

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

1. Einführung	1
2. Aufgabenstellung	5
3. Mathematische Modellbildung	7
3.1. Das System	7
3.2. Der Spiegel	7
3.3. Der Motor	9
3.4. Der Sensor	9
3.4.1. Das physikalische Modell des Sensors	9
3.4.2. Das lineare Sensormodell	10
3.4.3. Das nicht lineare Sensormodell	10
4. Programmentwicklung	13
5. Simulationsdurchführung	15
6. Diskussion	27
7. Zusammenfassung	29
A. Matlab-Files	31
A.1. msSpiegelundSensor.m	31
A.2. sensorDaten.m	35
A.3. frect.m	37
A.4. gekern.m	37
A.5. sensor.m	38
A.6. posEingabe.m	41
B. Simulink-Files	43
B.1. 1	43
Literaturverzeichnis	45
Abbildungsverzeichnis	47
Tabellenverzeichnis	49

Eidesstattliche Erklärung

51

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 die Größe der Spiegel und der Motoren unterscheiden sich, 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.

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.

In Abb. 1 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 entsprechende Anordnung können so Werkstücke größeren Ausmaßes beschriftet werden.



Abb. 1.1.: 2 Laserablenkspiegel [?]

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.

Es sollen verschiedene Winkel eingestellt werden, wobei die größte Winkeländerung 20° betragen soll. Die größte Winkeländerung soll mit einer Einstellzeit von 1 ms und mit einer Regelgenauigkeit von $1e-3^\circ$ erreicht 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

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

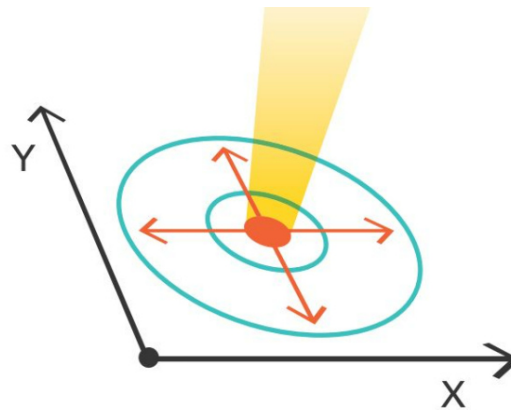


Abb. 1.2.: Fokusebene [?]

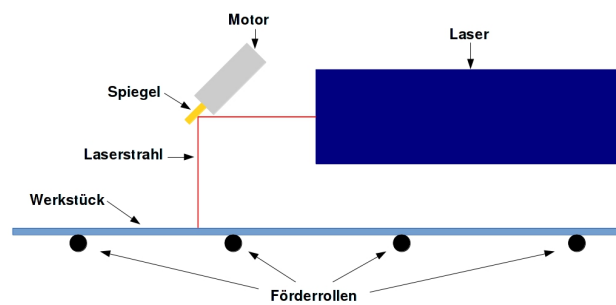


Abb. 1.3.: Fokusline

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 Gleichstrommotor, auf dessen Welle ein Spiegel 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 gewählten 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° 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 Lichtintensitäten auf 4 Sensoren
- es müssen verschiedene Parameter wie, Trägheitsmomente von Spiegel und Welle, Drehmomente, induzierte Spannungen und z.B. Lichtintensitäten beachtet 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 beachtet

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.

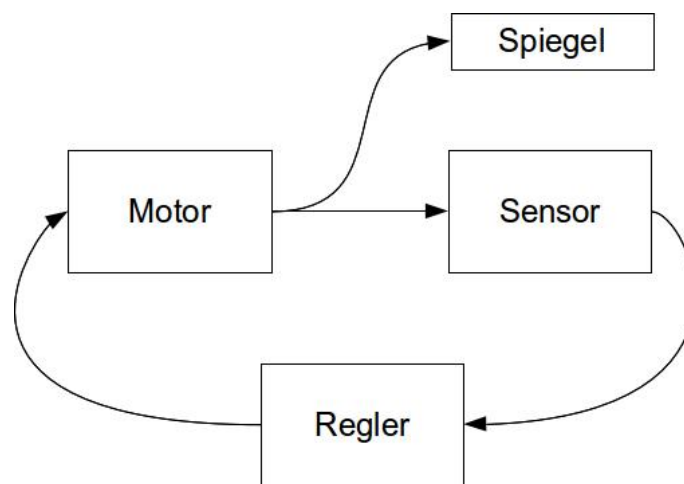


Abb. 3.1.: Allgemeiner Aufbau des simulierten Systems

3.2. Der Spiegel

Lineares Modell für die Berechnungen:

$$\Delta\phi = 20^\circ = 0,349rad$$

$$\Delta t = 1ms = 0,001s$$

$$\omega = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{0,349rad}{0,001s} = 349rad/s$$

(3.1)

Es ergibt sich eine Durchschnittswinkelgeschwindigkeit von 349 rad/s, um einen Winkel von 20° in 1 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:

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= 698 \text{ rad/s} \\ \Delta t &= 0,5 \text{ ms} = 0,0005 \text{ s} \\ \alpha &= \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{698 \text{ rad/s}}{0,0005 \text{ s}} = 1,396 * 10^6 \text{ rad/s}^2\end{aligned}\quad (3.2)$$

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 ms wieder mit dem gleichen Betrag der Beschleunigung abgebremst zu werden.

Modell für den Spiegel:

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

Das Trägheitsmoment des Spiegels beträgt demnach:

$$\begin{aligned}J &= \frac{1}{4} * m * R^2 + \frac{1}{12} * m * h^2 \\ J &= 1 \frac{4 * 10 * 10^{-3} * (6 * 10^{-3})^2 + \frac{1}{12} * 10 * 10^{-3} * (2 * 10^{-3})^2}{\text{J} = 93,3 * 10^{-9} \text{ kgm}^2} \quad (3.3)\end{aligned}$$

Aus den oben berechneten Daten ergibt sich ein Lastmoment von:

$$\begin{aligned}M_L &= J * \alpha \\ M_L &= 93,3 * 10^{-9} \text{ kgm}^2 * 1,396 * 10^6 \text{ rad/s}^2 \\ M_L &= 130,25 * 10^{-3} \text{ Nm} \quad (3.4)\end{aligned}$$

Theoretische Maximale Leistung eines Gleichstrommotors:

$$P = M_L * \omega$$

$$P = 130,25 * 10^{-3} Nm * 698 rad/s$$

$$P = 91 W \quad (3.5)$$

3.3. Der Motor

In der Regel werden Laserablenkespiegel 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 KPHI 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.

3.4. 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. 3.2 auf in:

- Einer Lichtquelle: LED mit einer Strahlungsleistung $\phi_e(\theta)$
- 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

Die LED

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

Die Blende

Die Blende wird im folgenden als masselos und völlig lichtundurchlässig angenommen.

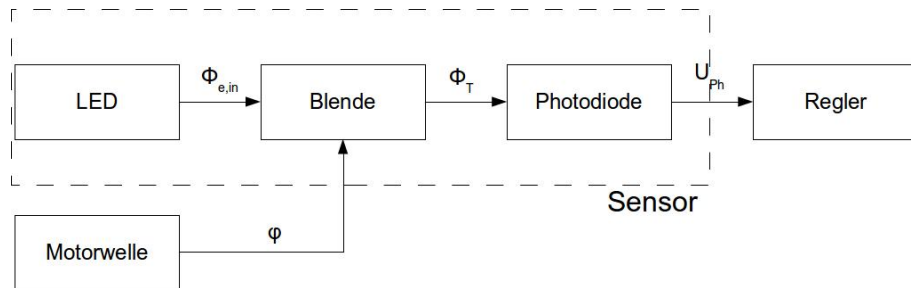


Abb. 3.2.: Allgemeiner Aufbau des Sensors

3.4.2. Das lineare Sensormodell

3.4.3. Das nicht lineare Sensormodell

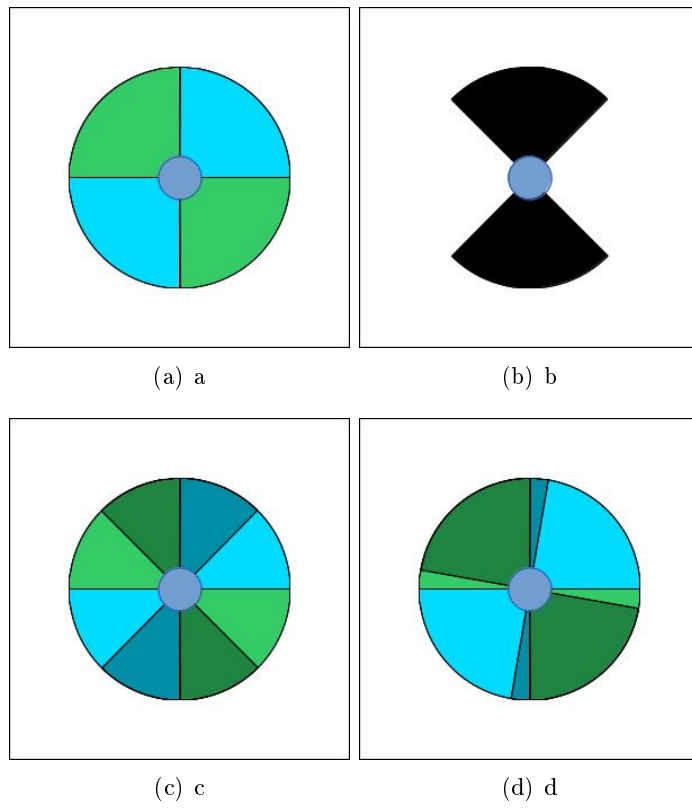


Abb. 3.3.: Sensor Funktionen

4. Programmentwicklung

text

5. Simulationsdurchführung

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

Es wird eine Spannungsbegrenzung von ± 24 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 2 verschiedene Sensoren das Positionssignal liefern.

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.

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 "*msSpiegelPID.münddasSimulink-FileßSpiegel.slx*" hergenommen.

In Abb. 5.4 ist das Ergebnis der PI-Regelung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach ca. 13 ms es keine Veränderung des eingesetllten Winkels gibt. Eine Erhöhung des P- oder I-Anteils ergibt ein Überschwingen, wie es in Abb. 5.4 dargestellt ist. In Abb. 5.4 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.

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 eingesetllten 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

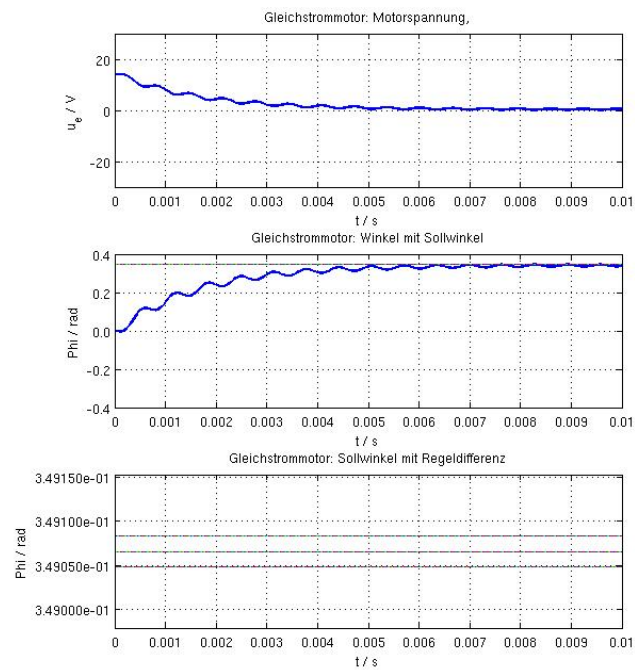


Abb. 5.1.: P-Anteil von 40

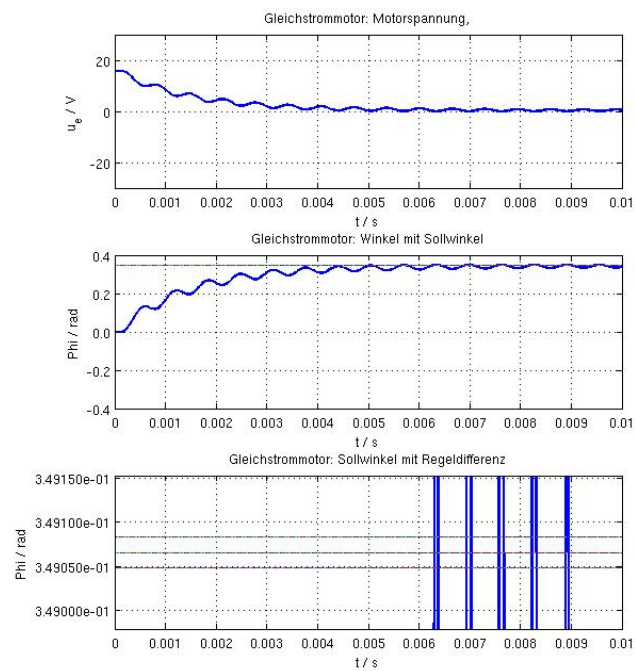


Abb. 5.2.: P-Anteil von 45

Grafik der Sollwinkel sowie die angegebene Abweichung angezeigt. Wie zu erkennen ist, ist die verbleibende Regeldifferenz noch viel zu groß.

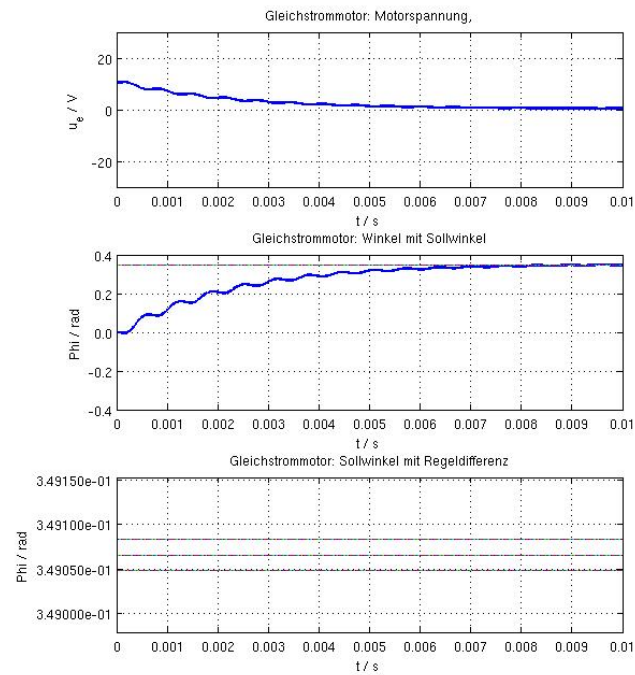


Abb. 5.3.: P-Anteil von 30 und I-Anteil von 17

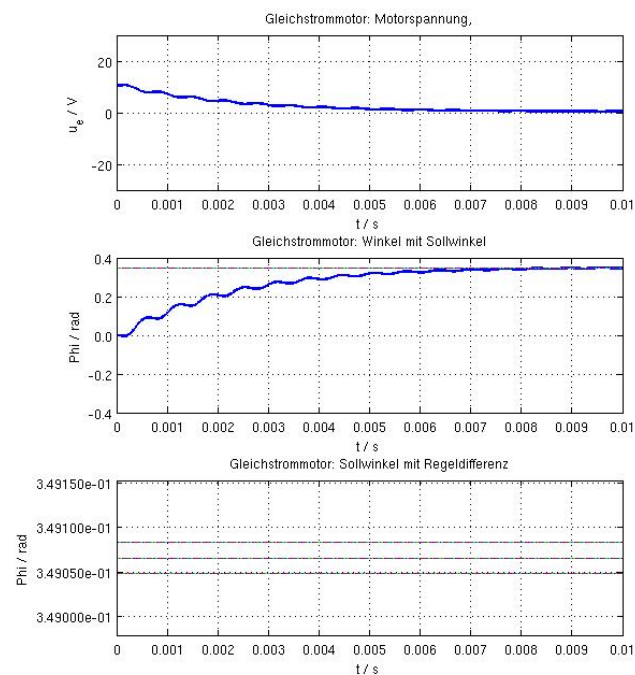


Abb. 5.4.: P-Anteil von 30 und I-Anteil von 17

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

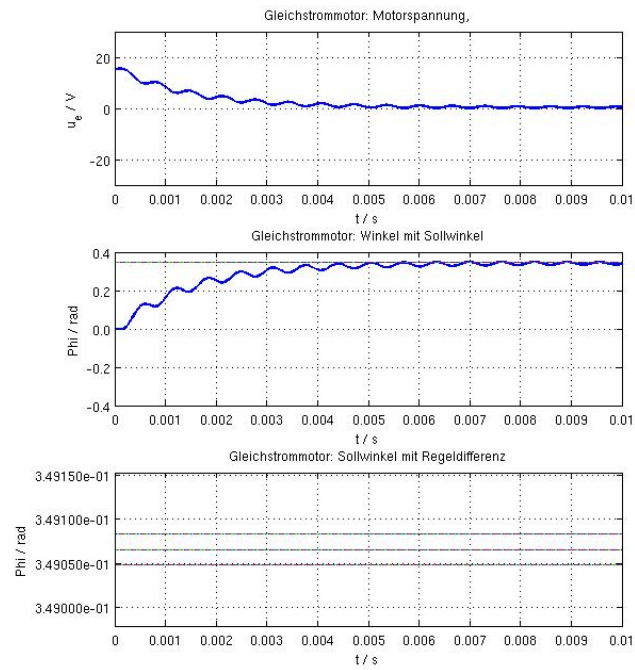


Abb. 5.5.: P=22 - D=1 - N=1

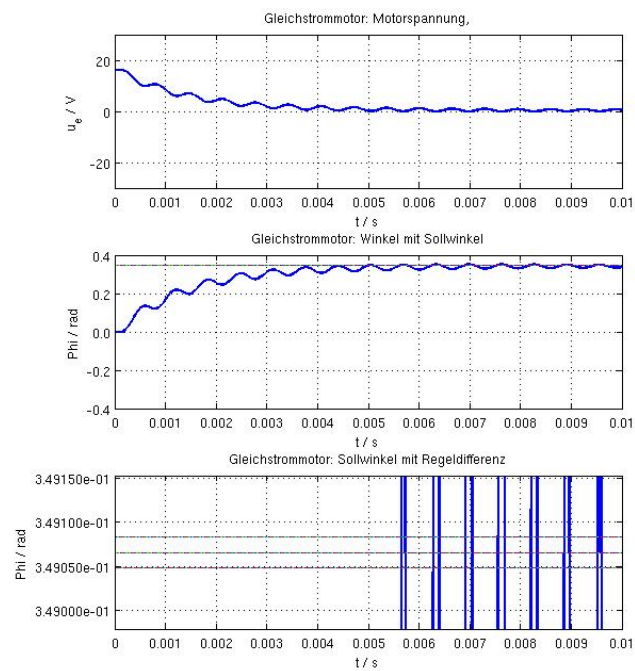


Abb. 5.6.: P=22 - D=1 - N=1

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.

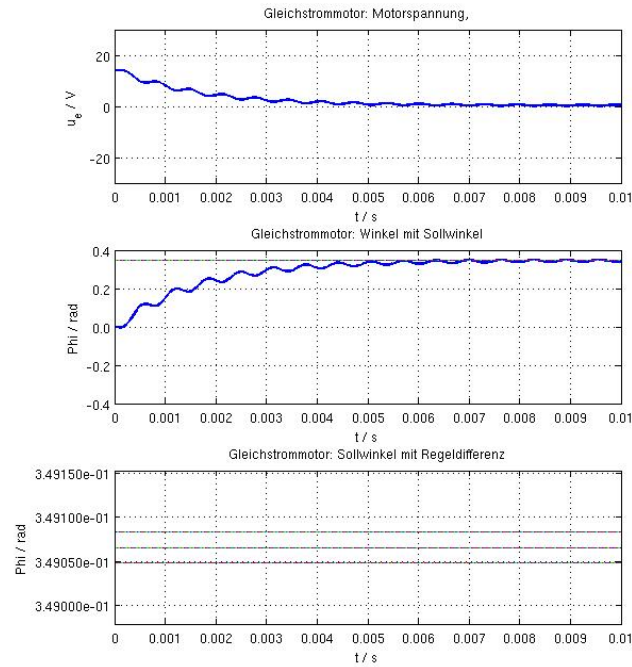


Abb. 5.7.: $P=20$ - $I=15$ - $D=1$ - $N=1$

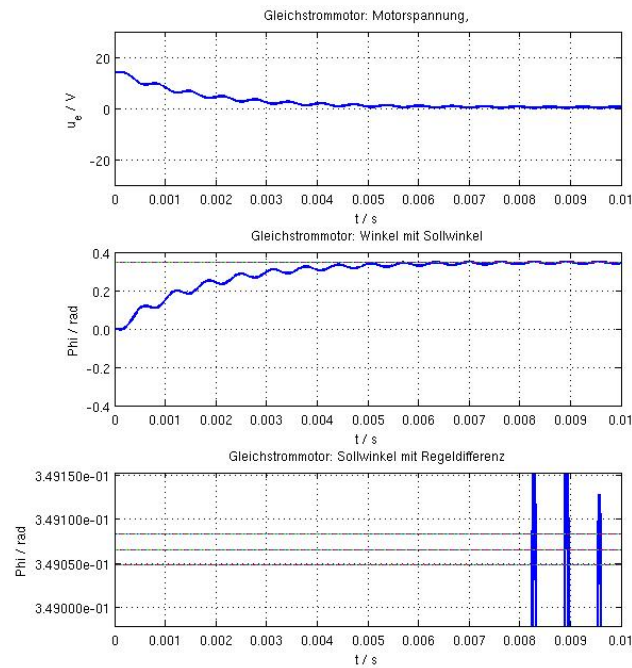


Abb. 5.8.: $P=20$ - $I=16$ - $D=1$ - $N=1$

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:

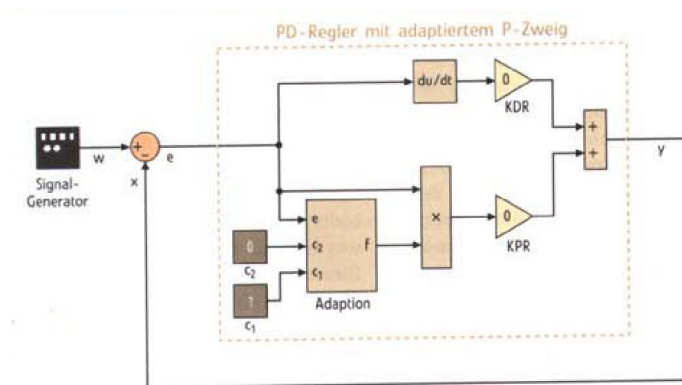


Abb. 5.9.: P-Adaption

Quelle: PDF, "Tempo beim Laserzugriff", Artikel im FM Elektronik, Jahrg.111(2003)5, Lugmair, Froriep, Kuplent, Langhans

Nun kann mit drei verschiedenen Parametern versucht werden, die Sollwerte zu erreichen. Wobei die beiden f-Parameter zu Beginn auf 1 gesetzt werden und erst mit dem Erhöhen des P-Anteils versucht wird, eine gute Regelung zu erhalten. Danach werden die beiden f-Parameter einzeln erhöht bzw. erniedrigt, bis sich das Ergebnis verbessert hat. Eine Anpassung des P-Anteils und danach eine erneute Anpassung der f-Parameter gehört ebenso zur Erreichung einer passenden Regelung. Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File "msSpiegelpad.münddasSimulink – FileßSpiegelPad.slx" hergenommen.

In Abb. 5.10 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. 5.11.

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 müsste, 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. Beispielfhaft wurden Werte für den

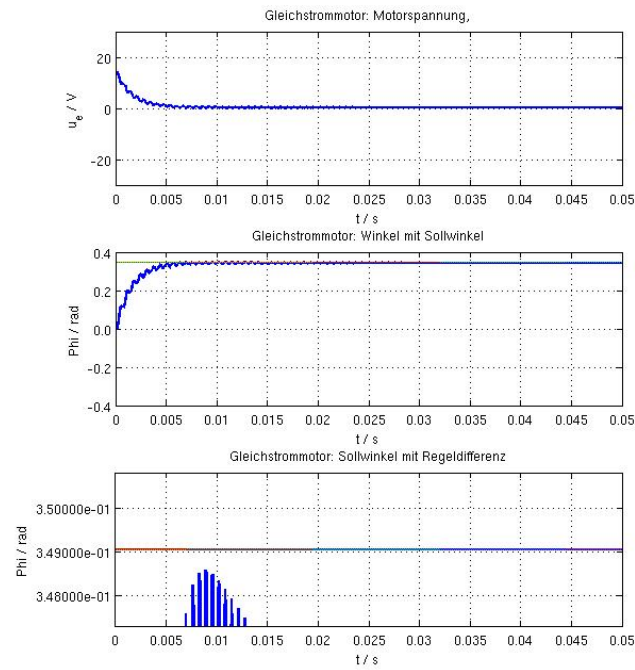


Abb. 5.10.: P-Adaption mit Parametern

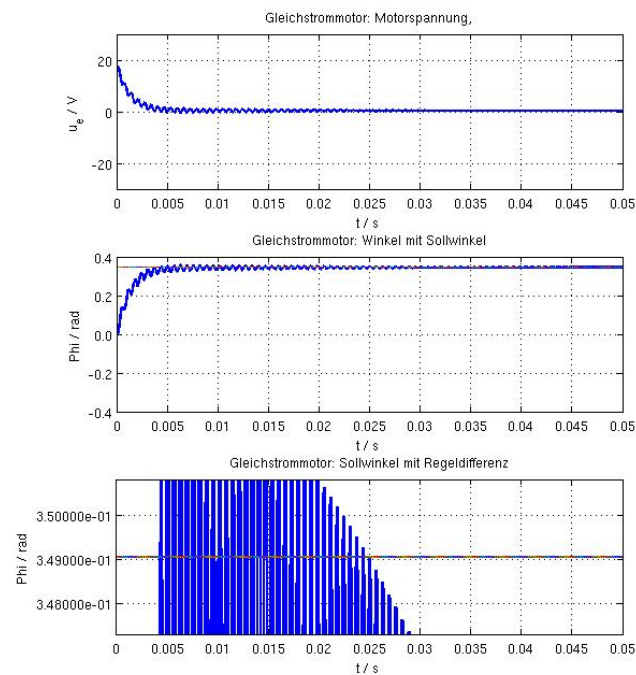


Abb. 5.11.: P-Adaption mit Parametern

Innenwiderstand und der Induktivität eines Galvos 6230 der Firma Cambridge Technology als Grundlage verwendet.

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

Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File "*msSpiegelpadWerte.münddasSimulink-FileßSpiegelPad.slx*" hergenommen.

In Abb. 5.12 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: 1.07Ω Induktivität der Spule : $173 \mu H$ – Anteil : $330 f_1 : 5 f_2 : 370$

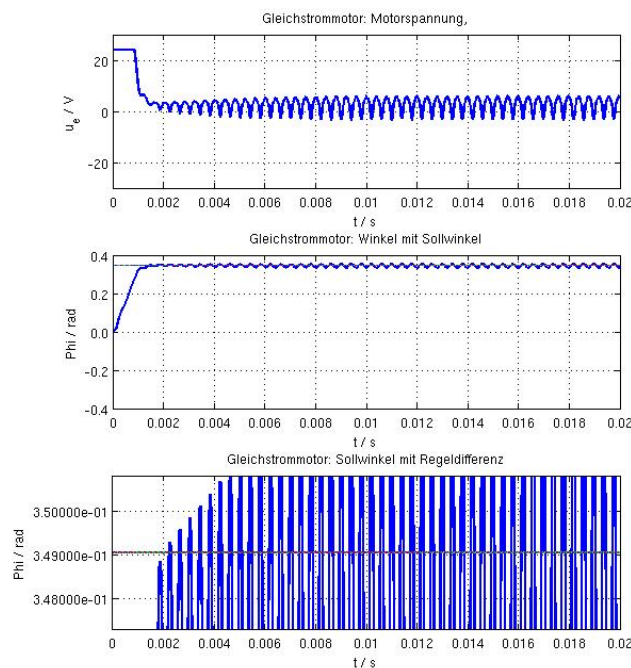


Abb. 5.12.: P-Adaption mit neuen Motorparametern

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

Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File "*msSpiegelpadNeueWerte.münddasSimulink-FileßSpiegelPad.slx*" hergenommen.

Wie in Abb. 5.13 zu erkennen, ist die Regelung in den geforderten Bereichen erfolgreich. Der geforderte Winkel von 20° ist unter 1ms in seinen Regeldifferenzen erreicht. Dieser Regelung liegen folgende Werte zu Grunde: Innenwiderstand der Spule: 0.1Ω Induktivität der Spule : $3 \mu H$ Motorkonstante $K_M \Phi I : 35 e-3 V s$ Reibungskoeffizient : $6 e-5 N m * s$ Trgheitsmoment des Spiegels : $93.3 e-9 kg * m^2$ Drehmoment auf den Spiegel: $130.25 e-6 N m$ P-Anteil: 320 $f_1 : 2 f_2 : 160$

Ein Blick auf den Strom liefert allerdings Ergebnisse, die weiterer Überarbeitung bedürfen. In Abb. 5.14 ist der Strom der aktuellen Regelung dargestellt. Es fließen Ströme in Höhe von 80 A.

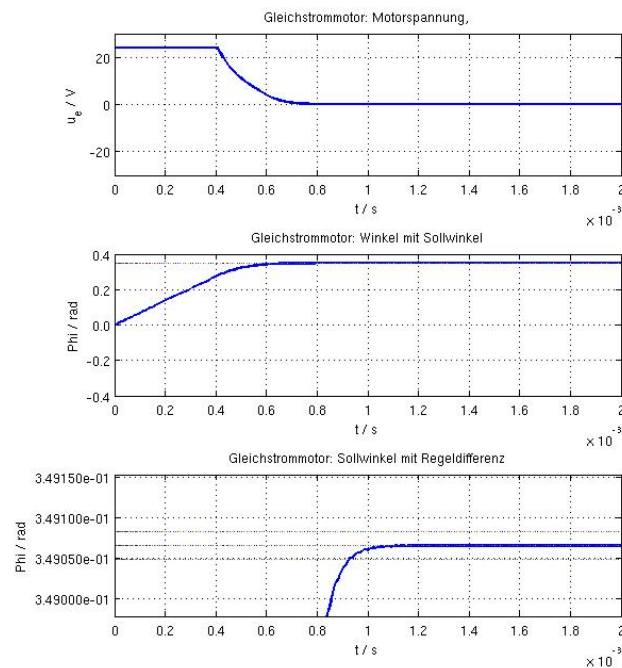


Abb. 5.13.: P-Adaption mit neuen Parametern

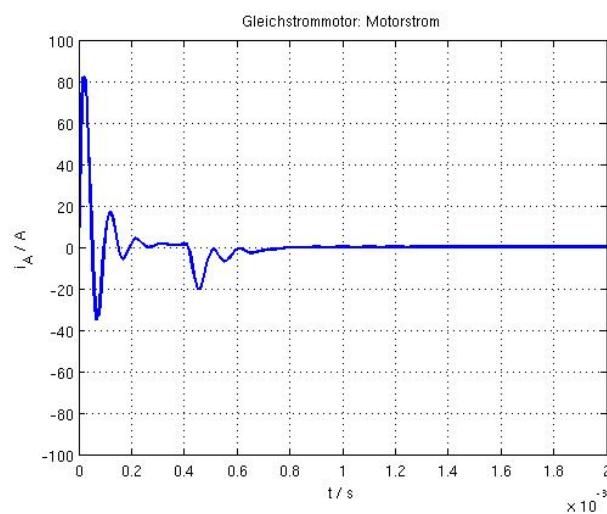


Abb. 5.14.: Stromhöhe während der Regelung

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

Für die folgenden Simulationen wird das Matlab-File "`msSpiegelpadNeueWertestrom.münddasSimulink-FileßSpiegelPadStrom.slx`" hergenommen.

Eine Regelung mit den aktuellen Werten zeigt das in Abb. 5.15 zu erkennende Ergebnis.

Durch weiteres Anpassen der unterschiedlichen Parameter, konnten die Sollwerte fast erreicht werden. Abb. 5.16 zeigt schon ein sehr gutes Ergebnis. Neues Trägheitsmoment des

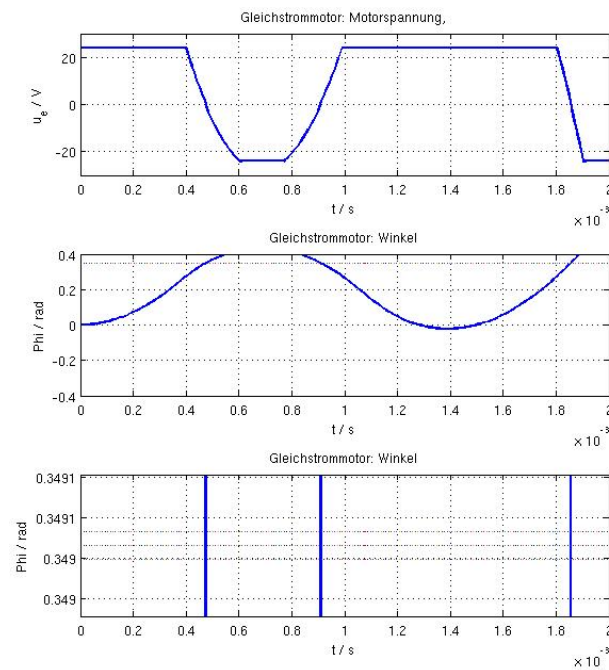


Abb. 5.15.: P-Adaption mit Strombegrenzung

Spiegels: $93.3 \times 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ Neues Drehmoment auf den Spiegel: $30,25 \times 10^{-6} \text{ Nm}$ P-Anteil: 218
 f_1 : 5 f_2 : 400

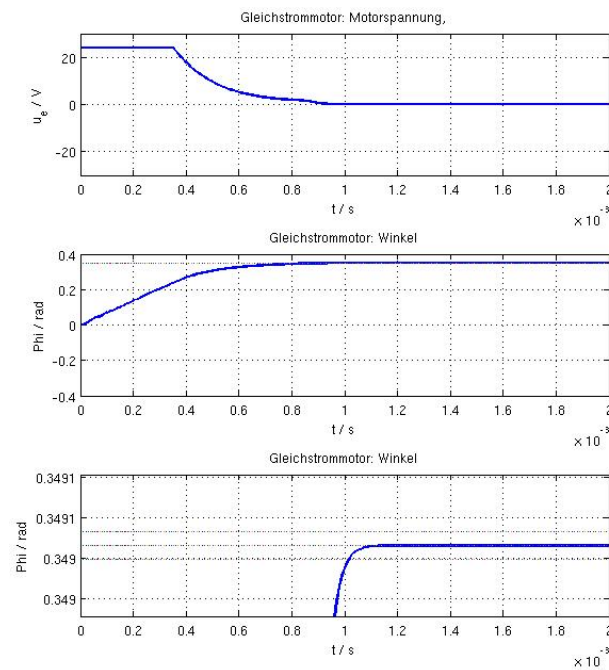


Abb. 5.16.: Angepasste P-Adaption mit Strombegrenzung

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

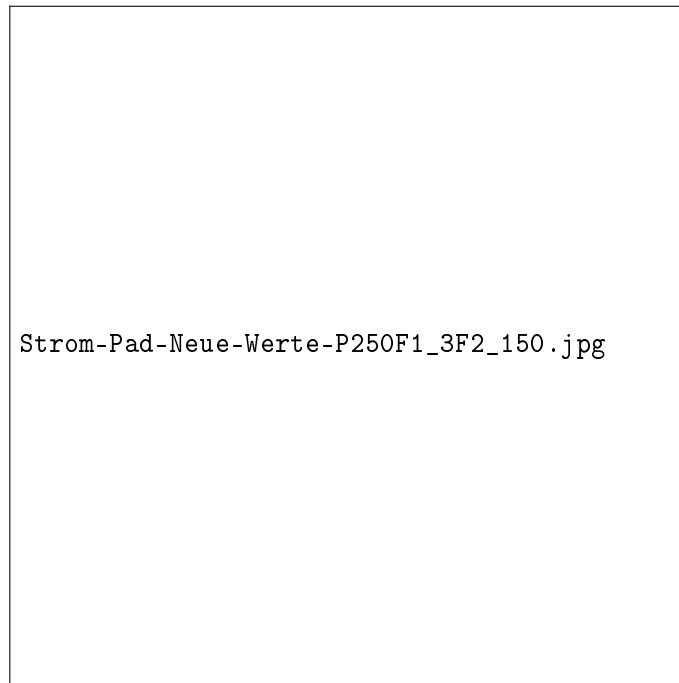


Abb. 5.17.: Angepasste P-Adaption mit Strombegrenzung

Trägheitsmoment des Spiegels: $93.3e-11 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ Drehmoment auf den Spiegel: $30,25e-6 \text{ Nm}$
P-Anteil: 250 f_1 : 3 f_2 : 150

In Abb. 5.17 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.

6. Diskussion

text

7. Zusammenfassung

text

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
5 %
6 % Unterprogramme: sSpiegelPadStromNeu.slx
7 %                  sensorDaten.m
8 %
9 % #####
10 %
11 % Parameterbeschreibung:
12 %
13 % RA          Ankerwiderstand
14 % LA          Ankerinduktivität
15 %
16 % J           Trägheitsmoment
17 % r           Reibkonstante
18 %
19 % KMPHI       Motorkenngrößen
20 %
21 % uephi       Sprunghöhe Motorwinkel
22 %
23 % te         Ende des Integrationsintervalls (ab t=0)
24 %
25 % ug, og     Untere/obere Grenze der Grafiken
26 %0
27 % #####
28 clear all
29 close all
30
31 % Funktionen die benötigt werden sind hier gespeichert
32 addpath('/home/michamann/git/syt_ss13/');
33
34 % Auswahl Sensorverhalten
35 global mode
36 mode = 'nonlinear';
37 global Unit
38 Unit = 'rad';
39
```

```

40 % Kennwerte fuer Sensor
41 Innenradius =5; % in mm
42 Aussenradius =10; % in mm
43 Lastwiderstand =6000; % in Ohm
44
45 Photodioden = [Innenradius,Aussenradius,Lastwiderstand];
46 Messbereich = 20/180*pi; % 45° in rad
47 LEDLeistung = 1; % in W
48 Umgebungstemperatur = 300; % in K
49 nonlinear = 1; % Wert zwischen 0 und 1
50
51 % Cell-Array fuer Kennwerte von Sensor
52 global Sensorkonstanten
53 Sensorkonstanten = sensorDaten(Photodioden,...
54                               Messbereich,...
55                               LEDLeistung,...
56                               Umgebungstemperatur,...
57                               nonlinear);
58
59
60 % Angabe der Parameter fuer Simulink fuer die weiteren Berechnungen
61 RA=0.1; % Innenwiderstand des Galvos
62 LA=3e-6; % Induktivitaet des Galvos
63 TA=LA/RA; % Zeitkonstante T1
64
65 J=93.3e-11; % kg m^2 Traegheitsmoment des Spiegels
66 r=6e-5; % Nm*s Reibung
67
68 KMPHI=35e-3; % Vs Motorkonstante
69
70 Mspiegel=30.25e-6; % Nm Drehmoment fuer Spiegel
71
72 te=.002; % end of simulation time
73
74 phi = 19*pi/180; % einzustellender Winkel
75
76 vu=-30; % uu=-30 V
77 vo=30; % uo=+30 V
78 iu=-15; % iu=-15 A
79 io=+15; % io=+15 A
80 pu1=-1; % phiu=-20° in rad 0.4
81 po1=1; % phio=+20° in rad -0.4
82 pu2=phi-0.5e-2*pi/180;% Diagrammgrenzen fuer Regeldifferenz
83 po2=phi+0.5e-2*pi/180;% Diagrammgrenzen fuer Regeldifferenz
84 % #####
85 % Plot: Eingangssignal u
86 figure(1)
87 set(gcf,'Units','normal','Position',[.49 .7 .5 .9], ...
88      'NumberTitle','on','Name','u und v ');
89

```

```

90 % Integrationsalgorithmus:
91 t0=0;
92 opts=simset('solver','ode45',...
93     'InitialState',[],...
94     'Refine',1,...
95     'MaxStep',.00001);
96
97 [t,x,y]=sim('sSpiegelPadStromSensor',[t0 te],opts);
98
99 % Plots
100 subplot(3,1,1)
101 plot(t,y(:,1),'linewidth',2)
102 axis([0 te vu vo])
103 grid on
104 hold on
105 xlabel('t / s')
106 ylabel('u_e / V')
107 title('Gleichstrommotor: Motorspannung,')
108
109 subplot(3,1,2)
110 plot(t,y(:,2),t,phi,'linewidth',2,'linewidth',2);
111 axis([0 te pu1 po1])
112 grid on
113 xlabel('t / s')
114 ylabel('Phi / rad')
115 YTicks=get(gca,'YTick');
116 set(gca,'YTickLabel',num2str(YTicks(:), '%.1f'));
117 title('Gleichstrommotor: Winkel')
118
119 subplot(3,1,3)
120 plot(t,y(:,2),...
121     t,phi,...
122     t,(phi-1e-3*pi/180),...
123     t,(phi+1e-3*pi/180),...
124     'linewidth',2,...
125     'linewidth',2,...
126     'linewidth',2,...
127     'linewidth',2);
128 axis([0 te pu2 po2])
129 grid on
130 xlabel('t / s')
131 ylabel('Phi / rad')
132 YTicks=get(gca,'YTick');
133 set(gca,'YTickLabel',num2str(YTicks(:), '%.5e'));
134 title('Gleichstrommotor: Sollwinkel und Toleranzen')
135
136 % figure(2)
137 % plot(t,y(:,4),'linewidth',2);
138 % axis([0 te iu io])
139 % grid on

```

```
140 % xlabel('t / s')
141 % ylabel('i_A / A')
142 % title('Gleichstrommotor: Motorstrom')
143 % figure(2)
144 % plot(t,y(:,7),'linewidth',2);
145 % axis([0 te vu vo])
146 % grid on
147 % xlabel('t / s')
148 % ylabel('U / V')
149 % title('Sensor: aktuelle Winkelspannung')
150 % figure(3)
151 % plot(t,y(:,6),'linewidth',2);
152 % axis([0 te vu vo])
153 % grid on
154 % xlabel('t / s')
155 % ylabel('U / V')
156 % title('Eingabe: Sollwinkelspannung')
157
158 % Plot der variablen Schrittweite
159 % ht=diff(t)';
160 % ht=[ht ht(end)]';
161 % set(gcf,'Units','normal','Position',[.1 .2 .4 .2], ...
162 %      'NumberTitle','on','Name','h ');
163 % plot(t,ht,'x','markersize',9,'linewidth',2);
164 % grid on
165 % xlabel('t / s')
166 % ylabel('h / s')
167 % title('Schrittweite')
168 %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 %     Gesamtleistung der LED => 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}=0.001; % 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 [?]	3
1.3. Fokusline	3
3.1. Allgemeiner Aufbau des simulierten Systems	7
3.2. Allgemeiner Aufbau des Sensors	10
3.3. Sensor Funktions	11
5.1. P-Anteil von 40	16
5.2. P-Anteil von 45	16
5.3. P-Anteil von 30 und I-Anteil von 17	17
5.4. P-Anteil von 30 und I-Anteil von 17	17
5.5. P=22 - D=1 - N=1	18
5.6. P=22 - D=1 - N=1	18
5.7. P=20 - I=15 - D=1 - N=1	19
5.8. P=20 - I=16 - D=1 - N=1	19
5.9. P-Adaption	20
5.10. P-Adaption mit Parametern	21
5.11. P-Adaption mit Parametern	21
5.12. P-Adaption mit neuen Motorparametern	22
5.13. P-Adaption mit neuen Parametern	23
5.14. Stromhöhe während der Regelung	23
5.15. P-Adaption mit Strombegrenzung	24
5.16. Angepasste P-Adaption mit Strombegrenzung	24
5.17. Angepasste P-Adaption mit Strombegrenzung	25

Tabellenverzeichnis

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)