

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Untersuchung und Aufrüstung eines Magnetschwebemodells

Prozessidentifikation, Reglerimplementierung,
hardwaremäßiger Temperaturschutz der Spulen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

O. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Alexander Weinmann
Univ. Ass. Dipl. Ing. Gerald Koller

E376

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Bacher Oskar

9626554

1040 Wien, Schelleingasse 36/118

Wien, im Juni 2003

(Bacher Oskar)

1 Systembeschreibung des Modells 730-T

Das System besteht aus einem elektromechanischen Modell (Abb.1.1) und einem elektrischen Leistungsteil (Abb.1.2).

Beim Modell handelt es sich um einen bzw. zwei Permanentmagnete, deren vertikale Positionen durch eine bzw. zwei Spulen beeinflusst werden. Die Bestimmung der Position der Magnetscheiben erfolgt mittels Laser, wobei diese innerhalb der Spulen untergebracht sind. Der Laser ist in der Spule nahe dem Glasstab positioniert. Der Laserstrahl trifft auf die *weiße* Oberfläche des Magneten und wird von dieser reflektiert. Das reflektierte Licht wird von einem Photodetektor aufgenommen. Dieser befindet sich ebenfalls innerhalb der Spule.



Abbildung 1.1: Modell 730 MagLev Apparat

Bei großen Strömen wird die Spule sehr heiß, wobei sich die Temperatur wiederum auf die Positionsbestimmung mittels Lasers auswirkt. Daher ist auch ein Sensor für die Temperaturkompensation des Lasers vorgesehen.

Die Anbindung der Positionsmessung, der Temperaturkompensation der Laser und der Ansteuerung der Spulen erfolgt über das Leistungsteil. Die 2 Eingänge *DAC1* und *DAC2* dienen der Spulenansteuerung ([0...10V]). Von den 4 Ausgängen liefern *ADC1* bzw. *ADC2* die Position der jeweiligen Magnetscheibe ([0...10V]) und *ADC3* bzw. *ADC4* ein Signal zur Temperaturkompensation des Lasers ([0...2V]).

Die Anordnung wird mittels Matlab 6.1 und Simulink über eine Echtzeitkarte (PCI-DAS1200) der Firma Measurement Computing Corp. betrieben.



Abb.1.2: Elektrisches Leistungsteil

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

DIPLOMARBEIT

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei meiner Diplomarbeit in direkter oder in indirekter Weise unterstützt haben.

In erster Linie gilt mein Dank Prof. Weinmann und DI Koller für die Möglichkeit die Diplomarbeit am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik zu schreiben und außerdem haben Sie mir durch Ihre fortlaufende Unterstützung die Arbeit sehr erleichtert. Gleichmaßen möchte ich mich bei Ing. Babler und Ing. Hofbauer für sie ständige Bereitstellung der Hilfsmittel bedanken.

Aufgabenstellung

Das Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik hat für die Lehre ein neues Modell erstanden. Dabei handelt es sich um zwei Permanentmagneten, deren vertikale Positionen durch zwei Spulen beeinflussbar sind. Die Bestimmung der Magnetpositionen erfolgt mittels Laser. Um auch dynamisch anspruchsvolle Regelungen zu studieren, können die Spulen kurzfristig mit ihrem 3,3-fachen (thermischen) Nennstrom betrieben werden.

Neben der Identifikation des Schwebemodells und der Implementierung erster Regler soll vor allem eine Schutzschaltung aufgebaut werden, die die beiden Spulen vor Überhitzung schützt, ohne die dynamischen Eigenschaften der Strecke zu beeinflussen.

Inhaltsverzeichnis

1 Systembeschreibung des Modells 730-T	9
2 Systemanalyse	11
<u>2.1 Experimentelle Analyse – Identifikation</u>	11
2.1.1 Abschätzung des Systemverhaltens	11
2.1.2 Identifikation – 1 Spule und 1 Magnet	12
2.1.3 Identifikation – 1 Spule und 2 Magnete	15
<u>2.2 Theoretische Analyse – Modellbildung</u>	18
2.2.1 Allgemeines	18
2.2.2 Bestimmen der Parameter a , b , c und d	19
2.2.2.1 Bestimmung der Parameter a und b	20
2.2.2.2 Bestimmung der Parameter c und d	20
2.2.3 Linearisierung der elektromechanischen Kraftgleichungen	21
2.2.4 Berechnung – 1 Spule und 1 Magnet (unten)	22
2.2.5 Berechnung – 1 Spule und 1 Magnet (oben)	24
2.2.5.1 Möglichkeit 1	24
2.2.5.2 Möglichkeit 2	24
2.2.6 Darstellung im Zustandsraum	26
<u>2.3 Vergleich der Identifikation und der theoretischen Analyse</u>	27
2.3.1 1 Spule – 1 Magnet – unten	27
2.3.2 1 Spule – 1 Magnet – oben	27
<u>2.4 Das Temperaturverhalten der Spule</u>	28
3. Reglerimplementierung	30
<u>3.1 Schweberegulation unten</u>	30
3.1.1 Darstellung der Nichtlinearität	30
3.1.2 Reglerentwurf	31
<u>3.2 Schweberegulation oben</u>	34
3.2.1 Nichtlinearität und Modellbildung	34
3.2.2 Reglerentwurf	35
3.2.3 Untersuchung des PDT1- Reglers	37
3.2.3.1 Katapult	37
3.2.3.2 Rechtecksignal	38

4. Schutz der Spulen vor Überhitzung	39
<u>4.1 Variante 1</u>	39
4.1.1 Vor- und Nachteile	41
<u>4.2 Variante 2</u>	42
4.2.1 Vor- und Nachteile	44
<u>4.3 Realisierung eines Alarmgebers</u>	45
<u>4.4 Variante 3</u>	46
4.4.1 Vor- und Nachteile	49
4.4.2 Platine	49
4.4.3 Gehäuse – Frontplatine	51
<u>4.5 Vergleich und Realisierung einer Variante</u>	52
4.5.1 Vergleich der 3 Varianten	52
4.5.2 Auswahl	53
Literaturverzeichnis	54
Abbildungsverzeichnis	55
Homepages	56
Parameter – Konstanten – Variablen	56
Anhang	58
Datenblatt des NTC- Abschalter	60
Index der auf CD gespeicherten Daten	61

Kurzfassung

Das erste Kapitel beschreibt die gesamte Modellanordnung. Die Funktionsweise ist im Detail erklärt und es wird auf die Schnittstellen zum Computer eingegangen.

Das zweite Kapitel behandelt die Prozessidentifikation. Prinzipiell wird zwischen einer theoretischen und einer experimentellen Identifikation unterschieden. Das Kapitel schließt mit einem Vergleich der beiden Ergebnisse. Ausgangspunkt für die theoretische Identifikation ist das Kräftegleichgewicht der Magneten. Die Vernachlässigung der Reibung und die Linearisierung im Arbeitspunkt liefern ein erstes Ergebnis. Bei der experimentellen Identifikation wird die *Identification Toolbox* von Matlab verwendet. Damit legt man ein PRBS- Signal (pseudostochastisches binäres Rauschsignal) an der Strecke an und misst gleichzeitig das Ausgangssignal. Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangssignal liefert die Übertragungsfunktion der Strecke (Modell wird im Arbeitspunkt als linear angenommen). Es werden verschiedene Fälle der Modellanordnung untersucht (ein Magnet- eine Spule, zwei Magnete- eine Spule...). Der letzte Teil des Kapitels stellt noch einen Zusammenhang zwischen dem Spulenstrom und der Spulentemperatur her.

Das dritte Kapitel behandelt die Implementierung erster Regler. Eingangs werden die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen der Position der Magnetscheiben und dem gelieferten Sensorsignal dargestellt. Der erste Fall des Reglerentwurfes bezieht sich auf den Betrieb der unteren Spule mit „nur“ einem Magneten. Die Regelung dieser (stabilen) Strecke gestaltet sich relativ einfach. Eine größere Herausforderung stellte die Regelung für den Betrieb der oberen Spule und einem Magneten dar. Die Schwierigkeit liegt in der Instabilität der Strecke. Die Magnetscheibe fällt entweder nach unten oder schnappt nach oben. Ein großes Problem stellte die Stellgrößenbegrenzung von 3V dar. Diese war anfangs notwendig, um die Spulen thermisch nicht zu überlasten. Durch diese Stellgrößenbegrenzung wurde der Regler in seinen dynamischen Eigenschaften stark eingeschränkt. Um dennoch eine korrekte Funktionsweise des Reglers zu gewährleisten wurde zusätzlich noch eine Anti- Windupmaßnahme vorgesehen.

Die Regler wurden mit Hilfe der *Control System Toolbox* von Matlab entwickelt.

Das vierte und letzte Kapitel beschäftigt sich mit dem Schutz der Spulen vor Überhitzung. Die Spulen können permanent mit einer Spannung von 3V betrieben werden. Kurzzeitig sind sogar 10V möglich (0.5 Sekunde pro Minute). Um unabhängig von solchen Vorgaben das Modell betreiben zu können werden 3 Varianten vorgestellt, welche die Spulen vor Überhitzung schützen. Die erste Variante stellt einen analytischen Zusammenhang zwischen Strom und Temperatur her (Beobachter). Die zweite verwendet den Temperaturkompensationssensor der Abstandsmessung um einen Rückschluss auf die Spulentemperatur zu ziehen. Die dritte Möglichkeit ist eine Hardware mit Temperaturabschalter. Bei Erreichen der maximal zulässigen Temperatur von ca. 85°C wird die Spannungsversorgung der Spulen unterbrochen.

Eine sorgfältige Untersuchung der 3 Varianten und der abschließende Vergleich führen zu dem Ergebnis, dass die 3. Möglichkeit die Beste ist, welche in weiterer Folge auch realisiert wurde.

2 Systemanalyse

Für den Reglerentwurf ist es notwendig das System zu kennen. Grundsätzlich bieten sich 2 Möglichkeiten für eine Analyse der unbekanntten Strecke an. Es sind dies die experimentelle und die theoretische Analyse[1]. Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Methoden getrennt voneinander ausgeführt und deren Ergebnisse verglichen.

2.1 Experimentelle Analyse - Identifikation

2.1.1 Abschätzung des Systemverhaltens

Die Permanentmagnete bewegen sich zwischen den Spulen in vertikaler Richtung entlang eines Glasstabes. Das magnetische Feld zwischen den Spulen ist nichtlinear, trotzdem kann man von der Sprungantwort auf das qualitative Verhalten des Systems schließen. Vereinfachend wird nur die untere Spule und ein Magnet betrachtet. Ein Sprung von 2V erzeugt das in Abb.2.1 dargestellte Übertragungsverhalten.

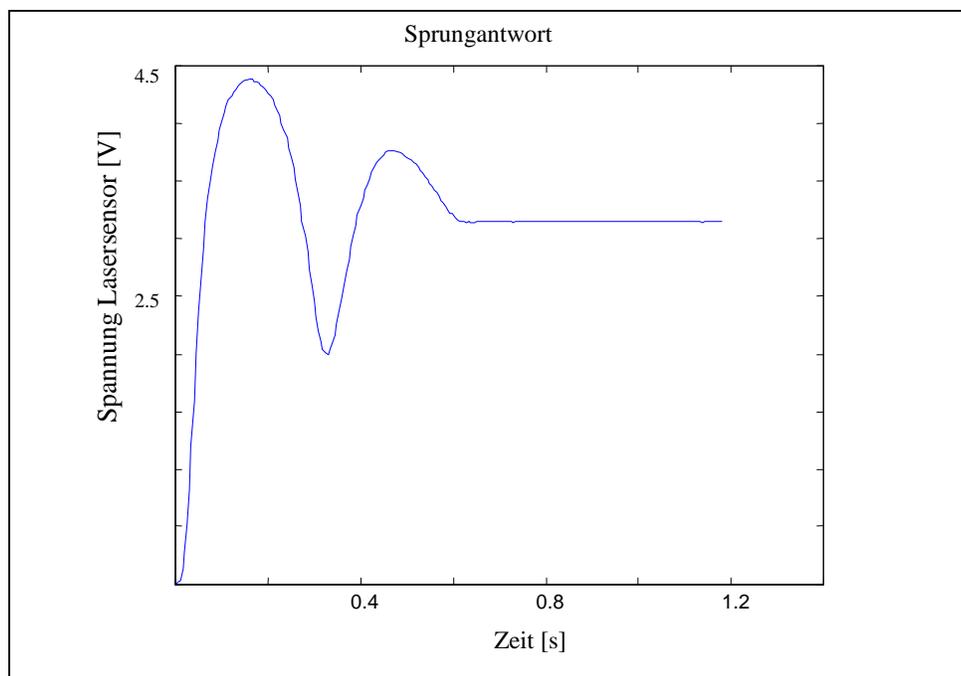


Abbildung 2.1: Sprungantwort (nichtlineares System)

Ausgehend von dieser Sprungantwort wird die Abtastzeit t_s bestimmt. Die Wahl der Abtastzeit ist für die Modellgenauigkeit von entscheidender Bedeutung. Als Richtwert gilt 10 Abtastungen pro Anstiegszeit. Näheres dazu kann in [2] nachgelesen werden. Die Abtastzeit für diese Systemanalyse ist: $t_s = 5$ ms.

2.1.2 Identifikation – 1 Spule und 1 Magnet

Wie aus Abb. 2.1 zu erkennen ist tritt ein starkes Überschwingen auf. Außerdem ist das magnetische Feld zwischen den Spulen nichtlinear. Um nun die Identifikation durchführen zu können wird ein Arbeitspunkt von 2V voreingestellt, was einer Position des Magneten von 27 mm über der Spule entspricht. Damit hat der Magnet damit ausreichend Freiraum sich aufgrund des angelegten Testsignals zu bewegen (ohne mit der Spule zu kollidieren). Die Bewegung um den Arbeitspunkt wird als linear angenommen. Als Testsignal eignet sich ein pbrs – Signal (pseudo binary random signal). Dieses diskrete Rauschsignal hat im gegenwärtigen Fall eine Amplitude von 0.8V und eine Periode von maximal 5s.

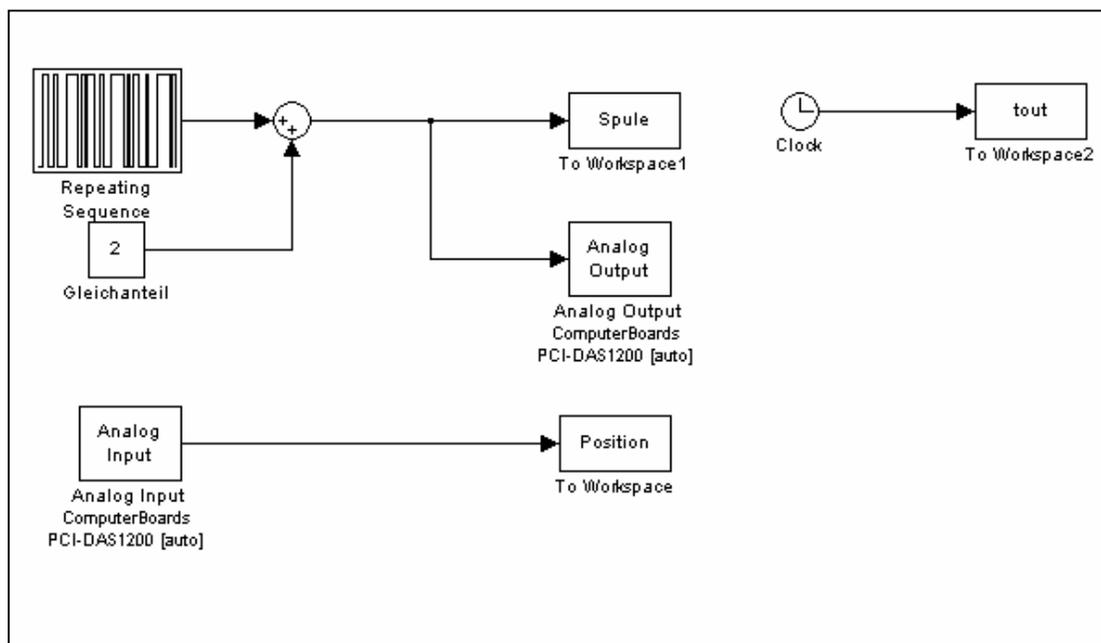


Abbildung 2.2: Simulinkdatei – Identifikation

Die in Abb.2.2 dargestellte Datei wird für die Identifikation verwendet. Das diskrete Rauschsignal wird über den analogen Ausgang der Echtzeitkarte dem Leistungsteil und damit dem Modell zugeführt. Über den analogen Eingang wird die Position des Magneten eingelesen (Abb.2.3). Die Daten werden für die Weiterverarbeitung im Workspace abgespeichert. Matlab bietet eine *Identification Toolbox* an, welche die Analyse sehr erleichtert. Mithilfe des angelegten Testsignals und dem gemessenen Ausgangssignal kann die Übertragungsfunktion des Systems bestimmt werden.

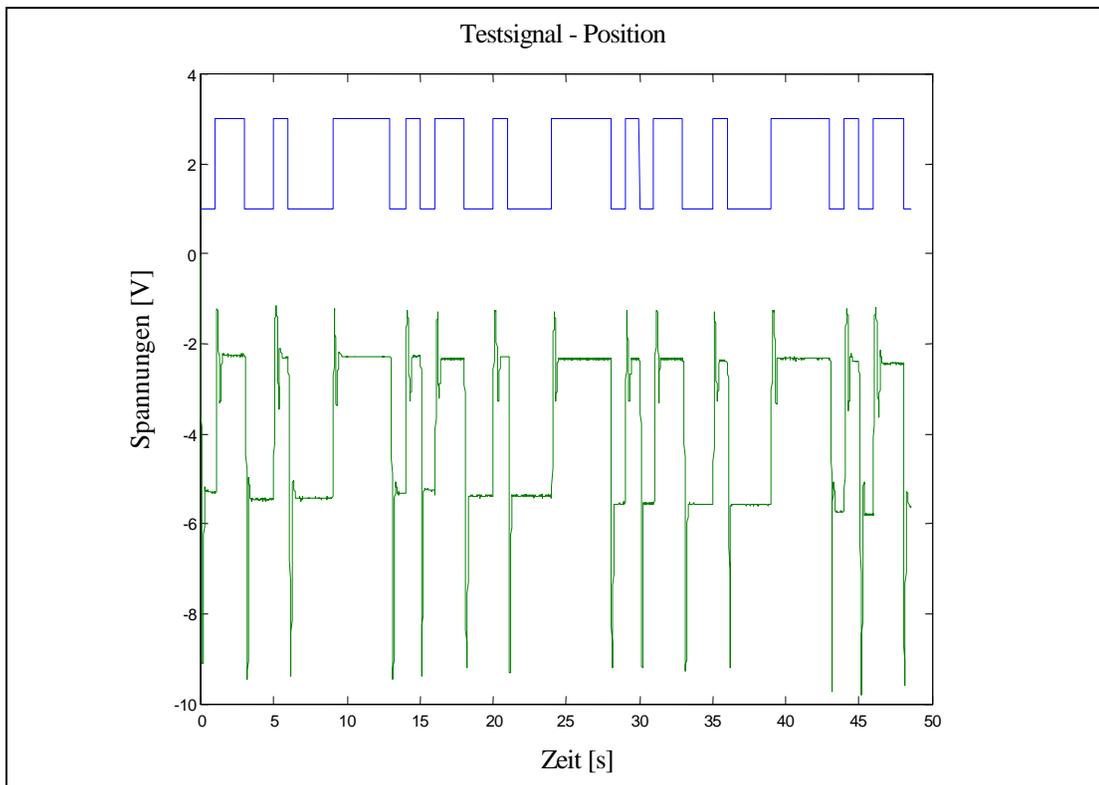


Abb.2.3: Diskretes Rauschsignal und zugehörige Magnetposition

Die Toolbox bietet eine Vielzahl von Analysemethoden an: parametrische, korrelations- und spektrale Modellbildung [3]. Die erste Hälfte der Daten aus Abb.2.3 wird für die Modellbildung verwendet, die andere Hälfte für die Validierung des erhaltenen Modells.

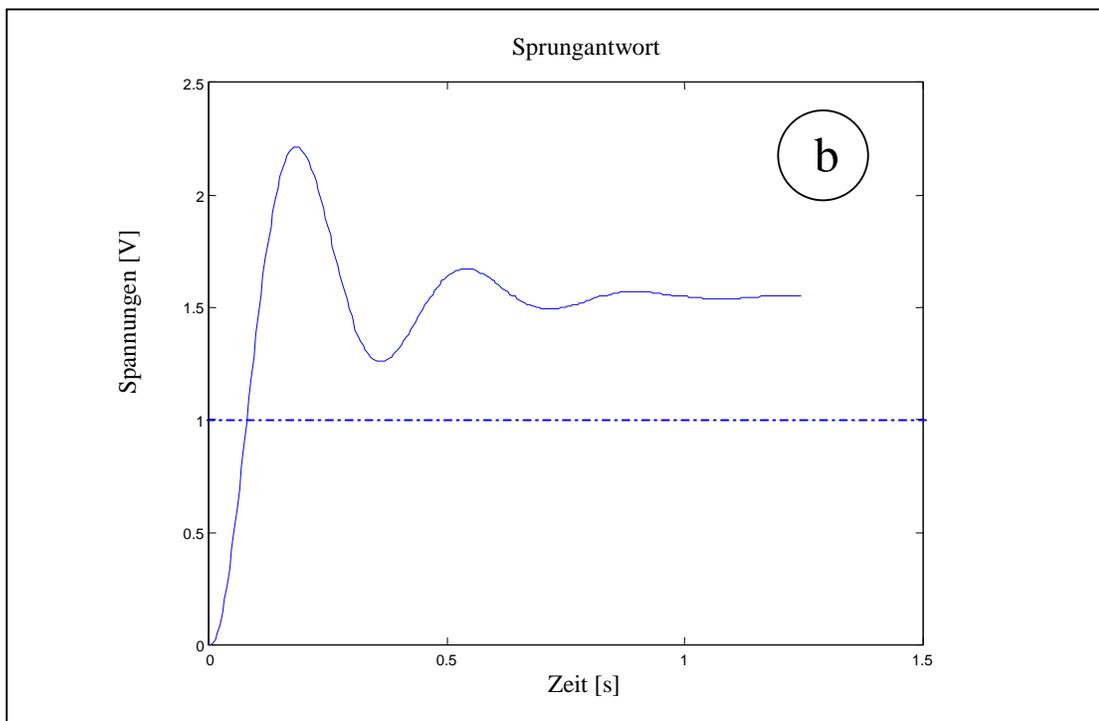
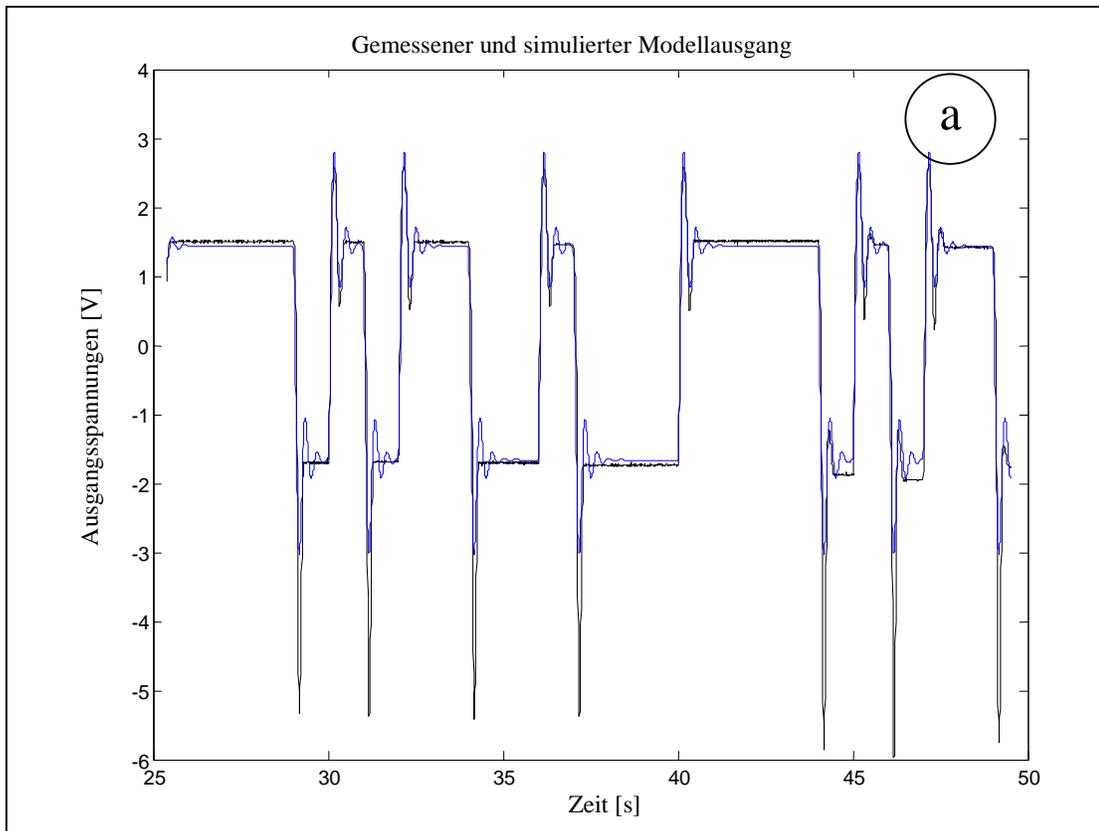


Abb.2.4: Vergleich des Modells und dem tatsächlichen System (a) und Sprungantwort (b)

In Abb.2.4a wird das tatsächliche System (schwarz) mit dem berechneten Modell (blau) verglichen. Darunter, in Abb.2.4b ist die Sprungantwort des modellierten Systems dargestellt. Darin erkennt man ein PT_2 – Verhalten mit relativ starkem Überschwingen. Die Übertragungsfunktion $G(z)$ lautet:

$$G(z) = \frac{0.01341 \cdot z}{z^2 - 1.954 \cdot z + 0.9534}, \quad (2.1)$$

bzw.

$$G(s) = \frac{1.364 \cdot s + 549.5}{s^2 + 9.534 \cdot s + 354.4} \approx \frac{550}{s^2 + 10 \cdot s + 355}. \quad (2.2)$$

Aus Gl. (2.2) ergibt sich der Dämpfungsgrad $D = 0.26$, die Nennkreisfrequenz $\omega_n = 0.053$ rad/s und die Stationärverstärkung $K_s = 1.55$.

2.1.3 Identifikation – 1 Spule und 2 Magnete

Die Anordnung von Abschnitt 2.1.2 wird um einen zweiten Magneten erweitert. Es wird

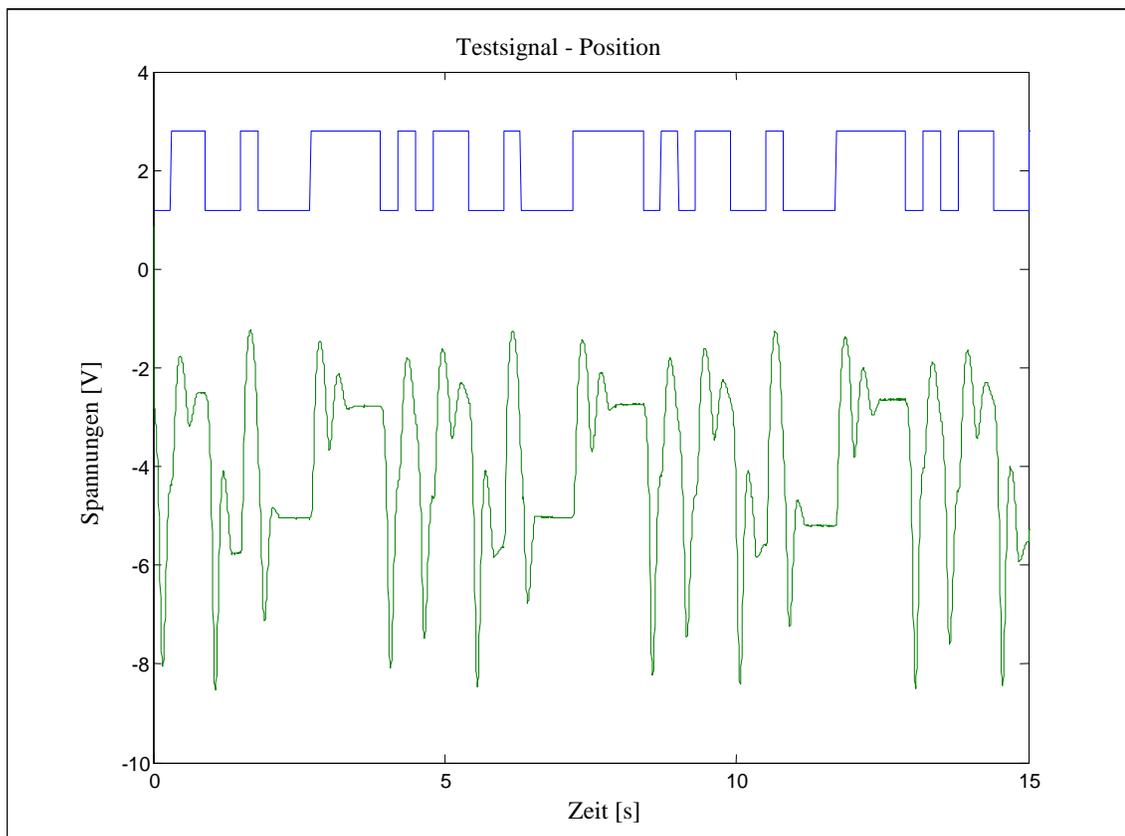


Abb.2.5: Diskretes Rauschsignal und Position des unteren Magneten

wieder die Simulink- Datei aus Abb.2.2 verwendet. Der Arbeitspunkt wird wiederum auf 2V eingestellt, was nun einer Position des unteren Magneten von 9 mm entspricht.

Da die Position in diesem Fall wesentlich kleiner ist, wird die Amplitude des diskreten Rauschsignals auf 0.25V reduziert und die maximale Periode auf 7.5 s erhöht. Damit wird sichergestellt, dass es zu keiner Kollision zwischen Magnet und Spule kommt und das nun trägere System kann dem Testsignal dennoch folgen. Die Verarbeitung der Ein – Ausgangsdaten (Abb.2.5) ähnelt der vorigen Vorgangsweise, wobei allerdings die höhere Ordnung aufgrund des zweiten Magneten berücksichtigt werden muss. Der Vergleich zwischen realem System (schwarz) und Modell (blau), sowie die modellierte Sprungantwort sind der Abb.2.6a bzw. 2.6b zu entnehmen.

Das System ist wesentlich schwingfreudiger und besitzt ein um eine Dimension höhere Übertragungsfunktion:

$$G(z) = \frac{0.05172 \cdot z^2 - 0.03485 \cdot z + 3.147e-18}{z^4 - 2.794 \cdot z^3 + 2.638 \cdot z^2 - 0.8394} \quad (2.3)$$

bzw.

$$G(s) = \frac{4.898 \cdot s^2 + 2254 \cdot s + 147700}{s^3 + 35.02 \cdot s^2 + 1871 \cdot s + 43390} \quad (2.4)$$

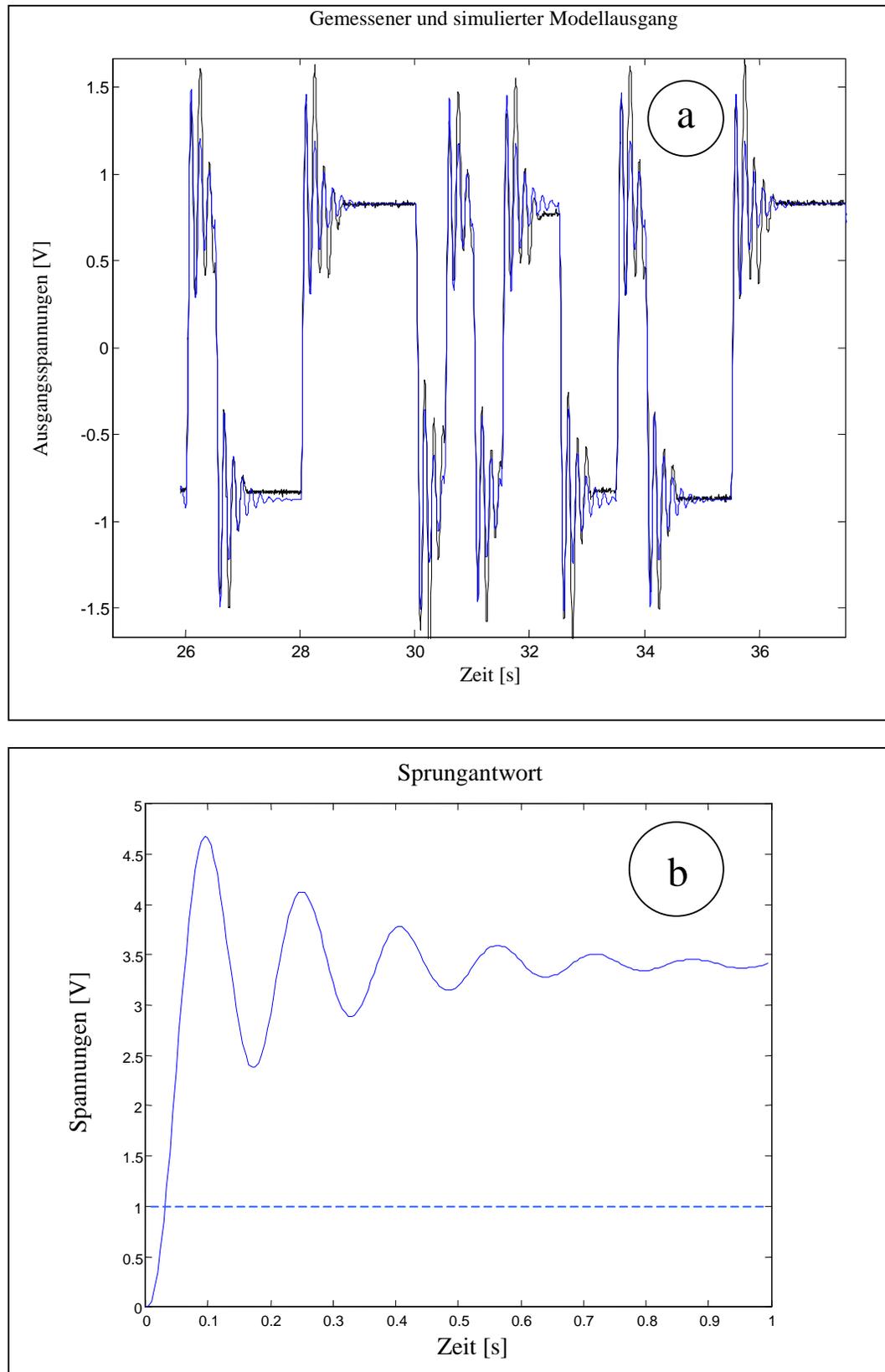


Abb.2.6: Vergleich des Modells und dem tatsächlichen System (a) und Sprungantwort (b)

2.2 Theoretische Analyse – Modellbildung

2.2.1 Allgemeines

Bei der theoretischen Analyse erfolgt die Modellbildung aus Naturgesetzen. Ausgehend von der schematischen Darstellung (Abb.2.7) werden die Zusammenhänge zwischen den Kräften dargestellt.

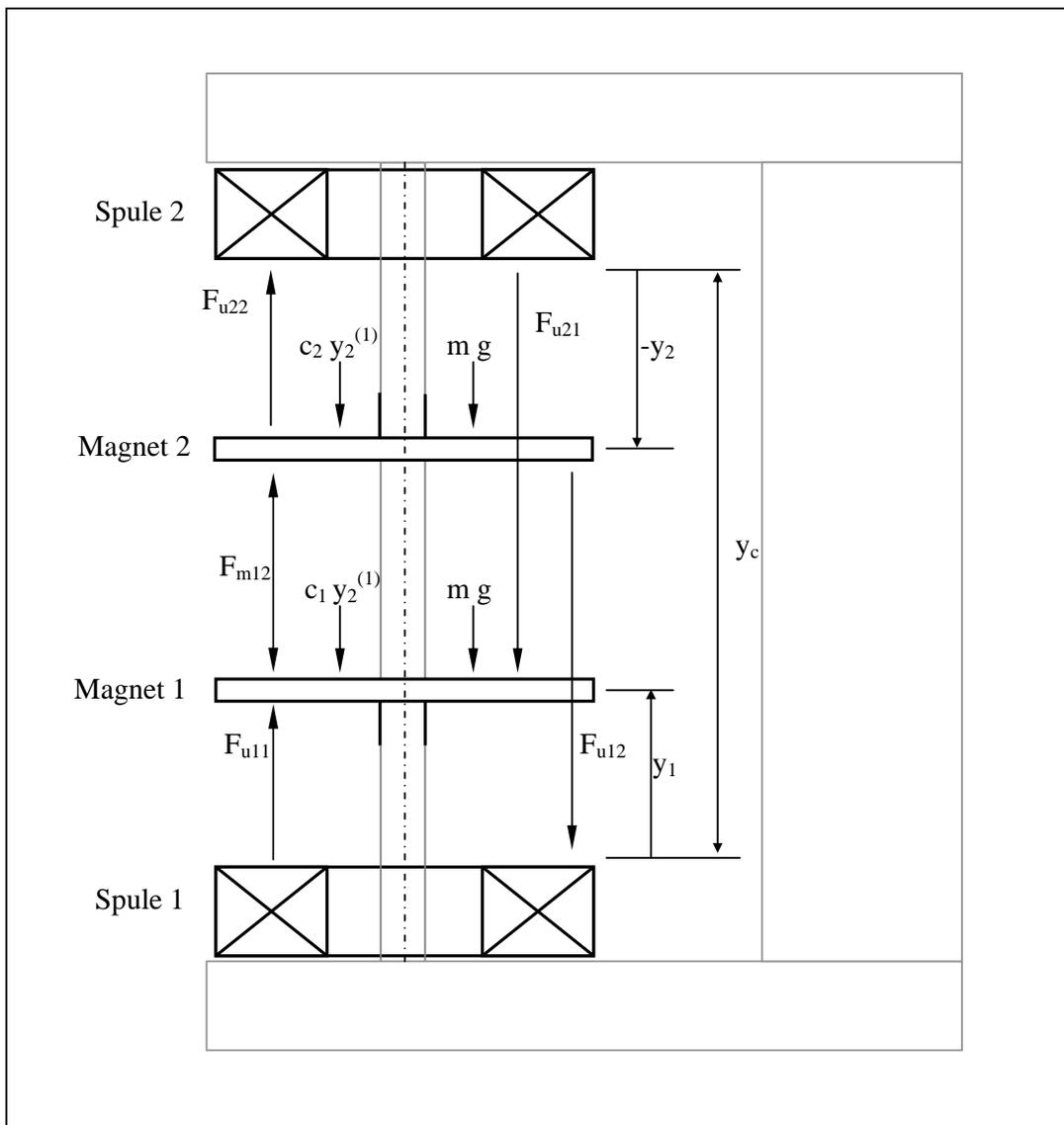


Abb.2.7: Kräfteverhältnisse am Modell

$$\text{Magnet 1:} \quad m \cdot y_1^{(2)} + c_1 \cdot y_1^{(1)} + F_{m12} = F_{u11} - F_{u21} - m \cdot g \quad (2.5)$$

$$\text{Magnet 2:} \quad m \cdot y_2^{(2)} + c_2 \cdot y_2^{(1)} - F_{m12} = F_{u22} - F_{u12} - m \cdot g \quad (2.6)$$

Mit:

$$F_{u11} = \frac{i_1}{a \cdot (y_1 + b)^N}, \quad (2.7)$$

$$F_{u12} = \frac{i_1}{a \cdot (y_c + y_2 + b)^N}, \quad (2.8)$$

$$F_{u21} = \frac{i_2}{a \cdot (y_c - y_1 + b)^N}, \quad (2.9)$$

$$F_{u22} = \frac{i_2}{a \cdot (-y_2 + b)^N}, \quad (2.10)$$

$$F_{m12} = \frac{c}{(y_{12} + b)^N}, \quad (2.11)$$

$$y_{12} = y_c + y_2 - y_1. \quad (2.12)$$

Die Parameter a , b , c , d und N können numerisch oder empirisch ermittelt werden. N sollte im Bereich von 3 bis 5 liegen [4]. Die Annahme von $N=4$ ist willkürlich, muss dann aber für alle Berechnungen beibehalten werden. y_{12} wird durch das im Modell integrierte Lineal bestimmt und beträgt 185 mm. Die Messung des Gewichts der Magnetscheiben liefert 125g pro Scheibe.

2.2.2 Bestimmen der Parameter a , b , c und d

Diese 4 Parameter werden einmal ermittelt, bleiben dann aber für die verschiedenen Modellkonfigurationen (1 Spule – 1 Magnet; 1 Spule – 2 Magnete; 2 Spulen – 1 Magnet und 2 Spulen – 2 Magnete) konstant.

2.2.2.1 Bestimmung der Parameter a und b

Mit den Parametern a und b werden die Kräfte zwischen Spulen und Magneten beschrieben und sie wurden empirisch bestimmt. Dazu wurden 2 Versuche ausgeführt. An die untere Spule wird ein Sprung von 1V angelegt. Die im Leistungsteil integrierte spannungsgesteuerte Stromquelle generiert daraus einen Strom i_1 von 0.4A, was die Magnetscheibe in die Position y_1 bringt. Für den 2. Fall wird ein Sprung von 2V (bzw. 0.8A) angelegt. Ausgehend von der Gl. (2.7) erhält man für b und a die Ausdrücke

$$b = \frac{\sqrt[4]{i_2} \cdot y_1 - \sqrt[4]{i_1} \cdot y_2}{(\sqrt[4]{i_1} - \sqrt[4]{i_2})} \quad \text{und} \quad a = \frac{i}{(y_1 + b)^4 \cdot m \cdot g} \quad (2.13)$$

wobei $a = 5167 \text{ A/Nm}^4$ und $b = 7.984 \text{ cm}$ beträgt.

2.2.2.2 Bestimmung der Parameter c und d

Mit Hilfe der Parameter c und d wird die Kopplung zwischen den Magneten angegeben. In [4, S.62, Fig.5.2-1.b] wird der Zusammenhang zwischen den 2 Magnetscheiben in einer Abbildung dargestellt. Es handelt sich dabei um eine invertierte Kurve 4.ter Ordnung; je näher sich die Magneten kommen (Abstand wird kleiner) umso größer wird die Kraft, mit der sie sich abstoßen. Mit den Gln. (2.11) und (2.12) und 2 verschiedenen Abständen der Magneten zueinander erhält man die Ausdrücke

$$d = \frac{y_{12-2} \cdot \sqrt[4]{F_2} - y_{12-1} \cdot \sqrt[4]{F_1}}{\sqrt[4]{F_1} - \sqrt[4]{F_2}}, \quad c = F_2 \cdot (y_{12-2} - d)^4 \quad (2.14)$$

mit $d = -30 \text{ cm}$ und $c = 0.00024 \text{ Nm}^4$.

Alle Parameter müssen für die Berechnungen in SI- Einheiten umgerechnet werden.

2.2.3 Linearisierung der elektromechanischen Kraftgleichungen

Bewegungen um einen voreingestellten Arbeitspunkt werden als linear angenommen. Ausgangspunkt sind die Gln. (2.5) und (2.6), wobei in diesen die Reibung $c \cdot y^{(l)}$ und die Koppelkräfte F_{u12} bzw. F_{u21} vernachlässigt werden. Dies ist zulässig, da die Reibungskräfte und die Koppelkräfte, verglichen mit den anderen Kräften, sehr klein sind.

$$m \cdot y_1^{(2)} + F_{m12} = F_{u11} - m \cdot g \quad (2.15)$$

$$m \cdot y_2^{(2)} - F_{m12} = F_{u22} - m \cdot g \quad (2.16)$$

Die Taylorentwicklung [5] der Gln. (2.15) und (2.16) liefert nach Abbruch der Reihe nach dem Term 1.ter Ordnung:

$$m \cdot y_1^{(2)*} + (k'_1 + k'_{12}) \cdot y_1^* - k'_{12} \cdot y_2^* = k'_{u1} \cdot u_1^*, \quad (2.17)$$

$$m \cdot y_2^{(2)*} + (k'_{12} - k'_2) \cdot y_2^* - k'_{12} \cdot y_1^* = k'_{u2} \cdot u_2^*, \quad (2.18)$$

mit

$$y_i^* = y_i - y_{i0}, \quad u_i^* = u_i - u_{i0}, \quad i = 1,2 \quad (2.19)$$

$$k'_1 = \frac{4 \cdot u_{10}}{a \cdot (y_{10} + b)^5}, \quad (2.20)$$

$$k'_2 = \frac{4 \cdot u_{20}}{a \cdot (-y_{20} + b)^5}, \quad (2.21)$$

$$k'_{12} = \frac{4 \cdot c}{(y_{120} + d)^5}, \quad (2.22)$$

$$k'_{u1} = \frac{1}{a \cdot (y_{10} + b)^4}, \quad (2.23)$$

$$k'_{u2} = \frac{1}{a \cdot (-y_{20} + b)^4}. \quad (2.24)$$

Liegt im Arbeitspunkt keine zusätzliche Spannung an, so gilt:

$$(F_{m12} - F_{u11} + m \cdot g) = 0. \quad (2.25)$$

2.2.4 Berechnung – 1 Spule und 1 Magnet (unten)

Es wird das Modell mit einer Spule und einem Magneten betrachtet. In Gl. (2.17) werden dementsprechend die Terme für den 2. Magneten nicht berücksichtigt (Gl. (2.26)), womit die Übertragungsfunktion $G(s)$ leicht bestimmt werden kann.

$$m \cdot y_1^{(2)*} + (k'_1 + k'_{12}) \cdot y_1^* = k'_{u1} \cdot u_1^* \quad (2.26)$$

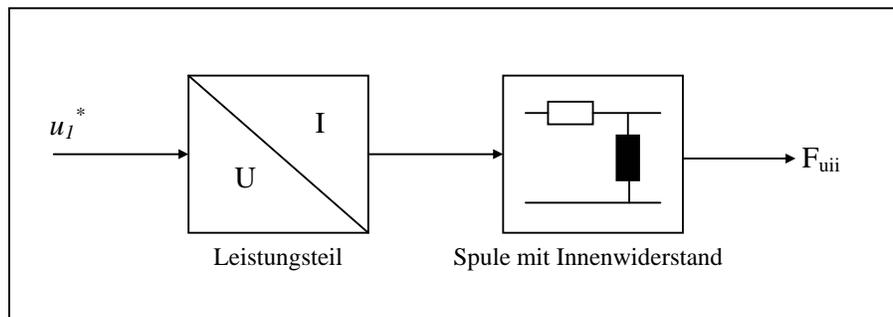


Abb.2.8: Leistungsteil und Spule

Die Kraft, die auf die Magnetscheibe wirkt entsteht durch das magnetische Feld der Spule (Abb.2.8). Die eingepreßte Spannung u_1^* wird über das Induktionsgesetz [6] als Funktion des Stromes dargestellt, womit Gl. (2.26) umgeschrieben wird zu

$$m \cdot y_1^{(2)*} + (k'_1 + k'_{12}) \cdot y_1^* = k'_{u1} \cdot \left(i_1^* \cdot R_i + \frac{di_1^*}{dt} \cdot L \right). \quad (2.27)$$

$$\frac{Y_1}{I_1} = \frac{k'_{u1} \cdot (R_i + s \cdot L)}{m \cdot s^2 + (k'_1 + k'_{12})} \quad (2.28)$$

Für die weiteren Betrachtungen wird stillschweigend vorausgesetzt, dass wir uns im Arbeitspunkt befinden. Der Stern bei den variablen Größen wird demzufolge nicht weiter angeschrieben.

Die Übertragungsfunktion im Laplace- Bereich Gl. (2.28) entspricht noch nicht dem Verhältnis zweier Spannungen. Die Position der Magnetscheibe y_1 wird durch die (linearisierte) Spannung des Sensors ausgedrückt.

Mit $Y_1 = k \cdot U_a$ und $I_e = 0.4 \cdot U_e$ ergibt sich die Übertragungsfunktion

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{9.376 \cdot (R_i + s \cdot L)}{s^2 + 607} \quad (2.29)$$

Der Widerstand R_i setzt sich aus dem Innenwiderstand des Leistungsteiles und dem Leitungswiderstand der Spule zusammen und beträgt $R_i = 58 \Omega + 16 \Omega = 74 \Omega$.

Um die Induktivität zu bestimmen wird ein Spannungssprung am Modell angelegt und die Spannung an der Spule aufgezeichnet. Damit wird über die Zeitkonstante τ und den Innenwiderstand R_i die Induktivität L ermittelt ($L = 0.76 \text{H}$). Eine weitere Möglichkeit wäre, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung aufzuzeichnen um damit auf die Induktivität zu schließen.

Die allgemeine Formel für die Berechnung der Induktivität über die geometrischen Abmessungen und die Anzahl der Windungen ist hier nicht zulässig. Die dafür notwendige Bedingung, dass der Durchmesser der Spule viel kleiner als die Länge der Spule ist, ist hier nicht erfüllt.

Damit ergibt sich für die theoretische Bestimmung der Übertragungsfunktion im Arbeitspunkt

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{693 + s \cdot 7.125}{s^2 + 607}. \quad (2.30)$$

Man erkennt sofort, dass es sich um ein oszillierendes System handelt ($w_n = 0.12$). Die Schwingung klingt in dieser theoretischen Betrachtung nicht ab, da für die Modellbildung der Anteil der Reibung vernachlässigt wurde (entspricht $D=0$).

2.2.5 Berechnung – 1 Spule und 1 Magnet (oben)

2.2.5.1 Möglichkeit 1

Im Wesentlichen ähnelt die Übertragungsfunktion für die Spule- Magnet oben der Gl. (2.30). Der Unterschied besteht darin, dass es sich im gegenwärtigen Fall um ein instabiles System handelt. Instabil in dem Sinn, da die Magnetscheibe entweder nach oben schnappt, oder nach unten fällt. Es gibt lediglich einen labilen Betriebspunkt, d.h., die durch das magnetische Feld hervorgerufene Kraft entspricht in diesem Punkt der Gewichtskraft der Magnetscheibe. Ausgehend von Gl. (2.18) und analoger Vorgehensweise wie in 2.2.4 lautet die Übertragungsfunktion

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1180 + s \cdot 7.125}{s^2 - 790}. \quad (2.31)$$

Diese theoretische Berechnung ist für den späteren Reglerentwurf von entscheidender Bedeutung. Eine weitere Möglichkeit eine instabile Strecke zu identifizieren wäre die Verwendung eines Hilfsreglers.

2.2.5.2 Möglichkeit 2

Aus Gl. (2.6) folgt unter Vernachlässigung der Reibung und der Kopplungen

$$m \cdot \frac{d^2 y_2^*}{dt^2} = f^*(y_2, i_2) - m \cdot g$$

mit

$$f^*(y_2, i_2) = F_{u22} = k_{u2}' \cdot u_2^*. \quad (2.32)$$

Für die Linearisierung wird die Differentialgleichung partiell nach dem Ort und der Zeit abgeleitet. Für den Arbeitspunkt von $y_2 = -2 \text{ cm}$ (bzw. $y_1 = 11 \text{ cm}$.) erhält man mit

$$\frac{1}{m} \cdot \frac{df}{dy_2} = r^2 > 0$$

und

$$(2.33)$$

$$\frac{1}{m} \cdot \frac{df}{di_2} = v > 0$$

$$\frac{d^2 y_2^*}{dt^2} - r^2 \cdot y_2^* = v \cdot i_2^* \quad (2.34)$$

Aus Gl. (2.34) bzw. Abb.2.9 ist die Übertragungsfunktion $G(s)$ leicht ermittelbar und lautet mit den Gln. (2.21) und (2.24)

$$G(s) = \frac{v}{s^2 - r^2},$$

$$G(s) = \frac{k'_{u2}}{m \cdot s^2 - k'_2 + k'_{12}}, \quad (2.35)$$

$$G(s) = \frac{16}{s^2 - 607}.$$

Die Übertragungsfunktion liefert einen stabilen und einen instabilen Pol [7].

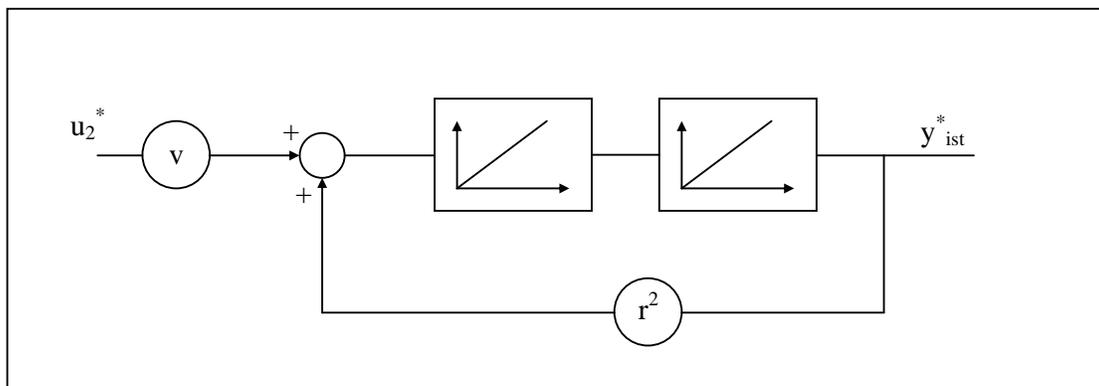


Abb.2.9: Darstellung der Strecke des Modells

Wird in Gl.(2.35) bzw. in Abb. 2.9 u_2^* durch eine Funktion in i ersetzt so erhält man wieder Gl.(2.31).

2.2.6 Darstellung im Zustandsraum

Es handelt sich hier um ein Mehrgrößensystem; 2 Eingänge für die Ansteuerung der Spulen und 2 Ausgänge für die Position der Magnete. Mit den Gln. (2.17) und (2.18) kann die Zustandsraumdarstellung [8] angeschrieben werden:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (2.36)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \quad (2.37)$$

mit

$$x^*(t) = \begin{bmatrix} y_1^* \\ y_1^{(1)*} \\ y_2^* \\ y_2^{(1)*} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(k_1' + k_{12}')}{m} & 0 & \frac{k_{12}'}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_{12}'}{m} & 0 & \frac{(k_2' - k_{12}')}{m} & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_{u11}'}{m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_{u22}'}{m} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_1^*(t) \\ u_2^*(t) \end{bmatrix}, \quad D \equiv 0.$$

$C_i=1$ ($i=1,2,3,4$) wenn x_i ein Ausgang ist und Null anderenfalls

Diese allgemeine Zustandsraumdarstellung kann auf den Fall einer Spule und einer Magnetscheibe reduziert werden, indem man die jeweiligen Koeffizienten in den Matrizen vernachlässigt.

2.3 Vergleich der Identifikation und der theoretischen Analyse

2.3.1 1 Spule – 1 Magnet – unten

Die experimentelle Analyse (Gl. (2.2)) und die theoretische Berechnung (Gl. (2.30)) liefern

$$G(s) = \frac{1.3 \cdot s + 550}{s^2 + 10 \cdot s + 355}, \quad G(s) = \frac{7.125 \cdot s + 693}{s^2 + 607}. \quad (2.39)$$

Die Ergebnisse stimmen im Wesentlichen überein. Bei der theoretischen Analyse soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Reibung vernachlässigt wurde, d.h., $c_1 \cdot s = 0$. Dementsprechend unterscheiden sich die Stationärverstärkung, der Dämpfungsgrad und die Nennfrequenz. Relevante Größen wie Innenwiderstand oder die Induktivität und die Parameter a , b , c , und d mussten empirisch ermittelt werden. Die Parameter sind bekanntlich eine Funktion der Position. Aufgrund der Reibung kommt es vor, dass bei mehrmaligem Anlegen desselben Spannungssprunges eine verschiedene Position erreicht wird. Diese geringfügigen Abweichungen gehen in die Berechnung zur 4. oder sogar zur 5. Potenz ein und sind deshalb erwähnenswert. Um dennoch die Parameter möglichst genau zu bestimmen, wurden die Versuche für jeden Parameter mehrmals ausgeführt und anschließend der Mittelwert der gemessenen Resultate verwendet.

2.3.2 1 Spule – 1 Magnet – oben

Beim Betrieb der Spule oben ist ersichtlich, dass es sich um ein instabiles System handelt. Die Magnetscheibe fällt entweder nach unten, oder schnappt nach oben. In Abschnitt 2.2.5 werden 2 verschiedene theoretische Ansätze für eine Modellbildung gewählt, welche beide zum selben Ergebnis kommen. Beim späteren Reglerentwurf wird sich diese Modellbildung als nützlich erweisen.

2.4 Das Temperaturverhalten der Spule

Um die Spule nicht zu zerstören, ist es notwendig den Zusammenhang zwischen Strom und Temperatur zu kennen. Laut Hersteller [9] kann die Spule dauernd mit einem Strom von 1.2A (bzw. 3V) betrieben werden. Kurzzeitig sind sogar 4A (bzw. 10V) möglich (0.5 s pro 60 Sekunden). Für die experimentelle Analyse wurde ein Temperatursensor (NiCr-Ni) an der Spule montiert. Die Auswertung der Wertetabelle für die Betriebspunkte 1V, 2V, 3V und 4V [entspricht 0.4A, 0.8A, 1.2A und 1.6A] ist der Abb.2.10 zu entnehmen. Man erkennt deutlich ein PT_1 -Verhalten.

Das Abkühlverhalten ist, wie zu erwarten war, eine Exponentialfunktion und ist in Abb.2.11 dargestellt. Beim Abkühlen werden nur die Betriebspunkte von 3V [1.2A] und von 2V [0.8A] betrachtet.

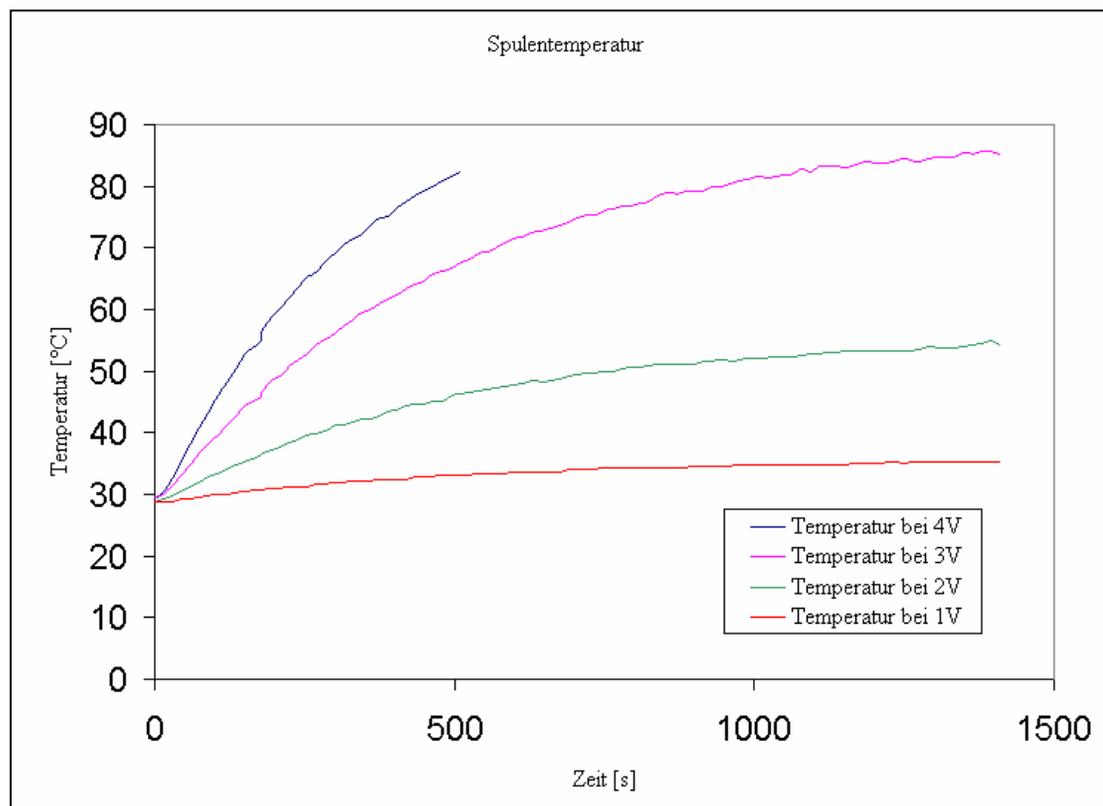


Abb.2.10: Spulentemperatur bei Anlegen einer konstanten Spannung

Die Grundlage für die mathematische Beschreibung des Temperaturverhaltens der Spulen in Abhängigkeit des Stromes bildet die Abb.2.10. Für die folgenden Betrachtungen wird die Temperaturkennlinie von 3V verwendet. Für diesen speziellen Fall gilt:

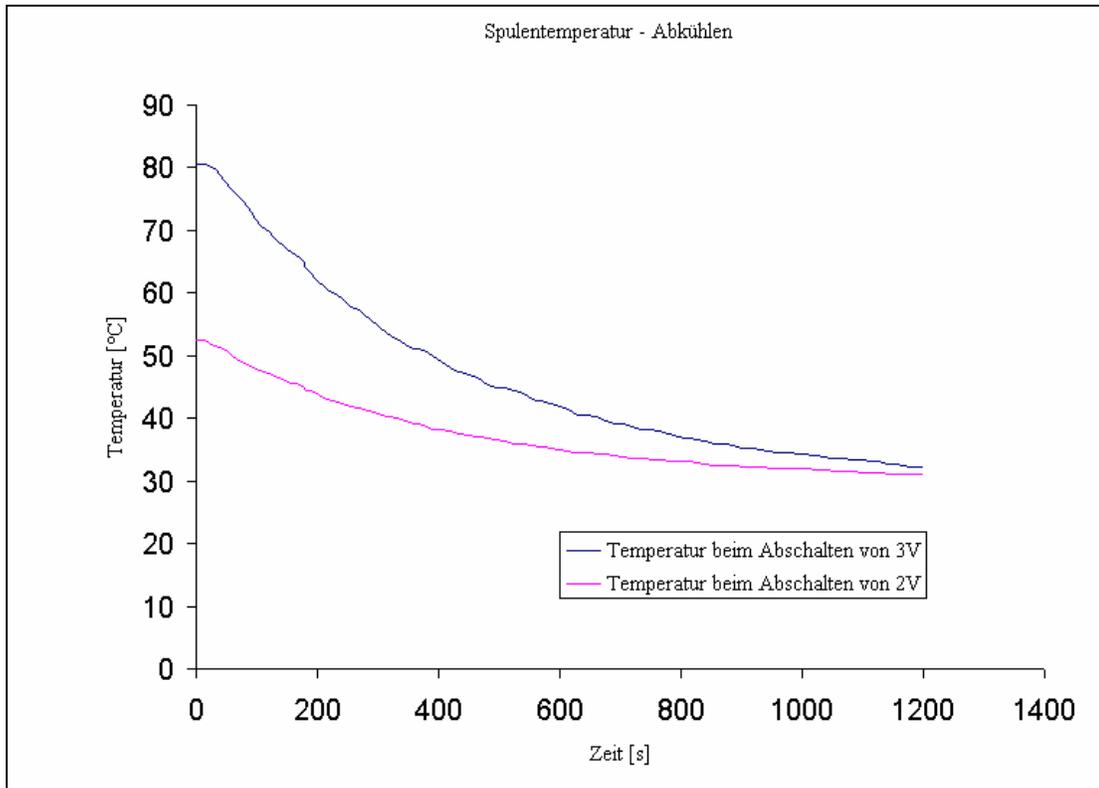


Abb.2.11: Abkühlverhalten der Spulen beim Ausschalten der Spannungsversorgung

$$T_{Sp} = T_A + \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \cdot p \cdot U \quad (2.40)$$

mit

$$p = \frac{T_{End}}{U}. \quad (2.41)$$

Die Spulentemperatur T_{Sp} ist eine Funktion der Anfangstemperatur T_A , der Spannung U und eines Proportionalitätsfaktors p . Die Endtemperatur T_{End} entspricht dem stationären Endwert (bei 3V), die Anfangstemperatur der Raumtemperatur. Aus der Kennlinie wurden dann die zugehörigen Werte graphisch ermittelt was

$$T_{Sp} = 28 + \left(1 - e^{-\frac{t}{460}}\right) \cdot 20 \cdot U \quad (2.42)$$

liefert. Eine allgemeinere Darstellung der Temperatur in Funktion der zugeführten Leistung ist im Abschnitt 4.1 angegeben.

3 Reglerimplementierung

3.1 Schweberegulation unten

Die Strecke besteht bei dieser Regelung aus der unteren Spule und einer Magnetscheibe. Es handelt sich hierbei um ein stabiles, nichtlineares System.

3.1.1 Darstellung der Nichtlinearität

Die Abstandsmessung mittels Laser (Abb.3.1) ist ebenso wie das magnetische Feld entlang der Bewegungsrichtung der Scheibe nichtlinear. In Abb.3.2 ist der Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Position der Magnetscheibe dargestellt. Im rechten Teil musste für diese Untersuchung vom labilen Gleichgewicht ausgegangen werden. Damit sieht man, dass eine Spannung u_2 , welche kleiner als 1V ist nicht ausreicht, um die Scheibe in der Nähe der oberen Spule zu halten. Außerdem erkennt man, dass bei ca. 9.5 cm die magnetische Kraft die Scheibe gerade noch halten kann. Positionen unterhalb von 9.5 cm können nur durch die obere Spule allein nicht mehr gehalten werden (auch wenn man die Spannung u_2 deutlich erhöht). Der Grund liegt darin,

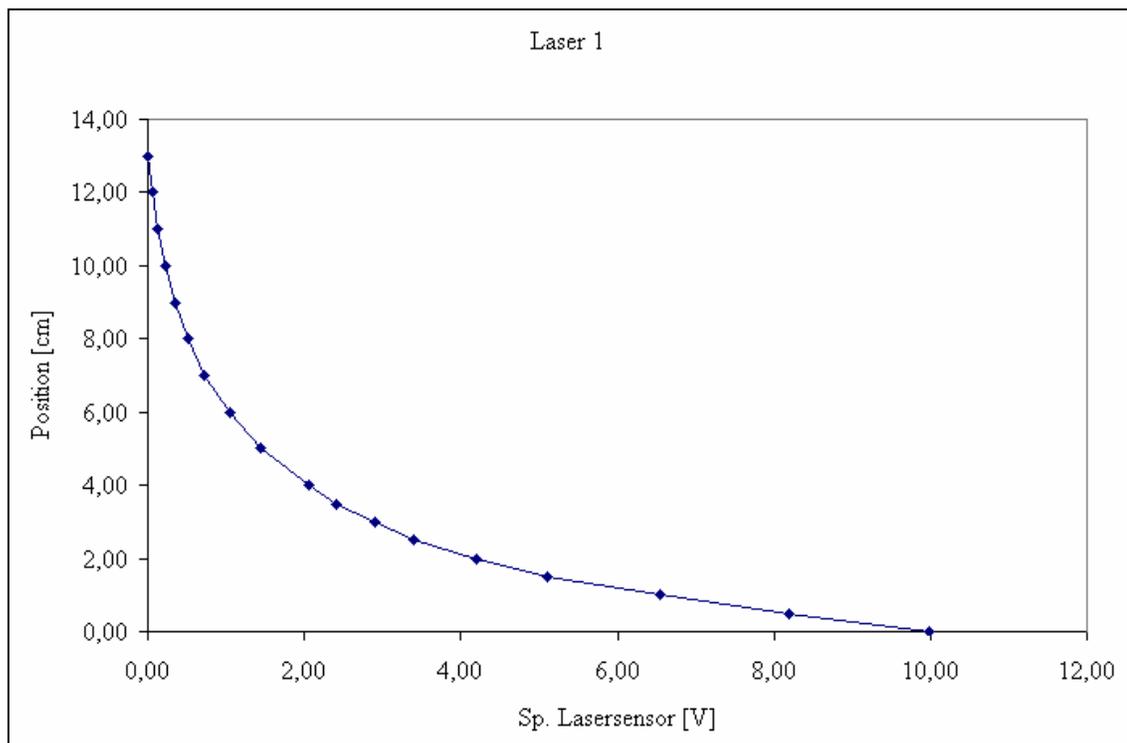


Abbildung 3.1: Zusammenhang zwischen Magnetposition und Sensorsignal

dass das magnetische Feld (und damit auch die Kraft) mit zunehmendem Abstand quadratisch abnimmt.

Um einen Regler zu entwerfen ist es notwendig die Strecke zu kennen. Das Übertragungsverhalten der Strecke wird von Gl. (2.2) übernommen. In dieser Gleichung wurde das Modell linearisiert, d.h. es wurden nur kleine Auslenkungen um den Arbeitspunkt von 2V betrachtet. In Abb.3.1 liegt es nahe, denn Arbeitspunkt zwecks besserer Linearisierung nach oben zu verschieben, z.B. 3V. Dies ist leider nicht zulässig, da 3V die Obergrenze für ein dauernd anliegendes Signal ist.

Diese Stellgrößenbegrenzung von 3V ergibt sich wegen des thermischen Schutzes der Spulen und ist von entscheidender Bedeutung für den Entwurf des Reglers. Die dadurch auftretende Nichtlinearität im Regelkreis hat vor allem bei der Schweberegulation oben einen großen Einfluss.

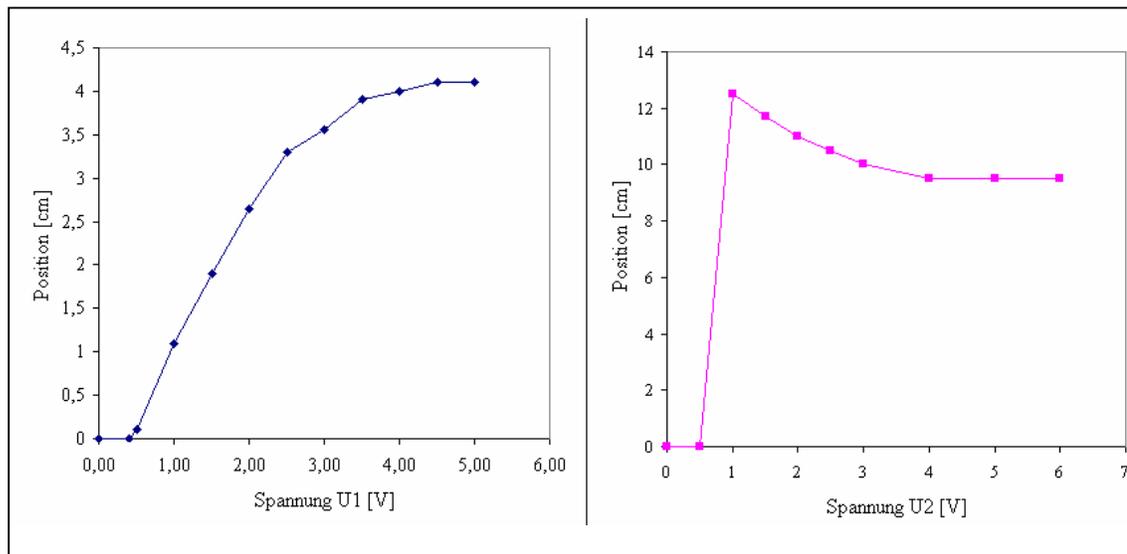


Abb.3.2: Zusammenhang zwischen Magnetposition und Magnetfeld

3.1.2 Reglerentwurf

Das Ziel war es einen Regler zu entwerfen, der in der Umgebung des Arbeitspunktes den vorgegebenen Sollwert genau erreicht. Die Nichtlinearität, welche durch die Stellgrößenbegrenzung auftritt hat keinen Einfluss und damit kann die *Control System Toolbox* von Matlab verwendet werden. Das darin enthaltene Userinterface (*SISO Design Tool*) ermöglicht den Reglerentwurf mit Wurzelortskurven. Für diese Modellkonfiguration

wurde ein einfacher I-Regler verwendet. Der wesentliche Teil der WOK der Regelschleife ist in Abb.3.3 dargestellt. Die Nullstelle in der rechten Halbebene bewirkt, dass das System bei zu großer Verstärkung ($V > 6$) instabil wird [10] d.h., die Magnetscheibe schwingt auf und ab und kollidiert unten mit der Spule.

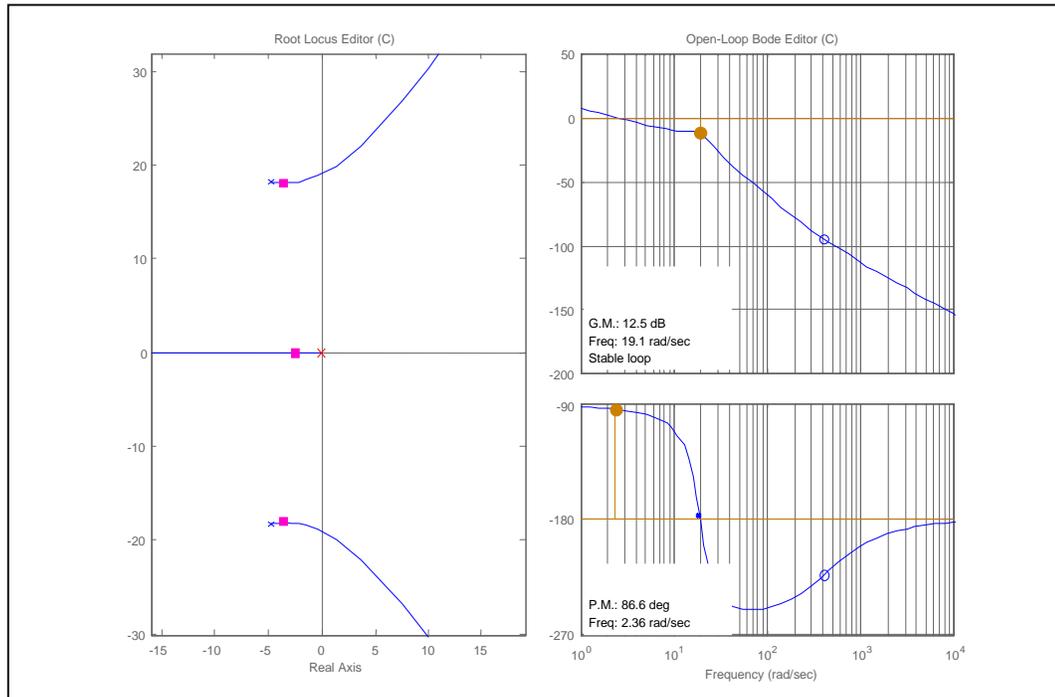


Abb.3.3: Wurzelortskurve und Bodediagramm der Schleife

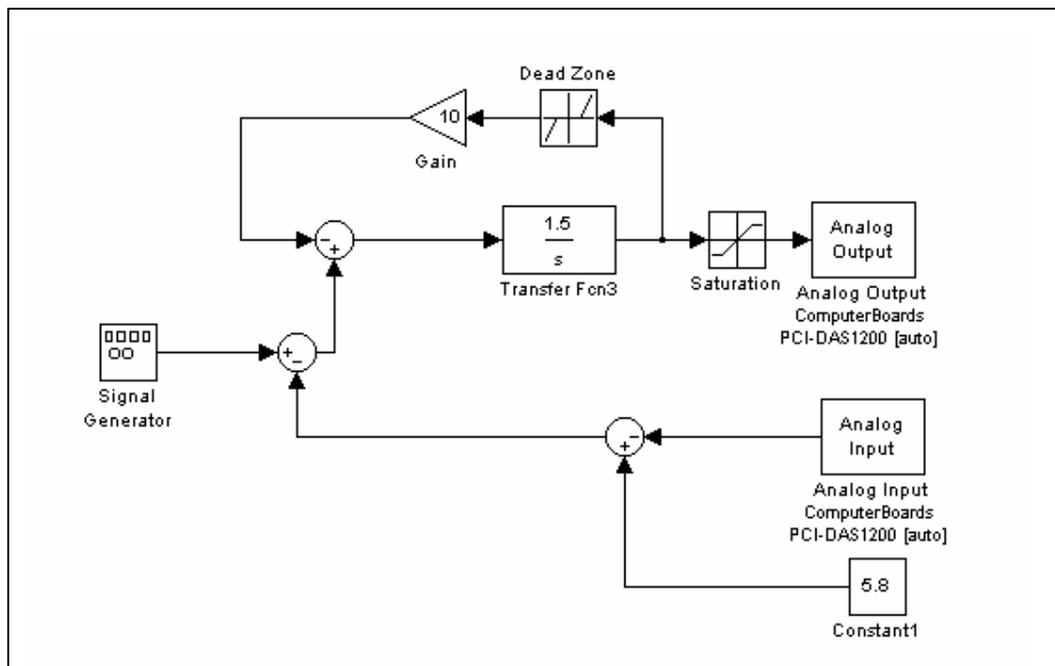


Abb.3.4: Simulinkdatei – I-Regler - unten

Um den Regler dynamisch zu verbessern ist eine Anti – Reset – Windup – Maßnahme [8] vorgesehen (Abb.3.4). Die 5.8, die im Rückkopplungszweig dazugezählt werden müssen kommen aufgrund der Linearisierung zustande. Es handelt sich dabei nur um eine Nullpunktverschiebung (siehe Abb.3.1).

In Abb.3.5 ist der Vergleich der Eingangs- und der Ausgangsgröße dargestellt. Betrieben wird das Modell ausgehend von einem Arbeitspunkt von 2V mit einer Rechteckschwingung mit einer Amplitude von 1V und einer Frequenz von 0.5 Hz.

Aufgrund der Linearisierung ist die Spannung proportional zur Position der Scheibe. Allerdings bedeutet eine Spannung von 1V nicht eine Bewegung von 1 cm, sondern in etwa 0.8 cm. Grund dafür ist die Steigungen der Tangenten in den Arbeitspunkten der Abb.3.1 und 3.2.

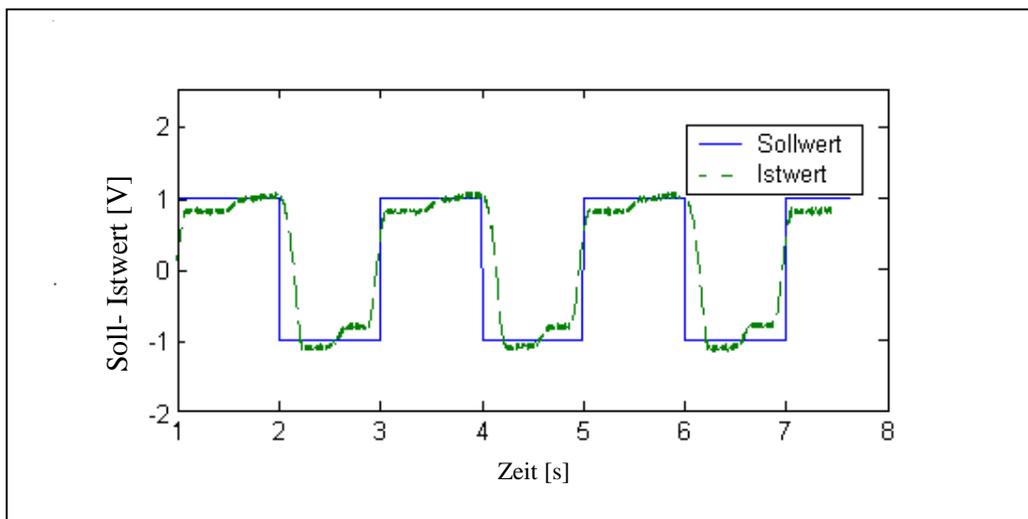


Abb.3.5: Soll – Istwertvergleich

3.2 Schweberegulation oben

3.2.1 Nichtlinearität und Modellbildung

Für die Schweberegulation oben ist es schwieriger den Regler zu entwerfen, da es sich neben den Nichtlinearitäten auch um ein instabiles System handelt. Die Strecke kann auf mehrere Weisen betrachtet werden:

- Nichtlineares Magnetfeld (Abb.3.2) und nichtlineare Sensorcharakteristik (Abb.3.6)
- Nichtlineares Magnetfeld und linearisierter Lasersensor
- Linearisiertes Magnetfeld und linearisierter Lasersensor

Ein homogenes Magnetfeld und eine lineare Positionsmessung sind wünschenswert. Bei genauer Kenntnis des Systems kann die Linearisierung des magnetischen Feldes mittels Feedback - Linearisierung erreicht werden. Die Positionsmessung kann durch eine Kennlinienkompensation linearisiert werden [8,11]. Im vorliegenden Fall macht die Feedback- Linearisierung wenig Sinn, da für ein homogenes B- Feld die Stellgröße $u(t)$ mit zunehmendem Abstand rapide ansteigt, dies die Stellgrößenbeschränkung von 3V aber verhindert.

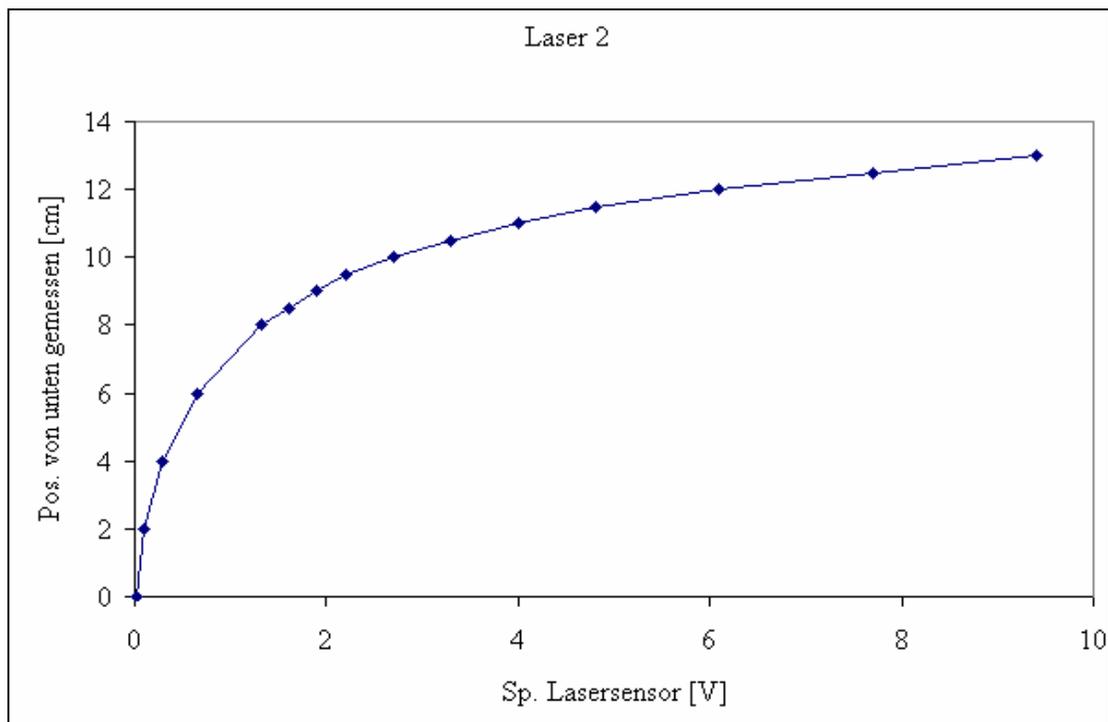


Abb.3.6: Zusammenhang zwischen Magnetposition und Sensorsignal

3.2.2 Reglerentwurf

Das Ziel war es, einen Regler zu entwerfen, der in der Umgebung des Arbeitspunktes die instabile Strecke stabilisiert, und dass vorgegebene Sollwerte der Position möglichst genau erreicht werden. Der Entwurf wurde aufgrund der Stellgrößenbeschränkung wesentlich erschwert. Das *SISO Design Tool* der *Control System Toolbox* kann hier, allerdings nur mit Einschränkungen, verwendet werden. Für die WOK (Abb.3.7) wird zunächst davon ausgegangen, dass es keine Stellgrößenbeschränkung gibt. Hat dann das System mit dem entworfenem Regler die gewünschten Eigenschaften, so ist nachträglich eine Simulation des Regelkreises in Simulink *mit* der Stellgrößenbeschränkung unumgänglich. Erst da zeigt sich, ob die Regelung trotz Stellgrößenbeschränkung stabil ist.

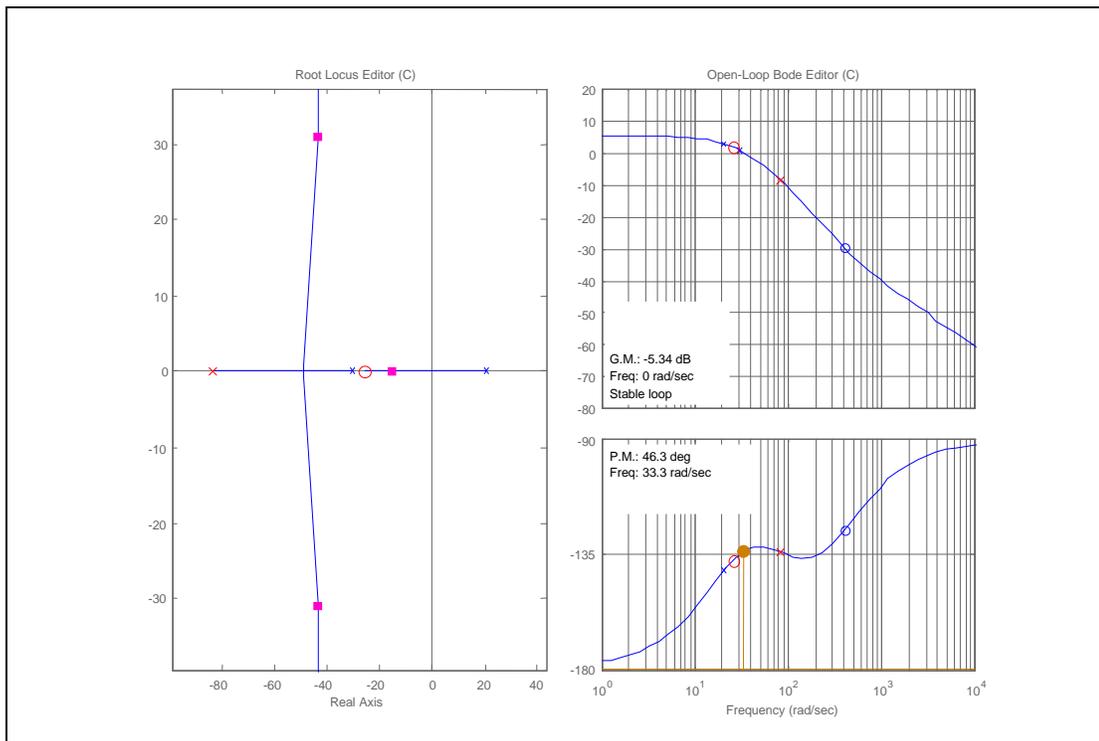


Abb.3.7 Wurzelortskurve und Bodediagramm der Schleife

Der in Simulink realisierte PDT1- Regler (Abb.3.8) liegt im Rückkopplungszweig. Die Parameter des Reglers ergeben sich durch den Entwurf mittels WOK zu

$$K_p=1.65,$$

$$T_d=0.04,$$

$$T_I=0.012.$$

Wesentlich für den Entwurf, war das Überschwingverhalten des geschlossenen Regelkreises. Bei zu großem Überschwingen nach unten, würde die Magnetscheibe den Arbeitsbereich von $y_{2max} = -3$ cm sehr schnell überschreiten. Diese 3 cm resultieren aus der Stellgrößenbegrenzung. Eine Optimierung mittels *NCD-Toolbox (Nonlinear Control Design)* liefert für überschwingfreies, stationärgenaues Reglerverhalten ein geringfügig verändertes K_p von 1.64.

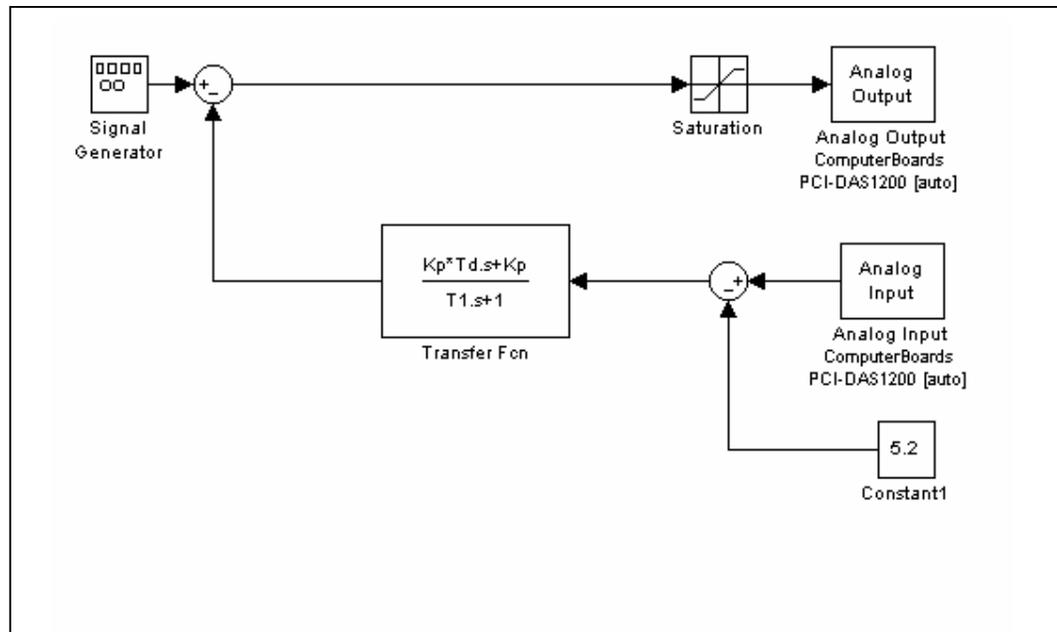


Abb.3.8: Simulink- Datei: PDT1- Regler – oben

3.2.3 Untersuchung des PDT1- Reglers

Der Regler wurde hinsichtlich 2 verschiedener Betriebsmöglichkeiten getestet. Im ersten Fall wird an die Spule unten ein Sprung angelegt, welcher die Magnetscheibe nach oben katapultiert. Des Weiteren wird untersucht, wie genau die Scheibe einem vorgegebenen Signal folgt.

3.2.3.1 Katapult

Die Echtzeitkarte PCI- DAS 1200 hat zwei Ausgänge, die über Simulink angesteuert werden können. Die Simulink- Datei aus Abb.3.8 wird lediglich um einen *Analog Output* und eine Spannungsquelle, die einen Sprung von 0 auf 2.5V liefert, erweitert. Der Sprung der Spannung bewirkt, dass die Scheibe regelrecht „abgeschossen“ wird. Sobald sie in den Arbeitsbereich des PDT1- Reglers tritt, übernimmt dieser die Magnetscheibe und führt sie an die gewünschte Position. In Abb.3.9 sei darauf hingewiesen, dass es sich um das Sensorsignal des Lasers handelt und dies nicht direkt der Position entspricht. Die Position wird über die Linearisierung dieses Signals ermittelt.

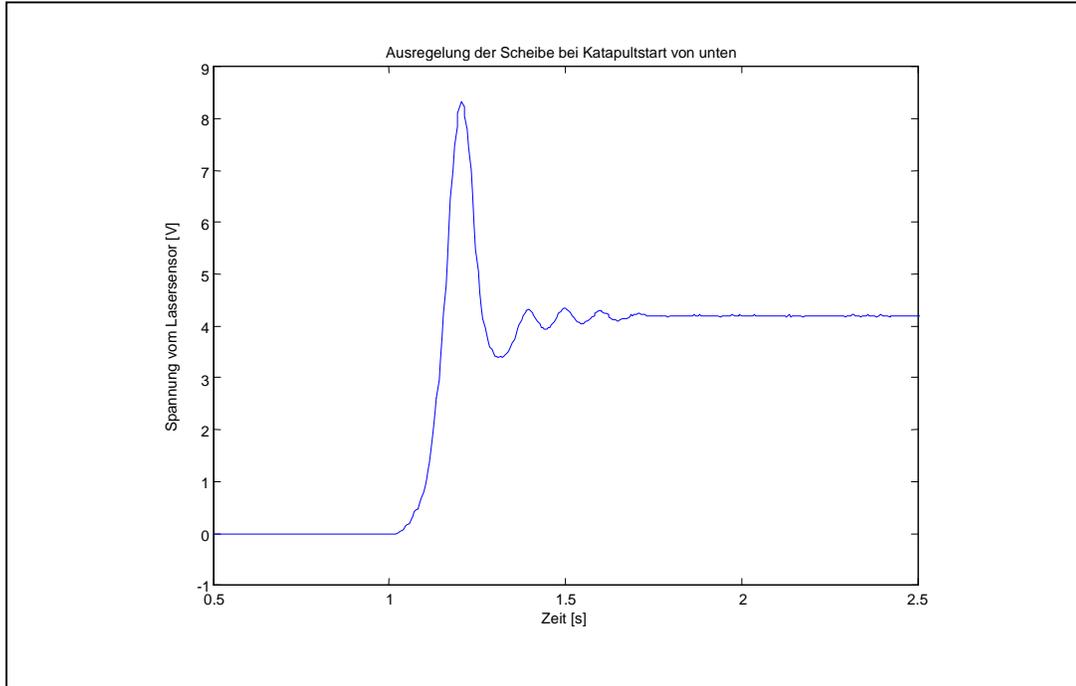


Abb.3.9: Stabilisierung der von unten nach oben katapultierten Magnetscheibe

3.2.3.2 Rechtecksignal

Der Vergleich zwischen Soll- und Istwert kann der Abb.3.10 entnommen werden.

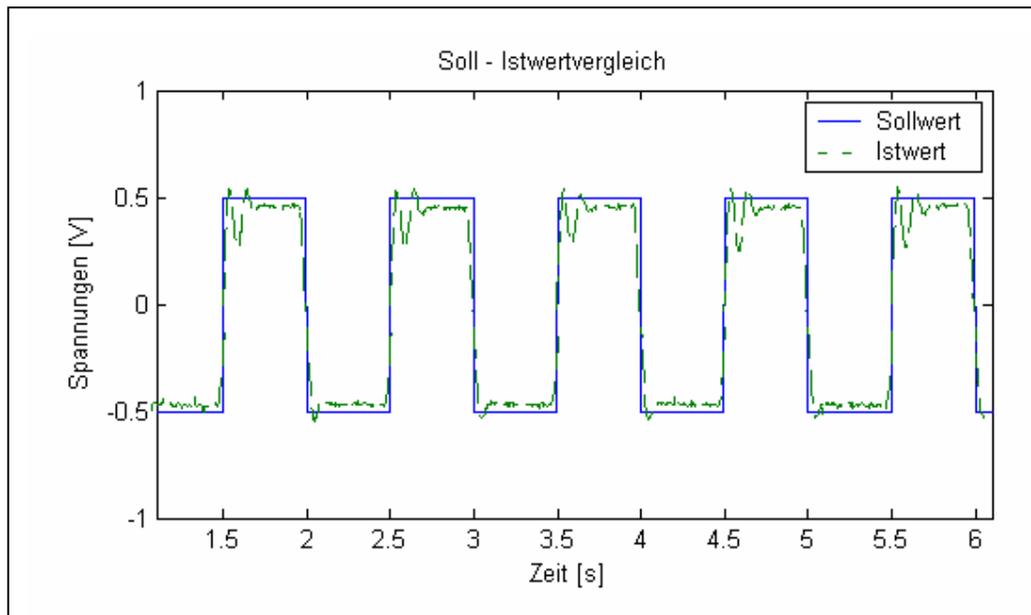


Abb.3.10: Soll – Istwertvergleich

4 Schutz der Spulen vor Überhitzung

In diesem Abschnitt werden 3 verschiedene Methoden vorgestellt, welche die Spulen vor Überhitzung schützen sollen. Die Motivation liegt darin, dass dann die Stellgrößenbegrenzung aus den vorigen Kapiteln nicht mehr notwendig ist. Es wird hier die Temperatur in den Spulen auf verschiedene Arten ermittelt, und sobald die zulässige Grenztemperatur erreicht ist, wird Alarm gegeben, bzw. die Stromversorgung der Spulen unterbrochen.

Zu Beginn wird der Zusammenhang zwischen Temperatur und Spannung in einer Übertragungsfunktion dargestellt. Die 2. Möglichkeit verwendet die Ausgänge *ADC3* und *ADC4*, welche ursprünglich für die Temperaturkompensation der Laser vorgesehen waren, als Sensoren für die Spulentemperatur. Als 3. Möglichkeit wird eine Schaltung vorgestellt, die mit 2 NTC- Elementen die Temperatur überwacht und gegebenenfalls die Spannungsversorgung unterbricht. Abschließend werden die 3 Methoden verglichen und die Beste realisiert.

4.1 Variante 1

Es wird ein Zusammenhang zwischen der zugeführten Leistung und der Spulentemperatur hergestellt. Die Spulentemperatur setzt sich aus der Umgebungstemperatur T_U und der Übertemperatur $T_{\dot{U}}$ zusammen. Ausgangspunkt sind theoretische Betrachtungen, wobei dann mithilfe der Abb.4.1 die notwendigen Parameter empirisch bestimmt werden. Die zugeführte Leistung P_{zu} führt zu einer Temperatursteigerung der Spulen, während gleichzeitig ein Wärmestrom an die Umgebung abgegeben wird. Die Wärmebilanz ergibt sich dementsprechend zu

$$P = k_1 \cdot \dot{T}_{\dot{U}} + k_2 \cdot T_{\dot{U}} . \quad (4.1)$$

Die Gl.(4.1) ergibt sich im Frequenzbereich zu

$$T_{\dot{\vartheta}} = \frac{P}{s \cdot k_1 + k_2} \quad \text{bzw.} \quad (4.2)$$

$$\frac{T_{\dot{\vartheta}}}{P} = \frac{K}{1 + s \cdot T} \quad \text{mit}$$

$$K = \frac{1}{k_1} \quad \text{und} \quad T = \frac{k_2}{k_1} . \quad (4.3)$$

Aus Abb. 4.1 folgt somit

$$\begin{aligned} K &= 3.7, \\ k_1 &= 0.27, \\ T &= 460 \text{ s}, \\ k_2 &= 124. \end{aligned}$$

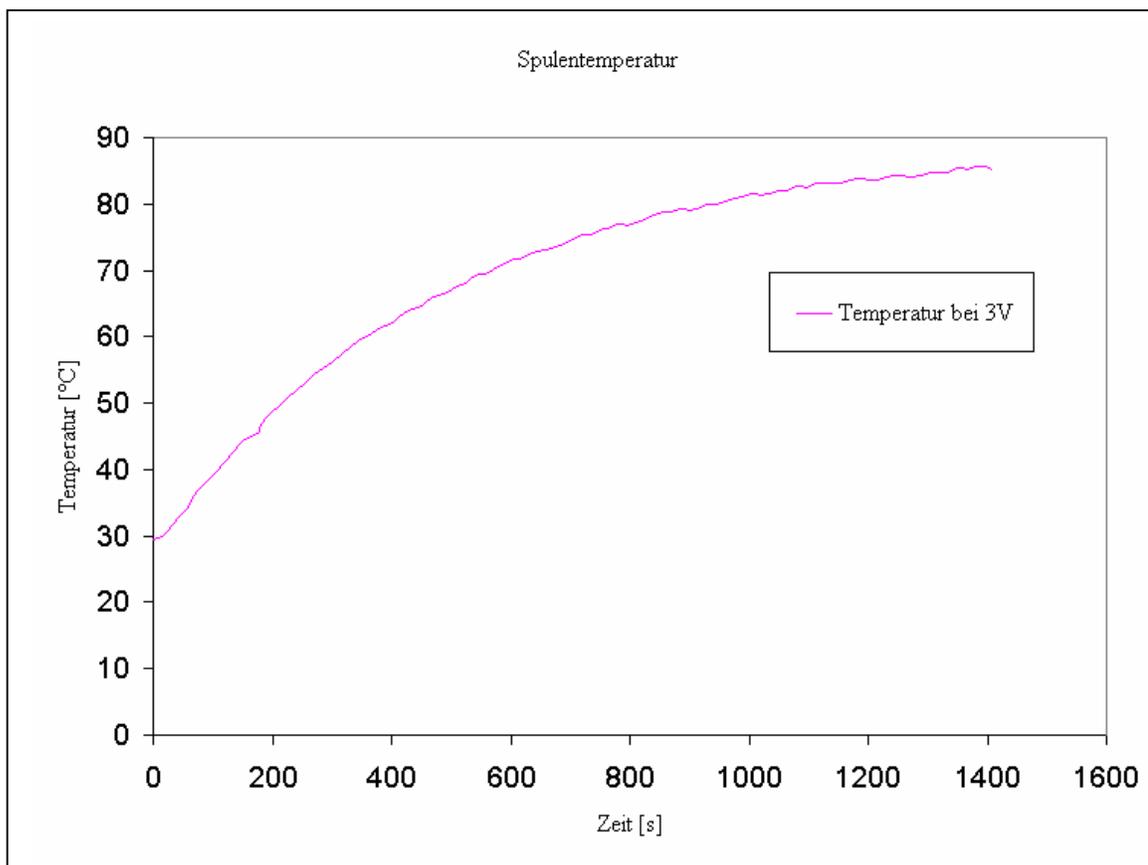


Abb.4.1: Spulentemperatur bei 3 V

Eine mögliche Realisierung in Matlab zeigt die Abb.4.2. Die Spulentemperatur hängt von der Spannung (bzw. dem Strom) quadratisch ab. Berücksichtigt wird natürlich auch der Innenwiderstand der Spule.

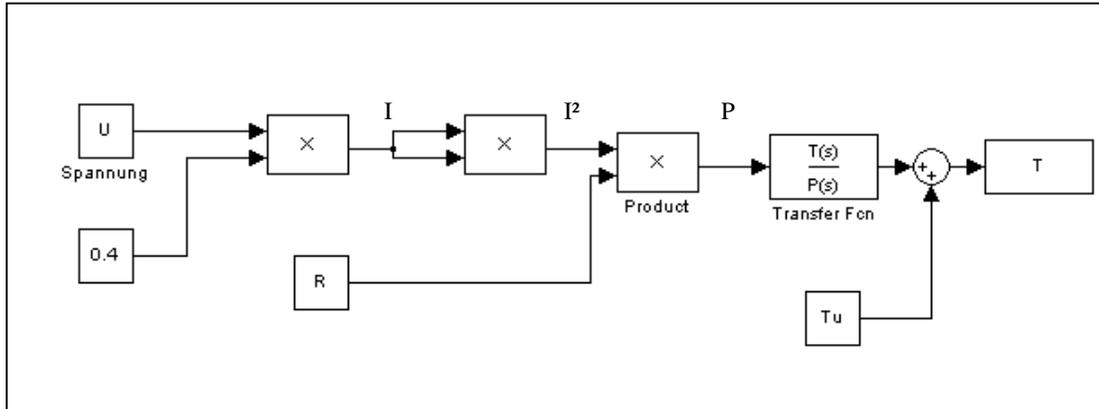


Abb.4.2: Erweiterung in Simulink

Der in Abb.4.2 dargestellte Teil ist nur für die Temperaturbestimmung vorgesehen. Werden nun Regler in Matlab implementiert, so sind die Temperaturbestimmung *und* der Regler in einer gemeinsamen Datei abzulegen. Über den analogen Ausgang der Echtzeitkarte kann ein Alarmgeber angeschlossen werden.

4.1.1 Vor- und Nachteile

Der Vorteil liegt in der Einfachheit der Ausführung. Das einzig notwendige hier ist, dass man das Übertragungsverhalten zwischen Temperatur und Spannung kennt. Ein auftretender Alarm kann über den analogen oder digitalen Ausgang der Echtzeitkarte ausgegeben werden.

Der wesentliche Nachteil ist, dass Matlab häufig abstürzt. In diesem Fall bleibt an der Echtzeitkarte der zuletzt anliegende Wert erhalten. Liegen an der Echtzeitkarte kurz vor dem Abstürzen z.B. 5V an, so bleiben diese erhalten. Wenn der Benutzer nicht sofort erkennt, dass mit dem Computer irgendetwas nicht stimmt, so heizt sich die Spule auf und brennt durch.

4.2 Variante 2

Die 2. Möglichkeit um die Spulen vor Überhitzung zu schützen besteht darin, die Sensoren, welche für die Temperaturkompensation des Lasers vorgesehen sind, zu verwenden. Diese sind innerhalb der Spulen montiert. Laut Hersteller [4] liefern die Ausgänge des Leistungsteils *ADC3* und *ADC4* eine Spannung zwischen 0...2V. Diese Spannungen liefern, wie gleich gezeigt wird, einem Zusammenhang mit der Temperatur der Spulen. Ob nun dieser Zusammenhang linear ist oder nicht, ist unwichtig; wichtig ist nur, dass die Grenztemperatur von 86°C nicht überschritten wird. Die Spule wird mit 3V betrieben und die Temperatur steigt (Abb.4.3). Bei Erreichen der Grenztemperatur wird das Leistungsteil ausgeschaltet und die Spule kühlt sich ab (Abb.4.4).

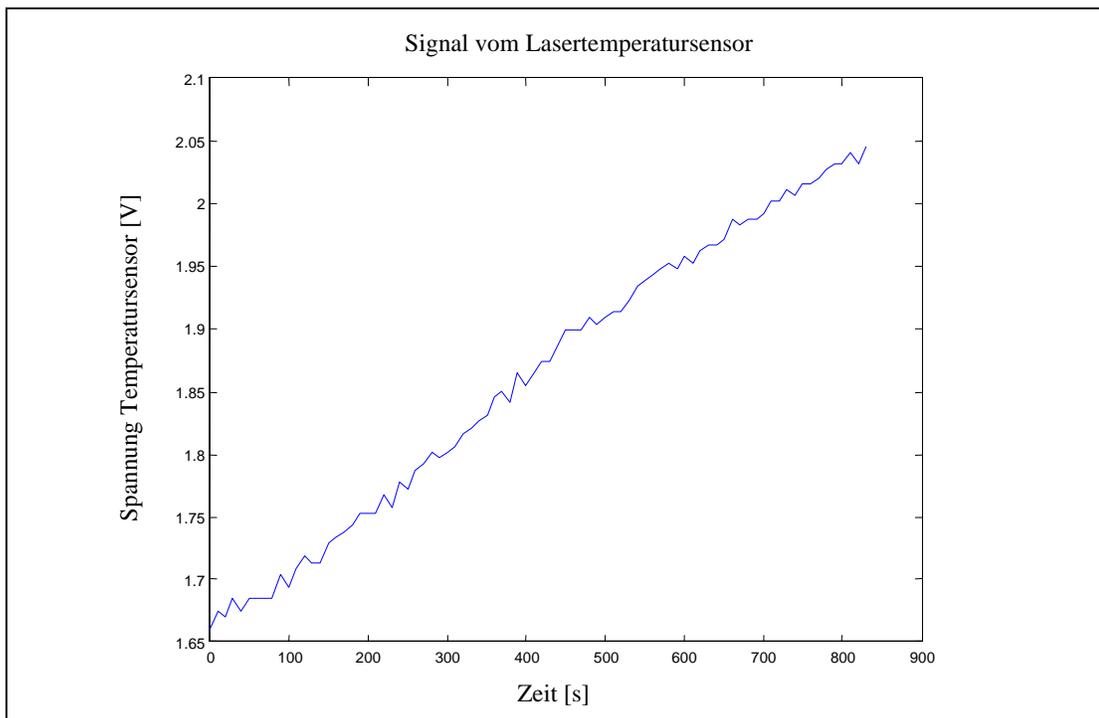


Abb.4.3: Signal vom Lasertemperatursensor bei Anlegen von 3V

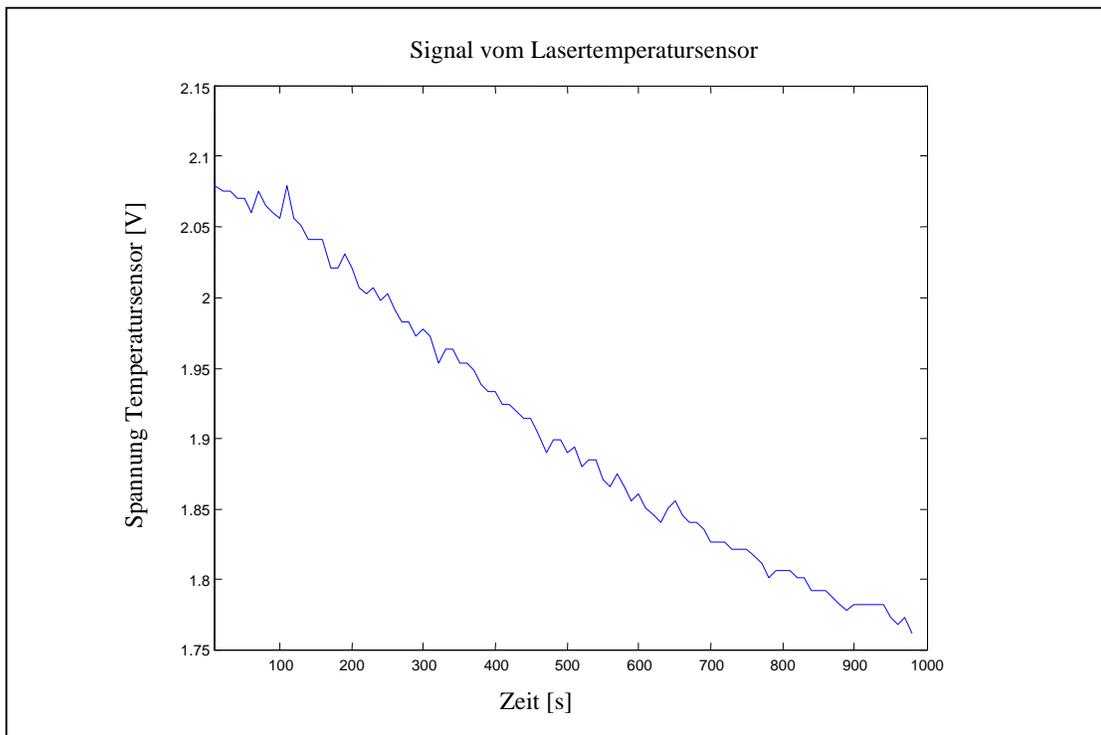


Abb.4.4: Signal vom Lasertemperatursensor beim Abkühlen der Spulen

In den Abb.4.3 und 4.4 liefern die Ausgänge *ADC3* und *ADC4* bei Erreichen der Grenztemperatur eine Spannung von etwas mehr als 2 V. Außerdem erkennt man, dass das Erwärmen der Spule schneller vor sich geht, als das Abkühlen. Eine mögliche Realisierung in Matlab ist in Abb.4.5 zu sehen.

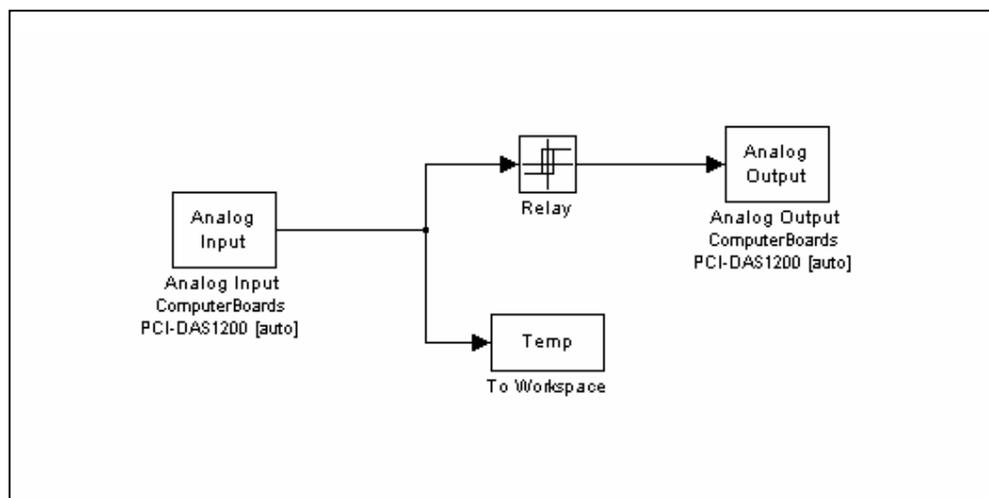


Abb.4.5: Auswertung der Daten des Temperaturkompensationssensors in Simulink

Über den analogen Eingang wird der aktuelle Spannungswert des *ADC3* bzw. des *ADC4* eingelesen. Der *Relay-Block* schaltet den Ausgang bei Erreichen der Grenztemperatur auf high, und es wird Alarm gegeben.

Um zu gewährleisten, dass die Grenztemperatur nicht überschritten wird, soll die Hysterese bei 2.05V aktiv werden. Die untere Schaltschwelle kann frei gewählt werden. Empfehlenswert sind 1.95V. Dies entspricht einer Abkühlung von ca. 10°C und dieser Abkühlvorgang dauert in etwa 1 Minute.

Wie für Abb.4.2 gilt auch für Abb.4.5, dass diese Datei immer gemeinsam mit einem Regler implementiert werden muss.

4.2.1 Vor- und Nachteile

Vorteilhaft sind die einfache Realisierung in Matlab und die genaue Arbeitsweise. Bei dieser Methode kann die Temperatur exakt bestimmt werden. Sollte es für bestimmte Anwendungen notwendig sein, die Temperatur zu jedem Zeitpunkt zu kennen, so genügt es, die Kennlinien aus Abb.4.3 und 4.4 durch eine Gerade anzunähern. Damit kann die Temperatur zu jedem Zeitpunkt einfach berechnet werden. Ein auftretender Alarm kann wiederum über den analogen oder digitalen Ausgang der Echtzeitkarte ausgegeben werden.

Nachteilig ist wieder das häufige Abstürzen von Matlab und damit die Möglichkeit, dass die Spule unbemerkt durchbrennen kann. Des Weiteren soll auf folgendes hingewiesen werden: Die Software *INSTACAL* (Software zum Kalibrieren und zum Anzeigen verschiedener Parameter der Echtzeitkarte) muss bei dieser Methode im Hintergrund laufen. Das eingestellte Spannungsintervall in *INSTACAL* (z.B. 0...2V) muss mit dem Spannungsintervall des analogen Ausganges in Matlab übereinstimmen. Ist dies nicht der Fall, funktioniert dieser Temperaturschutz nicht.

4.3 Realisierung eines Alarmgebers

In den beiden vorgestellten Methoden wird über den analogen oder digitalen Ausgang ein Alarmgeber angesteuert. Die Echtzeitkarte kann am Ausgang eine Spannung im Interwall von $[-10V...10V]$ bzw. einen Strom von $[-5mA...5mA]$ liefern. Da der Strom sehr klein ist, bedarf es einer Verstärkung. Es werden nun zwei Schaltungen eines Alarmgebers vorgestellt.

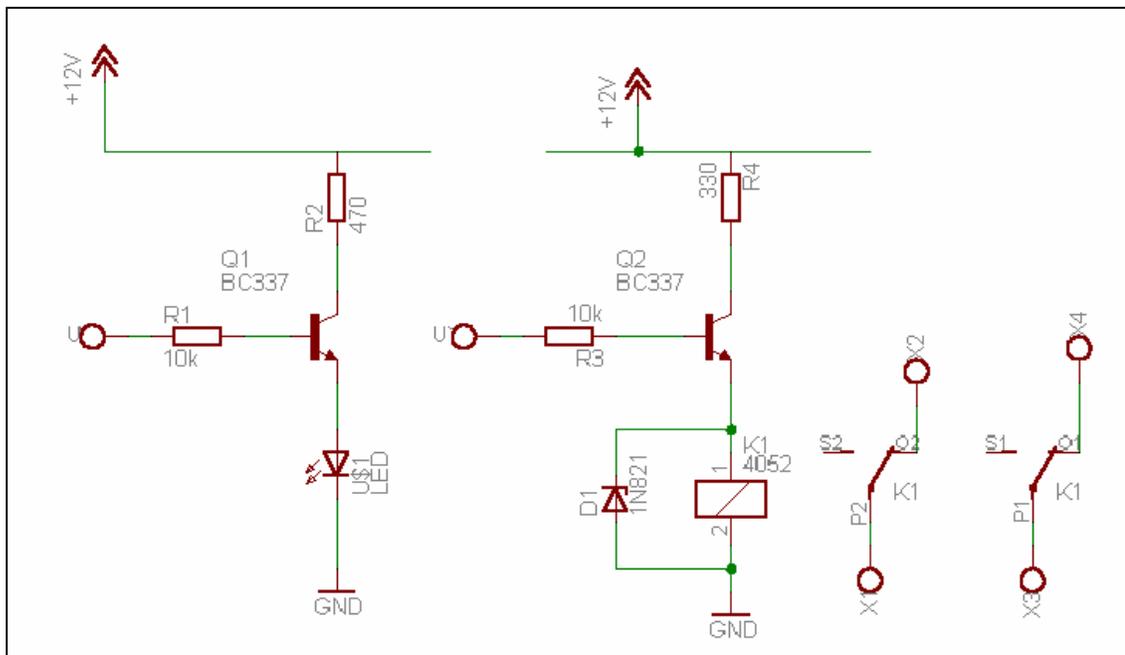


Abb.4.6: 2 mögliche Realisierungen eines Alarmgebers

In Abb.4.6 links wird eine LED eingeschaltet, sobald Alarm ausgelöst wird, rechts wird über ein Relais die Stromversorgung der Spule unterbrochen. Die Hysterese in der Simulinkdatei verhindert ein ständiges Schalten des Relais.

4.4 Variante 3

In diesem Abschnitt wird ein hardwaremäßiger Temperaturschutz vorgestellt. In Abb.4.7 ist die dafür notwendige Schaltung aufgezeichnet. Das Programm dafür (EAGLE) wurde von www.cadsoft.de zu Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei um eine kostenlose Demoversion (mit eingeschränkten Optionen), die allerdings für diese Anwendung vollkommen ausreichend war.

Die Schaltung besteht aus 2 identischen Teilen. Die obere Hälfte der Schaltung dient zum Schutz der oberen Spule, der untere Teil schützt die Spule unten. Eingangsseitig ist eine Transistorstufe zu erkennen. An die Anschlussklemmen $x2-3$ und $x2-4$ wird ein NTC-Abschalter angeschlossen. Genauso für die Anschlüsse $x2-1$ und $x2-2$. Die Eigenschaft des NTC- Abschalters ist, dass sein Widerstand in der Nähe der Schalttemperatur von einigen $100\text{k}\Omega$ auf $100\ \Omega$ fällt. Der hier verwendete NTC- Abschalter hat eine Schalttemperatur von 85°C . Die Potis $P1$ und $P2$ erlauben es diesen Arbeitspunkt gegebenenfalls etwas zu verschieben. Wird nun die Umschalttemperatur erreicht so schaltet der Transistor $T1$ (bzw. $T2$) durch und das Relais zieht an. Als Relais werden zwei 2x- Wechsler verwendet. Schaltet ein Relais durch, dann wird erstens die Stromversorgung für die Spule unterbrochen ($x1-3$, $x1-4$ bzw. $x1-1$, $x1-2$), zweitens macht eine rot blinkende LED darauf aufmerksam und drittens wird an einem separaten Ausgang ein 5V DC- Signal ausgegeben. Durch $R4$, $R5$ und $C1$ bzw. $R11$, $R12$ und $C3$ wird die Blinkfrequenz festgelegt (leuchtet ca. 120 ms und ist ca.60ms ausgeschaltet). Die LED's werden an die Klemmen $x2-7$, $x2-8$ und $x2-5$, $x2-6$ angeschlossen. Die Klemmen $x3-1$, $x3-2$ und $x3-3$, $x3-4$ stellen im Alarmfall den 5V- Ausgang dar. Damit kann mit der Echtzeitkarte über Matlab der Alarmzustand visualisiert werden. Die Ausgänge für Matlab und die Stromversorgungsunterbrechung können am Gehäuse über 8 Buchsen abgegriffen werden. Die NTC's werden auf der Rückseite über eine Bohrung an die Spulen montiert. Für die Spannungsversorgung wurde ein stabilisiertes 12V / 500mA- Netzteil gekauft. Zusätzlich wurde nachträglich noch eine grüne LED eingebaut, um anzuzeigen, ob das Gerät eingeschaltet ist.

Liste der verwendeten Bauteile

Widerstände:

R1, R8 = 3,3k

R2, R3, R6,R9, R10, R13 = 120

R4, R5, R11, R12 = 560k

R7, R14 = 470

R15, R17 = 12kR16, R18 = 10k

Potentiometer:

P1, P2 = 0..15k

Transistoren:

T1 ,T3 = BC 547

T2, T4 = BC 237

Kondensatoren:

C1, C3 = .15 μ F (Elko)

C2, C4 = 1nF

Dioden:

2 rote LED

2 Standarddioden (für Relais)

Timer:

2 NE 555

Steckerleisten:

X1, X3 je 4 Plätze

X2 – 10 Plätze

Relais:

2 2-fach- Wechsler

Netzteil:

12V – 500mA stabilisiertes Netzteil mit zugehöriger Anschlussbuchse

NTC:

2 NTC- Abschalter (Schalttemperatur 85°C)

Buchsen:

12 Stück

Jene Komponenten, welche nicht am Institut verfügbar waren wurden bei [ww.farnel.com](http://www.farnel.com) bestellt.

4.4.1 Vor- und Nachteile

Der große Vorteil dieser Variante ist, dass die Spulen unabhängig von Matlab geschützt werden. Weiters kann die Abschalttemperatur durch die Potis einfach verstellt werden. Der Nachteil ist, dass es die teuerste Variante ist. Verglichen mit dem Anschaffungspreis des Modells fallen diese zusätzlichen Kosten allerdings kaum ins Gewicht.

4.4.2 Platine

Das Programm EAGLE ermöglicht eine Layouterstellung aus dem vorgefertigten Schaltplan. Das Layout wurde manuell erstellt, einseitig entflechtet und ist in Abb.4.8 dargestellt.

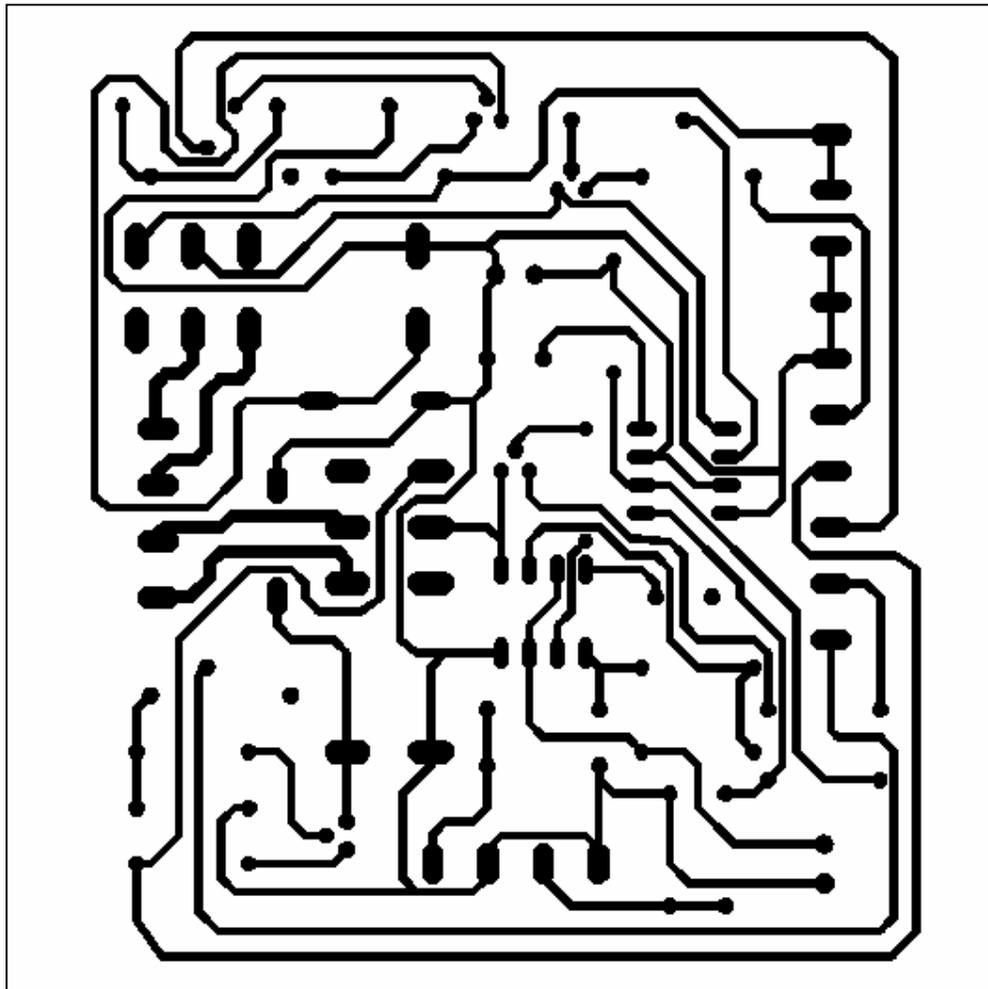


Abb.4.8: Layout

Die Anordnung der Bauteile kann der Abb. 4.9 entnommen werden. Links ist die Anschlussklemme *X1* zu sehen. Sie ist zuständig für die Unterbrechung der Stromversorgung. Die Klemme unten ist für den DC- Ausgang von 5V für die Verbindung zu Matlab. Bei der Klemme rechts werden die NTC- Abschalter, die LED's und die Spannungsversorgung angeschlossen. Die genaue Anschlussbelegung kann dem Anhang entnommen werden.

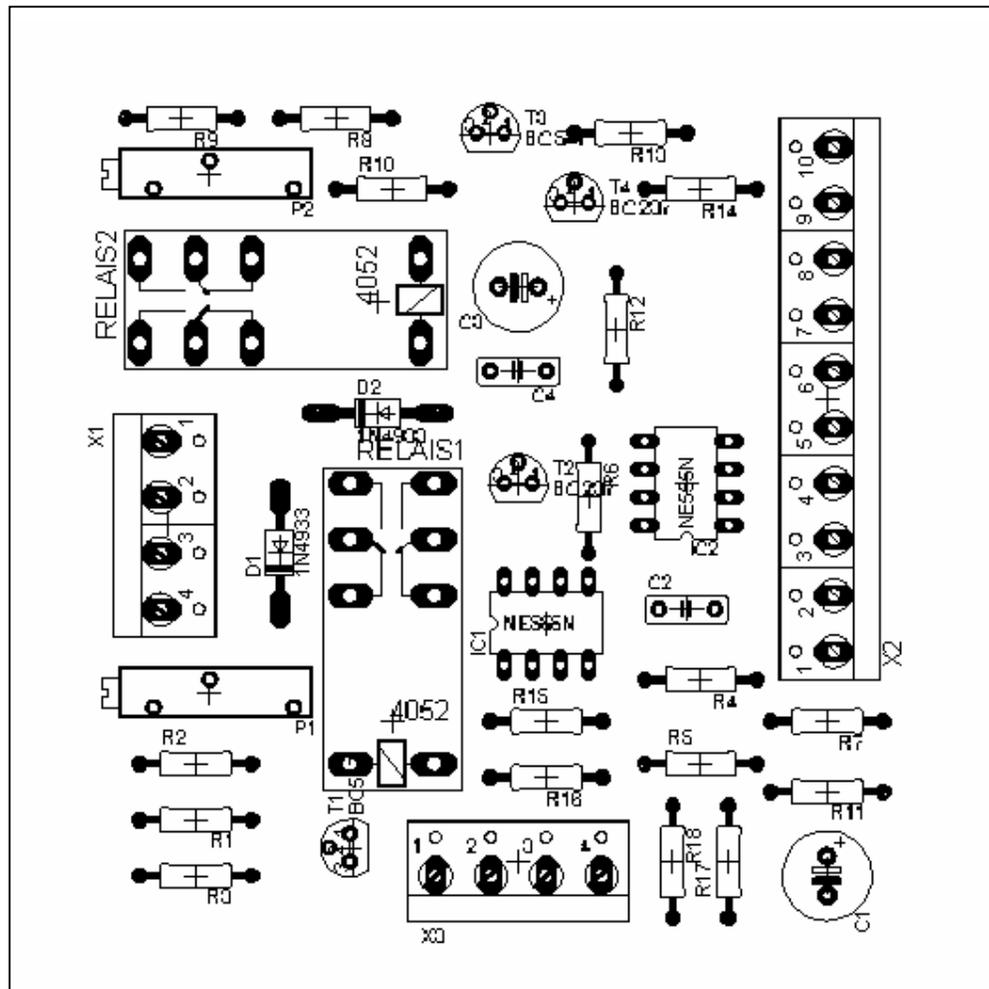


Abb.4.9: Anordnung der Bauelemente

4.4.3 Gehäuse – Frontplatte

Die Frontplatte (Abb.4.10) besteht aus einer Statusanzeige und einem oberen und einem unteren Teil. Die grüne LED links zeigt an, ob das Gerät eingeschaltet ist. Die obere Zeile,



Abb.4.10: Vorderansicht des thermischen Spulenschutzes

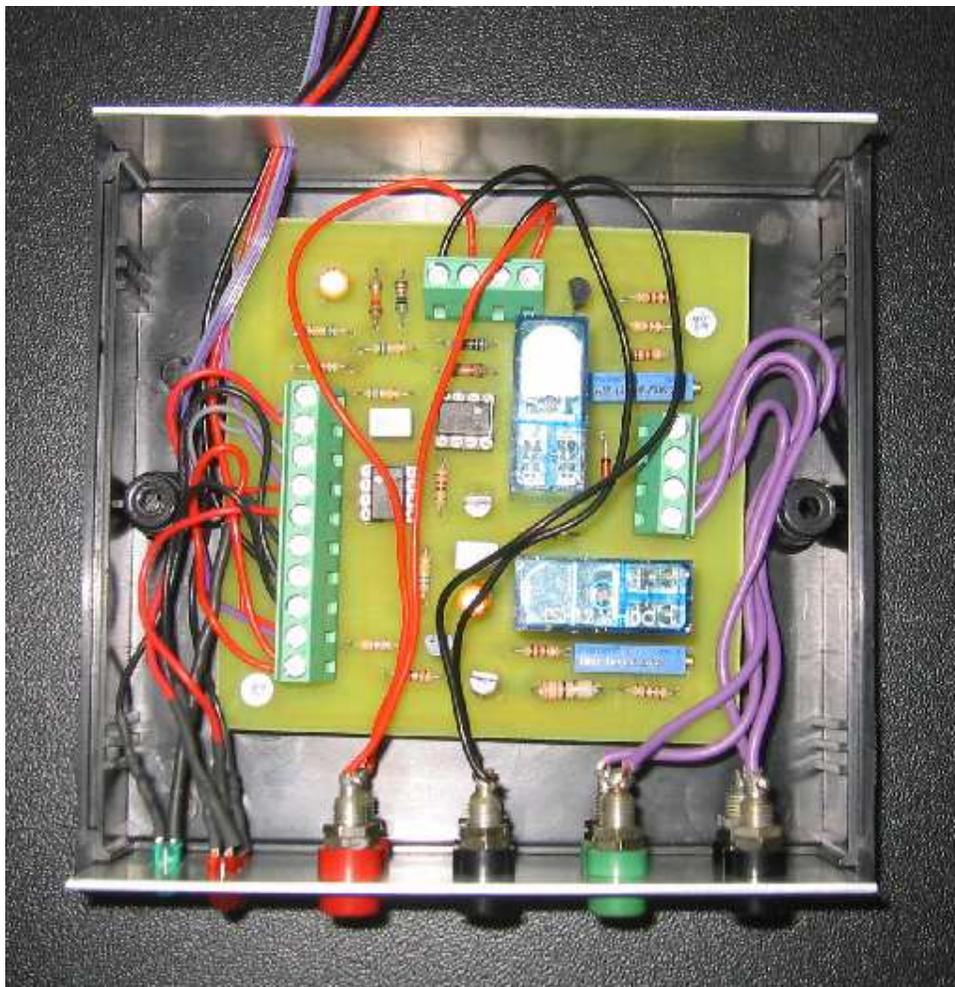


Abb.4.11: Draufsicht – offenes Gehäuse

bestehend aus einer LED und 4 Buchsen, schützt die obere Spule. Die rote LED blinkt bei Erreichen der Grenztemperatur, die rote und die schwarze Buchse stellen den 5V DC-Ausgang dar und die grüne und schwarze Buchse unterbrechen gegebenenfalls die Stromversorgung. Die untere Zeile ist für den Schutz der unteren Spule verantwortlich und ist identisch mit der Anordnung oben. Die Spannungsversorgung und die Leitungen der NTC' Abschalter treten auf der Rückseite über eine Bohrung aus.

4.5 Vergleich und Realisierung einer Variante

4.5.1 Vergleich der 3 Varianten

Alle drei vorgestellten Varianten erfüllen die Bedingung, die Spulen zu schützen, ohne die dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke zu beeinflussen.

Die Variante 1 ist zweifellos die einfachste Realisierungsmöglichkeit. Der Vorteil liegt in der Einfachheit. Es handelt sich lediglich um einen analytischen Zusammenhang zwischen Strom und Temperatur. Der wesentliche Nachteil ist, dass Matlab bei großen Datenmengen häufig abstürzt. In diesen Fall bleibt der momentane Spannungswert an der Echtzeitkarte bestehen, z.B. 5V. Dadurch wird die Grenztemperatur nach einiger Zeit überschritten, ohne dass es zu einem Alarm kommt. Die Folge ist eine durchgebrannte Spule.

Die Variante 2 nützt den Umstand, dass der Triangulationssensor temperaturabhängig ist. Von der Firma *ecp* ist für diesen Fall ein Temperatursensor zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Lasersensors vorgesehen. Durch empirische Versuche wurde festgestellt, dass sobald dieses Sensorsignal 2V überschreitet ist auch die Grenztemperatur der Spule erreicht. Der Zusammenhang zwischen der Spannung des Temperatursensor und der Temperatur ist nahezu linear. Damit wäre sogar zu jedem Zeitpunkt ein Rückschluss auf die momentane Temperatur möglich. Der Vorteil der Variante 2 liegt in der präzisen Arbeitsweise. Nachteilig ist aber wieder, dass beim Absturz von Matlab auch diese Realisierung ihren Dienst versagt und es kann zu einer thermischen Überbelastung der Spulen kommen.

Die Variante 3 ermöglicht den Schutz der Spulen unabhängig von jeglicher Software. 2 NTC- Abschalter mit zugehöriger Hardware kappen bei Erreichen der Grenztemperatur die Stromversorgung. Des Weiteren macht eine blinkende LED auf diesen Zustand aufmerksam und gleichzeitig steht noch ein 5V- DC- Ausgang für eine eventuelle

Anbindung an Matlab zu Verfügung. Der Vorteil dieser Variante liegt in der Zuverlässigkeit. Nachteilig sind der Aufwand und die Kosten für die Bauteile.

4.5.2 Auswahl

Alle drei Varianten erfüllen die Vorgaben. Realisiert wurde letztlich die Variante 3, da sie unabhängig von Matlab betrieben werden kann. Es ist zwar von der Hardware eine Verbindung zu Matlab möglich, allerdings beeinflusst die Funktionsweise von Matlab in keiner Weise den Spulenschutz. Auch die Kosten des Aufbaus sind, das Gesamtsystem betrachtend, gering. Diese betragen lediglich einige Prozent des Anschaffungspreises.

Literaturverzeichnis

- [1] Identifikation dynamischer Systeme; Band 1; Rolf Isermann, Springer-Verlag 1988

- [2] Regelungstechnik III: Identifikation, Adaption, Optimierung; 6. Auflage; Heinz Unbehauen, Vieweg-Verlag 2000

- [3] Prozessidentifikation mit Matlab, Diplomarbeit am IERT, Jänner 1991

- [4] Manual For Model 730 – Magnetic Levitation System; Instructor's Edition; Thomas R. Parks; Educational Control Products 1991-1999

- [5] Höhere Mathematik; Differential- und Integralrechnung, Vektor-Matrizenrechnung; 6. Auflage; Meyberg und Vachenaer, Springer-Verlag 2001

- [6] Grundlagen der Elektrotechnik, Band 2, Adalbert Prechtel, Springer-Verlag 1995

- [7] Grundlagen der Regelungstechnik; W. Schumacher, W. Leonard; Vorlesungsskript der TU- Braunschweig; 17.10.2001

- [8] Regelungen, Analyse und technischer Entwurf; Band 2, 3. Auflage; Weinmann Alexander, Springer-Verlag 1995

- [9] Model 730 – Magnetic Levitator „Plant Only“ Documentation; Educational Control Products 1991-2001

- [10] Regelungen, Analyse und technischer Entwurf; Band 1, 3. Auflage; Weinmann Alexander, Springer-Verlag 1994

- [11] Kennlinienbasierte Regelungen; Michael Heiss, Vorlesungsskript der TU-Wien, Oktober 2002

Abbildungsverzeichnis

- 1.1: Modell 730 MagLev Apparatus
- 1.2: Elektrisches Leistungsteil
- 2.1: Sprungantwort (nichtlineares System)
- 2.2: Simulinkdatei – Identifikation
- 2.3: Diskretes Rauschsignal und zugehörige Magnetposition
- 2.4: Vergleich des Modells und dem tatsächlichen System (a) und Sprungantwort (b)
- 2.5: Diskretes Rauschsignal und Position des unteren Magneten
- 2.6: Vergleich des Modells und dem tatsächlichen System (a) und Sprungantwort (b)
- 2.7: Kräfteverhältnisse am Modell
- 2.8: Leistungsteil und Spule
- 2.9: Darstellung der Strecke des Modells
- 2.10: Spulentemperatur bei Anlegen einer konstanten Spannung
- 2.11: Abkühlverhalten der Spulen beim Ausschalten der Spannungsversorgung
- 3.1: Zusammenhang zwischen Magnetposition und Sensorsignal
- 3.2: Zusammenhang zwischen Magnetposition und Magnetfeld
- 3.3: Wurzelortskurve und Bodediagramm der Schleife
- 3.4: Simulinkdatei – I-Regler – unten
- 3.5: Soll – Istwertvergleich
- 3.6: Zusammenhang zwischen Magnetposition und Sensorsignal
- 3.7 Wurzelortskurve und Bodediagramm der Schleife
- 3.8: Simulink- Datei: PDT1- Regler – oben
- 3.9: Stabilisierung der von unten nach oben katapultierten Magnetscheibe
- 3.10: Soll – Istwertvergleich
- 4.1: Spulentemperatur bei 3 V
- 4.2: Erweiterung in Simulink
- 4.3: Signal vom Lasertemperatursensor bei Anlegen von 3V
- 4.4: Signal vom Lasertemperatursensor beim Abkühlen der Spulen
- 4.5: Auswertung der Daten des Temperaturkompensationssensors in Simulink
- 4.6: 2 mögliche Realisierungen eines Alarmgebers
- 4.7: Schaltplan zum Übertemperaturschutz
- 4.8: Layout

- 4.9: Anordnung der Bauelemente
- 4.10: Vorderansicht des thermischen Spulenschutzes
- 4.11: Draufsicht – offenes Gehäuse

Homepages

www.ecp.com

www.computerboards.com

www.cadsoft.de

www.farnell.com

Parameter – Konstanten – Variablen

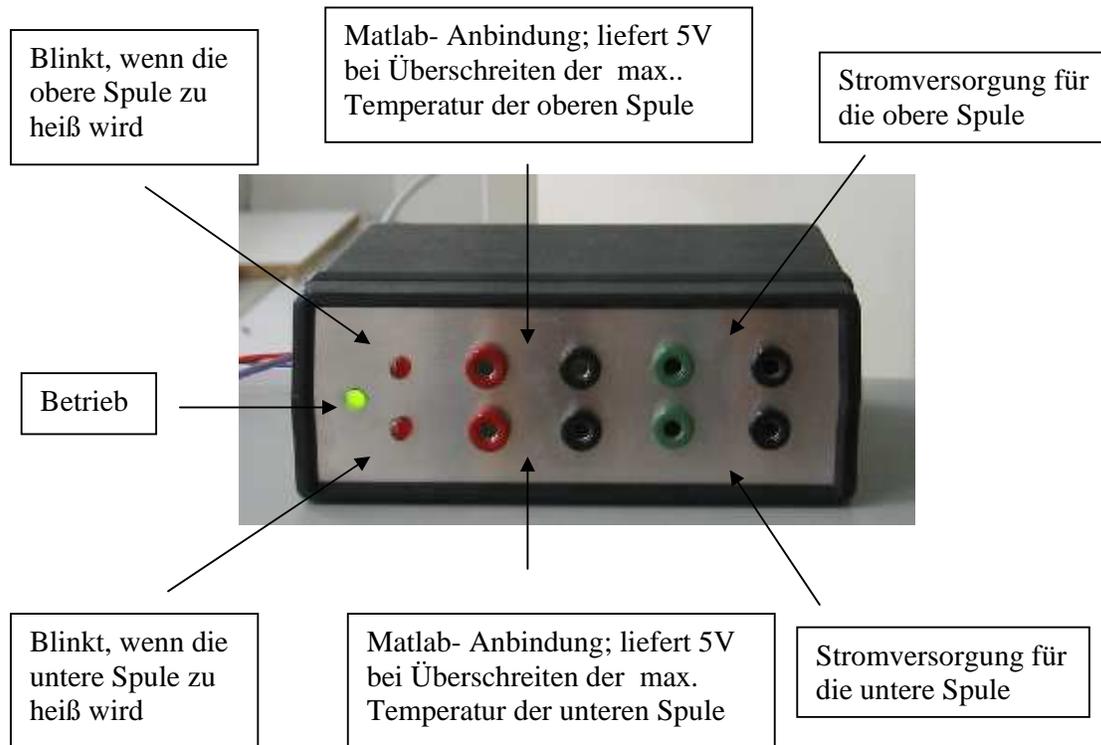
t_s	Abtastzeit
D	Dämpfungsgrad
ω_n	Nennkreisfrequenz
K_s	Stationärverstärkung
$m \cdot g$	Gewichtskraft der Magnetscheibe
y	Position des Magneten
F_{u11}	Kraft auf Magnet 1 hervorgerufen durch Spule 1
F_{u22}	Kraft auf Magnet 2 hervorgerufen durch Spule 2
F_{u12}	Kraft auf Magnet 1 hervorgerufen durch Spule 2
F_{u21}	Kraft auf Magnet 2 hervorgerufen durch Spule 1
F_{m12}	Kraft, die die Magneten aufeinander ausüben.
$c_1 \cdot y_1^{(1)}$	Reibungskraft
$c_1 \cdot y_2^{(1)}$	Reibungskraft
y_{10}	Position des Magneten 1 im Arbeitspunkt
$y_{12-1}; y_{12-2}$	entspricht y_{12} im Arbeitspunkt 1 bzw. 2 (Abschnitt 2.3.2.2)
$y_1^*; y_2^*$	Position vom Arbeitspunkt aus; $y_1^* = y_1 - y_{10}$
u_{10}	diese Spannung stellt den Arbeitspunkt ein
$u_1^*; u_2^*$	Spannung vom Arbeitspunkt aus; $u_1^* = u_1 - u_{10}$
i_1^*	Strom im Arbeitspunkt (unten)

i_2^*	Strom im Arbeitspunkt (oben)
R_i	Innerwiderstand, Widerstand des Leistungsteiles und der Kupferwiderstand der Spule
A	Systemmatrix
B	Steuermatrix
C	Ausgangsmatrix
D	Durchgangsmatrix
k	Steigung der Tangente im Arbeitspunkt (Linearisierung)
v	vorwärts, bestimmt die Nullstelle
r	rückwärts, bestimmt die Polstellen
K_p	Proportionalbeiwert
T_d	Differentialzeit (auch Vorhaltezeit)
T_I	Integralzeit (auch Nachstellzeit)
T_1	Zeitkonstante
T_{Sp}	Spulentemperatur
T_A	Anfangstemperatur (bei Beginn ist dies die Umgebungstemperatur)
p	Proportionalitätsfaktor [$^{\circ}C/V$]
T_{End}	Stationäre Endtemperatur
P_{zu}	zugeführte Leistung
k_1, k_2	Hilfsparameter (hängen physikalisch gesehen von der Fläche, dem Volumen, der spezifischen Wärmekapazität, der Dichte sowie vom Wärmeübergangskoeffizienten der Spulen ab.)
K	Proportionalverstärkung
T	Zeitkonstante für den Zusammenhang zwischen Spulentemperatur und zugeführter Leistung

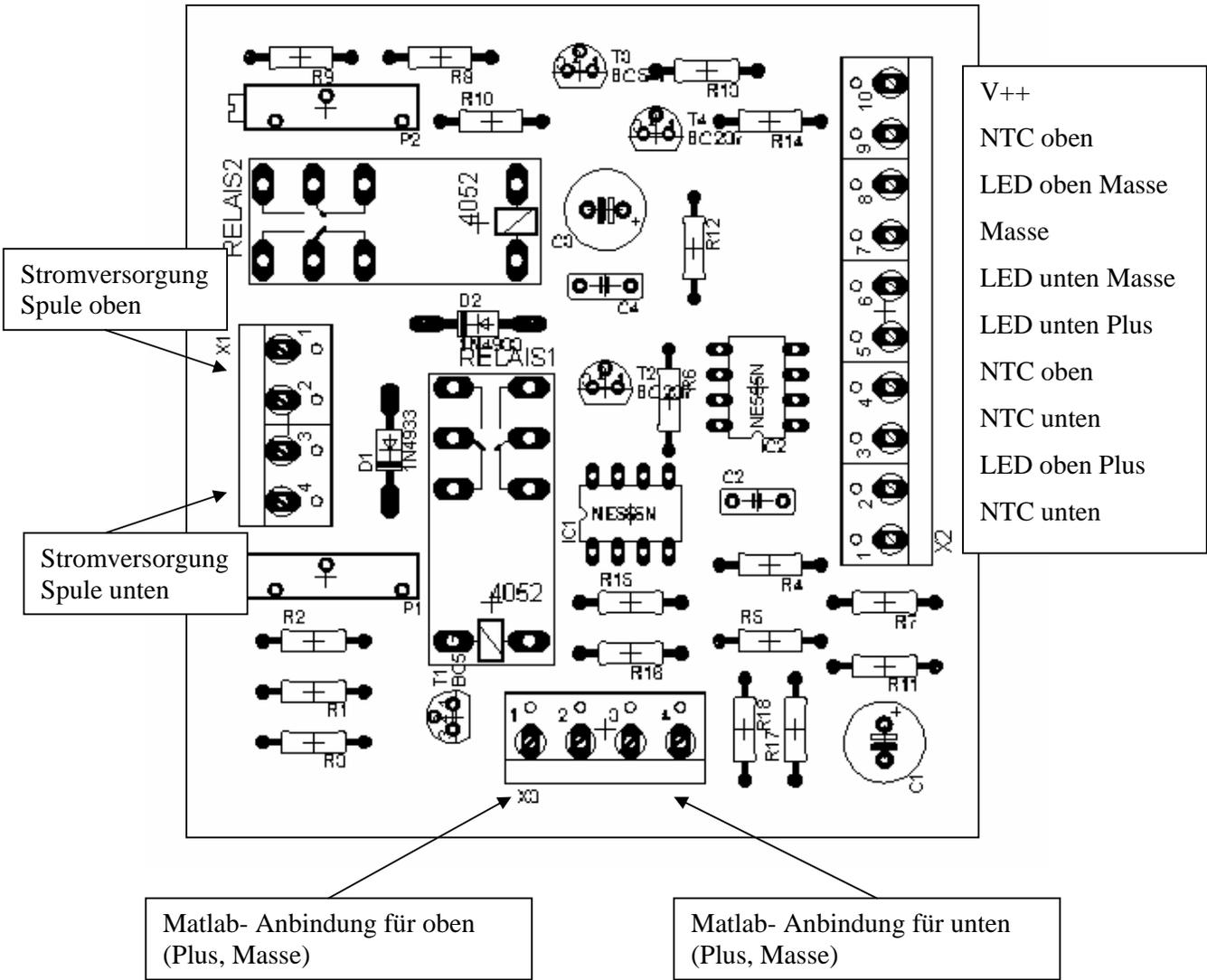
Anhang

Anschlussbelegung der Frontplatine und der Klemmen auf der Platine

Frontplatine

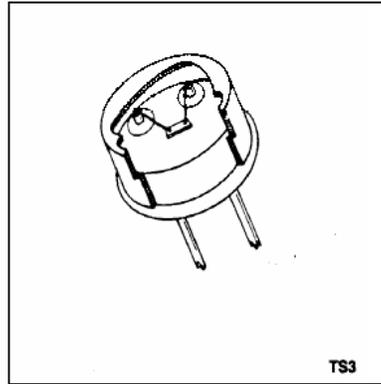


Anschlussbelegung der Klemmen



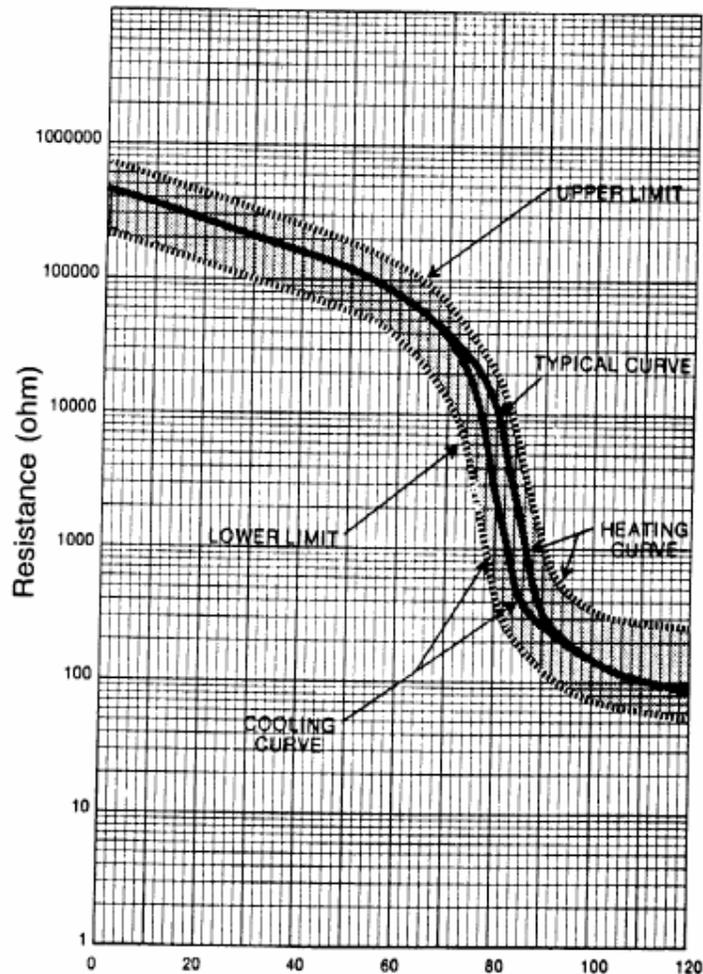
Datenblatt der NTC- Abschalter

- High sensitivity
- Quick reaction
- Hysteresis approx. 3-6°C
- Excellent reliability
- No selecting, no adjusting
- No corrosion of contact surface
- No +/- polarity
- Can be used as logical control element
- Isolated casing
- Easy installation



TSX-85	Resistance	65	Heating	25	45	90	k Ω
	Resistance	85	Heating		1.5		k Ω
	Resistance	100	Heating	75	150	330	Ω
	Sensitivity (°)	85	Heating	30	40		%/°C
	Latching Current (°)	-	D.C. Volts	1.4	2.0	2.6	mA

TS 3-85



Quelle: www.farnell.com

Gespeicherte Daten auf der CD

Worddokumente (für Win 98 und Win XP)

Kapitel 0 (Einleitung)
Kapitel 1 (Modellvorstellung)
Kapitel 2 (Systemanalyse)
Kapitel 3 (Reglerentwurf)
Kapitel 4 (Varianten des Temperaturschutzes)
Kapitel 5 (Anhang)

Matlabdateien

Identifikation für die Spule unten und 1 Magnetscheibe
Identifikation für die Spule unten und 2 Magnetscheiben
Regler für unten
Regler für oben

PDF- Dateien

ECP_MagLev_Model_730...(Hinweise zum Modell)
PCI-DAS1200_jr...(Echtzeitkarte)
BC237_Transistor_Datenblatt
BC337_Transistor_Datenblatt
BC547_Transistor_Datenblatt
NTC_Abschalter_Datenblatt
Relais_Datenblatt
Tutorial- Deutsch- Eagle

Programme

eagle-4.09r2g.exe (freeware)
Temperaturschutz (Schaltplan und Layout)