

E-Maschinen – Konstruieren mit elektrischen Maschinen

Vorlesung Maschinenkonstruktionslehre C – WS 25/26

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen





Einführung E-Maschinen & Lernziele



Leitbeispiel Automotive: Drehstrommaschinen



Leitbeispiel Powertool: Gleichstrommaschinen



Leitbeispiel 3D-Drucker: Schrittmotoren



Auswahl von E-Maschinen



Zusammenfassung & Lernziele





Einführung E-Maschinen & Lernziele



Leitbeispiel Automotive: Drehstrommaschinen



Leitbeispiel Powertool: Gleichstrommaschinen



Leitbeispiel 3D-Drucker: Schrittmotoren



Auswahl von E-Maschinen



Zusammenfassung & Lernziele



Lernziele der Vorlesung

E-Maschinen – Konstruieren mit elektrischen Maschinen

Problem

Konstruktionsingenieurinnen und -ingenieure müssen die **Eigenschaften verschiedener E-Maschinen** kennen, um die E-Maschinen für den jeweiligen **Anwendungsfall** geeignet auswählen zu können.

Ziele

- **Bestandteile** von elektrischen Systemen aufzählen und deren **Funktion** beschreiben können.
- Im Automotive Bereich gängige **Drehstrommotoren** aufzählen und unterscheiden können.
- Im Powertool Bereich gängige **Gleichstrommotoren** aufzählen und unterscheiden können.
- Bedarf, Vorteile und Anwendungen von unterschiedlichen **Schrittmotoren** benennen und beschreiben können.
- Einflüsse auf die **Auswahl** von **E-Maschinen** erklären und diese bewerten können.
- Drehmoment-/Drehzahl-**Kennlinien** unterscheiden können und deren Zusammenhang mit **Lasttypen** erklären können.

Fazit

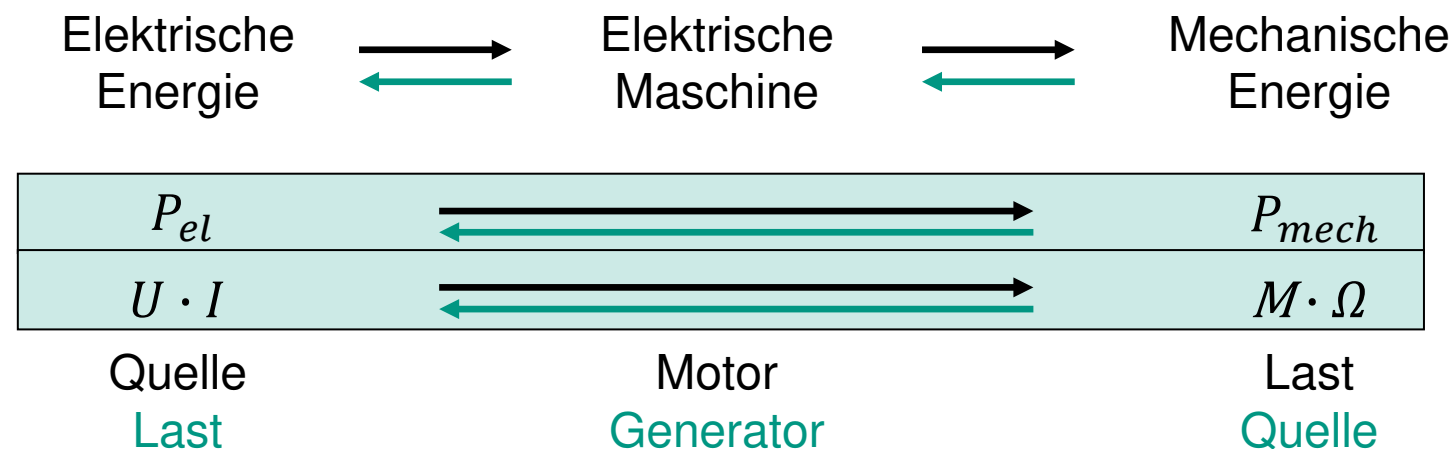
Konstruktionsingenieurinnen und -ingenieure müssen die **verschiedenen E-Maschinen** mit ihren **unterschiedlichen Eigenschaften** kennen, um mit diesen **konstruieren** zu können.

Die Auswahl einer geeigneten Elektrischen Maschine erfolgt aus dem Anwendungsfall und verschiedenen **Einflusskriterien und Randbedingungen**, die der Anwendungsfall mit sich bringt. Diese Einflusskriterien und Randbedingungen müssen von den/r Konstruktionsingenieur/in **aus dem Anwendungsfall abgeleitet** werden können.

E-Maschinen – Einführung – Motor & Generator

E-Maschinen können grundsätzlich als Motor oder Generator verwendet werden

Elektrische Maschinen nutzen elektromagnetische Effekte, um **elektrische in mechanische Energie (motorisch)** bzw. **mechanische in elektrische Energie (generatorisch)** umzuwandeln.

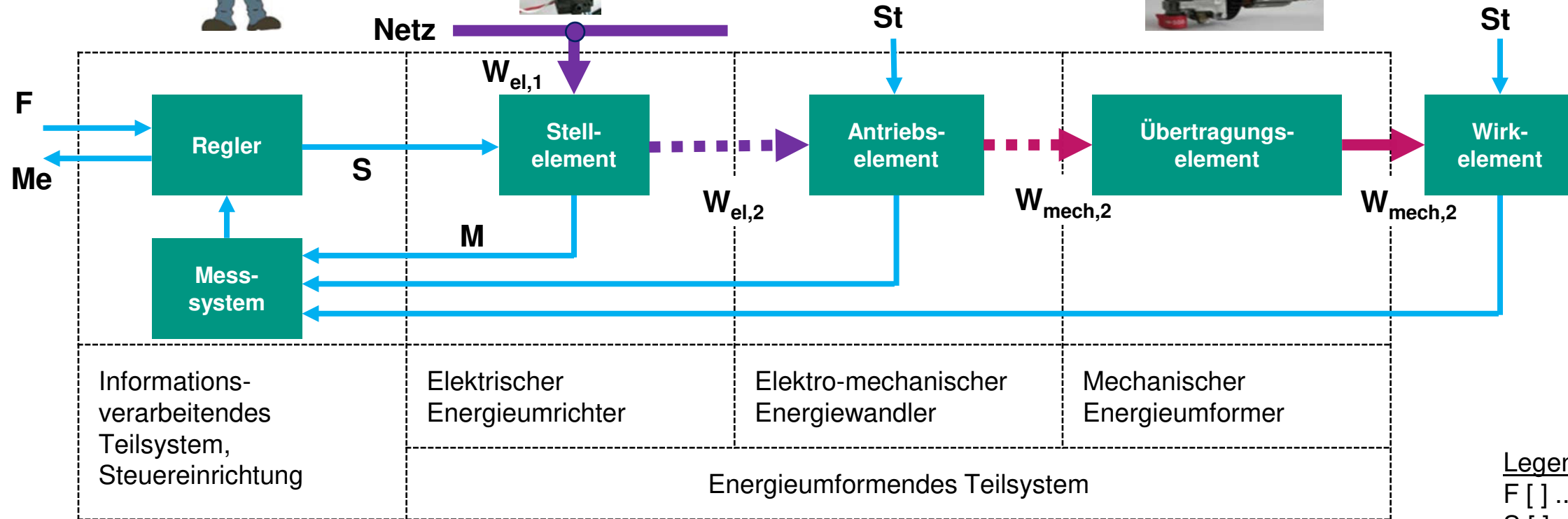


Hinweis:
Die Grundlagen zu Funktionsprinzipien der Elektromotoren werden in der VL „23339 Elektrotechnik“ aufgezeigt.

Legende:
 P [W] ... Leistung
 U [V] ... elek. Spannung
 I [A] ... elek. Strom
 M [Nm] ... Drehmoment
 Ω [1/s] ... Winkelgeschwindigkeit

E-Maschinen – Einführung – Struktur elektrisches Antriebssystem

Aus welchen Komponenten setzt sich ein elektrisches Antriebssystem zusammen?



Elektr. Energiefluss
 Mech. Energiefluss
 Informationsfluss

Energieflüsse mit aufgeprägtem Informationsfluss

Quelle: Handbuch elektrische Kleinantriebe

Legende:
 F [] ... Führungsgröße
 S [] ... Stellgröße
 M [] ... Messgröße
 St [] ... Störgröße
 Me [] ... Meldegröße
 W [W] ... Arbeit



E-Maschinen – Analyse technisches System – Energiebereitstellung

Unterschiedliche Formen der Energiebereitstellung müssen mitbedacht werden

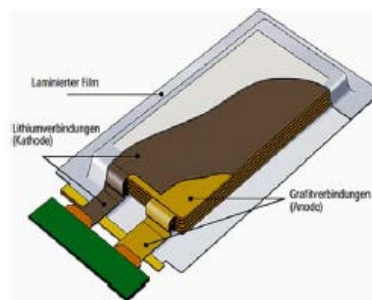
- Die **Form der elektrischen Energie** (Wechselstrom, Gleichstrom, Netzanschluss, Akkuanschluss) ist eine wichtige **Randbedingung** für die Auswahl passender **Elektromotoren**.
- Diese kann durch das **Stromnetz** oder **elektrochemische Batterien** wie die Lithium-Ionen-Batterie oder die **Brennstoffzelle** erfolgen.

Freileitungsmast



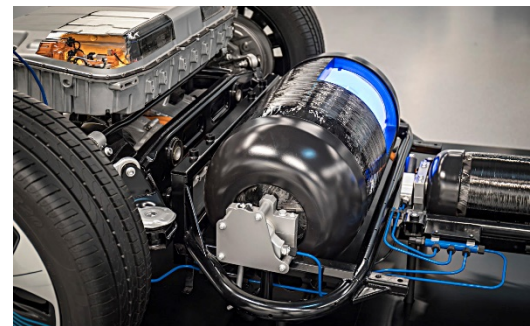
<http://www.neuepresse.de/Nachrichten/Niederersachsen/Uebersicht/Energiewirtschaft-warnt-vor-Kapazitaets-Engpaessen>

Darstellung Aufbau Pouchzelle



<https://www.zsw-bw.de/>

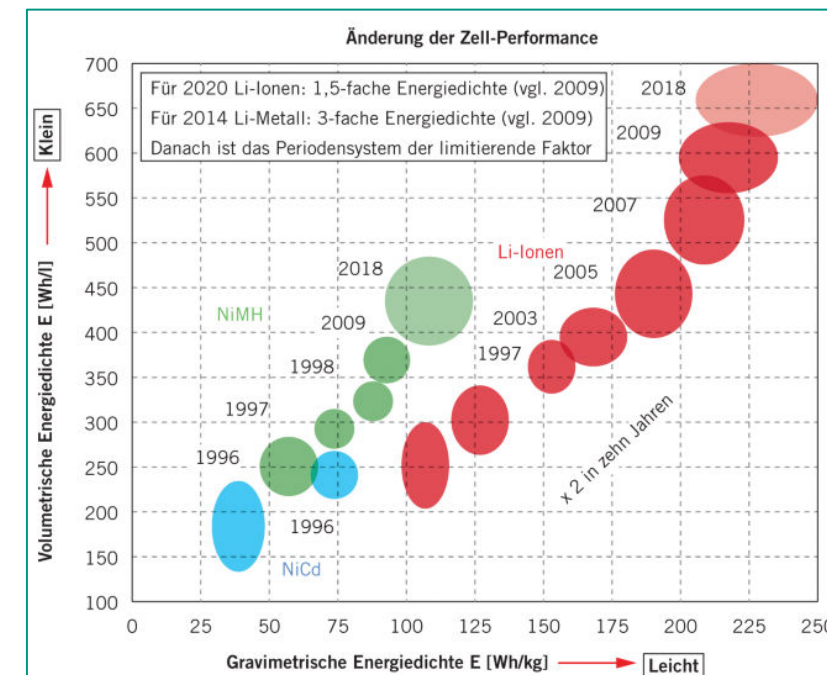
Wasserstoff-Tank



https://www.stern.de/auto/fahrberichte/der-naechste-versuch_8789186-8789190.html

- **Batterien** haben einen **enormen Energiedichtenachteil** gegenüber Verbrennungskraftstoffen
- Eine Akzeptanz der geringeren **Reichweite bei der Elektromobilität** ist (aktuell) erforderlich
- Prototypen von **Talent New Energy** (China) sollen eine **Energiedichte** von bis zu **720 Wh/kg** erreichen → 2000km Reichweite möglich? (Stand: 17.04.2024)

<https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/talent-new-energy-batterie-zelle-v1/>



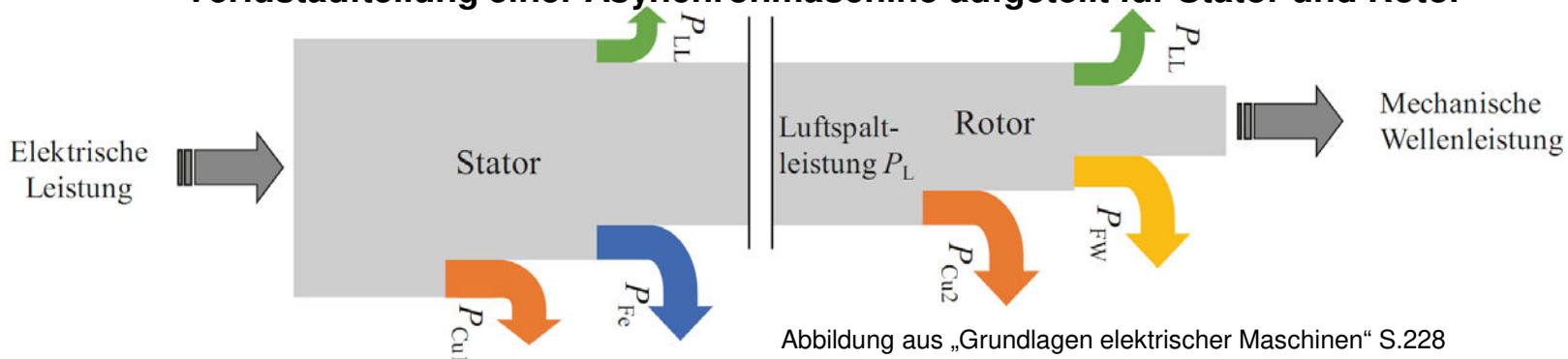
https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs35658-018-0060-7/MediaObjects/35658_2018_60_Fig5_HTML.gif (2018)

E-Maschinen – Einführung – Wirkungsgrad

Bei der Umwandlung elektrischer in mechanische Energie (oder andersherum) treten Verluste auf und Wärme entsteht, die abgeführt werden muss

- Als **Wirkungsgrad η** wird das **Verhältnis der abgegebenen Leistung P_2** zur **aufgenommenen Leistung P_1** bezeichnet

Verlustaufteilung einer Asynchronmaschine aufgeteilt für Stator und Rotor



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{ab}}{P_{auf}}$$

- Einfluss auf den Wirkungsgrad** haben vor allem Reibungsverluste (Lager und Luftverwirbelung), Eisenverluste (Ummagnetisierungsverluste durch das sich verändernde Magnetfeld) und Kupferverluste durch den ohmschen Widerstand der Leiter (→ früher immer aus „Kupfer“)
- Permanentmagneten verbessern den Wirkungsgrad**

Legende:

P_{LL} [W] ... lastabhängige Zusatzverluste
 P_{Cu1} [W] ... Verluste in der Wicklung des Ständers
 P_{Cu2} [W] ... Stromwärmeverluste der Rotorwicklung
 P_{Fe} [W] ... Eisenverluste
 P_{FW} [W] ... Reibungsverluste Lager und Luftverwirbelung

Kernaussage

Je nach **Betriebsart und Bauweise** kann der Wirkungsgrad elektrischer Maschinen stark variieren:
Von **über 98 %** bei **großen stationären Generatoren** bis **unter 50 %** bei ungünstig betriebenen **kleinen Motoren**
Vergleich: Benziner bei 20% und Elektroautos bei 64%¹

1: Quelle: <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/verkehr/electromobilitaet/effizienz-und-kosten>

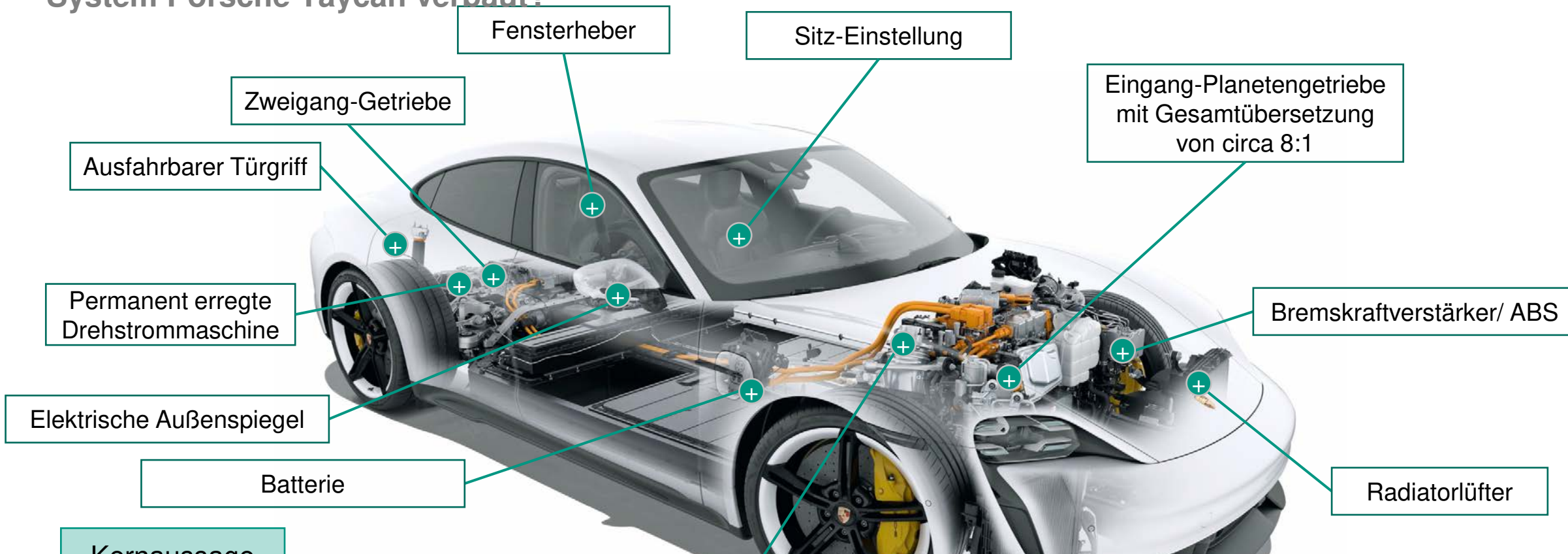
E-Maschinen – Analyse technisches System

Welche verschiedenen elektrischen Antriebssysteme und Komponenten sind in dem System Porsche Taycan verbaut?



E-Maschinen – Analyse technisches System

Welche verschiedenen elektrischen Antriebssysteme und Komponenten sind in dem System Porsche Taycan verbaut?



Kernaussage

Das **Funktionale Verhalten** von elektrischen Antriebssystemen wird durch die Komponenten, die Energieversorgung, die Steuerung und die Schnittstellen bestimmt. Die Komponenten des Systems müssen gut **aufeinander abgestimmt** sein.



Einführung E-Maschinen & Lernziele



Leitbeispiel Automotive: Drehstrommaschinen



Leitbeispiel Powertool: Gleichstrommaschinen



Leitbeispiel 3D-Drucker: Schrittmotoren



Auswahl von E-Maschinen

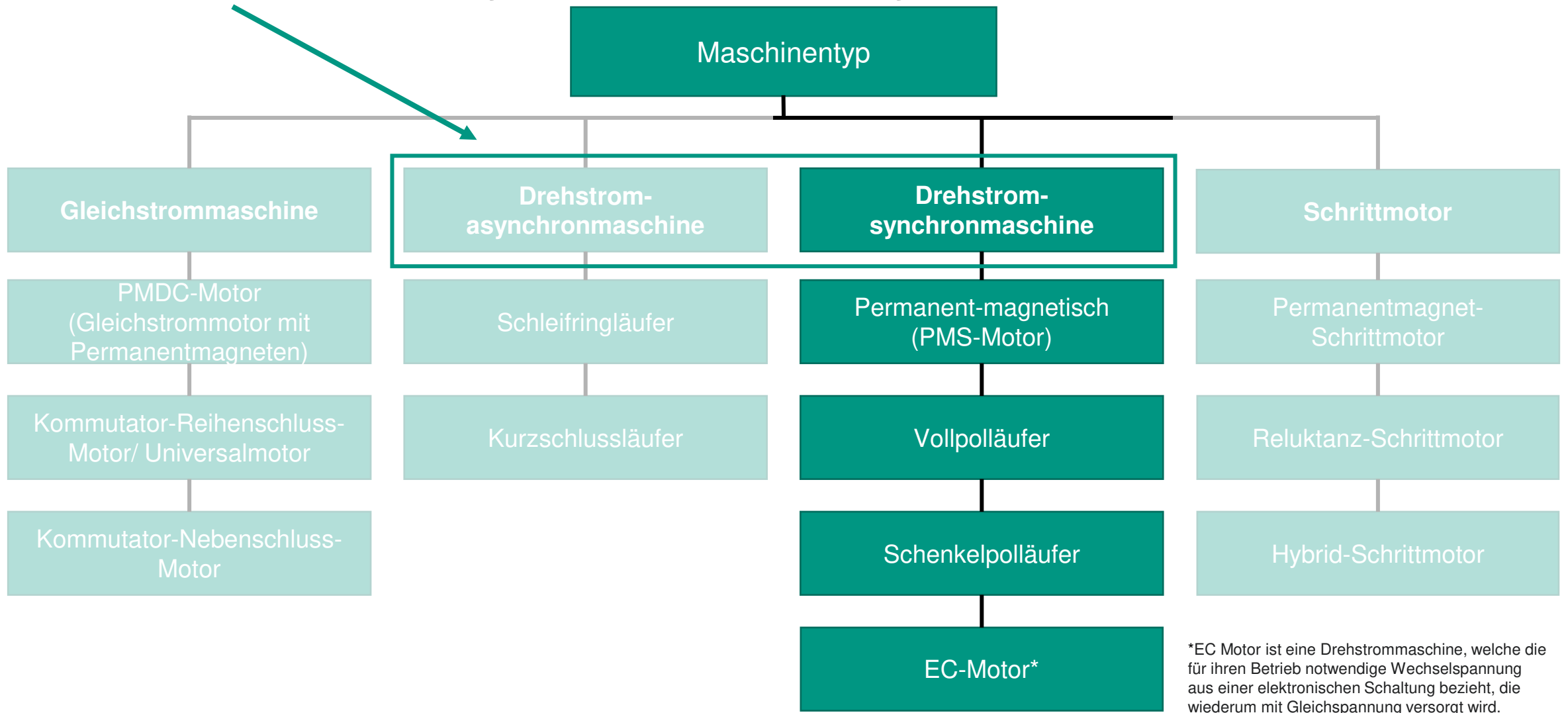


Zusammenfassung & Lernziele



E-Maschinen – Analyse technisches System – Automotive (Drehstrommaschinen)

Drehstrommaschinen können Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen sein



Video Funktionsweise einer Synchronmaschine (4 min)



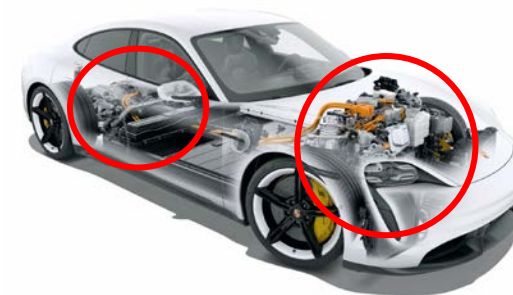
<https://youtu.be/Vk2jDXxZlhs>



Porsche Taycan

E-Maschinen – Analyse technisches System – Automotive

Synchronmaschine – Übersicht über Aufbau und Eigenschaften



- Magnetfeld des Rotors konstant, Magnetfeld des Stators dreht sich
- Enorme **Leistungsdichte**
- Hoher Wirkungsgrad und Genauigkeit:
 - Dadurch Beitrag zu hoher Reichweite
 - **Hohe Dauerleistung** (gute Reproduzierbarkeit bei direkt aufeinanderfolgenden Beschleunigungsvorgängen)
- Kostenintensiv (teurer als Drehstrom-Asynchronmaschine)
- Betreibbar als Generator → Rekuperation beim Fahrzeug möglich:
 - Hohe Rekuperationsleistung
 - Starke Verzögerung
 - Elektrischer Bremskraftverstärker

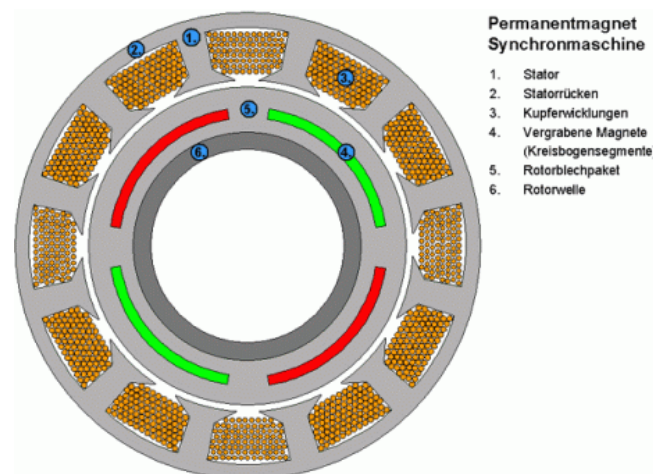
Hinterachse Taycan
E-Maschine mit 2-Gang-Getriebe



Vorderachse Taycan
E-Maschine mit 1-Gang-Getriebe



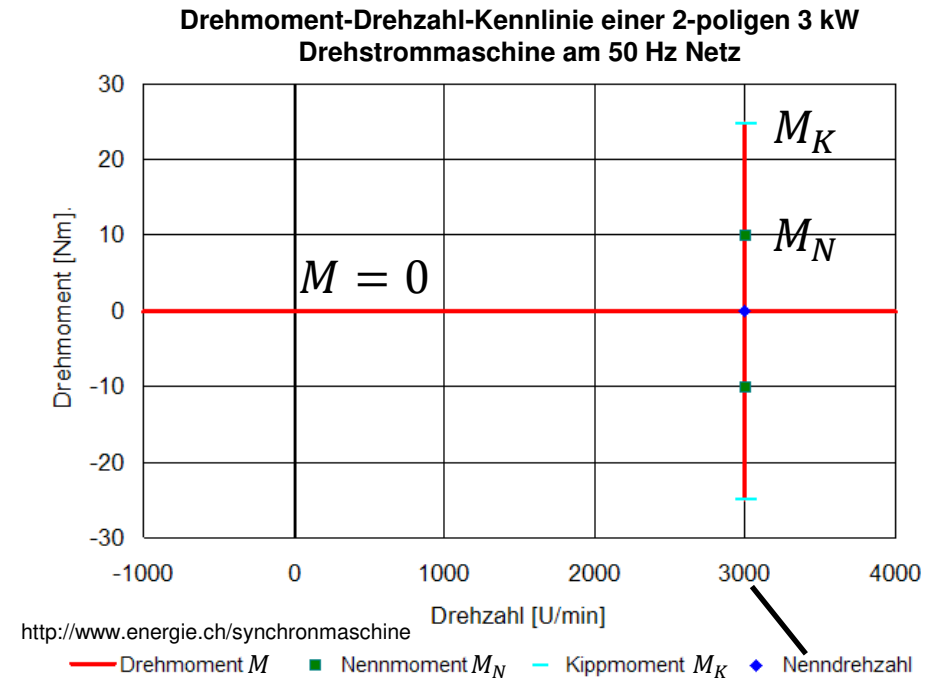
Schematische Darstellung SM mit
Permanentmagneten



SM mit Permanentmagneten



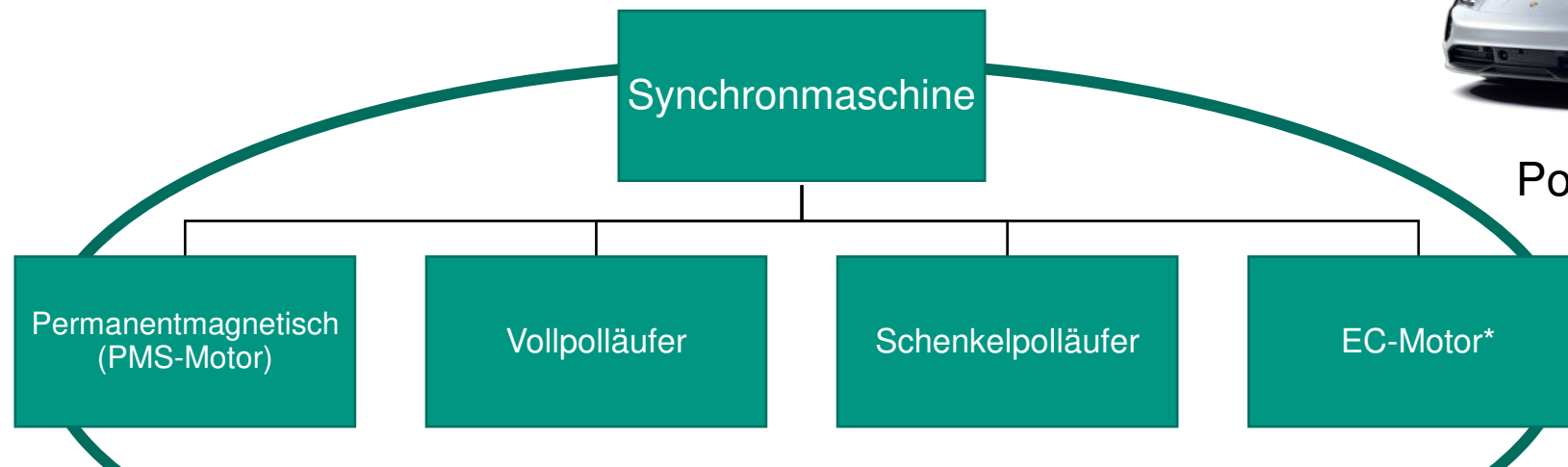
- Der Synchronmotor kann **nur mit einer Drehzahl** betrieben werden, der **Synchrondrehzahl/ Nenndrehzahl**
- Der Rotor folgt dem **Drehfeld des Stators exakt** → **Rotorgeschwindigkeit** ist **identisch** mit **Drehfeldgeschwindigkeit** des Stators
- Bei einer **Belastung über dem Kippmoment M_K** hat die Maschine **kein Drehmoment mehr**, sie kippt weg
- Die Drehzahl n ist abhängig von der **Frequenz f des magnetischen Drehfeldes** und der **Polpaarzahl p des Motors**: $n = f/p$



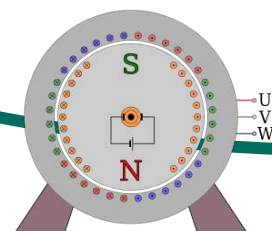
- Die Drehstrommaschine kann ohne Hilfe am Drehstromnetz aufgrund **des Trägheitsmoments des Läufers nicht selber anlaufen** → durch **Dämpferwicklungen** (Zusätzliche Käfigwicklung ähnlich einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer) wird ein **asynchrones Anlaufverhalten** ermöglicht



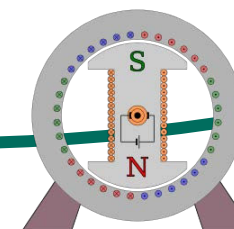
Porsche Taycan



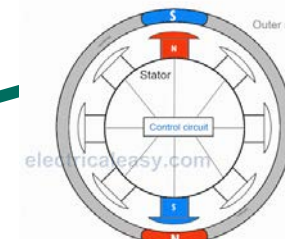
<https://bit.ly/2UcPKJy>



<https://bit.ly/2L1juUO>



<http://elektronik-kurs.net/elektrotechnik/mehrphasengeneratoren/>



*Gleichstrommotor aber funktioniert nach dem Prinzip eines (Synchron-)Drehstrommotors

<https://www.infineon.com/cms/de/applications/solutions/motor-control-and-drives/permanent-magnet-synchronous-motor/?redird=114035>



Synchronmaschine – Vor- und Nachteile der verschiedenen Bauformen

	PMS-Motor	Vollpolläufer	Schenkelpolläufer	EC-Motor
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompakt ▪ Zuverlässig ▪ geräuscharm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkungsgrade bis zu 98% im Generatorbetrieb ▪ wartungsarm (wenn Erregung ohne Schleifringe) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkungsgrade bis zu 98% im Generatorbetrieb ▪ wartungsarm (wenn Erregung ohne Schleifringe) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Wirkungsgrad (über 90%) ▪ Einfache Drehzahlregelung ▪ Höchste Drehzahlen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Langzeitstabilität ▪ Entmagnetisierungsgefahr durch starke Gegenfelder 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Anschaffungspreis 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wegen begrenztem Platz in den Polschuhen schwierige Auslegung der Anlaufwicklung ▪ Hoher Anschaffungspreis 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Preis ▪ Zusätzliche Elektronik nötig (Hall-Sensoren,...)

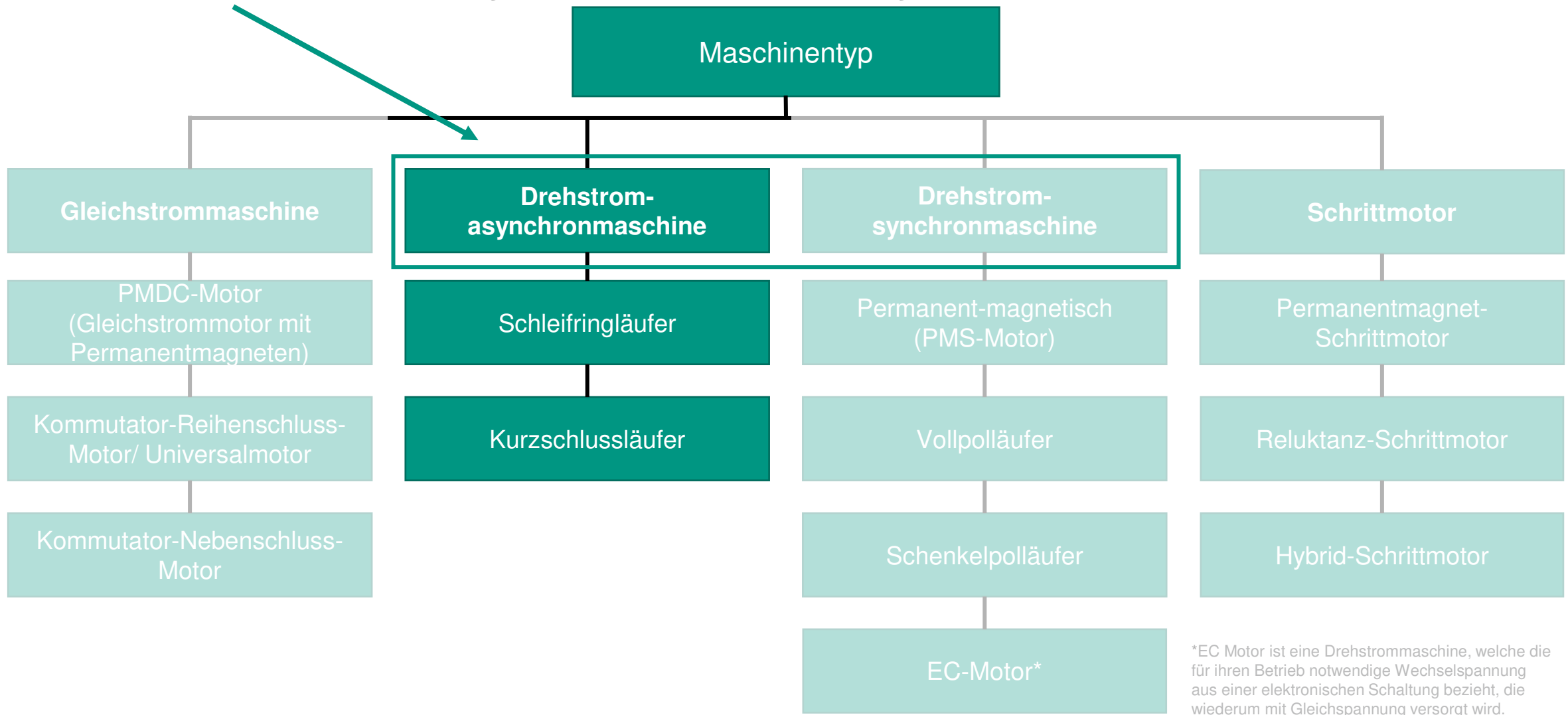
Elektromaschinen in Theorie und Praxis (VDE-Verlag)

Kernaussage

Synchronmaschinen haben eine hohe **Leistungsdichte** und **Wirkungsgrad** bei hohen Kosten. Sie können nur mit der **Synchrondrehzahl** betrieben werden und **kippen weg bei zu hoher Belastung**.

E-Maschinen – Analyse technisches System – Automotive (Drehstrommaschinen)

Drehstrommaschinen können Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen sein



Video Funktionsweise einer Asynchronmaschine (7 min)



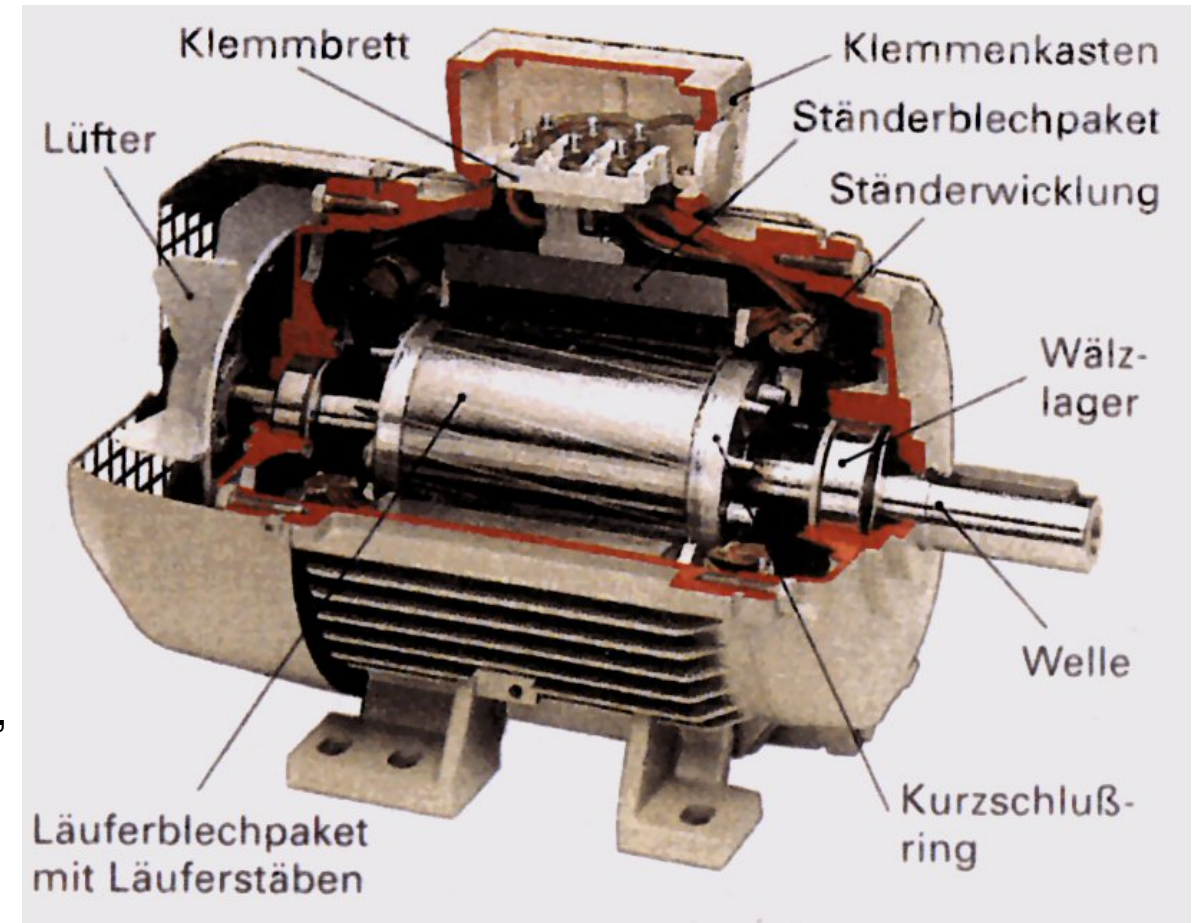
https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o



Tesla Model S

Asynchronmaschine – Übersicht über Aufbau und Eigenschaften

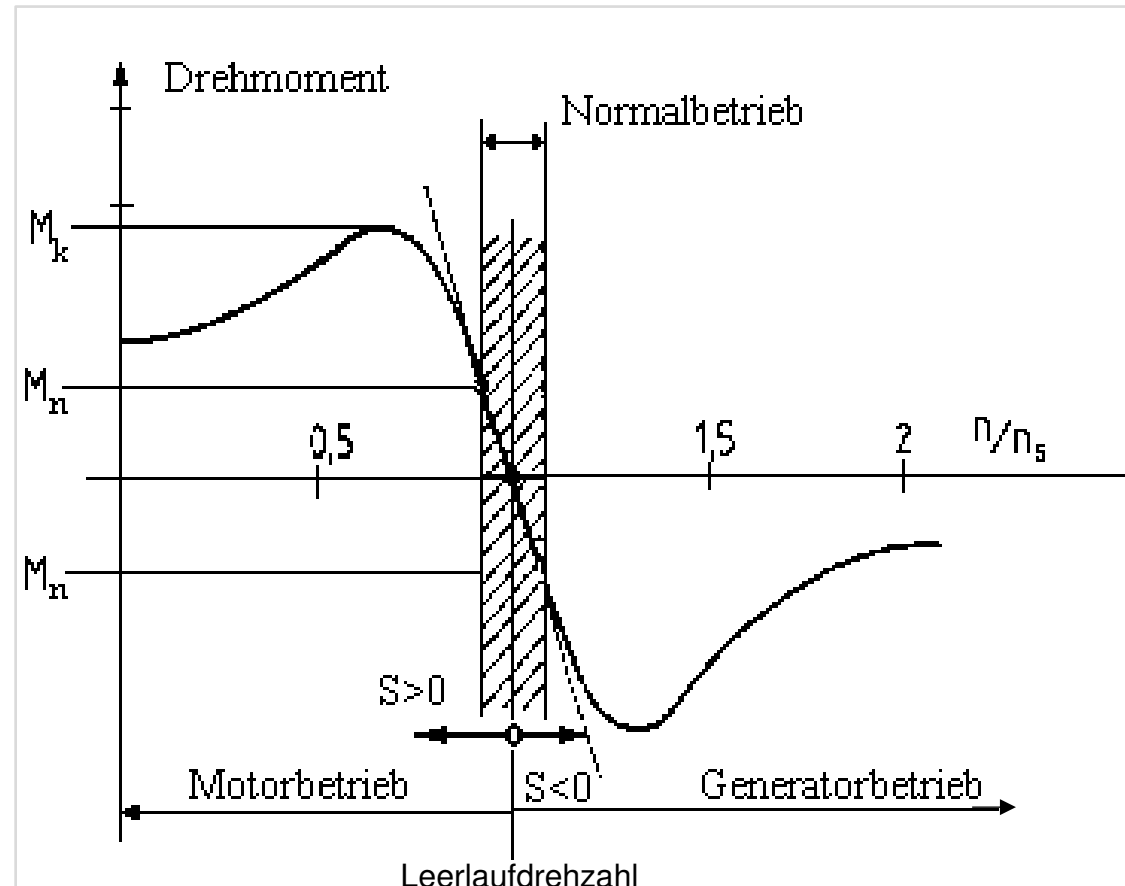
- Der Asynchronmotor besitzt eine **Erregerwicklung** im **Stator/ Ständer**
- Bei Anlegen von Drehstrom an den Stator entsteht ein **rotierendes Magnetfeld**
- Durch den **Unterschied** zwischen **Rotordrehzahl** und **Statorfrequenz** wird in den **Rotorwicklungen** eine **Spannung induziert**
- Durch die induzierte Spannung in den Rotorwicklungen wird über die **Lorentzkraft** der Rotor angetrieben
- Asynchronmotoren können daher **selbstständig anlaufen**
- **Simpler Aufbau** ohne Permanentmagnete, Bürsten, Kommutatoren möglich



Darstellung eines Asynchronmotors mit Kurzschlussläufer

- Asynchronmaschinen weisen ein **geringes Anlaufmoment** auf, welches sich bis zum **Kippmoment M_k** steigert
- Der **Normalbetrieb** befindet sich zwischen **Kippdrehzahl und Leerlaufdrehzahl**
- Bei **synchroner Drehzahl** von Magnetfeld von Stator und Rotor wird keine Spannung und damit auch **keine Kraft** induziert → immer **Schlupf** vorhanden
- Die **Stromaufnahme** ist im **Anlauf sehr hoch**, weswegen Motoren bei höheren Leistungen z.B. **durch Sternschaltungen** bei einer **niedrigen Spannung angefahren** werden können

Kennlinie eines Asynchronmotors mit Darstellung von Motor- & Generatorbetrieb



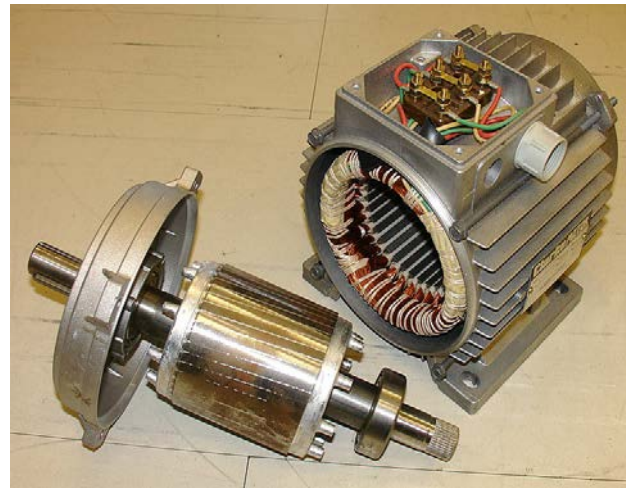
Legende:
 M_n [NM] ... Nenndrehmoment
 M_k [NM] .. Kippmoment
 n [1/s] ... Rotordrehzahl
 n_s [1/s] ... Synchrondrehzahl
 S [] ... Schlupf

Asynchronmaschine – Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Standardisiert
- Kostengünstig
- Robust, lange Lebensdauer
- Einfach im Aufbau
- Wartungsaufwand gering

Darstellung eines Asynchronmotors
mit Stator und Rotor



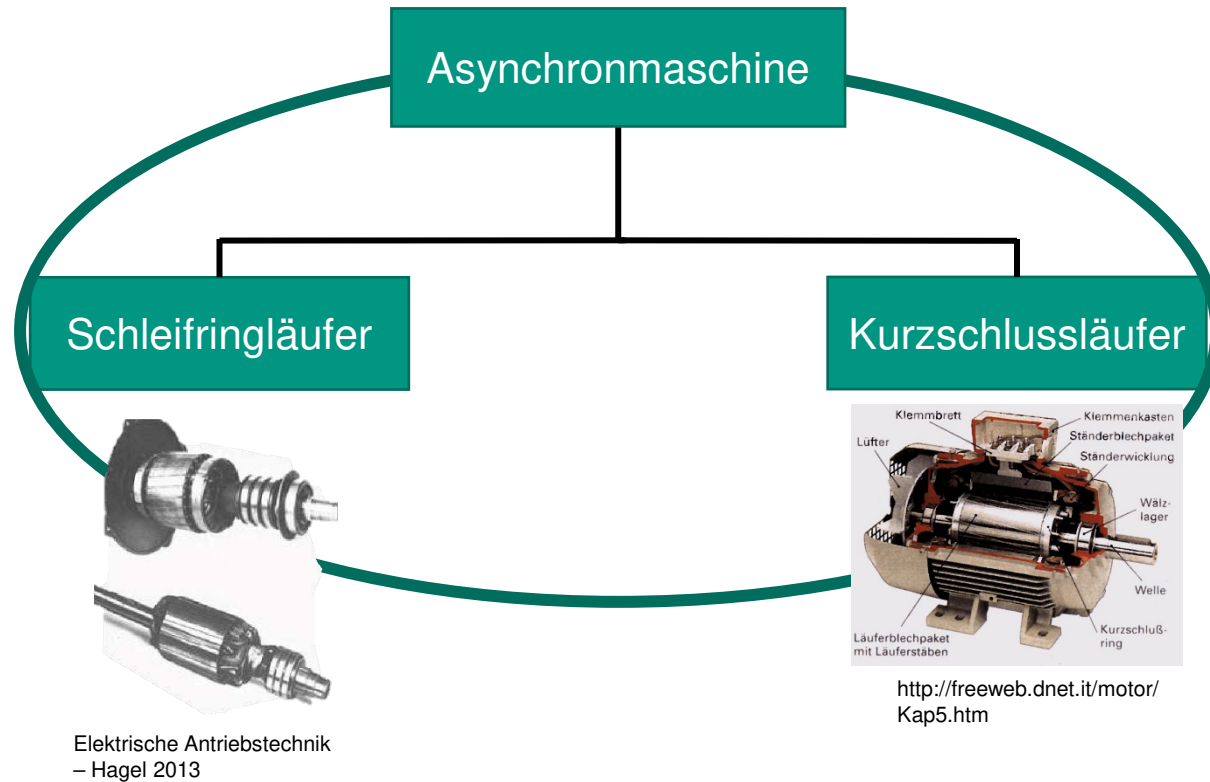
<https://bit.ly/2fTsqrD>

Nachteile:

- Benötigt hohe Anlaufströme
- Anlaufmoment niedrig
- Drehzahl ist lastabhängig
- Maximaldrehzahl ist von Drehstromfrequenz und Polpaarzahl abhängig

Kernaussage

Asynchronmaschinen bieten eine **kostengünstige, robuste** Alternative zu Synchronmaschinen. Jedoch benötigen sie **hohe Anlaufströme** und haben eine **begrenzte Maximaldrehzahl**.



Tesla Model S

Hinterachse eines Teslas mit ASM (Im Gegensatz zu SM im Taycan)





Einführung E-Maschinen & Lernziele



Leitbeispiel Automotive: Drehstrommaschinen



Leitbeispiel Powertool: Gleichstrommaschinen



Leitbeispiel 3D-Drucker: Schrittmotoren



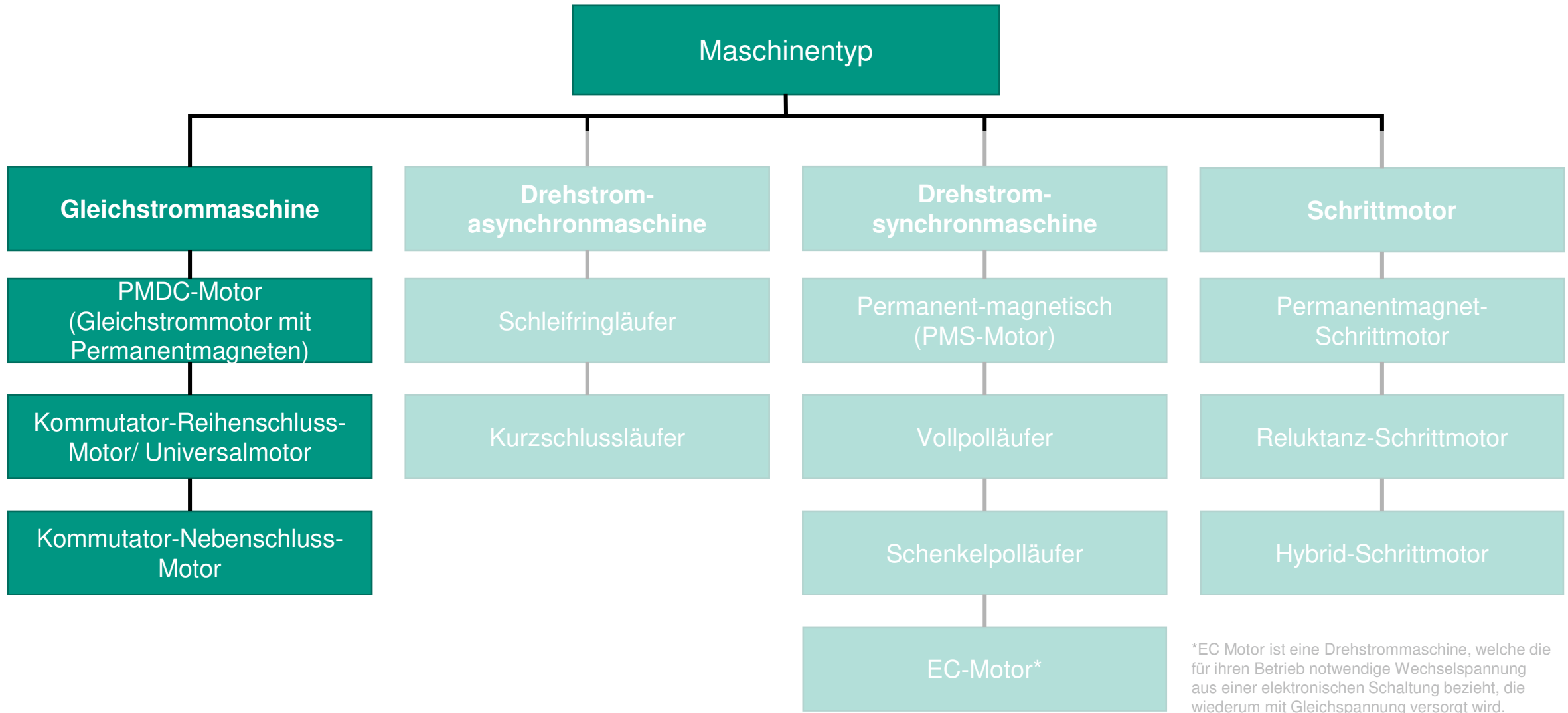
Auswahl von E-Maschinen



Zusammenfassung & Lernziele



Gleichstrommaschine – Klassierung nach Maschinentyp



*EC Motor ist eine Drehstrommaschine, welche für ihren Betrieb notwendige Wechselspannung aus einer elektronischen Schaltung bezieht, die wiederum mit Gleichspannung versorgt wird.

Gleichstrommaschine – Funktionsweise

Video Funktionsweise einer Gleichstrommaschine (5 min)



<https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo>



Hilti TE 7-C

Video Besonderheit Universalmotor (3 min)



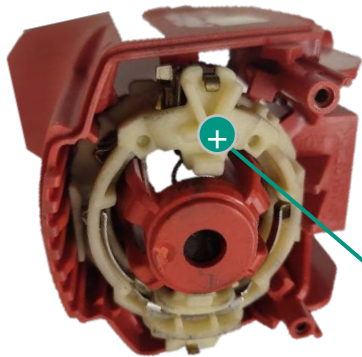
<https://www.youtube.com/watch?v=0PDRJKz-mqE>

E-Maschinen – Analyse technisches System – Powertool (Gleichstrommaschinen)

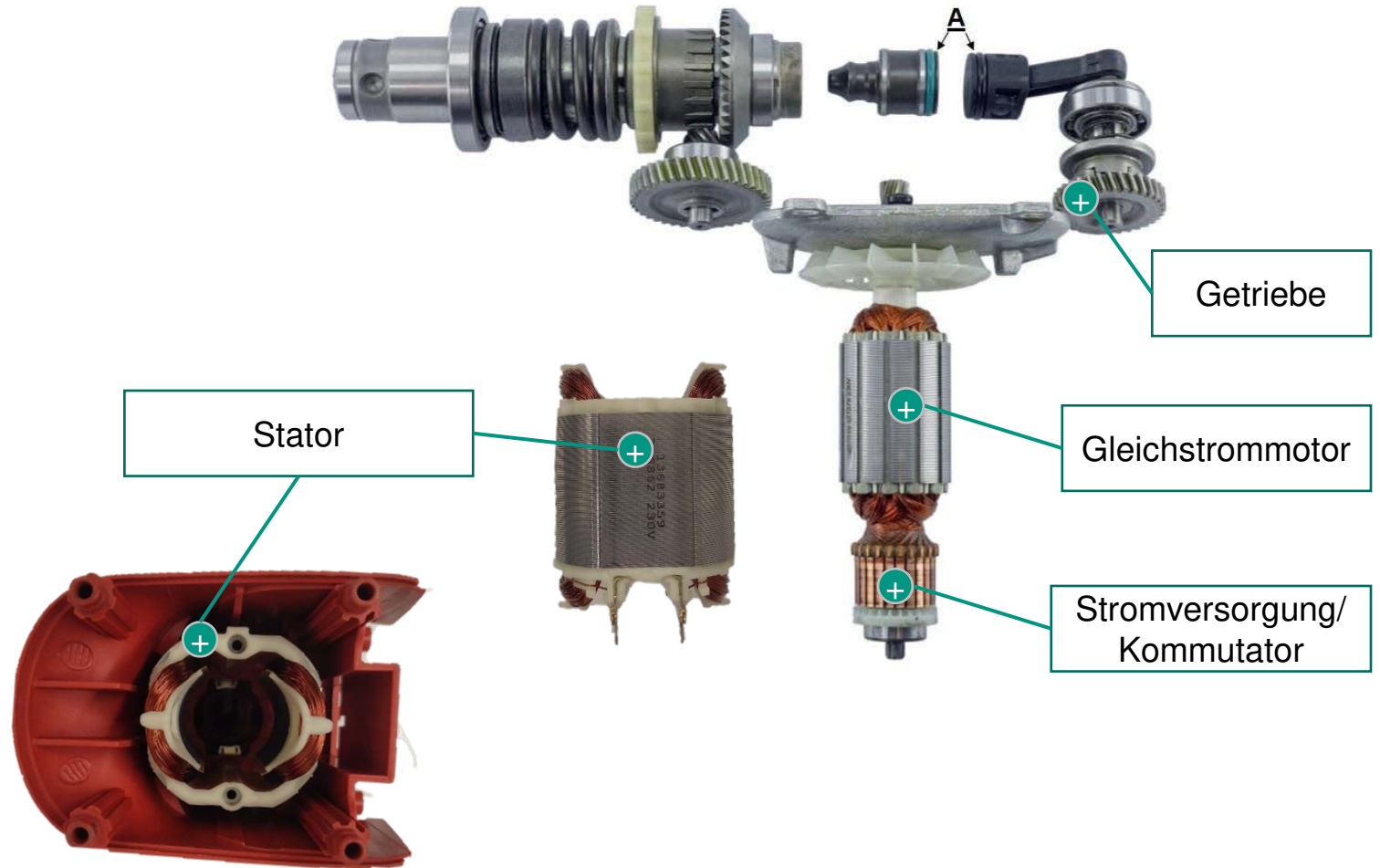
Leitbeispiel: Hilti TE7-C



Bohrhammer Hilti TE7-C (zerlegt, 144-13-3-1)



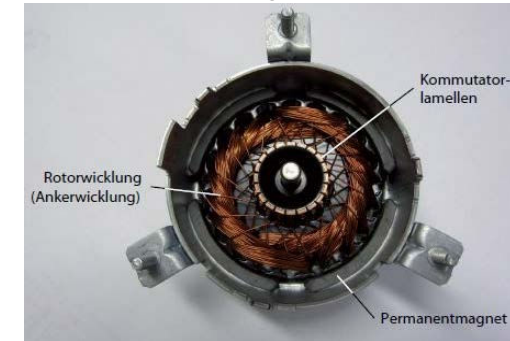
Kohlebürsten



Gleichstrommaschine – Übersicht über Aufbau und Eigenschaften

- **Stator** erzeugt **Erregerfeld** durch **Permanentmagnete** oder **stromdurchflossene Erregerwicklungen**
- **Rotor (Anker)** mit Wicklungen wird über **Kohlebürsten** und einen **Kommutator** von einer Gleichstromquelle gespeist
- Drehmomenterzeugung: Im Magnetfeld wirkt auf den stromdurchflossenen Leiter eine **Lorentzkraft**, die ein Drehmoment erzeugt. Der Kommutator hält die Drehrichtung konstant, indem er die Stromrichtung im Rotor passend „umpolt“
- Die Gleichstromquelle kann – je nach Schaltung – sowohl den Rotor als auch die Erregerwicklung des Stators speisen:
 - **Nebenschluss**: Rotor- und Erregerwicklung sind parallel geschaltet
 - **Reihenschluss**: Beide Wicklungen liegen in Reihe.
- Reihenschlussmotor kann auch mit Wechselstrom betrieben werden: Da Rotorstrom und Erregerfeldstrom bei Wechselspannung gleichzeitig umschwenken, bleibt das Drehmoment gleichgerichtet → **Universalmotor**

Darstellung eines Gleichstrommotors mit Permanentmagneten im Stator

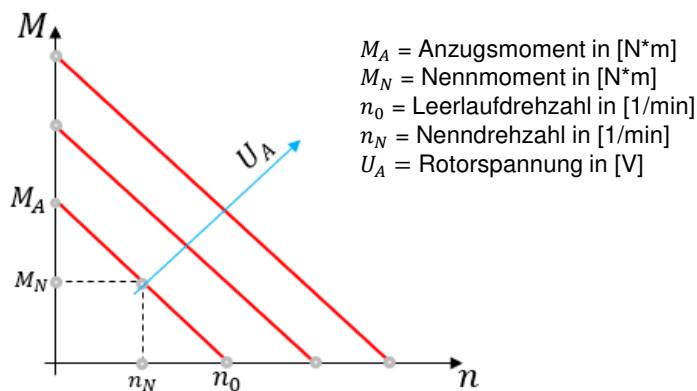


<https://www.hanser-konstruktion.de>

Rotor eines Gleichstrommotors mit Kommutator

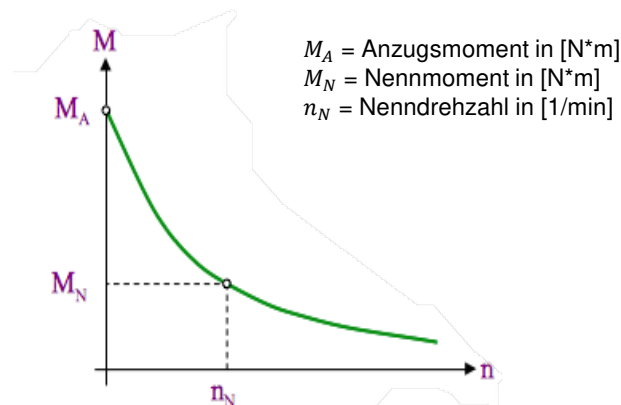


PMDC-Motor



- Mit **steigender Belastung** sinkt die **Drehzahl linear**
- Eine **Drehzahlverstellung** bezüglich der Nenndrehzahl n_N ist durch die Erhöhung/Verringerung der angelegten **Rotorspannung U_A** oder durch Vorschaltung eines **Widerstandes** erreichbar

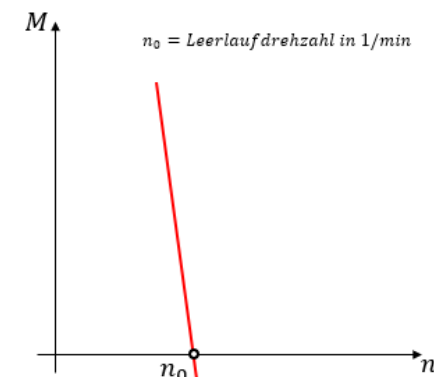
Reihenschlussmaschine (Universalmotor)



<http://elektronik-kurs.net/elektrotechnik/betriebsverhalten-von-gleichstrommotoren/>

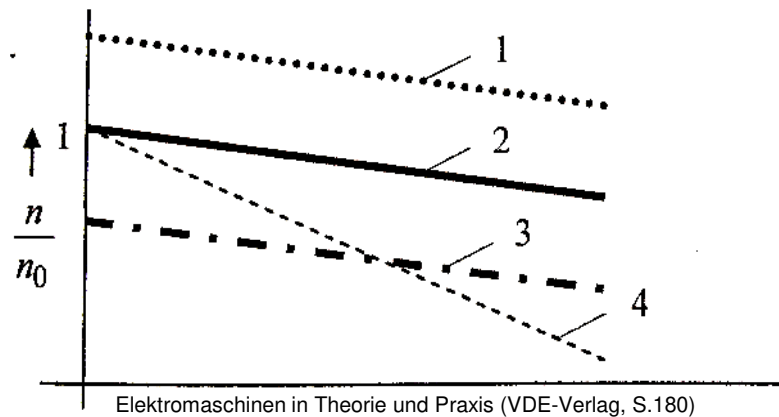
- Der Universalmotor weist bei **geringen Drehzahlen ein besonders großes Drehmoment** auf
→ **weiche Charakteristik**
- Das **Drehmoment nimmt bei größeren Drehzahlen überproportional ab**

Nebenschlussmaschine



<http://elektronik-kurs.net/elektrotechnik/betriebsverhalten-von-gleichstrommotoren/>

- Die Kennlinie des Nebenschlussmotors hat nur einen leichten **Drehzahlabfall mit steigender Last**
→ **steife Charakteristik**
- Im Gegensatz zum Universalmotor tritt eine **Leerlaufdrehzahl n_0** auf



1. Drehzahlerhöhung durch Feldschwächung
2. Natürliche Kennlinie
3. Drehzahlherabsetzung durch Ankerspannungsreduzierung
4. Drehzahlherabsetzung durch Ankervorwiderstandsänderung

M_N = Nennmoment in [N*m]
 n_0 = Leerlaufdrehzahl in [1/s]

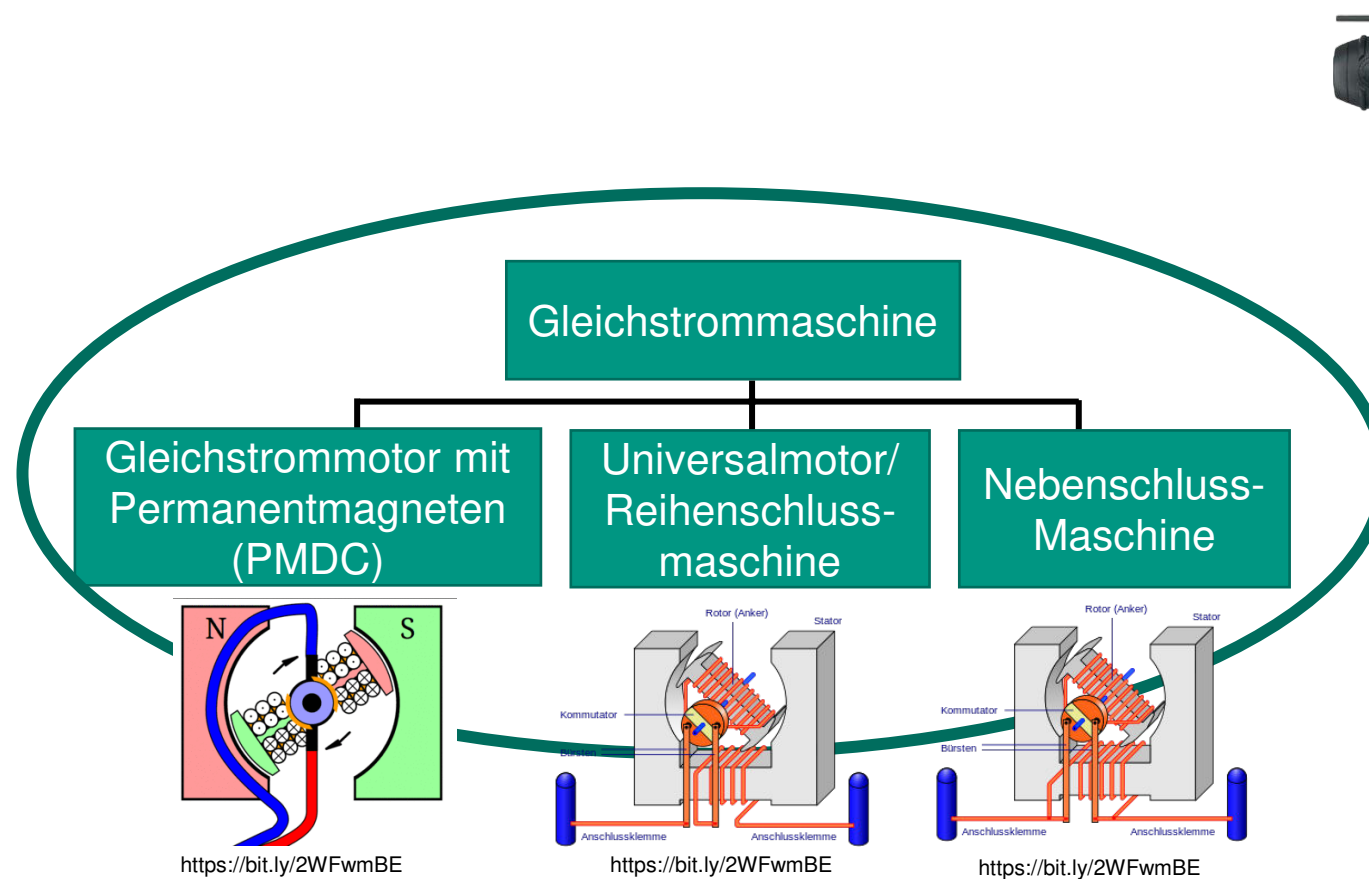
Drehzahlverstellungsmöglichkeiten
Gleichstrommotor $\frac{M}{M_n} \rightarrow$

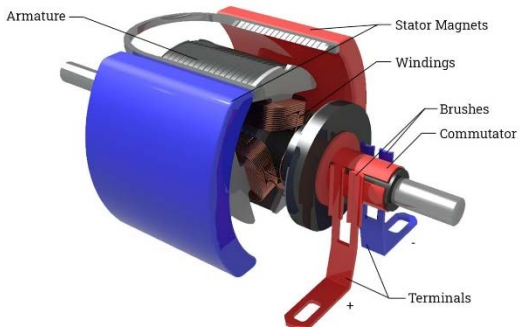
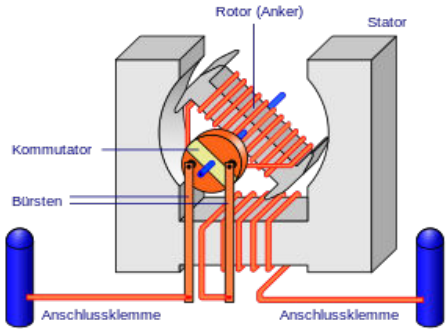
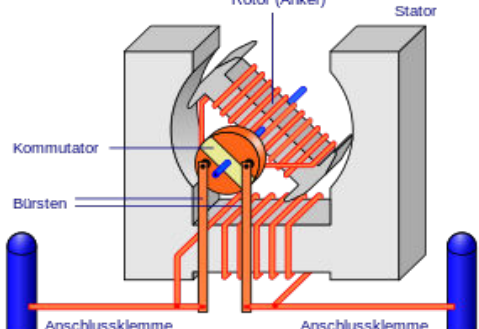
- Mit Gleichstrommotoren kann man **problemlos beliebige Drehzahlen** einstellen.
- Über folgende Größen kann die **Drehzahl verändert** werden:
 - Ankerspannung U_A (sog. Spannungssteuerung)
 - Drehzahlerhöhung durch **Feldschwächung**
 - **Ankerwiderstand** (sog. Widerstandssteuerung)

Quelle: http://antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompodium/Antriebstechnik/Info2_Gleichstrommotor/S_Modell_Unimog_18.htm

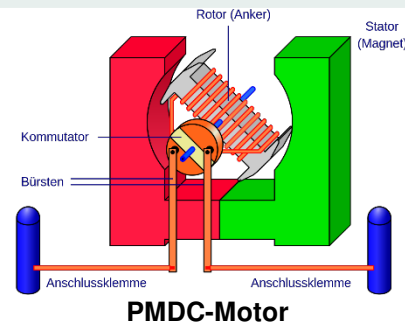
E-Maschinen – Analyse technisches System – Powertool (Gleichstrommaschinen)

Gleichstrommaschine – Klassierung nach Bauformen

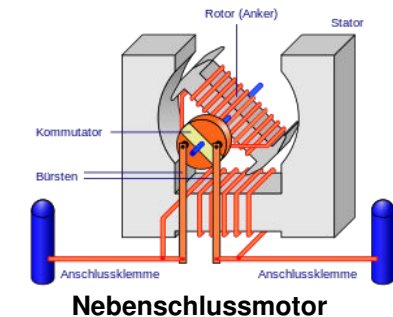


Permanent erregte GSM	Elektrisch erregte GSM	
<p style="text-align: center;">PMDC-Motor</p>  <ul style="list-style-type: none"> ■ Stator magnetfeld wird bei kleinen Motoren meist durch Permanentmagnete erzeugt ■ Zur Erzeugung des Erregermagnetfelds des Stators wird keine Energie benötigt → guter Wirkungsgrad ■ Kleinmaschinen (50W - 1kW) 	<p style="text-align: center;">Reihenschlussmaschine (Universalmotor)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ■ Beim Reihenschlussmotor sind Erregerwicklung und Anker-/Rotorwicklung in Reihe geschaltet ■ Drehmoment eines Reihenschlussmotor ist stark drehzahlabhängig ■ Kleinmaschinen werden bis 2000W gebaut 	<p style="text-align: center;">Nebenschlussmaschine</p>  <ul style="list-style-type: none"> ■ Beim Nebenschlussmotor sind Erregerwicklung und Anker-/Rotorwicklung parallel geschaltet ■ Drehzahl eines Nebenschlussmotors ist nahezu unabhängig vom Drehmoment
<p>Alle drei: S e l b s t g e f ü h r t e M a s c h i n e n M e c h a n i s c h e K o m m u t i e r u n g</p>		

	PMDC-Motor	Reihenschlussmotor (Universalmotor)	Nebenschlussmotor
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Gutes Preis-/Leistungsverhältnis Hoher Wirkungsgrad bis 90% 	<ul style="list-style-type: none"> Betrieb mit Wechselstrom möglich Großes Drehmoment bei kleiner Drehzahl „weiche“ Charakteristik 	<ul style="list-style-type: none"> Lastunabhängig „steife“ Charakteristik
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Magnetfeld kann durch Entmagnetisierungseffekte geschwächt werden Kommutatorverschleiß 	<ul style="list-style-type: none"> Kommutator wartungsbedürftig Lebensdauer (~3000h) Bürstenfeuer möglich Wirkungsgrad maximal 80% 	<ul style="list-style-type: none"> Kann nicht mit Wechselstrom betrieben werden Gefahr des Durchdrehens



<https://de.wikipedia.org/wiki/B%C3%BCrstenfeuer>



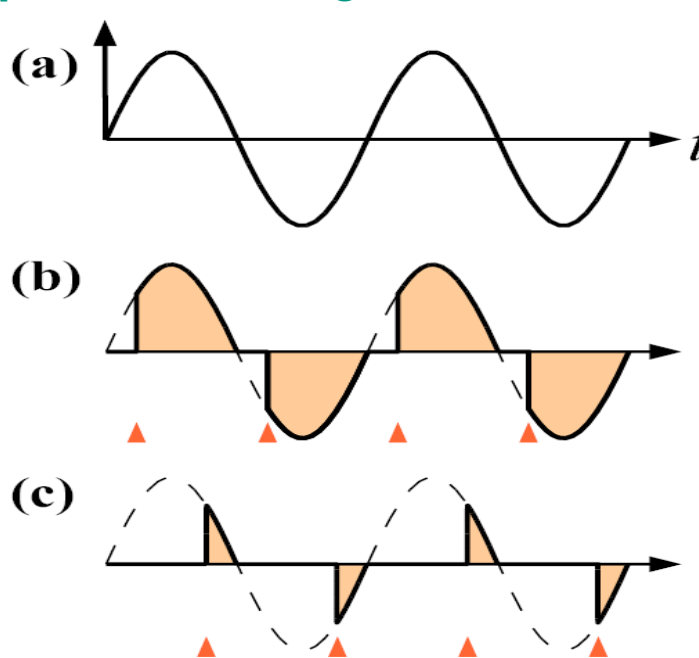
Kernaussage

Gleichstrommaschinen bieten sich für eine **Vielzahl von Anwendungsfällen an**, insbesondere Reihenschlussmotoren werden als **Universalmotoren** in verschiedensten Anwendungen eingesetzt

E-Maschinen – Powertool (Gleichstrommaschinen)


Phasenanschnittsteuerung eines mit Wechselstrom betriebenen Reihenschlussmotors (Universalmotors)

- Der Stromfluss wird meist durch **Triac** (Triode for Alternating Current), d.h. durch Antiparallelschaltung zweier Thyristoren, gesteuert
- Nach **Nulldurchgang der Wechselspannung** leitet der Triac den Strom so lange nicht bis er einen **Zündimpuls** erhält
- Ab diesem Zeitpunkt erfolgt die Energieversorgung
- **Je später** der Triac **gezündet** wird, **desto geringer** ist die **mittlere Leistung**







 Einführung E-Maschinen & Lernziele

 Leitbeispiel Automotive: Drehstrommaschinen

 Leitbeispiel Powertool: Gleichstrommaschinen

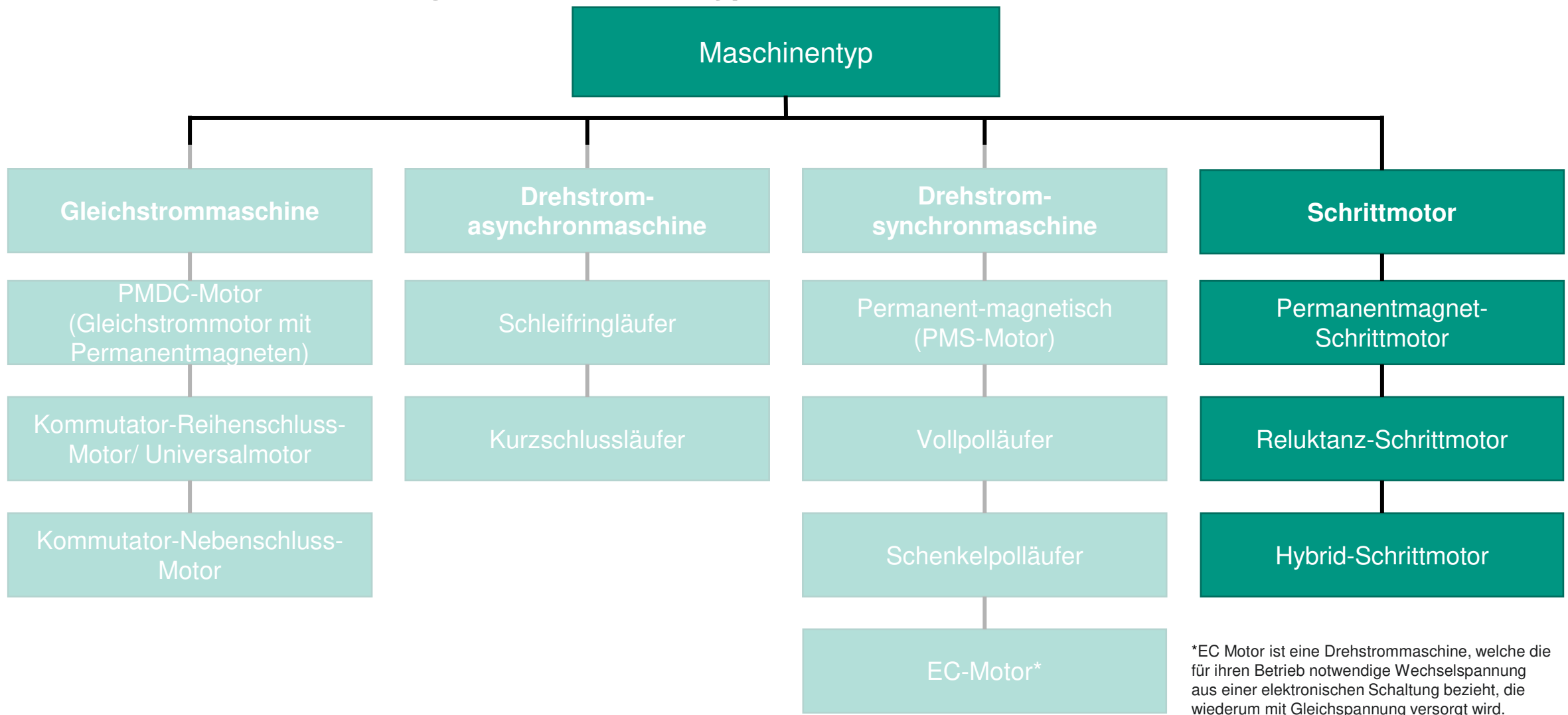
 Leitbeispiel 3D-Drucker: Schrittmotoren

 Auswahl von E-Maschinen

 Zusammenfassung & Lernziele

E-Maschinen – Analyse technisches System – 3D Drucker (Schrittmotor)

Schrittmotor – Klassierung nach Maschinentyp



*EC Motor ist eine Drehstrommaschine, welche die für ihren Betrieb notwendige Wechselspannung aus einer elektronischen Schaltung bezieht, die wiederum mit Gleichspannung versorgt wird.

Video Funktionsweise eines Schrittmotors (6 min)

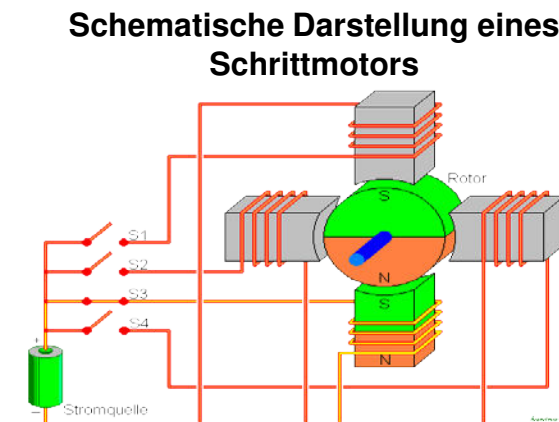


<https://youtu.be/eyqwLiowZiU>



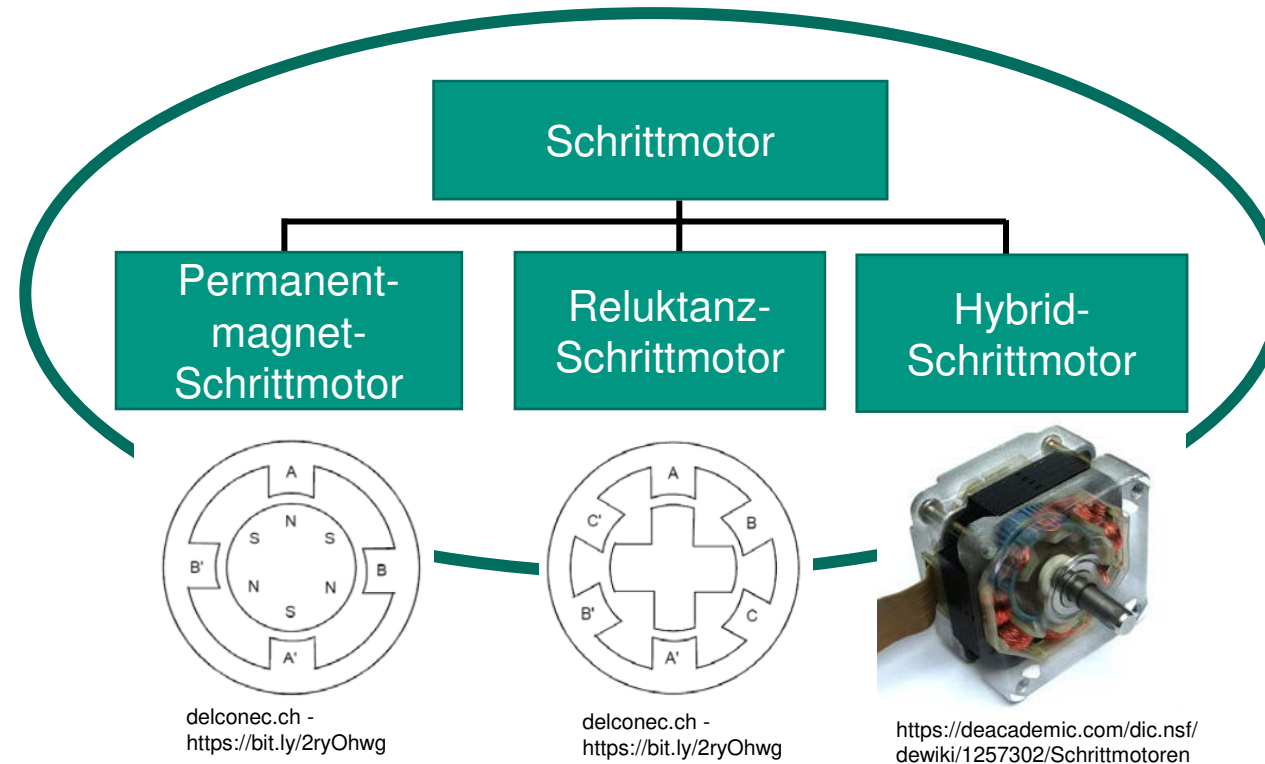
Schrittmotor – Übersicht über Aufbau und Eigenschaften

- Ermöglicht Ansteuerung in präzisen Winkelschritten ohne Positionssensor → **Open-Loop**: Jeder Eingangspuls führt zu einer definierten Rotorbewegung (**Schrittwinkel**)
- **Reluktanz-Schrittmotor**:
 - Rotor ist Eisenkern mit **Zähnen**, Stator mit mehr Zähnen und einzeln bestrombaren Spulen.
 - Durch **Umschalten der bestromten Statorzähne** richtet sich jeweils der nächstgelegene Rotorzahn am erregten Pol aus.
- **Hybrid-Schrittmotor**:
 - Rotor aus einem **Permanentmagneten** mit darüberliegenden **gezahnten Eisenpolen**.
 - Stator mit – wie beim Reluktanzmotor – mehr Zähnen
 - Rotorzähne werden nacheinander von **erregten Statorzähnen angezogen**.
 - Kombination von Magnetkraft und Reluktanzprinzip ermöglicht **kleinere Schrittwinkel** und **höhere Haltemomente**.



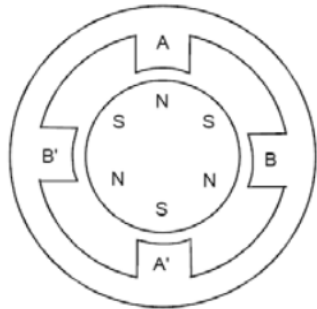
Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schrittmotor>

Schrittmotor – Klassierung nach Bauformen



Schrittmotor – Arten des Schrittmotors

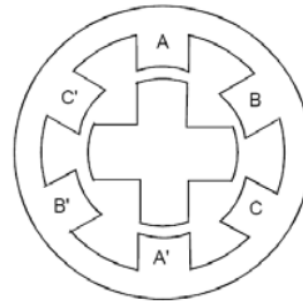
Permanentmagnet-Schrittmotor



delconec.ch - <https://bit.ly/2ryOhwg>

- Der **Rotor** ist ein starker **Magnet**
- Es ist nur eine **begrenzte Zahl** von magnetischen **Polen** nebeneinander **möglich**
- Dadurch **großer Schrittwinkel**
- **Günstig und hohes Drehmoment**

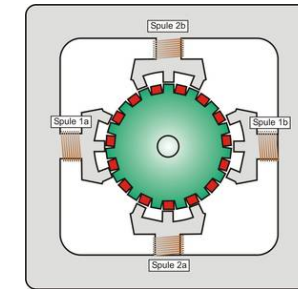
Reluktanz-Schrittmotor



delconec.ch - <https://bit.ly/2ryOhwg>

- Beim **Reluktanz-Schrittmotor** ist der **Rotor** ein **gezahnter Weicheisenkern**
- **Kleines Drehmoment**, da keine magnetischen Pole
- **Große Geschwindigkeit**
- **Genauer Schrittwinkel**

Hybrid-Schrittmotor



www.conrad.de/

- **Vereinigung** von **Reluktanz-** und **Permanentmagnet-Schrittmotor**
- **Rotor** besteht aus einem **axialen Permanentmagneten**, an dessen Enden **gezahnte Eisenkappen** befestigt sind
- **Hohes Drehmoment** und **genauer Schrittwinkel**



Schrittmotor – Vor- und Nachteile des Schrittmotors

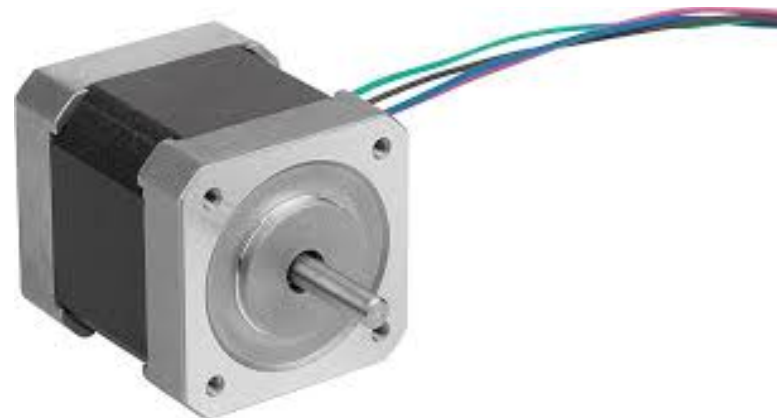
Vorteile:

- Hohe Positioniergenauigkeit
- Robust
- Wartungsaufwand gering
- Einfache Ansteuerung

Nachteile:

- Bei zu hoher Belastung unkontrollierbares Außerschrittfallen
- Bei Betrieb im Bereich der Eigenfrequenzen neigt der Schrittmotor zu schwingen

Ausführung eines
2-Phasen High-
Torque
Schrittmotor



Kernaussage

Wenn eine hohe **Positionsgenauigkeit** notwendig ist,
dann können **Schrittmotoren** eingesetzt werden,
weil diese **präzise** und eindeutig **wiederholbare** Schrittwinkel ermöglichen.
(Voraussetzung: Keine zu hohe Belastung)

E-Maschinen – Analyse technisches System – Vergleich Leitbeispiele

Gegenüberstellung der Anwendungsbereiche Automotive, Powertool und 3D-Drucker



Porsche Taycan

- Permanentmagnetische Synchronmaschine im Antrieb, (Asynchronmaschine auch möglich)
- Hohe Leistungsdichte
- Hoher Wirkungsgrad
- Hohe Dauerleistung

Drehstrommaschine



Powertool

- Reihenschlussmotor
- Simpel
- Leistungsstark
- Kompakt

Gleichstrommaschine



3D Drucker

- Hybrid-Schrittmotor
- Präzision
- Geringere Leistung
- Dauerbetrieb

Schrittmotor

Kernaussage

KonstrukteurInnen müssen die **Vielzahl** an **verfügbaren E-Maschinen** kennen und für den **Anwendungsfall entsprechend** einsetzen, um das gewünschte Betriebsverhalten zu ermöglichen.



Einführung E-Maschinen & Lernziele



Leitbeispiel Automotive: Drehstrommaschinen



Leitbeispiel Powertool: Gleichstrommaschinen



Leitbeispiel 3D-Drucker: Schrittmotoren



Auswahl von E-Maschinen



Zusammenfassung & Lernziele



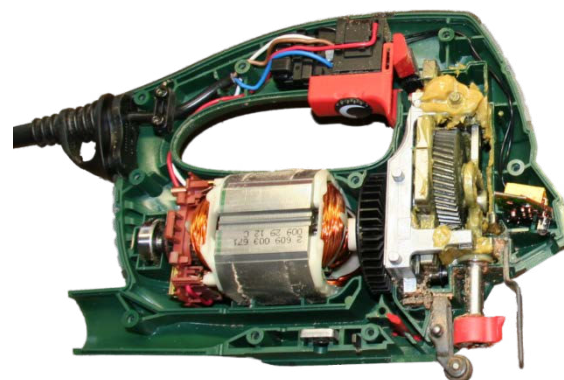
E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Mögliche Überlegungen für die Auswahl einer E-Maschine für eine Stichsäge



Wie sieht die **Systemumgebung** meines Elektromotors aus?

Welche internen **Randbedingungen** muss ich bei der Auswahl eines Motors berücksichtigen?



Wie sieht der **Anwendungsfall** von meiner E-Maschine aus?

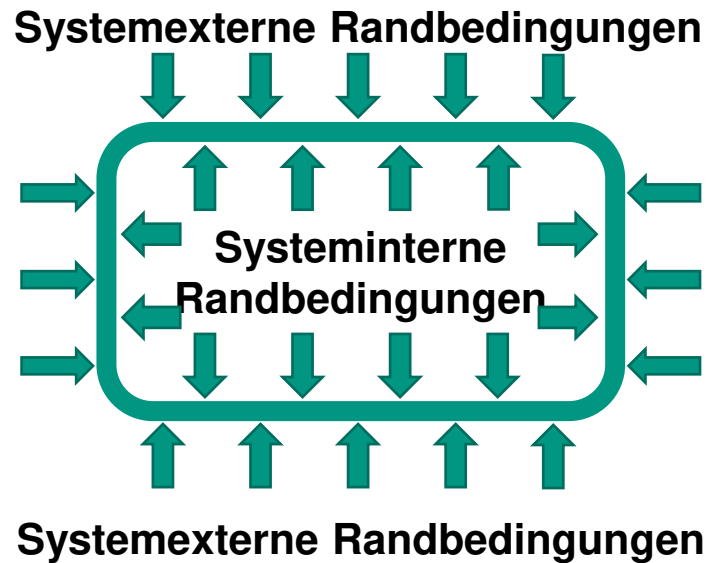
Wo liegen meine **Anwendungsgrenzen** und **welche Schäden** können auftreten?



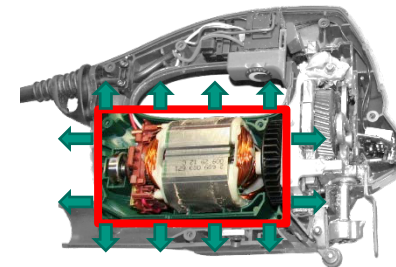
E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Beachten von Anwendungsfall und Randbedingungen bei der Auswahl einer E-Maschine für eine Stichsäge

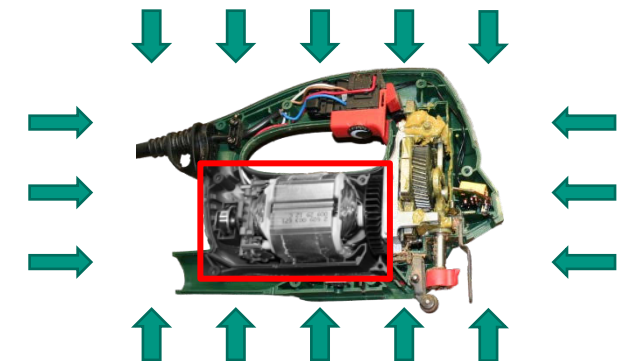
- Das Beachten des **gewünschten Anwendungsfalls** der E-Maschine und der **anwendungsspezifischen Randbedingungen** ist eine **Grundlage** für die **Motorauswahl**



- Es kann zwischen **internen** und **externen** Randbedingungen unterschieden werden
- Diese können sich unterschiedlich auf das **System auswirken**



Systemintern

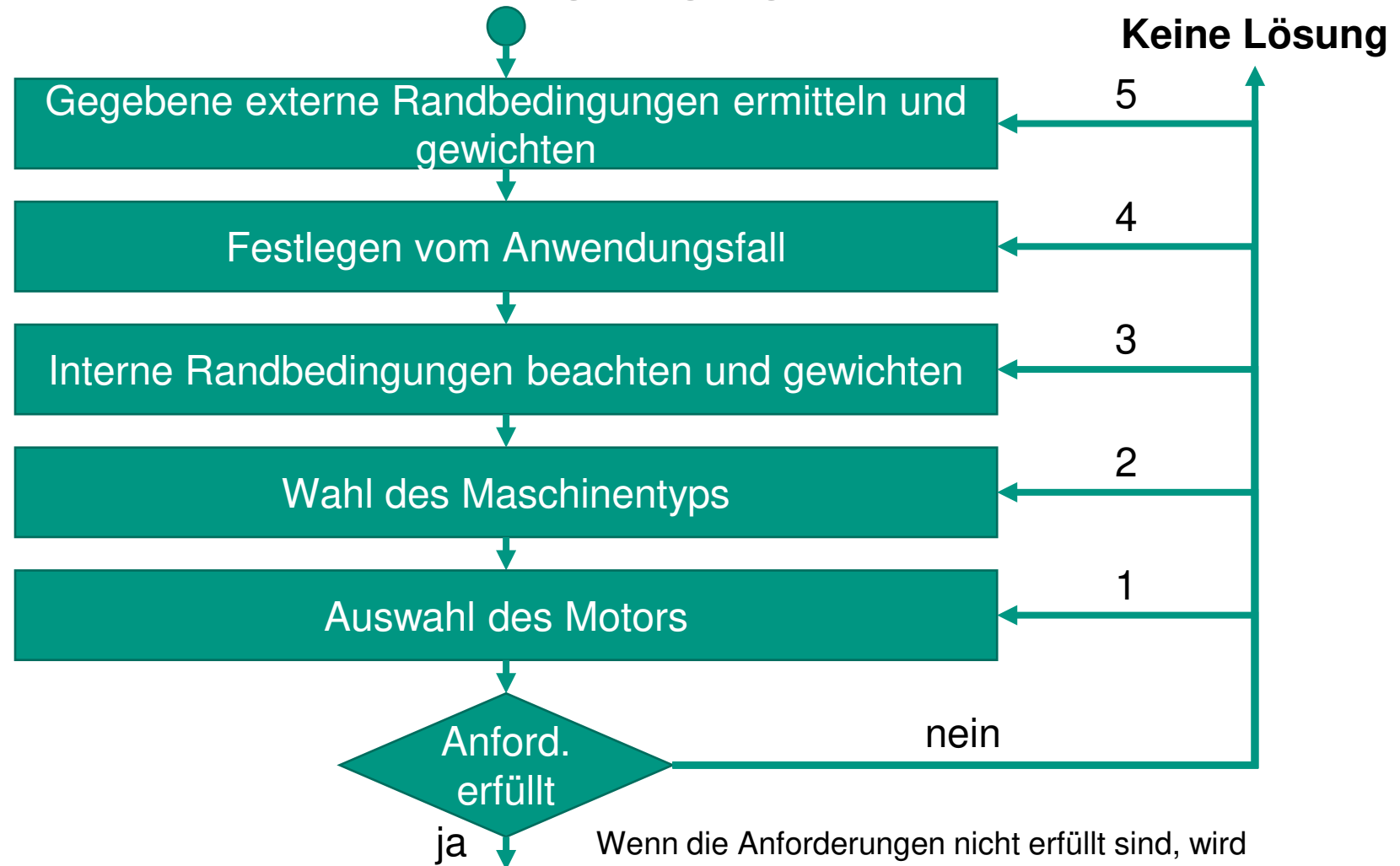
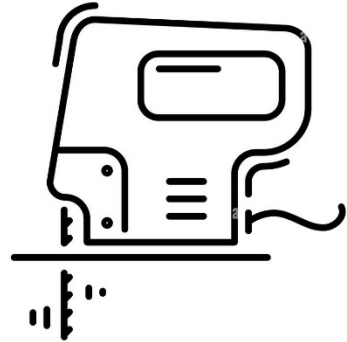


Systemextern

➤ In der Vorlesung erfolgt eine **exemplarische, nicht vollständige Betrachtung** von Auswahlbedingungen

E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Iterativer Prozess zur Auswahl der für den Anwendungsfall geeigneten E-Maschine

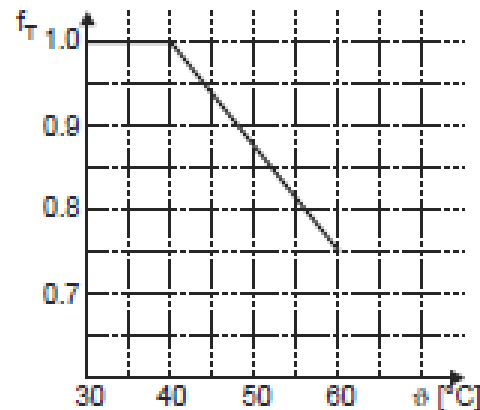


Wenn die Anforderungen nicht erfüllt sind, wird iterativ jeder Prozessschritt erneut durchlaufen

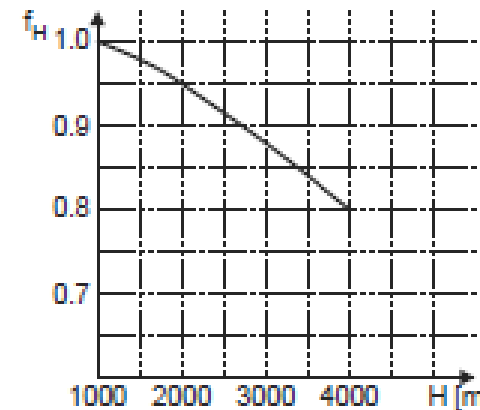
- Bei **höheren Umgebungstemperaturen** oder **Aufstellungshöhen** muss die **Bemessungsleistung** nach der folgenden Formel reduziert werden:

$$P_{Nenn,reduziert} = P_N \cdot f_T \cdot f_H$$

- Für **Drehstrommotoren** können die Faktoren f_T und f_H den folgenden Diagrammen entnommen werden:



Leistungsminderung abhängig von Umgebungstemperatur und Aufstellhöhe



Legende:

P [W] ... Leistung

f_t [] ... Faktor Temperaturminderung

f_H [] ... Faktor Minderung durch Aufstellungshöhe

ϑ [K] ... Umgebungstemperatur

H [m] ... Aufstellungshöhe über NN

Quelle: SEW Handbuch Getriebe- und Getriebemotoren S. 95



E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Anwendungsfall – Unterschiedliche Betriebsarten und deren Anwendung

■ Gemäß **EN 60034-1** werden folgende **Betriebsarten** festgelegt:

Betriebsart	Erläuterung	Anwendungsbeispiele
S1	Dauerbetrieb: Betrieb mit konstantem Belastungszustand , der Motor erreicht den thermischen Beharrungszustand.	Ventilatoren Rolltreppen Grundwasserpumpen
S2	Kurzzeitbetrieb: Betrieb mit konstantem Belastungszustand für eine begrenzte, festgelegte Zeit und anschließender Pause . In der Pause erreicht der Motor wieder die Umgebungstemperatur.	Kühlschränke Haushaltsgeräte Garagentor
S3	Aussetzbetrieb: Ohne Einfluss des Einschaltvorgangs auf die Erwärmung. Gekennzeichnet durch eine Folge gleichartiger Lastspiele, bestehend aus einem Zeitraum mit konstanter Belastung und einer Pause . Beschrieben durch die „Relative Einschaltdauer (ED)“ in %.	Hebezeuge Kompressoren Kreissägen
S4...S10	Aussetzbetrieb: Mit Einfluss des Einschaltvorgangs auf die Erwärmung. Gekennzeichnet durch eine Folge gleichartiger Lastspiele, bestehend aus einem Zeitraum mit konstanter Belastung und einer Pause . Beschrieben durch die „Relative Einschaltdauer (ED)“ in % und die Zahl der Schaltungen pro Stunde .	Werkzeugmaschinen Aufzugmotoren Transporteinrichtungen

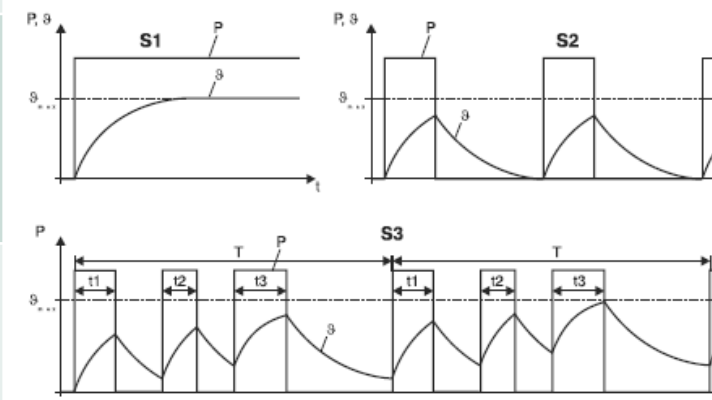
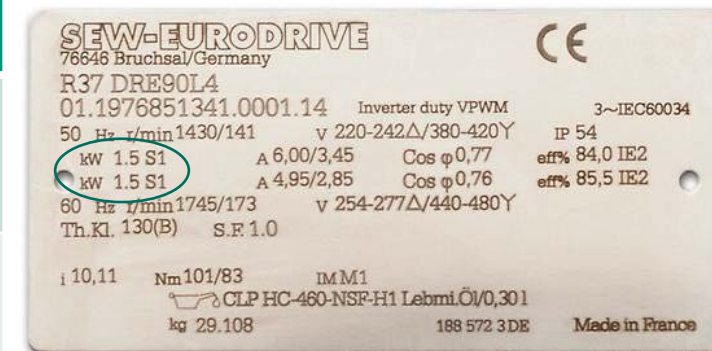
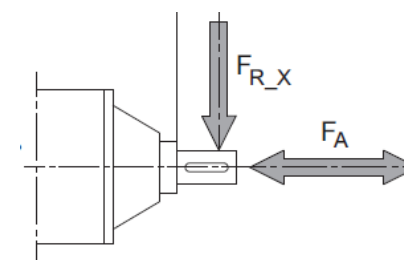


Bild 41: Betriebsarten S1, S2 und S3

03135AXX

- Bei Ermittlung der entstehenden **Querkraft** muss berücksichtigt werden, welches Übertragungselement an das Wellenende angebaut wird. Für verschiedene Elemente müssen **herstellerabhängige Zuschlagsfaktoren** f_z berücksichtigt werden:

Übertragungselement	Zuschlagsfaktor f_z	Bemerkungen
Zahnräder	1.15	< 17 Zähne
Kettenräder	1.40	< 13 Zähne
Kettenräder	1.25	< 20 Zähne
Schmalkeilriemen-Scheiben	1.75	Einfluss der Vorspannkraft
Flachriemen-Scheiben	2.50	Einfluss der Vorspannkraft
Zahnriemen-Scheiben	1.50	Einfluss der Vorspannkraft



- Die **Querkraftbelastung** F_R an der Motor- oder Getriebewelle wird dann folgendermaßen berechnet:

$$F_R = \frac{M_d * 2000}{d_0} * f_z$$

Kernaussage

Liegt keine Querkraftbelastung vor, ist als Axialkraft F_A (Zug oder Druck) 50% der Querkraft gemäß Auswahltabellen zulässig.

Legende:

F_R [N] ... Querkraft

M_d [Nm] ... Drehmoment

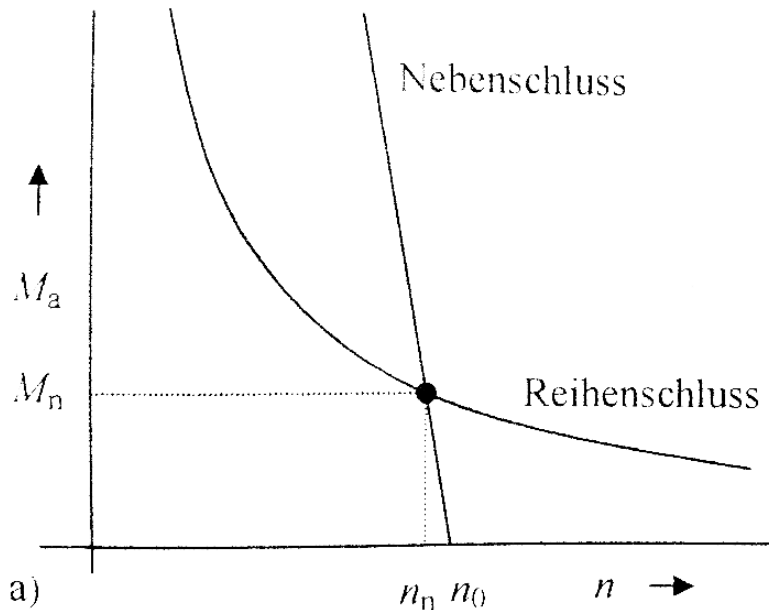
d_0 [mm] ... mittlerer Durchmesser des angebauten Übertragungselements

f_z [] ... Zuschlagsfaktor

E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Interne Randbedingung – Die Drehmoment-/Drehzahl-Kennlinie einer E-Maschine

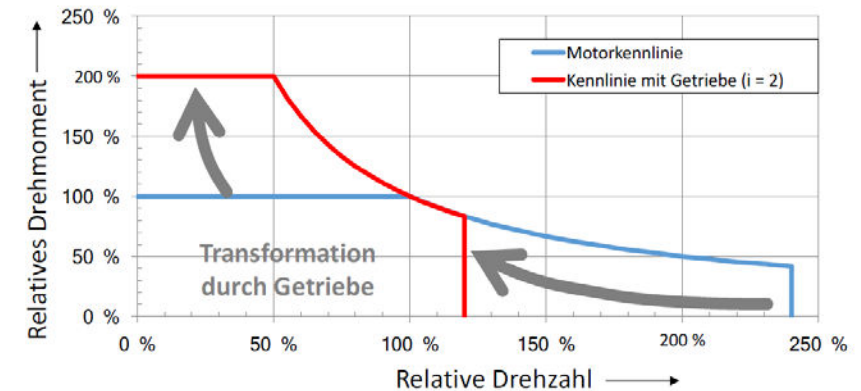
- Das **Betriebsverhalten elektrischer Maschinen** lässt sich in **Neben- und Reihenschlussverhalten** aufteilen. Diese Aufteilung gilt sowohl für den **motorischen als auch** für den **generatorischen Betriebszustand**.



Nebenschlussverhalten:
 „Steif“
 $n \approx \text{konst.} \rightarrow$ Nur geringer Drehzahlverlust bei Drehmomenterhöhung

Reihenschlussverhalten:
 „Weich“
 $M \sim 1/n \rightarrow$ Große Drehzahländerung bei Drehmomenterhöhung

Ein Getriebe ermöglicht die Drehmoment/Drehzahl-Kennlinie weiter zu beeinflussen:



Vorlesungsskript Hybride und Elektrische Fahrzeuge - © 2018 Prof. Martin Doppelbauer - KIT

Legende:
 M_A [Nm] ... Anzugsmoment
 M_N [Nm] ... Nennmoment
 n_0 [1/s] ... Leerlaufdrehzahl
 n_N [1/s] ... Nenn Drehzahl

Kernaussage

E-Maschinen haben einige **charakteristische Eigenschaften** und Merkmale, die Konstruierende bedenken und nutzen, um eine gewünschte **Drehmoment-/Drehzahl-Kennlinie** zu erreichen.

E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Interne Randbedingung – Einfluss des Betriebsverhaltens

- Bei der Auswahl in Bezug auf Drehzahl muss unterschieden werden, ob der Motor **eine weiche** oder **steife Charakteristik** aufweist
- Mithilfe **der Leistungselektronik** können die sogenannten **natürlichen Kennlinien der Motoren** verändert und an die Bedingungen der Arbeitsmaschinen **angepasst** werden

Steife Charakteristik



Quelle: trotec



Quelle: Bosch

Quelle: Elektromaschinen in Theorie und Praxis (VDE Verlag, 2016), Seite 492

Weiche Charakteristik



https://www.mediamarkt.de/de/product/_bosch-wan28231-2318580.html



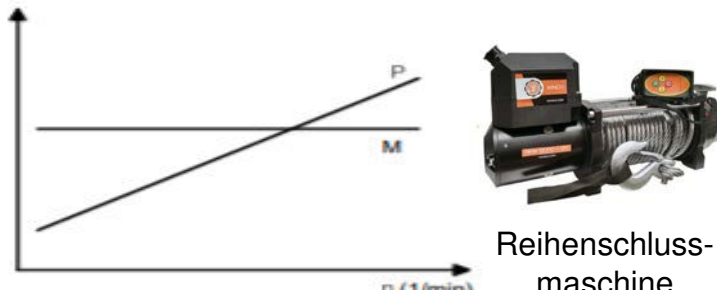
Quelle: Kitchen Aid

- Für Antriebe mit **schwerem Anlauf** (hohes Anlaufmoment)
 - Gabelstapler, Hebezeuge, Waschmaschinen, Mixer, Bohrmaschinen, Fahrzeuge
 - Universalmotor (Reihenschlussmotor)

E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Interne Randbedingung – Lasttypen, Drehmoment-/Drehzahl-Kennlinien und Leistungen

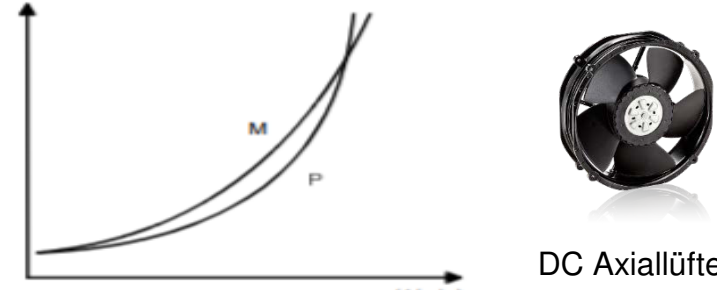
Statische Belastung



Reihenschlussmaschine

Anwendungsfälle:
Hubwerke, Rohrleitungssysteme

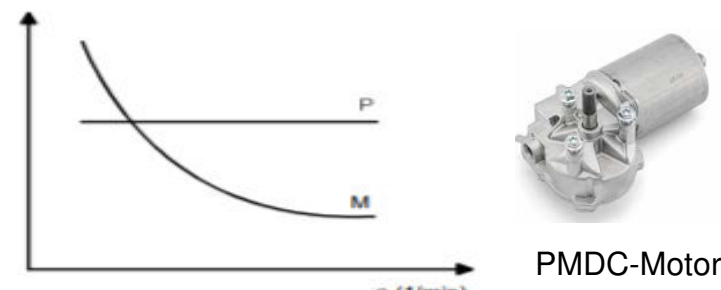
Quadratische Belastung



DC Axiallüfter

Anwendungsfälle:
Kreiselpumpen und Lüfter

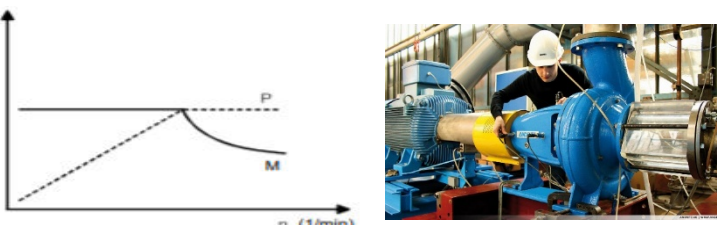
Konstante Leistung



PMDC-Motor

Anwendungsfälle:
Wickel- oder Haspelantriebe

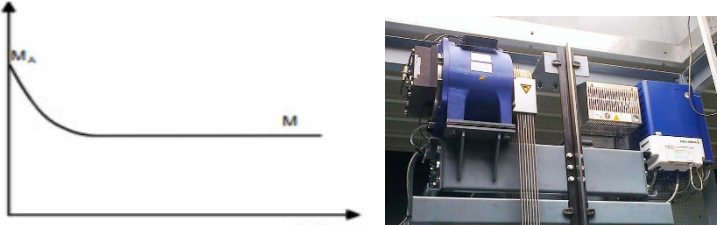
Konstante Leistung / Konstantes Moment



Asynchronmotor

Anwendungsfälle:
Papierindustrie

Hohes Anlaufmoment



Permanentmagneterregter Synchronmotor

Anwendungsfälle:
Aufzüge, Antrieb von Eimerbaggern

Prinzipiell sind auch weitere Lastfälle möglich, welche keiner einfachen mathematischen Beschreibung folgen.

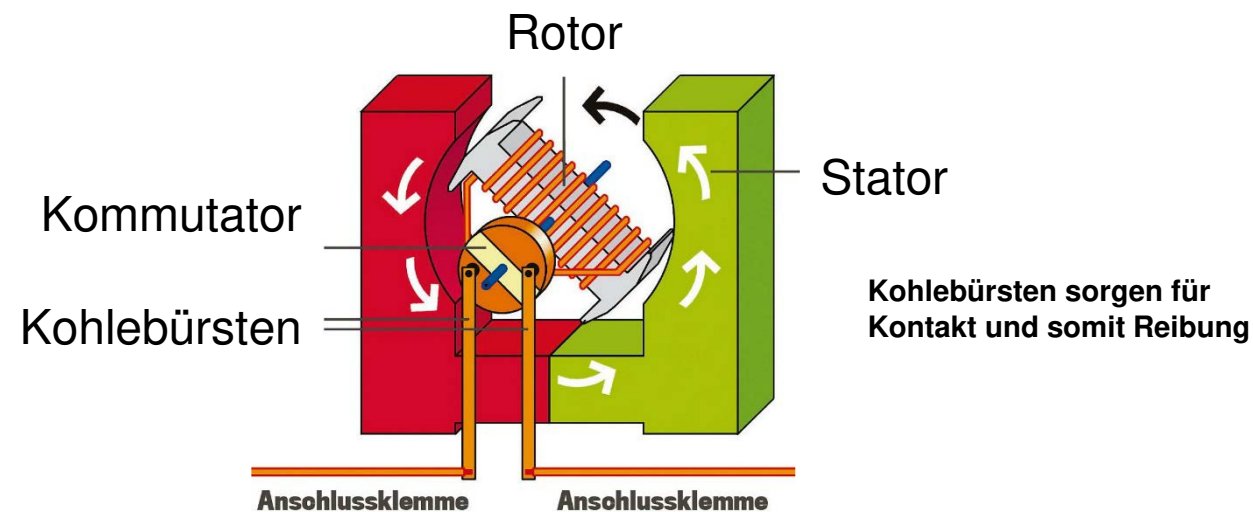
Legende:
P [W] ... Leistung
M [Nm] ... Drehmoment
n [1/min] ... Drehzahl



E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Interne Randbedingung – Einfluss von Geräuschemissionen

- **Es gibt 3 Hauptgeräuscharten** bei Elektromotoren:
 - **Magnetische Geräusche:**
 - **Magnetische Wechselkräfte** regen die Maschine zum Schwingen an
 - **Aerodynamische Geräusche:**
 - Werden zum Beispiel durch **ein Lüfterrad** hervorgerufen
 - **Mechanische Geräusche:**
 - Werden durch Schwingungen der mechanischen Teile wie Rotor, Kugellager, Dichtungen und Bürsten hervorgerufen





AKM-Servomotor mit passiver Kühlung

Passive Luftkühlung:

Weiterleitung von Wärme vom Motor über die Befestigungsvorrichtung auf die Maschinenkonstruktion



Lüftergekühlter Gleichstrommotor

Aktive Luftkühlung:

Blasen von Luft durch einen Ventilator über den Motor. Verringerung der auf die Maschinenkonstruktion übertragene Wärmemenge, was den Betrieb des Motors bei höheren Lasten ermöglicht.



Flüssigkeitsgekühlter Motor

Flüssigkeitskühlung:

Zirkulation von Ethylenglykol oder eines anderen flüssigen Kühlmittels im oder um das Motorgehäuse bzw. die Spulen, um die Wärme abzuleiten.

E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Interne Randbedingung – Einfluss von weiteren Kriterien

Einfluss der Energieversorgung

- **Drehstrommotoren** sind weit verbreitet, weil sie direkt an das **Netz angeschlossen** werden können.
- Ein **Universalmotor** kann mit **Wechsel- und Gleichstrom** betrieben werden.

Einfluss von hohen Leistungen

- Asynchronmaschinen sind für eine kleinere Leistung ($P < 30\text{MW}$) ausgelegt als Synchronmaschinen ($P < 2\text{GW}$).
- Asynchronmaschinen **reagieren stärker** auf **Netzspannungsschwankungen** im Vergleich zu Synchronmaschinen.

Einfluss der Lebensdauer

- Drehstrommotoren haben eine höhere **Lebensdauer** als Gleichstrommotoren. Diese kann jedoch durch **Motorverluste** oder zu **hohe Temperaturen** verringert werden.
- Die berechnete Lebensdauer (siehe Formel) ist **meist deutlich kleiner als die tatsächliche Lebensdauer**, da die Maschine **nicht immer in Vollast** betrieben wird.

Verbauter Universalmotor in einer Stichsäge



Synchrongenerator im Wasserkraftwerk Itaipu - Brasilien



$$L = L_0 2^{-\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}}$$

Legende:

L [h] ... Lebensdauer

L_0 [h] ... Isolationslebensdauer bei der Temperatur θ_0

θ_0 [K] ... Betriebsgrenztemperatur

θ [K] ... Betriebstemperatur

	Gleichstrommotor	Schrittmotor	EC-Motor	Asynchronmotor	Synchronmotor
Lebensdauer in h	<10000	15000	15000-20000	~20000	~20000

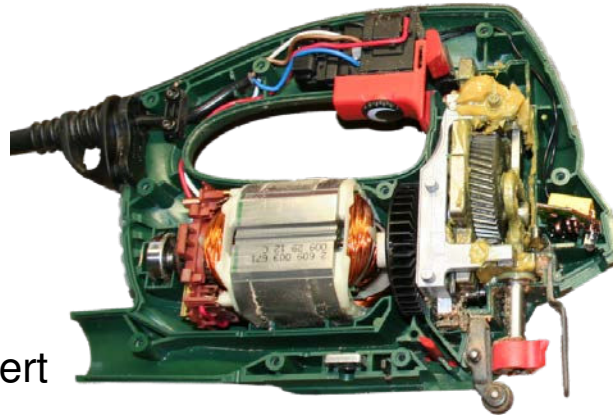
Quelle: Elektromaschinen in Theorie und Praxis (VDE Verlag, 2016), Seite 473, 510



E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Auswahl einer E-Maschine am Beispiel Stichsäge

- Externe Randbedingungen:
 - **Aufstellhöhe beliebig**
 - Betriebsart: **S3 (Aussetzbetrieb)**
 - **Kostengünstig**
- Anwendungsfall:
 - Netzanschluss
 - Keine hohe Genauigkeit/ Präzision gefordert
 - **Kleinmaschine** ($P < 2\text{kW}$)
 - Einfache Drehzahlregelung
- Interne Randbedingungen:
 - **Kein hoher Wirkungsgrad** benötigt



Mögliche weitere Kriterien

- Motorausstattung (Bremse, Steckverbinder, TF-Überwachung, usw.)
- Überlastfähigkeit
- Lebensdauer und Verschleiß (Schleifringe, Drehzahl/Umfangsgeschwindigkeit)
- Fehlerverhalten (z.B. Kurzschluss)
- Sensorik (Drehzahl- oder Drehwinkelsensor)
- Verfügbarkeit der Materialien (z.B. Seltene Erden in Magneten)
- Wärmeklassen und Schutzarten (IP-Codes)
- Leistung und Betriebspunkt
- Schaltheufigkeit
- Kühlung und Schmierung
- Betriebsverhalten (Steif vs. Weich)

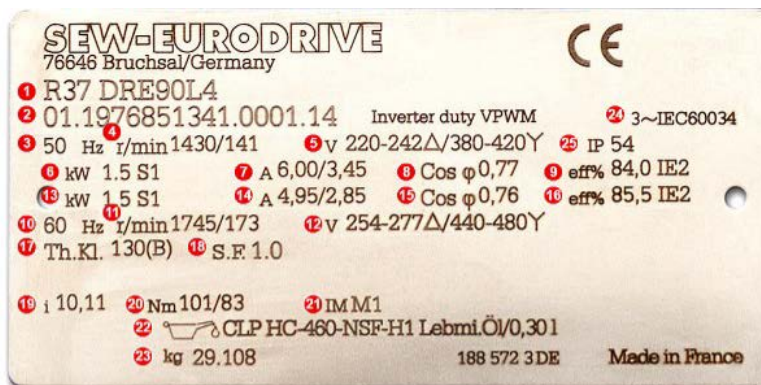
➔ Wahl der Motorart: **Universalmotor**

Kernaussage

Nach Ermittlung der **Randbedingungen** und deren **Gewichtung** kann für den **Anwendungsfall** eine geeignete **Motorart** und anschließend eine **geeignete E-Maschine** für das zu konstruierende System ausgewählt werden.

E-Maschinen – Auswahl von E-Maschinen

Zusammentragung relevanter Informationen auf einem Typenschild einer E-Maschine



Legende

- | | | | |
|--|---|---|--|
| 1 Typenbezeichnung | 2 Seriennummer | 3 Nennfrequenz 50 Hz | 4 Drehzahl
Motor/Drehzahl
Getriebe (bei 50 Hz) |
| 5 Bemessungsspannung
(bei 50 Hz) | 6 Leistung / Betriebsart
(bei 50 Hz) | 7 Bemessungsstrom (bei
50 Hz) | 8 Leistungsfaktor (bei 50
Hz) |
| 9 Wirkungsgrad (bei 50
Hz) | 10 Nennfrequenz 60 Hz | 11 Drehzahl
Motor/Drehzahl
Getriebe (bei 60 Hz) | 12 Bemessungsspannung
(bei 60 Hz) |
| 13 Leistung / Betriebsart
(bei 60 Hz) | 14 Bemessungsstrom (bei
60 Hz) | 15 Leistungsfaktor (bei 60
Hz) | 16 Wirkungsgrad (bei 60
Hz) |
| 17 Thermische Klasse | 18 Servicefaktor S.F. | 19 Übersetzung | 20 Maximales Drehmoment |
| 21 Raumlage
(Einbauposition) | 22 Öltyp / Ölmenge | 23 Masse | 24 Phasenzahl / Standard |
| 25 Schutzart | | | |
- © SEW-EURODRIVE

Kernaussage

Typenschildangaben gelten laut **IEC 60034 (EN 60034)** für eine **Umgebungstemperatur** von **maximal 40°C** und eine **Aufstellungshöhe** von **maximal 1000 m über NN**.

Quelle: <https://www.sew-eurodrive.de/produkte/getriebemotoren.html>





Einführung E-Maschinen & Lernziele



Leitbeispiel Automotive: Drehstrommaschinen



Leitbeispiel Powertool: Gleichstrommaschinen



Leitbeispiel 3D-Drucker: Schrittmotoren



Auswahl von E-Maschinen



Zusammenfassung & Lernziele



Lernziele der Vorlesung

E-Maschinen – Konstruieren mit elektrischen Maschinen

Problem

Konstruktionsingenieurinnen und -ingenieure müssen die **Eigenschaften verschiedener E-Maschinen** kennen, um die E-Maschinen für den jeweiligen **Anwendungsfall** geeignet auswählen zu können.

Ziele

- **Bestandteile** von elektrischen Systemen aufzählen und deren **Funktion** beschreiben können. F5ff
- Im Automotive Bereich gängige **Drehstrommotoren** aufzählen und unterscheiden können. F12ff+18ff
- Im Powertool Bereich gängige **Gleichstrommotoren** aufzählen und unterscheiden können. F26ff
- Bedarf, Vorteile und Anwendungen von unterschiedlichen **Schrittmotoren** benennen und beschreiben können. F37ff
- Einflüsse auf die **Auswahl** von **E-Maschinen** erklären und diese bewerten können. F44ff
- Drehmoment-/Drehzahl-**Kennlinien** unterscheiden können und deren Zusammenhang mit **Lasttypen** erklären können.

F50ff

Fazit

Konstruktionsingenieurinnen und -ingenieure müssen die **verschiedenen E-Maschinen** mit ihren **unterschiedlichen Eigenschaften** kennen, um mit diesen **konstruieren** zu können.

Die Auswahl einer geeigneten Elektrischen Maschine erfolgt aus dem Anwendungsfall und verschiedenen **Einflusskriterien und Randbedingungen**, die der Anwendungsfall mit sich bringt. Diese Einflusskriterien und Randbedingungen müssen von den/r Konstruktionsingenieur/in **aus dem Anwendungsfall abgeleitet** werden können.