

Modularer Aufbau eines induktiv aufladbaren Modell-Elektroautos

Simon Wilhelm*, Angela Fösel*

*Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstraße 7, 91058 Erlangen
simon.wilhelm@fau.de, angela.foesel@fau.de

Kurzfassung

BMW plant für das Jahr 2018 eine neue Variante eines seiner Hybrid-Fahrzeuge auf den Markt zu bringen: Der Akkumulator des BMW 530e iPerformance soll sich mithilfe einer speziellen Ladestation induktiv aufladen lassen und damit die E-Mobilität revolutionieren [1]. Dies zeigt, dass sich das Prinzip der induktiven Energieübertragung inzwischen weit über das Laden von elektrischen Zahnbürsten und Smartphones hinaus erstreckt und sich der Anwendungsbereich ständig erweitert. Auch im Physikunterricht aller Schularten spielt die induktive Energieübertragung eine wichtige Rolle. Eine Verknüpfung des Themas Induktion mit dem induktiven Ladesystem für Elektroautos weckt das Interesse der Schülerinnen und Schüler, motiviert und unterstützt das Lernen durch lebensnahe Kontexte.

In diesem Beitrag soll aus physikalischer und aus physikdidaktischer Sicht der Vorgang des induktiven Ladens anhand eines selbst entwickelten Modell-Elektroautos diskutiert werden. Der Fokus liegt hierbei auf dem modularen Aufbau, der sich von der Konzeption eines hochfrequenten Schwingkreises über eine resonante Übertragung bis hin zum Aufladen der Akkumulatoren erstreckt.

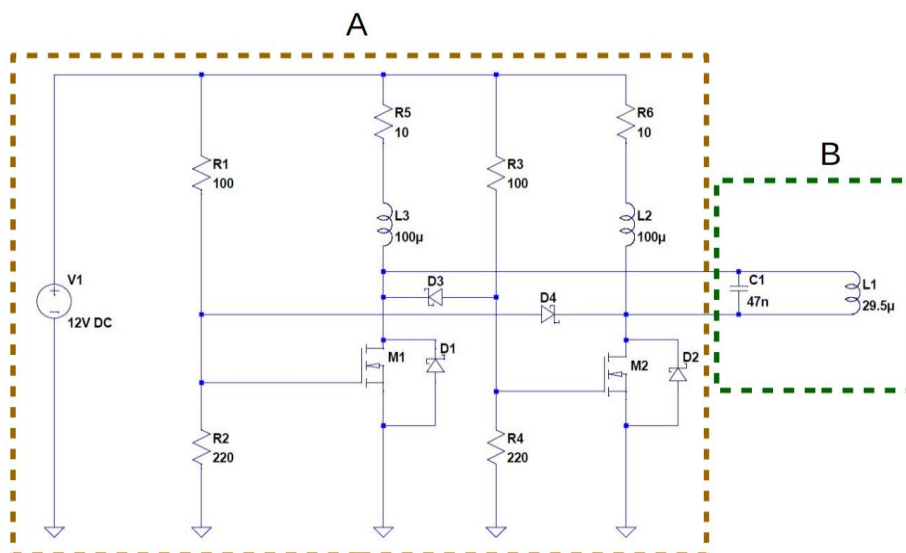


Abb. 1: Schaltplan des Royer-Oszillators.

1. Motivation

Im Rahmen einer Examensarbeit für das Studium des gymnasialen Lehramts wurde ein Modell konzipiert, das den Aufbau eines induktiv ladbaren Elektroautos und dessen Ladestation zeigt. Darüber hinaus sollte im Modellexperiment das induktive Laden auch für Schülerinnen und Schüler erfahrbar gemacht werden. Durch den realitätsnahen Bezug soll deren Interesse geweckt und ihre Motivation gesteigert werden, wobei der realitätsnahe Bezug dadurch gegeben ist, dass bereits Straßenbusse, die an ihren Haltestellen induktiv geladen werden, im Einsatz sind [2]. Darüber hinaus kündigt BMW für das Jahr 2018 den BMW 530e an, der mithilfe eines Ladepads induktiv aufgeladen werden kann, wobei das Ladepad als Sender Energie auf den Empfänger – das Auto – überträgt.

2. Allgemeiner Aufbau

Allgemein lässt sich das Ladesystem sowohl im Modell als auch im Original in zwei Teile aufteilen: Die Primärseite fungiert als Sender (Ladepad) und die Sekundärseite als Empfänger (im Auto). Die Primärseite muss mit Energie versorgt werden und ungedämpft schwingen. Die Sekundärseite besteht aus der Empfängerspule, in der eine Spannung durch das sich zeitlich ändernde Magnetfeld der Primärseite induziert wird, sowie einer Ladevorrichtung für den im Auto verbauten Akkumulator. Ziel des gesamten Systems ist es, Energie vom Sender auf den Empfänger zu übertragen, um den im Auto verbauten Akkumulator zu laden.

3. Aufbau des Modells - Primärseite

Primärseitig wurde die ungedämpfte Schwingung durch einen Royer-Oszillator realisiert, zu dem ein Schaltplan in Abbildung 1 zu sehen ist. Dieser hat zwei Vorteile. Einerseits schwingt er immer mit der Eigenresonanzfrequenz des integrierten LC-Schwingkreises, andererseits ermöglicht er eine permanente Energieversorgung [3]. Der Teil A dient als Versorgung für den LC-Schwingkreis (Teil B). Die Spule des LC-Schwingkreises besitzt dabei eine Induktivität von 29.5 μH und der Kondensator eine Kapazität von 47 nF, was zu einer Eigenresonanzfrequenz von 142 kHz führt. Durch die Transistoren M1 und M2, die durch den restlichen Aufbau immer wechselseitig schalten, wird im LC-Schwingkreis eine sinusförmige Spannung mit der Eigenresonanzfrequenz erzeugt.

Um die Funktionsweise des theoretischen Aufbaus aus Abbildung 1 zu überprüfen wurde eine Simulation des Royer-Oszillators mithilfe der Software „Eagle“ [4] durchgeführt. Das Ergebnis dieser Simulation zeigte eine ungedämpfte Schwingung mit einer Periodendauer von ca. 7 μs , was einer Frequenz von 142 kHz entspricht. Ebenso ergibt eine Vermessung des realen Royer-Oszillators, der in Abbildung 2 zu sehen ist, eine hochfrequente Wechselspannung parallel zur Spule des LC-Schwingkreises mit eben jener Fre-



Abb. 2: Platine des Royer-Oszillators mit Anschlüssen für die Gleichspannungsquelle (schwarz-rot) und für die Senderspule (blau).

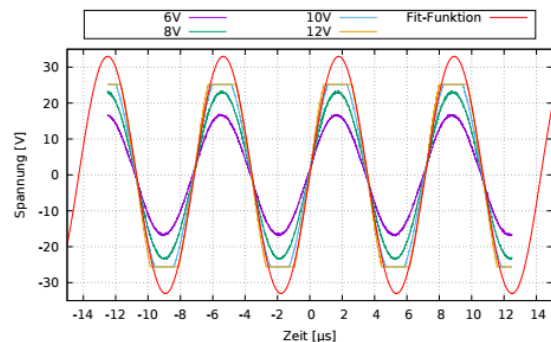


Abb. 3: Messung der von Royer-Oszillator erzeugten Ausgangsspannung parallel zur Senderspule bei verschiedenen Eingangsspannungen. Die aufgrund des eingeschränkten Messbereichs abgeschnittene Kurve wurde durch eine Fit-funktion der Form $f(x)=33*\sin(0.88*x)$ angenähert.

quenz. Bei der Messung wurde dabei für verschiedene Eingangsspannungen (DC) jeweils die Wechselspannung über der Spule mithilfe eines digitalen Oszilloskops aufgezeichnet. Abbildung 3 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Bei einer Eingangsspannung von 12 V DC ergibt sich dabei eine Spitzenspannung von 32 V durch die Spule, was auch bei nicht optimaler Spulenposition zum Laden eines Akkumulators ausreicht. Darüber hinaus ist diese Spannung im schulischen Rahmen noch innerhalb der Schutzbestimmungen (vgl. z. B. [5] S.13). Eine weitere Spannungserhöhung könnte zwar zu einer schnelleren Ladung genutzt werden, jedoch wäre diese für den schulischen Gebrauch nicht mehr sicher.

4. Aufbau des Modells – Sekundärseite

Da die Primärseite durch den zuvor beschriebenen Aufbau bereits festgelegt ist, werden jegliche Optimierungen der Übertragung sekundärseitig getätigt.

4.1. Optimierung

Zur Optimierung der Übertragung tragen in diesem Setting hauptsächlich zwei Punkte bei: Die Spulenpositionierung zueinander, sowie die Abstimmung des Empfängerschwingkreises auf den Senderschwingkreis. Zum ersten Punkt gehören die Kippung sowie der Abstand der Spulen zueinander. Zum zweiten Punkt können die Frequenzanpassung sowie die geometrische Wahl der Spulen gezählt werden. In diesem Aufbau wurde eine, in Relation zur Empfängerspule, große Senderspule gewählt, damit auch bei nicht optimalen Parkpositionen ein Ladevorgang möglich ist. Im Folgenden wird als Optimierungsbeispiel die Abstandveränderung bei gleichzeitiger Frequenzvariation diskutiert. Die Frequenzanpassung wurde dabei durch Veränderung der Kapazität erzielt, was durch die Thomsonsche Schwingungsgleichung [6] motiviert wurde. Abbildung 4 zeigt die bei verschiedenen sekundärseitigen Kapazitäten und variablem Abstand der Sender- und Empfängerspule induzierte Spannung in der Empfängerspule. Hierbei sei erwähnt, dass bei einer Kapazität von 110 nF der sekundäre

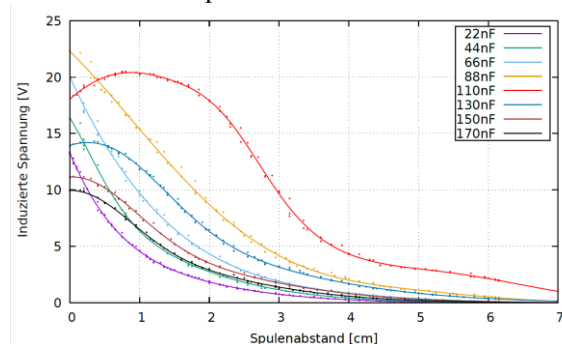


Abb. 4: Messung der Induktionsspannung in Abhängigkeit des Spulenabstandes für verschiedene Sekundär-schwingkreiskapazitäten.

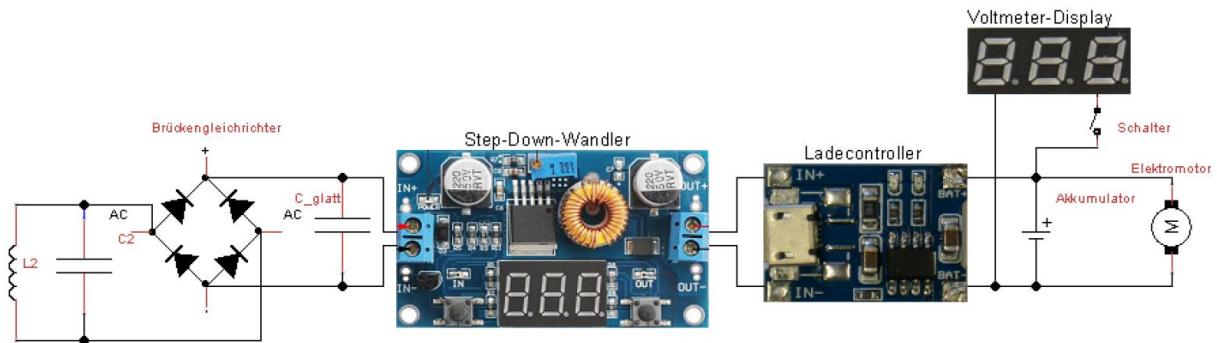


Abb. 5: Technischer Aufbau des Elektromodellautos.

Schwingkreis mit einer Spule der Induktivität $11.4 \mu\text{F}$ am nächsten an der primärseitig vorgegebenen Frequenz von 142 kHz ist. Nicht erwartet wurde dabei, dass bei einem geringen Abstand (unter 1 cm) eine geringere Spannung induziert wurde als bei einem größeren Abstand. Erklärt werden kann dies mithilfe der Lenzschen Regel: Aufgrund der induzierten Spannung baut sich sekundärseitig ein Magnetfeld auf, das dem bestehenden Magnetfeld entgegenwirkt, wodurch dieses abgeschwächt wird. Dadurch sinkt die induzierte Spannung. Dieses Phänomen ist im Nahfeld sehr groß, weshalb bei größerem Abstand das Gegenmagnetfeld vernachlässigbar klein wird.

4.2. Ladevorrichtung

Das Modell des induktiv ladbaren Elektroautos wurde möglichst realitätsnah konzipiert, weshalb derselbe Akkutyp wie in echten Elektroautos verwendet wurde, welcher der Lithium-Ionen-Akkumulator ist. Bei der Ladung von Lithium-Ionen-Akkus ist Gleichspannung von Vorteil, und es ist eine permanente Ladüberwachung notwendig [7]. Dies wurde durch einen Ladecontroller vom Typ TP4056 [8] realisiert. Dieser nutzt das sogenannte CCCV-Ladeverfahren („Constant Current – Constant Voltage“) um den Akkumulator zunächst mit konstantem Strom und dann mit konstanter Spannung zu laden, bevor der Ladevorgang beim Erreichen der Ladeschlussspannung

von 4.2 V abgebrochen wird. Um den Ladecontroller zu betreiben wird eine Gleichspannung von 5 V benötigt, weshalb weitere Bauteile in der Sekundärseite nötig sind, um die induzierte hochfrequente Wechselspannung auf eine Gleichspannung von 5 V zu transformieren.

Abbildung 5 zeigt den dafür verwendeten Aufbau. Die Spule L_2 bildet dabei mit dem Kondensator C_2 den Empfängerschwingkreis. In diesem wird die hochfrequente Wechselspannung induziert, welche durch einen Brückengleichrichter und einen Glättungskondensator C_{glatt} zu einer geglätteten Gleichspannung umgewandelt wird. Diese Spannung wird mithilfe eines Step-Down-Wandlers auf exakt 5 V transformiert, um dann dem Ladecontroller zugeführt zu werden. Der Ladecontroller lädt den parallel geschalteten Akkumulator, der mit dem Elektromotor verbunden ist. Um die derzeitigen Akkuspannung anzuzeigen, wurde ein Spannungsmessmodul parallel zum Akku integriert, welches sich durch einen Schalter aktivieren lässt. Dies ermöglicht den Schülern den Lade- und Entladeprozess zu verfolgen. All diese Bauteile sind durch den transparenten Aufbau in dem Modell zu sehen, welches in Abbildung 6 gezeigt ist. Die Empfängerspule wurde dabei auf der Unterseite mittig zur vorderen Achse des Fahrzeugs positioniert und ist deshalb nicht zu sehen. Fährt das Modellauto auf die Ladeplattform in Abbildung 7 auf, und ist diese mit der Platine des Royer-Oszillators verbunden, der wiederum mit einer Gleichspannung von 12 V betrieben wird, so kann der Ladeprozess auf dem Spannungsmessmodul beobachtet werden. Um dies nicht nur theoretisch zu beleuchten, wurde ein Video

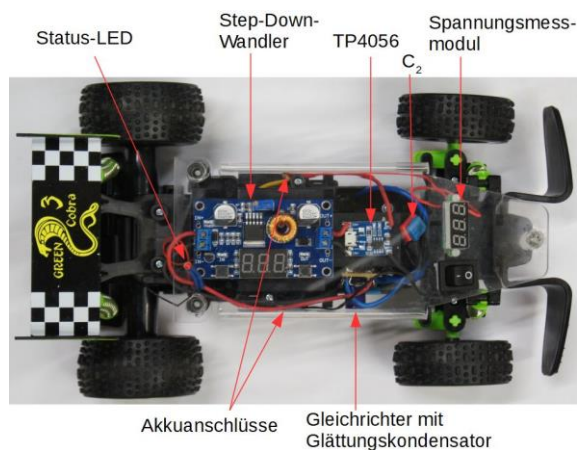


Abb. 6: Aufbau des Modell-Elektroautos. Die Empfängerspule befindet sich auf der Unterseite mittig zur vorderen Achse.

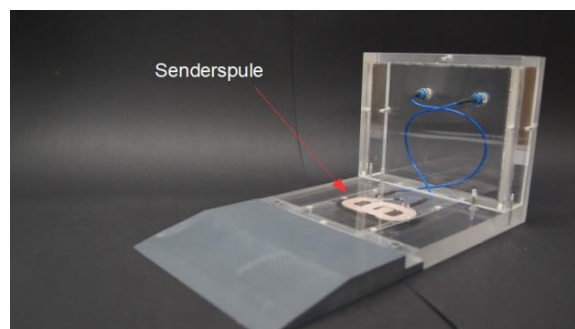


Abb. 7: Ladeplattform mit integrierter Senderspule des Royer-Oszillators.

des Ladevorganges erstellt, welches unter [9] („Ladevorgang eines induktiv ladbaren Elektromodellautos“) zu finden ist. Dabei zu sehen ist, wie das Modellauto auf die Ladeplattform auffährt. Das gelbe Display zeigt die aktuelle Spannung des Akkumulators an, welche vor dem Ladeprozess bei 2.91 V liegt. Durch das Auffahren liegt eine Last am Akku an, weshalb die Spannung kurzzeitig einbricht und dann aufgrund des Ladevorganges ansteigt. Nach knapp 20 s zeigt die Spannungsanzeige einen aktuellen Wert von 3.01 V an. Zu diesem Zeitpunkt wird das Auto von der Plattform gefahren, was erneut einen kurzen Spannungseinbruch zur Folge hat. Sobald das Auto stoppt, springt die Spannungsanzeige auf einen aktuellen Wert von 2.94 V. Dadurch kann innerhalb einer kurzen Zeit von 25 s der Ladeprozess verfolgt werden. Erwähnenswert ist dabei, dass Lithium-Ionen-Akkus, welche stärker entladen sind, zu Beginn des Ladevorganges schneller Spannung aufbauen, als solche die eine höhere „Start“-Spannung aufweisen [7]. Dadurch muss bei einer höheren Spannung längere Zeit in das Laden investiert werden, um einen Ladeeffekt zu beobachten.

5. Das Ladeverhalten

Fährt das Elektromodellauto auf die Ladeplattform auf, welche über den Royer-Oszillator mit einer 12 V-Gleichspannung betrieben wird, so können der Ladestrom und die Akkuspannung gemessen werden. Bei einer Akkuspannung von 2.6 V zu Beginn der Messung wurde der 600 mAh-Akku über eine Dauer von über 3.5 h mit der Ladevorrichtung geladen. Abbildung 8 zeigt die so erhaltenen Messdaten, wobei deutlich zu sehen ist, dass zunächst mit konstantem Strom und danach mit annäherungsweise konstanter Spannung geladen wird. Auch der Ladeabbruch nach dem Erreichen der Ladeschlussspannung von 4.2 V ist nach einer Zeit von 3.4 h klar zu erkennen. Danach beginnt die Spannung auf die Lagerspannung von 3.7 V abzufallen. Das so gebaute Modellauto erreicht eine maximale Geschwindigkeit von rund 9 km/h bei einem vollständig aufgeladenen Akku. Bei niedriger Akkuspannung erreicht das Fahrzeug keine maximale Leistung und somit eine geringere Geschwindigkeit. Ab einer Spannung von unter 2.8 V schaltet eine

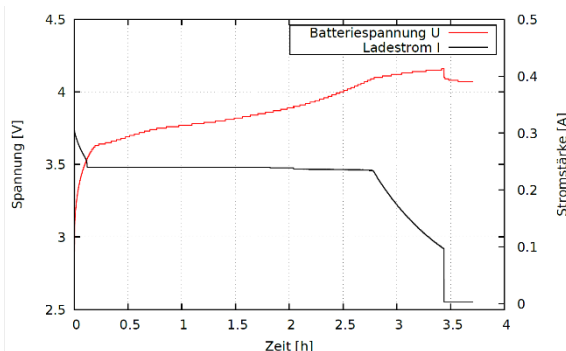


Abb. 8: Lademessung des Modellautos bei einer Startspannung von 2.6 V des Akkumulators.

Schutzelektronik den Motor ab, damit der Akku nicht tiefentladen wird. Für die Schülerinnen und Schüler ist somit ein deutlicherer Unterschied vor und nach dem Laden zu erkennen. Fährt das Auto zuvor nur noch kurze Zeit oder etwas langsamer, kann es nach einer vollständigen Ladung höhere Geschwindigkeiten erreichen und länger genutzt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden der Aufbau eines induktiv ladbaren Elektroautos sowie dessen Ladestation diskutiert. Großer Wert wurde dabei daraufgelegt, dass die einzelnen Komponenten und Aufbauten für sich schlüssig erklärt werden, wodurch das induktive Laden von der Spannungsquelle über den Sender- und Empfängerschwingkreis bis hin zum Akkumulator ersichtlich wurde. Durch diesen transparenten Aufbau wird der Lade- und Entladevorgang des Modellelektroautos beobachtbar, was ein tieferes Verständnis für diese Prozesse bei den Schülerinnen und Schülern erzeugt. Aufgrund dessen, dass immer wieder der Bezug zur Realität versucht wurde herzustellen, ist das hier diskutierte Modellauto als gelungene Reduktion der Wirklichkeit zu betiteln.

Zur Diskussion stehen noch die Optimierung der Parkposition, welche in der Wirklichkeit durch einen Autopiloten umgesetzt werden kann, sowie das „dynamische induktive Laden“, also das Laden während der Fahrt. Dadurch sind noch viele Ansatzpunkte für weiterführende experimentelle Umsetzungen möglich.

7. Literatur

- [1] BMW 530e Artikel. <http://www.bimmertoday.de/2017/04/27/bmw-wireless-charging-530e-ab-2018-mit-induktivem-laden/> (26.04.2018)
- [2] Induktives Zwischenladen in Mannheimer Buslinie. <https://goo.gl/J9swOe> (26.04.2018)
- [3] Jörg Rehmann. Oszillatoren, 2010. <http://www.jorettronik.de/Oszillatoren/Oszillatoren.html> (26.04.2018)
- [4] Downloadbereich für die Software Eagle. <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview> (25.04.2018)
- [5] Meyn, Jan-Peter (2013): Grundlegende Experimentiertechnik im Physikunterricht. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- [6] Demtröder, Wolfgang (2013): Experimentalphysik 2, S. 156. Springer-Verlag GmbH.
- [7] Karle, Anton (2016): Elektromobilität. S.79/80 Hanser Fachbuchverlag.
- [8] Downloadbereich des Datenblatts des Ladecontrollers TP4056. <https://tinyurl.com/y8odrech> (22.08.2018)
- [9] Video zum Ladevorgang des Modellelektroautos. <https://youtu.be/cHDlc50y36I> (25.04.2018)