden. Für den weiteren Einsatz besteht allerdings noch *technischer Forschungsbedarf*:

- Einhaltung der Vorschriften zur elektromagnetischen Verträglichkeit
- Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades
- Entwicklung des Wirkungsgrades außerhalb der spez. Temperaturbereiche
- Größere Toleranzen in Bezug auf Positionierung und Luftspalt
- Bidirektionale Energieübertragung für zukünftige Vehicle to grid – Konzepte

5 Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Anwendbarkeit der induktiven Ladung bei Elektrofahrzeugen wurden auf Grundlage einer Befragung von Experten aus Wissenschaft und Industrie wissenschaftliche Analysen zum Stand der Technik und der ökonomischen Dimension durchgeführt. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnten erste Anwendungsfelder in der Elektromobilität identifiziert werden.

Die zurzeit in der Entwicklung befindlichen Systeme erreichen Wirkungsgrade von 80 % und können maximal 11 kW an elektrischer Energie übertragen. Ein Einsatz der induktiven Technik bietet sich aufgrund einer einfachen Handhabung, geringen Verschleißes und eines hohen Schutzes gegen Vandalismus an, erfordert zunächst allerdings eine Weiterentwicklung in verschiedenen Bereichen. Neben einer Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades und den Toleranzen hinsichtlich Positionierung und Größe des Luftspaltes müssen insbesondere die Vorschriften zur elektromagnetischen Verträglichkeit eingehalten werden. Zudem ist die Standardisierung bisher ungeklärt und die Technologie nicht dazu in der Lage, Energie in das Stromnetz einzuspeisen.

Aufgrund signifikanter Mehrkosten gegenüber der konduktiven Ladung ist aus wirtschaftlicher Sicht vorläufig keine weitverbreitete Durchsetzung der induktiven Technik zu erwarten. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie z.B. einer überdurchschnittlich hohen Fahrleistung einzelner Fahrzeuge, ergibt sich allerdings für bestimmte gewerbliche Einsatzfelder zur Ladung von Fahrzeugflotten ein Potential. Potenzielle Skaleneffekte können die Kosten bis 2030 soweit reduzieren, dass ein regional gebundener Einsatz als Komfortladeoption in Nischen realistisch wird.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung dieser Studie im Rahmen des Projektes „Meregio Mobil“ unter dem Förderkennzeichen 01-ME-09004.

Weiterhin gilt der Dank auch den Gesprächspartnern aus der Industrie für die intensive Diskussion während der Interviews (siehe Quellenangaben) sowie Herrn J. Heinrich, Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe der Universität Stuttgart und Frau H. Barth des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) für Ihre Kommentare und Diskussion.

7 Literatur

Angerer, G.; Mohring, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Wietschel, M. (2010): Kupfer für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität, Karlsruhe, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung.

BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) (2010): Stromerzeugung in Deutschland 2009

Biere, D.; Dallinger, D.; Wietschel, M. (2009): Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen, Zeitschrift für Energiewirtschaft (02/2009), S. 173-181.

Brauner, G. (2008): Infrastrukturen der Elektromobilität, (Springer, Hrsg.) Fachzeitschrift e&i (Heft 11/2008), S. 382-386.

CONCAWE (2007): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center).

Hu, A. (2009): Wireless/Contactless Power Supply – Inductively coupled resonant converter solutions, Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller.

Huwig, D.; Wambsganß. P. (2010): Kontaktlose Energieversorgung mobiler Geräte durch induktive Nahfeldkopplung. Homburg, Deutschland.

Imura, T.; Uchida, T.; Hori, Y. (2009): Flexibility of Contactless Power Transfer using Magnetic Resonance Coupling to Air Gap and Misalignment for EV, World Electric Vehicle Journal (03/2009), S. 24-34.

Kiefer, S. (2009): Ganz ohne Kabelsalat, Sonne, Wind & Wärme (16/2009), S. 32-34.

Kley, F.; Dallinger, D.; Wietschel, M. (2010): Assessment of future EV charging infrastructure, Genf: Proceedings of International Advanced Mobility Forum, 09.-10. März 2010.

Kürschner, D. (2010): Methodischer Entwurf toleranzbehafteter induktiver Energieübertragungssysteme. Aachen, Shaker Verlag.

L+K (Linne + Krause Marketing-Forschung) (2008): Gutachten über die wirtschaftliche Lage des Hamburger Taxigewerbes, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt

Mazza, P.; Hammerschlag, R. (2005): Wind-to-Wheel Energy Assessment, Seattle: Institute for Lifecycle Environmental Assessment (ILEA).

MiD (2002): Mobilität in Deutschland, Projektbearbeitung durch DIW Berlin, Verteilt durch die Clearingstelle Verkehr des DLR-Institut für Verkehrsforschung: www.clearingstelle-verkehr.de

Parspour, N. (2010): Berührungslose Energieübertragung – Einführung, S. 1-26. Essen, Haus der Technik, RWTH Aachen.

Schedler, D. (2009): Kontaktlose Energieübertragung – Neue Technologie für mobile Systeme, München, Süddeutscher Verlag onpact GmbH.

Tate, E.; Harpster, M.; Savagian, P. (2008): The Electrification of the Automobile: From Conventional Hybrid, to Plug-in Hybrids, to Extended-Range Electric Vehicles, SAE 2008-01-0458, Abgerufen am 19. Mai 2010 von http://preprodha.ecomm.gm.com:8221/volt/eflex/docs/paper.pdf

VDE (2008) Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC69/156/CD:2008)

Wallerath, J.; Waffenschmidt, E. (2004): Inductive energy transfer for portable electronic devices, Abgerufen am 02. Juni 2010 von http://www.extra.research.philips.com/publ/rep/nl-ur/PR-TN2004-01106.pdf

Wiesspeiner, G. (2005): Drahtlos Akkus aufladen, Abgerufen am 19. Mai 2010 von www.bticcs.com/pub/d+e2005.pdf

Wietschel, M.; Kley, F.; Dallinger, D. (2009): Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft (Heft 03/2009), S. 33-41.

Autoren

Sebastian Schraven, Fabian Kley, Martin Wietschel

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)
Competence Center Energy Politik und Energie Systeme

Kontakt: Brigitte Kallfass
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Phone: +49 / 721 / 6809-150
Fax: +49 / 721 / 6809-203
E-mail: brigitte.kallfass@isi.fraunhofer.de
URL: www.isi.fraunhofer.de

Karlsruhe 2010