

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**  
**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**  
**Regelschaltungen**

**I Einleitung**

In dieser Versuchsreihe werden die grundlegenden Eigenschaften von Regelschaltungen aufgezeigt und das Verhalten von Regelstrecken analysiert.

**II Theoretische Grundlagen**

Regler wirken Störungen in einem System entgegen. Sie bestehen aus einem Messwerk zum Erfassen einer Störung anhand der Regelgröße, einem Vergleicher, der zwischen Soll- und Istwert,  $x_s$  und  $x_i$ , der Anordnung vergleicht, einem Regelwerk, welches den Unterschied zwischen Soll- und Istwert erkennt und ein je nach Regelabweichung  $x_w = x_s - x_i$  bedingtes Signal ausgibt, sowie einem Leistungsverstärker, der eine die Regelabweichung  $x_w$  korrigierende Größe, die Regelgröße  $y$ , erzeugt.

Es gibt sowohl stetige als auch unstetige Regler. Unstetige Regler sind z.B. Thermostaten, die bei einer bestimmten Regelabweichung im Kühlschrank, also dem Überschreiten des Istwertes der Innentemperatur vom Sollwert, eine Regelgröße solange erzeugen (die Kühlung anschalten) bis ein gewisser Wert (hier: unterhalb des Sollwertes) erreicht ist. Der Regler wirkt also nicht direkt der Regelabweichung entgegen und es entsteht Hysterese.

Dies ist bei den nächstgenannten Reglern nicht der Fall, da sie der Regelabweichung unmittelbar entgegenwirken.

**P-Regler (proportional)**

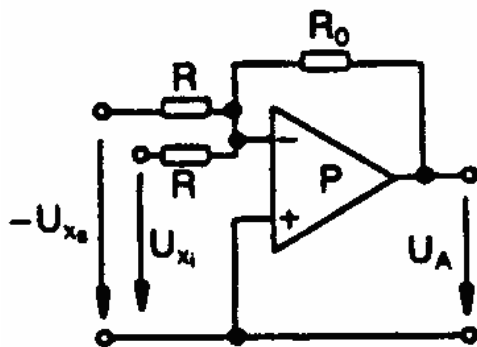


Abbildung 1: Schaltbild eines P-Reglers mit OV

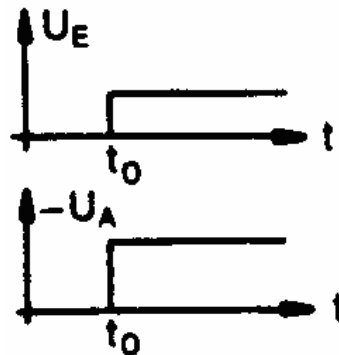


Abbildung 2: Sprungantwort eines P-Reglers

**P-Regler arbeiten schnell, verursachen jedoch eine bleibende Regelabweichung.**

(Abb. 1, 2 aus /2/ Müller, M. „Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Heft 3/35“ S. 27)

Der P-Regler bewirkt eine zur Regelabweichung  $x_w$  proportionale Veränderung der Stellgröße  $y$ . Der Nachteil eines P-Reglers ist seine Abhängigkeit von einer vorhandenen Regelabweichung.

Betrachtet man die Sprungantwort des P-Reglers in Abbildung 2, so fällt auf, dass er sehr schnell auf die Störung reagiert, worin sein Vorteil liegt. Elektronisch wird der P-Regler durch einen Addierer realisiert.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

I-Regler (integral)

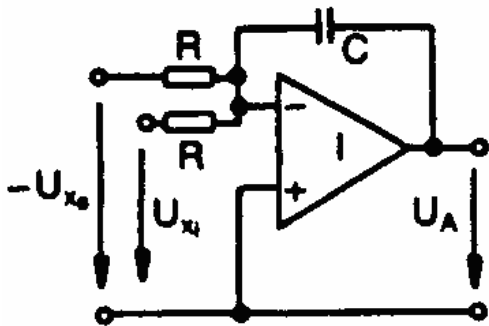


Abbildung 3: Schaltbild eines I-Reglers mit OV

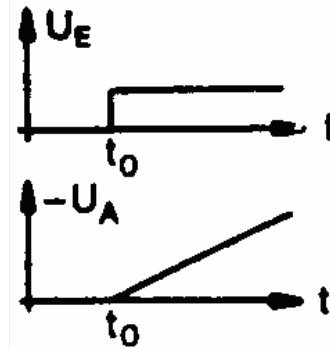


Abbildung 4: Sprungantwort eines I-Reglers

I-Regler arbeiten langsam, verursachen jedoch keine bleibende Regelabweichung.

(Abb. 3, 4 aus /2/ Müller, M. „Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Heft 3/35“ S. 27)

Bei einem I-Regler wird nicht die Stellgröße sondern die Stellgeschwindigkeit  $\dot{y}$  von der Regelabweichung abhängig gemacht. Eine große Regelabweichung erzeugt somit eine schnelle Stellgeschwindigkeit. Dies hat den Effekt, dass die Regelabweichung nach einiger Zeit gegen Null geht. Seine Wirkung summiert sich auf und ist damit abhängig von der Vergangenheit der Schaltung, wodurch der I-Regler relativ langsam ist.

Die Sprungantwort des I-Reglers (Abbildung 4) verläuft linear, wobei die Steigung von der Größe der Regelabweichung abhängt. Schaltungstechnisch entspricht der I-Regler einem Integrierer, wie in Abbildung 3 gezeigt.

PI-Regler (proportional-integral)

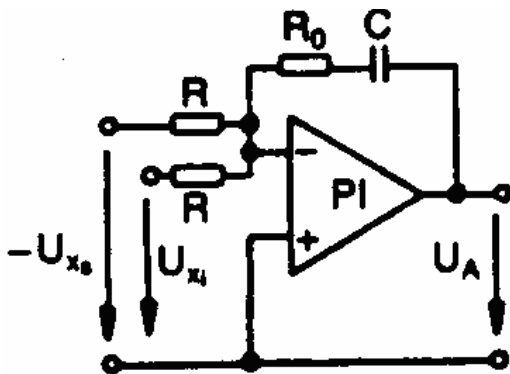


Abbildung 5: Schaltbild eines PI-Reglers mit einem OV

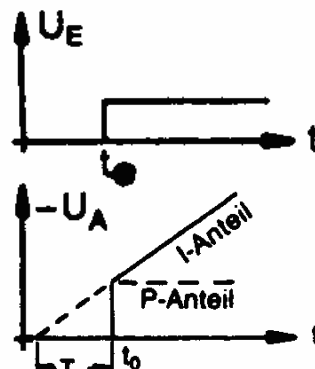


Abbildung 6: Sprungantwort eines PI-Reglers (Abb. modifiziert)

PI-Regler arbeiten schneller als I-Regler und verursachen keine bleibende Regelabweichung.

(Abb. 5, 6 aus /2/ Müller, M. „Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Heft 3/35“ S. 27)

Kombiniert man P- und I-Regler zu einem PI-Regler, so erhält man einen PI-Regler, der sich durch die Vorteile seiner einzelnen Regelglieder auszeichnet.

Bei der Sprungantwort (Abbildung 6) sieht man deutlich, dass sich diese aus der Summe von P- und I-Anteil zusammensetzt, wobei der Anteil des I-Reglers bis zur Zeit  $t_0$  nicht am Ausgang wirkt.  $T_n$  beschreibt die Nachstellzeit, die angibt, wie „spät“ der PI-Regler nach einem reinen I-Regler eingreift. Andersherum betrachtet sieht man also, wie früh ein reiner I-Regler vor der eigentlichen Störung hätte eingreifen müssen, um das Ergebnis des PI-Reglers zu erreichen.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

PD-Regler (proportional-differentiell)

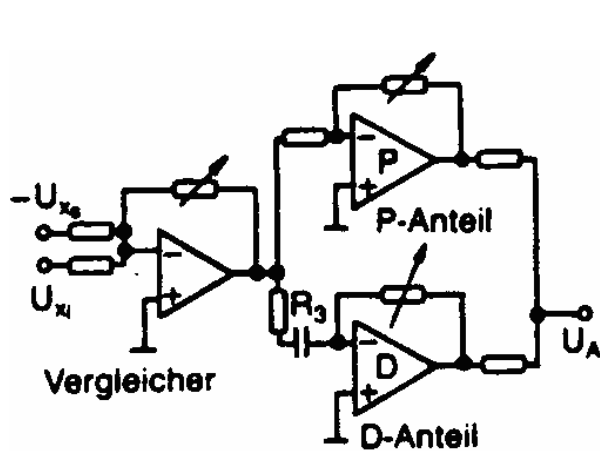


Abbildung 7: Schaltbild eines PD-Reglers mit drei OV's

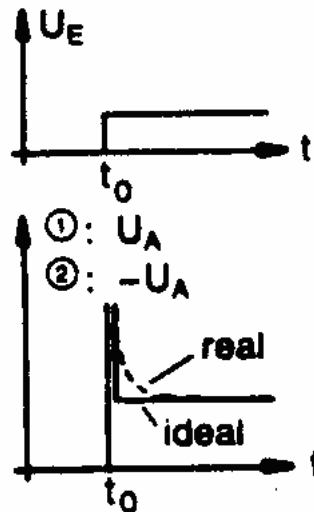


Abbildung 8: Sprungantwort eines realen und idealen PD-Reglers

PD-Regler arbeiten schneller als P-Regler, verursachen jedoch eine bleibende Regelabweichung.

(Abb. 5, 6 aus /2/ Müller, M. „Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Heft 3/35“ S. 27)

Ein D-Regler ist schaltungstechnisch ein Differentierer (D-Anteil nach Abbildung 7). Er kann nur auf eine sich ändernde Regelabweichung reagieren. Daher kombiniert man ihn in der Praxis mit einem P-Regler und man erhält einen PD-Regler, der sich durch die Vorteile seiner einzelnen Regelglieder auszeichnet. In Analogie zum späteren Versuch werden die beiden Regelglieder hier einzeln ausgeführt. Man könnte den ganzen PD-Regler jedoch auch mit nur einem OV realisieren. Die Schaltung ist als Beispiel dem Anhang A1 zu entnehmen.

PID-Regler (proportional-integral-differentiell)

PD-Regler (proportional-differentiell)

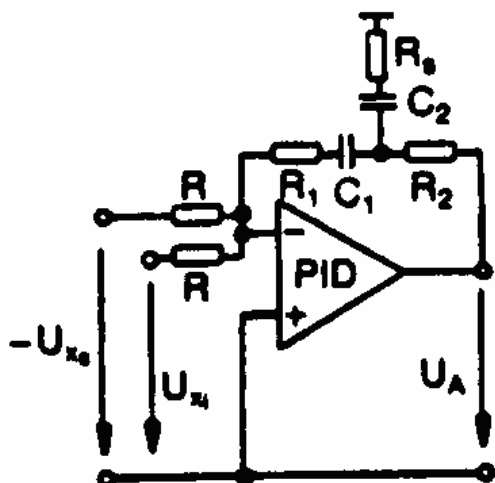


Abbildung 9: Schaltbild eines PID-Reglers mit einem OV

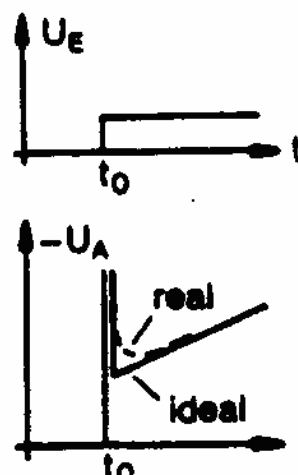


Abbildung 10: Sprungantwort eines realen und idealen PID-Reglers

PID-Regler arbeiten schnell und ohne bleibende Regelabweichung.

(Abb. 5, 6 aus /2/ Müller, M. „Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Heft 3/35“ S. 27)

Ein nach Abbildung 9 realisierter PID-Regler hat alle Vorzüge der bisher genannten Regler. Dementsprechend ist auch seine Sprungantwort, die sich durch die Addition seiner einzelnen Komponenten ergibt.

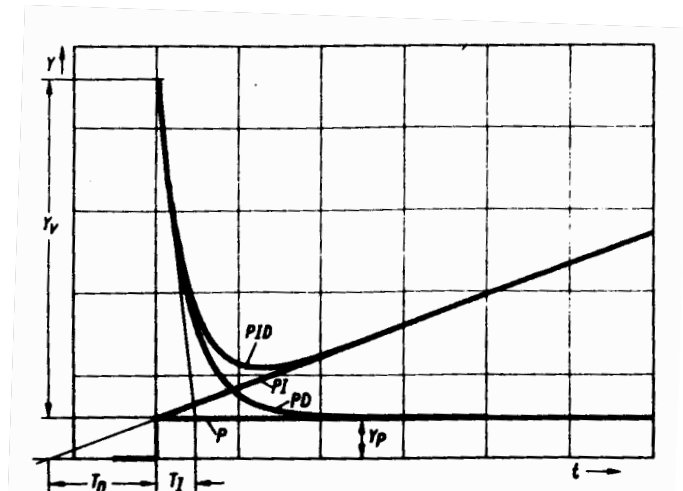
**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I****Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

Die Frequenzgleichung des PID-Reglers ist somit:

$$F_{PID} = V_p \left( 1 + \frac{1}{pT_n} + \frac{pT_v}{1 + pT_1} \right)$$

, wobei  $V_p$  die Proportionalverstärkung,  $T_n$  die Nachstellzeit des Integrators,  $T_v$  die Vorhaltezeitkonstante des Differentiators und  $T_1$  die Verzögerungszeitkonstante der Anordnung ist.

Ohne Verzögerung des Vorhaltes würde das Glied  $pT_v$  gegen unendlich gehen, was nicht der Fall ist. Daher entspricht es einer Höhenbeschränkung und hat für  $T_1 \ll T_v$ , praktisch genügt  $T_1 \leq 0,1T_v$ , keinen Einfluss auf die Regelung.



**Abbildung 11: Sprungantwort eines PID-Reglers und seine Parameter**  
(aus /3/ Rosenberg, W.: „Elektronik, Heft 12/17 (1968)“ S. 366)

Betrachtet man die Sprungantwort des PID-Reglers in Abbildung 11, so sieht man, dass sie sich aus den drei Einzelkomponenten zusammensetzt.

Dabei ist die mit dem Proportionalanteil  $y_p$  gegebene Proportionalverstärkung  $V_p = \frac{y_p}{x_w}$ .

Durch Verlängerung der durch das Integral charakterisierten Größe erhält man über den Schnittpunkt mit der x-Achse die Nachstellzeit  $T_n$ .

Die Höhe der Nadelspitze  $y_v$  ist um die Vorhalteverstärkung größer als der Proportional sprung, also  $y_v = y_p V_v$ , und die Verzögerungszeit  $T_1$  um  $V_v$  kleiner als die Vorhaltezeit, also  $T_v = V_v T_1$ .

Aus den beiden letzten Beziehungen ergibt sich somit indirekt die Vorhaltezeit.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

Realisierung eines PID-Reglers

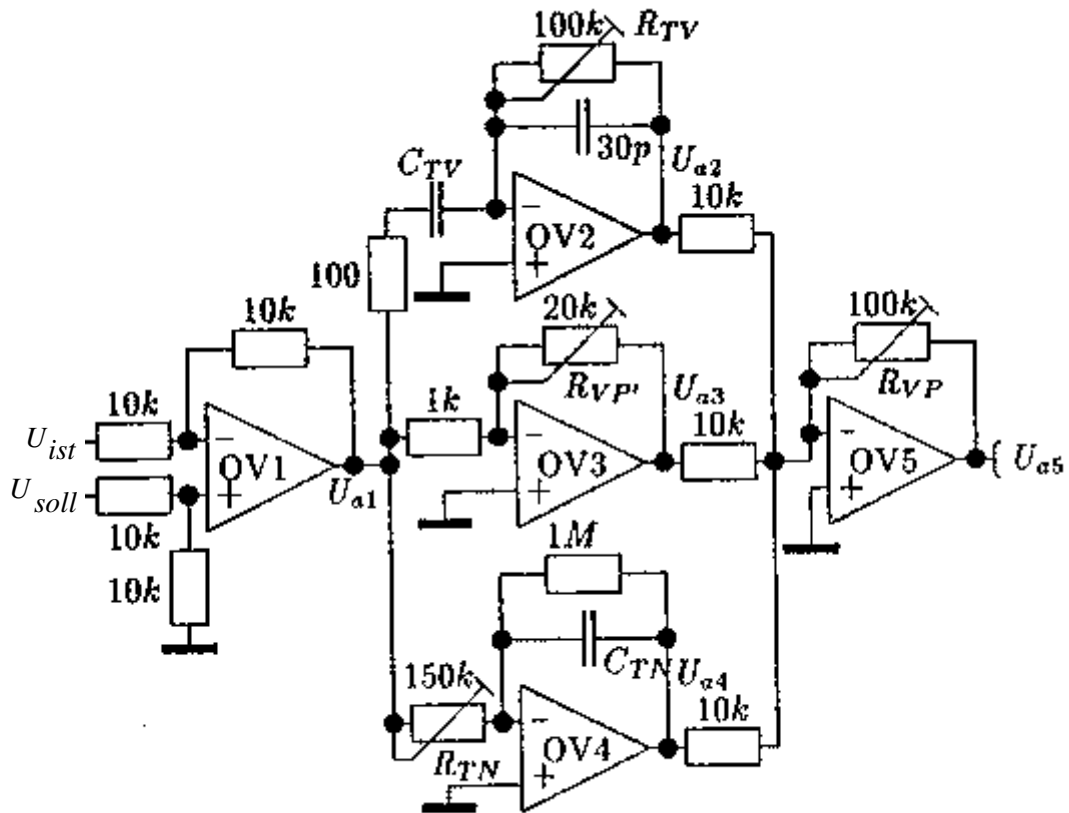


Abbildung 12: Schaltbild eines PID-Reglers aus Einzelreglern (aus /5/ „Vorbetrachtungen zum Versuch Regelschaltungen“ S. 5)

Baut man einen PID-Regler aus Einzelreglern auf, so gelten folgende Zusammenhänge:

- OV1:**  $U_{a1} = U_{soll} - U_{ist}$  |Differenzverstärker
- OV2:**  $U_{a2} = -T_v \frac{dU_{a1}}{dt}$   $T_v = R_{Tv} C_{Tv}$  |D-Regler
- OV3:**  $U_{a3} = -\frac{R_{vp'}}{1k\Omega} U_{a1}$  einstellen:  $U_{a3} = -U_{a1} \Rightarrow V_p' = -1$  |P-Regler
- OV4:**  $U_{a4} = -\frac{1}{T_n} \int U_{a1} dt$   $T_n = R_{TN} C_{TN}$  |I-Regler
- OV5:**  $U_{a5} = -V_p (U_{a2} + U_{a3} + U_{a4})$   $V_p = \frac{R_{vp}}{10k\Omega}$  |Addierverstärker

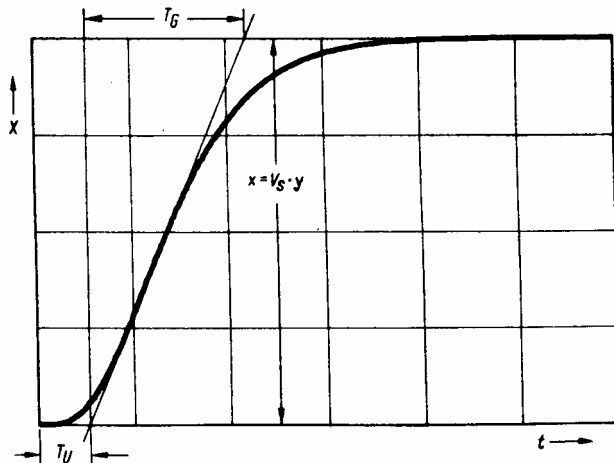
Daraus folgt für den gesamten PID-Regler mit  $U_e = U_{a1}$ :

$$U_a = V_p \left( U_e + T_v \frac{dU_e}{dt} + \frac{1}{T_n} \int U_e dt \right)$$

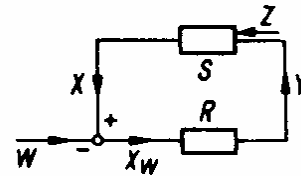
**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**

**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

**Regelstrecken**

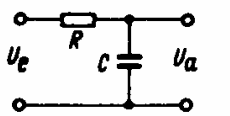


**Abbildung 13: Sprungantwort einer Regelstrecke mit Ausgleich**  
(aus /3/ Rosenberg, W.: „Elektronik, Heft 12/17 (1968)“ S. 365)



**Abbildung 14: Regelkreis bestehend aus Regelstrecke S, Regler R, Störung Z, Sollwert W, Regelabweichung  $x_w$  sowie Stellgröße Y**

Gibt man auf den Eingang einer Regelstrecke zum Zeitpunkt  $t_0$  eine Spannung, so ergibt sich am Ausgang ein Signal wie in Abbildung 13, die Sprungantwort der Regelstrecke. Wichtige Größen sind hierbei die Verzugszeit  $T_U$ , die Übergangszeit  $T_G$  sowie die Streckenverstärkung  $V_S$ , die sich durch den Endwert von  $x$ , dem Ausgangssignal, ergibt.



**Abbildung 15: Verzögerungsglied**  
(aus /3/ Rosenberg, W.: „Elektronik, Heft 12/17 (1968)“ S. 366)

Regelstrecken kann man mit Hilfe von Verzögerungsgliedern darstellen. Eine Regelstrecke n-ter Ordnung besteht aus n Verzögerungsgliedern, wobei für ein Glied nach Abbildung 15  $T_G = R_1 C_1$  und  $T_U = 0$  ist.

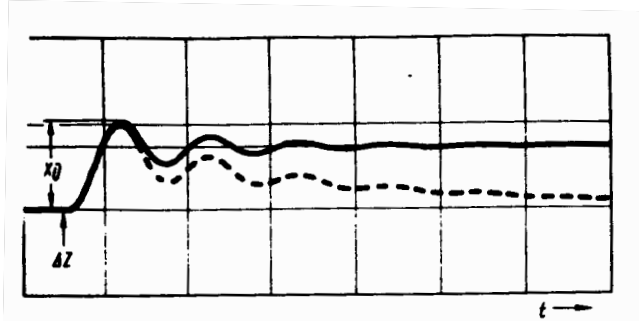
Werden mehrere Glieder hintereinander geschaltet, so wird  $T_U > 0$ . Es kann dabei zu einer Phasendrehung mit  $\varphi \geq 180^\circ$  zwischen Ein- und Ausgangssignal kommen, wodurch das Stabilitätsproblem auftritt.

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**

**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

**Optimierung eines Reglers**

Die Anpassung des Reglers an die Regelstrecke durch Variation der Reglerparameter stellt das Optimierungsziel des Regelkreises dar, sodass er den gewünschten Stabilitätszustand erhält.



**Abbildung 16: Einschwingvorgang eines Regelkreises nach Aufbringen einer Störung**  
(aus /3/ Rosenberg, W.: „Elektronik, Heft 12/17 (1968)“ S. 369)

Setzt man den Regelkreis einem Störsprung  $\Delta X$  oder Führungssprung  $\Delta W$  (vgl. Abbildung 14) aus, so kann man je nach Stabilitätszustand ein Einschwingverhalten nach Abbildung 16 beobachten.

Je nach Anwendung ist ein bestimmtes Einschwingverhalten optimal, wobei allgemein eine kleine Überschwingamplitude sowie eine kurze Einlaufzeit (3 bis 4 sichtbare Schwingungen) erwägt werden.

Vermindert man die Proportionalverstärkung, so wird der Einschwingvorgang stabiler und die erste Überschwingung  $x_{ü}$  größer.

Ohne I-Einfluss steigt dabei die bleibende Regelabweichung nach  $x_w = V_s \Delta Z \frac{1}{1+V_p}$ .

Mit I-Einfluss wird diese jedoch entsprechend der Nachstellzeit  $T_n$  gegen Null gehen. Für große  $T_n$  ist dies sichtbar (gestrichelte Linie aus Abbildung 16), für zu kleine  $T_n$  ergibt sich wie für zu große  $V_p$  eine Instabilität des Regelkreises.

Gleiches gilt für zu großes  $T_v$ , wobei ein Vergrößern anfangs wegen der Phasendrehung auch stabilisierend wirken kann.

Zur Optimierung haben sich je nach Reglertyp die folgenden Bedingungen als wirkungsvoll herausgestellt, wenn man die Verzugszeit  $T_U$ , die Übergangszeit  $T_G$  sowie die Streckenverstärkung  $V_S$  aus der Übergangsfunktion des Regelstrecke bestimmt hat:

<b>P-Regler:</b>	$V_p = \frac{1}{V_s} \frac{T_G}{T_U}$		
<b>I-Regler:</b>	$V_p = 0,8 \frac{1}{V_s} \frac{T_G}{T_U}$ $T_n = 3T_U$	<b>PID-Regler:</b>	$V_p = 1,5 \frac{1}{V_s} \frac{T_G}{T_U}$ $T_n = 2T_U$ $T_v = 0,5T_U$
<b>D-Regler:</b>	$V_p = 1,8 \frac{1}{V_s} \frac{T_G}{T_U}$ $T_v = 0,5T_U$		

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**

**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

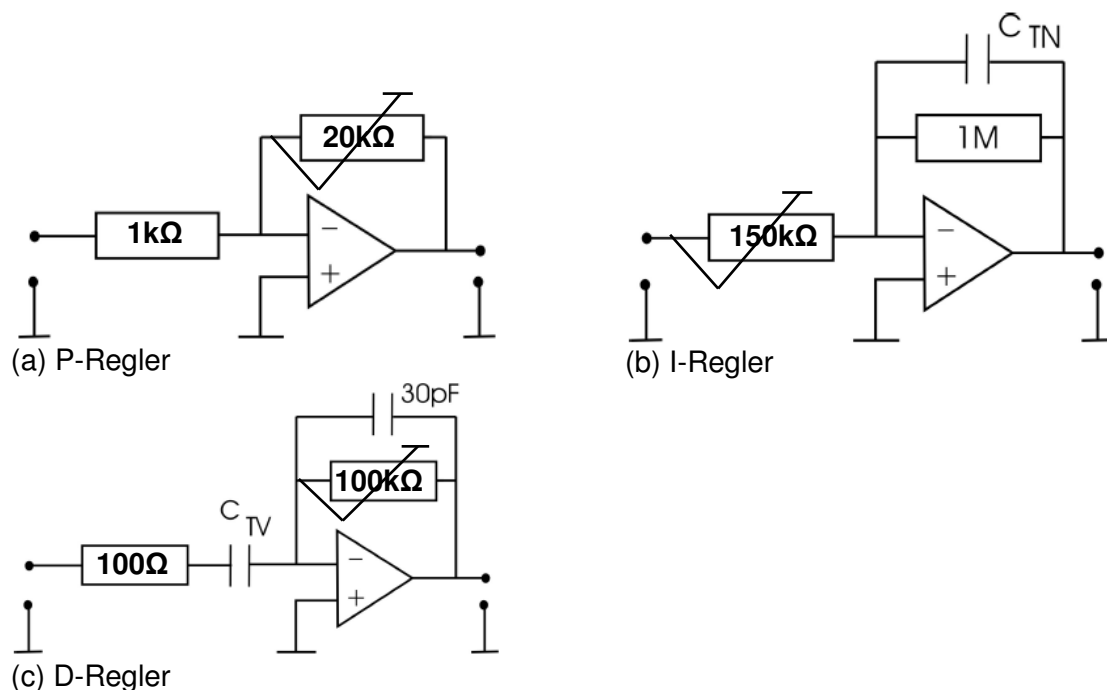
**III Versuchsteil**

**Sprungantwort von Reglern**

**III.i.a Versuchsaufbau**

Die für diesen Versuch benötigten Materialien sind:

- Modul mit OV's zur Realisierung von P/I/D-Reglern
- Oszilloskop Agilent 54603B mit Messkabeln
- Gleichspannungsquelle (+/- 12V, GND)
- Funktionsgenerator (für Rechteckspannung)
- diverse Laborstecker-Kabel



**Abbildung 17: Schaltbilder der verwendeten Regler**  
 (aus der Versuchsbeschreibung „Regelschaltungen“ der Universität Rostock)

Es wird ein

- (a) P-Regler
- (b) I-Regler
- (c) D-Regler
- (d) PID-Regler

nach den Schaltbildern aus Abbildung 17 (a), (b), (c) aufgebaut, wobei der PID-Regler durch Parallelschaltung der drei Einzelregler P, I, und D realisiert wird.



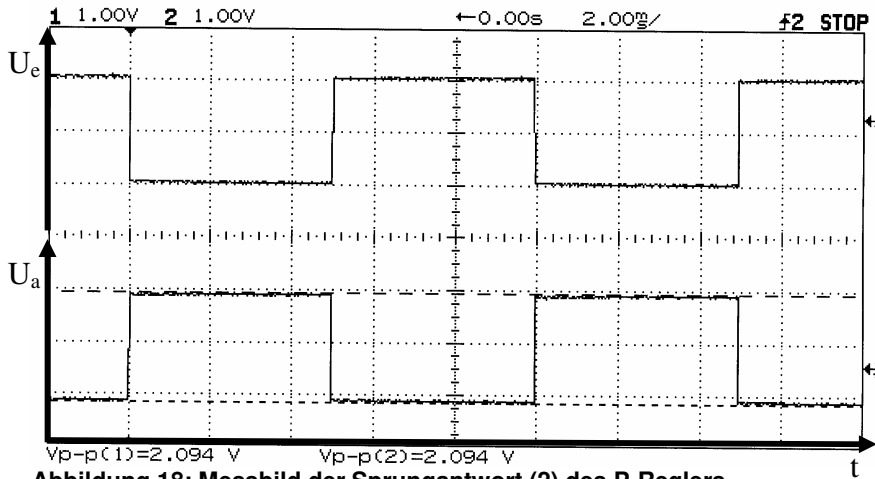
**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**

**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

**III.i.b Versuchsdurchführung**

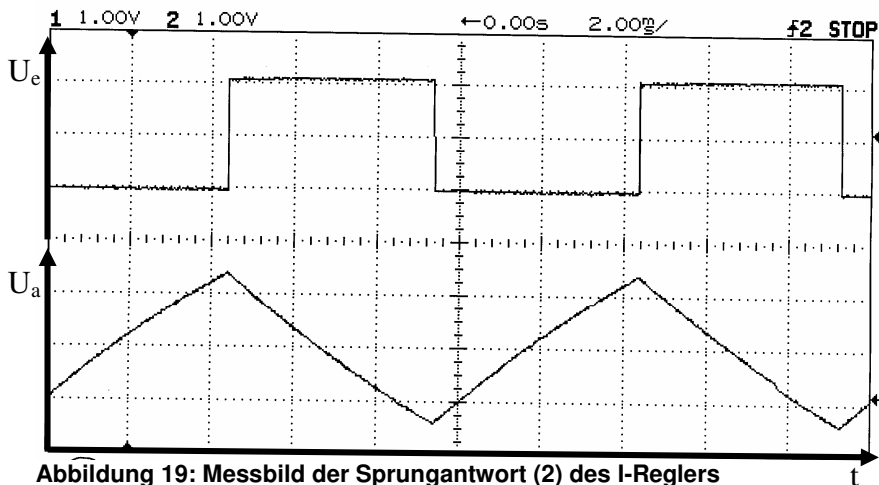
Es wird mit Hilfe des Oszilloskops die Sprungantwort, also das Ausgangssignal, auf das rechteckförmige Eingangssignal der einzelnen Regler ermittelt.

Dabei ergibt sich für den **P-Regler** folgendes Messbild (Abbildung 18):



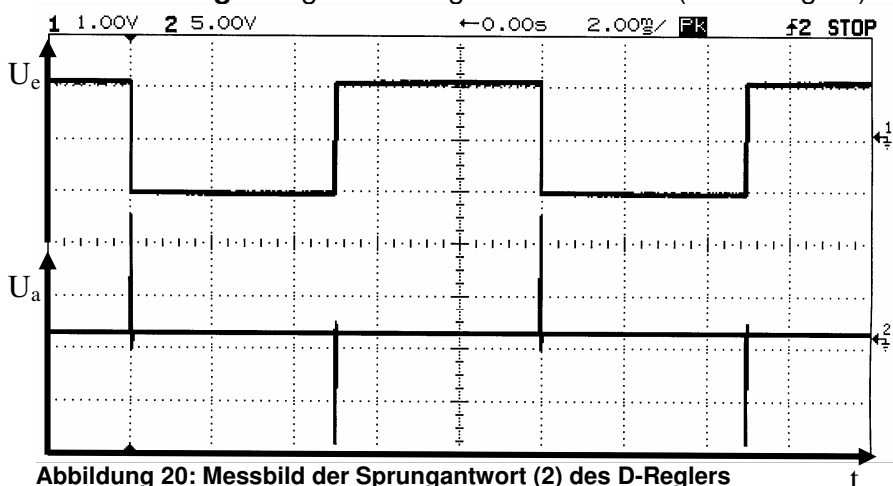
**Abbildung 18: Messbild der Sprungantwort (2) des P-Reglers**

Für den **I-Regler** ergibt sich folgendes Messbild (Abbildung 19):



**Abbildung 19: Messbild der Sprungantwort (2) des I-Reglers**

Für den **D-Regler** ergibt sich folgendes Messbild (Abbildung 20):



**Abbildung 20: Messbild der Sprungantwort (2) des D-Reglers**

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**

**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

Für den **PID-Regler** ergibt sich folgendes Messbild (Abbildung 21):

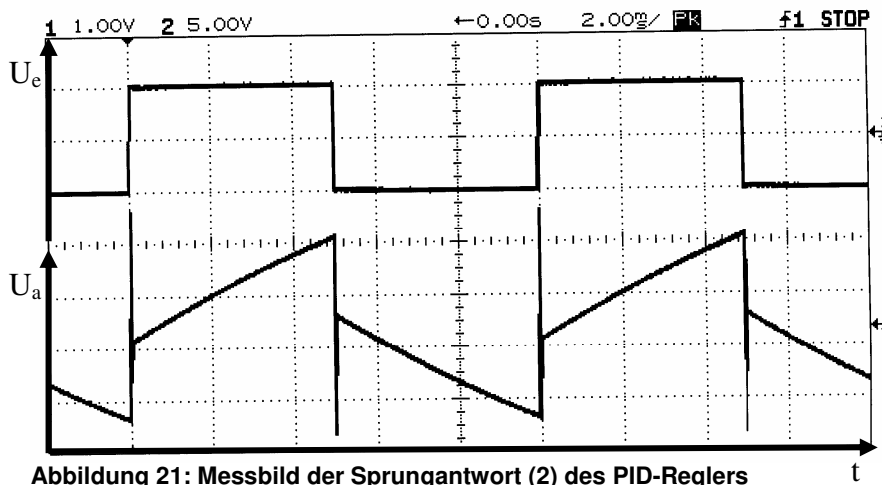


Abbildung 21: Messbild der Sprungantwort (2) des PID-Reglers

**III.i.c Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

- (a) Die Proportionalverstärkung des P-Reglers beträgt  $V_{p'} = -1$
- (b)
- (c)
- (d) Die Messergebnisse entsprechen den theoretischen Erwartungen im vollen Umfang bei einer geeigneten Wahl von  $C_{Tn}$  und  $C_{Tv}$ .

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**

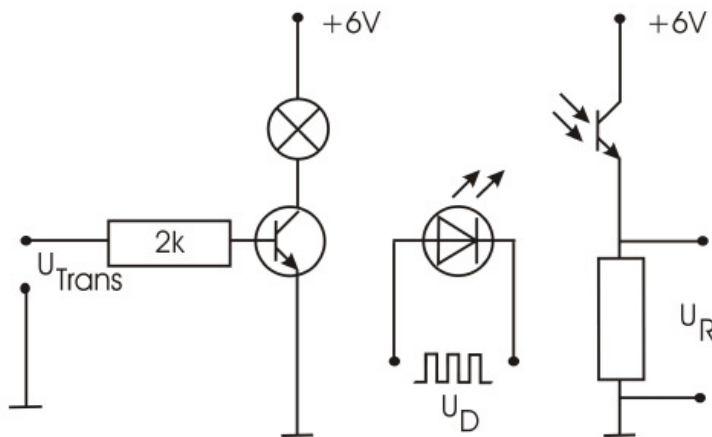
**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

**Übertragungsverhalten einer Regelstrecke**

**III.i.a Versuchsaufbau**

Die für diesen Versuch benötigten Materialien sind:

- Regelstreckenmodul nach Abbildung 22
- Oszilloskop Agilent 54603B mit Messkabeln
- Gleichspannungsquelle (+ 5V, GND)
- Funktionsgenerator (für Rechteckspannung < 1Hz)
- diverse Laborstecker-Kabel



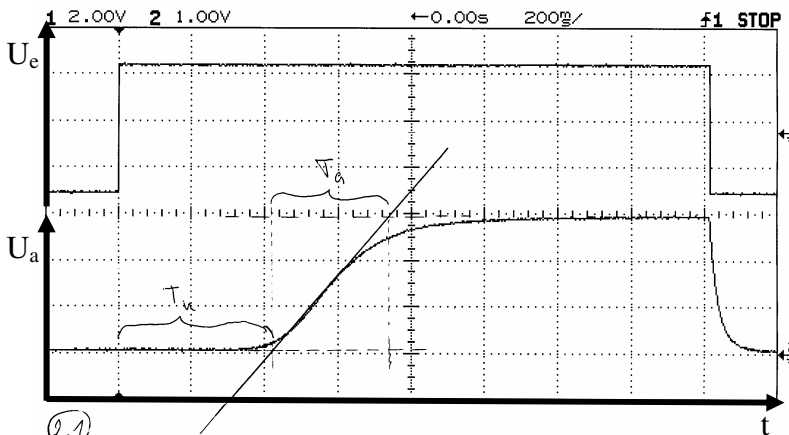
**Abbildung 22: Schaltbild einer Regelstrecke**  
(aus der Versuchsbeschreibung „Regelschaltungen“ der Universität Rostock)

Es wird eine Regelstrecke nach Abbildung 22 aufgebaut. Dabei ist  $U_D = 0V$  und die Apparatur gegen Fremdlicht zu schützen!

**III.i.b Versuchsdurchführung**

Es wird die Sprungantwort einer nach Abbildung 22 aufgebauten Regelstrecke mit dem Oszilloskop gemessen.

Dabei ergibt sich folgendes Messbild:



$T_u = 424 \text{ ms}$

$T_a = 328 \text{ ms}$

**Abbildung 23: Sprungantwort der Regelstrecke**

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**

**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

**III.i.c Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Anhand der Sprungantwort wird die für den nächsten Versuch erforderliche Dimensionierung des Regelkreises, bestehend aus PID-Regler und Regelstrecke, ermittelt.

Dabei ist  $T_u = 424ms$  und  $T_G = 328ms$ .

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I****Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007****Aufbau eines optimierten Regelkreises mit PID****III.i.a Versuchsaufbau**

Die für diesen Versuch benötigten Materialien sind:

- PID-Regler (dimensioniert für Regelstrecke (s.u.))
- Regelstreckenmodul nach Abbildung 22
- Oszilloskop Agilent 54603B mit Messkabeln
- Gleichspannungsquelle (+ 5V, GND)
- Funktionsgenerator (für Rechteckspannung zum Betrieb der LED)
- diverse Laborstecker-Kabel

PID-Regler und Regelstrecke werden zu einem Regelkreis zusammengeschaltet. Als Störgröße wird die LED aus Abbildung 22 nun auch beschaltet.

**III.i.b Versuchsdurchführung**

Es werden nun die Störgröße, die Istgröße und die Stellgröße des Regelkreises mit Hilfe des Oszilloskops aufgenommen.

Dabei ergibt sich folgendes Messbild durch gleichzeitige Darstellung aller Größen über die „Recall Trace“-Option des Oszilloskops (Abbildung 24):

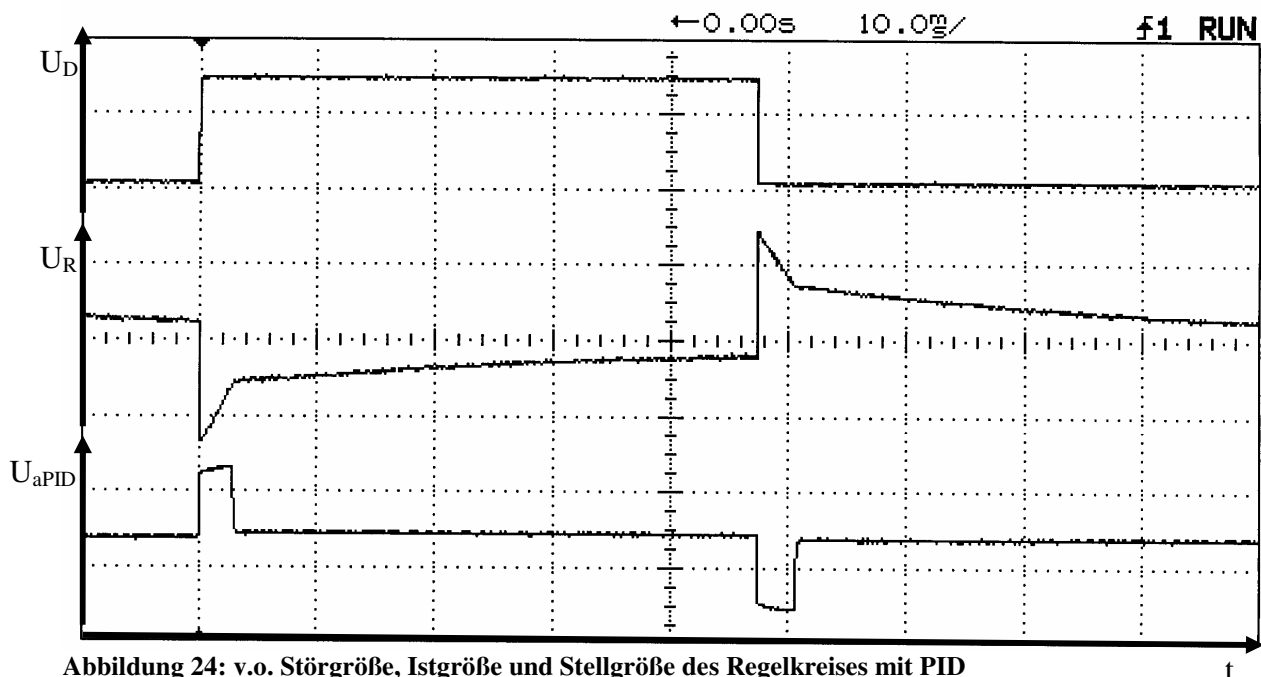


Abbildung 24: v.o. Störgröße, Istgröße und Stellgröße des Regelkreises mit PID

**III.i.c Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

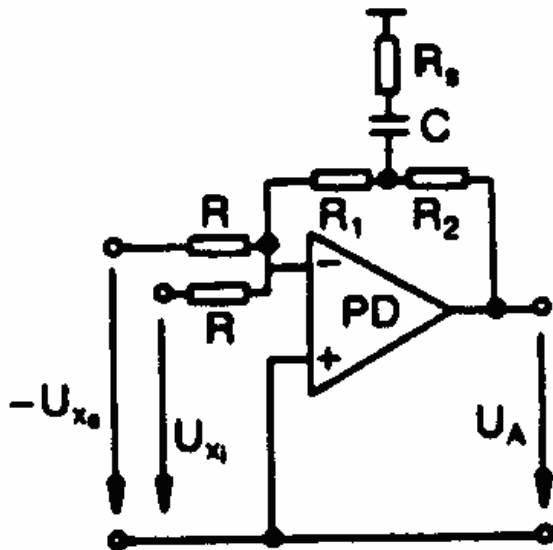
Die Ergebnisse entsprechen den theoretischen Erwartungen im vollen Umfang, wenn der Schaltung folgende Werte nach Seite 7 und 12 zugrunde gelegt werden:

$$R_{T_v} = 54,24k\Omega, C_{T_v} = 1\mu F \text{ und } R_{T_n} = 848k\Omega, C_{T_n} = 3,9\mu F$$

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

IV Anhang



A 1: Ein PD-Regler mit einem OV realisiert  
(aus /2/ Müller, M. „Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Heft 3/35“ S. 27)