

Musterlösung zu den Übungen Grundlagen elektrische Antriebe

Teil 1: GM

1 Gleichstrommaschine

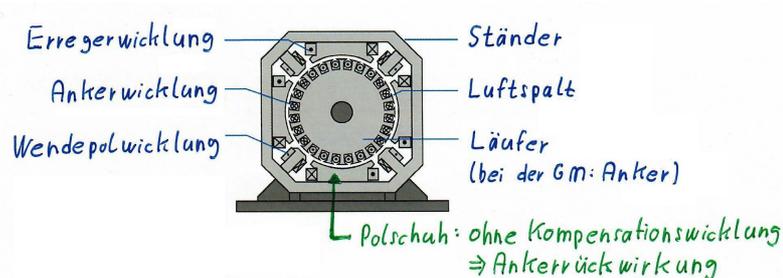
1.1 Grundlagen

In Bild 1.1 ist der Schnitt einer elektrischen Maschine dargestellt.

a.) Um welchen Maschinentyp handelt es sich? Begründen Sie!

Um eine Gleichstrommaschine, weil im Ständer deutlich ausgeprägte Polschuhe für die Hauptpole (der Erregerwicklung) zu sehen sind, zwischen denen sich die deutlich kleineren Wendepole befinden. Zudem befindet sich im Läufer eine (über den Umfang gleichmäßig) verteilte Wicklung, die somit als Ankerwicklung zu erkennen ist. Erreger-, Wendepol- und Ankerwicklung gibt es in dieser Form nur bei der GM.

b.) Benennen Sie die markierten Teile der Maschine.



Anmerkung zu den Polschuhen: diese sind hier (ggf. aus Kostengründen) ohne Kompensationswicklung ausgeführt. Damit wird die Ankerrückwirkung nicht kompensiert. Als Folge sinkt die Drehmomentkonstante k_t bei hohen Ankerströmen um bis zu 10%.

c.) Welches wichtige Bauteil dieser Maschine ist in Bild 1.1 nicht eingezeichnet?

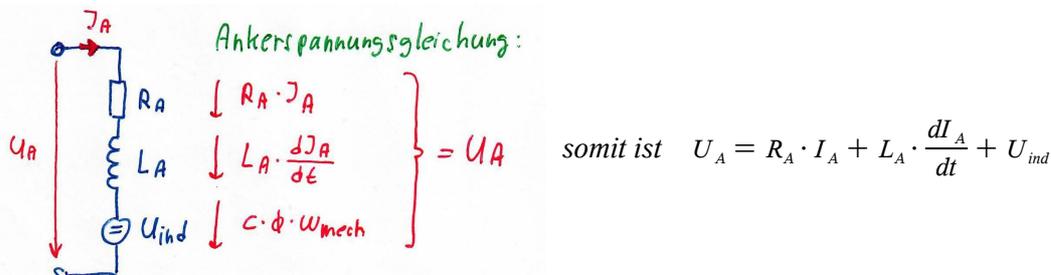
Der Kommutator mit den Kommutatorlamellen auf dem Anker und den (Kohle-) Bürsten im Ständer

d.) Welche Polpaarzahl hat die Maschine? Kann man daraus eine Synchrondrehzahl ableiten?

Es sind 4 Pole zu sehen, d.h. es werden sich 2 Polpaare jeweils aus Nord- und Südpol ausbilden. Also: 4-polige Maschine mit Polpaarzahl $p = 2$. Aufgrund der mechanischen Kommutierung läuft eine GM immer mit ihrer eigenen "inneren" Synchrondrehzahl, egal wie schnell sich der Anker dreht. Antwort zu "Synchrondrehzahl ableiten": nein, kann man nicht, denn eine Synchrondrehzahl ist nur bei Drehfeldmaschinen relevant (wo die Kommutierung nach außen verlagert ist und entweder durch das Drehstromnetz oder eine Leistungselektronik erfolgt). Die Polpaarzahl hat bei der GM nur Einfluss auf die Eisenkreisgeometrie und ermöglicht es bei großen Maschinen, den Ankerstrom auf möglichst viele Bürstenpaare zu verteilen.

1.2 Ersatzschaltbild

a.) Zeichnen Sie das elektrische Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine und benennen Sie die einzelnen Elemente. Wie lautet die zugehörige Spannungsgleichung?



b.) Welche Elemente bestimmen das stationäre Betriebsverhalten?

Ankerkreiswiderstand R_A und Spannungsquelle U_{ind} . Der induktive Spannungsfall macht sich nur bei schnellen Ankerstromänderungen bemerkbar und begrenzt den Stromanstieg, z.B. bei Einschaltvorgängen ("transientes Verhalten"). Bei konstanter Drehzahl ist U_{ind} konstant, auch wenn die Spannungsinduktion selbst natürlich ein dynamischer (d.h. zeitabhängiger) Vorgang ist. Durch den Kommutator wird Wechselspannung in den einzelnen Ankerwindungen nach außen hin gleichgerichtet.

c.) Leiten Sie aus dem Energieumsatz an der EMK-Spannungsquelle (U_{ind}) eine Beziehung für das innere Drehmoment der Maschine her.

Innere Leistung, elektrisch: $P_i = U_{ind} \cdot I_A$ diese Leistung "verschwindet" in der Maschine

Innere Leistung, mechanisch: $P_i = \omega_{mech} \cdot M_i$... und kommt an der Welle wieder heraus

Beide sind identisch: $U_{ind} \cdot I_A = \omega_{mech} \cdot M_i$ "elektromechanische Energiewandlung"

Induzierte Spannung: $U_{ind} = c \cdot \phi \cdot \omega_{mech}$ Bewegungsinduktion, egal ob Mot. oder Gen.
alternativ: "EMK" = Elektromotorische Kraft

daraus Drehmoment: $c \cdot \phi \cdot \omega_{mech} \cdot I_A = \omega_{mech} \cdot M_i \Rightarrow M_i = c \cdot \phi \cdot I_A$

1.3 Stationärer Betrieb

Für eine Gleichstrommaschine mit den Daten $I_{A,Nenn} = 25 \text{ A}$ und $U_{A,Nenn} = 220 \text{ V}$ sowie $I_{F,Nenn} = 1 \text{ A}$ und $U_{F,Nenn} = 220 \text{ V}$ wurden am Prüfstand folgende Werte ermittelt: Ankerwiderstand $1000 \text{ m}\Omega$, Leerlaufdrehzahl 2246 Upm bei $U_{A,Nenn} = 220 \text{ V}$ mit Stromaufnahme 1.0 A .

Die Maschine wird zunächst mit ihrem Nennerregerstrom betrieben, das Schleppmoment sei drehzahlunabhängig, der Eisenkreis verhalte sich bis $I_{F,Nenn}$ linear (ohne Sättigung).

a.) Wie groß ist die induzierte Spannung im Leerlauf bei 2246 Upm mit den o.g. Daten?

im Leerlauf ist mit $I_{A,Leerlauf} = 1 \text{ A}$:
$$U_{ind, Leerlauf} = U_{A, Nenn} - R_A \cdot I_{A, Leerlauf} = 219,0 \text{ V}$$

b.) Wie groß ist dabei das Schleppmoment?

allgemein gilt für U_{ind} :
$$U_{ind} = c \cdot \phi \cdot \omega_{mech} = k_i \cdot N [\text{Upm}] \cdot \frac{\pi}{30}$$

das gilt auch für die Leerlaufdaten:
$$U_{ind, Leerlauf} = k_i \cdot N_{Leerlauf} \cdot \frac{\pi}{30}$$

umgestellt nach k_i :
$$k_i = \frac{U_{ind, Leerlauf}}{N_{Leerlauf}} \cdot \frac{30}{\pi} = 0,931 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$$

im Leerlauf ist $M_i = M_{Schlepp}$:
$$M_{Schlepp} = k_i \cdot I_{A, Leerlauf} = 0,931 \text{ Nm}$$

c.) Wie groß sind im Motorbetrieb Nenndrehmoment, Nenndrehzahl und Nennleistung an der Welle? Skizzieren Sie dazu die Kennlinie Drehzahl über Drehmoment $N(M)$.

Natürlich gilt das für Leerlauf ermittelte k_i auch im Nennbetrieb. Eine Ankerrückwirkung wird hier vernachlässigt. Was nicht bekannt (oder gegeben) ist, kann auch nicht berücksichtigt werden!

Nenndrehmoment an der Welle bei Nennankerstrom unter Berücksichtigung des Schleppmomentes:

$$M_{Nenn} = M_{Welle} = M_{i, Nenn} - M_{Schlepp} = k_i \cdot (I_{A, Nenn} - I_{A, Leerlauf}) = 22,35 \text{ Nm}$$

Für die Nenndrehzahl muss zunächst $U_{ind, Nenn}$ bestimmt werden. Bei Belastung ist $U_{ind} < U_{ind, Leerlauf}$:

$$U_{ind, Nenn} = U_{A, Nenn} - R_A \cdot I_{A, Nenn} = 195,0 \text{ V}$$

Nun die Formel für U_{ind} entsprechend umstellen:

$$N_{Nenn} = \frac{U_{ind, Leerlauf}}{k_i} \cdot \frac{30}{\pi} = 2000,1 \text{ Upm}$$

Daraus kann man dann die Nennleistung bestimmen (überlegen Sie, ob es alternative Rechenwege gibt).

$$P_{Nenn} = P_{Welle} = M_{Nenn} \cdot \omega_{Nenn} = M_{Nenn} \cdot N_{Nenn} [\text{Upm}] \cdot \frac{\pi}{30} = 4,681 \text{ kW}$$

Die gefragte Kennlinie finden Sie unten bei Aufgabe f.)

Anmerkung: Die Winkelgeschwindigkeit ω hat die Einheit rad/s. Und als Index schreibt man normalerweise nicht "Nenn", sondern nur "N". Auf Nennbetrieb ist die Maschine ausgelegt (Eckpunkt, Typenpunkt), hier kann die Verlustwärme dauerhaft und innerhalb der zulässigen Betriebstemperatur der Wicklung abgeführt werden.

d.) Welcher Wirkungsgrad ergibt sich im Nennpunkt? Die Erregerleistung ist mit zu bilanzieren!

Der Wirkungsgrad bilanziert im Motorbetrieb die mechanische Ausgangsleistung zur elektrischen Eingangsleistung.

$$\eta_{\text{Nenn}} = \frac{P_{\text{Welle}}}{P_{A, \text{Nenn}} + P_{F, \text{Nenn}}} = \frac{P_{\text{Nenn}}}{U_{A, \text{Nenn}} \cdot I_{A, \text{Nenn}} + U_{F, \text{Nenn}} \cdot I_{F, \text{Nenn}}} = 0,818 \quad \text{bzw. } 81,8\%$$

Zur Plausibilitätsprüfung: schauen Sie nach, welche Wirkungsgrade wir im Praktikum aus Messungen an Gleichstromsachinen bestimmt haben. Für Generatorbetrieb müssten Sie übrigens wie folgt rechnen:

$$\eta = \frac{P_A}{P_{\text{Welle}} + P_F} \quad \text{d.h. die Ausgangsleistung wäre hier die elektrische Leistung des Ankerkreises.}$$

e.) Jetzt soll die Maschine bei 4000 Upm mit maximaler Leistung betrieben werden, wobei Ankerspannung und -Strom nicht über den Nennwert hinaus erhöht werden dürfen. Welche Werte müssen dann für I_A und I_F eingestellt werden, und wie groß sind dann Drehmoment und Leistungsabgabe an der Welle?

Im Grunddrehzahlbereich wird die Maschine immer mit Nennerregerstrom $I_{F, \text{Nenn}}$ betrieben und das Drehmoment über den Ankerstrom I_A eingestellt. Im Nennpunkt erreicht die Ankerspannung ihren Nennwert $U_{A, \text{Nenn}}$ und kann nicht weiter erhöht werden. Soll die Drehzahl weiter erhöht werden, muss der Feldstrom I_F umgekehrt proportional zu Drehzahl ($I_F \sim 1/N$) reduziert werden: der magn. Fluss Φ wird direkt mit I_F eingestellt, und aufgrund der Beziehung $U_{\text{ind}} = c \cdot \Phi \cdot \omega$ kann ω weiter gesteigert werden, wenn Φ reduziert wird. Wegen $k_i = c \cdot \Phi$ sinkt das Drehmoment dabei. U_{ind} und die Ankerspannung U_A steigen dafür nicht weiter an. Der Einfluss der Sättigung im Eisenkreis wird hier vernachlässigt, also gilt $\Phi \sim I_F$. Ansonsten würde die Kurve $\Phi(I_F)$ im oberen Strombereich immer mehr abflachen. Man wählt den Nennpunkt im allgemeinen so, dass der Eisenkreis bei $I_{F, \text{Nenn}}$ bereits etwas gesättigt ist, um das aktive Material der Maschine (Kupfer und Eisen) so gut wie möglich ausnutzen zu können.

Soll die Maschine im Feldschwächbereich mit Vollast (maximale Leistung) betrieben werden, gilt oberhalb der Nenndrehzahl (2000 Upm) $I_A = I_{A, \text{Nenn}}$ und $U_A = U_{A, \text{Nenn}}$ (hier also 220 V) sowie $U_{\text{ind}} = U_{\text{ind}, N}$ (hier also weiterhin 195 V). Für I_F gilt dann bei $N = 4000 \text{ Upm} = 2 \cdot N_{\text{Nenn}}$: $I_F = I_{FN} / 2 = 0,5 \text{ A}$.

Drehmoment bei halbem Erregerstrom: $M_{\text{Welle } 4000\text{Upm}} = \frac{k_i}{2} \cdot I_{A, \text{Nenn}} - M_{\text{Schlepp}} = 10,71 \text{ Nm}$

Achtung: das innere Drehmoment ist bei doppelter Nenndrehzahl halb so groß wie im Nennpunkt, jedoch bleibt das Schleppmoment unverändert (Aufgabenstellung: "drehzahlunabhängig"). Somit ist auch die Leistungsabgabe an der Welle etwas kleiner als im Nennpunkt ($P_N = 4,681 \text{ kW}$):

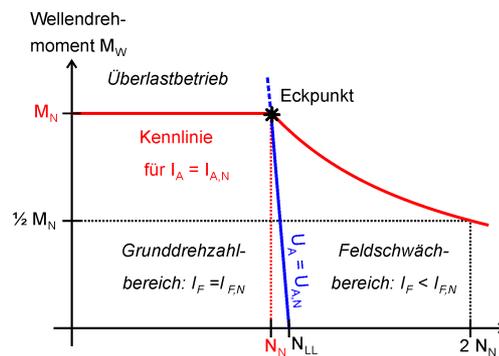
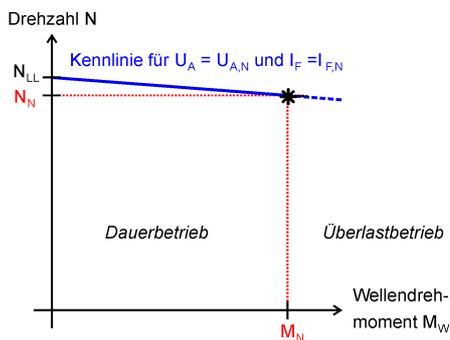
Wellenleistung bei $N = 4000 \text{ Upm}$: $P_{\text{Welle } 4000\text{Upm}} = M_{\text{Welle } 4000\text{Upm}} \cdot 4000 \text{ Upm} \cdot \frac{\pi}{30} = 4,486 \text{ kW}$

f.) Wie nennt man den Betriebsbereich, der in e.) angefahren wird? Skizzieren Sie den Verlauf von Drehmoment und Wellenleistung bei Vollast über der Drehzahl von 0 bis 4000 Upm.

Feldschwächbereich, siehe Erläuterungen unter e.). Drehmomentverlauf siehe auch Kapitel 4.4.

Achtung, bitte nicht verwechseln: in c.) war eine N-M-Kennlinie als Charakteristik Drehzahl über Drehmoment gefragt – diese gibt an, welche Drehzahl sich im spannungsgesteuerten Betrieb bei einer gegebenen Belastung einstellen würde. **Diese Kennlinie für c.) ist nachfolgend links geplottet.**

In f.) hingegen geht es um eine M-N-Kennlinie, also Drehmoment über Drehzahl: welches Drehmoment kann der Antrieb bei welcher Drehzahl an der Welle bereit stellen? **Für f.) siehe rechter Kurvenplot.**



1.4 Betrieb mit Ankerstromregelung

In einem Elektrofahrzeug werde eine Gleichstrommaschine durch eine Traktionsbatterie mit Energie versorgt. Die Maschine soll stromgeregelt betrieben werden, um die Gaspedalstellung als Drehmoment am Rad abzubilden.

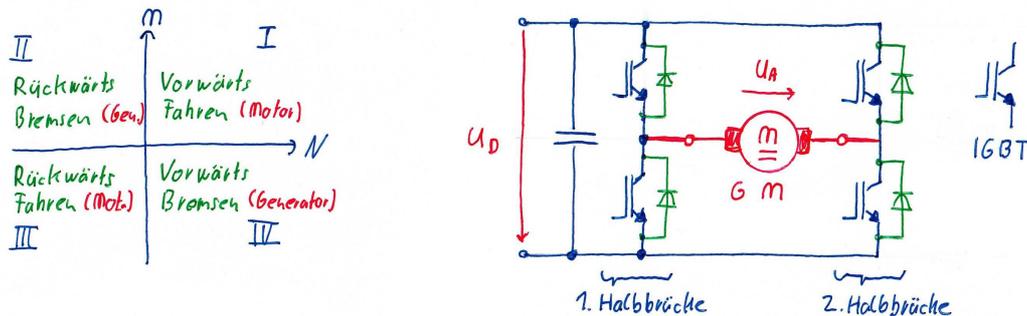
a.) Benötigt die Maschine dazu einen eigenen Drehmomentenregelkreis?

Nein, denn das Drehmoment kann über den Ankerstrom für einen Traktionsantrieb hinreichend genau eingepreßt werden. Bei hoher Genauigkeitsanforderung muss ggf. das Streckenverhalten linearisiert werden, beispielsweise um den Einfluss einer Ankerrückwirkung (k ; bricht bei hohen Strömen ein, wenn es keine Kompensationswicklung gibt) zu korrigieren.

Zudem ist hier der Drehmomentenregelkreis der unterlagerte Regelkreis: wenn Sie als Fahrer genau 50km/h fahren wollen (Sie sind der Drehzahlregelkreis), dann korrigieren Sie kleinere Abweichungen eben über die Gaspedalstellung und merken davon in der Regel nichts. Es gibt in seltenen Fällen Antriebssysteme, bei denen ein hochpräziser Drehmomentenregelkreis erforderlich ist, was jedoch den Einsatz einer sehr aufwändigen Istwerterfassung (Drehmomentmesswelle!) erfordert - allein das wäre im Fahrzeugbereich aufgrund der Kosten und des Bauraumbedarfs nicht akzeptabel.

b.) Was für ein leistungselektronisches Stellglied ist hier für den Ankerkreis erforderlich, wenn rekuperatives Bremsen und rückwärts fahren gefordert werden? (Überlegen Sie, welche Quadranten im Ankerstellbereich dazu benötigt werden.) Zeichnen Sie das Schaltbild des Leistungsteils mit IGBTs als Vorwärtsschalter.

Insgesamt werden alle 4 Quadranten benötigt, siehe nachfolgende Zeichnung. Also kommt eine Vollbrücke (oder auch "H-Brücke") zum Einsatz.



Für Vorwärtsfahren (Drehzahl positiv) und Rückwärtsfahren (Drehzahl negativ) jeweils mit Fahren/Antreiben (Motorbetrieb) und rekuperativem Bremsen (Generatorbetrieb) sind mit dem leistungselektronischen Stellglied insgesamt alle 4 Quadranten zu bedienen. Vorsicht: für Rückwärtsfahrt entspricht der III. Quadrant dem Motorbetrieb: sowohl Drehzahl als auch Drehmoment sind dann negativ, woraus sich eine positive Wellenleistung ergibt.

Für Traktionsantriebe an einem Hochvoltbordnetz (400 bis etwa 800 V DC) sind heute IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistoren) Standard. Diese benötigen für den Freilaufbetrieb (Strom fließt rückwärts durch den jeweiligen Zweig) eine Freilaufdiode, oben grün eingezeichnet. Der Zwischenkreis-kondensator an U_D ist zum Betrieb obligatorisch und muss mit eingezeichnet werden. An den Eingangsklemmen würde dann das Bordnetz bzw. die Traktionsbatterie mit der Spannung $U_{\text{Batt}} = U_D$ angeschlossen. Natürlich ist das nur ein Prinzip-Stromlaufplan, die technische Umsetzung ist komplexer.

c.) Welcher Maschinentyp würde sich heute für ein zeitgemäßeres Elektrofahrzeug anbieten und was wäre der Vorteil? Was müsste man an der Leistungselektronik, was an der Regelung ändern?

Eine Drehfeldmaschine. Entweder eine Asynchronmaschine, oder eine permanenterregte Synchronmaschine (PMSM). Die PMSM ist momentan in Bezug auf Wirkungsgrad und Gewicht die beste Wahl, jedoch mit dem Problem, dass relativ teures Seltenerd-magnetmaterial (NdFeB) benötigt wird.

Die Leistungselektronik müsste um eine 3. Halbrücke ergänzt werden. Auf diese Weise erhält man einen kompletten Drehstromwechsellrichter, siehe Kapitel 10.

Die Regelung einer Drehfeldmaschine ist deutlich komplexer als bei der GM, wo ein einfacher PI-Regler mit Pulsmustererzeugung für die Stromregelung ausreicht (siehe Kapitel 5). Zur Stromregelung wird bei ASM und PMSM eine Vektorregelung (auch: feldorientierte Regelung) benötigt.

Ergänzende Anmerkungen: Die Vektorregelung besteht aus Raumzeigertransformation, 2 PI-Reglern für d- und q-Strom, Vorsteuerung/Entkopplung und Rücktransformation mit Sinus-Dreieckmodulation zur Pulsmustererzeugung (alternativ: Raumzeigermodulation). Auch die Sensorik ist aufwändiger, da man zusätzlich eine Drehzahlerfassung (ASM) bzw. eine Pollageerfassung (PMSM) benötigt.

Dafür sind Drehfeldmaschinen leichter und kompakter als die GM und vor allem wartungsarm, da es keinen Kommutator mit Kohlebürsten gibt. Zudem ist die Kühlung einfacher: der Stator als "Anker", in dem die Verlustwärme entsteht, kann direkt wassergekühlt werden. Bei der GM hingegen befindet sich der Anker im Läufer, was klassischer Weise eine Luftkühlung mit Luftfilter erfordert, da die Luft durch den Luftspalt geblasen werden muss.

1.5 Dynamischer Betrieb

Eine fremderregte GM werde über eine Halbbrücke gespeist und ihr Ankerstrom geregelt. Die Zwischenkreisspannung beträgt 400V, die Ankernennspannung der Maschine 240 V, der Ankernennstrom 25 A, das Nennmoment 50 Nm, die Nenndrehzahl 1000 Upm. Das Schleppmoment ist vernachlässigbar. In einem Versuch wurden im Stillstand 400 V an die festgebremste Maschine gelegt und der Anstieg des Ankerstromes mit einem Oszilloskop festgehalten.

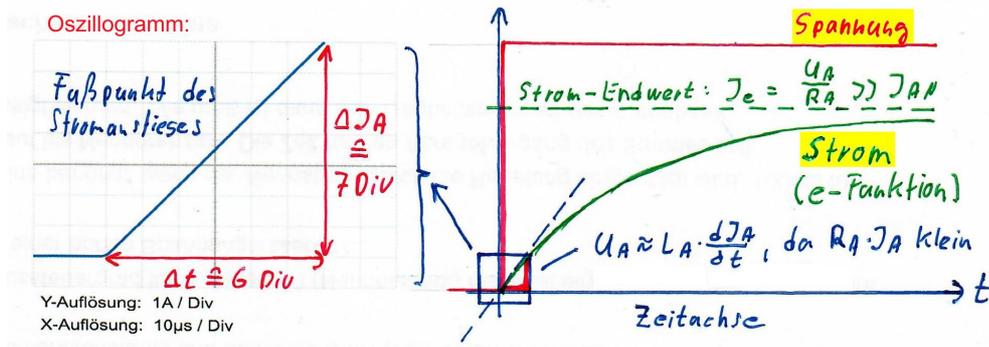


Bild 1.5

a.) Wie groß ist die Ankerinduktivität der Maschine, und wie schnell könnte der Nennstrom im Idealfall angeregt werden?

Bevor wir losrechnen, zunächst eine Erklärung der Messmethode. "Stillstand" und "festgebremst" \Rightarrow die Maschine dreht sich während des Versuches nicht, womit $U_{ind} = 0$. Also ist der Ankerkreis eine rein ohm'sch-induktive Last mit $U_A = R_A \cdot I_A + L_A \cdot dI_A/dt$. Wenn man jetzt $U_A = 400\text{ V}$ aufschaltet, steigt der Strom mit einer e-Funktion an. Da der Endwert dieser Funktion ($I_e = U_A/R_A$) weit über dem Ankernennstrom liegt, darf man das nur kurzfristig tun, d.h. man muss U_A abschalten, bevor der Strom zu groß bzw. die Wicklung zu heiß wird. Im Fußpunkt der e-Funktion ist das Glied $R_A \cdot I_A$ noch vernachlässigbar klein, so dass der Strom näherungsweise mit einer Ursprungsgerade linear ansteigt: $U_A \approx L_A \cdot \Delta I_A / \Delta t$. Diesen Ausschnitt (siehe Kasten in der Skizze der e-Funktion) zeigt das in der Aufgabenstellung gegebene Oszillogramm. Daraus kann man ablesen:

$$\Delta t = 60\ \mu\text{s} \text{ (6 Div) und } \Delta I_A = 7\ \text{A} \text{ (7 Div)} \quad \Rightarrow \quad L_A = U_A \cdot \frac{\Delta t}{\Delta I_A} = 400\text{V} \cdot \frac{60\ \mu\text{s}}{7\text{A}} = 3,43\ \text{mH}$$

b.) Wie groß ist der Ankerwiderstand? Hinweis: Aus den Angaben Nennmoment/Nennstrom kann die Drehmomentkonstante und damit die EMK (U_{ind}) bestimmt werden.

Drehmomentkonstante, wenn M_s vernachlässigbar ist: $k_i = \frac{M_N}{I_{A,N}} = \frac{50\ \text{Nm}}{25\ \text{A}} = 2\ \text{Nm/A}$

Induzierte Spannung bei Nenndrehzahl: $U_{ind} = c \cdot \phi \cdot \omega_{mech} = \frac{k_i \cdot N_N \cdot \pi}{30} = 209,4\ \text{V}$

Ankerspannungsgleichung nach R_A umgestellt: $R_A = \frac{U_{AN} - U_{ind}}{I_A} = 1,22\ \Omega$

c.) Welcher Aussteuergrad kann dauerhaft (Nennbetrieb!) maximal eingestellt werden? Was wäre der Vorteil einer hohen Spannungsreserve?

Die Ausgangsspannung einer Halbbrücke ist $U_{d2} = a \cdot U_{d1}$. Der Aussteuergrad a kann dabei von 0 bis 1 (bzw. von 0 bis 100%) verstellt werden, und U_{d1} ist die Eingangsspannung, die hier 400 V beträgt.

Also gilt $a_{\max, \text{dauer}} = \frac{U_{d2}}{U_{d1}} = 0,60$ bzw. 60%.

Vorteil: mit der hohen Eingangsspannung (Zwischenkreisspannung) kann der Ankerstrom schnell verstellt werden.

Ergänzendes Rechenbeispiel: Mit $U_A \approx L_A \cdot \Delta I_A / \Delta t$ (ansonsten müsste man mit der e-Funktion rechnen) und $U_A = U_{D1} = 400$ V sowie $\Delta I_A = I_{A,N}$ ist die Anregelzeit des Nennankerstromes

$$t_a = \Delta t = L_A \cdot \frac{I_{AN}}{U_A} = 0,214 \text{ ms}$$

Das bedeutet, dass das Nenndremoment innerhalb von nur 0,2 ms angeregt werden kann. Auch für einen hochdynamischen Antrieb ist das sehr schnell!

d.) Die Maschine benötigt ohne Lastmoment, wenn der Nennstrom durch die Regelung eingepreßt wird, 100 ms für den Hochlauf bis Nenndrehzahl. Die Zeit für den Anregelvorgang des Stromes soll vernachlässigt werden. Wie groß ist dann das Trägheitsmoment des Antriebes?

Bewegungsgleichung für $M_S = 0$ und $M_W = 0$: $k_i \cdot I_{A,N} = M_N = M_B = J_{\text{Antrieb}} \cdot \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$

Winkelgeschwindigkeit bei Nenndrehzahl: $\omega_N = \Delta \omega = N_N \cdot \frac{\pi}{30} = 104,7 \text{ rad/s}$

Bewegungsgleichung nach J_{Antrieb} umgestellt: $J_{\text{Antrieb}} = k_i \cdot I_{A,N} \cdot \frac{100\text{ms}}{\omega_N} = 0,048 \text{ kgm}^2$

Bezug zu Grundlagen der Elektrotechnik und Regelungstechnik: die Sprungantwort des Stromes bei Spannungsaufschaltung an einer ohm'sch-induktiven Last (Tiefpass bzw. PT1-Glied) ist eine e-Funktion:

$$I_A(t) = \frac{U_A}{R_A} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{L_A}{R_A}$$

Bei $t = \tau$ hat der Strom 63,2% des Endwertes erreicht, bei $t = 5\tau$ bereits 99,3%.

Die Anwendung umgehen wir hier – wie in der Praxis meist auch – durch vereinfachende Annahmen.

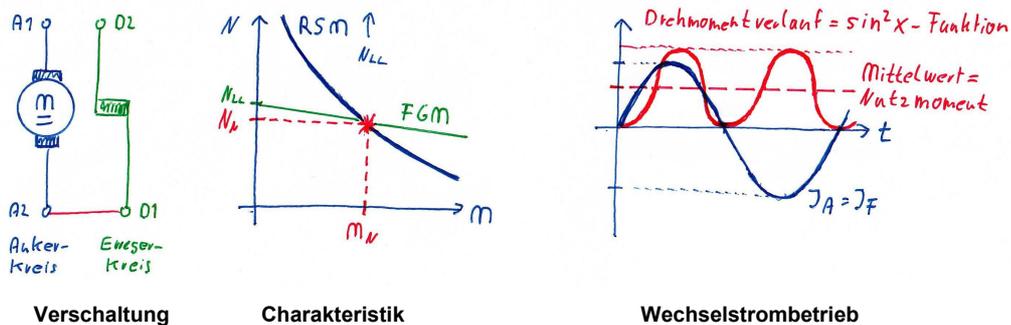
1.6 Reihenschlussmaschine

- a.) Wie sind Anker- und Erregerkreis bei der Reihenschlussmaschine geschaltet, und was bedeutet das für die Auslegung der Erregerwicklung in Bezug auf den Strom?

Wie aus der Bezeichnung zu erwarten, sind Anker- und Erregerwicklung in Reihe geschaltet. Falls vorhanden befinden sich noch Wendepol- und Kompensationswicklung im gleichen Stromkreis, ebenso in Serie geschaltet. Damit muss die Erregerwicklung aber auf den Ankernennstrom ausgelegt sein. Im Unterschied zur fremderregten GM, wo die Erregerwicklung häufig auf die Ankernennspannung ausgelegt ist (dünner Draht mit hoher Windungszahl und hohem Widerstand $R_F = U_F / I_F$), sieht man das an einer Erregerwicklung mit dickem Draht und entsprechend kleinerer Windungszahl.

Der Spannungsfall an der Erregerwicklung ist dann bei Gleichstrombetrieb deutlich kleiner als die Ankerspannung. Bei Wechselstrombetrieb ist der Spannungsfall im Erregerkreis aufgrund des dann wirksamen induktiven Blindwiderstandes deutlich erhöht (Die Erregerwicklung erzeugt den Hauptfluss, und es gilt bekanntlich allgemein $L = \text{Fluss} / \text{Strom}$).

- b.) Skizzieren Sie die Drehzahl-Drehmomentcharakteristik bei Betrieb an konstanter Spannung und vergleichen Sie diese mit der fremderregten GM.



Im Gegensatz zur fremderregten GM (fallende Gerade in grün, "FGM") ergibt sich für die N-M-Charakteristik der RSM eine Hyperbelfunktion, d.h. die Drehzahl bricht bei hoher Belastung stärker ein, während es im Teillastbetrieb eine deutliche Drehzahlüberhöhung gibt, denn der bei kleiner Belastung kleine Ankerstrom = Feldstrom bewirkt eine deutliche Feldschwächung. Bei identischer Eisenkreisdimensionierung würde sich für beide Varianten jedoch der gleiche Typenpunkt bei N_N und M_N ergeben.

- c.) Warum ist Wechselstrombetrieb möglich? Die Bezeichnung lautet dann "Einphasenreihenschlussmaschine" bzw. "Universalmotor". Nennen Sie typische Einsatzgebiete.

Wegen $M_i \sim I_A^2$ ergibt sich bei Wechselstromspeisung ein pulsierendes Drehmoment mit Gleichanteil ($\sin^2 x$ -Funktion). Dieser von Null verschiedene Mittelwert kann als Nutzmoment an der Welle abgegriffen werden. Einsatzgebiete:

"Universalmotor": in Haushaltsgeräten und Elektrowerkzeugen aller Art (Bohrmaschine,...)
In der Regel schnelldrehend mit hoher Leistungsdichte, ggf. mit Getriebe

"Einphasen-RSM": Fahrmotor in Elektrischen Triebfahrzeugen, kann über einen Stufentransformator (Schaltwerkslokomotive) oder einen Thyristorsteller drehzahlgesteuert werden.
Die letzten Vertreter fahren hier in Landshut als Loks der Baureihe 111 herum.
In modernen TFZ werden umrichter gespeiste ASM als Fahrmotoren eingesetzt.

Bei Betrieb an einem DC-Netz muss natürlich auch das Blockschaltbild eines Gleichstromstellers (das kann ein Tiefsetzer oder eine Vollbrücke sein) eingezeichnet werden. Ein (steuerbarer) Gleichrichter mit "3~" auf der Eingangsseite wäre falsch!

Zur Sensorik gehören hier Stromwandler und Drehzahlgeber. Die Ausgangsgröße des Stromreglers ist der Aussteuergrad $a = 0..100\%$ des Gleichstromstellers, aus dem der Pulsbreitenmodulator ("PWM") Steuerbefehle für den Stromrichter erzeugt. Im Falle einer Vollbrücke wären das wie hier eingezeichnet die Steuerbefehle S1 und S2 für die beiden Halbbrücken.

c.) Nun soll eine Lageregelung realisiert werden. Überlegen Sie, welche Sensorik zusätzlich benötigt wird und wie die Reglerstruktur zu ergänzen wäre. Wo werden Antriebe mit Lageregelung typischerweise eingesetzt?

Nun muss der Reglerkaskade noch eine zusätzliche Lageregelstufe vorgeschaltet werden, die eine Winkel- oder Positionsmessung (wenn z.B. der Verfahrweg einer Spindel gemessen werden soll) als Istwerterfassung benötigt. Was nicht geht, ist dem Drehzahlregler einfach die Weg-Regeldifferenz zu übergeben und die Drehzahlregelstufe "zu vergessen". Dann ist die Regelstrecke mit ihren 3 Integratoren meist nicht oder mit nur mit sehr schlechtem Anregelverhalten beherrschbar.

Wie in der Vorlesung Kapitel 5 erklärt, hier nochmal die 3 Integrationsstufen einer Lageregelung:

1. Ankerspannungsgleichung (Stellgröße ist die Ankerspannung!):

Spannungsbilanz \rightarrow Integrationsstelle \rightarrow Ankerstrom \Rightarrow Stromregler (Strom \sim Drehmoment)

2. Bewegungsgleichung:

Drehmomentenbilanz \rightarrow Integrationsstelle \rightarrow Drehzahl \Rightarrow Drehzahlregler

3. $\omega = d\alpha/dt$ bzw. $v = dx/dt$:

Drehzahl \rightarrow Integrationsstelle \rightarrow Winkel bzw. Position \Rightarrow Lageregler

d.) Zur Regelungstechnik: Was versteht man unter einer "Vorsteuerung"?

Informationen, die man im voraus leicht berechnen kann, werden auf den Reglerausgang addiert. Damit wird der Regler entlastet und kann auf eine höhere Anregeldynamik hin eingestellt werden.

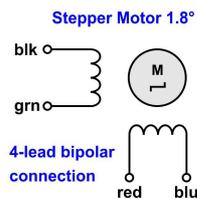
Als Beispiel ist oben eine typische EMK-Vorsteuerung im Stromregelkreis eingezeichnet: ohne Vorsteuerung muss der Stromregler die EMK (also $U_{ind} = c\Phi \cdot \omega_{mech}$) durch drehzahlabhängiges Anheben des Aussteuergrades a kompensieren, die Information dazu steht dann im Integrator. Nun kann man aber diesen EMK-kompensierenden Aussteuergrad a_{EMK} mit einem P-Glied aus dem Drehzahlwert berechnen und am Reglerausgang an einer Summationsstelle einschleifen.

Insbesondere, wenn Regelung und Leistungselektronik bei bereits drehender Maschine zugeschaltet werden sollen, ist das hilfreich, da sich dann der Regler nicht erst auf den drehzahlabhängigen Integratorstand einstellen muss, was einen Einschwingvorgang mit erheblicher Sollwertabweichung zur Folge hätte. Durch Reglerentlastung erhält man einen erheblich weicheren Einschaltvorgang.

Übrigens würde man bei einer Lageregelung auch am Ausgang des Lagereglers vorsteuern, indem man aus dem Positions-Sollwertverlauf ggf. schon einen Soll Drehzahlverlauf ableitet bzw. vorberechnet. Das erhöht die Stabilität im Zweifelsfall deutlich. Soll das Anregelverhalten optimiert werden, ist ein zusätzlicher D-Anteil im Regler hilfreich; damit erhielte man einen PID-Regler.

e.) Erklären Sie den Unterschied zwischen "Servomotor" und "Schrittmotor". Die Begriffe wurden in der Vorlesung bisher nicht explizit genannt. Recherchieren Sie ggf. im Netz.

Schrittmotor: Steuerung der Winkellage durch abwechselndes Bestromen der beiden Statorwicklungen (Schrittmotoren sind in der Regel 2-strängig ausgeführt). Durch sehr feine Rasterung der Pole ergeben sich kleine Winkelschritte im Grad-Bereich. Ist das Gegenmoment zu hoch, kann der Motor jedoch außer Tritt geraten und ggf. einen oder mehrere Schritte verlieren. Um das zu verhindern, kann man die Pollage messen und ggf. gegensteuern. Einsatzgebiete sind Kleinantriebe, z.B. für den Vorschub in 3D-Druckern und kleinen Werkzeugmaschinen.



Bilder: A. Kleimaier

Servomotor: Gleichstrommaschinen werden heute immer weniger als Servomotoren benutzt. In der Regel kommen 3-strängige Synchronservomotoren (PMSM) oder Asynchronservomotoren (ASM) zum Einsatz, die mit Frequenzumrichter und Vektorregelung (für die unterlagerte Stromregelschleife) betrieben werden. Siehe auch Seite 6 "Ergänzende Anmerkungen".

Drehzahl- und Lagerregelung sind wie oben in Aufgabe 1.7 c.) ausgeführt, d.h. die Position wird nicht wie beim Schrittmotor gesteuert und ggf. überwacht, sondern im Unterschied dazu mit einer geschlossenen Regelschleife angefahren. Einsatz in der Automatisierungstechnik, in Werkzeugmaschinen und z.B. zum Verfahren von Roboterarmen.



Bilder: A. Kleimaier

Anmerkung: klar, das geht über die Vorlesung hinaus, da uns dort für viele Dinge die Zeit fehlt. Das als Zusatzstoff einfach in die Übung auszulagern, in der die Kernkompetenzen in einem 2. Durchlauf erarbeitet werden sollen, ist nicht so ganz korrekt. Andererseits sollen Sie in der Lage sein, sich ggf. fehlendes Wissen selbstständig zu erschließen, um dabei möglichst schnell die für eine Aufgabenstellung relevanten Informationen zu gewinnen.

⚠ Bitte vergessen Sie nicht, dass wir auch im Praktikum Aufgabenstellungen bearbeitet und gerechnet haben. Auch das ist für die Prüfung relevant!

1.8 Zusatzaufgabe Kfz-Anlasser

Ein Kfz-Starter mit Permanenterregung werde zunächst im ausgebauten Zustand vermessen, wobei folgende Daten ermittelt werden:

Stillstand: $U_{AS} = 180\text{mV}$, $I_{AS} = 10.0\text{A}$

Leerlauf: $U_{AL} = 12.0\text{V}$, $I_{AL} = 20.0\text{A}$, $N_L = 3705\text{Upm}$

Nun werde der Starter in das Fahrzeug eingebaut. Die Übersetzung Starterritzel zu Zahnkranz Kurbelwelle betrage 1:15. Die Batterie habe eine Leerlaufspannung von 12.5V und einen Innenwiderstand von $10\text{m}\Omega$. Verluste im Bordnetz, ein Nachgeben der Batterie-Leerlaufspannung bei Belastung sowie die Ankerrückwirkung im Anlasser sollen vernachlässigt werden. Sein Schleppmoment sei drehzahlunabhängig.

Zunächst müssen die Maschinenparameter aus Stillstands- und Leerlaufmessung mit Hilfe der Ankerspannungsgleichung bestimmt werden. Das sind stationäre Betriebspunkte, also ist $L_A \cdot dI_A/dt = 0$.

Im Stillstand ist $U_{ind} = 0$, als gilt für den Ankerwiderstand: $R_A = \frac{U_{AS}}{I_{AS}} = 18\text{ m}\Omega$

Damit kann man U_{ind} aus der Leerlaufmessung rückrechnen: $U_{indL} = U_{AL} - R_A \cdot I_{AL} = 11,64\text{ V}$

also erhalten wir für die innere Drehmomentkonstante k_i : $k_i = \frac{U_{indL}}{\omega_L} = \frac{U_{indL}}{N_L} \cdot \frac{30}{\pi} = 0,03\text{ Nm/A}$

Berechnen Sie für Kurbelwellendrehzahlen von 0, 100, 200 und 250 Upm jeweils folgende Größen:

- die Stromaufnahme des Starters

Kurbelwellendrehzahl: $N_{KW} = 0, 100, 200\text{ und }250\text{ Upm}$

Übersetzung Starterritzel zu Zahnkranz: $i_{SR} = 15$

Leerlaufspannung Batterie: $U_{0Batt} = 12,5\text{V}$

Innenwiderstand batterie: $R_{iBatt} = 10\text{m}\Omega$

Winkelgeschwindigkeit Starterritzel: $\omega_{SR} = N_{KW} \cdot i_{SR} \cdot \frac{\pi}{30}$

Stromaufnahme Ankerkreis Starter: $I_A = \frac{U_{0Batt} - k_i \cdot \omega_{SR}}{R_A + R_{iBatt}}$

Rechenergebnis:	N_{KW}/Upm	0	100	200	250
	I_A/A	446,4	278,1	109,8	25,7

- die Batterieklemmenspannung

Rechnung über Spannungsfall an R_{iBatt} : $U_{KL} = U_{0batt} - I_A \cdot R_{iBatt}$

Rechenergebnis:	N_{KW}/Upm	0	100	200	250
	U_{KL}/V	8,0	9,7	11,4	12,2

- die el. Leistungsaufnahme des Starters

Batterieklamme = Ankerkreis:

$$P_A = U_{KL} \cdot I_A$$

Rechnergebnis:

N_{KW} / Upm	0	100	200	250
P_A / W	3587	2703	1252	314

- sein Drehmoment an der Kurbelwelle

i_{SR} und I_{AL} berücksichtigen:

$$M_{KW} = (I_A - I_{AL}) \cdot k_i \cdot i_{SR}$$

Rechnergebnis:

N_{KW} / Upm	0	100	200	250
M_{KW} / Nm	191,9	116,2	40,4	2,5

- den Wirkungsgrad des Starters

Wellenleistung zu Ankerleistung:

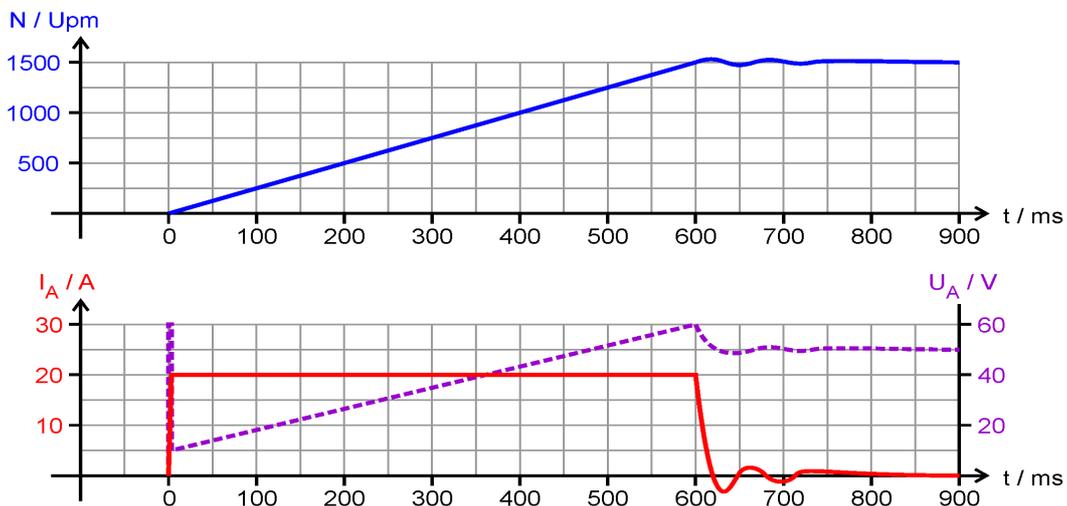
$$\eta_s = \frac{M_{KW} \cdot N_{KW} \cdot \pi / 30}{P_K}$$

Rechnergebnis:

N_{KW} / Upm	0	100	200	250
$\eta_s / \%$	0,0	45,0	67,6	21,2

1.9 Zusatzaufgabe Dynamischer Betrieb

Für einen drehzahlgeregelten elektrischen Antrieb mit einer permanenterregten GM werden beim Hochlauf die Trajektorien folgende Größen vermessen: Drehzahl, Ankerstrom und Ankerspannung. Der Antrieb laufe ohne Belastung und ein Schleppmoment sei vernachlässigbar. Die gemessenen Zeitverläufe sind unten abgebildet. Die Anregelzeit des Stromes betrage bei diesem Vorgang 1ms.



a.) Bestimmen Sie anhand der Messwerte folgende Systemparameter:

- Ankerwiderstand R_A

$t = 0 \text{ ms}$: Nach Anregeln des Stromes auf 20 A mit Spannungsspeak 60 V bleibt eine Spannungsstufe von 10 V bestehen, die dem ohm'schen Spannungsfall im Ankerkreis entspricht – da die Maschine hier noch steht ist entsprechend $U_{\text{ind}} = 0$.

$$\Rightarrow R_A = \frac{10 \text{ V}}{20 \text{ A}} = 0,5 \ \Omega$$

- Drehmomentkonstante k_i

$t = 900 \text{ ms}$: Im Leerlauf erreicht die Maschine bei $U_A = 50 \text{ V}$ eine Drehzahl $N_L = 1500 \text{ Upm}$. Da das Schleppmoment vernachlässigbar ist, gilt auch $I_A \approx 0$, womit der ohm'sche Spannungsfall in der Ankerspannungsgleichung entfällt. Also ist im Leerlauf $U_A \approx U_{\text{ind}} = k_i \cdot \omega_{\text{mech}}$.

$$\Rightarrow k_i = \frac{50 \text{ V}}{1500 \text{ Upm}} \cdot \frac{30}{\pi} = 0,318 \text{ Nm/A}$$

- Ankerinduktivität L_A

$t = 0..1 \text{ ms}$: Die Anregelzeit des Stromes beträgt 1 ms, wobei der Stromregler einen Spannungsspeak von 60 V erzeugt, um den Strom möglichst schnell ansteigen zu lassen. Wir vernachlässigen bei diesem Vorgang den ohm'schen Spannungsfall, und da die Maschine noch steht, reduziert sich die Ankerspannungsgleichung auf $U_A \approx L_A \cdot dI_A/dt$.

$$\Rightarrow L_A = 60 \text{ V} \cdot \frac{1 \text{ ms}}{20 \text{ A}} = 3 \text{ mH}$$

- Trägheitsmoment J_{Antr}

$t = 0..600 \text{ ms}$: Der Antrieb benötigt 600 ms, um mit einem Ankerstrom von 20 A von Null auf 1500 Upm hochzulaufen. Das Schleppmoment soll vernachlässigt werden, und k_i ist bereits bekannt. Also gilt:

$$M_B = k_i \cdot I_A = J_{\text{Antr}} \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_{\text{Antr}} \cdot \frac{dN}{dt} \cdot \frac{\pi}{30}$$
$$\Rightarrow J_{\text{Antr}} = 20 \text{ A} \cdot 0,318 \text{ Nm/A} \cdot \frac{600 \text{ ms}}{1500 \text{ Upm}} \cdot \frac{30}{\pi} = 0,0243 \text{ kg m}^2$$

b.) Welcher Energiebetrag wurde angenähert (0..600ms) für den Hochlauf elektrisch aufgebracht?

Allgemein gilt: $E_{\text{Anker}} = \int_0^{t_h} u_A(t) \cdot i_A(t) dt$ wobei $t_h = 600 \text{ ms}$ ist (Hochlaufzeit)

nun ist $i_A(t) = \text{const.} = 20 \text{ A}$ und $u_A(t)$ hat einen trapezförmigen Verlauf, so dass wir die Fläche unter der Kurve relativ leicht berechnen können. Das Trapez des Spannungszeitverlaufes können wir in eine quaderförmige Grundfläche mit 10 V Höhe sowie ein Dreieck mit 50 V Höhe zerlegen. Den Spannungsspeak des Anregelvorganges bei $t = 0..1 \text{ ms}$ vernachlässigen wir zunächst mal.

$$\Rightarrow E_{\text{Anker}} = 20 \text{ A} \cdot \left(10 \text{ V} \cdot 600 \text{ ms} + \frac{50 \text{ V} \cdot 600 \text{ ms}}{2} \right) = 20 \text{ A} \cdot 600 \text{ ms} \cdot \left(10 \text{ V} + \frac{50 \text{ V}}{2} \right) = 420,0 \text{ J}$$

Zum Spannungsspeak während des Anregelns: hier steigt der Strom angenähert linear von 0 auf 20 A an (Dreieck), während die Spannung 60 V beträgt.

$$\Rightarrow E_{\text{Anr}} = 60 \text{ V} \cdot \frac{20 \text{ A}}{2} \cdot 1 \text{ ms} = 0,6 \text{ J}$$

Musterlösung

da wir oben jedoch angenommen haben, dass der Strom während der gesamten 600 ms konstant 20 A betrug, ist die Rechnung für E_{Anker} natürlich nur eine Näherung, und wir können für ein korrektes Ergebnis nicht einfach E_{Anr} hinzuaddieren.

c.) Wieviel Energie ist am Ende mechanisch, wieviel magnetisch gespeichert? Wie erklärt sich die Differenz zu dem Ergebnis aus b.)? Führen Sie eine Kontrollrechnung durch!

$$E_{\text{mech}} = \frac{1}{2} \cdot J_{\text{Antr}} \cdot \omega^2 \quad \text{mit} \quad \omega = 1500 \text{ Upm} \cdot \frac{\pi}{30} = 157,08 \text{ rad/s} \quad \Rightarrow E_{\text{mech}} = 299,7 \text{ J}$$

$$E_{\text{magn}} = \frac{1}{2} \cdot L_A \cdot I_A^2, \quad \text{wobei } I_A \text{ bei } t = 600 \text{ ms noch } 20 \text{ A beträgt} \quad \Rightarrow E_{\text{magn}} = 0,6 \text{ J}$$

Da wir L_A in a.) unter der Annahme eines linearen Stromanstieg berechnet hatten, liefert die Rechnung für E_{magn} natürlich das selbe Ergebnis wie der Rechengang für E_{Anr} mit der gleichen Annahme. Mit E_{magn} kann man die Diskrepanz zu dem Ergebnis aus b.) jedoch nicht erklären. Aber wir haben natürlich auch Energie im Ankerwiderstand verheizt – Pardon, in Joule'sche Wärme umgewandelt.

$$E_{\text{Wärme}} = U_R \cdot I_A \cdot t_h; \quad \text{der Spannungsfall an } R_A \text{ betrug } 10 \text{ V bei } 20 \text{ A} \Rightarrow E_{\text{Wärme}} = 120,0 \text{ J}$$

Somit ist $E_{\text{mech}} + E_{\text{Wärme}} = 419,7 \text{ J}$. Im Vergleich zu b.) fehlen hier noch 0,3 J.

\Rightarrow In der Näherungsrechnung für das Integral von E_{Anker} ist E_{magn} offenbar nur zur Hälfte enthalten.