

# ELEKTROMOTOR

## Die Geschichte des Elektromotors

Die Entwicklung des Elektromotors geht zurück auf eine Entdeckung, die der dänische Wissenschaftler Hans Christian Oersted im Jahr 1820 machte. Er stellte fest, dass elektrischer Strom eine magnetische Wirkung hat und legte damit den Grundstein für weitere elektromagnetische Forschungsarbeiten in den folgenden Jahren. Es dauerte 18 Jahre, bis ein Elektromotor zum ersten Mal in der Praxis zum Einsatz kam: Hermann Jacobi stattete in St. Petersburg ein Schaufelboot mit einem elektrischen Antrieb aus.

Die Erfindung der Dynamomaschine durch Werner von Siemens (Patentiert im Jahr 1866) ermöglichte es, Strom in großem Maße zu produzieren. Als dann Ende des 19. Jahrhunderts vielerorts Kraftwerke gebaut und Stromnetze verlegt wurden, gab es den entscheidenden Schub für den Siegeszug der Elektromotoren. Der kommerzielle Durchbruch gelang nach der Erfindung des Asynchronmotors durch Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski. Dieser Motor wurde mit Drehstrom betrieben, der sich anders als Gleichstrom verlustarm über längere Distanzen transportieren ließ.

In vielen Industriebetrieben lösten in der Folge Elektromotoren die Dampfmaschinen ab. Die Elektrotechnik wird in Deutschland als ein Grundpfeiler der zweiten industriellen Revolution angesehen. Aber auch im Alltag der Bürger änderte sich dadurch Vieles. Der elektrische Strom machte es möglich, dass Telefone die Telegraphie ablösten. Pferdegespanne wurden durch elektrische Straßenbahnen ersetzt. Und in den Häusern leuchtete elektrisches Licht.

## Funktionsprinzip

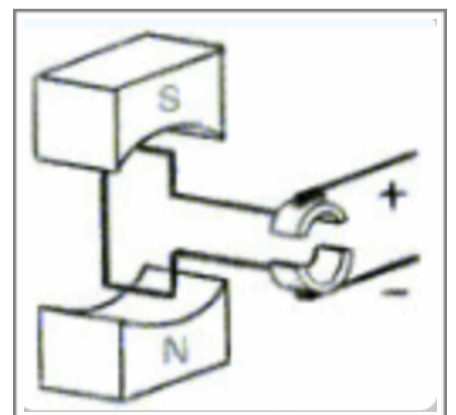
### Kurze Erklärung

Im Elektromotor wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Zunutze macht man sich dabei das Phänomen Magnetismus: Wie wir wissen, stoßen sich gleiche Pole ab und unterschiedliche Pole ziehen sich an. Mit elektrischem Strom ist es möglich, ein nicht magnetisch geladenes Teil magnetisch zu machen. Und auch die Polarität lässt sich beeinflussen, je nachdem in welche Richtung der Strom fließt. In einem einfachen Elektromotor gibt es einen festen magnetischen Teil (Stator) und einen beweglichen Teil (Rotor), der durch Strom magnetisch gemacht wird. Wenn nun durch die elektrische Aufladung zwei Plus-Pole einander zugewandt sind, dann stoßen sie sich ab und der bewegliche Teil des Elektromotors dreht sich. Bei jeder halben Umdrehung wechselt automatisch die Stromrichtung. So wird sicher gestellt, dass die Maschine permanent in Bewegung bleibt und nicht am Totpunkt stehen bleibt.

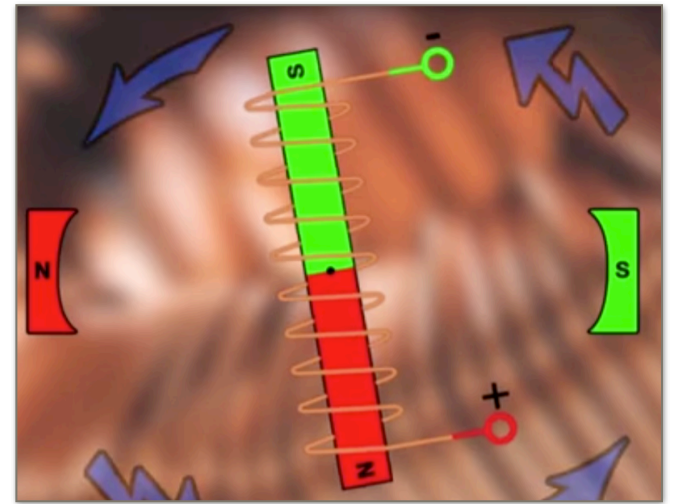
### Ausführliche Erklärung

Elektromotoren sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie treiben Lokomotiven, Straßenbahnen, Kräne und Pumpen an, Kinderspielzeug oder auch Festplatten und DVD-Player. Und wahrscheinlich sind sie die Zukunft des Individualverkehrs. Vom Fahrrad mit Elektrounterstützung bis zum Elektroauto. Wie aber funktioniert ein Elektromotor?

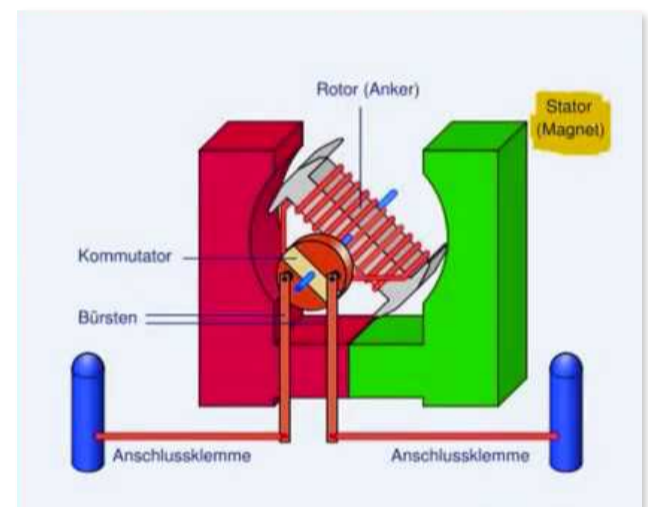
Ein Elektromotor ist eine elektrische Maschine, die elektrische Energie in mechanische umwandelt. Am Anfang steht dabei ein einfacher, zylindrisch aufgewickelter Draht. Eine Spule. Eine Spule, durch die ein Gleichstrom fließt, erzeugt ein Magnetfeld mit einem Nord- und einem Südpol. Wird eine solche Spule drehbar, etwa zwischen den beiden Polen eines Hufeisenmagneten aufgehängt, wirken die magnetischen Kräfte. Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen sich an. Die drehbar aufgehängte Spule, die Anker genannt wird, beginnt zu rotieren, in diesem Fall mit dem Uhrzeigersinn (Bild rechts). Allerdings nur so weit, bis der Anker parallel zu den magnetischen Feldlinien steht. Denn jetzt wirken keine magnetischen Kräfte mehr auf ihn ein, die ihn weiter rotieren lassen. Stattdessen halten ihn diese Kräfte nun in seiner Position fest. In einem Elektromotor soll der Anker jedoch weiter rotieren, um kontinuierlich



Bewegung zu erzeugen. Wenn das geschieht, dürfen die Ankerwicklungen nicht fest an eine Stromquelle angeschlossen sein. Stattdessen wird in die Spannungsversorgung des Ankers ein Stromwender eingefügt. Ein kleines aber effektives Bauteil, das der deutsch-russische Physiker Moritz Hermann von Jacobi 1834 erfand. Der Stromwender besteht aus einem Schleifring und zwei Schleifkontakten. Diese werden Bürsten genannt und bestehen meistens aus Kohle. Der Schleifring ist in zwei Segmente unterteilt, die jeweils mit einem Pol der Ankerwicklungen verbunden sind. Dazwischen liegt eine isolierende Schicht. Im Ausgangszustand ist dann zum Beispiel Pol 1 mit dem Plus- und Pol 2 mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden. Das bleibt zunächst auch so wenn der Stromwender gedreht wird. Hat der Stromwender sich aber so weit gedreht, dass die Bürsten die Isolierschicht des Schleifrings erreichen, ist keiner der beiden Pole mehr mit der Spannungsquelle verbunden. Der Stromwender ist stromlos. Wird der Stromwender noch ein bisschen weiter gedreht, kehrt sich das Spannungsverhältnis des Ausgangszustands um. Jetzt ist Pol 2 mit dem Plus- und Pol 1 mit dem Minuspol des Bauteils verbunden. Darum heißt es auch Stromwender, oder Lateinisch Kommutator.



Wie wirkt sich der Einbau des Kommutators nun auf unseren im Magnetfeld rotierenden Anker aus? Zu Beginn steht der Anker wieder senkrecht zu den magnetischen Feldlinien des umgebenden Magneten. Die gleichnamigen Pole stoßen einander ab, die ungleichnamigen ziehen sich an. Der Anker beginnt gegen den Uhrzeigersinn zu rotieren. Kurz bevor er nun aber wieder die Position erreicht, in der ihn keine Kräfte mehr weiterbewegen würden, erreichen die Bürsten die Isolierschicht des Schleifrings und schalten den Anker stromlos. Jetzt wirken keine magnetischen Kräfte mehr auf den Anker, die ihn festhalten würden. Infolge der eigenen Trägheit rotiert der Anker daher noch ein Stück in seiner ursprünglichen Bewegungsrichtung weiter. Dadurch treten die Bürsten wieder in Kontakt mit den Polen des Ankers. Nun jedoch erfüllt der Kommutator, der Stromwender, seine Aufgabe und kehrt die Polung des Ankers und damit das Magnetfeld gegenüber dem Ausgangszustand um. Dann wirken sofort wieder die magnetischen Kräfte. Zunächst vor allem die Abstoßungskräfte der gleichnamigen Pole. Bis etwa eine Viertelumdrehung weiter erneut die Anziehungskräfte der ungleichnamigen Pole stärker wirken. Erreichen die Bürsten nach einer Drehung des Ankers um beinahe 180° wieder die Isolierschicht des Schleifrings, wiederholt sich der Vorgang. Der Motor läuft jetzt ohne Unterbrechung.



Das war bereits das Funktionsprinzip des ersten von einem Elektromotor angetriebenen Schiffs. Das 1834 auf dem Fluss Neva in Sankt Petersburg über sieben Kilometer zurücklegte. Unser einfacher Gleichstromelektromotor hat allerdings einen entscheidenden Nachteil. Kommt er just in dem Zustand zur Ruhe, in dem der Anker stromlos geschaltet ist, können wir ihn nicht starten. Wir müssen ihn dann zunächst von außen in Bewegung versetzen. Eleganter ist die Lösung einen zweiten Anker mit eigenem Kommutator im rechten mit dem ersten Anker zu verbinden. So ist gewährleistet, dass immer einer der beiden Anker mit der Stromquelle verbunden ist und die Rotationsbewegung in Gang setzen kann. Moderne Elektromotoren haben nicht nur einen oder zwei, sondern eine ganze Reihe von Ankern mit einer entsprechenden Anzahl zusätzlicher Segmente am Kommutator. Der Magnet, in dem unser Anker gelagert war, muss übrigens nicht unbedingt ein Permanentmagnet sein, sondern kann auch ein von derselben Stromquelle gespeister Elektromagnet sein. Das ermöglicht dann eine weitere Bauart des Elektromotors. Statt die Polung des Magnetfelds des Ankers umzukehren wird hier per Wechselstrom die Polung des umliegenden Magneten umgekehrt. Ein solcher Wechselstromelektromotor kommt ohne Kommutator aus. Es muss nur sichergestellt werden, dass die Umpolung des Magnetfelds so getaktet ist, dass der Anker stets vorwärts bewegt und nicht etwa gebremst wird. Moderne Elektromotoren entwickeln erstaunliche Leistungen. So bringt es dieser elektrisch angetriebene Sportwagen auf 225 kW (306PS) Das ist etwa eintausend mal so viel wie beim Elektroschiff auf der Neva. Das größte Problem bei Elektromotoren, die nicht an eine feste Stromquelle angeschlossen sind, ist aber immer noch die Stromversorgung. Der Akku dieses Flitzers zum Beispiel füllt nicht nur den Raum aus, der normalerweise für den Tank benötigt wird, sondern den gesamten Kofferraum gleich mit.

## Wie lässt sich diese Bewegung nun nutzen?

Ganz einfach: Der Rotor, also der bewegliche Teil, ist fest auf einer Achse verbaut. Diese dreht sich zusammen mit dem Rotor, und was immer mit der Achse verbunden ist, dreht sich ebenfalls. Diese mechanische Energie kann für viele verschiedene Zwecke genutzt werden. Bei einem kleinen Motor könnte die Achse zum Beispiel einen Ventilator betreiben. Oder die Achse könnte, bei einem sehr großen Motor, die Räder einer Lokomotive in Bewegung setzen. Durch die Menge der zugeführten Energie lässt sich die Geschwindigkeit des Motors steuern. Und wie bei jedem anderen Motor auch, können natürlich etliche Anbauteile eingesetzt werden, die noch mehr Möglichkeiten eröffnen, die mechanische Energie optimal zu nutzen. Das folgende Youtube-Video erklärt die Funktionsweise eines Elektromotors sehr verständlich.

## Bauteile

### Stator

Als Stator wird der unbewegliche Teil des Elektromotors bezeichnet. Je nach Motortyp kommt hier entweder ein Dauermagnet zum Einsatz oder ein Elektromagnet. Bei den meisten Motoren liegt der Stator außen und ist mit dem Gehäuse verbunden. Es gibt aber auch Motoren, bei denen der unbewegliche Teil innen liegt und der Rotor um den Stator rotiert. In diesem Fall spricht man dann von einem Außenläufer.

### Rotor

Der bewegliche Teil des Elektromotors wird als Rotor, Anker oder Läufer bezeichnet. In den meisten Fällen besteht der Rotor aus einer Achse und einer Spule aus lackiertem Kupferdraht, durch die der Strom fließt und den Rotor zum Elektromagneten macht.

### Anker

Anker wird häufig als Synonym für den Rotor benutzt, beschreibt aber im engeren Sinne den Eisenkern des Rotors, um den die Spulen gewickelt sind.

### Kommutator

Der Kommutator hat seinen Namen aus dem lateinischen Wort *commutare* (=vertauschen) und ist dafür zuständig, dass die Stromrichtung wechselt. Er wird deshalb häufig auch als Stromwender bezeichnet. Mit der Stromrichtung ändert sich auch das Magnetfeld des Elektromagneten. Dies ist nötig, damit der Motor nicht stehen bleibt. Der Kommutator ist in vielen Fällen eine Scheibe aus Metall, die in zwei von einander isolierte Segmente unterteilt ist, und die sich mit der Achse des Motors dreht. Die Stromversorgung erfolgt meist durch Kohlebürsten, die an den Kommutator gedrückt werden. Nach einer halben Umdrehung des Motors wird die Stromzufuhr kurz unterbrochen, dann fließt der Strom umgekehrt durch die Spule.

### Stromquelle

Ohne Elektromagneten funktioniert kein Elektromotor. Daher muss jeder E-Motor über eine Stromquelle verfügen, die den eigentlich nicht-magnetischen Rotor zu einem Elektromagneten macht.

### Bürste

Mit Bürsten, die häufig aus Graphit bestehen, wird der Rotor über den Kommutator mit Strom versorgt.

### Kondensator

Ein Kondensator speichert Energie und gibt sie gezielt ab. Viele E-Motoren haben Betriebskondensatoren, die dafür sorgen, dass der Motor startet, in die richtige Richtung dreht und gleichmäßig seine Kraft entfaltet. Sehr große Maschinen können zusätzlich auch einen Anlaufkondensator haben. Die Kondensatoren sind häufig außen am Gehäuse des Motors angebracht. Sie sind vergleichsweise günstige Verschleißteile und häufig die Ursache, wenn der Elektromotor nicht anläuft.

## Gleichstrommotor – Kommutatormotor

Gleichstrommotoren werden – wie der Name schon sagt – mit Gleichstrom betrieben. Sie sind daher auf den oben bereits erwähnten Kommutator angewiesen, um zu funktionieren. Dieser mechanische Wechselrichter sorgt dafür, dass der Strom automatisch bei jeder halben Umdrehung der Achse umgepolt wird.

Bei den Gleichstrommotoren unterscheidet man wiederum zwischen zwei Unterklassen: Den permanent erregten und den elektrisch erregten Motoren. Beim permanent erregten Gleichstrommotor ist der Stator ein Permanentmagnet und nur der Rotor ein Elektromagnet. Diese Bauart kommt zum Beispiel bei Ventilatoren oder Auto-Anlassern zum Einsatz.

Beim elektrisch erregten Gleichstrommotor sind beide Haupt-Bauteile Elektromagneten. Hier wird nochmals unterschieden zwischen Reihenschluss- bzw. Hauptschlussmotoren auf der einen und Nebenschlussmotoren auf der anderen Seite. Der Unterschied: Beim Nebenschlussmotor haben Stator und Rotor jeweils eine eigene Stromquelle. Ein Hauptschlussmotor hat nur eine Stromquelle. Diese Maschinen können auch mit Wechselstrom betrieben werden und sind daher auch als Universalmotoren bekannt. Elektrisch erregte Gleichstrommotoren kommen in vielen Haushaltsgeräten zum Einsatz.

## Elektromotor vs. Verbrennungsmotor

**Einfacherer Aufbau:** Ein Verbrennungsmotor ist wesentlich komplizierter als ein vergleichbarer Elektromotor. Während ein typischer Pkw-Motor heute aus etwa 1400 Einzelteilen besteht, kommt ein vergleichbarer E-Motor mit nur 1000 Einzelteilen aus. Je weniger komplex ein Motor ist, desto weniger anfällig ist er in der Regel für Fehler und desto kostengünstiger ist die Wartung.

**Geringes Gewicht:** Ein Elektromotor ist deutlich leichter als ein Verbrennungsmotor. Bei gleicher Leistung ist ein Benzinmotor etwa viermal so schwer. Allerdings gilt dies nur für den Motor selbst, der Vorteil wird durch die schweren Akkus wieder zunichte gemacht (siehe unten: Energiedichte).

**Leistungsentfaltung:** Klarer Vorteil für den Elektromotor. Ein E-Motor kann schon kurz nach dem Anlaufen sein volles Drehmoment abrufen. Ein Verbrennungsmotor benötigt in der Regel eine bestimmte Drehzahl, um das maximale Drehmoment zu erreichen – um diesem Wert im Betrieb möglichst nahe zu kommen, wird die Drehzahl über ein Getriebe angepasst. Beim E-Motor wird ein Getriebe in den meisten Fällen nicht benötigt.

**Weniger Lärm:** Neben dem Vorteil, dass beim Betrieb eines Elektroautos keine Schadstoffe ausgestoßen werden (die fallen allerdings schon zuvor bei der Produktion des Stroms an), hat der Elektromotor den Vorteil, dass er deutlich leiser ist.

**Geringe Energiedichte:** Der vielleicht größte Nachteil des E-Motors ist die geringe Energiedichte der Akkus. Die Stromspeicher kommen bei weitem nicht an die Energiedichte von Benzin oder Diesel heran. Deshalb werden viele Akkus benötigt, um eine Reichweite zu ermöglichen, die der eines Verbrennungsmotors zumindest nahe kommt. Die Akkus sind schwer – der Vorteil des geringen Gewichts ist damit passé.

**Schwache Infrastruktur:** Auch beim Thema Tanken zieht das Elektroauto derzeit noch den Kürzeren. Die Infrastruktur wird zwar kontinuierlich ausgebaut – aber würden von heute auf morgen alle Autos nur noch Strom tanken, wäre das absolute Chaos programmiert. Weil der Ladevorgang beim Elektroauto – Schnelllader hin oder her – deutlich länger dauert als das Betanken mit 50 Liter Benzin oder Diesel, wären vermutlich deutlich mehr Ladestationen nötig als es heute Zapfsäulen gibt. Ansonsten wäre die Versorgung zumindest zu typischen Reisezeiten (Ferienbeginn) nicht gewährleistet.

**Heizen geht auf die Reichweite:** Eigentlich ist es ja ein Vorteil, dass beim Betrieb eines Elektromotors kaum Abwärme entsteht (siehe unten: Energiebilanz): Im Winter aber zeigen sich auch die Schattenseiten. Weil der Motor den Innenraum nicht aufheizt, muss mit Strom geheizt werden. Die Nutzung der Heizung reduziert daher die Reichweite des E-Autos.

**Effizienz und Ökobilanz:** Die Energiebilanz von Elektroautos ist deutlich besser als die eines Autos mit Verbrennungsmotor – trotz der aufwändigen Produktion der Akkuzellen. Auf den gesamten Lebenszyklus

betrachtet stößt ein E-Auto mindestens 30% weniger CO<sub>2</sub> aus. Auf den ersten Blick ist der Elektromotor sogar meilenweit im Vorteil: 90% der eingesetzten Energie wird in Bewegung umgesetzt – beim Verbrennungsmotor sind es nur 30%, der Rest geht hier durch Wärme und Reibung verloren. Allerdings darf man zwei Dinge nicht vergessen: Ein Elektromotor ist nur so umweltfreundlich wie die Quelle, aus der der Strom kommt. Stammt er aus Kohlekraftwerken, verliert der E-Motor. Je mehr saubere oder erneuerbare Energiequellen zum Einsatz kommen, desto besser schneidet der Elektromotor natürlich ab. Auch bei der Produktion der Akkus wird viel Energie benötigt. Und auch hier spielt die Art der Energiequelle eine entscheidende Rolle, wie die Ökobilanz des Elektroautos ausfällt.

### *Benutzte Links:*

<http://www.pauli-gmbh.de/elektromotoren-know-how/elektromotor-funktion-aufbau-typen-einsatz/>

<https://www.sofatutor.com/physik/videos/elektromotor>