



HTBLuVA St. Pölten
Höhere Abteilung Elektrotechnik
3100 St. Pölten, Waldstrasse 3 Tel: 02742-75051-300
Homepage: <http://et.htlstp.ac.at> E-Mail: et@htlstp.ac.at



Projekt-Titel:

SYSTEMIDENTIFIKATION

Mitglieder:

AUGUST LOIBL
LABENBACHER MICHAEL
NEULINGER DAVID
EDER DANIEL

Projektort: HTBL u. VA in St. Pölten

Projektdatum: 13. 04. 2016

Projektnummer: 08

Projektgruppe: 1

Fach: Laboratorium

Jahrgang/Klasse: 2015/16 5AHET

Lehrer: Dipl.-Ing. Erich Schubert

Protokollführer: <i>August Loibl</i>	Unterschriften:	Note:
--	------------------------	--------------

Inhaltsverzeichnis

1	Verwendete Geräte & Betriebsmittel	1
2	Gleichstrommotor (GM)	2
2.1	Regelungstechnische Beschreibung	2
2.2	Inbetriebnahme & Identifikation	5
3	Resümee	12
	Abbildungsverzeichnis	13
	Tabellenverzeichnis	14
	Abkürzungsverzeichnis	15

1 Verwendete Geräte & Betriebsmittel

Bez.	Betriebsmittel	Beschreibung/Typ	Geräte-Nr.
V1	Oszilloskop	Tektronix TDS 2004B	GA-03/04
V2	DC Spannungsversorgung	GW Model: GPC-3030	GA-03/02
V3	digitales Multimeter	—	G-10.2/01
M1	Motor-Board	5130 (hps)	—

Tabelle 1.1: verwendete Geräte & Betriebsmittel

Des Weiteren werden noch allgemeine Bestandteile einer Laborübung, wie beispielsweise BNC- und Verbindungsstrippen zur Durchführung dieses Versuches benötigt. Das verwendete Motorboard von hps SystemTechnik zeigt folgendes Bild:

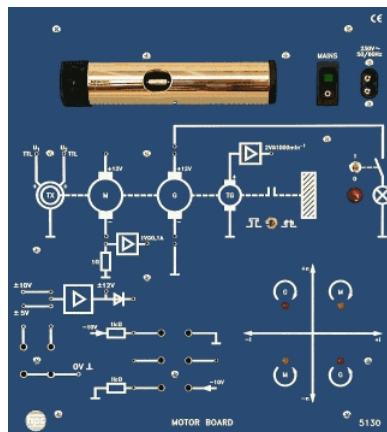


Abbildung 1.1: Motor-Board von hps SystemTechnik

Die Nenndrehzahl n_N der Maschine liegt bei 5900 min^{-1} , was bei einer Übersetzung des Tachogenerators von $2 \text{ V pro } 1000 \text{ min}^{-1}$ einer Spannung von $11,8 \text{ V}$ entspricht.

2 Gleichstrommotor (GM)

2.1 Regelungstechnische Beschreibung

Ein fremderregter Gleichstrommotor¹ der Form:

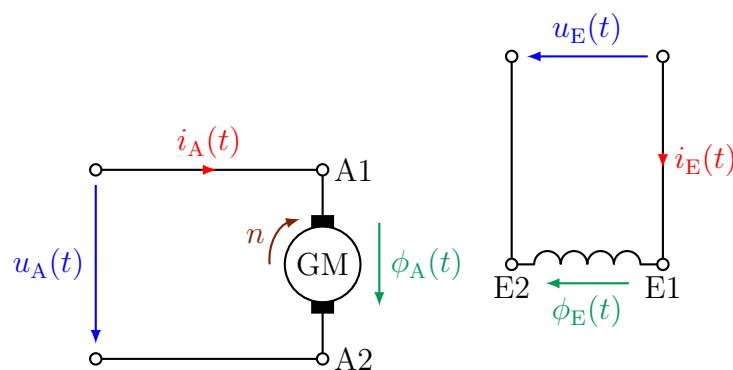


Abbildung 2.1: Ersatzschaltbild eines fremderregten Gleichstrommotors

lässt sich durch folgende Zusammenhänge beschreiben:

$$u_A = u_q + R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{d i_A}{d t} \quad (2.1)$$

$$u_q = k \cdot \phi_E \cdot n \quad \text{mit } k = z \cdot \frac{p}{a} \quad (2.2)$$

M_M Motormoment

i_A Ankerstrom

n Drehzahl

ϕ_A Ankerfeld

M_L Lastmoment

u_A Ankerspannung

ω Winkelgeschwindigkeit

ϕ_E Erregerfeld

¹Eine nebenschlusserregte zeigt prinzipiell sehr ähnliches Verhalten, welches hier beschrieben wird, jedoch nicht eine reihenschlusserregte GM, da bei dieser die Erregung vom Ankerstrom abhängig ist.

k	Proportionalitätsfaktor	z	Anzahl an Leitungen der Ankerwicklung
i_E	Erregerstrom	u_E	Erregerspannung
u_q	Quellenspannung	R_A	Ankerwiderstand
L_A	Induktivität der Ankerwicklung	a	halbe Anzahl der parallelgeschalteten Ankerzweige
p	Polpaarzahl	J	Trägheitsmoment
T_A	Ankerzeitkonstante	α	Winkelbeschleunigung

Dabei stellt k einen Proportionalitätsfaktor dar, welcher von der Anzahl der Leitungen der Ankerwicklung, der Polpaarzahl und der Anzahl der parallelen Ankerwicklungs-zweige abhängt. Die Übergangsspannung zwischen Bürsten und Stromwender wird hier nicht berücksichtigt. Das Produkt aus dem Fluss des Erregerfeldes und dem Proportionalitätsfaktor lässt sich aus den Nenndaten der Maschine folgendermaßen ermitteln:

$$k\phi_E = \frac{u_q}{n} = \frac{U_{A,N} - I_{A,N} \cdot R_A}{n_N} \quad (2.3)$$

Die Differenz zwischen Motormoment und Lastmoment ergibt:

$$J \cdot \alpha = M_M - M_L \quad (2.4)$$

$$M_M = \frac{k}{2\pi} \cdot \phi_E \cdot i_A \quad (2.5)$$

Damit nun ein Blockschaltbild angefertigt werden kann, wird in den Laplace-Bereich transformiert, was folgende Zusammenhänge ergibt:

$$U_A(s) = U_q(s) + R_A \cdot I_A(s) + s \cdot L_A \cdot I_A(s) \quad (2.6)$$

$$U_q(s) = k \cdot \phi_e \cdot n(s) \quad (2.7)$$

$$s \cdot J \cdot \omega(s) = M_M(s) - M_L(s) \quad (2.8)$$

$$M_M(s) = \frac{k}{2\pi} \cdot \phi_E \cdot I_A(s) \quad (2.9)$$

Mit Hilfe dieser kann für eine fremderregte Gleichstrommaschine das Blockschaltbild, siehe 2.2, angefertigt werden, wobei sich der Ankerkreis durch ein PT₁-Element mit der Zeitkonstante T_A beschreiben lässt.

$$T_A = \frac{L_A}{R_A} \quad (2.10)$$

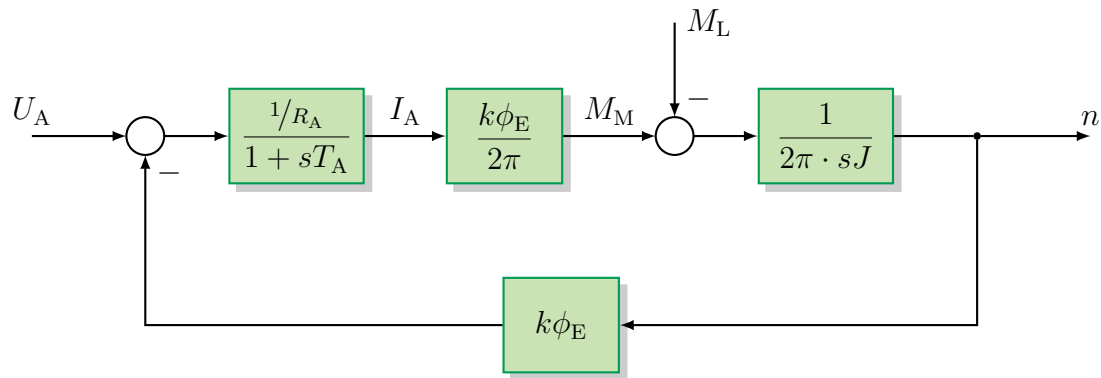


Abbildung 2.2: Blockschaltbild eines fremderregten Gleichstrommotors

Aus der Abb. 2.2 lässt sich nun direkt die Übertragungsfunktion $G(s) = n(s)/U_A(s)$ ablesen:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k\phi_E}}{1 + s \cdot JR_A \left(\frac{2\pi}{k\phi_E} \right)^2 + s^2 \cdot JL_A \left(\frac{2\pi}{k\phi_E} \right)^2} \quad (2.11)$$

Zusammenfassend lässt sich nun eine fremderregte GM mit Hilfe eines PT_2 -Elements darstellen, wobei sich für den Dämpfungsgrad und die natürliche Kreisfrequenz folgende Formeln ergeben:

$$\omega_n = \frac{k\phi_E}{2\pi\sqrt{JL_A}} \quad (2.12)$$

$$D = \frac{\pi R_A}{k\phi_E} \sqrt{\frac{J}{L_A}} \quad (2.13)$$

ω_n natürliche Kreisfrequenz

D Dämpfung

In der Praxis, vor allem bei kleinen fremderregten Gleichstrommaschinen wird oft eine Näherung durchgeführt, indem die Wirkung der Ankerzeitkonstante nicht berücksichtigt wird. Dadurch zeigt sich, dass eine solche GM als PT_1 -Element betrachtet werden kann.

2.2 Inbetriebnahme & Identifikation

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie eine Identifikation einer Regelstrecke im Zeitbereich erfolgen kann, indem beispielsweise am Eingang ein „Sprung“ angelegt und die Ausgangsgröße, also die Sprungantwort, gemessen wird.²

Mit Hilfe eines Oszilloskops konnte, nach Anlegen einer sprungförmigen Eingangsspannung von 0 V auf 10 V, folgende Sprungantwort erfasst werden, wobei der Tachogenerator eine Übersetzung von 2 V pro 1000 min⁻¹ aufwies und der Gleichstrommotor unbelastet war, sich also im Leerlauf befand.

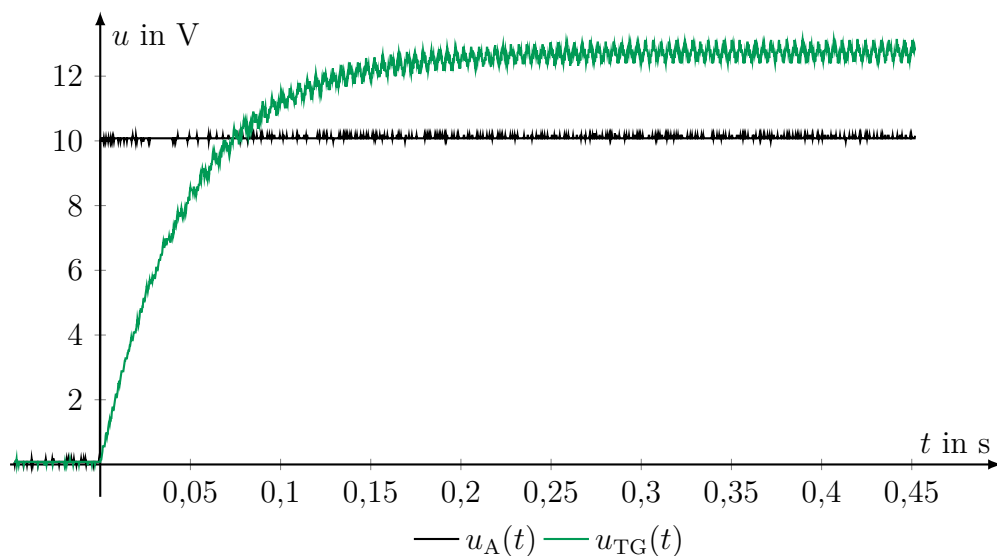


Abbildung 2.3: Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Leerlauf (Rechtslauf)

u_{TG} Spannung des Tachogenerators

n_{TG} Drehzahl des Tachogenerators

In dieser Abbildung 2.3 lässt sich eindeutig erkennen, dass man bei dieser Gleichstrommaschine mit der Näherung ohne Probleme arbeiten kann, da die Zeitkonstante verschwindend klein ist.

Mit Hilfe des Computeralgebrasystems Maxima (Version 15.08.02) kann nun mit der 63 %-Methode vom PT₁-Element die Übertragungsfunktion der GM ermittelt werden.

²Eine weitere Möglichkeit der Identifikation wäre im Frequenzbereich durch Anlegen einer sinusförmigen Eingangsgröße möglich, wobei der Frequenzgang erfasst wird.

Maxima-Programm zur Identifikation des Gleichstrommotors:

```
(%i1) kill(all)$
(%i11) load(coma)$
      load(dynamics)$
      load(descriptive)$
      load(distrib)$
      fpprintprec:5$
      ratprint:false$
      set_draw_defaults(grid=true,point_type=0,
      points_joined=true,line_width=1)$
      wxplot_size:[1000,750]$
      lg(x):=log(x)/log(10)$
      ln(x):=log(x)$
      lb(x):=log(x)/log(2)$
```

coma v.1.73, (Wilhelm Haager, 2015-01-09)

Gemessene Werte einlesen:

```
(%i16) werte1:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
      \\Laboratorium-5AHET\\08_Identifikation
      \\Sprungantwort_10V_Leerlauf\\LeerlaufCH1.csv",comma)$
      t_werte1:map(fourth,werte1)$
      y_werte1:map(fifth,werte1)$
      n:length(t_werte1)$
      ue_TG:1000/2$
(%i19) werte2:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
      \\Laboratorium-5AHET\\08_Identifikation
      \\Sprungantwort_10V_Leerlauf\\LeerlaufCH2.csv",comma)$
      t_werte2:map(fourth,werte2)$
      y_werte2:map(fifth,werte2)$
```

Mittelung der gemessenen Stationärverstärkung und Eingangsspannung:

```
(%i21) k_ue:sum(y_werte2[i],i,n/5*4,n)/(n/5);
      ue:sum(y_werte1[i],i,n/5,n)/(n/5*4);

(%o20) 12.767
(%o21) 10.099
```


Ermittlung der Stationärverstärkung und der Zeitkonstante:

```
(%i26) k:k_ue/ue$
      k_ue*(1-%e^(-1)),numer$
      i:1$
      while y_werte2[i]<k_ue*(1-%e^-1) do i:i+1$
      T:t_werte2[i]$
(%i28) G(s):=k/(1+s*T)$
      G(s);
```

```
(%o28)      1.2642
            -----
            0.048 · s + 1
```

Daten der Sprungantwort abspeichern:

```
(%i36) ua(t):=(ilt(G(s)/s,s,t))$ua(t),numer;
      tmin:0$tmax:0.5$deltat:0.0002$
      t_list:makelist(t,t,tmin,tmax,deltat)$
      ua_outputlist:create_list(ua(t),t,t_list)$
      amount:(tmax-tmin)/deltat$

(%o30)      1.2642 - 1.2642 · e-20.833·t

(%i38) write_data(ua_outputlist*ue*ue_TG,"C:\\Users\\User\\Desktop
      \\LaTeX-Laborprotokol-5AHET\\08\\TikZ\\Files
      \\Leerlauf-uaOutputlist.dat",comma)$
      write_data(t_list,"C:\\Users\\User\\Desktop
      \\LaTeX-Laborprotokol-5AHET\\08\\TikZ\\Files
      \\Leerlauf-tlist.dat",comma)$
```

Mit Hilfe der berechneten Werte kann nun die Messung mit der Ermittlung gegenübergestellt werden:

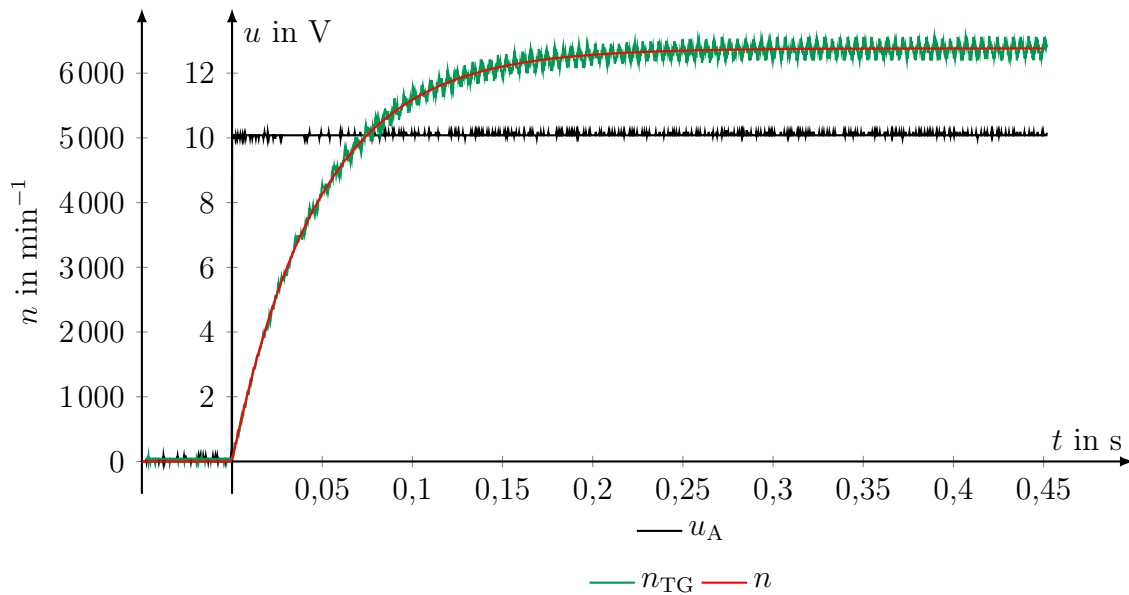


Abbildung 2.4: Gegenüberstellung der ermittelten und gemessenen Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Leerlauf (Rechtslauf)

In der Abb. 2.4 lässt sich deutlich erkennen, dass das Verfahren zur Ermittlung der Übertragungsfunktion sehr gut mit der Messung übereinstimmt. Bevor nun ein Regler dimensioniert werden kann, muss noch der Ausgang des Tachogenerators geglättet werden.

Die hier untersuchte Gleichstrommaschine lässt sich also näherungsweise mit folgender Übertragungsfunktion im Rechtslauf beschreiben:

$$G(s) = \frac{n(s)}{U_A(s)} \approx \frac{632}{1 + s \cdot 0,048} \quad (2.14)$$

Die Sprungantwort lässt sich somit folgendermaßen beschreiben:

$$n(t) = \left[632 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,048}} \right) \right] \cdot \sigma(t) \quad (2.15)$$

Laut dem Endwerttheorem $\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot U_A(s) \cdot G(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} n(t)$ folgt im Leerlauf bei einer Ankerspannung $u_{A, N}(t) = 12 \text{ V}$ eine Leerlaufdrehzahl von rund 7600 min^{-1} .

Der nächste Schritt besteht nun darin, die Maschine zu belasten, um deren Drehzahländerung zu untersuchen. Dafür wurde die GM mit dem auf dem Motor-Board vorhandenen Lastwiderstand (+ parallelgeschaltener Lampe) belastet und die Sprungantwort oszillographiert und erneut mit dem zuvor entworfenen Maxima-Skript ausgewertet.

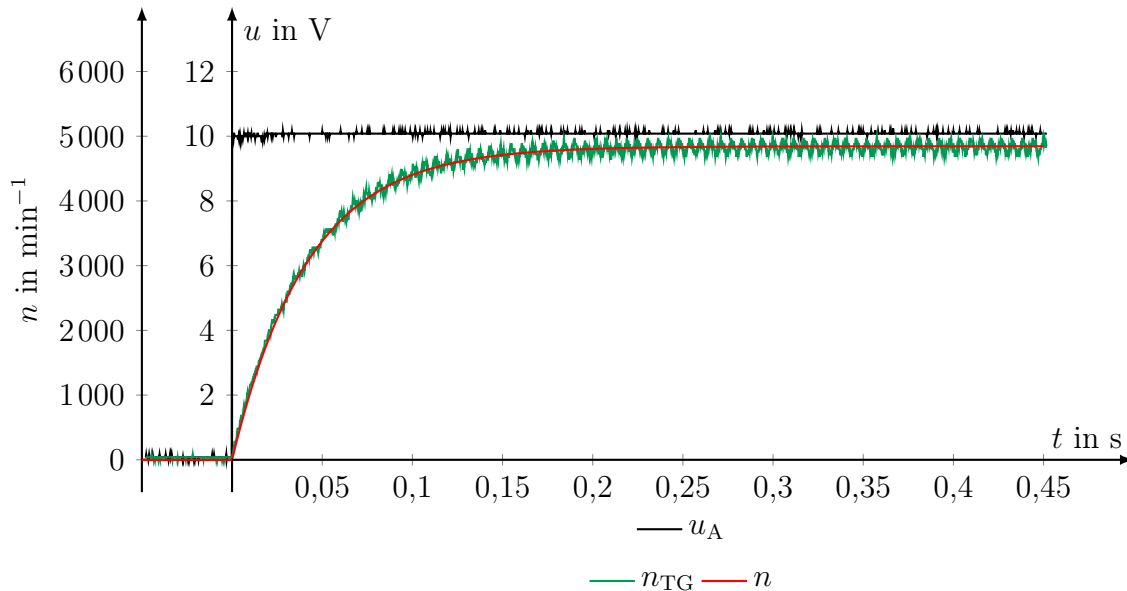


Abbildung 2.5: Gegenüberstellung der ermittelten und gemessenen Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Belastung (Rechtslauf)

Durch das zusätzliche Lastmoment lässt sich deutlich erkennen, dass die Drehzahl sinkt. Um nun die Drehzahl trotzdem konstant halten zu können, braucht es nun eine Regelung, welche die Ankerspannung dementsprechend erhöhen würde, sofern der Maximalwert dabei nicht überschritten wird.

Die bei dem Auftritt der Störung vorhandene maximale Drehzahl bei der Eingangsspannung $u_A(t) = 10 \text{ V}$ beträgt 4845 min^{-1} .

Im gesamten Kapitel wurde nun die Identifikation bei Motorrechtslauf untersucht. Für die Vollständigkeit wird nun auch noch die Sprungantwort für den Linkslauf durchgeführt, indem ein Ankerspannungsprung auf -10 V durchgeführt wird, was nach der Auswertung folgenden Verlauf im Leerlauf zeigt.

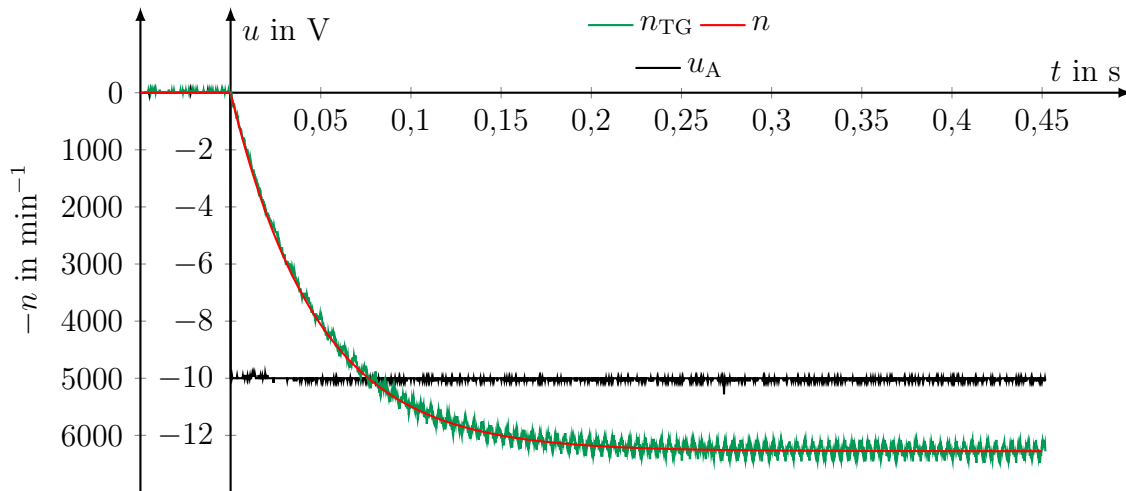


Abbildung 2.6: Gegenüberstellung der ermittelten und gemessenen Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Leerlauf (Linkslauf)

Die Abbildung lässt im Prinzip erkennen, dass die Maschine im Prinzip den gleichen Verlauf zeigt. Folgende Übertragungskennlinie konnte für den Linkslauf ermittelt werden, welche zum Rechtslauf prinzipiell keinen wesentlichen Unterschied aufzeigt:

$$G(s) \approx \frac{626}{1 + s \cdot 0,0481} \quad (2.16)$$

Die Sprungantwort lässt sich somit folgendermaßen beschreiben:

$$n(t) = \left[626 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,0481}} \right) \right] \cdot \sigma(t) \quad (2.17)$$

Somit folgt im Leerlauf bei einer Ankerspannung $u_{A, N}(t) = 12\text{ V}$ eine Drehzahl von 7510 min^{-1} .

Die kleinen Unterschiede, welche zwischen Rechts- und Linkslauf auftreten lassen sich dadurch erklären, dass die magnetisch neutrale Zone nicht 100 % mit der geometrisch neutralen übereinstimmt. Folglich kann eine Mittlung verwendet werden, wobei im Leerlauf bei $u_{A, N}(t) = 12\text{ V}$ im Mittel mit $n = 7550\text{ min}^{-1}$ gerechnet werden kann.

$$G(s) \approx \frac{629}{1 + s \cdot 0,04805} \quad (2.18)$$

$$n(t) = \left[629 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,04805}} \right) \right] \cdot \sigma(t) \quad (2.19)$$

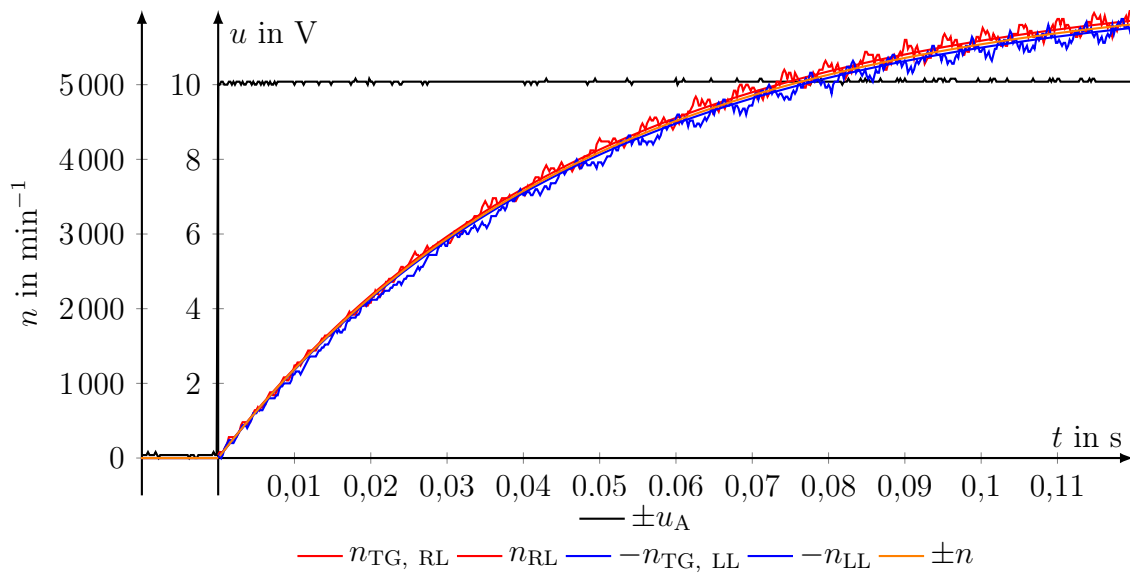


Abbildung 2.7: Gegenüberstellung und Mittlung von Links- & Rechtslauf ($0 \leq t \leq 0,12$)

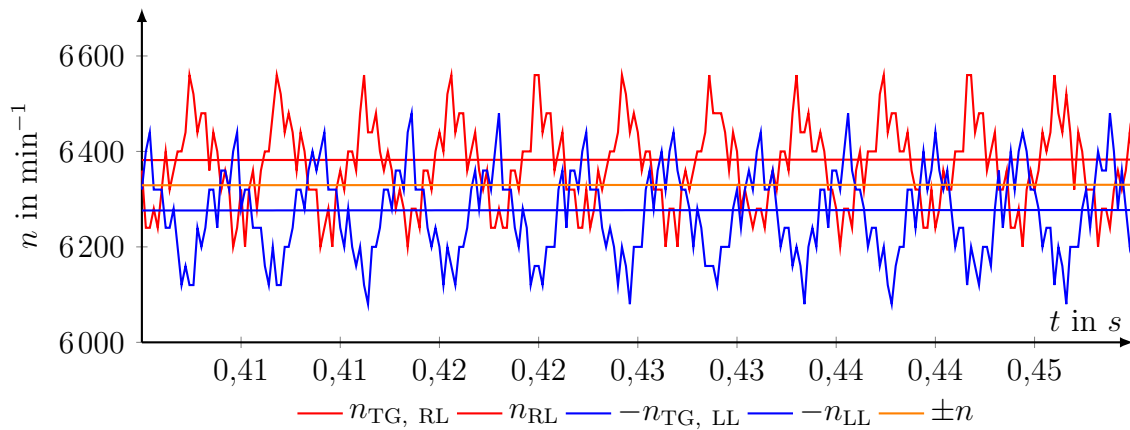


Abbildung 2.8: Gegenüberstellung und Mittlung von Links- & Rechtslauf ($0,4 \leq t \leq 0,45$)

3 Resümee

Mit dieser Übung konnte gezeigt werden, wie eine einfache Identifikation eines Systems erfolgen kann, wobei nicht genügend Zeit für eine Dimensionierung einer Regelung blieb. Dafür ist natürlich zuerst die Ausgangsspannung des Tachogenerators zu Glätten (z. B. PT_1 -Element) und im Anschluss darauf kann beispielsweise nach dem Betragsoptimum ein PI-Regler entworfen werden.

Des Weiteren konnte dadurch wieder aufgezeigt werden, dass es bei einer „normalen“ Gleichstrommaschine Unterschiede zwischen Rechts- und Linkslauf gibt, welche aber meist verschwindend klein, für eine exakte Regelung aber zu beachten sind.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Motor-Board von hps SystemTechnik	1
2.1 Ersatzschaltbild eines fremderregten Gleichstrommotors	2
2.2 Blockschaltbild eines fremderregten Gleichstrommotors	4
2.3 Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Leerlauf (Rechtslauf) . . .	5
2.4 Gegenüberstellung der ermittelten und gemessenen Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Leerlauf (Rechtslauf)	8
2.5 Gegenüberstellung der ermittelten und gemessenen Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Belastung (Rechtslauf)	9
2.6 Gegenüberstellung der ermittelten und gemessenen Sprungantwort der Gleichstrommaschine bei Leerlauf (Linkslauf)	10
2.7 Gegenüberstellung und Mittlung von Links- & Rechtslauf ($0 \leq t \leq 0,12$)	11
2.8 Gegenüberstellung und Mittlung von Links- & Rechtslauf ($0,4 \leq t \leq 0,45$)	11

Tabellenverzeichnis

1.1 verwendete Geräte & Betriebsmittel	1
--	---

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Bez.	Bezeichnung
BNC	Bayonet Neill–Concelman
Dipl.-Ing.	Diplom-Ingenieur
GM	Gleichstrommotor
HTBL u. VA	höhere technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt
Nr.	Nummer
z. B.	zum Beispiel