

Praktikum Regelungstechnik
Versuch V20 – Drehzahlregelung

Sven Richter (2685340)

30.06.2004

Inhaltsverzeichnis

4	Vorbereitung	2
4.1	Phasengänge des aufgeschnittenen Kreises mit unterlagerter Stromregelung	2
4.2	Regelabweichung	2
4.2.1	Einschleifiger Drehzahlregelkreis	2
4.2.2	Drehzahlregelung mit unterlagerter Stromregelung	3
4.3	Berechnung der Parameter k_R und T_N	4
4.3.1	einschleifiger Regelkreis	4
4.3.2	Drehzahlregelung mit unterlagerter Stromregelung	4
4.4	Experiment zur R_A Bestimmung	5
4.5	Programm zur Messwerterfassung	5
4.5.1	Motormomentbestimmung m	5
4.5.2	Beschleunigungsmoment m_b (für $m_L = const$)	5
5	Durchführung	6
5.1	Führungssprungantwort $\omega(t)$	6
5.2	Einschleifiger Drehzahlregelkreis	11
5.2.1	Bestimmung der Reglerparameter	11
5.2.2	Führungs- und Störsprungantworten $\omega(t)$ für obige Reglereinstellung	11
5.2.3	Führungs- und Störsprungantworten $\omega(t)$ für Betrags- und symmetrischen Optimum	13
5.3	Drehzahlregelung mit unterlagertem Stromregelkreis	16
5.3.1	Einstellen des Regelkreises auf gutes Stör- und Führungsverhalten	16
5.3.2	Führungs- und Störsprungantworten $\omega(t)$	16
5.3.3	Führungssprungantwort $\omega(t)$ bei konstanter Last	18
5.3.4	Führungssprungantwort $\omega(t)$ für $k_R = 0,1 * k_{R_{symOpt}}$	19
5.4	Widerstand des Ankerkreises R_A	20
5.4.1	Rechnerische Bestimmung	20
5.5	Bestimmung durch Messprogramm	21
6	Auswertung	22
6.1	Begründung der Änderungen des Regelfehlers e und des dynamischen Verhaltens der Regelgröße ω	22
6.1.1	in Abhängigkeit der Verstärkung k_R	22
6.1.2	in Abhängigkeit des Arbeitspunktes ω_0	22
6.2	Trägheitsmoment J	22
6.3	Begründung der Ergebnisse von Aufgabe 5.3.4	22

4 Vorbereitung

Versuchsstand I

$$\begin{aligned}
 R_A &= 2,5\Omega \\
 c\Phi &= 0,068Vs \\
 J &= 1,0 * 10^{-3}Ws^3 \\
 T_s &= 100ms \\
 T_A &= 10ms \\
 T_M &= 0,54s \\
 T_{mess} &= 5ms \\
 k_A &= \frac{c\Phi}{R_A} = 0,0272As \\
 k_m &= \frac{R_A}{C^2\Phi^2} = 540,66 \frac{1}{AVs^2} \\
 k_S &= 2,0 \\
 k_{mess} &= 0,03Vs \\
 k_1 &= 0,39 \frac{A}{V} \\
 a &= 2
 \end{aligned}$$

Versuchsstand II (Aufg 5.2)

$$\begin{aligned}
 R_A &= 3,25\Omega \\
 c\Phi &= 0,155Vs \\
 J &= 1,85 * 10^{-3}Ws^3 \\
 T_s &= 2ms \\
 T_A &= 8ms \\
 T_M &= 0,25s \\
 T_{mess} &= 5ms \\
 k_A &= \frac{c\Phi}{R_A} = 0,0477As \\
 k_m &= \frac{R_A}{C^2\Phi^2} = 135,27 \frac{1}{AVs^2} \\
 k_S &= 3,60 \\
 k_{mess} &= 0,0448Vs \\
 k_1 &= 1 \frac{A}{V} \\
 a &= 2
 \end{aligned}$$

4.1 Phasengänge des aufgeschnittenen Kreises mit unterlagerter Stromregelung

$$G_0 = \frac{1}{1 + sT_V} \frac{k_{mess}k_Rk_1(1 + sT_N)c\Phi}{sT_NsJ(1 + s2T_A)}$$

$$G_0 = \frac{k_{mess}k_Rk_1c\Phi}{T_NJ} \frac{(1 + sT_N)}{s^2(1 + sT_V)(1 + s2T_A)}$$

symmetrisches Optimum:

$$k_R = \frac{J}{2k_1c\Phi k_{mess}(2T_A + T_{mess})} = 25,14$$

$$T_V = T_N = 4(aT_s + T_{mess}) = 0,1s$$

$$G_0 = 200,0 * \frac{1}{s^2(1 + \frac{s}{50})}$$

Die grafische Darstellung der Phasengänge ist in Abbildung 1 dargestellt.

4.2 Regelabweichung

$$T_N = \infty$$

4.2.1 Einschleifiger Drehzahlregelkreis

$$G_0(s) = \frac{1}{(1+sT_V)} \frac{k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m}{(1+sT_S)(1+sT_A)(1+sT_M)}$$

$$Y_\Omega^W = \frac{k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m(1+sT_V)}{(1+sT_S)(1+sT_A)(1+sT_M)(1+sT_{mess})+(1+sT_V)k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m} \frac{W_0}{s}$$

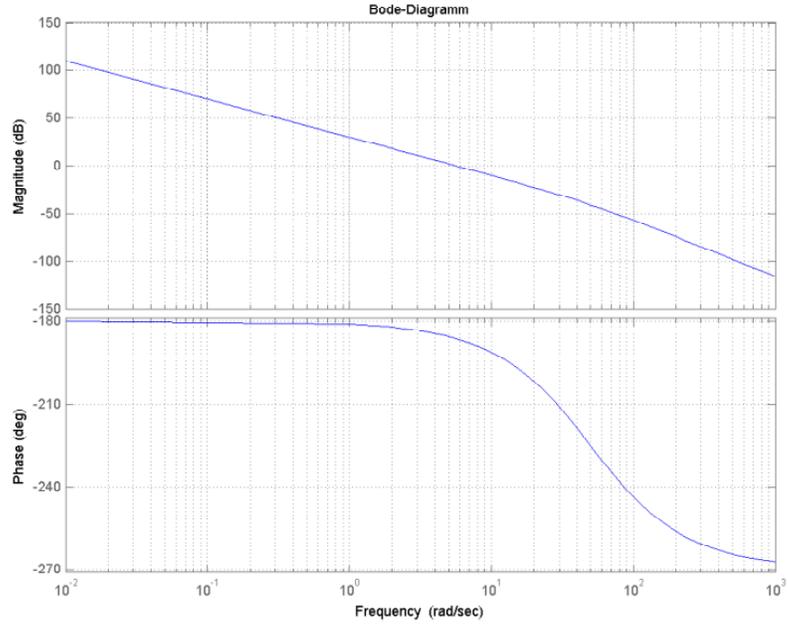


Abbildung 1: Phasengänge des aufgeschnittenen Kreises

$$\begin{aligned}
 \lim_{s \rightarrow 0} sY_{\Omega}^W &= \frac{k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m}{1+k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m}W_0 \\
 \rightarrow e_w &= \frac{k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m}{1+k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m} \\
 Y_{\Omega}^{ML} &= \frac{k_m(1+sT_S)(1+sT_A)(1+sT_{mess})}{(1+sT_S)(1+sT_A)(1+sT_M)(1+sT_{mess})+k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m} \frac{-M_L}{s} \\
 \lim_{s \rightarrow 0} sY_{\Omega}^{ML} &= \frac{k_m}{1+k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m}(-M_{L0}) \\
 \rightarrow e_{M_L} &= \frac{k_m}{1+k_{mess}k_Rk_Sk_Ak_m}
 \end{aligned}$$

4.2.2 Drehzahlregelung mit unterlagerter Stromregelung

$$\begin{aligned}
 G_0(s) &= \frac{1}{(1+sT_V)} \frac{k_{mess}k_Rk_1c\phi}{(1+s2T_A)sJ} \\
 Y_{\Omega}^W &= \frac{k_{mess}k_Rk_1c\phi(1+sT_{mess})}{(1+sT_V)(1+s2T_A)(1+sT_{mess})sJ+(1+sT_V)k_{mess}k_Rk_1c\phi} \frac{W_0}{s} \\
 \lim_{s \rightarrow 0} sY_{\Omega}^W &= W_0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\rightarrow \underline{e_w = 0} \\ Y_{\Omega}^{ML} &= \frac{(1+sT_{mess})(1+s2T_A)}{(1+s2T_A)(1+sT_{mess})sJ+k_{mess}k_Rk_1c\phi} \frac{-M_{L0}}{s} \\ \lim_{s \rightarrow 0} sY_{\Omega}^{ML} &= \frac{1}{k_{mess}k_Rk_1c\phi} (-M_{L0}) \\ &\rightarrow \underline{e_{ML} = \frac{1}{k_{mess}k_Rk_1c\phi}} \end{aligned}$$

4.3 Berechnung der Parameter k_R und T_N

4.3.1 einschleifiger Regelkreis

Betragsoptimum:

$$T_N = T_M$$

$$k_R = \frac{T_M}{2V_S T_{\Sigma}} = \frac{T_M}{2k_S k_A k_m k_{mess} (T_A + T_S + T_{mess})}$$

symmetrisches Optimum

$$T_N = 4(T_A + T_S + T_{mess})$$

$$k_R = \frac{T_M}{2V_S T_{\Sigma}} = \frac{T_M}{2k_S k_A k_m k_{mess} (T_A + T_S + T_{mess})}$$

	Versuchstand I	Versuchstand II
symmetrisches Optimum	$k_R = 2,66$ $T_N = 0,1s$	$k_R = 8,00$ $T_N = 0,06s$
Betrags-optimum	$k_R = 2,66$ $T_N = 0,54s$	$k_R = 8,00$ $T_N = 0,25s$

4.3.2 Drehzahlregelung mit unterlagerter Stromregelung

Drehzahlregelung symmetrisches Optimum:

$$k_R = \frac{J}{2k_1 c \Phi k_{mess} (2T_A + T_{mess})} = 25,14$$

$$T_V = T_N = 4(aT_s + T_{mess}) = 0,1s$$

Stromregler Betragsoptimum:

$$T_{1n} = T_s = 0,1s$$

$$k_{1R} = \frac{T_A}{2k_S \frac{1}{R_A} (T_S + T_A)} = 0,057 \frac{V}{A}$$

4.4 Experiment zur R_A Bestimmung

Durch Messung im stationären Fall wird der Spannungsabfall über der Spule Null. Der ohmsche Widerstand der Spule ist minimal und geht ggf. mit in U_b ein.

$$u_A = i_A R_A + U + U_b = i_A R_A + c\phi \omega + U_b$$

→ mindestens zwei verschiedene Messungen für unterschiedliche i_A , dabei bleibt U_b konstant und ω sowie U_A werden gemessen.

4.5 Programm zur Messwerterfassung

4.5.1 Motormomentbestimmung m

$$i_A \text{ messen} \rightarrow M = c\phi i_A$$

4.5.2 Beschleunigungsmoment m_b (für $m_L = const$)

$$M_b = M - M_L \rightarrow M_L = const = m * g * r$$

$$r = 60mm \quad m = 17g + 204g = 221g$$

$$M_L = 0,13 Nm$$

5 Durchführung

5.1 Führungssprungantwort $\omega(t)$

Die Abbildungen 2 bis 4 Zeigen die Messergebnisse für $\Delta\omega = 30\text{rad/s}^{-1}$, $T_V = 0$ am Arbeitspunkt $\omega_0 = 75\text{rad/s}^{-1}$ für $T_N = \infty$

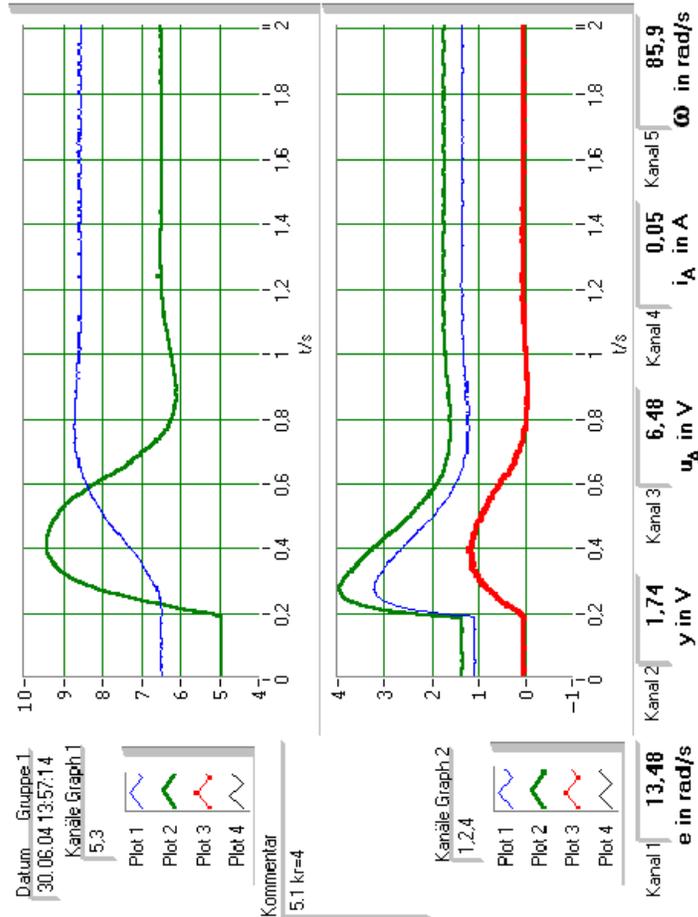


Abbildung 2: Führungssprungantwort mit $k_r = 4$

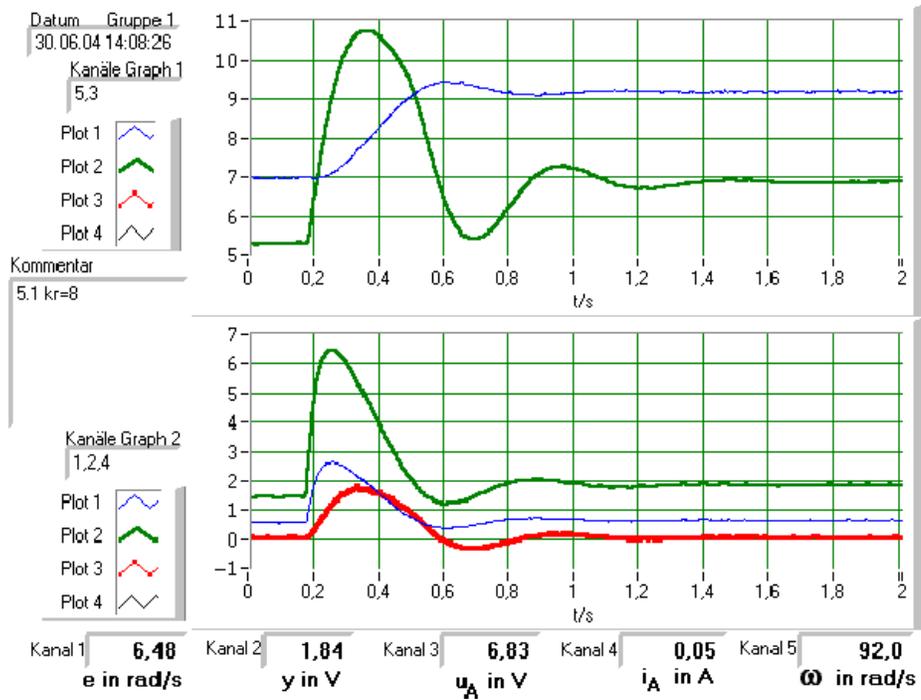


Abbildung 3: Führungssprungantwort mit $k_r = 8$

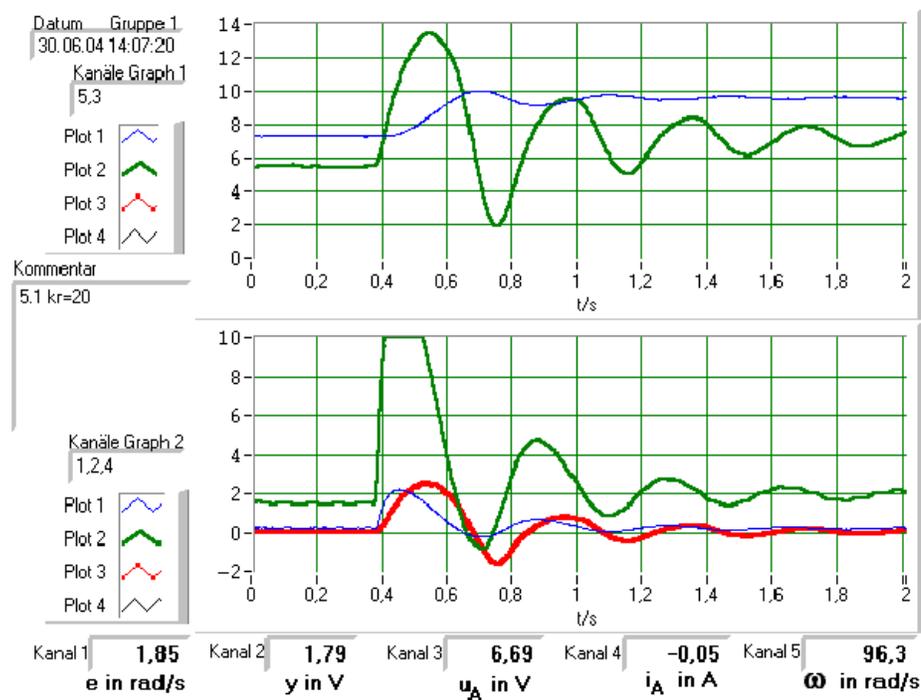


Abbildung 4: Führungssprungantwort mit $k_r = 20$

Die Abbildungen 5 bis 5 Zeigen die Messergebnisse für $\Delta w = 30\text{rads}^{-1}$,
 $T_V = 0$ mit $k_R = 20$ für $T_N = \infty$

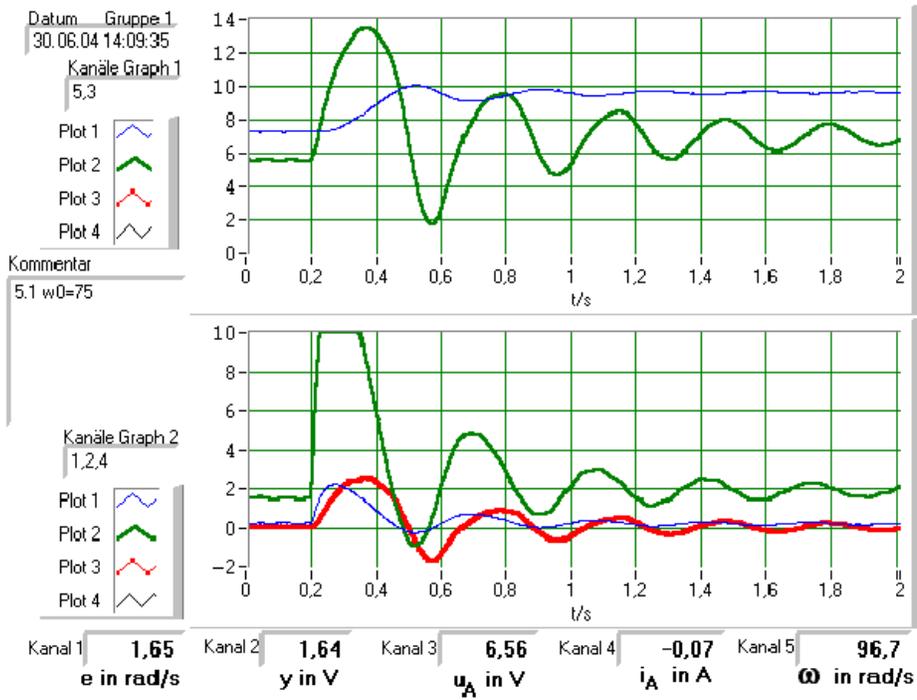


Abbildung 5: Führungssprungantwort mit $w = 75$

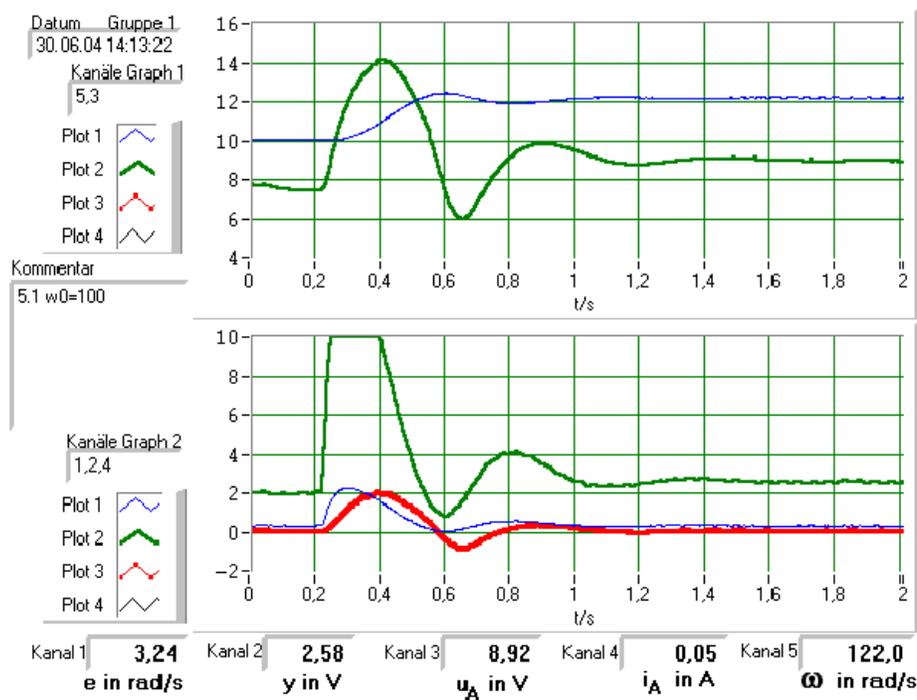


Abbildung 6: Führungssprungantwort mit $w = 100$

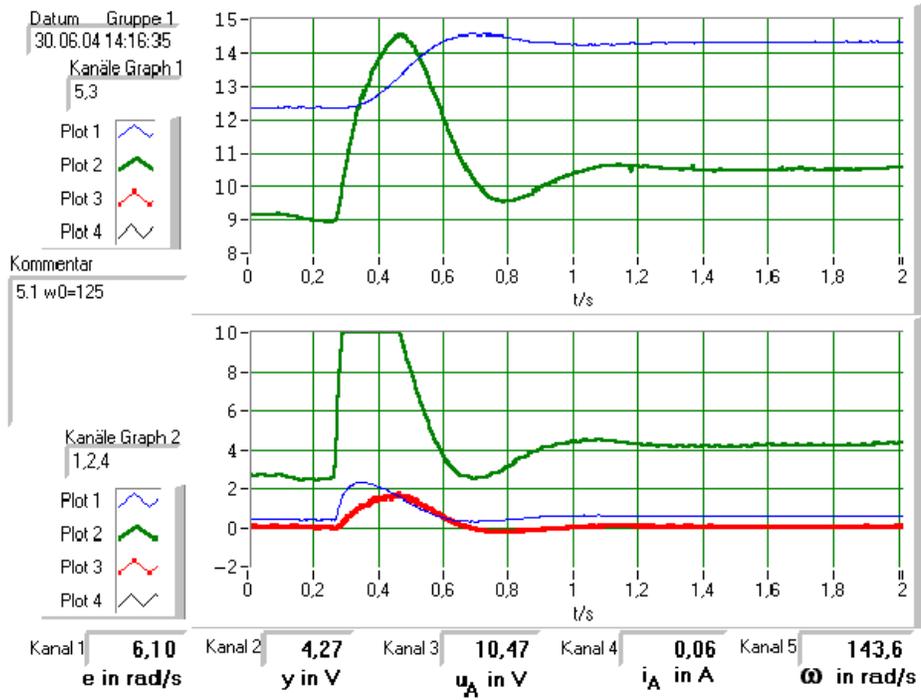


Abbildung 7: Führungssprungantwort mit $w = 125$

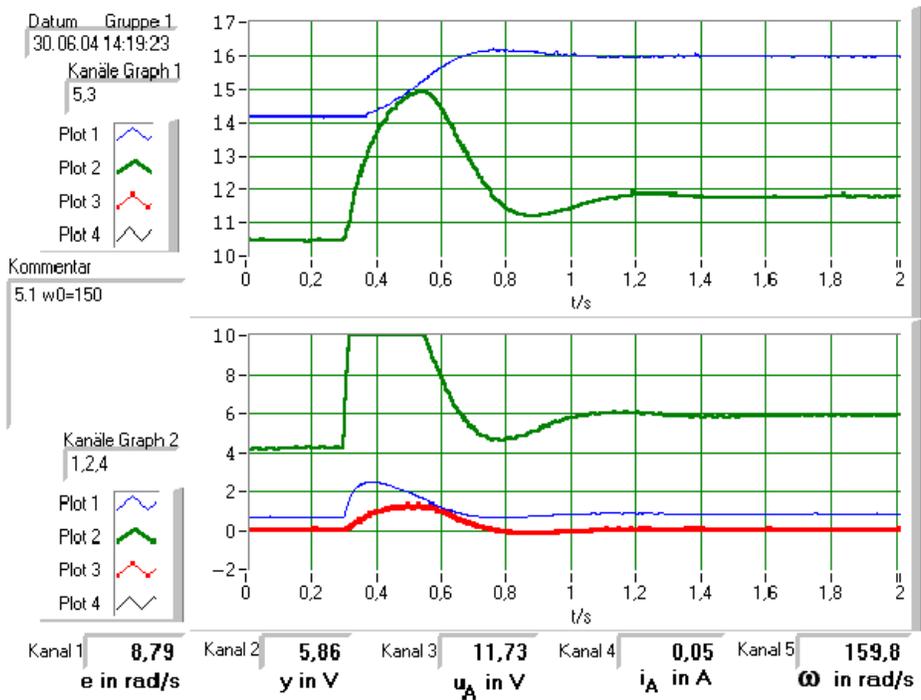


Abbildung 8: Führungssprungantwort mit $w = 150$

5.2 Einschleifiger Drehzahlregelkreis

5.2.1 Bestimmung der Reglerparameter

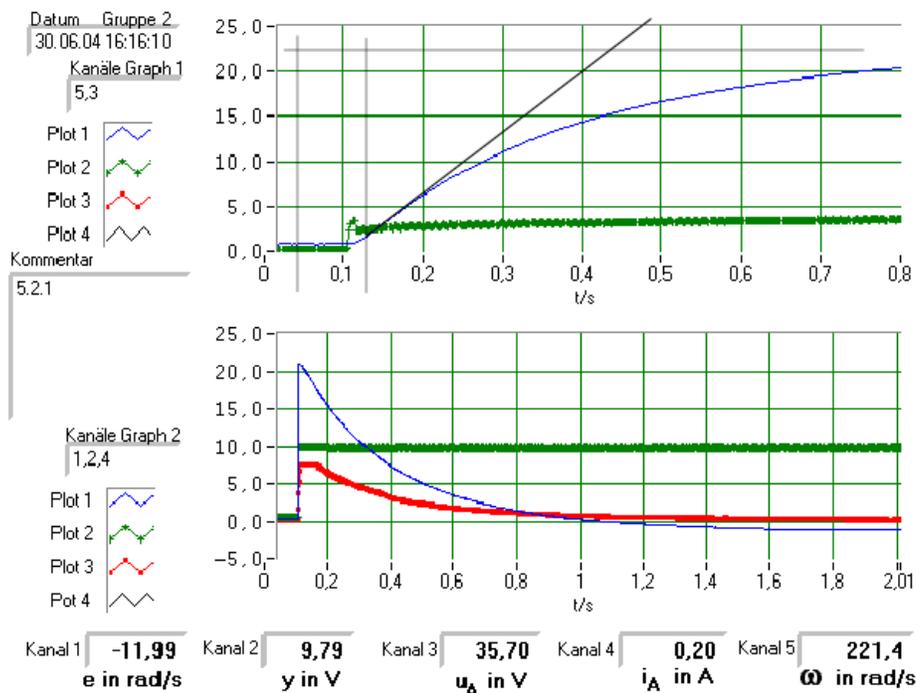


Abbildung 9: Sprungantwort der Regelstrecke (gestaucht mit Hilfslinien zum ablesen der Parameter)

Durch Ablesen der Parameter T_a und T_t in Abbildung 9 wurden folgende Reglerparameter nach CHIEN, HRONES und RESWICK für den PI-Regler ermittelt. Leider konnte bei dem Regelkreis kein Überschwingen beobachtet werden und daher wurde mit den Formeln für $\ddot{u} = 0\%$ gerechnet.

$$T_a = 0,3s \quad T_t = 0,1s \quad v_S = 22$$

$$T_N = 1,2T_a = 0,36s$$

$$\frac{T_t k_R v_s}{T_a} = 0,35 \rightarrow k_r = 0,048$$

5.2.2 Führungs- und Störsprungantworten $\omega(t)$ für obige Reglereinstellung

Die Abbildung 10 und 11 zeigen die Führungssprungantwort des System für $T_V = 0$ und $T_V \neq 0$. ($w_0 = 75\text{rad/s}^{-1}$, $\Delta w = 30\text{rad/s}^{-1}$). Die Abbildung ?? stellt dagegen das Störverhalten bei einem Lastwechsel von 221g auf 17g dar.

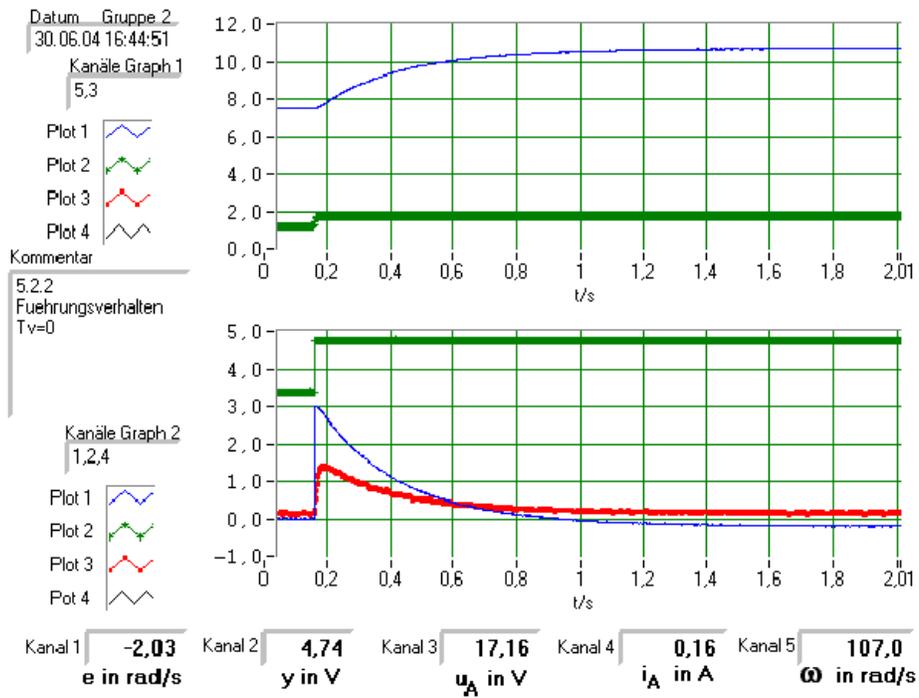


Abbildung 10: Führungssprungantwort mit $T_V = 0$

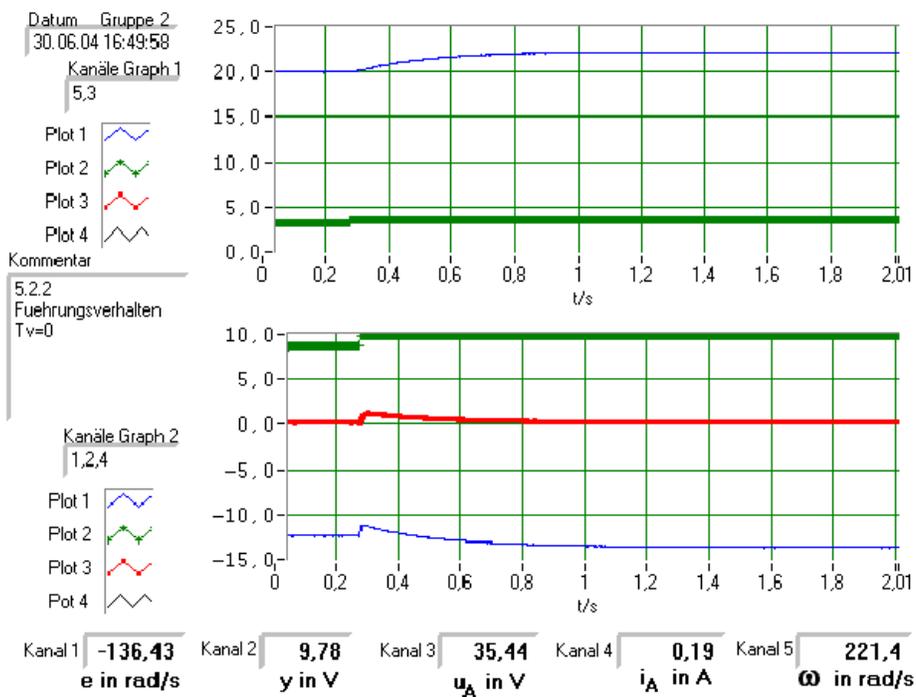


Abbildung 11: Führungssprungantwort mit $T_V = 1,3$

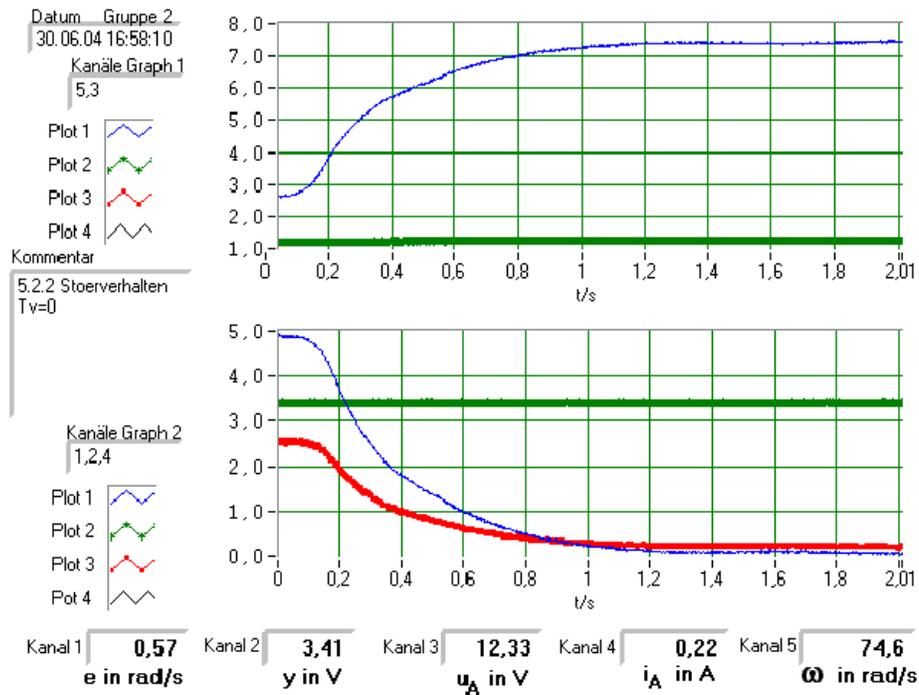


Abbildung 12: Störungssprungantwort mit $T_V = 0$

5.2.3 Führungs- und Störsprungantworten $\omega(t)$ für Betrags- und symmetrischen Optimum

Die Abbildungen 13 bis 16 zeigen jeweils die Antwort des System auf einen Führungssprung von 30 rad/s^{-1} und Störungssprung (Entlastung von 221g auf 17g).

Dabei wurden bei den Abbildungen 13 und 14 das System auf das Betragsoptimum eingestellt (d.h. $T_N = 0,3 \text{ s}$ $k_R = 8,0$) und für die Abbildungen 15 und 16 auf das symmetrische Optimum (d.h. $T_N = 0,1 \text{ s}$ $k_R = 8,0$).

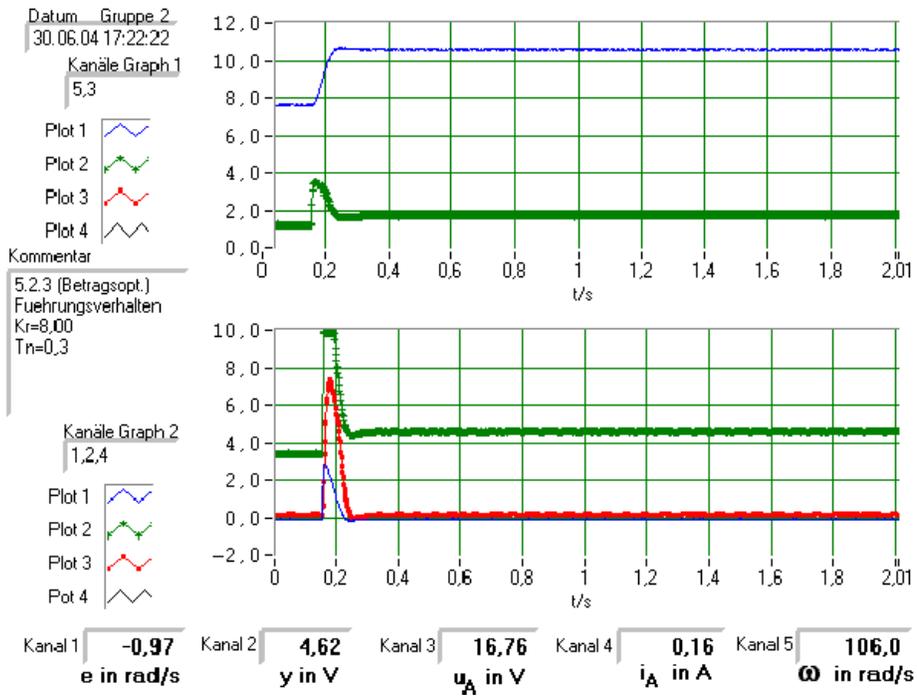


Abbildung 13: Führungssprungantwort für das Betragsoptimum

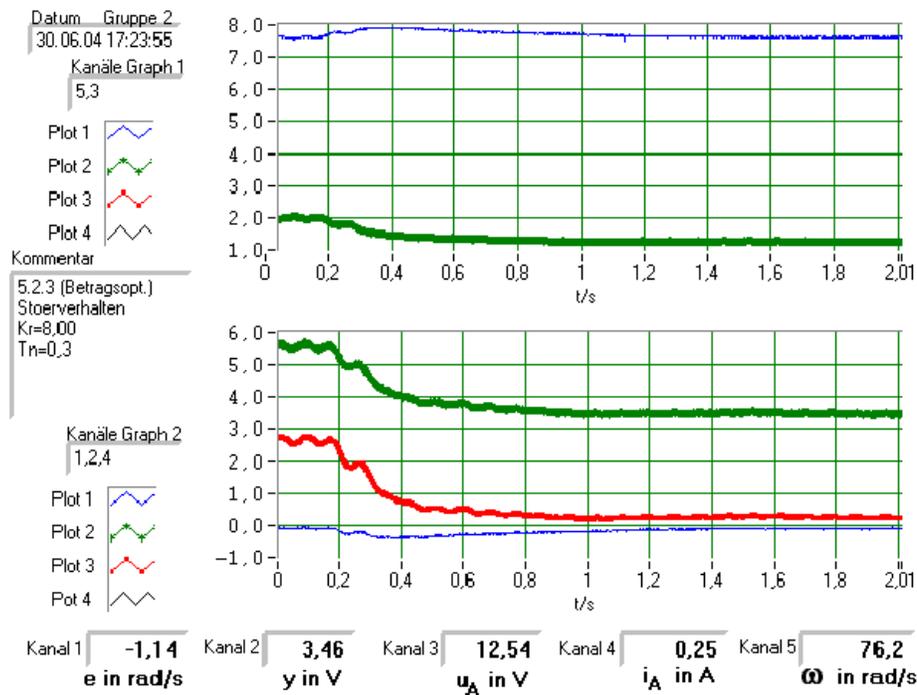


Abbildung 14: Störungssprungantwort für das Betragsoptimum

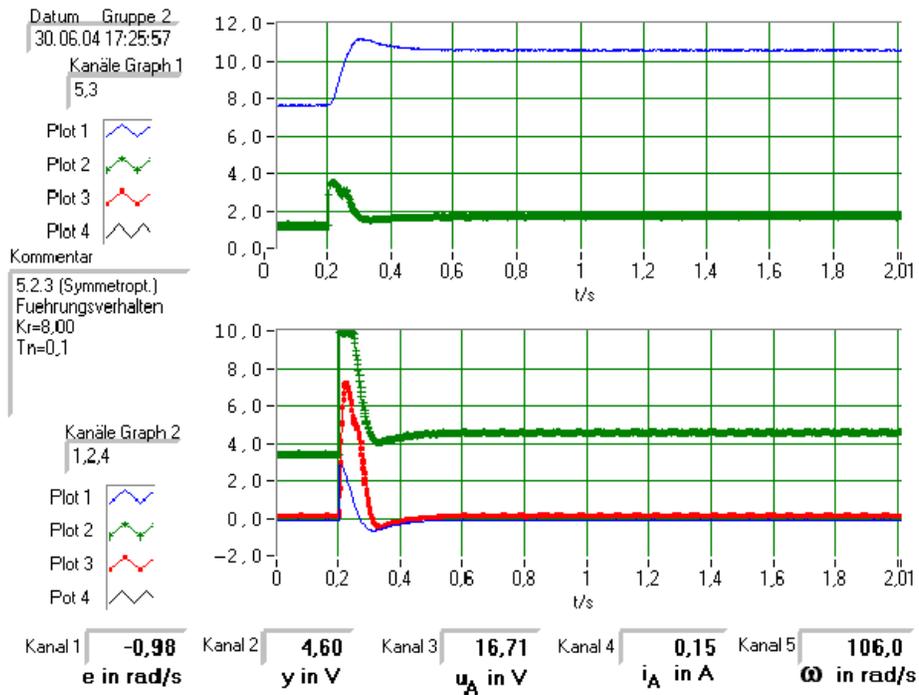


Abbildung 15: Führungssprungantwort für das symmetrische Optimum

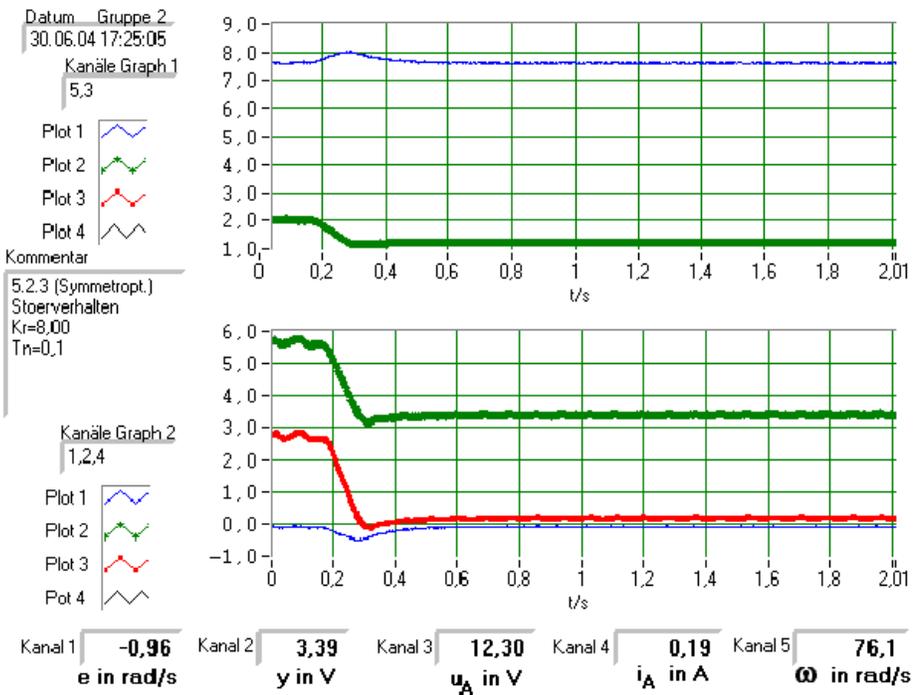


Abbildung 16: Störungssprungantwort für das symmetrische Optimum

5.3 Drehzahlregelung mit unterlagertem Stromregelkreis

5.3.1 Einstellen des Regelkreises auf gutes Stör- und Führungsverhalten

Der maximale Ankerstrom wurde auf $3,1A$ eingestellt. Desweiteren wurde $T_V = 1s$ und $k_R = 25,14$ eingestellt.

5.3.2 Führungs- und Störspungantworten $\omega(t)$

Die Abbildung 17 und 18 zeigen jeweils die Systemantwort für die unter Kapitel 5.3.1 eingestellten Werte.

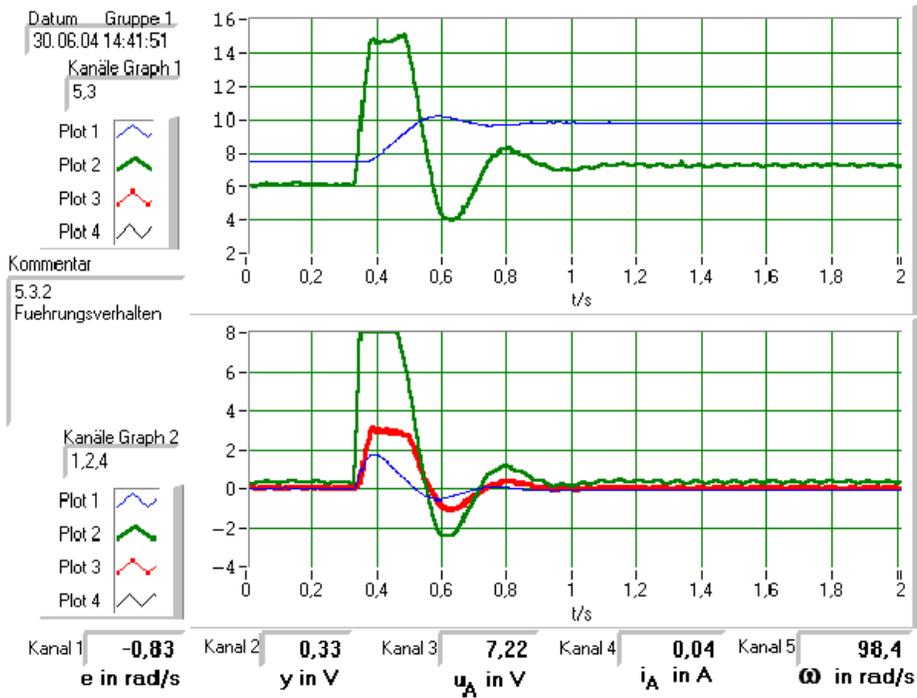


Abbildung 17: Führungssprungantwort bei konstanter Last

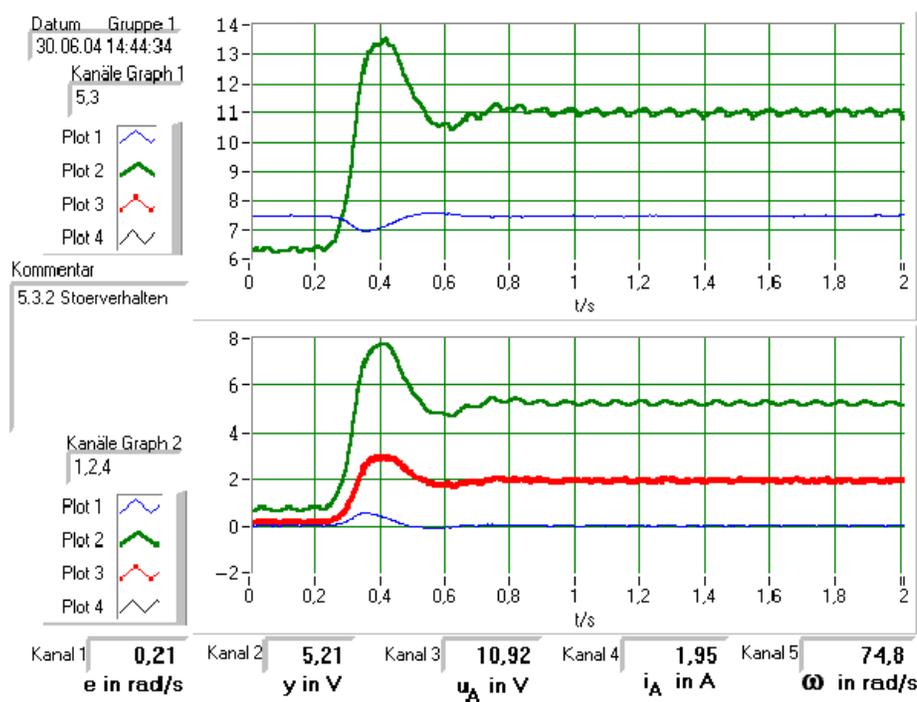


Abbildung 18: Störungssprungantwort bei konstanter Last

5.3.3 Führungssprungantwort $\omega(t)$ bei konstanter Last

Die Abbildung 19 stellt die Antwort des belasteten Systems ($m_L = 221g$) auf einen Führungssprung von $\Delta\omega = 30\text{rad/s}^{-1}$ dar.

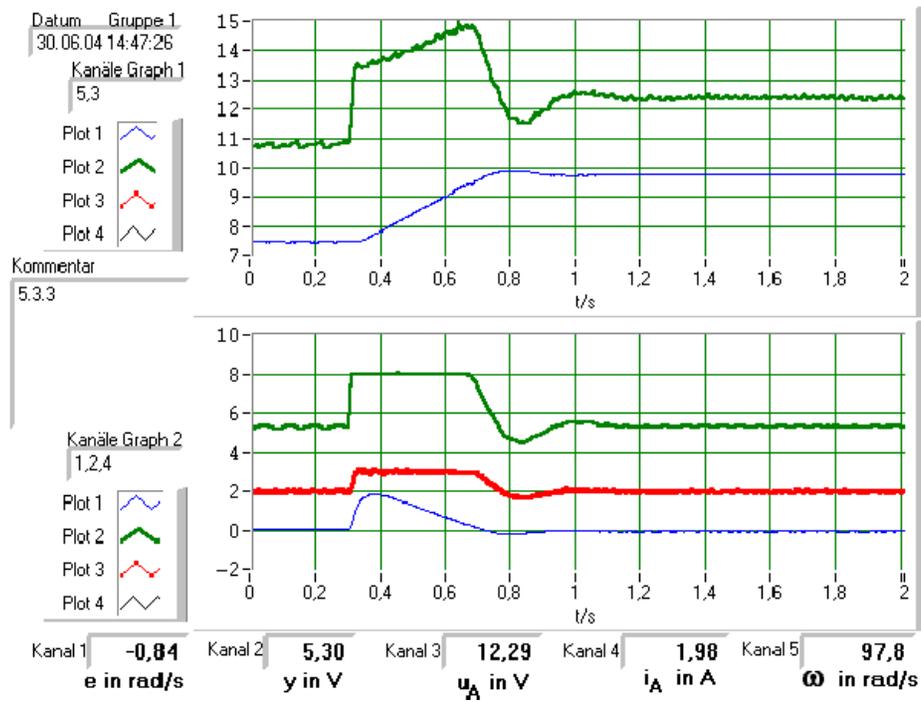


Abbildung 19: Führungssprungantwort bei konstanter Last

5.3.4 Führungssprungantwort $\omega(t)$ für $k_R = 0,1 * k_{R_{Symmetrisches\ Optimum}}$

Die Antwort des unbelasteten Systems auf auf einen Führungssprung ist in Abbildung 20 zu erkennen. Dabei wurde allerdings der Systemparameter k_R auf ein Zehntel des Wertes für das symmetrische Optimum eingestellt.

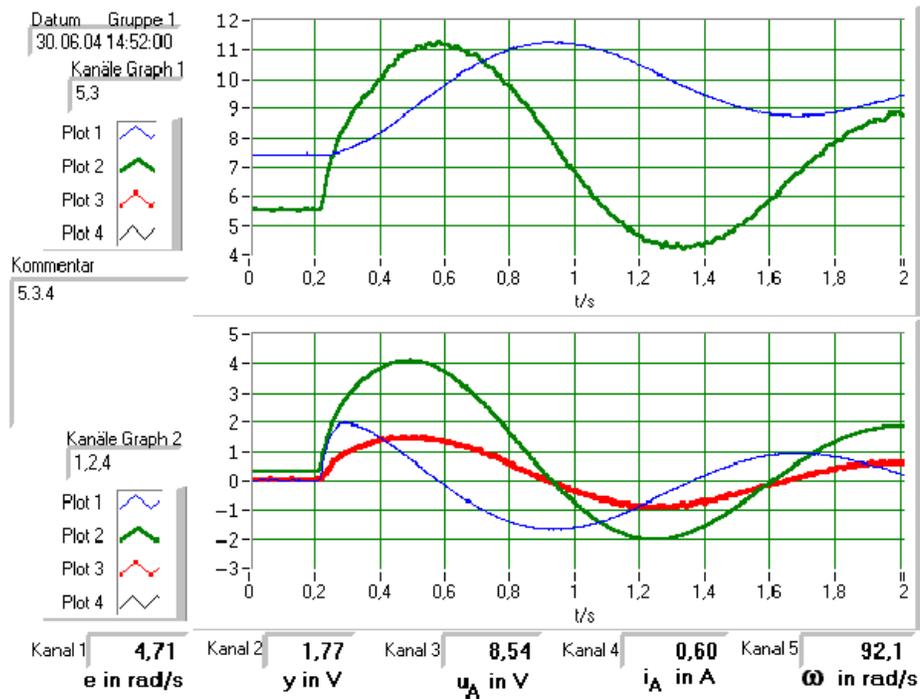


Abbildung 20: Führungssprungantwort für $k_R = 0,1 * k_{R_{Symmetrisches\ Optimum}}$

5.4 Widerstand des Ankerkreises R_A

5.4.1 Rechnerische Bestimmung

Belastung	U_A in V	I_A in A	ω in rads^{-1}
17g + 204g	12,47	2,0	96,9
17g	7,62	0,2	96,6
17 + 51g	8,90	0,6	96,1

$$u_A = i_A R_A + c\phi \omega + U_b$$

$$12,47V = 2,0A * R_A + 0,068Vs * 96,9\text{rads}^{-1} + U_b$$

$$7,62V = 0,2A * R_A + 0,068Vs * 96,6\text{rads}^{-1} + U_b$$

$$12,47V - 7,62V = R_A(2,0 - 0,2)A + 0,068Vs(96,9 - 96,6)\text{rads}^{-1}$$

$$4,85V = R_A * 1,8A + 0,0204V$$

$$\frac{4,8296V}{1,8A} = R_A$$

$$\underline{\underline{R_A = 2.68 \Omega}} \quad U_B = 0,515 V$$

5.5 Bestimmung durch Messprogramm

Mit Hilfe des Messprogramms wird durch Bestimmung der Regressionsgeraden und Ablesen des Anstiegs R_A ermittelt.

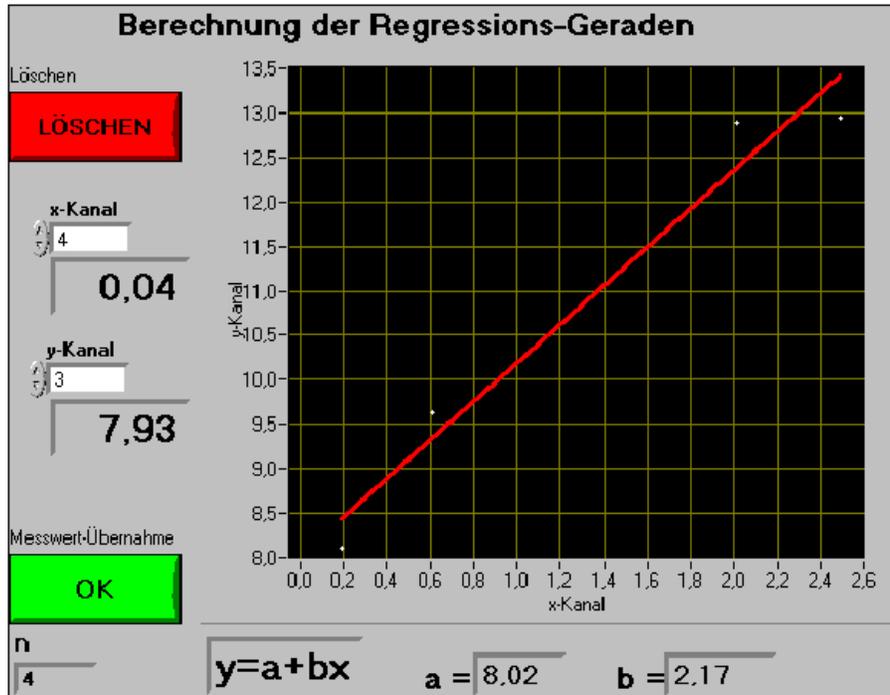


Abbildung 21: Regressionsgerade

Wie in Abbildung 21 abzulesen ist wurde die Gerade durch Messen von 4 Werten bestimmt. Dabei wurde ein Anstieg von $R_A = b = 2,17$ ermittelt.

Da bei der Bestimmung von R_A durch die Regressionsgerade mehr Messwerte als bei der händischen Berechnung zur Hilfe genommen worden werte ich den durch diese Methode erreichten Wert als genauer.

6 Auswertung

6.1 Begründung der Änderungen des Regelfehlers e und des dynamischen Verhaltens der Regelgröße ω

6.1.1 in Abhängigkeit der Verstärkung k_R

In den Sprungantworten ist zu beobachten, dass bei der Vergrößerung von k_R von 4 auf 20 sich das Überschwingen vergrößert. Die ist der Fall da sich mit der Erhöhung von k_R der Amplitudengang im Bode Diagramm (Abbildung 22 und 23) weiter nach oben verschiebt, womit der Nulldurchgang bei einer höheren Frequenz stattfindet, wodurch wiederum die Phasenreserve kleiner wird.

Der Regelfehler wird wie erwartet mit Zunahme von k_r immer größer.

6.1.2 in Abhängigkeit des Arbeitspunktes ω_0

Durch das Erhöhen des Arbeitspunktes wird die Änderung, die durch den Sprung erzeugt wird, natürlich prozentual viel geringer, daher verringert sich natürlich die Einschwingdauer und der Regelfehler.

6.2 Trägheitsmoment J

$$M = M_b + M_L = J_{ges} \frac{d\omega}{dt} + M_L$$

$$M = C\phi I_A = 0,0068A * 3V = 0,204VAS$$

$$M_L = m g r = 0,13Nm \text{ (siehe Vorbereitungsaufgabe 4.5.2)}$$

$$M_b = M - M_L = 0,204VAS - 0,13Nm = 0,074VAs$$

$$J_{ges} = M_b \frac{d\omega}{dt} = M_b \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 0,074VAs \frac{0,4s}{25rad}$$

$$\underline{\underline{J_{ges} = 1,184 * 10^{-3}Nm.s^3}}$$

6.3 Begründung der Ergebnisse von Aufgabe 5.3.4

Durch die Verringerung von k_R wird die Durchtrittsfrequenz kleiner. Da $\omega_D * t_R \approx 1,5$ wird t_R die Anstiegszeit größer. Dies kann man in der Sprungantwort recht deutlich erkennen.

Ausserdem wird auch die negative Phasenreserve geringfügig größer wodurch, aufgrund $\phi_R[Grad] + \ddot{u}[\%] \approx 70$ das System nicht so stark überschwingt.

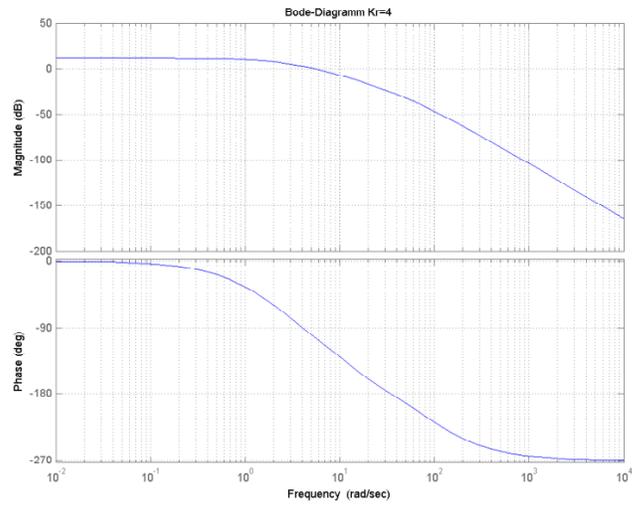


Abbildung 22: Bode Diagramm für $k_R = 4$

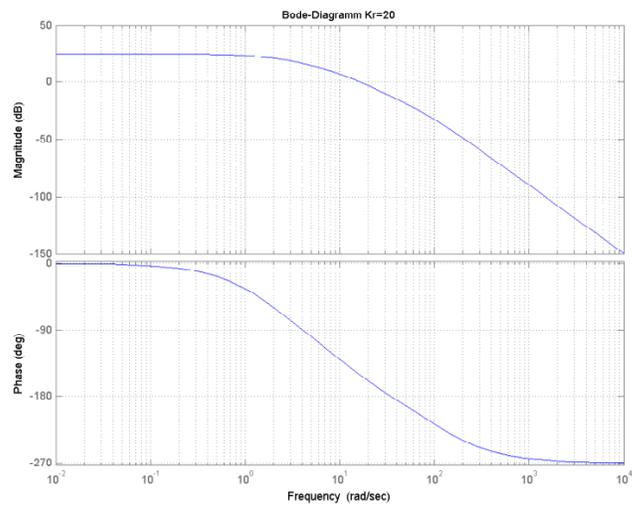


Abbildung 23: Bode Diagramm für $k_R = 20$