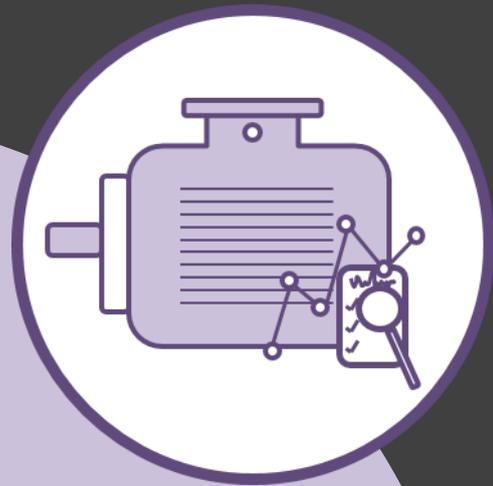


Universität Stuttgart

Institut für Erziehungswissenschaft

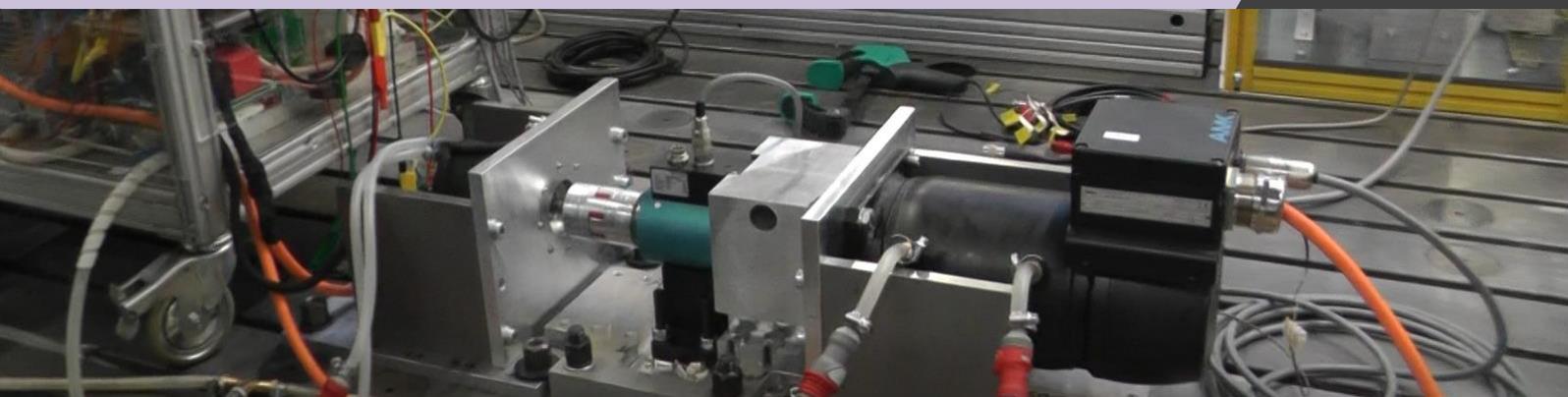


Lehr- und Lernmaterialien für
Naturwissenschaft und Technik (NwT)

Sina Zendler

Dynamik

Stuttgart, Oktober 2018



Redaktionelle Bearbeitung

Wissenschaftliche Leitung	Prof. Dr. Bernd Zinn, Universität Stuttgart
Autoren	Sina Zendler
Inhaltliche / fachliche Unterstützung	Prof. Dr. Bernd Zinn, Marcus Brändle und Mira Latzel
Hilfskräfte	Marcus Brändle und Jan Nowak
Lektorat	Mira Latzel und Marcus Brändle

Die konzipierten Lehr- und Lernmaterialien geben einen Einblick in die *Dynamik* am Beispiel von Elektromotoren im Rennsport. Zur Veranschaulichung wurde ein Interview mit dem GreenTeam der Universität Stuttgart durchgeführt und neben dem Begleitheft ein PPT-basiertes Selbstlernmodul erstellt, welches mit Videos und Aufgabenstellungen eine selbstständige Erarbeitung ermöglicht. Es werden die Leistungsparameter Drehzahl, Drehmoment und Leistung sowie die Leistungskennlinie und der Wirkungsgrad eines Elektromotors betrachtet und der Aufbau eines Elektromotorprüfstands vorgestellt. Die Vor- und Nachteile von Elektro- und Verbrennungsmotoren werden gegenübergestellt und in einem Exkurs kann man sich am „kleinsten Elektromotor der Welt“ versuchen, welcher mit wenigen handelsüblichen Komponenten selbst zusammengebaut werden kann.

Die vorliegenden Lehr- und Lernmaterialien zum Themenbereich *Dynamik* wurden am Institut für Erziehungswissenschaft der Universität Stuttgart entwickelt und fokussieren die Weiterbildung von Lehrkräften im gymnasialen Unterrichtsfach Naturwissenschaft und Technik (NwT). Die Materialentwicklung erfolgte im Rahmen der Qualitätsoffensive Lehrerbildung im Projekt *Lehrerbildung Plus* mit einer Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (FKZ: 01JA1607A). Die Weiterbildung von Lehrkräften erfolgt im Projekt *MINT-Teacher Lab* an der Universität Stuttgart. Das *MINT-Teacher Lab* wird von der Vector Stiftung gefördert und sieht neben der Konzeptionierung eines modernen schulischen Klassenraums die Unterstützung der professionsorientierten Lehreraus- und Weiterbildung in den MINT-Lehramtsfächern im Großraum Stuttgart-Ludwigsburg vor.

Die Informationen, welche in diesem Skript zusammengetragen wurden, sind sorgfältig erarbeitet worden. Jedoch können wir Fehler nicht komplett ausschließen. Wir als Autoren und Herausgeber übernehmen keine juristische Haftung und Verantwortung für eventuelle Fehler und deren Folgen. Die Bildrechte liegen bei den Autoren, außer bei den Abbildungen, bei denen die Originalquellen vermerkt sind.

Impressum

Herausgeber: Prof. Dr. Bernd Zinn und Mira Latzel

Druck und Vertrieb: **MINT Teacher Lab**

Universität Stuttgart

Institut für Erziehungswissenschaft

Azenbergstraße 12

70174 Stuttgart

Internetseite: <https://www.ife.uni-stuttgart.de/bpt/Mint-Teacher-Lab/>

E-Mail: mtl@ife.uni-stuttgart.de

Urheberrecht:

Die Inhalte dieses Heftes dürfen nicht vervielfältigt werden. Jede mechanisch oder technisch mögliche Reproduktion oder Vervielfältigung ist allein mit der Genehmigung der Herausgeber möglich.

Lehrerbildung
PLUS



Gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Gefördert von

VECTOR 
STIFTUNG

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
1. Abgleich Bildungsplan 2016	8
Mittelstufe	8
1.1 Denk- und Arbeitsweisen in Naturwissenschaft und Technik: Systeme und Prozesse	8
1.2 Energie und Mobilität	9
1.3 Stoffe und Produkte	11
1.4 Informationsaufnahme und –verarbeitung	12
Zusatz Dynamik	14
2. Zeichenerklärung	15
3. Formeln und Einheiten	16
3.1 Größen und ihre Einheiten	16
3.2 Formelsammlung zur Dynamik	17
3.3 Die gebräuchlichsten Vorsätze für Maßeinheiten	18
4. Einführung	19
4.1 Verortung der Dynamik in der Technischen Mechanik	19
5. Dynamik	21
5.1 Motoren im Rennsport: Drehzahl, Drehmoment und Leistung	21
5.2 Die Drehzahl	23
5.3 Das Drehmoment	25
5.4 Die Leistung	25
5.5 Der Motorprüfstand	27
5.6 Die Leistungskennlinie	28
5.7 Der Wirkungsgrad	30
5.8 Verbrennungsmotor und Elektromotor im Vergleich	31
Exkurs: Der kleinste Elektromotor der Welt	33

6. Hilfreiche Buch- und Internet-Tipps	35
11.1 Bücherauswahl.....	35
11.2 Zur Übung	35
7. Arbeitsblätter	36
 Arbeitsblatt: Drehzahl, Drehmoment und Leistung von Motoren	37
Abbildungsverzeichnis	42
Tabellenverzeichnis	43
Literaturverzeichnis.....	44

1. Abgleich Bildungsplan 2016

In diesem Kapitel wird der Bezug der Lehr- und Lernmaterialien zu den aktuellen Bildungsplänen für die Mittelstufe im gymnasialen Fach Naturwissenschaft und Technik (NwT) des Bundeslands Baden-Württemberg aufgeführt. Die Inhalte der Lehr- und Lernmaterialien *Technische Mechanik* wurden dafür mit den in den Bildungsplänen der Mittelstufe aufgelisteten prozess- und inhaltsbezogenen Kompetenzen abgeglichen. Bei den inhaltsbezogenen Kompetenzen ist der Bezug jeweils markiert (lila hinterlegt). Bei der Kennzeichnung handelt es sich nur um eine Orientierungshilfe. Je nach Klasse bzw. Klassenstufe müssen Lerninhalte gegebenenfalls intensiver oder weniger intensiv unterrichtet werden.

Mittelstufe

1.1 Denk- und Arbeitsweisen in Naturwissenschaft und Technik:

Systeme und Prozesse

- 1) Systeme analysieren und durch Systemgrenzen und Teilsysteme beschreiben (zum Beispiel Lebewesen, Maschinen, Sonnensystem)
- 2) Energie-, Stoff- und Informationsströme zwischen Teilsystemen erklären (zum Beispiel Treibhauseffekt, Stoffwechsel, GPS)
- 3) Wechselwirkungen (positive und negative Rückkopplung) zwischen Teilsystemen beschreiben (zum Beispiel Atemfrequenzanpassung, chemisches Gleichgewicht, Drehzahlregelung, Klimawandel)
- 4) Veränderungen in Systemen als Prozesse beschreiben (Prozessschritt, Teilprozess, Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe-Prinzip)
- 5) Teilsysteme durch ihre äußeren Funktionen beschreiben (Black-Box-Denken; zum Beispiel Sinneszelle, Batterie)

1.2 Energie und Mobilität

1.2.1 Energie in Natur und Technik

- 1) Die Bedeutung der Sonne für das Leben auf der Erde erläutern (zum Beispiel Photosynthese, Windsysteme, Schiefe der Ekliptik)
- 2) die Begriffe Energiespeicher und Energieübertragung erläutern (zum Beispiel Körpertemperatur von Tieren, elektrochemischer Energiespeicher, Gebäudeheizung, Atmosphäre)
- 3) Energieübertragungsketten in Systemen grafisch darstellen und erklären (zum Beispiel Lebewesen, Maschinen)
- 4) Energiedichten oder Speicherkapazitäten vergleichen (zum Beispiel Brennwert, latente Wärme)
- 5) Energieumsätze abschätzen, berechnen und vergleichen
- 6) aus individuellen oder regionalen Energieumsätzen eigenes und gesellschaftliches Handeln ableiten
- 7) Wirkungsgrade und Leistungen berechnen und vergleichen (Wirkungsgrad in Energieübertragungsketten)

1.2.2 Energieversorgungssysteme

- 1) Grundbegriffe der Energieversorgung beschreiben (zum Beispiel fossile und regenerative Energieträger, Grund- und Spitzenlast)
- 2) verschiedene Möglichkeiten der Nutzbarmachung von Energie beschreiben (Photovoltaik, Solarthermie, Windenergie, thermische Kraftwerke; höchster theoretischer Wirkungsgrad, zum Beispiel Carnotwirkungsgrad oder Betz'sche Leistungsentnahme)
- 3) Möglichkeiten der Energieversorgung hinsichtlich ökologischer und wirtschaftlicher Kriterien vergleichen und bewerten

- 4) ein Funktionsmodell eines energietechnischen Systems entwickeln, konstruieren, fertigen und die Energieumsetzung quantitativ auswerten (zum Beispiel Windkraftanlage, Photovoltaik, Anlage mit Brennstoffzelle, elektrochemischer Energiespeicher)
- 5) Eignungsfaktoren eines Standorts für ein Energieversorgungssystem analysieren (zum Beispiel naturräumliche, technische, gesellschaftliche, ökologische, wirtschaftliche Faktoren)

1.2.3 Bewegung und Fortbewegung

- 1) Bewegungen in Natur und Technik vergleichen (zum Beispiel aktive und passive Bewegungen)
- 2) Antriebsmöglichkeiten für Bewegungsabläufe beschreiben (zum Beispiel Muskel, Elektromotor)
- 3) Rückstoß, Auftrieb oder Reibung als Ursache für die Fortbewegung in Natur und Technik beschreiben (zum Beispiel Rakete, Heißluftballon)
- 4) Hebelwirkung, Drehmomente und Drehzahlen bestimmen (zum Beispiel Zusammenwirken von Muskulatur-Knochen-Gelenk, Motor-Welle-Lager)
- 5) Systeme zur Wandlung von Dreh- und Längsbewegungen erläutern
- 6) Übersetzungen dimensionieren und Getriebe konstruieren (Drehrichtung, Drehzahl, Drehmoment)
- 7) ein Objekt mit Antrieb entwickeln, konstruieren, fertigen und optimieren

1.3 Stoffe und Produkte

1.3.1. Eigenschaften von Stoffen

- 1) Eigenschaften von Stoffen bestimmen (zum Beispiel Löslichkeit, Leitfähigkeit, Brennbarkeit, Zugfestigkeit, Härte, Wasserspeicherfähigkeit)
- 2) die Eignung von Stoffen für einen bestimmten Zweck erläutern
- 3) Stoffeigenschaften mit einfachen Modellen auf Teilchen- oder mikroskopischer Ebene erläutern

1.3.2. Statische Prinzipien in Natur und Technik

- 1) den statischen Aufbau von natürlichen und technischen Systemen analysieren (geometrische Konstruktion, Stabilität des Dreiecks, Profile)
- 2) Zug- und Druckkräfte zweidimensional geometrisch oder rechnerisch bestimmen (zum Beispiel Brücke, Kran, Körperbau)

1.3.3. Produktentwicklung

- 1) ein Produkt mit definierter Funktion und bestimmter Eigenschaft entwickeln, konstruieren und normorientiert darstellen (zum Beispiel Windkraftanlage, Messgerät, Maschine)
- 2) Analogien zwischen technischen Produkten und natürlichen Systemen erläutern (zum Beispiel Lotuseffekt, Wärmedämmung, Stabilität von Konstruktionen)
- 3) Roh- und Werkstoffe ressourcenschonend auswählen und nutzen (Verschnitt, Ökobilanz)
- 4) mit Werkzeugen und Maschinen ein Produkt fertigen (Verfahren zum Trennen, Fügen, Umformen, zum Beispiel computergestützte Fertigung)
- 5) Funktion und Eigenschaften eines Produkts bewerten und Optimierungsansätze entwickeln

1.3.4. Stoffströme und Verfahren

- 1) natürliche und technische Stoffströme und Stoffkreisläufe erläutern (zum Beispiel Kalk-, Wasserkreislauf, atmosphärische Zyklen, Entstehung chemischer Elemente)

- 2) einen verfahrenstechnischen Herstellungsprozess und die darin enthaltenen Grundoperationen erläutern (chemische, thermische oder biochemische Verfahren)
- 3) in einem chemisch-technischen Verfahren ein Produkt realisieren und den Herstellungsprozess oder das Produkt optimieren (zum Beispiel Sonnencreme, Bioethanol, Zuckerherstellung, Produkt aus Gummi)

1.4 Informationsaufnahme und –verarbeitung

1.4.1. Informationsaufnahme durch Sinne und Sensoren

- 1) Die Verwendungsmöglichkeiten von Sensoren beschreiben (zum Beispiel Blutdruckmessgerät, Hygrometer, Anemometer)
- 2) Bau und Funktionsweise eines Sinnesorgans mit einem entsprechenden technischen Sensor vergleichen (zum Beispiel Auge mit Digitalkamera, Ohr mit Mikrofon)
- 3) die Gefährdung von Auge oder Ohr durch Überlastung beschreiben und persönliches Handeln von gesundheitlichen Grenzwerten ableiten
- 4) die Gesetzmäßigkeit zwischen subjektivem Erleben und Intensität des physikalischen Reizes erläutern (zum Beispiel Lichtintensität, Lautstärke, Schwereempfinden)
- 5) die Erweiterung menschlicher Sinnesleistungen durch Sensoren erläutern (zum Beispiel IR-Sensor, Hörgerät, Wärmebildkamera, Barometer)

1.4.2. Gewinnung und Auswertung von Daten

- 1) Bedingungen für zuverlässige Messungen erläutern und Messverfahren optimieren (systematische und zufällige Messfehler, Standardabweichungen, Randbedingungen oder Einflussgrößen, Kontrollmessungen oder Reproduzierbarkeit)
- 2) an einem ausgewählten Beispiel direkte und indirekte Messverfahren vergleichen
- 3) Messdaten mithilfe von Software auswerten und darstellen (Standardabweichungen, Tabellenkalkulation)
- 4) ein optisches oder akustisches Spektrum darstellen und auswerten (zum Beispiel Sonnenspektrum, Leuchtmittel aus dem Haushalt, Ton und Klang)

- 5) raumbezogene Daten darstellen und nutzen (zum Beispiel thematische Karten zur Sonneneinstrahlung oder Windstärke, Wetterkarten, Geoinformationssysteme)
- 6) Verfahren zur räumlichen Orientierung beschreiben (zum Beispiel astronomische Orientierung, satellitengestützt Navigation)

1.4.3. Informationsverarbeitung

- 1) Beispiele der analogen oder digitalen Informationscodierung aus Natur und Technik beschreiben (zum Beispiel digitale Dateiformate, maschinenlesbare Code-Systeme, DNA)
- 2) die Funktionsweise gesteuerter oder geregelter Systeme analysieren und dazu Energie-, Stoff- und Informationsströme untersuchen (zum Beispiel effiziente Energienutzung, Entwicklung eines Objekts mit Antrieb, Herstellung eines Produkts in einem chemisch-technischen Verfahren, physiologischer Regelkreis)
- 3) das Prinzip der Steuerung darstellen und erklären (zum Beispiel Robotik)
- 4) das Prinzip der Regelung auch unter Verwendung der Begriffe Sollwert, Istwert, Regelgröße und Störgröße darstellen und an Beispielen aus der Natur und der Technik erklären (zum Beispiel Körpertemperatur des Menschen, chemisches Gleichgewicht, Klimawandel: Mittlere Oberflächentemperatur der Erde, Oberflächentemperatur von Himmelskörpern)
- 5) Elemente einer Programmiersprache beschreiben (zum Beispiel Bedingung, Verzweigung, Schleife, Zähler, Zeitglied, Unterprogramm, Programmbausteine)
- 6) Algorithmen für zeit- und sensorgesteuerte Prozesse in einer Programmiersprache darstellen und damit Steuerungsabläufe realisieren (zum Beispiel Ampelsteuerung, Robotik)
- 7) Algorithmen für zeit- und sensorgesteuerte Prozesse entwickeln, beschreiben und darstellen
- 8) Chancen und Risiken der Informationstechnik für Individuum und Gesellschaft erläutern (zum Beispiel Simulation, Datenschutz, Internet of Things, Geoinformationssysteme, autonomes Fahren)

1.4.4. Elektronische Schaltungen

- 1) die Funktion von Bauteilen elektrischer oder elektronischer Schaltungen beschreiben (Schalter, Widerstand, Leuchtdiode, Transistor)

- 2) Schaltungen entwickeln, Bauteile dimensionieren und auswählen (Schaltplan, Datenblatt, Vorwiderstand, Spannungsteiler)
- 3) elektrische oder elektronische Schaltpläne analysieren und in einfachen Fällen entwickeln
- 4) elektrische oder elektronische Schaltungen realisieren und ihre Funktionsfähigkeit untersuchen

Zusatz Dynamik

- a) für verschiedene Antriebe die Drehzahl in Abhängigkeit des Drehmoments erfassen und daraus die Leistungskennlinien bestimmen ($P = 2 \cdot n \cdot f \cdot M$, Leistungsmaximum, Wirkungsgradkennlinie).

2. Zeichenerklärung

Ziel	
Übung	
Frage	
Buch	
Tipp / Hinweis Allgemein, führt nicht direkt zur Aufgabenlösung	
Fachwissen	 © Winter & Rieck
Merke	
Kopfnussaufgabe: Zusatzaufgabe, die freiwillig gemacht werden kann	 © Winter & Rieck

3. Formeln und Einheiten

3.1 Größen und ihre Einheiten

Tabelle 1: Größen und ihre Einheiten

Größe	Formelzeichen	Einheit
Arbeit	W	J = Nm
Beschleunigung	a	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Drehmoment	M	Nm
Drehzahl	n	$\frac{1}{\text{min}}$ bzw. $\frac{1}{\text{s}}$
Erdbeschleunigung	g	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Flächenlast	q	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
Frequenz	f	$\frac{1}{\text{min}}$
Kraft	F	N (= $\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}$)
Leistung	P	$1 \frac{\text{J}}{\text{S}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$ = 1 W
Masse	m	kg
Winkelgeschwindigkeit	ω	$\frac{1}{\text{min}}$
Wirkungsgrad	η	- bzw. %
Zeit	t	s

3.2 Formelsammlung zur Dynamik

Tabelle 2: Formelsammlung Kraft

Größe	Formel	Genauere Beschreibung
Kraft (Grundgesetz der Dynamik)	$F = m \cdot a$	F = Kraft [N] m = Masse des Körpers [kg] a = Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
Gewichtskraft	$G = m \cdot g$	G = Gewichtskraft [N] g = Erdbeschleunigung (hier: $9,81 \frac{m}{s^2}$)
Reaktionskraft	$-G = G'$	Reaktionsprinzip: actio = reactio

Tabelle 3: Formelsammlung Dynamik

Größe	Formel	Genauere Beschreibung
Definition Drehzahl	$n = \frac{\Delta Z}{\Delta t}$	n = Drehzahl [$\frac{1}{min}$] ΔZ = Zahl der Umdrehungen Δt = Zeitintervall
Drehzahl	$n = \frac{1}{T}$	n = Drehzahl [$\frac{1}{min}$] T = Umlaufdauer [min]
Drehmoment	$M = F \cdot l$	M = Drehmoment [Nm] F = Kraft [N] l = Hebelarm [m]
Winkelgeschwindigkeit	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot f$	ω = Winkelgeschwindigkeit [$\frac{1}{min}$] n = Drehzahl [$\frac{1}{min}$] f = Frequenz [$\frac{1}{min}$]
Leistung	$P = \frac{W}{t}$	P = Leistung [$1 \frac{J}{s} = 1 \frac{Nm}{s} = 1 W$] W = Arbeit [J = Nm] t = Zeit [s]

Leistung Motor	$P = M \cdot \omega$ $P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$	$P = \text{Leistung} \left[1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \text{ W} \right]$ $M = \text{Drehmoment} [\text{Nm}]$ $\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit} \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$ $n = \text{Drehzahl} \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$
Wirkungsgrad	$\eta = \frac{P_{\text{nutz}}}{P_{\text{auf}}} < 1$	$\eta = \text{Wirkungsgrad} [- \text{ bzw. } \%]$ $P_{\text{nutz}} = \text{Nutzleistung} [\text{W}]$ $P_{\text{auf}} = \text{aufgewendete Leistung} [\text{W}]$

3.3 Die gebräuchlichsten Vorsätze für Maßeinheiten

Tabelle 4: Die gebräuchlichsten Vorsätze für Maßeinheiten

Symbol	Bezeichnung	Wert
m	Milli	10^{-3}
c	Zenti	10^{-2}
d	Deka	10
k	Kilo	10^3
M	Mega	10^6

4. Einführung

4.1 Verortung der Dynamik in der Technischen Mechanik

Die **Dynamik** ist neben der Kinematik und der Festigkeitslehre ein Teilgebiet der Technischen Mechanik (hier kurz TM). Die TM beschäftigt sich mit den Bewegungen, mechanischen Beanspruchungen und Gleichgewichten von materiellen Körpern, die unter dem Einfluss von Kräften stehen. Sie bildet die Grundlage für viele Ingenieurwissenschaften.

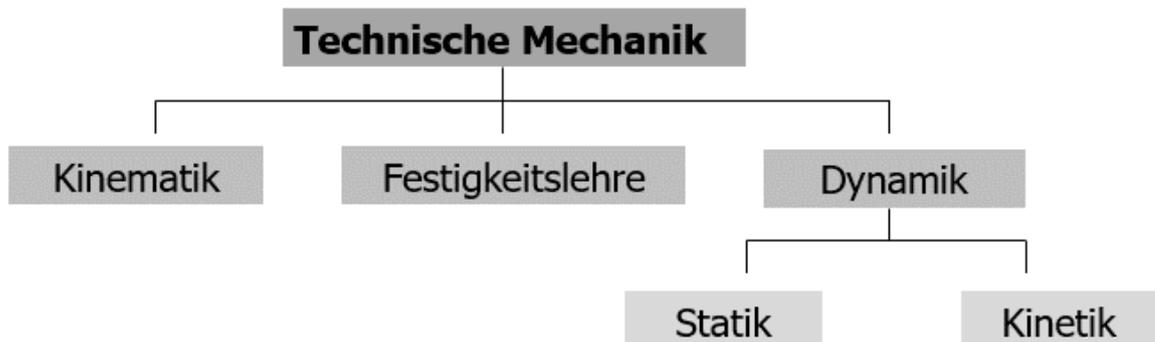


Abbildung 1: Gliederung der Technischen Mechanik

Teilgebiete der TM sind - betrachtet nach den physikalischen Vorgängen - die Kinematik und die Dynamik. Das Wort **Kinematik** leitet sich aus dem griechischen ab und bedeutet so viel wie Bewegung. Definiert wird die Kinematik als die Lehre von den Bewegungsabläufen fester Körper, allerdings wird hier die ursächliche Kraft außen vorgelassen. Im Maschinenbau wird zum Beispiel eine Bewegung erwünscht. Die **Dynamik** (aus dem Altgriechischen *dynamis* = Kraft) untersucht dagegen den Einfluss von Kräften auf die daraus resultierenden Bewegungen von Körpern und stellt Beziehungen zwischen der Beschleunigung und der dafür erforderlichen Kraft her. Die Dynamik wird dahingehend in die Statik und die Kinetik unterteilt.

Während die **Kinetik** die Bewegungen von Körpern unter dem Einfluss von äußeren und inneren Kräften betrachtet, umfasst die **Statik** die Betrachtung von Kräften an ruhenden Körpern. Vor allem im Bauwesen müssen Bewegungen ausgeschlossen werden oder anders ausgedrückt: an einem Gebäude müssen sich alle Kräfte im Gleichgewicht befinden, da eine Bewegung ja zum Einsturz führen kann. Dies zu erfüllen ist die Aufgabe der Statik. Sie ist die Lehre vom Gleichgewicht.

Wenn alle Gleichgewichtskräfte an einem Gebäude bekannt sind, kommt noch ein weiteres Gebiet dazu, die **Festigkeitslehre**. Mit Hilfe der Festigkeitslehre kann man nachweisen, dass die ausgesuchten Werkstoffe die Kräfte aufnehmen können und Formänderungen und weitere Beanspruchungen im Toleranzbereich bleiben. Bei der Konstruktion und Dimensionierung eines Gebäudes zum Beispiel spielen also vor allem die Festigkeitslehre als auch die Statik eine große Rolle.

5. Dynamik

5.1 Motoren im Rennsport: Drehzahl, Drehmoment und Leistung



Abbildung 2: GreenTeam Uni Stuttgart

(<https://www.greenteam-stuttgart.de/>)

Das GreenTeam der Universität Stuttgart wurde im Jahr 2009 gegründet. Studierende der Studienfächer Maschinenbau, Fahrzeug- und Motorentechnik, Elektrotechnik, Kybernetik und Mechatronik wirken hier auf freiwilliger Basis mit und entwickeln einen vollständig elektrisch angetriebenen Rennwagen, mit dem sie bei weltweiten Rennen gegen andere Universitäten im Rennsport antreten - und das sehr erfolgreich! Um Näheres über das GreenTeam zu erfahren, haben wir von der Technikdidaktik des Instituts für Erziehungswissenschaft „IfE“, den Teamleiter des GreenTeams „Simon“, besucht und ihn einen Tag lang bei seinen täglichen Aufgaben begleitet. Simon koordiniert als Teamleiter die Entwicklung des Elektromotors – dem Kernstück des Autos - und um einen Einblick in die ingenieurwissenschaftliche Arbeit zu bekommen, haben wir ein Interview mit ihm durchgeführt...

IfE: Simon, wie lief die letzte Saison für Ihr Team?

Simon: Die Saison 2016/17 war sehr erfolgreich für das GreenTeam. Wir haben vier Podiumsplatzierungen erlangt, wodurch wir jetzt weltweit zu den besten Formula Student Elektric Teams gehören. Besonders stolz sind wir auf den Sieg hier am Hockenheimring!

IfE: Wir haben gehört, dass Sie gerade an der Entwicklung eines neuen Elektromotors für das Rennfahrzeug arbeiten. Wie geht die Arbeit damit voran?

Simon: Das ist mittlerweile schon der zweite Motor, an dem ich arbeite, da bei dem Ersten noch viele Fehler behoben werden mussten...

IfE: Woran kann man denn erkennen, ob ein Motor für ein Rennfahrzeug gut geeignet ist?

Simon: In der Fahrzeugtechnik müssen Motoren immer wieder auf ihre Funktionstüchtigkeit untersucht werden. Um bestimmte Eigenschaften reproduzierbar prüfen zu können, verwendet man daher sogenannte Prüfstände. Mit Hilfe von verschiedensten Messsystemen, Sensoren und Anwendungssoftwares können so die gesuchten Größen gemessen und ausgewertet werden.

IfE: Welche Größen spielen für die Geschwindigkeit des Fahrzeugs eine besondere Rolle? Schließlich wollen Sie ja weiterhin mit vorne dabei bleiben ...

Simon: Die Drehzahl, das Drehmoment und die Leistung sind die Kennwerte, die den Vergleich von Motoren untereinander ermöglichen und daher besonders wichtig für uns sind.

5.2 Die Drehzahl

Hohe Drehzahlen spiegeln sich bei einem Autorennen durch einen brachialen Sound wieder. Nicht umsonst sollte man bei einem Formel 1 Rennen immer Kopfhörer dabei haben. Die Drehzahl gibt die Häufigkeit der Umdrehungen in einem bestimmten Zeitabschnitt wieder.

Ife: Simon, was für eine Bedeutung hat die Drehzahl für einen Elektromotor?

Simon: Die Drehzahl steht in diesem Fall für die Drehungen der Motorwelle pro Minute. Eine höhere Drehzahl bedeutet also, dass der Motor mehr arbeiten muss und dementsprechend auch einen höheren Energieverbrauch hat. Die Drehzahl bezieht sich dabei immer auf den kompletten umlaufenden Körper, wie zum Beispiel auf einen Elektromotorrotor.

In der Technik wird meistens die Einheit Umdrehungen pro Minute ($\frac{1}{min}$) verwendet, in der Physik werden die Umdrehungen dagegen pro Sekunde ($\frac{1}{s}$) betrachtet.

Allgemein wird die Drehzahl als Quotient aus der Zahl der Umdrehungen und einem bestimmten Zeitintervall definiert.

$$n = \frac{\Delta Z}{\Delta t}$$

$n = \text{Drehzahl} \left[\frac{1}{min} \right]$
$\Delta Z = \text{Zahl der Umdrehungen}$
$\Delta t = \text{Zeitintervall}$

Außerdem stellt die Drehzahl den Kehrwert der Umlaufdauer dar:

$$n = \frac{1}{T}$$

$n = \text{Drehzahl} \left[\frac{1}{min} \right]$
$T = \text{Umlaufdauer [min]}$

Mit diesen Kenntnissen lässt sich auch die Winkelgeschwindigkeit definieren. Da eine komplette Umdrehung einem Winkel von 2π entspricht, gilt für die Winkelgeschwindigkeit:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot f$$

ω = Winkelgeschwindigkeit $\left[\frac{1}{\text{min}}\right]$

n = Drehzahl $\left[\frac{1}{\text{min}}\right]$

f = Frequenz $\left[\frac{1}{\text{min}}\right]$

Bei einer Drehbewegung entspricht die Drehzahl der Frequenz.

IfE: Kann man pauschal sagen, in welchem Bereich die Drehzahl bei einem Rennfahrzeug liegen sollte?

Simon: Je nachdem, um was für einen Antrieb es sich handelt, gibt es verschiedene Drehzahl-optima. Bei einem Verbrennungsmotor ist das natürlich ganz anders als bei einem Elektromotor.

5.3 Das Drehmoment

Ein Drehmoment versetzt, wie es bereits in Kapitel 6.2 beschrieben wurde, einen Körper in Drehung. Es ist mit der Einheit Nm sozusagen das Äquivalent der Kraft, die Körper geradlinig beschleunigt.

IfE: Warum gehört gerade das Drehmoment zu einer der wichtigsten Kenngrößen?

Simon: Egal, ob es sich um einen Verbrennungsmotor oder eine Elektromaschine handelt, der Motor stellt immer an seinem Abtrieb ein Drehmoment zur Verfügung. Dieses Drehmoment hängt wiederum von der Drehzahl ab. Fakt ist für einen Rennwagen: Je größer das Drehmoment, umso mehr Power hat ein Antrieb.

5.4 Die Leistung

IfE: Wie schnell kann das Elektrorennfahrzeug derzeit dann maximal fahren?

Simon: Mit dem alten Motor waren es so um die 120-130 km/h. An den neuen Motor habe ich etwas höhere Erwartungen...

Die Leistung stellt den Quotienten aus der verrichteten Arbeit W (die Arbeit ist wiederum das Produkt aus Kraft und Strecke $W = F \cdot s$) und der dafür erforderlichen Zeit t dar.

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = \text{Leistung} \left[1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \text{ W} \right]$$

$$W = \text{Arbeit} [\text{J} = \text{Nm}]$$

$$t = \text{Zeit} [\text{s}]$$

IfE: Was bedeutet die Leistung praktisch für ein Rennauto?

Simon: Auf den Motor bezogen bedeutet dies: je höher die Drehzahl eines Autos, desto höher ist die abrufbare Leistung und damit auch die Beschleunigung, beispielsweise bei einem Überholmanöver. Handelt es sich um eine Motorantriebswelle, so ergibt sich die Leistung aus dem Produkt aus Drehzahl und Drehmoment.

$$P = M \cdot \omega$$
$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$P = \text{Leistung} \left[1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \text{ W} \right]$$

$$M = \text{Drehmoment} [\text{Nm}]$$

$$\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit} \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$

$$n = \text{Drehzahl} \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$



Die Leistung in PS

Die Leistungsangabe eines Motors erfolgt üblicherweise in PS (Pferdestärke). Der Erfinder der Dampfmaschine James Watt wollte damit eine anschauliche Einheit für die Leistung einer Dampfmaschine aufstellen und hat darunter die durchschnittliche verwendbare Leistung eines Pferdes bei der Arbeit verstanden. Die heute korrekte Einheit ist aber eigentlich das Watt. 1 Watt ist demnach die Leistung, bei der 1 J Arbeit während 1 s umgesetzt wird.

$$1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS} \text{ bzw. } 1 \text{ PS} = 0,736 \text{ kW}$$

Simon: Am besten wir schalten hierzu mal den Prüfstand an und schauen uns dann so eine Leistungskennlinie genauer an...

5.5 Der Motorprüfstand

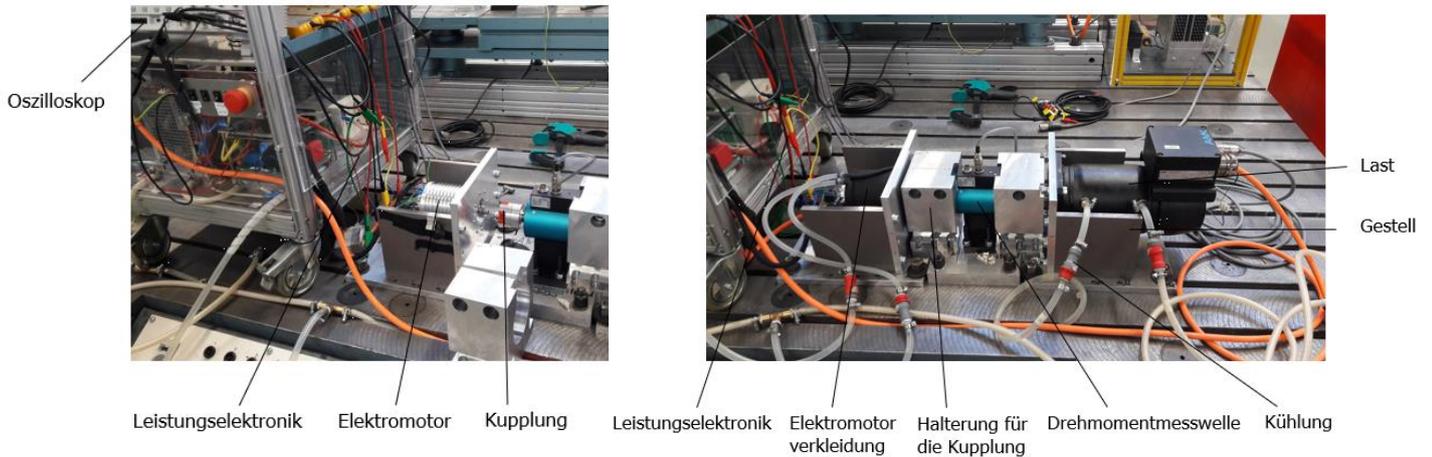


Abbildung 3: Motorprüfstand (links ohne Verkleidung, rechts mit Verkleidung)

IfE: Wie funktioniert das denn jetzt alles?

Simon: In dem Elektromotor ist ein Sensor eingebaut, der die Drehzahl misst. Über eine Kupplung wird der Elektromotor mit der Drehmomentmesswelle verbunden. Auf diese wirkt wiederum eine Last, die der Motor aufnehmen muss. Die Last kann variiert werden. Über Dehnmessstreifen in der Drehmomentwelle werden so die verschiedenen Drehmomente gemessen. Die nötige Spannung für den Elektromotor wird über ein leistungsstarkes Netzteil bereitgestellt und durch die Leistungselektronik in eine Wechselspannung umgewandelt. Alle Daten werden dann auf den PC übertragen.

IfE: Der Elektromotor sieht aber klein aus...

Simon: Haha ja, je kleiner, desto weniger Gewicht! Er wiegt gerade mal 3,5 kg, wobei der Motor des Teams in Karlsruhe sogar noch kleiner ist. Aber jetzt müssten auch die Daten fertig sein...

5.6 Die Leistungskennlinie

An einem Motorprüfstand kann gemessen werden, welche Drehzahl sich einstellt, wenn der Motor mit einem bestimmten Drehmoment belastet wird. Mit Hilfe der oben genannten Gleichung kann daraus die Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl berechnet und in einem Diagramm dargestellt werden. Das bezeichnet man als Leistungskennlinie. Sie spiegelt die Charakteristik eines Motors wieder.

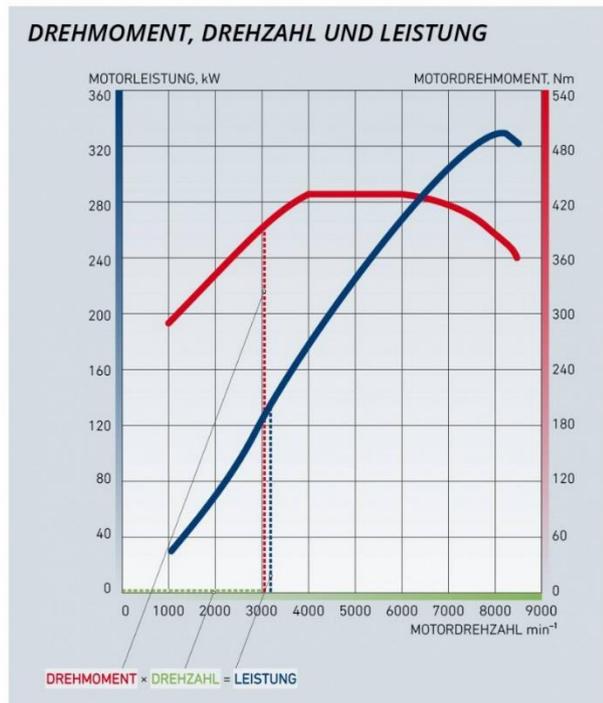


Abbildung 4: Leistungs- und Drehmomentkennlinie eines Verbrennungsmotors

(© Bild: Alessandro Holler)

IfE: Welche Charakteristika weist eine typische Elektromotorkennlinie auf?

Simon: Die Drehmomentkennlinie eines Elektro-Synchronmotors weist schon bei einer niedrigen Drehzahl ein hohes Drehmoment auf. Wenn die sogenannte Eckdrehzahl erreicht ist, fällt das Drehmoment ab. Die Eckdrehzahl ist also die Drehzahl, bei der das maximale Drehmoment gerade noch erhalten bleibt.

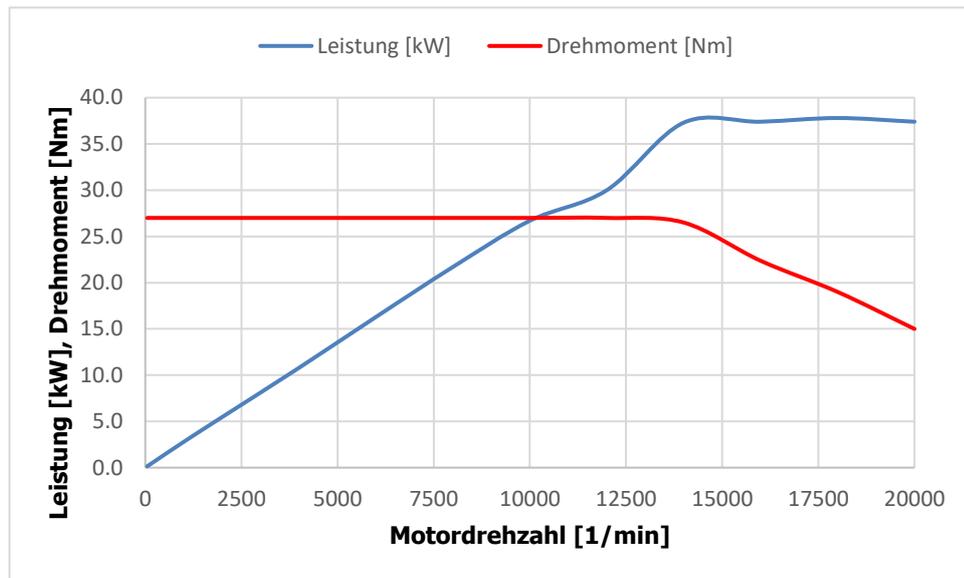


Abbildung 5: Leistungs- und Drehmomentkennlinie eines Elektromotors

Wird die Drehmomentkennlinie des Verbrennungsmotors (Ottomotor) aus Abbildung 4 mit der eines Elektromotors (Abbildung 5, Synchronmotor) verglichen, lässt sich feststellen, dass der Elektromotor von Beginn an ein hohes und konstantes Drehmoment ausübt. Der Verbrennungsmotor verzeichnet anfangs ein stetig ansteigendes Drehmoment, das in Abbildung 4 bei 4000 U/min sein Maximum erreicht und ab einer Motordrehzahl von 6000 U/min beginnt abzufallen. Die Drehmomentkennlinie des Elektromotors fällt ab 14000 U/min linear. Da sich die Drehzahl während des Drehmomentabfalls noch weiter erhöht, bleibt die Leistungskennlinie ab diesem Wert konstant. Diesen Sachverhalt erklärt die Formel in Abbildung 4.

Prinzipiell wäre bei einem Verbrennungsmotor ein stetiger Anstieg des Drehmoments mit kontinuierlich steigender Drehzahl zu erwarten. In der Praxis wird dies jedoch nicht erreicht. Bei einem Verbrennungsmotor lässt sich der Abfall des Drehmoments durch die immer höhere Kolbengeschwindigkeit erklären. Je schneller sich die Kolben bewegen, desto eher bekommt der Motor Füllungsprobleme und arbeitet dadurch unter Sauerstoffmangel. Der Kraftstoff verbrennt nicht mehr optimal und die auf den Kolben wirkende Kraft nimmt dadurch ab. Zunächst steigt die Drehzahl weiter an, was den Drehmomentabfall in gewissem Maß kompensieren kann und in einer weiteren Steigerung der Leistung resultiert. Der Gaswechsel wird dadurch zusehends schlechter, dies führt letztendlich ab 8000 U/min zu einem Leistungsabfall.

Beim Betrieb des Elektromotors ist die sogenannte Gegeninduktionsspannung der Ankerwicklung der limitierende Faktor. Bei niedriger Drehzahl ist diese Gegeninduktionsspannung gering. Dadurch kann eine hohe Stromstärke aufgenommen werden, woraus ein hohes Drehmoment resultiert. Mit steigenden Drehzahlen nimmt auch die Gegeninduktionsspannung zu. Dies führt zu einer sinkenden Aufnahme der Stromstärke und somit zu einem Abfall des Drehmoments.

5.7 Der Wirkungsgrad

IfE: Wird die Leistung des Motors dann direkt in die Bewegung umgesetzt?

Simon: Nein, leider nicht. Ein Teil der Energie geht durch die Reibung im Getriebe und so weiter verloren und wird in Wärme umgewandelt. Bei einem Elektromotor wird aber der Großteil der Energie in Bewegungsenergie umgesetzt. Der Wirkungsgrad ist bei Verbrennungsmotoren deutlich geringer.

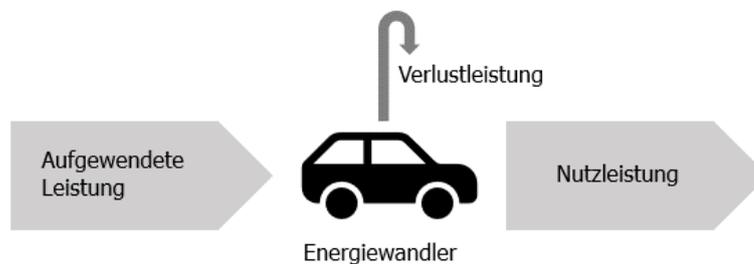


Abbildung 6: Wirkungsgrad

Technische Vorgänge sind immer mit einem gewissen Verlust verbunden. Um diesen zu beurteilen, wurde der Begriff des Wirkungsgrades eingeführt. Dieser ist das Verhältnis der Nutzleistung zur aufgewendeten Leistung.

$$\eta = \frac{P_{nutz}}{P_{auf}} < 1$$

η = Wirkungsgrad [%]

P_{nutz} = Nutzleistung [W]

P_{auf} = aufgewendete Leistung [W]

Der Wirkungsgrad zeigt also, wie effizient ein Energiewandler ist. Bei einem Elektromotor wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Da kein technischer Vorgang ohne den Verlust von Energie ablaufen kann, ist der Wirkungsgrad immer kleiner als 1 ($\eta < 1$).

In einem Rennwagen treten Verluste vor allem durch die Reibung auf. Wie man diese berechnet und welche verschiedenen Arten es davon gibt, ist Inhalt des nächsten Kapitels.

5.8 Verbrennungsmotor und Elektromotor im Vergleich

Vorteile von Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren:

- Elektromotoren weisen einen hohen Wirkungsgrad auf ($> 94 \%$). Verbrennungsmotoren geben einen Großteil der im Treibstoff chemisch gebundenen Energie als Wärme ab (ca. 75%), der Rest wird in Bewegungsenergie umgewandelt.
- Aufgrund der unterbrechungsfreien Drehmomentabgabe ist keine Anfahrtsynchronisation oder schaltbare Übersetzung notwendig. Dies erstreckt sich über den gesamten Geschwindigkeitsbereich.
- Geringere Größe (Abmessung) und Gewicht (Masse). Dies ermöglicht einen platzsparenden Einbau in der Nähe der Räder.
- Es entstehen keine Abgase (Emissionen) beim Betrieb.
- Aufgrund der langen Motor-Lebensdauer und der geringen Wartung sind die Betriebskosten vergleichsweise niedrig.
- Die Montage einschließlich dem Kühlsystem ist einfach.
- Ein Elektroantrieb ermöglicht die Einrichtung einer elektromotorischen Bremse, d. h. der Elektromotor wirkt beim Bremsen als Generator. Dies ermöglicht eine Energierückgewinnung der Beschleunigungsenergie. Zudem werden keinerlei Wartungsarbeiten aufgrund von Verschleiß benötigt.
- Der Energiebedarf ist geringer. In Bezug auf Motorenbenzin beträgt der Energiebedarf eines Tesla Roadster (2008) $457,2 \text{ kJ/km}$. Dies entspricht einem Verbrauch von $1,49$ Liter Benzin auf 100 km .

Nachteile von Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren:

- Noch weisen Elektromotoren mit einer Reichweite von 350 km (laut Hersteller) eine geringere Reichweite als herkömmliche Verbrennungsmotoren auf (Tesla Roadster 2008, der Tesla Roadster 2020 soll eine Reichweite von 1000 km haben).
- Langer Ladezyklus der Batterie (Lithium-Ionen-Akkus, wie sie auch in Laptops verwendet werden). Bei einer herkömmlichen 230-V-16-A-Schukosteckdose dauert ein vollständiger Ladezyklus eines Tesla Roadster (2008) etwa 24 Stunden um 56 kWh Energie zu speichern. Ein Elektrokleinwagen benötigt derzeit auf 100 km 15 – 20 kWh Energie, wobei die Ladedauer über eine normale Haushaltssteckdose sechs bis acht Stunden beträgt. Bei einem Drehstromanschluss beträgt die Zeitspanne zum Aufladen der Batterie unter zwei Stunden.
- Die Ladeinfrastruktur für öffentliche Stromtankstelle ist bislang nicht flächendeckend und unzureichend ausgebaut.
- Hinzu kommen fehlende Standards zum flächendeckenden Netzaufbau von Ladestationen (z. B. Stecker). Angedacht ist derzeit ein fünfpoliger Stecker mit einer Stromspannung von 400 V.
- Abmessung und Masse der Batterie (> 400 kg).

Exkurs: Der kleinste Elektromotor der Welt

Bau eines Elektromotors

Einfacher geht es kaum. Nur mit einem Draht, einer Batterie, einer Schraube und einem Neodym-Magnet kann man bereits einen Elektromotor innerhalb weniger Minuten bauen. Dieser wird auch Monopolar- oder Unipolarmotor genannt. So einfach funktioniert es:

1. Ein Kabel mit einer Länge von ca. 7 cm muss an beiden Seiten etwa 4 mm abisoliert werden.
2. Daraufhin setzt man einen Neodym-Magneten auf den Schraubenkopf.
3. Die Schraubenspitze wird nun an den negativen Pol (der flachen Seite) einer Batterie der Größe AA geführt.
4. Jetzt hält man ein Ende des Kabels an den positiven Batteriepol und das andere seitlich an den Magneten. Die Schraube rotiert und schon ist der Elektromotor fertig.

Funktionsweise

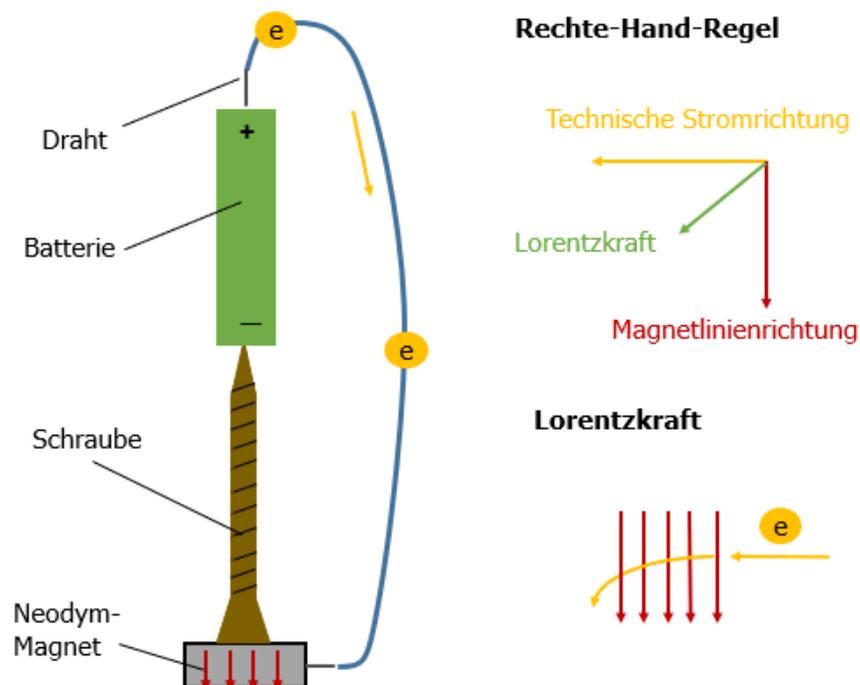


Abbildung 7: Der kleinste Elektromotor der Welt

In der Batterie wird durch den Draht ein Kurzschluss erzeugt. Dadurch fließt ein elektrischer Strom in der Schraube und in dem Magneten. Ein Strom entsteht immer durch den Transport von elektrischen Ladungsträgern wie Elektronen. Neodym-Magnete sind sehr starke Magnete, die aus einer Legierung aus Neodym, Eisen und Bor bestehen. Zwei aneinanderhaftende Neodym-Magnete sind mit bloßen Händen kaum zu trennen. Da durch den Neodym-Magneten ein starkes Magnetfeld erzeugt wird, werden die Elektronen darin durch die Lorentzkraft abgelenkt. Der Strom fließt dabei größtenteils senkrecht zu den magnetischen Feldlinien. Die Richtung dieser Kraft kann man mit Hilfe der „Rechten-Hand-Regel“ für positive Ladungsträger ermitteln. Der Daumen zeigt dabei in Richtung der technischen Stromrichtung (im Gegensatz zur physikalischen Stromrichtung geht diese von plus nach minus), der Zeigefinger in Richtung des Magnetfelds und der Mittelfinger gibt die Richtung der Lorentzkraft an. Die Schraube rotiert aufgrund des 3. Newton'schen Axioms „ $actio = reactio$ “, nach dem es zu einer Kraft auch immer eine Gegenkraft geben muss.

6. Hilfreiche Buch- und Internet-Tipps

Die Dynamik ist ein Teilgebiet der Technischen Mechanik. Für ein umfangreiches Verständnis, bei der Findung von Projektideen oder bei Problemen betreffend der Umsetzung, können einige Internetseiten und Bücher sehr hilfreich sein. Diese werden nachfolgend hier aufgelistet:



11.1 Bücherauswahl

K. Müller und H. Otto Alles: Statik

(Eine ausführliche Auflistung der Bücher mit Jahr und Verlag ist im Literaturverzeichnis zu finden.)

11.2 Zur Übung

Für vertiefende Aufgaben zur *Technischen Mechanik* bietet sich das Übungsbuch von Gross, Schnell, Ehlers und Wriggers „Formeln und Aufgaben zur Technischen Mechanik“ sehr gut an. In dem Buch „Statik“ von Müller und Otto werden zahlreiche Beispiele zu grundlegenden Themen gegeben. Auch Tutorials im Internet (beispielsweise StudyHelpTV, verfügbar unter <https://www.youtube.com/user/Studyhelpmedia>) oder die Skripte zur Festigkeitslehre und Technischen Mechanik der Uni Stuttgart (verfügbar unter: http://www.mechbau.uni-stuttgart.de/ls2/Downloads/Formelsammlung_TM1.pdf) bieten sich an, um sein Wissen zu erweitern.

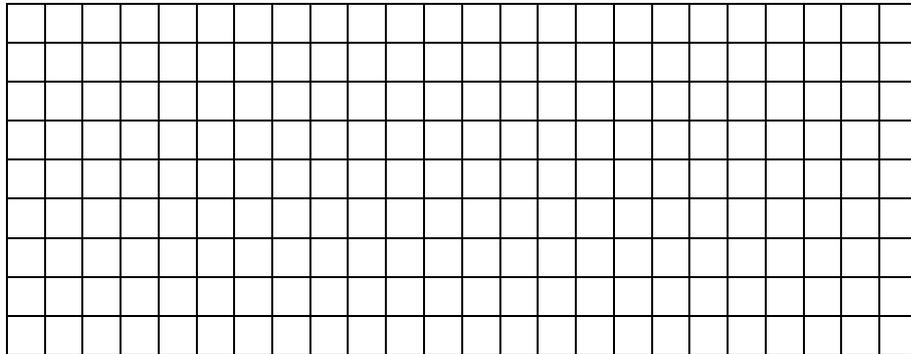
7. Arbeitsblätter

n [1/Min]	50	1000	2000	4000	6000	8000
P _{nutz} [W]						

n [1/Min]	10000	12000	14000	16000	18000	20000
P _{nutz} [W]						

b) Beschreibe die Leistungskennlinie des Elektromotors genauer und nenne die Unterschiede zu einem Verbrennungsmotor.

c) Berechne die Wirkungsgrade bei den einzelnen Drehzahlen (exemplarisch reicht die ausführliche Berechnung eines Wirkungsgrades aus). Trage die Werte in die Tabelle ein. Zeichne hierzu die Wirkungsgradkennlinie. Ermittle daraus den maximalen Wirkungsgrad.



n [1/Min]	50	1000	2000	4000	6000	8000
η [%]						

n [1/Min]	10000	12000	14000	16000	18000	20000
η [%]						

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederung der Technischen Mechanik	19
Abbildung 2: GreenTeam Uni Stuttgart	21
Abbildung 3: Motorprüfstand (links ohne Verkleidung, rechts mit Verkleidung)	27
Abbildung 4: Leistungs- und Drehmomentkennlinie eines Verbrennungsmotors	28
Abbildung 5: Leistungs- und Drehmomentkennlinie eines Elektromotors.....	289
Abbildung 6: Wirkungsgrad	30
Abbildung 7: Der kleinste Elektromotor der Welt	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Größen und ihre Einheiten	16
Tabelle 2: Formelsammlung Kraft.....	17
Tabelle 3: Ermittelte Kennwerte des GreenTeam-Elektromotors	37

Literaturverzeichnis

Kapitel: Dynamik

Böge, A. (1990): Mechanik und Festigkeitslehre. 21. verbesserte Auflage, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg.

Herr, H. (1991): Mechanik der festen Körper. Technische Physik. 1. Auflage, Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel.

<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Drehzahl> (aufgerufen am 03.09.2018)

<https://autorevue.at/ratgeber/drehmoment-drehzahl-und-leistung> (aufgerufen am 03.09.2018)

<https://www.greenteam-stuttgart.de/> (aufgerufen am 11.09.2018)

<https://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/steuerung/leistung.htm> (aufgerufen am 04.11.2018)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Synchronmaschine> (aufgerufen am 04.11.2018)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichstrommaschine#Reihenschlussmaschine> (aufgerufen am 04.11.2018)

<https://www.lehrerfreund.de/technik/1s/Verbrennungsmotor-2-Drehmoment-und-Leistungsverlauf/3633> (aufgerufen am 04.11.2018)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster_\(2008\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster_(2008)) (aufgerufen am 04.11.2018)

<https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/schon-gut-aufgestellt/> (aufgerufen am 05.11.2018)

Exkurs: Der kleinste Elektromotor der Welt

<https://www.experimentis.de/experimente-versuche/elektrizitaet-magnetismus/kleinster-elektromotor-der-welt/> (aufgerufen am 12.10.2018)

https://media2.supermagnete.de/projects/pu3.pdf?__9 (aufgerufen am 12.10.2018)

