3. Regelungstechnische Grundlagen

3.1 Standardregler

Das Kapitel befasst sich mit standardisierten Reglern, die eine bestimmte Reaktion auf eine Regelabweichung haben.

Zweipunktregler: Dieser Regler arbeitet digital, d.h. der Regler schaltet nur das Stellglied ein oder aus bei einer Regelabweichung und umgekehrt, sobald der Prozess sich wieder in den erlaubten Grenzen bewegt.

Proportionalregler (P-Regler): Der Regler erzeugt eine Übertragungsfunktion, die proportional der Regelabweichung ist, d.h. umso größer die Abweichung ist, desto größer ist das Stellsignal. Auch bei kleiner werdender Regelabweichung reduziert sich das Stellsignal entsprechend. Der Begriff „Proportional“ beschreibt, dass es ein lineares Verhältnis zwischen Regelabweichung und Stellwert existiert. Bild 3.1. zeigt den Verlauf.

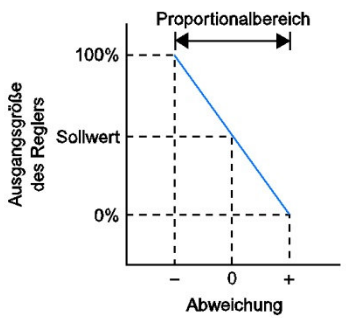

Bild 3.1. Proportionales Verhalten eines Reglers nach [1]

Die Abweichung der Ausgangsgröße vom Sollwert Δx kann mit der Geradengleichung

$$\Delta x = K_p \cdot e$$

beschrieben werden, wobei Kp die Geradensteigung und e die Abweichung ist. Es ist zu beachten, dass der Regler nur einen eingeschränkten Bereich hat, in dem die Geradengleichung gilt. Diesen Bereich bezeichnet man als den Proportionalbereich.

Durch Einführung der Reglerausgangsgrößen u (u_0 = Reglerausgangsgröße bei Abweichung 0, u_{aus}= Reglerausgangsgröße bei Abweichung e) ergibt sich:

$$u_{aus} - u_0 = K_p \cdot e(t)$$

Das „e“ ist die zeitabhängige Größe. Bei Anwendung der Laplace Transformation ergibt sich:

$$U(s) = K_p \cdot E(s)$$

Somit lässt sich die Übertragungsfunktion G(s) schreiben:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

Also ist die Geradensteigung Kp die Übertragungsfunktion des Reglers (im Proportionalbereich).

Bei der Festlegung des Reglers legt man den Istwert in die Mitte des Proportionalitätsbereichs des Reglers, so dass man 50% Reaktionsbereich nach oben und unten hat.

Integralregler (I-Regler): Der Regler erzeugt einen Stellwert, der proportional zum Integral der Abweichung über die Zeit ist. So erzeugt eine konstante Reglerabweichung ein konstant anwachsendes Stellsignal. Erst eine Änderung der konstanten Reglerabweichung ändert die Steigung des Stellsignals. Somit arbeitet der Integralregler zurückwirkend, d.h. er reagiert auf die Summe der Abweichungen. Mit dem Regler alleine kann ein Prozess nicht auf einen neuen Sollwert gefahren werden, da ein arbeitender Regler zurückblickend immer eine Reglerabweichung hat und der Regler deshalb immer wieder einen ändernden Stellwert ausgibt.

Bei diesem Regler ist die Reglerausgangsgröße u proportional zur Reglerausgangsgröße.

$$\frac{du}{dt} = K_I \cdot e(t)$$

Definition: K_I= Proportionalitätskonstante für den Integralregler = Integralkonstante [1/s]

$$\int_{u_0}^{u_{aus}} du = \int_0^u K_I \cdot e \cdot dt$$

$$u_{aus} - u_0 = \int_0^u K_I \cdot e \cdot dt$$

Mit Hilfe der Laplace-Transformation lässt sich die Übertragungsfunktion ermitteln:

$$(U_{aus} - U_0)(s) = U(s) = \frac{1}{s} \cdot K_I \cdot E(s)$$

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{s} \cdot K_I$$

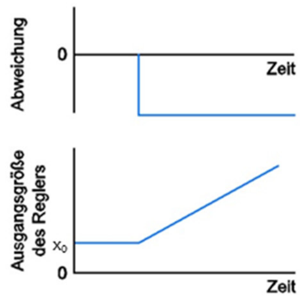

Bild 3.2. Grafische Darstellung des Verhaltens eines Integralreglers nach [1]

Das Bild zeigt zu Beginn eine konstante Ausgangsgröße des Reglers. Der Integralanteil reagiert nicht, da die Abweichung = 0 ist. Im weiteren Verlauf ändert sich die Ausgangsgröße des Reglers mit einer konstanten Geschwindigkeit. Somit reagiert der Integralregler und steigt gemäß der einmaligen Sprungfunktion um einen konstanten Wert stetig an.

Differentialregler (D-Regler): Der Regler erzeugt ein Signal proportional zur Geschwindigkeit mit der die Abweichung auftritt (Differential vom Weg!). Bei großen Änderungsraten (großer Wert innerhalb kleiner Zeitintervalle) wird eine sehr große Stellgröße eingestellt. Bei einer kleineren Änderung innerhalb des Zeitintervalls wird eine entsprechend kleine Stellgröße ausgegeben. Durch dieses Verhalten versucht dieser Regler eine offensichtlich große Regelabweichung vorzuhalten, also mit einem großen Wert die große Änderungsgeschwindigkeit abzubremsen. Das Verhalten wird in der Regel nicht alleine, sondern in Kombination mit einem anderen Regler (z.B. dem I-Regler) eingesetzt. Nachteil eines solchen Reglers ist eine Verlangsamung des Stellprozesses, also bei sehr dynamischen Reglern nicht zu empfehlen.

Der Differentialregler arbeitet proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Eingangsgröße. Da die Geschwindigkeit die Ableitung des Wegs ist und der Weg die Eingangsgröße des Proportionalreglers ist, ergibt sich der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgang zu:

$$u_{aus} - u_0 = K_D \cdot \frac{de}{dt}$$

Definition: u_{aus} = Ausgangsgröße bei der Abweichung e, u_0 = Ausgangsgröße beim Sollwert, e = Abweichung, de/dt = Geschwindigkeit der Abweichung, K_D= Proportionalitätskonstante für den Differenzialregler = Differenzialkonstante.

Nach Umwandlung durch die Laplace Transformation ergibt sich:

$$U(s) = (U_{\text{aus}} - U_0)(s) = K_D \cdot s \cdot E(s)$$

Die Übertragungsfunktion ergibt sich somit mit:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_D \cdot s$$

Aufgrund der beschriebenen Funktion können sich große Reglerausgangsgrößen innerhalb kürzester Zeit ergeben, wenn die Abweichungsgeschwindigkeit nur groß genug ist. Bild 4.3. zeigt an einem Beispiel die Reglerreaktion, bei dem die Eingangsgröße sich mit einer konstanten Geschwindigkeit ändert.

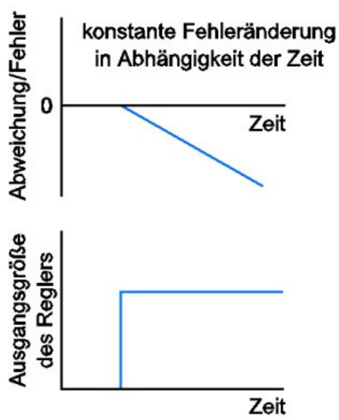

Bild 3.3. Grafische Darstellung des Offsets nach [1]

Anhand von Bild 3.3. erkennt man, dass der Regler nur auf eine Steigungsänderung des Eingangssignals reagiert. Solange die Steigung (d.h. die Änderungsgeschwindigkeit der Eingangsgröße) konstant bleibt, gibt der Regler ein konstantes Ausgangssignal aus. Aufgrund dieser Eigenschaft lässt sich nachvollziehen, dass der Regler keinen Offset, d.h. eine bleibende Regelabweichung einstellen kann. Schließlich ist die Änderungsgeschwindigkeit bei einer bleibenden Reglerabweichung = 0 und deshalb reagiert der Regler nicht auf die Änderung.

Aus diesem Grund wird der Differentialregler auch nie alleine eingesetzt, sondern immer mit einem Proportionalregler kombiniert. So reagiert der Differentialregler auf die Änderungsgeschwindigkeit und der Proportionalregler auf die Regelabweichung, inklusive der bleibenden Regelabweichung.

In der Praxis wird meistens eine Kombination von den Proportional-, Differential- und Integralreglern eingesetzt, also der Proportional-Differential Regler(PD), der Proportional-Integral Regler (PI) oder der Proportional-Integral-Differential Regler (PID). Aufgrund der zu diskutierenden Anwendung wird nur auf den PI-Regler eingegangen.

Proportional-Integralregler

Das Ausgangssignal lässt sich mit der folgenden Gleichung beschreiben:

$$u_{aus} = K_p \cdot e(t) + \int_0^u K_I \cdot e \cdot dt + u_0$$

Definition: u_{aus} = Ausgangsgröße bei der Abweichung e, u_0 = Ausgangsgröße beim Sollwert, e = Abweichung, K_p= Proportionalkonstante, K_I= Proportionalitätskonstante für den Integralregler = Integralkonstante [1/s]

Zur Ermittlung der Übertragungsfunktion erfolgt die Überführung in den Bildbereich mit der Laplace-Transformation:

$$(U_{aus} - U_0)(s) = U(s) = K_p \cdot E(s) + \frac{1}{s} \cdot K_I \cdot E(s)$$

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{1}{s} \cdot K_I$$

Bei Einführung der Nachstellzeit

$$T_{PI} = \frac{K_p}{K_I}$$

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{s} \cdot \left(s + \frac{1}{T_{PI}}\right) = K_p \cdot \frac{s \cdot T_{PI} + 1}{s \cdot T_{PI}}$$

Bild 3.4. verdeutlicht die Funktion des PI-Reglers in der grafischen Darstellung. Bei Vorgabe einer Sprungfunktion spricht der Proportionalregler sofort mit einem Sprung an, der Integralanteil wächst über die Zeit konstant an, solange die konstante Änderung anliegt.

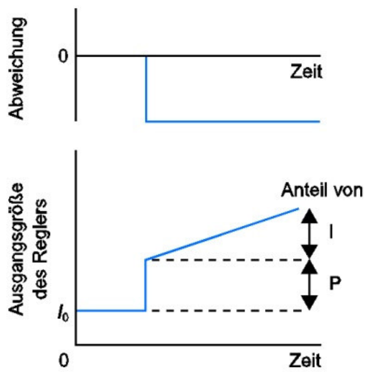

Bild 3.4. Grafische Darstellung des Verhaltens eines PI-Reglers nach [1]

Der PI-Regler hat eine spezielle Eigenschaft, die wir im Folgenden betrachten wollen. Wie vorher schon diskutiert, muss eine Sollwertänderung des Reglers beim Proportionalregler mit Hilfe eines Offsets eingestellt werden. Der PI-Regler stellt sich selbstständig auf eine Sollwertänderung ein. Bild 3.5. zeigt das Verhalten bei einer Sollwertverschiebung, aufgetrennt für den Proportional- und Integralanteil.

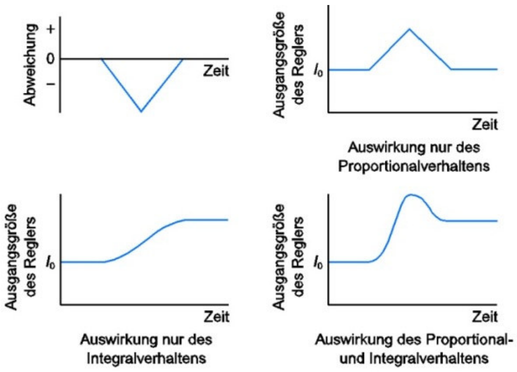

Bild 3.5. Selbständiger Offsetabgleich des PI-Reglers nach [1]

Im ersten Bild sehen wir, wie eine Reglerabweichung über die die Zeit verläuft. Der Proportionalanteil reagiert gleichsinnig also proportional, d.h. er versucht zeitgleich dagegen zusteuern. Sobald die Abweichung die umgekehrte Steigung einnimmt, fährt der Proportionalanteil gleichsinnig zurück, bis die Abweichung wieder gegen Null geht.

Der Integralanteil steigt entsprechend der Fläche unter der Abweichung an. Aber Achtung, selbst bei Umkehr der Steigung haben wir einen Flächenanteil, der nach wie vor die Ausgangsgröße positiv ansteigen lässt. Erst nachdem die Abweichung bei 0 ist, ändert sich der Integralanteil nicht mehr, aber der Anteil bleibt erhalten!

Im 3.5. Bild mit der Überlagerung beider Teilregelungen erkennt man das finale Ergebnis. Der Regler hat sich selbstständig auf einen neuen Sollwert (vergleichbar mit dem Offset) eingestellt. Liegt im Weiteren keine Abweichung vor, bleibt der neue Sollwert so bestehen.

Dieses Verhalten nutzt man insbesondere in Prozessen, bei denen mit großen Änderungen des Prozesses gerechnet werden muss. Der Integralanteil braucht aber Zeit, da der neue Sollwert sich entsprechend der Integralfunktion über der Zeit ändert. Das Verhalten ist bei hochfrequenten Schwankungen der Abweichung anfällig gegen Schwingungen, d.h. es stellt sich kein stabiler Zustand mehr ein, weil der Regler mit der Festlegung des passenden Sollwerts nicht mehr hinterherkommt.

Weiterhin muss beachtet werden, dass der PI-Regler mit einem erheblichen Überschwinger vor dem endgültigen Ausregeln arbeitet, wie in Bild 4.5. zu sehen ist. Prozesse, die empfindlich auf die Ausschläge reagieren, könnten in eine Überlast gelangen. Viel wichtiger ist aber, dass Prozesse, welche nahe des 100% Sollwerts gefahren werden, nicht mehr nachstellen können, da der Regler am „Anschlag“ ist. Ist ein Prozess beim Anfahren in dem extremen Bereich, wird sich nicht der 100% Wert einstellen können. Ein Beispiel ist eine Wasserstandsregelung im Behälter. Ist der Behälter am Anfang leer, so kann der Wasserhahn nicht konstant 100% geöffnet werden, sondern nach dem Einregeln wird der Hahn wieder etwas zugefahren.

3.2 Anwendung der Regelungstheorie auf den Gleichstrommotor

Die Funktionsweise des Modells zeigt je nach Lasten, das ein Hochlaufen des Motors gar nicht oder nur sehr schleppend möglich ist, da bei konstanter Spannung U_a mit steigender Drehzahl der Ankerstrom I_a abnimmt.

Was ist die richtige Maßnahme?

Wir wollen eine bestimmte Drehzahl einhalten, also wäre es sinnvoll die Drehzahl als Regelabweichung zurück zu koppeln. Der direkte Weg wäre eine Spannungsanhebung aufgrund einer Drehzahlabweichung. Ausprobieren!

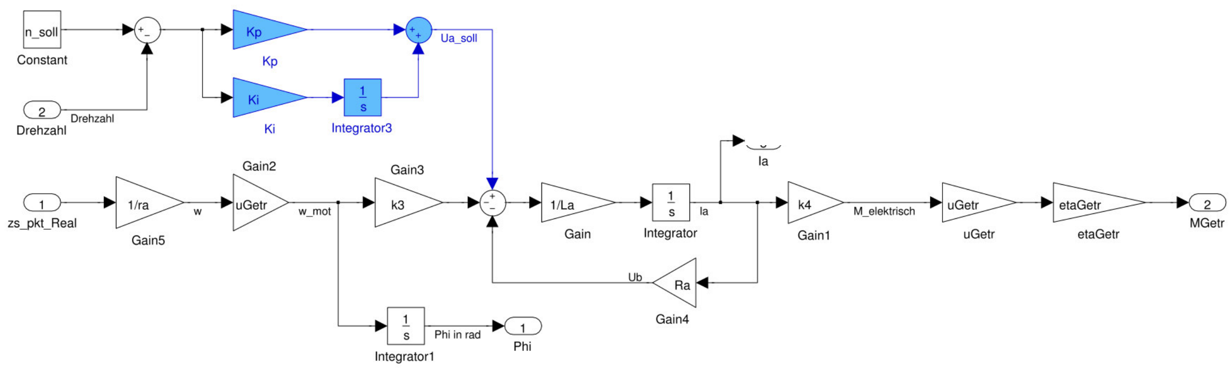

Bild. 3.6. Blockschaltbild einer ankergesteuerten Gleichstrommaschine mit n-Regelung in Simulink©

Mögliche Problematik dieser Reglerstruktur:

Die Strom-Spannungskopplung verlangt Ströme, die den Motor zerstören können. Ströme können im Regler nicht bewertet werden.

Ansprechverhalten vom Regler ist relativ lang, da mit steigender Drehzahl auch die Gegenspannung größer wird -> Stellgröße verändert interne Regelgröße negativ (U_b wird von U_a subtrahiert)

Die elegantere und damit auch übliche Vorgehensweise zeigt die genauere Betrachtung der Wirkungskette. Wir brauchen eine Drehmomentänderung, um Drehzahlabweichungen abzufangen. Das Drehmoment wird beim Motor durch den Strom gestellt. Von daher ist es besser eine **Kaskadenregelung** zu verwenden, d.h. eine Drehzahlregelung, die den Strom stellt.

Vorteile:

Schnelleres Stellen, da direkt auf die Stellgröße Einfluss genommen wird -> kleinere Regelabweichungen.

Notwendige Strombegrenzungen zum Schutz des Motors können einfacher implementiert werden, d.h. Zugriff auf den Strom, z.B. für Einklemmschutz.Bild 3.7. zeigt das Modell.

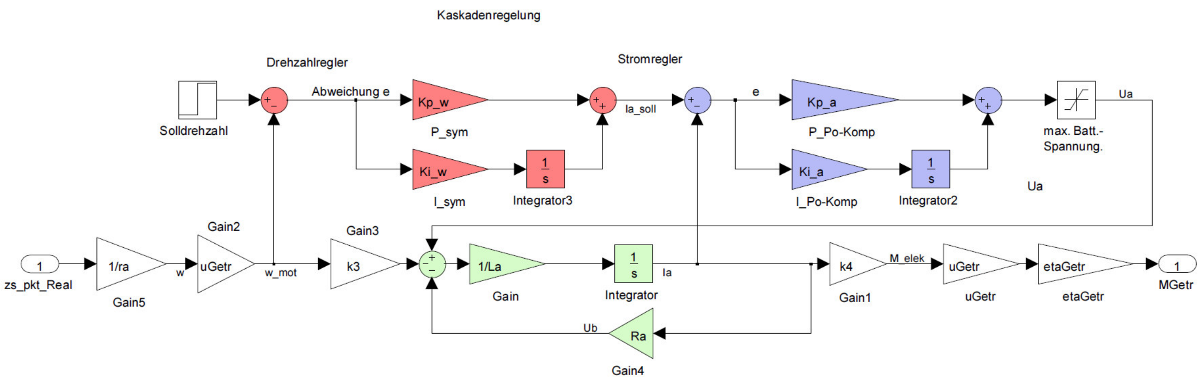

Bild. 3.7. Blockschaltbild einer ankergesteuerten Gleichstrommaschine mit I,n-Regler in Simulink©

3.3 Einstellen der Reglerparameter für P und I-Anteil

Allgemeine Vorgehensweise zur Einstellung von kaskadierten Reglern

Wenn Sie sich die Reglerstrecke anschauen, so haben wir einen kaskadierten Regler angesetzt. Einmal haben wir den inneren Regler, den Stromregler und dann den äußeren Regler, den Drehzahlregler. Bei der Einstellung der Reglerparameter geht man von innen nach außen vor, d.h. zunächst parametrieren wir den Stromregler danach den Drehzahlreglr. Zur Einstellung der Reglerparameter sind verschiedene Verfahren möglich. Im Rahmen der Veranstaltung werden drei Verfahren vorgestellt, und zwar das empirische und zwei analytisches Verfahren.

Die i.d.R. ungünstigste Anforderung an einen Regler ist die schlagartige Änderung der Eingangsgröße, also die Sprungantwort. Für die Reglerparametrierung wird dieser Fall gewählt.

Also bauen Sie in das Simulink-Modell einen sprunghaften Sollwertanstieg ein, um zu sehen, wie die Regelstrecke reagiert. Geben Sie sich mit dem Simulink-Block „Scope“ an geeigneten Stellen die Systemantwort aus, um das Reaktionsverhalten zu analysieren.

Empirisches Einstellen der Reglerparameter für P und I-Anteil

Das Verfahren ist einfach zu beschreiben, allerdings je nach Regelkreis auch sehr aufwändig. Hierbei werden die Parameter durch Ausprobieren eingestellt. Bei stabilen Systemen kommt man sehr schnell zu einem Erfolg, allerdings ist schwer abzuschätzen, ob das Optimum aus dem Regler herausgeholt wurde.

Als Faustregel für das Einstellen gilt: Zunächst <u>I-Anteil auf null</u> setzen und nur den P-Anteil einstellen. P-anteil anheben, bis das System in eine deutliche Überschwingung kommt. Falls das System stark schwingt, also instabil ist, dann P-Anteil senken.

Danach den I-Anteil anheben, so dass die Überschwingung gedämpft wird. Zu großer I-Anteil erzeugt eine sehr lange Zeitkonstante. Auch hier durch Einstellen verschiedener Werte das Optimum finden. Viel Erfolg!

Bitte notieren Sie sich Ihre optimalen Reglerparameter!! Es ist interessant diese mit den analytischen Regelparametern zu vergleichen.

3.4 Analytisches Einstellen der Reglerparameter für P und I-Anteil:

Stromregler

Als Verfahren wählen wir die „**Polstellenkompensation**“. Wir gehen bei der elektrischen Maschine von einem PT1 Verhalten aus, d.h. wir laufen bei einer Sprungantwort asymptotisch gegen den Sollwert, ein Überschwingen findet nicht statt. Das Vorgehen hat den Nachteil, dass wir ggf. etwas langsamer sind, haben aber ein stabiles Betriebsverhalten.

Das PT1-Glied für den GS-Anker nach Kap. 3.1.4.2 ist wie folgt definiert:

$$G_A(S) = \frac{V_A}{T_A \cdot s + 1}$$

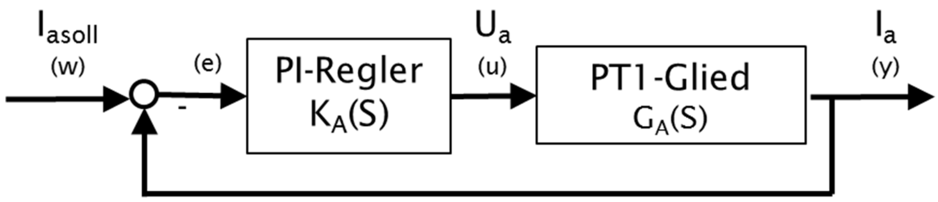

Bild. 3.8. Stromregelkreis des Gleichstrommotor-Ankers

Mit Verwendung der Gleichung des PI-Reglers aus Kap. 4.1. e) und der Übertragungsfunktion $G_A(S)$ für das PT1-Glied, also den GS-Anker, ergibt sich die Reglerfunktion wie folgt:

$$Y(S) = W(S) \cdot K_A(S) \cdot G_A(S) - Y(S) \cdot K_A(S) \cdot G_A(S)$$

$$Y(S) \cdot \left(1 + K_A(S) \cdot G_A(S)\right) = W(S) \cdot K_A(S) \cdot G_A(S)$$

Und die gesamte Übertragungsfunktion ergibt sich mit:

$$G_{Ag}(S) = \frac{Y(S)}{W(S)} = \frac{K_A(S) \cdot G_A(S)}{1 + K_A(S) \cdot G_A(S)}$$

Als nächstes betrachten wir die beiden hintereinandergeschalteten Funktionen der Wirkkette des PI-Reglers und des PT-1 Glieds ($K_A(S) \cdot G_A(S)$).

$$K_A(S) \cdot G_A(S) = K_{P\_A} \cdot \frac{s \cdot T_{PI\_A} + 1}{s \cdot T_{PI\_A}} \cdot \frac{V_A}{T_A \cdot s + 1}$$

Bei Verwendung der Polstellenkompensation, setzt man die beiden Zeitkonstanten als gleich an!

$$T_{PI\_A} = T_A$$

Aus Kapitel 2.1.6 haben wir die Zeitkonstante mit der Induktivität und dem Widerstand im Anker beschrieben.

$$T_{PI\_A} = \frac{L_A}{R_A} = T_A$$

Somit gilt:

$$K_A(S) \cdot G_A(S) = K_{P\_A} \cdot \frac{s \cdot T_{PI\_A} + 1}{s \cdot T_{PI\_A}} \cdot \frac{V_A}{T_{PI\_A} \cdot s + 1} = \frac{K_{P\_A} \cdot V_A}{s \cdot T_{PI\_A}}$$

Und eingesetzt:

$$\frac{I_A}{I_{Asoll}} = \frac{Y(S)}{W(S)} = \frac{K_A(S) \cdot G_A(S)}{1 + K_A(S) \cdot G_A(S)} = \frac{\frac{K_{P\_A} \cdot V_A}{s \cdot T_{PI\_A}}}{1 + \frac{K_{P\_A} \cdot V_A}{s \cdot T_{PI\_A}}} = \frac{K_{P\_A} \cdot V_A}{s \cdot T_{PI\_A} + K_{P\_A} \cdot V_A}$$

$$= \frac{1}{s \cdot \frac{T_{PI\_A}}{K_{P\_A} \cdot V_A} + 1}$$

Setzen wir den Teil im Nenner hinter dem s als Zeitkonstante des Gesamtsystems T_g an, so erhält man wieder die Form eines PT1-Glieds.

$$T_g = \frac{T_{PI\_A}}{K_{P\_A} \cdot V_A}$$

$$\frac{I_A}{I_{Asoll}} = \frac{Y(S)}{W(S)} = \frac{1}{s \cdot T_g + 1} \qquad (PT1 - Glied)$$

Mit diesem Vorgehen vermeiden wir ein Überschwingen, da die Regelstrecke ein PT1-Glied darstellt, können aber für einen schnellen Stromanstieg das U_A groß einstellen, unter Berücksichtigung des U_{Amax}.

Mit diesem Vorgehen ist der Anteil der Integralverstärkung mit der Proportionalverstärkung gekoppelt. Jetzt muss man nur den Proportionalanteil einstellen, der Integralanteil ergibt sich rechnerisch aus der folgenden Beziehung:

$$K_A(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_{P\_A} \cdot \frac{s \cdot T_{PI\_A} + 1}{s \cdot T_{PI\_A}}$$

mit

$$T_{PI\_A} = \frac{L_A}{R_A} = T_A$$

Ergibt sich der PI-Regler zu:

$$K_A(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_{P\_A} \cdot \frac{s \cdot \frac{L_A}{R_A} + 1}{s \cdot \frac{L_A}{R_A}} = K_{P\_A} + K_{P\_A} \cdot \frac{R_A}{L_A} \cdot \frac{1}{s}$$

$$K_A(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_{P\_A} + \frac{1}{s} \cdot K_{I\_A} \qquad \text{mit} \quad K_{I\_A} = K_{P\_A} \cdot \frac{R_A}{L_A}$$

Induktionsspannung

Bild 3.9 zeigt den Gesamtregler mit der Rückkopplung der Induktionsspannung, abhängig von der Drehzahl.

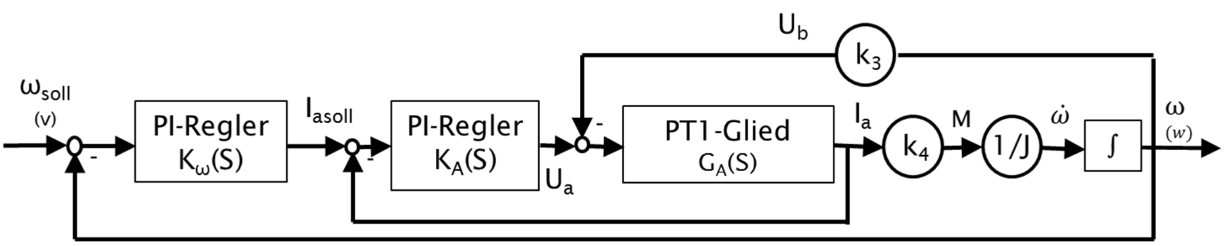

Bild. 3.9. Gesamtregler mit Beachtung der Induktionsspannung U_b

Wie im Bild 3.9. zu erkennen ist, greift die drehzahlabhängige Induktionsspannung in die bisher betrachteten Regler ein. Es müssen die Zeitkonstanten der Teilsysteme betrachtet werden. Die Zeitkonstante zwischen der Spannung und dem Strom ist deutlich kleiner, als die Zeitkonstante der Drehzahl, und damit der Induktionsspannung. Das bedeutet, dass die Ankerspannung und der Strom sich deutlich schneller verändern können als die Drehzahl des Systems. Diese Betrachtung lässt sich einfach nachvollziehen. Mit der Erkenntnis ist es zulässig, den eingezeichneten Spannungskreis als „aufgetrennt“ zu betrachten. Das bedeutet, dass die Induktionsspannung nicht gekoppelt ist und so als ungekoppelte Störgröße zu betrachten ist. Von daher braucht die Induktionsspannung bei der Reglerparametrierung nicht berücksichtigt werden!

Drehzahlregler

Bild 3.10. beschreibt die gesamte Reglerstruktur mit der in Kapitel 3.1 und 3.2 getroffenen Vereinfachung. Die Struktur hat den inneren PI-Regler mit der Übertragungsfunktion $G_{Ag}(s)$ und ist dann im weiteren Ablauf mit einem Integrator verbunden. Diese Kombination wird in der Fachliteratur auch als IT-1-Glied bezeichnet. Versucht man einen IT-1 Regler mit der Polstellenkompensation einzustellen, wird man kein stabilen Betriebspunkt einstellen können. Ein mögliches Verfahren zur Festlegung des Drehzahlreglers ist das Verfahren des **Symmetrischen Optimums**.

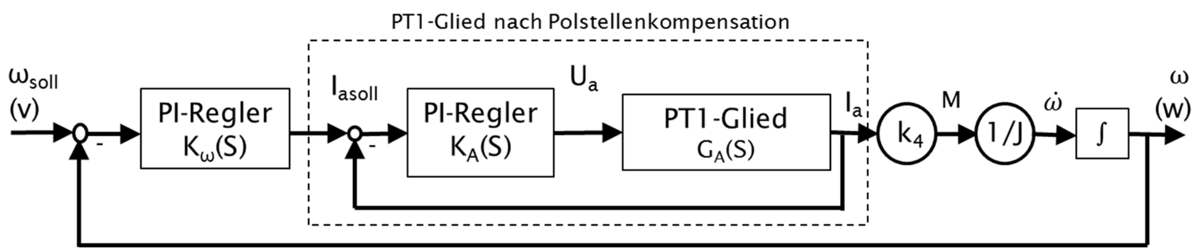

Bild 3.10. Gesamtregler mit unterlagertem Stromregelkreis des Gleichstrommotor-Ankers

$$K_\omega(S) = K_{P\_\omega} + \frac{K_{I\_\omega}}{s} = K_{P\_\omega} \cdot \frac{s \cdot T_{PI\_\omega} + 1}{s \cdot T_{PI\_\omega}}$$

$$G_\omega(S) = \frac{W(S)}{V(S)}$$

$$G_\omega(S) = \underbrace{K_{P\_\omega} \cdot \frac{s \cdot T_{PI\_\omega} + 1}{s \cdot T_{PI\_\omega}}}_{\text{PI-Regler } K_\omega(S)} \cdot \underbrace{\frac{1}{T_1 \cdot s \cdot (T_g \cdot s + 1)}}_{\text{IT1-Strecke}}$$

Die Zeitkonstante T_1 ist die Zeitkonstante des nachgeschalteten Integrators und entspricht im Bild 3.10 den Faktoren vor dem Integral, also:

$$T_1 = \frac{1}{s}$$

Das Trägheitsmoment J beinhaltet alle rotatorischen und translatorischen Massen, die durch den Motor beschleunigt werden müssen. Bei unserem betrachteten Modell muss das Trägheitsmoment des Motors, des Schlittens und des Fensters mit Berücksichtigung der Getriebeübersetzung betrachtet werden.

Betrachtet man den Beschleunigungsvorgang, so wird aufgrund der Feder-Dämpfungsverbindung zwischen Fenster und Schlitten zum Zeitpunkt n=0 nur der Schlitten beschleunigt und ab Zeitschritt n+1 die Feder zusammengedrückt. Somit muss zu dem Zeitpunkt n=0 nur die Schlittenmasse beschleunigt werden. Zu dem späteren Zeitpunkt, wenn die Feder sich eingeschwungen und die Dämpfung auch keine Relativgeschwindigkeit hat, entspricht die zu beschleunigende Masse die des Fensters und dem Schlitten. Also haben wir zwischen diesen beiden Extremen immer die gesamte Masse des Schlittens und mit steigender Zeit einen zunehmenden Anteil vom Fenster zu beschleunigen. Unser Regler bekommt eine feste Parametrierung für den gesamten Vorgang, also müssen wir bei der Festlegung des Reglers einen Wert für die zu beschleunigenden Massen annehmen. Wir gehen von der Gesamtmasse als ungünstigste Reglerparametrierung aus, d.h. wir betrachten den Punkt, bei dem Schlitten und Fenster keine relative Bewegung mehr haben.

Bei der Regelung ist unbedingt vorher festzulegen, ob die Winkelgeschwindigkeit des Motors (wie hier gezeigt) oder die Geschwindigkeit des Fensters als Regelgröße verwendet wird. Bei der Umrechnung muss der Rollenradius aus der Beziehung $\dot{z}_S = \omega \cdot r_a$ beachtet werden!

Die Solldrehzahl ergibt sich mit der geforderten Geschwindigkeit des Fensters von $0{,}042\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ zu:

$$\omega = \frac{\dot{z}_S}{r_a} \cdot u_{Getr}$$

$$\omega = \frac{0{,}042\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{0{,}011\,m} \cdot 49 = 185{,}60\,\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}$$

Das Trägheitsmoment für die Reglerparametrierung setzt sich aus der Trägheit J_{mot} des Motors und dem aufgrund der zu beschleunigenden Massen äquivalenten Trägheitsmoment J_{mech} zusammen. Analog zum Vorgehen aus Kapitel 2.6 müssen nun die beiden Massen m_s und m_f in ein Trägheitsmoment überführt werden. Aus Kapitel 2.6 erhalten wir:

$$F_{Trg} = J_{mech} \cdot \frac{\ddot{z}_s}{{r_a}^2} \cdot {u_{Getr}}^2 \cdot \eta_{Getr.}$$

$$m_{mech} \cdot \ddot{z}_s = J_{mech} \cdot \frac{\ddot{z}_s}{{r_a}^2} \cdot {u_{Getr}}^2 \cdot \eta_{Getr.}$$

$$J_{mech} = m_{mech} \cdot \frac{{r_a}^2}{{u_{Getr}}^2 \cdot \eta_{Getr.}}$$

$$J_{mech} = (m_s + m_f) \cdot \frac{{r_a}^2}{{u_{Getr}}^2 \cdot \eta_{Getr.}}$$

$$J = J_{mot} + J_{mech}$$

$$J = J_{mot} + (m_s + m_f) \cdot \frac{{r_a}^2}{{u_{Getr}}^2 \cdot \eta_{Getr.}}$$

Die Zeitkonstante T_1 berechnet sich somit zu:

$$T_1 = \left(J_{mot} + (m_s + m_f) \cdot \frac{{r_a}^2}{{u_{Getr}}^2 \cdot \eta_{Getr.}}\right) \cdot \frac{1}{k_4}$$

Das symmetrische Optimum Verfahren erfolgt mit folgender Vorschrift:

$$a = 2 \cdot D + 1$$

$$T_{PI\_\omega} = T_g \cdot a^2$$

$$K_{P\_\omega} = \frac{1}{a} \cdot \frac{T_1}{T_g}$$

$$K_{I\_\omega} = \frac{K_{P\_\omega}}{T_{PI\_\omega}}$$

Zum Einstellen des Reglers gibt man einen Dämpfungsfaktor als Startwert vor, z.B. D=1. Bei der Abstimmung des Reglers ändert man nur noch den Dämpfungsfaktor, alle anderen Parameter stellen sich entsprechend den dargestellten Gleichungen ein.

Hinweis: Dieser Ansatz verspricht nur Erfolg, wenn die Schwingungsform aufgrund der trägen Drehmasse J schneller abklingt, als die Einregelung. Da es ein Einmassensystem ist, wird es funktionieren.