

Grundlagen der Elektromobilität



Inhaltsverzeichnis

Grundlagen der Elektromobilität	1
1 Energiespeicher.....	4
1.1 Energiespeicher im Vergleich.....	4
1.2 Energiespeicher Akku ("Batterie").....	5
1.3 Energiedichte, Wirkungsgrad, Einsatzgebiete verschiedener Akkutypen.....	7
1.4 Funktionsweise Li-ION-Akku.....	8
2 Warum Elektroantrieb?.....	10
2.1 Verbrennungsmotor vs. Elektroantrieb Darstellung aus Sicht des Herstellers eines Umrüstkits.....	10
2.2 Wichtige Kenngröße: das Drehmoment M	11
3 Funktionsprinzip Gleichstrom-Motor.....	17
3.1 Magnetfeldlinien.....	17
3.2 Durchflutungsgesetz.....	17
3.3 Kraftwirkung auf stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld.....	17
3.4 Stromdurchflossener Rotor (Leiterschleife) im Magnetfeld.....	18
3.5 Kommutierung.....	19
3.6 Pedelec-Motor für Hinterradnarbe (Bionx).....	20
3.7 Pedelec-Motor für Tretlagerantrieb (Panasonic).....	21
3.8 Pedelec-Motor mit innenliegendem Rotor.....	22
3.9 Induktionsgesetz.....	23
3.10 Motorersatzschaltbild.....	24
4 Berechnungen zum Motor im E-Bike, Pedelec.....	25
4.1 Versuchsaufbau Messungen an der Gleichstrommaschine.....	25
4.2 Messung der Leerlaufdrehzahl in Abhängigkeit von der Klemmenspannung.....	26
4.3 Messung des Klemmenstroms in Abhängigkeit vom Drehmoment.....	27
4.4 Messung der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie.....	28
4.5 Formeln und Kennlinien Elektromotor	29
4.6 Erklärung der Motorkennlinien $n(M)$ und $I(M)$	30
4.7 Erklärung der Motorkennlinien $P_{ab}(M)$ und $\eta(M)$	31
4.8 Zusammenfassung: Strom und Spannung beim Motor.....	32
4.9 Arbeitsbereich im Kennlinienfeld.....	33
4.10 Beispiel Änderung des Unterstützungsgrades.....	33
4.11 Welche Kräfte müssen bei der Fortbewegung überwunden werden?.....	34
4.12 Kennlinienfeld Drehmoment in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.....	35
4.13 Kennlinienfeld Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.....	36

4.14 Wiederholung wichtiger elektrischen Grundgrößen.....	37
4.15 Einfache Reichweitenberechnung.....	37
4.16 Grundlegende Berechnungen aus bekannten Motordaten.....	38
4.17 Berechnung der Klemmenspannung für 25% Motorunterstützung.....	39
4.18 Energieverbrauch in der Ebene, berechnet mit Motordaten.....	41
4.19 Berechnung des Energieverbrauchs mit Leistung und Wirkungsgrad.....	42
4.20 Bergfahrt.....	42
4.21 Heimfahrt.....	42
4.22 Betriebskosten E-Bike gegenüber Auto mit Verbrennungsmotor	43
5 Steuerschaltungen.....	44
5.1 Eigenschaften verschiedener Transistoren.....	44
5.2 Datenblatt-Beispiele.....	47
5.3 Versuche: Wie schnell schalten die Transistortypen?.....	48
5.4 Pulsweitenmodulation PWM.....	51
5.5 Transistor als Verstärker oder elektronischer Schalter.....	55
5.6 Gegenüberstellung digitale PWM-Steuerung und analoge Steuerung.....	56
5.7 Übung Berechnungen zu Transistorschaltungen.....	59
5.8 Transistorbrücke zur Richtungsumschaltung.....	60
5.9 Spule an geschalteter Gleichspannung.....	63
5.10 Tiefsetzsteller.....	66
5.11 Tiefsetzsteller zur Motorsteuerung.....	68
5.12 Vergleich zwischen linearem Spannungsregler und Tiefsetzsteller.....	72
5.13 Vergleichs-Berechnungen Tiefsetzsteller und Spannungsregler	74
5.14 Übung: Tiefsetzsteller-IC ersetzt linearen Spannungsregler	75
5.15 Tiefsetzsteller für energiesparende LED-Beleuchtung.....	77
5.16 Der Vorteil eines Tiefsetzstellers gegenüber einem Vorwiderstand.....	78
5.17 Vorschau: Hochsetzsteller -> LPE 15, Jahrgangstufe 2.....	80
5.18 Vorschau: Tiefsetzsteller / Hochsetzsteller beim Pedelec für Motor / Generatorbetrieb -> LPE 15, Jahrgangstufe 2.....	81
5.19 Vorschau: Vierquadrantenbetrieb -> LPE15.....	83

Version: 01.05.13, 12:18

1 Energiespeicher

1.1 Energiespeicher im Vergleich

(Quelle: Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektroauto>, 21.12.2012)

Zentraler Punkt in der Entwicklung von Elektrofahrzeugen ist der Energiespeicher mit hohen Energiedichte. Erst dann können Elektroautos Reichweiten erzielen, die denen von verbrennungsmotorisch angetriebenen Autos ebenbürtig sind.

In der folgenden Tabelle wird verglichen, welchen Treibstoffvorrat ein Auto bei unterschiedlichen Antriebsarten laden und transportieren muss, um ohne Nachzutanken etwa 400 km weit zu fahren. Dafür benötigt man etwa 50 kWh Antriebsenergie.

Es fließen Schätz- und Mittelwerte ein, daher gilt bei allen Zahlenwerten eine Toleranz von etwa $\pm 30\%$.

Ermittlung der Masse des Energiespeichers für eine Reichweite von 400km

Treibstoff	Energiedichte (kWh/kg)	Antriebskomponente	mittlerer Wirkungsgrad des Antriebs	Gesamtmasse des Energiespeichers in kg für 50 kWh nutzbare Energie
Strom aus Bleiakkumulator	0,03	Elektromotor mit Nutzbremse	95 % bis zu 97 %	1718*
Strom aus Lithium-Ionen-Akkumulator	0,13	Elektromotor mit Nutzbremse	95 % bis zu 97 %	396*
Dieselmotorkraftstoff	11,8	Dieselmotor mit Getriebe	25 % 23,5 %	18 (+5 Tankbehälter)
Superbenzin	11,1	Ottomotor mit Getriebe	15 % 14 %	32* (+5 Tankbehälter)
Flüssiger Wasserstoff	33,3	Wasserstoffspeicherung Brennstoffzelle PAFC Elektromotor	38 % und 95 %	4,1 (+Tankbehälter)
Druckwasserstoff 700 bar		Wasserstoffspeicherung Brennstoffzelle PEMFC Elektromotor	60 % und 95 %	3 (+125 Tankbehälter)

Anmerkungen:

- Bei Nutzbremmung wird der Energiespeicher aufgeladen. Die Ersparnis hängt dabei maßgeblich von der Fahrweise ab, darüber hinaus von der Dimensionierung der Antriebe und dem Wirkungsgrad der Leistungselektronik.
- Die Energiedichte bei Benzin, Diesel und Wasserstoff ist als unterer **Heizwert** angegeben. Mit geeigneten Maschinen kann auch der obere Heizwert bzw. **Brennwert** des Kraftstoffs genutzt werden, der ca. 10 % höher ist.
- Diesel- und Ottomotor laufen nicht ständig bei optimaler Drehzahl und Belastung, deshalb liegen die mittleren Wirkungsgrade deutlich unter den Maximalwirkungsgraden 45 % bzw. 30 %. Der Wirkungsgrad ist hier auf den unteren Heizwert des Treibstoffs bezogen.
- Bei Akkus ist die Masse des Behälters im Wert der Energiedichte bereits enthalten, bei Diesel, Benzin und Wasserstoff muss er addiert werden. Aufgrund der leichten Elektromotoren, des Wegfalls eines Schaltgetriebes, der Auspuffanlage und der Startbatterie ergeben sich beim Elektrofahrzeug weitere Gewichtseinsparungen, die hier nicht berücksichtigt sind.
- Bei den mit * gekennzeichneten Werten wurde die Gesamtmasse von Bub gegenüber dem Original verändert, da dort niedrigere Werte angegeben wurden und nicht ersichtlich ist, woher diese Werte stammen.

1.1.1 Berechnung des Kraftstoffverbrauchs aus der gegebenen Tabelle

Aufgabe: Wieviel Liter Diesel pro 100km benötigt ein Auto mit den oben dargestellten werten? Dichte Diesel: 0,83 kg/L

$$\frac{18\text{kg}}{0,83\frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 21,7\text{L} \quad \text{pro 400km} \Rightarrow \frac{21,7\text{L}}{400\text{km}} = 0,0542\frac{\text{L}}{\text{km}} = \frac{5,4\text{L}}{100\text{km}}$$

1.1.2 Ermittlung der zu Grunde liegenden Berechnungsformel

Welche Berechnung liegt der obenstehenden Tabelle zugrunde?

$$m_{\text{Speicher}}(50\text{kWh}) = \frac{50\text{kWh}}{\text{Energiedichte in } \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot \text{Wirkungsgrad}}$$

Beispiel Diesel: $m_{\text{Speicher}}(50\text{kWh}) = \frac{50\text{kWh}}{11,8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot 0,234} = 18,1\text{ kg}$

Beispiel Litium-Ionen-Akku: $m_{\text{Speicher}}(50\text{kWh}) = \frac{50\text{kWh}}{0,13 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot 0,97} = 396\text{ kg}$

1.1.3 Energieverbrauch für 100km

Der Tabelle wurde ein Energieverbrauch von 50kWh für 400km zugrunde gelegt.

Dies entspricht einem Energieverbrauch von $\frac{50\text{kWh}}{400\text{km}} = \frac{12,5\text{kWh}}{100\text{km}}$

Vergleich aktueller Elektrofahrzeuge:

Modell	Sitze	Reichweite (km)	Vmax (km/h)	Verbrauch je 100km (kWh)	Ladezeit Standard (Stunden)	Kapazität Fahrbatterie (kWh)	Gewicht leer mit Akku (kg)	monatl. Produktion
Mitsubishi i-MiEV	4	150	130	13,5	6	16	1110	5650
Nissan Leaf	5	175	150	21 [21]	7 (3,3kW) 10 (2,3kW)	24	1520	3300
Tesla	5(+2)	483	201	17	24	85	2108	1000

(Quelle Tabellenauszug: http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Elektroautos_in_Serienproduktion 27.12.2012)

1.2 Energiespeicher Akku ("Batterie")

(Quelle: **Universität Stuttgart**, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Prof. Dr. Ing. A. Voß: **Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität, Dez 2009**)

Die Batterie ist ein elektrochemischer Energiespeicher, bei dessen Entladung chemisch gespeicherte Energie über eine elektrochemische Redoxreaktion in elektrische Energie umgewandelt wird. Bei geeigneter Paarung von Anoden- und Kathodenmaterial findet an der Anode eine Stoffoxidation statt (Abbildung 2-2). Die freiwerdenden Elektronen wandern über einen elektrischen Verbraucher zur Kathode und führen dort zu einer Stoffreduktion. Gleichzeitig kommt es über den Ionenstrom durch einen Ionen leitenden Elektrolyten zu einem Ladungsausgleich zwischen Kathode und Anode. Bei Akkumulatoren sind diese Reaktionen umkehrbar (reversibel), sodass die Batterie bei Zufuhr elektrischer Energie wieder aufgeladen werden kann.

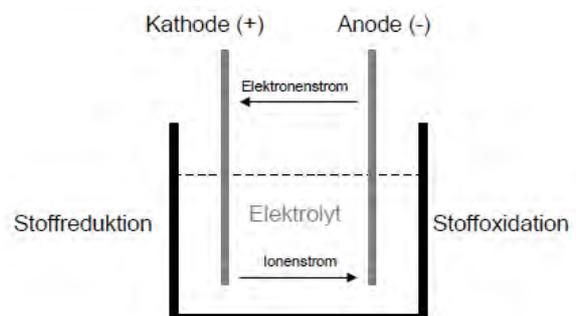


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung einer Batterie während der Entladung

1.2.1 Anforderungen an Akkumulatoren in Fahrzeugen

Der entscheidende Faktor für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen sind die Batterien, die allerdings zuerst noch weiterentwickelt werden müssen. Als Hindernisse sind hier vor allem ihre derzeit hohen Kosten, die niedrige Energiedichte sowie der daraus resultierende große Platzbedarf zu nennen. Sie führen dazu, dass der Einsatzschwerpunkt für Batterie betriebene Elektrofahrzeuge vornehmlich auf Kurzstrecken gesehen wird. Ein weiterer entscheidender Nachteil gegenüber Verbrennungsmotoren ist die lange Aufladezeit für Batterien von meist mehreren Stunden, die mit einer konventionellen Fahrzeugbetankung nicht konkurrieren kann. Mithilfe von Schnellladesystemen lässt sich diese Zeit bei einigen Batterievarianten zwar deutlich reduzieren, jedoch ist damit zumeist auch eine Abnahme der Lebensdauer verbunden.

Gewünschte Eigenschaften von Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen sind:

- hohe Energiedichte zur Ermöglichung großer Reichweiten
- hohes Leistungsvermögen zur Anpassung an unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten
- guter Ladewirkungsgrad, möglichst verbunden mit einer Schnellladefähigkeit
- ausreichende mechanische Stabilität
- Belastbarkeit bezüglich hoher und tiefer Temperaturen
- lange Lebensdauer

1.2.2 Blei-Akku

Die älteste wieder aufladbare Batterievariante ist die Blei-Säure Batterie (Pb-PbO₂), die zurzeit in fast allen Fahrzeugen als Starterbatterie eingesetzt wird. Ihre Eigenschaften sind

- ausgereift
- hohe Verfügbarkeit
- niedriger Preis
- niedrige Energiedichte
- fehlenden Schnellladefähigkeit

Die Bleibatterien sind daher für Elektroautos ungeeignet.

1.2.3 Ni-Cd- und Ni-MH-Akku

Die Nickel-Cadmium Batterie (Ni-Cd) gehört ebenfalls zu den ältesten wieder aufladbaren Batterietypen, ist in der EU aufgrund der toxischen und kanzerogenen Eigenschaften von Cadmium seit einigen Jahren verboten (es existieren jedoch viele Ausnahmegenehmigungen).

Die Nickel-Metallhydrid (Ni-MH) Batterie ist eine viel genutzte Batterie für elektromobile Fahrzeuganwendungen (z. B. Toyota Prius Hybrid). Ihre Vorteile liegen in einer akzeptablen Energiedichte sowie einer hohen Anzahl erreichbarer Ladezyklen bei fehlendem Memory-Effekt.

1.2.4 Li-ION-Akku

Als weltweit erster Mobilhersteller verwendet Mercedes Benz die Lithium-Ionen Batterie ab 2009 serienmäßig im S 400 BlueHybrid. Neben der im Vergleich zur Ni-MH Batterie deutlich höheren Energiedichte der Li-Ion Batterie (Tabelle 2-1) zählen die folgenden Punkte zu ihren weiteren positiven Eigenschaften:

- kein Memory Effekt
- keine Verwendung toxischer Substanzen
- 40 % kleiner und nur etwa halb so schwer wie vergleichbare Ni-MH Batterien,
- derzeit bis zu 1000 Ladezyklen
- Verwendung preislich unkritischer Rohstoffe

Dem stehen jedoch derzeit noch eine Reihe von Problemen entgegen, die es durch konsequente Weiterentwicklung dieser Technologie zu lösen gilt. Dazu zählen:

- extreme Empfindlichkeit gegenüber Überladung,
- mögliche Selbstzündung bei zu starker/schneller Entladung/Ladung
- empfindlich gegenüber Tiefentladung,
- momentan noch zu teuer

Eine vielversprechende Weiterentwicklung der Li-Ion Batterie ist die Lithium-Polymer Batterie (Li-Po), die statt eines flüssigen Elektrolyten einen Elektrolyten auf Polymerbasis verwendet. Energie- und Leistungsdichte lassen sich so nochmals steigern. Des Weiteren kann sie mit dem flexiblen Polymer als Elektrolyt quasi jede Form annehmen.

1.3 Energiedichte, Wirkungsgrad, Einsatzgebiete verschiedener Akkutypen

(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>)

Akkumulatortyp	Energiedichte (Wh/kg)	Ladewirkungsgrad	Besonderheit	Einsatz
Bleiakkumulator	30	60–70 %		Starterbatterie Auto
Lithium-Ionen-Akkumulator auf der Basis von LiCoO ₂	120–210	90,00%	neuere Modelle schnellladefähig	Handy, Laptop
Lithium-Polymer-Akkumulator	140	90,00%	praktisch beliebige Bauform möglich	
Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator	80-100	90,00%	schnellladefähig, hochstromfähig, eigensicher	
Lithium-Titanat-Akkumulator	70–90	90–95 %	schnellladefähig	
Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator (Zebra-Batterie)	100–120	80–90 %	300 °C Betriebstemperatur, keine Selbstentladung aber Heizverluste 10-20%	
Nickel-Eisen-Akkumulator	40	65-70 %	sehr unempfindlich gegen Über- und Tiefentladung	
Nickel-Cadmium-Akkumulator	40–60	70,00%	EU-weit verboten, aber mit vielen Ausnahmen.	
Nickel-Metallhydrid-Akkumulator	60–110	70,00%	Nachfolger Ni-Cd-Akkus	A, AA, AAA -Zellen 1,2V
Zinn-Schwefel-Lithium-Akkumulator	1100	?	Experimenteller Prototyp[6]	

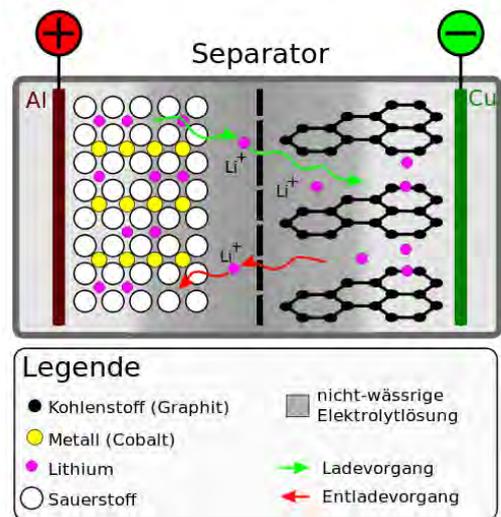
1.4 Funktionsweise Li-ION-Akku

Aufbau

Eine Lithium-Ionen-Zelle besteht aus

- Grafit-Elektrode (negativ)
- Lithium-Metalloxyd-Elektrode (positiv)
- Mikroporöser Separator, der nur für die Lithium-Ionen durchlässig ist und die beiden Seiten trennt.

Das Lithium-Metalloxyd kann Mangan, Nickel oder Kobalt sein. Die Zusammensetzung hat Einfluss auf die Eigenschaften des Lithium-Ionen-Akkus und ist je nach Hersteller und Güteklasse unterschiedlich. Die Nennspannung von Li-Ionen-Zellen ist abhängig vom Elektrodenmaterial und liegt bei 3,6 oder 3,7 Volt.

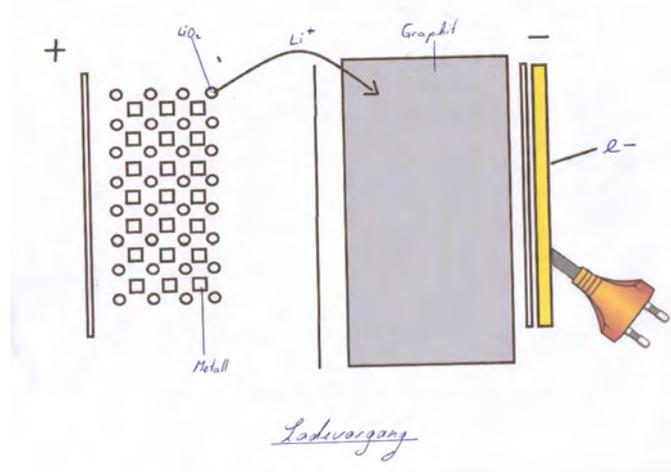


Lithium ist das leichteste Metall und reagiert heftig mit Wasser. Deshalb kommt als Elektrolyt ein wasserfreies, aber brennbares Lösungsmittel zum Einsatz. Das Lösungsmittel ist der Grund, warum es gelegentlich Meldungen von explodierenden oder brennenden Notebook-Akkus gibt. Hierbei hat sich das Elektrolyt entzündet. Die genaueren Gründe sind vielfältig. In der Regel kommt es zu Akku-Rückrufaktionen, wenn fehlerhafte Li-Ionen-Akkus festgestellt werden.

Aufladen:

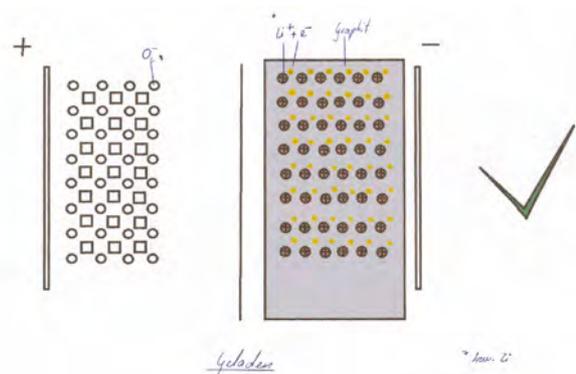
Zum Aufladen werden mit dem Ladegerät Elektronen bereitgestellt, welche am Minuspol anliegen. Es wandern Li+ Ionen durch das Elektrolyt bis hin zum Graphit, wo sie sich mit einem e- zusammen einlagern. Auf der Seite der Kathode bleiben nun negative Ionen übrig.

Dieser Vorgang wird fortgeführt bis alle Li+ eingelagert und mit einem e- versehen sind.



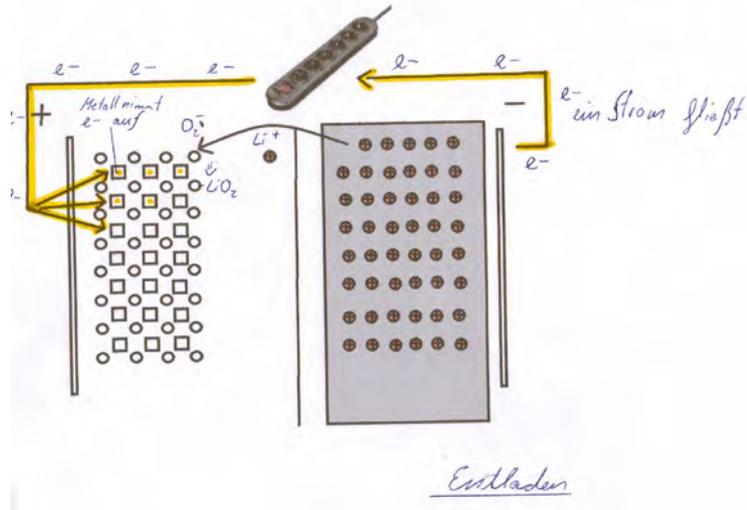
Geladener Zustand:

Im Geladenen Zustand sind im Graphit die Lithium-Atome eingelagert. Die Stromquelle wird entfernt und der Akkumulator ist einsatzbereit.



Entladen:

Beim Entladen wird nun ein Verbraucher angeschlossen, welcher nun eine Art Brücke für die e^- bildet. Sie wandern durch ihn hindurch zur Kathode, wo sie sich im Metall einlagern. Zeitgleich wandern die Li^+ Ionen zurück durch das Elektrolyt zu den Ionen und bilden vereinfacht wieder Lithiumoxid.



2 Warum Elektroantrieb?

2.1 Verbrennungsmotor vs. Elektroantrieb

Darstellung aus Sicht des Herstellers eines Umrüstkits.

2.1.1 Informationen zu Leistung und Verbrauch

- Elektro-Motor BEA-AC25
- Batterie-Spannung 100V
- max. Motorleistung (P) 25kW
- max. Drehmoment (T) 120Nm
- max. Motordrehzahl 6000 U/min
- Motor 30cm x 35cm, 60kg

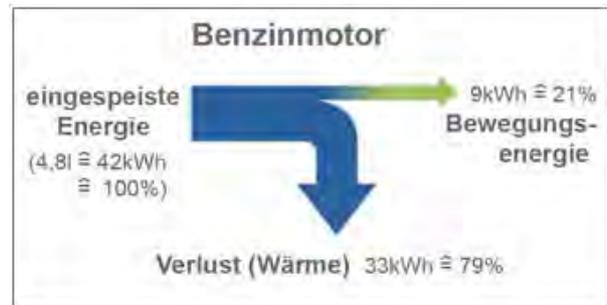
(Quelle: <http://www.bea-tricks.de/datenfakten.html>)

Im Lieferumfang des BEA-tricks-Umrüstkits ist ein konfektionierter Akkublock vom Typ Lithium Ionen enthalten. Der BEA-tricks-Akkublock hat eine Nennspannung von 100Volt. Das ergibt bei einer Kapazität von 176Ah eine Energie von 18kWh.

2.1.2 Die Effizienz des BEA-tricks-Elektromotors

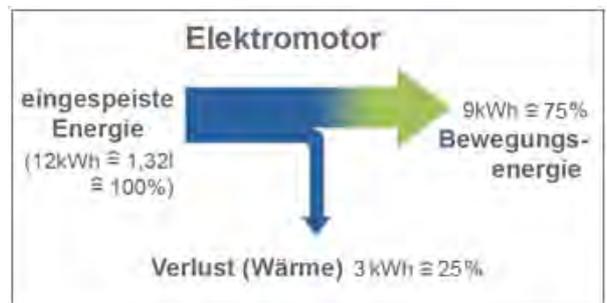
Vorher: Benzin-Motor

- Verbrauch
Stadtverkehr 6,0l / 100km
Landstraße 4,0l / 100km
Durchschnitt 4,8l / 100km
- Abgas-Norm EU3 (grüne Feinstaubplakette)
- CO₂-Ausstoß ≈ 113g/km



Nachher: E-Motor BEA-AC25

- Verbrauch
Stadtverkehr 11kWh / 100km
Landstraße 13kWh / 100km
Durchschnitt 12kWh / 100km
- Abgas-Norm 100% emissionsfreier Motor **
** CO₂-Ausstoß ≈ 53,1g/km bei der Stromerzeugung im Residualmix



2.1.3 Geschwindigkeit & Beschleunigung

Die Reichweite eines Fahrzeuges mit implementiertem BEA-tricks - Umrüstkitt bewegt sich im Stadtverkehr, je nach Akkugröße und -typ, zwischen 100 - 150km.

Direktantrieb	Standardübersetzung
Höchstgeschw.	95 km/h
Beschl. 0-50 km/h	6 s
Beschl. 0-80 km/h	13 s

2.1.4 schwierige Bewertung

Beim Versuch, die Angaben zu kontrollieren fällt uns auf, dass uns Grundkenntnisse fehlen, die es uns ermöglichen, die Angaben objektiv zu bewerten.

Daher beschäftigen wir uns zunächst mit den

- grundlegenden Eigenschaften von Elektroantrieben,
- Verständnis der Grundgrößen (Drehmoment, ...)
- Energiequelle Akku oder ...?

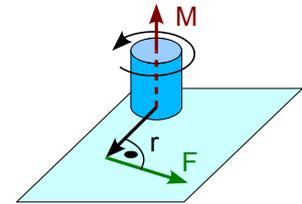
2.2 Wichtige Kenngröße: das Drehmoment M

Das Drehmoment ist eine physikalische Größe in der klassischen Mechanik. Es kann die Rotationsgeschwindigkeit eines Körpers ändern, womit es für Drehbewegungen dieselbe Rolle wie die Kraft für die geradlinige Bewegung spielt

Die international verwendete Maßeinheit für das Drehmoment ist das Newtonmeter. Sein übliches Formelzeichen ist M (Anlehnung an die englische Bezeichnung moment of force).

Wirkt eine Kraft F senkrecht auf einen Hebelarm der Länge r, so ergibt sich der Betrag des Drehmoments aus der Länge des Hebelarms multipliziert mit dem Betrag der Kraft:

$$M = F \cdot r \quad [M] = 1\text{Nm}$$



Bei Motoren werden oft 2 Werte für das Drehmoment angegeben: Der Bemessungswert (auch Nennwert oder Nominalwert genannt) und der Maximalwert.

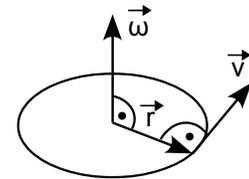
Aus dem Drehmoment lässt sich die abgegebene mechanische Leistung berechnen:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}, \text{ mit } W = F \cdot s \text{ (Kraft mal Weg) und } v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{ ergibt}$$

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta s \cdot F}{\Delta t} = v \cdot F$$

sich:

mit $M = F \cdot r \rightarrow F = \frac{M}{r}$, $v = \omega \cdot r$ und $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ ergibt sich:



$$P = v \cdot F = \omega \cdot r \cdot \frac{M}{r} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

Zusammenfassung:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = v \cdot F$$

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

$$[P] = 1\text{Nm/s} = 1\text{W}$$

W = Arbeit in Nm = Ws, t = Zeit in s, v = Geschwindigkeit in m/s, F = Kraft in N

M = Drehmoment in Nm, ω = Winkelgeschwindigkeit in 1/s, n = Drehzahl in 1/s

Achtung: Das vom Motor abgegebene Drehmoment (Motordrehmoment) ist nur dann identisch mit dem auf das Rad wirkende Drehmoment (Raddrehmoment), wenn kein Getriebe oder keine Kette vorhanden ist und der Motor direkt auf die Radachse wirkt (Narbenmotor).

2.2.1 Beispiel Drehmoment Bergauffahrt

Fährt man mit 25km/h auf seinem Fahrrad oder E-Bike in der Ebene, dann muss am Hinterrad ein Drehmoment von ca. 10Nm aufgebracht werden.

Fährt man mit 8km/h auf seinem Fahrrad oder E-Bike einen Berg mit 10% Steigung nach oben, dann muss am Hinterrad ein Drehmoment von ca. 37,5Nm aufgebracht werden.

Abschätzung der Kraft, die man auf das Pedal ausüben muss:

Annahmen:

- 1:1-Übersetzung (vorne und hinten an der Kette gleiche Zähnezahl)
- Pedal steht gerade waagrecht

Tretkurbel-Länge $r = 0,175\text{m}$

$$M = F \cdot r \rightarrow F = \frac{M}{r} = \frac{37,5\text{ Nm}}{0,175\text{ m}} = 214\text{ N}$$

Dies entspricht der Kraft, die eine Masse von $m = \frac{F}{g} = \frac{214\text{N}}{9,81\text{N/kg}} = 22\text{kg}$ ausüben würde!

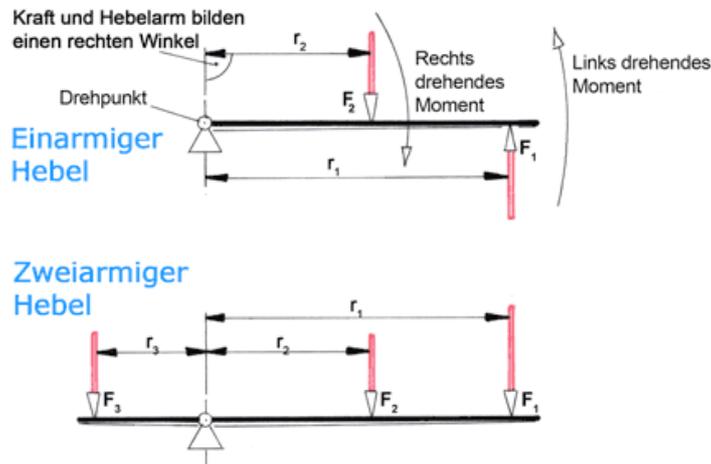
Wenn man nun berücksichtigt, dass das aufzubringende Drehmoment ein Mittelwert ist und man in der angenommenen Pedalstellung die maximale Kraft ausübt, so wird deutlich, dass diese Bergfahrt ganz schön anstrengend ist!

(Im Kapitel 2.2.6 Auftretende Drehmomente beim Fahrrad, Seite 16 kommen wir noch einmal auf das Problem zurück)

2.2.2 Beispiel Drehmomente beim Hebel

(Quelle: lehrerfreund.de)

Hebelarten

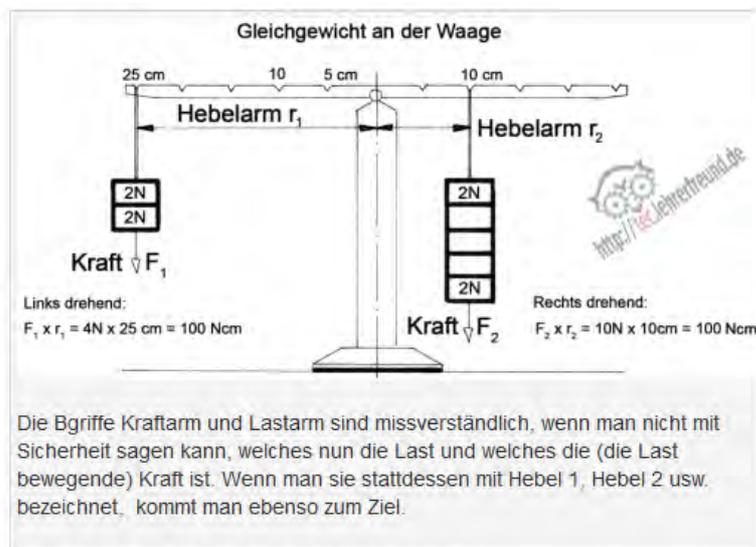


3. Das Hebelgesetz

Am **Beispiel einer Waage** ist das Hebelgesetz leicht zu verstehen. Die Waage bleibt im Gleichgewicht, wenn das Produkt aus Kraft mal Abstand vom Drehpunkt auf beiden Seiten gleich ist. Daraus folgt das Hebelgesetz:

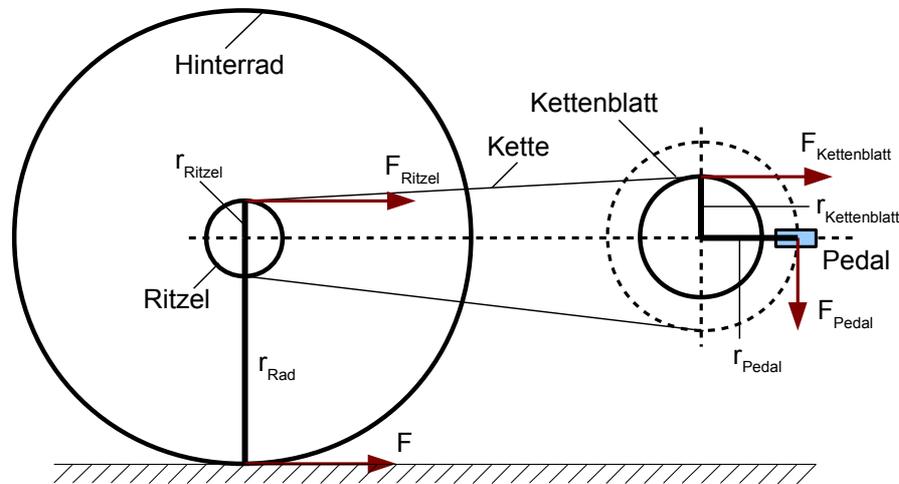
$$\text{Kraft} \cdot \text{Kraftarm} = \text{Last} \cdot \text{Lastarm}$$

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$



Erkenntnis: Die Kräfte alleine zählen nicht!

2.2.3 Beispiel Drehmomente am Fahrrad / E-Bike



Bewegt der Fahrer das Pedal, dann erzeugt er über die **Tretkraft** F_{Pedal} und den **Kurbelradius** r_{Pedal} ein Drehmoment $M_{Pedal} = F_{Pedal} \cdot r_{Pedal}$

Das **Drehmoment** M_{Pedal} wird (über das Tretlager) auf das **Kettenblatt** übertragen. Dort wirkt die Kraft $F_{kettenblatt}$ am Radius $r_{kettenblatt}$:

$F_{kettenblatt} > F_{pedal}$ weil $r_{kette} < r_{pedal}$ und $F \cdot r = M = \text{konstant}$.

Über die **Kette** wirkt $F_{kettenblatt}$ auch am **Ritzel**: $F_{Ritzel} = F_{kettenblatt}$

Das **Drehmoment** $M_{Ritzel} = F_{Ritzel} \cdot r_{Ritzel}$ ist kleiner als $M_{kettenblatt}$ (= M_{pedal}).

Weil das Ritzel beim Treten zusammen mit der Nabe und dem Reifen ein starres System bildet, wirkt das Ritzelmoment M_{Ritzel} auch am **Radumfang**: $M_{Rad} = F_{Rad} \cdot r_{Rad}$.

In der skizzierten Situation ist M_{Rad} kleiner als M_{pedal}

Man kann deshalb auch sagen: **Fahrradantriebe sind Drehmomentwandler.**

2.2.4 Aufgabe "Fahrradantrieb" (in Arbeit)

(Quelle: <http://www.lehrerfreund.de/technik/1s/fahrrad-antrieb/3018>)

Beim Fahren erzeugt der Fahrer eine Tretkraft $F_p = 175 \text{ N}$. Der Kurbelradius r_p ist 165 mm . Kettenblatt $\varnothing 186,1 \text{ mm}$ (46 Zähne; $12,7 \text{ mm}$ Zahnteilung), Ritzel $\varnothing 76,8 \text{ mm}$ (19 Zähne; $12,7 \text{ mm}$ Zahnteilung), Hinterrad $\varnothing 650 \text{ mm}$.

Berechnen Sie:

- M_p
- F_k
- F
- Übersetzung zwischen Pedal und Hinterrad (über die Drehmomente)
- Kraftübersetzung $F_p : F$ (Beachten: In der Fahrradtechnik werden Übersetzungen anders gerechnet als im Maschinenbau: $i = M_1/M_2 = z_1/z_2 = n_2/n_1$)

a) Pedalmoment



$$M_p = F_p \cdot r_p$$

$$= 175 \text{ N} \cdot 0,165 \text{ m}$$

$$= \underline{28,875 \text{ Nm}}$$

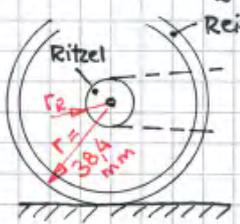
Dieses Moment wirkt auch am Kettenblatt, weil dieses zusammen mit dem Pedal ein starres System bildet

b) Kettenblattkraft $F_k = \frac{M_p}{r_k} = \frac{28,875 \text{ Nm}}{0,09305 \text{ m}}$

$$= 310,32 \text{ N}$$

$$0,09305 \text{ m} = 93,05 \text{ mm} = \frac{186,1 \text{ mm}}{2}$$

Weil F_k von der Kette auf das Ritzel übertragen wird, ist $F_k = F_r = 310,32 \text{ N}$



c) Das Ritzelmoment M_r und das Radumfangsmoment M_{Rad} sind gleich groß, weil Ritzel und Reifen ein starres System bilden.

$$F = \frac{M_r}{r} = \frac{M_k}{r} = \frac{F_k \cdot r_R}{r}$$

$$= \frac{310,32 \text{ N} \cdot 0,0384 \text{ m}}{0,325 \text{ m}}$$

$$= \underline{36,67 \text{ N}}$$

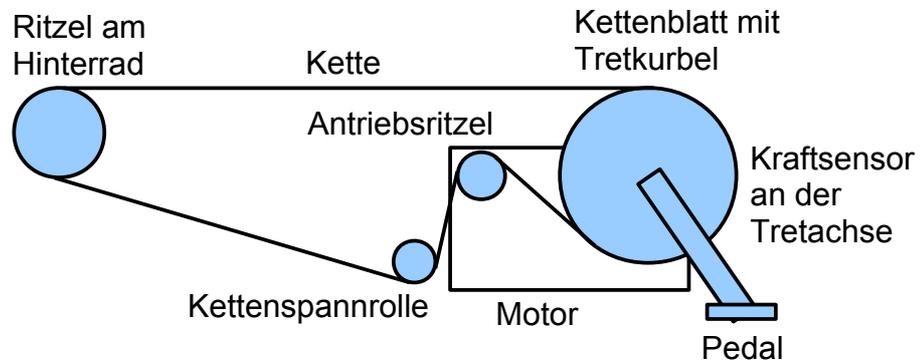
d) $i = \frac{M_R}{M_p} \rightarrow M_R = F \cdot r = 36,67 \text{ N} \cdot \frac{0,65 \text{ m}}{2}$

$$M_R = 11,92 \text{ Nm}$$

$$= 11,92 \text{ Nm} : 28,875 \text{ Nm} = \underline{0,413}$$

e) $i = F_p : F = \frac{175 \text{ N}}{36,67 \text{ N}} = \underline{4,77}$ d.h. die Tretkraft ist 4,77 Mal größer als die Umfangskraft am Reifen

2.2.5 Kette als Drehmomentwandler beim E-Bike mit Mittelantrieb



Laut Datenblatt erbringt ein E-Bike-Motor für Hinterradantrieb ein viel größeres Drehmoment als ein Motor für Mittelantrieb. Warum muss das so sein?

Beispiel: Ritzel am Hinterrad 32 Zähne, Antriebsritzel des Motors 9 Zähne

Man erhält also eine Untersetzung von $\frac{9}{32} = 0,281$

Wenn das Drehmoment des Hinterrad-Motors 7Nm beträgt, muss das eines vergleichbaren Mittelantrieb-Motors nur $7\text{Nm} \cdot \frac{9}{32} = 1,97\text{Nm}$ betragen. Dafür dreht sich der Mittelmotor

aber auch viel schneller $n_{\text{Mittelantrieb}} = \frac{32}{9} \cdot n_{\text{Hinterrad}}$.

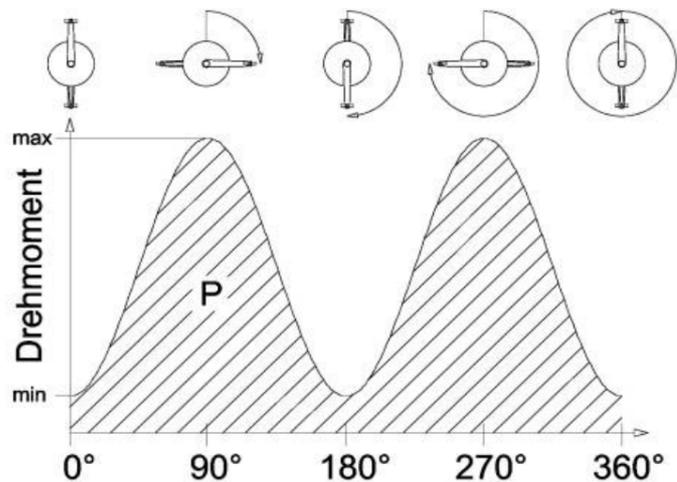
Die Leistung $P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$ ist in beiden Fällen gleich.

2.2.6 Auftretende Drehmomente beim Fahrrad

Bei Berechnungen am Fahrrad wird von Leistungen zwischen 80W und 200W mit mittlerem (konstanten) Drehmoment ausgegangen. Dies ist jedoch eine Vereinfachung! Die vom Radfahrer erzeugte Leistung besteht aus der relativ konstanten Drehzahl und dem aufgrund der Kurbeltriebskinematik stark schwankenden Drehmoment. Messungen ergaben bei verschiedenen Antriebsleistungen Drehzahlschwankungen von ca. 5% und Drehmomentschwankungen bis über 90% pro Kurbelumdrehung. Die Tabelle zeigt die Messergebnisse bei verschiedenen Leistungen.

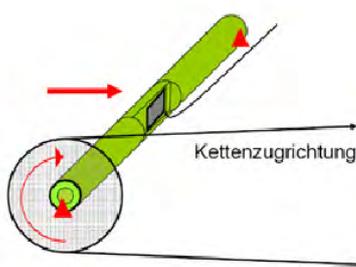
Fahrleistung und Drehzahl	100 W, 75 min ⁻¹	300 W, 75 min ⁻¹	575 W, 50 min ⁻¹
Drehmomentmaximum	21,6 Nm	68 Nm	200 Nm
Drehmomentminimum	3,8 Nm	8 Nm	20 Nm

Bild 1 zeigt den typischen Leistungsverlauf über eine Umdrehung der Antriebswelle.



(Quelle : Rohloff, [http://www.rohloff.de/no_cache/de/technik/speedhub/wirkungsgradmessung/index.html?sword_list\[0\]=torq&sword_list\[1\]=arm](http://www.rohloff.de/no_cache/de/technik/speedhub/wirkungsgradmessung/index.html?sword_list[0]=torq&sword_list[1]=arm))

2.2.7 Messung des Drehmoments und Regelung der Motorleistung beim Pedelec



Bringt der Benutzer durch Pedalieren Kräfte über die Kette auf den Antrieb ein, bewirkt dies eine elastische Durchbiegung der Hinterradachse. Die vom Fahrer eingebrachten Kräfte werden kontinuierlich durch Dehnmessstreifen, die auf der Hinterradachse sitzen, gemessen. Das System reagiert je nach eingebrachter Kraft und regelt die Motorleistung je nach eingestellter Unterstützungsstufe.

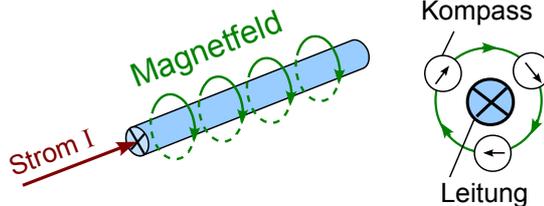
(Quelle: KTM Bike Industries http://www.bikipedia.de/wp-content/uploads/downloads/ANTRIEBSSYSTEM_BIONX.pdf)

3 Funktionsprinzip Gleichstrom-Motor

3.1 Magnetfeldlinien

Feldlinien zeigen die Richtung des Magnetfeldes an. Ein kleiner (Elementar-) Magnet oder ein Kompass, der sich in einem Magnetfeld befindet, richtet sich in Richtung der Feldlinien aus.

Die Feldlinien sind gedachte Linien.



Rechte Handregel:
Daumen zeigt in
Stromrichtung
Finger zeigen im
Magnetfeldrichtung

3.2 Durchflutungsgesetz

Ein elektrischer Strom erzeugt ein Magnetfeld dessen Feldlinien ringförmig um den Leiter verlaufen.

Daher richten sich die Magneten oberhalb und unterhalb des Leiters in unterschiedliche Richtungen aus.

3.3 Kraftwirkung auf stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

Wenn man einen stromdurchflossenen Leiter in ein Magnetfeld bringt, dann wechselwirken die beiden Magnetfelder miteinander.

Dadurch wirkt eine Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter.

Richtung der Kraftwirkung (3-Finger-Regel rechte Hand)

Ursache Strom (Daumen nach hinten)

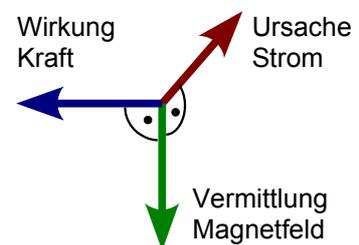
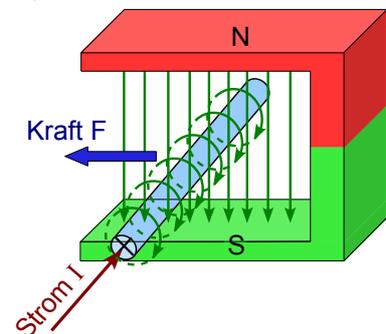
Vermittlung Magnetfeld (Zeigefinger nach unten)

Wirkung Kraft (Mittelfinger nach links)

Kennzeichnung der Stromrichtung

Kreuz: Strom fließt nach hinten
(Merkregel: Pfeilende)

Punkt: Strom fließt nach vorne
(Merkregel: Pfeilspitze)



Weitere Anwendung: Der Elektronenstrahl in einer Bildröhre, der das Bild auf die Mattscheibe zeichnet, wird durch Elektromagnete abgelenkt. (z.B. in einer alten Fernsehöhre)

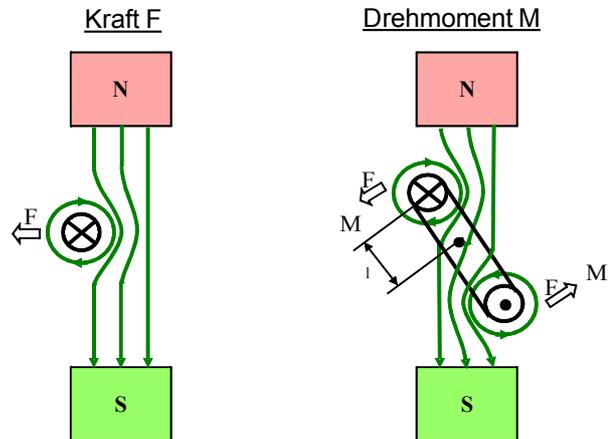
3.4 Stromdurchflossener Rotor (Leiterschleife) im Magnetfeld

Das linke Bild zeigt, dass ein einzelner stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld abgelenkt wird.

Im rechten Bild sieht man eine Leiterschleife, deswegen fließt in dem einen Leiter der Strom nach hinten und in dem anderen nach vorne.

Die Kräfte erzeugen ein Drehmoment in der Drehachse der Leiterschleife.

Funktionsprinzip

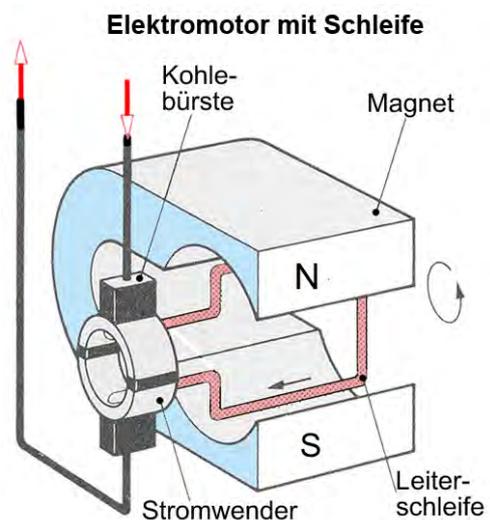


- Je stärker das äußeres Magnetfeld (durch Nord und Südpol) ist, desto größer ist die Kraft. [
- Je größer der Strom ist, desto stärker ist das Magnetfeld um den Leiter. Desto größer ist die Kraft.
- Wenn man nicht nur eine Leiterschleife nimmt sondern viele (z.B. 50), dann hat man eine Spule. Damit die 50fache Kraftwirkung!!!!

Das Bild zeigt warum sich ein Motor dreht:

- Die äußeren Magnete (Nord- und Südpol). werden **Stator** (=dreht sich nicht) genannt.
- Die Leiterschleife (Spule) wird **Rotor** oder **Anker** genannt.
- Der Rotor oder Anker ist der bewegliche Teil im Motor, kommt von Rotieren.
- Permanent erregte Motoren haben als äußere Magnete Permanentmagnete.
- Es gibt auch Motoren bei denen dieses Magnetfeld durch Spulen erzeugt wird.

Um eine 360°-Drehung zu erhalten, ist ein Stromwender (Kommutator) notwendig.



3.5 Kommutierung

3.5.1 Aufbau

Damit der Motor sich um 360° dreht, ist eine Umpolung des Stromes im Anker notwendig. Die Umpolung übernimmt der so genannte **Kommutator (Polwender)**.

Dieser besteht aus Schleifringen, die mit dem Anker verbunden sind, und Kohlebürsten, die von außen an die Schleifringe gepresst werden.

3.5.2 Erklärungen der einzelnen Phasen

- 1) **Strom fließt von a nach b**
a stößt sich von S ab
b stößt sich von N ab
- 2) zusätzlich sieht man:
a wird von N angezogen
b wird von S angezogen
- 3) Wenn "nicht gleich" eine Umpolung der Stromrichtung erfolgt, bleibt der Anker stehen!
- 4) Die Umpolung des Stromes durch den Polwender hat zur Folge, dass der **Strom nun von b nach a fließt**.
a stößt sich von N ab
b stößt sich von S ab.
- 5) zusätzlich sieht man:
a wird von S angezogen
b wird von N angezogen
- 6) "gleich" ist eine erneute Umpolung erforderlich. Vorgang beginn von Vorne bei 1)

3.5.3 Elektronische Kommutierung

Man versucht moderne Motoren und Generatoren ohne diese Bürsten aufzubauen:

Englisch: brushless DC – Motor
Deutsch: Bürstenloser Gleichstrom Motor

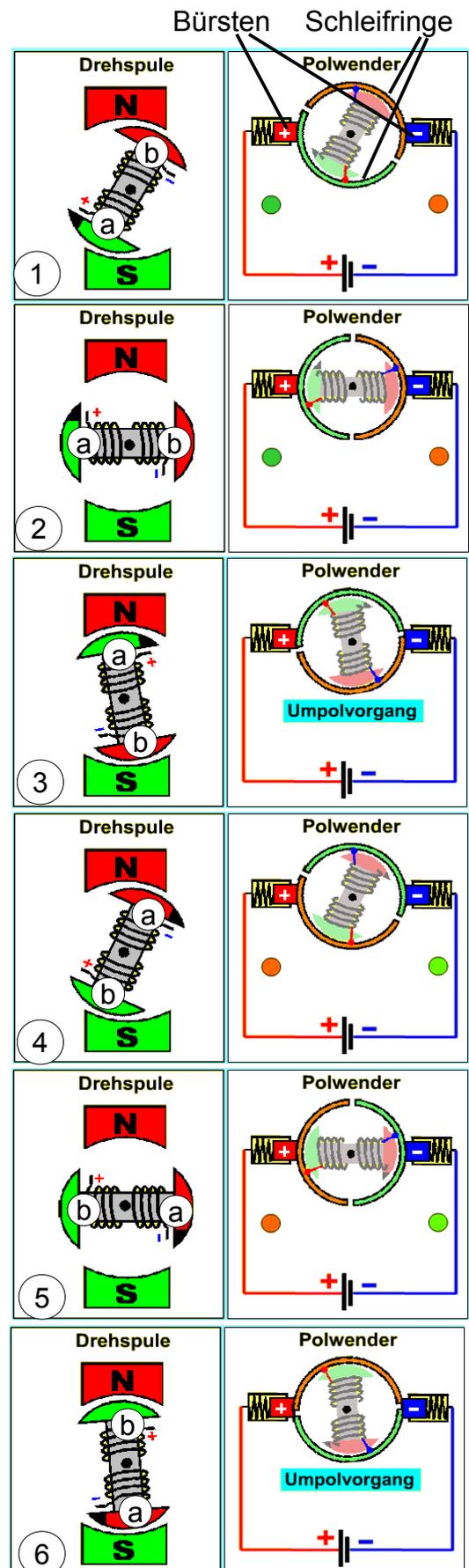
Wie bekommt man es "bürstenlos" hin?

Der sich drehende Anker muss ein Permanentmagnet sein, das äußere Magnetfeld wird durch Spulen erzeugt, dessen Polung zum richtigen Zeitpunkt geändert wird.

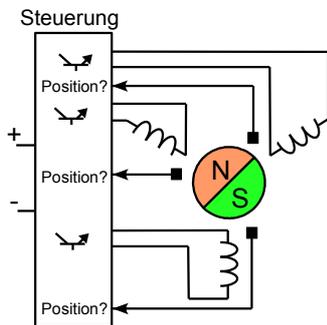
Technisch: Transistoren schalten die Richtung des Stroms um, der durch die Spulen fließt.

Solche Motoren nennen sich elektronisch Kommutiert, Abkürzung : EC-Motor

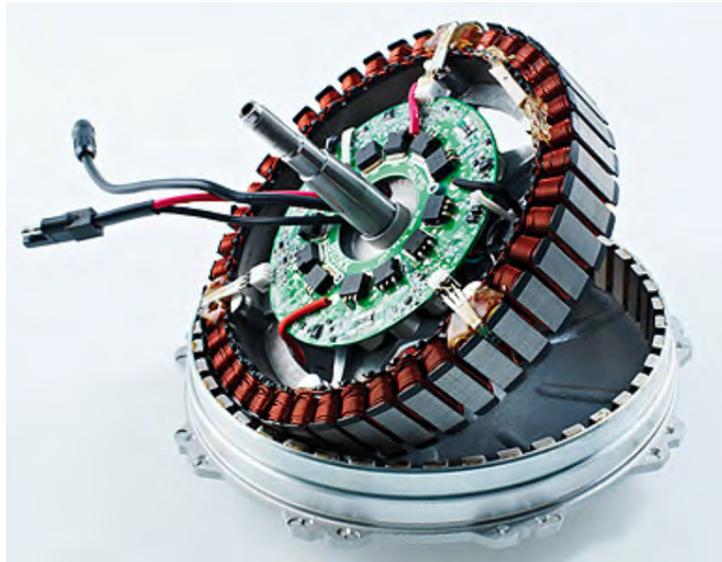
(C) der Bilder: Dieter Welz, Ulm,
<http://www.zum.de/dwu/depotan/apem105.htm> Screenshots der Animation "Gleichstrom-Elektromotor"



3.6 Pedelec-Motor für Hinterradnabe (Bionx)



Bürstenloser Motor:
Permanent-Magnete drehen sich, Magnetfeld-Sensoren messen, in welcher Stellung sich der Rotor gerade befindet. Transistoren schalten in Abhängigkeit von der Stellung des Rotors die Stromrichtung durch die Spulen um.



3.6.1 Firmen-Beschreibung

- bürstenloser Gleichstrom-Hinterradnabenmotor ohne Getriebe
- Rückladebetrieb (Rekuperation) vorgesehen
- Leistung nominal 250 Watt
- Drehmoment nominal 9 Nm / maximal 40 Nm in die Hinterradachse integrierte Kraftmessensorik
- Gewichtsoptimiert durch doppelte Anzahl der Pole, doppelte Anzahl Magneten, Verringerung des Luftspalts, weniger Eisen im Stator, weniger Kupferdraht im Stator weniger Widerstand (Anmerkung: Vergleich mit dem Vorgängermodell)
- Gewicht 3,5kg

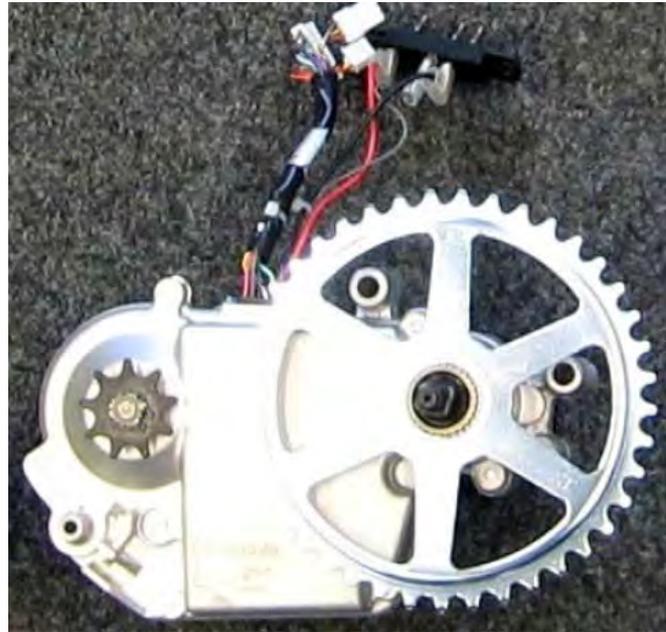
3.6.2 Eigene Ergänzungen

- Die äußeren Permanentmagnete drehen sich und sind fest mit den Speichen des Rades verbunden
- Die Spulen in der Mitte mit der Elektronik stehen fest.
- Die schwarzen elektronischen Teile auf der Platine sind Transistoren, die als elektronische Schalter verwendet werden. Sie lassen zum richtigen Zeitpunkt Strom durch die Spulen fließen. Dies nennt sich elektronisch kommutieren.
- Es gibt weniger Transistoren als Spulen, daraus schließen wir, dass ein Transistor immer mehrere Spulen gleichzeitig schaltet.

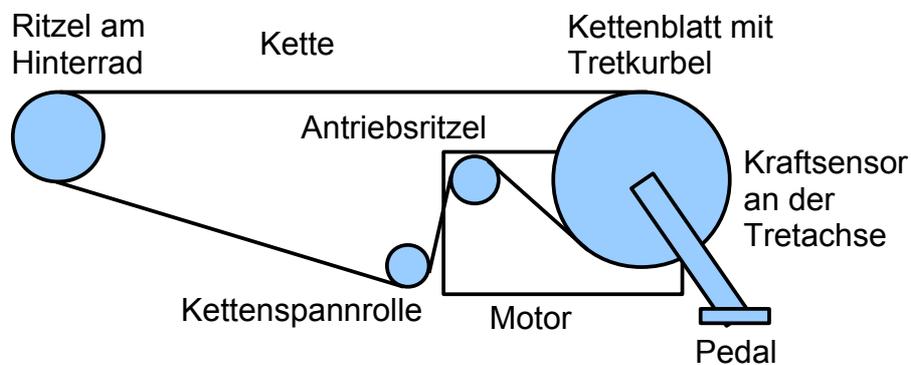
3.7 Pedelec-Motor für Tretlagerantrieb (Panasonic)

3.7.1 Firmen- Beschreibung

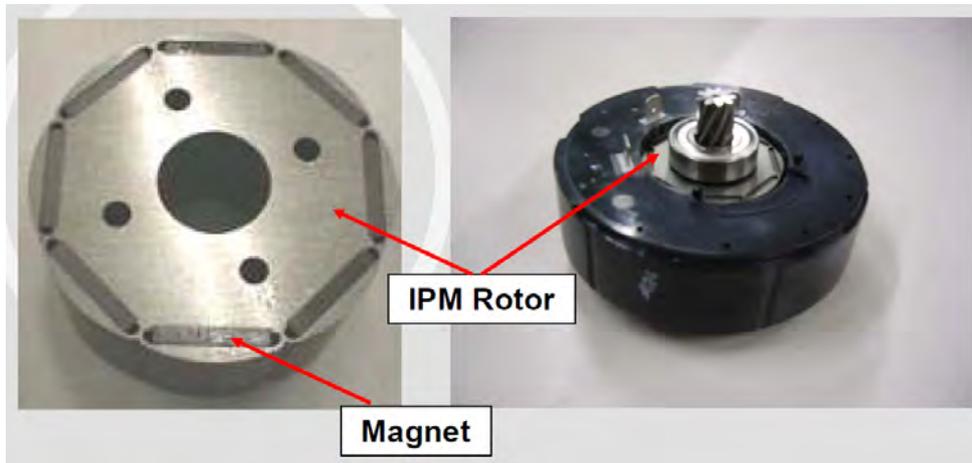
- Antriebseinheit und Steuerung als 3-in-1-Konstruktion (Motor, Controller & Kraftsensor)
- sehr geringe elektromagnetische Belastung
- Gewicht der Antriebseinheit 3,8kg
- bürstenloser Motor
- Innenlager mit Kraftsensor
- Getriebe mit Antriebsritzel



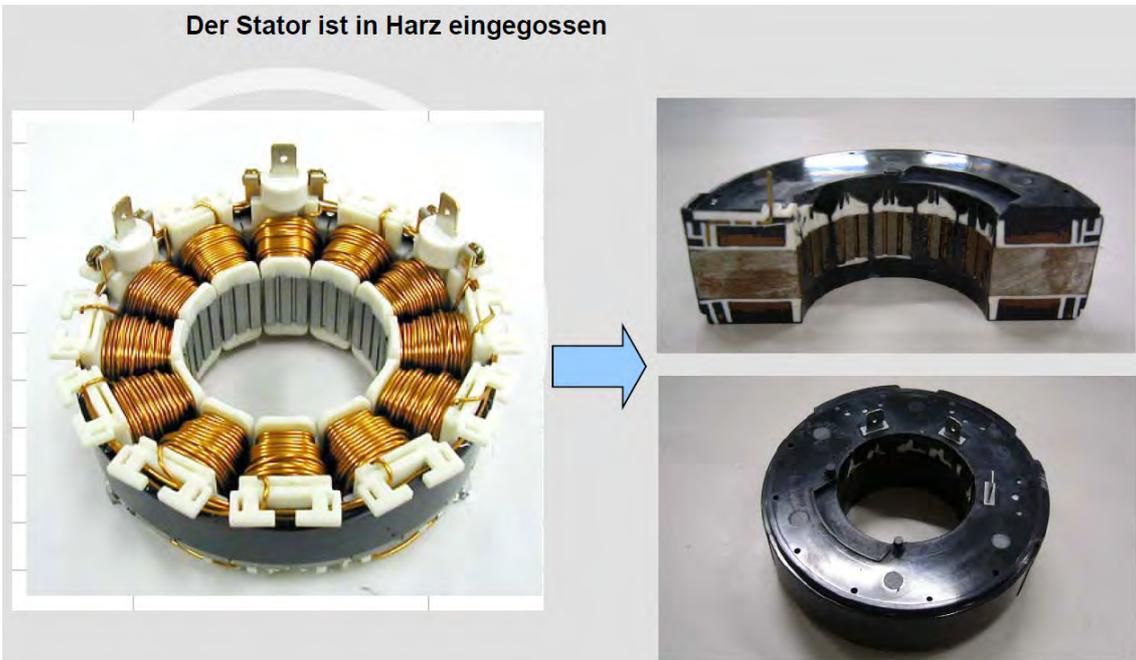
(Quelle: Kalkhoff Bikes, Derby Cycle Werke GmbH, Siemensstr. 1-3, 49661 Cloppenburg)



3.8 Pedelec-Motor mit innenliegendem Rotor



Der Stator ist in Harz eingegossen



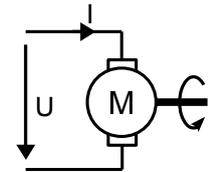
(c) Kalkhoff Bikes, Derby Cycle Werke GmbH, Siemensstr. 1-3, 49661 Cloppenburg

3.9 Induktionsgesetz

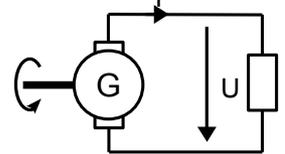
Das Durchflutungsgesetz sagt aus, dass ein elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt. Dies ist die Grundlage zur Erklärung des Funktionsprinzips eines Motors.

Ein Motor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie um.

Das Prinzip funktioniert auch umgekehrt: Dreht man die Welle eines Motors, so erzeugt dieser eine elektrische Spannung: Man betreibt ihn als Generator, der mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt. Dieses Prinzip wird beschrieben mit dem Induktionsgesetz.



Durchflutungsgesetz
→ Erklärung Motor

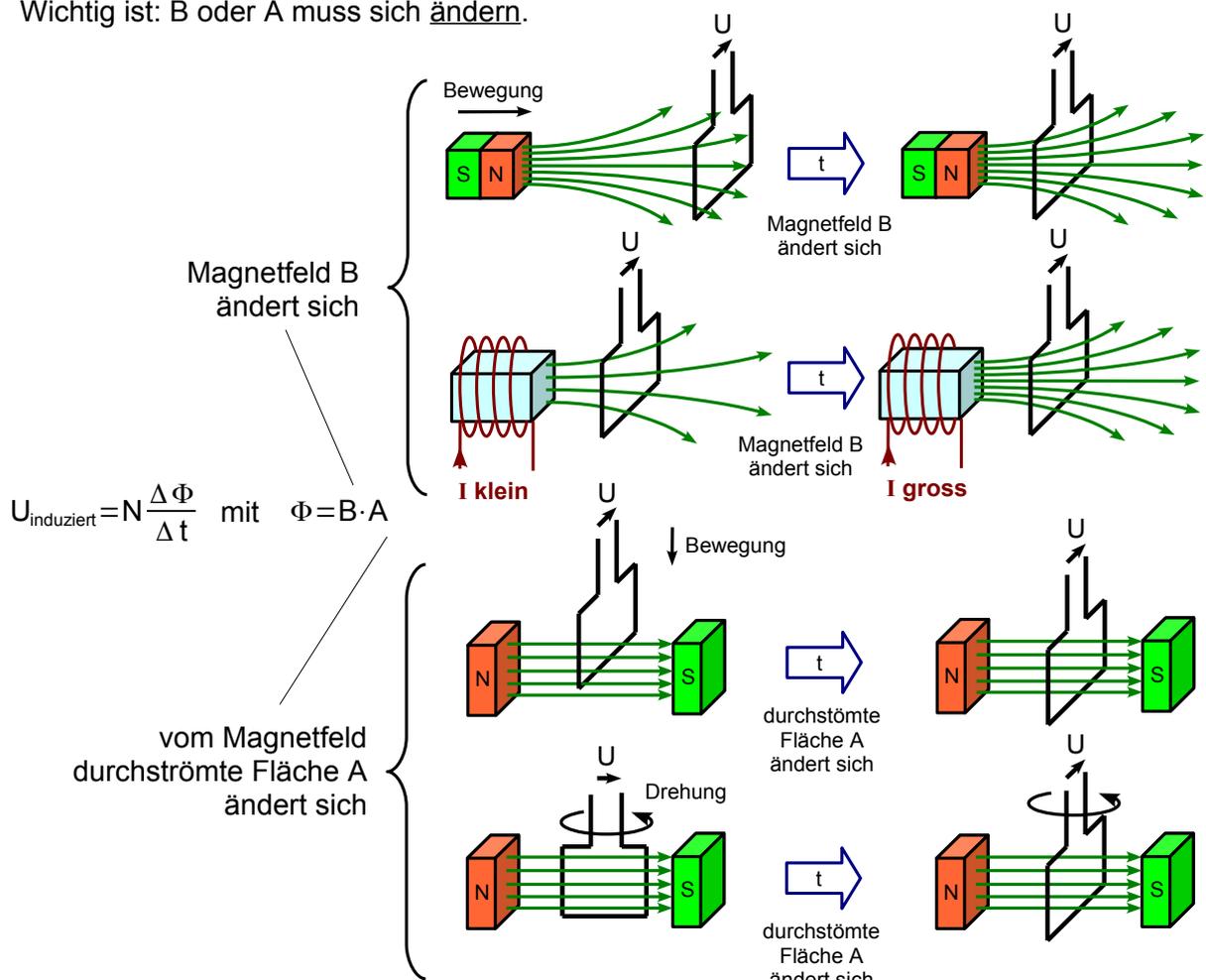


Induktionsgesetz
→ Erklärung Generator

Eine Leiterschleife oder Spule ist einem Magnetfeld ausgesetzt, das durch Permanentmagnete oder durch stromdurchflossene Spulen erzeugt wird.

Ändert man die Stärke des Magnetfeldes B oder die Größe der Fläche A der Leiterschleife, die dem Magnetfeld ausgesetzt ist, so ist an den Anschlüssen der Leiterschleife eine Spannung messbar. Man sagt: Es wird eine Spannung induziert.

Wichtig ist: B oder A muss sich ändern.



Die Größe der induzierten Spannung ist abhängig von: der Windungszahl N der Spule, der Größe der Fläche A, der Schnelligkeit der Änderung.

3.10 Motorersatzschaltbild

Wir haben gesehen, dass ein Motor auch als Generator betrieben werden kann und demzufolge eine Spannung induziert, wenn er sich dreht.

Dieses Phänomen existiert auch im Motorbetrieb. Der von außen angelegten Klemmenspannung setzt der Motor eine "selbst erzeugte" Induktionsspannung entgegen.

Diese elektrischen Eigenschaften lassen sich mit dem nebenstehenden **Ersatzschaltbild** beschreiben.

Der Draht der Ankerspule hat einen elektrischen Widerstand R_{Anker} . Wenn der Motor steht, wird die Größe des Stromes I_{Klemme} nur durch diesen sehr kleinen Widerstand bestimmt. Der sogenannte Anlaufstrom des Motors ist daher sehr gross.

Beispiel: $U_{\text{Klemme}} = 25\text{V}, R_{\text{Anker}} = 1\Omega$

$$U_{\text{induziert}} = 0\text{V} \rightarrow U_{\text{Klemme}} = U_R$$

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{25\text{V}}{1\Omega} = 25\text{A}$$

Wenn der Motor sich dreht (Drehzahl $n > 0$) wird eine Spannung $U_{\text{induziert}}$ induziert, die proportional mit der Drehzahl n steigt:

Grund: Je größer die Drehzahl n , desto schneller ändert sich die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche A im Anker, desto größer ist die induzierte Spannung.

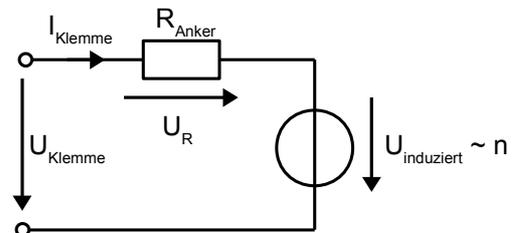
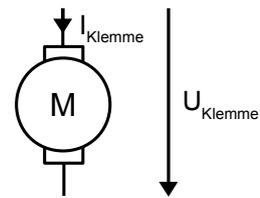
Durch die induzierte Spannung sinkt der fließende Strom I_{Klemme} .

Beispiel: bei $U_{\text{induziert}} = 10\text{V}$:

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_{\text{Klemme}} - U_{\text{induziert}}}{R} = \frac{25\text{V} - 10\text{V}}{1\Omega} = 15\text{A}$$

bei $U_{\text{induziert}} = 20\text{V}$:

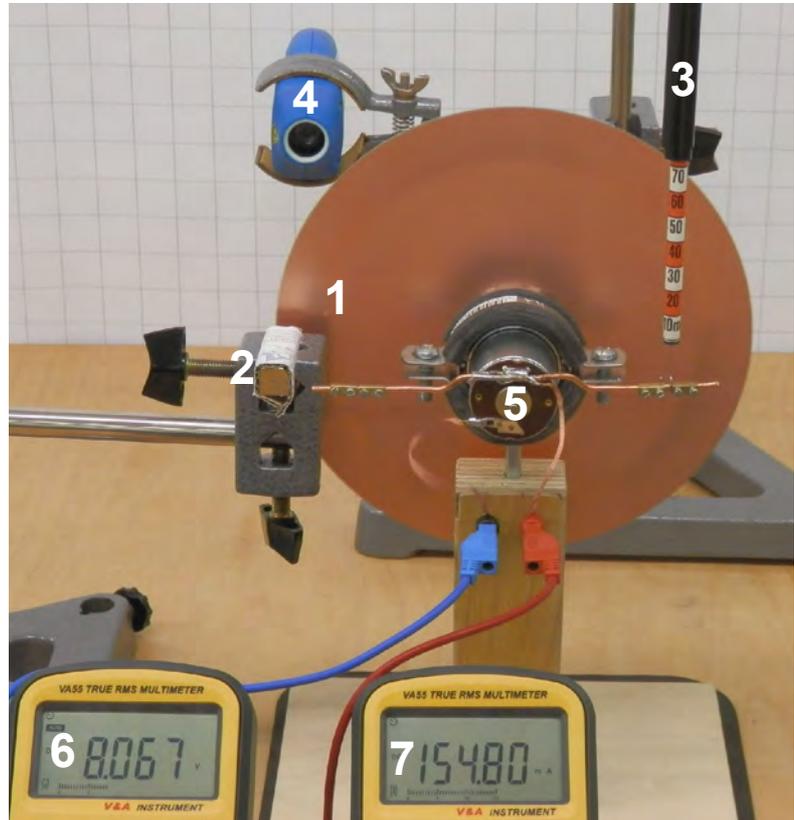
$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_{\text{Klemme}} - U_{\text{induziert}}}{R} = \frac{25\text{V} - 20\text{V}}{1\Omega} = 5\text{A}$$



4 Berechnungen zum Motor im E-Bike, Pedelec

4.1 Versuchsaufbau Messungen an der Gleichstrommaschine

- 1 Wirbelstrombremse
- 2 Bremsmagnet
- 3 Drehmomentmessung
- 4 Drehzahlmessung
- 5 Gleichstrommaschine
- 6 Spannungsmessung
- 7 Strommessung
- 8 Netzteil
- 9 Reflexmarke



4.1.1 Bauteile

- Faulhaber DC-Kleinstmotor 3557K 020 CS
- Rillenkugellager FAG 61807
- Aeronaut Spannkonus 4 mm Welle / 8 mm Schaft
- Scheibe Platinenmaterial 1,5 mm Epoxidharz mit 35 μm Cu
- optischer Drehzahlmesser
- Federkraftmesser

4.2 Messung der Leerlaufdrehzahl in Abhängigkeit von der Klemmenspannung

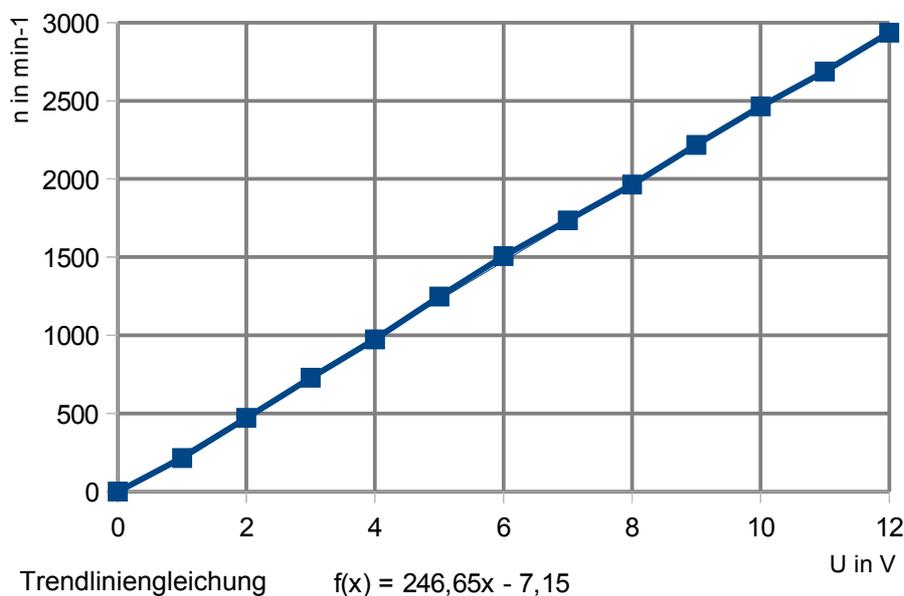
4.2.1 Fragestellung

Welchen Einfluss hat die Klemmenspannung auf die Leerlaufdrehzahl?

4.2.2 Versuch zur Klärung

- Klemmenspannung einstellen ($U = 0 \dots 12\text{V}$ in 1V-Schritten).
- Warten bis Drehzahl sich stabilisiert hat. Man erkennt dies daran, dass die Stromaufnahme sich nicht mehr verändert.
- Leerlaufdrehzahl messen.

Leerlaufdrehzahl in Abhängigkeit von der Klemmenspannung



4.2.3 Folgerung

Die Leerlaufdrehzahl ist proportional zur Klemmenspannung.

$$n = k_n \cdot U$$

n Drehzahl

U Klemmenspannung

k_n Drehzahlkonstante

hier: $k_n = 247 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$ (Steigung der Trendlinie aus dem Diagramm)

4.3 Messung des Klemmenstroms in Abhängigkeit vom Drehmoment

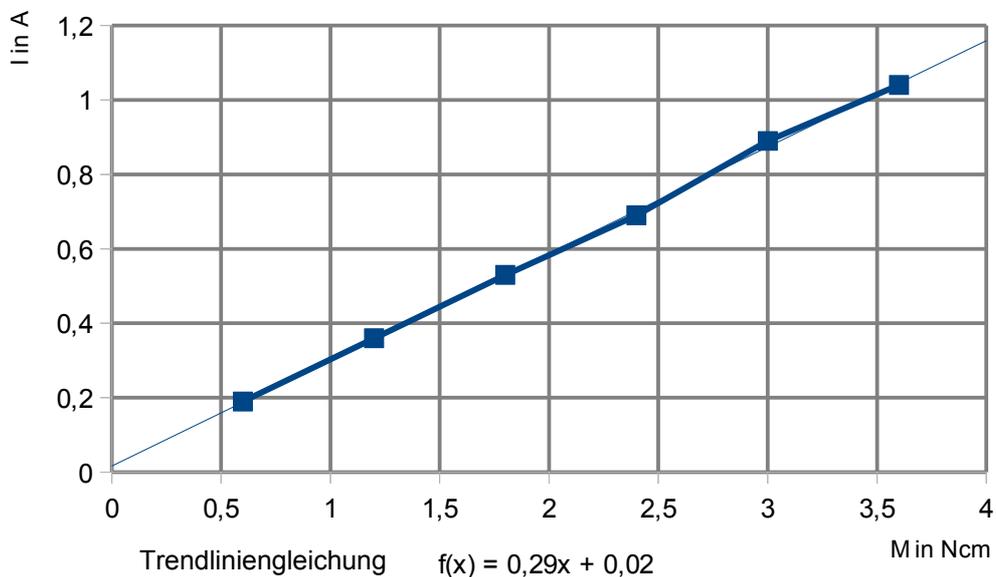
4.3.1 Fragestellung

Welchen Einfluss hat das Drehmoment auf den Klemmenstrom?

4.3.2 Versuch zur Klärung:

- Klemmenspannung einstellen ($U = 12\text{ V}$) und konstant halten.
- Lastmoment mit Bremsmagnet einstellen ($M = 0\text{ Ncm}$ bis $3,6\text{ Ncm}$ in $0,6\text{ Ncm}$ -Schritten) und an Drehmoment-Messhebel messen.
- Klemmenstrom messen.

Klemmenstrom in Abhängigkeit vom Lastmoment



4.3.3 Folgerung

Der Klemmenstrom ist proportional zum Lastmoment.

$$I = k_i \cdot M$$

I Klemmenstrom
M Drehmoment
 k_i Stromkonstante

hier: $k_i = 0,29 \frac{\text{A}}{\text{Ncm}}$ (Steigung der Trendlinie aus dem Diagramm)

Auch wenn der Motor noch gar nicht über die Wirbelstrombremse gebremst wird, misst man bereits ein Moment. Dies liegt daran, dass der Motor durch Reibung in seinen Lagern und zwischen Bürsten und Kommutator gebremst wird (Reibemoment).

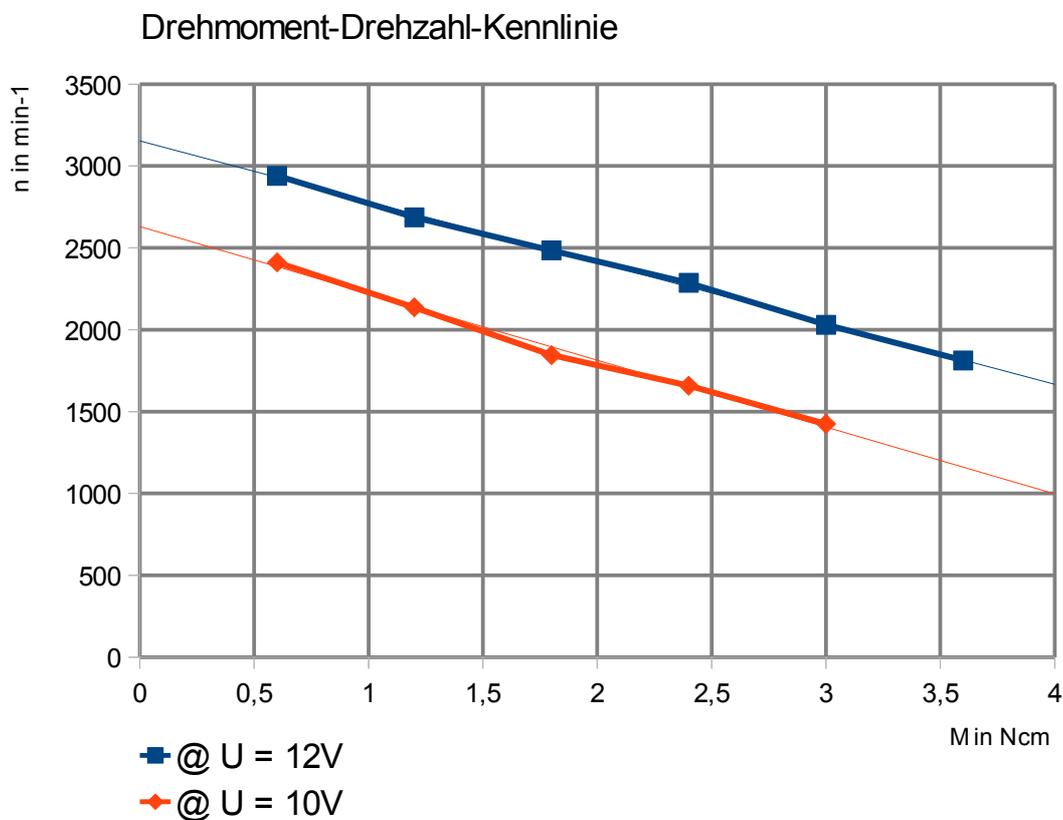
4.4 Messung der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

4.4.1 Fragestellung

Wie stark sinkt die Drehzahl bei Belastung ab?

4.4.2 Versuch zur Klärung

- Klemmenspannung einstellen ($U = 12\text{ V}$) und konstant halten.
- Lastmoment mit Bremsmagnet einstellen ($M = 0\text{ Ncm}$ bis $3,6\text{ Ncm}$ in $0,6\text{ Ncm}$ -Schritten) und an Drehmoment-Messhebel messen.
- Drehzahl messen
- Schritt 2 und 3 wiederholen bei einer Klemmenspannung $U = 10\text{ V}$



4.4.3 Folgerung

Von der im ersten Versuch ermittelten Leerlaufdrehzahl ausgehend sinkt die Drehzahl proportional zum Lastmoment.

Wählt man eine kleine Leerlaufspannung und wiederholt den Versuch, so erhält man die gleiche Abhängigkeit, daher verlaufen beide Kennlinien parallel.

Dieses Verhalten kann man mit dem Ersatzschaltbild des Motors erklären, siehe 4.6 Erklärung der Motorkennlinien $n(M)$ und $I(M)$.

4.5 Formeln und Kennlinien Elektromotor

4.5.1 Motorersatzschaltbild

U_{Klemme} Spannung an den Motoranschlüssen

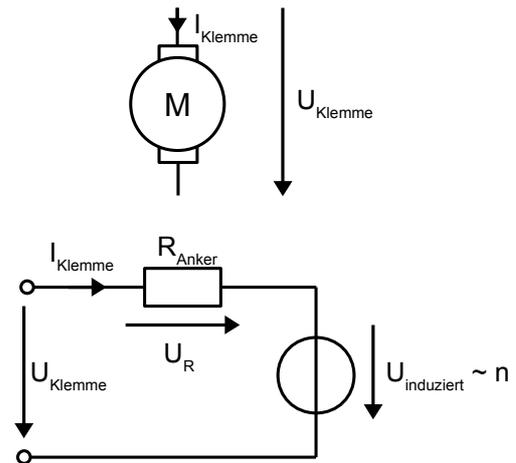
I_{Klemme} Stromaufnahme des Motors

R_{Anker} Ankerwiderstand

n Drehzahl des Motors in 1/s

$U_{induziert}$ im Motor induzierte Spannung

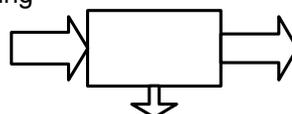
$$\frac{U_{induziert}}{n} = \text{konst} \quad \text{bzw.} \quad U_{induziert} \sim n$$



4.5.2 Verlustleistungen im Motor

zugeführte Leistung

$$P_{zu} = P_{\text{elekt}} = U_{Klemme} \cdot I_{Klemme}$$



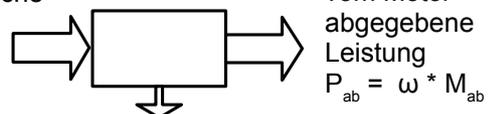
Wärmeverluste

$$P_{\text{verlust}} = U_R \cdot I_{Klemme}$$

$$P_{\text{verlust}} = I_{Klemme}^2 \cdot R_{Anker}$$

Mechanische Leistung

$$P_{\text{mech}} = \omega \cdot M_{\text{mech}}$$



vom Motor

abgegebene

$$P_{\text{ab}} = \omega \cdot M_{\text{ab}}$$

Mechanische Verluste (Lager, Bürsten,...), hervorgerufen durch Reibungsmoment M_{Reib}

$$M_{\text{mech}} = M_{\text{reib}} + M_{\text{ab}}$$

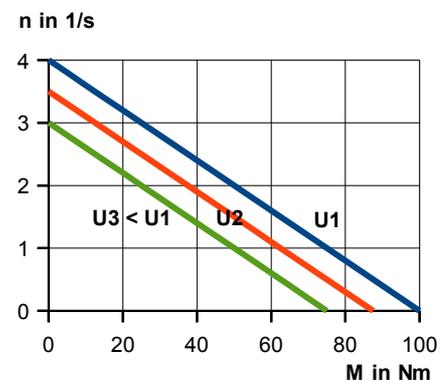
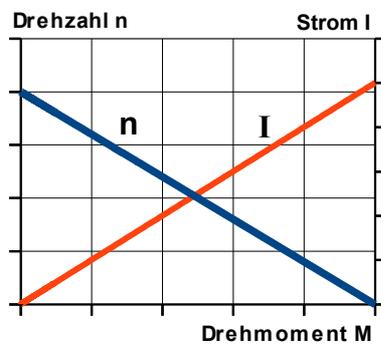
$$\text{wenn } M_{\text{reib}} \ll M_{\text{mech}}: M_{\text{mech}} \approx M_{\text{ab}} \text{ und } P_{\text{mech}} \approx P_{\text{ab}}$$

4.5.3 Motorkennlinien und mechanische Größen

$$\frac{M}{I} = \text{konst}$$

Anwendung z.B.

$$\frac{M}{I} = \frac{M_{\text{Nenn}}}{I_{\text{Nenn}}}$$



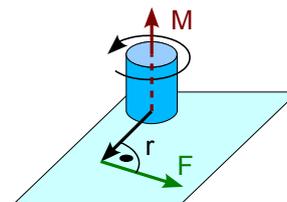
Die Drehzahl des Motors wird von der angelegten Spannung bestimmt!

Es fließt der Strom, der notwendig ist, um das geforderte Drehmoment zu liefern.

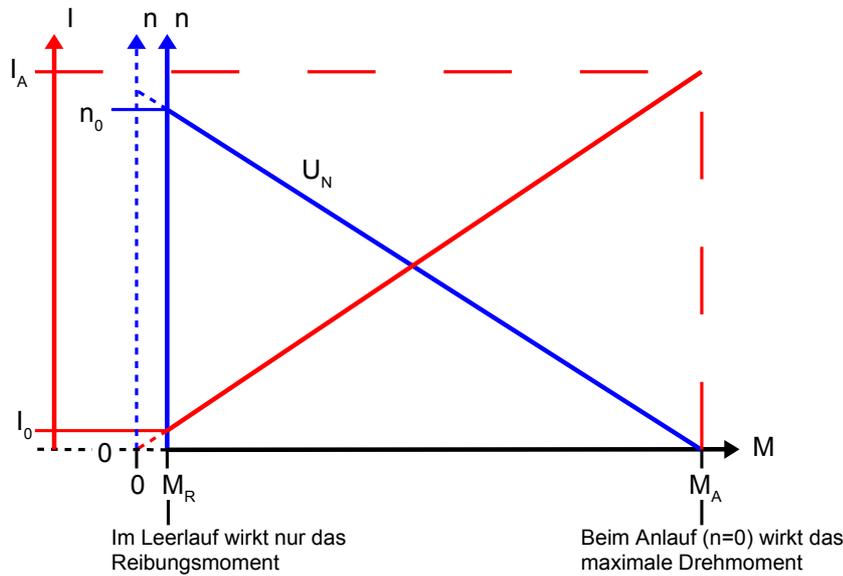
$$M = F \cdot r \quad [M] = \text{Nm}$$

$$P_{\text{mech}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = v \cdot F \quad [P] = \text{Nm/s}$$

$$P_{\text{mech}} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$



4.6 Erklärung der Motorkennlinien $n(M)$ und $I(M)$

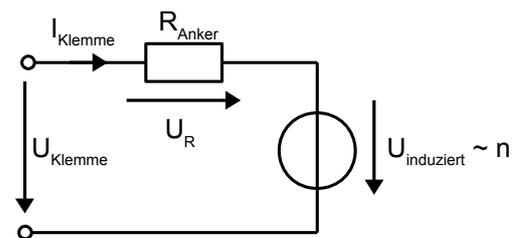


Beim Anlaufen:

- Der Motor steht noch \rightarrow Drehzahl $n = 0$.
- Es fließt der maximale Strom. $\rightarrow I = I_A$
Weil $n=0 \rightarrow U_{\text{induziert}} = 0 \rightarrow I$ wird nur durch den sehr kleinen Ankerwiderstand R_{Anker} begrenzt:

$$I_{\text{Klemme}} = \frac{(U_{\text{Klemme}} - U_{\text{induziert}})}{R_{\text{Anker}}} = \frac{(U_{\text{Klemme}} - 0)}{R_{\text{Anker}}}$$

- Es wirkt das maximale Drehmoment $M = M_A$.

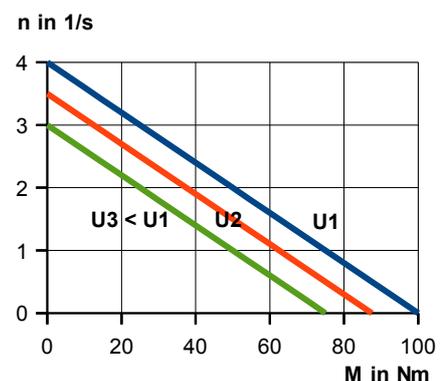


Im Leerlauf:

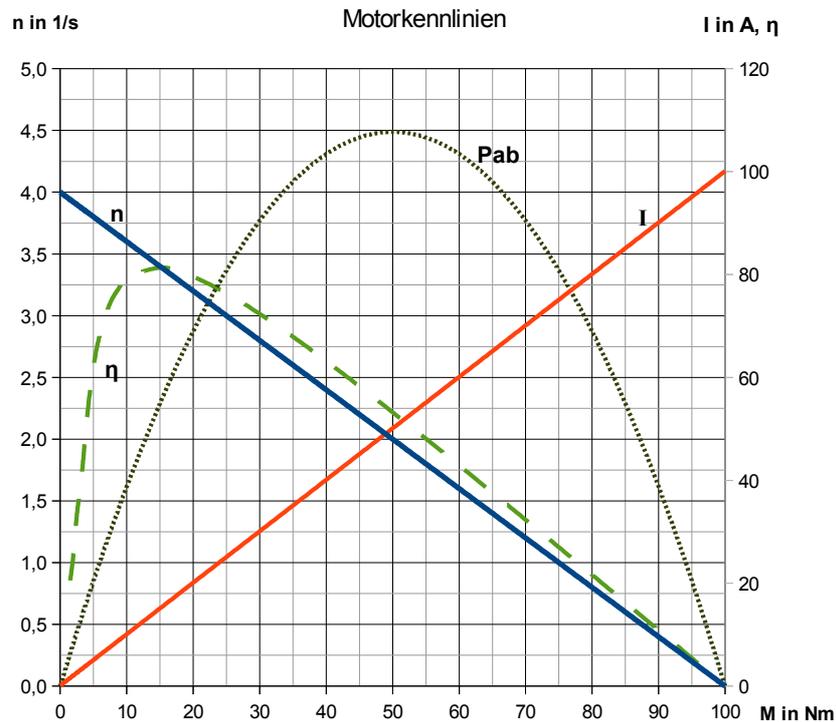
- Der Motor dreht sich mit der maximalen Drehzahl $n = n_0$ (Leerlaufdrehzahl).
- Es fließt nur ein sehr kleiner Strom $I = I_0$ (Leerlaufstrom), der benötigt wird, um das Reibungsmoment M_R zu überwinden.

$n(M)$ -Kennlinie:

- verschiebt man die n -Achse nach links (gestrichelt), so wird die I -Kennlinie eine Ursprungsgerade und es gilt: $\frac{M}{I} = \text{konst}$.
- Bei den Berechnungen ist das Reibungsmoment M_R bzw. der Leerlaufstrom I_0 bei kleinen Drehmomenten zu berücksichtigen, sonst erhält man falsche Ergebnisse.
- Bei kleineren Motorspannungen verschiebt sich die $n(M)$ Kennlinie nach unten. Die Steigung bleibt dabei konstant. Es ändern sich jedoch die Leerlaufdrehzahl und das maximale Drehmoment.



4.7 Erklärung der Motorkennlinien $P_{ab}(M)$ und $\eta(M)$



Gültigkeit

- Die Kennlinien haben immer diesen prinzipiellen Verlauf.
- Für unterschiedliche Motorspannungen ändern sich die Skalierungen der Achsen.

Abgegebene Leistung P_{ab}

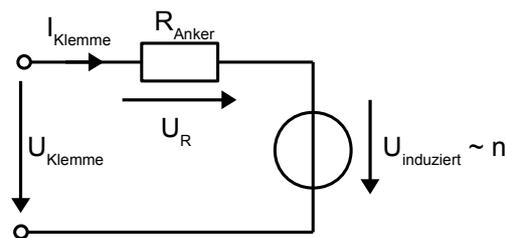
- $P_{ab} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \sim n \cdot M$
Die mechanisch abgegebene Leistung ist proportional zur Fläche unter der Kurve $n(M)$. Die Kurvenform ist eine Parabel.
- Bei $0,5 n_0$ bzw. $0,5 M_0$ wird die maximale Leistung abgegeben.
(Dies ist aber weder der Nennbetrieb noch ist hier der Wirkungsgrad maximal!)
- Der Maximalwert hängt quadratisch von der Motorspannung ab.

Wirkungsgrad η

- Im Leerlauf ist der Wirkungsgrad = 0, da ja keine Leistung abgegeben wird, ebenso beim Anlauf, weil der Motor hier steht ($n=0$)
- Den Maximalwert von η wird bei ca. $1/7 M_A$ erreicht. Hier ist der Strom noch relativ klein, daher ist die Wärmeverlustleistung $P=U_{Anker} \cdot I$ noch relativ klein.
- Wird dem Motor ein größeres Drehmoment abverlangt, so steigt der Strom ($\sim M$) an, ebenso die abgegebene Leistung, jedoch steigt die Verlustleistung quadratisch ($P=I^2 \cdot R_{Anker}$), was zu einem Absinken des Wirkungsgrades führt.
Beim E-Bike wird der Strom begrenzt um den Motor nicht thermisch zu überlasten.

4.8 Zusammenfassung: Strom und Spannung beim Motor

- Die Drehzahl wird von der angelegten Spannung bestimmt.
- Beim Anlauf bestimmen angelegte Spannung und Ankerwiderstand den Anlaufstrom. Da R_{Anker} klein \rightarrow Anlaufstrom groß
- Bei Belastung sinkt die Drehzahl ab $\rightarrow U_{\text{induziert}}$ sinkt \rightarrow Ankerstrom steigt an.
- Der Motor "holt sich den Strom, den der braucht" für ein bestimmtes Drehmoment
- Die Drehzahländerung erfolgt über die Änderung der Motorspannung U_{Klemme} .



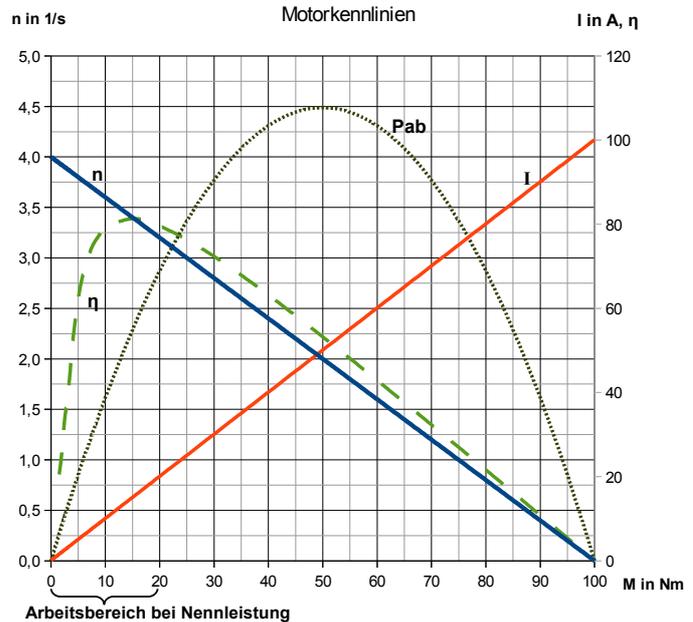
4.9 Arbeitsbereich im Kennlinienfeld

Die Skalierung der Achsen ist für jede Klemmenspannung unterschiedlich.

Der gesamte Kennlinienbereich kann nur bei kleinen Spannungen genutzt werden.

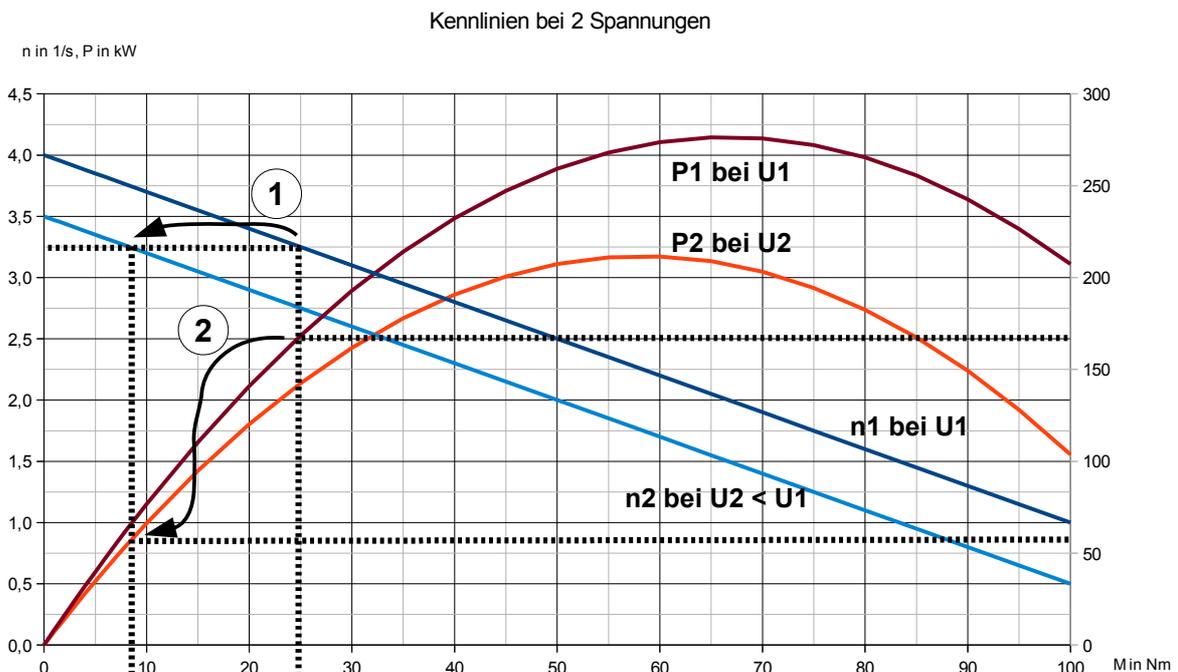
Im Bereich der Nennspannung wird nur ein schmaler Abschnitt im Bereich des maximalen Wirkungsgrades genutzt, weil der Motor sonst thermisch überlastet wäre.

Die Regelung sorgt dafür, dass der Strom und damit P nicht zu groß werden.



4.10 Beispiel Änderung des Unterstützungsgrades

- 1) Unterstützungsgrad wird kleiner eingestellt $\rightarrow n$ bleibt gleich, \rightarrow Kennlinie $N(M)$ verschiebt sich (bei gleichbleibender Steigung), da die Spannung geändert wird, $\rightarrow M$ ändert sich
- 2) abgegebene Leistung ändert sich, (P ist quadratisch von U abhängig)

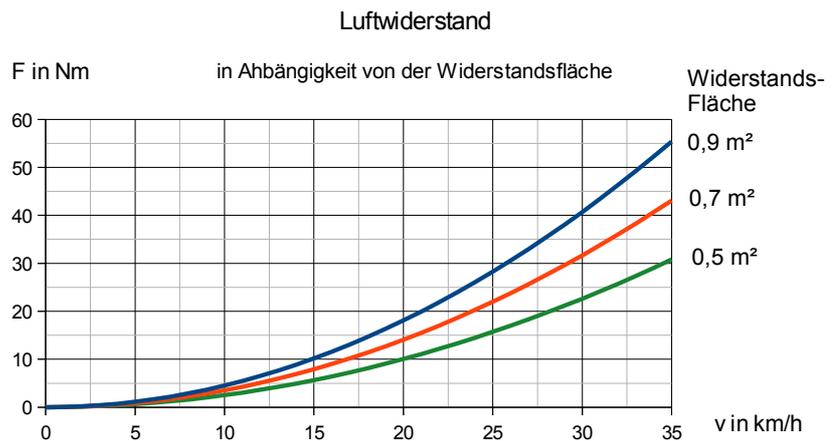


4.11 Welche Kräfte müssen bei der Fortbewegung überwunden werden?

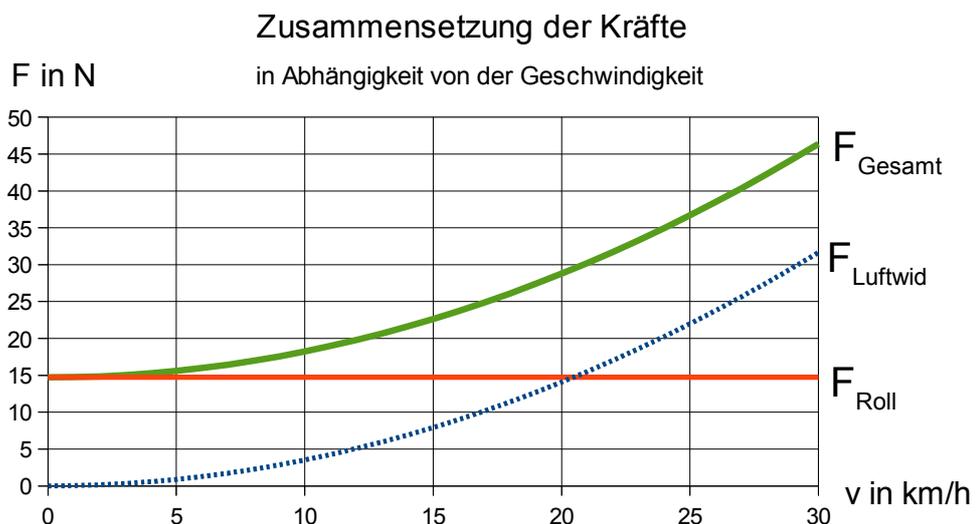
Die dem E-Bike-Fahrer bei der Fortbewegung entgegenwirkende Kraft setzt sich aus drei Teilen zusammen:

- Rollreibungskraft $F_{roll} = C_R \cdot F_{Normal}$ mit $F_{Normal} = F_G \cdot \cos(\alpha)$
- Luftwiderstand $F_{Luftwiderstand} = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot v^2 \cdot A$
- Hangabtriebskraft bei Bergfahrten $F_{Hangabtrieb} = F_G \cdot \sin(\alpha)$

Der Luftwiderstand ist erheblich von der Fläche abhängig, die sich dem Wind entgegenstellt:



Bei kleinen Geschwindigkeiten muss der Fahrer hauptsächlich die Rollreibung überwinden, der Luftwiderstand ist quadratische von der Geschwindigkeit abhängig, daher ist bereits bei 20km/h der Luftwiderstand genauso groß wie die Rollreibungskraft.



zugrunde liegende Werte: Masse Fahrer + E-Bike: $m = 100\text{kg}$

Fläche (Fahrer + E-Bike) zur Berechnung des Luftwiderstandes: $0,5\text{m}^2$

$C_R = 0,015$, $C_W = 1,1$, $\rho_{Luft} = 1,184\text{Kg/m}^3$

4.12 Kennlinienfeld Drehmoment in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Dieses Kennlinienfeld ermöglicht es, einfache Berechnungen beim E-Bike durchzuführen.

Zugrundeliegende Formeln:

$$M = (F_{\text{Luftwiderstand}} + F_{\text{Rollreibung}} + |F_{\text{Hangabtrieb}}|) \cdot r_{\text{Rad}}$$

mit $F_{\text{Luftwiderstand}} = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot v^2 \cdot A$ $F_{\text{roll}} = C_R \cdot F_{\text{Normal}}$

und $F_{\text{Normal}} = F_G \cdot \cos(\alpha)$ $F_{\text{Hangabtrieb}} = F_G \cdot \sin(\alpha)$

Zugrunde liegende Werte:

Radius der Rades: 0,33m => Radumfang 2,074m

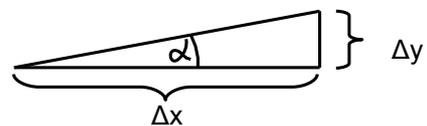
Masse Fahrer + E-Bike: m = 100kg

Fläche (Fahrer + E-Bike) zur Berechnung des Luftwiderstandes: 0,5m²

C_R = 0,015, C_w = 1,1, ρ_{Luft} = 1,184Kg/m³

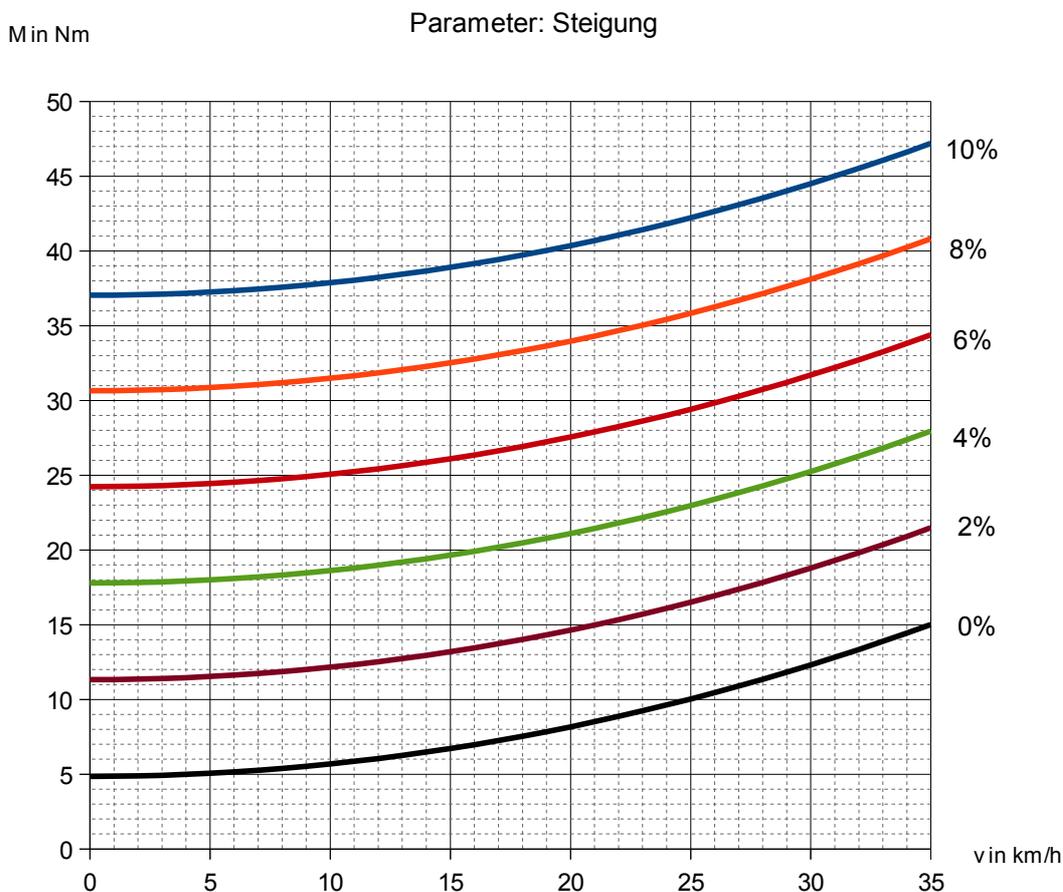
Steigung

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan(\alpha)$$



Beispiel: Δy = 1m, Δx = 10m -> m = 0,1 = 10% -> α = 5,7°

Drehmoment in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit



4.13 Kennlinienfeld Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Dieses Kennlinienfeld ermöglicht es, einfache Berechnungen beim E-Bike durchzuführen.

Zugrundeliegende Formeln:

$$P = \omega \cdot M = \frac{v}{r} \cdot F_{\text{Ges}} \cdot r = v \cdot F_{\text{ges}} = v \cdot (F_{\text{Luftwiderstand}} + F_{\text{Rollreibung}} + |F_{\text{Hangabtrieb}}|)$$

mit $F_{\text{Luftwiderstand}} = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot v^2 \cdot A$ $F_{\text{roll}} = C_R \cdot F_{\text{Normal}}$

und $F_{\text{Hangabtrieb}} = F_G \cdot \sin(\alpha)$ $F_{\text{Normal}} = F_G \cdot \cos(\alpha)$

Zugrunde liegende Werte:

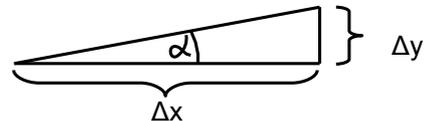
Masse Fahrer + E-Bike: $m = 100\text{kg}$

Fläche (Fahrer + E-Bike) zur Berechnung des Luftwiderstandes: $0,5\text{m}^2$

$C_R = 0,015$, $C_W = 1,1$, $\rho_{\text{Luft}} = 1,184\text{Kg/m}^3$

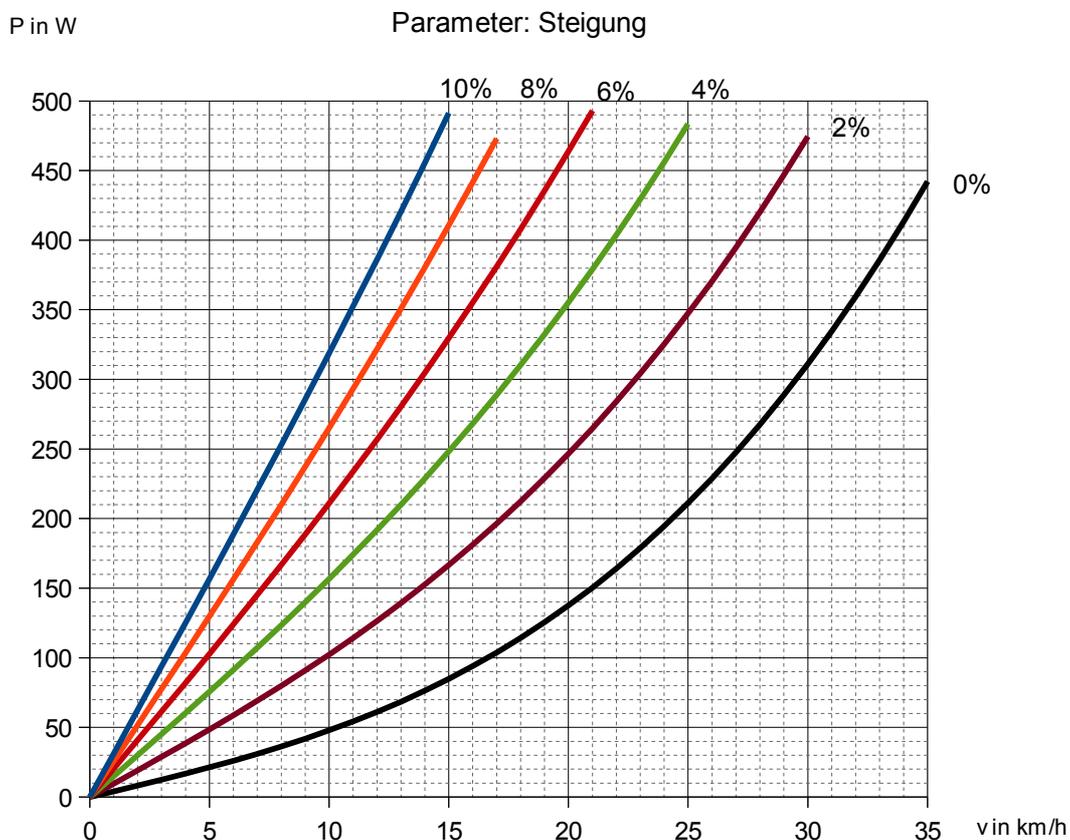
Steigung

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan(\alpha)$$



Beispiel: $\Delta y = 1\text{m}$, $\Delta x = 10\text{m}$ -> $m = 0,1 = 10\%$ -> $\alpha = 5,7^\circ$

Leistung in W in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit



4.14 Wiederholung wichtiger elektrischer Grundgrößen

Größe	Formelzeichen	Einheit	Formel
Spannung	U	V (Volt)	$U = R \cdot I \quad I = \frac{U}{R}$
Strom	I	A (Ampere)	
Widerstand	R	Ω (Ohm)	
Leistung	P	W (Watt)	$P = U \cdot I$
Ladung	Q	Ah (AmpereStunden) oder Cb (Coulomb)	$I = \frac{Q}{t} \quad Q = I \cdot t$
Arbeit	W	Wh (Wattstunden)	$P = \frac{W}{t} \quad W = P \cdot t$

4.15 Einfache Reichweitenberechnung

Datenblatt: Batterie 22,2V / 6,4Ah, 142Wh
 Motor 250W (Nennwert) bei 25V,
 Drehmoment 7Nm Nennwert, Wirkungsgrad 100%

Gesucht: Reichweite bei $v = 25 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und 50% Motorbetrieb

Das für eine Fortbewegung mit 25km/h in der Ebene erforderliche Drehmoment am Hinterrad lesen wir aus der Kennlinienschar 4.12 Seite 35 ab:
 $M = 10\text{Nm}$ bei $v = 25\text{km/h}$

Der Motor muss jedoch nur 5Nm aufbringen bei 50% Tretunterstützung.

Strom im Nennbetrieb: $P = U \cdot I \Rightarrow I_{\text{Nenn}} = \frac{P_{\text{Nenn}}}{U_{\text{Nenn}}} = \frac{250\text{W}}{25\text{V}} = 10\text{A}$

mit $\frac{M}{I} = \text{konst}$ erhält man: $\frac{M_{\text{nenn}}}{I_{\text{nenn}}} = \frac{M_{25}}{I_{25}} \Rightarrow I_{25} = M_{25} \cdot \frac{I_{\text{nenn}}}{M_{\text{nenn}}} = 5\text{Nm} \cdot \frac{10\text{A}}{7\text{Nm}} = 7,14\text{A}$

mit $Q = I \cdot t$ erhält man: $t = \frac{Q}{I} = \frac{6,4\text{Ah}}{7,14\text{A}} = 0,896\text{h}$

zurückgelegte Entfernung: $s = v \cdot t = 25 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0,793\text{h} = 22,4\text{km}$

4.16 Grundlegende Berechnungen aus bekannten Motordaten

Das Ziel der folgenden Berechnungen ist es, mithilfe der bekannten Nenndaten des Motors den fließenden Strom, die anzulegende Spannung, den sich ergebenden Wirkungsgrad bei allen anderen Betriebsfällen auszurechnen. (z.B. bei 25% Motorleistung in Aufg. 4.17)

Dazu muss man aus den Nenndaten erst einmal den Ankerwiderstand, die induzierte Spannung, Nenndrehzahl usw. bestimmen, um anschließend in einfachen Dreisatz-Berechnungen auf die anderen Betriebsfälle schließen zu können.

Vor den Aufgaben stehen immer mögliche Aufgabenstellungen, mit denen man sich eng geführt dem Endziel nähert.

Aufgabenstellung zu 4.16

Aus dem Datenblatt eines E-Bikes entnimmt man folgende Motordaten

$$U_{\text{Nenn}} = 36\text{V}, P_{\text{Nenn}} = 250\text{W}, M_{\text{Nenn}} = 9\text{Nm}, \eta_{\text{max}} = 80\%$$

Der Motor ist direkt auf Hinterradachse montiert. Der Radumfang beträgt 2m

Annahme: Die mechanischen Verluste des Motors bleiben im Nennbetrieb unberücksichtigt ($P_{\text{ab}} = P_{\text{mech-abgegeben}} + P_{\text{mechan-Verlust}} \rightarrow P_{\text{ab}} = P_{\text{mech-abgegeben}}$ wenn $P_{\text{mechan-Verlust}}$ klein)

4.16.1 Berechnen Sie die abgegebene mechanische Leistung im Nennbetrieb.

4.16.2 Welche Motordrehzahl liegt dem Nennbetrieb zugrunde?

4.16.3 Welcher Fortbewegungsgeschwindigkeit entspricht diese Drehzahl?

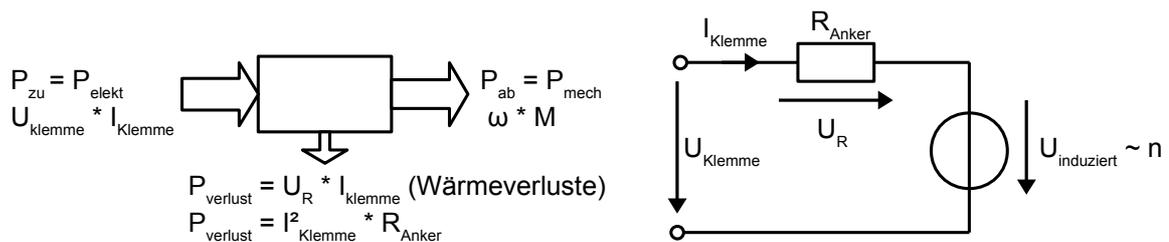
4.16.4 Welcher Strom fließt im Nennbetrieb?

4.16.5 Berechnen Sie den Ankerwiderstand. ($I_{\text{Nenn}} = 6,944\text{A}$)

4.16.5 Ermitteln Sie die am Ankerwiderstand abfallende Spannung und die im Motor induzierte Spannung U_{ind} im Nennbetrieb.

4.16.1 Abgegebene Leistung im Nennbetrieb

$$P_{\text{mech}} = \eta \cdot P_{\text{nenn}} = 0,8 \cdot 250\text{W} = 200\text{W} \rightarrow P_{\text{Verlust}} = P_{\text{Nenn}} - P_{\text{ab}} = 50\text{W}$$



4.16.2 Nenndrehzahl

$$P_{\text{mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \rightarrow n_{\text{Nenn}} = \frac{P_{\text{mech}}}{2 \cdot \pi \cdot M_{\text{nenn}}} = \frac{200\text{W}}{2 \cdot \pi \cdot 9\text{Nm}} = 3,537 \frac{1}{\text{s}}$$

4.16.3 zugehörige Geschwindigkeit

$$v = n \cdot \text{Radumfang} = 3,537 \frac{1}{\text{s}} \cdot 2\text{m} = 7,074 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7,074 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{3600}{1000} = 25,5 \text{ km/h}$$

Dieser Wert würde im Nennbetrieb erreicht, wenn Reibung und Luftwiderstand ein Drehmoment von 9Nm erfordern würden und alleine der Motor den Antrieb übernimmt.

4.16.4 Stromaufnahme

$$P_{zu} = P_{elektr} = U_{Klemme} \cdot I_{Klemme} = U_{Nenn} \cdot I_{Nenn} \rightarrow I_{Nenn} = \frac{P_{Nenn}}{U_{Nenn}} = \frac{250W}{36V} = 6,944 A$$

4.16.5 Ankerwiderstand

$$P_{VerlustNenn} = P_R = I_{Nenn}^2 \cdot R_{Anker} \rightarrow R_{Anker} = \frac{P_{Verlust}}{I_{Nenn}^2} = \frac{50W}{(6,944 A)^2} = 1,037 \Omega$$

4.16.6 U_{ind} für weitere Berechnungen mit dem Motorersatzschaltbild

$$P_{Verlust} = \frac{U_R^2}{R_{Anker}} \rightarrow U_R = \sqrt{P_{Verlust} \cdot R_{Anker}} = 7,2 V$$

$$\rightarrow U_{induziert} = U_{Klemme} - U_R = 36V - 7,2V = 28,8 V$$

4.17 Berechnung der Klemmenspannung für 25% Motorunterstützung Aufgabenstellungen zu 4.17:

Nun soll untersucht werden, welche Spannung an den Motor angelegt werden muss, wenn der Motor nur noch 1/4 des in der Radachse wirkenden Drehmoments aufbringen muss, das restliche Drehmoment bringt der Fahrer auf. Die Geschwindigkeit soll unverändert bleiben.

Der Motor muss stets ein Reibungsmoment von $M_{Reib} = 0,3Nm$ zusätzlich aufbringen. (mechanische Motorverluste)

$$\text{Nennbetrieb: } M_{Nenn} = 9Nm, I_{Nenn} = 6,944A, n_{Nenn} = 3,537 \frac{1}{s} \quad U_{ind_Nenn} = 28,8V, R_{Anker} = 1,037\Omega$$

4.17.1 Welcher Strom fließt nun in den Motor?

4.17.2 Welche Klemmenspannung muss (von der Elektronik) angelegt werden?
Stellen Sie durch Berechnung fest, ob der Wirkungsgrad sich geändert hat.

4.17.3 Die Elektronik erzeugt die Motor-Klemmenspannung durch ein PWM-Signal mit dem Maximalwert 36V. Ermitteln Sie den notwendigen Tastgrad des PWM-Signals wenn der Effektivwert der Spannung 30,84V betragen soll..

Vorüberlegungen

$M_{Motor} = 25\% \cdot M_{Nenn}$; $M_{Fahrer} = 75\% \cdot M_{Nenn}$; wegen $P = \omega \cdot M$ gelten die %-Werte auch für P

Folgende Gesetzmäßigkeiten werden zur Berechnung benötigt:

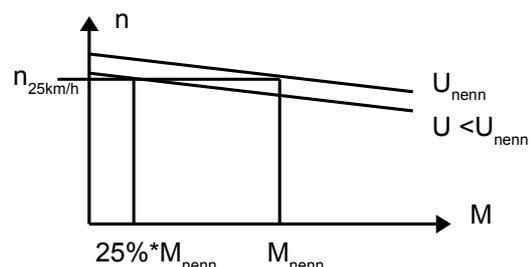
$$\frac{M}{I} = konst_1 \quad \frac{U_{induziert}}{n} = konst_2$$

Was bleibt gleich?

- R_{Anker} und die Drehzahl n ändert sich nicht (gleiche Geschwindigkeit)
- weil $U_{induziert} / n$ konstant ist, ändert sich auch $U_{induziert}$ nicht!

Wie ändert sich die $n(M)$ -Kennlinie?

- Steigung bleibt gleich
- n bleibt gleich
-> Kennlinie so verschieben, dass $M = 25\% \cdot M_{Nenn}$ wird



4.17.1 geänderter Motorstrom

Zum Vergleich werden die Berechnungen ohne (linke Spalte) und mit (rechte Spalte) Berücksichtigung der mechanischen Motorverluste durchgeführt.

ohne Berücksichtigung mechanischer Verluste

$$M_2 = 0,25 \cdot 9 \text{ Nm} = 2,25 \text{ Nm}$$

$$\frac{M}{I} = \text{Konst} = \frac{M_{\text{Nenn}}}{I_{\text{Nenn}}} = \frac{M_{25}}{I_{25}}$$

$$I_{25} = \frac{M_{25} \cdot I_{\text{nenn}}}{M_{\text{Nenn}}} = \frac{2,25 \text{ Nm} \cdot 6,944 \text{ A}}{9 \text{ Nm}} = 1,736 \text{ A}$$

mit Berücksichtigung mechanischer Verluste

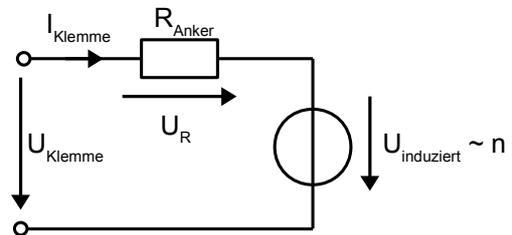
Der Motor muss ein zusätzliches Reibungsmoment von $0,3 \text{ Nm} \approx 3\% \cdot M_{\text{Nenn}}$ aufbringen

$$M_2 = 0,25 \cdot 9 \text{ Nm} + 0,3 \text{ Nm} = 2,55 \text{ Nm}$$

$$I_{25} = \frac{M_{25} \cdot I_{\text{nenn}}}{M_{\text{Nenn}}} = \frac{2,55 \text{ Nm} \cdot 6,944 \text{ A}}{9 \text{ Nm}} = 1,968 \text{ A}$$

4.17.2 Klemmenspannung

weil $\frac{U_{\text{induziert}}}{n} = \text{konst}_2$ und n konstant bleibt, ändert sich auch $U_{\text{induziert}} = 28,8 \text{ V}$ nicht.



$$U_R = R_{\text{Anker}} \cdot I_{25} = 1,037 \Omega \cdot 1,736 \text{ A} = 1,8 \text{ V}$$

$$U_{\text{Klemme}} = U_R + U_{\text{ind}} = 1,8 \text{ V} + 28,8 \text{ V} = 30,6 \text{ V}$$

$$P_{\text{zu}} = U_{\text{Klemme}} \cdot I_{25} = 30,6 \text{ V} \cdot 1,736 \text{ A} = 53,1 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = 0,94 \quad (\text{falsches Ergebnis})$$

$$U_R = R_{\text{Anker}} \cdot I_{25} = 1,037 \Omega \cdot 1,968 \text{ A} = 2,04 \text{ V}$$

$$U_{\text{Klemme}} = U_R + U_{\text{ind}} = 2,04 \text{ V} + 28,8 \text{ V} = 30,84 \text{ V}$$

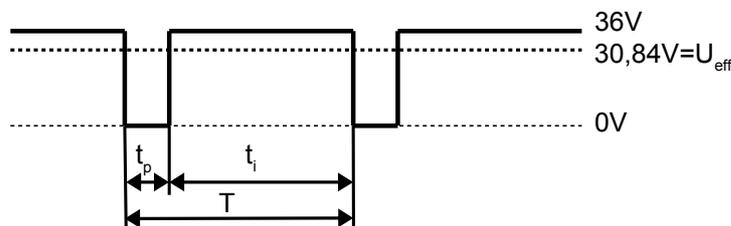
$$P_{\text{zu}} = U_{\text{Klemme}} \cdot I_{25} = 30,84 \text{ V} \cdot 1,968 \text{ A} = 60,7 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{50 \text{ W}}{60,7 \text{ W}} = 0,82 \quad (P_{\text{ab}} = 25\% \cdot \omega \cdot 9 \text{ Nm})$$

Die obenstehenden Berechnungen zeigen, dass bei kleinen Motorleistungen die Reibungsverluste des Motors berücksichtigt werden sollten, sonst erhält man für den Wirkungsgrad falsche Ergebnisse.

4.17.3 Tastgrad t_i / T der Motorspannung bei Verwendung eines PWM-Signals

Erklärung PWM siehe Fehler: Referenz nicht gefunden Fehler: Referenz nicht gefunden, Seite Fehler: Referenz nicht gefunden



$$\text{Tastgrad} = \left(\frac{U_{\text{Effektivwert}}}{U_{\text{Maximalwert}}} \right)^2 = \frac{t_i}{T} = \left(\frac{30,84 \text{ V}}{36 \text{ V}} \right)^2 = 0,857 = 85,7\%$$

Der Effektivwert der Spannung ist nicht gleich dem Mittelwert der Spannung. Diesen Effektivwert muss man anlegen, damit dem Motor genauso viel Leistung zugeführt wird, wie wenn man eine Gleichspannung von 30,84V anlegen würde.

4.18 Energieverbrauch in der Ebene, berechnet mit Motordaten

Der E-Bike-Fahrer fährt mit 20km/h in der Ebene eine Strecke von 30km. Der Motor muss 25% der Gesamtleistung aufbringen. Welche Energiemenge wird dem Akku entnommen? Entnehmen Sie das notwendige Drehmoment der $M(v)$ -Kennlinienschar. Berücksichtigen Sie, dass der Motor zusätzlich ein Reibemoment von $M_R = 0,3\text{Nm}$ aufbringen muss.

Motordaten: $R_{\text{Anker}} = 1,04\Omega$, Motorkonstanten $U_{\text{ind}} / n = 8,142 \text{ Vs}$, $M / I = 1,296 \text{ Nm/A}$
 Radumfang: $RU = 2,07\text{m}$

Aufgabenstellungen

- 4.18.1 Ermitteln Sie das notwendige Motordrehmoment aus der Kennlinienschar $M(v)$.
- 4.18.2 Welcher Motorstrom fließt?
- 4.18.3 Ermitteln Sie die Motordrehzahl.
- 4.18.4 Welche Spannung wird im Motor induziert?
- 4.18.5 Welche Spannung muss durch die Elektronik an den Motor angelegt werden?
- 4.18.6 Welche Leistung muss der Motor aufbringen?
 Welche Energiemenge W (Arbeit) ist notwendig?
 Welcher Wirkungsgrad wird erreicht?

4.18.1 Notwendiges Drehmoment

abgelesen aus Kennlinienschar bei $m=0\%$ Steigung: $M = 8\text{Nm} \Rightarrow M_{\text{Motor}} = 2\text{Nm}$ (25%)

4.18.2 Notwendiger Strom

$$\frac{M}{I} = \text{konst} = 1,296 \text{ Nm/A} \Rightarrow I = \frac{M}{\text{konst}} = \frac{(2\text{Nm} + 0,3\text{Nm})}{1,296 \text{ Nm/A}} = 1,775 \text{ A}$$

4.18.3 Drehzahl n pro Sekunde

$$v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r = RU \cdot n \Rightarrow n = \frac{v}{RU} = \frac{20 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{2,07} = \frac{20 \cdot \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}}}{2,07} = 2,684 \frac{1}{\text{s}}$$

4.18.4 Induzierte Spannung U_{ind}

$$\frac{U_{\text{ind}}}{n} = 8,142 \text{ Vs} \Rightarrow U_{\text{ind}} = 2,684 \frac{1}{\text{s}} \cdot 8,142 \text{ Vs} = 21,85 \text{ V}$$

4.18.5 Klemmenspannung

$$U_R = R_{\text{Anker}} \cdot I = 1,04\Omega \cdot 1,775 \text{ A} = 1,846 \text{ V}$$

$$U_{\text{Klemme}} = U_R + U_{\text{ind}} = 1,846 \text{ V} + 21,85 \text{ V} = 23,7 \text{ V}$$

4.18.6 Elektrische Leistung, Energiemenge und Wirkungsgrad

$$P_{\text{elektr}} = 23,7 \text{ V} \cdot 1,775 \text{ A} = 42,06 \text{ W}$$

\Rightarrow nach 1,5h Fahrt: $W = P \cdot t = 42,06 \text{ W} \cdot 1,5 \text{ h} = 63,1 \text{ Wh}$

$$P_{\text{ab}} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot 2,684 \frac{1}{\text{s}} \cdot 2\text{Nm} = 33,7 \text{ W} \quad \eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{33,7 \text{ W}}{42,06 \text{ W}} = 0,801$$

4.19 Berechnung des Energieverbrauchs mit Leistung und Wirkungsgrad

Der E-Bike-Fahrer fährt mit 20km/h in der Ebene eine Strecke von 30km. Der Motor muss 25% der Gesamtleistung aufbringen und besitzt einen Wirkungsgrad von 80%.

Welche elektrische Leistung nimmt der Motor auf ?

Welche Energiemenge wird dem Akku entnommen?

Entnehmen Sie die notwendige Leistung der P(v)-Kennlinienschar.

4.19.1 Notwendige Leistung und verbrauchte elektrische Energiemenge

abgelesen aus der Kennlinien $m=0\%$ der Kennlinienschar P(v) bei $v=20\text{km/h}$: $P=135\text{W}$

$$P_{\text{Motor}} = 0,25 \cdot 135\text{W} = 33,75\text{W}$$

$$P_{\text{zu}} = \frac{P_{\text{Motorab}}}{\eta} = \frac{33,75\text{W}}{0,8} = 42,18\text{W}$$

$$\Rightarrow \text{nach } 1,5\text{h Fahrt: } W = P \cdot t = 42,18 \cdot 1,5\text{h} = 63,3\text{Wh}$$

4.20 Bergfahrt

Nach der Talfahrt führt eine Steigung mit 6% auf einen Berg. 1000m Höhenunterschied sind zu überwinden. Der Fahrer wählt 50% Motorleistung und fährt 15km/h schnell.

Reicht die verbleibende Energiemenge für die Bergfahrt?

Entnehmen Sie die notwendige Leistung der P(v)-Kennlinienschar.

Motordaten: $\eta=0,80$ Akku: 288 Wh.

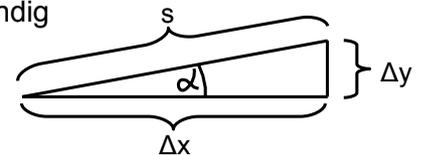
Aus der 6%-Kennlinie bei $v = 15\text{km/h}$: $P = 330\text{W}$

$$P_{\text{Motor}} = 50\% \cdot 330\text{W} = 165\text{W}$$

$$P_{\text{zu}} = \frac{P_{\text{Motorab}}}{\eta} = \frac{165\text{W}}{0,8} = 206,25\text{W} \quad \text{elektrische Leistung notwendig}$$

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \Rightarrow \Delta x = \frac{\Delta y}{m} = \frac{1000\text{m}}{0,06} = 16,67\text{km} \approx s$$

$$v = \frac{s}{t} \Rightarrow t = \frac{s}{v} = \frac{16,67\text{km}}{15 \frac{\text{km}}{\text{h}}} = 1,11\text{h} \quad (\text{weil } \tan(\alpha) \approx \sin(\alpha) \text{ für kleine } \alpha \text{ gilt } \Delta x \approx s)$$



$$W = P \cdot t = 206,25\text{W} \cdot 1,11\text{h} = 229,1\text{Wh}$$

$$W_{\text{ges}} = 63,3\text{Wh} + 229,1\text{Wh} = 292,4\text{Wh} < 288\text{Wh}$$

Kurz vor der Bergspitze schaltet der Motor ab!

4.21 Heimfahrt

Bei der anschließenden Talfahrt werden 30% der für die Bergfahrt benötigten Energiemenge wieder in den Akku eingespeist. Reicht die Energiemenge im Akku für Heimfahrt? (Energieverbrauch Heimfahrt wie Hinfahrt)

$$W_{\text{Heimfahrt}} = 0,3 \cdot 229\text{Wh} = 68,7\text{Wh} > 63,3\text{Wh}$$

Die Energiemenge müsste knapp für die Heimfahrt reichen.

4.22 Betriebskosten E-Bike gegenüber Auto mit Verbrennungsmotor

Zur Zeit noch verursacht der Akkumulator in Elektrofahrzeugen einen nicht vernachlässigbaren Kostenanteil. Hohe Anschaffungskosten und vergleichbar kurze Lebensdauer verursachen hohe Kosten.

Der Akku eines E-Bikes kostet 600€.

Er kann 1000x aufgeladen werden (danach verringert sich die Kapazität spürbar, er ist jedoch nicht kaputt).

Pro Aufladung werden ca. 400Wh gespeichert und 50km gefahren.

Der Strompreis beträgt 25€ pro kWh.

(Anmerkung: richtiges E-Bike, hier wird nicht oder wenig getreten, kein Pedelec!)

Gesucht sind die Kosten pro km unter Berücksichtigung der Akku-Anschaffungskosten.

Der Akku hält $1000 \cdot 50\text{km} = 50.000\text{km}$.

Die verbrauchte Energiemenge beträgt $400\text{Wh} \cdot 1000 = 40\text{kWh}$.

Die Stromkosten betragen $40\text{kWh} \cdot 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 10 \text{€}$.

Die Gesamtkosten betragen $\text{Akkukosten} + \text{Stromkosten} = 600 \text{€} + 10 \text{€} = 610 \text{€}$.

Kosten: $\frac{610 \text{€}}{50.000\text{km}} = 0,0122 \frac{\text{€}}{\text{km}} = 1,22 \frac{\text{€}}{100\text{km}} = 1,22 \frac{\text{ct}}{\text{km}}$

Zum Vergleich: Energiekosten für ein Auto mit Verbrennungsmotor

Verbrauch $\frac{6\text{L}}{100\text{km}}$, 1L kostet 1,50€

Kosten: $\frac{6\text{L}}{100\text{km}} \cdot 1,50 \frac{\text{€}}{\text{L}} = 9 \frac{\text{€}}{100\text{km}} = 9 \frac{\text{ct}}{\text{km}}$

Der Energiekosten des E-Bikes mit 1,22 Cent pro km sind wesentlich günstiger als die des Autos mit 9 Cent pro km. Beim Auto kommen ferner hohe Anschaffungs-, Wartungs- und Nebenkosten hinzu.

5 Steuerschaltungen

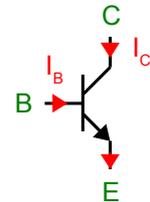
5.1 Eigenschaften verschiedener Transistoren

5.1.1 Bipolar-Transistor

Prinzip:

Der kleine Strom I_B , der in die Basis fließt, steuert den großen Kollektorstrom I_C .

B: Basis
E: Emittter
C: Kollektor

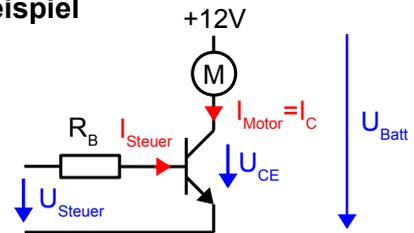


I_B : Basisstrom (steuert)
 I_C : Kollektorstrom (wird gesteuert)

Eigenschaften

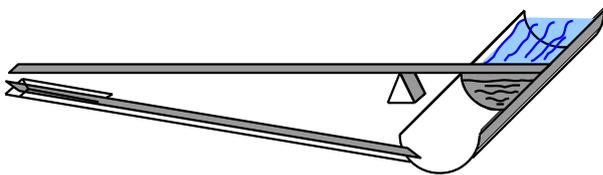
- Es muss ein Basisstrom fließen damit der Transistor leitet
- schaltet schnell
- Verlustleistung $U_{CE} \cdot I_C$ klein wenn U_{CE} klein

Schaltungsbeispiel

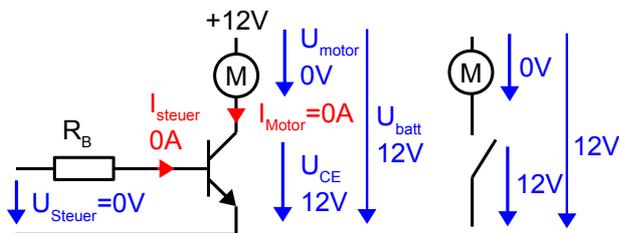


Transistor sperrt

Kein Steuerstrom
→ Transistor sperrt

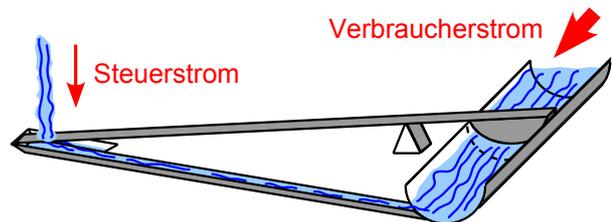


Steuerspannung ist 0 → Steuerstrom ist 0
→ Verbraucherstrom $I_{Motor} = 0$ → $U_{Motor} = 0$
→ die gesamte Spannung fällt am Transistor ab

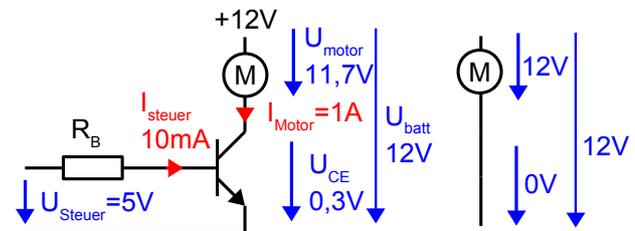


Transistor leitet

kleiner Steuerstrom steuert den großen Verbraucherstrom → Transistor leitet



Zahlenwerte sind Beispielwerte!
Steuerspannung = 5V → Steuerstrom = 1mA (wird durch R_B bestimmt) → $I_{Motor} = 1A$ → fast gesamte Spannung am Motor, Restspannung am Transistor



5.1.2 Feldeffekt-Transistor

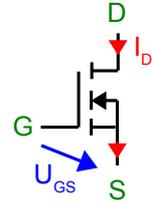
hier: MOSFET (Metal-Oxid-Semiconductor Field Effect Transistor)

Prinzip:

Die Spannung am Gate steuert den Verbraucherstrom I_D
Den Transistor kann man als **spannungsgesteuerten Widerstand** betrachten.

G: Gate
D: Drain
S: Source

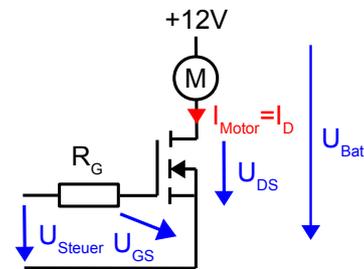
U_{GS} : Gate-Source-Spannung (steuert)
 I_D : Drainstrom (wird gesteuert)



Eigenschaften

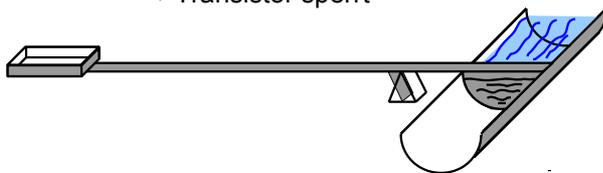
- Es fließt nur dann ein Strom I_D , wenn eine Spannung U_{GS} anliegt.
- schaltet langsamer als Bipolartransistor
- Verlustleistung von der Größe des Kanalwiderstandes R_{kanal} zwischen D und S abhängig ($I^2 * R_{kanal}$)
- Parallelschaltung mehrerer Transistoren möglich um den Verbraucherstrom zu erhöhen.
- bei hohen Schaltfrequenzen (100kHz) fließt ein merklicher Gatestrom, da die Elektronen zum Gate hin- und zurücktransportiert werden müssen.

Schaltungsbeispiel



Transistor sperrt

Keine Spannung am GATE
→ Transistor sperrt

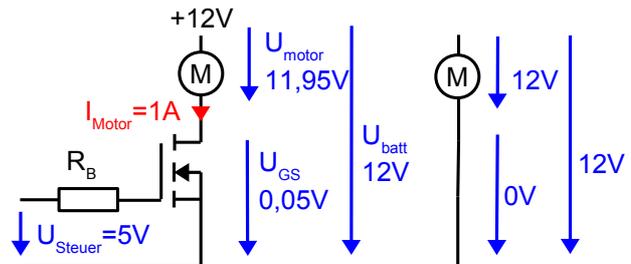
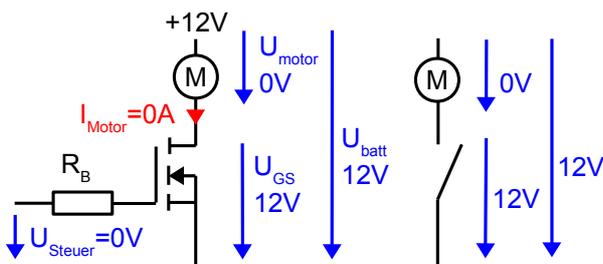
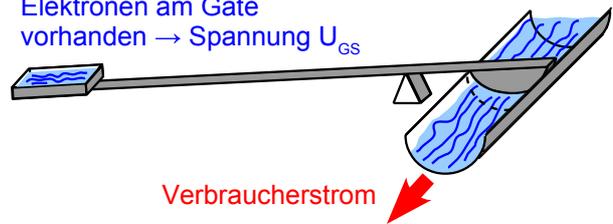


Transistor leitet

Spannung U_{GS} → Transistor leitet

Elektronen am Gate vorhanden → Spannung U_{GS}

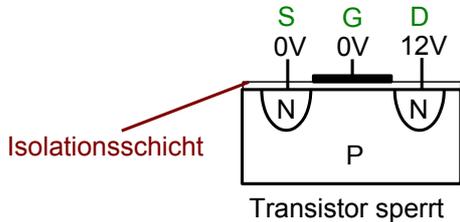
Verbraucherstrom



Transistor sperrt

$U_{GS} = 0V$

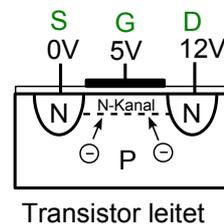
- kein Kanal vorhanden
- kein Strom I_D möglich



Transistor leitet

$U_{GS} = 5V$

- Elektronen wandern zum Gate
- es bildet sich ein N-leitender-Kanal
- Strom I_D von D nach S



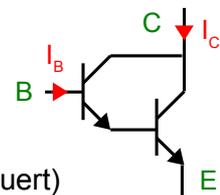
5.1.3 Bipolarer Darlington-Transistor

Prinzip:

Der sehr kleine Strom I_B , der in die Basis des ersten Transistors fließt, steuert den größeren Kollektorstrom I_C des ersten Transistors. Dieser wird zum Basisstrom des zweiten Transistors und steuert den sehr großen Kollektorstrom des zweiten Transistors

B: Basis
E: Emittor
C: Kollektor

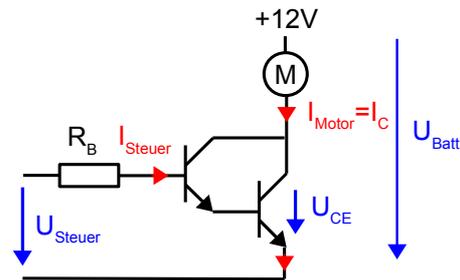
I_B : Basisstrom (steuert)
 I_C : Kollektorstrom (wird gesteuert)



Eigenschaften

- Es muss ein Basisstrom fließen, damit der Transistor leitet
- für große Verbraucherströme bei relativ kleinen Steuerströmen
- schaltet schnell
- Verlustleistung $U_{CE} \cdot I_C$ kann groß werden weil U_{CE} deutlich größer ist als beim einfachen Bipolartransistor

Schaltungsbeispiel



5.1.4 IGBT

Abkürzung für insulated-gate bipolar transistor

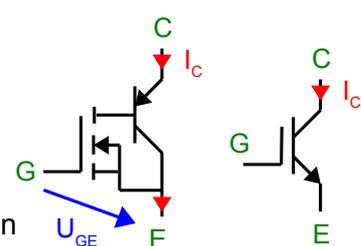
Prinzip:

Darlington-Schaltung aus MOSFET und Bipolartransistor.
Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode

G: Gate
E: Emittor
C: Kollektor

links: Aufbau

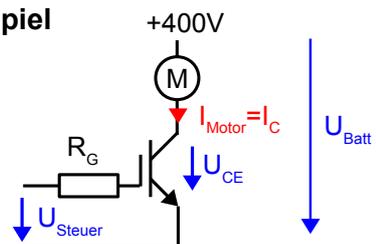
rechts: Schaltzeichen



Eigenschaften

- Vereint die guten Eigenschaften von MOSFET und Bipolartransistor
- Leistungslose Steuerung bei kleinen Frequenzen da kein Strom notwendig.
- Geringe Verlustleistung weil U_{CE} klein ist.
- für sehr große Ströme geeignet

Schaltungsbeispiel



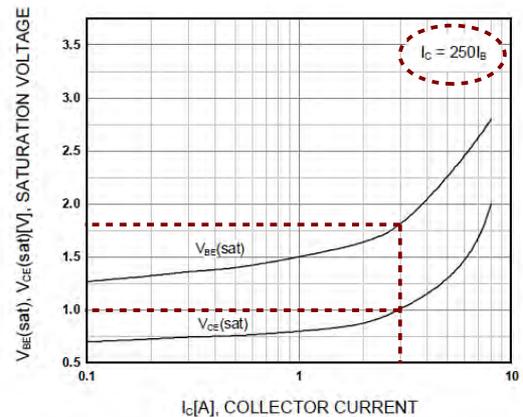
5.2 Datenblatt-Beispiele

5.2.1 Bipolarer Darlington-Transistor TIP 122

Abzulesen ist z.B. folgendes:

Für einen Laststrom von $I_C = 3\text{ A}$ gilt:
Wenn der Basisstrom so eingestellt wird, dass er $1/250$ von I_C beträgt, also 12 mA , so beträgt die Restspannung zwischen Kollektor und Emittor $U_{CE\text{sat}} = 1\text{ V}$.

(Der Basisvorwiderstand muss so gewählt werden, dass $I_B = 12\text{ mA}$ bei $U_{BE} = 1,6\text{ V}$ beträgt.)



Continuous collector current	I_C	5	A
Peak collector current (see Note 1)	I_{CM}	8	A
Continuous base current	I_B	0.1	A
Continuous device dissipation at (or below) 25°C case temperature (see Note 2)	P_{tot}	65	W
Continuous device dissipation at (or below) 25°C free air temperature (see Note 3)	P_{tot}	2	W

Der Kollektorstrom I_C darf maximal 5 A betragen.

Mit einem (großen) Kühlkörper kann der Transistor 65W Verlustleistung aufnehmen, ohne Kühlkörper nur 2W.

Beispiel: Bei einem Laststrom von 3A muss der Transistor $P = U_{CE} \cdot I_C = 1\text{ V} \cdot 3\text{ A} = 3\text{ W}$ Verlustleistung aufnehmen. -> Kühlkörper notwendig!

5.2.2 MOSFET IRLZ 34N

Es kann ein maximaler Laststrom I_D von 30A fließen. Dann kann der Transistor (mit großem Kühlkörper) 68W Verlustleistung aufnehmen.

Der Drain-Source-Widerstand R_{DS} beträgt im durchgeschalteten Zustand nur $0,035\Omega$.

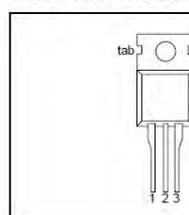
Beispiel: Bei einem Laststrom von 3A muss der Transistor

$P = I_D^2 \cdot R_{DS} = (3\text{ A})^2 \cdot 0,035\Omega = 0,315\text{ W}$ Verlustleistung aufnehmen.

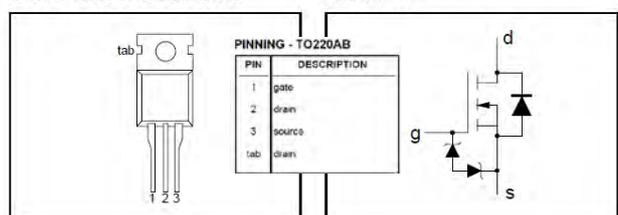
QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	UNIT
V_{DS}	Drain-source voltage	55	V
I_D	Drain current (DC)	30	A
P_{tot}	Total power dissipation	68	W
T_j	Junction temperature	175	°C
$R_{DS(ON)}$	Drain-source on-state resistance $V_{GS} = 10\text{ V}$	35	mΩ

PIN CONFIGURATION



SYMBOL



Wenn man die Spannung am Gate nicht ändert, fließt praktisch kein Strom ins Gate.

I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 16\text{ V}$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -16\text{ V}$

Das Gate ist ein Elektronenspeicher und wirkt wie ein Kondensator. Mithilfe

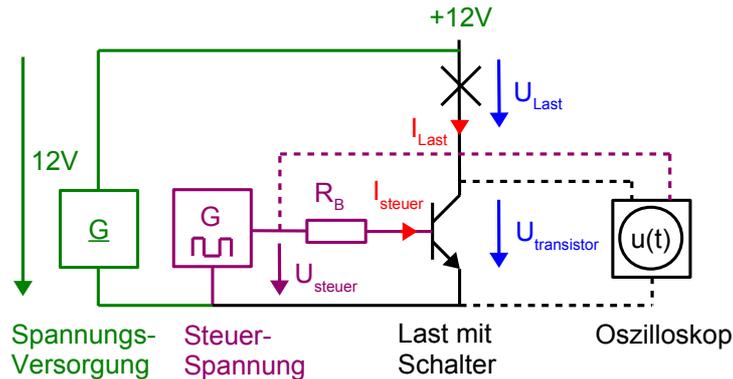
C_{iss}	Input Capacitance	—	880	—	pF	$V_{GS} = 0\text{ V}$
C_{oss}	Output Capacitance	—	220	—		$V_{DS} = 25\text{ V}$
C_{res}	Reverse Transfer Capacitance	—	94	—		$f = 1.0\text{ MHz}$, See Fig. 5

der Angabe der Kapazität C kann man ausrechnen, wie groß der (Auf- und Entlade-) Strom ist, der ins Gate fließt, wenn man den Transistor ein- und ausschaltet.

5.3 Versuche: Wie schnell schalten die Transistortypen?

Zur Steuerung von Motoren oder LEDs verwendet man heute praktisch nur noch schnell schaltende Transistoren. Daher untersuchen wir die verschiedenen Transistortypen und beurteilen das Schaltverhalten und die sich daraus ergebenden Eigenschaften.

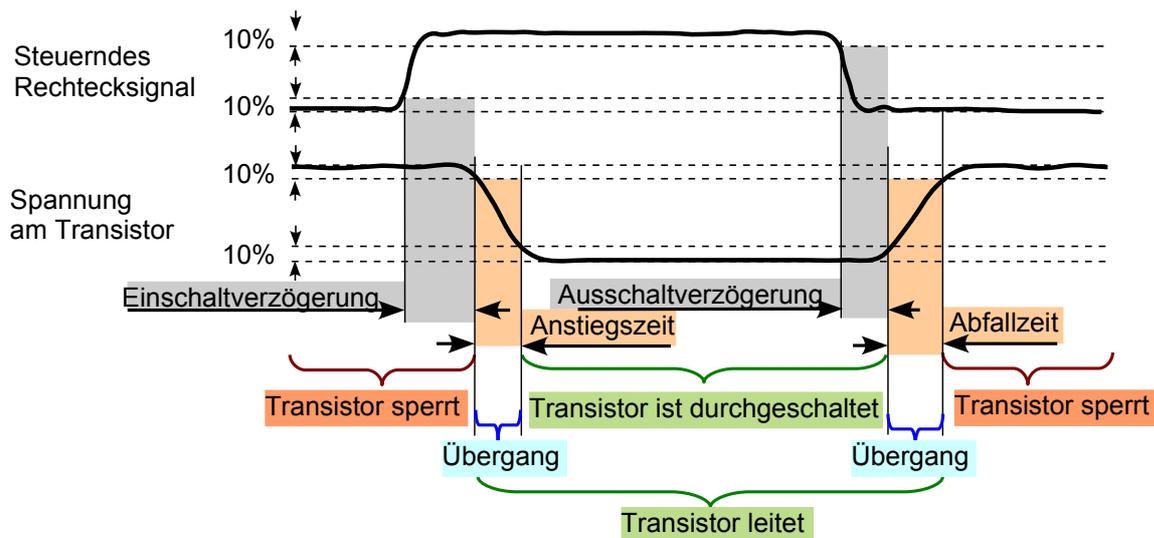
- Wie schnell schalten die Transistoren?
- Wie verändert der Steuerstrom das Schaltverhalten?
- Welche Verlustleistung ($U_{CE} \cdot I_C$) entsteht?

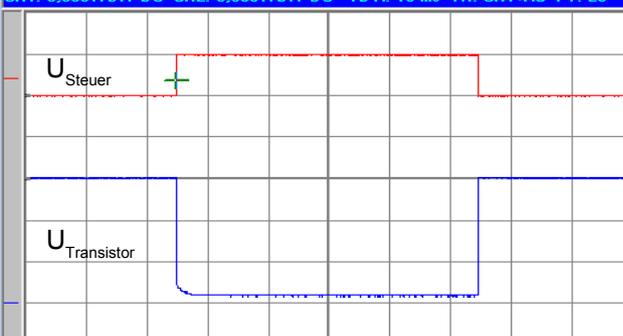
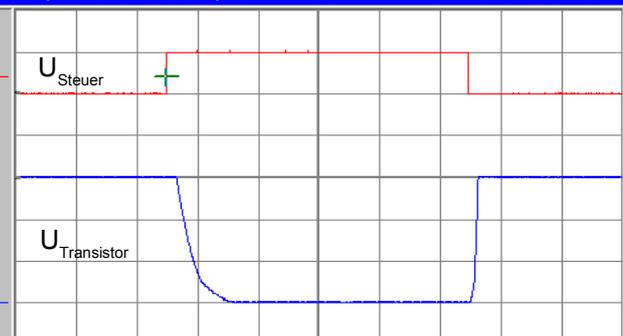
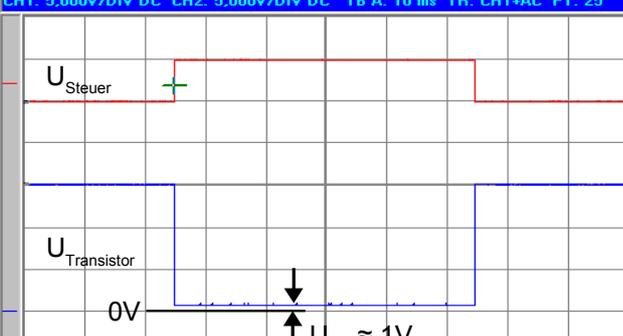
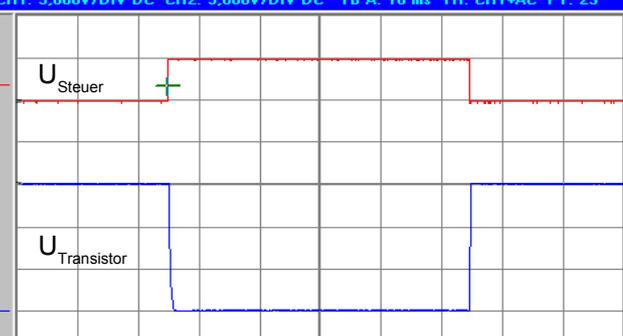


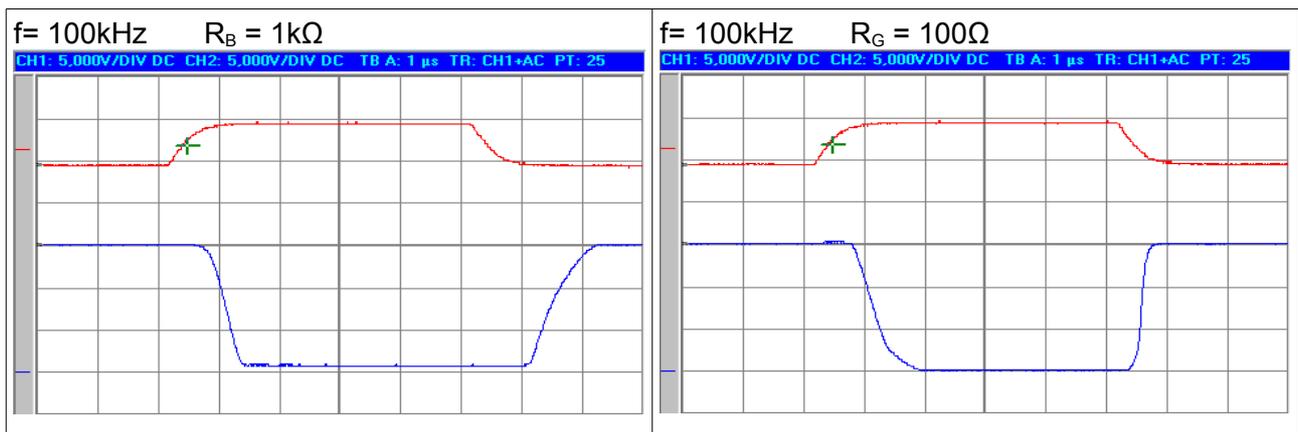
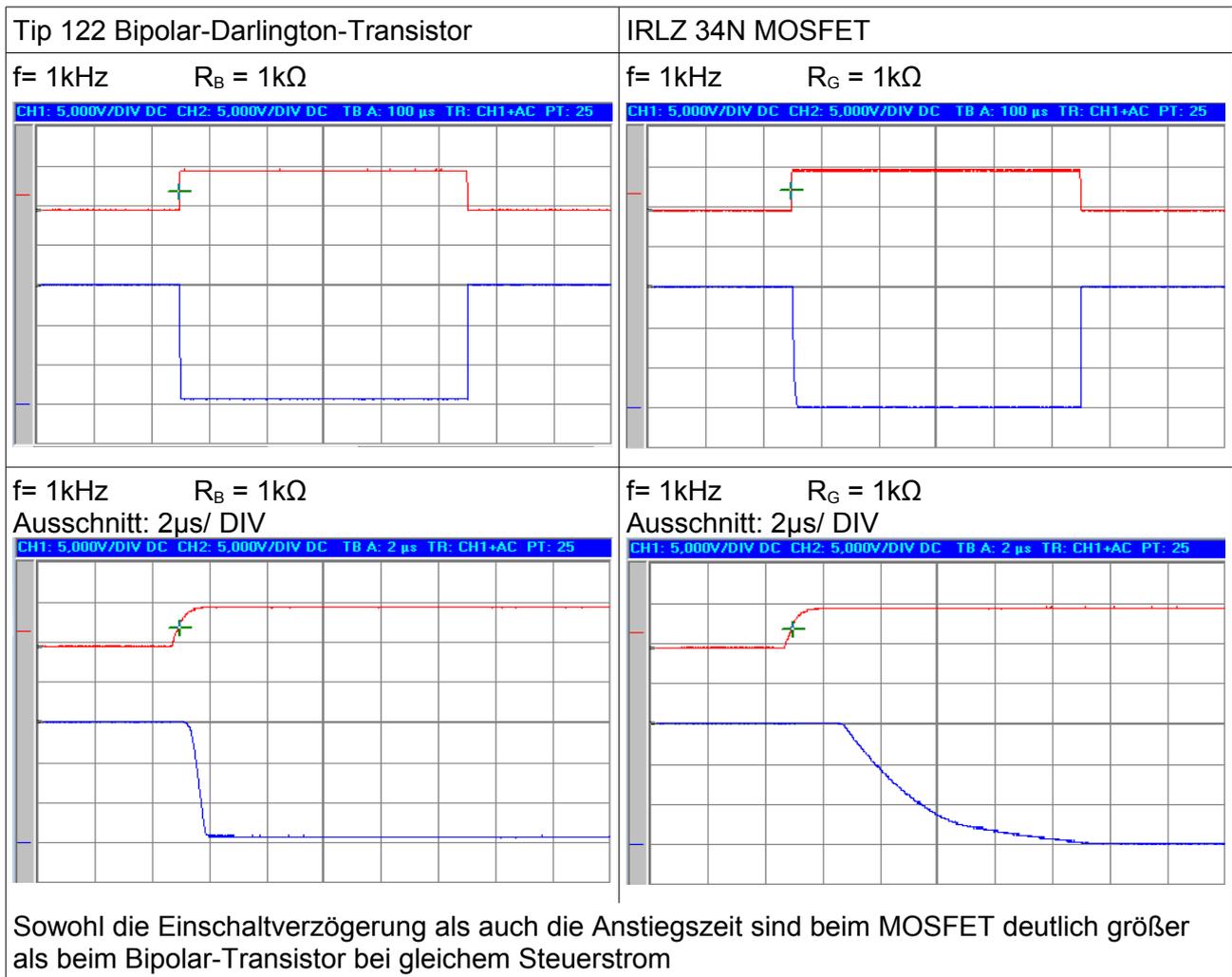
Die Frequenz des Rechteckgenerators (0V / 5V) wird verändert. Am Oszilloskop kann man die Zeit zwischen den Flanken des Rechteckgenerators und den Flanken der Spannung U_{CE} am Transistor ablesen.

Der Basisvorwiderstand stellt die Größe des Basisstromes ein. Dieser Widerstand wird geändert und beobachtet, ob sich die Schaltverzögerung und die Flankensteilheit ändert.

5.3.1 Schalt- und Verzögerungszeiten



Tip 122 Bipolar-Darlington-Transistor	IRLZ 34N MOSFET
<ul style="list-style-type: none"> • Gleichspannung 5V an $R_B = 15k\Omega$ -> Transistor leitet • Bei größeren Widerständen R_B ist der Basisstrom nicht ausreichend, die Lampe ist dunkler. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichspannung 5V an $R_B = 10M\Omega$, bleibt eingeschaltet, auch wenn Gate offen. • Ausschalten mit 0V an $R_B = 10M\Omega$
<p>f= 10Hz $R_B = 15k\Omega$</p> <p>CH1: 5,000V/DIV DC CH2: 5,000V/DIV DC TB A: 10 ms TR: CH1+AC PT: 25</p> 	<p>f= 10Hz $R_G = 1M\Omega$</p> <p>CH1: 5,000V/DIV DC CH2: 5,000V/DIV DC TB A: 10 ms TR: CH1+AC PT: 25</p> 
<p>f= 10Hz $R_B = 10k\Omega$</p> <p>CH1: 5,000V/DIV DC CH2: 5,000V/DIV DC TB A: 10 ms TR: CH1+AC PT: 25</p> 	<p>f= 10Hz $R_G = 100k\Omega$</p> <p>CH1: 5,000V/DIV DC CH2: 5,000V/DIV DC TB A: 10 ms TR: CH1+AC PT: 25</p> 
<ul style="list-style-type: none"> • Schaltet schnell (Flanke steil) • Am durchgeschalteten (Darlington-) Transistor fällt eine merkliche Spannung ab -> Verlustleistung $P = U_{CE} * I$ merklich 	<ul style="list-style-type: none"> • Wenn der Gatestrom zu klein ist, schaltet der Transistor nicht so schnell (Flanke nicht so steil) • Praktisch kein Spannungsabfall am Transistor -> geringe Verlustleistung

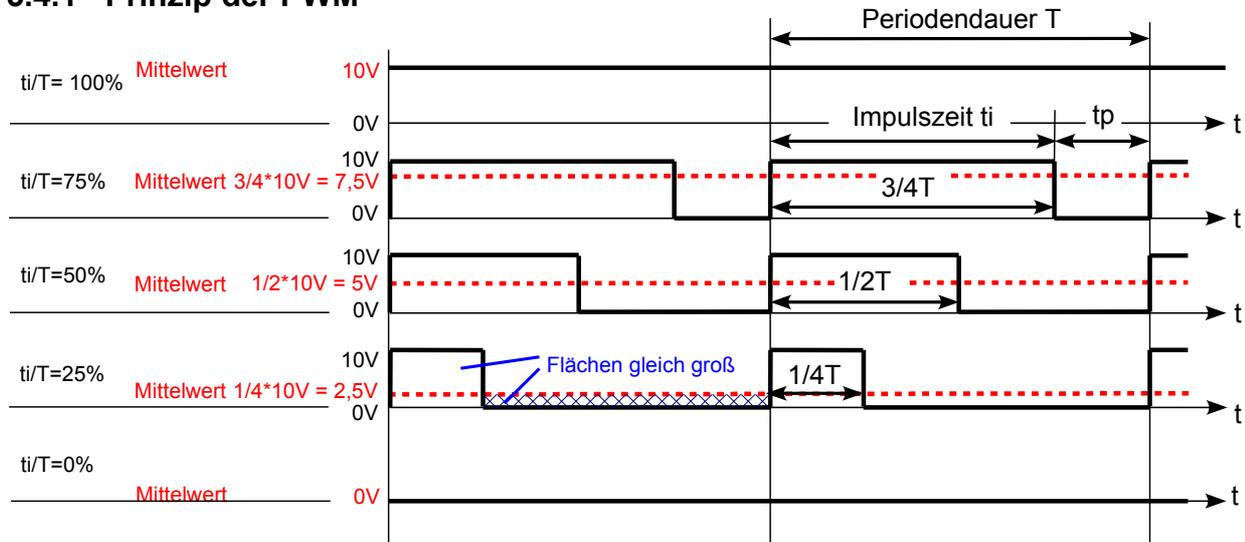


Folgerungen:

- Bei höheren Schaltfrequenzen muss auch beim MOSFET ein Strom fließen, der Elektronen zum Gate bringt und wieder von dort zurücktransportiert. Das Gate wirkt wie ein Kondensator
- Folge der flachen Flanken: Während des Umschaltens ist der Transistor nicht ganz durchgeschaltet und wirkt als Verstärker (vergl. Kap Fehler: Referenz nicht gefunden), bei dem Verlustleistung entsteht.

5.4 Pulsweitenmodulation PWM

5.4.1 Prinzip der PWM



Die Abbildung zeigt 5 verschiedene Tastgrade t_i / T eines PWM-Signals.

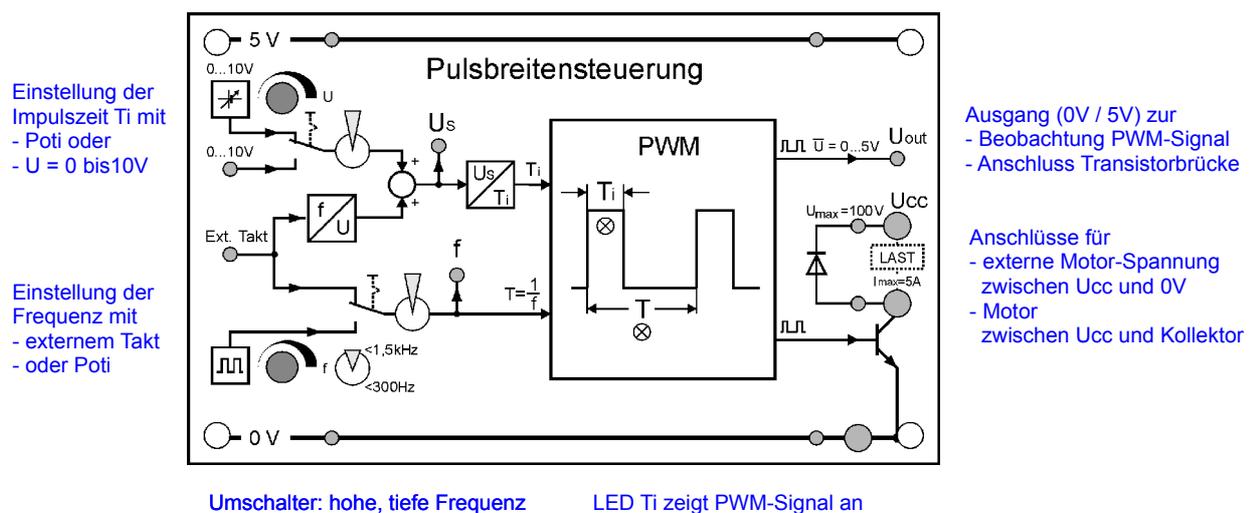
Wenn das Ein- und Ausschalten sehr schnell erfolgt, liegt am Verbraucher eine mittlere Spannung an.

Ist der Verbraucher eine Lampe, so sieht man eine "mittlere Helligkeit". In Wirklichkeit wird die Lampe sehr schnell ein- und ausgeschaltet.

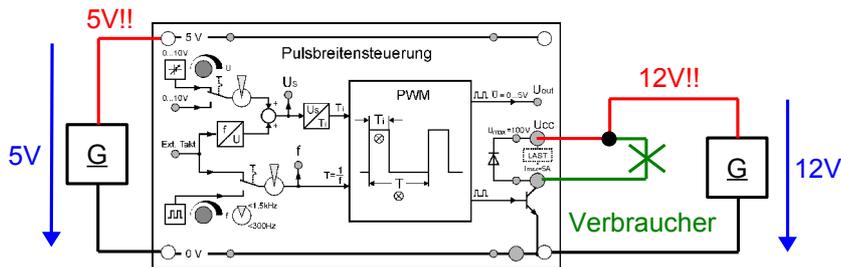
Je Länger die "An"-Zeit gegenüber der "Aus"-Zeit der Lampe ist, desto heller leuchtet die Lampe.

Ist der Verbraucher ein Gleichstrommotor, so kann man mit dem PWM-Signal die Drehzahl ändern.

5.4.2 Schaltungsmodul PWM



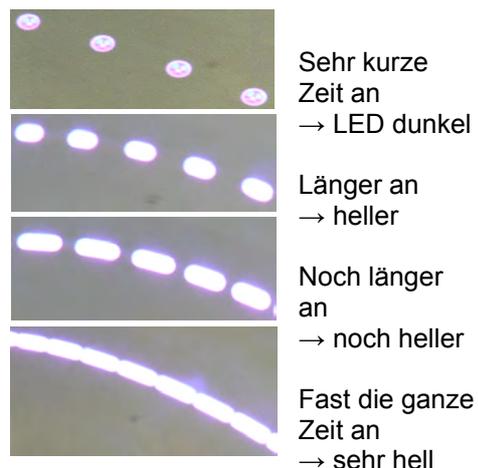
5.4.3 Ansteuerung einer Glühlampe mit einem PWM-Signal



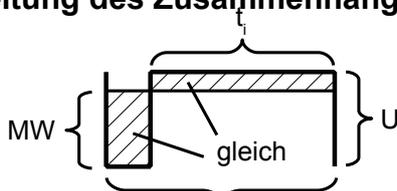
- Glühlampe als Verbraucher anschließen
- Auf niedrigste Frequenz einstellen, kleines T_i → Die Lampe leuchtet periodisch kurz auf mit maximaler Helligkeit, dann ist sie längere Zeit aus.
- Mit Schalter auf hohen Frequenzbereich schalten, der Tastgrad bleibt dabei gleich → Lampe glimmt nur, man sieht einen "Mittelwert".
- Den Tastgrad vergrößern → je größer T_i ist, desto heller leuchtet die Lampe
- Nach dem Umschalten auf die niedere Frequenz sieht man, dass die Lampe nun länger an und kürzer aus ist.

5.4.4 Ansteuerung einer LED mit einem PWM-Signal

Verwendet man als Verbraucher eine LED (mit Vorwiderstand), so kann man den sich ändernden Tastgrad sichtbar machen, indem man die leuchtende LED sehr schnell hin- und herbewegt. In den Bildern rechts sieht man die Ein- und Ausschaltzeiten bei vier verschiedenen Tastgraden.



5.4.5 Herleitung des Zusammenhangs zw. Tastgrad und Spannungsmittelwert



$$\text{gleiche Flächen: } t_i \cdot (U - MW) = MW \cdot (T - t_i)$$

$$\rightarrow T_i \cdot U - MW \cdot T_i = MW \cdot T - MW \cdot t_i \rightarrow t_i \cdot U = MW \cdot T$$

$$\rightarrow \frac{t_i}{T} = \frac{MW}{U}$$

$$\text{Tastgrad} = \frac{\text{Impulszeit}}{\text{Periodendauer}} = \frac{t_i}{T} = \frac{MW}{U} = \frac{\text{Mittelwert}}{\text{Maximalspannung}}$$

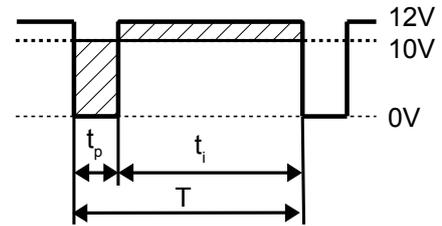
5.4.6 Berechnungsbeispiel Mittelwert der Spannung

Ein 12V-PWM-Signal soll so eingestellt werden, dass sich eine mittlere Spannung von 10V ergibt.

Ermitteln Sie den Tastgrad und die Impulszeit bei einer Frequenz von 10kHz.

$$\text{Tastgrad} = \frac{t_i}{T} = \frac{\text{Mittelwert}}{U_{\text{Maximalwert}}} = \frac{10\text{V}}{12\text{V}} = 0,833 = 83,3\%$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10.000 \cdot \frac{1}{\text{s}}} = 0,0001 \text{ s} = 100\mu\text{s} \quad t_i = 0,833 \cdot 100\mu\text{s} = 83,3\mu\text{s} \quad (t_p = 16,7\mu\text{s})$$



5.4.7 Berechnungsbeispiel Leistung

Da PWM-Signal (Tastgrad 83,3%) liegt an einem Widerstand von 10Ω .

Der Strom während der Zeit t_p ist null, daher auch die Leistung.

Während der Zeit t_i fließt ein Strom von $I_i = \frac{12\text{V}}{10\Omega} = 1,2 \text{ A} \rightarrow P_i = 12\text{V} \cdot 1,2 \text{ A} = 14,4 \text{ W}$

Die effektive Leistung während der Zeit T beträgt: $P_{\text{eff}} = P_i \cdot 0,833 = 12\text{W}$

5.4.8 Vergleich PWM-Spannungsmittelwert -Gleichspannung

Vergleicht man eine Lampe (10Ω) an der das PWM-Signal mit einem Spannungsmittelwert von 10V und dem Tastgrad 83,3% (Berechnung oben Fehler: Referenz nicht gefunden und 5.4.7) mit einer Lampe, die man an 10V Gleichspannung anlegt, so stellt man fest, dass die Lampe an Gleichspannung wesentlich dunkler ist, also eine kleinere Leistung aufnimmt.

Die Gleichstromleistung der Lampe beträgt $P_{\text{gl}} = \frac{U^2}{R} = \frac{(10\text{V})^2}{10\Omega} = 10\text{W}$.

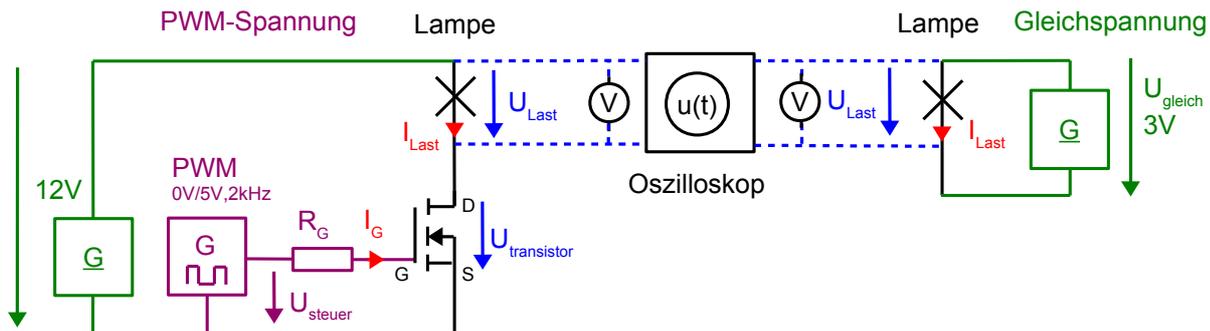
Die Effektivleistung der Lampe am PWM-Signal ist jedoch 12W!

5.4.9 Vergleich Effektive PWM-Leistung und Gleichstromleistung

Nun stellt sich die Frage, welchen Tastgrad des PWM-Signals man einstellen muss, damit die die Leistung durch das PWM-Signal genauso groß ist wie die Gleichstromleistung.

Die Leistung ist quadratisch von der Spannung abhängig: $P \sim U^2$ (weil $P = \frac{U^2}{R}$).

Für den Tastgrad ergibt sich: $\text{Tastgrad} = \frac{t_i}{T} = \left(\frac{U_{\text{Effektivwert}}}{U_{\text{Maximalwert}}} \right)^2$



Die rechte Lampe wird mit einer Gleichspannung von 3V versorgt. Die linke Lampe wird mit einem PWM-Signal ein- und ausgeschaltet. An der Lampe liegen abwechselnd 0V und 12V an.

Der Effektivwert der Spannung des PWM-Signals muss 3V betragen. $U_{\text{eff}} = 3V$ (ungleich Mittelwert!)

Wie muss die Pulsweite t_i der PWM-Spannung eingestellt werden, dass beide Lampen gleich hell leuchten?

Der Tastgrad muss $\text{Tastgrad} = \frac{t_i}{T} = \left(\frac{U_{\text{Effektivwert}}}{U_{\text{Maximalwert}}} \right)^2 = \left(\frac{3V}{12V} \right)^2 = 0,0625 = 6,25\%$ betragen.

Rechts sieht man das Oszillogramm der oben dargestellten Schaltung.

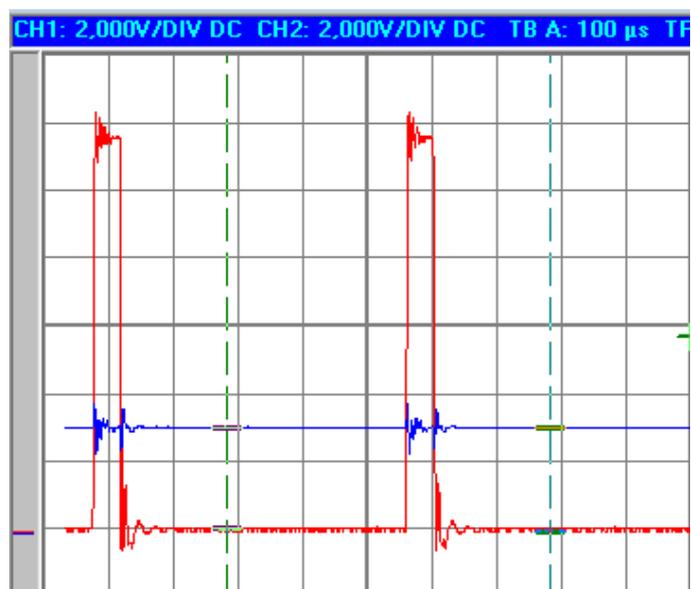
Abgelesen am PWM-Signal:

$$\frac{t_i}{T} = \frac{0,3 \text{ Kästchen}}{4,8 \text{ Kästchen}} = 0,0625$$

Es ist also ein Tastgrad von 6,25% einstellt.

An der Lampe liegt eine Gleichspannung von 3V an.

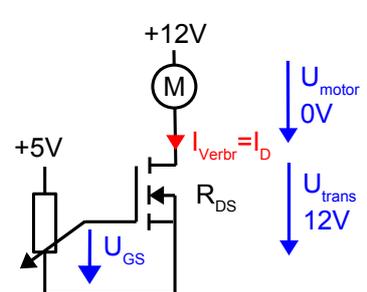
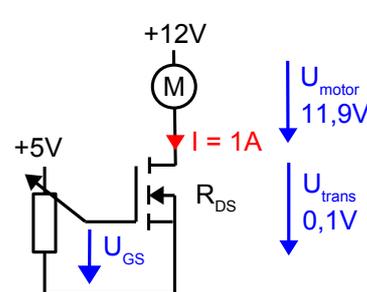
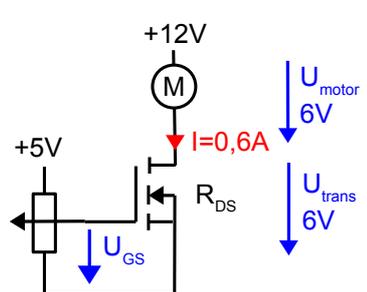
Beide Lampen leuchten gleich hell, da sie die gleiche effektive Leistung aufnehmen.



5.5 Transistor als Verstärker oder elektronischer Schalter

Es soll geklärt werden, warum einen Transistor mit einem PWM-Signal ansteuert und nicht einfach mit einer Gleichspannung.

Man könnte die Spannung am Motor (und damit die Drehzahl) dadurch ändern, dass man den Transistor nicht ganz durchschaltet. Man ändert einfach mithilfe des Potis die Größe der Spannung Gate des Transistors. Diesen Fall zeigt das rechte Bild. Die beiden anderen Fälle zeigen die Schaltzustände, die bei einem PWM-Signal vorkommen: AUS oder AN.

Transistor als Schalter		Transistor als Verstärker
<p>Transistor sperrt, Motor steht.</p>  <p>$U_{GS} = 0V$</p>	<p>Transistorwiderstand minimal "Transistor leitet maximal". Motor dreht sich mit maximaler Drehzahl</p>  <p>$U_{GS} = 5V$</p>	<p>Transistorwiderstand mittelgroß "Transistor leitet etwas". Motor dreht sich mit kleinerer Drehzahl</p>  <p>Poti so eingestellt, dass am Motor und Transistor die gleiche Spannung abfällt</p>
<p>$P_{Motor} = 0W$ $P_{Transistor} = 0W$</p>	<p>$P_{Motor} = 11,9W (= U_{Motor} * I_{Motor})$ $P_{Transistor} = 0,1W$ nur wenig Verlustleistung am Transistor</p>	<p>$P_{Motor} = 3,6W$ $P_{Transistor} = 3,6W$ die Hälfte der Leistung fällt am Transistor ab!!!</p>

Wenn der Transistor durchschaltet ist, fällt an ihm nur eine kleine Verlustleistung an (Bild Mitte). Ist er jedoch nur "etwas" durchgeschaltet (Bild rechts), so wird die Verlustleistung sehr groß. Der Wirkungsgrad dieser Schaltung ist also sehr schlecht und der Transistor muss gut gekühlt werden, um die nutzlos entstehende Wärme abzuführen.

Daher ist es viel effizienter, den Motor sehr schnell ($f > 1kHz$) ein- und auszuschalten wie bei einem PWM-Signal. Dieses Prinzip wird bei allen modernen Geräten verwendet, bei denen es auf hohen Wirkungsgrad und geringe Verlust ankommt, z.B. in LED-Lampen, Schaltnetzteilen, Wechselrichter für Solaranlagen.

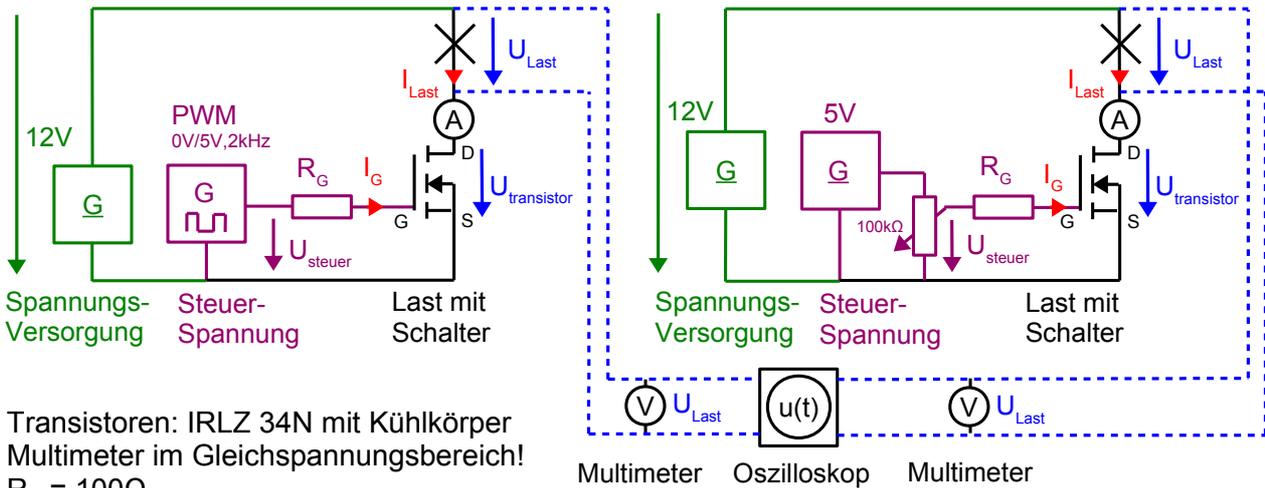
Auf den folgenden Seiten folgen entsprechende Berechnungen bei der Gegenüberstellung

- des PWM-Betriebs, bei dem der Transistor als Schalter arbeitet
- und des Transistor-Betriebs als Verstärker.

5.6 Gegenüberstellung digitale PWM-Steuerung und analoge Steuerung.

Die folgenden Versuche sollen Antworten auf folgende Fragen geben:

- Warum verwendet man die PWM-Steuerung?
- Welche Vorteile bringt die PWM-Steuerung?
- Welche Verlustleistungen entstehen?
- Wird die Last bei vergleichbaren Spannungen mit der gleichen Leistung versorgt?



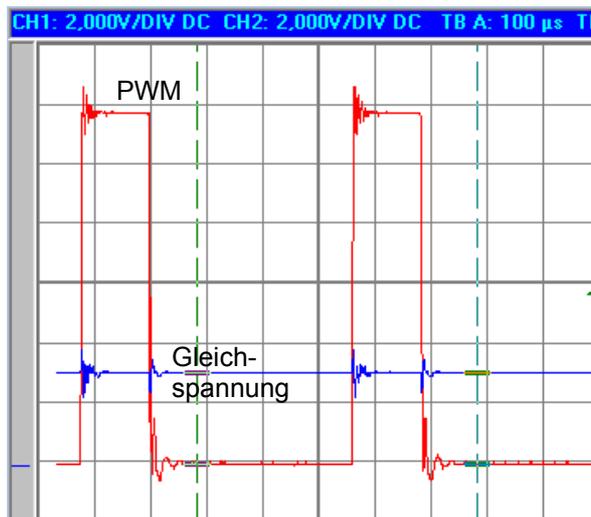
Transistoren: IRLZ 34N mit Kühlkörper
Multimeter im Gleichspannungsbereich!
 $R_G = 100\Omega$

Pulsweite t_i (PWM, links) und Steuerspannung (analoge Steuerung, rechts) so eingestellt, dass beide Spannungsmesser die gleiche Spannung von 3V anzeigen.

PWM
Messwerte:
 $U = 3V$
 $I = 1,02A$

Kühlkörper kalt
Lampe viel heller als bei Gleichspannung

$t_i = 1,2$ Kästchen
 $T = 4,8$ Kästchen
 $\frac{t_i}{T} = \frac{1,2}{4,8} = 0,25$



Gleichspannung
Messwerte:
 $U = 3V$
 $I = 1,41A$
10µF am Oszi-Eingang zur Störungsunterdrückung

Kühlkörper heiß
Lampe glimmt nur

Leistungsberechnung:
während Impulszeit t_i : $U_i = 12V$
 $I_i = \frac{1,02A}{0,25} = 4,08A \rightarrow P_i = U_i \cdot I_i = 49W$
während Pausenzeit: $P=0$
Mittelwert einer Periode:
 $P_{eff} = P_i \cdot 0,25 = 12,3W$

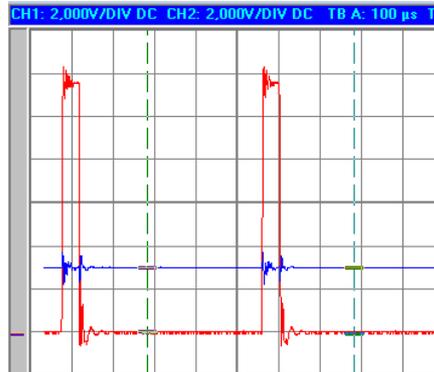
Leistungsberechnung:
 $P = U \cdot I = 3V \cdot 1,41A = 4,2W$

Da die Lampe im PWM-Betrieb die 3-fache Leistung aufnimmt verglichen mit Gleichspannung, leuchtet sich auch viel heller.

Pulsweite t_i (PWM, links) und Steuerspannung (analoge Steuerung, rechts) so eingestellt, dass beide Lampen gleich hell erscheinen (subjektives Empfinden, keine Leistungsmessung).

PWM
Messwerte
 $U = 1V$
 $I = 0,42A$

$t_i = 0,4$ Kästchen
 $T = 4,8$ Kästchen
 $\frac{t_i}{T} = \frac{0,4}{4,8} = 0,083$



Gleichspannung
Messwerte
 $U = 3V$
 $I = 1,41A$

Leistungsberechnung:
während Impulszeit t_i : $U_i = 12V$
 $I_i = \frac{0,42A}{0,1} = 5A \rightarrow P_i = U_i \cdot I_i = 60W$

$P_{eff} = P_i \cdot 0,083 = 5W$ liegt in der Größe der Gleichstromleistung.

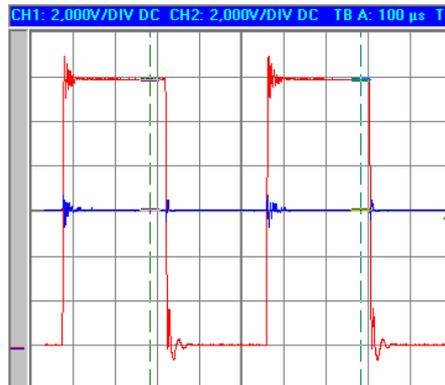
Leistungsberechnung:
 $P = U \cdot I = 3V \cdot 1,41A = 4,2W$

Pulsweite t_i (PWM, links) und Steuerspannung (analoge Steuerung, rechts) so eingestellt, dass beide Spannungsmesser die gleiche Spannung von 6V anzeigen.

PWM
 $U = 6V$
 $I = 1,74A$

Kühlkörper kalt
Lampe deutlich heller
als mit Gleichspannung

Tastgrad 50%
 $I_i = \frac{1,74A}{0,5} = 3,48A$
 $\rightarrow P_i = U_i \cdot I_i = 41,8W$
 $P_{eff} = P_i \cdot 0,5 = 20,9W$



Gleich
 $U = 6V$
 $I = 2,0A$

Kühlkörper heiß
leuchtet

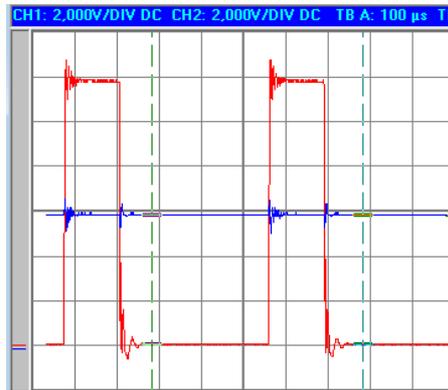
$P = 6V \cdot 2A = 12W$

5.6.1 Aufgabe Berechnungen an PWM-Signalen

Ermitteln Sie die Tastgrade, die Leistungen der Lampe und die Verlustleistungen am Transistor in den folgenden drei Fällen.

Pulsweite t_i (PWM, links) und Steuerspannung (analoge Steuerung, rechts) so eingestellt, dass beide Lampen gleich hell erscheinen (subjektives Empfinden, keine Leistungsmessung).

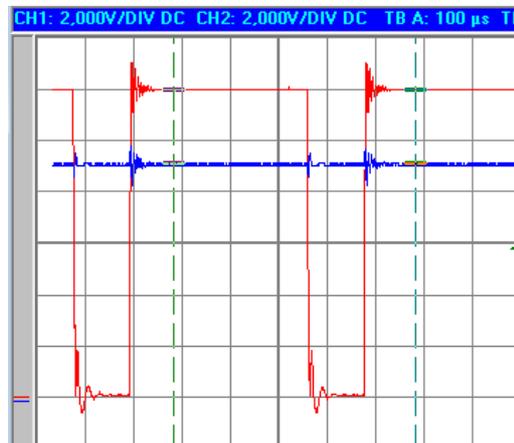
PWM
 $U = 3,25V$
 $I = 1,08A$



Gleichspannung
 $U = 6V$
 $I = 2,0A$

Pulsweite t_i (PWM, links) und Steuerspannung (analoge Steuerung, rechts) so eingestellt, dass beide Spannungsmesser die gleiche Spannung von 9V anzeigen.

PWM
 $U = 9V$
 $I = 2,38A$
 $R_{vor} = 470\Omega$



Gleichspannung
 $U = 9,05V$
 $I = 2,502A$
 $R_{vor} = 100\Omega$

kalt

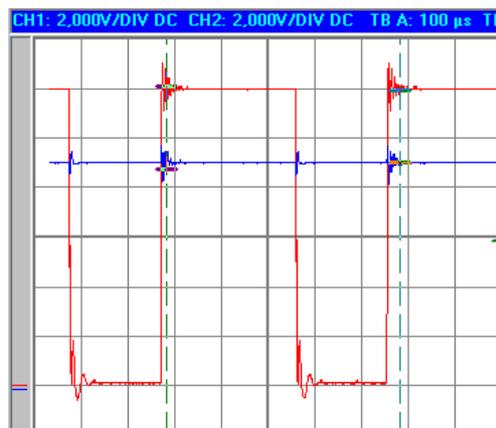
heiß

deutlich heller als mit
Gleichspannung

hell

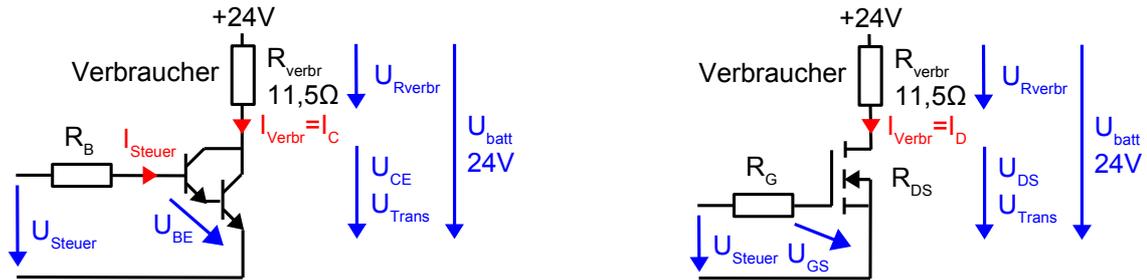
Pulsweite t_i (PWM, links) und Steuerspannung (analoge Steuerung, rechts) so eingestellt, dass beide Lampen gleich hell erscheinen (subjektives Empfinden, keine Leistungsmessung).

PWM
 $U = 7,1V$
 $I = 1,97A$



Gleichspannung
 $U = 9,05V$
 $I = 2,502A$

5.7 Übung Berechnungen zu Transistorschaltungen



Die abgebildeten Schaltungen werden verglichen. Als Verbraucher wird vereinfacht ein ohm'scher Widerstand mit $R = 11,5\Omega$ angenommen.

5.7.1 Statischer Betrieb: beide Transistoren sind durchgeschaltet.

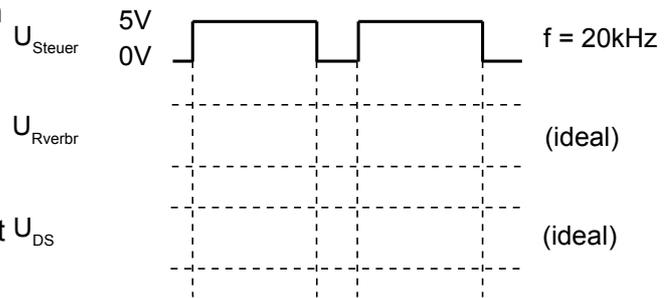
Der bipolare Darlington-Transistor hat im durchgeschalteten Zustand eine Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung von $U_{CE} = 1V$.

Der MOSFET hat im durchgeschalteten Zustand einen Kanalwiderstand von $R_{DS} = 0,1\Omega$.

Berechnen Sie für beide Schaltungen den Verbraucherstrom I_{Verbr} und die Verlustleistungen des Verbraucher-Widerstands P_{Rverbr} und des Transistors P_{Trans} .

5.7.2 Dynamischer Betrieb: U_{Steuer} ist ein PWM-Signal

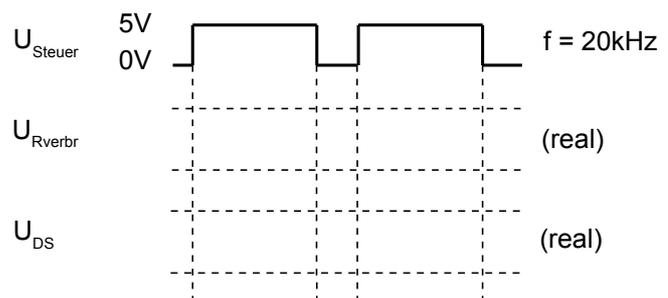
Skizzieren Sie die ideale Spannung am Verbraucher U_{Rverbr} und die Spannung am MOSFET U_{DS} unter das gegebene Steuersignal U_{steuer} . Geben Sie die Größe der Spannungen an.



Das Signal U_{Steuer} hat einen Tastgrad von 75%. Berechnen Sie den Mittelwert U_{DS} der Spannung am Widerstand und die mittlere Leistung am Widerstand.

Im realen Betrieb stellt man fest, dass die Leistung am Verbraucher-Widerstand kleiner und am Transistor größer ist.

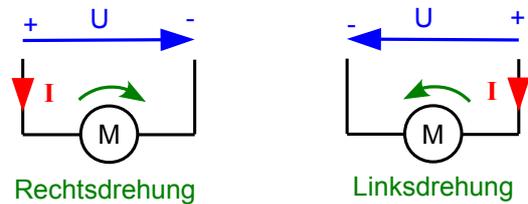
Erklären Sie diesen Sachverhalt anhand von Skizzen der realen Spannungsverläufe am Transistor. Beachten Sie, dass die Frequenzen recht groß sind.



5.8 Transistorbrücke zur Richtungsumschaltung

5.8.1 Drehrichtung beim Gleichstrommotor

Eine Drehrichtungsumkehr erhält man durch Umpolen der Gleichspannung. Dadurch wird die Stromrichtung im Motor umgekehrt. Die erzeugten Magnetfelder im Motor ändern Ihre Richtung, daher dreht sich der Motor in die andere Richtung.



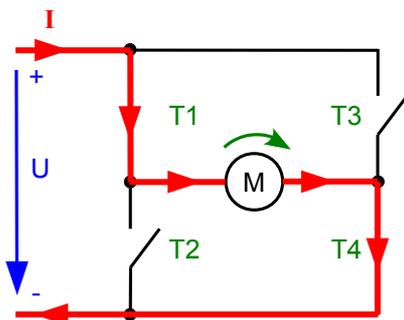
Wenn der Motor mit einer Transistorschaltung angesteuert wird, sind für eine Richtungsumkehr 4 Transistoren notwendig.

An jedem Motoranschluss stellen 2 Transistoren die Verbindung zum Plus- und Minusanschluss der Versorgungsspannung her.

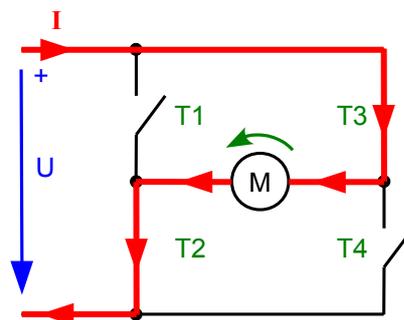
5.8.2 Prinzipieller Aufbau einer Transistorbrückenschaltung

Prinzip der Brückenschaltung, Darstellung mit Schaltern anstelle von Transistoren

- Die Transistoren sind als Schalter dargestellt.
- Schalter geschlossen bedeutet: Transistor leitet
- Schalter offen bedeutet: Transistor sperrt

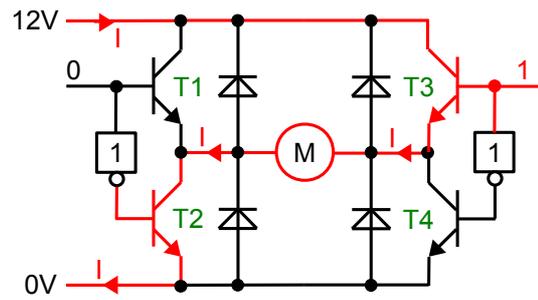
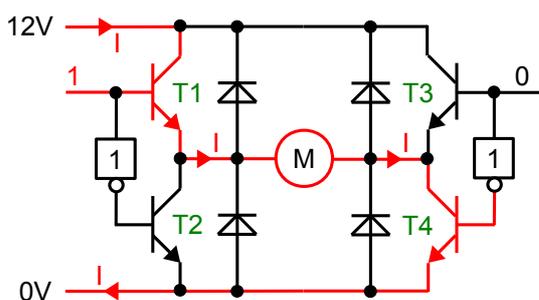


T1 und T2 leiten
Stromfluss gemäß den Pfeilen
von links nach rechts durch den Motor
Es erfolgt eine **Rechtsdrehung**.

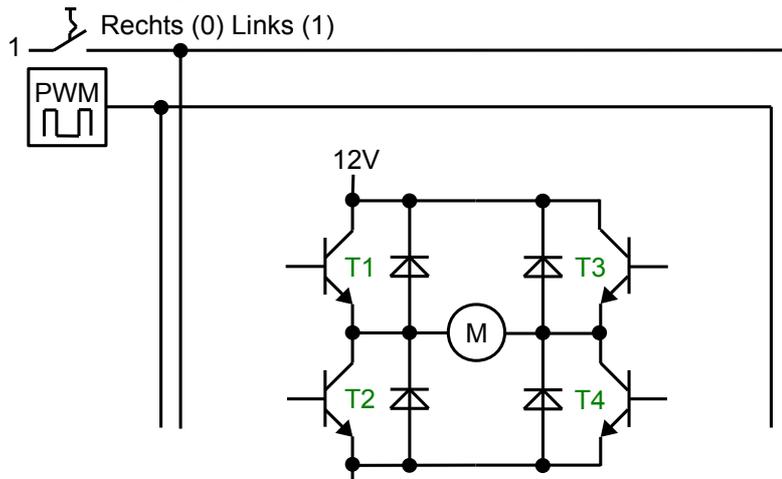


T3 und T4 leiten
Stromfluss gemäß den Pfeilen
von rechts nach links durch den Motor
Es erfolgt eine **Linksdrehung**.

Transistor-Brückenschaltung mit Freilaufdioden und Verriegelung durch Inverter



5.8.3 Aufgabe Logik entwerfen zur Ansteuerung der Transistorbrücke



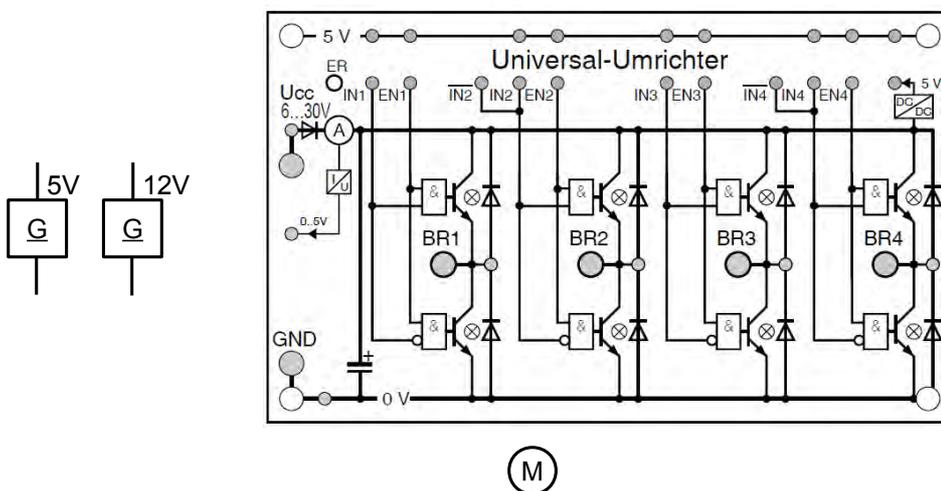
Ein Schalter steuert die Umschaltung zwischen Rechts- und Linkslauf. Das PWM-Signal schaltet den Motor ein- und aus und steuert die Drehgeschwindigkeit.

4 logische Schaltungen, bestehend aus UND, ODER, NICHT, sind zu entwerfen, die an die Eingänge der Transistoren gezeichnet werden. Erklären Sie die Wirkungsweise Ihrer Schaltungen.

5.8.4 Versuch Anschluss des Motors an die Transistorbrückenschaltung

Start / Stopp

Rechts / Links



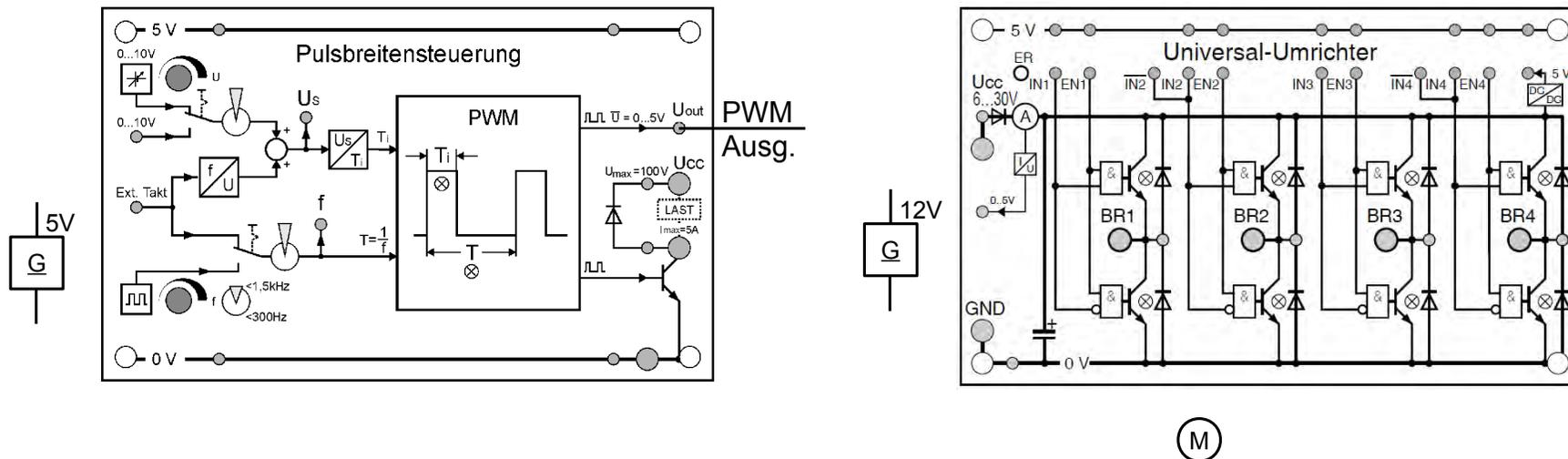
Zeichnen Sie die notwendigen Verbindungen ein zum Anschluss des 12V-Motors, der zwei Netzteile und der zwei Schalter an die Transistorbrückenschaltung.

Plus: rot, GND: schwarz, Motor: grün

Geben Sie Erklärungen zur Anschlussweise und testen Sie die Funktion. Beachten Sie die LEDs, die anzeigen, welcher Transistor gerade durchschaltet ist.

5.8.5 Versuch Motor mit PWM-Drehzahlsteuerung und Drehrichtungs-Umschaltung

Rechts / Links 

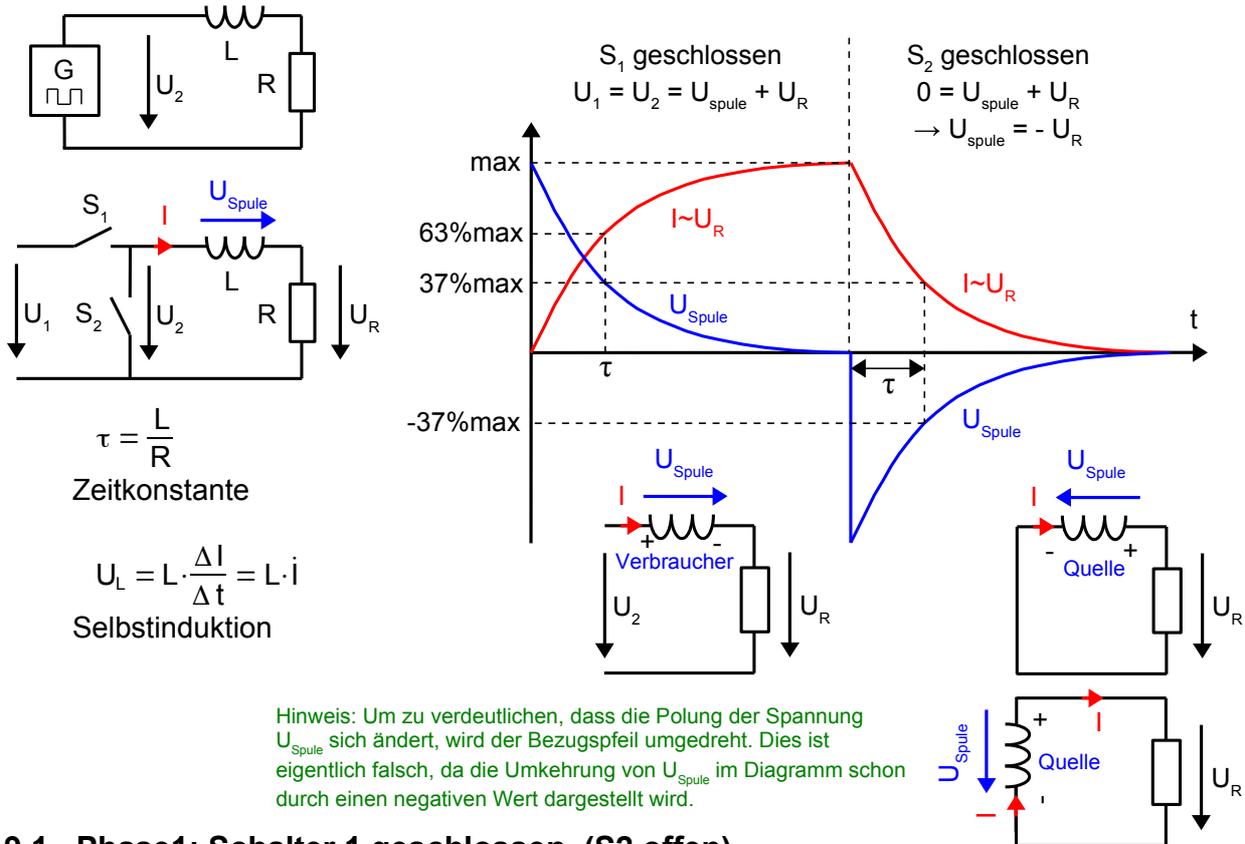


Die Drehzahl des 12V-Motors soll mit dem Tastgrad des PWM-Signals veränderbar sein. Ein Schalter ändert die Drehrichtung. Zeichnen Sie alle notwendigen Verbindungen: Plus rot, GND schwarz, Motor grün, PWM blau. Vergessen sie nicht, dass bei Module verbunden werden müssen.

Schalten Sie zum Funktionstest das PWM-Signal auch einmal auf die kleinste Frequenz, um das Verhalten der Schaltung durch Beobachten der LEDs und der Motordrehrichtung zu ändern.

Geben Sie hier Ihre Hinweise zur Anschlussweise:

5.9 Spule an geschalteter Gleichspannung



5.9.1 Phase 1: Schalter 1 geschlossen, (S2 offen)

- der Strom möchte sich stark ändern
 \rightarrow die Spule induziert eine Spannung U_{Spule} (Selbstinduktion) die fast so groß ist wie U_1 (U_L ist groß weil ΔI groß ist)
- da nun $U_R = U_2 - U_{\text{Spule}}$ sehr klein ist, fließt auch nur ein kleiner Strom $I = U_R / R$
- die Größe der Stromänderung ΔI nimmt ab $\rightarrow U_{\text{Spule}}$ nimmt ab
- $U_R = U_2 - U_{\text{Spule}}$ steigt (weil U_{Spule} sinkt)
- Am Ende ist $U_{\text{Spule}} = 0$ und es fließt der maximale Strom $I = \frac{(U_2 - U_{\text{Spule}})}{R} = \frac{(U_2 - 0)}{R} = \frac{U_2}{R}$

\rightarrow Ohne Spule würde sofort der maximale Strom fließen, der durch R begrenzt wird.

\rightarrow Die Spule verzögert den Stromanstieg

\rightarrow Die Spule versucht, "den alten Strom aufrecht zu erhalten".

\rightarrow Der Strom in der Spule kann sich nicht sprunghaft ändern.

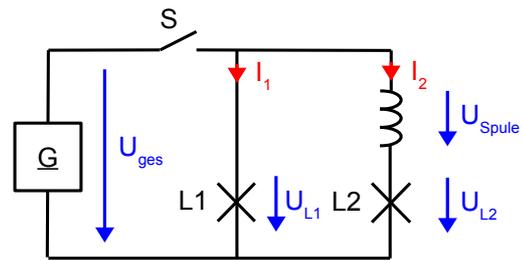
\rightarrow Durch den fließenden Strom ist Energie in der Spule gespeichert.

5.9.2 Phase 2: Schalter 2 geschlossen, (S1 offen)

- Strom fließt weiter in die gleiche Richtung
- Spule wirkt nun als Energiequelle
- die Spannung an der Spule hat nun jedoch eine andere Polarität!
 wenn $U_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \cdot \dot{i}$ bei Stromzunahme positiv war muss U_L bei Stromabnahme negativ werden!
- U_{Spule} und U_R müssen addiert 0 ergeben (da $U_2 = 0$)

5.9.3 Versuch Beobachtung des verzögerten Stromanstiegs bei der Spule

Zwei identische Lampen werden parallel an einer Gleichspannungsquelle betrieben. Die Lampe L2 erhält als Vorwiderstand eine Spule mit hoher Induktivität L und kleinem ohm'schen Drahtwiderstand R .



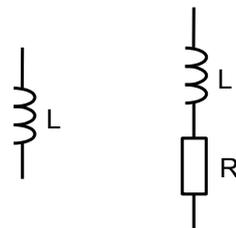
Beobachtungen:

- Beim Einschalten des Schalter S leuchtet L2 verzögert auf.
- Betreibt man die Spule ohne Eisenkern, ist keine Verzögerung beim Einschalten zu sehen.
- Betreibt man die Spule mit Eisenkern, ist das verzögerte Aufleuchten von L2 zu sehen.
- Betreibt man die Spule mit geschlossenem Eisenkern, wird die Verzögerung deutlich größer.
- L2 leuchtet etwas dunkler als L1. Die Spannungsmessung zeigt, dass an der Spule eine kleine Spannung abfällt.

Erklären Sie die Beobachtungen.

5.9.4 Ersatzschaltbild der Spule

Eine ideale Spule besitzt keinen ohm'schen Widerstand R . Nach dem Induktionsgesetz entsteht an der Spule nur dann eine Spannung, wenn sich der Stromfluss durch die Spule **ändert**. Eine solche Spule mit der Kenngröße Induktivität L wird ideale Spule genannt.



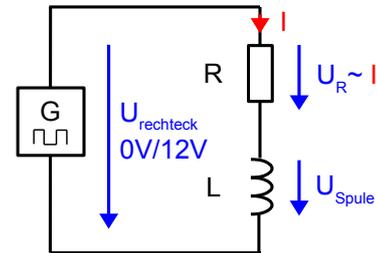
ideale Spule reale Spule

Eine Spule besteht jedoch aus einem Draht und dieser hat einen Widerstand R . Dies zeigt auch die letzte Beobachtung in 5.9.3. Möchte man diesen Sachverhalt zum Ausdruck bringen, so zeichnet man das Ersatzschaltbild der realen Spule als Reihenschaltung aus idealer Spule und ohm'schem Widerstand R .

5.9.5 Versuch Untersuchung des Strom- und Spannungsverlaufs an der Spule

Den Strom kann man nicht direkt mit einem Oszilloskops messen. Man muss den Spannungsabfall an einem Widerstand messen, dieser ist proportional zum fließenden Strom ($U=R \cdot I$).

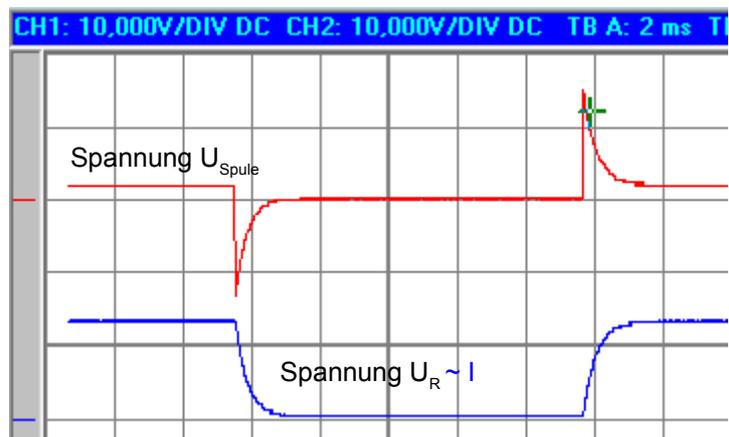
Es soll der Strom- und Spannungsverlauf der Spule mit dem Oszilloskop erfasst werden. Dazu wird mit einem Rechteckgenerator die (Gesamt-) Spannung schnell ein und ausgeschaltet. Die Spannung wird direkt an der Spule gemessen, der Stromverlauf wird indirekt durch den Spannungsabfall an einem in Reihe geschalteten Widerstand gemessen.



Es ergeben sich folgende Oszillogramme:

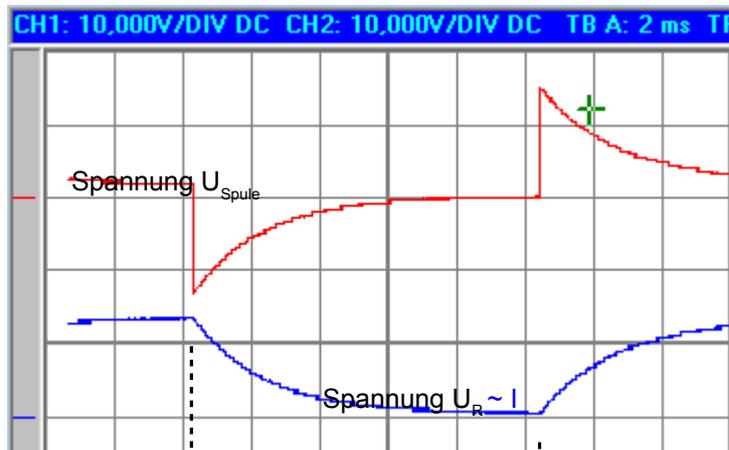
Spule ohne Eisenkern

→ Induktivität klein



Spule mit Eisenkern

→ Induktivität groß



Spannung U_{Rechteck}

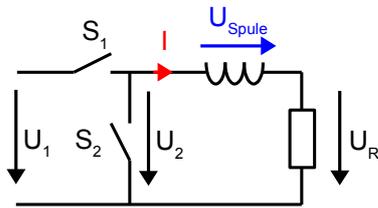


Erklären Sie die Signalverläufe.

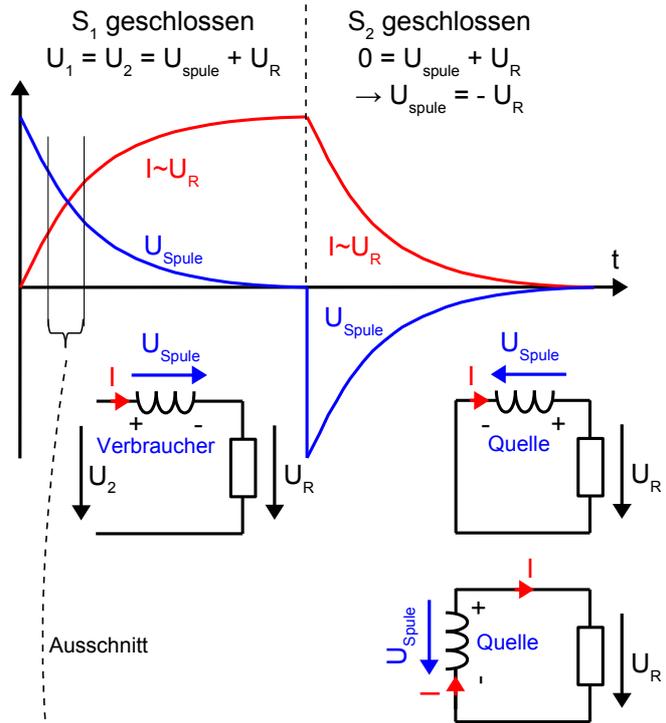
Zeichnen und begründen Sie den Spannungsverlauf der Rechteckspannung U_{Rechteck} .

Die Spannung an der Spule ist nicht ganz null, wenn sich der Strom nicht mehr ändert. Wo sehen Sie das in den Oszillogrammen und warum ist das so?

Herleitung der Tiefsetzsteller-Funktion



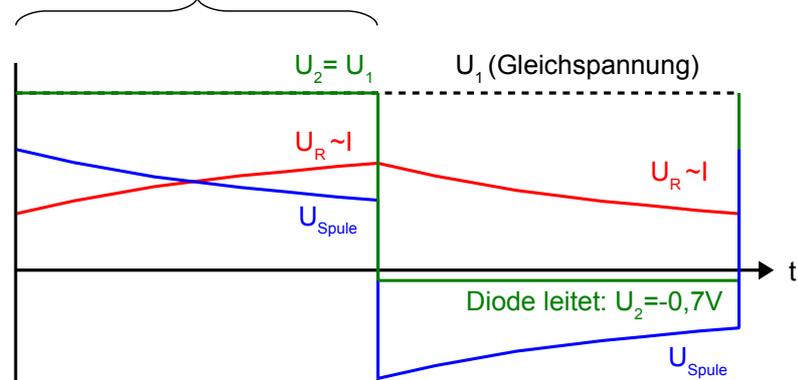
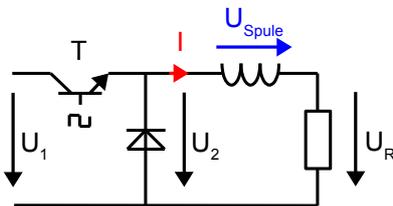
Zu den Pfeilen U_{Spule} siehe Hinweis letzte Seite.



5.10 Tiefsetzsteller

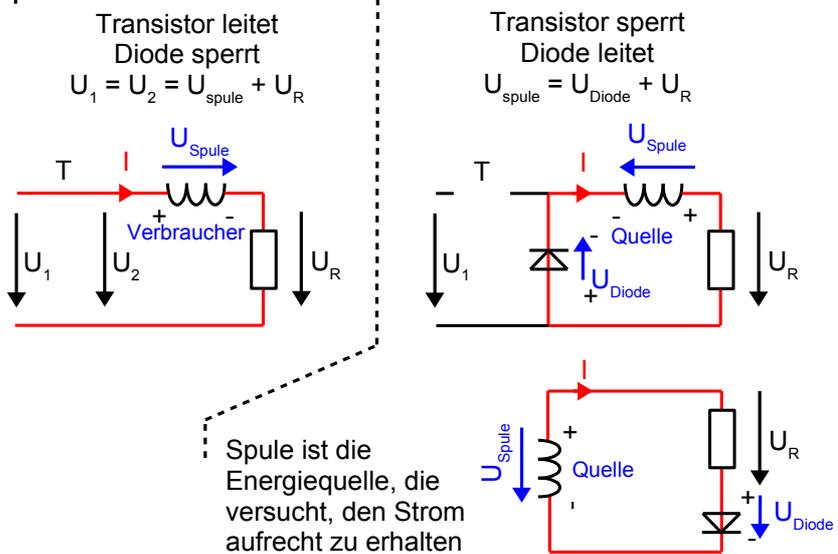
(englisch: Step-Down-Converter)

5.10.1 Schaltung

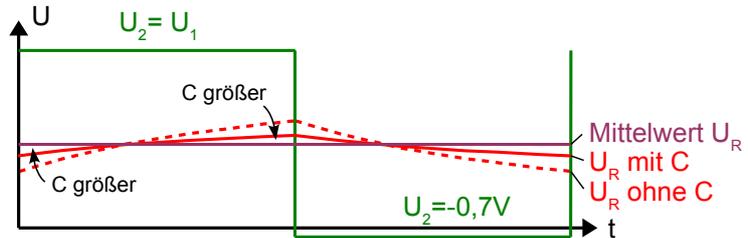
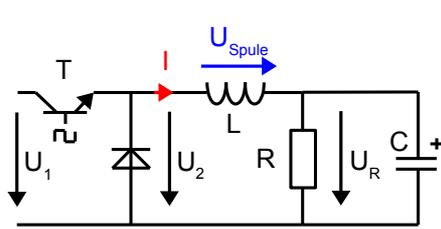


5.10.2 Funktionsweise

- Der Schalter S_1 ist hier ein Transistor, der mit einer rechteckförmigen Spannung angesteuert wird.
- Man erhält die gleichen Verläufe wie bei der Spule an geschalteter Gleichspannung.
- Die Periodendauer ist so klein, dass der Strom I niemals 0 wird.

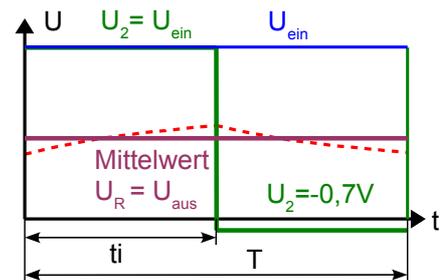
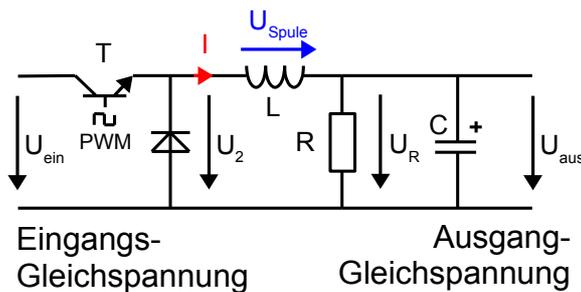


5.10.3 Glättung durch Kondensator

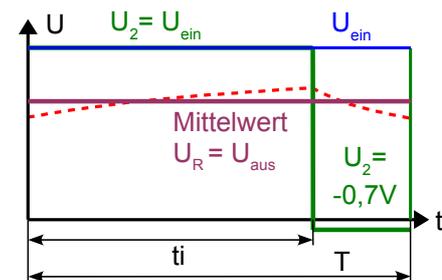


- Die Spannung am Widerstand U_R kann durch einen parallel geschalteten Kondensator geglättet werden.
- Je größer die Kapazität C des Kondensators ist, desto besser ist die Glättung
- Je größer die Kapazität ist, desto mehr nähert sich der Spannungsverlauf dem arithmetischem Mittelwert an.
- Bei großer Kapazität und kleiner Periodendauer des Rechtecksignals am Transistor erhält man am Ausgang eine Gleichspannung
- Mit einem Tiefsetzsteller kann man aus einer großen Gleichspannung eine kleine Gleichspannung erzeugen bei geringen Verlusten.

5.10.4 Tastgrad der PWM beeinflusst den Mittelwert der Ausgangsspannung



- Ändert man die Länge der Impulszeit t_i , so vergrößert sich der Tastgrad t_i / T .
- Der Tastgrad des PWM-Signals am Transistor beeinflusst die Größe der Ausgangsspannung
- Mit steigendem Tastgrad steigt der Mittelwert der Ausgangsspannung an.



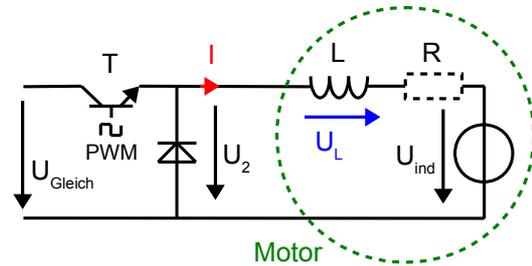
5.10.5 Fazit

- Mit einem Tiefsetzsteller (Step-Down-Converter) kann man aus einer großen Gleichspannung eine kleine Gleichspannung erzeugen.
- Der Tastgrad des PWM-Signals, mit dem der Transistor angesteuert wird, stellt die Größe der Ausgangsspannung ein.
- Tiefsetzsteller haben meist Wirkungsgrade von 80% oder besser.
- Bei Tiefsetzstellern fließt praktisch kein Ruhestrom, wenn sie ausgeschaltet sind.
- Nach diesem Prinzip arbeiten auch Schaltnetzteile, die aus den oben genannten Gründen deutlich energieeffizienter sind als konventionelle Netzteile mit Transformatoren.

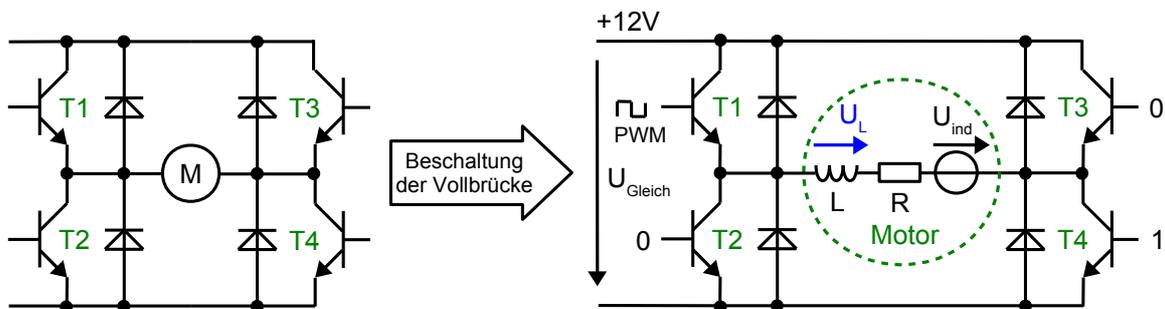
5.11 Tiefsetzsteller zur Motorsteuerung

5.11.1 Funktionsprinzip

- Als "externe" Bauteile werden häufig nur der Schalt-Transistor und die Diode verwendet.
- Die Motorwicklung ist die Spule.
- Falls die Induktivität der Wicklung nicht ausreicht, wird noch eine externe Spule in Reihe geschaltet.
- Der Widerstand ist der Wicklungswiderstand.
- Ein Kondensator zur Glättung wird oft eingespart.
- Wenn der Motor sich vorwärts und rückwärts drehen soll, wird eine Vollbrücke aus T1 bis T4 verwendet.
- Wenn eine Vorwärtsdrehung ausreichend ist, verwendet man eine Halbbrücke aus T1 und T2, wobei der 2. Transistor nur zur Rückspeisung (Rekuperation) benötigt wird.

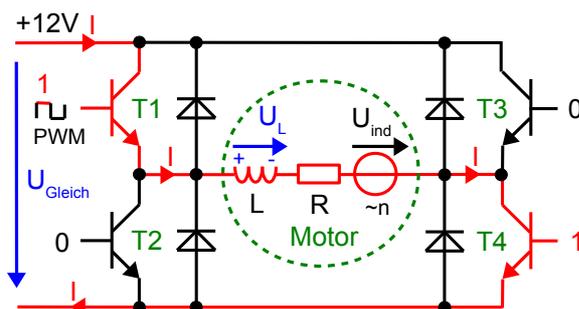


5.11.2 Transistorbrücke im Tiefsetzsteller-Betrieb



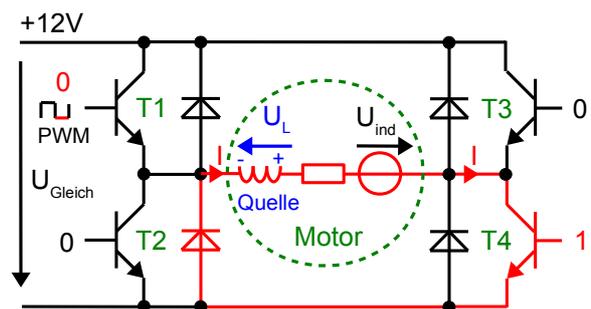
Vorwärtslauf -> T4 leitet immer, PWM an T1

PWM-Signal ist logisch 1



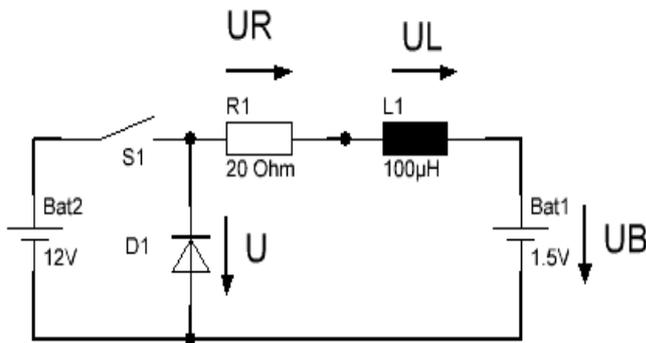
- T1 leitet -> Strom wird von Gleichspannungsquelle zugeführt
- Spule wird als Verbraucher

PWM-Signal ist logisch 0



- T1 sperrt
- Spule wird als Quelle
- Diode an T2 zum Stromfluss notwendig

5.11.3 Versuch Tiefsetzsteller mit Spule und Widerstand



Zeichnen Sie den Stromverlauf und die Spannungsverläufe bei geschlossenem und offenem Schalter ein!

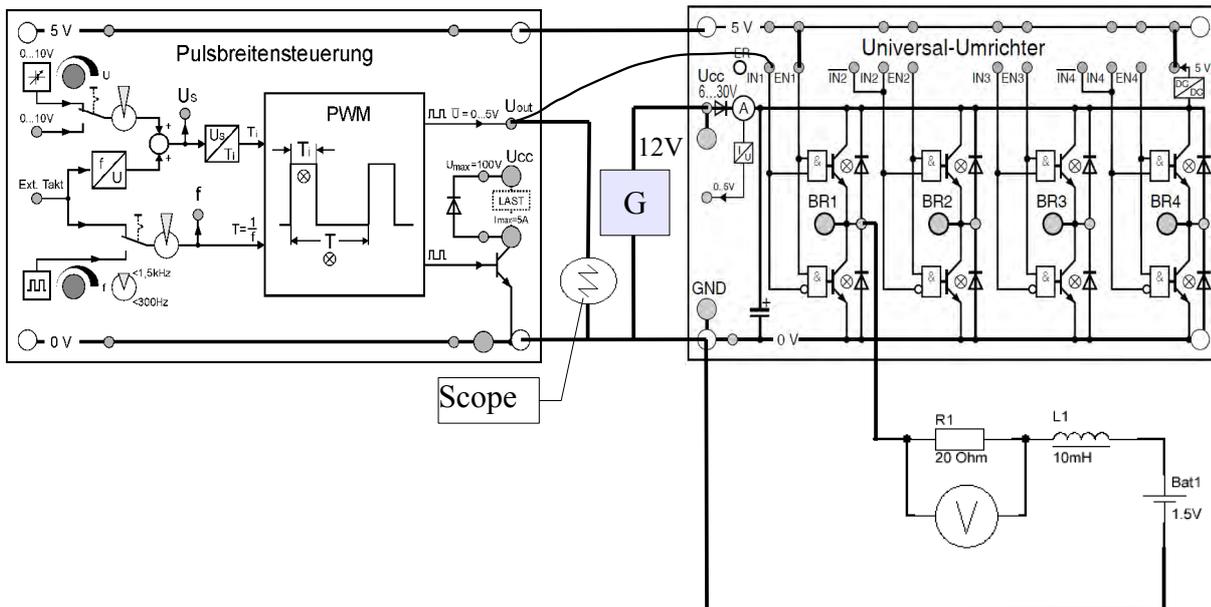
Ziel:

- Anwendung Maschenregel: $U(t) = U_R(t) + U_L(t) + U_D$
- Überlagerungsprinzip -> Wechselfeld an L

U_R, U_L, U_B, U, I_1



5.11.4 Versuch Tiefsetzsteller Motor-Generator-Betrieb



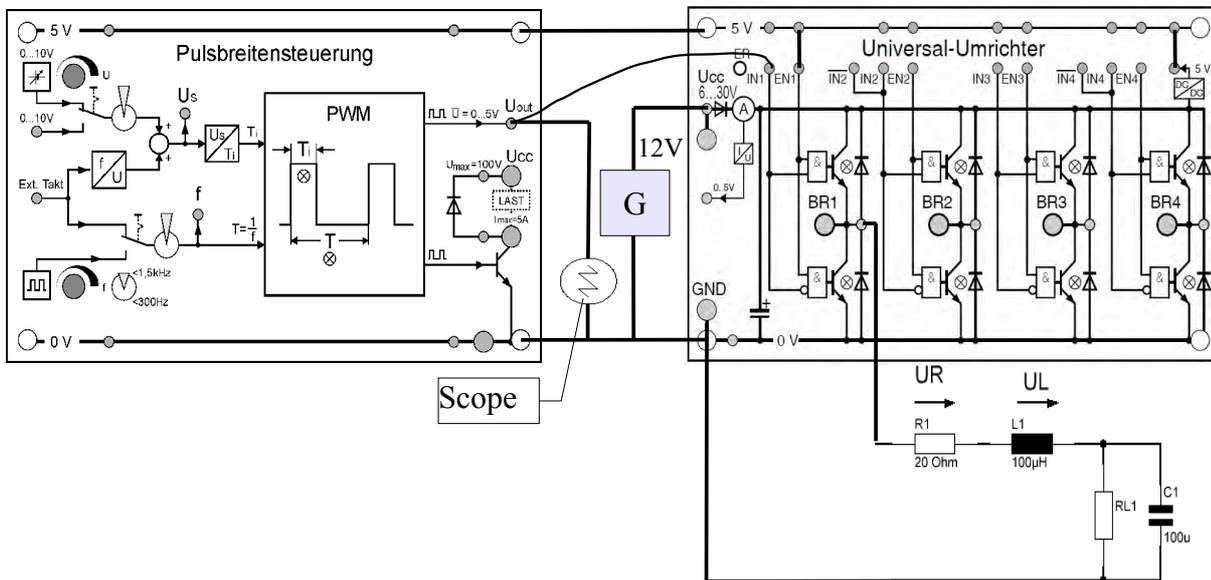
Überlegungen

- $\tau = L / R \Rightarrow 0.1H / 20 \text{ Ohm} \Rightarrow 5 \text{ ms}$ damit Pulsperiode von 1 ms (1 kHz) möglich
- Versuch mit 1.5V Batterie am Ausgang \Rightarrow stellt U_{IND} eines Motors dar.

Versuchsdurchführung

- Verbinden Sie den Ausgang des PWM Moduls mit dem IN1 Eingang des Universalumrichters
- Achten Sie auf die Versorgung des PWM Moduls (5V aus dem Universalumrichter) und gemeinsame Masseleitung
- Stellen Sie die höchste Frequenz des PWM Moduls ein
- Messen Sie mit einem Scope die Ausgangsspannung des PWM Moduls und mit einem Spannungsmesser „indirekt“ den Strom an der Spule.
(alternativ kann mit dem Scope dann auch der Stromverlauf durch Messung der Spannung über dem Widerstand dargestellt werden)
- Stellen sie verschiedene Tastgrade ein:
 - \Rightarrow in welchem Bereich des Tastgrads fließt Strom in die Batterie ?
 - \Rightarrow bei welchem Tastgrad wird der Strom gegen Null ?
 - \Rightarrow bei welchem Tastgrad fließt Strom aus der Batterie in den Generator ?

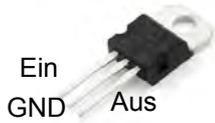
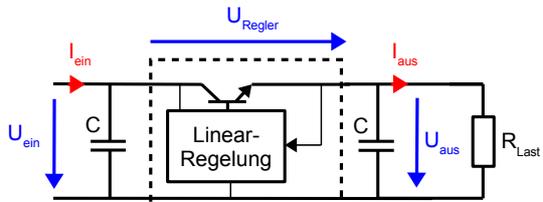
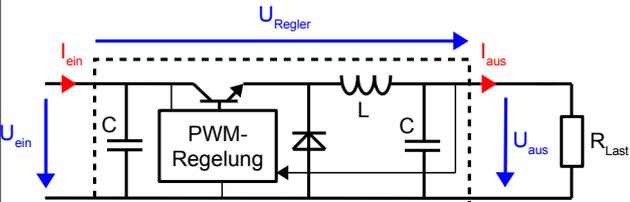
5.11.5 Anwendung Tiefsetzsteller: Schaltnetzteil



Versuchsdurchführung

- Messen Sie bei verschiedenen Lastwiderständen (100, 150, 330 Ohm) die Spannung an RL bei verschiedenen Tastgraden. U_{RL1} soll 5 Volt betragen.
- Wie verhält sich der Eingangsstrom zum Laststrom ? (Eingangsstrom evtl. am Netzteil ablesbar)
- Bestimmen sie den Wirkungsgrad der Spannungsumsetzung bei verschiedenen Lastwiderständen
- Ziel: Durch Veränderung des arithmetischen Mittelwertes der Eingangsspannung (PWM) sollen unterschiedliche Ausgangsgleichspannungen erzeugt werden.

5.12 Vergleich zwischen linearem Spannungsregler und Tiefsetzsteller

Vergleich der wichtigsten Daten zweier PIN-Kompatiblen Spannungsregler	
LM 7805 	TSR 1-2450 
$U_{\text{ein}} = 7,5\text{V bis } 25\text{V}, U_{\text{aus}} = 5\text{V}$	$U_{\text{ein}} = 6,5\text{V bis } 36\text{V}, U_{\text{aus}} = 5\text{V}$
$I_{\text{Aus-Max}} = 1\text{ A}$	$I_{\text{Aus-Max}} = 1\text{ A}$
$P_{\text{max}} \leq 15\text{W}$	Wirkungsgrad 94% ($U_{\text{ein-min}}$) 84% ($U_{\text{ein-max}}$)
Dauerkurzschlussfest	Dauerkurzschlussfest
Eingangsstrom bei Leerlauf: max. 4mA	Eingangsstrom bei Leerlauf: max. 1mA
Kondensatoren 100nF an Ein- und Ausgang notwendig	Eingangsfiler: interne Kondensatoren
Linearregler	DC-DC-Wandler
Einzelpreis: 0,30€	Einzelpreis: 9€
 <p style="text-align: center;">Linearregler</p> <p style="text-align: center;">$I_{\text{aus}} \approx I_{\text{ein}}$</p> <p style="text-align: center;">Der Transistor leitet während der gesamten Zeit</p> <p style="text-align: center;">$P_{\text{Verlust}} = U_{\text{Regler}} \cdot I$</p> <p style="text-align: center;">$P_{\text{aus}} = P_{\text{ein}} - P_{\text{Regler}}$</p>	 <p style="text-align: center;">Schaltregler mit Tiefsetzsteller</p> <p style="text-align: center;">$I_{\text{aus}} \neq I_{\text{ein}}$</p> <p style="text-align: center;">Der Transistor leitet nur, wenn das PWM-Signal=1 ist.</p> <p style="text-align: center;">$P_{\text{aus}} \approx 0,8 \dots 0,95 \cdot P_{\text{ein}}$</p>

Die typische Aufgabe eines Spannungsreglers ist es, aus einer größeren, eventuell schwankenden Gleichspannung eine kleinere, konstante Gleichspannung abzuleiten. Solche Spannungsregler sind milliardenfach in Netzteilen, z.B. in PCs, verbaut. Im folgenden Versuch werden wir feststellen, wie ineffektiv diese Linearregler arbeiten und wie viel effizienter und energieschonender dagegen geschaltete Regler sind.

5.12.1 Versuchsaufbau

Der gleiche Schaltungstyp wird mit einem linearen Spannungsregler LM7805 und einem geschalteten Regler TSR 1-2450 aufgebaut. Schon der große Kühlkörper des 7805 macht deutlich, was zu erwarten ist.



Gleichspannung
7,5 bis 25V

Abbildung 1: Versuchsaufbau Spannungsregler

5.12.2 Versuchsdurchführung

Messen Sie jeweils gleichzeitig: U_{ein} und I_{ein} sowie U_{aus} und I_{aus} . Berechnen Sie daraus die aufgenommene Leistung P_{ein} , die vom Verbraucher aufgenommene Leistung P_{aus} , die Verlustleistung des Reglers P_{Regler} sowie den Wirkungsgrad η der Schaltung.

5.12.3 Linearregler: $U_{\text{ein}} = 12\text{V}$ fest, $R_{\text{Verbraucher}}$ und damit I_{aus} ändern.

U_{ein} in V	I_{ein} in A	P_{ein} in W	U_{aus} in V	I_{aus} in A	P_{aus} in W	P_{regler} in W	η

Feststellungen:

5.12.4 Linearregler: $R_{\text{Verbraucher}}$ und damit I_{aus} fest, U_{ein} ändern von 6,5V bis 20V

U_{ein} in V	I_{ein} in A	P_{ein} in W	U_{aus} in V	I_{aus} in A	P_{aus} in W	P_{regler} in W	η

Feststellungen:

5.12.5 Schaltregler: $U_{\text{ein}} = 12\text{V}$ fest, $R_{\text{Verbraucher}}$ und damit I_{aus} ändern.

U_{ein} in V	I_{ein} in A	P_{ein} in W	U_{aus} in V	I_{aus} in A	P_{aus} in W	P_{regler} in W	η

Feststellungen:

5.12.6 Schaltregler: $R_{\text{Verbraucher}}$ und damit I_{aus} fest, U_{ein} ändern von 6,5V bis 20V

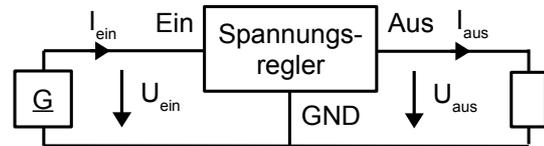
U_{ein} in V	I_{ein} in A	P_{ein} in W	U_{aus} in V	I_{aus} in A	P_{aus} in W	P_{regler} in W	η

Feststellungen:

5.13 Vergleichs-Berechnungen Tiefsetzsteller und Spannungsregler

Ein elektronischer Verbraucher benötigt eine Versorgungsspannung von 5V. Zur Verfügung steht eine 12V-Gleichspannung und ein linearer Spannungsregler.

Daten des Verbrauchers: $R=7\Omega$.



Gleichspannung 12V

Verbraucher

5.13.1 Ströme

Berechnen Sie die fließenden Ströme und erklären Sie Wirkungsweise des Spannungsreglers.

5.13.2 Leistungen

Welche Leistungen nehmen Verbraucher und Spannungsregler auf?

Welche Leistung muss der Generator abgeben?

5.13.3 Wirkungsgrad

Ermitteln Sie den Wirkungsgrad bei den gegebenen Verhältnissen.

5.13.4 Wirkungsgrad-Änderungen und Eingangsstrom-Änderungen

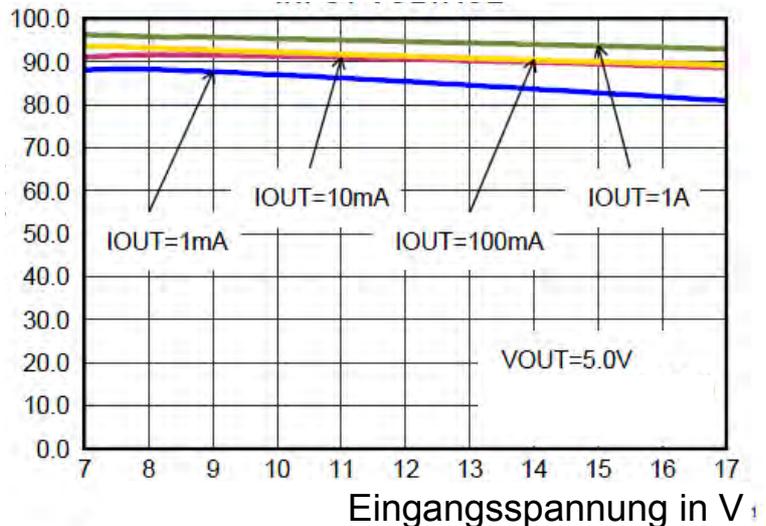
- Auf welchen Wert ändern sich Wirkungsgrad und Eingangsstrom, wenn man die Eingangsspannung auf 9V verringert? Die Belastung bleibt unverändert bei $R=7\Omega$.
- Auf welchen Wert ändern sich Wirkungsgrad und Eingangsstrom, wenn man die Belastung auf 1A erhöht ($R=5\Omega$) bei unveränderter Eingangsspannung von 12V?

Der lineare Spannungsregler wird durch einen geschalteten Spannungsregler mit integriertem Tiefsetzsteller (DC-DC-Konverter) ersetzt.

Die Eingangsspannung beträgt 12V, der Verbraucher hat einen Widerstand von $R=7\Omega$.

Den Wirkungsgrad entnehmen Sie bitte dem nebenstehenden Diagramm.

Wirkungsgrad in %



5.13.5 Ausgangsstrom

Berechnen Sie den Ausgangsstrom.

5.13.6 Wirkungsgrad

Lesen Sie den (ungefähren) Wirkungsgrad der Schaltung aus dem Diagramm ab.

5.13.7 Eingangsstrom

Ermitteln Sie die Größe des Eingangsstroms.

5.13.8 Wirkungsgrad-Änderungen und Eingangsstrom-Änderungen

- Auf welchen Wert ändern sich Wirkungsgrad und Eingangsstrom, wenn man die Eingangsspannung auf 9V verringert? Die Belastung bleibt unverändert bei $R=7\Omega$.
- Auf welchen Wert ändern sich Wirkungsgrad und Eingangsstrom, wenn man die Belastung auf 1A erhöht ($R=5\Omega$) bei unveränderter Eingangsspannung von 12V?

5.14 Übung: Tiefsetzsteller-IC ersetzt linearen Spannungsregler

In immer mehr Geräten soll der Wirkungsgrad verbessert und Standby-Verluste verringert werden. Einen wichtigen Beitrag liefern dabei Tiefsetzsteller-ICs, die kostengünstig auf engstem Raum eingesetzt werden können. Die integrierte Schaltung TPS62150 stellt eine solche Lösung dar: Mit wenigen externen Bauteilen kann ein Tiefsetzsteller aufgebaut werden, der eine zwischen 0,9V und 6V einstellbare Gleichspannung aus der etwas höheren Eingangsspannung erzeugt, die sich im Bereich 3V bis 17V bewegen kann. (Schaltungskosten ca. 1€)

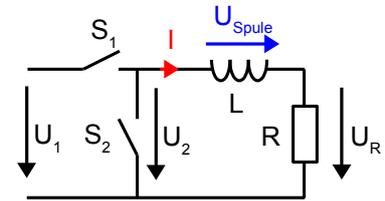


Abbildung 2: Tiefsetzsteller-Prinzip

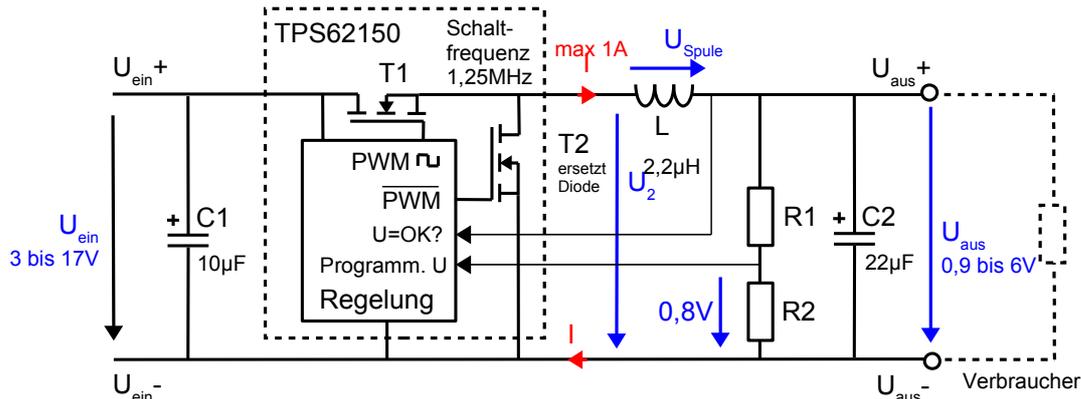


Abbildung 3: Programmierbarer Spannungsregler mit Tiefsetzsteller-IC

T1 ist der PWM-gesteuerte Schalttransistor, die Diode wurde durch Transistor T2 ersetzt (geringere Verluste), der immer dann leitet, wenn T1 nicht leitet. Daher wird er mit dem invertierten PWM-Signal angesteuert. Am Anschluss "U=OK?" wird geprüft, ob die gewünschte Ausgangsspannung erreicht ist oder ober der Tastgrad des PWM-Signals eventuell nachgeregelt werden muss. Die Größe der Ausgangsspannung wird mit den Widerständen R1 und R2 "programmiert".

Die Regelung stellt die Ausgangsspannung immer so ein, dass am Eingang "Programm. U" genau 0,8V anliegen: $U_{aus} = 0,8V \cdot (1 + R1 / R2)$.

Da die Schaltfrequenz des PWM-Signals mit 1,25MHz sehr hoch ist, kann die Spule mit 2,2µH sehr klein ausfallen, ebenso der Glättungskondensator am Ausgang. Auch am Eingang ist ein Kondensator notwendig: Da der Ausgangsstrom maximal 1 A betragen kann, muss während der Einschaltzeit von T1 kurzzeitig ein wesentlich höherer Strom fließen. Dieser kann durch Entladung von C1 bereitgestellt werden.

5.14.1 Dimensionierung R1, R2 zur Einstellung des Ausgangsspannung

Typische Ausgangsspannungen sind 2,5V; 3,3V; 5V. Dimensionieren Sie R1 und R2 für diese 3 Fälle. Beide Widerstände sollen Werte $\geq 100k\Omega$ und $\leq 1M\Omega$ besitzen.

5.14.2 Stromkreise

Geben Sie in den zwei Fällen PWM-Signal=0 und PWM-Signal=1 an, durch welche Bauteile der Verbraucherstrom fließt.

5.14.3 Spannungsverläufe

Skizzieren und erklären Sie den möglichen Verlauf der Spannungen U_{ein} , U_2 , U_{spule} , U_{aus} , wenn die Schaltung eine Eingangs-Gleichspannung von 12V auf eine Ausgangs-Gleichspannung von 5V herabgesetzt.

5.14.4 Wirkungsgrad und PWM-Signal

Dem Datenblatt des TPS62150 sind die folgenden 2 Kennlinien und das Oszillogramm entnommen. Erklären und interpretieren Sie die Darstellungen

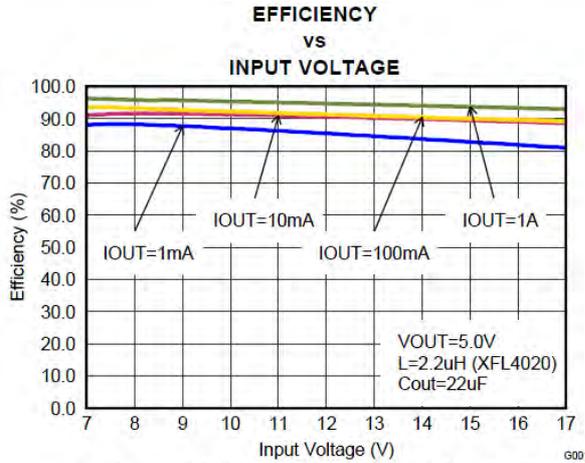


Figure 6. Efficiency with 1.25MHz, Vout=5V
Abbildung 4: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Eingangsspannung bei verschiedenen Lastströmen und einer Ausgangsspannung von 5V

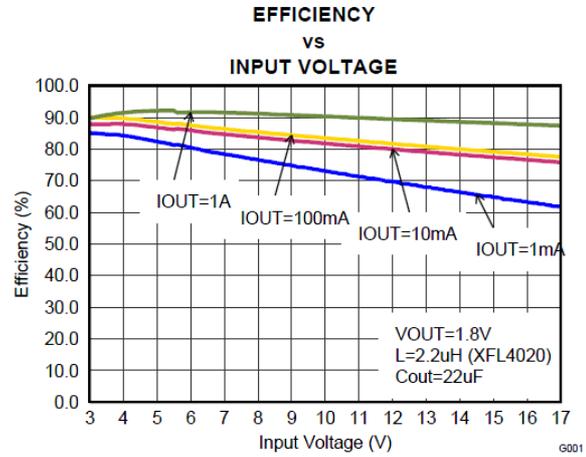


Figure 14. Efficiency with 1.25MHz, Vout=1.8V
Abbildung 5: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Eingangsspannung bei verschiedenen Lastströmen und einer Ausgangsspannung von 1,8V

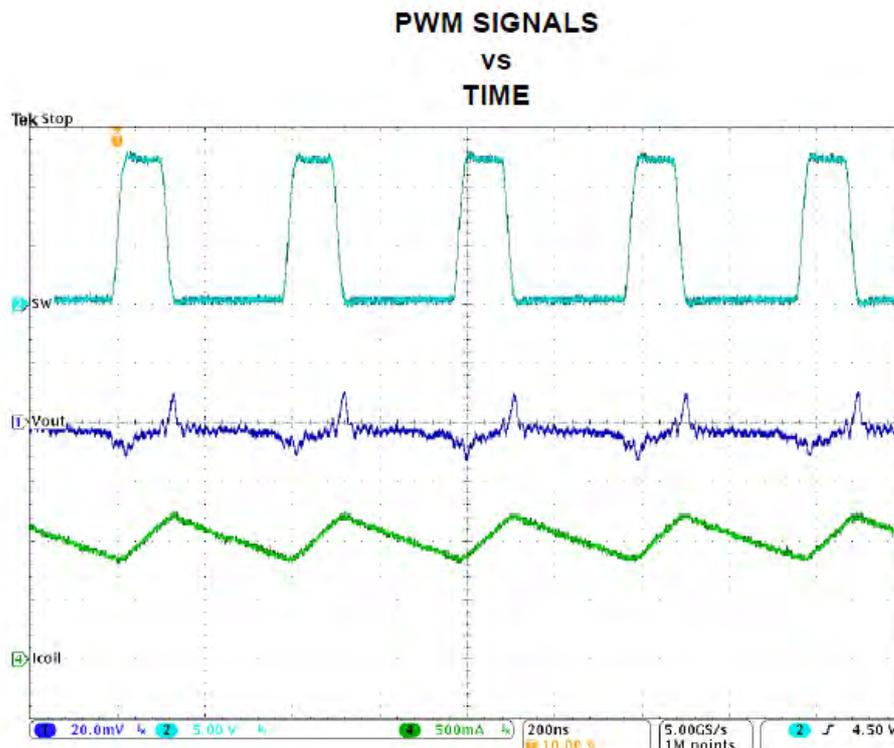


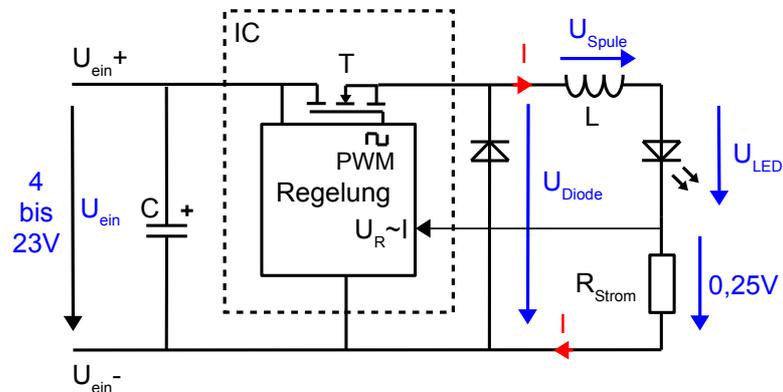
Figure 35. Typical Operation in PWM Mode ($I_{OUT}=1A$)
Abbildung 6: Oszillogramme bei einem Laststrom von 1A.
Oben: U_2 5V/Div, Mitte: Restwelligkeit U_{aus} 20mV/Div, unten: I 500mA/Div

5.15 Tiefsetzsteller für energiesparende LED-Beleuchtung

Ein Tiefsetzsteller-IC mit integriertem Transistor T erlaubt den Betrieb von Hochleistungs-LEDs an Gleichspannungen zwischen 4V und 23V.

Ein PWM-Signal schaltet den Transistor. Die Regelung stellt den Tastgrad so ein, dass die Spannung am Widerstand R_{Strom} im Mittel 0,25V beträgt.

Wünscht man einen mittleren LED-Strom von 1A, so setzt man einen Widerstand von $0,25\Omega$ ein: $I = 0,25V / 0,25\Omega = 1A$ konstant gehalten.



5.15.1 Stromkreis 1

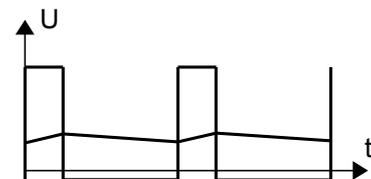
Geben Sie den Stromkreis an, wenn der Transistor durchgeschaltet ist.

5.15.2 Stromkreis 2

Geben Sie an, wo der Strom fließt, wenn der Transistor sperrt. Welche Aufgaben haben dabei die Diode und die Spule?

5.15.3 Diagramm mit PWM

Erklären Sie nun, welche elektrischen Größen im rechten Diagramm zu sehen sind.



5.15.4 Alle Spannungsverläufe

Zeichnen Sie die noch fehlenden Spannungen dazu. Insgesamt soll man U_{ein} , U_{Spule} , U_{LED} , U_2 sehen.

5.15.5 Fragen zur Induktivität

Man versucht, Spulen so klein wie möglich aufzubauen, weil sie dann billig und klein sind. Markieren Sie die Aussagen mit richtig (r) und falsch (f).

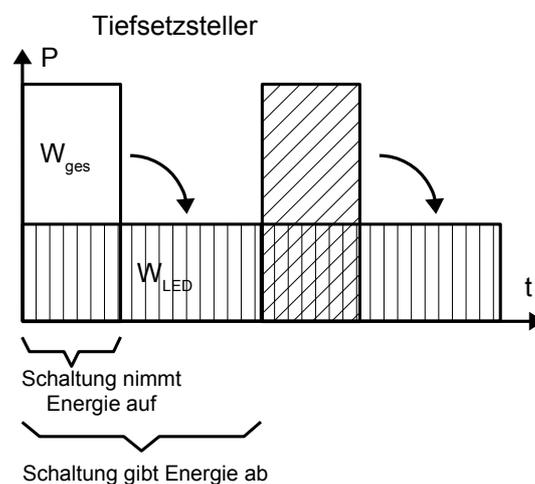
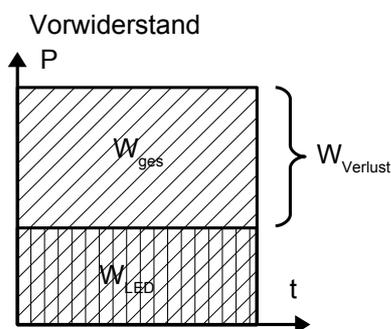
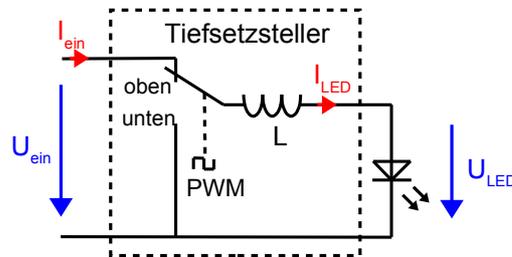
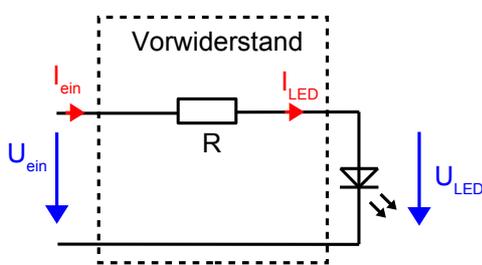
1. Je kleiner die Induktivität L einer Spule ist, desto flacher sind die Kurvenverläufe von U_{LED} und U_{Spule} in 5.15.3 und 5.15.4.
2. Wenn man die Frequenz des PWM-Signals erhöht, schwanken U_{LED} und U_{Spule} in 5.15.3 und 5.15.4 weniger stark.
3. An Spulen kann sich der Stromfluss sprunghaft ändern.
4. Spulen speichern Energie durch fließenden Strom.
5. Je schneller sich der Stromfluss in der Spule ändert, desto größer ist die induzierte Spannung an der Spule.
6. Je weniger Windungen eine Spule hat, desto größer ist der Leitungswiderstand R .

5.16 Der Vorteil eines Tiefsetzstellers gegenüber einem Vorwiderstand

Am Beispiel Vorwiderstand einer Beleuchtungs-LED wird der Energiespareffekt des Tiefsetzstellers gegenüber einem Vorwiderstand deutlich: Der ideale Tiefsetzsteller verbraucht keine Energie, der Vorwiderstand verbraucht immer Energie. Je größer die Eingangsspannung gegenüber der Spannung am Verbraucher (LED) ist, desto größer ist der Unterschied zwischen beiden Lösungen.

Bei der Lösung mit Vorwiderstand sind Eingangsstrom I_{ein} und Verbraucherstrom I_{LED} zu jeder Zeit gleich groß. Je größer die Eingangsspannung ist, desto größer ist der Spannungsabfall am Vorwiderstand, desto größer ist die Verlustleistung ($P_{\text{Verlust}} = U_R \cdot I$).

Bei Lösung mit Tiefsetzsteller fließt nur dann ein Eingangsstrom I_{ein} , wenn der Schaltung Energie zugeführt werden muss und der Schalter in der gezeichneten Stellung "oben" ist. In in dieser Zeit wird derjenige Energieanteil, der bei der Variante "Vorwiderstand" vom Vorwiderstand verbraucht wird, wird hier von der Spule gespeichert und in der Schalterstellung "unten" von der Spule an die LED übertragen. Im Idealfall geht also keine Energie verloren.



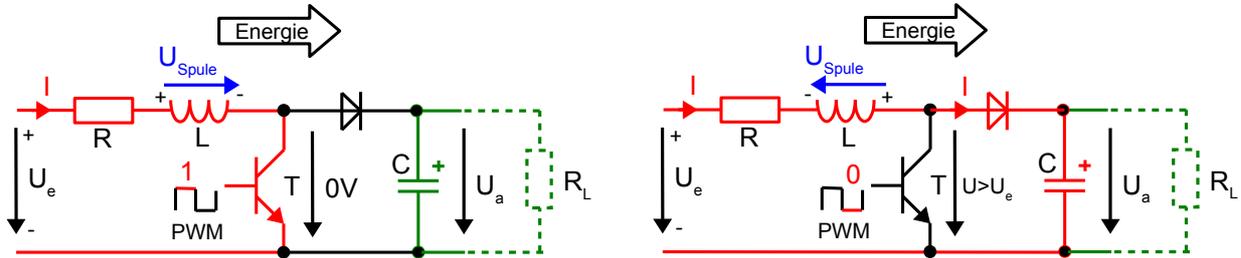
Ende Skript Elektromobilität J1

Es folgen Ideen für J2.

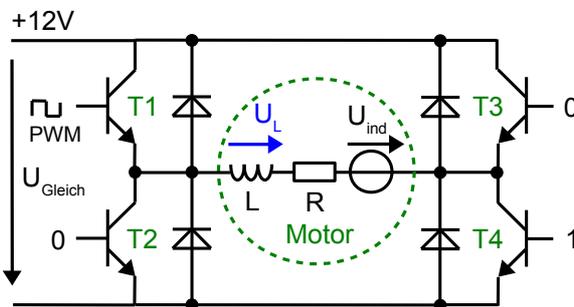
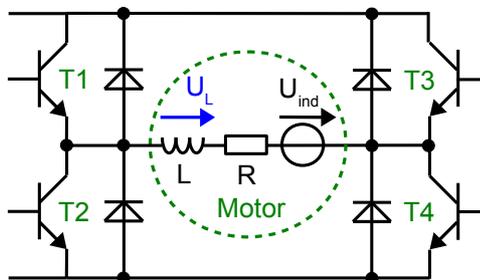
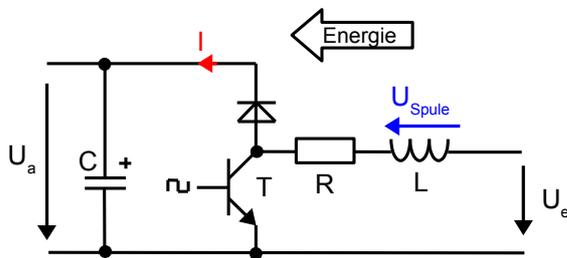
In LPE15 wird das Thema aufgegriffen und der Hochsetzsteller sowie die Rückspeisung vom Motor (im Generator-Betrieb) in den Akku erklärt.

5.17 Vorschau: Hochsetzsteller -> LPE 15, Jahrgangstufe 2

Einer kleine Gleichspannung am Eingang wird in eine größere Spannung am Ausgang umgesetzt:
 $U_a > U_e$



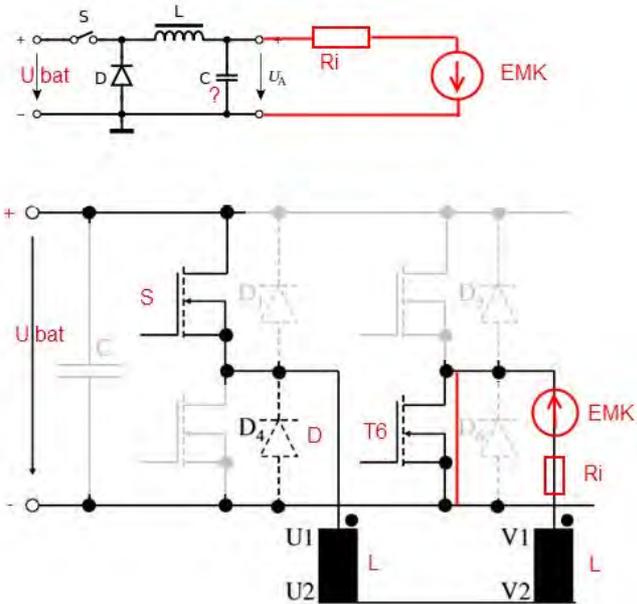
umgezeichnet für Brückenschaltung:



in Arbeit!

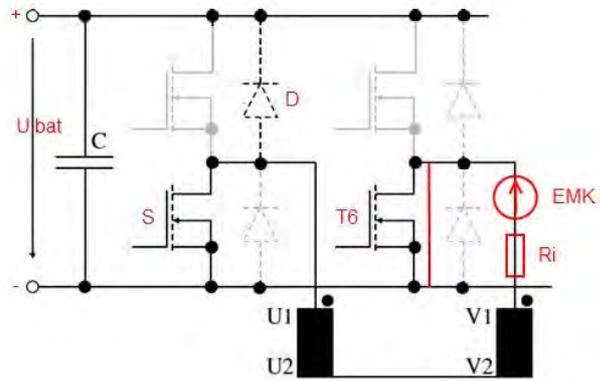
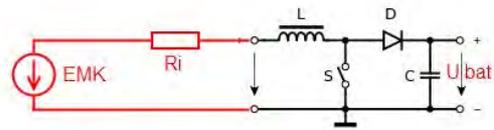
5.18 Vorschau: Tiefsetzsteller / Hochsetzsteller beim Pedelec für Motor / Generatorbetrieb -> LPE 15, Jahrgangstufe 2

Die Motorspulen sind die Induktivität!



wie im Prinzipschaltbild Step-Down, aber C fehlt!

<http://www.pedelecforum.de/forum/showthread.php?16124-Einarbeitung-in-die-Schaltungstechnik-von-Pedelec-Controlern>



wie im Prinzipschaltbild Step-Up!

<http://www.pedelecforum.de/forum/showthread.php?16124-Einarbeitung-in-die-Schaltungstechnik-von-Pedelec-Controlern>

aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Vierquadrantensteller>

5.19 Vorschau: Vierquadrantenbetrieb -> LPE15

5.19.1 Tiefsetzsteller

Der Tiefsetzsteller-Betrieb dient zum Antreiben, der Motor nimmt Leistung auf. In der dargestellten Schaltung wird dazu T4 durchgeschaltet und auf T1 ein PWM-Signal gelegt. Leitet T1, liegt am Motor eine positive Spannung an, die Induktivität magnetisiert sich auf, ein positiver Strom fließt und der Motor erzeugt ein beschleunigendes Drehmoment. Schaltet T1 ab, induziert die Motorwicklung Spannung und der Strom fließt über D2 weiter, wobei die Magnetisierung des Motors wieder leicht abnimmt. Je länger die Leitphase im Verhältnis zur Sperrphase dauert, desto mehr Strom fließt und umso stärker ist die Beschleunigung.

Für entgegengesetzte Polarität wird T2 durchgeschaltet und T3 mit einem PWM-Signal versorgt.

5.19.2 Hochsetzsteller

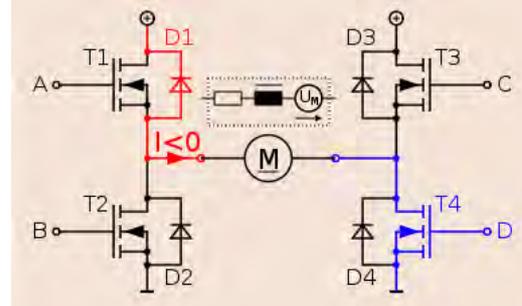
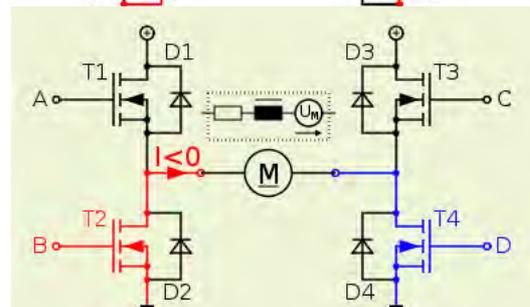
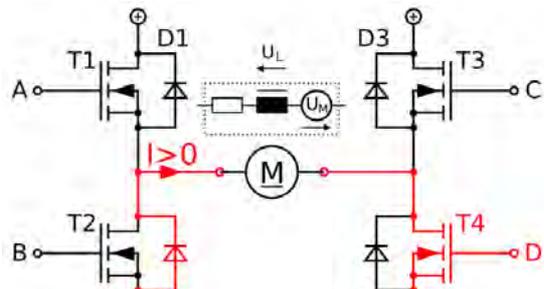
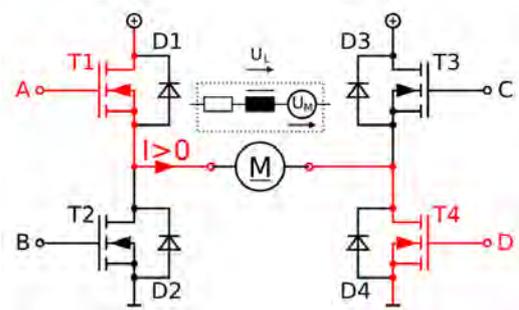
Der Hochsetzsteller-Betrieb dient zum Bremsen und Rückspeisen, der Motor gibt Leistung ab. Dazu wird T4 durchgeschaltet und an T2 ein PWM-Signal gelegt. Leitet T2, magnetisiert sich die Motorinduktivität über U_M auf, ein negativer Strom I fließt. Der Strom besitzt zu U_M eine entgegengesetzte Polung und der Motor gibt Leistung ab, die im Magnetfeld gespeichert wird. Sperrt anschließend T2, dann induziert die Motorwicklung Spannung und der Strom fließt über D1 weiter, wobei die Magnetisierung wieder leicht abnimmt und die Energie aus dem Magnetfeld in die Versorgungsspannung abgegeben wird. Der Motor wandelt mechanische Leistung in elektrische Leistung und bremst deswegen.

Zu beachten ist, dass dem Hochsetzsteller U_M als Spannungsversorgung dient und U_B als Last.

Für entgegengesetzte Polarität wird T2 durchgeschaltet und T4 mit einem PWM-Signal versorgt.

5.19.3 Leerlauf

Noch keine Erwähnung fand der Leerlaufbetrieb, bei dem höchstens ein Transistor leitet. Nachdem sich ein Restmagnetfeld abgebaut hat fließt kein Strom mehr durch den Motor. Es wird weder beschleunigt noch gebremst.

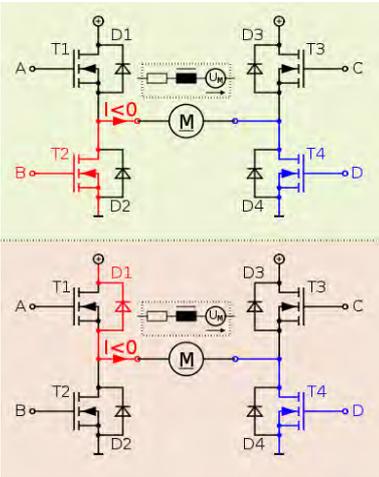
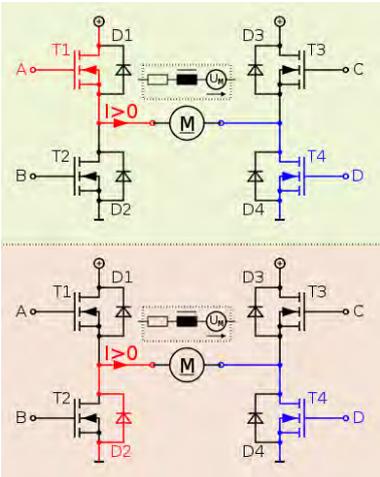
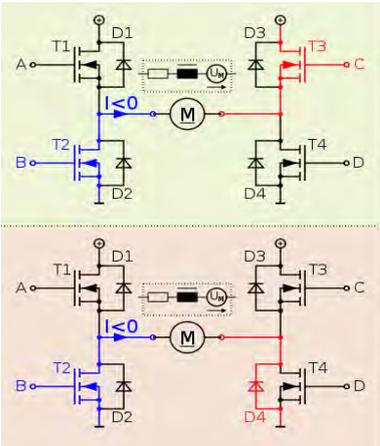
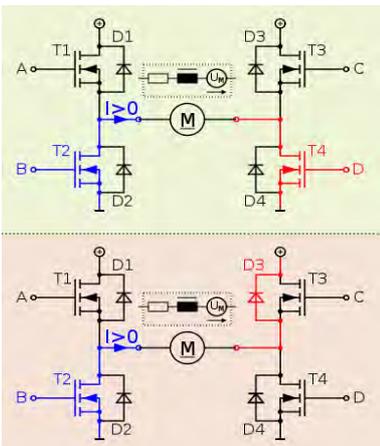


5.19.4 „Notbremse“

Eine nur bedingt empfehlenswerte Betriebsart ist die Notbremse, bei der T2 und T4 leiten und damit den Motor kurzschließen. Der vom Motor erzeugte Strom wird nur durch die ohmschen Verluste begrenzt und Leistung wird in Wärme umgewandelt. Wichtig ist, dass alle Bauteile die auftretenden Werte aushalten.

5.19.5 Zusammenfassung

Der Wortteil Quadrant spielt auf die vier Bereiche in einem Koordinatensystem an, wobei der Strom ($\hat{=}$ Drehmoment) auf der x-Achse liegt und die Spannung ($\hat{=}$ Drehzahl) auf der y-Achse. Nachfolgend sind die Betriebsarten entsprechend ihrer Position im Koordinatensystem anschaulich aufgeführt.

<p>UM > 0 und I < 0 -> Generator</p>  <p>Quadrant 2 Vorwärtslauf bremsen</p>	<p>UM > 0 und I > 0 -> Motor</p>  <p>Quadrant 1 Vorwärtslauf beschleunigen</p>
<p>UM < 0 und I < 0 -> Motor</p>  <p>Quadrant 1 Vorwärtslauf beschleunigen</p>	<p>UM < 0 und I > 0 -> Generator</p>  <p>Quadrant 4 Rückwärtslauf bremsen</p>

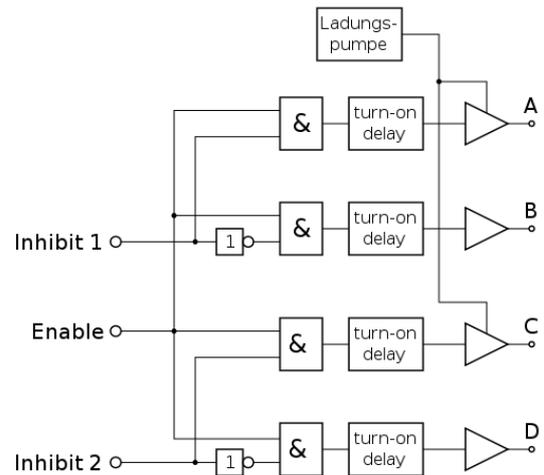
Rot kennzeichnet in den Grafiken jeweils den alternierenden Schalter und blau den permanent leitenden Schalter.

5.19.6 Ansteuerung

Ansteuerlogik für MOSFET-H-Brücke

Bei der sicheren Ansteuerung von MOSFET-H-Brücken hilft eine Ansteuerlogik mit belastbaren Treiberstufen, [MOSFET-Treiber](#) oder H-Brücken-Treiber genannt. Die Logik stellt sicher, dass nicht beide Transistoren (T1 und T2, bzw. T3 und T4) gleichzeitig eingeschaltet werden können. Des Weiteren ist ein „turn-on delay“ integriert (nicht zu verwechseln mit der Einschaltverzögerung), das nur das Einschalten der MOSFETs verzögert, jedoch nicht das Ausschalten. Dadurch wird die Verzögerungszeit, bis ein Transistor sperrt, überbrückt und verhindert, dass beim Umschalten sich die Einschaltphasen der Transistoren überlappen und einen Kurzschluss bilden (engl. cross conduction oder shoot-through). Auch bei kürzesten Überlappungen im μs -Bereich ergeben sich in den Versorgungsleitungen hohe Stromspitzen, die z. B. dazu führen können, dass die zulässige [Rippelstrom](#)-Belastung von Glättungs-Elektrolytkondensatoren überschritten wird.

Um die oberen Transistoren (T1 und T3) durchzuschalten, muss an deren Eingang eine über der Versorgungsspannung U_B liegende Spannung anstehen. Bei Treibern im [Kleinspannungsbereich](#) geschieht dies meist mittels [Bootstrapping](#).



5.19.7 Weitere Betrachtungen

Nachteil der Vierquadrantensteller ist das niedrige Bremsmoment im Stillstand, da U_M einen kleinen Wert annimmt. Bei idealer Betrachtung bleibt der Strom konstant und damit das Drehmoment, sprich Bremskraft, konstant. Problematisch sind die ohmschen Verluste, denn wenn U_M klein bleibt, dann gilt das auch für den Strom ($I = U/R$). Entsprechend ergibt eine geringe Drehzahl eine geringe mögliche Bremskraft.

Für einen ordnungsgemäßen Betrieb muss der Motor im richtigen Quadranten gesteuert werden. Geschieht dies nicht, sind zwei Fehlerfälle denkbar:

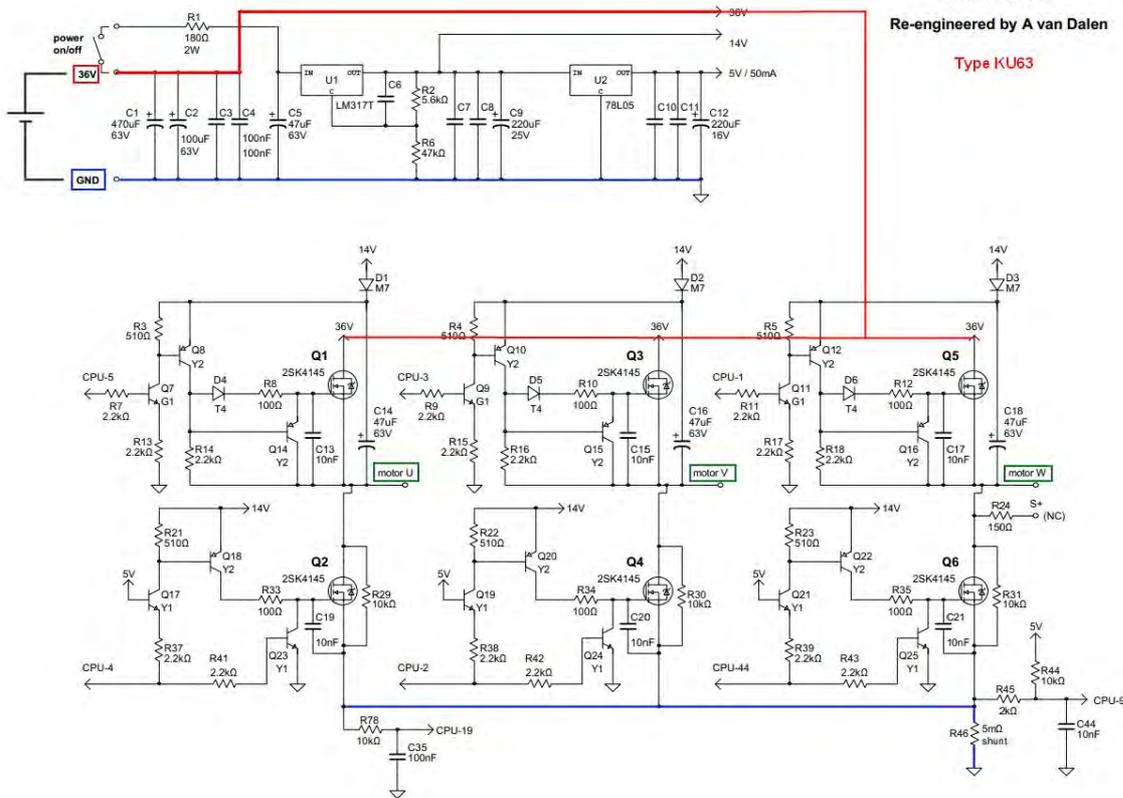
- Bremsen bei verkehrter Drehrichtung: Die Motorinduktivität wird nicht mehr entmagnetisiert und der Motor verhält sich wie bei einem Kurzschluss. Der Bremsstrom wird nur durch die ohmschen Verluste der Wicklung begrenzt. Der Motor bremst sehr stark.
- Beschleunigen bei verkehrter Drehrichtung: Die Motorinduktivität wird nicht mehr entmagnetisiert. Schalten nun beide Transistoren durch, fließt der durch die ohmschen Verluste begrenzte Strom und dabei addieren sich U_M und U_B . Der Motor bremst stark, abhängig vom [Pulsweitenverhältnis](#).

China e-bike BLDC motor controller 36V 250W

Version 1-9-2011

Re-engineered by A van Dalen

Type KU63



<http://www.pedelecforum.de/forum/showthread.php?15492-Neuer-Kontroller-Hilfe-und-Radiuskopffraktur>