

## Induktives Laden von Elektroautos im Modellexperiment

Angela Fösel\*

\*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
[angela.foesel@fau.de](mailto:angela.foesel@fau.de)

### Kurzfassung

Das Thema induktive Energieübertragung spielt im Physikunterricht aller Schularten eine wesentliche Rolle wie auch im Alltag der Schülerinnen und Schüler. So können Smartphones mittlerweile induktiv aufgeladen werden, und auch im Zusammenhang mit Elektroautos wird dieses Prinzip aktuell diskutiert. Eine Orientierung des Physikunterrichts am Kontext „Elektroauto“ weckt das Interesse der Schülerinnen und Schüler für das Phänomen der induktiven Energieübertragung, motiviert und unterstützt das Lernen nachhaltig. In diesem Beitrag wird das Prinzip des induktiven Ladens von Elektroautos aus physikalischer und physikdidaktischer Sicht beleuchtet. Hierzu werden zunächst wesentliche Aspekte der induktiven Energieübertragung aufgezeigt, immer mit dem Fokus auf der Anwendung „induktives Laden“. Das Hauptaugenmerk jedoch liegt auf der Realisierung eines Modell-Elektroautos: Dieses wurde eigens konzipiert, um grundsätzliche Mechanismen des induktiven Ladens eines (echten) Elektroautos erfahrbar zu machen.

### 1. Einleitung

Die Geschichte der Elektromobilität [1] ist eng verknüpft mit der Erfindung der (wiederaufladbaren!) Batterie: Bereits im Jahr 1802 stellte *Johann Wilhelm Ritter* (1776-1810) einen ersten Akkumulator vor, die Ritter'sche Säule. Das vermutlich erste Elektrofahrzeug mit Akkumulatorenbetrieb konzipierte *Gustave Trouvé* (1839-1902), und er präsentierte sein Elektrodreirad im April 1881 erstmals der Pariser Öffentlichkeit. Das Trouvé Tricycle erreichte eine Geschwindigkeit von bis zu 12 km/h, was in etwa dem Tempo einer Pferdekutsche entsprach. Die Leistung des Motors betrug 0,1 PS (0,074 kW), die Reichweite des Fahrzeugs lag bei 26 km. Für einen Vergleich der Kenndaten des Trouvé Tricycle sei beispielsweise der e-Golf von VW hergenommen: Dieses Elektroauto wirbt mit einer maximalen Reichweite von 190 km, die Spitzengeschwindigkeit soll 140 km/h betragen. Die Leistung des Elektromotors wird vom Hersteller mit 115 PS (85 kW) angegeben.

Damals wie heute decken Elektrofahrzeuge ihren gesamten Energiebedarf über den Akku(mulator), der deshalb regelmäßig aufgeladen werden muss. Je nachdem, an welcher Ladestation das Fahrzeug angeschlossen wird, wird dem Fahrzeug Gleichstrom, Wechselstrom oder Drehstrom unterschiedlicher maximaler Stromstärke angeboten. Die Ladung der sekundären Batterie selbst erfolgt jedoch stets mit Gleichstrom. Im einfachsten Fall geschieht das Laden an der heimischen Steckdose, die üblicherweise Stromstärken von 10-16 A liefert. Da die Leitungen an der Hausstromversorgung nicht für einen Dauerbetrieb von 16 A ausgelegt sind, lässt sich bei ei-

ner Spannung von 230 V nur eine Leistung von 2,3 kW entnehmen. Damit könnte eine komplett entladene Sekundärbatterie mit einer Speicherkapazität (physikalisch: „Energieinhalt“) von 24,2 kWh (e-Golf) innerhalb von 11-13 Stunden vollständig aufgeladen werden. Die heute üblichen Lithium-Ionen-Akkus sollten jedoch nicht vollständig entladen werden (vgl. [2], S. 284), daher kann von einer typischen Ladedauer von 5-6 Stunden ausgegangen werden.

In den meisten Fällen geschieht das Laden über Nacht. Dennoch erscheint uns eine Ladedauer von fünf Stunden inakzeptabel, sind wir es doch von Verbrennern gewohnt, dass ein Tankvorgang nur wenige Minuten dauert. Schnellladestationen können Akkus mit der Kapazität von 24,2 kWh in nur etwa 30 Minuten von 20 % auf 80 % des Energieinhalts aufladen, vorausgesetzt, das Fahrzeug verfügt über die entsprechende Infrastruktur; ein ausschließliches Aufladen der Traktionsbatterie eines Elektroautos mit großen Strömen an Schnellladestationen vermindert allerdings deren Lebensdauer [3]. Unabhängig von der Ladedauer haben all diese leitungsgebundenen (konduktiven) Ladeverfahren die Nachteile, dass Kabel mit der Zeit verschmutzen können und dass das Hantieren beim „Tanken“ aufwändig ist. Die Vorteile einer draht- und kontaktlosen Ladetechnik liegen somit eindeutig im Komfort, im Winter oder bei Regen mag auch die Sicherheit des Betreibers ein gutes Argument sein.

Generell wird bei einem draht- und kontaktlosen Laden von Akkus die Energie zwischen Ladestation und elektrischem Gerät ohne Verwendung von Steckverbindungen und elektrischen Kontakten

übertragen. Neben anderen möglichen Formen der Energieübertragung, beispielsweise optisch (Solarzelle) oder mechanisch (Piezowandler), kommt speziell beim draht- und kontaktlosen Aufladen von Akkus die induktive Übertragung von Energie im Nahfeld von zwei Spulen zur Anwendung (transformatorische Kopplung).

Im Vergleich zum konventionellen Transformator gibt es hierbei nur den Unterschied, dass die Primär- und die Sekundärseite nicht durch einen Eisenkern aus Transformatorblechen magnetisch sehr gut miteinander gekoppelt sind. Übrigens findet diese Methode auch jenseits der Elektromobilität ein weites Anwendungsfeld: Neben Schnurlos- und Mobiltelefonen, elektrischen Zahnbürsten oder Rasierapparaten profitieren vor allem solche Geräte von der induktiven Ladetechnik, bei denen es keine Steckverbindungen oder Durchführungskontakte geben kann, beispielsweise medizinische Implantate [4].

## 2. Induktive Energieübertragung und induktives Laden

Beim induktiven Laden funktioniert die Energieübertragung „induktiv“ über einen Luftspalt zwischen zwei sich gegenüberliegenden Spulen. Eine im Boden versenkte (primäre) Spule wird von Wechselstrom durchflossen und erzeugt dabei ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld. Dieses magnetische Wechselfeld induziert an den Enden der (sekundären) Spule, die in die Unterbodenverkleidung des Fahrzeugs integriert ist, eine (Induktions-)Spannung. Bei einem sekundärseitig geschlossenen Stromkreis fließt ein Induktionsstrom. Für das Laden von Akkumulatoren wird die in der Empfangsspule induzierte Spannung zunächst gleichgerichtet und steht anschließend als Gleichspannung dem „Verbraucher“ oder dem Lade regler zur Verfügung. Insbesondere beim Laden von heute in Elektroautos häufig verwendeten Lithium-Ionen-Akkus kommen spezielle Ladeverfahren wie das CCCV- („Constant Current and Constant Voltage“-) Verfahren (vgl. [2], S. 309) zur Anwendung. Eine schematische Darstellung des Prinzips der induktiven Energieübertragung und des induktiven Ladens eines Elektroautos findet sich unter [5].

Die induktive Energieübertragung erfolgt effizient bei vergleichsweise hohen Frequenzen von etwa 10 kHz bis ca. 1 MHz, da diese den Leistungstransfer begünstigen. Ebenso entscheidend für einen hohen Wirkungsgrad der Energieübertragung ist eine gute magnetische Kopplung zwischen den beiden Spulen. Der Kopplungsfaktor hängt stark von dem Versatz der Spulen in horizontaler wie auch in vertikaler Richtung ab. In der Praxis versucht man, das Fahrzeug so zu positionieren, dass sich die beiden Spulen direkt gegenüber stehen. Der Luftspalt beträgt typischerweise etwa 150 mm; zum Erreichen dieses geringen vertikalen Abstands wird die Sekundärspule meist abgesenkt. In dem kurzen Video „Emil - Braunschweig

fährt induktiv“ (vgl. [6]) ist die Vorbereitung auf einen induktiven Ladevorgang gut zu sehen. „Emil“ (Elektromobilität mittels induktiver Ladung) begann 2012 als ein vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördertes Projekt in Braunschweig. Seit dem 27. März 2014 ist das Projekt Realität: Insgesamt fünf rein elektrisch betriebene Busse sind in Braunschweig auf einer 9,1 km langen Strecke im Linienbetrieb (Linie M19) unterwegs. Geladen wird per induktiver Schnellladung mit einer Leistung von knapp 200 kW am Hauptbahnhof (= Start- und Zielhaltestelle) sowie an ausgewählten Haltestellen während des Ein- und Aussteigens der Fahrgäste [7]. Ebenfalls im März 2014 ist die vergleichbare Buslinie 63 in Mannheim in Betrieb genommen worden, seit August 2015 sind auch in der Hauptstadt Berlin Linienbusse mit induktiver Ladeinfrastruktur unterwegs (Linie 204; Zoologischer Garten → Bahnhof Südkreuz) [8]. Geplant ist, das auch für Elektroautos, insbesondere für Taxis, nutzbar zu machen [9].

Weiterhin wird die magnetische Kopplung verbessert durch den Einsatz ferromagnetischer Materialien, die z. B. oberhalb oder unterhalb der Spulen angebracht werden und den magnetischen Fluss bündeln bzw. die Ausbildung von Streufeldern verringern (vgl. [10], S. 7). Die Ferrite wirken zusätzlich als Schirm zur Reduktion der induzierten Störspannungen in benachbarten Schaltungsteilen. Darüber hinaus ist das System zur Abschirmung des Fahrgastraums gegenüber dem magnetischen Feld nach oben hin mit einer Aluminiumplatte abgedeckt, so dass keine Gefahr für die Nutzer (vgl. [2], S. 313 und [11], S. 5) besteht. Details zur technisch-praktischen Umsetzung finden sich unter [12].

Ein Akku mit einer Kapazität von 20 kWh kann per induktivem Ladeverfahren bei einer durchschnittlichen Ladeleistung von 3 kW in etwa 6 Stunden voll aufgeladen oder, bei entsprechender Infrastruktur, beispielsweise an Taxiplätzen oder Bushaltestellen (→ „Emil“), in kürzeren Zeiträumen immer wieder nachgeladen werden. Die induktive Energieübertragung ist jedoch keine neue Technologie des 21. Jahrhunderts. Herzschrittmacher waren die ersten Gerätschaften, die das Prinzip des induktives Laden anwandten: Der schwedische Herzchirurg Åke Senning vollendete 1958 in Zusammenarbeit mit Rune Elmquist die Arbeiten am ersten vollständig implantierbaren Schrittmacher.

## 3. Induktives Laden eines Modellelektroautos

Bei einem Elektroauto kann der Akku mittels resonant induktiver Energieübertragung aufgeladen werden. Diese elektrische Energie wird anschließend (weitestgehend) dem Elektromotor zugeführt, und das Auto fährt. Um die grundsätzlichen Mechanismen der induktiven Energieübertragung und des induktiven Ladens im Zusammenhang mit einem (echten) Elek-

troauto erfahrbar zu machen, haben wir ein Modell-Elektroauto konzipiert, das bez. der entscheidenden Bauteile strukturell zu einem realen Elektroauto ist: Unser Modell-Elektroauto hat vier Räder, einen Elektromotor und einen Akkupack. In Abb. 2 ist hinten rechts (silberfarben) der Elektromotor zu sehen, vorne links (geschützt durch schwarzes Tape) der Akkupack. Weitere Details, insbesondere Angaben zu den verwendeten Materialien, werden später in diesem Kapitel gemacht.

Wir wollen zunächst unsere Modellierung des Prinzips der Energieübertragung vorstellen: Zur Realisierung der induktiven Energieübertragung haben wir uns für die fertige Sender-Empfänger-Einheit „Adafruit Inductive Charging Set - 5 V @ 500 mA max“ [13] entschieden, die die Firma exp-tech kostengünstig anbietet. Dieses Set generiert primärseitig aus einer Gleichspannung eine hochfrequente Wechselspannung; eine Senderspule wird damit von einem ebenfalls hochfrequenten Wechselstrom durchflossen und erzeugt so ein sich zeitlich schnell änderndes Magnetfeld. Die Energie wird durch das Spulenpaar resonant induktiv übertragen. Gemessen haben wir eine Übertragungsfrequenz von ca. 66 kHz. Im Empfängerkreis schließlich wird aus der hochfrequenten Wechselspannung eine Gleichspannung mit einem festen Ausgangswert von 5 V generiert. Zu beachten ist, dass die Schaltung auf der Primärseite eine (stabilisierte) Gleichspannung von 9,5 V verlangt, die Stromstärke sollte auf maximal 100 mA begrenzt werden. Sekundärseitig haben wir bei optimaler Kopplung (wenige Millimeter Abstand zwischen den Spulen) einen Kurzschlussstrom von ca. 120 mA gemessen. Bei Entfernungen jenseits der 10 mm oder bei horizontalem Versatz sinkt die Stromstärke schnell auf unter 50 mA, und auch die Ausgangsspannung liegt dann deutlich unter 5 V. Versetzen wir eine der beiden oder beide Spulen mit einer Ferritplatte, so steigt die Kurzschlussstromstärke auf etwa 140 - 160 mA. Im unbelasteten Zustand beträgt somit der Wirkungsgrad unseres Systems etwa 84 %.

Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Zum Nachweis der übertragenen Energie können wir beispielsweise eine LED zum Leuchten bringen (→ Abb. 1). Die Leuchtstärke der LED hängt signifikant von der Positionierung der Spulen untereinander ab; sie lässt damit qualitativ eine Beurteilung der Effizienz der magnetischen Kopplung zu. Auch ein kleiner Elektromotor, wie er im Modellbaubereich eingesetzt wird, kann zum Laufen gebracht werden. Wir haben hierzu z. B. den Motor Fa-130RA der Firma Opitex [14] verwendet.

Ein nachfolgendes Modellexperiment soll das Prinzip des induktiven Ladens erfahrbar machen: Wir wollen unser Modell-Elektroauto bzw. dessen Akku induktiv laden und dann das Fahrzeug in Bewegung versetzen. Im Unterschied zu einem realen Elektroauto bekommt unser Modell-Auto allerdings einen NiMH-

Akku, da es bei diesem (bei kleinen Ladenströmen) keine speziellen Ladeverfahren zu berücksichtigen gilt.

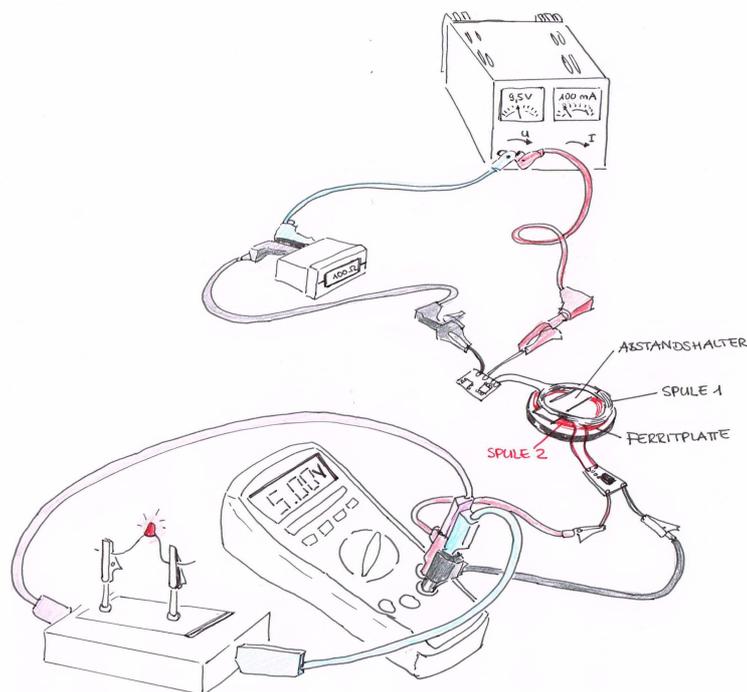


Abb. 1: Induktive Energieübertragung mit dem „Inductive Charging Set“ von Adafruit. Die primäre Spule liegt auf einer Ferritplatte; Klebezettel sorgen für einen Abstand von etwa 1-2 mm zwischen den beiden Spulen. Die Ausgangsspannung beträgt 5 V. Eine LED (mit Vorwiderstand) macht deutlich, dass Energie übertragen wird.

Die an der Sender-Empfänger-Einheit ausgangsseitig zur Verfügung stehende Energie soll genutzt werden, um einen Akku zu laden. Wir haben uns für einen kleinen Modellbau-Akkupack vom Zelltyp NiMH (4 Zellen) entschieden: Wir wollten an Gewicht sparen, um unser Modell-Auto simpel zu halten, aber gleichzeitig auch die Ausgangsspannung von 5 V maximal nutzen. Die Ausgangsspannung unseres Energieübertragungssystems war jedoch nicht ganz ausreichend zum Laden der vier Zellen, da die Ladeschlussspannung hierfür etwa  $4 \cdot 1,45 \text{ V} = 5,8 \text{ V}$  betragen müsste. Deshalb haben wir das Akkupack umgebaut, so dass nur noch drei Zellen verwendet werden. Ergänzt haben wir das Pack um eine Diode, an der die übrigen etwa 0,7 V abfallen. Wir haben den Ladevorgang insofern überwacht, als wir den Ladestrom in Abhängigkeit von der Zeit mit einer Messwerterfassungssoftware gemessen haben. Die Spannung an den Klemmen des umgebauten Modellbau-Akkupacks wurde gleichzeitig aufgezeichnet. Mit Erreichen der Ladeschlussspannung von 4,35 V haben

wir den Ladevorgang beendet.

Wir haben den Akku erst nach dem Ladevorgang in unser Modell-Elektroauto eingesetzt, um die einzelnen Vorgänge transparent zu gestalten. Bei einem realen Elektroauto wird selbstverständlich über der Primärspule geparkt, und der Akku befindet sich, auch beim Aufladen, immer im Auto. Unser erstes induktiv geladenes Elektro-Modellauto (vgl. Abb. 2) war einfachst gehalten: Die Karosserie und der Antrieb über ein einzelnes Vorderrad (Frontantrieb!) waren einem Funktionsmodell „Elektrofahrrad“ von Opitec entnommen. Allerdings haben wir den mitgelieferten Elektromotor durch einen Solar-Getriebemotor ersetzt, der bezüglich seiner Kenndaten besser auf das Akkupack abgestimmt war. Letzteres haben wir aus technischen Gründen auf dem Dach des Autos angebracht und über einen einfachen Kippschalter mit dem Motor verbunden. Sobald man das Auto „startet“, d.h. den Schalter umlegt, fährt es los!

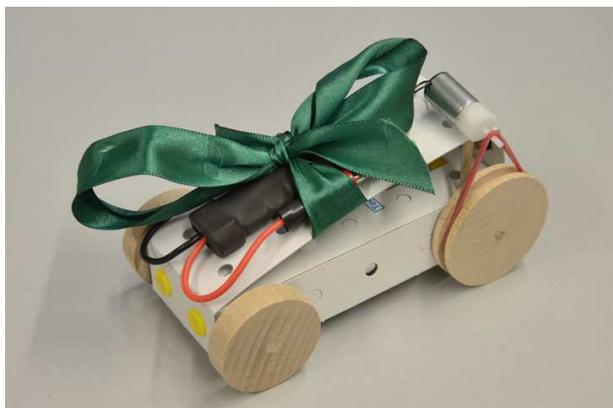


Abb. 2: Modell-Elektroauto.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben uns in Theorie wie auch im Experiment mit dem Prinzip des induktiven Ladens von Elektroautos auseinandergesetzt.

Einfache Experimente, die grundsätzliche Mechanismen des kontaktlosen Energieübertragens zeigen, wurden vorgestellt.

Insbesondere haben wir ein (Modell-)Elektroauto induktiv aufgeladen und in Bewegung gesetzt. Bisher haben wir jedoch nur gezeigt, dass der induktiv aufgeladene Akku den Elektromotor energetisch versorgt. Weiterführende Experimente im Zusammenhang mit einer Reichweitendiskussion stehen noch aus und führen sicherlich zu einem tieferen Verständnis. Auch bietet das aktuelle Forschungsfeld des „dynamischen induktiven Ladens“, d.h. des Ladens während der Fahrt, noch viele Ansatzpunkte für experimentelle Umsetzungen.

#### 5. Literatur

- [1] Fösel, Angela: Eine kleine Geschichte der Elektromobilität. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 64 (2016), No. 8, S. 5-12. Aulis Verlag. Hallbergmoos 2015.
- [2] Schoblick, Robert: Antriebe von Elektroautos in der Praxis. Franzis Verlag. Haar bei München 2013.
- [3] Batteriezukunft. Speicherenergie für E-Mobility: Schnelles Laden ermüdet die Batterie vorzeitig. [www.batteriezukunft.de/nutzen/schnellladen](http://www.batteriezukunft.de/nutzen/schnellladen) (10.08.2016)
- [4] Grödl, Felix Veit: Simulationstool zur Auslegung transkutaner Energieübertragungssysteme. Dissertation. Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München 2013.
- [5] Induktive Energieübertragung und induktives Laden eines Elektroautos. [www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/presseinformationen-2013/es-geht-auch-ohne-kabel](http://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/presseinformationen-2013/es-geht-auch-ohne-kabel) (31.05.2016)
- [6] Forschungsprojekt emil: Emil - Braunschweig fährt induktiv. Film, veröffentlicht am 18.08.2014. <http://www.verkehr-bs.de/unternehmen/forschungsprojekt-emil/film.html> (31.05.2016)
- [7] Forschungsprojekt emil: Die Technik. <http://www.verkehr-bs.de/unternehmen/forschungsprojekt-emil/technik.html> (31.05.2016)
- [8] E-Bus Berlin. <http://e-bus.berlin/> (31.05.2016)
- [9] Forschungsprojekt emil: Induktives Laden von E-PKW. <http://www.verkehr-bs.de/unternehmen/forschungsprojekt-emil/induktives-laden-von-e-pkw.html> (31.05.2016)
- [10] Hantschel, Jörg: Kabellose Energieübertragung. Die Spulen als zentrale Bauelemente. [http://www.we-online.de/web/de/electronic\\_components/download\\_center\\_pbs/Download\\_Center\\_PBS.php](http://www.we-online.de/web/de/electronic_components/download_center_pbs/Download_Center_PBS.php) (31.05.2016)
- [11] Parspour, Nejila und Wambsgaß, Peter: Kontaktlose Energieübertragung. [http://www.rrc-wireless-power.de/fileadmin/website\\_wireless\\_power/Dokumente/Whitepapers/RRC\\_WirelessPower\\_Kontaktlose\\_Energieuebertragung.pdf](http://www.rrc-wireless-power.de/fileadmin/website_wireless_power/Dokumente/Whitepapers/RRC_WirelessPower_Kontaktlose_Energieuebertragung.pdf) (31.05.2016)
- [12] Conductix-Wampfler AG, Weil am Rhein und Daimler AG, Sindelfingen: Abschlussbericht zum Verbundvorhaben „Kabelloses Laden von Elektrofahrzeugen“. <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/>

- foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/  
pkw-feldversuche/abschlussberichte/  
abschlussbericht-conductix.pdf (31.05.2016)
- [13] EXP GmbH, 66117 Saarbrücken/Germany. <http://www.exp-tech.de/>
- [14] OPITEC Handel GmbH, 97232 Giebelstadt/Germany. <http://de.opitec.com/opitec-web/articleNumber/209644/kmanmo/p/2> (09.08.2016)
- adafruit-inductive-charging-set-5v-at-500ma-max (09.08.2016)