



## V.6

### Energie nutzen

# Elektro- und Dieselmotor – Bau eigener Motoren und Umweltwirkung von Motoren

Benjamin Streit



© RAABE 2021

© kenneth-cheung/E+

Elektromotoren findet man in verschiedenen Größen und zahlreichen Anwendungsfeldern von Spielwaren über Küchengeräte und Werkzeugmaschinen bis hin zu Autos, Zügen und Industrieanlagen. Dieselmotoren findet man überall dort, wo viel Kraft gebraucht wird, in Autos, Bussen, Lastwagen, landwirtschaftlichen Großmaschinen, Lokomotiven und Schiffen. In dieser Unterrichtseinheit werden zunächst die physikalischen und methodischen Grundlagen zu diesen beiden Motorentypen vermittelt. Experimente dienen schließlich der Vertiefung und dem genaueren Hinterfragen der Funktionsweise der technischen Alltagsgegenstände.

---

#### KOMPETENZPROFIL

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Klassenstufe:</b>         | 7–10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Dauer:</b>                | 9 Unterrichtsstunden                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Kompetenzen:</b>          | Die Schüler 1. beschreiben die Funktionsweise und den Aufbau von Elektro- sowie Dieselmotoren, 2. unterscheiden verschiedene Arten von Motoren, 3. beschreiben die Kraftübertragung mithilfe eines Getriebes, 4. recherchieren und reflektieren ihre Rechercheergebnisse zu Produktion, Umweltbelastung und ökologischem Fußabdruck. |
| <b>Thematische Bereiche:</b> | Mechanik: Kraftübertragung mithilfe eines Getriebes; Elektrotechnik: Elektromotoren, Funktion von elektronischen Alltagsgegenständen; Thermodynamik: Funktion einer Wärmekraftmaschine am Beispiel des Dieselmotors                                                                                                                  |

---

## Rund um die Reihe

### Warum wir das Thema behandeln

Sobald sich Ihre Schüler in den Straßenverkehr begeben, sind sie von Autos, Motorrädern, Bussen und Lastwagen umgeben, die immer noch mehrheitlich mit Verbrennungsmotoren angetrieben werden. Auch der unter Schülern inzwischen mehr als bekannten „Fridays for Future“-Bewegung ist diese Tatsache ein Dorn im Auge. So rief die Klimaschutzbewegung am 10. Oktober 2020 zu Protesten für eine Verkehrswende in Form einer Menschenkette vor dem Verkehrsministerium auf. Ausgerüstet mit Plakaten mit Aufschriften wie „Verkehrswende statt Weltende“ forderten die Demonstranten einen stärkeren Ausbau des Bus- und Bahnverkehrs bundesweit, um für mehr Umweltschutz im Verkehr zu sorgen. Doch was ist so schlecht an Autos & Co. und welche Art des Antriebs ist die umweltfreundlichste? Und wo spielen Motoren außerhalb des Straßenverkehrs noch eine Rolle und wie funktionieren sie? Diesen Fragen wollen wir in der vorliegenden Unterrichtseinheit auf den Grund gehen. Um den Schülern eine fundierte Grundlage für die kritische Auseinandersetzung mit Fragen zur Umweltbelastung und dem ökologischen Fußabdruck sowie aber auch der Funktionsweise von Motoren zu liefern, werden in dieser Unterrichtsreihe Funktionsweise sowie Einsatzgebiete von Diesel- und Elektromotoren erarbeitet.

Die Unterrichtsreihe ist mit einem starken Fokus auf der selbstständigen Lernstoffbearbeitung konzipiert. Daher kann sie auch hervorragend im Hybrid- oder Fernunterricht Einsatz finden.

### Was sie zum Thema wissen müssen

Ein Motor ist eine Kraftmaschine, die eine Energieform in nutzbare Bewegungsenergie umwandelt. Beispiele sind Elektromotoren und Dieselmotoren, aber auch der Ottomotor, Dampfmaschinen etc.

### Elektromotor

Ein großer Teil der maschinell erledigten Arbeit wird von Elektromotoren geleistet. Hierbei spielen Kräfte eines Magnetfelds auf einen stromdurchflossenen Leiter eine wesentliche Rolle. Eine stromdurchflossene rechteckige Leiterschleife, drehbar um eine Achse gelagert, befindet sich in einem Magnetfeld. Die magnetischen Kräfte auf den Strom in der Leiterschleife erzeugen ein Drehmoment, das die Leiterschleife in Bewegung setzt. Nach jeder halben Drehung kehrt ein Kommutator (Anordnung stationärer Schleifkontakte) die Stromrichtung in der Leiterschleife und damit die Feldrichtung des Magnetfeldes des stromdurchflossenen Leiters um. Dadurch wirkt das Drehmoment immer in dieselbe Richtung.

Das Drehmoment auf eine beliebige ebene stromdurchflossene Spule in einem homogenen Magnetfeld berechnet man mit der Formel  $\tau = (NIA)B\sin\theta$ . Hierbei sind die Größen in Klammer die Eigenschaften der Spule: N: Anzahl der Windungen, I: Stromstärke,  $A = a \cdot b$ : von der Spule umschlossene Fläche. B ist die Stärke des homogenen Magnetfeldes und  $\theta$  der Neigungswinkel der Spule im Magnetfeld.

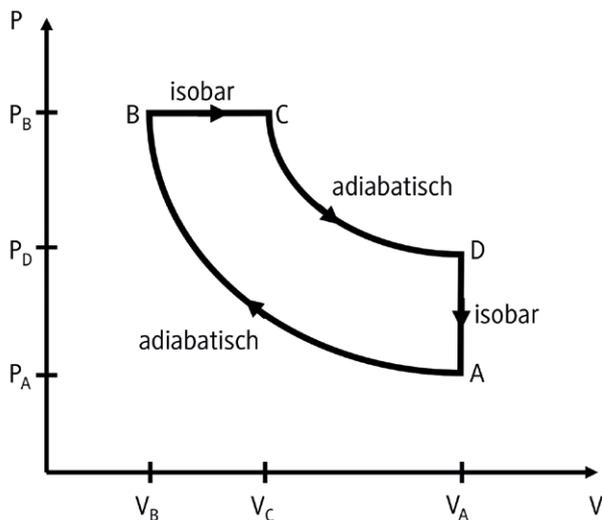
Der Wirkungsgrad eines Elektromotors ist  $\eta = \frac{\text{mechanische Leistung}}{\text{elektrische Leistung}} = \frac{\tau\omega}{UI}$ . Hierbei ist  $\tau$  das Drehmoment,  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit, U die Spannung und I die Stromstärke.

## Dieselmotor

Der Dieselmotor gehört zu den Wärmekraftmaschinen. Hier wird durch Verbrennung erzeugte Wärmeenergie in Bewegungsenergie umgewandelt. Die Dampfmaschine, bei der durch die Verbrennung von Holz oder Kohle ein Wasserbad erhitzt wurde und der entstehende Dampf einen Kolben antrieb, war die erste Wärmekraftmaschine. Um die Vorgänge in solchen Maschinen zu beschreiben, wurde die Thermodynamik entwickelt, mit deren Hilfe komplexe Vorgänge durch Angabe weniger makroskopischer Systemgrößen (z. B. Temperatur, Druck, Dichte) beschrieben werden können.

Bei einem Dieselmotor wird die Verbrennungsluft durch hohe Verdichtung über die Entzündungstemperatur des Kraftstoffes hinaus erhitzt und der Kraftstoff unmittelbar bevor der Kolben im Zylinder den oberen Umkehrpunkt erreicht, feinst verteilt in die heiße Luft gespritzt. Die Temperatur der heißen Luft (700–900 °C) reicht aus, um den Kraftstoff zu verdampfen und das Dampf-Luft-Gemisch zu zünden. Daher braucht ein Dieselmotor im Gegensatz zum Ottomotor keine Zündkerzen, sondern nur Zündhilfen für den Kaltstart (z. B. Glühkerzen).

### Thermodynamische Berechnung der Schritte im Diesel-Zyklus



P-V-Diagramm für den Diesel-Zyklus (Kreisprozess). Skizze: Benjamin Streit

Der Diesel-Zyklus besteht aus vier Schritten (siehe P-V-Diagramm oben): adiabatische (kein Wärmeaustausch) Komprimierung, isobare (Druck konstant) Expansion, adiabatische Expansion, isochore (Volumen konstant) Dekompression. Wir betrachten diesen Zyklus mit einem idealen Gas als Hilfsystem und bestimmen Arbeit und Wärmetransfer in jedem Schritt. Anschließend berechnen wir den Wirkungsgrad. In den folgenden Berechnungen ist  $\gamma$  der Adiabatenexponent des idealen Gases,  $P$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $W$  die mechanische Arbeit,  $Q$  die Wärmemenge,  $n$  die Stoffmenge,  $c_p$  die spezifische Wärme bei konstantem Druck,  $c_v$  die spezifische Wärme bei konstantem Volumen und  $R$  die universelle Gaskonstante.

Für adiabatische Prozesse im idealen Gas gilt:

$$P \cdot V^\gamma = \text{const. und } \Delta Q = 0.$$

1. Schritt A → B (adiabatisch):

$$\Delta W_{A \rightarrow B} = - \int_{V_A}^{V_B} \frac{P_A \cdot V_A^\gamma}{V^\gamma} dV = \frac{1}{\gamma - 1} P_A V_A^\gamma (V_B^{1-\gamma} - V_A^{1-\gamma}) = \frac{1}{\gamma - 1} (P_B V_B - P_A V_A)$$

$$\Delta Q_{A \rightarrow B} = 0$$

2. Schritt B → C (isobar: P = const.):

$$\Delta W_{B \rightarrow C} = -P_B (V_C - V_B), \quad \Delta E_{B \rightarrow C} = \int_{V_B}^{V_C} c_V dT = \frac{c_V P_B}{nR} (V_C - V_B)$$

$$\text{mit } PV = nRT \Rightarrow dT = \frac{P}{nR} dV$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{B \rightarrow C} &= \Delta E_{B \rightarrow C} - \Delta W_{B \rightarrow C} = \frac{c_V P_B}{nR} (V_C - V_B) - (-P_B (V_C - V_B)) = \left( \frac{c_V}{nR} + 1 \right) P_B (V_C - V_B) \\ &= \frac{P_B}{nR} (c_V + nR) (V_C - V_B) = \frac{P_B}{nR} c_P (V_C - V_B) \end{aligned}$$

$$\text{mit } c_p - c_v = nR$$

3. Schritt C → D (adiabatisch):

$$\Delta W_{C \rightarrow D} = - \int_{V_C}^{V_D} \frac{P_C \cdot V_C^\gamma}{V^\gamma} dV = \frac{1}{\gamma - 1} P_C V_C^\gamma (V_D^{1-\gamma} - V_C^{1-\gamma}) = \frac{1}{\gamma - 1} (P_D V_D - P_C V_C)$$

$$\Delta Q_{C \rightarrow D} = 0$$

4. Schritt D → A (isochor: V = const.):

$$\Delta W_{D \rightarrow A} = 0, \quad \Delta E_{D \rightarrow A} = \int_{P_D}^{P_A} c_V dT = \frac{c_V V_A}{nR} (P_A - P_D)$$

$$\Delta Q_{D \rightarrow A} = \Delta E_{D \rightarrow A}$$

Wirkungsgrad:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad \Delta W = \Delta W_{A \rightarrow B} + \Delta W_{B \rightarrow C} + \Delta W_{C \rightarrow D} + \Delta W_{D \rightarrow A}$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = - \frac{\Delta W}{\Delta Q_{B \rightarrow C}} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\left( \frac{V_C}{V_A} \right)^\gamma - \left( \frac{V_B}{V_A} \right)^\gamma}{\left( \frac{V_C}{V_A} \right) - \left( \frac{V_B}{V_A} \right)} = 1 - \frac{\gamma^{\gamma-1}}{\gamma \varepsilon^{\gamma-1} (\gamma - 1)} \text{ mit } \gamma = \frac{V_C}{V_B} \text{ und } \varepsilon = \frac{V_A}{V_B}$$

## Vorschläge für die Unterrichtsgestaltung

### Voraussetzungen der Lerngruppe

Für die Schülerversuche ist es vorteilhaft, wenn die Lernenden bereits selbstständig Versuche durchgeführt und protokolliert haben. Die Materialien sind jedoch so ausführlich verfasst, dass sie auch einen ersten Einstieg ohne Vorerfahrung ermöglichen.

### Aufbau der Reihe

Als Einstieg in die erste Unterrichtsstunde kann die Lehrkraft erzählen, dass ihr Sohn/Neffe/Enkel sie vor Kurzem fragte, warum ein Mixer nur mit Strom funktioniert und ein Auto (Ausnahme: E-Auto) nur mit Kraftstoff? Die Lehrkraft erläuterte ihm daraufhin, dass in beiden Fällen Motoren verbaut sind und diese für die Funktionsweise maßgeblich wichtig sind. Doch das reichte ihm nicht aus. Die Lehrkraft bittet die Lernenden, ihr dabei zu helfen, herauszufinden, wie verschiedene Motoren funktionieren, damit sie dies ihrem Sohn/Neffen/Enkel weitergeben kann. Hierauf kann am Ende der

Einheit als wiederholendes und die Einheit in sich schließendes Element Rückgriff genommen werden. Die Lehrkraft verteilt nun **M 1**. Zunächst werden in einem kurzen Brainstorming in Einzelarbeit Begriffe gesammelt, die den Schülern zum Thema Motoren einfallen. Diese werden im Plenum gebündelt und z. B. an der Tafel fixiert. Anhand dessen kann die Lehrkraft Vorkenntnisse erfragen, ggf. vorhandene Fehlvorstellungen erkennen und diese zum Ende der Einheit aufklären. Im Anschluss recherchieren die Schüler anhand der folgenden Aufgaben in Kleingruppen für ca. 25 Minuten zu den Eigenschaften sowie der Erfindung verschiedener Motoren. Die Schüler zeigen die Ergebnisse anschließend im Plenum, wo die wichtigsten Ergebnisse festgehalten werden.

Ziel der zweiten/dritten Stunde ist es, die Schüler an den Aufbau und die Funktionsweise eines Elektromotors heranzuführen. Zu Beginn wird gemeinsam der Text von **M 2** gelesen und Aufgabe 1 bearbeitet. Gemeinsam werden die Forschungsfragen entwickelt, sodass im Folgenden an den gleichen Fragen gearbeitet werden kann. Die Aufgaben 2–4 werden schließlich in Kleingruppen bearbeitet und die Ergebnisse im Plenum zusammengetragen. Die Abbildungen der Elektromotoren kann die Lehrkraft dabei z. B. mittels Dokumentenkamera projizieren und von den Schülern beschriften lassen. In der Folgestunde sammeln die Schüler in Kleingruppenarbeit anhand der Experimente von **M 3** praktische Erfahrungen mit Elektromotoren und deren Funktionsweise. Je nachdem, welche Materialien in welcher Zahl zur Verfügung stehen, können mehrere Gruppen parallel denselben Versuch durchführen oder jede Gruppe startet mit einem anderen Versuch und es wird danach gewechselt, bis jede Gruppe alle Versuche durchgeführt hat. Anstelle oder zusätzlich zu den Versuchen kann an dieser Stelle auch ein Elektromotorbausatz (z. B. von der Firma Eschke, siehe Medientipps und Fotos in M 2) zum Einsatz kommen. Für den Aufbau eines solchen Bausatzes brauchen ungeübte Experimentatoren ungefähr eine Stunde.

In der nächsten Doppelstunde werden mithilfe von **M 4** der Aufbau und die Funktionsweise eines Dieselmotors vermittelt. Die Schüler bilden Kleingruppen und bearbeiten die Aufgaben 1–4. Die Gruppenarbeitsphase kann nach Abschluss der Aufgabe 1 kurz unterbrochen und die Fragen gesammelt werden. An dieser Stelle kann dazu angeregt werden die Fragen bei der Bearbeitung von Aufgabe 2 im Auge zu behalten. Abschließend werden die Ergebnisse im Plenum zusammengetragen und die Erkenntnisse festgehalten.

In der siebten Stunde folgen anhand von **M 5** eine Einführung und ein Experiment zu Getrieben. Die für die Versuche benötigten Zahnräder und das Befestigungsmaterial findet man z. B. in Bausätzen von Fischer- oder LEGO-Technik usw. Man kann auch in der Stunde zuvor den Schülern die Aufgabe geben, zu Hause nach entsprechenden Bausätzen zu suchen und die Eltern zu fragen, ob sie diese in die Schule mitnehmen dürfen. Als Variation des Versuchs kann man die Schüler anregen, mehrere Zahnräder hintereinanderschalten oder mit einer Welle zu verbinden.

In **M 6** werden in der achten Stunde schließlich Methoden zur Ermittlung des ökologischen Fußabdrucks in Produktion und Alltagsgebrauch am Beispiel der beiden Motorentypen getestet. Diese Stunde soll den Schülern ein Grundverständnis für Umweltfragen vermitteln. Die Schüler werden in Kleingruppen eingeteilt oder erledigen die Aufgaben 1–5 in Einzelarbeit. Abschließend werden die Ergebnisse im Plenum zusammengetragen. Als Abschluss der Unterrichtseinheit dient die Lernstandsüberprüfung **M 7**. Sie kann als Lernzielkontrolle zur Vorbereitung auf eine Klassenarbeit, als Test oder als abschließende Selbstkontrolle eingesetzt werden.

# Auf einen Blick

Ab = Arbeitsblatt, FoV = Folienvorlage, LEK = Lernerfolgskontrolle, SV = Schülerversuch

## 1. Stunde

**Thema:** Einführung zu Motoren

**M 1 (Ab)** **Was ist ein Motor?**

## 2.–4. Stunde

**Thema:** Elektromotoren

**M 2 (Ab/FoV)** **Der Elektromotor**

**M 3 (SV)** **Einen einfachen Elektromotor selbst bauen**

**Benötigt:** Pro Gruppe für den Schülerversuch:

- 1,5-Volt-Batterie Typ AA und/oder Mono
- Zylindermagnet, quaderförmiger Magnet
- 15 cm Kupferdraht, 1 m Kupferdraht lackiert
- 2 Büroklammern, 1 Schraube, Klebeband
- optional: Komplettbausatz Elektromotor und 4,5-Volt-Blockbatterie

## 5.–7. Stunde

**Thema:** Dieselmotoren und Getriebe

**M 4 (Ab)** **Der Dieselmotor**

**M 4a (FoV)** **Der Vier-Takt-Prozess des Dieselmotors**

**M 5 (Ab/SV)** **Getriebe**

**Benötigt:** Pro Gruppe für den Schülerversuch:

- 1 Zahnrad mit Kurbel
- verschieden große weitere Zahnräder
- Befestigungsmaterial

## 8.–9. Stunde

**Thema:** **Ökologischer Fußabdruck** und Lernerfolgskontrolle

**M 6 (Ab)** **Umweltbelastungen bei Produktion, Betrieb und Entsorgung**

**M 7 (LEK)** **Teste dich selbst! – Was weißt du über Elektromotoren und Dieselmotoren?**

### Minimalplan (5 Stunden)

Sie haben wenig Zeit oder Ihnen fehlen die Versuchsmaterialien? Die Einheit kann in 4 Stunden unterrichtet werden. Führen Sie **M 1** und **M 2** normal durch. In der dritten Stunde bearbeiten Sie **M 4** und geben die Rechercheaufgaben als Hausaufgabe auf. **M 5** wird in der vierten Stunde **ohne die Versuche** durchgeführt. **M 3, M 6 und ggf. M 7** werden **weggelassen**.

