

## **Labor Mechatronik**

### **Versuch V2**

#### **- Drehzahlregelung -**

<i>Labor Mechatronik</i> .....	1
1. Ziel des Versuchs .....	2
2. Theoretische Grundlagen .....	2
2.1. Beschaltung von Operationsverstärkern.....	2
2.2. OPV-Beschaltung als Regler.....	2
2.3. Allgemeine Berechnungen der Beschaltungen.....	3
2.4. Modell des Gleichstrommotors .....	5
2.5. Bestimmung der Systemparameter .....	6
3. Versuchsdurchführung.....	7
3.1. Versuchsaufbau .....	7
3.2. Aufgabenstellung.....	11
4. Vorbereitungsfragen .....	14
5. Auswertung.....	14
6. Literatur zum Nachlesen und Vorbereiten.....	15

## 1. Ziel des Versuchs

Die Drehzahlregelung von permanent- und fremderregten Gleichstrommotoren spielt heute in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen der Mechatronik eine große Rolle. In diesem Versuch sollen die Grundelemente der Regelung und ein Drehzahlregelungssystem untersucht werden. Dazu werden Operationsverstärker und eine Motor-Generator-Strecke betrachtet.

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1. Beschaltung von Operationsverstärkern

Die bei weitem häufigste Anwendung von Operationsverstärkern ist die des Reglers. Er wird als invertierender oder nicht invertierender Verstärker oder als Differenzverstärker benutzt, aber immer mit Rückführung. Weitere Anwendung findet er in Analogrechnerschaltungen als Summierer, Subtrahierer, Integrierer, Differenzierer, Mittelwert-Bilder oder Absolutwert-Bilder. Er wird auch für Funktionsgenerator-, Impedanzwandler-, oder digital / analog Wandlerschaltungen eingesetzt.

Die unterschiedlichen Funktionen werden durch spezielle Eingangs- und Rückführungs-Beschaltungen realisiert.

Eine wichtige Eigenschaft der Verstärker ist, dass bei negativer Rückführung die Verstärkung reduziert wird, während sie bei positiver Rückführung extrem groß wird.

### 2.2. OPV-Beschaltung als Regler

Ein Regler soll die Regeldifferenz zwischen Führungsgröße und Regelgröße mit einem der Regelstrecke angepassten Zeitverhalten zur Stellgröße verarbeiten. Dazu nutzt man die Verstärkereigenschaften (große Leerlaufverstärkung, geringer Eingangsstrom) wie folgt aus:

Die Sollwertspannung wird über ein Netzwerk zu einem Sollwertstrom. Da der Eingang E1 ein virtueller Massepunkt ist, kann auch die Sollwertspannung einseitig an Masse gelegt werden. Das gleiche gilt für den Istwertkanal. Die Summe der Ströme muss dann vom Strom durch die Rückführung kompensiert werden.

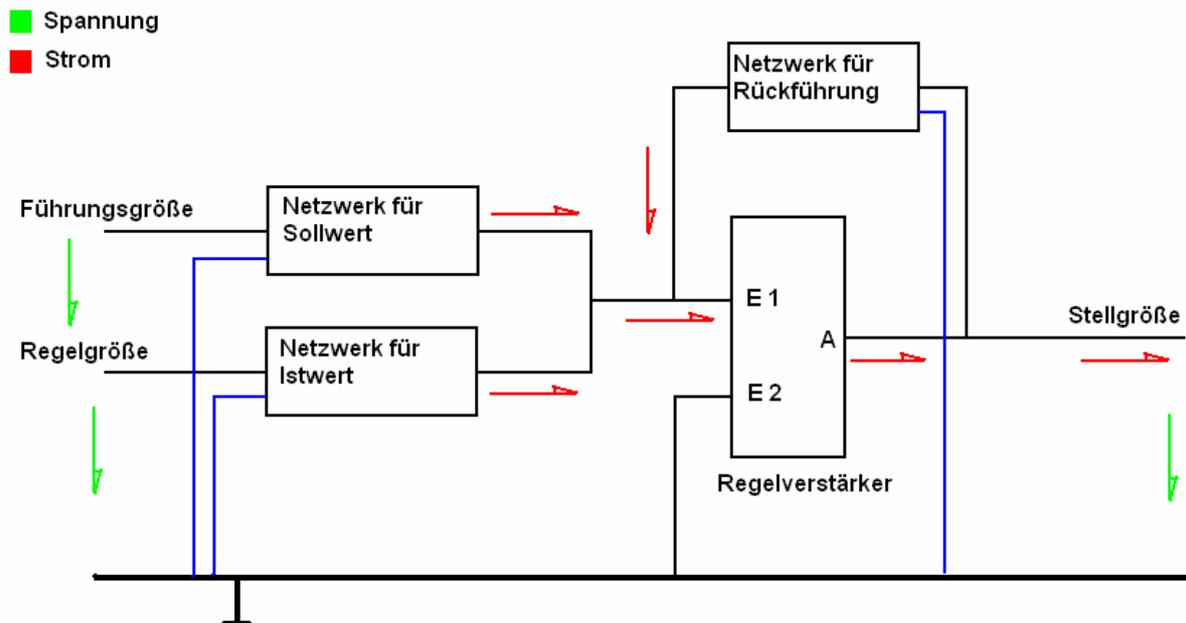


Abbildung: Regelverstärker, beschaltet mit Sollwertkanal, Istwertkanal und Rückführung

Durch die Beschaltung mit passiven komplexen Zweipolen oder Vierpolen zwischen den Eingängen bzw. dem Ausgang und dem Gegenkopplungseingang E1 wird dem Regler das gewünschte Zeitverhalten aufgeprägt.

Für die Beschaltung als Rechenverstärker gilt im wesentlichen das gleiche wie vorher, nur wird der Istwertkanal weggelassen. Wichtig ist, dass der Operationsverstärker von hoher Qualität ist und die Bauteile der Netzwerke hohe Genauigkeit garantieren, damit die Rechenergebnisse reproduzierbar sind.

### 2.3. Allgemeine Berechnungen der Beschaltungen

Aus dem vorher gesagten lassen sich folgende Vereinfachungen treffen:

- Innerhalb des Aussteuerbereiches ist die Differenzspannung zwischen den beiden Eingängen Null. D.h., liegt der Plus-Eingang auf Masse, so ist das Potential des Minus-Eingangs ebenfalls quasi Masse (virtuelle Masse).
- Der Eingangsstrom in den Verstärker ist Null. D.h., sein Eingangswiderstand ist unendlich.

Daraus ergibt sich das Übertragungsverhalten für den invertierenden Verstärker:

$$\frac{U_E}{Z_E} = I_0 = -I_1 = \frac{-U_A}{Z_A} \quad (1)$$

$U_E$  Eingangsspannung

$Z_E$  Eingangswiderstand

$U_A$  Ausgangsspannung

$Z_A$  Ausgangswiderstand

Daraus folgt

$$\frac{-U_A}{U_E} = \frac{Z_A}{Z_E} \quad (2)$$

Mit Z als Wechselstromwiderstand  $Z = R + X$  und  $X = \omega L + 1/(\omega C)$ . Die Grundlagen dazu sind im Script Grundlagen der Elektrotechnik zu finden.

Es ergibt sich für den nichtinvertierenden Eingang:

$$\frac{(U_A - U_E)}{Z_A} = \frac{U_E}{Z_1} \quad (3)$$

$$U_e = U_{e2} * \left( \frac{Z_0}{(Z_e + Z_0)} \right) = U_{e2} * \left( \frac{1}{\left( \frac{Z_e}{Z_0} + 1 \right)} \right) \quad (4)$$

$$U_e \rightarrow U_{e2} \text{ für } Z_0 \rightarrow \infty$$

Weiterhin folgt aus (3)

$$\frac{U_A}{Z_A} = U_e * \left( \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_1} \right) = U_{e2} * \left( \frac{Z_0}{(Z_e + Z_0)} \right) * \left( \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_1} \right) \quad (5)$$

$$\frac{U_A}{U_{e2}} = \left( \frac{Z_0}{(Z_e + Z_0)} \right) * \left( 1 + \frac{Z_A}{Z_1} \right) \quad (6)$$

Für  $Z_0 = Z_A$  und  $Z_e = Z_1$  folgt

$$\frac{U_A}{U_{e2}} = \frac{Z_A}{(Z_e + Z_A)} * \left( \frac{(Z_e + Z_A)}{Z_e} \right) \quad (7)$$

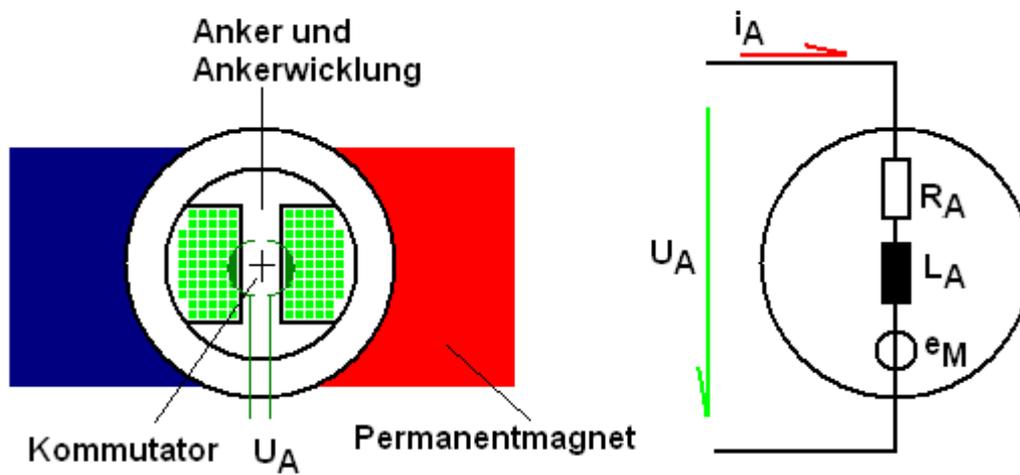
$$\frac{U_A}{U_{e2}} = \frac{Z_A}{Z_e} \quad (8)$$

Aus diesen Gleichungen ist ersichtlich, dass für  $Z_0$  gegen unendlich die Eingangsspannung direkt am Plus-Eingang liegt. Ist kein Eingangsnetzwerk  $Z_1$  vorhanden ( $Z_1$  gegen unendlich), so erhält man den Spannungsfolger oder auch Impedanzwandler. Und ist  $Z_0 = Z_A$  und  $Z_e = Z_1$  ergibt sich der Differenzverstärker, bei dem die Ausgangsspannung ohne Vorzeichenumkehr die Eingangsspannung abbildet, multipliziert mit dem Verstärkungsfaktor  $Z_A / Z_e$

## 2.4. Modell des Gleichstrommotors

Die Motor-Generator-Strecke besteht aus einem permanenten Motor, einem permanenten Generator und einem auf derselben Welle sitzenden permanenten Tachogenerator. Die drei Maschinen sind im Aufbau und der Funktion im Wesentlichen identisch mit einer permanenten Gleichstrommaschine. Am Tachogenerator sind zwei Impulsgeber mit zwei um  $90^\circ$  el. versetzten Impulsketten eingebaut.

Der prinzipielle Aufbau der permanenten Gleichstrommaschine ist im folgenden Bild dargestellt.



Aus dem Ersatzschaltbild lässt sich die Gleichung für die Spannung des Ankerkreises bestimmen.

$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \left( \frac{d}{dt} i_A(t) \right) + e_M(t) \quad (9)$$

Die induzierte Ankerspannung  $e_M$  ist proportional zur Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Es gilt folgende Beziehung:

$$e_M = c \cdot \Psi \cdot \omega \quad (10)$$

c	Maschinenkonstante
$\Psi$	magnetischer Fluss
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

Zum Aufstellen der mechanischen Bewegungsgleichung muss der Anker freigeschnitten werden. Anschließend werden die Drehmomente eingezeichnet.

Es ergibt sich

$$J \cdot \left( \frac{d}{dt} \right) \ddot{\Phi}(t) = m_A(t) - m_L(t) - m_R(t) \quad (11)$$

J	Massenträgheitsmoment	$m_L$	Lastmoment
$\Phi$	Winkel	$m_R$	Reibmoment
$m_A$	Antriebsmoment		

Der Ankerstrom  $i_A(t)$  erzeugt das Ankermoment  $m_A(t)$ . Das Verhältnis zwischen dem Ankerstrom und dem Ankermoment wird Drehmomentkonstante genannt.

$$k_G = c * P s i_F = \frac{M_A}{i_A} \quad (12)$$

## 2.5. Bestimmung der Systemparameter

Für die Generatorkonstante gilt gemäß der Gleichung 12 und unter Beachtung der Gleichung 10, dass die induzierte Ankerspannung proportional zur Winkelgeschwindigkeit ist. Es ergibt sich:

$$e_M = k_G * \left(\frac{d}{dt}\right) * \Phi(t) \quad (13)$$

Es folgt:

$$\int_0^t e_M dt = k_G * \int_0^{\Phi} d\Phi \quad (14)$$

Die Generatorkonstante  $k_G$  lässt sich also so bestimmen, dass man die Motorklemmen mit einem Integrierer verbindet, diesen zu NULL setzt und dann den Motor von Hand einige Umdrehungen dreht. Das Integral der induzierten Ankerspannung lässt sich mit einem Multimeter ablesen.

Der Ankerwiderstand  $R_A$  wird mit dem Verhältnis Ankerspannung zu Ankerstrom bestimmt. Dabei muss der Rotor festgehalten werden. Je nach Rotorstellung ergeben sich unterschiedliche Werte, so dass ein mittlerer Wert bestimmt werden sollte. Die Ankerinduktivität  $L_A$  lässt sich mit dem nun bekannten  $R_A$  bestimmen. Mit einem Signalgenerator und nachgeschaltetem Leistungsverstärker wird ein Spannungssprung auf die Ankerwicklung gegeben. Dabei muss der Stromanstieg bei blockiertem Rotor festgestellt werden.

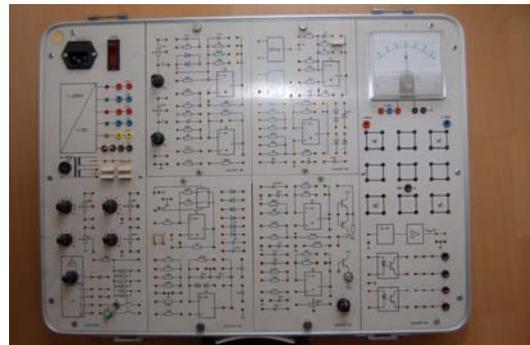
Das Reibmoment lässt sich bei bekannten Generatorkonstanten über den Motorstrom messen, der vom Motor ohne Lastmoment aufgenommen wird. Bei stillstehendem Motor erhöht man den Strom soweit, bis der Rotor anfängt sich zu drehen. Der Strom sinkt dann ab bis auf den Gleitreibungswert.

Das Massenträgheitsmoment wird mit dem Auslaufversuch bestimmt. Zurzeit  $t = 0s$  wird die Spannungsversorgung des Motors unterbrochen. Da das Reibmoment im Wesentlichen auf der konstanten Gleitreibung beruht, kann aus der Bewegungsgleichung (siehe Gleichung 11) sofort  $J$  ermittelt werden.

### 3. Versuchsdurchführung

#### 3.1. Versuchsaufbau

Grundgerät:



Funktionseinheiten:

Stromversorgung

Gleichspannung  $\pm 15V / 1A; \pm 10V / 0,5A; +5V / 1A$

Wechselspannungen  $24V_{eff} / 1A; 6V_{eff} / 0,5A$

Sollwert-Störgrößengeber

Potentiometer /Spannungsteiler

Taktgenerator 0,02 Hz bis 10kHz

Kippschalter und Taster

Messinstrument für Spannungsmessung  $\pm 15V$ . Genauigkeitsklasse 2

Regelstrecken-Steckplatz

Leistungsverstärker

Optokoppler

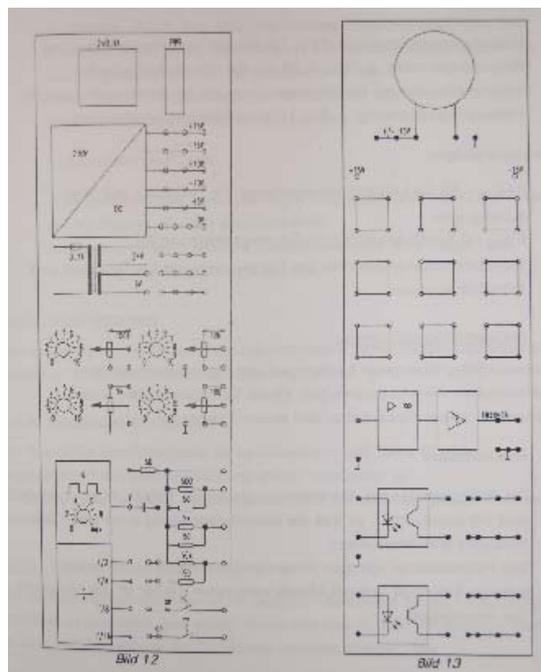
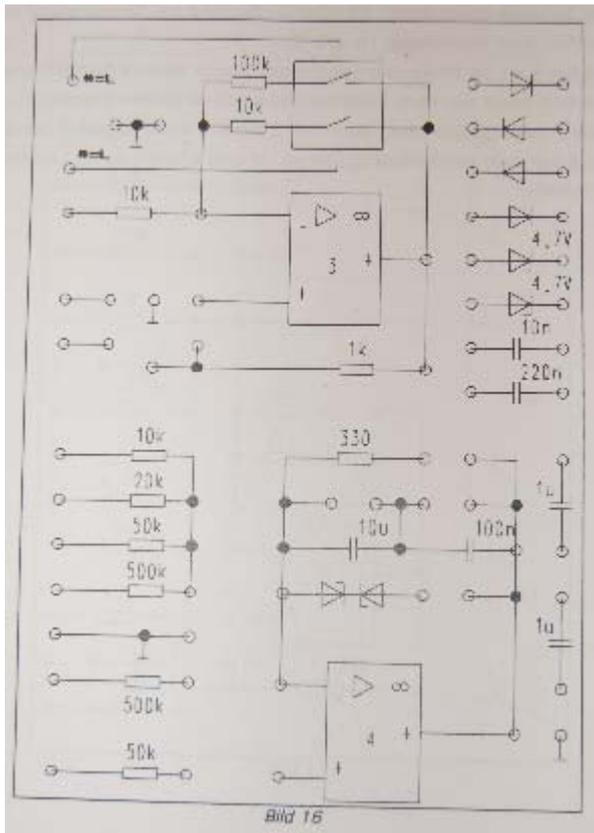


Abbildung Grundgerät



### Experimentierplatte 3



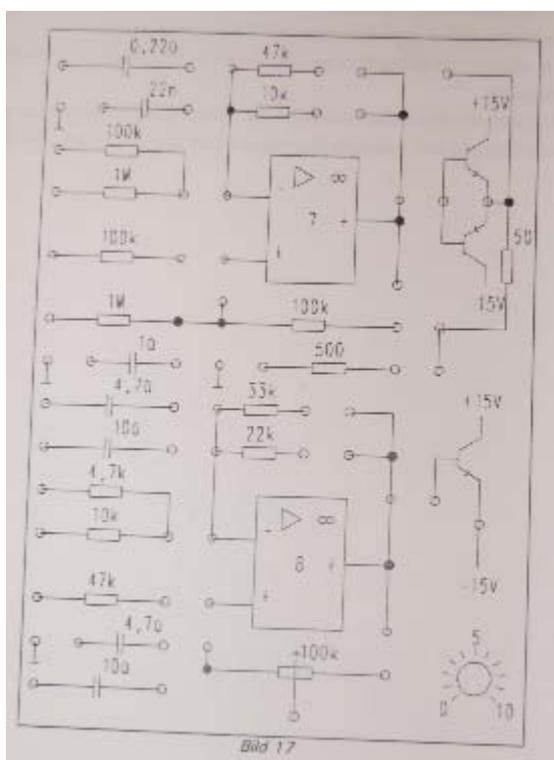
Die Experimentierplatte 3 ist bestückt mit zwei Operationsverstärkern und zwei FET-Schaltern.

Der Verstärker 3 hat in seiner Rückführung zwei mit FET-Schaltern schaltbare Widerstände. Beaufschlagt man die Binäreingänge der FET mit M-Signal, so werden die Schalter durchlässig. Im offenen Zustand am Binäreingang sind sie im Analog-Pfad sehr hochohmig ( $> 50\text{dB}$ ).

Der Verstärker 4 ist als Integrator geschaltet. Durch weitere Rückführung (z.B. ein Widerstand) kann aus dem Integrator eine aktive Glättung gemacht werden. Die Ausgangsspannung kann mit Z-Dioden aktiv begrenzt werden.

Beide Verstärker sind kurzschlussfest gegen Masse und können einen Laststrom von 5mA treiben.

### Experimentierplatte 4



Die Experimentierplatte 4 ist mit zwei Operationsverstärkern bestückt. Durch freie Wahl der Eingangs- und Rückführungsgrößen ist unterschiedliches Übertragungsverhalten wählbar.

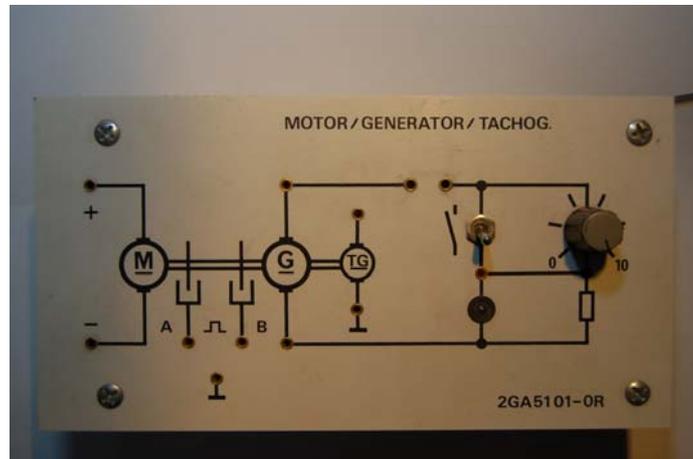
Verstärker 7 ist besonders als Stromquelle geeignet, da eine nachschaltbare Transistorstufe den Ausgangsstrom auf 1A erhöhen kann.

Verstärker 8 eignet sich besonders als Multivibrator mit einer nachschaltbaren optischen Anzeige.

Ein frei beschaltbares Potentiometer kann für Verstärkungsänderungen als auch zur Veränderung der Ausgangsfrequenz eines Multivibrators verwendet werden.

## Motor-Generator-Strecke Experimentierplatte 5

Der Baustein der Motor->Generator-Strecke (2GA5101-0R) ist mit einem Motor, einem Generator als Belastungseinheit, sowie einem Tachogenerator und einem Impulsgeber bestückt. Die Belastung für den Generator ist zwischen Leerlauf und einer ohmschen Belastung durch einen Verbindungsstecker wählbar. Parallel zum Lastwiderstand befindet sich zur optischen Anzeige eine Lampe. Der über ein Potentiometer einstellbare Vorwiderstand kann zur Sprungerzeugung mit einem Schalter überbrückt werden.



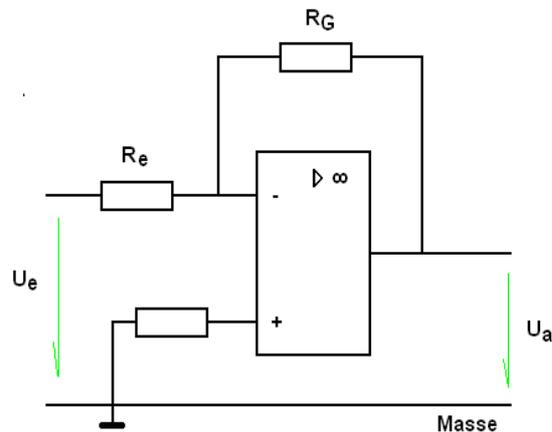
Zum Istwertvergleich ist zusätzlich zum Tachogenerator ein Impulsgeber mit zwei um  $90^\circ$  el. versetzten Impulsketten eingebaut.

Technische Daten:

Motor Nennspannung:	15V
Drehzahl	5000rpm
Tachogeneratorspannung	1,5mV/rpm
Max. Drehzahl	5000 rpm
Impulsgeber:	15 Impulse /Umdrehung; Rechtecksignal TTL/CMOS
Drehrichtung	beliebig, bei Rechtslauf auf Antrieb gesehen eilt der Kanal B um $90^\circ$ dem Kanal A nach.

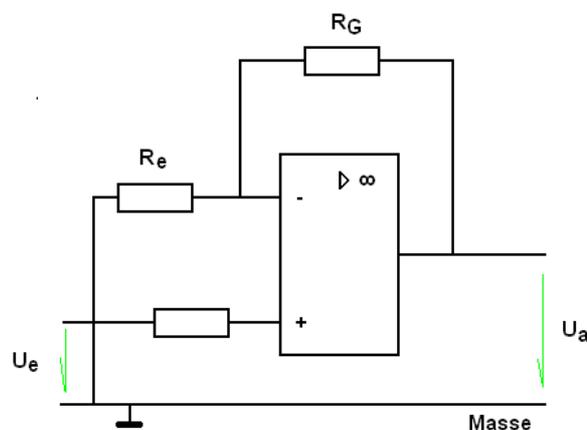
Das Potentiometer hat  $500\Omega$  und der Lastwiderstand  $47\Omega$ .

### 3.2. Aufgabenstellung



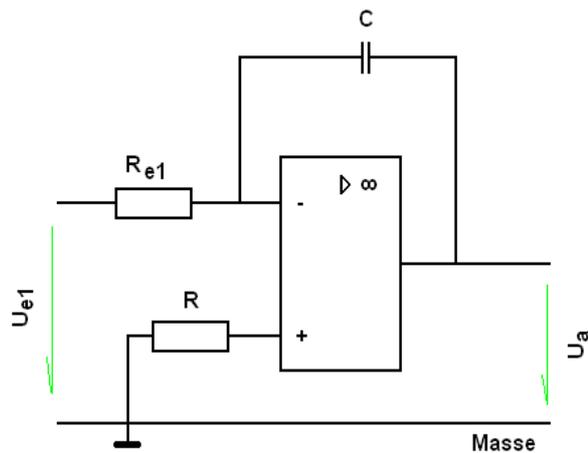
Schaltung zu Aufgabe 1

- Aufgabe 1** Bauen Sie die Schaltung für einen Invertierenden Verstärker mit dem OPV Verstärker 1 der Experimentierplatte (2GA5101-OB) auf. Nehmen Sie die Kennlinien für  $U_e$  im Bereich  $-5\text{ V}$  bis  $5\text{ V}$  und Rückführwiderstände  $R_{G1} = 0,01\text{ M}\Omega$ ,  $R_{G2} = 0,1\text{ M}\Omega$  und  $R_{G3} = 1\text{ M}\Omega$  auf. Der Eingangswiderstand soll  $R_{E-} = 10\text{ k}\Omega$  und der Widerstand für den positiven Eingang gegen Masse  $R_{E+} = 10\text{ k}\Omega$  betragen. Zeichnen Sie die Kennlinien  $U_A = f(U_e)$ , bestimmen Sie den Verstärkungsfaktor und Diskutieren Sie die Ergebnisse.  
**Hinweis:** Bitte erst den positiven Bereich Messen, dann Eingangsspannungquelle wechseln und den negativen Bereich der Kennlinien aufnehmen



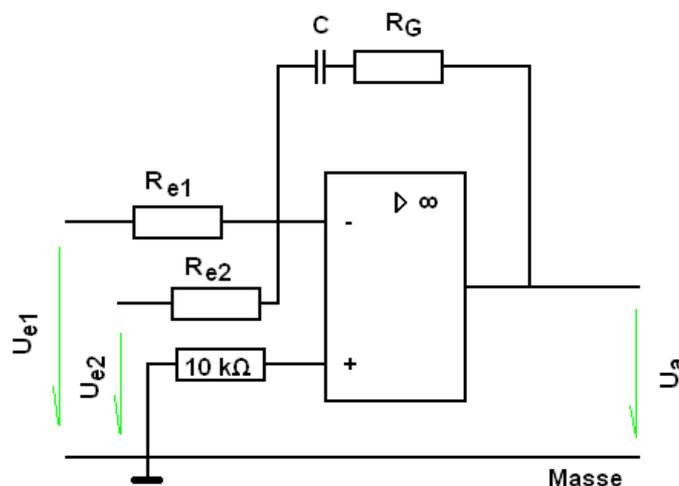
Schaltung zu Aufgabe 2

- Aufgabe 2** Bauen Sie die Schaltung für einen Nichtinvertierenden Verstärker mit dem OPV Verstärker 1 der Experimentierplatte (2GA5101-OB) auf. Nehmen Sie die Kennlinien für  $U_e$  im Bereich  $-5\text{ V}$  bis  $5\text{ V}$  und Rückführwiderstände  $R_1 = 0,01\text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 0,1\text{ M}\Omega$  und  $R_3 = 1\text{ M}\Omega$  auf. Der Eingangswiderstand soll  $R_{E+} = 10\text{ k}\Omega$  und der Widerstand für den negativen Eingang gegen Masse  $R_{E-} = 10\text{ k}\Omega$  betragen. Zeichnen Sie die Kennlinien  $U_A = f(U_e)$ , bestimmen Sie den Verstärkungsfaktor und Diskutieren Sie die Ergebnisse.  
**Hinweis:** Bitte erst den positiven Bereich Messen, dann Eingangsspannungquelle wechseln und den negativen Bereich der Kennlinien aufnehmen Der negative Eingang soll über die Diodenbrücke gegen Masse geschaltet werden.



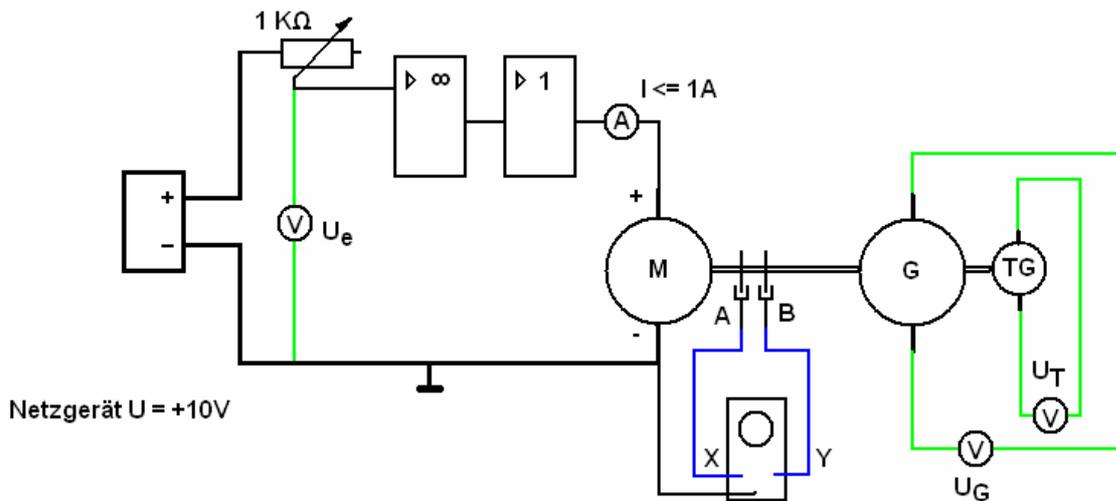
Schaltung zu Aufgabe 3

- Aufgabe 3** Bauen Sie die Schaltung für einen Integrator mit dem OPV Verstärker 4 der Experimentierplatte (2GA5101-OD) auf. Bestimmen Sie die Zeitkonstante rechnerisch und durch Messung für die Kapazität  $C_1 = 10 \text{ nF}$ . Der Eingangswiderstand soll  $R_{E-} = 20 \text{ k}\Omega$  und der Widerstand für den positiven Eingang gegen Masse  $R_{E+} = 50 \text{ k}\Omega$  betragen. Am Eingang E1 soll eine Rechteckspannung  $U_{e1}$  mit  $2\text{V} / 5\text{Hz}$  anliegen. Zeichnen Sie die Kennlinien  $U_A(t)$  und Diskutieren Sie die Ergebnisse.



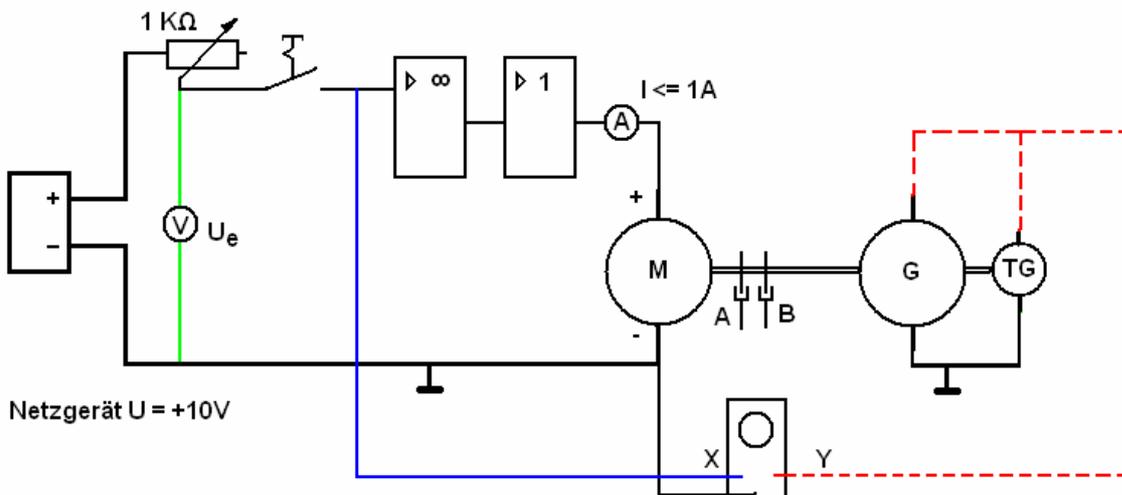
Schaltung zu Aufgabe 4

- Aufgabe 4** Bauen Sie die Schaltung für einen PI-Regler mit dem OPV Verstärker 1 der Experimentierplatte (2GA5101-OB) auf. Die Widerstände haben die Werte  $R_{e1} = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 1 \text{ k}\Omega$ . Der Kondensator im Rückführungszweig ist mit  $C = 0,1 \mu\text{F}$  angegeben. Der Eingang E2 ( $U_{e2}$ ) bleibt unbeschaltet. Am Eingang E1 soll eine Rechteckspannung  $U_{e1}$  mit  $2\text{V} / 5\text{Hz}$  anliegen. Ermitteln Sie die Verstärkung für den P-Anteil des Reglers. Vergleichen Sie den gemessenen Wert mit dem errechneten Wert. Bestimmen Sie die Nachstellzeit. Zeichnen Sie die Übergangsfunktion. Diskutieren Sie die Ergebnisse. (Nach dem justieren der Kanäle des Oszilloskops, im Rückführungszweig  $R = 1 \text{ M}\Omega$  zur Kondensator-Widerstandsreihen-anordnung (mit Brücke) Parallelschalten.)



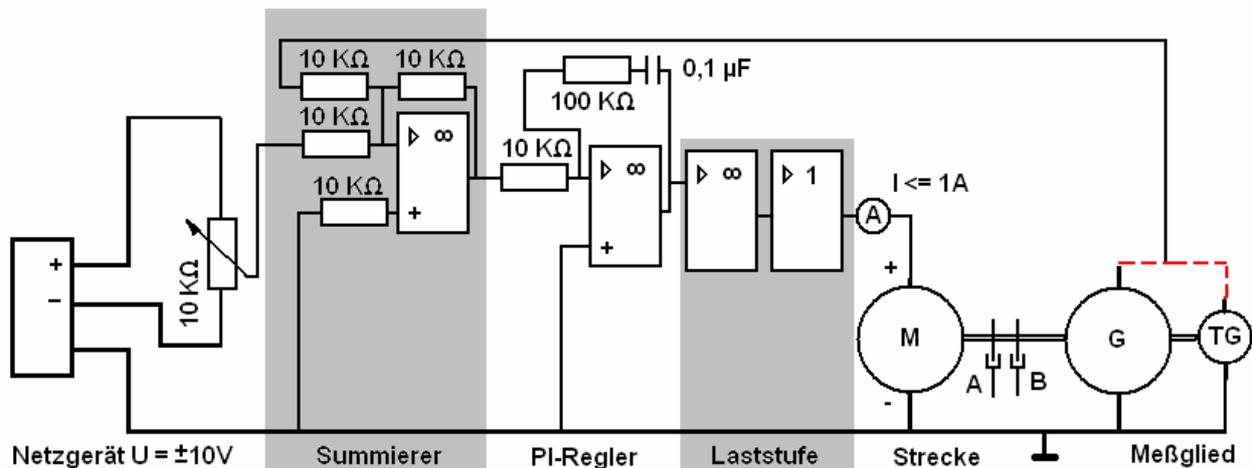
Schaltung zu Aufgabe 5

- Aufgabe 5** Ermitteln Sie die Streckenverstärkung der Motor-Generator-Strecke. Nehmen Sie die Kennlinie  $U_e = f(n)$ ,  $U_T = f(n)$ ,  $U_G = f(n)$  auf und stellen Sie diese grafisch dar. Geben Sie die Streckenverstärkungen an. Messen Sie die Impulse und überprüfen Sie das Ergebnis mit ihren Berechnungen. Diskutieren Sie die Ergebnisse.



Schaltung zu Aufgabe 6

- Aufgabe 6** Ermitteln Sie die Übergangsfunktion der Strecke. Nehmen Sie den Funktionsverlauf mit einem Zweistrahloszilloskop auf und bestimmen Sie die Parameter für die Übertragungsfunktion. Welche Streckenordnung können Sie feststellen? Geben Sie die Gleichung an und stellen Sie den Verlauf dar. Diskutieren Sie die Ergebnisse.



Schaltung zu Aufgabe 7

- **Aufgabe 7** Bauen Sie die Drehzahlregelstrecke auf. Ermitteln Sie messtechnisch die Soll-Ist-Differenz im eingeschwungenen Zustand. Bestimmen Sie die Zeitwerte des Reglers. Diskutieren Sie die Ergebnisse.

#### 4. Vorbereitungsfragen

- 1) Wie wird das Übertragungsverhalten eines Operationsverstärkers festgelegt. Geben Sie einen Überblick zu den wichtigsten OPV-Schaltungen.
- 2) Beschreiben Sie das Verhalten von I-Reglern, P-Reglern und D-Reglern.
- 3) Geben Sie das Modell eines Gleichstrommotors in einer Zustandsraumdarstellung an.
- 4) Welche Motorkonstanten sind in der Modellbildung zu berücksichtigen und wie werden diese Motorkonstanten bestimmt.

#### 5. Auswertung

Zum Versuch ist ein ausführliches Protokoll anzufertigen. Das Protokoll ist in folgende Teile zu gliedern:

1. Allgemeine Angaben:      Download Titelblatt
2. Kurze Beschreibung des Zieles der Teilversuche
3. Versuchsauswertung

Stellen Sie die aufgenommenen Messkurven maßstäblich grafisch dar und diskutieren Sie die Ergebnisse. Beachten Sie auch die Hinweise im Arbeitsblatt: **Anleitung\_zum\_Auswerten\_von\_Messegebnissen.pdf**.

Hinweise:

- Die Messwertprotokolle sind als Anlage zum Protokoll mit abzugeben.

## 6. Literatur zum Nachlesen und Vorbereiten

Analog-Trainer :

Grundgerät	2GA5101-0A
Experimentierplatte	2GA5101-0B
Experimentierplatte	2GA5101-0C
Experimentierplatte	2GA5101-0D
Experimentierplatte	2GA5101-0E

Helmut Bode                    MATLAB in der Regelungstechnik,  
B.G. Teubner Verlag Stuttgart 1998

Helmut Scherf                Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme,  
Oldenburg Verlag München 2004

Philippsen, H.-W.:        Einstieg in die Regelungstechnik,  
Hanser Verlag, München 2004

Reuter, M.; Zacher, S.:    Regelungstechnik für Ingenieure,  
Vieweg, Braunschweig 2002