

H. C. Nägerl
 Institut für Experimentalphysik
 Universität Innsbruck
 6020 Innsbruck, Austria
 Christoph.Naegerl@uibk.ac.at
 Tel. 507 6316 oder 6377
 (April 30, 2001)

I. EINLEITUNG

Die Regelungstechnik ist aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken (für eine breite Übersicht siehe beispielsweise [1]). Regler, insbesondere elektronische Regler, finden sich in allen Lebensbereichen, sei es im Auto, im CD-Spieler oder, wie es in diesem Versuch gezeigt wird, in der Messtechnik. Im allgemeinen besteht die Aufgabe eines Reglers darin, eine bestimmte physikalische Grösse (die Regelgrösse X) auf einen vorgegebenen Sollwert (die Führungsgrösse W) zu bringen und dort zu halten. Dieses geschieht unter dem Einfluss von Störungen (Störgrösse Z), welcher der Regler ausgleichen soll. Dazu beeinflusst der Regler die Regelgrösse X mit Hilfe der Stellgrösse Y so, dass die Regelabweichung $W - X$ minimal ist (Prinzip **Gegenkopplung**). Veranschaulicht ist dieses in Fig. 1 (nach [2]).

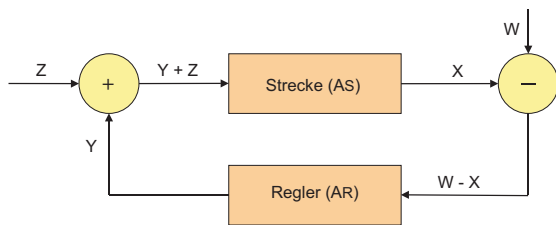


FIG. 1. Blockschaltbild eines Regelkreises. Die Strecke hat die (komplexe) Verstärkung A_S , und der Regler hat die (komplexe) Verstärkung A_R . Das Produkt $g = A_S A_R$ ist die Schleifenverstärkung. X ist die Regelgrösse, W die Führungsgrösse, Z die Störgrösse, Y die Stellgrösse und $W - X$ die Regelabweichung.

In diesem Versuch soll ein zweimodiger HeNe-Laser [4] mit Hilfe einer Temperatur-Stabilisierung frequenz-stabilisiert werden. Ein solcher frequenz-stabiler Laser kann dann beispielsweise als Wellenlängenreferenz in einem präzisen Interferometer benutzt werden. Führungsgrösse ist hierbei die Mitte des Verstärkungsprofils des HeNe-Laserübergangs bei 633 nm. Die Frequenz des HeNe-Lasers ist durch die Länge des Laserresonators bestimmt. Diese Länge kann über die Temperatur verändert werden. Die Temperatur des Laserresonators ist somit die Stellgrösse. Sie kann über einen Strom durch eine Heizwendel eingestellt werden.

Ziel des Versuchs ist es, einen elektronischen Regler aufzubauen und dessen Regeleigenschaften (Einschwingverhalten, mittlere Regelabweichung etc.) zu charakterisieren.

II. SICHERHEITSHINWEIS

In diesem Praktikumsversuch kommt ein HeNe-Laser zum Einsatz. Dieser hat zwar eine niedrige Leistung (ca. 1 mW), aber stellt dennoch eine **Gefahr** dar, sollte das Licht ins Auge geraten. Deshalb ist beim Aufbau mit entsprechender Vorsicht vorzugehen: Der Laserstrahl sollte bei längerem Nichtgebrauch immer geblockt werden. Der Hauptstrahl, abgezwigte Strahlen oder Reflexe dürfen den optischen Tisch nicht verlassen. Alle Strahlen sind immer parallel zur Ebene des optischen Tisches zu führen. Zudem ist sicherzustellen, dass keine reflektierenden Oberflächen (wie z.B. ein Schraubenzieher) zufällig in den Strahl geraten.

Weiterhin stellt das Hochspannungsnetzgerät des HeNe Laser eine Gefahr durch Stromschlag dar. Das Laser-Gehäuse muss deshalb mit der entsprechenden Vorsicht behandelt werden und ist **nicht** zu öffnen.

III. ALLGEMEINE ÜBERLEGUNGEN

A. Prinzip der Stabilisierung

Der HeNe-Laser ist so gebaut, dass maximal zwei Moden des Laserresonators gleichzeitig anschwingen können. Diese beiden Moden sind dann gekreuzt polarisiert (warum?). Dieses erreicht man dadurch, dass der freie Spektralbereich des Laserresonators gerade so gewählt wird, dass genau zwei Moden in das Verstärkungsprofil des HeNe-Übergangs passen (siehe Fig.2) und kein polarisations-selektierendes Element in den Laserresonator eingebaut ist. Regelte man die Länge des Laserresonators nicht, so würde, in Abhängigkeit von der Länge der Laserröhre, die eine oder die andere Mode anschwingen oder beide gleichzeitig, je nachdem, wie die Lage der Resonatormoden im Vergleich zur Lage des Verstärkungsprofils ist. Der Laser hätte also eine ungefähre Frequenzungenauigkeit von 1 GHz (man überlege sich, wie gross diese Ungenauigkeit in Wellenlängeneinheiten

[nm] ist). Man trennt nun die beiden ausgekoppelten Moden mit Hilfe eines Polarisationsstrahlteilers, so dass man die Intensitäten der Moden unabhängig auf zwei Photodetektoren messen kann (siehe Fig.8). Ist die Intensität in beiden Moden gleich, so sind die Moden symmetrisch um das Zentrum des Verstärkungsprofils angeordnet (siehe Fig.2). Die Regelung besteht also darin, die Länge des Laserresonators über die Temperatur so zu verändern, dass die Intensität in beiden Moden gleich ist.

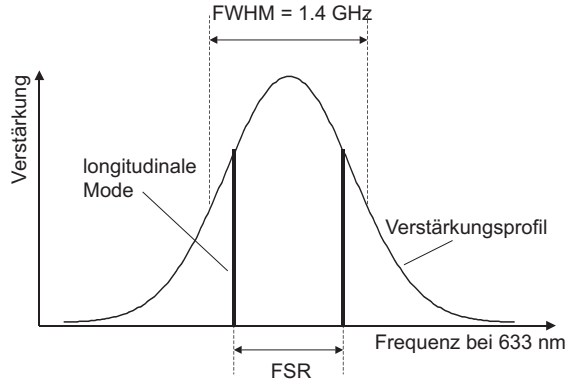


FIG. 2. Das (Doppler-verbreitete) Verstärkungsprofil des HeNe-Übergangs ($\text{FWHM} \approx 1.4 \text{ GHz}$) und die longitudinalen Resonatormoden mit dem freien Spektralbereich ($\text{FSR} \approx 1.1 \text{ GHz}$) als Abstand. Die beiden Moden sind symmetrisch um die Mitte des Verstärkungsprofils angeordnet. Dieses ist die Situation, wie sie durch die Regelung erzielt werden soll.

Das Differenzsignal der beiden Photodioden stellt das **Fehlersignal** dar. Dieses soll mit Hilfe des Reglers auf 0 geregelt werden.

B. Elektronischer Regler

Prinzipiell gibt es drei verschiedene Typen von Reglern: Den Proportional-Regler (**P-Regler**), den Proportional-Integral-Regler (**PI-Regler**) und den Proportional-Integral-Differential-Regler (**PID-Regler**). Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [2]. Hier sei das Wichtigste kurz zusammengefasst (unter Verwendung der dortigen Notation). Dabei gehen wir davon aus, dass die Regelstrecke ein typisches Tiefpassverhalten aufweist (warum ist diese Annahme vernünftig? D.h. wie kommt dieses Verhalten zustande?). Ein P-Regler ist ein linearer Verstärker, dessen Phasengang konstant ist über den charakteristischen Frequenzbereich der Regelstrecke (in Fig.3 ist das **Bode-Diagramm** der Strecke und des P-Reglers gezeigt). Elektronisch realisieren lässt sich dieser beispielsweise durch einen Operationsverstärker mit ohm'scher Gegenkopplung. Die **Schleifenverstärkung** $g = A_S A_R$ ist das (komplexe) Produkt der (komplexen) Strecken-Verstärkung A_S und

der (i.a. auch komplexen) Regler-Verstärkung A_R . Ist bei einer Frequenz f_s die Phasennacheilung der Schleifenverstärkung 180° , und ist dort der Betrag der Schleifenverstärkung ≥ 1 , so wird die Gegenkopplung zur Mitkopplung und das gesamte System (Regler plus Strecke) schwingt auf bei der Frequenz f_s . Die **kritische Frequenz** f_k ist diejenige, bei der die Schleifenverstärkung genau 1 wird (die mit dieser Frequenz verbundene Bandbreite wird i.a. als **Regelbandbreite** bezeichnet). Diese sollte also kleiner als f_s sein. Die **Phasen-Reserve** α ist die Phase, die der Phase der Schleifenverstärkung bei f_k noch bis 180° fehlt. Eine Phasen-Reserve von $\alpha \approx 60^\circ$ stellt i.a. das Optimum dar. Dieses stellt man dadurch ein, dass man die Verstärkung $A_R = A_P$ des P-Reglers entsprechend aufdreht. Dann ist die Einschwingzeit minimal. Der Nachteil eines einfachen P-Reglers besteht darin, dass im eingeschwungenen Zustand eine nicht verschwindende Regelabweichung verbleibt, da man i.a. die Schleifenverstärkung aus Stabilitätsgründen nicht beliebig aufdrehen kann (wann gilt diese Aussage beispielsweise nicht?).

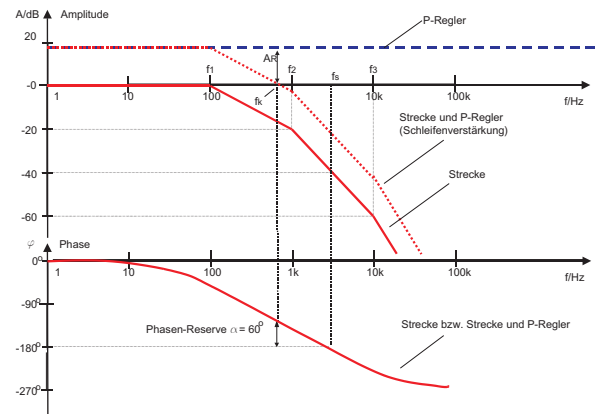


FIG. 3. Bode-Diagramm einer Tiefpass-Strecke mit P-Regler. Oben ist der Amplitudengang, und der Phasengang gezeigt. Die Grenzfrequenzen der Strecke liegen bei $f_1 = 100 \text{ Hz}$, $f_2 = 1 \text{ kHz}$ und $f_3 = 10 \text{ kHz}$. Für die Strecke wurde eine Verstärkung von 1 bei niedrigen Frequenzen angesetzt.

Diesen Nachteil kann man dadurch beheben, dass man man dem Proportionalteil einen Integralteil hinzufügt, wobei die Grenzfrequenz f_I des Integrators zu $f_I \approx \frac{1}{10} f_k$ gewählt wird. Das Ergebnis ist in Fig.4 gezeigt (man überlege sich, wie man die Bode-Diagramme zu zeichnen habe. Welche Steigung hat beispielsweise der Amplitudengang in den Einheiten dB/Dekade?). Die Schleifenverstärkung steigt bei niedrigen Frequenzen an und zwingt damit die Regelabweichung auf 0. Der Frequenzgang in der Umgebung der kritischen Frequenz f_k wird dabei nicht geändert. Das Stabilitätsverhalten des Regelkreises ändert sich also nicht. Der PI-Regler lässt sich beispielsweise durch Parallelschalten eines Proportionalverstärkers mit einem Integrator (z.B. ein

Operationsverstärker mit kapazitiver Gegenkopplung realisieren. Alternativ (siehe unten) kann man einen PI-Regler durch einen einzigen Operationsverstärker mit in Reihe geschalteter ohm'scher und kapazitiver Gegenkopplung verwirklichen.

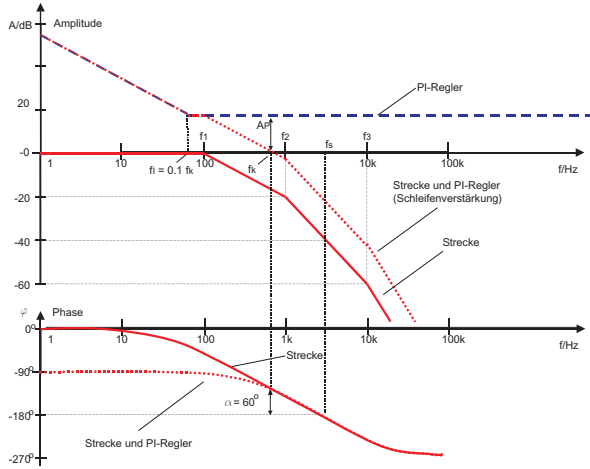


FIG. 4. Bode-Diagramm der Tiefpass-Strecke mit PI-Regler. Die Grenzfrequenz f_I des Integrators wurde zu $f_I \approx \frac{1}{10}f_k$ gewählt.

Verbessern kann den Frequenzgang eines PI-Reglers dadurch, dass man die Phasenvoreilung eines Differentiators bei hohen

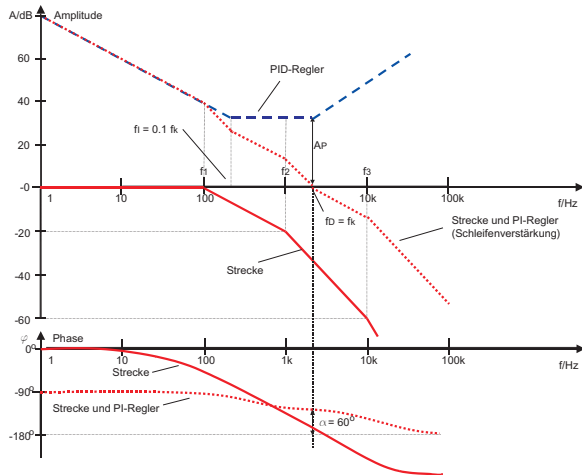


FIG. 5. Bode-Diagramm der Tiefpass-Strecke mit PID-Regler. Man sieht im Phasendiagramm eindeutig, wie der D-Zweig den Phasengang in der Nähe der alten kritischen Frequenz "nach oben verbiegt" und somit ein Erhöhen der Bandbreite erlaubt. Es ist wieder $f_I \approx \frac{1}{10}f_k$, wobei f_k die neue kritische Frequenz ist.

Frequenzen dazu benutzt, die Phasennacheilung der Strecke in der Nähe der kritischen Frequenz f_k teilweise zu kompensieren, um damit die Regelbandbreite zu vergrößern. Dieses ist in Fig.5 gezeigt. Dazu wähle man die kritische Frequenz f_k so, dass die Phasenreserve bei

dieser Frequenz nur mehr 15° beträgt (die Proportionalverstärkung A_P muss dafür entsprechend erhöht werden). Wenn man nun die Grenzfrequenz f_D des Differentiators zu $f_D \approx f_k$ wählt, erhöht sich die Phasenreserve bei f_k um 45° von 15° auf 60° und man erhält das alte Stabilitätsverhalten. Bei der Wahl der Grenzfrequenz des Integrators geht man nun wie vorher vor, d.h. man wählt $f_I \approx \frac{1}{10}f_k$ wie gehabt.

C. Elektronische Realisierung des PID-Reglers

In diesem Versuch soll der PID-Regler als Kombination eines PI- und eines D-Reglers verwirklicht werden. Der PI-Regler lässt sich mit Hilfe eines Operationsverstärkers aufbauen. Die entsprechende Schaltung ist in Fig.6 gezeigt.

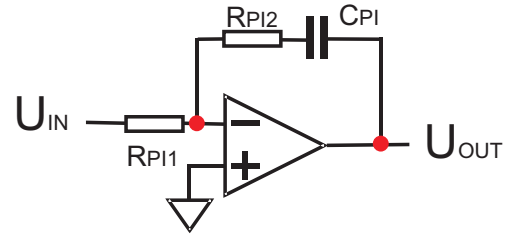


FIG. 6. PI-Zweig, realisiert mit Hilfe eines Operationsverstärkers.

Für die komplexe Verstärkung gilt

$$\begin{aligned} A_R &= -\frac{R_{PI2} + 1/(i\omega C_{PI})}{R_{PI1}} \\ &= -\frac{R_{PI2}}{R_{PI1}} \left(1 + \frac{1}{i\omega C_{PI} R_{PI2}} \right) \\ &= -A_P \left(1 + \frac{\omega_I}{i\omega} \right). \end{aligned}$$

Dabei sind die Reglerdaten

$$\begin{aligned} A_P &= \frac{R_{PI2}}{R_{PI1}}, \\ f_I &= \frac{\omega_I}{2\pi} \\ &= \frac{1}{2\pi C_{PI} R_{PI2}}. \end{aligned}$$

Den PID-Regler kann man nun durch Parallelschalten des PI-Reglers und eines D-Zweiges mit anschließender Addition realisieren. Die Schaltung ist in Fig.7 dargestellt. Wählt man für den Addierer $R_{A1} = R_{A2} = R_{A3} = R_A$, so ergibt sich die komplexe Verstärkung

$$A_R = A_P \left(1 + \frac{\omega_I}{i\omega} + \frac{i\omega}{\omega_D} \right)$$

mit der Grenzfrequenz des Differentiators

$$f_D = \frac{\omega_D}{2\pi} = \frac{A_P}{2\pi C_D R_D}.$$

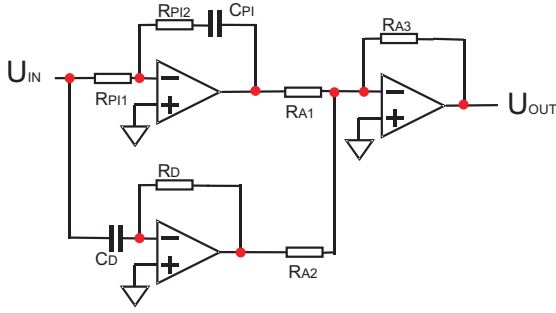


FIG. 7. PID-Regler. Ein PI-Zweig und ein D-Zweig werden parallel geschaltet.

IV. VERSUCHSAUFBAU

Der Versuchsaufbau ist in Fig.8 schematisch dargestellt.

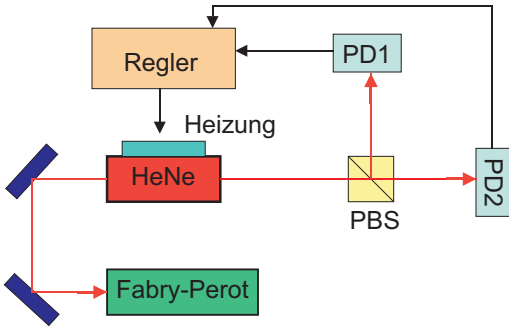


FIG. 8. Versuchsaufbau. Die beiden Moden des HeNe-Lasers werden am Polarisationsstrahlteiler PBS getrennt und auf die jeweiligen Photodetektoren PD1 und PD2 geschickt. Das Signal der Photodetektoren wird vom Regler verarbeitet und auf ein Heizelement gegeben. Zum unabhängigen Beobachten der beiden Moden dient ein Fabry-Perot Interferometer.

Das Nutzlicht des HeNe-Lasers, kommend vom Auskoppelspiegel des Laserresonators, wird zur Beobachtung des Modenverhaltens auf ein Fabry-Perot Interferometer (siehe [4]) geschickt. Da der andere Endspiegel des Laserresonators eine nicht verschwindende Transmission aufweist, kann dieses (Rest-)Licht für die Stabilisierung des Lasers benutzt werden. Dazu wird das Licht an einem Polarisationsstrahlteiler aufgeteilt und auf zwei Photodetektoren (Photodiode plus Verstärker) geschickt. Die Signale der beiden Photodetektoren wer-

den voneinander subtrahiert (das Ergebnis dieser Subtraktion ist das Fehlersignal) und dann von der Regелеlektronik verarbeitet. Die (zu bauende) Regelektronik gibt dann einen Strom aus, welcher die Heizwicklung am Laser treibt und damit über Temperatur und Längenausdehnung auf die Frequenz des Lasers einwirkt.

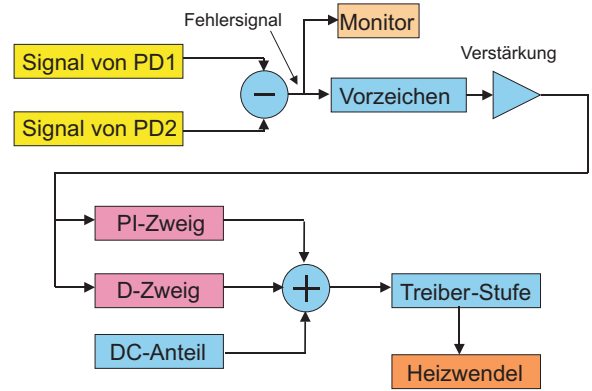


FIG. 9. Schematischer Aufbau des Reglers.

In Fig.9 ist der schematische Aufbau der Regelektronik skizziert. Nach Generierung (durch Subtraktion) des Fehlersignals wird das passende Vorzeichen erzeugt (man überlege sich, dass sich in diesem Versuch das Fehlersignal ohne Einschränkung auf das richtige Vorzeichen einstellen lässt, so dass die Regelektronik dieses nicht können muss). Das Signal wird dann in seiner Amplitude geregelt (verstärkt oder abgeschwächt) und dann auf einen kombinierten Proportional-Integral-Regler und auf einen Differentiator gegeben. Deren Verstärkung und Grenzfrequenzen sind einstellbar. Das Ergebnis wird dann addiert (wobei noch eine feste, aber regelbare Spannung hinzuaddiert wird, welche einen konstanten Strom durch die Heizwendel bewirkt) und auf eine Treiberstufe gegeben, welche den Strom durch die Heizwendel bestimmt.

V. GERÄTE UND HILFSMITTEL

Zweimodiger HeNe-Laser mit Heizwicklung, Polarisationsstrahlteiler (PBS), Alu-Umlenkspiegel, diverse optische und opto-mechanische Elemente, 2 Photodetektoren, Fabry-Perot Interferometer, digitales Speicher-Oszilloskop, regelbares Mehrfach-Netzteil, elektronische Bauelemente, Lötkolben. Die Datenblätter zu den elektronischen Bauelementen findet man bei Bedarf auf dem Internet.

Bemerkung: Die optischen Bauelemente sind mit der nötigen Vorsicht zu behandeln. Die Oberflächen der Alu-Spiegel dürfen nicht berührt werden. Geschieht dieses doch einmal, so sollten diese Oberflächen sofort mit Methanol geputzt werden (bitte dann zeigen lassen,

VI. VORBEREITUNG AUF DEN VERSUCH

Neben dem üblichen gründlichen Studium der Literatur (insbesondere vergegenwärtige man sich die Funktionsweise von Operationsverstärkern, siehe [2] und [3], und überlege sich die Funktionsweise der elektronischen Schaltungen) und der Beantwortung der in diesem Anleitungstext gestellten Fragen sei dringend eine einfache Computerrechnung empfohlen: Man berechne das Bode-Diagramm (d.h. Amplitudengang und Phasengang) der in Fig.3 dargestellten Tiefpass-Strecke (für die Grenzfrequenzen wähle man 100 Hz, 1 kHz und 10 kHz). Ebenso berechne man die Bode-Diagramme der in Abschnitt IIIB diskutierten Regler und stelle dann die Bode-Diagramme der Schleifenverstärkung dar. Dabei variere man die für den PID-Regler charakteristischen Parameter A_P , f_I und f_D , und man versuche, deren Einstellung zu optimieren. Als Computersprache seien Matlab oder Mathematica empfohlen.

VII. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Gemäss Fig.8 werde mit Hilfe des Assistenten zuerst der optische Aufbau realisiert. Dazu kopple man das Nutzlicht des HeNe-Lasers in das Fabry-Perot Interferometer (ein optischer Abschwächer, nicht eingezeichnet in Fig.8, ist vermutlich nötig, um die störenden Rückreflexe vom Fabry-Perot-Interferometer in den HeNe-Laser zu unterdrücken). Des weiteren richte man das Laserlicht, welches dem Rückspiegel entweicht, mit Hilfe des Polarisationsstrahlteilers auf die beiden Photodetektoren. Der HeNe-Laser ist so ausgerichtet in seinem Gehäuse, dass die beiden Polarisationsachsen senkrecht bzw. parallel zur Oberfläche des optischen Tisches stehen. Sollte dieses nicht der Fall sein (wie erkennt man das?), dann muss entweder der Laser um seine Längsachse rotiert werden (dieses darf nur mit Hilfe des Assistenten geschehen, da dazu das Gehäuse des Lasers geöffnet werden muss), oder man benutzt eine $\lambda/2$ Verzögerungsplatte, um die Polarisationsrichtung zu drehen. Ist der Laser noch in seiner Aufwärmphase, oder schickt man für einige Sekunden einen kleinen Strom (ca. 200 mA) durch die Heizwendel, so kann man das Durchfahren der Moden in rascher Abfolge beobachten.

Als nächstes gilt es, den elektronischen Regler zu realisieren. Der Aufbau der Schaltung ist in Fig.10 gezeigt. Aus Zeitgründen sind Teile der Schaltung bereits realisiert. Herzstück der Schaltung ist der (kombinierte) PI-Zweig und der D-Zweig. Diese müssen unter Anleitung des Assistenten gelötet und dabei korrekt bestückt werden. Dabei wird die Elektronik so gelötet, dass die einzustellenden Widerstände und Kondensatoren steckbar sind, damit man sie zur Anpassung und Optimierung des

Reglers austauschen kann. Für die Operationsverstärker wird der Präzisions-OP-Amp OP27 benutzt.

Für die Treiberstufe mit dem Messwiderstand von $R_M = 1 \Omega$ überlege man sich die Auslegung der Widerstände so, dass bei -5.0 V hinter dem Addierer ein Strom von 400 mA durch die Heizwendel fliesst.

Nachdem die Regelektronik fertig gelötet und auf ihre Grundfunktionen getestet worden ist, werde sie in den Regelkreis eingebracht. Mit Hilfe des Monitor Ausgangs kann man des Fehlersignal direkt auf dem digitalen Speicher-Oszilloskop beobachten. Zuerst werde der PI-Regler abgeglichen (dazu stelle man sicher, dass der D-Zweig inaktiv ist).

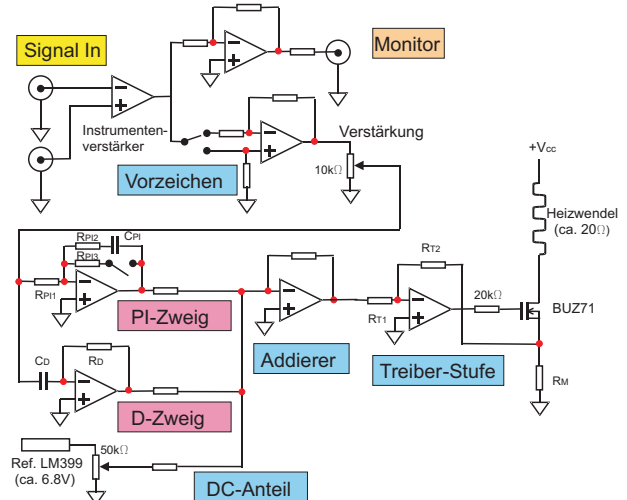


FIG. 10. Elektronischer Aufbau des Reglers. Für alle nicht bezeichneten Widerstände kann der Wert 10 k Ω gewählt werden. Für den Messwiderstand wähle man $R_M = 1 \Omega$.

Dafür schliesse man den Schalter am PI-Zweig, um den Integrator zu deaktivieren (man beachte, dass man bei geschlossenem Schalter keinen reinen P-Regler hat, wenn man den Kondensator nicht entfernt. Wie ist der Frequenzgang bei geschlossenem Schalter? Korrekterweise müsste man einen Doppelschalter verwenden, welcher den Zweig mit dem Kondensator auftrennt. Alternativ kann man vorerst den Kondensator aus seinem Steckplatz entfernen). Jetzt stelle man das Vorzeichen und die Verstärkung A_P des P-Reglers (mit Hilfe der Widerstände und des Potentiometers) so ein, dass man ein schwach gedämpftes Regelverhalten beobachtet (dabei wähle man die Stellung des Potentiometers so, dass man noch genug Einstellvariabilität habe). Welche Regelabweichung beobachtet man? Das Einschwingverhalten lässt sich bequemerweise so beobachten, indem man den Regelkreis kurz aus dem Gleichgewicht bringt (beispielsweise durch eine Temperaturfluktuation). Man

messe die Frequenz der Schwingung mit Hilfe des digitalen Speicheroszilloskops. Diese Frequenz benutze man dazu, den Integrator entsprechend zu dimensionieren. Was ändert sich dann am Einschwingverhalten?

Als nächstes versuche man, die Frequenzabweichungen des HeNe-Laser im eingeregelter Zustand zu charakterisieren. Dazu muss man die Abweichungen des Fehlersignals von 0 in Frequenzeinheiten kalibrieren. Dieses geschieht mit Hilfe des Fabry-Perot Interferometers. Als bekannt darf man dafür den freien Spektralbereich (FSR) des Lasers bzw. des Fabry-Perot-Interferometers voraussetzen. Man gebe einen ungefähren Wert für die Frequenzabweichungen gemittelt über eine Minute an.

Schliesslich gleiche man den PID-Regler ab (wie geht man dabei am besten vor?), und man untersuche, ob man das Regelverhalten durch Einbringen des D-Zweiges verbessern kann.

Falls Zeit und Lust übrig geblieben ist, dann versuche man, ob es möglich ist, das Bode-Diagramm der Strecke direkt zu messen (wie macht man das?). Lassen sich die Grenzfrequenzen der Strecke bestimmen?

VIII. PROTOKOLL UND AUSWERTUNG

Wie üblich beinhaltet das Protokoll eine genaue Beschreibung der im Versuch durchgeführten Aufgaben samt der gemessenen Daten. Man diskutiere das Regelverhalten der gebauten Regelung und schlage Verbesserungen vor. Wodurch wird die Regelung limitiert?

-
- [1] R.C. Dorf und R.H. Bishop: Modern Control Systems, Addison Wesley, Menlo Park, CA (1998).
 - [2] U. Tietze und Ch. Schenk: Halbleiter-Schaltungstechnik (10-te Auflage) Springer-Verlag, Berlin (1993).
 - [3] P. Horowitz und W. Hill: The Art of Electronics (2-te Auflage) Cambridge University Press (1989).
 - [4] W. Demtröder: Laserspektroskopie (3-te Auflage) Springer-Verlag, Berlin (1993).