

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio



# Aufbau einer Wellenlängenstabilisierung für einen Nd:YAG-Laser

**Bachelor-Arbeit**

von Jens Söder, geb. am 13. Januar 1987 in Osnabrück

1. Prüfer : Prof. Dr. Franz-Josef Lübken  
Betreuer und 2. Prüfer: Dr. Michael Gerding

Rostock, 02.08.2010

**Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik Kühlungsborn**  
**Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät**  
**Universität Rostock**



# Abstract

The aim of this Bachelor-Thesis is to realize a wavelength-stabilization for a Nd:YAG-laser. This laser is used as a seederlaser for the powerlaser of the RMR-Lidar at Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn, Germany. Therefore the transmission through an iodine absorption cell is compared to the output power of the laser. The ratio of this two measurements is proportional to the absorption of iodine. At 532 nm iodine has a lot of strong absorption lines. Accordingly one of these lines is used to lock the second harmonic generation of the laser radiation to a designated ratio at an appointed absorption line. Due to the absorption spectrum this ratio is connected to the wavelength of 532.1 nm. The improved stability of the laser allows to use a narrow-band receiver. Therefore measurements by day become possible despite of the much higher brightness of the sky.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>3</b>
1.1. Prinzip des RMR-Lidars . . . . .	3
1.1.1. Der Nd:YAG-Leistungslaser . . . . .	6
1.1.2. Der Seederlaser . . . . .	7
1.1.3. Die Wellenlängenstabilisierung . . . . .	8
<b>2. Aufbau und Betrieb</b>	<b>11</b>
2.1. Realisierung des Aufbaus . . . . .	11
2.2. Justage des Aufbaus und der Parameter . . . . .	14
2.2.1. Temperaturstabilisierung der Iodzelle . . . . .	14
2.2.2. Justage der Komponenten . . . . .	16
2.2.3. Iod-Absorptionsspektrum . . . . .	17
2.2.4. Auslesen der Logdatei . . . . .	18
<b>3. Auswertung</b>	<b>21</b>
3.1. Temperaturstabilisierung der Iodzelle . . . . .	21
3.2. Erwartete Drift der Wellenlänge . . . . .	22
3.2.1. Wellenlängendrift durch Temperaturänderung in der Iodzelle . . . . .	23
3.2.2. Wellenlängendrift die Fotodioden . . . . .	24
3.2.3. Drift des Ångströmmeters . . . . .	25
3.2.4. Zusammenfassung der erwarteten Drift . . . . .	26
3.3. Gemessene Wellenlängendrift . . . . .	26
3.4. Interpretation der Wellenlängendrift . . . . .	27
<b>4. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>29</b>

<b>A. Anhang</b>	<b>31</b>
A.1. Berechnung der Transmission durch die Iodzelle . . . . .	31
A.1.1. Programm zur Berechnung des Dampfdrucks von Iod . . . . .	31
A.1.2. Programm zur Berechnung der Transmission . . . . .	32
A.2. Leseroutine . . . . .	34
 <b>Literaturverzeichnis</b>	 <b>39</b>



# 1 Einführung

## 1.1. Prinzip des RMR-Lidars

Am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) in Kühlungsborn wird ein gepulster Laserstrahl senkrecht in die Atmosphäre gerichtet. Die Rückstreuung wird von einem Teleskop erfasst und mit verschiedenen Instrumenten weiter untersucht.

Die Abkürzung „Lidar“ steht in Anlehnung an „Radar“ für *Light detection and ranging*. Hierbei wird ein Laserstrahl ausgesendet, von einem Objekt zurückgestreut und durch einen Detektor in der Nähe des Lasers erfasst. Aus der Laufzeit des Signals lässt sich die Entfernung zum Objekt messen. Doch in der Atmosphärenphysik sind weit mehr Informationen von Interesse. Um diese zu erhalten werden vier verschiedene Messmethoden verwendet: Rayleigh-Streuung, Mie-Streuung und Raman-Streuung, die abgekürzt den Begriff RMR-Lidar prägen, sowie Resonanz-Streuung.



**Abbildung 1.1.:** Strahl des RMR-Lidars über dem Institut für Atmosphärenphysik Kühlungsborn. Foto: Gerd Baumgarten

Als Rayleigh-Streuung wird der elastische Streuprozess von elektromagnetischen Wellen (in diesem Fall Licht) an Partikeln bezeichnet, deren Durchmesser klein im Vergleich zur Wellenlänge ist. Hierbei erfolgt keine Verschiebung der Wellenlänge, da keine Energie auf das Streupartikel übertragen wird. Der Rayleigh-Streuquerschnitt eines Objekts skaliert mit der vierten Potenz der Frequenz des gestreuten Lichts. Dies bedeutet, dass kürzerwelliges Licht erheblich stärker gestreut wird als längerwelliges. Als Mie-Streuung bezeichnet man die Streuung an Objekten, deren Größe im Bereich der Wellenlänge des gestreuten Lichts liegt. Bei einer Wellenlänge von einigen Hundert Nanometern kommen hier also nicht Atome oder Moleküle als Streuobjekte in Frage, sondern feste Partikel oder Tröpfchen. Dies können zum Beispiel Aerosole aus Vulkanausbrüchen sein. Die Namensgebung „Mie-Streuung“ beschreibt eigentlich nur einen Spezialfall der Aerosolstreuung, nämlich die Streuung an sphärischen Objekten. Ebenso wie bei der Rayleigh-Streuung handelt es sich hier um einen elastischen Prozess.

Raman-Streuung bezeichnet die inelastische Streuung von Licht an Materie. Im konkreten Fall wird ein Molekül von einem Photon der Frequenz  $h\nu$  auf ein virtuelles Niveau angeregt. Der Grundzustand ist jedoch durch verschiedene Schwingungs- und diese wiederum durch Rotationszustände aufgespalten. Folglich kann beim Zurückfallen in den Grundzustand sowohl ein Photon mit geringerer Energie  $h\nu'$ , als auch ein Photon mit höherer Energie  $h\nu''$  gegenüber  $h\nu$  abgestrahlt werden.

Resonanzstreuung bezeichnet Streuung an einem Atom oder Molekül, bei der die Frequenz des anregenden Photons genau einem elektronischen Übergang des Atoms oder Moleküls entspricht.

Die Lidar-Systeme am IAP in Kühlungsborn besteht aus einem RMR-Lidar und einem Kalium-Resonanz-Lidar. Das RMR-Lidar misst die Temperatur in einem Höhenbereich von 20–90 km. Als Lichtquelle wird hier ein Nd:YAG-Laser bei einer Wellenlänge von 532 nm und 355 nm eingesetzt. Die Wellenlänge 532 nm liegt im sichtbaren Bereich und gibt dem Laserstrahl seine in Abbildung 1.1 deutlich sichtbare grüne Farbe. Um die Temperatur oberhalb von 20 km Höhe zu messen wird über Rayleigh-Streuung an Molekülen mit dem RMR-Lidar ein Profil der Anzahldichte der Moleküle aufgenommen. Aus der Anzahldichte  $n$  lässt sich über die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase

$$T(z) = \frac{p(z)}{n \cdot k_B}$$

ein Temperaturprofil berechnen. Der dazu notwendige Druckgradient ergibt sich zu

$$\frac{dp}{dz} = -g \cdot n(z)$$

$n(z)$  ist das mit dem Lidar gemessene Dichteprofil. Um über die Höhe integrieren zu können muss für einen Höhenbereich ein Referenzwert für die Temperatur vorliegen. Um den Fehler klein zu halten ist es zweckmäßig, von großen zu kleinen Höhen zu integrieren. Der hierfür notwendige Referenzwert, wird durch ein Kalium-Doppler-Lidar gemessen. „Between about 20 and 90 km, temperatures were calculated from Rayleigh backscattering by air molecules, where the upper start values for the calculation algorithm were taken from the potassium lidar results.“[Alpers/et al Temperature measurements]. Um den Startwert zu erhalten wird Resonanzstreuung an der Kalium  $D^1$ -Linie verwendet. Das rückgestreute Signal ist dopplerverbreitert. Über die Maxwell-Boltzmann-Verteilung kann die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen berechnet werden. Folglich kann das Rückstreusignal der  $D^1$ -Linie mit einem Gaußprofil gefittet werden, dessen Fitparameter wiederum die Temperatur wiedergeben. Neben dem Referenzwert für das RMR-Lidar liefert diese Messung in der Hauptsache ein Temperaturprofil zwischen etwa 80 und 105 km Höhe.

Unterhalb von 35 km wird das Rayleigh-Rückstreusignal des RMR-Lidars durch Aerosolstreuung überlagert. Um diesen Untergrund subtrahieren zu können, wird eine weitere Messmethode angewendet: „To correct for any additional aerosol backscatter at the 532 nm wavelength channel used for the Rayleigh temperature retrieval, we simultaneously observe the 608 nm N<sub>2</sub> vibrational Raman backscatter (Gerding et al., 2006). This is used to calculate the backscatter ratio R of total and molecular backscatter on a nightly mean basis.“[Gerding/et al]

Zwischen 1 km und 20 km Höhe wird das Temperaturprofil mittels Rotations-Raman-Streuung gemessen. Somit kann die Anlage einen Höhenbereich von 1–105 km abdecken.

Alle diese Methoden hatten jedoch bis zum Sommer 2010 ein praktisches Problem: Da die Detektoren im Nachweiszweig nicht zwischen Photonen vom Laser und solchen aus dem Sonnenlicht unterscheiden können, waren Messungen nur nachts möglich. Da eine Beobachtung aber außerdem nur durchgeführt werden kann, wenn der Himmel wolkenfrei ist, waren die Messzeiten stark eingeschränkt. Um Messungen auch bei Tag durchführen zu können muss das Signal-Untergrund-Verhältnis, also Laser-rückstreuung zu Sonnenlicht verbessert werden. Doch wie lässt sich das bewerkstelligen, wenn die Energie der Laserpulse aus technischen Gründen nicht wesentlich er-

höht werden kann? Die Rayleigh-Rückstreuung des Lasers hat eine Dopplerverbreiterung durch die Atmosphärentemperatur von rund 2500 MHz. Die Sonne hingegen sendet ein Schwarzkörperspektrum mit einer Temperatur von 5900 K aus, also ein sehr breites Spektrum. Wenn es gelingt den Empfangszweig so schmalbandig zu machen, dass das Rückstreuspektrum den Bereich maximal ausfüllt, wird der größte Teil des Sonnenspektrums abgeschnitten. Weiterhin hat das verwendete Teleskop nur ein sehr kleines Sichtfeld von  $60\mu\text{rad}$  (entsprechend 6 m Durchmesser in 100 km Höhe), kann also die solaren Photonen nur aus einem sehr engen Raumwinkel empfangen. Hierdurch wird das Signal-Untergrund-Verhältnis hinreichend gut, um auch am Tag Messungen durchführen zu können. Unabdingbare Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass der Drift des Lasers klein bleibt gegenüber der Breite der Filter im Empfangszweig. Daraus erwächst der Gegenstand dieser Arbeit: Aufbau einer Wellenlängenstabilisierung für einen Nd:YAG-Laser. Hiermit soll das oben beschriebene RMR-System stabilisiert werden.

### 1.1.1. Der Nd:YAG-Leistungslaser

Ein Nd:YAG-Laser ist ein Festkörperlaser. Als Lasermedium dient ein mit  $Nd^{3+}$ -Ionen dotierter YAG-Kristall (Yttrium-Aluminium-Granat). Durch optisches Pumpen mit Blitzlampen werden hierin, wie in Abbildung 1.2 gezeigt, höhere Energiezustände angeregt. Der Übergang in das obere Laserniveau erfolgt strahlungslos. Der eigentliche Laserübergang emittiert Photonen mit  $\lambda = 1064.43$  nm (im Folgenden werden alle Wellenlängen wie hier für Vakuum angegeben). Vom unteren Laserniveau erfolgt wiederum ein strahlungsloser Übergang in den Grundzustand. Somit handelt es sich um einen Vierniveaulaser.

Weil für die Messungen ein möglichst kurzer, gepulster Laserstrahl benötigt wird, ist in den Resonator ein Q-Switch eingebaut. Erst wenn dieser den Strahlengang zwischen den Resonatorspiegeln freigibt, kann es zu einer stimulierten Emission kommen. Dazwischen jedoch wird die Besetzungsinversion durch die Blitzlampen weiter verstärkt ohne dass es zu einer Entvölkerung des oberen Laserniveaus kommt.

Um sicherzustellen, dass bei geöffnetem Q-Switch ausschließlich Laserstrahlung einer bestimmten Frequenz entsteht, wird in den Resonator der Strahl eines weiteren Lasers eingekoppelt. Dadurch werden im Resonator des Leistungslasers durch die Laseremission Photonen erzeugt, die kohärent zu denen des so genannten Seederlasers sind.

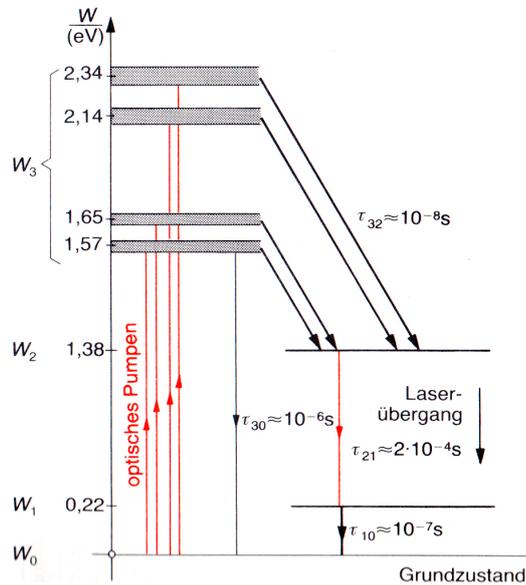


Abbildung 1.2.: Termschema eines Nd:YAG-Lasers [Bauer]

Das führt dazu, dass nur eine einzige longitudinale Mode im Laserresonator angeregt wird, die dann die Frequenz der emittierten Photonen exakt festlegt.

### 1.1.2. Der Seederlaser

Auch der verwendete Seederlaser ist ein kommerzieller Nd:YAG-Festkörperlaser. Er besitzt zwei Lichtausgänge: Einen mit der Grundwellenlänge von  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  und einen mit der Second Harmonic Generation (SHG) bei  $\lambda = 532 \text{ nm}$ . Die Frequenzverdopplung ist ein Effekt der nichtlinearen Optik in einem speziellen Kristall. Doch zunächst ist hiermit das Problem der Frequenzstabilität des Lasers nur vom Leistungs- auf den Seederlaser verschoben. Bereits vorgefunden wurden folgende Systeme zur Stabilisierung:

- Der gesamte Raum ist klimatisiert, was einem Temperaturdrift entgegen wirkt.
- Der Seederlaser weist einen Laserkristall auf, der zusammen mit dem Frequenzverdopplerkristall bereits ab Werk temperaturstabilisiert ist.

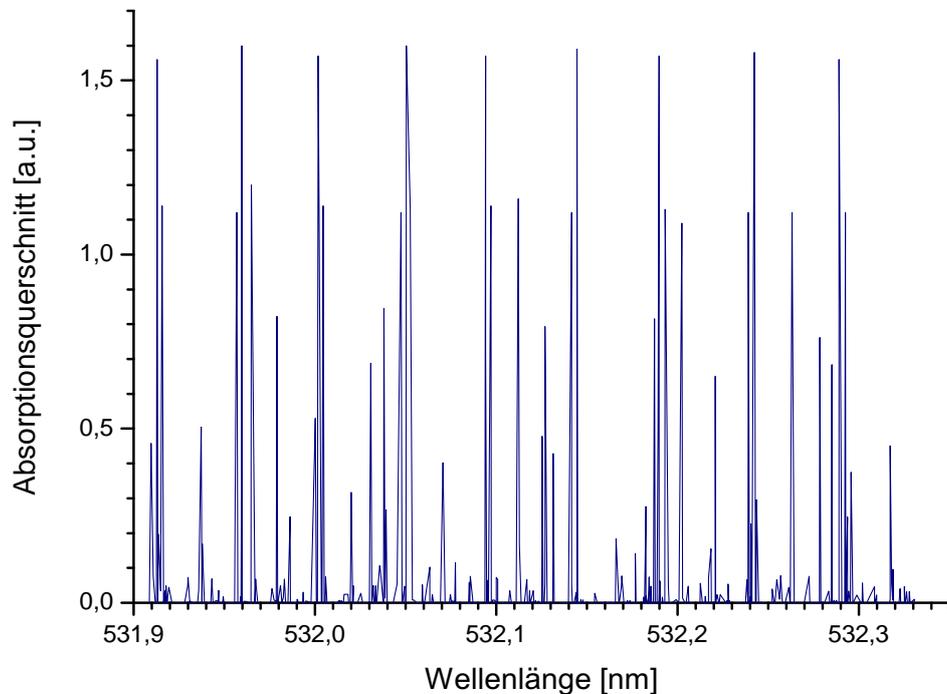
Zudem bietet der Seederlaser die Möglichkeit, die Temperatur des Laserkristalls zusätzlich durch eine externe Kontrollspannung nachzuregeln. Außerdem kann die Resonatorlänge durch piezokontrollierte Endspiegel beeinflusst werden. Die Temperaturkontrolle bewirkt ein langsames Nachfahren über relative große Frequenzbereiche,

während die Piezos eine schnelle Korrektur um kleine Werte ermöglichen. Diese beiden Parameter müssen jedoch sinnvoll und automatisch nachgestellt werden. Hierzu muss die genaue Frequenz der Strahlung gemessen werden, um auf Abweichungen reagieren zu können. Auf den ersten Blick scheint hierfür ein kommerzielles, sehr präzises Wellenlängenmeter geeignet. In diesem Fall steht das Ångströmmeter WS Ultimate 30 MC4 der Firma High Finesse GmbH zur Verfügung. Nach deren Angaben muss das Gerät jedoch für eine Genauigkeit von 100 MHz alle zwei Wochen kalibriert werden. Da dies einen großen Aufwand bedeutet, ist das Wellenlängenmeter damit nicht geeignet, eine Stabilisierung über längere Zeiträume zu gewährleisten. Eine andere Möglichkeit ist es, charakteristische Stellen im Absorptionsspektrum eines Moleküls zu nutzen und aus der Transmission durch eine gasgefüllte Zelle Rückschlüsse auf die Veränderung der Wellenlänge zu ziehen. Dieser Weg wurde für den Seederlaser am IAP gewählt.

### 1.1.3. Die Wellenlängenstabilisierung

Um die Wellenlänge des Seederlasers zu stabilisieren, wird das Licht der SHG (532 nm) aufgeweitet und über einen Strahlteiler ein Teil abgezweigt, der auf eine Fotodiode trifft. Der Rest geht durch die gasgefüllte Zelle und trifft dann auf eine zweite Fotodiode. Durch Vergleich zwischen den Signalen der beiden Dioden kann direkt die Transmission durch die Zelle gemessen werden. Auf diese Weise kann unterschieden werden zwischen Intensitätsschwankungen des Lasers und Änderungen der Absorption. Als Absorptionsgas ist Iod sehr geeignet, weil es bei einer Wellenlänge von 532 nm eine Vielzahl von Absorptionslinien aufweist. Diese Absorptionslinien sind in der Grafik 1.3 dargestellt. Sie wurden mit einem speziellen Programm rechnerisch unter Berücksichtigung der Dopplerverbreiterung ermittelt. Dabei ist der Absorptionsquerschnitt in willkürlichen Einheiten über der Wellenlänge aufgetragen

Grundsätzlich ist eine möglichst geringe Temperatur der Iodzelle anzustreben, weil dann die Dopplerverbreiterung der Absorptionslinien geringer ist. Dies wird angestrebt um eine möglichst große Kantensteilheit der Absorptionslinien zu erzielen, denn hierdurch wird das Verhältnis von Transmissionsänderung zu Wellenlängenänderung größer. Das wiederum ermöglicht eine genauere Regelung der Wellenlänge. Gleichzeitig ist es technisch erheblich aufwändiger eine solche Zelle zu kühlen, als sie zu heizen. Deshalb wurde im vorliegenden Fall eine Zelltemperatur von 40°C gewählt. Weil



**Abbildung 1.3.:** Absorptionsspektrum von Iod

der Absorptionsgrad jedoch nicht nur eine Funktion der Wellenlänge, sondern auch der Teilchendichte und damit der Temperatur innerhalb der Zelle ist, muss diese möglichst exakt geregelt werden. Im vorliegenden Fall ist die Zelle daher in ein massives Aluminiumgehäuse eingebaut, das nur Öffnungen für den Strahl hat. Durch die hohe Wärmekapazität des Blocks wird die Einheit unempfindlicher gegen Schwankungen der Umgebungstemperatur. Zudem wird das Aluminiumgehäuse durch zwei Heizpatronen auf die geforderte Temperatur gebracht. An einer anderen Stelle des Gehäuses wird die Temperatur gemessen und so über einen PID-Regler die Heizleistung nachgestellt.

Aufgabe in dieser Arbeit war es, die benötigten Komponenten auf einer optischen Bank aufzubauen und sie zu justieren. Weiterhin sollte um diese Einheit eine lichtdichte Kiste gebaut werden. Zudem galt es die Parameter für den PID-Regler der Heizung zu finden ein Programm zur Regelung des Seederlasers für die Gegebenheiten des Aufbaus passend einzustellen. Abschließend wurden die Ergebnisse der Stabilisierung ausgewertet.



## 2 Aufbau und Betrieb

### 2.1. Realisierung des Aufbaus

Für die Stabilisierung des Seederlasers wurde eine Software vorgefunden, die die Signale der beiden Photodioden ausliest. Das Verhältnis der beiden Werte fließt als Sollwert in einen Zweipunktregler ein. Als Stellgrößen dienen die Piezokontrollspannung für kurzzeitige Änderungen und die Temperaturkontrollspannung für ein langsames Nachfahren der Laserfrequenz. Außerdem wurde die Halterung für die Iodzelle durch eine feinmechanische Werkstatt aus Aluminium erstellt.

Um Umgebungslicht abzuschirmen, sollte der gesamte Aufbau nicht offen im Raum realisiert werden, sondern in einem abgeschlossenen Kasten. Anderenfalls würde Umgebungslicht, beispielsweise von der Raumbeleuchtung, die Signale der Fotodioden beeinflussen. Der andere Grund hierfür ist eine Temperaturisolierung der Iodzelle gegenüber der Raumtemperatur. Diese schwankt im konkreten Fall besonders durch Einschalten des Leistungslasers, weil dann die Klimaanlage die entstehende Wärme nicht mehr abführen kann. Außerdem wird durch eine solche Kapselung auch dem Laserschutz Genüge getan.

Die Größe der Box wurde so gewählt, dass der gesamte technische Aufbau mit allen Lichtleiterfasern problemlos darin unterzubringen war. Das Grundgerüst besteht an den Kanten aus Aluminiumprofilen mit quadratischem Querschnitt. Diese Kanten wurden mit würfelförmigen Verbindern zusammengesetzt. Dadurch entstand ein in sich stabiles Grundgerüst, das auf einen optischen Tisch aufgeschraubt werden konnte. Das Material der Seitenflächen und des Deckels sind Platten aus einer Doppelschicht Hartpappe mit dazwischenliegendem Schaumstoffkern. Der gesamte Aufbau ist schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt, während Abbildung 2.2 ein Foto des Aufbaus zeigt.

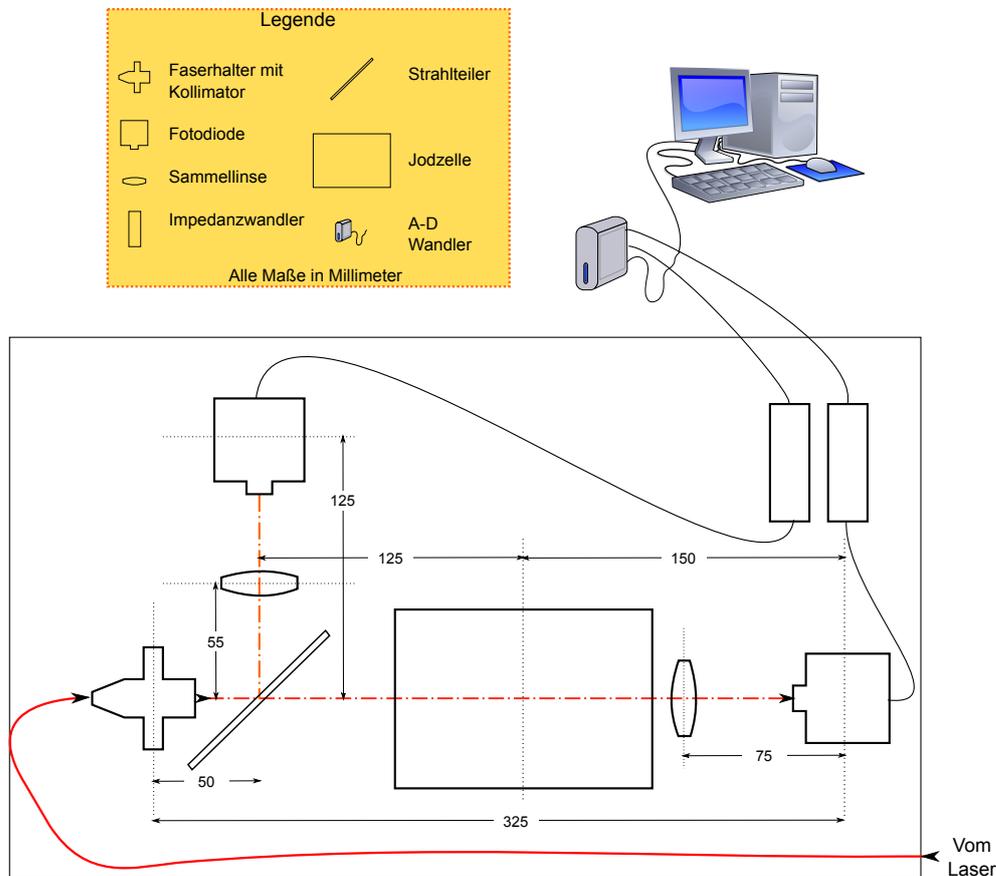


Abbildung 2.1.: Schematischer Aufbau der Iod-Stabilisierung

Der Laserstrahl aus dem Seeder wird über ein polarisationserhaltende Glasfaser in einen Kollimator eingekoppelt, wo er auf einen Durchmesser von 20 mm gebracht und parallelisiert wird. Der Strahlteiler hat ein Teilungsverhältnis von transmittierter zu reflektierter Intensität von 70 zu 30. Der reflektierte Strahl wird von einer Sammellinse mit einer Brennweite von 50 mm auf eine Fotodiode fokussiert und dient als Referenz für die Leistung des Lasers.

Der transmittierte Teil wird durch die Jodzelle geleitet und dahinter von einer zweiten 50 mm Linse ebenfalls auf eine Fotodiode gebündelt. Fotodioden sind typische Stromquellen und benötigen einen hohen Ausgangswiderstand. Daher wird ihnen jeweils ein Impedanzwandler nachgeschaltet, dessen Ausgangsspannung von 0–10 V durch einen Analog-Digital-Wandler (A-D-Wandler) ausgelesen werden kann.

Diese beiden Werte dienen einer bereits vorhandenen Software als Eingangsparameter, die hieraus mit einem digitalen Zweipunktregler die Kontrollspannung für die Temperatur des Laserkristalls sowie die Piezokontrollspannung nachregelt.

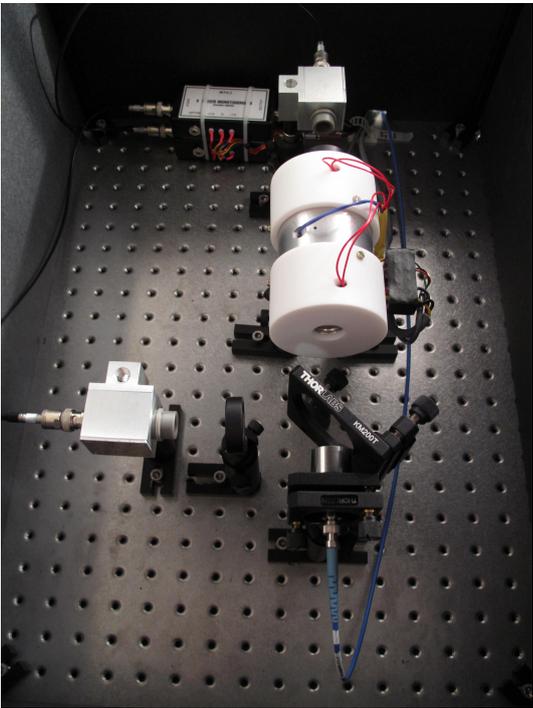


Abbildung 2.2.: Optische Komponenten der Iod-Stabilisierung

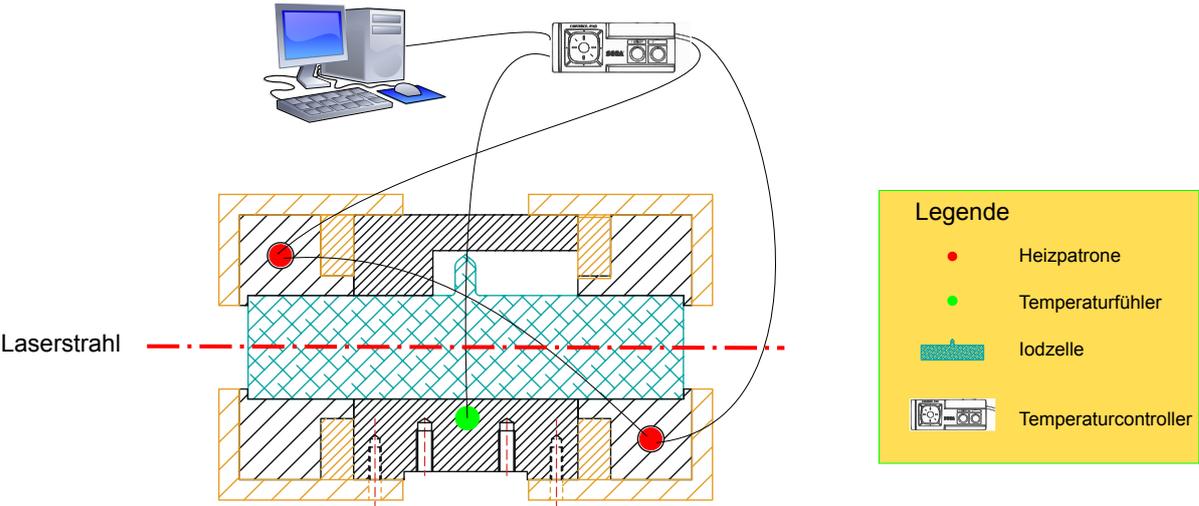


Abbildung 2.3.: Schematischer Aufbau der Temperaturstabilisierung

## 2.2. Justage des Aufbaus und der Parameter

### 2.2.1. Temperaturstabilisierung der Iodzelle

Die Temperaturstabilisierung der Iodzelle wird durch den Controller HT MC1 der Firma Horst gesteuert. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Diese Skizze enthält einen Teil der CAD-Zeichnung, nach der die Aufnahme für die Iodzelle hergestellt wurde. Bei dem Controller handelt es sich um einen fernsteuerbaren PID-Regler (Proportional-Integral-Differenzial-Regler). In Abbildung 2.4 sind die Sprungantworten der einzelnen Teile des Reglers dargestellt. Die Antwort des PID-Reglers besteht aus einer entsprechend gewichteten Kombination der drei Einzelantworten.

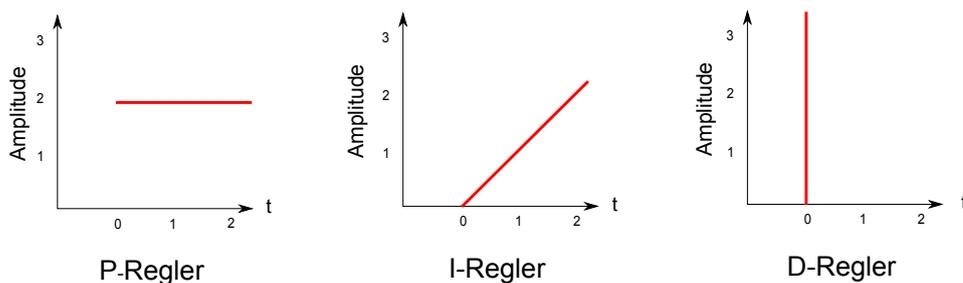


Abbildung 2.4.: Sprungantworten von P-Regler, I-Regler und D-Regler im Vergleich

Das Ziel dieser Kombination ist es, auf der einen Seite eine möglichst schnelle Antwort auf Störungen der Regelgröße zu erhalten, zum anderen jedoch ein Überschwingen zu verhindern. Um das optimal zu gewährleisten ist der Einfluss der einzelnen Anteile durch entsprechende Parameter passend einzustellen. Dafür muss eine Sprungantwort der Regelstrecke aufgenommen werden. Das bedeutet, dass bei Zimmertemperatur die Heizleistung manuell auf 100% gestellt und so lange die Temperaturentwicklung beobachtet wird, bis keine Erwärmung mehr erfolgt.

Wichtige Parameter sind nun die Verzugszeit  $T_u$ , die Ausgleichszeit  $T_g$  und die Steigung der Wendetangente.  $T_u$  ist ein Maß dafür, wie stark die Antwort der Regelstrecke verzögert ist. Sie dient also zur Bestimmung des D-Anteils.  $T_g$  beschreibt die Zeit, die die Regelstrecke benötigt um den Maximalwert zu erreichen. Diese steht mit dem I-Anteil in Zusammenhang. Die Steigung der Wendetangente bestimmt schließlich die Proportionalantwort der Strecke.

Nach der Bedienungsanleitung zum HT MC1 Controller berechnet sich der in % ein-

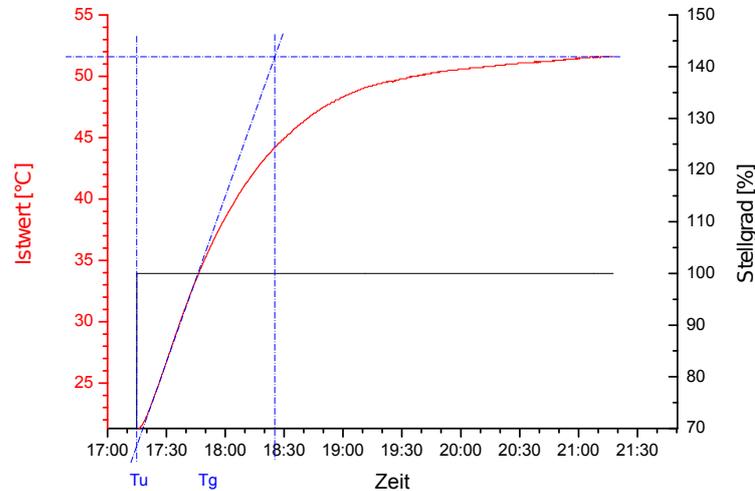


Abbildung 2.5.: Sprungantwort der Regelstrecke

zustellende P-Anteil  $X_P$  zu:

$$X_P = \frac{\Delta T_{Sprungantwort} \cdot 100\%}{\Delta T_{Fuehler}}$$

Für den verwendeten Fühler PT 100 mit einem Temperaturbereich von  $-200^{\circ}C$  bis  $800^{\circ}C$  und einem gemessenen Temperaturunterschied in der Sprungantwort von  $\Delta T=30^{\circ}C$  folgt für  $X_P$ :

$$X_P = \frac{30K \cdot 100\%}{1000K} = 3\%$$

Der I-Anteil und der D-Anteil können direkt aus den entsprechenden Zeiten abgelesen werden. Damit ergeben sich für die PID-Parameter die in Tabelle 2.1 dargestellten rechnerischen Werte. Da der Temperaturcontroller für schneller reagierende Strecken

Tabelle 2.1.: Errechnete PID-Parameter für den Temperaturcontroller

Bezeichnung	P-Anteil	I-Anteil	D-Anteil
Wert	3 %	4200 s	260 s

entwickelt wurde liegt der zulässige Wertebereich für den I-Anteil bei 1–4000 s. Das bedeutet, dass der I-Anteil auf 4000 s begrenzt ist. Zusätzlich muss noch der Schaltzyklus festgelegt werden. Das meint den zeitlichen Abstand zwischen zwei Regelvorgängen

gen des Controllers. Der Wert wurde auf  $t_n = 10$  s gesetzt.

Ausgehend von den errechneten Werten wurden in vielen Versuchsreihen die Parameter schließlich zu den in Tabelle 2.2 aufgeführten Werten ermittelt und eingestellt. Der eingestellte P-Anteil ist nur halb so groß (stärkere Proportionalantwort) wie der

**Tabelle 2.2.:** Empirisch ermittelte PID-Parameter für den Temperaturcontroller

Bezeichnung	P-Anteil	I-Anteil	D-Anteil
Wert	1,5 %	1500 s	260 s

errechnete Wert, weil anderenfalls das Nachregeln zu langsam erfolgte. Aus dem gleichen Grund liegt die Integrationszeit nur bei 1500 s statt 4400 s. Dies war notwendig, weil zwar die Zeit für eine Erwärmung von 20 °C auf 40 °C sehr lang war, die Störungen durch Änderung der Raumtemperatur aber nur wenige Grad betragen und lediglich eine Amplitude von etwa 1 °C haben. Die Auswertung dieser Daten erfolgt im Abschnitt 3.1.

### 2.2.2. Justage der Komponenten

Nachdem alle Komponenten auf der optischen Bank aufgebaut waren, galt es diese zu justieren. Hierzu waren sie zunächst in der Höhe abzustimmen. Dann wurden die Linsen und die Iodzelle so ausgerichtet, dass sie sich mittig im Strahlengang befanden. Die Fotodioden wurden so hinter den Linsen platziert, dass sie nicht genau im Brennpunkt liegen. Dadurch wäre nur ein kleiner Teil der Detektorfläche ausgeleuchtet worden. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Detektorfläche ungleich empfindliche Stellen hat, soll dies vermieden werden. Zudem war der Strahlteiler so auszurichten, dass die beiden optischen Achsen parallel zur Tischplatte und orthogonal zueinander verlaufen.

Nachdem die Dioden mit den Impedanzwandlern verbunden waren, wurde der Strahl des Lasers zunächst bei großer Intensität justiert. Anschließend musste die Lichtstärke mit einer Stellschraube so weit reduziert werden, dass die Dioden nicht in Sättigung gingen.

Beide Heizpatronen der Iodzelle wurden in Reihe geschaltet um eine geringere Heizleistung zu erreichen, da der Controller eine feste Ausgangsspannung hat und die Heizleistung nur über das Tastverhältnis bestimmt wird. Bei 40 °C ist die benötigte Heizleistung so gering, dass sonst die Heizung der Zelle in kurzen Stößen erfolgen

würde.

Nachdem die beiden Fotodioden mit dem AD-Wandler verbunden waren, konnte über das Seederkontrollprogramm die Temperaturkontrollspannung des Laserkristalls durchgescannt werden. Dabei driftet die Wellenlänge über einen bestimmten Bereich. Somit kann über das vom Seederkontrollprogramm grafisch ausgegebene Intensitätsverhältnis an den beiden Fotodioden das Absorptionsspektrum der Iodzelle betrachtet werden. Um hierfür eine Zuordnung zu einer Wellenlänge zu erhalten, da nicht nur eine stabile, sondern eine bestimmte Wellenlänge gewollt ist, wurde das Absorptionsspektrum von Iod zudem mit dem Programm IodineSpec4 von Thoptica Photonics berechnet.

Während zum Zeitpunkt dieser Arbeit die gewählte Wellenlänge sich am Nd:YAG-Spektrum orientiert, soll zukünftig mit 1064,699 nm die Wellenlänge einer Fraunhoferlinie eingestellt werden. Der Hintergrund ist, dass bei dieser Wellenlänge das Sonnenspektrum wegen einer Absorptionslinie des Wasserstoffs in der Sonnenatmosphäre eine stark verringerte Intensität hat. Dadurch wird der Untergrund der Messung kleiner.

### 2.2.3. Iod-Absorptionsspektrum

Das Programm IodineSpec4 zur Berechnung des Iodspektrums liefert den Absorptionsquerschnitt  $\sigma$  der Iodmoleküle als Funktion der Wellenzahl  $\tilde{\nu}$ . Daraus lässt sich die Wellenlänge nach  $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$  berechnen. Der Absorptionsquerschnitt wird jedoch in willkürlichen Einheiten ausgegeben. Die Transmission  $\tau$  durch die Iodzelle berechnet sich zu

$$\tau = e^{-\frac{N(T)\sigma(\lambda)}{A}} \quad (2.1)$$

$A$  bezeichnet hierbei den Strahlquerschnitt in der Iodzelle.  $N$  ist die Anzahl der Teilchen. Weil der Druck gering ist, kann die Teilchenzahl über das ideale Gasgesetz mit der Boltzmann-Konstante  $k_B$  berechnet werden.

$$pV = Nk_B T \quad (2.2)$$

Da nur die Teilchen betrachtet werden sollen, die auch vom Strahl erfasst werden, ist das Volumen  $V$  in diesem Fall nicht das gesamte Volumen der Zelle, sondern berechnet sich im konkreten Fall mit der Länge der Iodzelle  $l=10$  cm zu

$$V = A \cdot l \quad (2.3)$$

Weil das Iod in der Zelle sowohl in fester als auch in gasförmiger Phase vorliegt, entspricht der Druck  $p$  dem Sublimationsdruck des Iods  $p_s(T)$ .

Nach [Gillespie/Fraser] kann der Sublimationsdruck für Iod durch die Formel

$$\log p_s = -3512,8/T - 2,013 \cdot \log T + 13,3740 \quad (2.4)$$

beschrieben werden.

$\log$  bezeichnet hier den dekadischen Logarithmus,  $T$  die Temperatur in Kelvin. Für Temperaturen um  $40^\circ\text{C}$  ist die Abweichung der gemessenen von den theoretischen Werten nach [Gillespie/Fraser] kleiner als ein Prozent.

Um die Teilchenzahlen für verschiedene Temperaturen zu berechnen, wurde in der Sprache 'C' ein Programm geschrieben (Quellcode im Anhang unter A.1.1), das für ein festgelegtes Temperaturintervall den Druck in Abhängigkeit von der Temperatur in eine txt-Datei schreibt. Diese Datei wird wiederum von einem zweiten Programm ausgelesen (siehe A.1.2), das dann mit dem Iodspektrum nach der Gleichung (2.1) die Transmission berechnet. Da das Programm Iodine Spec4 jedoch Absorptionsquerschnitte in willkürlichen Einheiten ausgibt, musste im Exponenten von Gleichung (2.1) eine Skalierungskonstante eingeführt werden. Ihr Wert wurde empirisch ermittelt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abschnitt 3.2.1 dargestellt.

#### 2.2.4. Auslesen der Logdatei

Um auch quantitativ die Wirkung der Stabilisierung erfassen zu können muss die Logdatei des Seederkontrollprogramms ausgelesen werden. Diese Datei hat folgende Struktur: Am Anfang jeder Zeile steht das Datum, dann folgt durch einen Tab getrennt die Uhrzeit, danach kommt eine Bezeichnung der Zeile. Dies ist gewissermaßen ihre 'Erkennungsmarke'. Es wird zwischen fünf verschiedenen Zeilen unterschieden, die Informationen über den Seederlaser und das Wellenlängenmeter enthalten. Die verschiedenen Arten haben jedoch keine feste Reihenfolge. Somit kann die Datei nicht automatisch in ein Programm zur Auswertung von Messdaten wie Origin oder Excel

eingelezen werden. Folglich war eine Leseroutine zu schreiben, die die verschiedenen Zeilenarten erkennt und die Messwerte dann jeweils in Spalten untereinander schreibt und dem entsprechenden Zeitpunkt zuordnet.

Das Programm enthält die fünf 'Erkennungsmarken' der verschiedenen Zeilen. Es liest zeilenweise die Quelldatei in einen String ein. Dieser String wird dann mit allen Erkennungsmarken auf Übereinstimmung überprüft. Falls eine solche vorliegt, wird die entsprechende Routine gestartet und alle erforderlichen Daten werden zeichenweise in einem neuen String kopiert und so zusammengesetzt, dass sie dem vorgegebenen Muster entsprechen. Auf diese Weise entstehen drei Messwertreihen, die sich dann beispielsweise mit Origin darstellen lassen.



# 3 Auswertung

Alle in der Auswertung verwendeten Daten stammen vom 14.07.2010. Die Wellenlängen werden stets für Vakuum angegeben.

## 3.1. Temperaturstabilisierung der Iodzelle

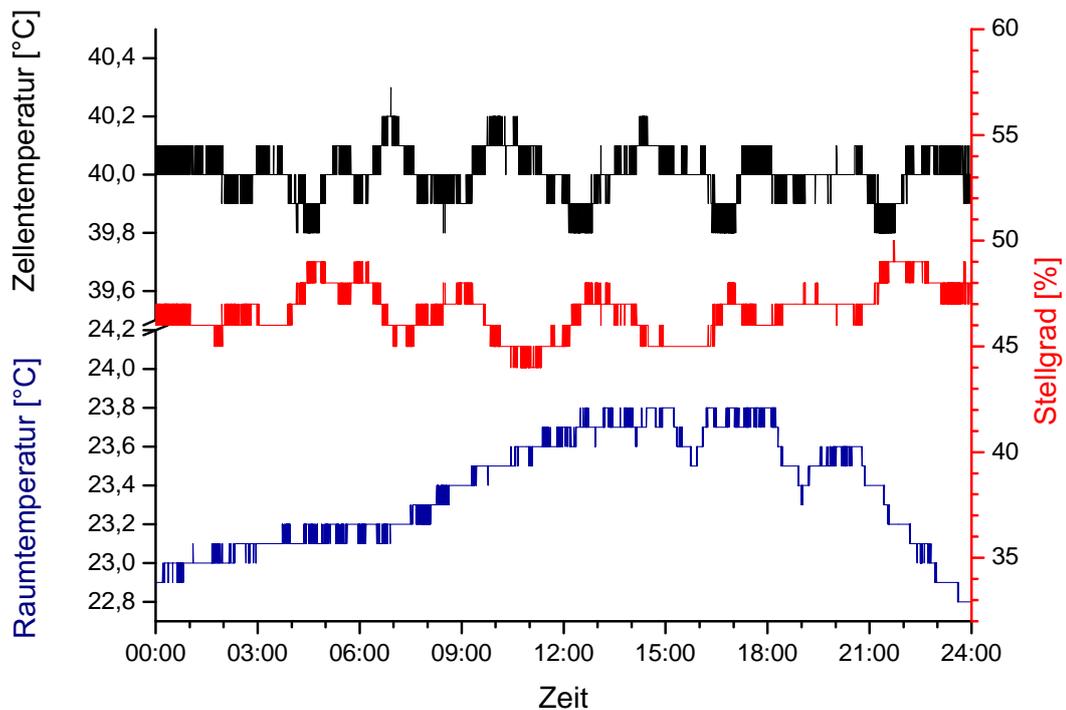


Abbildung 3.1.: Temperatur in der Iodzelle

Die Abbildung 3.1 zeigt den Verlauf der Temperatur in der Iodzelle, des Stellgrads der Heizung und der Raumtemperatur. Die ersten beiden Werte werden durch den Temperaturcontroller ausgegeben, die Raumtemperatur wurde mit einem Datenlogger gemessen. Zunächst wird deutlich, dass sowohl der Temperaturcontroller als auch der Datenlogger eine Auflösung von maximal  $0,1\text{ °C}$  haben. Die Raumtemperatur stieg bis 13:00 Uhr von  $22,9\text{ °C}$  auf  $23,8\text{ °C}$  an. Das liegt daran, dass die Klimaanlage die beim Betrieb des Leistungslasers entstehende Wärme nicht vollständig abführen kann. Der Leistungslaser war vom Spätnachmittag des Vortags bis 18:02 Uhr in Betrieb. Da die Klimaanlage tagsüber mehr Räume kühlen muss, steigt die Temperatur in dieser Zeit im Laserraum an.

Die Temperatur in der Iodzelle zeigt, von einer Ausnahme um ca. 9:45 Uhr abgesehen, Schwankungen von maximal  $\pm 0,2\text{ °C}$  um den Sollwert von  $40\text{ °C}$ . Zwischen 3:30 Uhr und 21:30 Uhr zeigt die Temperatur periodische Schwankungen mit einer Periodendauer von etwa 3,5 Stunden. Da diese Schwingungen keine Korrelation mit der Außentemperatur zeigen, wird es sich um Eigenschwingungen des Regelkreises handeln. Weil die berechneten Parameter des PID-Reglers durch eine Versuchsreihe empirisch optimiert wurden und die Schwingungsamplitude mit  $\pm 0,2\text{ °C}$  nur eine signifikante Stelle größer ist als die Auflösung des Controllers, scheint die erreichte Stabilität des Regelkreises bestmöglich zu sein.

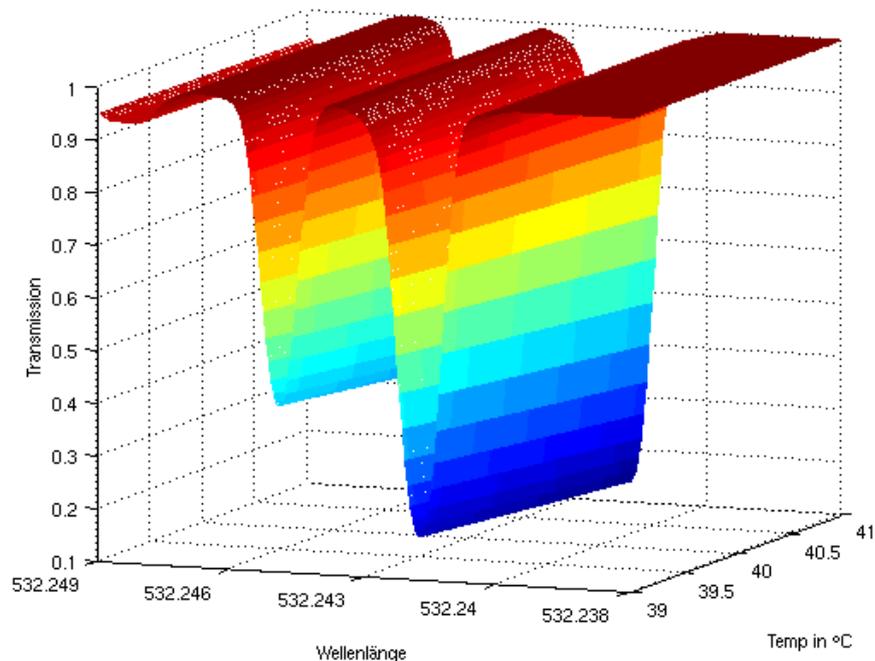
## 3.2. Erwartete Drift der Wellenlänge

Für die Regelung der Wellenlänge des Seederlasers werden im Wesentlichen zwei Fehlerquellen erwartet:

- Zum einen konnte die Temperatur in der Iodzelle nur auf  $\pm 0,2\text{ °C}$  stabilisiert werden. Wie in Abschnitt 2.2.3 erläutert, ist die Transmission durch die Iodzelle nicht nur eine Funktion der Wellenlänge, sondern auch eine Funktion der Temperatur. Es wird also bei Temperaturänderung in der Iodzelle eine Änderung des Intensitätsverhältnisses erwartet, die dazu führt, dass die Wellenlänge des Lasers nachgestellt wird.
- Zum anderen zeigen die Photodioden, mit denen die Intensitäten der Teilstrahlen gemessen werden eine Variation, die dazu führen kann, dass der Laser fälschlicherweise nachgeregelt wird.

### 3.2.1. Wellenlängendrift durch Temperaturänderung in der Iodzelle

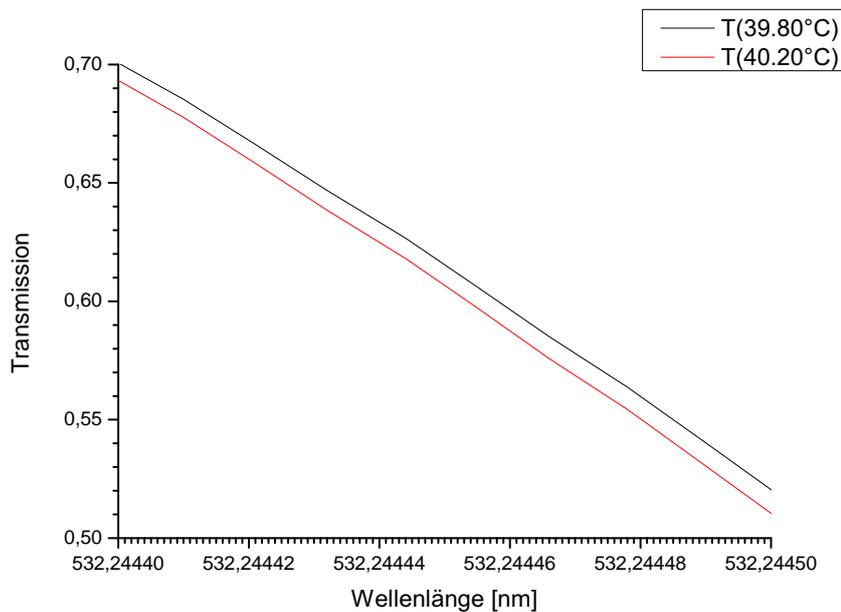
Das mit den in Abschnitt 2.2.3 genannten Programmen berechnete Spektrum als Funktion der Wellenlänge und der Temperatur ist in Abbildung 3.2 als dreidimensionaler Graf dargestellt. Die Linien gleicher Transmission sind hier durch farbliche Übergänge dargestellt. Insbesondere an den beiden Minima ist zu erkennen, dass die Transmission eine Funktion der Temperatur ist. Bei höherer Temperatur kann weniger Licht die Iodzelle passieren, weil sich mehr Moleküle in der Gasphase befinden.



**Abbildung 3.2.:** Transmission durch die Iodzelle als Funktion der Wellenlänge und der Temperatur

Um eine qualitative Aussage über die Änderung der Wellenlänge mit der Temperatur machen zu können, wurde aus dem gleichen Datensatz eine Kurvenschar für die minimale und die maximale Temperatur der Iodzelle (39,8 °C und 40,2 °C) erstellt. Innerhalb dieses Toleranzbereichs hält der PID-Regler die Temperatur der Iodzelle konstant. Um in dem Grafen die beiden Linien als solche erkennen zu können war es notwendig, einen sehr kleinen Ausschnitt zu wählen. Am Betriebspunkt des Lasers, etwa bei einer Transmission von 0,6 und einer Wellenlänge von 532,244 nm, ergibt sich das in Abbildung 3.3 gezeigte Verhältnis von Wellenlänge zu Transmission. Der

Wert für die Transmission von 0,6 kommt durch folgende Abschätzung zustande: Der Strahlteiler transmittiert etwa 70 % des Lichts. Das eingestellte Verhältnis von Intensität hinter der Zelle zu Intensität vor der Zelle beträgt 2. Weil zusätzlich Verluste durch Reflexe an den Glasscheiben der Iodzelle entstehen, wird das Transmissionsverhältnis durch den Ioddampf mit 0,6 angenommen.



**Abbildung 3.3.:** Transmission durch die Iodzelle als Funktion der Wellenlänge für zwei verschiedene Temperaturen

Unter der Annahme, dass das Programm zum Steuern des Seederlasers das Intensitätsverhältnis konstant hält, lässt sich aus der Grafik 3.3 die erwartete Drift für die Temperaturänderung von 0,4 °C ablesen. Sie beträgt  $\Delta\lambda_{Temp} = 5 \text{ fm} = 5,3 \text{ MHz}$ .

### 3.2.2. Wellenlängendrift die Fotodioden

Abbildung 3.4 zeigt das Signalverhältnis der beiden Fotodioden. Neben einzelnen Amplitudensprüngen zeigt es eine ständige Variation von  $\pm 0,02$ , die zeitweilig (z.B. zwischen 19:00 und 21:00 Uhr) besonders groß ist. In dieser Zeigt beträgt die mittlere Abweichung etwa  $\pm 0,1$ , entspricht 5 %. Anhand von Abbildung 3.3 kann diesem Wert eine Wellenlängenänderung zugeordnet werden. Sie liegt bei  $\Delta\lambda_{Rausch} = 34 \text{ fm} = 36 \text{ MHz}$ . Diese Variation ist jedoch klein gegen die kurzzeitigen Amplitu-

densprünge mit einer Abweichung von etwa  $\pm 0,4$ , entspricht 20 %. Sie haben eine zeitliche Länge von etwa 10 s. Verursacht werden sie unter anderem durch elektrische Störungen der übrigen Geräte im Labor. So lassen sich diese Spitzen beispielsweise durch Ein- und Ausschalten eines Computerbildschirms wiederholbar erzeugen. Da die Software des Lasers diese Verhältnisänderungen nicht von echten Änderungen der Wellenlänge unterscheiden kann, werden sie zumindest teilweise 'ausgeregelt' und verursachen Frequenzänderungen von maximal 140 MHz.

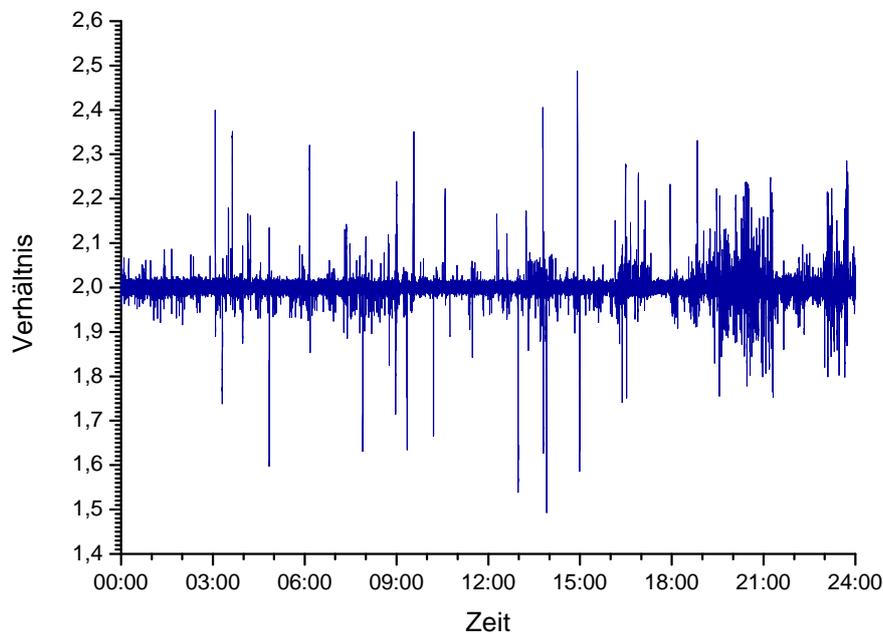


Abbildung 3.4.: Signalverhältnis der beiden Fotodioden

### 3.2.3. Drift des Ångströmmeters

Nach den Herstellerangaben hat das verwendete Ångströmmeter unter Laborbedingungen eine Genauigkeit von 30 MHz über einen Zeitraum von 20 min. Um eine Genauigkeit von 100 MHz zu erreichen schreibt der Hersteller eine Kalibrierungsperiode von zwei Wochen vor. Der Zeitpunkt der letzten Kalibrierung konnte nicht ermittelt werden, lag jedoch zum Zeitpunkt dieser Auswertung länger als ein halbes Jahr zurück. Somit muss damit gerechnet werden, dass die absolute Abweichung der Wellenlängenmessung mehrere 100 MHz beträgt. Die relative Abweichung im Verlauf eines

Tages (in diesem Fall die Messdauer) sollte geschätzt kleiner als 60 MHz sein, nach Angaben des Herstellers sicher kleiner als 100 MHz sein.

### 3.2.4. Zusammenfassung der erwarteten Drift

Aus dem zuvor Gesagten ergibt sich die in Tabelle 3.1 gezeigte Abschätzung für die maximale Drift der gemessenen Frequenz. Zu beachten ist jedoch, dass die Drift des Ängströmmeters nicht in die wahre Frequenzänderung eingeht, sie beeinflusst nur die Unsicherheit der Messkurve 3.5. Damit wird deutlich, dass die durch die Tempera-

**Tabelle 3.1.:** Maximale Drift der Wellenlänge des Seederlasers

Driftursache	Ängströmmeter	Fotodioden (Variation)	elektrische Störungen	Iodzelle
Wert [MHz]	60	34	140	5,3
Gesamt	scheinbare Drift 60 MHz		reale Drift 145 Mhz	

turänderung in der Iodzelle erwartete Drift wesentlich kleiner ist, als die durch die Variation der Fotodioden und die elektrischen Störungen. Da die zwei letztgenannten Fehlerquellen beide das Signalverhältnis der Fotodioden beeinflussen, kann für eine Fehlerabschätzung der größere der beiden Werte als Maximalwert angenommen werden.

## 3.3. Gemessene Wellenlängendrift

Die Abbildung 3.5 zeigt den Verlauf der Wellenlänge. Zusätzlich aufgetragen sind die Temperatur der Iodzelle und die Temperatur im Wellenlängenmeter. Die gemessene Wellenlänge hat eine Schwingung mit einer Periode von etwa 24 Stunden und einer Amplitude von rund 60 fm. Insgesamt ist das Signal um etwa 20 fm verrauscht. Außerdem ist noch eine Schwingung mit einer Amplitude von 20–30 fm auszumachen. Deren Periodendauer ist jedoch variabel. Zwischen 00:00 und 06:00 Uhr beträgt sie rund eine Stunde. Von 15:00–21:00 Uhr liegt sie jedoch bei drei Stunden.

Der Verlauf der Iodzellentemperatur wurde bereits im Abschnitt 3.1 diskutiert. Er wurde dargestellt, um eine eventuelle zeitliche Korrelation zwischen Änderungen der

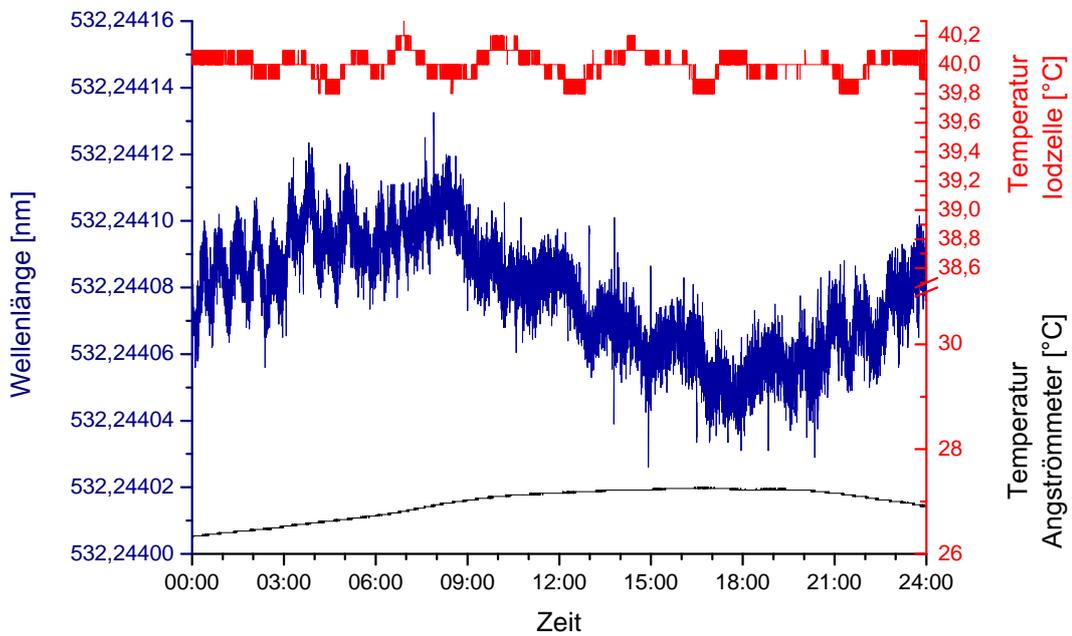


Abbildung 3.5.: Verlauf der Wellenlänge, mit Temperatur der Iodzelle und des Ängströmmeters

Zellentemperatur, und damit des Dampfdrucks in der Zelle, und der Wellenlänge aufzeigen zu können. Die Temperatur innerhalb des Ängströmmeters wurde mit angegeben, weil Temperaturschwankungen eine wahrscheinliche Ursache für eine Drift des Geräts sind.

### 3.4. Interpretation der Wellenlängendrift

Es fällt auf, dass die gemessene mittlere Wellenlänge mit 532,24407 nm von dem über das Iodspektrum zu  $\lambda=532,24445$  nm berechneten Wert um rund 400 fm abweicht. Diese Diskrepanz erklärt sich dadurch, dass das Ängströmmeter seit mindestens einem halben Jahr nicht mehr kalibriert wurde. Trotzdem ist davon auszugehen, dass die gemessenen relativen Abweichungen eines Tages innerhalb der in Kapitel 3.2.4 genannten Toleranzen korrekt sind.

Die kürzerperiodischen Schwankungen zwischen 00:00 und 18:00 Uhr resultieren möglicherweise aus einer ungünstigen Abbildung des Interferenzmusters im Ängströmmeter, was zu einem großen Fehler bzw. einer periodischen Variation bei der Wellenlängen-

bestimmung führt. Nach 08:00 Uhr sorgte dann die Temperaturänderung für ein verändertes (günstigeres) Interferenzmuster. Die kurzzeitige Schwingung stimmt in ihrer Periodendauer insbesondere zwischen 09:00 und 18:00 Uhr mit der Temperaturschwingung überein. Den theoretischen Überlegungen zur Absorption in der Iodzelle zufolge dürfte diese Schwingung aber nur eine Amplitude von etwa 5 fm haben. Die gemessene Amplitude liegt jedoch zwischen 20 und 30 fm. Folglich gibt es hier keinen ursächlichen Zusammenhang. Das Rauschen der gemessenen Wellenlänge ist vermutlich im Rauschen des Ängströmmeters begründet, was jedoch mangels genauerer Messmöglichkeiten nicht nachgewiesen werden kann.

Da die Amplitude der längerperiodischen Wellenlängenvariation mit 24-stündiger Periode jedoch im Bereich der eben genannten Toleranzen liegt, ist eine Drift des Wellenlängenmeters als Ursache zu vermuten. Die Temperatur innerhalb des Geräts zeigt jedoch keinen zeitlichen Zusammenhang zur Wellenlängenänderung. Dies wäre ein Indiz dafür gewesen, dass das Messgerät driftet. So kann die Ursache für diese Wellenlängenänderung nicht eindeutig festgestellt werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die gemessene Drift mit etwa 80 fm nur rund 2% der Halbwertsbreite der Etalons im Nachweiszweig beträgt. Diese liegt bei etwa 4 pm. Das bedeutet, dass der Seederlaser für diese Anwendung ausreichend stabilisiert wurde. Diese Vermutung bestätigt sich praktisch: Seit nunmehr sechs Wochen (Stand Ende Juli 2010) sind mit dem RMR-Lidar in Kühlungsborn Tag- und Nachtmessungen möglich. Vor Einschalten der Stabilisierung mussten die Etalons einige Male im Lauf einer mehrstündigen Messung neu auf die Laserwellenlänge abgestimmt werden. Mit der Seeder-Stabilisierung entfällt dies praktisch vollständig.

Weil die gemessene Wellenlängenänderung im Bereich der Unsicherheit des Messgeräts liegt ist zudem nicht festzustellen, ob die tatsächliche Änderung nicht deutlich kleiner ist.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das RMR-Lidar in Kühlungsborn erlaubt Temperaturmessungen in einem Höhenbereich von 20 – 90 km. Durch die Wellenlängenstabilisierung für den Seederlaser sind Messungen nicht nur in der Nacht, sondern auch bei Tag möglich. Diese Stabilisierung nutzt die Wellenlängenabhängigkeit der Transmission durch eine mit Ioddampf gefüllte Zelle um die Laserwellenlänge bei einem bestimmten Wert zu halten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die technischen Komponenten der Iodstabilisierung für den Seederlaser des RMR-Lidars in Kühlungsborn aufgebaut und justiert. Hierzu gehörten eine optische Justage und eine Anpassung von Programmparametern, insbesondere das Anpassen der Parameter des PID-Reglers für die Heizung der Iodzelle. Um die Logdatei des Seederlasers auslesen zu können war eine entsprechende Leseroutine zu schreiben. Außerdem wurde eine mögliche Wellenlängenänderung durch Temperaturverschiebungen in der Iodzelle rechnerisch untersucht. Hierzu war die Temperaturabhängigkeit des Iodspektrums zu untersuchen. Es kann festgehalten werden, dass die durch die verbleibende Ungenauigkeit der Iodzellentemperatur sich ergebende Wellenlängenverschiebung sehr klein ist gegen die anderen Fehlerquellen, insbesondere gegen die Variationen Fotodioden. Hier gibt es Verbesserungsmöglichkeiten: Wenn es gelingt die Störungen der elektrischen Geräte im Labor von den Fotodioden fern zu halten, ist eine Verbesserung der Wellenlängenstabilisierung zu erwarten.

Insgesamt wurde eine Drift von weniger als 80 MHz erreicht. Diese ist wesentlich kleiner als die Halbwertsbreite der im Nachweiszweig verwendeten Etalons. Folglich ist die erreichte Wellenlängenstabilität ausreichend gut um den Betrieb des Systems mit für Tageslichtmessungen optimiertem Empfangszweig zu ermöglichen. Ein vergleichbares Lidar-System in ALOMAR, Norwegen, erreicht nach Quelle [Fiedler/von Cossart] einen Drift von unter 52 MHz. Diese Genauigkeit liegt im Bereich der Exaktheit der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Wellenlängenstabilisierung für den RMR-Seederlaser in Kühlungsborn. Mit dem Verfahren der Frequenzstabilisierung über eine Iod-Absorptionszelle ist nach Quelle [Araya/al] bei deutlich größerem apparativen

Aufwand eine Frequenzdrift von unter einem Kilohertz möglich. Eine solche Genauigkeit ist im vorliegenden Fall jedoch gar nicht erforderlich.

Für die Zukunft ist geplant, den Leistungslaser auf eine Wellenlänge von 1064,699 nm zu stabilisieren. Dies ist die Wellenlänge einer Fraunhoferlinie des Sonnenspektrums. Dadurch wird der Untergrund der Messung weiter reduziert. Bisher ist allerdings noch nicht klar, ob der Leistungslaser bei dieser Wellenlänge die erforderliche Pulsenergie erreicht.

# A Anhang

## A.1. Berechnung der Transmission durch die Iodzelle

### A.1.1. Programm zur Berechnung des Dampfdrucks von Iod

Dieses Programm berechnet wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben den Sublimationsdruck von Iod als Funktion der Wellenlänge und der Temperatur in der Iodzelle.

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

FILE *results;
int a=0, b=0;
double p=0, t=0, mem;
char erg[20], zw[10];

int main(){
    printf("Dieses Programm berechnet den Dampfdruck von Iod in Pa in einem vorgegebenen Temperaturintervall nach
    'The normal pressure of crystalline Iodine', MIT 1936. Die Schrittweite betraegt 0.05K.\n");

    printf("Gib die untere Schranke zur Berechnung in Grad Celsius ein.\n");
    scanf("%d", &a);

    printf("Gib die obere Schranke zur Berechnung in Grad Celsius ein.\n");
    scanf("%d", &b);

    t=a+273.15;

    results = fopen("IodinePressure.txt", "wb");

    while (t<=(b+273.15)){
        sprintf (erg, "%0.2f\t", t-273.15);
        mem=-3512.8/t-2.013*log10(t)+13.374;
        p=pow(10, mem);
        p=p*pow(10, 5);
        sprintf (zw, "%0.31f", p);
        strcat(erg, zw);
        strcat(erg, "\n");
        fputs(erg, results);
        fputs(erg, stdout);
        t=t+0.05;
    }

    fclose(results);
}
```

```

printf("\n\nDone!\n\n");

return 0;
}

```

## A.1.2. Programm zur Berechnung der Transmission

Das folgende Programm berechnet aus dem Absorptionsquerschnitt von Iod als Funktion der Wellenlänge und dem Dampfdruck von Iod als Funktion der Temperatur die Transmission durch die am RMR-Lidar in Kühlungsborn verwendete Iodzelle.

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>

float C=299792458,kb=1.3806504E-23, pi=3.14159, V=0.000016933, A=0.000153938, L=0.11;

FILE *PRESS, *SIGMA, *RESULTS;

int i=0, k=0;
double p=0, t=0, wz=0, si=0, lambda=0, n=0, T=0, b=0;
char tp[50], ws[50], wavenr[20], sigma[20];
char temp[20], press[20], *erg1, *erg2, trans[50], output[2500], header[20];

int main(){
    printf("Dieses Programm berechnet die Transmission durch die Iodzelle in Abhaengigkeit von Wellenlaenge und Temperatur \n");

    SIGMA=fopen("IodspektrK.txt","rb"); //Quelle fuer Iodspektrum in abhaengigkeit von Wellenzahl

    RESULTS= fopen("TransVLT.txt","wb"); //Ausgabedatei

    PRESS= fopen("IodinePressure.txt","rb"); //Quelle fuer Sublimationsdruck von Iod in Abhaengigkeit von der Temperatur

    b=pow(10, -18);
    sprintf (output, "Wellenlaenge\t");

    do{erg2=fgets(tp, 50, PRESS); //ganze schleife: schreibe einen header fuer Ausgabedatei

        for(i=0; i<5; i++){
            temp[k]=tp[i];
            k++;
        }
        k=0;

        t=atof(temp);

        sprintf (header, "T(%.21f C)\t", t);
        strcat(output, header);

    }while(erg2!=NULL);

    strcat(output, "\n");
    fputs(output, RESULTS);

    fclose(PRESS);

    PRESS= fopen("IodinePressure.txt","rb");

    sprintf (output, "\t\t");

```

```

do{ //lese Wellenzahl und Absorptionsquerschnitt aus
    erg1=fgets(ws, 50, SIGMA);

    for(i=0; i <10; i++){
        wavenr[k]=ws[i];
        k++;
    }
    k=0;

    for(i=11; i <22; i++){
        sigma[k]=ws[i];
        k++;
    }
    k=0;
    wz=atof(wavenr);

    lambda=1000000/wz;
    sprintf (output, "%lf\t", lambda);

    si=atof(sigma);

PRESS= fopen("IodinePressure.txt","rb");

do{erg2=fgets(tp, 50, PRESS); //lese Temperatur und Iodsublimationsdruck aus

    for(i=0; i <5; i++){
        temp[k]=tp[i];
        k++;
    }
    k=0;

    for(i=6; i <13; i++){
        press[k]=tp[i];
        k++;
    }
    k=0;

    t=atof(temp); //rechne Temperatur in Kelvin um
    t=t+273.15;

    p=atof(press);

    n=V*p/(kb*t); //berechne die Anzahl der Teilchen im Laserstrahl

    T=exp(-n*si*b/A); //berechne die Transmission durch die Zelle

    sprintf (trans, "%.9lf\t", T);
    strcat(output, trans);

}while(erg2!=NULL);

    strcat(output, "\n"); //schreibe die Ergebnisse in die Ausgabedatei
    fputs(output, RESULTS);

    fclose(PRESS);
}while(erg1!=NULL);

fclose(SIGMA);
fclose(RESULTS);

printf("\n\nDone!\n\n");

return 0;
}

```

## A.2. Leseroutine

Die auszulesende Logdatei des Seederlaserkontrollprogramms hat folgende Struktur, die 'Erkennungsmarken' der einzelnen Zeilen sind blau hervorgehoben:

```

2010-06-13 00:00:06 SDR p01 vismean0 2.148676 vismean1 4.293840 visstdev0 0.091605 visstdev1 0.110205
2010-06-13 00:00:06 SDR p04 stab 23.7288 range 0.0010 counts 59
2010-06-13 00:00:06 SDR p03 irmean -0.022984 irstdev 0.044658
2010-06-13 00:00:06 SDR p02 r 1.9984 stab 23.7288 tmp 8.072000 pzo 6.272286
2010-06-13 00:00:08 SDR p01 vismean0 2.152676 vismean1 4.308288 visstdev0 0.096651 visstdev1 0.099775
2010-06-13 00:00:08 SDR p04 stab 22.7848 range 0.0010 counts 79
2010-06-13 00:00:08 SDR p03 irmean -0.022913 irstdev 0.044768
2010-06-13 00:00:08 SDR p02 r 2.0014 stab 22.7848 tmp 8.072000 pzo 6.266687
2010-06-13 00:00:10 SDR p01 vismean0 2.149154 vismean1 4.300454 visstdev0 0.088028 visstdev1 0.106116
2010-06-13 00:00:10 SDR p04 stab 22.2222 range 0.0010 counts 99
2010-06-13 00:00:10 SDR p03 irmean -0.022848 irstdev 0.044795
2010-06-13 00:00:10 SDR p02 r 2.0010 stab 22.2222 tmp 8.072000 pzo 6.234586
2010-06-13 00:00:12 SDR p04 stab 21.0084 range 0.0010 counts 119
2010-06-13 00:00:12 SDR p03 irmean -0.023128 irstdev 0.044524
2010-06-13 00:00:12 SDR p02 r 2.0041 stab 21.0084 tmp 8.072000 pzo 6.255418
2010-06-13 00:00:12 SDR p01 vismean0 2.158819 vismean1 4.326507 visstdev0 0.095132 visstdev1 0.106714
2010-06-13 00:00:14 SDR p01 vismean0 2.160273 vismean1 4.308843 visstdev0 0.093281 visstdev1 0.110711
2010-06-13 00:00:14 SDR p04 stab 20.8633 range 0.0010 counts 139
2010-06-13 00:00:14 SDR p03 irmean -0.022964 irstdev 0.044636
2010-06-13 00:00:14 SDR p02 r 1.9946 stab 20.8633 tmp 8.072000 pzo 6.091511
2010-06-13 00:00:14 WLM p01 F 281.630585 Lambda 1064.488283 T 25.062 RIodine 2.0059

```

Folgendes Programm liest diese Logdatei aus und schreibt sie in neue Dateien, die entsprechend weiterverarbeitet werden können.

```

#include <stdio.h>
#include <string.h>
FILE *quelle, *Ra, *Wl, *Power;
char str[100], zwischen[50], wlm[]="WLM", zeit[100], wavenr[10], ausgwlm[20], p02[]="SDR p02", dpkt[]=":", ratio[10];
char stabil[10], tmp[10], pzo[10], twlm[10], p01[]="SDR p01", pbfcell[10], pbhcell[10], pfad[9];
char kp02[]="Time\t\tTime\t\tStability\tVoutTmp\t\tVoutPzo\n\n"; //Kopfzeile f r p02
char kwlm[]="Time\t\tWavelength/nm\tTmpWlm/ C \n"; //Kopfzeile f r WLM
char kp01[]="Time\t\tPower bef Cell\t\tPower beh Cell\n"; //Kopfzeile f r p01
char *erg, a;
int i=5, k=0;

int main(){
printf("Dieses Programm liest den den Logfile des RMR-Seeder in KBorn aus.\n\n"
"Stelle etwa in Zeile 25 des Programmtextes den Pfad zur Quelldatei ein.\n\n"
"Falls die Fehlermeldung 'Quelldatei nicht gefunden' erscheint, ggf korrigieren.\n\n"
"anderenfalls erzeugt das Programm im uebergeordneten Verzeichnis die Dateien\n"
"WLMeter, Ratio und Power mit entsprechendem Inhalt.\n\n");

quelle = fopen("../20100624.laserlog.txt", "rb"); //Pfadangabe zur Quelldatei

```

```

if (quelle == NULL){
    printf("Quelldatei nicht gefunden.\n");
}
else printf("Quelle erfolgreich geoeffnet.\n");

Wl = fopen("../WlMeter.txt", "wb");

Ra = fopen("../Ratio.txt", "wb");

Power = fopen("../Power.txt", "wb");

fputs(kp02, Ra); //schreibe Kopfzeile in Datei f r p02
fputs(kwlm, Wl); //schreibe Kopfzeile in Datei f r WlM
fputs(kp01, Power); //schreibe Kopfzeile in Datei f r p01

do {
    erg=fgets(str, 100, quelle); //lese die Zeit in hh:mm:ss aus

    if (strstr(str, dpkt)){ //untersuche ob Zeile Zeitangabe enthaelt

        for(i=11; i<19; i++){
            zeit[k]=str[i];
            k++;
        }
        k=0;

        if (strstr(str, wlm)){ //untersuche ob Zeile WlM oder nicht
            for(i=51; i<63; i++){ //lese Lambda von Wavelengthmeter aus
                wavenr[k]=str[i];
                k++;
            }
            k=0;
            wavenr[12] ='\0';
            strcat(zeit, "\t");
            strcat(zeit, wavenr);

            for(i=69; i<75; i++){ //lese T von Wavelengthmeter aus
                twlm[k]=str[i];
                k++;
            }
            k=0;
            strcat(zeit, "\t");
            strcat(zeit, twlm);

            strcat(zeit, "\n");
            fputs(zeit, Wl);
        }

        if (strstr(str, p01)){ //untersuche ob Zeile SDR p01
            for(i=39; i<48; i++){ //lese Power before Cell aus Zeile P01 aus
                pbfcell[k]=str[i];
                k++;
            }
            k=0;
            strcat(zeit, "\t");
            strcat(zeit, pbfcell);

            for(i=59; i<67; i++){ //lese Power behind Cell aus Zeile P01 aus
                pbhcell[k]=str[i];
                k++;
            }
            k=0;
            strcat(zeit, "\t\t");
            strcat(zeit, pbhcell);
            strcat(zeit, "\n");
            fputs(zeit, Power);
        }

        if (strstr(str, p02)){ //untersuche ob Zeile SDR p02

```

```
        for(i=32; i<38; i++){           //lese ratio aus Zeile P02 aus
            ratio[k]=str[i];
            k++;
        }
        k=0;
        strcat(zeit, "\t");
        strcat(zeit, ratio);

        for(i=45; i<52; i++){           //lese stability aus Zeile P02 aus
            stabil[k]=str[i];
            k++;
        }
        k=0;
        strcat(zeit, "\t\t");
        strcat(zeit, stabil);

        for(i=59; i<66; i++){           //lese Temperaturkontrollspannung aus Zeile P02 aus
            tmp[k]=str[i];
            k++;
        }
        k=0;
        strcat(zeit, "\t\t");
        strcat(zeit, tmp);

        for(i=74; i<82; i++){           //lese Piezokontrollspannung aus Zeile P02 aus
            pzo[k]=str[i];
            k++;
        }
        k=0;
        strcat(zeit, "\t\t");
        strcat(zeit, pzo);
        strcat(zeit, "\n");
        fputs(zeit, Ra);
    }
    zeit[8] = '\0';
}

while (erg!=NULL);

fclose(quelle);
fclose(WI);
fclose(Ra);
fclose(Power);

printf("\n\nDone!\n\n");

return 0;
}
```





# Literaturverzeichnis

- Alpers, M./al:** The Rayleigh/Mie/Raman Lidar at IAP Kühlungsborn. *Journal of Aerosol Science*, 30 1999, 637–638
- Alpers, M./al:** Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using Resonance, Rayleigh, and Rotational Raman scattering. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4 2004, 793–800
- Araya, Akito/al:** Iodine-stabilized Nd:YAG laser applied to a long-baseline interferometer for wideband earth strain observations. *Review of scientific instruments*, 73 2002, 2434–2439
- Bauer, Helmbrecht:** *Lasertechnik: Grundlagen und Anwendungen*. Würzburg. 1991
- Demtröder, Wolfgang:** *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Berlin. 2005
- Eichler, J./Eichler, H.J.:** *Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Berlin. 2002
- Fiedler, Jens/Cossart, Götz von:** Automated Lidar Transmitter for multiparameter Investigations Within the Artic Atmosphere. *IEE transactions on geoscience and remote sensing*, 37 1999, 748–755
- Gerding, Michael/al:** Seasonal variation of nocturnal temperatures between 1 and 105 km altitude at 54 N observed by lidar. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8 2008, 7465–7482
- Gillespie, Louis J./Fraser, Lewis H. D.:** The normal Vapor pressure of chrySTALLINE Iodine. *Contribution from the Research Laboratory of physical Chemistry* 58 1936

**LaserSystems, HighFinesse (Hrsg.):** Wavelengthmeter WS Ultimate User Manual.  
Tübingen

**Themaddin:** Regelungstechnik. (URL: <http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik>) – Zugriff am 09-07-10

# Selbständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine außer den von mir angegebenen Hilfsmitteln und Quellen dazu verwendet habe sowie die den benutzten Werken inhaltlich und wörtlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Rostock, 02.08.2010