

Laborübungen zum Fach

**Grundlagen der Elektrotechnik 2**

**Versuch V8: Steuern und Regeln**

**Modul/Unit-Nr. TELG2004.2**

Laborausarbeitung in Ordnung

Laborausarbeitung nicht in Ordnung

Kurs-Nr. TEL0....GR.....

Name der/s Studierenden: .....

Betreuer: Dipl.-Ing. Joh. Huning

Ort/Datum: .....

Unterschrift: .....

# 1 Vorbereitung

## 1.1 Einführende Fragen

- 1: Der Sprachgebrauch verwendet oft salopp das Wort „Helligkeitsregler“ für einen Dimmer zum Verändern der Helligkeit vom Glühbirnen. In Zentralheizungen von Wohngebäuden arbeiten Temperaturregler an Heizkörpern. Worin besteht der prinzipielle Unterschied der beiden „Regler“ ?
  
- 2: Die Lenkung von sparsamen Kleinwagen geschieht meist über mechanische Schneckengetriebe. Bereits in gut ausgestatteten Mittelklasse-Pkw finden sich Servolenkungen. Beide Lenkungen werden über das Lenkrad bedient. Worin besteht hier der prinzipielle Unterschied?

Antwort zu 1:

---

---

---

---

---

---

---

---

Antwort zu 2:

---

---

---

---

---

---

---

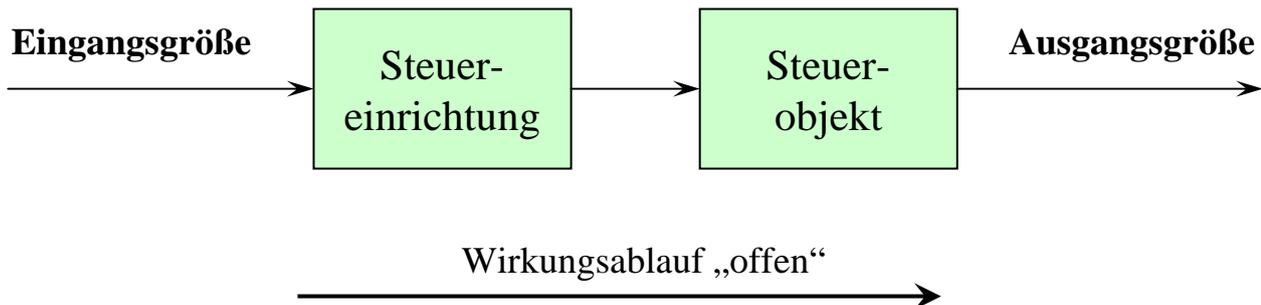
---

## 1.2 Grundbegriffe nach DIN 19226

Nach DIN 19226 gelten folgende Definitionen:

### Die Steuerung:

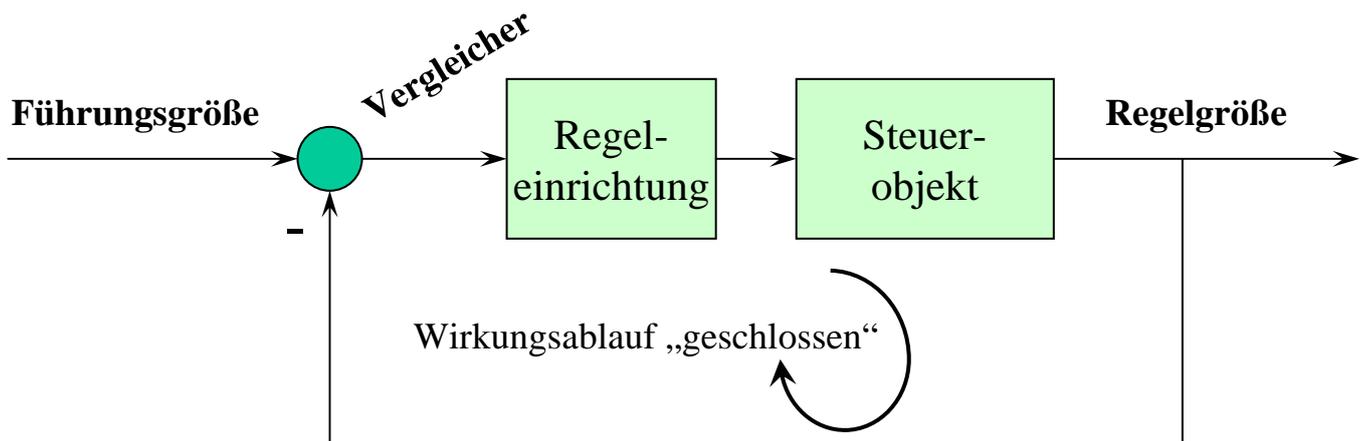
Das Steuern ist der Vorgang in einem System, bei dem eine (oder mehrere) Eingangsgröße(n) andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichnend für das Steuern ist der offene Wirkungsablauf ausgehend von der Eingangsgröße über die Steuereinrichtung, das Steuerobjekt, hin zur Ausgangsgröße. Im Englischen treffend als „Open Loop Control“ bezeichnet.



**Bild 1a: Steuerung**

### Das Regeln:

Das Regeln ist ein Vorgang, bei dem eine Größe (die **Regelgröße**) fortlaufend erfasst und mit einer anderen Größe, der **Führungsgröße**, verglichen wird. Das Ergebnis des Vergleichs dient einer Regeleinrichtung dazu, Maßnahmen zum Ausgleichen von Differenzen einzuleiten, um so die Führungsgröße mit der Regelgröße möglichst in Übereinstimmung zu bringen. Weil im Gegensatz zur Steuerung auf die Regelgröße Bezug genommen wird, ergibt sich ein geschlossener Wirkungsablauf, im Englischen als „Closed Loop Control“ bezeichnet. Hier sprachlich abgesetzt durch die Begriffe Führungs- und Regelgröße anstelle der Eingangs- und Ausgangsgrößen bei Steuerungen.

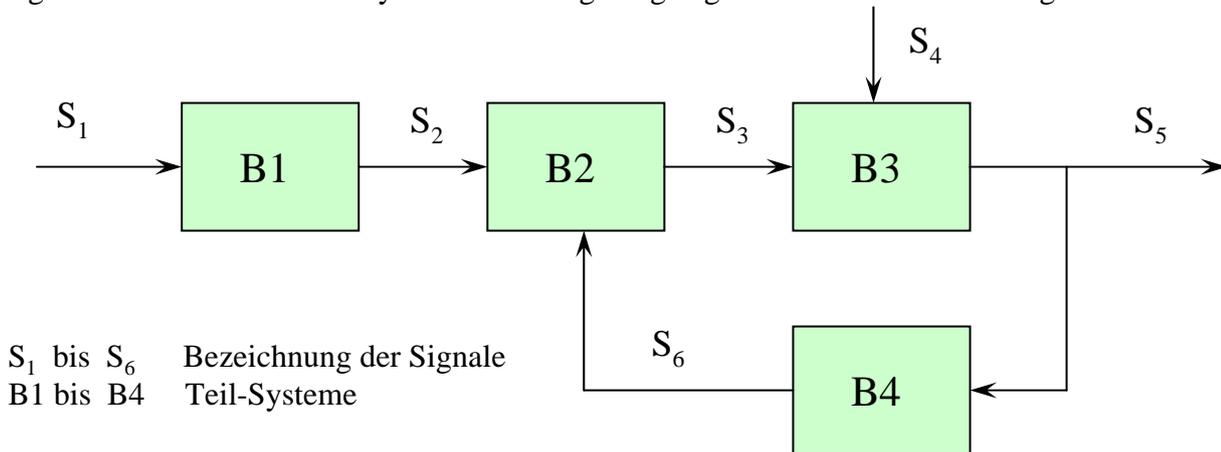


**Bild 1b: Regelung**

Regelungen sind robuster als Steuerungen, falls außer der Steuereinrichtung noch andere Dinge, wie z.B. Störgrößen, auf das Steuerobjekt einwirken, die auch mehr oder weniger Einfluss auf die Ausgangsgröße ausüben können. Die Robustheit kommt durch die Rückführung der Regelgröße und den anschließenden Vergleich zwischen Führungs- und Regelgröße zustande. Die Rückführung bringt dafür jedoch unter bestimmten Bedingungen Probleme mit sich!

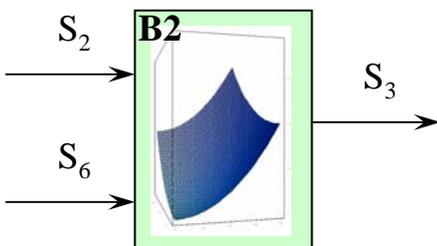
### 1.3 Wirkungsplan

Der Wirkungsplan ist eine symbolisierte Darstellung der wirkungsmäßigen Zusammenhänge zwischen den Signalen eines Systems oder einer Anzahl von aufeinander einwirkender Systeme. Können Teil-Systeme mit ihren zugehörigen Signalen gegeneinander abgegrenzt werden, so werden sie als Rechteck (Block) dargestellt; Eingangssignale werden als Pfeile gezeichnet, die in die Blöcke münden, Ausgangssignale kommen als Pfeile aus den Blöcken heraus. Mit Hilfe der Pfeile ist die Struktur des Signalfusses innerhalb des Systems eindeutig festgelegt und leicht verständlich gemacht.



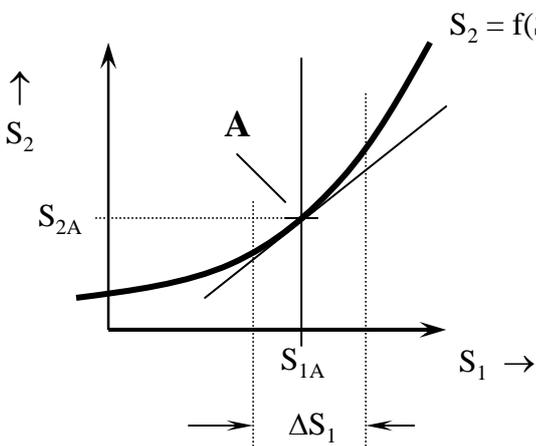
**Bild 2: Wirkungsplan**

Um die Übersichtlichkeit und den Informationsgehalt eines Wirkungsplans weiter zu erhöhen, können die Blöcke Hinweise über ihre Übertragungseigenschaften enthalten. Die Übertragungseigenschaften können sich je nach Anwendung auf das statische oder dynamische Verhalten beziehen.



In der Beschreibung des **statischen** Übertragungsverhaltens taucht die Zeit  $t$  nicht auf. Daher kann man für die Zuordnung von Ausgangs- zu Eingangssignal Tabellen, interpolierte Tabellen, d.h. Kennlinien (eindimensional), oder auch Kennfelder (mehrdimensional) verwenden. Bild 3 zeigt z.B. den Block B2 mit „Innenleben“ für zwei Eingangssignale.

**Bild 3: Block B2**,  $S_3 = f(S_2, S_6)$ ; z.B:  $S_3 = S_2^2 + S_6^2$



Sind die Zusammenhänge empirisch gefunden worden, so enthalten die Kennlinien meist auch Nichtlinearitäten. Bewegt sich das System im regulären Betrieb nur um einen kleinen Bereich  $\Delta S_1$  um einen festen „Arbeitspunkt“  $A(S_{1A}, S_{2A})$ , lässt sich die Kennlinie in A linearisieren (Bild 4). Das vereinfacht den Aufwand und macht die Aufgabe wieder für die lineare Regelungstheorie zugänglich.

Die Funktion  $S_2 = f(S_1)$ , die das wirkliche Systemverhalten beschreibt, wird durch

$$S_2 \approx S_{2A} + \left. \frac{df(S_1)}{dS_1} \right|_{S_1=S_{1A}} \cdot (S_1 - S_{1A})$$

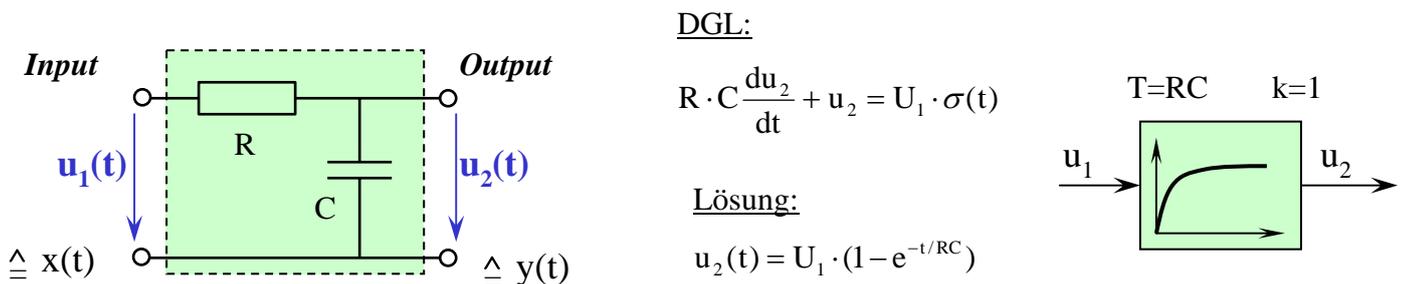
approximiert.

**Bild 4: Block B1, Nichtlinearität**

Unter dem **dynamischen** Verhalten eines Systems versteht man die **zeitliche** Abhängigkeit des Ausgangssignals  $y(t)$  bei definierter Änderung des Eingangssignals  $x(t)$ . Die Darstellung dieser Abhängigkeit kann graphisch als Zeitschrieb oder als Oszillogramm geschehen, rechnerisch als Zeitfunktion aus z.B. einer gelösten Differentialgleichung (DGL). Für die Charakterisierung eines Systems im Zeitbereich wird als Eingangssignal  $x(t)$  gerne die Sprungfunktion  $\sigma(t)$  gewählt:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < 0 \\ 1 & \text{für } t \geq 0 \end{cases}$$

Die Systemreaktion  $y(t) = h(t)$  heißt dann Sprungantwort oder Übergangsfunktion  $h(t)$ . Anhand eines einfachen RC-Glieds soll das Aufstellen eines Blocks im Wirkungsplan illustriert werden.



**Bild 5:** a) System „RC-Tiefpass“      b) DGL und Lösung      c) Block-Symbol

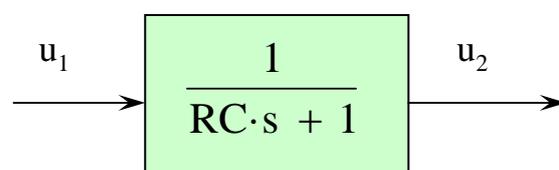
Neben der Beschreibung im **Zeitbereich** existiert gleichberechtigt die Beschreibung eines Systems im **Frequenzbereich**. Durch Laplace-Transformation der DGL gelangt man zur Beschreibung eines Systems im **Frequenzbereich**. Basis ist die Übertragungsfunktion (vgl. Komplexe Wechselstromrechnung).

$$\mathcal{L} \left\{ R \cdot C \frac{du_2}{dt} + u_2 = u_1 \right\} = R \cdot C \cdot s \cdot u_2(s) + u_2(s) = u_1(s)$$

Durch Ausklammern von  $u_2(s)$  und Umstellen kann man eine Übertragungsfunktion  $F(s)$  definieren:

$$\frac{u_2(s)}{u_1(s)} = F(s) = \frac{1}{RC \cdot s + 1}$$

Die Übertragungsfunktion wird schließlich in den entsprechenden Block des Wirkungsplans eingetragen.

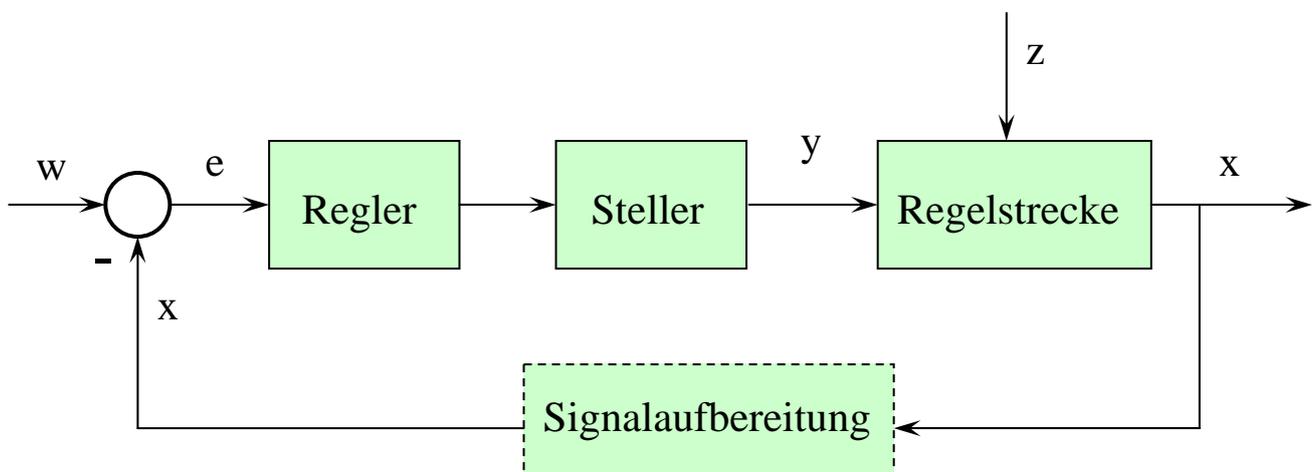


**Bild 6:** Block mit Übertragungsfunktion

## 1.4 Der einschleifige Standard-Regelkreis

### Wirkungsweise und Terminologie

Beim einschleifigen Standard-Regelkreis gibt es lediglich eine einzige Regelgröße  $x$ , auf die in gewünschter Weise einzuwirken ist. Sie wird ständig gemessen und gelangt über den Rückführzweig nach vorne in das Summierglied. Hier wird die Regeldifferenz  $w - x = e$  gebildet. Die Regeldifferenz  $e$  dient dem Regler als Eingangssignal. Der Regler löst beim Auftreten einer Regeldifferenz  $w - x \neq 0$  einen entsprechenden Reglereingriff aus, indem er über einen Steller die Stellgröße  $y$  auf die Regelstrecke aufschaltet. Primäres Regelziel ist es, die Regelgröße konstant zu halten. Erst dann strebt der Regelungstechniker an, die Regeldifferenz zu null zu machen, auch wenn eine Störgröße  $z$  in einer für den Regler unvorhersehbaren Weise auf die Regelstrecke aufschlägt.



mit:  $w$  Führungsgröße  
 $x$  Regelgröße  
 $e$  Regeldifferenz  $w - x$   
 $y$  Stellgröße  
 $z$  Störgröße

Kommentar: Im Rückführzweig befindet sich in den meisten industriellen Reglern noch eine Signalaufbereitung und/oder Verstärkung der Messsignale. (Notwendig zur Reduktion von Störungen im Messsignal)

**Bild 7 : Der einschleifige Standard-Regelkreis**

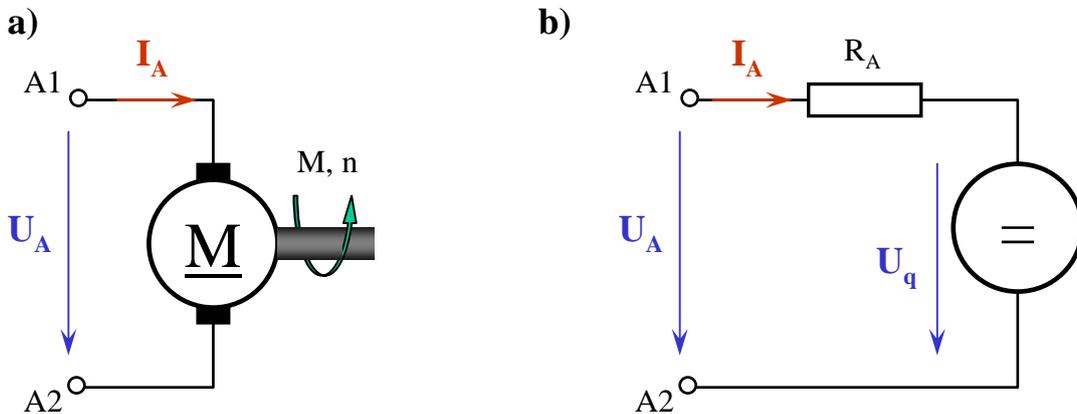
Aufgrund der hier vorausgesetzten Linearität lässt sich zuerst untersuchen, wie gut ( $\rightarrow$  Frage des Optimierungskriteriums!) der Regler die Regelgröße  $x$  mit einer Führungsgröße  $w$  in Übereinstimmung bringt. Die Störgröße  $z$  ist während dieser (theoretischen) Untersuchung gleich null ( $z = 0$ ). Die so ermittelten Eigenschaften des Regelkreises bezeichnet man als sein **Führungsübertragungsverhalten**.

Danach kann man das **Störübertragungsverhalten** des Regelkreises untersuchen. Analog zur obigen Untersuchung setzt man nun die Führungsgröße  $w$  gleich null oder konstant und untersucht den Einfluss z.B. eines Störgrößensprungs  $z = Z \cdot \sigma(t)$  auf die Regelgröße  $x$ . Ziel ist es, den Einfluss einer Störgröße zu eliminieren. Diese Untersuchung gibt Auskunft über das **Störübertragungsverhalten** des Regelkreises.

Aufgrund der Linearität des Systems werden sich im Betrieb des Regelkreises Führungs- und Störgrößenänderungen in der Regelgröße entsprechend ungestört überlagert wiederfinden, gemäß Superpositionsprinzip. Folglich ist die Regelkreissynthese dann auch meist ein Kompromiss aus einer Optimierung auf **Führungs-** und **Störübertragungsverhalten**.

## 1.5 Die Regelstrecke

Die im Laborversuch zu untersuchende Regelung soll einem Gleichstrommotor (DC-Motor) eine konstante, d.h. lastunabhängige Drehzahl aufprägen. Bevor man jedoch mit dem Reglerentwurf beginnen kann, ist es zwingend notwendig, sich eine genaue Kenntnis über die Regelstrecke zu verschaffen. Dies in Theorie und Praxis! Die Regelstrecke ist hier ein kleiner permanentmagneterregter DC-Motor. Bild 8 zeigt das Schaltplansymbol und einen Ersatzschaltplan, welcher das stationäre (und sogar quasistationäre) elektrische Betriebsverhalten der Maschine praxistauglich beschreibt.



A1, A2	Ankerklemmen	$R_A$	Ankerkreiswiderstand
$U_A$	Ankerspannung	$U_q$	innere induzierte Spannung (auch Gegen-EMK)
$I_A$	Ankerstrom	$M, n$	Drehmoment und Drehzahl

**Bild 8: Gleichstrommaschine, a) Schaltplansymbol, b) Ersatzschaltplan elektrisch**

Nach Kirchhoff ist die an den Klemmen A1 und A2 angelegte Spannung  $U_A$  gleich der Summe aus dem Spannungsfall über dem Ankerkreiswiderstand  $R_A$  und der induzierten Spannung  $U_q$ :

$$U_A = R_A \cdot I_A + U_q \quad (1)$$

Die im Anker induzierte Spannung  $U_q$  ist der Drehzahl  $n$  direkt proportional:

$$U_q = k_U \cdot n \quad (2)$$

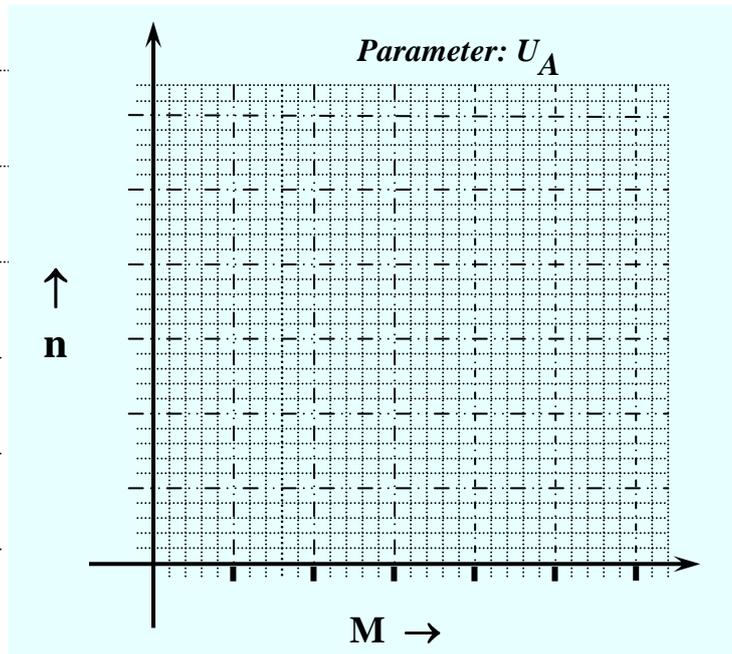
wobei  $k_U$  eine spezifische Motorkonstante ist, die Dinge wie Anzahl der Ankerleiter, magnetischen Fluss der Maschine, Rotorvolumen etc. enthält.

Das Drehmoment  $M$  der Maschine ist direkt proportional zum Ankerstrom  $I_A$ :

$$M = k_m \cdot I_A \quad (3)$$

wobei für  $k_m$  ähnliches gilt wie für  $k_U$ . Wie man auf die Konstanten  $k_U$  und  $k_m$  oder auch die Systemgleichungen einer Regelstrecke im Detail kommt, ist für den Regelungstechniker stets eine „Vorübung“ und wird als **Modellbildung** bezeichnet. (Entfällt hier aus Zeitgründen.) Denn für eine erfolgreiche Reglerauslegung ist es fundamental wichtig, sich ein Gespür für das statische und dynamische Verhalten der Regelstrecke „DC-Motor“ anzueignen. Als möglichen Zugang dazu bietet sich hier eine Auseinandersetzung mit den Systemgleichungen (1) (2) (3) an. Entsprechende Aufgaben zur Förderung des Verständnisses gibt es nachfolgend.

Entwickeln Sie aus den Systemgleichungen (1) ... (3) des Gleichstrommotors die Drehzahl-Drehmomentkennlinie  $n = f(M, U_A)$  mit  $U_A$  als variablem Parameter!



**Bild 8: Drehzahl/Drehmoment Kennlinie**

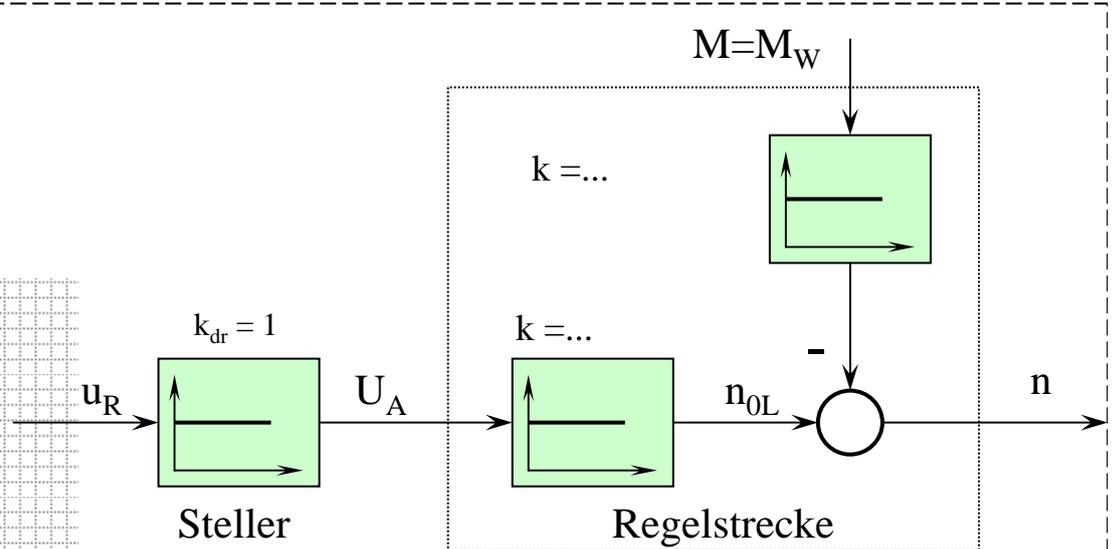
Welche wichtigen Eigenschaften eines Gleichstrommotors lesen Sie bei  $M=0$  (d.h. **idealer Leerlauf**) aus der Kurvenschar der Drehzahl-Drehmomentkennlinien heraus?

Wie groß ist der Ankerstrom  $I_A$  im idealen Leerlauf?

Wie könnte man die Achsen der Drehzahl-Drehmomentkennlinien noch beschriften? (Hinweis: Systemgleichung (2) und (3) ansehen!)

Der Gleichstrommotor wird zunächst bei  $U_A = \text{konst.}$  Im idealen Leerlauf, d.h. Motormoment  $M = \text{Lastmoment } M_W = 0 \text{ Nm}$  betrieben. Danach wird das Lastmoment  $M_W$  langsam gesteigert. Wieso gibt die Motordrehzahl  $n$  mit wachsendem  $M_W$  immer mehr nach?

Bild 9 zeigt fragmentarisch den bisher entwickelten Wirkungsplan der Regelstrecke DC-Motor mit der Ankerspannung  $U_A$  als Input,  $M_W = M$  als Störgröße und der Drehzahl  $n$  als Output. Der Steller (Bild 7) heißt hier Motortreiber und verstärkt das Ausgangssignal  $u_R$  des Reglers im vorliegenden Versuch mit dem Faktor  $k_{dr} = 1$  (Proportional-Glied)



**Bild 9: Wirkungsplan des DC-Motors mit Steller**

- 1.) Bestimmen Sie die beiden Verstärkungen  $k = \dots$  der Blöcke der Regelstrecke und tragen diese in den Wirkungsplan ein! (Hinweis: Formel  $n = f(M)$  ansehen!)
- 2.) Betrachten Sie mit den Augen eines Regelungstechnikers ihren Wirkungsplan und machen Sie sich nochmals anhand des Signalflusses für die Fälle Störgröße  $M_W = 0$  und  $M_W \uparrow$  deutlich, wie die Signale  $u_R$  und  $M_W$  auf die Regelgröße „Drehzahl  $n$ “ einwirken.
- 3.) Entwickeln Sie den Wirkungsplan zu einem einschleifigen Standard-Regelkreis weiter, der die Drehzahl der Maschine regeln kann ( $\rightarrow$  Drehzahlregelung DC-Motor)
- 4.) Wie lauten die Übertragungsfunktionen  $F_F(s) = n/n_W$  und  $F_S(s) = n/M_W$  für einen PI-Regler?

.....

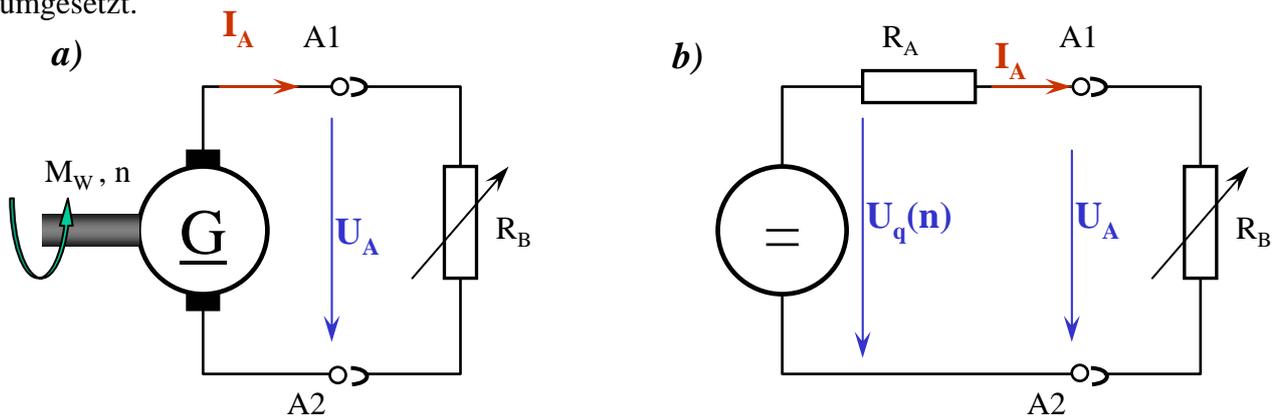
.....

.....

.....

## 1.6 Realisierung der Störgröße $M_W$

Damit man mit unterschiedlichen Störgrößen definiert experimentieren kann, ist an den DC-Motor ein Generator angekuppelt. Der Generator ist ebenfalls eine permanentmagneterregte Gleichstrommaschine gleicher Baugröße wie der DC-Motor und hat folglich auch den gleichen Ersatzschaltplan. An die Ankerklemmen A1 und A2 ist ein variabler Bremswiderstand  $R_B$  als Last angeschlossen. In diesem Betriebsfall ist die innere induzierte Spannung  $U_q$  stets größer als die Ankerspannung  $U_A$  weshalb die Gleichstrommaschine jetzt Ankerstrom  $I_A$  abgibt und als Generator arbeitet. Damit die Energiebilanz stimmt, muss sie dazu angetrieben werden. Sie nimmt dabei das Lastmoment  $M_W$  auf, wie gewünscht. Die mechanische Leistung an der Welle des Generators wird im Ankerkreiswiderstand  $R_A$  und vor allem im Bremswiderstand  $R_B$  in Joule'sche Wärme umgesetzt.



**Bild 10: Gleichstromgenerator, a) Schaltplansymbol, b) Ersatzschaltplan**

Diese einfache Methode, einen Motor mit einem Generator zu belasten, der auf einen Widerstand speist hat u.a. den Nachteil, dass die Belastung  $M_W$  mit der Drehzahl variiert. Möchte man diesen Effekt vermeiden, so müsste man den Bremswiderstand in geeigneter Weise der Drehzahl nachführen. Im Versuch spielt dies keine Rolle, da alle Versuche bei konstanter Drehzahl ausgeführt werden. Die folgende Vorbereitungsfrage ist daher optional und kann bei Interesse bearbeitet werden, um sich mehr Routine im Aufstellen und im „Lesen“ von Wirkungsplänen anzueignen!

a) Skizzieren Sie den Wirkungsplan obiger Anordnung, wobei jetzt gilt:

Regelgröße: Lastmoment  $M_W$

(Optional!) Stellgröße: Bremswiderstand  $R_B$

Störgröße: Antriebsdrehzahl  $n$

b) Fügen Sie weitere Blöcke derart hinzu, dass eine Lastmoment-Steuerung entsteht, die von der Drehzahl  $n$  nicht gestört wird!



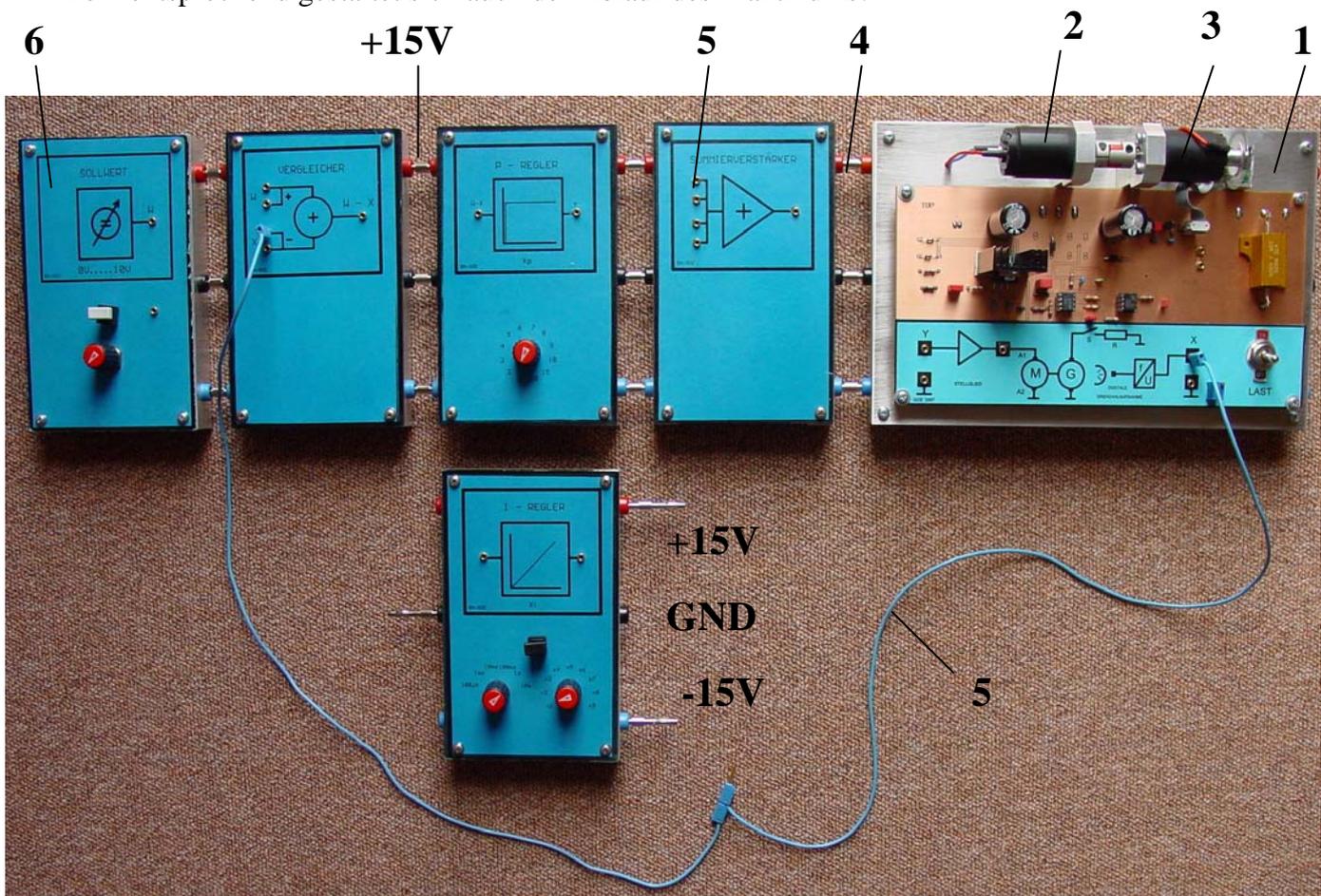
## 2. Beschreibung des Versuchsaufbaus

Bild 11 zeigt ein Foto des kompletten Versuchsaufbaus. Es gibt einen kleinen DC-Motor-Generator Satz (1), welcher als Regelstrecke dient. Regelziel ist, dem Gleichstrommotor (2) eine gewünschte konstante Drehzahl  $n$  aufzuprägen, die durch einen Generator (3) mit seinem Bremsmoment  $M_W$ , nicht gestört werden darf. Der DC-Motor wird also in der Betriebsart „Drehzahlregelung“ betrieben. Da die Drehzahl  $n$  als Regelgröße hier im Versuch stets konstant sein soll, entsteht in der Terminologie des Regelungstechnikers eine „Festwertregelung“ mit der Konsequenz einer weiteren sprachlichen Abgrenzung der Begriffe: Die Regelgröße heißt hier „Istwert“, die Führungsgröße ist der „Sollwert“.

Für die Experimente ist der Regler aus Gründen der Übersichtlichkeit in seine Funktionseinheiten zerlegt worden, die relevanten Teilschaltungen befinden sich in den blauen Modulen. Die Module können beliebig zusammengesteckt werden, da die Stromversorgung (+15V, GND, -15V) mit Hilfe der seitlich angeordneten Bananenstecker und -buchsen (4) durchgeschleift wird. Die Signalverbindungen werden mit den kleinen 2 mm Buchsen und den zugehörigen flexiblen Kabeln (5) hergestellt.

Dieses Konzept gestattet einen inkrementalen Aufbau und eine schrittweise Inbetriebnahme der Anlage. In anderen Worten: Sie beginnen mit Modul „Sollwert“ (6), nehmen es in Betrieb, testen dies so lange intensiv aus, bis Sie es im Griff haben und bauen dann das nächste Modul dazu. Diese Arbeitsweise hat sich in der Industrie immer wieder bewährt, weil die eigene Vorstellung mit der Anlage mitwachsen kann und ein Schritt auf den nächsten aufsetzt. Außergewöhnlichen oder nicht erwünschten Betriebszuständen kommt man so recht schnell auf die Spur.

Dem entsprechend gestaltet sich auch der Ablauf des Praktikums!



**Bild 11: Der modulare Versuchsaufbau**

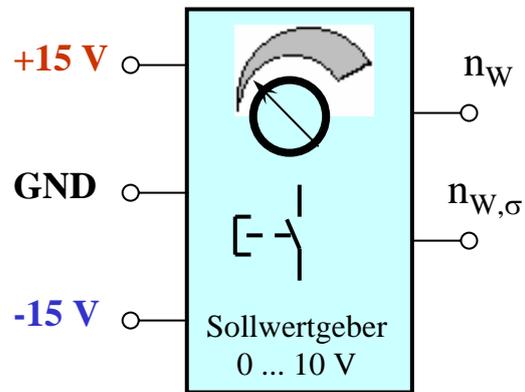


## 4. Voruntersuchungen

### 4.1 Messungen am Sollwertgeber

Bild 12 zeigt schematisch das Modul „Sollwertgeber“. Es verfügt über zwei Ausgänge  $n_W$  und  $n_{W,\sigma}$ . Auf dem Ausgang  $n_W$  liegt eine variable Gleichspannung, die mittels Potentiometer im Bereich 0 ... 10 V eingestellt werden kann. Es handelt sich dabei um eine Steuerspannung, die NICHT zur Speisung von Verbraucherlasten, hier z.B. dem Motor, geeignet ist!

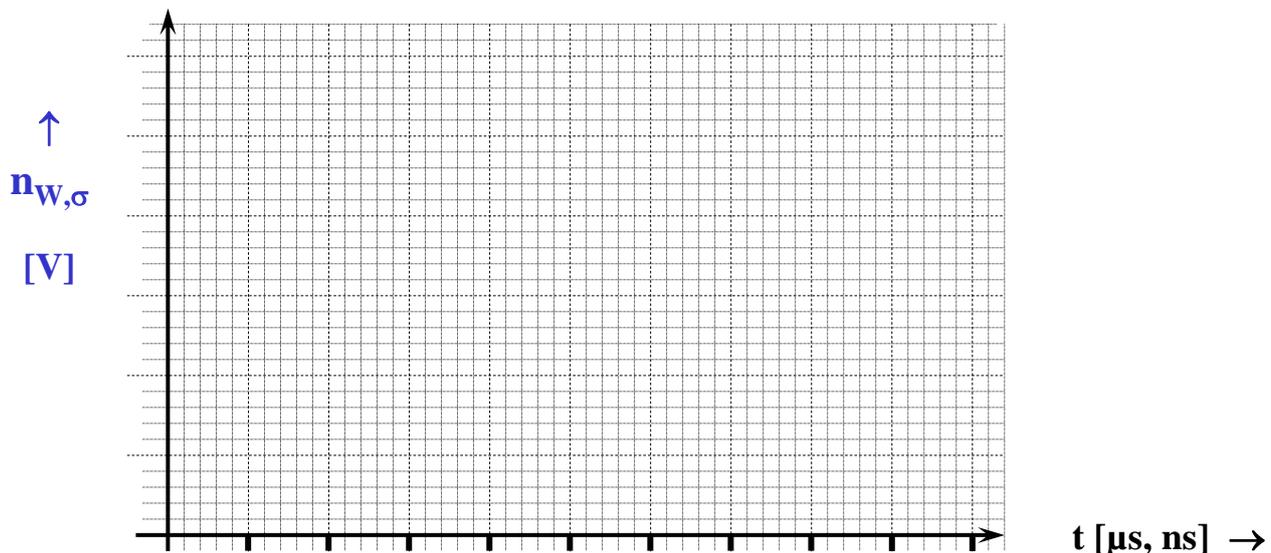
Der zweite Ausgang  $n_{W,\sigma}$  zeigt bei Drücken des (prellfreien!) Tasters einen Spannungssprung von 0V auf den aktuell eingestellten Wert  $n_s$ ; bei Loslassen des Tasters springt die Spannung wieder auf 0V zurück.



**Bild 12: Der Sollwertgeber**

#### Aufgaben:

- Schließen Sie den Sollwertgeber an die Laborstromversorgung an!
- Überprüfen Sie den Signalhub (Multimeter) und die Schwingungsweite (Oszilloskop) des Ausgangs  $n_W$ !
- Zeichnen Sie mittels Oszilloskop im Single-SEQ Mode (Einzelbild) einige Spannungssprünge  $n_{W,\sigma}$  auf!
- Überprüfen Sie, ob der Taster wirklich prellfrei ist!



**Fragen:** Was würde passieren, wenn man doch versucht, mit dem Sollwertgeber den Motor anzusteuern?

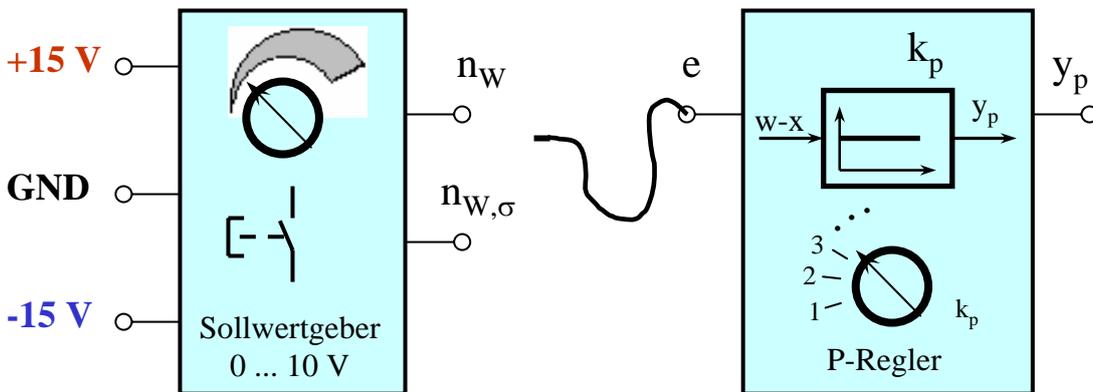
---

Welches Einschwingverhalten sollte die Steuerspannung  $n_W$  aufweisen und warum?

---

## 4.2 Messungen am P-Regler

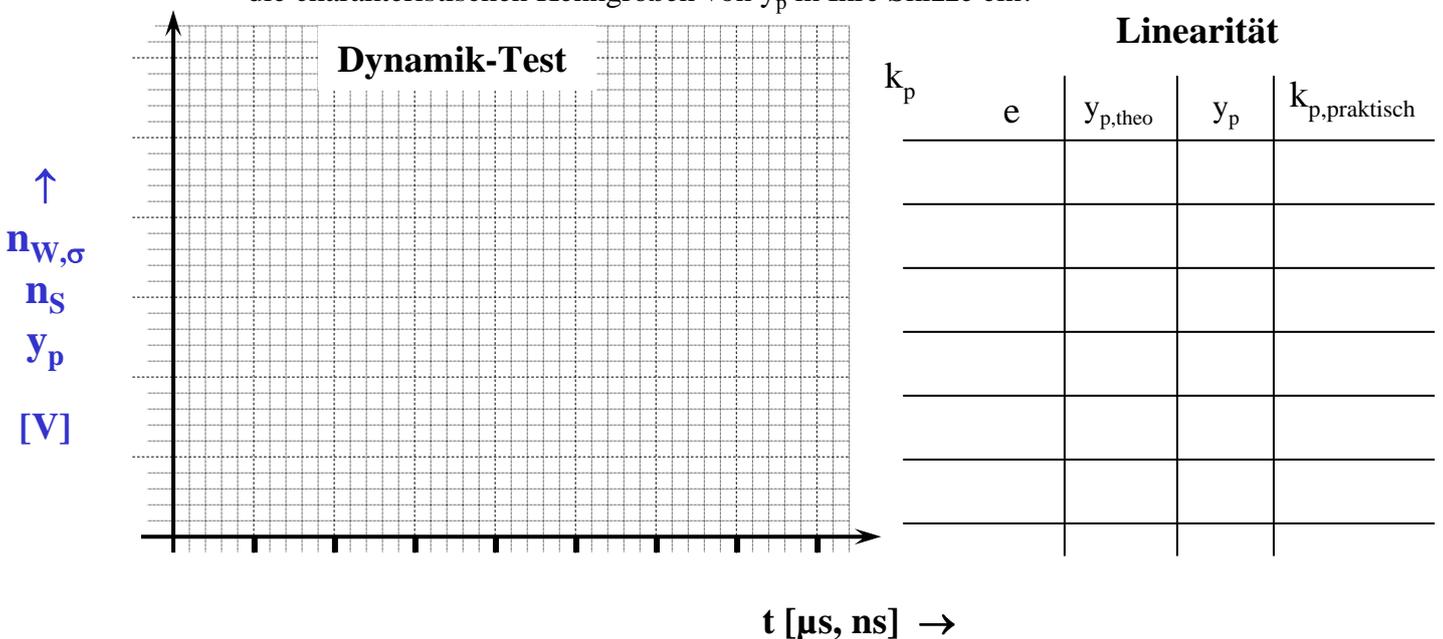
Bild 13 zeigt als den nächsten Schritt den Sollwertgeber, der den Eingang  $w-x = e$  des P-Reglers speist. Zu untersuchen sind die Übertragungseigenschaften des Reglers bei Anregung mit kontinuierlichen und sprungförmigen Signalen.



**Bild 13: Sollwertgeber mit nachgeschaltetem P-Regler**

### Aufgabe:

- Module gemäß Schaltungsvorschlag Bild 13 zusammenstecken, Stromversorgung anschließen !
- für **statische** Tests: Ausgang des Sollwertgebers  $n_w$  auf P-Regler-Eingang  $e = w - x$  legen !  
Überprüfen Sie die Linearität des P-Reglers, indem Sie bei festgelegter Reglerverstärkung  $k_p$  verschiedene Eingangsspannungs-Pegel an  $e$  anlegen und die Ausgangsspannung  $y_p$  mit der Theorie vergleichen (Vergl.: P-Übertragungsfunktion:  $y_p = k_p \cdot e$ )!
- für **dynamische** Tests: Ausgang des Sollwertgebers  $n_{w,\sigma}$  auf P-Regler-Eingang  $e = w - x$  legen  
Zeichnen Sie eine Sprungantwort des P-Reglers auf (Übergangsfunktion) und tragen Sie die charakteristischen Kenngrößen von  $y_p$  in Ihre Skizze ein!



**Fragen:** Ist der P-Regler schnell genug oder sollte im P-Regler ein OP mit höherer Dynamik eingesetzt werden?

Ist die Linearität des P-Reglers gut genug?

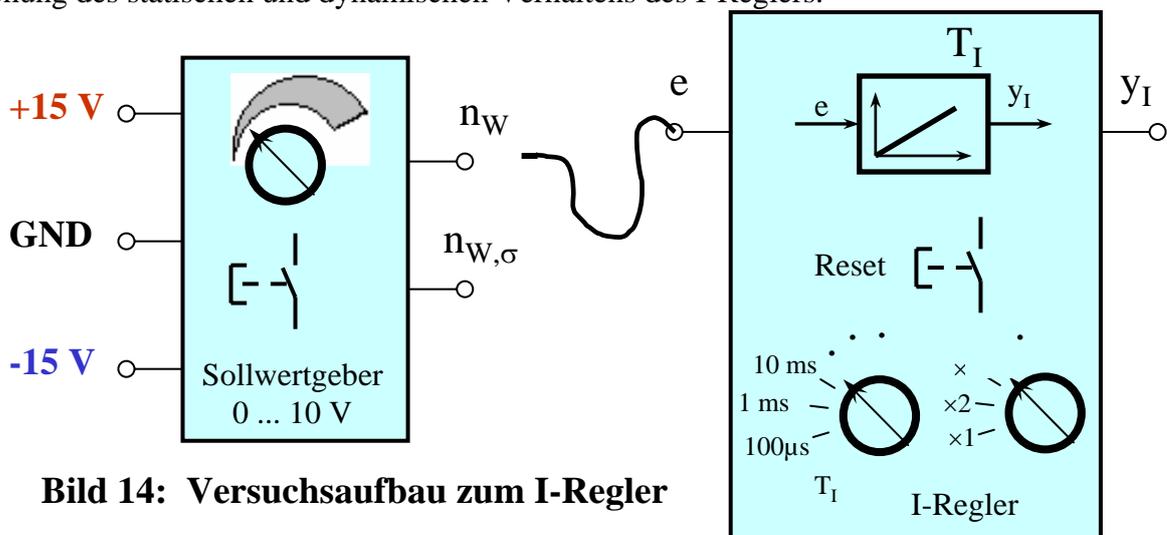
### 4.3 Messungen am I-Regler

Ein I-Regler integriert fortwährend das Eingangssignal  $e$  und gibt „Integral  $e$ “ als Ausgangssignal  $y_I$  aus. Bei einem konstanten Eingangssignal  $e = \text{konst.}$  entsteht eine rampenförmig ansteigende Spannung am Ausgang  $y_I$  des I-Reglers (Wirkungsplan). Durch die *Nachstellzeit*  $T_I$  stellt man die Steigung der Rampe ein. Im Zeitbereich wird das Verhalten des I-Reglers beschrieben durch:

Je kleiner die Nachstellzeit  $T_I$  (steht im Nenner!), desto steiler die Rampe und signifikanter der spätere Reglereingriff des Integrators!

$$y_I = \frac{1}{T_I} \int e \, dt$$

Der I-Regler im Versuch weist als Besonderheit einen Reset-Knopf auf. Damit löscht man das „Gedächtnis“ des I-Reglers, d.h. die gesamte Vorgeschichte, die am Eingang  $e$  aufintegriert zum aktuellen Wert  $y_I$  beigetragen hat, wird verworfen. Bei Drücken des Reset-Knopfes wird der Ausgang  $y_I$  auf 0V zurückgesetzt. Die Konfiguration in Bild 14 zeigt den Versuchsaufbau zur Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens des I-Reglers.



**Bild 14: Versuchsaufbau zum I-Regler**

#### Untersuchung des statischen Verhaltens, stationäre Endwerte:

In der Praxis treten bei Integratoren Schmutzeffekte auf wie **Driften**, das **Bias-Problem** und eine **Begrenzung** der Stellgröße  $y_I$ . Diese Schmutzeffekte stören die Regelungstechnik und müssen daher verstanden werden, um sie zu umgehen oder zu unterdrücken.

#### Aufgaben: Driften & Begrenzungen

- Stellen Sie am Ausgang  $n_W$  des Sollwertgebers 0V ein (Multimeter) und legen  $n_W$  auf  $e$  des I-Reglers!
- Die Nachstellzeit  $T_I$  ist auf 1s einzustellen, nach Rücksetzen des I-Reglers ist  $y_I$  aufzuzeichnen!
- Auswertung im nachfolgenden Diagramm mit Kommentierung, Kenngrößen und Parametrierung!
- Führen Sie die Untersuchung auch für kleinere und größere Nachstellzeiten  $T_I$  durch!
- Führen Sie die Untersuchung auch für  $n_W = 1 \text{ V}$  und  $n_W = -0.1 \text{ V}$  durch!

#### Fragen:

- Welche Spannung  $y_I(t \rightarrow \infty)$  müsste sich theoretisch bei  $e = \begin{cases} -0.1 \text{ V} \\ 0 \text{ V} \\ 1 \text{ V} \end{cases}$  zeigen?  $y_I = \begin{cases} \text{_____} \\ \text{_____} \\ \text{_____} \end{cases}$

-Worin bestehen also hier die Unterschiede zwischen Theorie und Praxis?

$e = -0.1 \text{ V} :$

---

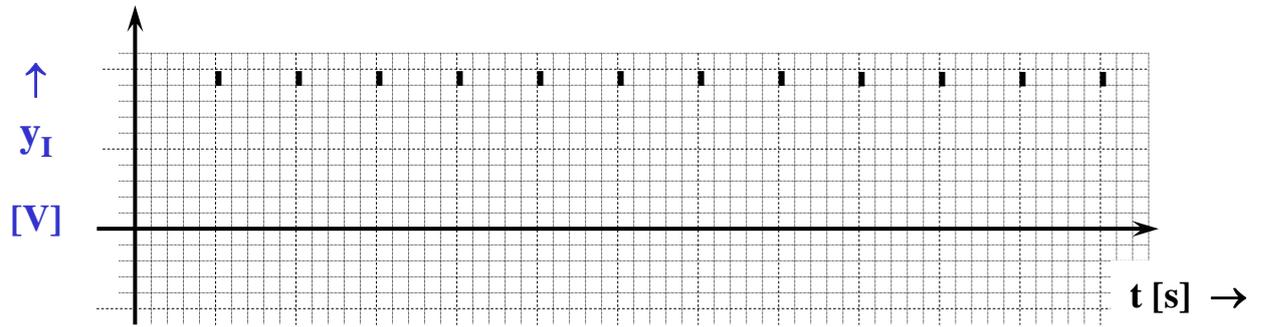
$e = 0 \text{ V} :$

---

$e = 1.0 \text{ V} :$

---

## Auswertung „Driften & Begrenzungen“



## 4.4 Messungen am PI-Regler

Ein PI-Regler entsteht durch Parallelisierung von P- und I-Regler. Der P- und der I-Regler werden mit dem selben Eingangssignal  $e$  beaufschlagt. Die Ausgangssignale  $y_P$  und  $y_I$  der beiden Regler werden im „Addierer“ zu  $y_{PI}$  aufsummiert. Im Zeitbereich lautet die beschreibende Gleichung:

$$y_{PI} = y_P + y_I = k_P \cdot e + \frac{1}{T_I} \int e \, dt$$

Bild 15 zeigt den Schaltungsvorschlag

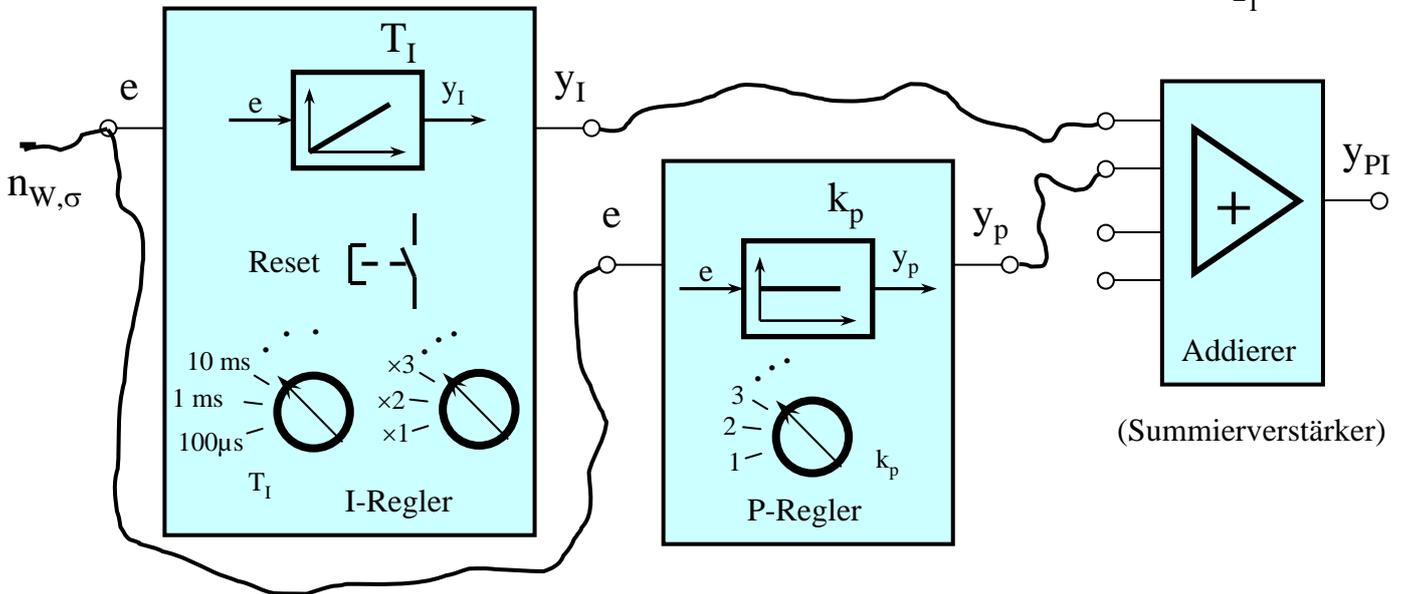
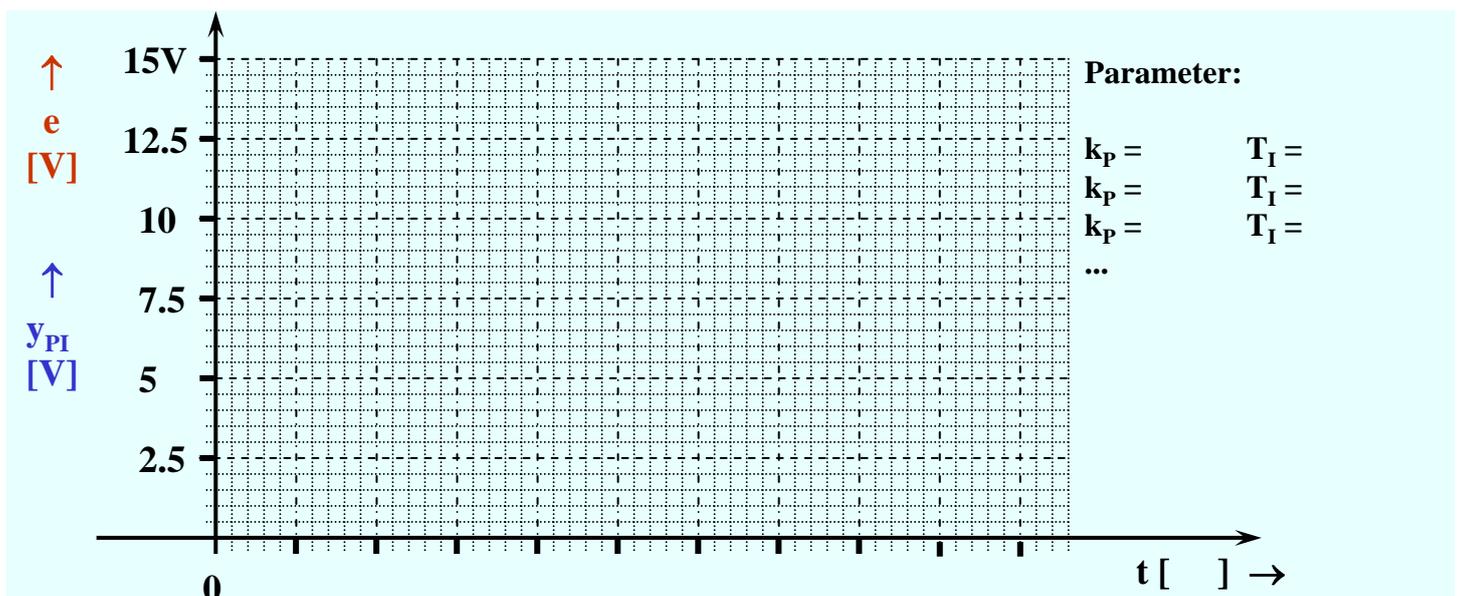


Bild 15: Versuchsaufbau zum PI-Regler

### Aufgabe: Übergangsfunktion PI-Regler

- Zeichnen Sie die Übergangsfunktion des PI-Reglers auf mit folgenden Größen und Parametern:  
Eingangsgröße:  $e = 1V \sigma(t)$ ; Reglerparameter:  $k_P = 3$ ;  $T_I = 100ms$ ; !
- Variieren Sie die Größen und Parameter, so dass Sie ein Gefühl für das Übertragungsverhalten eines PI-Reglers bekommen!

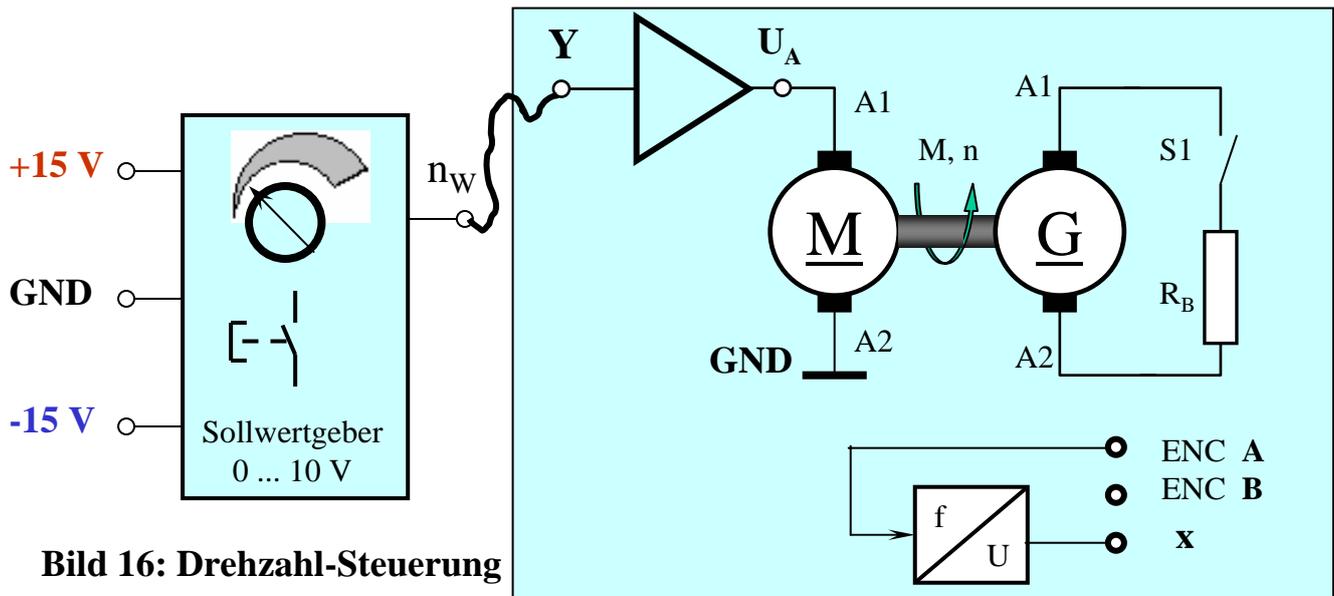


Falls Interesse und Zeit vorhanden ist, beaufschlagen Sie den Regler auch wieder mit Signalen aus dem Funktionsgenerator  $\sim \Delta$  oder  $\sim \sigma$ . Überlegen Sie sich dazu immer auf einem Beiblatt, wie die Systemreaktion aussehen muss, messen nach und korrigieren Ihre Vorstellung ggf.

## 5. Messungen an der Regelstrecke

### 5.1 Die Istwert-Erfassung

Die aktuelle Motordrehzahl wird mittels Gabellichtschranke und Strichscheibe (64 Striche), welche auf dem zweiten Wellenende des Generators montiert ist, in zwei TTL-Rechtecksignale „Encoder A“ und „Encoder B“ umgesetzt. Beide Signale sind über die 2mm Buchsen herausgeführt. „Encoder A“ liegt auf dem Eingang eines f/U-Wandlers, so dass die aktuelle Motordrehzahl auch als Analog-Spannung verfügbar ist.

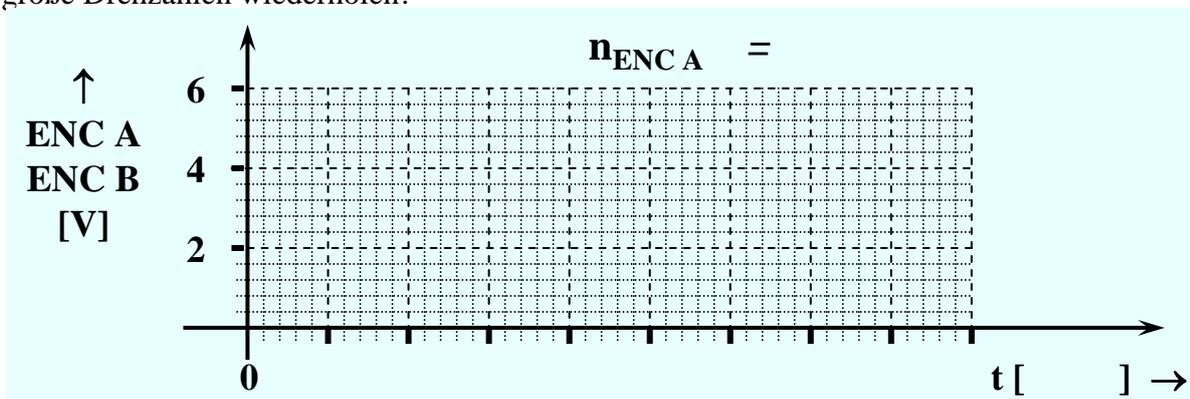


#### Aufgabe:

Die Aufzeichnung der Encoder-Signale und die Überprüfung der Linearität der Umsetzung der TTL-Rechtecksignale in einen analogen Spannungspegel ist Gegenstand dieser Untersuchungen. - Stellen Sie die Versuchsschaltung nach Bild 16 her!

- Lassen Sie den Motor langsam drehen und oszillographieren und skizzieren Sie beide Encoder-Signale!
- Ermitteln Sie daraus die aktuelle Drehzahl (64 Striche)!
- Messen Sie den Analogpegel der aktuellen Drehzahl!

Digitale Encoder arbeiten prinzipbedingt sehr genau. Nehmen Sie die berechneten Werte des Encoders als Referenz und prüfen Sie den Analogpegel auf Linearität, indem Sie die Untersuchung für mittlere und große Drehzahlen wiederholen!



**Bild 17: Encoder-Signale, niedrige Drehzahl**

	kleine Drehzahl	mittlere Drehzahl	große Drehzahl
<b>ENC A</b>	U/min		
analog x	V		
1V $\hat{=}$ U/min			

**Tabelle: Linearitäts-Check**

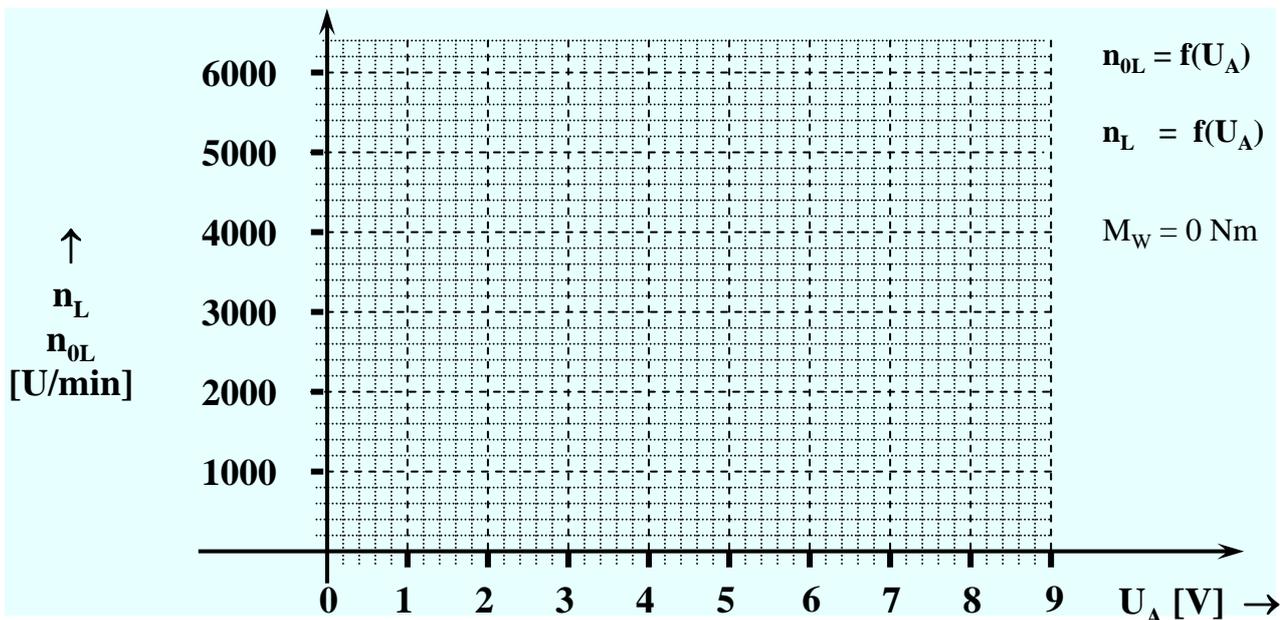
## 5.2 Die Leerlaufcharakteristik

### Aufgabe:

- Versuchsschaltung gemäß Bild 16!  
( Hinweis :Leerlauf: Generatorklemmen offen  $\rightarrow MW = 0 \text{ Nm}$  )
- Ermitteln Sie für Leerlauf (S1 *off*) die Kennlinie  $n_L = f(U_A)$  und tragen diese in Bild 18 ein!  
( Drehzahl aus Analogpegel x )
- Ermitteln Sie mit Hilfe der Versuchsergebnisse und der Systemgleichungen  
(Abschnitt 1.5, S. 6) die Motorkonstante  $k_U = \dots$
- Skizzieren Sie in Bild 18 die theoretische Kennlinie  $n_{0L} = f(U_A)$  gemäß Systemgleichung  
und erklären Sie den unterschiedlichen Verlauf der beiden Kennlinien!

Hinweise: Messwerte :  $0 < U_A < 10\text{V}$  in 1V Schritten

Umcodierungsfaktor: 1V  $\hat{=}$  U/min (f/U-Converter)



**Bild 18: Leerlaufcharakteristik  $n_L = f(U_A)$  und idealer Leerlauf  $n_{0L} = f(U_A)$  -20-**

### 5.3 Die Anlaufcharakteristik

Bei kleinen Motorspannungen zeigt sich ein nicht lineares Verhalten des Motors.  
Nehmen Sie dazu mit dem Oszilloskop eine Messung vor!

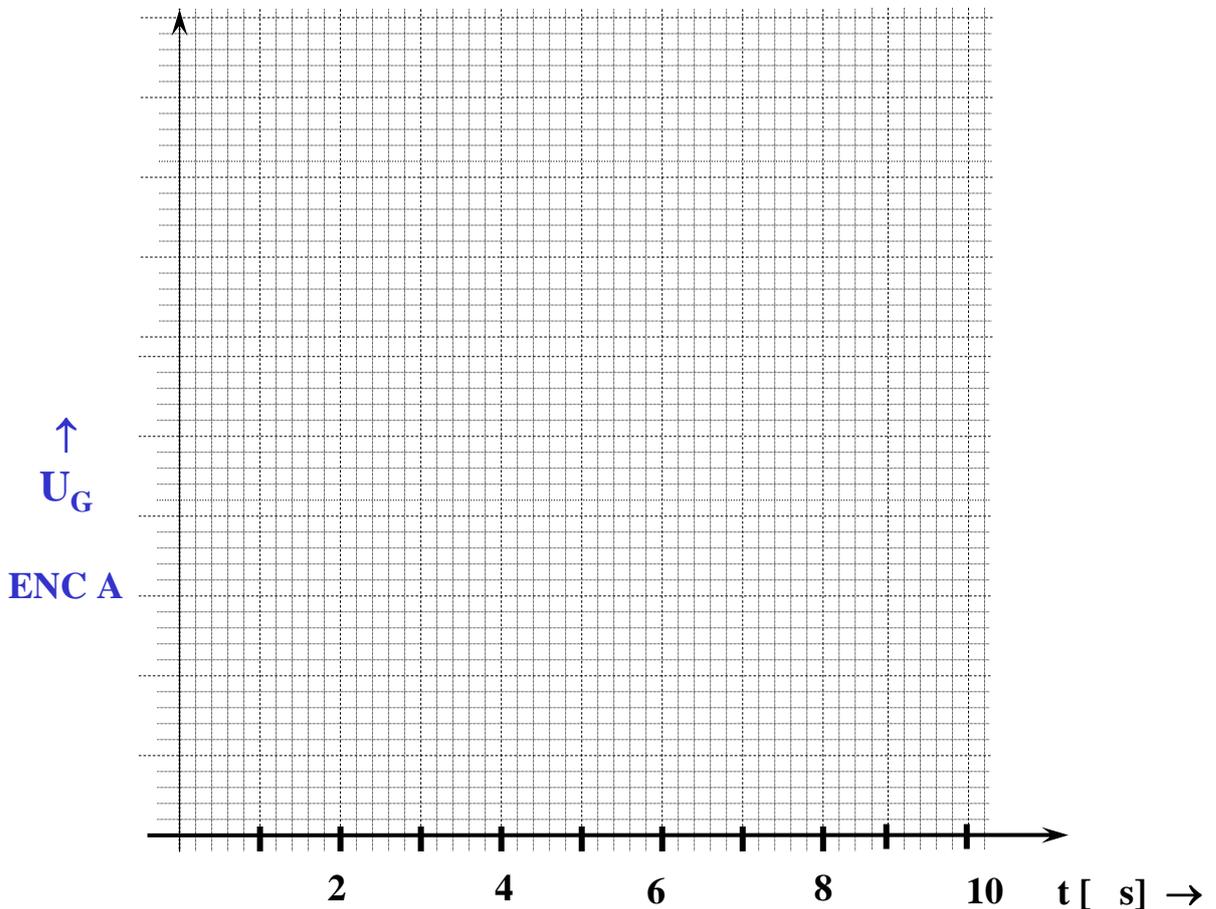
Steuern Sie den Motor am Stellglied mit einem Generator an.

Generatoreinstellungen:

- Funktion: Sinus
- Spannung: 4V (Spitze-Spitze)
- Frequenz: 0,2Hz

Oszilloskopeinstellungen:

- Y-CH1: 1V/Div
- Y-CH2: 0,5V/Div
- Timbase: 1s/Div
- Signal CH1: Generatorspannung
- Signal CH2: ENC A



Unterschied in  $n_L$  und  $n_{0L}$  wegen:

.....

.....

.....

## 6. Drehzahl-Steuerung (Regelkreis offen)

### Aufgabe:

- Versuchsaufbau gemäß Bild 16!
- Fahren Sie bei Leerlauf des DC-Motors eine Drehzahl von  $n_L = 3000$  U/min an!
- Prägen Sie dem DC-Motor einen (Nenn-)Laststoß auf, indem Sie den Bremswiderstand  $R_B$  am Generator zuschalten!
- Beobachten Sie, wie die Störgröße  $M_W$  auf die Drehzahl  $n$  des DC-Motors einwirkt!
- Diese Steuerung hat keine Möglichkeit, den Einfluss der Störgröße zu kompensieren!  
Wieso? ....

- Um wie viele U/min gibt die Leerlaufdrehzahl  $n_L = 3000$  U/min des DC-Motors bei  $M_{Wmax}$  nach?

$\Delta n = \dots\dots$

- Tragen Sie in Bild 19 den Betriebspunkt  $P(M_{Wmax}, n = n(M_{Wmax}))$  ein und ergänzen sie die Drehzahl-Drehmoment Kennlinie des DC-Motors!
- Tragen Sie die ideale Kennlinie bei einer Leerlaufdrehzahl von 2800U/min ein !

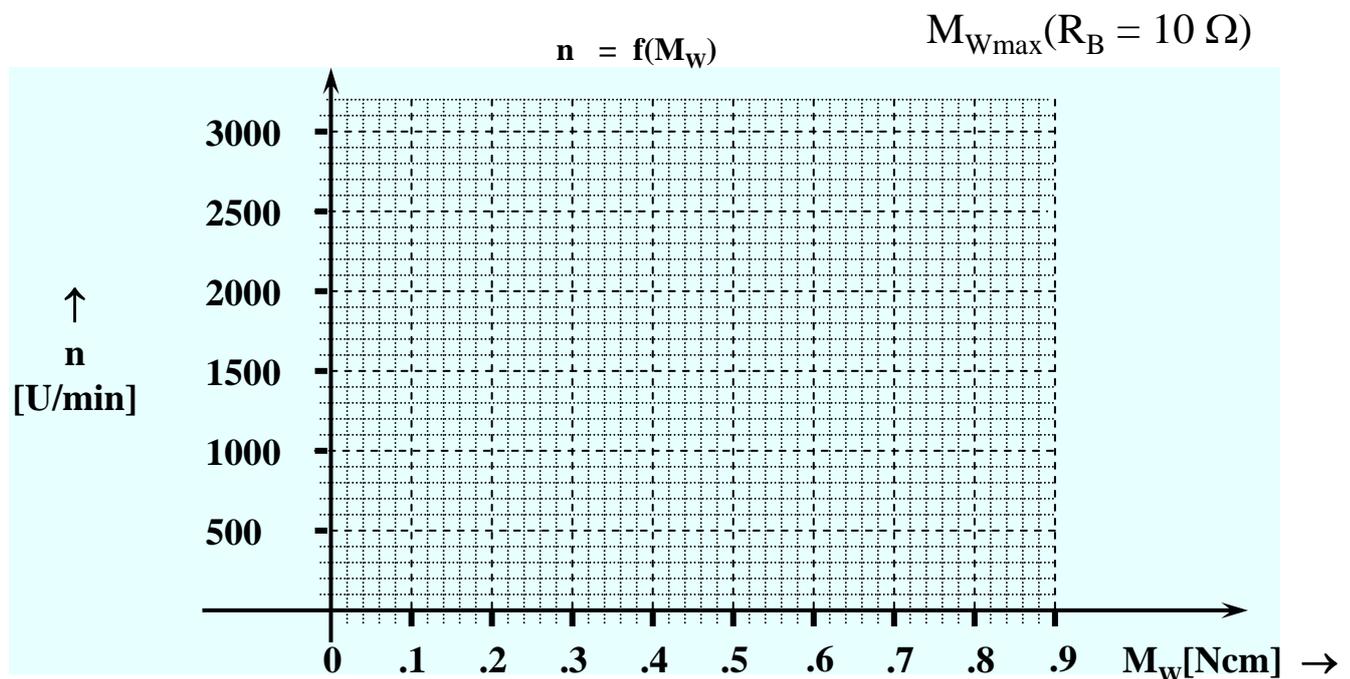


Bild 19: Nebenschlusscharakteristik  $n = f(M_W)$  eines DC-Motors

## 7. Regelung der Drehzahl (Regelkreis geschlossen)

Eine gut fundierte Reglerauslegung/Regleruntersuchung läuft immer nach der gleichen Choreographie ab. Man beginnt mit stationären Tests, weil dies das Einfachste ist. Außerdem erhält man meist Kennlinien als Ergebnis, die leicht zu interpretieren sind. Danach schließen sich Dynamik-Tests an. Hier interessiert das Verhalten des Regelkreises auf Führungsgrößen- und Störgrößensprünge. Die Untersuchungen zum P, I und PI-Regler laufen daher gleichartig ab.

### 7.1 Drehzahlregelung mit P-Regler

#### 7.1.1 Stationäre Untersuchungen

Im Bild 11 sind die Module bereits so gesteckt, dass die Struktur des einschleifigen Standard-Regelkreises mit P-Regler deutlich hervortritt. Die Rückführung (5) ist ebenfalls bereits verdrahtet. Der Summierverstärker ist optional und kann auch weggelassen werden.

#### Aufgabe:

- Stellen Sie die restlichen Signalverbindungen für einen P-Regler ( $k_p = 3$ ) im einschleifigen Standard-Regelkreis her!
- Beobachten Sie, wie man mit dem Sollwertgeber die Drehzahl variieren kann!
- Regeln Sie bei Leerlauf eine Drehzahl von  $n_L = 3000$  U/min ein!
- Beaufschlagen Sie den DC-Motor mit Nennmoment, indem Sie den Bremswiderstand  $R_B$  an den Generator anschalten!  
Anmerkung: Ist die Drehzahl einmal einjustiert, Sollwertgeber nicht mehr verstellen oder gar nachführen!
- Was beobachten Sie?
- Was können Sie aussagen, wenn Sie das Experiment mit unterschiedlichen Reglerverstärkungen  $k_p$  wiederholen?

Beobachtung „Leerlauf - Nennlast“ : .....

.....

.....

.....

Beobachtung „variables  $k_p$ “ : .....

.....

.....

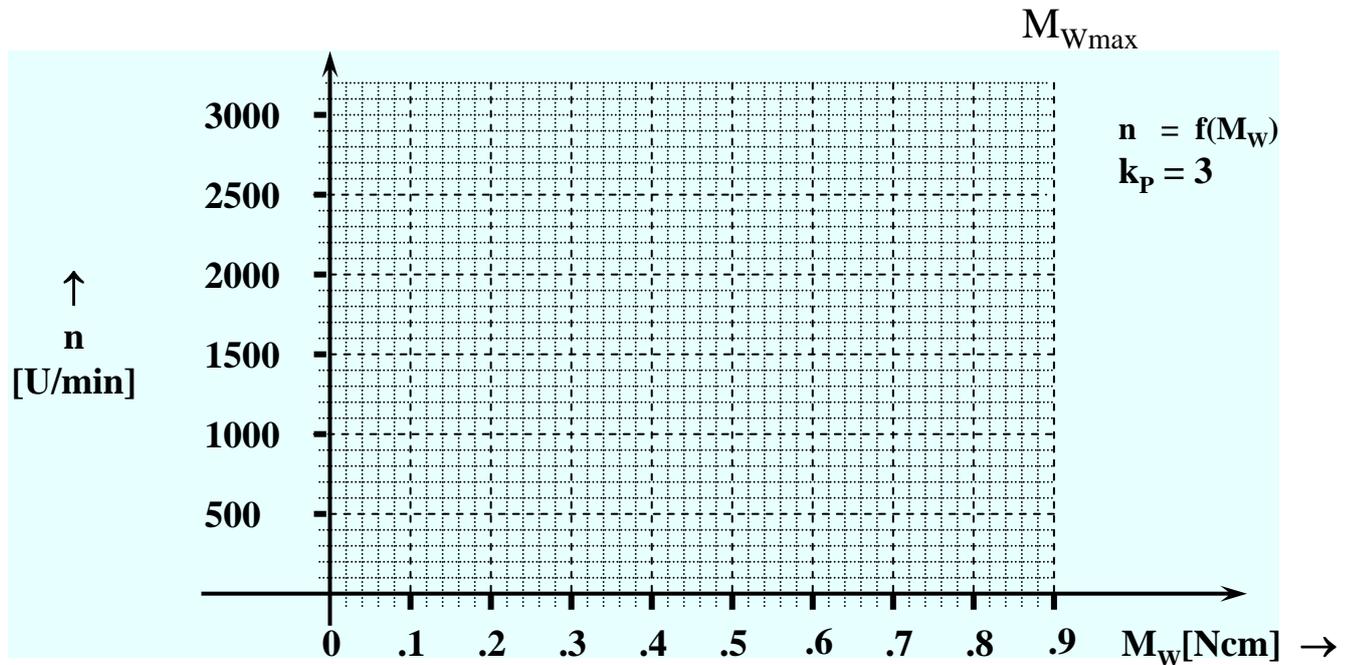
.....

.....

Die Auswertung dieser stationären Untersuchung zum Störübertragungsverhalten des Regelkreises lässt sich ebenfalls wieder in einer Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie zusammenfassen.

**Aufgabe:**(analog Abschnitt 6)

- Um wie viele U/min gibt die Leerlaufdrehzahl  $n_L = 3000$  U/min des DC-Motors, jetzt mit Unterstützung durch einen P-Regler ( $k_p = 3$ ), bei  $M_{Wmax}$  nach?  $\Delta n = \dots\dots$
- Tragen Sie in Bild 20 den Betriebspunkt  $P(M_{Wmax}, n = n(M_{Wmax}))$  ein und ergänzen sie die Drehzahl-Drehmoment Kennlinie des P-geregelten DC-Motors!



**Bild 20: Drehzahl-Drehmomentkennlinie eines DC-Motors mit P-Regler**

Je waagrechtener eine Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie verläuft, desto „steifer“ ist sie. Ist die Charakteristik des DC-Motors jetzt steifer geworden gegenüber Bild 19?

Begründung:.....

.....

Wovon hängt die Steigung bzw. **Steifigkeit** der Kennlinie jetzt ab?

Der P-Regler liefert für den Regelungstechniker hier kein befriedigendes Ergebnis. Wieso ist das Ergebnis nicht befriedigend und warum ist der P-Regler hier suboptimal?

.....

.....

.....

.....

.....

## 7.1.2 Dynamische Tests

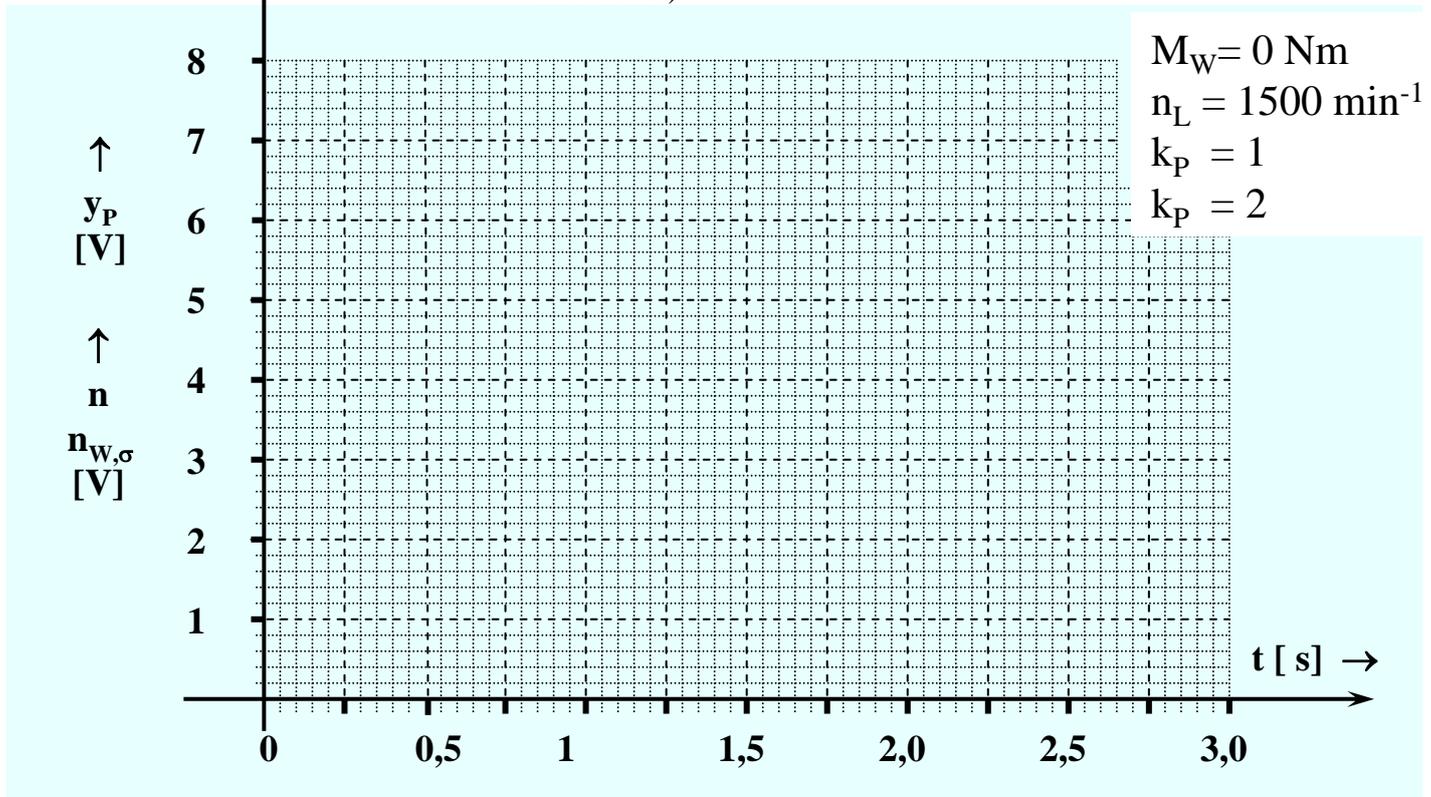
Systemreaktion auf einen Sollwertsprung  $n_w(t) = n_w \cdot \sigma(t)$

### Aufgabe:

- Gleicher Aufbau wie Bild 21, drehzahl geregelter Motor mit P-Regler,  $k_p = 1$ , DC-Motor im Leerlauf;
- Jedoch als Sollwert die Buchse  $n_{w,\sigma}$  im Sollwertgeber benutzen!
- Drücken Sie den Taster dauerhaft nieder und stellen Sie eine Leerlaufdrehzahl  $n_L = 1500 \text{ 1/min}$  ein!
- Nach Loslassen des Tasters fährt die Drehzahl auf null.
- Bei erneutem Drücken des Tasters regen Sie das Regelsystem mit dem Sollwertsprung an!
- Zu oszillographieren sind: Sollwertsprung  $n_{w,\sigma}$

Reglereingriff, d.h. Zeitverlauf der Reglerausgangsspannung  $y_P$   
 Zeitverlauf der Drehzahl  $n(t)$

(NB: Oszilloskop im „SINGLE-SEQ Modus“; Trigger auf  $n_{w,\sigma}$  als Referenz!)



**Bild 22: Zeitliche Verläufe der Systemgrößen  $n_{w,\sigma}$ ,  $y_P$  und  $n$**

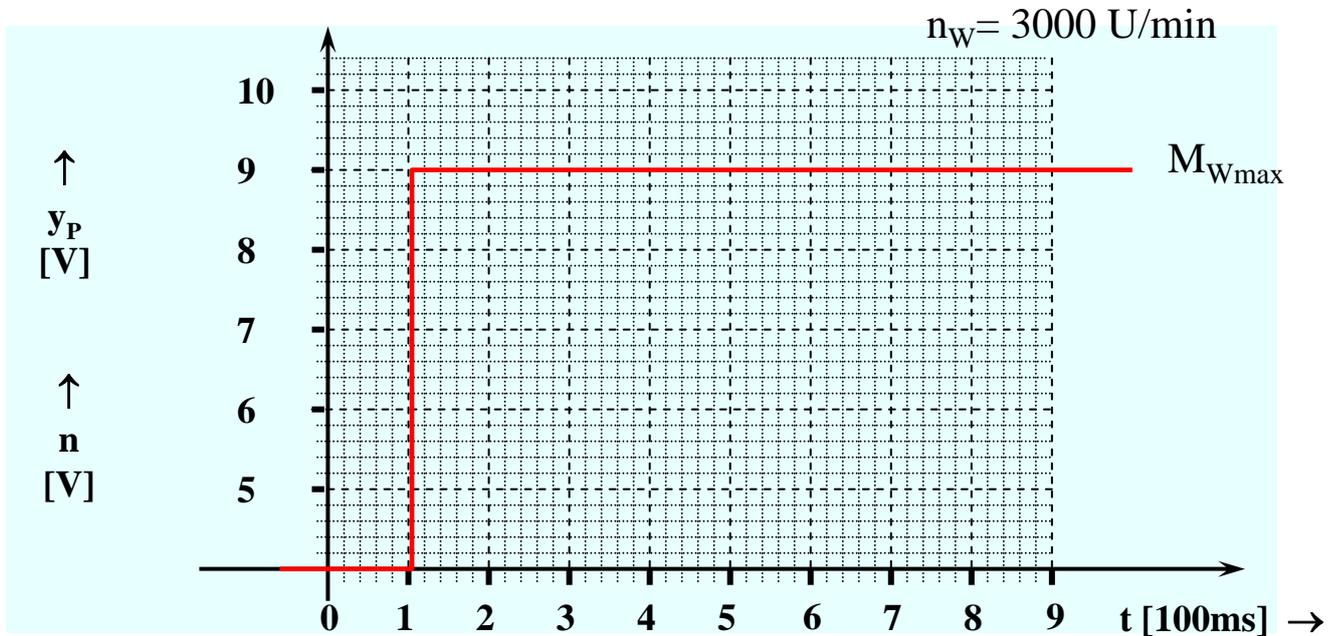
**Aufgabe:** Fahren Sie den Versuch auch bei der Reglerverstärkung  $k_p = 2$  durch!

Wie ändern sich Anregelzeit, Überschwinger  $n$  und bleibende Regeldifferenz für  $k_p \uparrow$  ?

## Systemreaktion auf einen Störgrößensprung

### Aufgabe:

- Gleicher Aufbau wie Bild 21,  $k_p = 3$  ; DC-Motor Leerlauf,  $n_L = 3000$  U/min
- Störgrößensprung auslösen durch Anschalten von  $R_B = 10 \Omega$  an den Generator!
- Zu oszillographieren sind: Reglereingriff, d.h. Zeitverlauf Reglerausgangsspannung  $y_p$   
Zeitverlauf der Drehzahl  $n$



**Bild 23: Zeitliche Verläufe der Systemgrößen  $M_w$ ,  $n_w$ ,  $y_p$  und  $n$**

Einstellung - Oszilloskop:

CH1: Sollwert  $n$   
 CH2: Reglerausgangsspannung  $y_p$   
 Y-Ablenkung: 1 V/Div (beide Kanäle)  
 Trigger: „SINGLE-SEQ-Mode“  
 Triggerung auf CH2, positive Flanke  
 Time Base: 50ms/Div

Grundeinstellung - Regler:  
 P-Regler:  $k_p = 3$

**Aufgabe:** Führen Sie den Versuch auch bei der Reglerverstärkung  $k_p = 7$  durch!

Wie beeinflusst  $k_p$  Ausregelzeit, Unterschinger von  $n$  und die bleibende Regeldifferenz?

Tendenz:  $k_p \uparrow$  : .....

.....

.....

Tendenz:  $k_p \downarrow$  : .....

.....

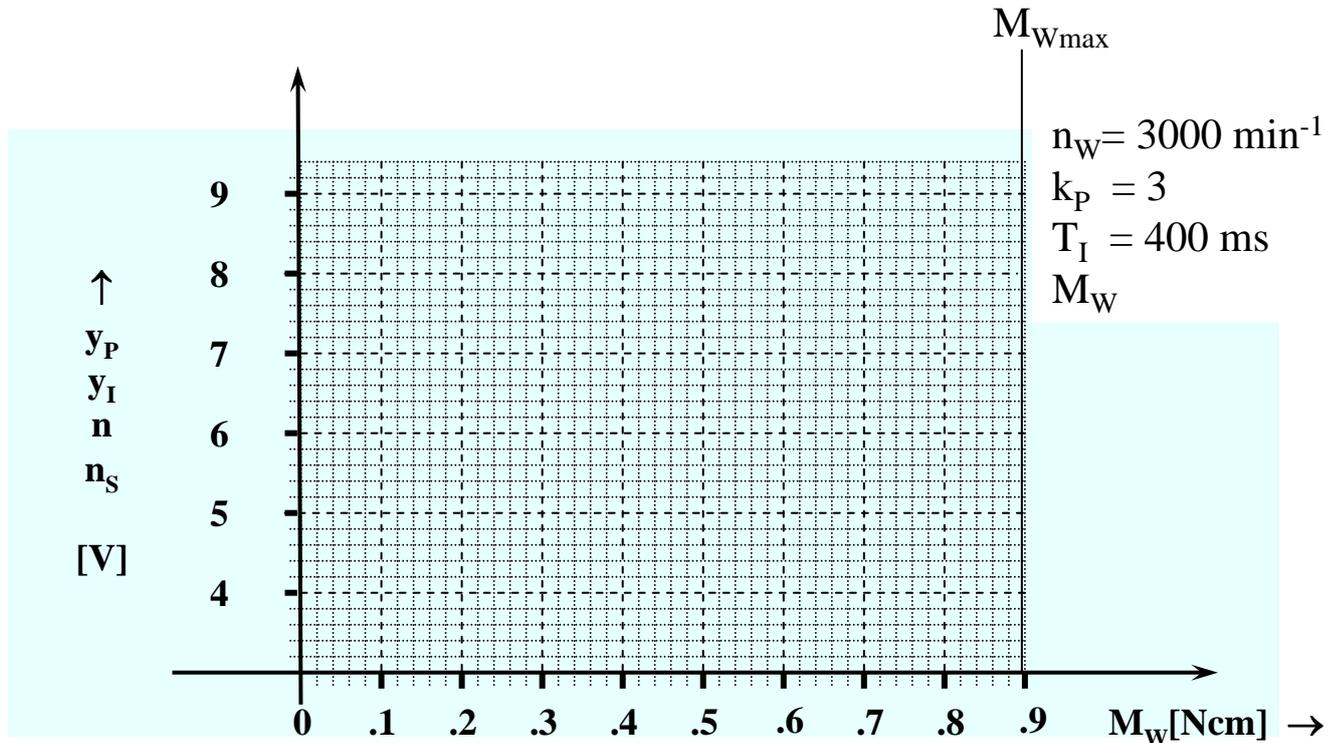
.....

## 7.2 Drehzahlregelung mit PI-Regler

### 7.2.1 Stationäre Untersuchungen

#### Aufgabe:

- Erweitern Sie den Aufbau zu einem PI-drehzahlgeregelten DC-Motor mit  $k_p = 3$  und  $T_I = 400 \text{ ms}$  !
- Regeln Sie bei Leerlauf eine Drehzahl von  $n_L = 3000 \text{ min}^{-1}$  ein!
- Messen Sie die relevanten Spannungspegel für Leerlauf und  $M_W = M_{Wmax}$  und skizzieren Sie sie!



**Bild 24: Drehzahl-Drehmomentkennlinie eines DC-Motors mit PI-Regler, und relevante Größen im Regelkreis**

Ergänzen Sie aus den beiden Parametersätzen der beiden Extreme **Leerlauf** und **max. Moment** die zugehörigen Kennlinien!

Begründung: .....

.....

.....

.....

.....

Ist der Regelungstechniker mit dem **stationären Verhalten** des Regelsystems zufrieden?

Ja

Nein

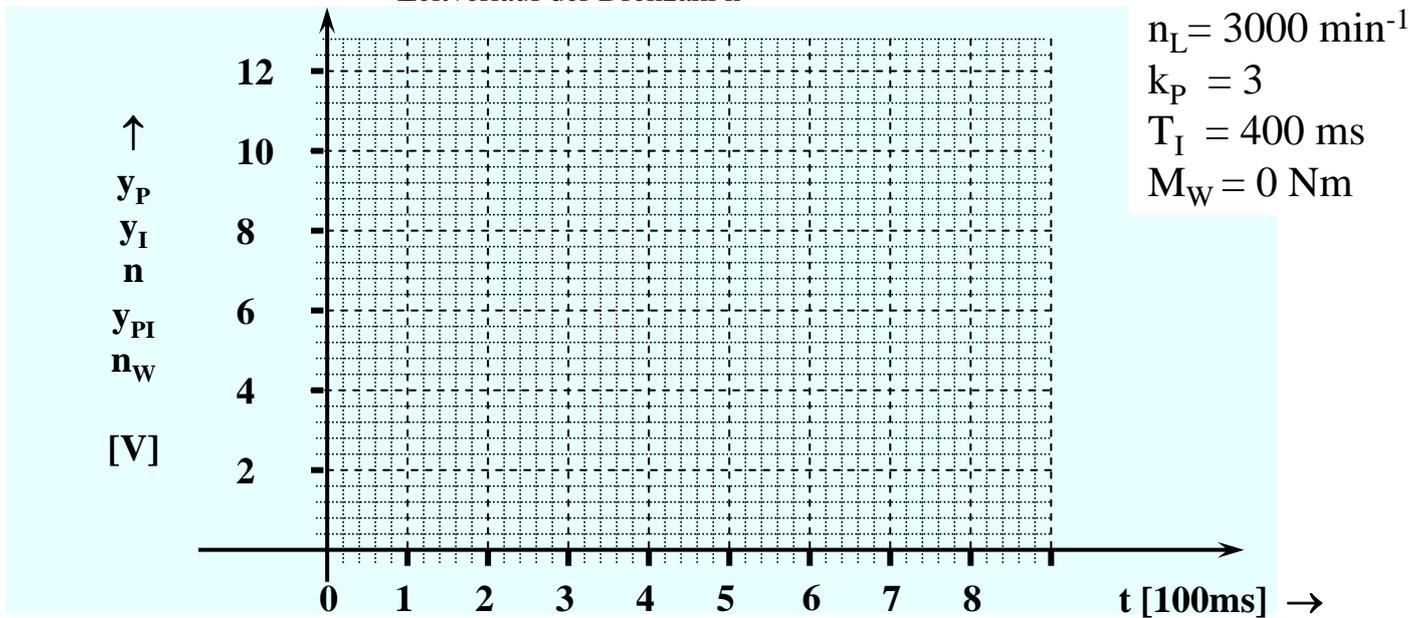
Begründung: .....

## 7.2.2 Dynamische Tests PI-Regler

### Systemreaktion auf einen Sollwertsprung:

#### Aufgabe:

- Regelkreiseinstellung wie bei der stationären Untersuchung 7.2.1
  - Gleiches Vorgehen wie 7.1.2 P-Regler!
  - Zu oszillographieren sind die relevanten Systemgrößen  $y_P$ ,  $y_I$ ,  $y_{PI}$ ,  $n$ ,  $n_W$
- Zeitverlauf der Drehzahl  $n$



**Bild 25: Zeitliche Verläufe der relevanten Systemgrößen**

Sie wollen mit der Drehzahlregelung einen DC-Motor für eine Werkzeugmaschine betreiben. Hier sind Überschwinger kritisch, da sonst z.B. ein Fräser unkontrolliert in das Werkstück fährt und Material wegnimmt, das man nicht wieder „anpappen“ kann.

#### Aufgabe:

Finden Sie durch Probieren heraus, bei welchen Reglerparametern  $k_P$  und  $T_I$  eine minimale Anregelzeit ohne Drehzahl-Überschwinger zustande kommt!

Obiger Spezialfall, ein schwingungsfähiges System ohne Schwingungen zeitoptimal in einen neuen Zustand zu überführen, hat eine besondere Bezeichnung, welche?

Wären Sie als Regelungstechniker mit dem Führungsübertragungsverhalten des PI-Reglers zufrieden, im direkten Vergleich mit P- oder I-Regler?

Ja

Nein

Begründung: .....

.....

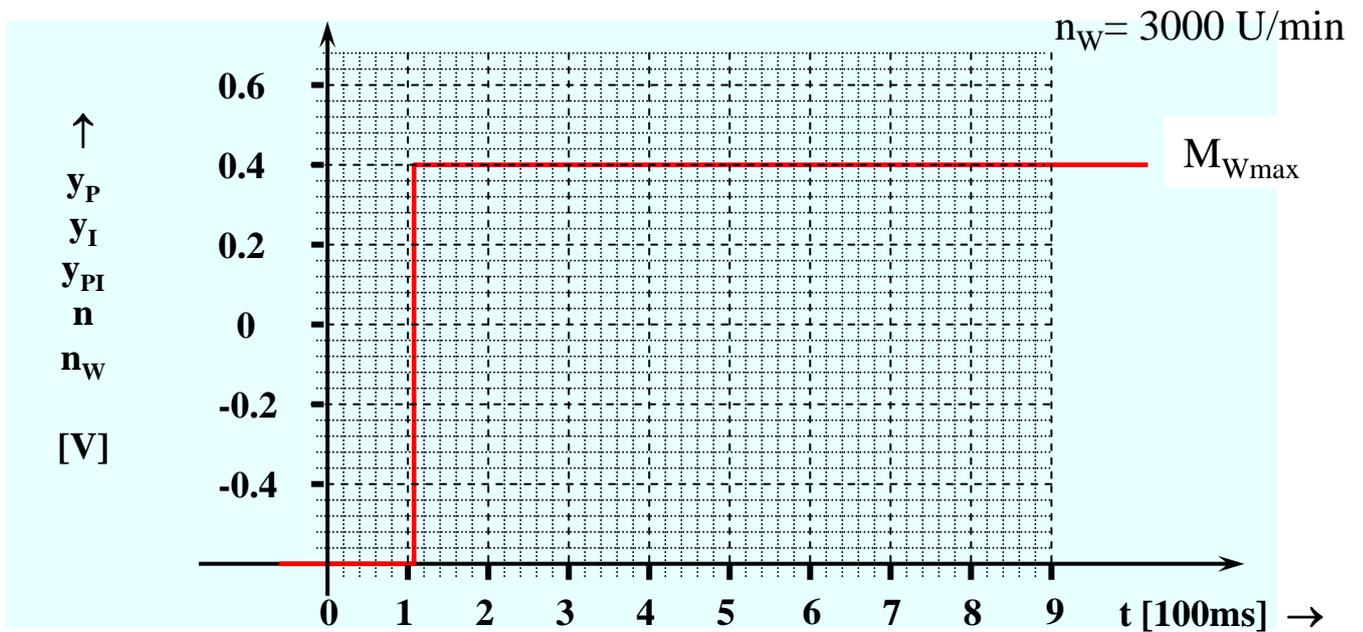
.....

.....

# Systemreaktion auf einen Störgrößenprung

## Aufgabe:

- Regelkreiseinstellung wie bei der stationären Untersuchung 7.2.1
- Gleiches Vorgehen wie 7.1.2 P-Regler!
- Oszillographieren und skizzieren Sie die relevanten Größen im Regelkreis!  
( Hinweis: die stationäre Regeldifferenz ist null, daher Oszilloskop auf „AC-Coupling“ der Eingangskanäle CH 1 und CH 2 einstellen! Hinweis: Farbstift verwenden!)



**Bild 26: Zeitliche Verläufe der relevanten Systemgrößen**

Wären Sie als Regelungstechniker mit dem Störübertragungsverhalten des PI-Reglers zufrieden oder würden Sie eher einen anderen Regler favorisieren?

- Ja  
 Nein

## 8. Zusammenfassung

In der Industrie werden auch heute noch trotz der großen Fortschritte in der Regelungstheorie hauptsächlich P- oder PI-Regler eingesetzt. Auch bei sehr komplizierten Anlagen wird stets versucht, diese mit einschleifigen Standard-Regelkreisen in den Griff zu bekommen. Eine Mehrgrößen-Regelkreissynthese wird ungern versucht.

PI-Regler sind sehr robust gegenüber Parameterdriften im System und schaffen es, die Regeldifferenz bei deterministischen und sprungförmigen Signalen stets fast zeitoptimal zu null zu machen. Wo der Integralanteil zu Stabilitätsproblemen neigt, wird er weggelassen und stattdessen ein einfacher P-Regler eingesetzt. Man nimmt die bleibende Regeldifferenz gerne in Kauf, wenn sich das fraglich System dadurch stabilisieren lässt. Sehen Sie sich die erzielten Ergebnisse der einzelnen Regler nochmals rückblickend unter diesen Aspekten an und beantworten Sie sich selbst mit einer kurzen zusammenfassenden Kommentierung die Frage, welchen Regler **Sie** für die Drehzahlregelung implementiert hätten.

Komentierung:.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Meckerecke: V8 gefällt mir (nicht) wegen:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Autor: Prof. A. Götz, Feb. 2007

Durchgesehen und getestet: Dr.-Ing. R. Blümel, März 2007

Modifiziert und getestet: Dipl. Ing. Joh. Huning, Dipl. Ing. R. Groß; 9.01.2008