

---

# Elektromaschinen- und Energietechnisches Praktikum



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Institut für  
Elektrische  
Energiewandlung

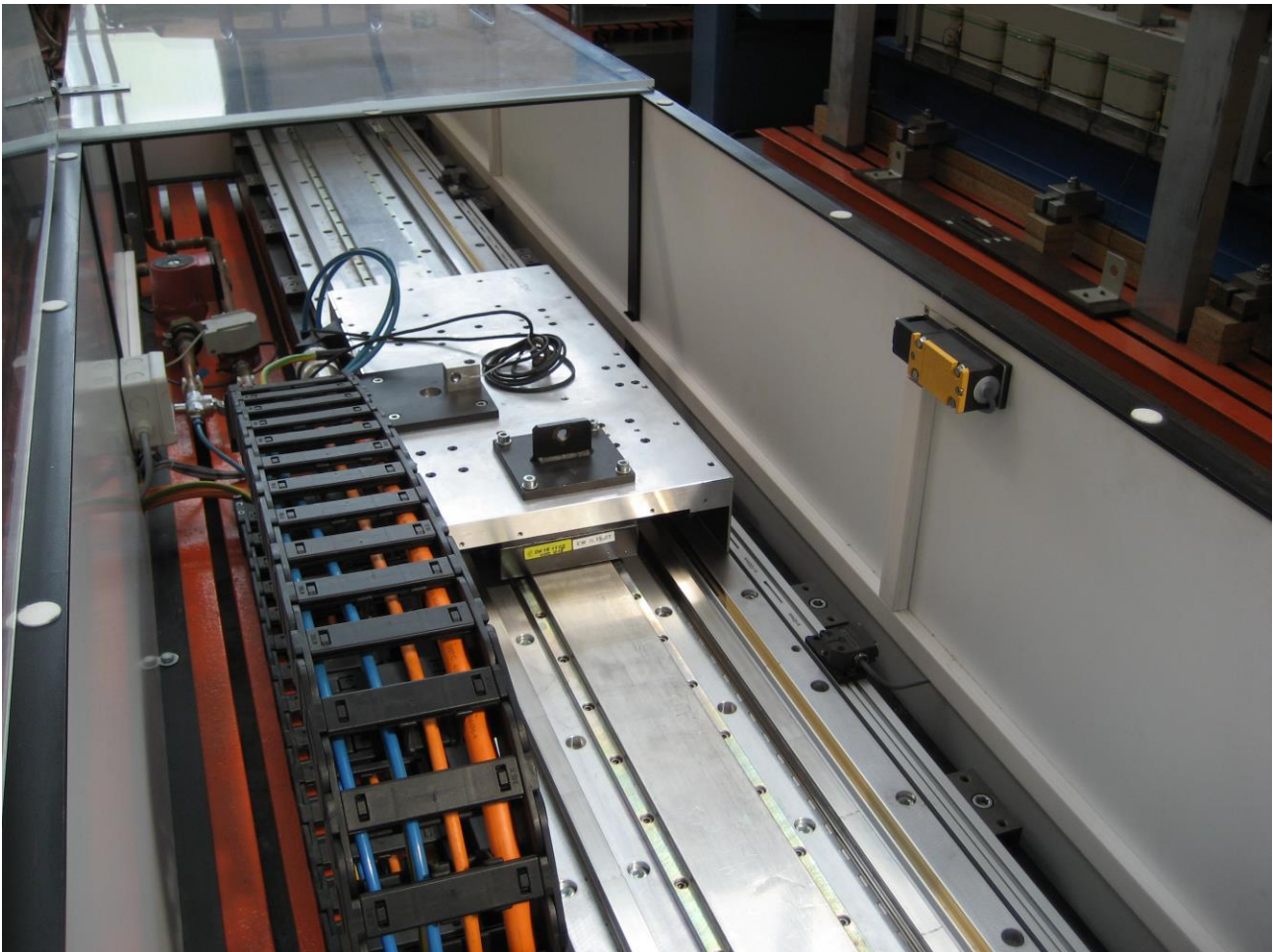
---

## M6: Der Permanentmagnet-Synchron-Linearmotor

---

Dokumentversion: 13.08.2020, Version 1.9

Betreuer: Martin Weicker, S3|10/317, Tel.: +49 6151 16 24191, [mweicker@ew.tu-darmstadt.de](mailto:mweicker@ew.tu-darmstadt.de)



---

# Inhaltsverzeichnis

1	Aufbau von Permanentmagnet-Synchron-Linearmotoren	3
2	Lineares Wanderfeld	4
3	Schubkraft, Verluste und Wirkungsgrad, Einsatzgebiete	6
4	Kraftdichten im Linearmotor	8
5	Motorkennlinien und Kenngrößen	11
6	Motordaten	15
7	Flussdichtemessung	15
7.1	Vorbereitung	15
7.2	Versuchsdurchführung	15
7.3	Ausarbeitung	16
8	Aufbau und Inbetriebnahme des Antriebs	17
8.1	Aufbau des Versuchsstands	17
8.2	Motor und Lagegeber	18
8.3	Antriebsregler	20
8.4	Inbetriebnahmeschritte	21
8.5	Ausarbeitung	23
9	Stillstandsmessung im Synchronbetrieb	23
9.1	Vorbereitung	24
9.2	Versuchsdurchführung	24
9.2.1	Aufbau	24
9.2.2	Messablauf	25
9.3	Ausarbeitung	25
10	Positionierbetrieb	25
10.1	Vorbereitung	25
10.2	Versuchsdurchführung	26
10.2.1	Wahl der Hauptbetriebsart	26
10.2.2	Eingabe und Ausführung von Positioniersätzen	26
10.2.3	Bedienung des Digitalen Oszilloskop	27
10.2.4	Fahrt zu Position 0	27
10.2.5	Relative Verfahrbewegungen	28
10.2.6	Absolute Verfahrbewegungen	28
10.2.7	Fahrt mit maximaler Dynamik	28
10.2.8	Fahrt mit Ruckbegrenzung	28
10.2.9	Positionierablauf	28
10.3	Ausarbeitung	28
11	Literatur	29
12	Verständnisfragen	29

# Teil A: Grundlagen

## 1 Aufbau von Permanentmagnet-Synchron-Linearmotoren

Permanentmagneterregte Linearmaschinen sind Synchronmaschinen, die man sich als „aufgeschnittene“ und in die Ebene „ausgerollte“ elektrische Maschine vorstellen kann (Abb. 1).

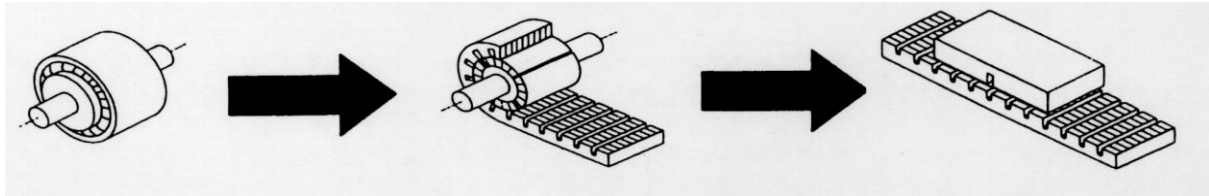


Abb. 1: Entstehungsprinzip des einseitigen Langstator-Linearmotors

Rotierende PM-Synchronmaschinen sind im Skript „Elektrische Maschinen und Antriebe“ beschrieben. Wie bei diesen rotierenden PM-Maschinen wird auch bei Linearmaschinen das magnetische Luftspaltfeld der Drehstromwicklung so erzeugt, dass es räumlich zum Luftspaltfeld der Permanentmagnete um  $90^\circ$  elektrisch phasenversetzt ist. Dadurch entsteht maximale Schubkraft. (= Einprägen von reinem Querstrom  $I_s = I_{sq}$ ,  $I_{sd} = 0$ ). Lesen Sie bitte über die prinzipielle Funktionsweise von umrichter gespeisten Permanentmagnet-Maschinen im Skript zum Versuch „M9 – Permanentmagnet-Synchronservomotor“ nach. Für die beschriebene  $I_q$ -Einprägung muss – wie bei rotierenden Maschinen – ein Lagegeber die Relativposition zwischen Drehstromwicklung (Primärteil) und Permanentmagneten (Sekundärteil) erfassen. Dies ist zumeist ein im Sekundärteil befestigter Linearmaßstab, der z.B. optisch die Position des bewegten Primärteils misst. Dies ist die häufigste Anordnung (Abb. 2), wie sie auch im Praktikum verwendet wird. Statt der Kugellager der rotierenden Maschinen wird das bewegte Teil in Linearführungen gelagert.

Primärteil: Abgewickelte Drehstromwicklung, vom Frequenzumrichter (Antriebsregler) gespeist.

Sekundärteil: Aufgeklebte Flachmagnete, mit amagnetischer Edstahlhülle umschlossen, um metallische Verschmutzung leicht abstreifen zu können.

Der bewegte Teil wird über Linearführungen gelagert.

Kurzstator: Kurzes Primärteil wird über langem Sekundärteil bewegt. Diese Bauform wird zumeist eingesetzt, um die Stromwärmeverluste zu minimieren.

Langstator: Kurzes Sekundärteil wird über langem Primärteil bewegt (Prinzip des *Transrapid*). Dadurch wird der Kabelschlepp („Energiekette“) vermieden, aber die Drehstromwicklung im Primärteil wird länger, ragt über den Permanentmagnet-Sekundärteil hinaus, wo keine Schubkraft gebildet wird. Diese Ausführung hat daher wegen des erhöhten elektrischen Widerstands  $R_s$  unnötig hohe Stromwärmeverluste.

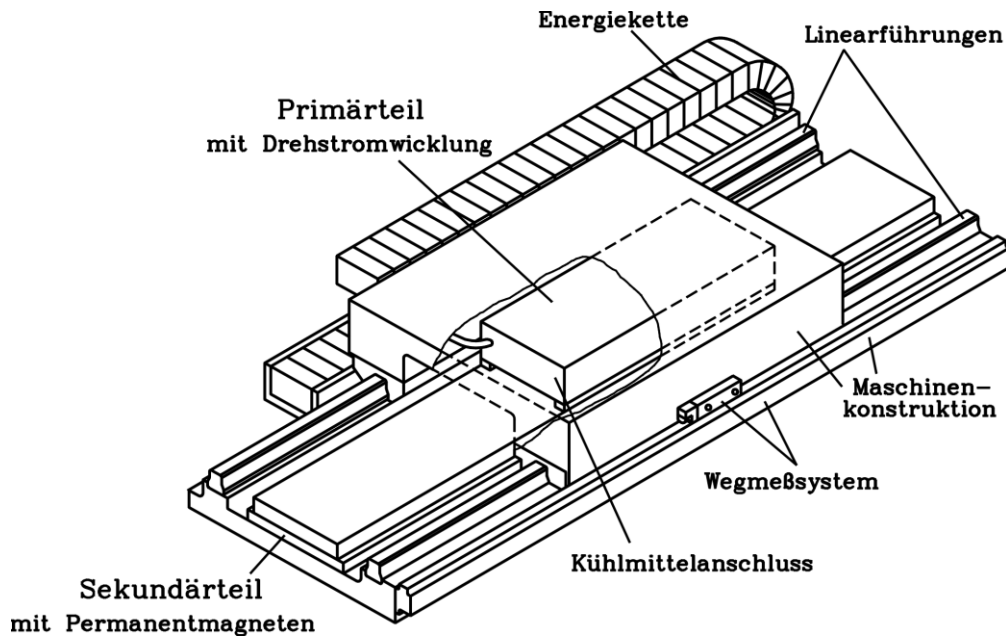


Abb. 2: Prinzipdarstellung eines einseitigen Kurzstator-Linear-Servomotors

## 2 Lineares Wanderfeld

Wird eine Drehfeldwicklung linear (eben) angeordnet, so entsteht kein Drehfeld, sondern ein Wanderfeld  $B_{\delta s}(x, t)$ . Abb. 3 zeigt für  $q = 1$ ,  $m = 3$ , eine ungesehnte Wanderfeldwicklung und das idealisierte Luftspaltfeld  $B_{\delta s}$  für unendlich schmale Nuten. In der Zeit  $T/6$  wandert das vielpolige Feld nach links um  $\tau_p/3$ . Die Wanderfeldgeschwindigkeit

$$v = \frac{\tau_p/3}{T/6} = 2 \cdot \tau_p / T = 2 \cdot \tau_p \cdot f_s = v_{\text{syn}} \quad (1)$$

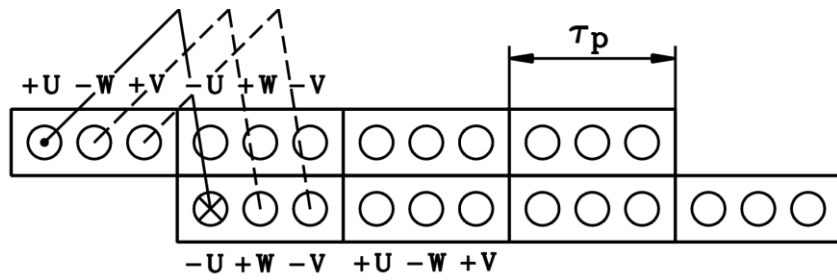
ist die bekannte Synchrongeschwindigkeit. Die Magnetpole verschwinden am linken Motorende in Abb. 3 und entstehen am rechten Ende neu.

### Beispiel 2-1: Synchrongeschwindigkeit eines Linearmotors

Für den im Praktikum verwendeten Linearmotor soll die Synchrongeschwindigkeit bestimmt werden: Polteilung  $\tau_p = 62,5 \text{ mm}$ , Nutteilung  $\tau_Q = \tau_p / (m - q) = 20,8 \text{ mm}$ .

Bei  $f_s = 16 \text{ Hz}$  ist die Wanderfeldgeschwindigkeit

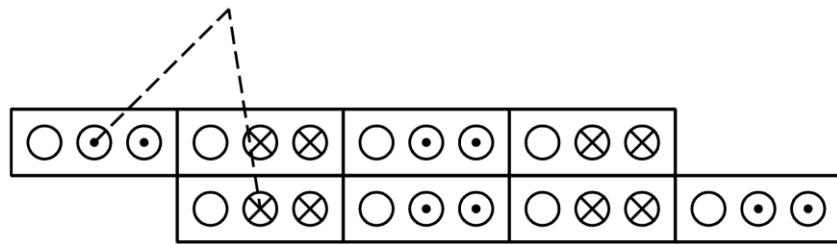
$$v_{\text{syn}} = 2 \cdot \tau_p \cdot f_s = 2 \cdot 16 \cdot 62,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} = 2 \text{ m/s} = 120 \text{ m/min}$$



$$q=1$$

$$m=3$$

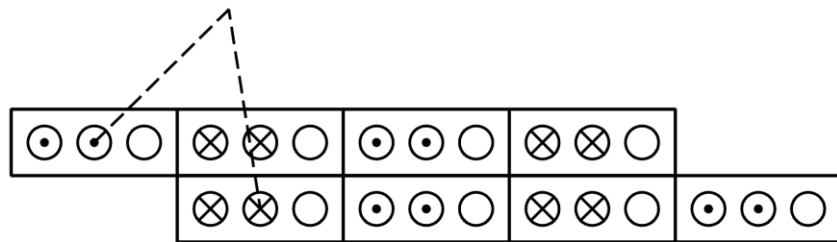
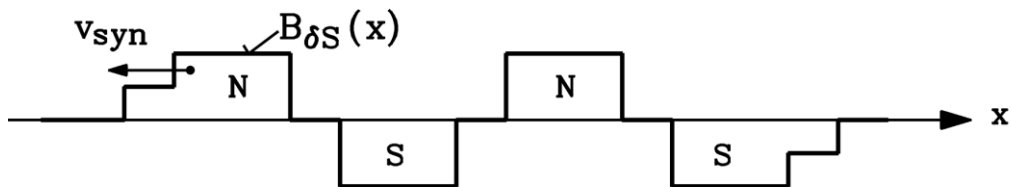
$$2p=4$$



$$t=0:$$

$$i_U=0$$

$$i_V=-i_W=\frac{\sqrt{3}}{2}\hat{I}$$



$$t=T/6:$$

$$i_V=0$$

$$i_U=-i_W=\frac{\sqrt{3}}{2}\hat{I}$$

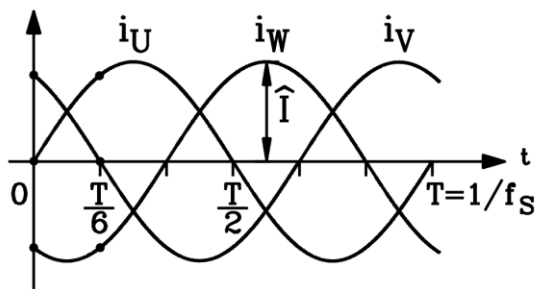
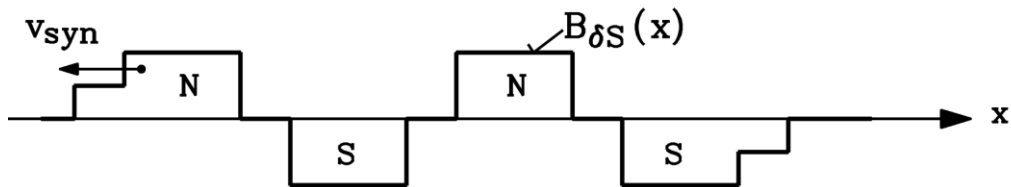


Abb. 3: Entstehen eines Wanderfelds bei Direkteinspeisung (dreisträngige Wanderfeldwicklung  $m = 3$ , ungesehnt mit  $q = 1$  Spulen je Pol und Strang).

In der Anordnung Abb. 4 steht das Sekundärteil still, das Primärteil bewegt sich.

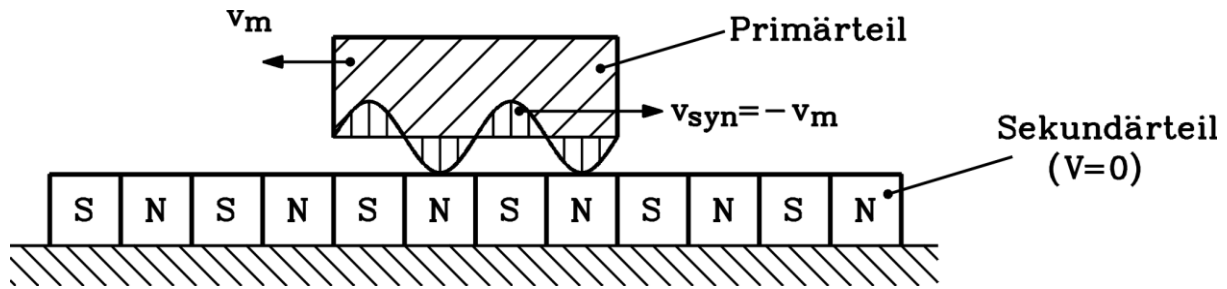


Abb. 4: Bewegungsablauf eines Synchronlinearmotors

Das Wanderfeld des Primärteils wandert synchron mit dem Permanentmagnetfeld (Sekundärteil) und steht daher räumlich still ( $v = 0$ ). Relativ zum Primärteil wandert das Wanderfeld mit  $v_{syn}$  nach rechts in Abb. 4 und daher das Primärteil mit  $v_m = -v_{syn}$  nach links. Kontrolle:  $v = v_m + v_{syn} = v_m - v_m = 0$ . Im Stillstand ist die Frequenz  $f_s = 0$ . Es wird in die Wicklungen Gleichstrom eingepreßt z.B.  $i_u = 0, i_v = -i_w = I_s \cdot \sqrt{3}/2$  als Gleichstrom.

### 3 Schubkraft, Verluste und Wirkungsgrad, Einsatzgebiete

Jeder stromdurchflossene Leiter der Wanderfeldwicklung erfährt im Feld der Permanentmagnete eine Lorentz-Kraft  $F_L$

$$F_L = i_{q, \text{Leiter}} \cdot B_\delta \cdot l_{Fe} \quad (2)$$

Dabei ist die „Eisenlänge“  $l_{Fe}$  die Tiefe des Primärteils. Da nur Querstrom eingepreßt wird, sind im Bereich der N-Pole der Läufermagnete alle Ströme in den Wanderfeldwicklungen z.B. stets in positiver Polarität, im Bereich der S- Pole in negativer Polarität (Abb. 5).

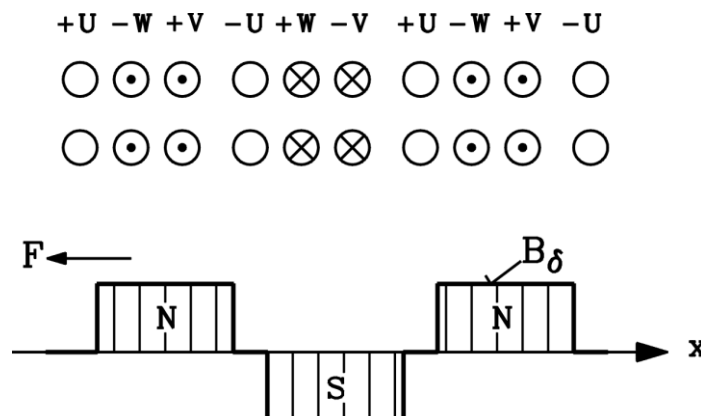


Abb. 5: Durch Querstromeinprägung  $I_s = I_q, I_d = 0$  haben unter den jeweiligen Permanentmagnet - Polen die Ströme in der Ständerwicklung stets einheitliche Polarität. (hier:  $t = 0: i_u = 0, i_v = -i_w = I \cdot \sqrt{3}/2$ )

Dadurch ergibt sich die maximale Schubkraft  $F$  als Summe über alle Leiterkräfte  $F_i$ . Die Geschwindigkeit des Primärteils ist im Vergleich zu rotierenden Maschinen eher gering. Sie beträgt bei dem hier verwendeten Motor nur maximal etwa  $2,5 \text{ m/s} = 9 \text{ km/h}$ .

Rotierender Motor	Linearmotor
$n = 3000 \text{ min}^{-1}, d_r = 120 \text{ mm}$	
$v_u = d \cdot \pi \cdot n = 18,8 \text{ m/s}$	$v = 2,5 \text{ m/s}$
$2p = 6; f_s = 150 \text{ Hz}$	$f_s = 16 \text{ Hz}$
$\tau_p = d_r \cdot \pi / 2p = 62,8 \text{ mm}$	$\tau_p = 62,8 \text{ mm}$ (entspricht <b>nicht</b> dem hier verwendeten Motor!)

Tab. 1: Vergleich von rotierendem Motor und linearem Motor

Die Schubkräfte  $F$  bezogen auf die Luftspaltoberfläche  $O_{\text{mot}}$  bei einseitiger Ausführung (**ein** Primär- und **ein** Sekundärteil, **ein** Luftspalt, vgl. hierzu Abb. 6 und Abb. 7) können je nach zulässiger Stromdichte in den Leitern der Wanderfeldwicklung  $5\text{-}8 \text{ N/cm}^2 = F/O_{\text{mot}}$  betragen.

### Beispiel 3-1: Schubkraft eines Linearmotors

Für einen Linearmotor mit der Polzahl  $2p = 6$ , der Polteilung  $\tau_p = 62,8 \text{ mm}$  und einer Eisenlänge  $l_{\text{Fe}} = 100 \text{ mm}$  ergibt sich eine Motoroberfläche

$$O_{\text{mot}} = 2p \cdot \tau_p \cdot l_{\text{Fe}} = 6 \cdot 62,8 \cdot 100 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 = 376,8 \text{ cm}^2$$

Mit der max. möglichen bezogenen Schubkraft  $F/O_{\text{mot}} = 8 \text{ N/cm}^2$  ergibt sich eine maximale Schubkraft

$$F = (F/O_{\text{mot}}) \cdot O_{\text{mot}} = 8 \text{ N/cm}^2 \cdot 376,8 \text{ cm}^2 = 3014 \text{ N}$$

Damit diese hohe Schubkraft möglich ist, wird das Primärteil i.a. indirekt wassergekühlt, um die Stromwärmeverluste abzuführen. Es ergeben sich auf Grund der Schubkraft relativ hohe Beschleunigungen  $a$ , wenn nur die Masse des Primärteils ohne Kabelschlepp und Zusatzmasse betrachtet wird.

### Beispiel 3-2: Beschleunigung eines Linearmotors

Die Masse des Primärteils (bei  $h = 5 \text{ cm}$  Höhe) für die Daten aus Beispiel 3-1 wird mit der Annahme von  $\rho = \rho_{\text{Fe}} = 7850 \text{ kg/m}^3$

$$m_s = 2p \cdot \tau_p \cdot l_{\text{Fe}} \cdot h \cdot \rho = 6 \cdot 62,8 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 10^{-9} \cdot 7850 \text{ kg} = 14,8 \text{ kg}$$

Die resultierende Beschleunigung des Linearmotors wird dann

$$a = \frac{F}{m_s} = \frac{3014 \text{ N}}{14,8 \text{ kg}} = 204 \text{ m/s}^2 = 20,8g$$

**Fazit:**

---

Daher werden Linearmotoren als hochdynamische Positionierantriebe z.B. in Werkzeugmaschinen eingesetzt („Linear-Servomotor“)

Vorteile von Linear-Servomotoren:

- Direktantrieb, daher Wegfall der mechanischen Lose, wie sie bei Getrieben auftreten würde
- Wegfall elastischer mechanischer Komponenten  $\Rightarrow$  geringere Anzahl System-Eigenfrequenzen, höhere Regelverstärkung möglich.
- Durch größere Regelverstärkung höhere Dynamik möglich.
- Geringerer mechanischer Verschleiß.
- Höhere Systemsteifigkeit.

### Beispiel 3-3: Wirkungsgrad eines Linearmotors

Im Weiteren soll der Wirkungsgrad eines Linearmotors abgeschätzt werden. Wir verwenden die Daten aus den vorherigen Beispielen:

$$F = 3014 \text{ N}; O_{\text{mot}} = 376,8 \text{ cm}^2; v_m = 2 \text{ m/s}$$

Die Stromwärmeverluste in der Wicklung wurden durch Messungen zu  $P_{\text{Cu,s}} = 880 \text{ W}$  bestimmt. Für die Berechnung können die Reibungs- und Ummagnetisierungsverluste wegen der geringen Geschwindigkeit  $v$  und der niedrigen Frequenz  $f_s$  vernachlässigt werden.

Die abgegebene mechanische Leistung des Linearmotors ist

$$P_{\text{m,out}} = F \cdot v_m = 3014 \text{ N} \cdot 2 \text{ m/s} = 6028 \text{ W}$$

Der Wirkungsgrad berechnet sich dann zu

$$\eta = \frac{P_{\text{m,out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{m,out}}}{P_{\text{m,out}} + P_{\text{Cu,s}}} = \frac{6028}{6028 + 880} = 87,3 \%$$

## 4 Kraftdichten im Linearmotor

Bei  $q > 1$  und gesehten Wicklungen ist durch die daraus resultierenden Wicklungsfaktoren  $k_w \leq 1$  eine gewisse Abschwächung der Schubkraft  $F$  gegeben. Da  $B_\delta$  als Scheitelwert der Luftspaltgrundwelle des Permanentmagnet-Felds verstanden wird, ist auf den Effektivwert umzurechnen.

$$F = k_w \cdot z \cdot I_{\text{q,Leiter}} \cdot \frac{B_\delta}{\sqrt{2}} \cdot l_{\text{Fe}} = k_w \cdot \frac{z \cdot I_{\text{q,Leiter}}}{2p \cdot \tau_p} \cdot \frac{B_\delta}{\sqrt{2}} \cdot (l_{\text{Fe}} \cdot 2p \cdot \tau_p) \quad (3)$$

Mit dem Strombelag

$$A = \frac{z \cdot I_{\text{q,Leiter}}}{2p \cdot \tau_p} \quad (4)$$



und der Motor – Luftspaltfläche (einseitig)

$$O_{\text{mot}} = 2p \cdot \tau_p \cdot l_{\text{Fe}} \quad (5)$$

folgt die Schubkraft des Linearmotors:

$$F = \frac{k_w}{\sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot O_{\text{mot}} \quad (6)$$

#### Beispiel 4-1: Schubkraft- und Schubkraftdichte eines Linearmotors

Technische Daten:

Wassermantelkühlung:	$A = 1000 \text{ A/cm}$ (Effektivwert)
Luftspaltflussdichte:	$B_\delta = 0,7 \text{ T}$ (Amplitude)
Wicklungsfaktor:	$k_w = 1$ ( $q = 1$ , ungeseht)
Motor - Luftspaltfläche:	$O_{\text{mot}} = 376,8 \text{ cm}^2$

Die Schubkraft  $F$  und die Schubkraftdichte berechnet sich mit (6) zu

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 376,8 \text{ N} = 1865 \text{ N} \quad (\text{Dauerschubkraft})$$

$$\Rightarrow \frac{F}{O_{\text{mot}}} = \frac{1865 \text{ N}}{376,8 \text{ cm}^2} = 5 \text{ N/cm}^2 \quad (\text{Dauerschubkraftdichte})$$

Für den Kurzzeitbetrieb (1s Beschleunigung) ist ein ca. 1,8-facher Strom zulässig:

$$F_{\text{max}} = 1,8 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 376,8 \text{ N} = 3357 \text{ N} \quad (\text{Kurzzeit-Schubkraft})$$

$$\Rightarrow \frac{F_{\text{max}}}{O_{\text{mot}}} = 1,8 \cdot \frac{1865 \text{ N}}{376,8 \text{ cm}^2} = 9 \text{ N/cm}^2 \quad (\text{Beschleunigungskraftdichte})$$

Als wesentlicher Unterschied zu rotierenden elektrischen Maschinen ist zu beachten, dass der magnetische Zug zwischen Primär- und Sekundärteil (bzw. zwischen Stator und Rotor), der durch die anziehende Kraftwirkung der magnetischen Feldlinien bewirkt wird, nicht verschwindet und somit die Linearführung **stark** belastet (Abb. 6).

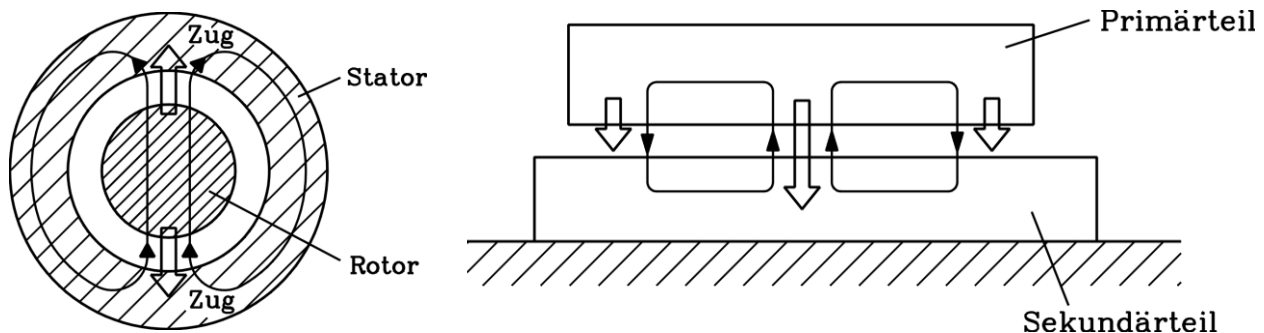


Abb. 6: Der magnetische Zug bei rotierenden und linearen Motoren

Der resultierende magnetische Zug verschwindet im Idealfall bei rotierenden elektrischen Maschinen. Bei Linearmotoren jedoch addieren sich alle Pole zu einer großen resultierenden Kraft.

**Beispiel 4-2: Magnetischer Zug des Linearmotors**

$$\text{Normalkraft pro Flächenelement: } \sigma = \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \tag{7}$$

$$\text{Sinusgrundwelle: } B_{\delta}(x) = B_{\delta} \cdot \sin \frac{x\pi}{\tau_p} \tag{8}$$

$$\text{Normalkraft: } F_N = l_{Fe} \int_0^{2p\tau_p} \sigma dx = l_{Fe} \cdot \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \int_0^{2p\tau_p} \sin^2 \frac{x\pi}{\tau_p} dx = l_{Fe} \cdot \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \cdot p \cdot \tau_p = O_{mot} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \tag{9}$$

Für den Linearmotor aus dem vorigen Beispiel ergibt sich mit  $O_{mot} = 376,8 \text{ cm}^2$ ,  $B_{\delta} = 0,7 \text{ T}$  über (9) eine Normalkraftdichte:

$$\frac{F_N}{O_{mot}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,7^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \text{ N/cm}^2 = 9,75 \text{ N/cm}^2$$

und daraus eine Normalkraft

$$F_N = 9,75 \text{ N/cm}^2 \cdot 376,8 \text{ cm}^2 = 3680 \text{ N} \quad (!!!)$$

**Fazit:**

Die wegen der Permanentmagnete dauernd auftretende Magnetzug-Kraftdichte, die auch bei stromloser Wicklung auftritt, ist zumindest doppelt so groß wie die tangential wirkende Schubkraftdichte! Abhilfe bringt die beidseitige Anordnung mit zwei Luftspalten, wo sich die Normalzugkräfte aufheben (Abb. 7).

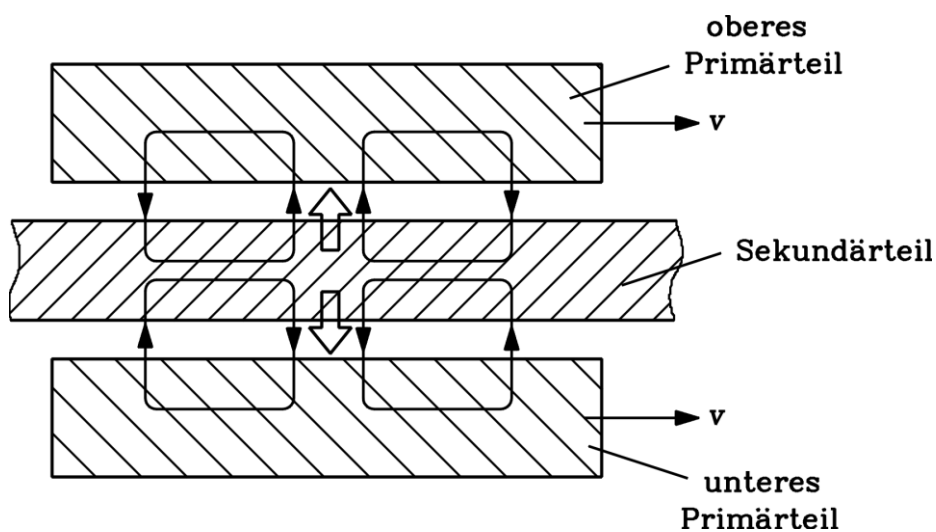


Abb. 7: Bei doppelseitig wirkenden Linearmotoren ist die resultierende Magnetzugkraft Null.

## 5 Motorkennlinien und Kenngrößen

Die Motorkennlinien von Linearmotoren sind wie bei rotierenden Permanentmagnet Synchronmaschinen aus dem Zeigerdiagramm von Strom und Spannung abzuleiten. In das bewegte Primärteil induziert das ruhende Permanentmagnet-Sekundärteil die Polradspannung ( $N_s$ : Strangwindungszahl)

$$\underline{U}_p = j\omega \cdot \underline{\Psi}_p \quad \text{mit} \quad \underline{\Psi}_p = k_w \cdot N_s \cdot \frac{2}{\pi} \tau_p \cdot l_{Fe} \cdot B_\delta \quad (10)$$

Wegen der  $L_q$ -Einprägung sind Strom und Polradspannung in Phase. Das Feld des Primärteiles induziert in die Wanderwicklung die Selbstinduktionsspannung  $j\omega_s L_q I_{sq}$ , wobei  $L_q$  die Synchroninduktivität der Querachse ist. Mit dem Spannungsfall am Ständerwiderstand  $R_s$  ergibt sich die erforderliche, vom Umrichter einzuprägende Spannung  $\underline{U}_s$  (Abb. 8).

$$\underline{U}_s = R_s \cdot \underline{I}_{sq} + j\omega_s \cdot L_q \cdot \underline{I}_{sq} + \underline{U}_p \quad (11)$$

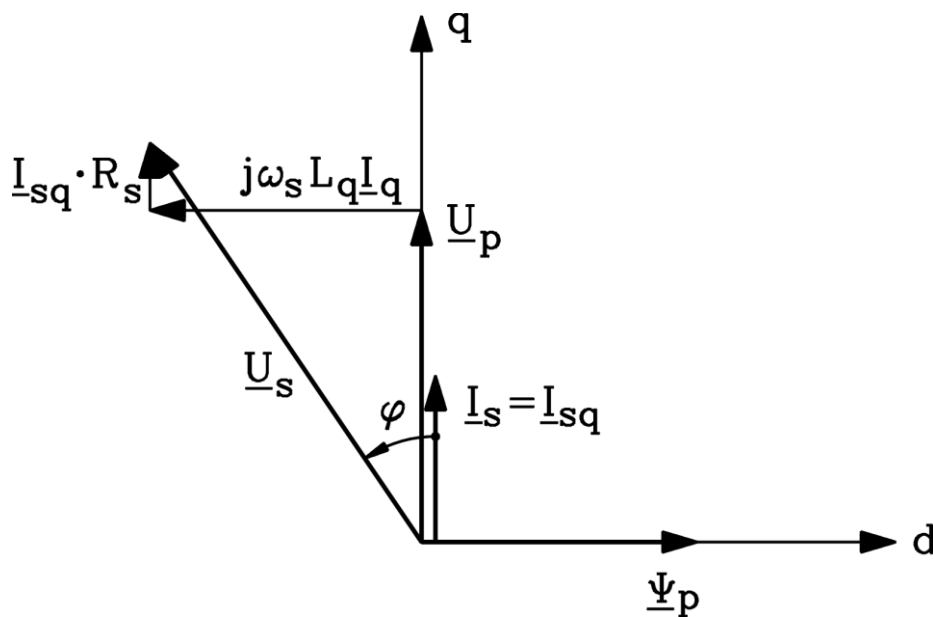


Abb. 8: Feldorientierter Betrieb  $I_s = I_{sq}$  in der Darstellung als Zeigerdiagramm je Strang.

Mit steigender Geschwindigkeit  $v_m$  und damit steigendem  $\omega_s$  nehmen  $\underline{U}_p$  und  $\omega_s \cdot L_q$  linear mit  $\omega_s$  zu. Es kann  $R_s \cdot I_s$  vernachlässigt werden. Wegen (12) muss auch  $\underline{U}_s$  mit  $\omega_s$  zunehmen. Nach Erreichen der Umrichtermaximalspannung  $U_{s,max}$  muß  $I_s$  verringert werden („Spannungsgrenze“).

$$\underline{U}_s = \underline{U}_{s,max} = j\omega_s \cdot L_q \cdot \underline{I}_{sq} + j\omega_s \cdot \underline{\Psi}_p \quad (12)$$

mit

$$I_{sq} = \frac{\sqrt{U_{s,max}^2 - (\omega_s \cdot \Psi_p)^2}}{\omega_s \cdot L_q} \quad (13)$$

Bei

$$\omega_{s, \max} = \frac{U_{s, \max}}{\psi_p} \quad (14)$$

wird  $I_{sq} = 0$ . Die maximale („Leerlauf-“) Geschwindigkeit  $v_{\max}$  des Linearmotors ist erreicht („Spannungsgrenze“). Da wegen der Permanentmagnete  $B_\delta$  konstant ist, ist die Schubkraft  $F$  linear vom Strom  $I_s$  abhängig, solange das Eisen nicht sättigt (Abb. 9).

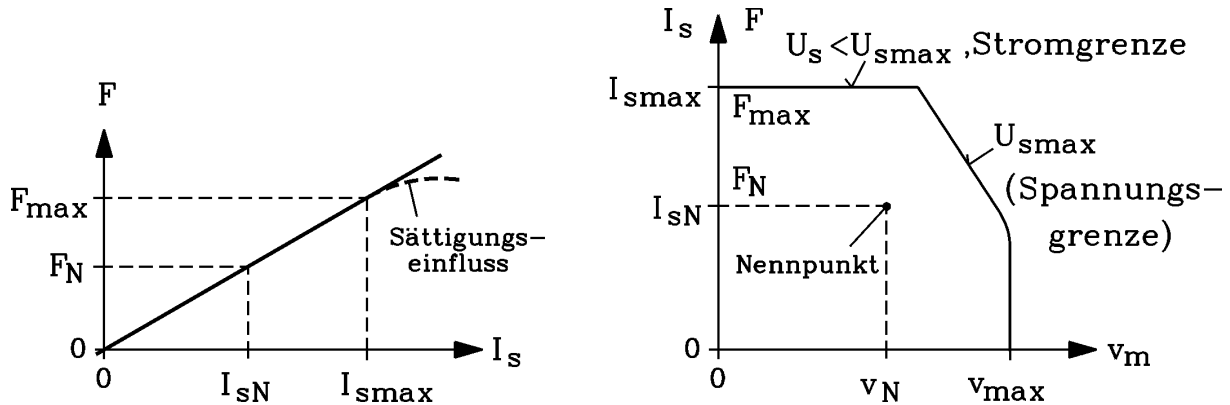


Abb. 9: Kennlinien des Linearmotors a) Strom-Kraft-Kennlinie b) Strom-Geschwindigkeits-Kennlinie und Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie

Der Nennpunkt ( $F_N, v_N$ ) kann dauernd gefahren werden (Abb. 9b), Werte mit **höherer** Geschwindigkeit oder **höherem** Strom nur kurzzeitig. In diesem Bereich wird der Linearmotor als „Beschleunigungsantrieb“ zum schnellen Positionieren verwendet. Ein dreifach kaskadierter Regelkreis, der aus dem Linearmaßstab Position und Geschwindigkeit (über eine Zeitmessung) als Istgrößen zusätzlich zum gemessenen Strom  $I_s$  ermittelt, erlaubt innerhalb der Auflösungs- und Regelgenauigkeit eine Positionierung des Primärteils (Abb. 10).

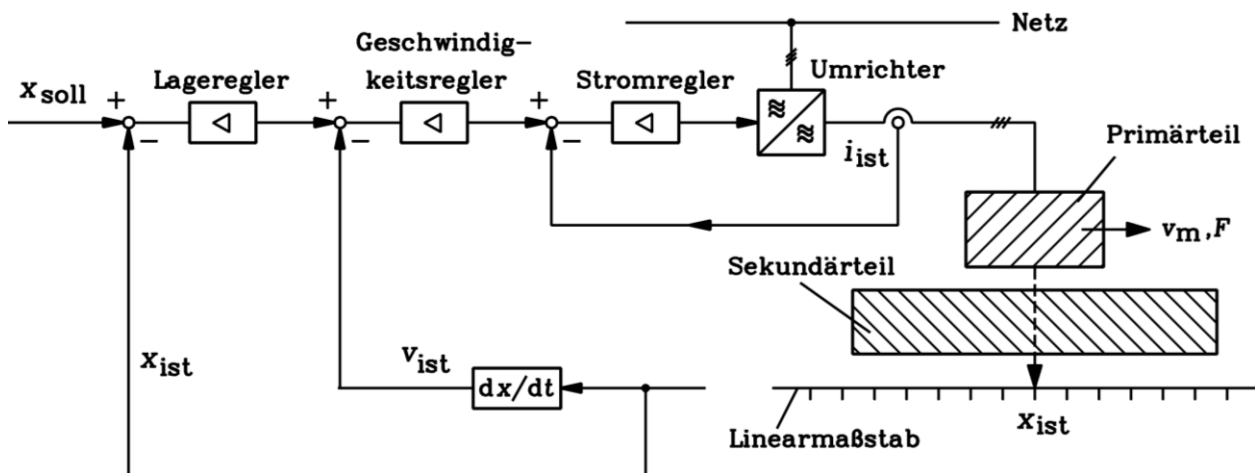


Abb. 10: Kaskadierter Regelkreis, langsamerer Positionsregler ist dem schnelleren Geschwindigkeits- und dem noch schnelleren Stromregler überlagert.

Um ruckartige Bewegungen beim Positionieren zu vermeiden, ist eine „Ruckbegrenzung“ möglich, bei der die Änderung des Strom  $I_s$  und damit der Kraft  $F$  nicht sprungartig (=unendlich schnell) erfolgt. Dies vermeidet insbesondere bei mechanisch schwingungsfähigen Systemen (hier nicht zutreffend) die Anregung von Eigenfrequenzen. Außerdem wird damit der Dynamik des Stromregelkreises nachgekommen, da ein unendlich schnelles Stellen der Zustandsgröße  $I_s$  prinzipiell nicht möglich ist.

Bei dem hier eingesetzten Linearantrieb kann eine linear zu- oder abnehmende Beschleunigung vorgegeben werden, d.h. der Ruck ist dann auf einen konstanten maximalen Wert begrenzt (Abb. 11).

Der Ruck  $r$  ist die zeitliche Ableitung der Beschleunigung  $a$ :

$$r = \frac{da}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}, \quad v = \frac{dx}{dt} \quad (15)$$

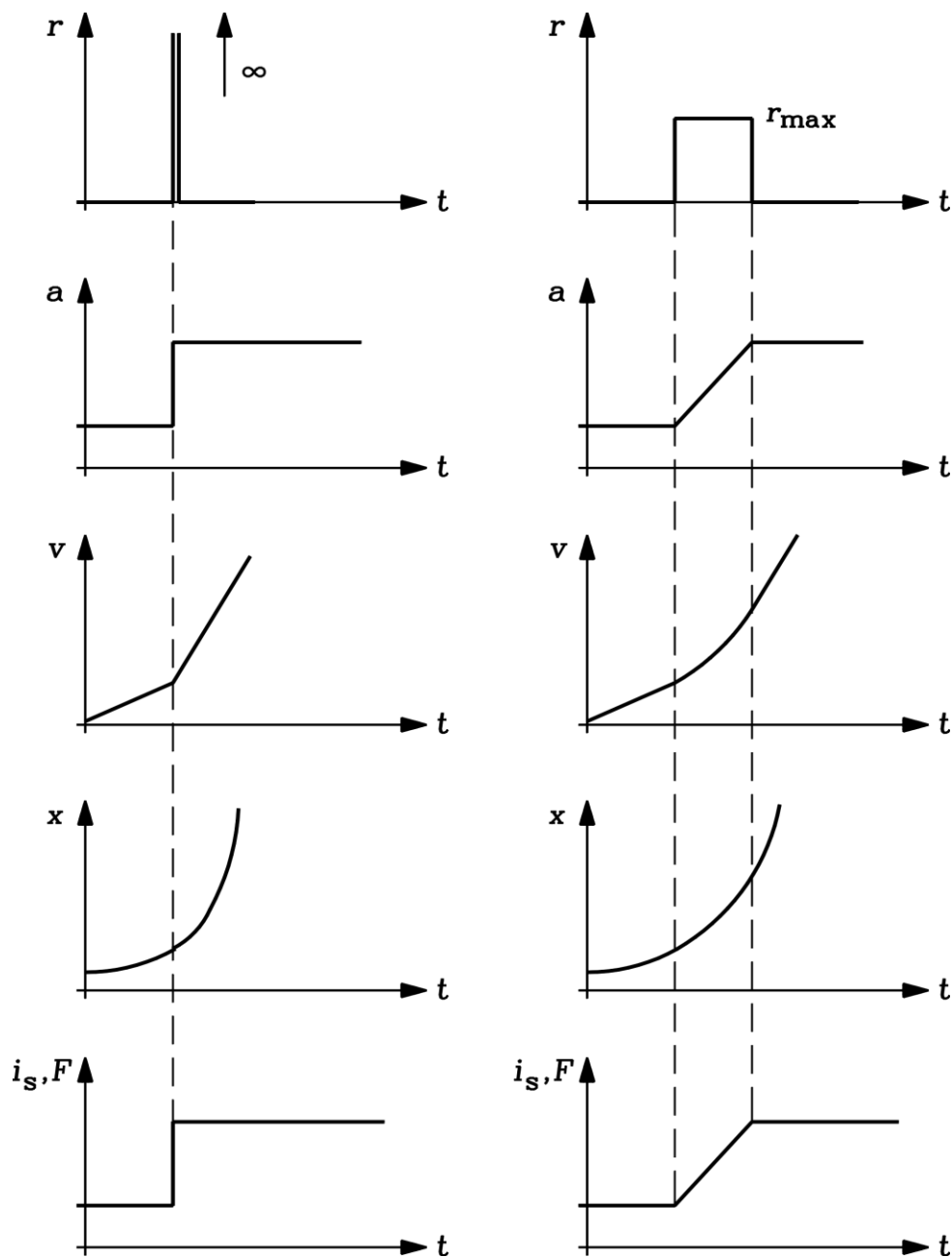


Abb. 11: a) Betrieb ohne Ruckbegrenzung b) Betrieb mit Ruckbegrenzung

---

### Beispiel 5-2: Ruckbegrenzung

Das Anfahren des Linearmotors aus dem Stillstand soll mit maximaler Beschleunigung (ca.  $200 \text{ m/s}^2$ , vgl. Beispiel 3-2) erfolgen. Diese Beschleunigung soll nach  $t = 2 \text{ ms}$  erreicht werden, wobei eine lineare Zunahme (konstanter Ruck) erfolgt.

Ruckbegrenzung auf

$$r = \frac{\Delta a}{\Delta t} = \frac{200 \text{ m/s}^2}{2 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 1 \cdot 10^5 \text{ m/s}^3$$

# Teil B: Versuchsdurchführung

## 6 Motordaten

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Daten
Primärteiltyp Standardkapselung			LSP080L-RU2-BN
Maximalkraft	$F_{\max}$	N	3500
Dauernennkraft	$F_d$	N	1750
Maximalstrom <sup>2)</sup>	$i_{\max}$	A	55
Dauernennstrom <sup>1, 2)</sup>	$i_{dN}$	A	20,8
Maximalgeschwindigkeit mit $F_{\max}$ <sup>2)</sup>	$v_{F\max}$	m/s	2,1
Nenngeschwindigkeit <sup>2)</sup>	$v_N$	m/s	4
Anziehungskraft <sup>3)</sup>	$F_N$	N	10200
Masse Primärteil	$m_p$	kg	17
Masse Sekundärteil	$m_s$	kg/m	14,6
Nennluftspalt	$\delta$	mm	1,4
Zwischenkreisspannung	$U_d$	V	540
Länge Primärteil	$l_p$	mm	545
Breite Primärteil	$b_p$	mm	150
Länge Sekundärteil		mm	2700
Magnetbreite Sekundärteil		mm	80

<sup>1)</sup> Bei Flüssigkeitskühlung (Kühlmittel Wasser, Vorlauftemperatur 30 °C), Wicklungstemperatur 135 °C, Nennluftspalt und Motorstillstand  
<sup>2)</sup> Angaben in Scheitelwerten  
<sup>3)</sup> Zwischen Primär- und Sekundärteil bei Nennluftspalt, Primärteil unbestromt

Tab. 2: Daten des im Praktikumsversuch verwendeten Linearmotors

## 7 Flussdichtemessung

Benötigte Geräte:

- Hallsonde
- Messverstärker
- Multimeter zur Anzeige der Hallspannung
- Metallmaßband

### 7.1 Vorbereitung

Rufen Sie sich die Funktionsweise einer Hallsonde (Hall-Effekt) in Erinnerung und beschreiben Sie diese in einigen Stichpunkten. Nennen Sie einen alternativen Effekt, über den magnetische Felder gemessen werden können.

### 7.2 Versuchsdurchführung

Bestimmen Sie die Flussdichte  $B_s$  der Permanentmagnetanordnung im Luftspalt zwischen Motor und Sekundärteil (Abb. 12) in Abhängigkeit der Position  $x$  in Längsrichtung des Motors. Nehmen

---

Sie hierzu 50 Messpunkte auf einer Länge von 100 mm auf. Die Lage  $\Delta x$  der Sonde (relativ zu Ihrem ersten Messpunkt) ist mit dem Metallmaßband zu bestimmen, welche auf dem Sekundärteil zu befestigen ist (Achtung: Starke Anziehung durch die PM).

Für diese Messung darf der Antrieb noch nicht eingeschaltet sein!

Zur Aufnahme des ersten Messpunktes schieben Sie die Hallsonde bis zum Anschlag in den Luftspalt zwischen Linearmotor Primär- und Sekundärteil. Achten Sie darauf, dass sich die Hallsonde bezüglich der Querachse des Tisches in der Mitte der Anordnung befindet und dass die Sonde parallel zur Kante des Sekundärteils ausgerichtet ist.

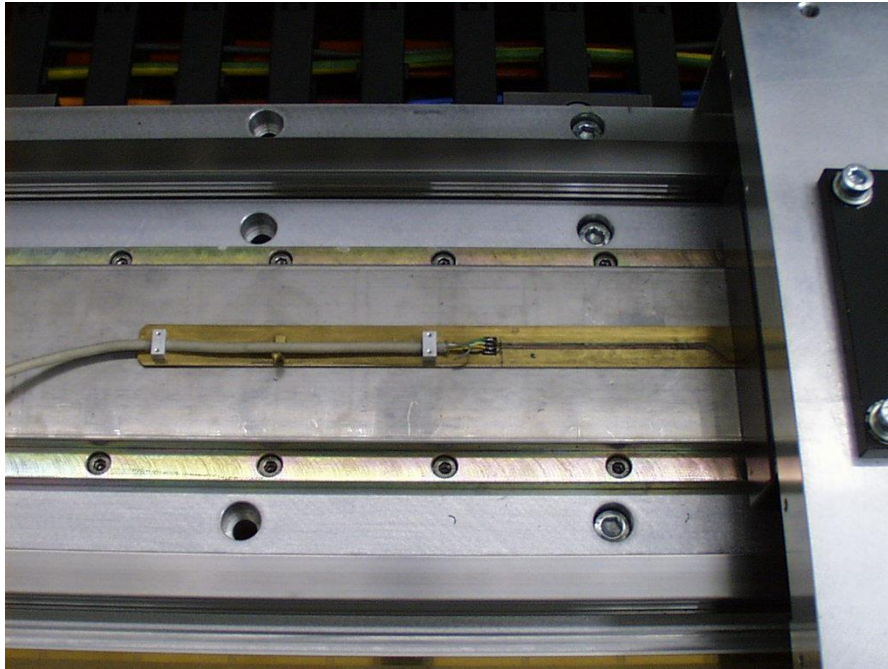


Abb. 12: Messung der Luftspaltflussdichte mit Hallsonde.

Die gemessene Ausgangsspannung  $U_H$  des Messverstärkers tragen Sie in Abhängigkeit der Messposition  $\Delta x$  in eine Tabelle ein. Die Ausgangsspannung  $U_H$  des Messverstärkers ist der Flussdichte direkt proportional zzgl. eines geringen Offsets. (siehe Tab. 3)

Nach der Versuchsdurchführung entfernen Sie alle Teile aus dem Fahrweg des Schlittens und achten darauf, dass keine Teile über den Schlitten hinausragen.

Flussdichte $B$	Hallspannung $U_H$
16 mT	0 mV
875 mT	100 mV

Tab. 3: Flussdichte in Abhängigkeit der Hallspannung

---

### 7.3 Ausarbeitung

---

Fügen Sie Ihre Erklärung aus der Versuchsvorbereitung 7.1 der Ausarbeitung hinzu. (0,5 Punkte)

Fügen Sie Ihrer Tabelle mit den gemessenen Werten der Hallspannung die Berechnung der Luftspaltflussdichte bei. Geben Sie ebenfalls die Berechnungsgleichung an. (1 Punkt)

---



Zeichnen Sie ein Diagramm  $B_s(\Delta x)$  und bestimmen Sie aus Ihrem Diagramm die Polteilung der Maschine. Das Diagramm ist von Hand zu zeichnen. (0,75 Punkte)

Berechnen Sie die Speisefrequenz für eine Verfahrgeschwindigkeit von  $v = 1$  m/s. (0,25 Punkte)

## 8 Aufbau und Inbetriebnahme des Antriebs

### 8.1 Aufbau des Versuchstands

Abb. 13 zeigt den Versuchstand auf der Bedienungsseite. Sie finden hier die Schalter und Sicherungseinrichtungen für die Leistungsvorsorgung, Bedien- und Anzeigeelemente zur Steuerung sowie einen PC zur Parametrierung des Antriebsreglers. In Abschnitt 8.4 wird im Rahmen der Inbetriebnahme näher auf die einzelnen Elemente eingegangen.

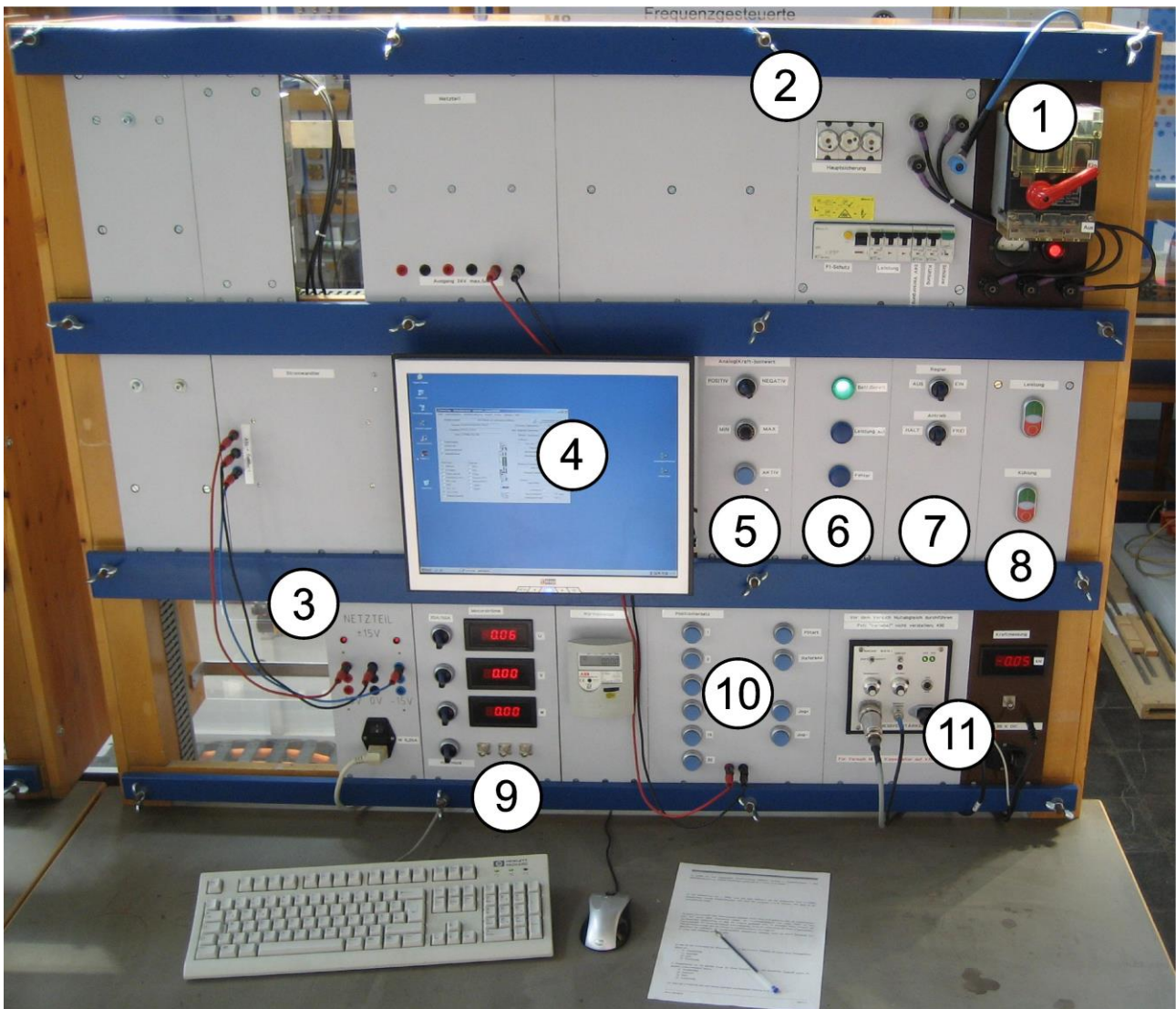


Abb. 13: Aufbau und Bedienelemente des Versuchstands

In Abb. 14 ist ein vereinfachtes Schaltbild des Versuchstands aufgezeichnet. Die Steuerlogik stellt insbesondere sicher, dass die Leistung für den Antriebsregler nur bei dessen Betriebsbereitschaft sowie eingeschalteter Kühlung erfolgen kann.

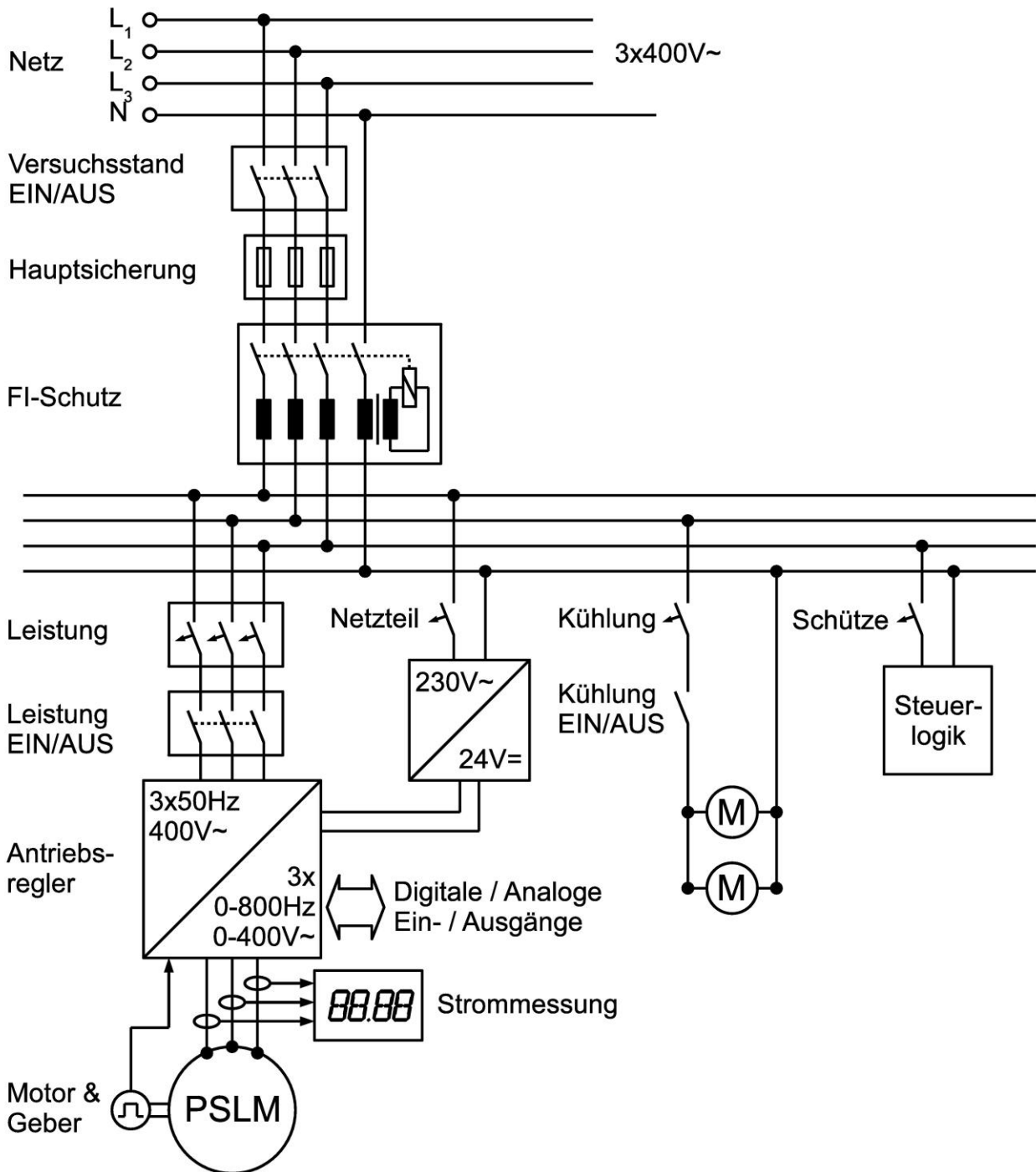


Abb. 14: Vereinfachtes Schaltbild des Versuchsstands

## 8.2 Motor und Lagegeber

In Abb. 15 sehen Sie eine Darstellung des Linearmotors. Der auf dem Fundament (1) verschraubte Motor befindet sich in einem Gehäuse mit Plexiglasabdeckung (4), die sich bei Bedarf (z.B. zum Umbau für Versuch 9.2) öffnen lässt. Öffnen Sie die Abdeckung nur nach Rücksprache mit dem Betreuer! Bei geöffneter Abdeckung muss stets ein Versuchsteilnehmer die Abdeckung festhalten, damit diese nicht versehentlich zufallen kann. Die Abdeckung ist mit Sicherheitsschaltern (4a)

ausgerüstet, die den Antrieb bei geöffneter Abdeckung sperren. Bitte achten Sie beim Schließen darauf, dass die Schalterelemente richtig ineinander greifen und nicht beschädigt werden.

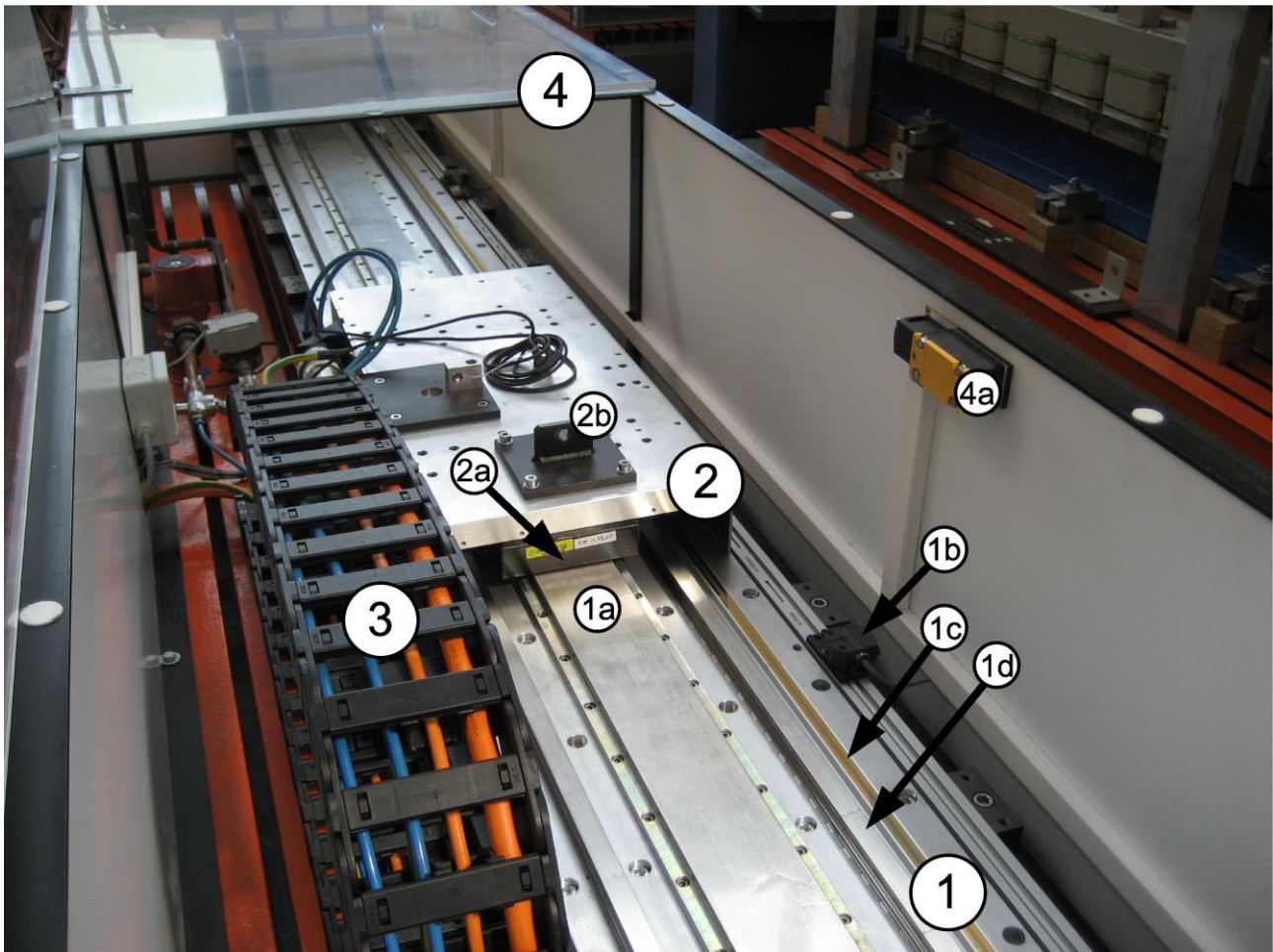


Abb. 15: Fundament mit Motor und Lagegeber

Neben den abgedeckten Permanentmagneten des Sekundärteils (1a) und den Linearführungen (1d) erkennen Sie auch das lineare Wegmesssystem (1c), den sog. Geber. Bei dem verwendeten Gebersystem Heidenhain LIDA 105C handelt es sich um einen Inkrementalgeber. Inkrementalgeber bedeutet, dass die Positionsinformation durch Zählen der einzelnen Inkremente (Messschritte) gewonnen wird. Hierdurch lässt sich allerdings nur eine relative, keine absolute Position ermitteln. Es lässt sich z.B. bestimmen, dass der Motor um  $\Delta x = 6.237\text{mm}$  verfahren ist, die Position  $x$  bleibt dadurch unbekannt. Zur Ermittlung der absoluten Position sind im Abstand einiger cm weitere Referenzmarken angebracht, die allerdings erst überfahren werden müssen. Wie Sie eine „Referenzfahrt“ ausführen, ist in Abschnitt 8.4 beschrieben.

Für weitere Informationen zu linearen Gebern und dem verwendeten LIDA 105C können Sie unter <http://www.ew.e-technik.tu-darmstadt.de/cms/fileadmin/pdf/Praktikum/M6/<DATEINAME>> folgende Dokumente laden:

Dokument	Dateiname
Produktbroschüre	Heidenhain_Laengenmess.pdf
Montageanleitung	Heidenhain_LIDA.pdf

Der Schlitten (2) mit dem Primärteil (2a) und einer Befestigungsmöglichkeit (2b) für die Kraftmessdose ist mit dem Fundament über eine elastische Schleppkette (3) verbunden. Hierin verlaufen die Leitungen für die Stromversorgung des Motors, die Gebersignale sowie die Wasserkühlung.

### 8.3 Antriebsregler

Als Antriebsregler (Leistungselektronik wie bei einem Frequenzumrichter, jedoch mit umfangreichen regelungstechnischen Funktionen) kommt ein ECODRIVE DKC01.3-100-7 (Endstufe 100A, 200...480V Eingangsspannung) von Rexroth Indramat zum Einsatz. Die Geräteserie ist in Abb. 16 dargestellt.



Abb. 16: Antriebsregler-Serie Rexroth Indramat ECODRIVE (4.v.l.: DKC01.3-100-7)

Der Antriebsregler verfügt über eine Vielzahl von digitalen und analogen Ein- und Ausgängen, über die bestimmte Funktionen angewählt und Statusinformationen ausgegeben werden können. Außerdem steht eine Parametrierungsschnittstelle zum PC (siehe Abschnitt 8.4) zur Verfügung. Ein Teil dieser Ein- und Ausgänge sind mit den Bedienelementen am Versuchsstand verbunden.

Falls Sie sich näher mit dem Antriebsregler beschäftigen möchten, können Sie unter der Webseite <http://www.ew.e-technik.tu-darmstadt.de/cms/fileadmin/pdf/Praktikum/M6/<DATEINAME>> alle Unterlagen als pdf herunterladen:

Dokument	Dateiname
Produktbroschüre	ECO3_brochure.pdf
Projektierungshandbuch	ECO3_project.pdf
Funktionsbeschreibung	ECO3_funktion.pdf
Parameterbeschreibung	ECO3_parameter.pdf

## 8.4 Inbetriebnahmeschritte

Die Inbetriebnahme des Antriebs geschieht über einen PC mit der Bediensoftware *DriveTop*. Die Kommunikation erfolgt über eine serielle EIA-232 Schnittstelle, wie sie auch heute noch in den meisten PCs verfügbar ist. Zur Inbetriebnahme betrachten Sie bitte nochmals Abb. 13.

Sofern noch nicht geschehen, schalten Sie den PC (4) ein. Für das Login *student* wird kein Passwort benötigt.

Prüfen Sie, ob alle Leitungsschutzschalter („Sicherungsautomaten“ sowie die Schmelzsicherungen) und der Fehlerstromschutzschalter eingeschaltet / in Ordnung sind (2). Schalten Sie dann an dem großen Leistungsschalter (1) den Versuchsstand ein.

Über das 24V-Netzteil erfolgt nun die Versorgung aller Geräte mit Steuerspannung. Insbesondere sollten das Lüftergeräusch des Antriebreglers nun hörbar sein.

Stellen Sie außerdem sicher, dass das 15V-Netzteil (3), welches zur Versorgung der LEM-Stromwandler dient, auf der Frontseite des Versuchsstands eingeschaltet ist. Ansonsten funktioniert die Strommessung nicht korrekt.

Der Antrieb kann in diesem Zustand nicht bestromt werden, da die Endstufe noch spannungsfrei ist. Schalten Sie die Kühlung und Leistungszuschaltung (400V) später nur nach Freigabe durch den Betreuer ein! Öffnen Sie nicht die Motorabdeckung und führen Sie insbesondere keine Umbauten bei zugeschalteter Leistung durch!

Starten Sie nun die Software *DriveTop* (Verknüpfung auf dem Desktop).

Die Software beginnt, nach Antrieben zu suchen. Sobald der Antrieb (nur einer vorhanden) gefunden ist, kann *OK* beendet werden.

Es erscheint ein Dialog, ob die Menüstruktur angepasst werden soll. Hier kann *Nein* gewählt werden.

Nun sollte auf der Statusanzeige (6) die Lampe *Betriebsbereit* leuchten. Falls nicht, wurde vermutlich ein Endschalter überfahren. Öffnen Sie die Abdeckung (Leistung aus?!) und schieben Sie den Schlitten (Primärteil) vom Endschalter weg Richtung Fahrbahnmitte. Generell sollte der Schlitten sich vor dem erstmaligen Einschalten der Leistung mindestens 10cm von den Endschaltern entfernt befinden, um bei der Referenzfahrt diese nicht auszulösen. Nun können Sie im Menü *Extras* den Fehler löschen.

Die Software sollte nun den Zustand *Bereit zur Leistungszuschaltung* (Abb. 17, links) für den Antrieb zeigen. Für eine detaillierte Anzeige wählen Sie im Menü *Ansicht* den Punkt *Antriebsstatus* (Abb. 17, rechts).

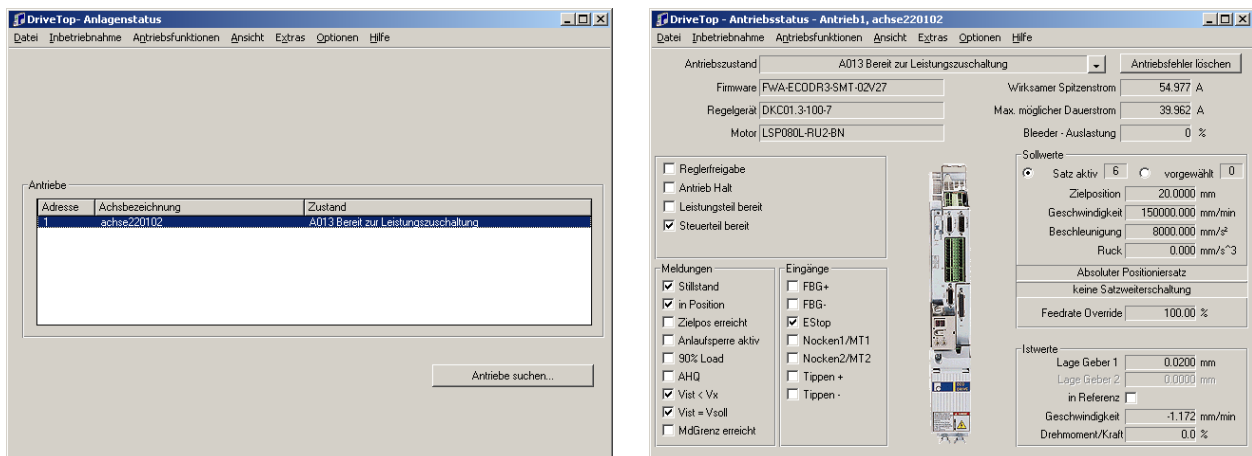


Abb. 17: Statusfenster der Bediensoftware DriveTop. Anlagenstatus (links), Antriebsstatus (rechts)

Es werden nun die Voreinstellungen für den ersten Versuch (Stillstandsmessung) aufgezeigt. Zunächst muss die Betriebsart gewählt werden. Dazu ist der Antrieb in den Parametriermodus zu schalten (Menü *Extras – Parametriermodus*). Der Antriebszustand wechselt nun nach *Kommunikationsphase 2*.

Wählen Sie im Menü *Antriebsfunktion – Betriebsartenauswahl* als Hauptbetriebsart die *Momentenregelung* (die Nebenbetriebsarten sind irrelevant).

Da die Vorgabe der Kraft (Kraftsollwert) über das *Poti* an der Analog-Sollwertvorgabe (5) erfolgen soll, welches mit Analogeingang 1 verbunden ist, ist nun das Verhalten der Analogeingänge festzulegen. Wählen Sie im Menü *Antriebsfunktion – Analogeingänge* (Abb. 18).

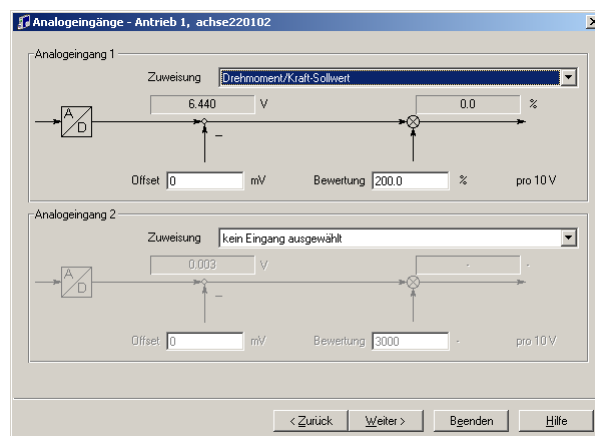


Abb. 18: Analogeingänge

Als Zuweisung wählen Sie *Drehmoment/Kraft-Sollwert* für den Analogeingang 1. Offset 0mV, Bewertung 200%. Dies bedeutet, dass wenn am Eingang eine Spannung von 10V (Endanschlag) anliegt, der Motor die 2-fache Nennkraft erzeugt. Sie können die Funktion des Analogeingangs testen, indem Sie an dem *Poti* drehen und dabei gleichzeitig die Taste *Aktiv* gedrückt halten, durch die die Potispannung aufgeschaltet wird. In dem Menü erscheint (nach kurzer Verzögerung) die aktuelle Eingangsspannung. Über die Wahl der Bewegungsrichtung können Sie positive und negative Spannung anlegen.

Haben Sie die Einstellung abgeschlossen, schalten Sie im Menü *Extras* in den Betriebsmodus. Der Antriebszustand ist nun wieder *Bereit zur Leistungszuschaltung*.

Im Folgenden wird der Antrieb eingeschaltet. Stellen Sie zunächst sicher, dass die Schalter *Regler* und *Antrieb* (7) auf *AUS* bzw. *HALT* stehen. Schalten Sie nun die Kühlpumpe über den Taster *Kühlung* ein. Schalten Sie außerdem die Versorgung der Endstufe (Schalter *Leistung*) ein (Rücksprache mit Betreuer!). Der Antriebszustand wechselt nach *Steuer- und Leistungsteil betriebsbereit*. Die Lampe *Leistung ein* leuchtet auf.

Stellen Sie das *Sollwertpoti* auf den linken Anschlag (Wert 0). Damit ist sichergestellt, dass kein Kraftsollwert vorgegeben wird. Beachten Sie, dass ein Kraftsollwert bei nicht eingespanntem Schlitten zur Beschleunigung gemäß  $a = dv/dt = F/m$  führt und der Motor unkontrolliert mit hoher Geschwindigkeit (je nach Beschleunigungsstrecke) gegen den Endanschlag fahren kann.

Schalten Sie nun den *Regler EIN*. Sie sehen, dass der Motor sich einige cm nach links und/oder rechts bewegt. Da der Antrieb nur um einen Inkrementalgeber (Abschnitt 0) verfügt, weiß der Antriebsregler nach dem Einschalten weder, wo sich der Schlitten aktuell befindet, noch wo die d-

---

/q-Achse des Motors liegt. Letztere Information wird aber zur Querstromregelung benötigt (Abschnitt 5). Der Antriebsregler versucht nun, die Lage der d-/q-Achse zu bestimmen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „Kommutierungsfindung“. Beachten Sie, dass es sich hierbei nicht um eine Referenzfahrt handelt! Der Antriebsregler hat nach wie vor keine Information über die Position des Schlittens. Sie erkennen dies daran, dass im Fenster *Antriebsstatus* unter *Istwerte – Lage Geber 1* ein Wert angezeigt wird, der mit dem absoluten Koordinatensystem auf dem Fahrweg nicht übereinstimmt, außerdem ist *Geber 1* nicht *in Referenz*.

Für Kraftregelung, Drehzahlregelung und relative Positionierungen (z.B. „verfahre 5cm nach rechts von aktueller Position“) ist der Antrieb nun jedoch betriebsbereit. Der Antriebszustand ist nach *Antrieb HALT* gewechselt.

Der Vollständigkeit halber wird nun noch das Ausführen einer Referenzfahrt aufgezeigt. Dies wird später für die absolute Positionierung (Abschnitt 10) benötigt.

Schalten Sie hierzu *Antrieb* auf *FREI*. Die Referenzfahrt kann auf zwei Arten durchgeführt werden. Entweder Sie wählen im Menü *Extras – Antriebskommandos* das Kommando *Antriebsgeführtes Referenzieren*, oder Sie betätigen den Taster *Referenzfahrt* auf dem Bedienfeld für die Digitaleingänge (10). Der Taster muss für einige Sekunden gedrückt gehalten werden, bis der Vorgang abgeschlossen ist.

Schalten Sie die Schalter *Regler* und *Antrieb* wieder auf *AUS* bzw. *HALT*. Schalten Sie nun die *Leistung* und die *Kühlung* aus. Der Antrieb ist jetzt auch für absolute Positionierungen betriebsbereit. Sie sehen, dass *Geber 1* nun *in Referenz* ist. Vergleichen Sie erneut die *Lage Geber 1* mit dem Koordinatensystem des Fahrwegs.

Solange der Regler im Betriebsmodus ist und die Steuerspannung nicht ausgeschaltet wird, „vergisst“ der Regler die absolute Position nicht mehr. Sie können (bei ausgeschalteter Leistung!) auch versuchen, den Schlitten von Hand zu verschieben und werden sehen, dass die Position nach wie vor richtig angezeigt wird.

---

## 8.5 Ausarbeitung

---

Warum bewegt sich der Motor beim erstmaligen Einschalten einige cm nach links und rechts? Könnte Versuch 9.2 nun direkt (ohne vorige Referenzfahrt) durchgeführt werden? Versuch 10.2.5 und 10.2.6 ebenfalls? Wann und warum ist eine Referenzfahrt auszuführen? (1 Punkt)

## 9 Stillstandsmessung im Synchronbetrieb

Im Stillstand soll die vom Linearmotor aufgebrachte Kraft in Abhängigkeit des Effektivwerts des Primärstroms  $I_s$  bestimmt werden. Der Motor muss dazu fest eingespannt und die Kraft mit einer Kraftmessdose gemessen werden.

Benötigte Geräte:

- Haltevorrichtung für Kraftmessdose (Gewindestange M12, Muttern, Unterlegscheiben)
- Kraftmessdose mit Messverstärker und Anzeigeelement
- Dreiphasige Strommessung (LEM-Wandler und Anzeigeelemente)

---

## 9.1 Vorbereitung

---

Die Gewindestange zum Einspannen des Motors wird je nach Kraftrichtung des Motors auf Zug oder Druck belastet. Welcher Fall ist kritischer? Berechnen Sie a) die maximale Zugkraft b) die maximale Druckkraft.

Daten der Gewindestange:

Elastizitätsmodul  $E \approx 200\text{kN/mm}^2$ , Zugfestigkeit (Streckgrenze, Festigkeitsklasse 4.6)  $R_e = 240\text{N/mm}^2$ , Durchmesser ohne Gewinde  $d \approx 10\text{mm}$  (kreisförmig anzunehmen), Länge  $l = 500\text{mm}$ .

Hinweis zu b): Eulersche Knicklast; gehen Sie sicherheitshalber von einem beidseitig gelenkig gelagerten Balken aus, da zumindest die Schraubverbindungen am Schlitten vermutlich nur ein extrem geringes Biegemoment aufbringen kann. Wenn Sie Ihre Unterlagen aus dem Fach „Technische Mechanik“ nicht verfügbar haben, finden Sie alle notwendigen Gleichungen auch bei „Wikipedia“.

---

## 9.2 Versuchsdurchführung

---

### 9.2.1 Aufbau

Der Antriebsregler muss in Betrieb genommen worden sein, bevor mit dem Aufbau der Haltevorrichtung begonnen wird. Die Steuerspannung bleibt ständig eingeschaltet. Es muss jedoch unbedingt darauf geachtet werden, dass die Leistungsversorgung beim Einbau der Haltevorrichtung ausgeschaltet ist.

Zum Aufbau betrachten Sie bitte Abb. 19.

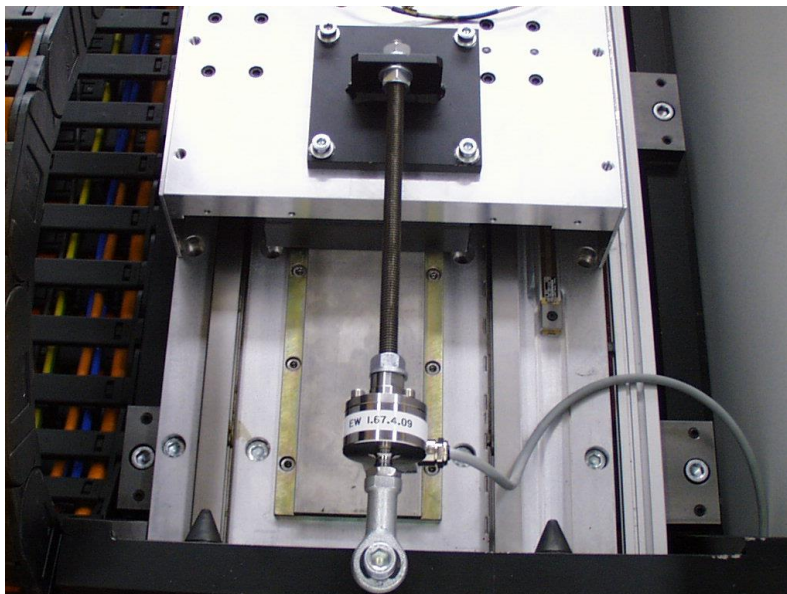


Abb. 19: Haltevorrichtung mit Kraftmessdose

Die Gewindestange wird auf der einen Seite in die Kraftmessdose eingeschraubt (Sicherung gegen Verdrehen durch Gegenmutter), welche wiederum am Fundament befestigt ist. Auf der anderen



---

Seite ist die Gewindestange mit zwei Muttern auf der entsprechenden Halterung am Schlitten des Motors zu befestigen. Drehen Sie die Muttern von Hand gut fest!

Bitte beachten Sie erneut, dass alle eisenhaltigen Teile von den PM mit großer Kraft angezogen werden! Halten Sie nur ein Teil zur Zeit in den Händen.

### 9.2.2 Messablauf

Lassen Sie Ihren Aufbau nochmals durch den Betreuer überprüfen. Schalten Sie *Leistung* und *Kühlung* ein, stellen Sie *Regler* und *Antrieb* auf *EIN* bzw. *FREI*. Wählen Sie mit dem *Sollwertpoti* nacheinander mindesten zehn verschiedene Kraftwerte aus (Achtung: Der Maximalwert wird bereits ca. bei Stellung 8 erreicht) und schalten Sie diese mit *Aktiv* auf den Antrieb. Lesen Sie jeweils die Kraft und die drei Phasenströme von den entsprechenden Messgeräten ab. Die Messgeräte für die Ströme haben jeweils zwei Messbereiche (20A/50A), die getrennt voneinander umgeschaltet werden können. Im Bereich 50A ist der angezeigte Wert mit 2,5 zu multiplizieren. Außerdem können Sie die Strommesswerte mittels *Hold* „einfrieren“. Dadurch können Sie die Werte nach der Messung – die Sie bei großen Strömen bitte zügig durchführen – in Ruhe ablesen und notieren.

---

## 9.3 Ausarbeitung

Fügen Sie Ihre Berechnungen aus der Versuchsvorbereitung 9.1 der Ausarbeitung hinzu. (1 Punkt)

Berechnen Sie für jeden Messpunkt die Summe aller drei Phasenströme  $I_{\Sigma}$  sowie den Stromeffektivwert  $I_{\xi}$  (Herleitung der Berechnungsgleichung ggf. mit Skizze ist aufzuzeigen) und geben Sie beide Werte zusammen mit Ihren Messwerten an. (1 Punkte)

Zeichnen Sie ein Diagramm  $F(I_{\xi})$ . Das Diagramm ist von Hand anzufertigen. (0,5 Punkte)

## 10 Positionierbetrieb

In diesem Abschnitt werden Sie verschiedene Positioniervorgänge durchführen und aufzeichnen. Der Antriebsregler bietet dem Anwender dazu die Möglichkeit, sogenannte Positioniersätze unter Angabe von Zielposition, Verfahrensgeschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck zu parametrieren, die dann über digitale Eingänge ausgewählt und gestartet werden können.

Benötigte Geräte:

- Digitaloszilloskop-Funktion des Antriebsreglers. Sollten Sie mit der prinzipiellen Funktionsweise digitaler Speicheroszilloskope (Abtastrate, Triggerbedingungen) nicht vertraut sein, bereiten Sie sich bitte im Voraus des Versuchs intensiv darauf vor!

---

### 10.1 Vorbereitung

Sie möchten mit einem digitalen Speicheroszilloskop (Speichertiefe 1024 Messwerte) zwei Signale gleichzeitig für eine Dauer von  $T=3s$  messen. Wie hoch ist die Abtastzeit  $T_s$  zu wählen, wenn diese ein ganzzahliges Vielfaches der Abtastgrundfrequenz  $T_{s0} = 0,5ms$  betragen muss.

Stellen Sie die Zahlen 10 und 22 als Dualcode (6 bits) dar.

Der Linearmotor soll von Position  $x_0 = 0$  zeitoptimal auf Position  $x_1 = 1500\text{mm}$  verfahren. Dabei beträgt die maximale Geschwindigkeit  $v_{max} = 1\text{m/s}$ , die maximale Beschleunigung (auch zum Bremsen)  $a_{max} = 1\text{m/s}^2$  (keine Ruckbegrenzung). Wie lange dauern Beschleunigungs- und Bremsvorgang? Welche Strecke wird währenddessen zurückgelegt? Wie lange dauert die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit? Welche Strecke wird währenddessen zurückgelegt? Ist es sinnvoll den Verfahrensvorgang mit der eingangs berechneten Abtastfrequenz aufzuzeichnen?

## 10.2 Versuchsdurchführung

### 10.2.1 Wahl der Hauptbetriebsart

Da Sie den Antrieb zuvor in der Betriebsart *Momentenregelung* betrieben haben, ist nun ein Umschalten der Betriebsart notwendig.

Schalten Sie den Antrieb in den Parametriermodus (Menü *Extras – Parametriermodus*). Wählen Sie im Menü *Antriebsfunktion – Betriebsartenauswahl* als Hauptbetriebsart *Positioniersatz-Betrieb Geber 1* (die Nebenbetriebsarten sind wiederum irrelevant). Nach einer Phasenumschaltung muss erneut eine Referenzfahrt erfolgen. Gehen Sie wie in Abschnitt 8.4 beschrieben vor.

### 10.2.2 Eingabe und Ausführung von Positioniersätzen

Wählen Sie im Menü *Antriebsfunktionen – Betriebsarten – Hauptbetriebsart*. Es erscheint das in Abb. 20 dargestellte Fenster.

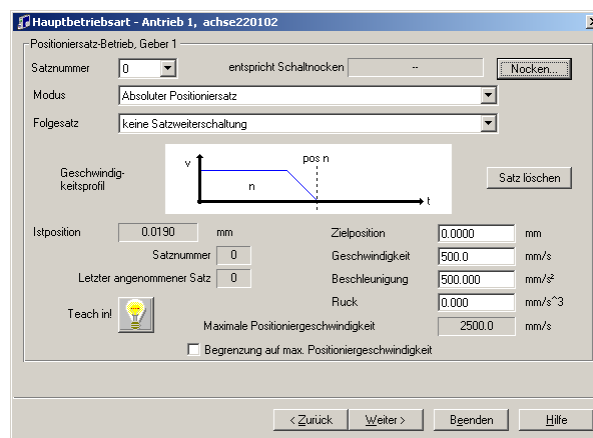


Abb. 20: Fenster zur Parametrierung der Positioniersätze

Sie können nun eine Satznummer (bis zu 64 verschiedene können nachher angewählt werden) bestimmen. Bei *Modus* können Sie zwischen absoluter und relativer Positionierung (und anderen hier nicht betrachteten Modi) wählen. *Folgesatz* gibt an, ob der Antrieb nach Ausführung des Positioniersatzes in den Stillstand übergeht und dort verharret, oder ob der Satz mit der nächsten Satznummer automatisch ausgeführt wird. Ferner können Sie *Zielposition*, (maximale) *Geschwindigkeit*, (maximale) *Beschleunigung* und (maximalen) *Ruck* vorgeben. Bei Wahl von *Ruck* = 0 findet keine Ruckbegrenzung statt. Nach erfolgter Eingabe können Sie zum nächsten Satz wechseln oder das Fenster schließen.

Die Wahl des auszuführenden Positioniersatzes geschieht anschließend als Dualcode über digitale Eingänge (Wertigkeit  $2^0$ - $2^5$ ). Sie können sich den gewählten Satz im Fenster *Antriebsstatus* (Abb. 17, rechts) anzeigen lassen. Mit *PStart* führen Sie den gewählten Satz aus.

### 10.2.3 Bedienung des Digitalen Oszilloskop

Zum Starten des digitalen Oszilloskops wählen Sie im Menü *Extras – Oszilloskop*. Es öffnet sich das Fenster *Oszilloskopfunktion* (Abb. 21, links). Im Menü *Messung – Signalauswahl* können Sie maximal zwei Signale wählen, die Sie zeitgleich aufzeichnen können. Außerdem können Sie Triggerbedingung und -zeitpunkt festlegen (Abb. 21, rechts).

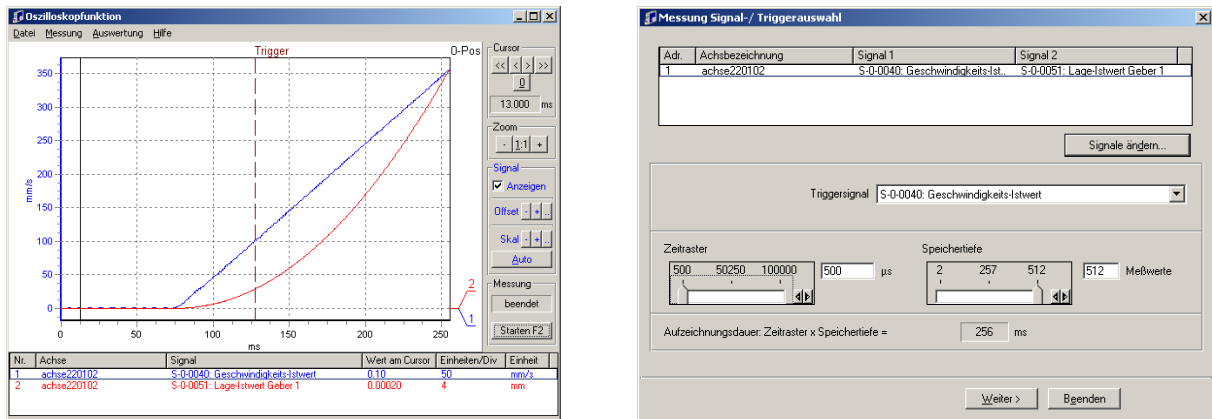


Abb. 21: Digitales Oszilloskop. Hauptfenster mit Signaldarstellung (links) und Signalauswahl (rechts)

Wenn Sie Ihre Messung abgeschlossen haben, können Sie die Daten im Textformat exportieren (Menü *Datei – Messdaten exportieren*). Die resultierende Datei enthält in zwei Spalten Abtastzeitpunkt und Wert von einem Signal. Die Dateien können Sie dann später mit jedem Editor ansehen oder nach Matlab einlesen, um Diagramme für die Ausarbeitung zu erstellen (Abb. 22).

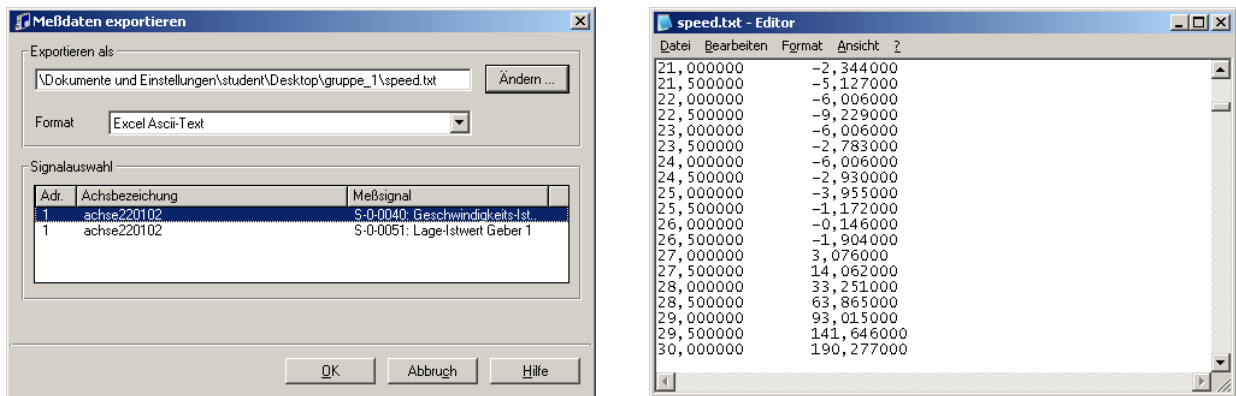


Abb. 22: Digitales Oszilloskop. Exportieren der Messdaten und Anzeige im Editor

### 10.2.4 Fahrt zu Position 0

Parametrieren Sie einen Positioniersatz (vorzugsweise Satz 0), der den Antrieb zur Absolutposition  $x = 0\text{mm}$  mit einer Geschwindigkeit  $v_{max} = 0,5\text{m/s}$ , und einer Beschleunigung  $a_{max} = 0,5\text{m/s}^2$  ohne Ruckbegrenzung verfährt (siehe erneut Abb. 20). Fertigen Sie sich eine stichwortartige Auflistung/Tabelle Ihrer Positioniersätze an, damit Sie später nicht durcheinander kommen (Bsp.: Fahrsatz Nr. 0: Fahrt absolut zu 0).

Führen Sie den Positioniersatz aus (vorher Leistungszuschaltung und Einschalten der Regelung). Beobachten Sie dabei den Motor. Was passiert, wenn Sie den Positioniersatz erneut ausführen (wenn der Motor bereits bei Position  $x = 0\text{mm}$  ist)?

---

### 10.2.5 Relative Verfahrbewegungen

Parametrieren Sie einen weiteren Positioniersatz mit einer Relativbewegung  $\Delta x = +100\text{mm}$ . Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck übernehmen Sie wie in Abschnitt 10.2.4. Führen Sie den Positioniersatz ebenfalls aus. Was passiert nun wenn Sie den Positioniersatz mehrfach hintereinander ausführen (Achtung: Endschalte!)? Versuchen Sie auch, durch Ausführen von Positioniersatz 0 wieder zur Ursprungsposition zurück zu kehren.

### 10.2.6 Absolute Verfahrbewegungen

Da Sie nun im Parametrieren und Ausführen von Positioniersätzen geübt sind, soll nun ein absoluter Positioniervorgang genauer untersucht werden. Schreiben Sie einen Positioniersatz zur Position  $x = 1400\text{mm}$  (10cm von der Endlage entfernt) mit  $v_{max} = 1\text{m/s}$ , und einer Beschleunigung  $a_{max} = 1\text{m/s}^2$ . Positionieren Sie den Antrieb zuvor bei  $x_0 = 100\text{mm}$  (z.B. mittels Ihres Satzes vom vorigen Abschnitt).

Parametrieren Sie nun das digitale Oszilloskop so, dass Lage  $x(t)$  und Geschwindigkeit  $v(t)$  des kompletten Verfahrvorgangs aufgenommen werden (Aufnahmedauer, Trigger). Überlegen Sie sich dazu zunächst, wie lange der Vorgang in etwa dauern wird. Sollten Sie eine zu hohe oder zu niedrige Aufnahmedauer gewählt haben, können Sie natürlich die Aufzeichnung beliebig oft wiederholen. Speichern Sie Ihre aufgenommenen Daten.

Angenommen, Sie interessieren sich, wie der Antrieb im Detail die Endposition erreicht (weil Sie z.B. Überschwingen vermuten). Ist die gemachte Aufzeichnung hierzu geeignet? Falls nein, verbessern Sie die Oszilloskopeinstellung und speichern Sie erneut die Aufzeichnung.

### 10.2.7 Fahrt mit maximaler Dynamik

Legen Sie erneut einen Positioniersatz mit Ziel  $x = 1400\text{mm}$ , nun allerdings mit  $v_{max} = 2,4\text{m/s}$ , und  $a_{max} = 9,9\text{m/s}^2$  an. Die Startposition ist wiederum  $x_0 = 100\text{mm}$ . Nehmen Sie den Verfahrvorgang mit dem Oszilloskop auf.

### 10.2.8 Fahrt mit Ruckbegrenzung

Den Positioniersatz aus Abschnitt 10.2.7 soll nun eine Ruckbegrenzung hinzugefügt werden. Bestimmen Sie  $r_{max}$  so, dass  $a_{max}$  nach ca. 20ms erreicht wird. Nehmen Sie den Verfahrvorgang auf. Entspricht die Veränderung gegenüber Abschnitt 10.2.7 Ihren Erwartungen?

### 10.2.9 Positionierablauf

– Derzeit nicht im Versuch enthalten –

---

## 10.3 Ausarbeitung

---

Fügen Sie Ihre Berechnungen aus der Versuchsvorbereitung 10.1 der Ausarbeitung hinzu. (1 Punkt)

Stellen Sie sämtliche mit der Oszilloskopfunktion aufgenommenen Verfahrvorgänge – jeweils Lage und Geschwindigkeit – dar (diese sollten nicht von Hand, sondern z.B. mit Matlab, notfalls Excel gezeichnet werden). (2 Punkte)

Diskutieren Sie die aufgenommenen Verfahrvorgänge. Stellen Sie insbesondere die Unterschiede dar. (1 Punkt)

---

---

## 11 Literatur

Sollten Sie weitere Fragen zum Thema haben, die durch diese Anleitung nicht beantwortet werden, können Sie zunächst die folgende Literatur zu Rate ziehen oder selbstverständlich auch Ihren Versuchsbetreuer fragen.

- [1] **Binder, Andreas:** Elektrische Maschinen und Antriebe. Skript zur Vorlesung. 2009.
- [2] **Markert, Richard:** Einführung in die Technische Mechanik. Skript zur Vorlesung, 2002.
- [3] **Schröder, Dierk:** Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen. 3. Auflage. Springer 2009.

## 12 Verständnisfragen

- 1) Beschreiben Sie den Aufbau eines permanentmagneterregten Synchron-Kurzstator-Linearmotors! Welche Komponenten sind für das gesamte Antriebssystem erforderlich?
- 2) Ein Synchronlinearmotor Primärteil soll mit 250 m/min bei einer Polteilung von 80 mm bewegt werden. Wie groß ist die erforderliche Frequenz des elektrischen Drehstromsystems?
- 3) Ein Linearmotor entwickelt sowohl eine Schubkraft als auch eine Normal-Anziehungskraft zwischen Primär- und Sekundärteil. Wie groß ist bei einer Motoroberfläche von 500 cm<sup>2</sup> die Normalkraft bei einer Luftspaltflussdichte  $B = 0,8 \text{ T}$ ?
- 4) Wie groß ist die zugehörige Schubkraft bei einem Strombelag von 1000 A/cm und einem Wickelfaktor von 1?
- 5) Skizzieren Sie das Strom- und Spannungszeigerdiagramm bei konstanter Statorfrequenz für Motorbetrieb und feldorientierter Stromeinprägung! Wie hängt die Schubkraft vom Strom ab?
- 6) Skizzieren Sie die Grenzkennlinien der Schubkraft in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Linearmotors für die drei Grenzwerte: Maximale Strangspannung, maximaler Phasenstrom, maximale Geschwindigkeit!
- 7) Skizzieren Sie den kaskadierten Regelkreis eines positionsgeregelten Linearmotors und tragen Sie die notwendigen Soll- und Istwerte ein!
- 8) Die Beschleunigung des beweglichen Linearmotorprimärteil soll sich in der Zeit von 10 ms von 1 m/s<sup>2</sup> auf 5 m/s<sup>2</sup> linear erhöhen. Wie groß ist der auftretende Ruck? Welche Geschwindigkeit wird ausgehend von 12 m/min nach dieser Zeit erreicht?
- 9) Ein Linearmotor hat eine maximale Schubkraft von 3500 N bei 55 A Effektivwert je Strang. Wie groß ist bei maximaler Geschwindigkeit bei 3 m/s die mechanische Leistung? Um wieviel verringert sich die Stromstärke bei feldorientiertem Betrieb, wenn die Schubkraft auf 1500 N verringert wird? Wie groß ist die Beschleunigung der bewegten Masse des Primärteils (20 kg) in beiden Fällen?
- 10) Der Spannungszwischenkreisumrichter, der die Dreiphasen-Wicklung des Primärteils speist, ändert durch Pulsweitenmodulation die gleichgerichtete Netzspannung des Spannungszwischenkreises 560 V in ein Drehspannungssystem mit einer veränderlichen verketteten Spannungsgröße (effektiv) zwischen 0 und 400 V (bei Vernachlässigung des ohm'schen Widerstands der Wicklung). Die zugehörige Frequenz der Spannung variiert zwischen 0 und 800 Hz. Skizzieren Sie die  $U(f)$ -Kennlinie zwischen 0 und 1000 Hz möglichst maßstäblich! Wie nennt man den Betriebsbereich von 800 bis 1000 Hz? Wie groß ist die Geschwindigkeit des bewegten Primärteils bei Maximalfrequenz und einer Polteilung von 65 mm?