

# Elektromobilität

## Beschreibung eines Versuchs für das DLR\_School\_Lab

Volker Bosch, Verena Hartmann

2013

### Zusammenfassung

Dieser Artikel stellt eine Versuchsreihe zum Thema Elektromobilität vor. Zentrales Element dieser Experimente ist ein fernsteuerbares Modellauto mit elektrischem Antrieb und einem hochkapazitiven Doppelschichtkondensator als Energiespeicher. Schülerinnen und Schüler erfahren anhand dieses Autos, dass verschiedene Fahrmanöver, wie häufige Beschleunigungsvorgänge oder das Überqueren von Bergen Einfluss auf den Energiebedarf eines Fahrzeugs haben, indem vor Beginn und nach Abschluss eines jeden Fahrmanövers der Energiegehalt des Kondensators über dessen Spannung ermittelt wird. In einem weiteren Experiment wird demonstriert dass Zusatzverbraucher, wie Heizung und Beleuchtung ebenfalls Energie benötigen. Durch die theoretische Betrachtung und die experimentelle Überprüfung des Energiebedarfs wird der Begriff des Wirkungsgrads vermittelt.

## 1 Einleitung

Schon in der Schule gehört Physik nicht gerade zu den Lieblingsfächern vieler Schüler. Da ist es nicht verwunderlich, dass sich die Wenigsten später für einen Beruf oder ein Studium aus den Bereichen Naturwissenschaft und Technik entscheiden.

Doch woran liegt das und was können wir dagegen tun? Zum einen hat sicherlich das schlechte Image dieser Fächer mit den geringen Zahlen an Studierenden zu tun. *„Alle Physiker sind Nerds, weltfremd und haben keine sozialen Kontakte. Sie leben in ihrer eigenen Welt und man erkennt sie schon an ihrer ungepflegten Erscheinung und ihrer Hornbrille.“* So stellen sich viele den Physiker vor. Außerdem ist das klassische Bild eines Physikers oder eines Ingenieurs männlich. *„Für Mädchen und Frauen ist das nichts, die können das eh nicht.“* Deshalb ziehen es viele Schülerinnen schon von vornherein überhaupt nicht in



Abb. 1: Das DLR\_School\_Lab-Versuchsfahrzeug auf seinem Testparcours. Im Hintergrund das große Vorbild, ein Brennstoffzellen-Versuchsfahrzeug des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte.

Betracht, beruflich diese Richtung einzuschlagen. Auch wird den Schülern oft von einem Ingenieurstudium abgeraten, da man als Ingenieur keine guten Jobaussichten habe. Das liegt vermutlich auch daran, dass die Einstellungszahlen der Wirtschaft stark von der aktuellen konjunkturellen Lage abhängen, so dass zeitweise nur sehr wenige oder überhaupt keine Absolventen eines Jahrgangs eingestellt werden. Zu anderen Zeiten wiederum würde die Wirtschaft gerne mehr Absolventen naturwissenschaftlich-technischer Studiengänge einstellen als vorhanden sind, was aber in der Öffentlichkeit meist unbemerkt bleibt.

Viele Schülerinnen und Schüler haben falsche Vorstellungen von der täglichen Arbeit eines Ingenieurs oder Wissenschaftlers. Außerdem kennen sie Physik und die anderen Naturwissenschaften aus der Schule oft als langweilig und trocken. Diesem Zustand Abhilfe zu schaffen ist das Ziel der DLR\_School\_Labs, die im Rahmen dieses Artikels am Beispiel eines Experiments zum Thema Elektromobilität vorgestellt werden.

## 2 Das DLR\_School\_Lab

### 2.1 Konzept

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) beschäftigt als Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland derzeit 7.400 Mitarbeiter an 16 Standorten. Neben der Arbeit in Forschung und Entwicklung für die Luft- und Raumfahrt ist das DLR auch in den Bereichen Energie, Verkehr und Sicherheit tätig. Nachwuchsförderung ist dem DLR ein wichtiges Anliegen. Eines der vielfältigen Programme, mit denen junge Menschen für Naturwissenschaften und Technik begeistert und gezielt gefördert werden sollen, sind die DLR\_School\_Labs. Seit den Anfängen im Jahr 2000 in Göttingen bietet das DLR mittlerweile an 12 Standorten Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, Einblicke in Forschungsarbeiten zu bekommen und selbst Experimente durchzuführen, die in Schulen in dieser Form in der Regel nicht angeboten werden können. Außerdem kommen sie in Kontakt mit Wissenschaftlern und Ingenieuren, die authentisch über ihre Berufe berichten können.

Ziel der DLR\_School\_Labs ist es, bereits bei jungen Menschen Interesse für Naturwissenschaften und Technik zu wecken und dieses später auch zu vertiefen, um mögliche Wünsche an und Vorstellung von Berufsleben oder Studium zu unterstützen bzw. zu konkretisieren.

Die Experimente richten sich in erster Linie an Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Mittel- und Oberstufe sowie deren Lehrerinnen und Lehrer, die dort Anregungen für einen abwechslungsreichen Unterricht mit aktuellen Themen bekommen sollen. Die Förderung von Mädchen ist dem DLR dabei besonders wichtig. Außerdem bietet das DLR weitere Förderprogramme für außergewöhnlich begabte Schülerinnen und Schüler an.

Im Schülerlabor des DLR sollen die Schülerinnen und Schüler aber nicht nur Spaß haben, obwohl dieses eine sehr wichtige und nicht zu vernachlässigende Komponente ist. Wäre der Spaß aber der einzige Aspekt, der bei der Planung der Versuche berücksichtigt wird, bekäme der potentielle Nachwuchs vollkommen falsche Vorstellungen von einem Beruf als Ingenieur oder Naturwissenschaftler. Den Schülerinnen und Schülern soll im Rahmen der Versuche daher auch vermittelt werden, dass „forschen“ mit Arbeit verbunden ist. Sie führen Messungen durch und lernen, die Ergebnisse entsprechend auszuwerten.

Ein Tag im DLR\_School\_Lab umfasst Vorträge, Führungen und je nach Standort auch Museumsbesuche sowie stets einen praktischen Teil, in welchem die Schülerinnen und Schüler selbst experimentieren dürfen. Eine Schulklasse wird dabei in kleine Gruppen zu je drei bis sechs Jugendlichen eingeteilt, die jeweils von einem Tutor betreut werden. Das Programm umfasst Vormittags und nachmittags eine „Experimentierrunde“, in der die Versuche einer Station zu einem bestimmten Thema durchgeführt und ausgewertet werden. Dabei werden die Nachwuchswissenschaftler von ihrem Tutor unterstützt. Dieser beantwortet auch Fragen zum jeweiligen Versuch. Für Oberstufenschüler sind zwei Stunden pro Station eingeplant, für die Mittelstufe etwa eine bis eineinhalb Stunden.

## 2.2 Struktur eines DLR\_School\_Lab-Versuchs

Um mit den Experimenten im DLR\_School\_Lab einen möglichst großen Lernerfolg zu erzielen, ist es erforderlich, dass einerseits die Schüler ein gewisses Grundwissen über die relevanten Themen mitbringen und dass andererseits der Betreuer einen Überblick darüber bekommt, was die Experimentierenden bereits wissen. So können die vorhandenen Kenntnisse erweitert und vertieft werden.

Der Wissensstand der Schülerinnen und Schüler wird durch Arbeitsblätter abgefragt, in denen Grundlagen behandelt werden, die für die jeweiligen Versuche erforderlich sind. Diese sind von den Experimentierenden vor der Durchführung der eigentlichen Experimente zu bearbeiten. So frischen sie bereits zuvor erworbene Kenntnisse auf oder sie lernen das für den Versuch Relevante neu. Diese Überprüfung von Wissen soll nicht als Test aufgefasst werden, für den es am Ende womöglich eine Note gibt – vielmehr ist sie dazu da, den Ablauf der Experimente optimal auf den Wissensstand der Schüler abzustimmen. Sie sollen sich weder überfordert fühlen, noch sich langweilen, wenn sie möglicherweise all das bereits wissen, was ihnen der Betreuer während der Experimente erzählt.

Nun schließt sich die eigentliche Experimentierphase an. Nach Möglichkeit sollten sämtliche Schüler einer Gruppe in die Durchführung der Experimente eingebunden werden. Aufgaben sind neben der eigentlichen Versuchsdurchführung beispielsweise das Ablesen von Messgeräten sowie das Protokollieren der Messwerte. Abschließend folgt die Auswertung der Messwerte.

## 3 Versuch zum Thema Elektromobilität

### 3.1 Technischer Hintergrund des Versuchs

Die Experimente eines DLR-Schülerlabors behandeln in erster Linie Themen, die auch Gegenstand der Forschung an den Instituten des jeweiligen DLR-Standortes sind. Am Standort Stuttgart des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. bearbeiten mehr als 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in sechs Forschungsinstituten Themen aus Raumfahrt, Luftfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit. Der Stuttgarter DLR-Standort geht zurück auf das im Jahre 1954 am Stuttgarter Flughafen gegründete Forschungsinstitut für Physik der Strahlantriebe (FPS). Seit 1961 liegt der Standort im Pfaffenwald in Stuttgart-Vaihingen. Durch die geografische Nähe und die enge Zusammenarbeit mit der Universität in Forschung und Lehre ist der DLR-Standort heute fest in die Stuttgarter Wissenschaftslandschaft eingebunden.

Das Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart repräsentiert den jüngsten Forschungsschwerpunkt des DLR, die Verkehrsforschung. Im Zentrum der Forschung stehen neue Konzepte für Straße und Schiene. In enger Zusammenarbeit mit internationalen Partnern aus Forschung und Industrie bearbeiten und koordinieren die Wissenschaftler verkehrstechnisch relevante Themen wie alternative Antriebe und Energiewandlung, Kraftstoff-

und Energiespeicherung, Leichtbau- und Hybridbauweisen sowie innovative Techniksysteme und Technikbewertung für Fahrzeuge.

Der Forschungsbereich Elektromobilität des Instituts für Fahrzeugkonzepte stellt die Grundlage der Versuchsreihe dar, die im Rahmen des vorliegenden Artikels stellvertretend für die zahlreichen Versuche des DLR\_School\_Labs beschrieben wird.

### 3.2 Zielsetzung

Durch diesen Versuch sollen die Probleme und Herausforderungen der Elektromobilität vermittelt werden, um den Schülerinnen und Schülern zu vermitteln, dass auch heute noch ein großer Bedarf an Forschung zu diesem Thema besteht. Die wesentliche Herausforderung stellt heute der Energiespeicher eines Elektrofahrzeugs dar. Die Technik der elektrochemischen Speicherung von Energie ist zwar schon sehr alt aber auch heute noch besteht ein großer Bedarf an deren Verbesserung. Darüber hinaus soll der Versuch demonstrieren, welche Auswirkungen der begrenzte Energievorrat, der heute in üblichen Fahrzeugbatterien mitgeführt werden kann, auf den Betrieb eines Elektrofahrzeugs hat.

### 3.3 Aufbau des Versuchs

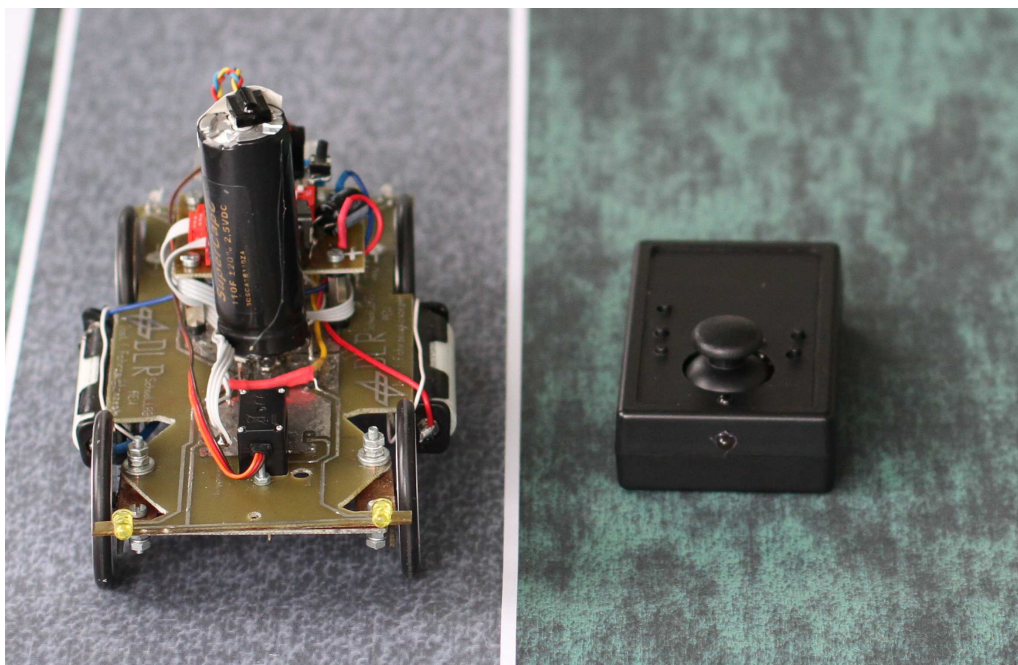


Abb. 2: Das fernsteuerbare Modellfahrzeug mit abgenommener Karosserie. In der Mitte des Fahrzeugs steht der 110[F]-Doppelschichtkondensator. Rechts neben dem Fahrzeug liegt die Infrarot-Fernbedienung.

Gegenstand der hier beschriebenen Experimente ist das fernsteuerbare Modell eines Elektroautos, welches am Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR aufgebaut wurde. Abb. 2 zeigt das „Versuchsfahrzeug“ und gibt den Blick auf dessen Innenleben frei.

Als Energiespeicher für den Antrieb besitzt das Fahrzeug einen Doppelschichtkondensator [1] mit der beeindruckenden Kapazität von 110F und der etwas weniger beeindruckenden Maximalspannung von 2,5V. Durch einen Hochsetzsteller wird die variable Kondensatorspannung auf eine konstante Spannung von 3V hochgesetzt. Die Schaltung arbeitet mit Eingangsspannung bis herab zu 0,5V.

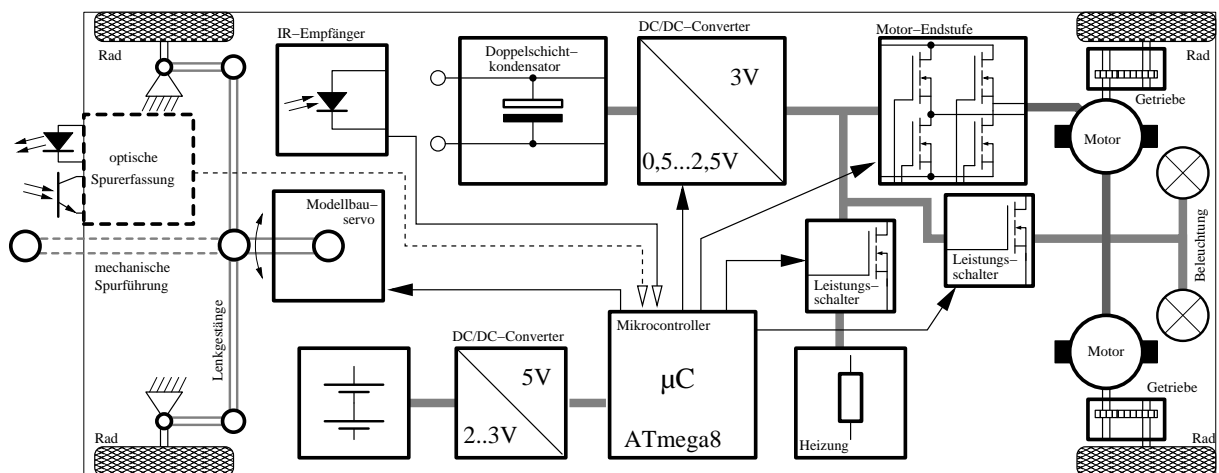


Abb. 3: Blockschaltbild des ferngesteuerten Modellautos.

Die Infrarot-Fernsteuerung wird sowohl im Sender als auch im Empfänger einen einfachen 8-Bit-Mikrocontroller realisiert. Implementiert wurde das Protokoll der LEGO Power Functions<sup>TM</sup>[2]. Im Empfänger steuert der Mikrocontroller eine integrierte MOSFET-Vollbrücke durch ein pulsweitenmoduliertes Signal an und ermöglicht so gemäß des implementierten Protokolls sieben verschiedene Drehzahlen des Getriebemotors [3], jeweils vorwärts oder rückwärts. Die Lenkung wird durch einen Modellbau-Servo bewerkstelligt, der ebenfalls direkt vom Mikrocontroller angesteuert wird. Auch hier stehen neben der Geradeausfahrt jeweils sieben Lenkwinkel nach rechts und links zur Verfügung. Über zwei Leistungstransistoren können zwei zusätzliche Verbraucher zugeschaltet werden. Vier Leuchtdioden stellen die Fahrzeugbeleuchtung dar, ein Leistungswiderstand simuliert die Heizung des Fahrzeugs. Motoren, Beleuchtung und Heizung werden aus dem Kondensator gespeist. Mikrocontroller und Servo besitzen eine eigene elektrische Versorgung, die aus zwei Batteriezellen und einem weiteren DC/DC-Wandler realisiert wurde. Abb. 3 zeigt das Blockschaltbild des Fahrzeugs. In Abb. 4 ist der Schaltplan der Fahrzeugelektronik abgebildet. Abb. 5 zeigt den Schaltplan des Senders.

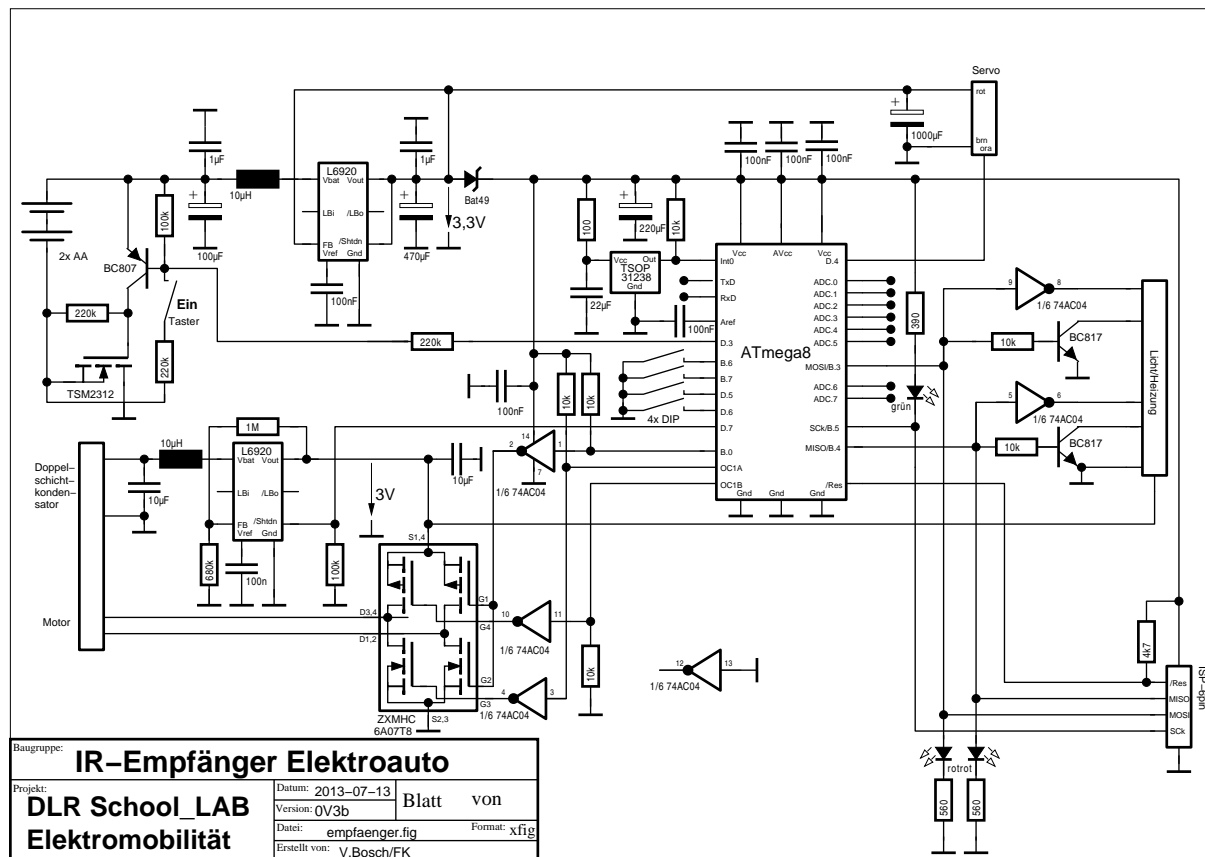


Abb. 4: Die Elektronik des fernsteuerbaren Modellfahrzeugs.

### 3.4 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wird die Kapazität des Kondensators bestimmt, die in der Regel vom Nennwert abweicht, da deren Toleranz bis zu 20% betragen kann. Die Ermittlung der tatsächlichen Kapazität erfolgt während des Aufladevorgangs mit konstantem Strom. In regelmäßigen Intervallen  $\Delta t$  wird der Kondensator von der Stromquelle getrennt und dessen Klemmenspannung gemessen. Aus Ladestrom, Zeitdauer und Spannungsänderung kann die Kapazität des Kondensators durch die folgende Betrachtung ermittelt werden:

Die Kapazität  $C$  eines Kondensators ist definiert als der Quotient der in ihm gespeicherten elektrischen Ladung  $Q$  und der zwischen den Elektroden anliegenden Spannung  $U$  oder anders formuliert: die Kapazität eines Kondensators ist das Maß dafür, welche Ladung ein Kondensator bei einer bestimmten Spannung speichern kann. Dieses gilt nicht nur für die Augenblickswerte von Ladung  $Q(t)$  und Spannung  $U(t)$ , sondern auch für die Änderungen  $\Delta Q$  und  $\Delta U$ .

$$C = \frac{Q(t)}{U(t)} = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \quad (1)$$

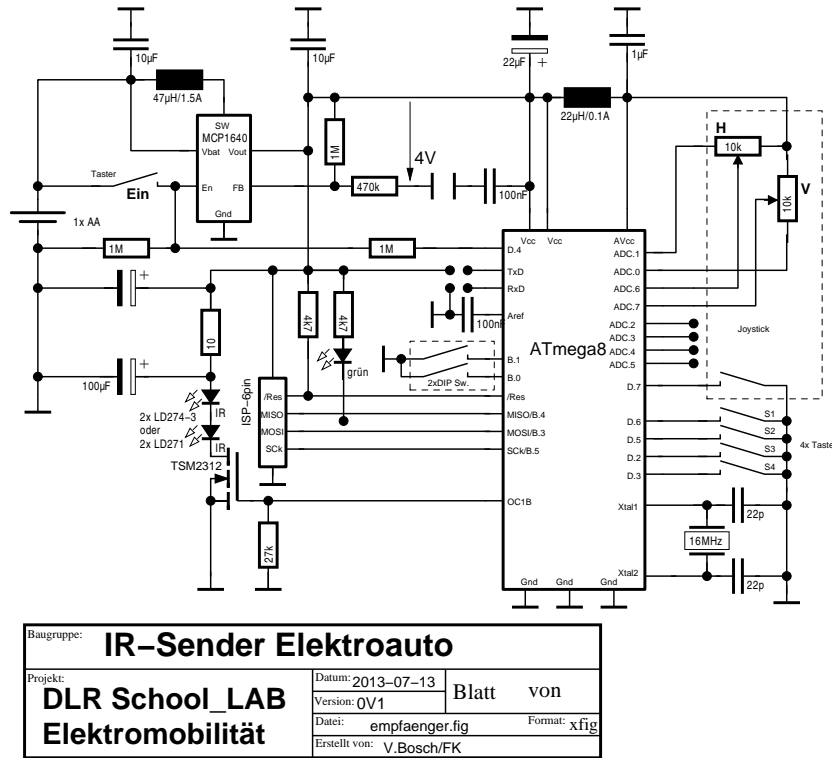


Abb. 5: Schaltplan des Senders für die Infrarot-Fernsteuerung.

Der elektrische Strom  $I$  entspricht der zeitlichen Änderung der Ladung  $Q$ :

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} \quad (2a)$$

$$dt \rightarrow \Delta t : \quad I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2b)$$

Gleichung (2b) beschreibt die Änderung der Ladung  $\Delta Q$ , die ein konstanter Strom  $I$  in einem Zeitintervall  $\Delta t$  bewirkt. Mit Gleichung (1) berechnet sich dann die Kapazität  $C$  eines Kondensators, der über den Zeitraum  $\Delta t$  mit dem konstanten Strom  $I$  geladen wird und dabei seine Spannung um den Wert  $\Delta U$  ändert.

$$C = \frac{I \Delta t}{\Delta U} \quad (3)$$

Die so ermittelte Kapazität dient im weiteren Verlauf als Basis für Berechnungen. Für die eigentlichen Versuche mit dem Elektroauto ist es erforderlich, dass die Experimentierenden die in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie berechnen können.

$$E_{el} = \frac{1}{2} C U^2 \quad (4)$$

Die Kapazität ist durch den Vorversuch bekannt und die Spannung kann an den Anschlussklemmen des Kondensators mit Hilfe eines Voltmeters ermittelt werden.



Schülern der Oberstufe sollte die Formel (4) bereits bekannt sein und sie müssten in der Lage sein, diese anwenden zu können. Bei jüngeren Schülern, die den Kondensator im Schulunterricht noch nicht behandelt haben, kann diese als sogenannte „fremde Formel“ durch den Tutor eingeführt werden. Der Tutor erklärt den Schülern, welche Größen sich hinter den jeweiligen Formelzeichen verbergen. Mit Hilfe der ermittelten Werte können die Schüler nun die Kapazität berechnen.

Durch die Bestimmung der Energie im Kondensator vor Beginn ( $E_{el_1}$ ) und nach Abschluss ( $E_{el_2}$ ) des jeweiligen Fahrmanövers kann ermittelt werden, welche Energiemenge ein bestimmtes Fahrmanöver auf einer vorgegebenen Strecke jeweils benötigt. Für jedes Fahrmanöver wird das Auto mehrere Runden über den Testparcours gesteuert. Vor der ersten Runde und nach Abschluss der letzten wird der jeweilige Energieinhalt im Kondensator bestimmt. Die Differenz dieser Werte entspricht der Energie, die während des Fahrmanövers im Fahrzeug umgesetzt wurde.

$$\Delta E = E_{el_2} - E_{el_1} \quad (5)$$

Zehn Runden auf ebener Strecke dienen als Referenz. Die hierfür erforderliche Energie wird zu den Ergebnissen der weiteren Versuche in Beziehung gesetzt. Für eine weitere Messung über zehn Runden wird ein Berg in den Testparcours eingefügt, wie in Abb. 6 dargestellt.

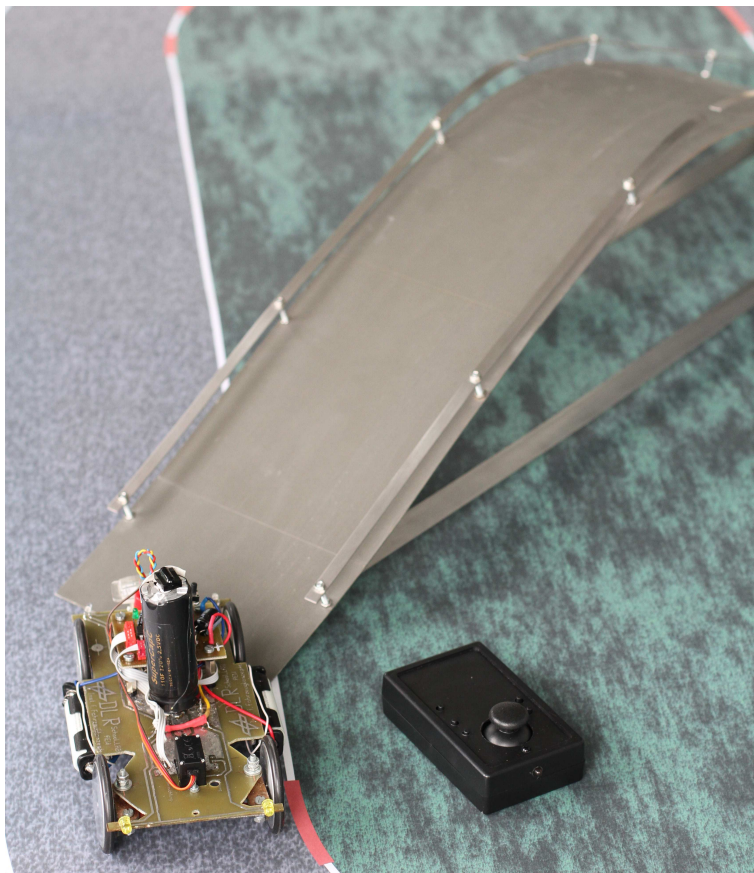


Abb. 6: Ein „Berg“ wird in den Testparcours eingefügt.

Erneut wird die Energie im Kondensator vor und nach der Fahrt bestimmt. Die zusätzliche Energie für die Überwindung der Steigung ergibt sich aus der Differenz zum Referenzwert aus der ersten Messung. Je nach Klassenstufe ist dieses Experiment durch die zusätzliche Aufgabe zu ergänzen, die potentielle Energie zu berechnen, die am höchsten Punkt des Berges in dem Auto steckt, wie in Abb. 7 dargestellt.

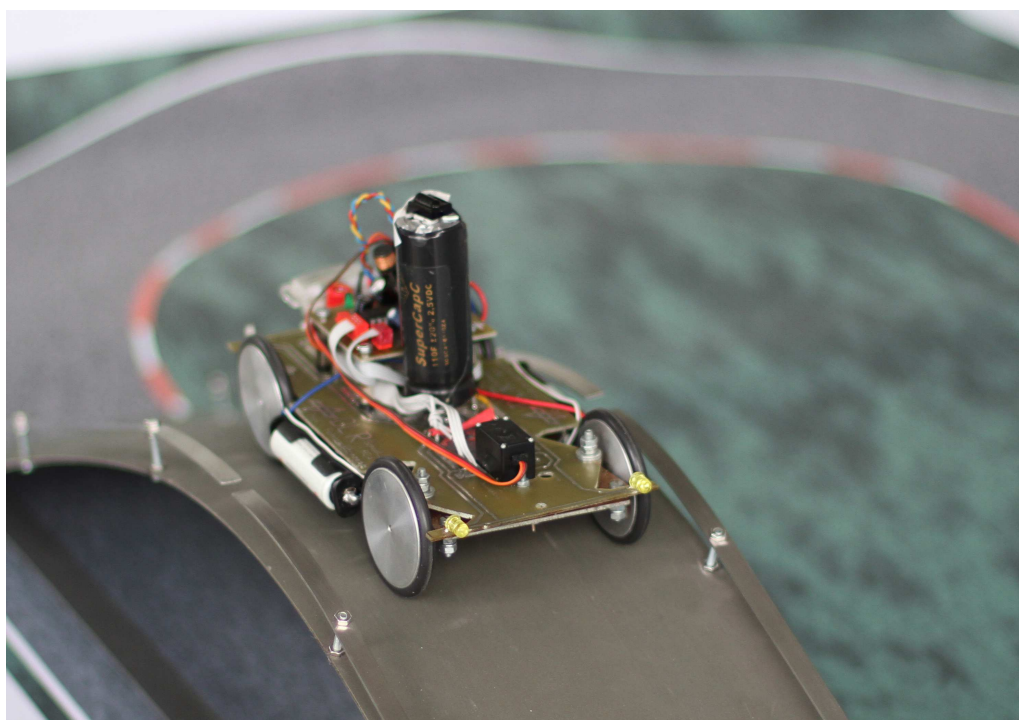


Abb. 7: Das Modellauto hat den Gipfel des Berges erklommen.

Mit der Anzahl der Runden, also dem Faktor zehn multipliziert ergibt sich so die Energie, die theoretisch für die zehn Runden mit Steigung zusätzlich erforderlich ist. Die Schüler sollen versuchen, Antworten auf die Frage zu finden, warum dieser Wert viel kleiner ist, als der, den sie im Experiment gemessen haben. Umgekehrt kann der Versuch auch so begonnen werden, dass die Schüler Vorhersagen über den Mehrverbrauch des Autos treffen und diese dann im Experiment überprüfen.

Um die Fahrt mit Beleuchtung zu überprüfen, werden erneut Messungen auf ebener Strecke durchgeführt. Das Fahrzeug verfügt über kleine Lampen, die sich über die Fernsteuerung einschalten lassen. Damit werden die zehn Runden ein weiteres Mal absolviert und die Energiewerte bestimmt. Auch hier lässt sich eine Erweiterung einbauen, in der die Schüler aus dem zusätzlichen Energiebedarf  $E$ , den die Lämpchen erfordern, deren Leistung  $P$  bestimmen.

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (6a)$$

$$dt \rightarrow \Delta t: P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (6b)$$

### 3.5 Protokoll eines Testlaufs

In Tab. 1 ist jeweils die Spannung am Kondensator vor und nach dem entsprechenden Fahrmanöver aufgeführt sowie der sich daraus ergebende Energiebedarf, der über die tatsächliche Kapazität des verwendeten Doppelschichtkondensators von 136 F berechnet wurden.

Fahrzyklus	$U_0$ [V]	$U_1$ [V]	$\Delta U$ [V]	$E_{el_0}$ [J]	$E_{el_1}$ [J]	$\Delta E_{el}$ [J]
Ebene, ohne Licht	2,5	2,38	0,12	425,00	385,18	39,82
Berg, ohne Licht	2,38	2,11	0,27	385,18	302,74	82,44
Ebene, mit Licht	2,11	1,72	0,39	302,74	201,17	101,57
Berg, mit Licht	2,5	2,04	0,46	425,00	282,99	142,01

Tab. 1: Energiebedarf für jeweils 10 Runden der entsprechenden Fahrweise

Aus der Differenz des Energiebedarfs lässt sich der Mehrbedarf ermitteln, der für den Berg, bzw. die Beleuchtung oder beides erforderlich ist. So werden für den Berg 4,26 J zusätzlich benötigt, für die Beleuchtung 6,18 J.

Mit der Masse des Fahrzeugs  $m = 379,5$  g, der Erdbeschleunigung  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> und der Höhe des Berges  $h = 16,3$  cm lässt sich über die Gleichung

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (7)$$

die potentielle Energie des Fahrzeugs auf dem Scheitelpunkt des Berges berechnen zu  $E_{pot} = 0,61$  J. Mit dem Mehrbedarf an Energie, den das Fahrzeug tatsächlich für die Überwindung des Berges benötigt hat, lässt sich berechnen, zu welchem Anteil die elektrische Energie vom Antriebssystem in potentielle Energie umgewandelt wurde. Das Antriebssystem besteht aus Speicherkondensator, Hochsetzsteller, MOSFET-Brücke, Motor und Getriebe. Der Wirkungsgrad des gesamten System beträgt:

$$\begin{aligned} \eta_{ges} &= \frac{E_{out}}{E_{in}} \\ &= \frac{0,61 \text{ J}}{4,26 \text{ J}} = 0,1424 = 14,24\% \end{aligned} \quad (8a)$$

## 4 Fazit

Mit den vorgestellten Experimenten können die teilnehmenden Schülerinnen und Schüler im wahrsten Sinne des Wortes „erfahren“, welchen Einfluss verschiedene Fahrmanöver auf den Energiebedarf eines Fahrzeugs haben. So wird die Problematik des eng begrenzten Energieinhalts heutiger Fahrzeugbatterien verdeutlicht. Schülern der Oberstufe kann ergänzend dazu die Funktionsweise eines Elektromotors und das Verhalten eines Kondensators vermittelt werden. Die Schüler sollen den Begriff des Wirkungsgrads erfassen, indem sie erkennen, dass die Umwandlung von Energie stets mit Verlusten behaftet ist.

## 5 Ausblick

Die Verwendung eines ferngesteuerten Modellfahrzeugs macht die Versuche für die Durchführenden interessant, birgt jedoch auch ein gewisses Risiko. Aufgrund des verwendeten Fersteuerungsprotokolls ist der Lenkwinkel sehr grob quantisiert und die Spurführung des Fahrzeugs entsprechend anspruchsvoll. So besteht die Gefahr, dass einzelne Schüler mit der Führung des Fahrzeugs überfordert sind. Auch können heftige Lenkmanöver die Ergebnisse der einzelnen Experimente verfälschen. Abhilfe könnte hier eine automatische Spurführung des Fahrzeugs schaffen, die nur für einzelne Experimente aktiviert wird. Für eine selbständige Spurführung stehen mehrere Verfahren zur Auswahl. Am einfachsten kann eine mechanische Spurführung implementiert werden, indem eine Nut in der Fahrbahn einen Zapfen auf der Spurstange anlenkt, ähnlich des Systems der Slotcars. Eine aufwändigere Lösung wäre die optische Spurführung, beispielsweise indem eine Fahrbahnmarkierung auf dem Testparcours mittels einer Reflexlichtschranke durch den Mikrocontroller des Fahrzeugs abgetastet wird.

Ergänzend zu den im Detail vorgestellten Experimenten können weitere Versuche zur Energiewandlung angeboten werden. Mittels einer Geschwindigkeitsmessung kann die kinetische Energie des Fahrzeugs ermittelt werden und mit der für den Beschleunigungsvorgang benötigten Energiemenge des Fahrzeugs verglichen werden. Durch Zusatzgewichte kann der Einfluss der Fahrzeugmasse demonstriert werden. Über die in einem Heizwiderstand in Wärme umgesetzte elektrische Energie kann die Problematik der Heizung eines Elektrofahrzeugs verdeutlicht werden sowie deren Einfluss auf die Reichweite demonstriert werden.

Weitere Experimente wären durch den Einsatz von Kondensatoren mit geringerer Kapazität möglich. So bietet sich beispielsweise ein Wettbewerb an, bei welchem es gilt, die meisten Runden mit einer Kondensatorladung zurückzulegen und so einen sehr effizienten Fahrstil zu entwickeln.

Die Nutzbremmung oder Rekuperation kann mit dem vorliegenden Versuchsaufbau leider nicht demonstriert werden, da die Verluste in den einzelnen Komponenten zu hoch sind. Hierfür wäre ein eigener Versuchsaufbau erforderlich.

Für den Einsatz im DLR\_School\_Lab wird durch die Lehrwerkstätten am DLR-Standort Stuttgart ein robustes Modellfahrzeug mit ansprechendem Äußeren entworfen und aufgebaut.

## Literatur

- [1] WIMA: *Double-Layer Capacitors in Cylindrical Metal Case with very High Capacitances in the Farad Range*, [http://www.wima.de/DE/products\\_super.htm](http://www.wima.de/DE/products_super.htm), Juli 2013.
- [2] TechnicBRICKs: *LEGO Power Functions RC Protocol v1.20 update*, <http://www.technicbricks.com/2010/03/lego-power-functions-rc-protocol-v120.html>, Juli 2013.

- [3] Faulhaber: DC-Getriebemotoren mit Edelmetallkommutierung, [http://www.faulhaber.com/uploadpk/DE\\_1512\\_SR\\_DFF.pdf](http://www.faulhaber.com/uploadpk/DE_1512_SR_DFF.pdf), Juli 2013.

## Kontakt Daten

**Dr.-Ing. Volker Bosch** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR Institut für Fahrzeugkonzepte. Er ist zuständig für die Entwicklung elektrischer Traktionsantriebe.

**Verena Hartmann** studierte an der Universität Stuttgart Mathematik und Physik für das gymnasiale Lehramt. Bis zum Beginn ihres Vorbereitungsdienstes ist sie am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte als wissenschaftliche Hilfskraft beschäftigt.