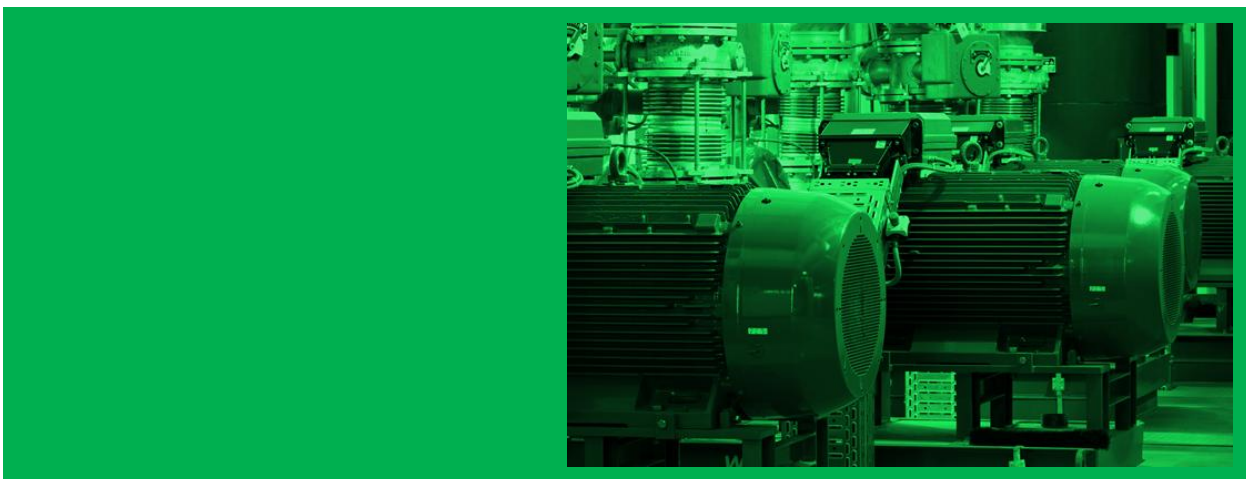


Kursbuch zum Onlinekurs

Auslegung elektrischer Antriebe

Kurseinheit 1

Erstellt für M.Mustermann von **w-tech**, Neumannstr. 29, 90763 Fürth, www.w-tech.de



1 Einführung

1.1 Der Aufbau elektrischer Antriebe

Die von elektrischen Antrieben bereitgestellte mechanische Energie dient zur Beeinflussung von Prozessgrößen in Arbeitsmaschinen. Die mechanische Energie muss entsprechend den Anforderungen des Prozesses dosiert bzw. zu- und abgeschaltet werden. Aus diesem Grund bestehen heutige elektrische Antriebe nicht nur aus einem Elektromotor, sondern weisen eine ganze Reihe weiterer Komponenten auf, die nachfolgend beschrieben werden:

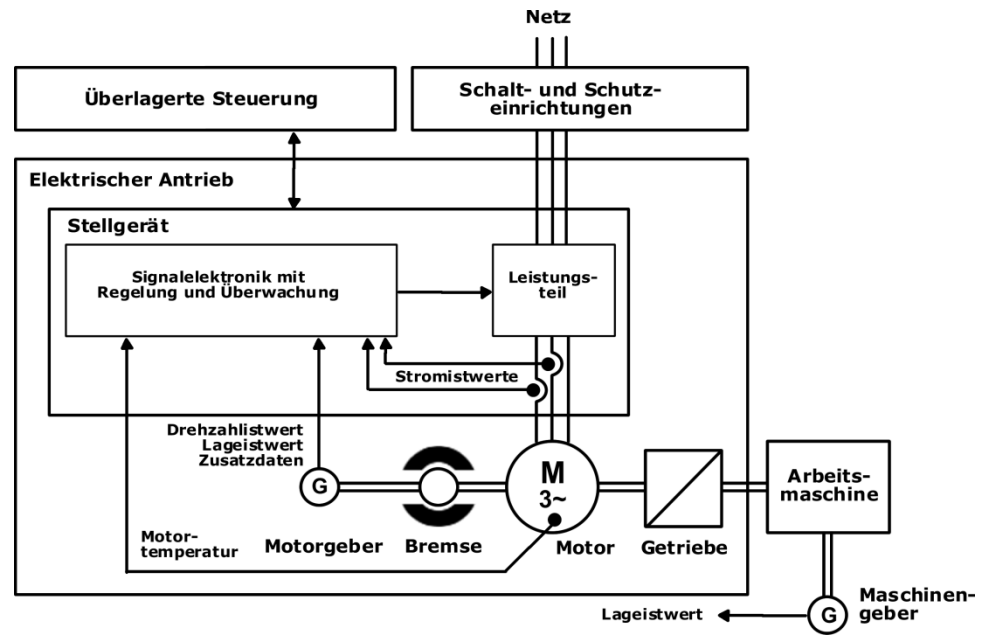


Bild 1-1 Aufbau moderner elektrischer Antriebe

- Elektromotor** Das Herzstück eines jeden elektrischen Antriebes ist sein Elektromotor. Er dient als Energiewandler, der die zugeführte elektrische Energie in mechanische Energie umsetzt. Im generatorischen Betrieb (z. B. bei Bremsvorgängen) erfolgt der Energiefluss in entgegengesetzter Richtung. Mechanische Energie wird dann in elektrische Energie umgewandelt.
- Motorgeber** Der am Motor angebaute Geber (Motorgeber) ermittelt aktuelle Bewegungsgrößen wie Drehzahl, Geschwindigkeit, Lage und stellt sie der Signalelektronik zur Verfügung.
- Bremse** Die Haltebremse verhindert Bewegungen des Motors bei abgeschaltetem Stellgerät. Besonders bei "hängenden" Lasten (z. B. Roboterarmen, Aufzügen, Hubwerken) sorgt die Bremse für die Fixierung des mechanischen Systems auch im inaktiven Zustand des Antriebes.
- Getriebe** Das Getriebe ist ein mechanischer Wandler. Es passt die vom Motor abgegebenen mechanischen Größen wie Drehzahl und Drehmoment an die Erfordernisse der Arbeitsmaschine an. Eine weitere Aufgabe von Getrieben besteht darin, bei Bedarf die rotatorische Bewegung des Motors in eine lineare Bewegung zu wandeln.
- Schalt- und Schutz-einrichtungen** Schalt- und Schutzeinrichtungen trennen den elektrischen Antrieb bei Bedarf vom Netz und schützen den Antrieb sowie die Versorgungsleitungen vor einer Überlastung. Überlastungen können zum einen durch die Arbeitsmaschine aber auch durch Fehler im Antrieb hervorgerufen werden.

Stellgerät

Das Stellgerät besteht aus dem Leistungsteil und der Signalelektronik.

- Das **Leistungsteil** "portioniert" die dem Motor zugeführte elektrische Energie und beeinflusst damit die vom Motor abgegebene mechanische Energie. Leistungsteile elektrischer Antriebe sind heute aus Leistungshalbleitern aufgebaut. Diese arbeiten als elektronische Schalter, über die die elektrische Energiezufuhr zum Motor an- und abgeschaltet wird. Integrierte Messsysteme erfassen die elektrischen Ströme und Spannungen und stellen sie der Signalelektronik zur Verfügung.
- Die **Signalelektronik** ist das "Gehirn" des elektrischen Antriebes. Sie bestimmt die Steuersignale für das Leistungsteil so, dass sich an der Motorwelle die gewünschten Kräfte bzw. Bewegungen einstellen. Dazu verfügt die Signalelektronik über verschiedene Steuer- und Regelfunktionen. Die erforderlichen Istwerte der elektrischen Größen erhält die Signalelektronik vom Leistungsteil, mechanische Größen wie Drehzahl und Lage werden vom Motorgeber bereitgestellt. Ihre Sollwerte erhält die Signalelektronik von einer überlagerten Steuerung. An dieses gibt sie auch aktuelle Istwerte zurück.

Neben den erforderlichen Steuer- und Regelfunktionen übernimmt die Signalelektronik auch Schutzfunktionen und verhindert unzulässige Überlastungen für das Leistungsteil und den Motor.

1.2 Auslegungsschritte

Auslegungsschritte

In Maschinen, Anlagen und Transportmitteln werden elektrische Antriebe in großer Anzahl und Vielfalt eingesetzt. Der Konstrukteur steht deshalb regelmäßig vor der Aufgabe, für seine Anwendung die optimale Antriebskonfiguration zu finden. In den meisten Fällen greift er dabei auf das Angebot von Antriebslieferanten zurück, die vorgefertigte Antriebselemente entsprechend Kap. 1.1 in verschiedenen Ausprägungen anbieten.

Die Aufgabe des Konstrukteurs liegt dann darin, die optimal geeigneten Antriebskomponenten auszuwählen und zu einem kompletten elektrischen Antrieb zu kombinieren. Die dabei entstehende Antriebskonfiguration deckt die Anforderungen der Anwendung hinreichend gut ab und weist niedrige Kosten sowie einen geringen Materialeinsatz und einen geringen Energieverbrauch auf.

Der Auslegungsprozess erfolgt in mehreren Auslegungsschritten, die aufeinander aufbauen. Entsprechend dem nachfolgenden Bild beginnt die Auslegung mit der Wahl der optimalen Antriebslösung und endet mit der Überprüfung der Wirtschaftlichkeit.

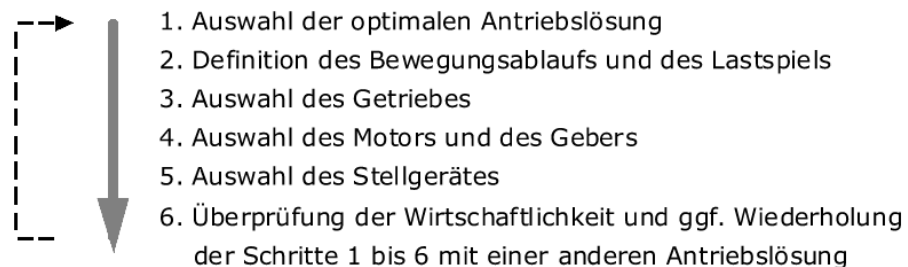


Bild 1-2 Vorgehensweise bei der Auslegung elektrischer Antriebe

Der Elektrotechniker verfügt so über große Freiheitsgrade bei der Auswahl und Dimensionierung von Antriebslösungen. Die Auslegung elektrischer Antriebe führt deshalb nicht zwangsläufig zu einem eindeutigen Ergebnis sondern liefert je nach Gewichtung der Anforderungen verschiedene Lösungen. Um zu einer wirtschaftlich optimalen Antriebsauslegung zu kommen, sind ein mehrmaliges Durchlaufen der Auslegungsschritte und ein Vergleich der verschiedenen Lösungen erforderlich.

In den folgenden Kapiteln werden die technisch geprägten Auswahlsschritte 1 bis 5 behandelt. Die wirtschaftliche Bewertung im Auslegungsschritt 6 ist nicht Gegenstand des vorliegenden Kursbuches.

1.3 Fragen und Aufgaben

1. Warum müssen elektrische Antriebe ausgelegt werden?
2. Aus welchen Komponenten besteht ein elektrischer Antrieb? Welche Aufgaben haben diese Komponenten?
3. In welchen Schritten erfolgt die Auslegung eines elektrischen Antriebes?
4. Führt die Auslegung elektrischer Antriebe immer zu einer eindeutigen optimalen Lösung?

2 Mathematische Grundlagen

2.1 Einführung

Elektrische Antriebe haben die Aufgabe, Bewegungsabläufe in Maschinen, Anlagen und von Transportmitteln zu realisieren. Ausgangspunkt für die Auslegung ist deshalb die mathematische Beschreibung der zu realisierenden Bewegungsabläufe. Aus den Bewegungsabläufen werden die für ihre Realisierung erforderlichen Kräfte und Drehmomente ermittelt. Bewegungsablauf sowie Kraft- bzw. Drehmomentbedarf sind die Eingangsgrößen für die Auslegung der elektrischen Antriebe. Die nachfolgenden Abschnitte behandeln deshalb die mathematischen Grundlagen, die zu ihrer Bestimmung erforderlich sind.

2.2 Kinematische Gleichungen

2.2.1 Grundgleichungen

Kinematische Gleichungen beschreiben die Bewegungen von Körpern. Mathematisch ist zwischen translatorischen und rotatorischen Bewegungen zu unterscheiden. Umgangssprachlich wird diese Unterscheidung oft nicht getroffen. Insbesondere die Begriffe Position (für Weg und Winkel), Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck werden für beide Bewegungsformen verwendet.

**Weg,
Geschwindigkeit,
Beschleunigung**

Translation			Rotation		
Größe	Formel	Einheit	Größe	Formel	Einheit
s : Weg	$s = f(t)$		φ : Winkel	$\varphi = f(t)$	(rad)
v : Geschwindigkeit	$v = \frac{ds}{dt}$		ω : Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	$\frac{1}{s}$
			n : Drehzahl	$n = \frac{\omega}{2\pi}$	$\frac{1}{min}$
a : Beschleunigung	$a = \frac{dv}{dt}$	$\frac{m}{s^2}$	α : Winkelbeschleunigung	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$	$\frac{1}{s^2}$
j : Ruck	$j = \frac{da}{dt}$	$\frac{m}{s^3}$	ρ : Winkelruck	$\rho = \frac{d\alpha}{dt}$	$\frac{1}{s^3}$

Tabelle 2-1 Kinematische Gleichungen der Translation und der Rotation

Die Bewegungen von Körpern werden durch die kinematischen Gleichungen in Tabelle 2-1 beschrieben.

Ruck

Neben den allgemein bekannten Bewegungsgrößen wie Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung wird als zusätzliche Größe der Ruck bzw. der Winkelruck eingeführt. Er beschreibt, wie schnell sich die Beschleunigung ändert. Insbesondere bei Positionieranwendungen ist der Ruck ein Maß für die Belastungen, die die mechanischen Elemente aushalten müssen. Hohe Werte für den Ruck regen Schwingungen an, führen zu Materialermüdung und erhöhen den Verschleiß.

SI-Einheiten verwenden

Für die praktische Arbeit mit den Berechnungsgleichungen empfiehlt es sich, alle Größen mit ihren SI-Einheiten zu verwenden. Diese Einheiten lassen sich einfach in einander umrechnen und ermöglichen so eine Kontrolle der Rechenergebnisse. Eine Ausnahme bildet die Drehzahl, die in Katalogen für Motoren und Getriebe üblicherweise in min^{-1} angegeben wird.

Vereinfachte Bewegungsgleichungen

Für bestimmte Sonderfälle lassen sich die Bewegungsgleichungen vereinfachen und in Differenzgleichungen überführen.

Sonderfall 1: Konstante Geschwindigkeit und konstante Winkelgeschwindigkeit

Konstante Geschwindigkeit

Translation	Rotation
v : Geschwindigkeit	ω : Winkelgeschwindigkeit
$v = \frac{ds}{dt} \rightarrow v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_{Ende} - s_{Anfang}}{t_{Ende} - t_{Anfang}}$	$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \rightarrow \omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi_{Ende} - \varphi_{Anfang}}{t_{Ende} - t_{Anfang}}$

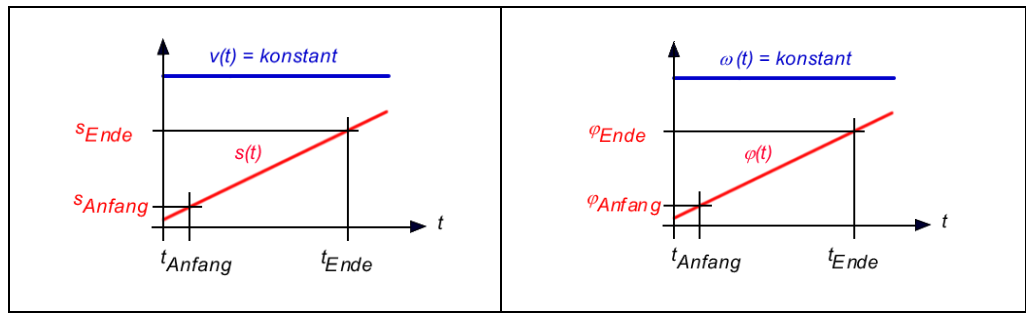


Tabelle 2-2 Kinematische Gleichungen der Translation und der Rotation bei konstanter Geschwindigkeit

Die Anwendung der kinematischen Gleichungen bei konstanter Geschwindigkeit verdeutlichen die folgenden Beispiele:

Beispiele mit konstanter Geschwindigkeit

Beispiel: PKW

Ein PKW fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h. Welchen Weg legt er in 10 min zurück?

Aus $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ folgt:

$$\Delta s = v \cdot \Delta t = \frac{50 \text{ km} \cdot 10 \text{ min}}{h} = \frac{50.000 \text{ m} \cdot 600 \text{ s}}{3600 \text{ s}} = 8333 \text{ m} = 8,3 \text{ km}$$

Beispiel: Regalfördergerät

Ein Regalfördergerät fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1,25 m/s. Wie lange braucht es für einen Weg von 50 m?

$$\text{Aus } v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{ folgt: } \Delta t = \frac{\Delta s}{v} = \frac{50 \text{ m}}{1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 40 \text{ s}$$

Sonderfall 2: Konstante Beschleunigung und konstante Winkelbeschleunigung

Konstante Beschleunigung	Translation	Rotation
	$a:$ Beschleunigung	$\alpha:$ Winkelbeschleunigung
	$a = \frac{dv}{dt} \rightarrow a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{\text{Ende}} - v_{\text{Anfang}}}{t_{\text{Ende}} - t_{\text{Anfang}}}$	$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \rightarrow \alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{\omega_{\text{Ende}} - \omega_{\text{Anfang}}}{t_{\text{Ende}} - t_{\text{Anfang}}}$

Tabelle 2-3 Kinematische Gleichungen der Translation und der Rotation bei konstanter Beschleunigung

Die Anwendung der kinematischen Gleichungen bei konstanter Beschleunigung verdeutlichen die folgenden Beispiele.

Beispiel: PKW

Ein PKW hat eine konstante Beschleunigung. Er beschleunigt von 0 km/h auf 100 km/h in 8 s. Wie hoch ist die Beschleunigung des Fahrzeugs?

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{100 \frac{km}{h} - 0 \frac{km}{h}}{8 s} = \frac{100.000 m}{3600 s \cdot 8 s} = 3,47 \frac{m}{s^2}$$

Beispiel: Motor

Ein Motor beschleunigt mit einer konstanten Winkelbeschleunigung von 600 1/s². Nach welcher Zeit erreicht der Motor eine Drehzahl von 3000 min⁻¹?

Aus $\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$ folgt:

$$\Delta t = \frac{\Delta \omega}{\alpha} = \frac{2\pi \cdot \Delta n}{\alpha} = \frac{2\pi \cdot (3000 \text{ min}^{-1} - 0 \text{ min}^{-1})}{600 \frac{1}{s^2}} = \frac{2\pi \cdot 3000}{60 s \cdot 600 \frac{1}{s^2}} = 0,52 s$$

2.2.2 Bewegungsabläufe bei elektrischen Antrieben

Lastspiel

Die Bewegungsabläufe von Maschinenelementen erfolgen im Allgemeinen zyklisch. Das heißt, die Bewegungen wiederholen sich regelmäßig. Für die Auslegung ist es sinnvoll, nur einen Bewegungszyklus zu betrachten. Dieser Zyklus wird als Lastspiel bezeichnet. Der reale Bewegungsablauf besteht damit aus einer unendlich langen Anreihung von ein und demselben Lastspiel.

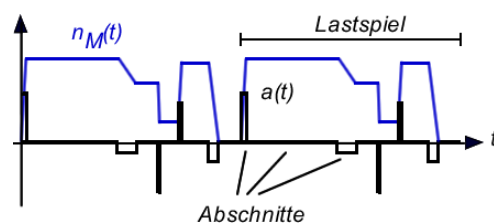


Bild 2-1
Bewegungsablauf und Lastspiel mit Abschnitten konstanter Beschleunigung

Für die verschiedenen Anwendungsfälle elektrischer Antriebe ergeben sich typische Lastspiele.

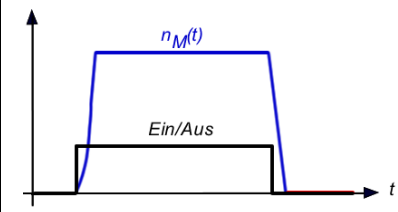
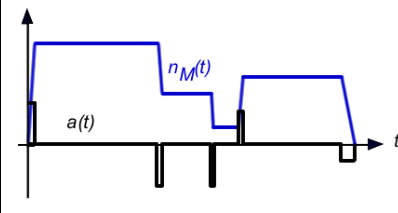
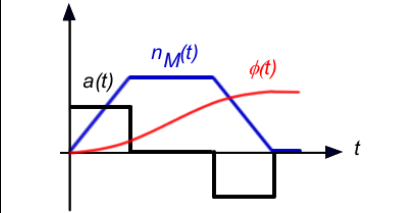
Bewegungsabschnitte

Innerhalb des Lastspiels werden Bewegungsabschnitte definiert. Für jeden Bewegungsabschnitt gilt, dass die Beschleunigung innerhalb des Abschnittes konstant ist.

Damit ergeben sich folgende typische Abschnitte innerhalb eines Lastspiels

- **Beschleunigungsphase**
Der Betrag der Geschwindigkeit nimmt zu.

- **Konstantfahrphase**
Die Geschwindigkeit ist konstant und die Beschleunigung ist 0.
- **Bremsphase**
Der Betrag der Geschwindigkeit nimmt ab.
- **Pause**
Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung sind 0. Das Maschinenelement ist in Ruhe.

Typische Lastspiele	Anwendung	Typisches Lastspiel	Kennzeichen
	Konstantantrieb		Dauerbetrieb mit konstanter Drehzahl. Ein- und Ausschaltvorgänge sind von untergeordneter Bedeutung
	Drehzahlveränderlicher Antrieb		Betrieb mit veränderlicher Drehzahl Beschleunigungs- und Bremsvorgänge müssen betrachtet werden. Oft sind jedoch die auftretenden Lastmomente für die Auslegung relevant.
	Servoantrieb		Die Position bzw. der Weg ist die führende Größe. Die Drehzahl ändert sich laufend. Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sind von großer Bedeutung für die Antriebsauslegung.

Berechnung der Bewegungsgrößen

Die Berechnung der Bewegungsgrößen erfolgt abschnittsweise. Dabei ist zu unterscheiden, ob der Abschnitt einer Beschleunigungs- oder Bremsphase bzw. einer Konstantfahr- oder Pausenphase zuzuordnen ist.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Formeln, die jeweils anzuwenden sind.

Beschleunigungs- oder Bremsphase, $a \neq 0$ bzw. $\alpha \neq 0$	
Beschleunigung	$a = \frac{v_{Ende} - v_{Anfang}}{T} = \text{konstant}$
Winkelbeschleunigung	$\alpha = \frac{\omega_{Ende} - \omega_{Anfang}}{T} = \text{konstant}$
Geschwindigkeit	$v_{Ende} = a \cdot T + v_{Anfang}$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega_{Ende} = \alpha \cdot T + \omega_{Anfang}$

Weg	$\Delta s = \frac{a}{2} \cdot T^2 + v_{Anfang} \cdot T = \frac{v_{Ende} + v_{Anfang}}{2} \cdot T$
Winkel	$\Delta \varphi = \frac{\alpha}{2} \cdot T^2 + \omega_{Anfang} \cdot T = \frac{\omega_{Ende} + \omega_{Anfang}}{2} \cdot T$
Konstantfahrt- oder Pausenphase, a = 0 bzw. α = 0	
Beschleunigung	$a = 0$
Winkelbeschleunigung	$\alpha = 0$
Geschwindigkeit	$v = v_{Anfang} = \text{konstant}$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \omega_{Anfang} = \text{konstant}$
Weg	$\Delta s = v_{Anfang} \cdot T$
Winkel	$\Delta \varphi = \omega_{Anfang} \cdot T$
T:	Dauer der Phase

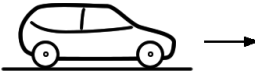
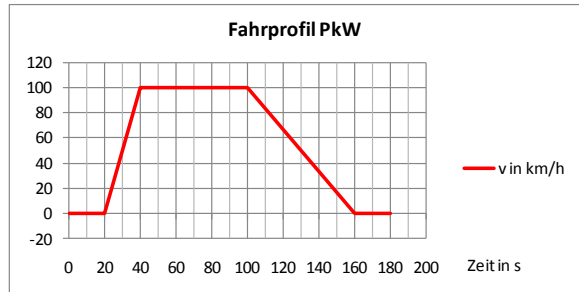
Tabelle 2-4 Kinematische Gleichungen der Translation und der Rotation in verschiedenen Bewegungsabschnitten

Die Anwendung der kinematischen Gleichungen auf komplette Bewegungsabläufe verdeutlichen die folgenden Beispiele:

Beispiel: PKW

Ein PKW weist das nachfolgend dargestellte Geschwindigkeitsprofil auf:

**Beispiel:
Bewegungsgrößen
für einen PKW**

Verlauf		Zeit	Geschwindigkeit
		$t_0 = 0 \text{ s}$	$v_0 = 0 \text{ km/h}$
		$t_1 = 20 \text{ s}$	$v_1 = 0 \text{ km/h}$
		$t_2 = 40 \text{ s}$	$v_2 = 100 \text{ km/h}$
		$t_3 = 100 \text{ s}$	$v_3 = 100 \text{ km/h}$
		$t_4 = 160 \text{ s}$	$v_4 = 0 \text{ km/h}$
		$t_5 = 180 \text{ s}$	$v_5 = 0 \text{ km/h}$

Welche Beschleunigung tritt in den einzelnen Bewegungsabschnitten auf?

Ab-schnitt	Dauer	Beschleunigung
I	$T_I = t_1 - t_0$	$a_I = \frac{v_1 - v_0}{T_I} = \frac{0 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{20 \text{ s}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

	$T_I = 20\text{ s} - 0\text{ s} = 20\text{ s}$	
II	$T_{II} = t_2 - t_1$ $T_{II} = 40\text{ s} - 20\text{ s} = 20\text{ s}$	$a_{II} = \frac{v_2 - v_1}{T_{II}}$ $a_{II} = \frac{100 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{20\text{ s}} = \frac{100\,000\text{ m}}{3600\text{ s} \cdot 20\text{ s}} = 1,389 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
III	$T_{III} = t_3 - t_2$ $T_{III} = 100\text{ s} - 40\text{ s} = 60\text{ s}$	$a_{III} = \frac{v_3 - v_2}{T_{III}}$ $a_{III} = \frac{100 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{60\text{ s}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
IV	$T_{IV} = t_4 - t_3$ $T_{IV} = 160\text{ s} - 100\text{ s} = 60\text{ s}$	$a_{IV} = \frac{v_4 - v_3}{T_{IV}}$ $a_{IV} = \frac{0 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{60\text{ s}} = \frac{-100\,000\text{ m}}{3600\text{ s} \cdot 60\text{ s}} = -0,463 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
V	$T_V = t_5 - t_4$ $T_V = 180\text{ s} - 160\text{ s} = 20\text{ s}$	$a_V = \frac{v_5 - v_4}{T_V}$ $a_V = \frac{0 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{20\text{ s}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Verlauf der Beschleunigung 		

Welcher Weg wird in den einzelnen Bewegungsabschnitten zurückgelegt?

Ab-schnitt	Weg im Abschnitt
I	$\Delta s_I = v_0 \cdot T_I = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 20\text{ s} = 0\text{ m}$
II	$\Delta s_{II} = \frac{a_{II}}{2} \cdot T_{II}^2 + v_1 \cdot T_{II} = \frac{1,389\text{ m} \cdot (20\text{ s})^2}{\text{s}^2 \cdot 2} + 0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 20\text{ s} = 277,8\text{ m}$
III	$\Delta s_{III} = v_2 \cdot T_{III} = \frac{100\,000\text{ m}}{3600\text{ s}} \cdot 60\text{ s} = 1666,7\text{ m}$

IV	$\Delta s_{IV} = \frac{a_{IV}}{2} \cdot T_{IV}^2 + v_3 \cdot T_{IV} = \frac{-0,463 \text{ m} \cdot (60 \text{ s})^2}{\text{s}^2 \cdot 2} + \frac{100\,000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} \cdot 60 \text{ s}$ $= 833,3 \text{ m}$
V	$\Delta s_V = v_4 \cdot T_V = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 20 \text{ s} = 0 \text{ m}$

Welchen Gesamtweg hat der PKW zurückgelegt?

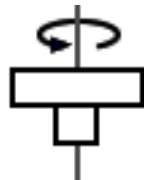
Gesamter Weg	$s = \Delta s_I + \Delta s_{II} + \Delta s_{III} + \Delta s_{IV} + \Delta s_V$ $s = 0 \text{ m} + 277,8 \text{ m} + 1666,7 \text{ m} + 833,3 \text{ m} + 0 \text{ m} = 2777,8 \text{ m}$
--------------	--

Zurückgelegter Weg

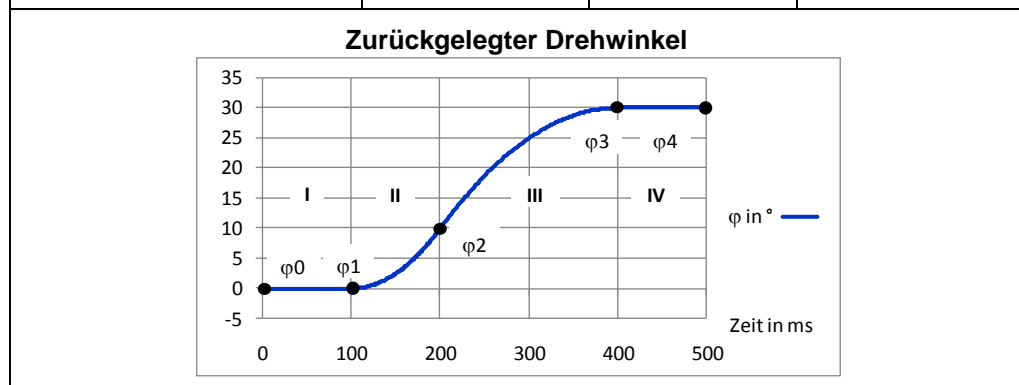
Beispiel: Drehtisch

Ein Drehtisch weist das nachfolgend dargestellte Positionsprofil auf:

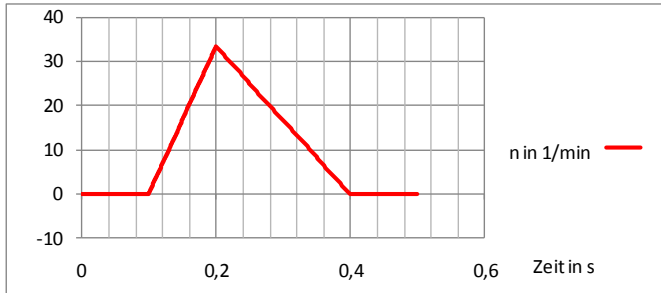
**Beispiel:
Bewegungsgrößen
für einen Drehtisch**



Zeit	Position in °	Position in rad
$t_0 = 0 \text{ ms}$	$\varphi_0 = 0^\circ$	$\varphi_0 = 0$
$t_1 = 100 \text{ ms}$	$\varphi_1 = 0^\circ$	$\varphi_1 = 0$
$t_2 = 200 \text{ ms}$	$\varphi_2 = 10^\circ$	$\varphi_2 = 0,175$
$t_3 = 400 \text{ ms}$	$\varphi_3 = 30^\circ$	$\varphi_3 = 0,524$
$t_4 = 500 \text{ ms}$	$\varphi_4 = 30^\circ$	$\varphi_4 = 0,524$

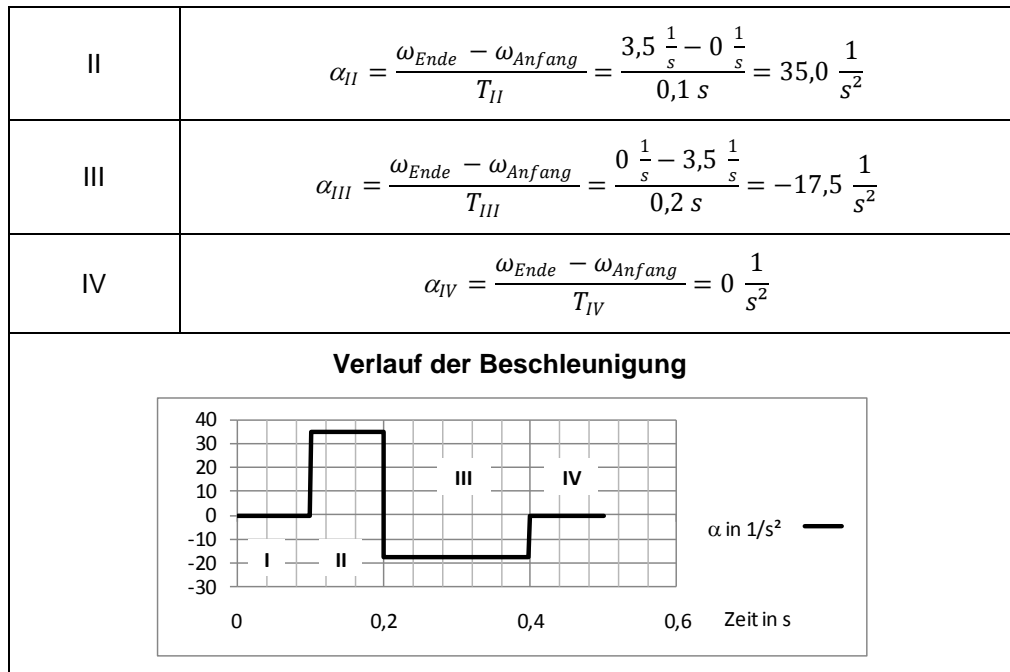


Welche Winkelgeschwindigkeit und Drehzahl erreicht der Drehtisch in den einzelnen Bewegungsabschnitten?

Ab-schnitt	Dauer	Winkelgeschwindigkeit und Drehzahl
I	$T_I = t_1 - t_0$ $T_I = 0,1 \text{ s} - 0 \text{ ms} = 0,1 \text{ s}$	$\omega_{Anfang} = \omega_{Ende} = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{T_I} = 0 \frac{1}{\text{s}}$ $n_{Anfang} = n_{Ende} = \frac{\omega_{Anfang}}{2\pi} = 0 \frac{1}{\text{min}}$
II	$T_{II} = t_2 - t_{01}$ $T_{II} = 0,2 \text{ s} - 0,1 \text{ s} = 0,1 \text{ s}$	$\omega_{Ende} = \frac{2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)}{T_{II}} - \omega_{Anfang}$ $\omega_{Ende} = \frac{2 \cdot (0,175 - 0)}{0,1 \text{ s}} - 0 \frac{1}{\text{s}} = 3,5 \frac{1}{\text{s}}$ $n_{Ende} = \frac{\omega_{Ende}}{2\pi} = \frac{3,5 \cdot 60}{\text{min} \cdot 2\pi} = 33,4 \frac{1}{\text{min}}$
III	$T_{III} = t_3 - t_2$ $T_{III} = 0,4 \text{ s} - 0,2 \text{ s} = 0,2 \text{ s}$	$\omega_{Ende} = \frac{2 \cdot (\varphi_3 - \varphi_2)}{T_{III}} - \omega_{Anfang}$ $\omega_{Ende} = \frac{2 \cdot (0,524 - 0,175)}{0,2 \text{ s}} - 3,5 \frac{1}{\text{s}} = 0 \frac{1}{\text{s}}$ $n_{Ende} = \frac{\omega_{Ende}}{2\pi} = 0 \frac{1}{\text{min}}$
IV	$T_{IV} = t_4 - t_3$ $T_{IV} = 0,5 \text{ s} - 0,4 \text{ s} = 0,1 \text{ s}$	$\omega_{Anfang} = \omega_{Ende} = \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{T_{IV}} = 0 \frac{1}{\text{s}}$ $n_{Anfang} = n_{Ende} = \frac{\omega_{Anfang}}{2\pi} = 0 \frac{1}{\text{min}}$
Verlauf der Drehzahl 		

Welche Winkelbeschleunigung tritt in den einzelnen Bewegungsabschnitten auf?

Abschnitt	Winkelbeschleunigung
I	$\alpha_I = \frac{\omega_{Ende} - \omega_{Anfang}}{T_I} = 0 \frac{1}{\text{s}^2}$



2.3 Kraft- und Drehmomentgleichungen

2.3.1 Grundgleichungen

Kraft und Drehmoment

Die Bewegungen der Körper werden durch Kräfte hervorgerufen, die auf sie einwirken. Die vom elektrischen Antrieb bereitgestellten Kräfte und Drehmomente werden

- zum Beschleunigen und Bremsen der mechanischen Elemente und
- zum Kompensieren der von der Arbeitsmaschine geforderten Lastkräfte und Lastdrehmomente

verwendet.

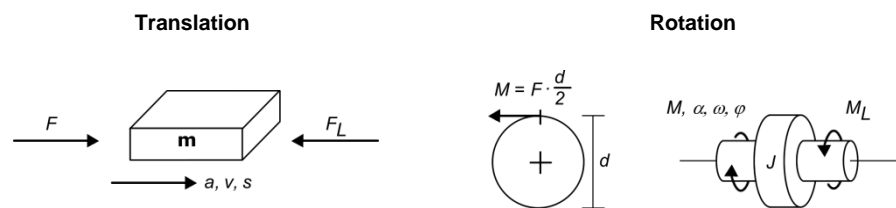


Bild 2-2 Bewegungsgrößen, Kräfte und Drehmomente

Der Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung ergibt sich aus dem Satz von Newton bzw. seiner Erweiterung zum Kraft- bzw. Drehmomentgleichgewicht.

Translation			Rotation		
Größe	Formel	Einheit	Größe	Formel	Einheit

<i>F</i> : Kraft		<i>N</i>	<i>M</i> : Drehmoment	$M = F \cdot \frac{d}{2}$	<i>Nm</i>
Kraftgleichgewicht	$F = F_B + F_L$	<i>N</i>	Drehmomentgleichgewicht	$M = M_B + M_L$	<i>Nm</i>
<i>F_B</i> : Beschleunigungskraft	$F_B = m \cdot a$	<i>N</i>	<i>M_B</i> : Beschleunigungsmoment	$M_B = J \cdot \alpha$	<i>Nm</i>
<i>F_L</i> : Lastkraft <i>M_L</i> : Lastdrehmoment <i>m</i> : Masse der sich linear bewegenden mechanischen Elemente			<i>J</i> : Trägheitsmoment der rotierenden mechanischen Elemente <i>d</i> : Durchmesser, an dem die Lastkraft angreift		

Tabelle 2-5 Kraft- und Drehmomentgleichgewicht

Um die Kraft- und Drehmomentgleichungen verwenden zu können, müssen

- der Bewegungsablauf bzw. die aktuell wirksame Beschleunigung,
- die zu bewegenden Massen und Trägheitsmomente und
- die angreifenden Lastkräfte und Lastdrehmomente

bekannt sein.

Die Beschleunigungen wurden im Abschnitt 2.2.2 bereits behandelt. Die Ermittlung von Massen, Trägheitsmomenten, Lastkräften und Lastdrehmomenten ist Gegenstand der folgenden Kapitel.

2.3.2 Beschleunigungskräfte und -drehmomente

Elektrische Antriebe bewegen mechanische Elemente. Deren Massen *m* und Trägheitsmomente *J* bestimmen die für die Bewegung erforderliche Beschleunigungskräfte *F_B* bzw. die Beschleunigungsmomente *M_B*.

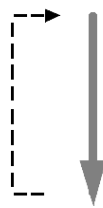
Die Massen und Trägheitsmomente der mechanischen Elemente werden vom verwendeten Material sowie ihrer geometrischen Form bestimmt. Bei Rotationsbewegungen hat zusätzlich die Lage der Rotationsachse einen Einfluss auf das Trägheitsmoment.

.....

**Masse und
Trägheitsmoment
geometrischer
Körper**

3 Auslegungsschritt 1: Auswahl der optimalen Antriebslösung

Das folgende Kapitel behandelt den ersten Auslegungsschritt.



1. Auswahl der optimalen Antriebslösung
2. Definition des Bewegungsablaufs und des Lastspiels
3. Auswahl des Getriebes
4. Auswahl des Motors und des Gebers
5. Auswahl des Stellgerätes
6. Überprüfung der Wirtschaftlichkeit und ggf. Wiederholung der Schritte 1 bis 6 mit einer anderen Antriebslösung

3.1 Überblick über die verfügbaren Antriebslösungen

Verfügbare Antriebslösungen

Elektrische Antriebe sind äußerst vielgestaltig und in unterschiedlichsten Ausführungen verfügbar. Im ersten Auslegungsschritt muss deshalb die optimal geeignete Antriebslösung gefunden werden. Diese wird dann für die folgenden Auslegungsschritte verwendet.

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedenen Typen von Elektromotoren herausgebildet, die jeweils spezifische Stärken und Schwächen sowie bevorzugte Leistungsbe- reiche aufweisen. Berücksichtigt man zusätzlich die verschiedenen Ausprägungen an Stellgeräten, ergibt sich eine Vielzahl von Antriebslösungen.

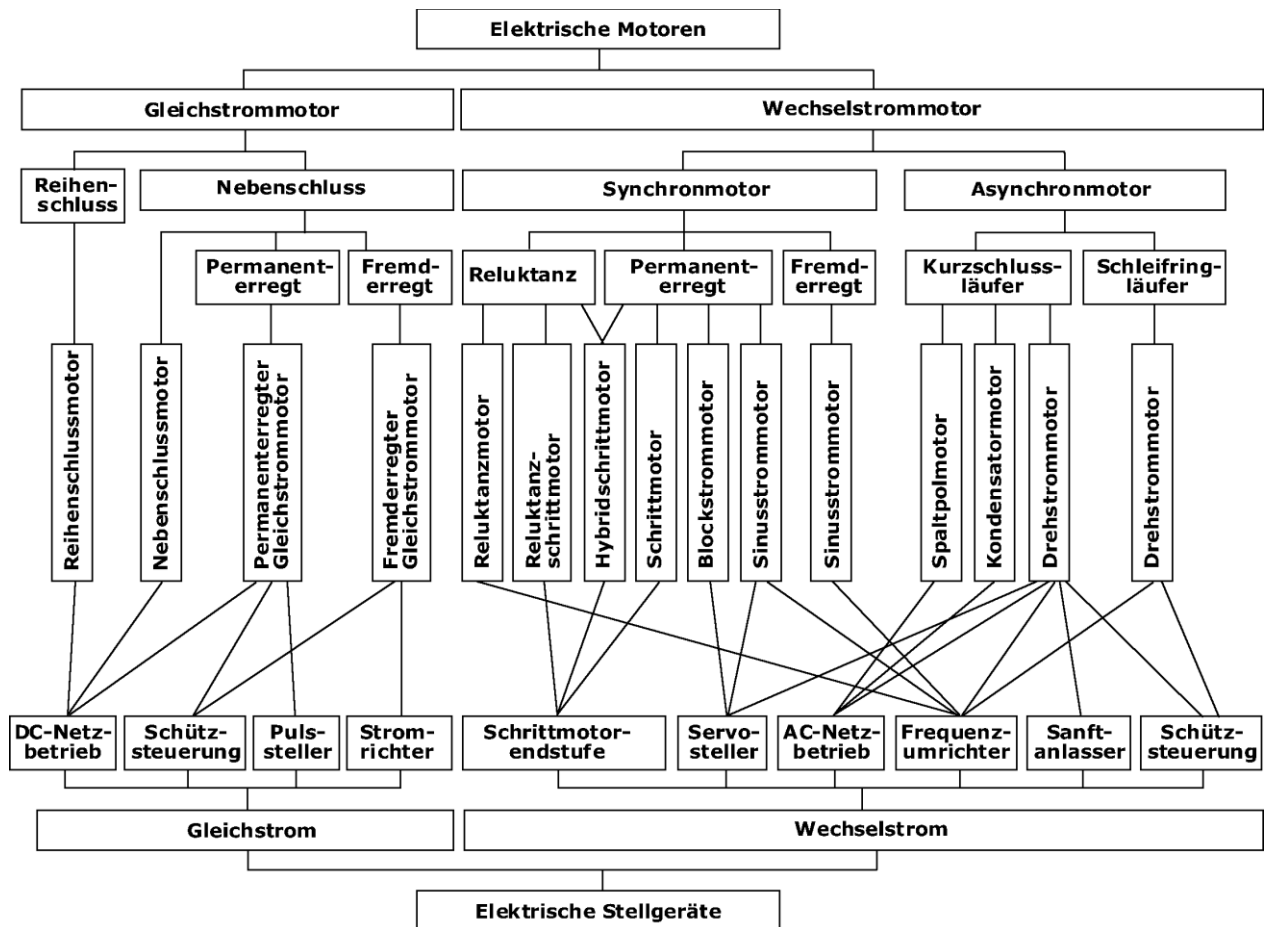


Bild 3-1 Klassifizierung elektrischer Antriebe nach ihrer technischen Realisierung

Entsprechend der Form des Motorstromes unterscheidet man Gleichstromantriebe und Wechsel- bzw. Drehstromantriebe

- **Gleichstromantriebe** verwenden einen Gleichstrommotor und werden mit Gleichstrom betrieben. Bei kleineren Leistungen wird das erforderliche Magnetfeld mit Permanentmagneten, bei größeren Leistungen mit einer separaten Erregerwicklung erzeugt. Für Servoanwendungen kommen als Stellgeräte hochdynamische Pulssteller, für drehzahlveränderbare Antriebe Stromrichter zum Einsatz.
- **Wechselstromantriebe** verwenden Motoren, die mit ein- oder mehrphasigem Wechselstrom betrieben werden. Dabei hat die Frequenz des Motorstromes einen entscheidenden Einfluss auf die Motordrehzahl. Synchronmotoren folgen in ihrer Drehbewegung exakt der Frequenz des speisenden Stromes, während bei Asynchronmotoren eine Differenz zwischen der Frequenz des Motorstromes und der Drehfrequenz auftritt.

Antriebe mit Synchronmotoren verfügen im Allgemeinen immer über ein Stellgerät. Asynchronmotoren können sowohl direkt am Netz als auch mit Stellgeräten betrieben werden.

Bei Verwendung eines Stellgerätes ergeben sich weitere Freiheitsgrade bezüglich des Regelverfahrens. Die Antriebe können gesteuert oder geregelt betrieben werden.

Aus der Vielzahl der Kombinationen wurden die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführten Antriebslösungen extrahiert. Sie decken das Spektrum der im Maschinen- und Anlagenbau sowie im Transportanwendungen eingesetzten Antriebslösungen ab.

Hinweis: Aufbau und Funktion der verschiedenen Antriebslösungen werden im Onlinekurs „Elektrische Antriebe kurz und bündig“ vorgestellt.

3.2 Auswahlsschritte

3.2.1 Vorgehensweise

Aus den theoretisch verfügbaren Antriebslösungen muss die optimale Antriebslösung ausgewählt und anschließend dimensioniert werden.

Die Auswahl der optimalen Antriebslösung erfolgt in 2 Schritten:

1. Im **ersten Schritt** werden alle die Antriebslösungen eliminiert, die die technischen Randbedingungen der Anwendung nicht erfüllen können. Dazu werden **technische Ausschlusskriterien** verwendet: Kann eine Antriebslösung diese nicht abdecken, wird sie für den folgenden zweiten Schritt ausgeschlossen.
2. Im **zweiten Schritt** werden die verbliebenen Antriebslösungen untereinander verglichen und die optimale Lösung ausgewählt. Dazu werden **Leistungskriterien** verwendet.

.....

Schritte zur Auswahl der optimalen Antriebslösung