

# Simulationsstudie:

## Regelung eines Laserablenkspiegels

Projektarbeit zur Vorlesung Simulationstechniken  
SS 2013

Fakultät 06  
Fakultät für angewandte Wissenschaften und Mechatronik  
der Hochschule München

*vorgelegt von*

**Michael Jost**  
**Sebastian Schleich**

München, Juli 2013

Simulationsstudie eingereicht am: .....

Prüfer:

Prof. Dr. Rainer Froriep  
Prof. Dr. rer. nat. Alfred Kersch



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2. Aufgabenstellung</b>	<b>5</b>
<b>3. Mathematische Modellbildung</b>	<b>9</b>
3.1. Das System . . . . .	9
3.2. Der Spiegel . . . . .	9
3.3. Der Motor . . . . .	11
3.3.1. Der elektrische Teil . . . . .	12
3.3.2. Der mechanische Teil . . . . .	13
3.3.3. Der ganze Motor . . . . .	14
3.4. Der Sensor . . . . .	14
3.4.1. Das physikalische Modell des Sensors . . . . .	14
3.4.2. Das lineare Sensormodell . . . . .	16
3.4.3. Das nicht lineare Sensormodell . . . . .	17
<b>4. Programmentwicklung</b>	<b>19</b>
4.1. Motor in Simulink . . . . .	19
4.2. Matlab . . . . .	20
4.2.1. Motor in Matlab . . . . .	20
4.2.2. Sensor in Matlab . . . . .	21
4.2.2.1. Sensorkonstanten . . . . .	21
4.2.2.2. Rechtecks- und Glättungsfunktion . . . . .	22
4.2.2.3. Die Sensor-Funktion . . . . .	22
4.2.2.4. Die Plausibilitätstests zum Sensor . . . . .	22
<b>5. Simulationsdurchführung</b>	<b>27</b>
5.1. Simulation . . . . .	27
5.1.1. PID-Regelung . . . . .	27
5.1.1.1. P-Regelung . . . . .	27
5.1.1.2. PI-Regelung . . . . .	27
5.1.1.3. PD-Regelung . . . . .	29
5.1.1.4. PID-Regelung . . . . .	29
5.1.2. P-Adaption . . . . .	31
5.1.2.1. Regelung mit P-Adaption . . . . .	33

---

5.1.2.2.	P-Adaption mit Galvo-Werten . . . . .	34
5.1.2.3.	P-Adaption mit neuen Werten . . . . .	35
5.1.2.4.	Strombegrenzung . . . . .	36
5.1.2.5.	Fertige P-Adaption . . . . .	38
5.1.3.	Regelung mit Sensor . . . . .	39
5.1.3.1.	Linearer Sensor 1 . . . . .	40
5.1.3.2.	Linearer Sensor 2 . . . . .	40
5.1.3.3.	Nichtlinearer Sensor . . . . .	40
<b>6.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>43</b>
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>47</b>
<b>A.</b>	<b>Matlab-Files</b>	<b>49</b>
A.1.	msSpiegelundSensor.m . . . . .	49
A.2.	sensorDaten.m . . . . .	53
A.3.	frect.m . . . . .	55
A.4.	gekern.m . . . . .	55
A.5.	sensor.m . . . . .	56
A.6.	posEingabe.m . . . . .	59
<b>B.</b>	<b>Simulink-Files</b>	<b>61</b>
B.1.	1 . . . . .	61
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>62</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>64</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>65</b>

# 1. Einführung

Bei der Bearbeitung von z.B. Wafern (z.B. Lasertrimmen von Widerständen), Glas (z.B. Brille) oder Masken für die Lithographie, wird ein Laserstrahl in der Fokusebene durch 2 Spiegel, einer für die X- und einer für die Y-Richtung, abgelenkt. Durch diese Anordnung lassen sich Beschriftungen in 2 Dimensionen ausführen. Wobei eine Fokusebene durch Werte gleicher Intensität und gleicher Strahldurchmesser festgelegt ist. Aber auch in der Medizin, beim Laserstrahlschweißen, in der Raumfahrt, beim Militär und in Barcode Scannern finden Spiegelmotoren Verwendung. Die Spiegel sind auf einer Welle montiert, die über einen Motor bewegt wird. Es gibt verschiedene Größen der Spiegel und der entsprechenden Motoren. Aber nicht nur durch die Größe der Spiegel und der Motoren, sondern auch in der erreichbaren bzw. geforderten Geschwindigkeit und Genauigkeit unterscheiden sich die verschiedenen Ausführungen.

Wird ein Laserstrahl durch zwei Spiegel abgelenkt, so ist die Fokusebene auf eine kleine Fläche beschränkt, siehe Abb. 1.1 und 1.2. Sollen größere Flächen mit dem Laser bearbeitet werden, so müssen die Anlagen verändert werden.

Es werden drei Lösungsansätze vorgestellt.

Der Laserstrahl ist fest nach unten gerichtet und zwei entsprechend große Motoren bewegen den ganzen Laser in X- und Y-Richtung über das Werkstück. Diese Möglichkeit bringt allerdings einige Nachteile mit sich. Zum einen ist die Geschwindigkeit und Genauigkeit von großen Motoren eingeschränkt. Zum anderen kann es die Lebensdauer eines Lasers negativ beeinflussen, wenn er ständig Beschleunigt und Abgebremst wird, und so entsprechenden Kräften die an ihm rütteln ausgesetzt ist. Diese Lösung ist für sehr feine bzw. kleine Strukturen und aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu empfehlen.

Eine andere Lösung ist der Einsatz von Robotern in der Fertigung. Dies bringt allerdings den Nachteil, dass die Bewegung drei-dimensional ausgeführt wird und so weitere Ungenauigkeiten miteingebracht werden. Ein große finanzielle Investition stellt ein Roboter ebenfalls dar.

Der dritte Lösungsansatz sieht einen fest eingebauten Laser vor, dessen Laserstrahl nur in einer Richtung abgelenkt wird. Durch die Auslenkung des Laserstrahls in nur einer Richtung, ergibt sich keine Fokusebene sondern eine Fokuslinie. Bewegt sich nun das zu beschriftende Werkstück quer zu der Fokuslinie, kann eine große Fokusebene beschriftet werden, siehe Abb. 1.3.

In Abb. 1.3 tritt die Fokuslinie senkrecht aus dem Bild heraus. Es muss dabei sichergestellt sein, dass der Vorschub des Werkstücks auf die Einstellgeschwindigkeit der Spiegelverstellung und somit auf die Beschriftung in der Fokuslinie abgestimmt ist. Durch eine



Abb. 1.1.: 2 Laserablenkspiegel [?]

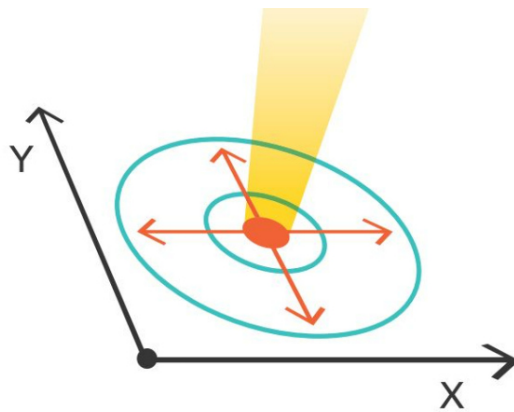


Abb. 1.2.: Fokusebene [?]

entsprechende Anordnung können so Werkstücke größeren Ausmaßes beschriftet werden. Die Bearbeitung von Solarpanels oder Werbebeschriftungen auf Folien können so realisiert werden.

Gegenstand dieser Simulationsstudie ist die Regelung eines Motors zur Ablenkung eines Laserstrahls an einem Spiegel.

Grundsätzlich sollen verschiedene Winkel eingestellt werden können, wobei die größte Winkeländerung  $20^\circ$  betragen soll. Die größte Winkeländerung soll mit einer Einstellzeit

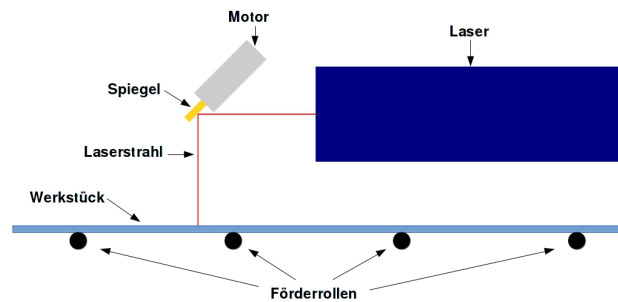


Abb. 1.3.: Fokusline

von 1 ms und mit einer Regelgenauigkeit von  $1e-3^\circ$  erreicht werden. Die Simulation wird mit einem fest vorgegebenen Winkel von  $20^\circ$  durchgeführt und eine entsprechende Regelung zur Einhaltung der Vorgaben soll entwickelt werden.

Der Spiegel ist auf der Welle eines Gleichstrommotors befestigt. Da Gleichstrommotoren auf eine Drehgeschwindigkeit und nicht auf einen festen Winkel geregelt werden, ergibt sich hier eine neue Aufgabenstellung. Die Regelung umfasst folgende Bereiche:

- Elektronische Steuerung des Motors
- Mechanische Umsetzung der elektrischen Steuersignale in Drehbewegungen
- Aufnehmen der aktuellen Winkelposition durch einen Sensor und Umwandlung in ein elektrisches Signal
- Entwickeln und testen verschiedener Sensoren

Das Aufnehmen der Winkelposition ist von großer Wichtigkeit. In dieser Simulationsstudie lässt sich die Winkelposition in Simulink direkt ablesen. Wird aber ein reales Bauteil angeschlossen, weichen dessen Parameter von denen der Simulationsstudie ab. Aufgrund dieser Abweichung lässt sich die Winkelposition nicht mehr direkt ablesen, sondern muss am Bauteil selbst gemessen werden. Ohne eine genaue Winkelzuordnung ist eine Regelung aber nicht möglich. Aus diesen Gründen wird in Kap. 3.4 intensiver auf die Sensoren eingegangen und es werden verschiedene Sensormodelle vorgestellt.





## 2. Aufgabenstellung

Um größere Flächen eines Werkstücks mit dem Laser zu bearbeiten, soll ein Laserstrahl von einem fest eingebauten Laser mit einem Spiegel abgelenkt werden. Es entsteht so eine Fokuslinie in der das Werkstück beschriftet werden kann. Durch einen Vorschub des Werkstückes kann so eine große Fläche beschriftet werden.

Die Ablenkung des Laserstrahls erfolgt durch einen Spiegel, der auf der Welle eines Gleichstrommotors fest montiert ist.

In dieser Simulationsstudie soll untersucht werden, ob es möglich ist eine Regelung aufzubauen, die einen Laserablenkspiegel, der von einem Gleichstrommotor bewegt wird, auf eine bestimmte Winkelposition zu bewegen und in entsprechenden Regeldifferenzen zu halten. Es werden folgende, willkürlich gewählte Leistungsmerkmale vorgegeben:

- Verstellung des Spiegels aus der Ruhelage (Mitte) um  $\pm 10^\circ$ . Wobei die Ruhelage des Spiegels den Laserstrahl genau in die Mitte der Fokuslinie auf dem Werkstück ablenkt.
- Um einen maximalen Winkelbereich von  $20^\circ$  abzufahren, darf die Regelung nicht länger als 1 ms benötigen.
- Der einzustellende Winkel soll mit einer Genauigkeit von  $1e-3^\circ \approx 17 \mu\text{rad}$  erreicht und gehalten werden.

In dieser Simulationsstudie wird vorausgesetzt, dass der Abstand des Lasers zum Werkstück unerheblich für die Regelung ist. Zudem wird der Fokus des Laserstrahls über den zu regelnden Winkelbereich als konstant angenommen. Der aufeinander abgestimmte Vorschub des Werkstücks und abfahren der Fokuslinie des Lasers wird hier nicht betrachtet, da nur die Ablenkung des Laserstrahls im Zentrum der Studie steht. Ein in der Realität beobachtbarer an- und abstieg der Laserleistung beim an- und abschalten des Lasersstrahls wird hier ebenso vernachlässigt.

- Verstellung des Spiegels aus der Ruhelage (Mitte) um  $\pm 10^\circ$ . Wobei die Ruhelage des Spiegels den Laserstrahl genau in die Mitte der Fokuslinie auf dem Werkstück ablenkt.
- Um einen maximalen Winkelbereich von  $20^\circ$  abzufahren, darf die Regelung nicht länger als 1 ms benötigen.
- Der einzustellende Winkel soll mit einer Genauigkeit von  $1e-3^\circ$  erreicht und gehalten werden.

In dieser Simulationsstudie wird vorausgesetzt, dass der Abstand des Lasers zum Werkstück keine Rolle spielt. Zudem wird der Fokus des Laserstrahls über den zu regelnden Winkelbereich als konstant angenommen. Der aufeinander abgestimmte Vorschub des Werkstücks und abfahren der Fokuslinie des Lasers wird hier nicht betrachtet, da nur die Ablenkung des Laserstrahls im Zentrum der Studie steht. Ein in der Realität beobachtbarer an- und abstieg der Laserleistung beim an- und abschalten des Lasersstrahls wird hier vernachlässigt.

Die Simulationsstudie deckt folgende Themen ab:

- Bewegung von Magnet, Welle und Spiegel als mechanische Arbeit durch angesetzte Drehmomente
- Drehmomente werden durch Ströme, die Magnetfelder hervorrufen, realisiert
- Positionserfassung durch Auswertung von Sensoren
- Es müssen verschiedene Parameter wie, Trägheitsmomente von Spiegel und Welle, Drehmomente, induzierte Spannungen und z.B. Lichtintensitäten betrachtet werden

Bevor mit der Simulationsstudie begonnen wird, werden einige Vereinfachungen angenommen:

- Spiegel und Drehachse sind eine immer gleich konzentrierte Masse -> gleiche Beschleunigungen
- Luftspalt zwischen Magnet und Spule hat keinen Einfluss -> Luftspalt hat geringere magnetische Kraftflussdichte
- Spiegel ist immer mit Schwerpunkt in der Drehachse -> keine anderen Drehmomente, kein Verbiegen
- Durch verdrehen des Spiegels kann der Laserstrahl nicht vom Spiegel „fallen“ (wäre der Spiegel zu weit gedreht, so dass der Laserstrahl nur noch auf eine kleine Ablenkfläche trifft, würde der mittlere Teil des Laserstrahls abgelenkt und der äußere Teil würde am Spiegel vorbei „laufen“)
- Lichtquelle hat konstante Beleuchtungsstärke in den Halbraum
- Völlige Abdunkelung des einen Sensors, wenn der andere maximale Helligkeit besitzt
- Alle Bauteile 100% steif
- Erwärmung und dadurch eine Veränderung der Parameter wird nicht betrachtet

Es wird mit einem vorgegebenen Gleichstrommotor begonnen, Werte für die Regelparameter heraus zu finden, mit denen sich erste Ergebnisse zeigen. Mit diesen gefundenen Regelparametern wird dann versucht, die Regelergebnisse noch zu verbessern. Als Alternative

---

kommt die s.g. P-Adaption in Betracht. Bei der P-Adaption gibt es im Regelkreis nur einen P-Regler. Diesem P-Regler ist eine Funktion vorgeschaltet, die es über zwei einzugebende Parameter erlaubt, näher an den Sollwert zu gelangen.



## 3. Mathematische Modellbildung

### 3.1. Das System

Der vorliegenden Simulationsstudie wird in folgendes, in Abb. 3.1 dargestellten Systems zugrunde gelegt.

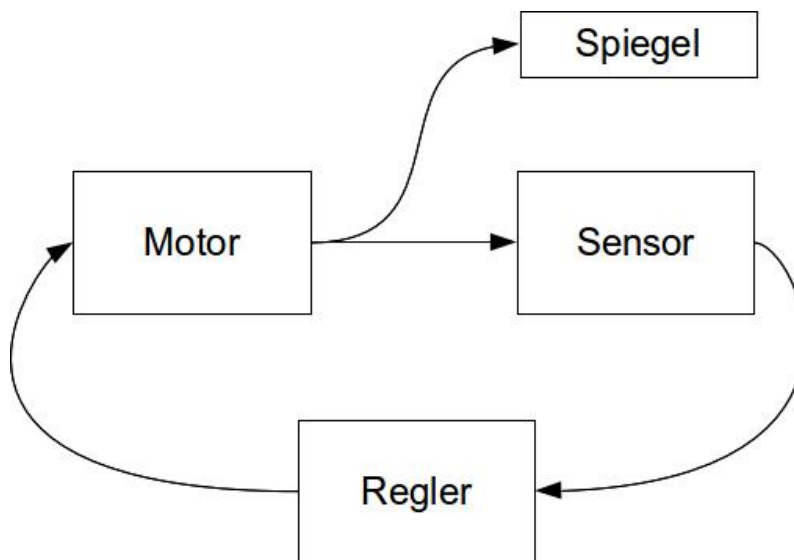


Abb. 3.1.: Allgemeiner Aufbau des simulierten Systems

Abb. 3.1 zeigt also einen Regelkreis. Der Motor bringt die Bewegungsenergie über elektromagnetisch/mechanische Wechselwirkung ins System ein. Die Modellbildung hierfür wird im Abschnitt 3.3. Der Spiegel reagiert auf die Zustandsänderungen der Motorwelle gemäß dem Modell aus Abschnitt 3.2. Der Sensor überwacht den Bewegungszustand, genauer die Winkelposition der Motorwelle und wandelt diese in ein Spannungssignal um. Das Übertragungsverhalten dieses Sensors, kann mit dem Modellen aus Abschnitt 3.4 beschrieben werden. Das Spannungssignal des Sensors liefert den Sollwert der Regeleinrichtung. Die Ermittlung der Reglerparameter erfolgt während der Simulationsdurchführung in Abschnitt 5.

### 3.2. Der Spiegel

Lineares Modell für die Berechnungen:

$$\Delta\phi = 20^\circ = 0,349 \text{ rad} \quad (3.1)$$

$$\Delta t = 1 \text{ ms} = 0,001 \text{ s} \quad (3.2)$$

$$\omega = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{0,349 \text{ rad}}{0,001 \text{ s}} = 349 \text{ rad/s} \quad (3.3)$$

Es ergibt sich eine Durchschnittswinkelgeschwindigkeit von  $349 \text{ rad/s}$ , um einen Winkel von  $20^\circ$  in  $1 \text{ ms}$  zu überfahren. Dies würde aber eine Anfangs- und Endgeschwindigkeit voraussetzen. Da der Spiegel aber aus einer Ruhelage beschleunigt und wieder in einer Ruhelage enden soll, wird ein linearer Verlauf der Geschwindigkeit von  $\omega = 0 \text{ rad/s}$  und der doppelten Durchschnittsgeschwindigkeit  $\omega = 698 \text{ rad/s}$  bei der Hälfte der Strecke und bei der Endposition wieder  $\omega = 0 \text{ rad/s}$  der zu fahrenden Strecke angenommen. Daraus folgt eine Beschleunigung von:

$$\Delta\omega = 698 \text{ rad/s} \quad (3.4)$$

$$\Delta t = 0,5 \text{ ms} = 0,0005 \text{ s} \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{698 \text{ rad/s}}{0,0005 \text{ s}} = 1,396 * 10^6 \text{ rad/s}^2 \quad (3.6)$$

Der Spiegel erfährt zu Beginn der Regelung eine Beschleunigung von  $\alpha = 1,396 * 10^6 \text{ rad/s}^2$  um nach der Hälfte der Zeit, also nach  $0,5 \text{ ms}$  wieder mit dem gleichen Betrag der Beschleunigung abgebremst zu werden.

Modell für den Spiegel:

- Durchmesser:  $12 \text{ mm} \rightarrow$  Radius:  $R = 6 \text{ mm}$
- Höhe:  $h = 2 \text{ mm}$
- Gewicht:  $m = 10 \text{ g}$

Das Trägheitsmoment des Spiegels beträgt demnach:

$$J = \frac{1}{4} * m * R^2 + \frac{1}{12} * m * h^2 \quad (3.7)$$

$$J = \frac{1}{4} * 10 * 10^{-3} \text{ kg} * (6 * 10^{-3} \text{ m})^2 + \frac{1}{12} * 10 * 10^{-3} \text{ kg} * (2 * 10^{-3} \text{ m})^2 \quad (3.8)$$

$$J = 93,3 * 10^{-9} \text{ kgm}^2 \quad (3.9)$$

Aus den oben berechneten Daten ergibt sich ein Lastmoment von:

$$M_L = J * \alpha \quad (3.10)$$

$$M_L = 93,3 * 10^{-9} \text{ kgm}^2 * 1,396 * 10^6 \text{ rad/s}^2 \quad (3.11)$$

$$M_L = 130,25 * 10^{-3} \text{ Nm} \quad (3.12)$$

Theoretische Maximale Leistung eines Gleichstrommotors:

$$P = M_L * \omega \quad (3.13)$$

$$P = 130,25 * 10^{-3} \text{ Nm} * 698 \text{ rad/s} \quad (3.14)$$

$$P = 91 \text{ W} \quad (3.15)$$

### 3.3. Der Motor

In der Regel werden Laserablenkspiegel über einen Galvo gesteuert. Bei der Bearbeitung dieser Simulationsstudie ergaben sich Probleme, Informationen Über die Ansteuerung solcher Galvos zu bekommen. Insofern wird die Simulationsstudie auf der Ansteuerung eines

Gleichstrommotors beruhen. Aber auch hierbei konnten jedoch keine Informationen über die Gleichstrommotorparameter  $K_M \Phi$  und der Reibungskonstanten bei verschiedenen Herstellern gefunden werden. Um dennoch die Studie durchführen zu können, wird auf die Motorvorgaben aus der Vorlesung Systemtechnik von Prof. Froriep zurück gegriffen.

### 3.3.1. Der elektrische Teil

Der elektrische Teil eines Gleichstrommotors besteht aus einer Spule  $L_A$ , ihrem Innenwiderstand  $R_A$ , der induzierten Spannung  $e_A$  und der Eingangsspannung für den Motor  $U_e$ , siehe Abb. 3.2.

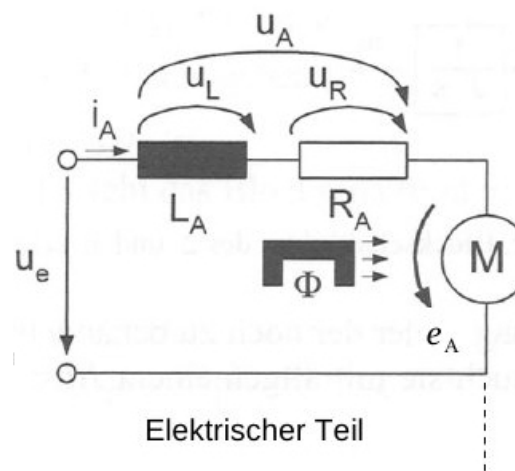


Abb. 3.2.: Elektrischer Teil des Motors

Es lässt sich folgende Spannungsmasche aufstellen:

$$U_e = u_L + u_R - e_A \quad (3.16)$$

Die Spannung  $e_A$  wirkt der Eingangsspannung entgegen und hat ein negatives Vorzeichen. Die Teilspannungen  $u_L$  und  $u_R$  lassen sich folgendermaßen umschreiben:

$$u_L = L_A * s i_A \quad (3.17)$$

$$u_R = R_A * i_A s = \frac{d}{dt} \quad (3.18)$$

Dieses lässt sich in einer Formel ausdrücken:



$$U_e = L_A * si_A + R_A * i_A - e_A \quad (3.19)$$

Für die spätere Integration in Simulink wird die Gleichung 3.19 umgeschrieben:

$$si_A = \frac{1}{L_A} (e_A - R_A i_A + u_e) \quad (3.20)$$

Wobei

$$e_a = K_M \Phi \omega \quad (3.21)$$

$K_M$  und  $\Phi$  Motorkonstanten sind.

### 3.3.2. Der mechanische Teil

Der mechanische Teil eines Gleichstrommotors besteht aus dem gesamten Drehmoment  $M_B$ , dem Motormoment  $M_M$ , dem Lastmoment  $M_L$  des Spiegels. Sowie der Moment-Winkel-Beziehung (Reibung) (siehe Abb. 3.3):

$$M_R = r\omega, \text{ mit } \omega = \frac{d}{dt}\varphi \quad (3.22)$$

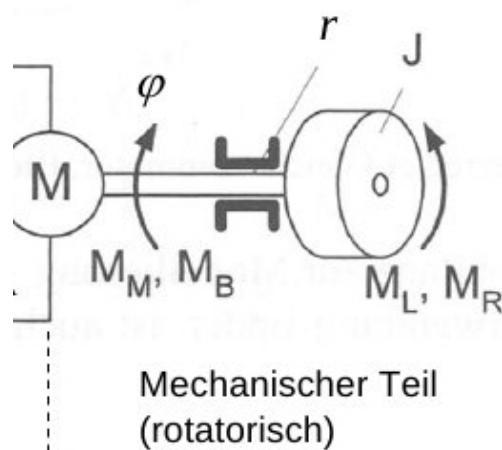


Abb. 3.3.: Mechanischer Teil des Motors

Es lässt sich folgende Moment-Bilanzgleichung aufstellen:

$$M_B = M_M - M_R - M_L \quad (3.23)$$

$$J * \frac{d}{dt} \omega = M_M - r\omega - M_L \quad (3.24)$$

Für die spätere Integration in Simulink wird die Gleichung 3.24 umgeschrieben:

$$s\omega = \frac{1}{J}(M_M - r * \omega - M_L) \quad (3.25)$$

Wobei

$$M_M = K_M * \Phi * i_A \quad (3.26)$$

$K_M$  und  $\Phi$  Motorkonstanten sind.

### 3.3.3. Der ganze Motor

Werden die beiden Einzelaspekte des Motors gleichzeitig betrachtet, so ergibt sich folgender Zusammenhang wie er in Abb. 3.4 dargestellt ist.

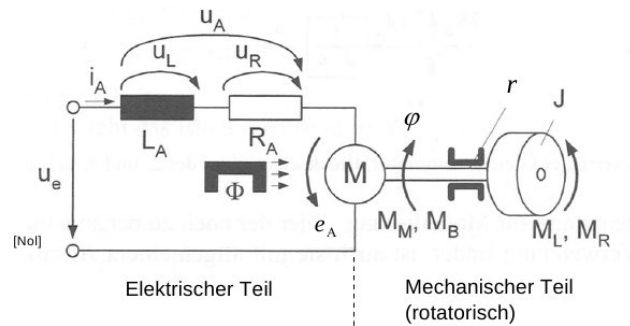


Abb. 3.4.: Aufbau des Motors

## 3.4. Der Sensor

Im Folgenden werden der Aufbau, das physikalische Modell sowie verschiedene mathematische Modelle des Sensors vorgestellt und erläutert.

### 3.4.1. Das physikalische Modell des Sensors

Der in Abb. 3.1 dargestellte Sensor gliedert sich nach folgender Darstellung in Abb. 3.5 auf in:

- Einer Lichtquelle: LED mit einer Strahlungsleistung  $\phi_e$
- Einer Blende mit einer Transmissionsfunktion  $T(\varphi)$
- Einer Anordnung aus Photodioden, welche die transmittierte Lichtleistung als Spannungssignal  $U_{ph}(\phi)$  bzw.  $U_{ph}(\varphi)$  darstellt

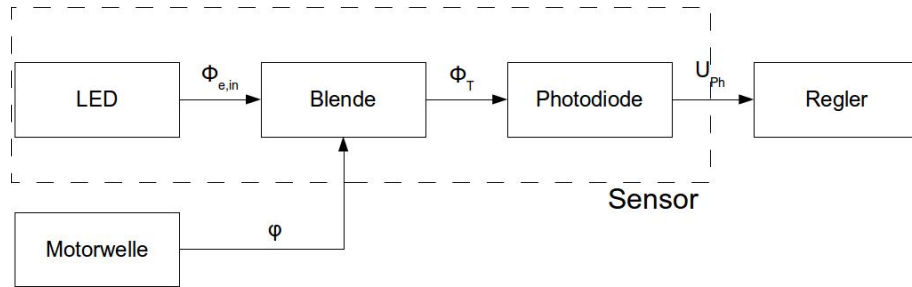


Abb. 3.5.: Allgemeines Funktionsdiagramm des Sensors

### Die Photodioden

In Abb. 3.6 ist die Anordnung der Dioden skizziert. Diese setzt sich aus 4 Photodioden zusammen, von denen jeweils zwei gegenüberliegende mittels des Differenzenprinzips verschaltet sind. Störeinflüsse, wie z.B. thermisches Rauschen, sollen somit vermindert werden. Die beiden sich somit ergebenden Diodengruppen sind symmetrisch zur Position  $\varphi = 0^\circ$  angeordnet. Diese liefern ein Spannungssignal, werden im quasi Kurzschluss betrieben. Somit verhält sich jede Photodiode als ideale Stromquelle, bei der die Stromstärke  $I_{ph}$  proportional zur einfallenden Lichtleistung  $\phi$  ist. Angeschlossen an einem hochohmigen Widerstand, fällt an diesem das Spannungssignal  $U_{ph}(\phi)$  ab, welches ebenfalls proportional zur einfallenden Lichtleistung  $\phi$  ist. Die Dioden sind als Kreissegmente gleicher Form und Größe ausgeführt.

### Die Blende

Die Blende wird im folgenden als masselos und völlig lichtundurchlässig angenommen. Die Bewegung der Motorwelle wird auf die Blende übertragen, sodass die Abdeckung der Dioden mit der Winkelposition variiert. Die Geometrie der Blende ist dabei auf die Geometrie der Photodioden abgestimmt, sodass für Randwerte des Messbereichs des Sensors völlige Abschattung bzw. völlige Ausleuchtung je einer Diodengruppe erreicht wird.

### Die LED

Die LED wird im folgenden als ein punktförmiger, lambert'scher Strahler betrachtet. Die gesamte Strahlungsleistung  $\phi_e$  wird in den Halbraum  $\omega = 2\pi$  abgestrahlt. Das Spektrum der LED wird in dieser Simulationsstudie nicht berücksichtigt.

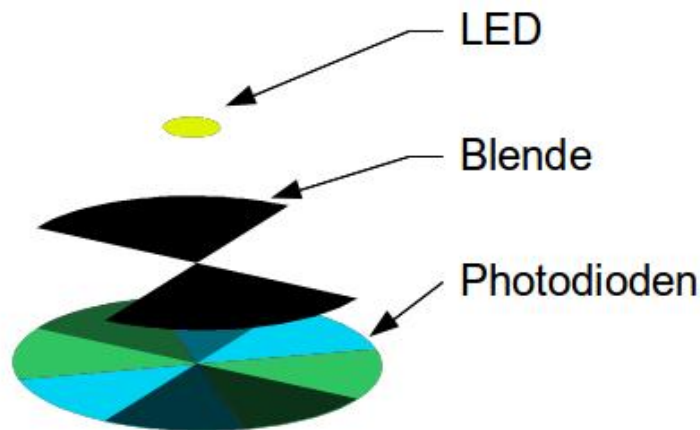


Abb. 3.6.: Allgemeiner Aufbau des Sensors

Das Sensor-System bildet demnach die Bewegungen der Motorwelle als Spannungssignal ab, in dem die Einfallende Lichtleistung der LED durch Abschattung der Photodioden mittels der dazwischen liegenden Blende verändert wird. In Abb. 3.7 ist der Effekt der Abschattung skizziert. Für eine Auslenkung um etwa beispielsweise  $-40^\circ$  um die Ausgangslage Abb. 3.7(b), vergrößert die Effektive Empfängerfläche der einen Diodengruppe, während sich die Effektive Empfängerfläche der anderen verkleinert.

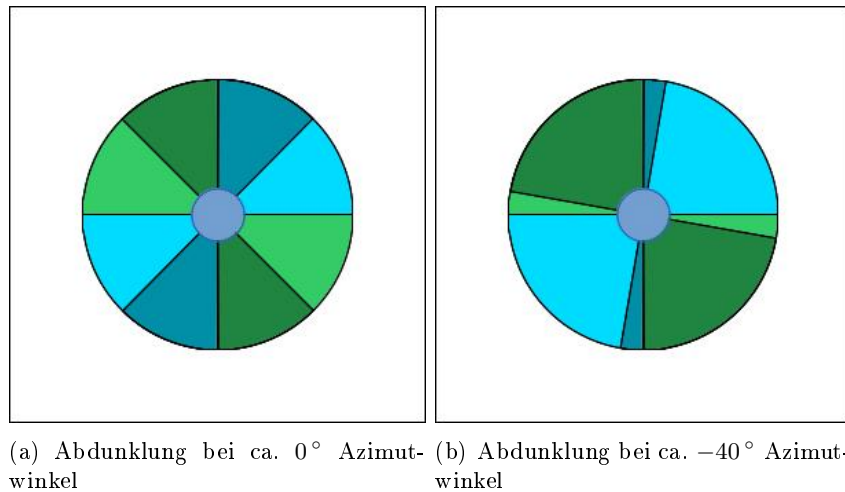


Abb. 3.7.: Skizze des Funktionsprinzips des Sensors

### 3.4.2. Das lineare Sensormodell

Für das lineare Sensormodell wird zunächst von folgendem Zusammenhang aus gegangen:

$$U_{ph,Sensor} = U_{max,Sensor} * k(\varphi) \quad (3.27)$$

mit

$$k(\phi) = A * \varphi + B \quad (3.28)$$

Weiter ergibt sich mit folgenden Randwerten der Zusammenhang:

$$k(+\varphi_{max}) = 1 \text{ und } k(-\varphi_{max}) = 0$$

$$k(\phi) = \frac{1}{2\varphi_{max}}\varphi + 0.5 \quad (3.29)$$

Mit den Voraussetzung aus Kap. 3.4.1 ergibt sich für das maximale Spannungssignal einer Diode:

$$U_{max,Diode} = I_{max,Diode} R_{Last} \quad (3.30)$$

mit dem maximalen Stromsignal  $I_{max,Diode}$  und dem Lastwiderstand der Diode  $R_{Last}$ .

Unter Annahme folgender Bedingungen und Zusammenhänge:

- Die Strahlungsleistung  $\phi_{max,Diode}$  wird verlustfrei in elektrische Leistung  $P_{el} = I^2 R$  umgesetzt
- Die Fläche Diode ergibt sich als Kreisringsegment:  $A_{R,S} = \frac{\varphi_{Segment}}{2}(r_2 - r_1)^2$
- Die Bestrahlungsstärke ergibt sich zu:  $E_e = \frac{\phi_{max,Diode}}{A_{R,S}}$

folgt:

$$I_{max,Diode} = \sqrt{\frac{P_{el,max,Diode}}{R_{Last}}} = \sqrt{\frac{\phi_{max,Diode}}{R_{Last}}} = \sqrt{\frac{E_e A_{R,S}}{R_{Last}}} \quad (3.31)$$

### 3.4.3. Das nicht lineare Sensormodell

Das lineare Sensormodell aus Kap. 3.4.2 berücksichtigt keine Effekte, wie Streulicht oder Beugung an den Kanten der Blende. Diese Effekte sollen mit einem mathematischen Modell qualitativ beschrieben werden. Sowohl bei Beeinflussung durch Streulicht, als auch Beugung wird erwartet, dass mehr Lichtleistung auf die Photodioden Trifft. Besonders an den Rändern des Messbereichs, steigt das Signal stärker an. Erreicht werden soll dies mittels:

- Beschreibung der Blende als Rechteckfunktion über den Azimutwinkel  $T(\varphi)$
- Breite der Blendenfunktion ist Öffnungswinkel der Blende  $b_{Blende} = \varphi_{Kreissegment}$
- Beschreibung der Dioden als Rechteckfunktion über den Azimutwinkel  $D(\varphi)$
- Breite der Diodenfunktion ist Öffnungswinkel der Blende  $b_{Diode} = \varphi_{Kreissegment}$
- Beide Funktionen sind  $\pi$ -Periodisch (Punktsymmetrie zur Motorwelle)
- Faltung der Blenden- und der Diodenfunktion ergibt  $k(\varphi)$  mit nicht stetigem, linearen Verhalten über den Definitionsbereich  $\pm n\pi$ ,  $n \in \mathbb{N}$ .

- Faltung dieser Ergebnisfunktion mit einem Glättungskern gemäß Gl. 3.32 beschreibt qualitativ die zuvor genannten Effekte und hat ein nicht lineares Übertragungsverhalten des Sensors zur Folge.

$$j_e(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{e} * c * \exp(-\frac{1}{1-(x/e)^2}), & |x| < 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.32)$$

Weitere Erläuterungen zur qualitativen Darstellung des Vorgangs werden im Verlaufe der Plausibilitätstests in Kap. 4.2.2.4 diskutiert.

## 4. Programmentwicklung

Bei der Programmentwicklung werden die in Kap. 3 aufgestellten Gleichungen mit Matlab und Simulink umgesetzt. Es wird begonnen, die Gleichungen des elektrischen und des mechanischen Teils des Motors in Simulink umzusetzen. Im Anschluss folgt die Implementierung der Werte, des Simulinkprogrammes und des Motors in Matlab. Daran schliesst sich die Umsetzung der Sensoren in Matlab. Wenn die Sensoren mit Matlabfiles eingebunden werden können, werden die Simulink- und Matlabprogramme des Motors entsprechend erweitert.

### 4.1. Motor in Simulink

Es werden die Formeln 3.20 und 3.25 aus den Kap. 3.3.1 und 3.3.2 hergenommen. Durch ein umstellen der beiden Formeln, so dass nur noch erste Ableitungen in beiden Formeln vorkommen, lassen sie sich kombinieren und in Simulink einbinden, da so ein Gleichungssystem nur mit ersten Ableitungen entstanden ist. Um einen besseren Überblick zu bekommen, werden die Formeln hier noch einmal aufgeführt.

$$s i_A = \frac{1}{L_A} (e_A - R_A i_A + u_e) \quad (4.1)$$

$$e_a = K_M * \Phi \omega \quad (4.2)$$

$$s \omega = \frac{1}{J} (M_M - r * \omega - M_L) \quad (4.3)$$

$$M_M = K_M * \Phi * i_A \quad (4.4)$$

$K_M$  und  $\Phi$  sind Motorkonstanten.

Mit der Annahme das

$$x_1 := \omega \quad (4.5)$$

$$x_2 := i_A \quad (4.6)$$

ist, lässt sich folgendes Gleichungssystem aufstellen:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{J}(K_M \Phi x_{\text{SensorFunktion2}} - r * x_1 - M_L) \quad (4.7)$$

$$x_2 = \frac{1}{L_A}(K_M * \Phi x_1 - R_A x_2 + u_e) \quad (4.8)$$

Dieses Gleichungssystem lässt sich jetzt durch die grafischen Elemente in Simulink sehr einfach modellieren.

Wie zu Beginn des Kap. 3.3 erwähnt, war es nicht möglich an verschiedene Werte der Motorkonstanten  $K_M$  und  $\phi$  zu gelangen. Aus diesem Grund wird auf die begleitenden Unterlagen der Vorlesung Systemtechniken von Prof. Froriep zurück gegriffen.

Auf dieser Grundlage werden die weiteren Programme entwickelt.

Um eine Regelung aufzubauen, wird noch ein Regler, ein Sollwertgeber und ein Subtrahierer von Ist- und Sollwert benötigt. Diese werden über die Simulinkbibliothek eingebunden und entsprechende Verbindungen werden angelegt. Das fertige Grundprogramm ist in Abb. 4.1 dargestellt.

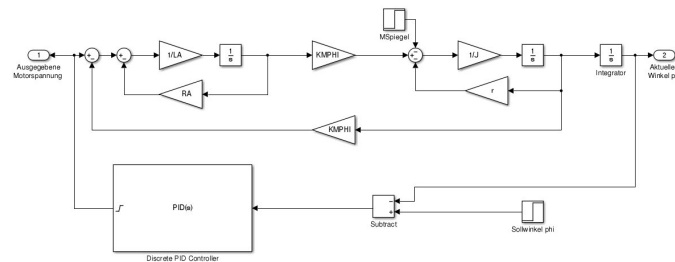


Abb. 4.1.: Simulink Grundprogramm

## 4.2. Matlab

### 4.2.1. Motor in Matlab

Die Programmentwicklung in Matlab gestaltet sich für den Motor als relativ einfach, da, wie oben erwähnt, keine Motordaten gefunden wurden, wird auf das Matlabfile von Prof. Froriep aus der Vorlesung Systemtechniken zurück gegriffen. In diesem Matlabfile stehen:

- Die Motorkennndaten



- Die berechnete Trägheit des Spiegels
- Das berechnete Drehmoment
- Die Grenzen für die Plots
- Die Anweisungen für die Plots
- Die Anweisungen für den Integrationsalgorithmus.

Dieses File ist eine sehr gute Grundlage für die Simulation, welches während der Simulation entsprechend angepasst werden kann.

Als Größen zur Ausgabe in einem Diagramm, interessieren vor allem die Eingangsspannung  $u_e$ , der aktuelle Winkel  $\phi$ , sowie der Sollwinkel mit seinen Toleranzen. Es werden drei Plots dargestellt. In dem ersten Plot ist die Motorspannung dargestellt. In dem zweiten Plot der aktuelle Winkel  $\phi$ , der direkt von dem Motor abgegriffen wird, sowie der einzustellende Sollwinkel dargestellt. Der dritte Plot enthält auch wieder den aktuellen Winkel  $\phi$ , jedoch mit einer feineren Auflösung um den Sollwinkel, um die Toleranzgrenzen besser erkennen zu können.

#### 4.2.2. Sensor in Matlab

Der Sensor selbst wird nur mit Matlabprogrammen simuliert. Dies ermöglicht verschiedene Sensoren in das Hauptprogramm einzubinden und Änderungen an z.B. den Ausmaßen und dem Verhalten des Sensors vorzunehmen, ohne das Hauptprogramm ändern zu müssen.

##### 4.2.2.1. Sensorkonstanten

Um einen Sensor mit seinen verschiedenen Kenngrößen wie Sensorfläche, Übertragungsverhalten, und weiteres simulieren zu können, werden die verschiedenen Funktionen aus Kap. 3.4 in einzelnen Matlabfiles umgesetzt. Die Charakteristischen Daten der Photodioden, Blende und LED werden mit Hilfe der Matlabfunktion `SensorDaten.m` (siehe Anhang A.2) in ein Cell-Array gespeichert. Dies bietet den Vorteil, die Ergebnisse komplizierter Berechnungen und einige Konstanten in einer einzigen Variable zu speichern und an die Hauptfunktion `sensor.m` zu übergeben.

Die in Kap. 3.4.3 erläuterte mathematische Beschreibung der Einflüsse von Beugung und Streulicht, wird in den Zeilen 38 bis 81 der Matlab-Funktion umgesetzt. Die Limitierung auf eine diskrete Faltungsoperation erzeugt bei der Umsetzung einige Probleme.

- Diskrete Faltung erzeugt Randeffekte (Abweichung zur kontinuierlichen Lösung der Faltung zweier Rechteckfunktionen) -> Definitionsbereich vergrößern
- Diskrete Faltung erzeugt diskrete Lösung. Somit muss das Verhalten des Sensors zwischen den Lösungswerten der Faltung interpoliert werden -> lineare Interpolation

#### 4.2.2.2. Rechtecks- und Glättungsfunktion

Die Berechnung der Diskreten Faltung benötigt Diskrete Funktionswerte der Rechteckfunktionen für Blende und Dioden. Die im Anhang A.3 und A.4 dargestellten Matlab-Files `frect.m` und `gekern.m` Berechnen die Funktionswerte der in Kap. 3.4.3 beschriebenen Funktionen. Diese werden im File `SensorDaten.m` (vgl. Kap. 4.2.2.1) in For-Schleifen zu Vektoren mit Diskreten Funktionswerten zusammengesetzt.

#### 4.2.2.3. Die Sensor-Funktion

Die Verwendungs des Sensors in den vorhandenen Simulinkprogramme macht es nötig, diverse Voreinstellungen als globale Variablen zu übergeben.

- **Unit:** die Einheit, in der die Sensorfunktion den Positionswinkel der Motorwelle übergeben wird
- **mode:** das Übertragungsverhalten, des Sensors
- **Sensorkonstanten:** die in Kap. 4.2.2.1 beschriebenen charakteristischen Werte des Sensorsystems als Cell-Array

Die Variable **Unit** ermöglicht eine Umrechnung der Einheit für den eingegebenen Motorwellenwinkel.

Um das Wirken, des Differenzenprinzips in der Vorliegenden Anordnung zu demonstrieren, wird ein Rauschen generiert. Dieses variiert statistisch gleichverteilt im Bereich von 0 bis  $\frac{1}{10}$  des maximalen Stromsignals.

Die in Kap. 3.4 vorgestellten Mathematischen Modelle werden mittels `caseswitch` der Variablen **mode** implementiert. Für die modes: „linear2 und „nonlinear müssen die Funktionswerte, welche zwischen den diskreten, charakteristischen Werten liegen linear interpoliert werden.

#### 4.2.2.4. Die Plausibilitätstests zum Sensor

Hier soll das in Kap. 3.4.3 beschriebene Verhalten, bei Beeinflussung der Messung durch Streulicht und Beugung qualitativ bewertet und auf Plausibilität geprüft werden. Abb. 4.2 Zeigt den Verlauf der Gewichtungsfunktion(Faltungsfunktion) über den Azimutwinkel bzw. Positionswinkel  $\varphi$

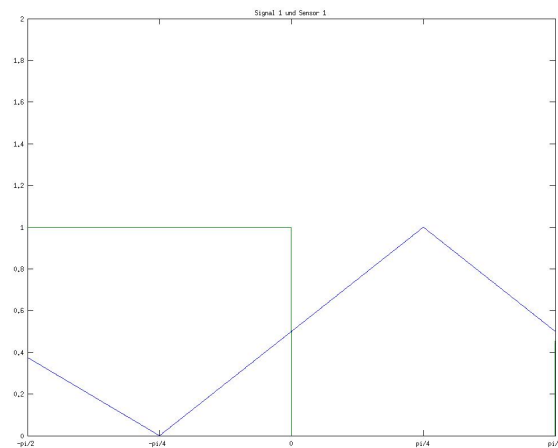


Abb. 4.2.: Diodenfunktion und lineare Faltungsfunktion

Abb. 4.3 zeigt, dass die diskrete Faltung der Blenden- und der Diodenfunktion qualitativ das erwartete Verhalten abbildet.

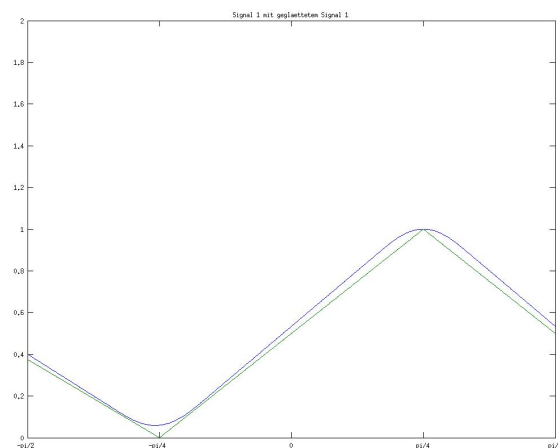


Abb. 4.3.: Vergleich der ungeglätteten mit der geglätteten Funktion

Im folgenden soll überprüft werden, ob die Sensoren für den maximalen Messbereich von  $\pm 45^\circ$  das erwartete Verhalten Zeigen. Abb. 4.4 zeigt die Kennlinie einer einzelnen Diodengruppe mit Einfluss durch statistisch gleichverteiltes Rauschen.

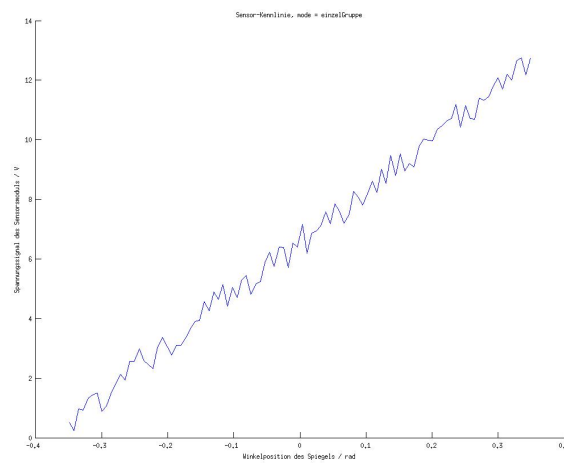


Abb. 4.4.: Kennlinie des Sensors im mode: einzelGruppe

Abb. 4.5 zeigt, das ideal lineare Verhalten des Sensors im mode: linear1.

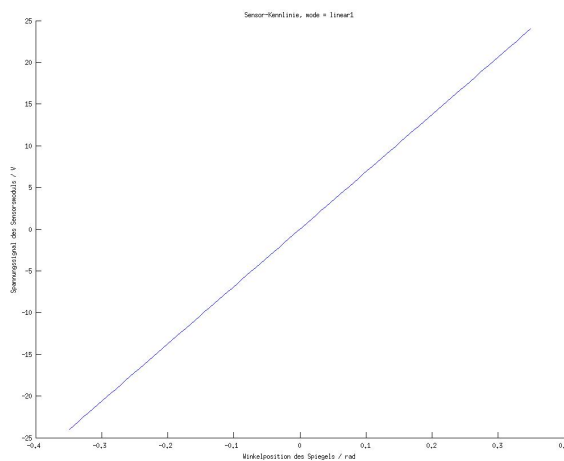


Abb. 4.5.: Kennlinie des Sensors im mode: linear1

Abb. 4.6 stellt die Kennlinie des Sensors mittels Faltungsfunktion ohne Glättung wie erwartet dar.

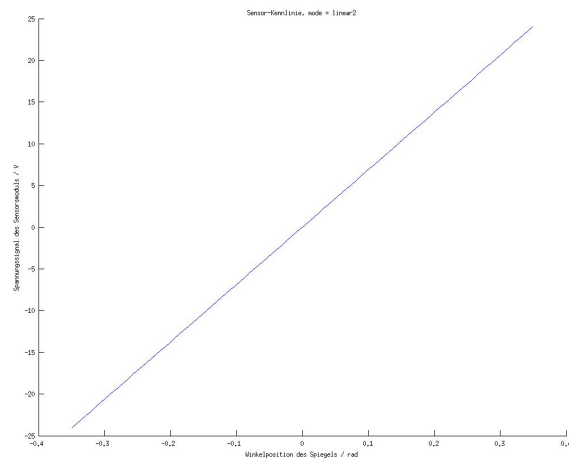


Abb. 4.6.: Kennlinie des Sensors im mode: linear2

Eben falls im mode: nonlinear zeigt die Abb. 4.7 qualitativ das erwartete Verhalten der Kennlinie.

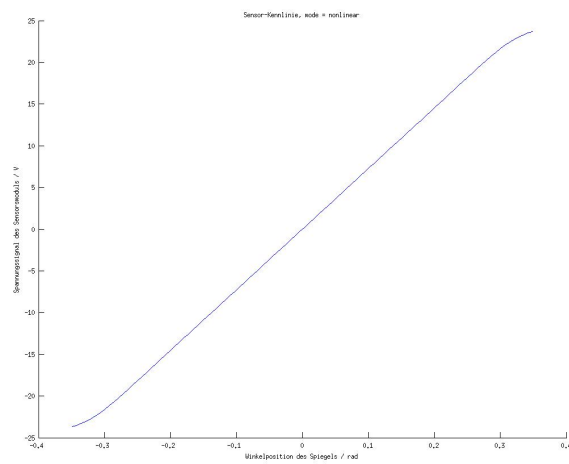


Abb. 4.7.: Kennlinie des Sensors im mode: nonlinear



## 5. Simulationsdurchführung

### 5.1. Simulation

In diesem Abschnitt werden verschiedene Simulationen durchgeführt. Der Motor, der der Regelung zu Grunde liegt, ist der Gleichstrommotor aus der Vorlesung von Prof. Froiriep. Mit diesem Motor soll von einer Nullposition ausgehend ein Winkel von  $20^\circ$  angefahren werden. Dieser Winkel soll innerhalb von einer Millisekunde erreicht werden.

Es wird eine Spannungsbegrenzung von  $\pm 24\text{ V}$  eingeführt, da diese eine in der Fertigung übliche Versorgungsspannung ist.

Zu Beginn wird der Sensor, der das aktuelle Positionssignal liefert, aus der Regelung heraus gelassen. Somit ist es möglich, die Regelung an den Motor anzupassen und sobald diese die Sollwerte erfüllt, werden 3 verschiedene Sensoren das Positionssignal liefern.

#### 5.1.1. PID-Regelung

Für die verschiedenen P-, PI-, PD- und PID-Regelungen wird der PID-Reglerblock von Simulink verwendet.

Es wird mit einer P-Regelung begonnen, die Sollwerte zu erreichen. Wenn die P-Regelung nicht ausreicht, wird die P-Regelung erst nur um einen I-Anteil und dann nur um einen D-Anteil erweitert. Sollten immernoch keine Zufriedenstellenden Ergebnisse vorliegen, so wird mit einer PID-Regelung versucht, die Vorgaben zu erreichen.

##### 5.1.1.1. P-Regelung

In Abb. 5.1 ist das Ergebnis der reinen P-Regelung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach ca. 7 ms es keine Veränderung des eingesetllten Winkels gibt. Eine Erhöhung des P-Anteils ergibt ein Überschwingen, wie es in Abb. 5.2 dargestellt ist. In Abb. 5.1 und 5.2 ist in der untersten Grafik der Sollwinkel sowie die angegebene Abweichung angezeigt. Wie zu erkennen ist, ist die verbleibende Regeldifferenz noch viel zu groß. Demnach wird mit einem zugefügten I-Anteil zur reinen P-Regelung versucht, die restliche große Regeldifferenz auszugleichen. Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File `msSpiegel_PID.m` und das Simulink-File `sSpiegel.slx` verwendet.

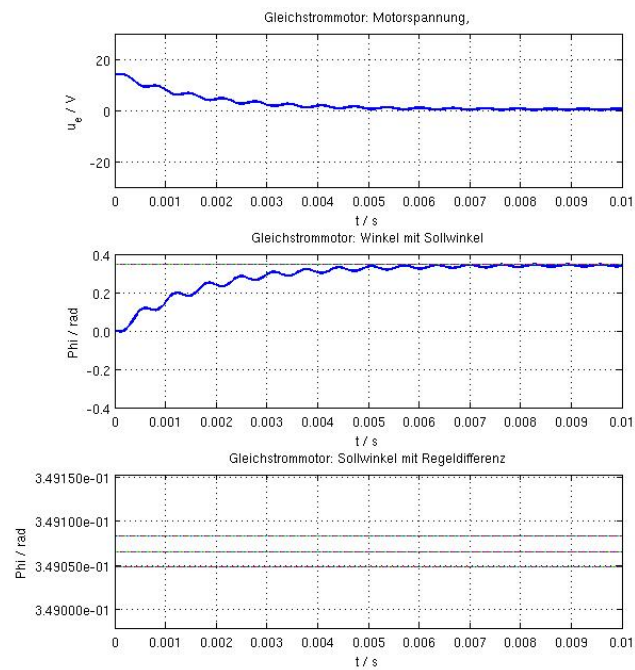


Abb. 5.1.: P-Anteil von 40

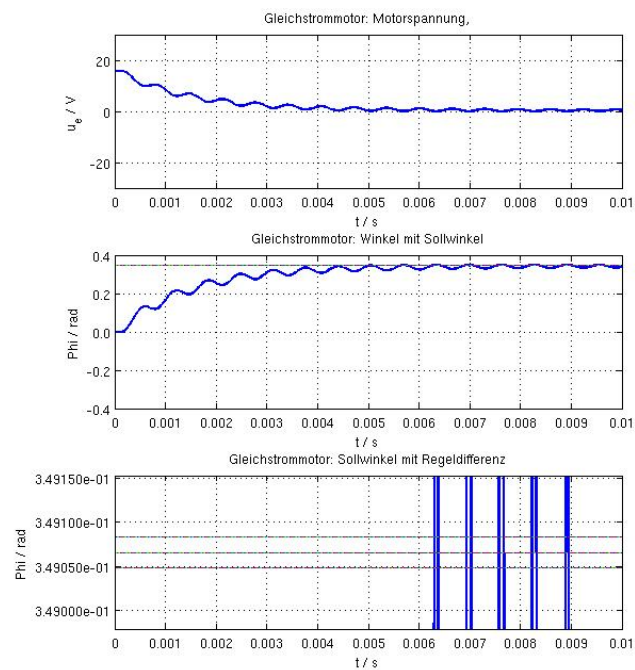


Abb. 5.2.: P-Anteil von 45



### 5.1.1.2. PI-Regelung

In Abb. 5.3 ist das Ergebnis der PI-Regelung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach ca. 13 ms es keine Veränderung des eingesetzten Winkels gibt. Eine Erhöhung des P- oder I-Anteils ergibt ein Überschwingen, wie es in Abb. 5.4 dargestellt ist. In Abb. 5.3 und 5.4 ist in der untersten Grafik der Sollwinkel sowie die angegebene Abweichung angezeigt. Wie zu erkennen ist, ist die verbleibende Regeldifferenz noch viel zu groß. Demnach wird der zugefügte I-Anteil herausgenommen und ein D-Anteil zur reinen P-Regelung hinzugenommen, um so ein besseres Regelergebnis zu erreichen.

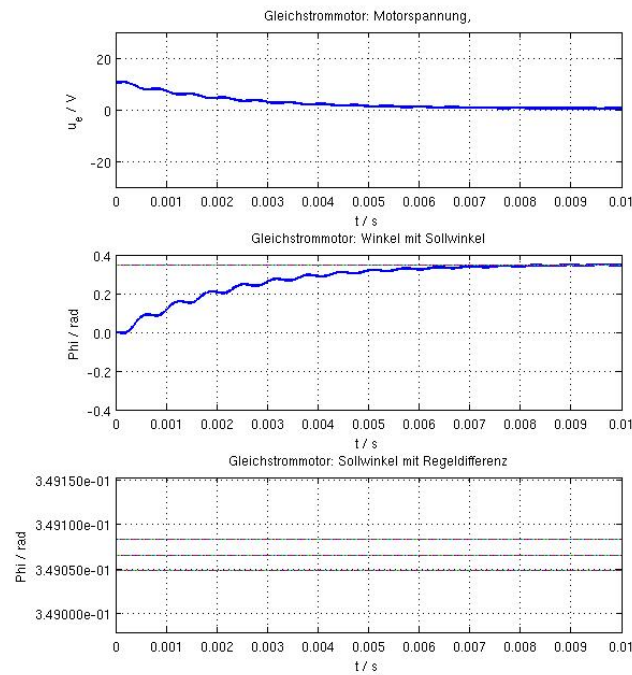


Abb. 5.3.: P-Anteil von 30 und I-Anteil von 17

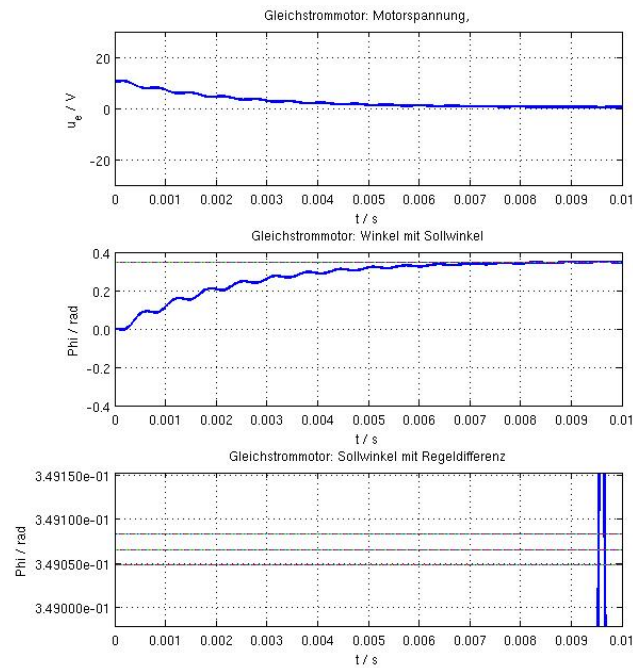


Abb. 5.4.: P-Anteil von 30 und I-Anteil von 18

### 5.1.1.3. PD-Regelung

Auch mit der PD-Regelung werden die Vorgaben noch nicht erfüllt. In Abb. 5.5 ist das Ergebnis der PD-Regelung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach ca. 7 ms es keine Veränderung des eingesetzten Winkels gibt. Eine Erhöhung des P- oder D-Anteils ergibt ein Überschwingen, wie es in Abb. 5.6 dargestellt ist. In Abb. 5.5 und 5.6 ist in der untersten Grafik der Sollwinkel sowie die angegebene Abweichung angezeigt. Wie zu erkennen ist, ist die verbleibende Regeldifferenz noch viel zu groß.

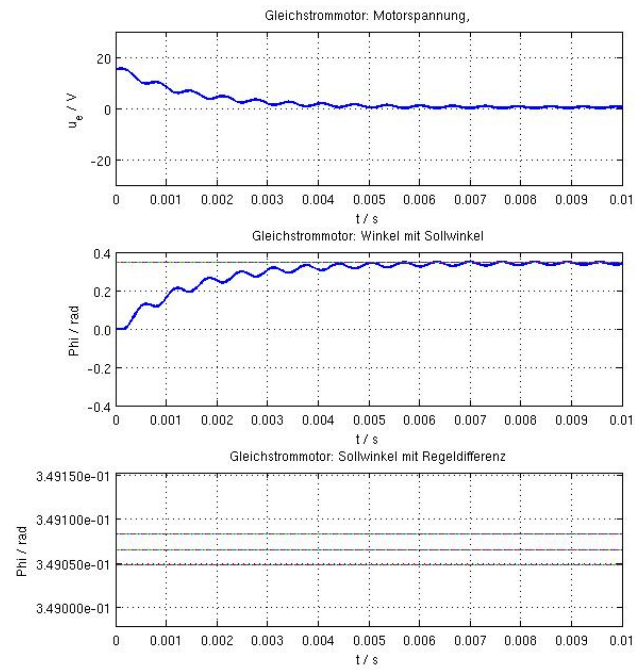


Abb. 5.5.: P=22 - D=1 - N=1

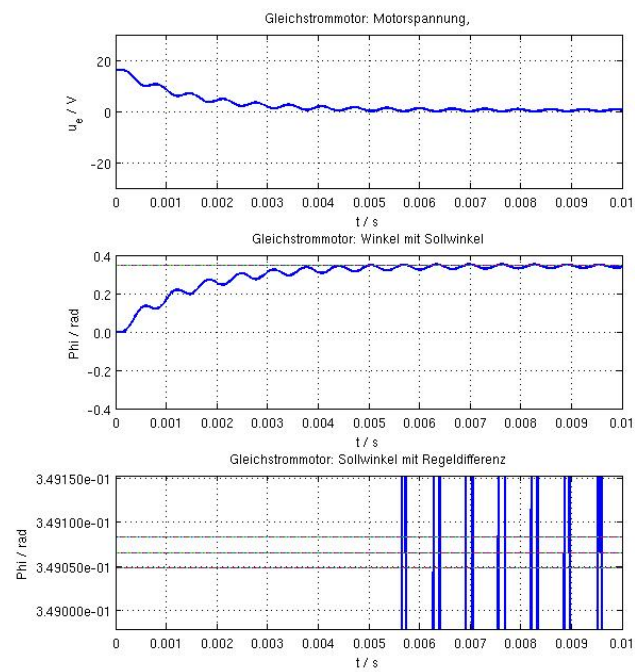


Abb. 5.6.: P=22 - D=1 - N=1

#### 5.1.1.4. PID-Regelung

Nun wird mit einer Kombination der P-, I- und D-Anteile die Regelung betrieben. In Abb. ?? ist das Ergebnis der PID-Regelung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach ca. 7 ms es keine Veränderung des eingesetllten Winkels gibt. Eine Erhöhung der verschiedenen Reglerparamteranteile ergibt ein Überschwingen, wie es in Abb. ?? dargestellt ist. In Abb. ?? ist in der untersten Grafik der Sollwinkel sowie die angegebene Abweichung angezeigt. Durch die große Abweichung vom Sollwinkel ist in dieser Grafik kein Graph zu erkennen.

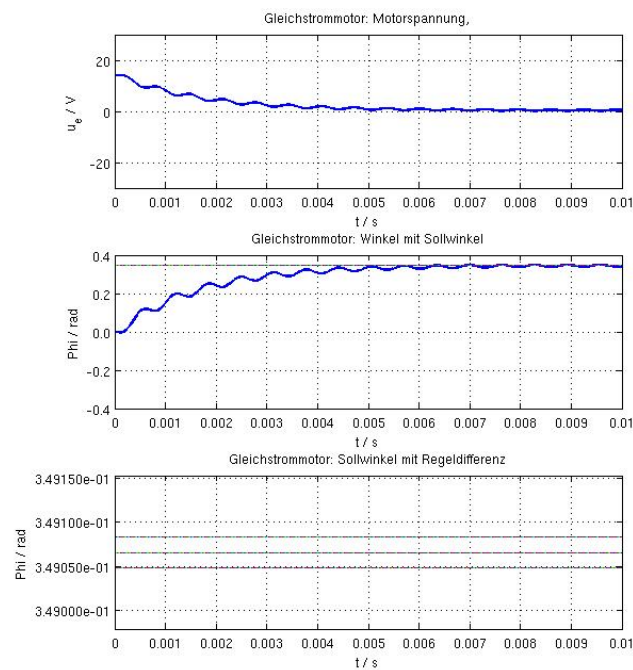


Abb. 5.7.: P=20 - I=15 - D=1 - N=1

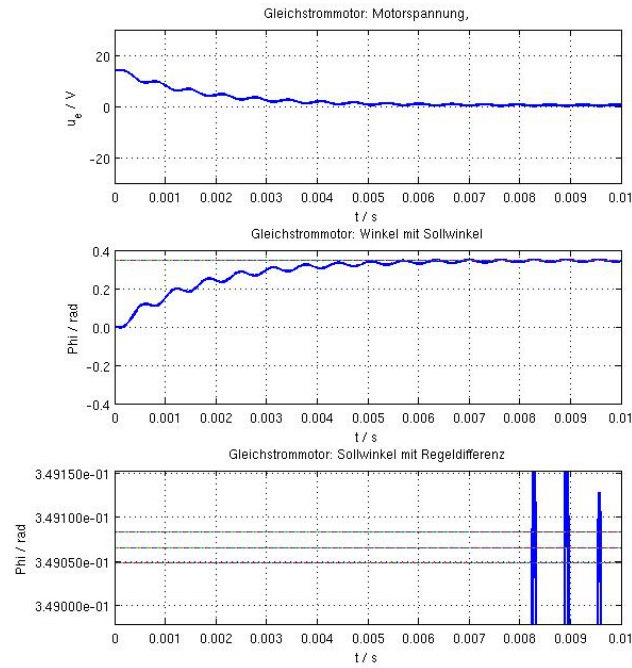


Abb. 5.8.: P=20 - I=16 - D=1 - N=1

### 5.1.2. P-Adaption

Es zeigt sich, dass der P-Anteil den meisten Einfluss, bzw. den größten Erfolg bei der Regelung ausmacht. Durch hinzugefügte I- oder D-Anteile konnte die Regelung nicht verbessert werden. Nach dem die verschiedenen Regler die Vorgaben noch nicht erfüllen konnten, wird nun die P-Adaption eingesetzt. Bei der P-Adaption wird folgende Formel vor den P-Verstärker geschaltet:

$$f = 1 + \frac{c_1 - 1}{(c_2 * e)^2 + 1} \quad (5.1)$$

Dabei muss der Regelkreis folgendermaßen erweitert werden:



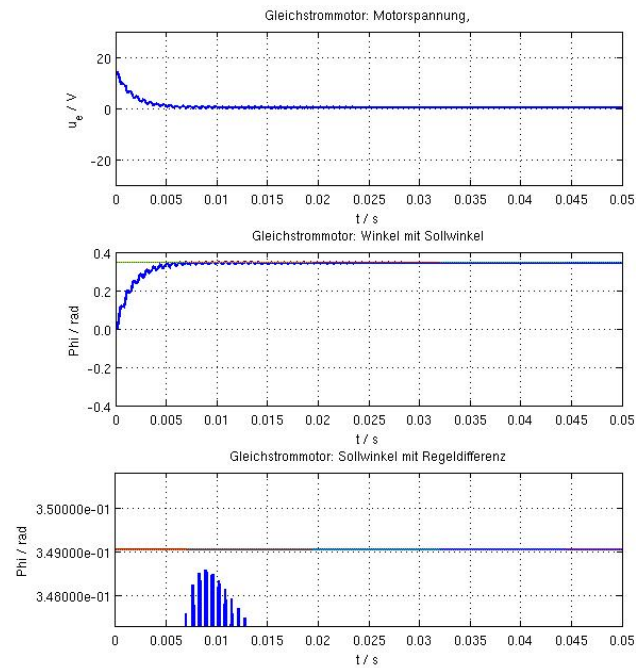


Abb. 5.11.: P-Adaption mit Parametern

In Abb. 5.11 ist zu erkennen, dass der Sollwinkel nicht erreicht wird. Wird jedoch der P-Anteil erhöht und mit den beiden f-Parametern weitere Einstellungen probiert, so wird der Sollwinkel nie erreicht. Es kommt zwar zu einem Schwingen um den Sollwinkel, aber dieser kann nicht stabil erreicht werden, siehe Abb. 5.12.

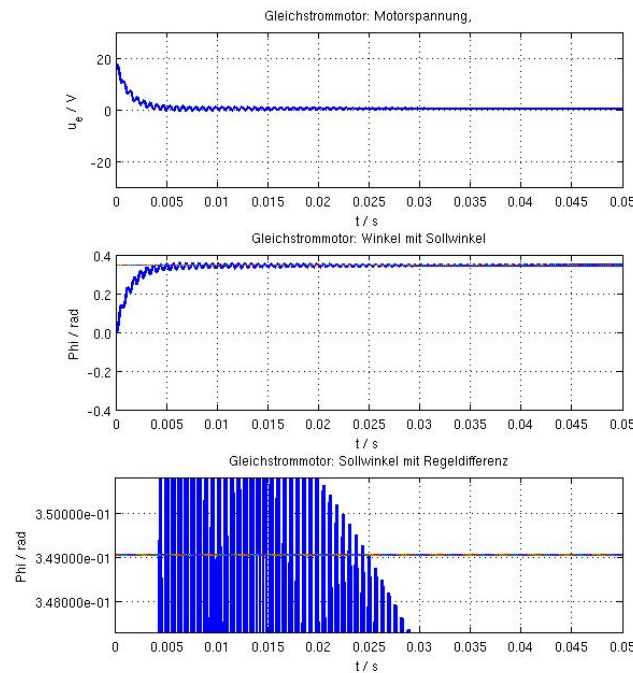


Abb. 5.12.: P-Adaption mit Parametern

#### 5.1.2.2. P-Adaption mit Galvo-Werten

Durch die Verwendung der P-Adaption konnte die Einregelzeit nicht verbessert werden. Es zeigt sich, dass mit dem vorhandenen Gleichstrommotor keine der Vorgaben eingehalten werden können. Um heraus zu finden, welche Daten der Motor aufweisen muss, um mit einer PID- oder P-Adaption geregelt werden zu können, werden jetzt zusätzlich zu den  $f_1$  und  $f_2$  Parametern auch die Motorparameter geändert. Es wurden Werte für den Innenwiderstand und der Induktivität eines Galvos 6230 der Firma Cambridge Technology als Grundlage verwendet [?].

CaTe: PDF, Model 6230H Optical Scanner (Mechanical and Electrical Specifications), Cambridge Technology, 03/07.

Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File `msSpiegel_Pad_Werte.m` und das Simulink-File `sSpiegelPad.slx` benutzt.

In Abb. 5.13 ist eine langsame Annäherung an die zu erfüllenden Vorgaben zu sehen. Jedoch noch nicht in der geforderten Zeit und noch mit zu großen Schwankungen um den Sollwinkel. Es sind folgende Werte aktuell eingestellt:

- Innenwiderstand der Spule:  $1.07 \Omega$
- Induktivität der Spule:  $173 \mu\text{H}$
- P-Anteil: 330
- $f_1$ : 5



- $f_2$ : 370

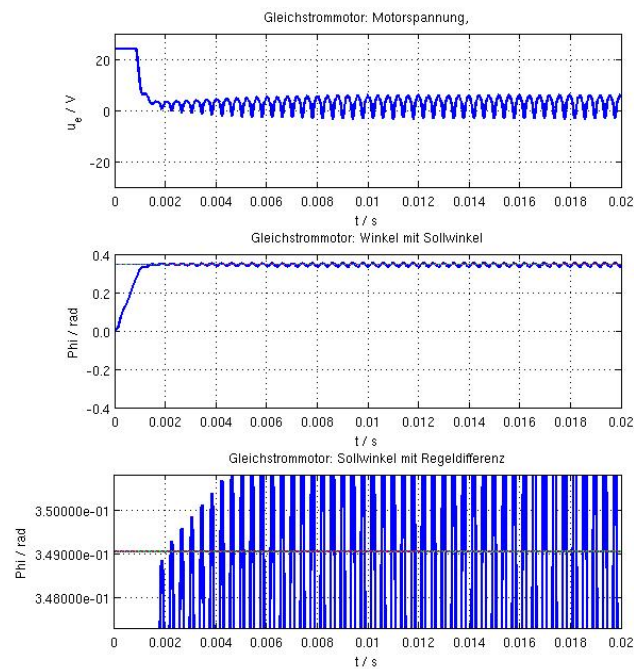


Abb. 5.13.: P-Adaption mit neuen Motorparametern

### 5.1.2.3. P-Adaption mit neuen Werten

Nun werden die Motor- und Spiegelwerte solange verändert, bis sich das gewünschte Ergebnis einstellt. Sollte die Regelung erfolgreich sein, kann mit den veränderten Werten evtl. ein Motor und Spiegel hergestellt werden, der den Anforderungen entspricht.

Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File `msSpiegel_Pad_Neue_Werte.m` und das Simulink-File `sSpiegelPad.slx` verwendet.

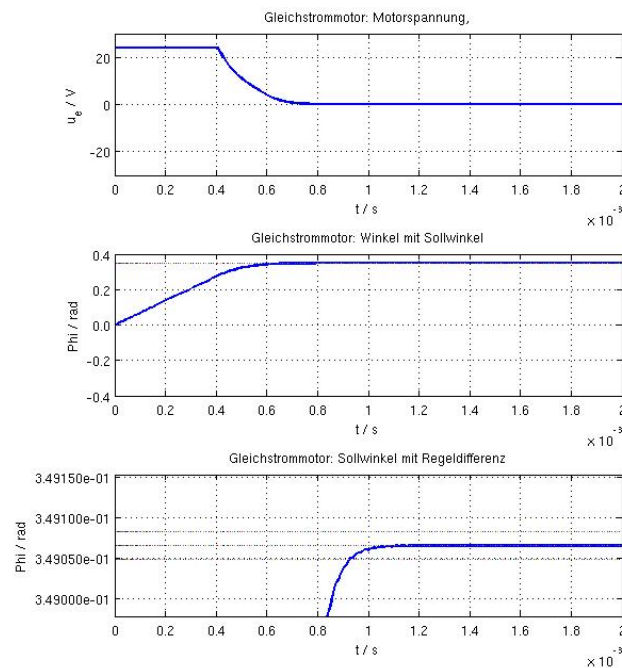


Abb. 5.14.: P-Adaption mit neuen Parametern

Wie in Abb. 5.14 zu erkennen, ist die Regelung in den geforderten Bereichen erfolgreich. Der geforderte Winkel von  $20^\circ$  ist unter 1 ms in seinen Regeldifferenzen erreicht. Dieser Regelung liegen folgende Werte zu Grunde:

- Innenwiderstand der Spule:  $0.1 \Omega$
- Induktivität der Spule:  $3 \mu\text{H}$
- Motorkonstante  $K_{\text{MPHI}}$ :  $35\text{e} - 3 \text{Vs}$
- Reibungskoeffizient:  $6\text{e} - 5 \text{Nms}$
- Trägheitsmoment des Spiegels:  $93.3\text{e} - 9 \text{kgm}^2$
- Drehmoment auf den Spiegel:  $130.25\text{e} - 6 \text{Nm}$
- P-Anteil: 320
- $f_1$ : 2
- $f_2$ : 160

#### 5.1.2.4. Strombegrenzung

Ein Blick auf den Strom liefert allerdings Ergebnisse, die weiterer Überarbeitung der Regelung bedürfen. In Abb. 5.15 ist der Strom der aktuellen Regelung dargestellt. Es fließen Ströme in Höhe von 80 A.

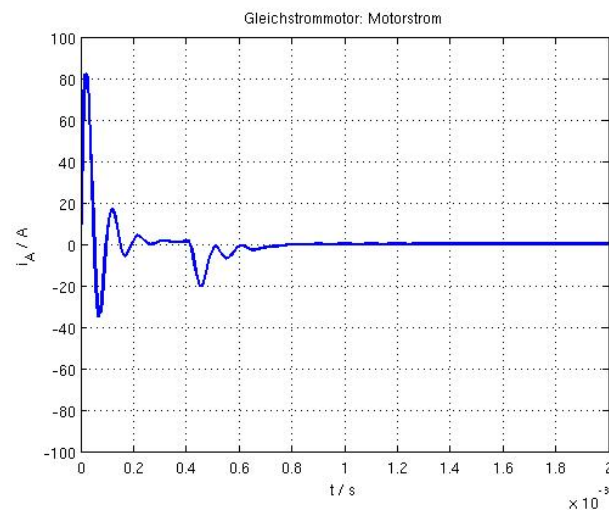


Abb. 5.15.: Stromhöhe während der Regelung

Dies ist allerdings sehr hoch, deshalb wird in die bestehende Regelung eine Strombegrenzung von 10 A eingebaut und erneut versucht, die Regelung entsprechend anzupassen.

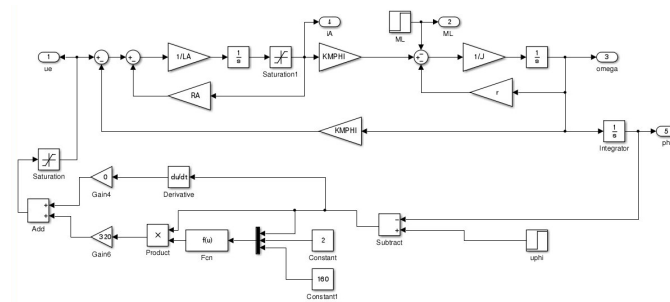
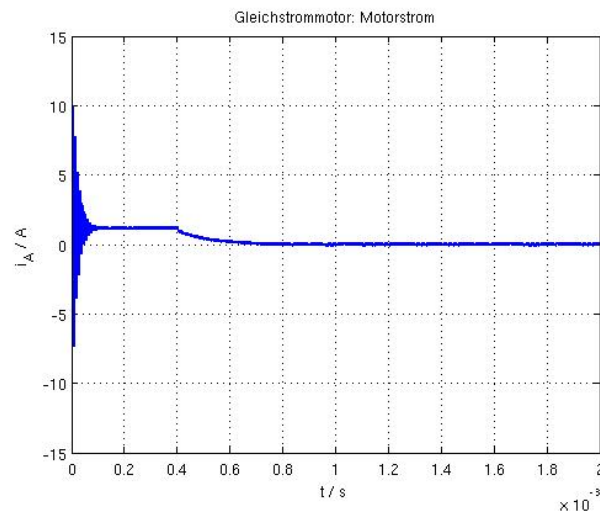


Abb. 5.16.: P-Adaption mit Strombegrenzung

In Abb. 5.16 ist die P-Adaption mit einer Strombegrenzung zu erkennen. Für eine bessere Übersicht, wurden entsprechende Positionen mit einem Namen versehen und der D-Anteil aus der Regelung genommen, da dieser auf Null gesetzt ist, siehe Abb. 5.17.

Abb. 5.17.: Motorstroms mit Strombegrenzung auf  $\pm 10$  A

Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File `msSpiegel_Pad_Neue_Werte_Strom.m` und das Simulink-File `sSpiegelPadStrom.slx` benutzt.

Eine Regelung mit den aktuellen Werten zeigt das in Abb. 5.18 zu erkennende Ergebnis.

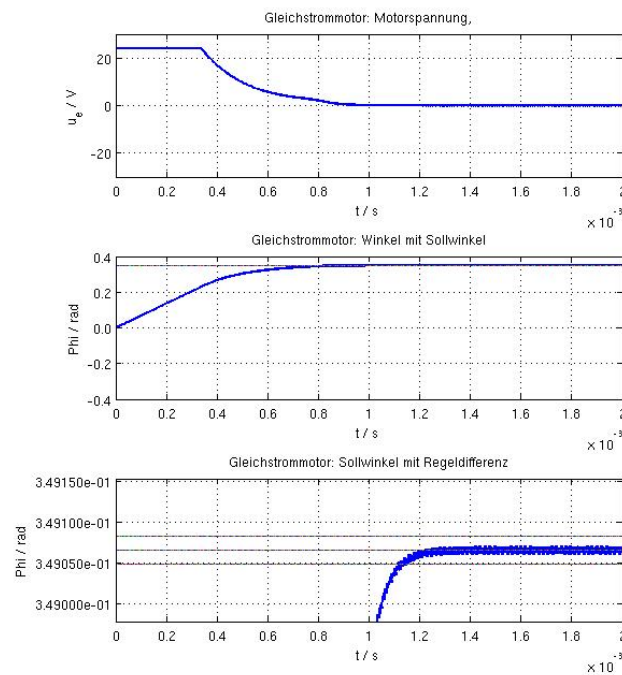


Abb. 5.18.: P-Adaption mit Strombegrenzung

Durch weiteres Anpassen der unterschiedlichen Parameter, konnten die Sollwerte fast erreicht werden. Abb. ?? zeigt schon ein sehr gutes Ergebnis.

- Neues Trägheitsmoment des Spiegels:  $93.3e - 11 \text{ kg} * \text{m}^2$

- Neues Drehmoment auf den Spiegel:  $30,25e - 6 \text{ Nm}$
- P-Anteil: 200
- $f_1$ : 3
- $f_2$ : 150

#### 5.1.2.5. Fertige P-Adaption

Die Einregelzeit liegt nur noch knapp über der vorgegebenen Zeit, durch weitere Anpassung der Regelparameter soll die vorgegebene Einregelzeit erreicht werden. Abb. ??

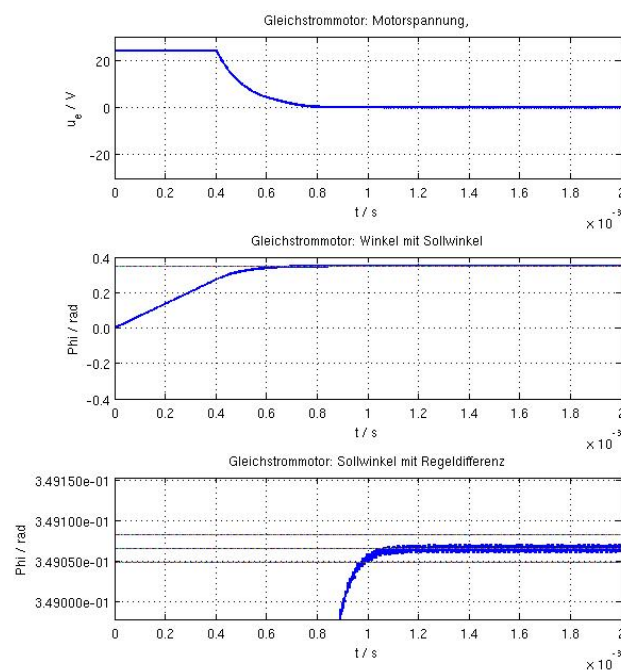


Abb. 5.19.: Angepasste P-Adaption mit Strombegrenzung

- Trägheitsmoment des Spiegels:  $93.3e - 11 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Drehmoment auf den Spiegel:  $30,25e - 6 \text{ Nm}$
- P-Anteil: 320
- $f_1$ : 2
- $f_2$ : 160

In Abb. 5.19 ist zu erkennen, dass durch Anpassung des Trägheitsmoments des Spiegels, des wirkenden Drehmoments auf den Spiegel und der verschiedenen Regelparameter, trotz Spannungs- und Strombegrenzung, die Regelung erfolgreich ist. Der Spiegel zittert zwar etwas um die Position, dies ist aber im angegebenen Toleranzbereich.

### 5.1.3. Regelung mit Sensor

Nach dem die Regelung für einen perfekt linear arbeitenden Sensor, der durch ein direktes abgreifen des aktuellen Winkels realisiert wurde, funktioniert, wird der Sensor aus Kap 3.4 in die Simulation mit eingebaut. Dafür wird das vorhandene Simulink-File `sSpiegelPadStrom.slx` verwendet und um den Sensor erweitert. Zudem wird der eingegebene Winkel in eine Spannung umgerechnet, da der Sensor eine vom Winkel abhängige Spannung ausgibt. In Abb. 5.20 ist der gesamte Simulationsaufbau dargestellt, welcher als `sSpiegelPadStromSensor.slx` gespeichert ist.

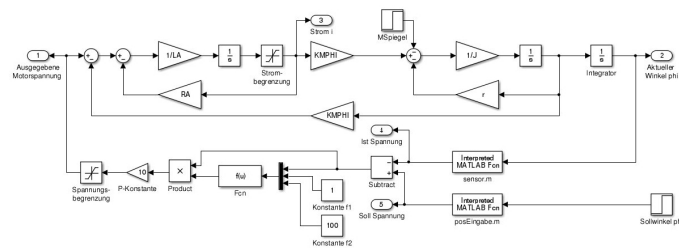


Abb. 5.20.: Simulinaufbau mit Sensor

Zur Ansteuerung wird das Matlab-File `msSpiegel_Pad_Neue_Werte_Strom.m` modifiziert und als `msSpiegelundSensor.m` gespeichert. In diesem Matlab-File ist es möglich, verschiedene Kenndaten für den Sensor einzugeben. Es werden gelten folgende Daten:

- Innenradius = 5 mm
- Aussenradius = 10 mm
- Lastwiderstand = 6000 Ohm
- Messbereich =  $20^\circ$
- LEDLeistung = 1 W
- Umgebungstemperatur = 300 K
- nonlinear = 0.0001 (falls ein nichtlinearer Sensor simuliert werden soll)

Es werden drei verschiedenen Simulationen durchgeführt.

In der ersten Simulation wird ein linearer Sensor verwendet. Dies sollte die gleichen Ergebnisse liefern wie der ideale Sensor. Hierbei wird die Regelung, falls nötig, angepasst.

Die zweite Simulation wird ebenfalls mit einem linearen Sensor durchgeführt, nur ist hierbei die Linearität durch eine Faltung der Blende mit der Sensorfläche realisiert. Es wird erwartet, dass sich dieser Sensor gleich verhält wie der ideale Sensor.

Bei der dritten und letzten Simulation wird ein nichtlinearer Sensor verwendet. Wobei der Nichtlinearitätsfaktor, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, auf den Wert 0,0001 gesetzt wird. Dies sollte ein nahezu lineares Verhalten zeigen.

### 5.1.3.1. Linearer Sensor 1

Abb. 5.21 zeigt das Regelergebnis des ersten linearen Sensors. Es ist gut zu erkennen, dass die Regelung sogar schneller erfolgt als vorher.

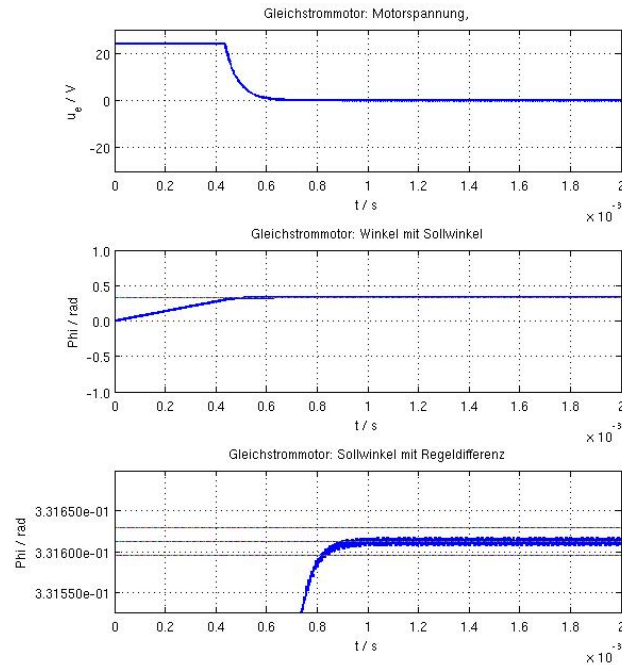


Abb. 5.21.: Erster linearer Sensor

### 5.1.3.2. Linearer Sensor 2

Abb. 5.22 zeigt das Regelergebnis des zweiten linearen Sensors. Es ist gut zu erkennen, dass eine Regeldifferenz bleibt. Diese lässt sich auch nicht durch verändern der Regelparameter reduzieren.

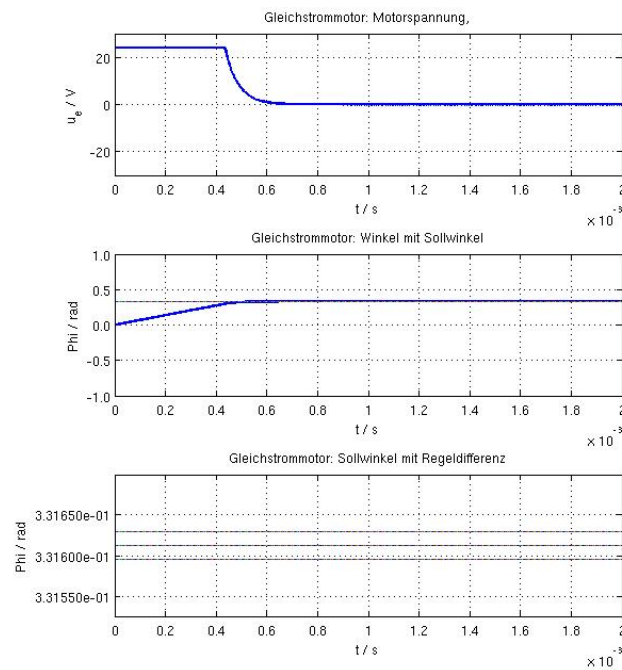


Abb. 5.22.: Zweiter linearer Sensor

### 5.1.3.3. Nichtlinearer Sensor

Abb. 5.23 zeigt das Regelergebnis des nicht linearen Sensors. Auch hier ist eine restliche Regeldifferenz zu erkennen, die sich wiederum nicht durch anpassen der Regelparameter beglichen lässt.



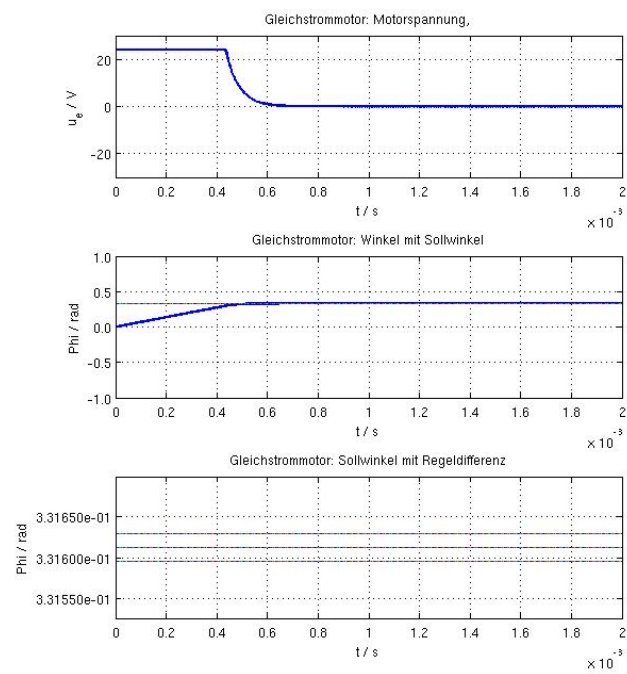


Abb. 5.23.: Nichtlinearer Sensor



## 6. Diskussion

Die Verstellung von Laserablenkspiegeln erfolgt i.d.R. durch Galvos. In dieser Simulationsstudie sollte die Regelung eines Gleichstrommotors zur Spiegelverstellung untersucht werden. Die Simulationsstudie wurde mit einem vorgegebenen Gleichstrommotor Abb. 3.4 aus Kap. 3.3.3 begonnen. Für diesen Motor wurde ein PID-Regler in Simulink integriert, Abb. 4.1 aus Kap. 4.1, und unterschiedliche Regelparameter getestet. Der Sensor wurde noch nicht integriert, um erst einmal eine Regelung für einen Gleichstrommotor zu bekommen, mit der es überhaupt möglich ist, einen Winkel einzustellen.

Bei der reinen P-Regelung, konnte weder die Einregelzeit, noch die Genauigkeit erreicht werden.

Wie in Abb. 5.1 und 5.2 aus Kap. 5.1.1.1 zu erkennen ist, beträgt die Zeit, bis der Winkel in der Nähe des Sollwertes ist, ca. 7 ms. Jedoch ist eine große Schwankung des Winkels zu erkennen. Bei kleinerem P-Anteil von  $P = 40$  ist die Abweichung noch so groß, dass der Winkel in der unteren Grafik nicht erreicht wird. Bei einem etwas größerem P-Anteil  $P = 45$  ist zu erkennen, dass der Sollwinkel zwar überfahren wird, aber nicht stabil bleibt. Abb. 5.1 und 5.2 sind hier dafür exemplarisch, dass auch bei anderen Werten keine erfolgreiche Regelung erreicht werden konnte.

Die Erweiterung des reinen P-Reglers um einen I-Anteil ist in den Abb. 5.3 und 5.4 aus Kap. 5.1.1.2 zu erkennen. Durch die Erweiterung mit einem I-Anteil, hat sich die Einregelzeit auf ca. 9 ms verlängert. Der Sollwinkel nicht erreicht.

Eine Erhöhung des P- oder I-Anteils führte dann wieder zu Schwingungen um den Sollwinkel, wie es in Abb. 5.4 exemplarisch für einen leicht erhöhten I-Anteil dargestellt ist.

Die Erweiterung des reinen P-Reglers um einen D-Anteil ist in den Abb. 5.5 und 5.6 aus Kap. 5.1.1.3 zu erkennen. Hier ergibt sich das gleiche Problem wie bei der P- und PI-Regelung. Bis zu einer Grenze der P- und D-Anteile, ist die Regelung zu weit von dem Sollwinkel entfernt. Wird nur ein Anteil leicht erhöht, kommt es zu einem Überspringen um den Sollwinkel. Jedoch hat sich die Zeit, bis der aktuelle Winkel um den Sollwinkel schwingt, auf ca. 6 ms verkürzt.

Es wurde nun mit einer PID-Regelung versucht, die Vorgaben zu erreichen. In den Abb. 5.7 und ?? aus Kap. 5.1.1.4 sind die Ergebnisse der PID-Regelung dargestellt. Es zeigt sich das von der P-, PI- und PD-Regelung bekannte Verhalten, dass bis zu entsprechenden Reglerwerten, der aktuelle Winkel zu weit vom Sollwinkel entfernt ist und bei einer nur kleinen Erhöhung eines der Parameter, ein Überspringen um den Sollwinkel einsetzt. Dies ist exemplarisch für den I-Anteil in Abb. ?? dargestellt. Die Zeit bis zum ersten durchstreichen des Sollwinkels ist etwas über 8 ms.

Mit dieser noch nicht zufriedenstellenden Regelung, wird der PID-Reglerblock in Simulink entfernt und eine P-Adaption in den Regelkreis eingebaut. Abb. ?? aus Kap. 5.1.2 zeigen diesen Aufbau. Mit der vorgeschalteten Funktion vor den P-Verstärker, soll eine geringere bleibende Regeldifferenz erreicht werden.

Wie aus den Abb. 5.11 und 5.12 aus Kap. 5.1.2.1 zu erkennen ist, wird der Sollwinkel noch nicht erreicht. Der aktuelle Winkel gelangt bei kleineren Parameterwerten nicht in die Nähe des Sollwinkels. Bei größeren Parameterwerten dagegen, ergibt sich wieder ein Überschwingen um den Sollwert. Auch mit dieser P-Adaption konnten keine Parameterwerte gefunden werden, mit der eine Regelung bei diesem Gleichstrommotor, den Vorgaben entsprechend realisiert werden konnte.

Um eine erfolgreiche Regelung zu erreichen, werden die Motorparameter angepasst, während die P-Adaption als Regelung behalten wird. Es wird zuerst die Induktivität und der Innenwiderstand eines Galvos eingesetzt, um so erneut Parameter zu finden, die eine erfolgreiche Regelung ermöglichen.

Mit diesen Parametern konnte zwar ein Überschwingen um den Sollwinkel nicht verhindert werden, jedoch hat sich die Zeit, bis zum ersten durchschreiten des Sollwinkels auf ca. 2 ms verkürzt. Abb. 5.13 aus Kap. 5.1.2.2 zeigt den Vorgang.

Nach entsprechenden Anpassungen konnte eine erfolgreiche Regelung aufgebaut werden. Abb. 5.14 aus Kap. 5.1.2.3 zeigt, dass die Einregelzeit unter 1 ms liegt und sich der aktuelle Winkel in den Regeldifferenzen befindet.

Ein Blick auf den Strom zeigt, dass weitere Anpassungen notwendig sind. Es wurde eine Strombegrenzung eingebaut und neue Regelparameter getestet. Siehe Abb. 5.15 und 5.17 aus Kap. 5.1.2.4.

Nach einigen Versuchen mit verschiedenen Parameter, ist wieder eine erfolgreiche Regelung aufgebaut worden. Der Strom ist auf 10 A begrenzt, die Einregelzeit liegt bei 1 ms und der aktuelle Winkel ist innerhalb der Vorgaben für die Regeldifferenz. Abb. 5.19 aus Kap. 5.1.2.5 zeigt die erfolgreiche Regelung.

Nach werden 3 verschiedenen Sensoren in den Regelkreis eingebracht.

Abb. 5.20 zeigt den Simulationsaufbau für die verschiedenen Sensoren. Die weitere Implementierung der verschiedenen Sensoren erfolgt über Parameter in den Matlab-Files.

Als der erste lineare Sensor das aktuelle Positionssignal lieferte, musste die Regelung angepasst werden. Mit den neuen Regelparametern konnte sogar eine noch kürzere Einregelzeit erreicht werden. Abb. 5.21 aus Kap. 5.1.3.1 zeigt die erfolgreiche Regelung.

Ohne die Regelparameter zu ändern, wurde der zweite lineare Sensor getestet. Die Regelung ist zwar genauso schnell, jedoch bleibt eine Regeldifferenz übrig. In Abb. 5.22 aus Kap. 5.1.3.2 ist der Vorgang dargestellt.

Die Simulation mit dem dritten, dem nicht linearen Sensor lieferte ebenfalls eine bleibende Regeldifferenz. In Abb. 5.23 aus Kap. 5.1.3.3 ist der Vorgang dargestellt. Die verbleibende Regeldifferenz wird auf die diskrete Faltung zurückgeführt, da sowohl für den Sensor mit linearem als auch nicht linearem Fehler deutliche Abweichungen im Gegensatz zum nicht linearen Sensor auftreten.

Nur durch die Anpassung der Motorwerte, des Spiegels und mit der Verwendung eines linearen Sensors, konnte eine den Vorgaben entsprechende Regelung evaluiert werden. Der Innenwiderstand und die Induktivität des Motors mussten verringert werden, um eine kleinere Zeitkonstante zu erhalten. Dies lässt sich mit entsprechend weniger Windungen im Motor realisieren. Dies bedingt gleichzeitig, eine Verringerung der Induzierten Spannung. Durch eine bessere Ausführung der Lager, kann der Reibungskoeffizient verringert werden. Somit sind die in dieser Simulationsstudie getätigten Änderungen am Motor nicht nur ein ideales Wunschverhalten, sondern theoretisch realisierbar.

Es wurde zudem das Drehmoment und die Trägheit des Spiegels verringert. Da die Vorgaben zu den Eigenschaften des Spiegels willkürlich gewählt wurden, sind diese Anpassungen vorstellbar. Durch eine Verkleinerung der Masse, der Höhe oder des Durchmessers, wird die Trägheit des Spiegels verringert. (siehe Form. 3.7) Da der Strahldurchmesser nicht zu den Anforderungen dieser Studie gehört, lässt sich die Spiegelfläche weiter reduzieren. Durch die Wahl eines anderen Materials kann das Gewicht verringert werden. Sollte der Spiegel eine geringere Trägheit aufweisen können, so wird zur Berechnung des Drehmomentes, die Beschleunigung verringert, siehe Form. 3.10 aus Kap. 3.2.

Als eine sehr strenge Bedingung ist ein linearer Sensor aufzuführen. Es zeigte sich, dass auch bei kleinen Abweichungen von der Linearität, eine genaue Regelung nicht mehr möglich ist, wie sie in Kap. 2 gefordert werden. Bei Galvos, die eigentlich für solche Aufgaben verwendet werden, werden üblicherweise Sensoren mit einer Linearität von 99,9% verwendet [?].

Der hier verwendete Integrationsalgorithmus wurde nicht verändert. Der Aufbau der Sensoren, der ganzen Simulation und um entsprechende Regelparameter zu evaluieren, nahm schon sehr viel Zeit in Anspruch, so dass es nicht möglich war, andere Integrationsalgorithmen zu testen.



## 7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Simulationsstudie sollte ein Gleichstrommotor auf eine bestimmte Winkelposition eingeregelt werden. Gleichstrommotoren werden i.d.R. auf eine vorgegebene Winkelgeschwindigkeit geregelt, insofern ergibt sich hier eine neue Aufgabenstellung.

Folgende Vorgaben ergeben sich aus der Aufgabenstellung (siehe Kap. 2):

- den maximalen Verstellwinkel von  $20^\circ$
- innerhalb einer Einstellzeit von 1 ms
- auf eine Genauigkeit von  $10^{-3}^\circ$  einzustellen.

Die Simulationsstudie wurde mit einem vorgegebenen Gleichstrommotor begonnen. Für diesen Motor wurde ein PID-Regler in Simulink integriert und unterschiedliche Regelparameter getestet. Der Sensor wurde noch nicht integriert, um erst einmal eine Regelung für einen Gleichstrommotor zu bekommen, mit der es überhaupt möglich ist, einen Winkel einzustellen.

Durch entfernen des PID-Reglers und implementieren einer P-Adaption sollte die verbleibende Regeldifferenz verringert werden. Es wurden verschiedene Simulationen durchgeführt, bei denen die Vorgaben auch nicht erreicht wurden. Es zeigte sich sogar, dass die Einregelzeit größer geworden war und die Regeldifferenz nicht wesentlich verbessert werden konnte.

Um die Vorgaben der Regelung dennoch einhalten zu können, wurden verschiedene Motorparameter verändert und neue Simulationen durchgeführt. Mit den veränderten Motorwerten konnte die Einregelzeit auf ca. 2 ms verkürzt werden. Jedoch konnte noch keine stabile Winkelposition erreicht werden.

Mit weiteren Veränderungen der Motorparameter und nun auch der Spiegelparameter wurden erneut verschiedenen Simulationen durchgeführt. Die Vorgaben konnten nun erfüllt werden.

Leider war der Strom zu hoch, weshalb eine Strombegrenzung implementiert wurde. Nach neuen Simulationen und anpassen verschiedenster Parameter wurde erneut eine erfolgreiche Regelung realisiert.

Mit dieser erfolgreichen Regelung wurden nun verschiedene Sensoren implementiert.

Es zeigte sich, dass ein linear übertragender Sensor von großer Wichtigkeit ist, da sonst eine bleibende Regeldifferenz entsteht.

Es konnte eine Regelung und ein Sensor simuliert werden, mit denen es möglich ist, die Vorgaben aus Kap. 2 zu erfüllen.





## A. Matlab-Files

### A.1. msSpiegelundSensor.m

```
1 % msSpiegel_Pad.m      (Matlab/Simulink R2011b)
2 %
3 % Vorgang: Regelung eines Gleichstrommotors zur Spiegelverstellung
4 % Verfahren: Simulink, mithilfe einer P-Adaption, eingebauter Strom-
5 %            begrenzung, angepasster Motorenwerte und eingebauter
6 %            Sensor
7 %
8 % Unterprogramme: sSpiegelPadStromNeu.slx
9 %                 sensor.m
10 %                 posEingabe.m
11 %
12 % #####
13 %
14 % Parameterbeschreibung:
15 %
16 % RA          Ankerwiderstand
17 % LA          Ankerinduktivität
18 %
19 % J           Traegheitsmoment
20 % r           Reibkonstante
21 %
22 % MSpiegel    Drehmoment  $f_{\frac{1}{4}} r$  Spiegel
23 %
24 % KMPHI       Motorkenngrösse
25 %
26 % phi         Sprunghöhe Motorwinkel
27 %
28 % te          Ende des Integrationsintervalls (ab t=0)
29 %
30 % xuX, xoX    Untere/obere Grenze der Grafiken
31 % 0
32 % #####
33 clear all
34 close all
35
36 % Funktionen die benoetigt werden sind hier gespeichert
37 addpath('/home/michamann/git/syt_ss13/');
38
39 % Auswahl Sensorverhalten
```

```

40 global mode
41 mode = 'nonlinear';           % linear1, linear2, nonlinear
42 global Unit
43 Unit = 'rad';
44
45 % Kennwerte fuer Sensor
46 Innenradius =5;              % in mm
47 Aussenradius =10;           % in mm
48 Lastwiderstand =6000;       % in Ohm
49
50 Photodioden = [Innenradius,Aussenradius,Lastwiderstand];
51 Messbereich = 20/180*pi;     % 45° in rad
52 LEDLeistung = 1;            % in W
53 Umgebungstemperatur = 300;   % in K
54 nonlinear = 0.0001;         % Wert zwischen 0 und 1
55
56 % Cell-Array fuer Kennwerte von Sensor
57 global Sensorkonstanten
58 Sensorkonstanten = sensorDaten(Photodioden,...
59                               Messbereich,...
60                               LEDLeistung,...
61                               Umgebungstemperatur,...
62                               nonlinear);
63
64
65 % Angabe der Parameter fuer Simulink fuer die weiteren Berechnungen
66 RA=0.1;                      % Innenwiderstand
67 LA=3e-6;                     % Induktivitaet
68 TA=LA/RA;                    % Zeitkonstante T1
69
70 J=93.3e-11;                  % kg m^2 Traegheitsmoment des Spiegels
71 r=6e-5;                      % Nm*s Reibung
72
73 KMPHI=35e-3;                 % Vs Motorkonstante
74
75 MSpiegel=30.25e-6;           % Nm Drehmoment fuer Spiegel
76
77 te=.002;                     % end of simulation time
78
79 phi = 19*pi/180;             % einzustellender Winkel
80
81 vu=-30;                      % uu=-30 V
82 vo=30;                       % uo=+30 V
83 iu=-15;                      % iu=-15 A
84 io=+15;                      % io=+15 A
85 pu1=-1;                      % phiu=-20° in rad 0.4
86 po1=1;                       % phio=+20° in rad -0.4
87 pu2=phi-0.5e-2*pi/180;       % Diagrammgrenzen fuer Regeldifferenz
88 po2=phi+0.5e-2*pi/180;       % Diagrammgrenzen fuer Regeldifferenz
89

```

```

90 % #####
91
92 % Plot: Eingangssignal u und Winkel phi
93 figure(1)
94 set(gcf,'Units','normal','Position',[.49 .7 .5 .9], ...
95     'NumberTitle','on','Name','u und v ');
96
97 % Integrationsalgorithmus:
98 t0=0;
99 opts=simset('solver','ode45',...
100     'InitialState',[],...
101     'Refine',1,...
102     'MaxStep',.00001);
103
104 [t,x,y]=sim('sSpiegelPadStromSensor',[t0 te],opts);
105
106 % Plots
107 subplot(3,1,1)
108 plot(t,y(:,1),'linewidth',2)
109 axis([0 te vu vo])
110 grid on
111 hold on
112 xlabel('t / s')
113 ylabel('u_e / V')
114 title('Gleichstrommotor: Motorspannung,')
115
116 subplot(3,1,2)
117 plot(t,y(:,2),t,phi,'linewidth',2,'linewidth',2);
118 axis([0 te pu1 po1])
119 grid on
120 xlabel('t / s')
121 ylabel('Phi / rad')
122 YTicks=get(gca,'YTick');
123 set(gca,'YTickLabel',num2str(YTicks(:), '%.1f'));
124 title('Gleichstrommotor: Winkel mit Sollwinkel')
125
126 subplot(3,1,3)
127 plot(t,y(:,2),...
128     t,phi,...
129     t,(phi-1e-3*pi/180),...
130     t,(phi+1e-3*pi/180),...
131     'linewidth',2,...
132     'linewidth',2,...
133     'linewidth',2,...
134     'linewidth',2);
135 axis([0 te pu2 po2])
136 grid on
137 xlabel('t / s')
138 ylabel('Phi / rad')
139 YTicks=get(gca,'YTick');

```

```

140 set(gca,'YTickLabel',num2str(YTicks(:), '%.5e'));
141 title('Gleichstrommotor: Sollwinkel mit Regeldifferenz')
142
143
144 % MÃ¶glichkeit, Strom und Winkelspannung auszugeben
145
146 % figure(2)
147 % plot(t,y(:,4),'linewidth',2);
148 % axis([0 te iu io])
149 % grid on
150 % xlabel('t / s')
151 % ylabel('i_A / A')
152 % title('Gleichstrommotor: Motorstrom')
153 % figure(2)
154 % plot(t,y(:,7),'linewidth',2);
155 % axis([0 te vu vo])
156 % grid on
157 % xlabel('t / s')
158 % ylabel('U / V')
159 % title('Sensor: aktuelle Winkelspannung')
160 % figure(3)
161 % plot(t,y(:,6),'linewidth',2);
162 % axis([0 te vu vo])
163 % grid on
164 % xlabel('t / s')
165 % ylabel('U / V')
166 % title('Eingabe: Sollwinkelspannung')
167
168 % Plot der variablen Schrittweite
169 % ht=diff(t)';
170 % ht=[ht ht(end)]';
171 % set(gcf,'Units','normal','Position',[.1 .2 .4 .2], ...
172 %      'NumberTitle','on','Name','h ');
173 % plot(t,ht,'x','markersize',9,'linewidth',2);
174 % grid on
175 % xlabel('t / s')
176 % ylabel('h / s')
177 % title('Schrittweite')
178 %end

```

## A.2. sensorDaten.m

```

1  %% Sensorkonstanten = sensorDaten(Photodioden,
2  %                                     Messbereich,
3  %                                     LEDLeistung,
4  %                                     Umgebungstemperatur)
5  % Erzeugt:
6  %     [Out]:
7  %     Array der Sensorkonstanten => Sensorkonstanten
8  %         1 signal_max in A
9  %         2 Lastwiderstand der Idealen Photodiode in Ohm
10 %         3 Azimutwinkel der Photodioden/Maximaler Messbereich in rad
11 %         4 signal_max in V
12 %         5 X Koordinaten der linearen Kennlinie
13 %         6 X Koordinaten der nicht linearen Kennlinie
14 %         7 Y- / Funktions-Werte der linearen Kennline
15 %         8 Y- / Funktions-Werte der nicht linearen Kennline
16 %
17 %     [In]:
18 %     Array der Diodendaten(geometrisch, elektrisch) => Photodioden
19 %         1 Innererradius r1 in mm
20 %         2 Äußererradius r2 in mm
21 %         3 Lastwiderstand in Ohm
22 %
23 %     Maximal messbarer Winkel +/- => Messbereich in rad
24 %
25 %     maximale Leistung der LED auf einer Diode => LEDLeistung in W
26 %     Umgebungstemperatur => Umgebungstemperatur in K
27
28 function Sensorkonstanten = sensorDaten(Photodioden,...
29 %                                     Messbereich,...
30 %                                     LEDLeistung,...
31 %                                     Umgebungstemperatur,...
32 %                                     nonlinear)
33 Sensorkonstanten{1}=sqrt(LEDLeistung/Photodioden(3)); % max Strom
34 Sensorkonstanten{2}=Photodioden(3); % Lastwiderstand
35 Sensorkonstanten{3}=Messbereich; % max Messbereich
36 Sensorkonstanten{4}=Sensorkonstanten{1}*Photodioden(3)*4;%max Spannung
37
38 %Sensorcharakteristik mittels Faltung von Fensterfunktionen
39 xmin = -2*pi;
40 xmax = 2*pi;
41 x = linspace(xmin,xmax,4000);
42
43 c = 1;
44 e = nonlinear;
45 b = Messbereich*2;
46 pb = 0;
47 ps1 = b/2;
48 g = [];

```

```
49 r = [];  
50 s1 = [];  
51 s2 = [];  
52 for i = x  
53     r(end+1) = frect(i,b,pb);  
54     s1(end+1) = frect(i,b,ps1);  
55     s2(end+1) = frect(i,b,-ps1);  
56 end  
57 r = 1-r;  
58 s1 = 1-s1;  
59 s2 = 1-s2;  
60 f1 = conv(r,s1);  
61 f1 = f1./max(f1);  
62 x21 = linspace(2*min(x),2*max(x),size(f1,2));  
63 f2 = conv(r,s2);  
64 f2 = f2./max(f2);  
65 Sensorkonstanten{5} = linspace(2*min(x),2*max(x),size(f2,2));  
66 for i = x21  
67     g(end+1) = gekern(i,e,c);  
68 end  
69 g = g./max(g);  
70  
71 gf1 = conv(g,f1);  
72 gf1 = gf1./max(gf1);  
73 gf2 = conv(g,f2);  
74 gf2 = gf2./max(gf2);  
75 Sensorkonstanten{6} = linspace(4*min(x),4*max(x),size(gf1,2));  
76 f = f1-f2;  
77 Sensorkonstanten{7} = f./max(f);  
78 gf = gf1-gf2;  
79 Sensorkonstanten{8} = gf./max(gf);  
80  
81 Sensorkonstanten{9} = Umgebungstemperatur;  
82  
83 end
```

### A.3. frect.m

```
1 function rect = frect(x,breit,pos)
2
3 while abs(x)/(pi/2) > 1
4     x = x - sign(x)*pi;
5 end
6
7 if and(x > (pos-breit/2),x<(pos+breit/2))
8     rect = 1;
9 else
10     rect = 0;
11 end
12
13 end
```

### A.4. gekern.m

```
1 function glatt = gekern(x,e,c)
2 xe = x/e;
3
4 if abs(xe) < 1
5     glatt = c*exp(-1/(1-xe^2));
6 else
7     glatt = 0;
8 end
9
10 glatt = 1/e * glatt;
11
12 end
```

## A.5. sensor.m

```

1  %% signal = sensor( Blendenwinkel, Unit, mode, Sensorkonstanten)
2  % Erzeugt:
3  %      [Out]:
4  %      Normiertes Spannungssignal +/-5V => signal in V
5  %
6  %      [In]:
7  %      aus Eingangswinkel => Blendenwinkel in
8  %      der angegebenen Einheit => Unit
9  %      Kennmode des Sensors => mode
10 %      Array aus Sensorkonstanten => Sensorkonstanten
11 %      1 signal_max in A
12 %      2 Lastwiderstand der Idealen Photodiode in Ohm
13 %      3 Azimutwinkel der Photodiodennonlinear
14 %      4 signal_max in V
15 %      Unit cases: 'grad', 'mgrad', 'rad', 'mrad'
16 %      mode cases : 'linear', ...
17
18 function signal = sensor(Blendenwinkel)
19
20 global Unit
21 global mode
22 global Sensorkonstanten
23
24 %% Umrechnung der Eingangseinheit
25 switch Unit
26     case 'grad'
27         phiB = Blendenwinkel/180*pi;
28     case 'mgrad'
29         phiB = Blendenwinkel/1000/180*pi;
30     case 'rad'
31         phiB = Blendenwinkel;
32     case 'mrad'
33         phiB = Blendenwinkel/1000;
34 end
35 %% Rauschen aus Temperaturspannung
36 % kb = 8.6173324*10^-5; % eV/K
37 % e = 1; % eV
38 % T = Sensorkonstanten{9};
39 % RLast = Sensorkonstanten{2};
40 % zufall = 0.5-rand();
41 % UT = kb*T/e/RLast % in V
42 % Rauschen = UT+UT*zufall
43
44 Rauschen = rand()*Sensorkonstanten{1}/10;
45
46 switch mode
47     case 'einzelnGruppe'
48

```



```

49     a=@(phi)1/Sensorkonstanten{3}/2*phi+0.5;% lineares Model
50
51     S1=@(phi,d)Sensorkonstanten{1}*(a(phi))+d;% Signal Sensor 1
52     S3=@(phi,d)Sensorkonstanten{1}*(a(phi))+d;% Signal Sensor 3
53     S2=@(phi,d)Sensorkonstanten{1}*(1-a(phi))+d;% Signal Sensor 2
54     S4=@(phi,d)Sensorkonstanten{1}*(1-a(phi))+d;% Signal Sensor 4
55
56     S13=@(phi,d)S1(phi,d)+S3(phi,d);
57     S24=@(phi,d)S2(phi,d)+S4(phi,d);
58
59     Iph=@(phi,d)S13(phi,d);% Gesamt Photostrom
60
61     signal=Iph(phiB,Rauschen)*Sensorkonstanten{2};% [Out]
62
63     case 'linear1'
64         a=@(phi)1/Sensorkonstanten{3}*phi+0.5;% lineares Model
65
66         S1=@(phi,d)Sensorkonstanten{1}*(a(phi))+d;% Signal Sensor 1
67         S3=@(phi,d)-Sensorkonstanten{1}*(a(phi))+d;% Signal Sensor 3
68         S2=@(phi,d)Sensorkonstanten{1}*(1-a(phi))+d;% Signal Sensor 2
69         S4=@(phi,d)-Sensorkonstanten{1}*(1-a(phi))+d;% Signal Sensor 4
70
71         S13=@(phi,d)S1(phi,d)-S3(phi,d);
72         S24=@(phi,d)S2(phi,d)-S4(phi,d);
73
74         Iph=@(phi,d)S13(phi,d)-S24(phi,d); % Gesamt Photostrom
75         signal=Iph(phiB,Rauschen)*Sensorkonstanten{2}; % [Out]
76
77     case 'linear2'
78         AP=abs(Sensorkonstanten{5}-phiB);
79         ind1=find(AP==min(AP));
80         ind2=find(AP==min(AP(AP~=min(AP))));
81         X1=Sensorkonstanten{5}(ind1);
82         X2=Sensorkonstanten{5}(ind2);
83         Y1=Sensorkonstanten{7}(ind1);
84         Y2=Sensorkonstanten{7}(ind2);
85
86         I0=Sensorkonstanten{1}*4;
87         Iph=@(phiB)I0*((Y2-Y1)/(X2-X1)*phiB+(X2*Y1-X1*Y2)/(X2-X1));
88         signal=Iph(phiB)*Sensorkonstanten{2};
89
90     case 'nonlinear'
91         AP=abs(Sensorkonstanten{6}-phiB);
92         ind1=find(AP==min(AP));
93         ind2=find(AP==min(AP(AP~=min(AP))));
94         X1=Sensorkonstanten{6}(ind1);
95         X2=Sensorkonstanten{6}(ind2);
96         Y1=Sensorkonstanten{8}(ind1);
97         Y2=Sensorkonstanten{8}(ind2);
98

```

```
99         I0=Sensorkonstanten{1}*4;
100         Iph=@(phiB) I0*((Y2-Y1)/(X2-X1)*phiB+(X2*Y1-X1*Y2)/(X2-X1));
101         signal=Iph(phiB)*Sensorkonstanten{2};
102     end
103
104     %Signalbegrenzung
105     if signal > Sensorkonstanten{4}
106         signal = Sensorkonstanten{4};
107     elseif signal < -Sensorkonstanten{4}
108         signal = -Sensorkonstanten{4};
109     end
110
111 end
```

## A.6. posEingabe.m

```
1  %% sollsignal = posEingabe(phiPos)
2  % Erzeugt:
3  %       [Out]:
4  %       sollsignal
5  %
6  %       [In]:
7  %       sollwinkel
8
9
10 function sollsignal = posEingabe(phi)
11
12 global Unit
13 global Sensorkonstanten
14
15 switch Unit
16     case 'grad'
17         phiPos = phi/180*pi;
18     case 'mgrad'
19         phiPos = phi/1000/180*pi;
20     case 'rad'
21         phiPos = phi;
22     case 'mrad'
23         phiPos = phi/1000;
24 end
25
26 % if abs(phiPos) > Sensorkonstanten{3}
27 %     phiPos = Sensorkonstanten{3}*sign(phiPos);
28 % end
29 %
30 sollsignal = (phiPos*1/(Sensorkonstanten{3})) * Sensorkonstanten{4};
31
32 end
```



## B. Simulink-Files

### B.1. 1



# Literaturverzeichnis





# Abbildungsverzeichnis

1.1. 2 Laserablenkspiegel [?]	2
1.2. Fokusebene [?]	2
1.3. Fokusline	3
3.1. Allgemeiner Aufbau des simulierten Systems	9
3.2. Elektrischer Teil des Motors	12
3.3. Mechanischer Teil des Motors	13
3.4. Aufbau des Motors	14
3.5. Allgemeines Funktionsdiagramm des Sensors	15
3.6. Allgemeiner Aufbau des Sensors	16
3.7. Skizze des Funktionsprinzips des Sensors	16
4.1. Simulink Grundprogramm	20
4.2. Diodenfunktion und lineare Faltungsfunktion	23
4.3. Vergleich der ungeglätteten mit der geglätteten Funktion	23
4.4. Kennlinie des Sensors im mode: einzelGruppe	24
4.5. Kennlinie des Sensors im mode: linear1	24
4.6. Kennlinie des Sensors im mode: linear2	25
4.7. Kennlinie des Sensors im mode: nonlinear	25
5.1. P-Anteil von 40	28
5.2. P-Anteil von 45	28
5.3. P-Anteil von 30 und I-Anteil von 17	29
5.4. P-Anteil von 30 und I-Anteil von 18	30
5.5. P=22 - D=1 - N=1	30
5.6. P=22 - D=1 - N=1	31
5.7. P=20 - I=15 - D=1 - N=1	31
5.8. P=20 - I=16 - D=1 - N=1	32
5.9. P-Adaption [?]	32
5.10. P-Adaption in Simulink	33
5.11. P-Adaption mit Parametern	33
5.12. P-Adaption mit Parametern	34
5.13. P-Adaption mit neuen Motorparametern	35
5.14. P-Adaption mit neuen Parametern	36
5.15. Stromhöhe während der Regelung	37
5.16. P-Adaption mit Strombegrenzung	37
5.17. Motorstroms mit Strombegrenzung auf $\pm 10$ A	37
5.18. P-Adaption mit Strombegrenzung	38
5.19. Angepasste P-Adaption mit Strombegrenzung	39

5.20. Simulinaufbau mit Sensor . . . . .	39
5.21. Erster linearer Sensor . . . . .	41
5.22. Zweiter linearer Sensor . . . . .	41
5.23. Nichtlinearer Sensor . . . . .	42

# Eidesstattliche Erklärung

Wir versichern hiermit gemäß § 35 Abs.7 der Rahmenprüfungsordnung für Fachhochschulen in Bayern, dass wir die vorliegenden schriftliche Arbeit mit dem Titel:

## **Simulationsstudie: Regelung eines Laserablenkspiegels**

selbständig angefertigt, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt haben.

Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, haben wir in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle (einschließlich Internet sowie anderer elektronischer Datensammlungen) deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt auch für angefügte Zeichnungen, bildliche Darstellungen, Skizzen und dergleichen.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift (Michael Jost)

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift (Sebastian Schleich)