

ÜBUNGSAUFGABEN

Regelung elektrischer Antriebe

von

M.Sc. Simon Decker

Inhaltsverzeichnis

1	Drehzahlgeregelte Gleichstrommaschine	1
1.1	Beiblatt	3
2	Stromeinprägung	5
2.1	Beiblatt	6
3	Rotororientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine	10
4	Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine	11
4.1	Beiblatt	12
5	Kompensationsstromwandler	13
6	Resolver	16

1 Drehzahlgeregelte Gleichstrommaschine

Eine mit Nennfluß fremderregte Gleichstrommaschine (GM) wird über einen selbstgeführten Stromrichter (Vierquadrantensteller) aus einem Gleichspannungszwischenkreis gespeist, welcher seine Energie über einen netzseitigen selbstgeführten Stromrichter (Active-Front-End) aus dem Drehstromnetz bezieht. Die GM soll in der Drehzahl geregelt werden, wozu eine quasikontinuierlich ausgelegte Kaskadenregelung mit unterlagertem Stromregelkreis benutzt werden soll. Die Regelung des Umrichters erfolgt mit einem digitalen Signalprozessor (DSP), welcher periodisch alle $t_{TR} = 125\mu s$ neue Sollwerte berechnet und diese an den Vierquadrantensteller ausgibt. Die mittlere Totzeit des Vierquadrantenstellers beträgt $t_{TSG} = \frac{t_{TR}}{2}$.

Die Daten der Maschine sind:

$$\text{Nennspannung} \quad U_{AN} = 250 \text{ V} \quad (1.1)$$

$$\text{Nennstrom} \quad I_{AN} = 50 \text{ A} \quad (1.2)$$

$$\text{Ankerwiderstand} \quad R_A = 750 \text{ m}\Omega \quad (1.3)$$

$$\text{Ankerinduktivität} \quad L_A = 10 \text{ mH} \quad (1.4)$$

$$\text{Trägheitsmoment} \quad J = 0.15 \text{ Ws}^2 \quad (1.5)$$

$$\text{Nennzahl} \quad n_N = 1600 \text{ min}^{-1} \quad (1.6)$$

Entwerfen Sie Strom- und Drehzahlregler für diesen Antrieb.

- Zeichnen sie das Schaltbild des Antriebssystems
- Ermitteln Sie aus den Modellgleichungen der Gleichstrommaschine das Strukturmodell und die Übertragungsfunktion des Ankerstroms $\frac{i_A}{u_A}(s)$. Berechnen Sie die Ankerkreiszeitkonstante T_A und die elektromechanische Zeitkonstante T_M , die sich aus der Übertragungsfunktion ablesen lassen. Ermitteln Sie eine vereinfachte Übertragungsfunktion, in der Sie die induzierte Spannung als Störgröße auffassen, und vergleichen Sie sie mit der zuerst ermittelten Übertragungsfunktion.
- Wählen Sie einen geeigneten Stromregler für die vereinfachte Strecke unter Beachtung der Totzeiten von Umrichter und Signalverarbeitung. Berechnen Sie die Reglerparameter für eine Dämpfung von $d = \frac{1}{\sqrt{2}}$ des geschlossenen Regelkreises. Wie groß ist die Ersatzzeitkonstante für eine Näherung des geschlossenen Regelkreises durch ein PT_1 -Glied?
- Untersuchen Sie die Vernachlässigung der induzierten Spannung auf den Reglerentwurf. Ist der entstandene geschlossene Regelkreis stationär genau?
- Entwerfen sie den Drehzahlregelkreis nach dem symmetrischen Optimum. Wie können sie das Überspringen bei einem Sollwertsprung dämpfen?

- f) Die entworfene Kaskadenregelung soll nun auf dem digitalen Signalprozessor der Anlage implementiert werden. Zeichnen sie die zeitdiskrete Struktur der Regler, welche als PI-Regler in mit getrennter Realisierung von P- und I-Anteil aufgebaut werden sollen.
- g) Zur Verhinderung von Regler-Windup und zur sicheren Inbetriebnahme des Systems sollen geeignete Begrenzungen für das elektrische Moment $M_{i,max}$, dem maximalen Ankerstrom $I_{A,max}$ und der maximalen Ankerspannung $U_{A,max}$ ergänzt werden. Vervollständigen sie dazu das Strukturbild aus dem vorherigen Aufgabenteil.

Literatur

Föllinger, „Regelungstechnik, Einführung in ihre Methoden und ihre Anwendung
Schröder, „Elektrische Antriebe Regelung von Antriebssystemen
Kiencke, Jäkel, „Signale und Systeme

1.1 Beiblatt

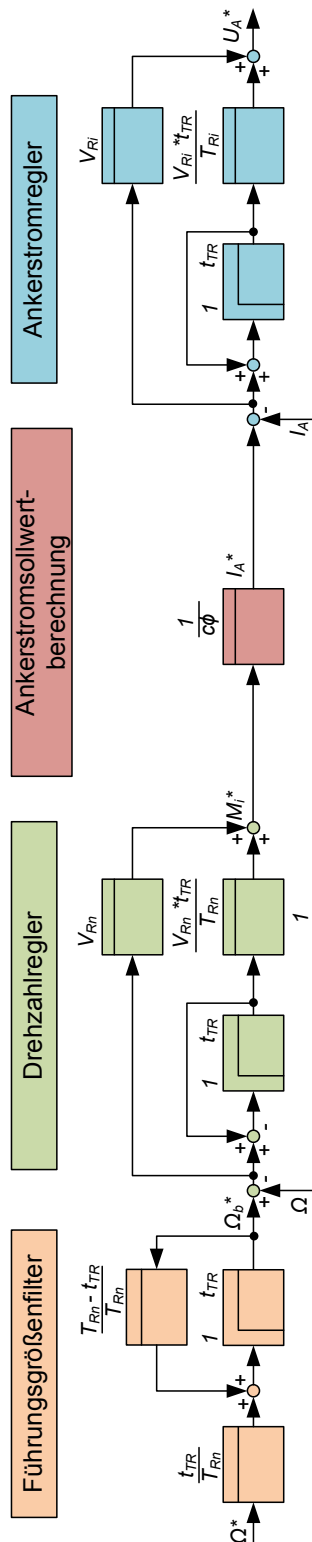


Abbildung 1: Zeitdiskret ausgeführte Kaskadenregelung der Gleichstrommaschine ohne Begrenzungen

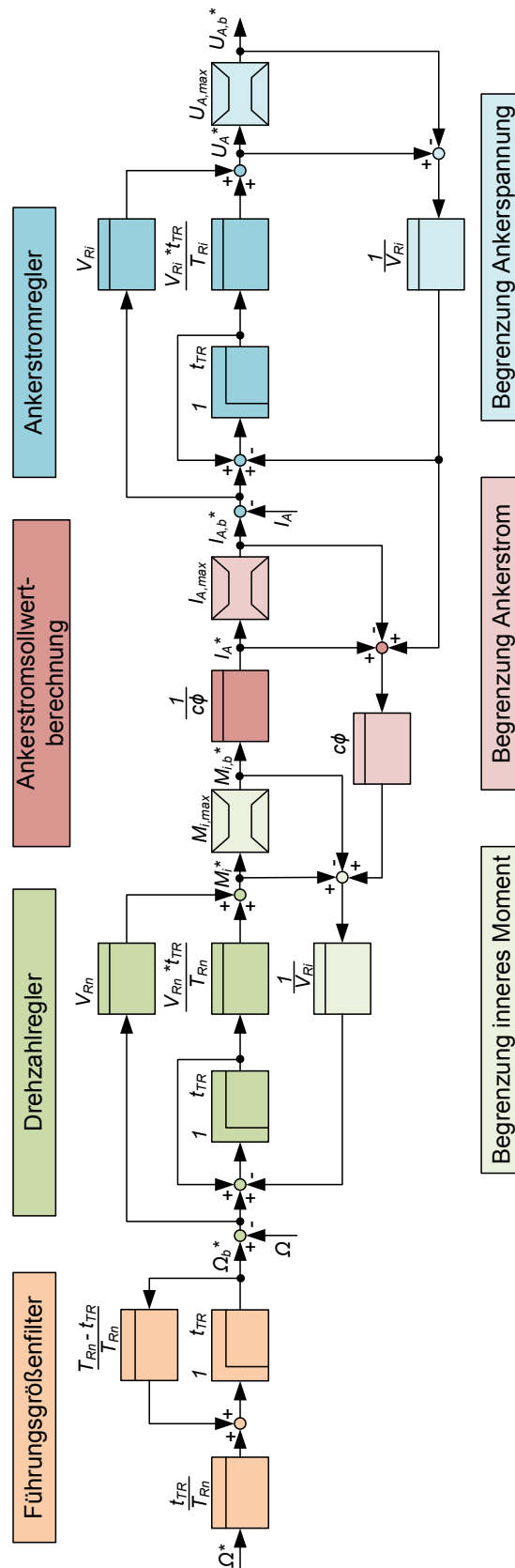


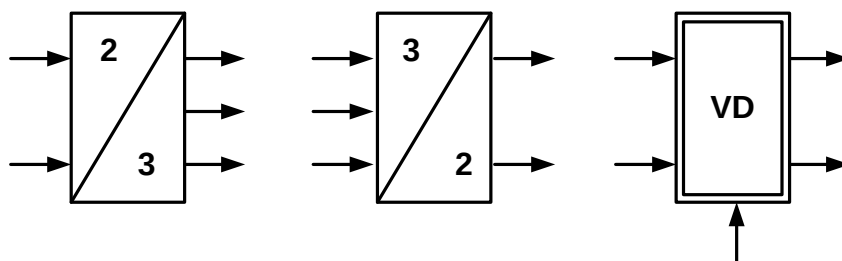
Abbildung 2: Zeitdiskret ausgeführte Kaskadenregelung der Gleichstrommaschine mit Begrenzungen und Rückrechnung der Integralanteile

2 Stromeinprägung

Mit Hilfe einer gesteuerten Spannungsquelle (z. B. einem Spannungswischenkreisumrichter) sollen Ströme in ein dreiphasiges symmetrisches Wicklungssystem (z. B. Maschinenstator) eingeprägt werden. Der Sollwert sei als Raumzeiger gegeben. Verzögerungen durch das Stellglied oder der Istwerterfassung können vernachlässigt werden. Die Kopplung der Wicklungen untereinander kann bei der Beschreibung mit Raumzeigern ebenfalls vernachlässigt werden.

- Entwerfen Sie einen PI-Regler für eine einzelne Wicklung mit $L = 1.9 \text{ mH}$ und $R = 170 \text{ m}\Omega$ in der Art, dass die geregelte Strecke einem Sollwertsprung zehn Mal so schnell folgt, wie die unregelte Strecke einem Stellgrößensprung.
- Erweitern Sie die Anordnung um weitere zwei Wicklungen und verwenden Sie als Sollgröße einen Stromraumzeiger. Reduzieren Sie die Anzahl der Regler auf zwei: Einen für den Real- und einen für den Imaginärteil des Stromraumzeigers.
- Im Wicklungssystem soll jetzt ein Drehfeld erzeugt werden. Bei der Vorgabe eines rotierenden Stromsollraumzeigers weichen Amplitude und Phase der erzeugten Ströme auch nach längerer Zeit vom Sollwert ab. Dieses Problem soll gelöst werden, indem die Regler in einem rotierenden Koordinatensystem arbeiten. Ergänzen Sie dafür die Struktur.
- Der entstandene Regelkreis verhält sich möglicherweise schwerfälliger als erwartet. Korrigieren Sie die Struktur, um mit den gegebenen Reglern schnellstes Verhalten zu erreichen.

Hinweis: Benutzen Sie für die Strukturbilder $2 \rightarrow 3$ -Wandler, $3 \rightarrow 2$ -Wandler und Vektordreher.



2.1 Beiblatt

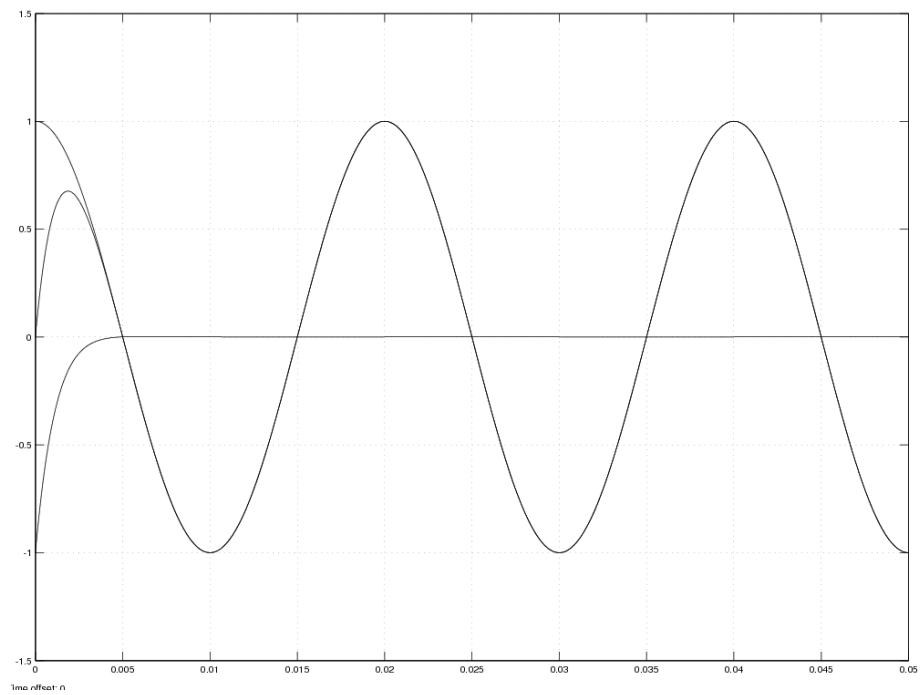
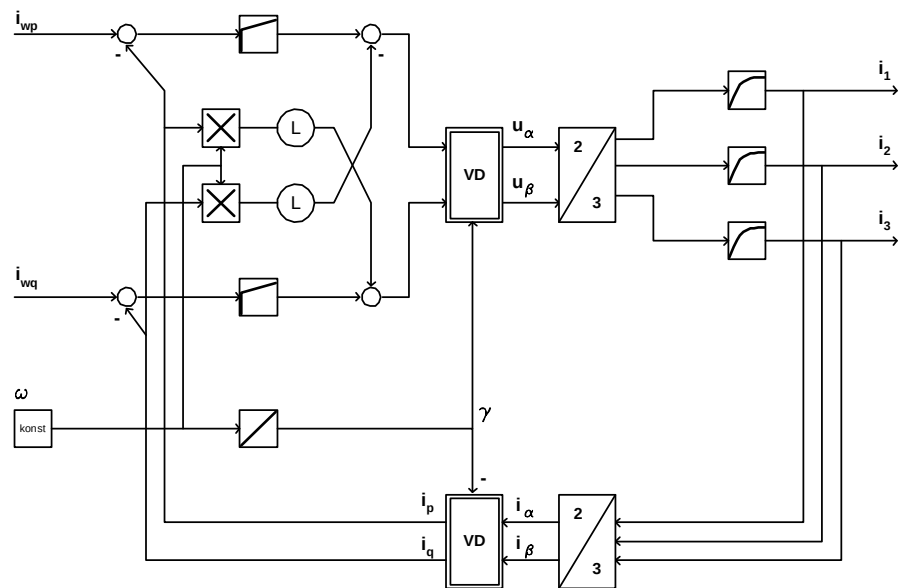
Dargestellt sind folgende auf $\hat{i}$ bezogene zeitliche Verläufe im Strang 1 (Zeitachse in Sekunden):

- Sollwert des Stroms, $i_{w1}(t) = \hat{i} \cos(\omega t)$ mit Startwert 1
- Verlauf des Stromistwerts $i_1(t)$ im jeweiligen Strukturbild mit Startwert 0.
- Verlauf der Abweichung, d. h. der Differenz aus Ist- und Sollwertverlauf $\Delta i_1(t) = i_1(t) - i_{w1}(t)$, beginnend bei -1 .

Bei allen Teilaufgaben gilt $\omega = 2\pi 50 \text{ Hz}$.

zu Teilaufgabe d)

Vorgabe wie in c), PI-Regler und Entkopplung im rotierenden Koordinatensystem.



3 Rotororientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine

Für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit sinusförmiger Stromeinprägung, integriertem Resolver und einem Läufer mit Seltene-Erden-Magneten soll eine feldorientierte Regelung in rotororientierten Koordinaten entworfen werden.

Als Stellglied dient ein selbstgeführter Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis und Bremssteller, der über eine Diodenbrücke aus dem 400V-Drehspannungsnetz gespeist wird. Die Regelung des Umrichters erfolgt mit einem digitalen Signalprozessor (DSP), welcher periodisch alle $t_{TR} = 125\mu s$ neue Sollwerte berechnet und diese an den selbstgeführten Wechselrichter ausgibt. Die mittlere Totzeit des Wechselrichters beträgt in dieser Anwendung $t_{TSG} = \frac{t_{TR}}{2}$.

$$\text{Nenndrehzahl} \quad n_N = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (3.1)$$

$$\text{Nennmoment} \quad M_N = 21 \text{ N m} \quad (3.2)$$

$$\text{Nennspannung} \quad U_N = 330 \text{ V} \quad (3.3)$$

$$\text{Nennstrom} \quad I_{SN} = 13.5 \text{ A} \quad (3.4)$$

$$\text{Induktivität} \quad L_d = 5.94 \text{ mH} \quad (3.5)$$

$$\text{Statorwiderstand (bei } 20^\circ\text{C)} \quad R_S = 235 \text{ m}\Omega \quad (3.6)$$

$$\text{Überlastbarkeit} \quad \ddot{u} = 2 \quad (3.7)$$

$$\text{Polpaarzahl} \quad p = 3 \quad (3.8)$$

$$\text{Trägheitsmoment} \quad J = 3.6 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2 \quad (3.9)$$

- Zeichnen Sie das leistungselektronische Schaltbild des Antriebs.
- Zeichnen Sie das regelungstechnische Blockschaltbild des Antriebs.
- Berechnen Sie die Reglerparameter für die nach dem Betragsoptimum auszulegen- den Stromregler.
- Berechnen Sie die Reglerparameter für den nach dem symmetrischen Optimum auszulegenden Drehzahlregler.
- Berechnen Sie die Spannungs-, Strom- und Statorflußraumzeiger für die Fälle Leer- lauf, Nennbetrieb und maximale Überlastung.

4 Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine

Die Systemgleichungen der Asynchronmaschine sind:

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S - j \dot{\gamma}_S \underline{\Psi}_S + \underline{\dot{\Psi}}_S \quad (4.1)$$

$$0 = R'_R \underline{i}'_R - j \dot{\gamma}_R \underline{\Psi}'_R + \underline{\dot{\Psi}}'_R \quad (4.2)$$

$$\underline{\Psi}_S = (L_h + L_{S\sigma}) \cdot \underline{i}_S + L_h \underline{i}'_R \quad (4.3)$$

$$\underline{\Psi}'_R = L_h \underline{i}_S + (L_h + L'_{R\sigma}) \cdot \underline{i}'_R \quad (4.4)$$

$$M = \frac{3}{2} p L_h \cdot \text{Im} \{ \underline{i}_S \underline{i}'_{R*} \} \quad (4.5)$$

- a) Ermitteln Sie aus den Systemgleichungen die Gleichungen für die feldorientierte Regelung. Reduzieren Sie dazu das Gleichungssystem in dem Sie die Zustandsgrößen $\underline{i}'_R$ und $\underline{\Psi}_S$ eliminieren. Vereinfachen Sie die erhaltenen Gleichungen durch die Wahl des Bezugssystems.
- b) Leiten Sie das Strommodell zur Schätzung des Rotorflussraumzeigers ab. Berechnen Sie die Rotorzeitkonstante aus den Parametern der Asynchronmaschine:

$$R'_R = 0.063 \, \Omega \quad (4.6)$$

$$R_S = 0.063 \, \Omega \quad (4.7)$$

$$L_h = 0.015 \, \text{H} \quad (4.8)$$

$$L_{S\sigma} = 890 \, \mu\text{H} \quad (4.9)$$

$$L'_{R\sigma} = 890 \, \mu\text{H} \quad (4.10)$$

- c) Vergleichen Sie die feldorientierte Regelung mit Strommodell mit der Kennliniensteuerung für eine mit Stromquelle betriebene Asynchronmaschine.

4.1 Beiblatt

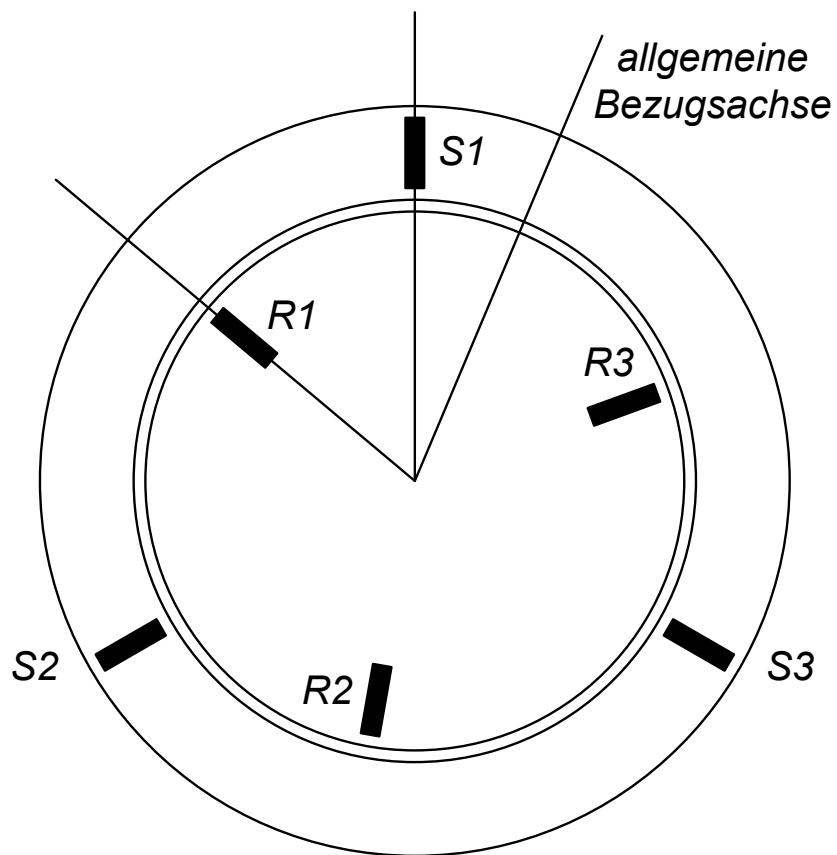


Abbildung 3: Schnittbild der Asynchronmaschine

5 Kompensationsstromwandler

Für einen Kompensationsstromwandler (LA 55-P von LEM, siehe folgende Seiten) sollen die Einsatzmöglichkeiten bestimmt werden. Mit dem Wandler soll ein Strom $\hat{I}_{\max} = 70 \text{ A}$ gemessen werden. Die Umgebungstemperatur sei 60°C . Als Versorgungsspannungen stehen $\pm 15 \text{ V}$ zur Verfügung.

- a) Wie groß ist die maximale Messspannung, die an einem geeigneten Messwiderstand abgegriffen werden kann? Wie groß muss der Messwiderstand gewählt werden, um ein Spannungssignal im Bereich $-5 \text{ V} < u_M < 5 \text{ V}$ zu erhalten?
- b) Welche Versorgungsleistung muss dem Stromwandler zur Verfügung gestellt werden?
- c) Wie hoch ist die Ausgangsspannung des eingebauten Verstärkers bei Nennstrom? Wie groß ist der maximale Strom, der mit dem Wandler gemessen werden kann, ohne den Verstärker zu überlasten?
- d) Wie groß ist die relative Genauigkeit bei Nennstrom? Was kann eine dauerhafte Beeinträchtigung der Messgenauigkeit verursachen?



Stromwandler LA 55-P

Für die elektronische Strommessung : DC, AC, Impuls..., mit galvanischer Trennung zwischen dem Primärkreis (Starkstromkreis) und dem Sekundärkreis (elektronischer Kreis).



Elektrische Daten

I_{PN}	Primärstrom, effektiv	50	A
I_{PM}	Primärstrom, Effektiv, Messbereich	0... ± 70	A
R_M	Messwiderstand @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	
		$R_{M,typ}$	$R_{M,max}$
		10	100
		50	600
		100	600
		50	135
		100	135
		50	135
		100	135
I_{SM}	Sekundärstrom, effektiv	50	mA
K_N	Übersetzungsverhältnis	1 : 1000	
V_C	Versorgungsspannung (± 5 %)	± 12... 15	V
I_C	Stromaufnahme	10 @ ± 15 V + I_S	mA
V_d	Prüfspannung, effektiv, 50 Hz, 1 min	2.5	kV

Genauigkeit - Dynamisches Verhalten

X	Genauigkeit @ I_{PM} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.65	%
	@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.90	%
	@ ± 12... 15 V (± 5 %)	< 0.15	%
ε_L	Linearitätsfehler	Typ	Maxi
		± 0.2	mA
I_{0M}	Offsetstrom @ $I_L = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.3	mA
I_{0T}	Reststrom @ $I_L = 0$ bei spezifiziertem R_M als Folge eines Primärstroms von $3 \times I_{PM}$	± 0.1 ± 0.5	mA
	Änderung von I_{0T} mit der Temperatur	0°C... + 70°C	
		- 25°C... + 85°C	
t_n	Reaktionszeit @ 10 % von I_{PM}	< 500	ns
t_{di}	Anspruchzeit bis 90 % von I_{PM}	< 1	µs
d/dt	di/dt bei optimaler Kopplung	> 200	A/µs
BW	Frequenzbereich (-1 dB)	DC... 200	kHz

Allgemeine Daten

T_A	Umgebungstemperatur	- 25... + 85	°C
T_S	Lagertemperatur	- 40... + 90	°C
R_S	Sekundärspulenwiderstand @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	Ω
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	Ω
m	Massen	18	g
	Normen	EN 50178 - 1997	

Anmerkungen : ¹⁾ Messbereich begrenzt auf ± 60 A_{max}
²⁾ Messbereich begrenzt auf ± 55 A_{max}
³⁾ Als Folge der Remanenz des Magnetkreises.

07/10/31

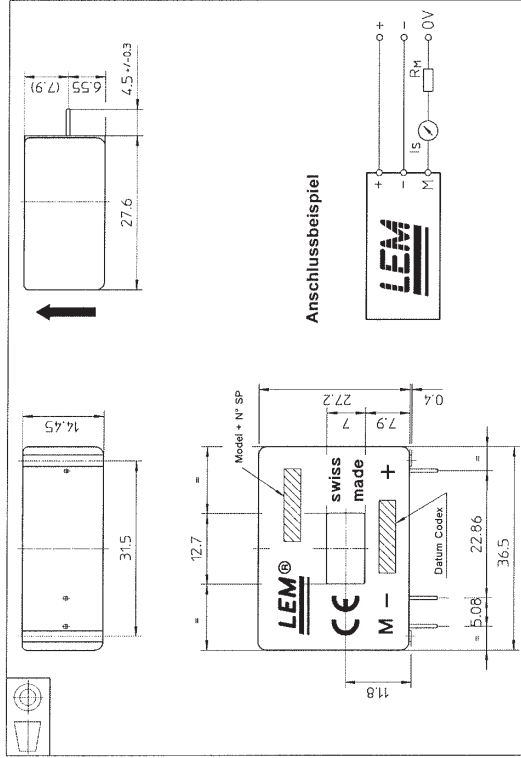
LEM behält sich das Recht vor, Änderungen im Sinne einer Verbesserung vorzunehmen, ohne Sie zu informieren.

Seite 12

www.lem.com



Abmessungen LA 55-P (in mm)



Mechanische Eigenschaften

- Allgemeine Toleranz ± 0.2 mm
- Primaröffnung 12.7 x 7 mm
- Befestigung und Sekundäranschlüsse 0.83 x 0.56 mm
- Empfohlener Bohrungsdurchmesser 0.9 mm

Bemerkungen

- I_S ist positiv, wenn I_P in Richtung des aufgedruckten Pfeiles fließt.
- Die Temperatur des Primärleiters darf 90°C nicht übersteigen
- Das dynamische Verhalten (Anspruchzeit und di/dt) ist am besten, wenn eine Primärspule benutzt wird, welche die Öffnung für den Primärkreis ganz ausfüllt
- Besteht der Primärkreis aus einer oder mehreren Windungen, ist darauf zu achten, dass diese um das Oberteil des LEM Stromwandlers gelegt werden, um eine optimale magnetische Kopplung zu erreichen
- Dieser Wandler ist ein Standardmodell. Sollten davon abweichende Parameter (Versorgungsspannung, Übersetzungsverhältnis, unipolare Messungen...) benötigt werden, nehmen Sie bitte Kontakt mit uns auf.

07/10/31

LEM behält sich das Recht vor, Änderungen im Sinne einer Verbesserung vorzunehmen, ohne Sie zu informieren.

Seite 22

www.lem.com

Sicherheitshinweis



Diese Stromwandler müssen in elektronischen/elektronischen Geräten verwendet werden, die die zureichenden Normen und Sicherheitsanforderungen erfüllen. Sie müssen gemäß den Herstellerangaben verwendet werden.



Vorsicht, Hochspannung

Bei Betrieb dieses Stromwandlers können gewisse Teile des Moduls eine gefährliche Spannung aufweisen. Die Nichtbeachtung dieser Warnung kann zu Verletzungen und/oder schweren Schäden führen. Dieser Stromwandler ist ein Einbaugerät, dessen leitende Teile nach Einbau berührungssicher sein müssen. Ein Schutzgehäuse oder eine zusätzliche Abdeckung sind empfehlenswert. Die Hauptspannungsversorgung muss abschaltbar sein.

Prinzipskizze eines Kompensationsstromwandlers mit Hall-Sensor

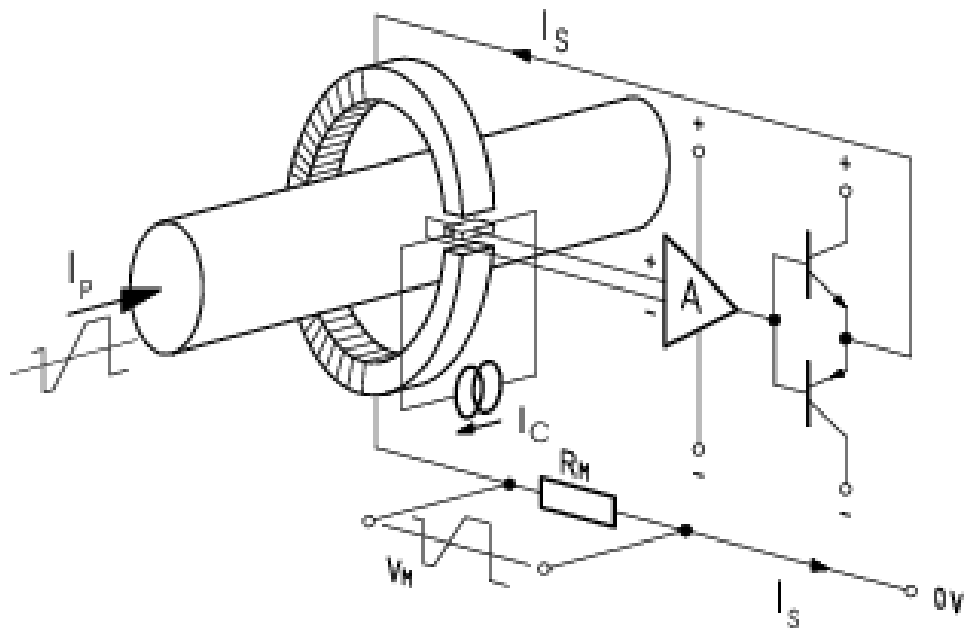


Abbildung 4: Kompensationsstromwandler mit Hall-Sensor

Quelle: LEM - Kompensations-Stromwandler mit kleiner Montagefläche bis 100-A-Nennstrom

6 Resolver

In Abbildung 5 ist ein Resolver und dessen prinzipieller Aufbau dargestellt.

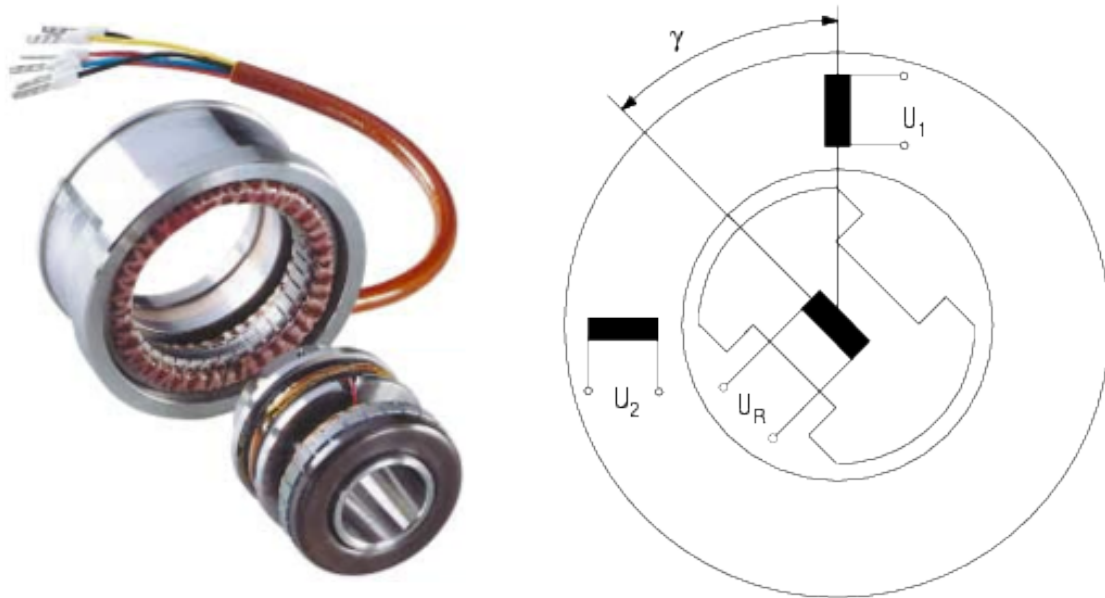
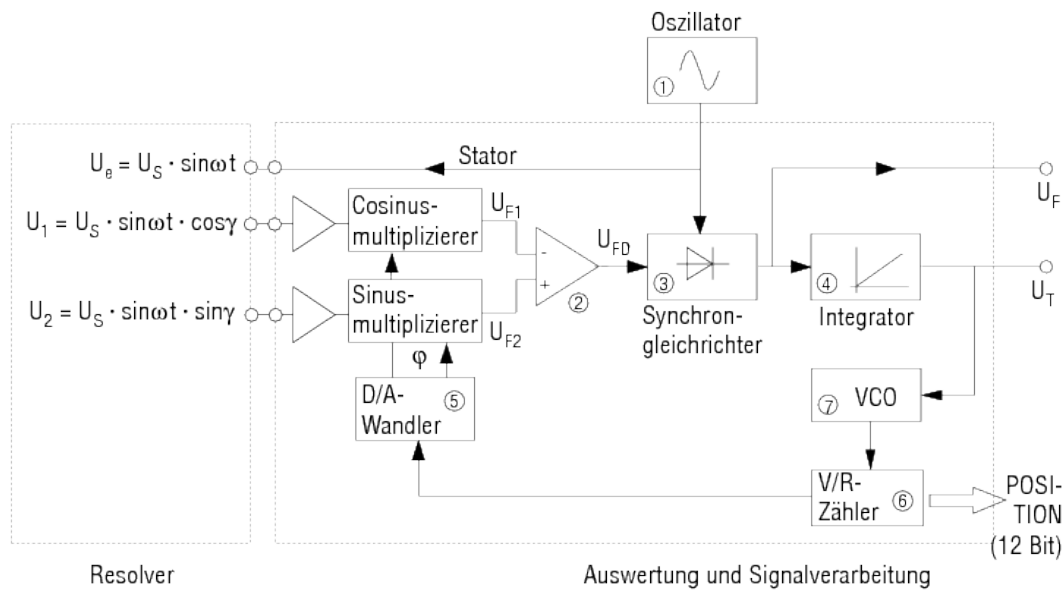


Abbildung 5: Resolver, Schematischer Aufbau eines Resolvers. Quelle: SEW - Praxis der Antriebstechnik, Band 7

Wie funktioniert ein Resolver? Welche Größen lassen sich aus den Ausgangsspannungen bestimmen? Wie werden sie ausgewertet?

Resol verauswertung mit Phasenregelkreis



MD0113AD

Abbildung 6: Blockschaltbild eines R/D-Wandlers

Quelle: SEW - Praxis der Antriebstechnik, Band 7

Betrachtung mit vereinfachten Resolversignalen

Die Zwischensignale sind:

$$U_{F1} = U_S \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi$$

$$U_{F2} = U_S \cdot \sin \omega t \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi$$

Das Differenzsignal am Ausgang des Fehlerverstärkers ist

$$\begin{aligned} U_{FD} &= U_{F2} - U_{F1} \\ &= U_S \cdot \sin \omega t \cdot (\sin \gamma \cdot \cos \varphi - \cos \gamma \cdot \sin \varphi) \\ &= U_S \cdot \sin \omega t \cdot \sin (\gamma - \varphi) \end{aligned}$$

Nachdem $\sin \omega t$ entfernt wurde, bleibt die Fehlerspannung

$$U_F = \text{konst} \cdot \sin (\gamma - \varphi)$$

Über den Integrator als Regler, den VCO (voltage controlled oscillator), den Vorwärts-/Rückwärts-Zähler und den Digital-Analog-Wandler (mit sin-cos-Tabellen!) schließt sich der Phasenregelkreis. U_T ist aufgrund des Regelkreises proportional zur Drehzahl.