



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Landeswettbewerb Jugend forscht

## SACHSEN-ANHALT



### **Zum Einfluss des Resonatorauf- baues auf Leistung und Strah- lenqualität bei Lasern**

Josefine Proll

**Schule:**

Landesschule Pforta  
Schulstraße 12  
06628 Schulpforte



Zum  
Einfluss des Resonatoraufbaus  
auf Leistung und Strahlqualität  
bei Lasern

September 2004-Juli 2005 Schulpforte

vorgelegt von Josefine Proll, 13N

Betreuer: Gerald Lange, LaserOptikSysteme, Jena

Lutz Henniger, LaserOptikSysteme, Jena

Silke Tonndorf, Landesschule Pforta, Schulpforte

## Inhaltsverzeichnis

0. Einleitung .....	- 4 -
1. Theoretische Vorbetrachtungen .....	- 5 -
1.1 Allgemeine Funktionsweise .....	- 5 -
1.1.1 Absorption .....	- 6 -
1.1.2 Stimulierte bzw. induzierte Emission.....	- 6 -
1.1.3 Resonatorprinzip .....	- 7 -
1.2 Pumpen.....	- 8 -
1.2.1 Pumpen mit Blitzlampen .....	- 8 -
1.2.3 Pumpen mit Dioden.....	- 9 -
1.3 Lasertypen .....	- 10 -
1.3.1 Festkörperlaser .....	- 10 -
1.3.2 Helium-Neon-Laser.....	- 10 -
1.3.3 Diodenlaser.....	- 11 -
1.4 Anwendung von Lasern .....	- 12 -
2. Methoden.....	- 13 -
2.1 Qualitätsprüfung der Laserkristallstäbe .....	- 13 -
2.1.1 Prüfung mit AKF.....	- 13 -
2.1.2 Die Parallelitätsüberprüfung mit Hilfe eines Lasers .....	- 14 -
2.2 Justierung des Hauptexperimentes .....	- 15 -
2.2.1 Grobjustierung.....	- 16 -
2.2.2 Feinjustierung.....	- 16 -
2.3 Überprüfen der optimalen Arbeitstemperatur .....	- 17 -
2.4 Untersuchung der Leistung mit verschiedenen Auskoppelspiegeln und Resonatorlängen .....	- 17 -
2.5 Untersuchung der Strahldivergenz mit verschiedenen Resonatorlängen.....	- 19 -
2.6 Überprüfung der Kippstabilität eines Resonatoraufbaus .....	- 21 -
3. Auswertung .....	- 22 -
3.1 Qualitätsprüfung der Kristallstäbe .....	- 22 -
3.1.1 Überprüfung der Parallelität der Endflächen und der Rechtwinkligkeit bezüglich des Umfanges mit AKF .....	- 22 -
3.1.2 Überprüfung der Parallelität der Endflächen mit He-Ne-Laser .....	- 23 -
3.2 Optimale Arbeitstemperatur der Laserköpfe 013-97 und 016-98 .....	- 24 -
3.3 Einfluss des Auskoppelspiegels .....	- 25 -

3.4 Einfluss der Resonatorlänge.....	- 27 -
3.5 Kippstabilität bei unterschiedlichen Resonatorlängen .....	- 28 -
3.6 Divergenz .....	- 30 -
4. Zusammenfassung.....	- 31 -
5. Anhang .....	- 33 -
5.1 Protokolle .....	- 33 -
5.2 Quellenverzeichnis .....	- 46 -
5.3 Literaturverzeichnis.....	- 47 -
5.4 Bildquellenverzeichnis .....	- 48 -
5.5 Selbstständigkeitserklärung.....	- 49 -
5.5 Selbstständigkeitserklärung.....	- 49 -

## 0. Einleitung

Diese Arbeit ist im Rahmen eines einjährigen Praktikums bei der Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH in Jena entstanden.

Bei der L.O.S. werden Laser für den unterschiedlichen Einsatz in Lasershows bis hin zur Materialbearbeitung entwickelt und produziert. Die in diesem Betrieb hergestellten Laser können unterschiedliche Merkmale haben, so unterscheiden sie sich in Wellenlänge und Aufbau, außerdem kann die Leistung von 1 Watt bis zu 70 Watt betragen. Bei dem Aufbau ist vor Allem der Resonator mit der Länge und unterschiedlichen Auskoppelspiegeln veränderlich, er nimmt Einfluss auf Leistung und Qualität des Laserstrahls.

Zu Beginn der Arbeit soll die Theorie des Lasers betrachtet werden, wobei besondere Schwerpunkte auf dem Laserprinzip und den verschiedenen Laserarten liegen. Im folgenden Verlauf wird auf die Methoden eingegangen, mit denen die Versuche durchgeführt wurden. Zur Untersuchung der Leistung des Strahls in Abhängigkeit von der Stromstärke wurden die Resonatorlänge sowie der Auskoppelspiegel im Resonatoraufbau verändert, in Bezug auf die Resonatorlänge wurde ebenfalls der Einfluss auf die Strahlqualität, hier in Form der Divergenz, gemessen. Laser reagieren sehr empfindlich auf Dejustierungen, deshalb ist die Untersuchung der Kippstabilität ein wichtiger Bestandteil der Messungen, gerade weil diese Dejustierungen häufig beim Transport auftreten können.

Laser werden heutzutage neben dem bekannten Hausgebrauch z.B. bei CD-Spielern und Laserdruckern insbesondere in der Industrie verwendet. Gerade für die Materialbearbeitung ist eine stabile, hohe Leistung notwendig, die wiederum vom Resonatoraufbau abhängig ist. Es kann aber auch notwendig sein, einen Strahl mit sehr geringer Divergenz zu erzeugen. Um den Aufbau des Lasers dem späteren Verwendungszweck anzupassen, wurden vergleichende Messungen an jeweils zwei verschiedenen Laserköpfen durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, Zusammenhänge zwischen Leistung und Qualität des Laserstrahls bei unterschiedlichem Resonatoraufbau darzustellen.

## 1. Theoretische Vorbetrachtungen

Laser – dieser allgemein bekannte und häufig verwendete Begriff ist die Abkürzung für den englischen Ausdruck „Light amplification by stimulated emission of radiation“, was auf Deutsch „Lichtverstärkung durch angeregte Aussendung von Strahlung“ heißt.

In dieser Bezeichnung kann man auch schon das allgemeine Funktionsprinzip der Laser erkennen.

### 1.1 Allgemeine Funktionsweise

Generell wird Material mit Energie angeregt, Strahlung auszusenden, die dann die typischen Eigenschaften von Laserlicht besitzt. „Laserlicht ist eine sehr gleichmäßige Welle. Bei dieser Art von Strahlung treten spezielle Effekte der Beugung und Überlagerung (Interferenz) sehr deutlich in Erscheinung.“<sup>1</sup> Das Laserlicht ist nur durch jeweils eine einzige Wellenlänge im Bereich von infrarot bis zu ultraviolett charakterisiert und ist somit einfarbig. Es wird auch monochromatisches Licht genannt. Als weitere wichtige Eigenschaften gelten die hohe Bündelung und sehr geringe Divergenz des Strahls ebenso wie die hohe Leistungsdichte. Es gibt verschiedenste Materialien, die in der Lage sind, Laserlicht auszusenden. Häufig dienen hierzu Feststoffe, aber es werden auch Gase und Flüssigkeiten zur Erzeugung von Strahlung verwendet. In der neueren Technik gibt es auch Plasmalaser, Halbleiterlaser oder Freielektronenlaser.

Auf die speziellen Funktionsprinzipien einiger dieser Typen wird im weiteren Verlauf eingegangen.

Unabhängig von der Art des Lasermaterials gilt, zunächst muss es angeregt werden. Auch hierfür gibt es unterschiedliche Möglichkeiten: Die Anregung kann durch Licht, durch Stromdurchgang im Halbleiter, durch chemische Reaktion, durch radioaktive Strahlung oder auch durch Elektronenstrahlung erfolgen.

---

<sup>1</sup> /2/ Seite 26

### 1.1.1 Absorption

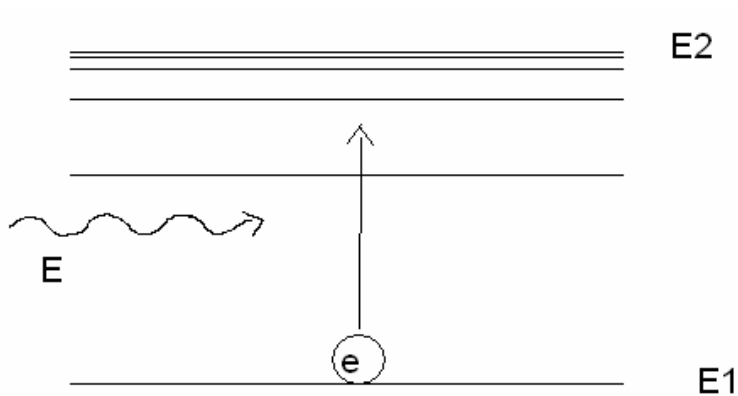


Abbildung 1

Beim Vorgang des Pumpens wird Energie freigesetzt, die auf das laseraktive Material gelangt (Abb.1). Hier nun absorbieren die Valenzelektronen auf dem unteren Energieniveau E1 des Materials die Energie und werden dazu angeregt, sich auf ein höheres Energieniveau zu begeben. Nach einer unterschiedlich kurzen Zeit fallen die Elektronen wieder auf ein niedrigeres Niveau zurück. Der Energieunterschied zwischen den beiden Energieniveaus wird dabei in Form von Licht abgegeben, dessen Frequenz sich aus  $E=h \cdot f$  ergibt. Es gibt jedoch unterschiedliche Übergänge zwischen den Energieniveaus, so ergeben sich für die unterschiedlichen Elektronen unterschiedliche Abstände und davon abhängig nicht eine konstante Frequenz. Es ist daher nicht möglich, gezielt bestimmtes Licht mit Hilfe der spontanen Emission zu erzeugen.

Aus diesem Grund nutzt man die stimulierte Emission, auch induzierte Emission genannt.

### 1.1.2 Stimulierte bzw. induzierte Emission

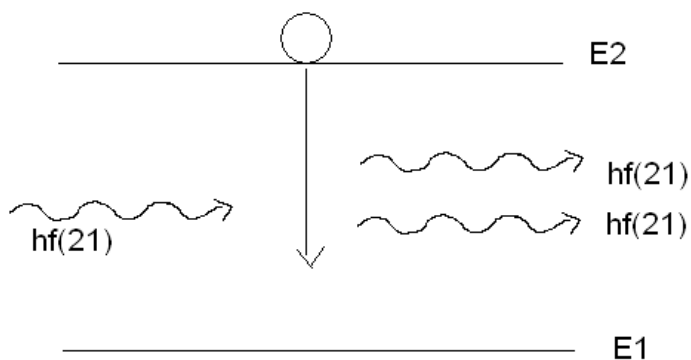


Abbildung 2

Zuerst werden die Elektronen des Lasermaterials mit Energie gepumpt und auf ein höheres Energieniveau gebracht. Wenn sich dann mehr Elektronen gemeinsam auf einem höheren Niveau befinden als auf einem niedrigeren, spricht man vom Zustand der Inversionsbesetzung, für den nur einige Stoffe und Kombinationen geeignet sind. Um des weiteren die Emission von Licht zu erreichen, wird der angeregte Stoff mit Strahlung beschossen, welche schon die Eigenschaften besitzt, die später der Laserstrahl haben soll, oder die zumindest einfach in diese überführt werden können (Abb.2). Ein auftreffender Lichtquant kann in dem Stoff zwei unterschiedliche Ergebnisse hervorrufen: Ein Elektron kann dazu angeregt werden, auf ein höheres Energieniveau zu gelangen, oder ein angeregtes Elektron, das sich bereits auf einem höheren Energieniveau befindet, kann wieder auf das niedere Energieniveau unter Emission gelangen. Befindet sich der Stoff im Zustand der Besetzungsinversion, ist das Herunterfallen eines Elektrons wahrscheinlicher, da sich mehr Elektronen auf dem höheren Energieniveau befinden. Bei diesem Vorgang wird die Energiedifferenz in Form von Strahlung frei, die die gleichen Eigenschaften besitzt wie die anregende Strahlung.

Nach diesem Vorgang stehen bereits zwei Photonen zur Verfügung, die wiederum jeweils auf ein angeregtes Elektron treffen, so dass wieder Photonen herausgelöst werden. Die Anzahl der Photonen steigt somit exponentiell und der Laserstrahl wird stärker. Nach dieser Kettenreaktion hat man viele gleichartige Photonen vorliegen, also monochromatisches und kohärentes Licht.

### 1.1.3 Resonatorprinzip

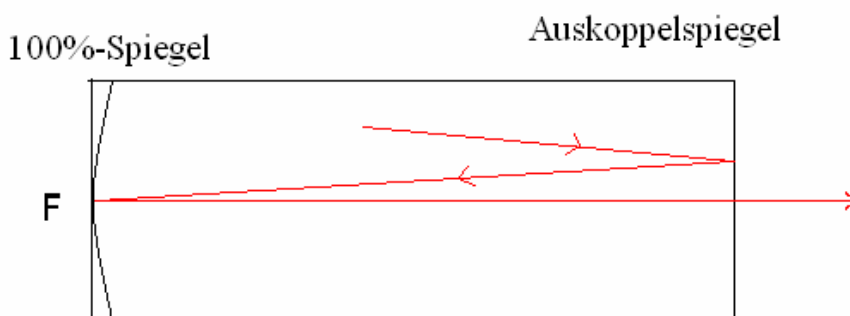


Abbildung 3

Im Resonator des Lasers bewegen sich die Photonen dann hin und her (Abb.3). Treffen sie nicht senkrecht auf den teildurchlässigen Hohlspiegel, werden sie nicht durchgelassen, sondern auf den Spiegel mit einem Reflexionsgrad von 100% an der Rückwand reflektiert. Bei



den Messungen in dieser Arbeit wurde für den Rückspiegel ein Hohlspiegel mit einem Radius von 2m verwendet, der für die Parallelrichtung der Strahlen verantwortlich ist.

Der Strahl der Photonen wird, wenn er auf den teildurchlässigen Auskoppelspiegel trifft, geteilt. Viele Photonen gelangen in einem wenig divergenten Strahl nach außen, deshalb ist die Intensität des Strahls sehr groß. Hierbei handelt es sich um ein weiteres Charakteristikum für den Laserstrahl.

Der im Resonator verbleibende Anteil des Strahls bewegt sich mehrmals zwischen den beiden Endspiegeln, wobei jedes Mal ein Anteil durch den Auskoppelspiegel nach außen gelangt. Bei dem mehrmaligen Durchlaufen des Resonators, dessen Länge ein Vielfaches der Wellenlänge des Lichtes darstellt, bildet sich eine stehende Welle aus. Je höher der Reflexionsgrad des Spiegels ist, desto mehr Photonen verbleiben im Resonator und erhöhen die Leistung durch die vermehrte Anregung des laseraktiven Materials.

## 1.2 Pumpen

Wie bereits zuvor erwähnt, gibt es verschiedene Arten der Anregung des Materials, also des Pumpens.

### 1.2.1 Pumpen mit Blitzlampen

Besonders verbreitet ist immer noch die ursprüngliche Art des Blitzlampenpumpens.

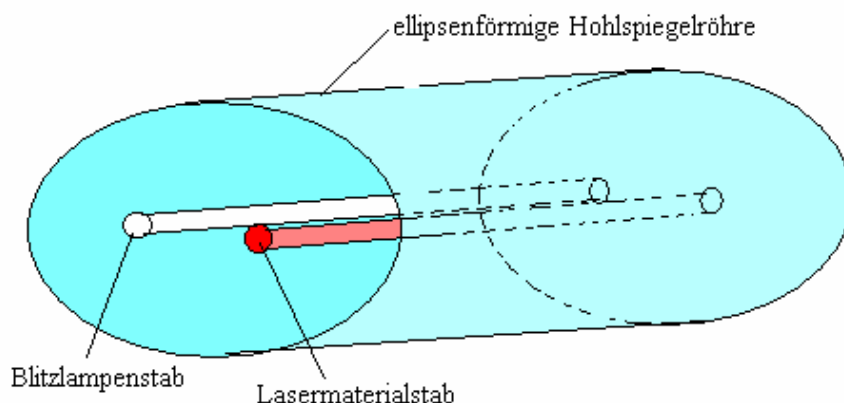


Abbildung 4

Dabei befinden sich sowohl die Blitzlampe als auch das anzuregende Lasermaterial in je einem Brennpunkt des ellipsenförmigen Hohlspiegels (Abb. 4). Erzeugt die Blitzlampe einen

Lichtblitz, wird diese Energie direkt auf das Lasermaterial gebracht und somit die Anregung erreicht. Der Nachteil ist allerdings, dass nur ein kleiner Teil des Blitzlichtes absorbiert wird und für die Anregung verwendet werden kann. Ein weitaus größerer Teil gelangt in das Material und ist als Abwärme nicht mehr nutzbar. Eine Blitzlampe ist nur beschränkt nutzbar, so dass die Lebensdauer eines blitzlampengepumpten Lasers nur bei 400 bis 1000 Betriebsstunden liegt. Außerdem liegt der Wirkungsgrad unter 3%.

Da das anregende Blitzlicht in den Kristall hineingelangen muss, ist die Lichtdurchlässigkeit des Materials generell ein bestimmendes Kriterium, speziell auch für den Einsatz des Blitzlampenpumpens. Es existieren jedoch Alternativen des Pumpens, die auch für nicht lichtdurchlässige Materialien geeignet sind, wie das Pumpen mit Dioden.

### **1.2.3 Pumpen mit Dioden**

Zuerst wird von einem Diodenlaser ein Strahl erzeugt, der mit Hilfe von Kollimieroptik (zur Strahlverengung) direkt auf das Lasermaterial gerichtet wird. Da der Diodenlaser thermisch auf die richtige Wellenlänge eingestellt wurde (siehe 1.3.3.), kann das Material auch wirklich den Großteil der Pumpenergie absorbieren und somit nutzen. Daraus ergibt sich eine viel effektivere Anregung, als das z.B. beim Pumpen durch Blitzlampen der Fall wäre.

Zu beachten ist hierbei jedoch die Empfindlichkeit der Dioden gegenüber unterschiedlichen Temperaturen, da sonst die optimale Wellenlänge wieder verstellt werden würde. Trotz der relativ hohen Anschaffungskosten sind diodengepumpte Laser verstärkt gefordert, da durch die effektive Anregung auch nur wenig Abwärme entsteht und der Wirkungsgrad somit bei über 10% liegt. Die Lebensdauer eines diodengepumpten Lasers ist nicht von einer Blitzlampe abhängig, deshalb kann diese Art von Lasern auch bis zu 20000 Stunden im Betrieb sein. Nur die Pumpdioden degradieren nach einiger Zeit, geben also nicht mehr die notwendige Leistung ab. Diese Pumpdioden können jedoch einfach ausgetauscht werden, so dass der Laser wieder in Betrieb genommen werden kann.

## 1.3 Lasertypen

### 1.3.1 Festkörperlaser

Besonders weit verbreitet sind die Festkörperlaser, bei denen speziell herangezüchtete Kristalle als das laseraktive Material dienen. Ursprünglich als ganze Stäbe eingesetzt, wie dies auch bei dem 1960 von Maiman entwickelten Rubinlaser, dem ältesten Laser überhaupt, der Fall war, gibt es jetzt materialsparende Techniken. Bei den so genannten Scheibenlasern wird nämlich nur eine kleine Scheibe vom Kristallstab verwendet. Da diese jedoch so dünn sind, ist die Wärmebelastung bei der Anregung wesentlich höher. Deshalb werden die Scheiben auf Wärmesenken aufgelötet, um die Wärme abzuleiten. Hierbei wird zwar an Material gespart, was meist den Großteil des Preises eines Lasers ausmacht, doch ist der technische Aufwand größer.

Auf die kleine Scheibe des möglichst perfekten Kristalls müssen zwei Beschichtungen aufgetragen werden. Eine für das Auflöten, die andere, dass der Kristall nur für eine Wellenlänge empfindlich ist.

### 1.3.2 Helium-Neon-Laser

„In einem Glasrohr befindet sich ein Helium-Neon-Gasgemisch. Für den Lasereffekt verantwortlich sind die Neon-Atome, während die Helium-Atome zur Anregung der Neon-Atome verwendet werden. [...] Beschleunigte Elektronen regen in einer Gasentladung die in hoher Konzentration vorhandenen He-Atome an. Das mit  $E=20,61$  eV angeregte Helium befindet sich in einem metastabilen Zustand (Abb. 5). Da der optische Übergang in den Grundzustand nicht möglich ist, wirkt das angeregte Helium wie ein Energiespeicher. Der 2s-Helium-Zustand  $E_{2,He}$  besitzt fast die gleiche Energie wie der Neon-Zustand  $E_{3,Ne}$ . Die angeregten He-Atome im Zustand  $E_{2,He}$  geben ihre Energie durch Stöße an die Neon-Atome ab, die sich dann im Zustand  $E_{3,Ne}$  befinden. Eine geringe Energiedifferenz wird durch die kinetische Energie der Teilchen ausgeglichen.

Die Energieübertragung vom Helium auf das Neon führt dazu, dass sich mehr angeregte Neon-Atome im energiereichen Zustand  $E_{3,Ne}$  als im Zustand  $E_{2,Ne}$  befinden.“<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> / 1/ Seite 432

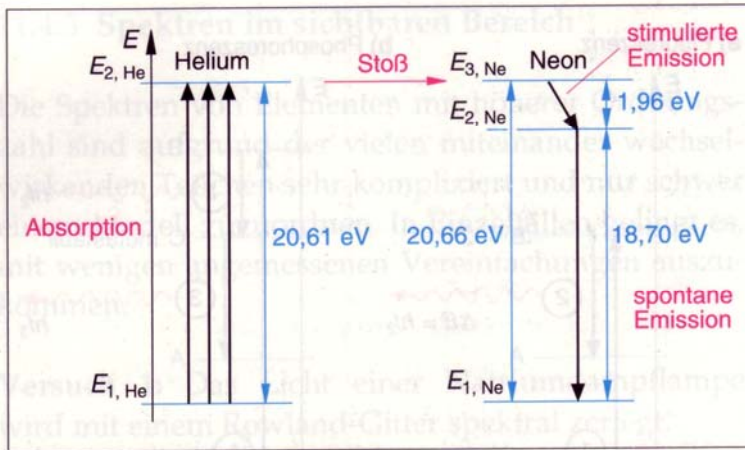


Abbildung 5 Energieniveaus Helium und Neon

Nach Erzeugung dieser Besetzungsinversion gehen die Neon-Atome mit hoher Wahrscheinlichkeit in den energieärmeren Zustand über und emittieren dabei Licht mit der dem Abstand der Energieniveaus entsprechenden Wellenlänge von 633nm. Auch bei diesem Lasertyp wird der Strahl in einem Resonator verstärkt. Dieser Laser-Typ wird trotz seiner relativ geringen Leistung von wenigen Milliwatt häufig gebaut und insbesondere für die Messtechnik verwendet. Dies trifft auch für einige Messungen dieser Arbeit zu.

### 1.3.3 Diodenlaser

Bei diesen auch als Halbleiterlasern bezeichneten Lasern wird der Laserstrahl auf eine andere Art und Weise erzeugt.

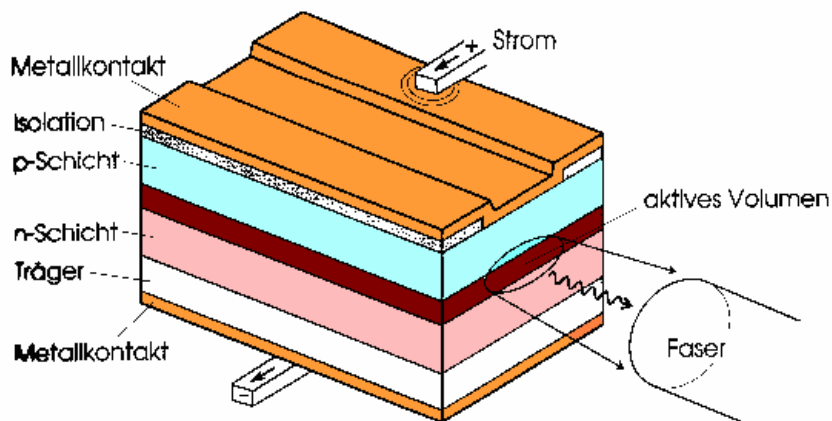


Abbildung 6

Am p-n-Übergang (Abb. 6) werden Elektronen vom Valenzband, dem Grundzustand, angeregt und gelangen auf das Leitungsband, einen höheren Energiezustand. Bei ausreichendem

Stromdurchfluss gelangen mehr Elektronen auf das Leitungsband, als sich im Grundzustand befinden; es entsteht ein Zustand der Besetzungsinversion. Danach kehren die Elektronen in das Valenzband zurück und senden dabei je nach Abstand der beiden Bänder Licht mit bestimmter Wellenlänge aus. Der Lasereffekt wird durch die Reflexion an den parallelen Endflächen der Diodenschicht verstärkt.

Durch die direkte Anregung durch Strom, kleine bauliche Abmessungen und einen hohen Wirkungsgrad ist der Diodenlaser sehr gut für den Einbau in technische Geräte geeignet und von großem wirtschaftlichen Interesse. Die Wellenlänge des Diodenlasers kann über die Temperatur reguliert werden, pro Kelvin Änderung ergibt sich eine Änderung der Wellenlänge um etwa 0,3nm. Diese Eigenschaft ist besonders beim Einbau der Diodenlaser in andere, z.B. Festkörperlaser, als Element zum Pumpen von Nutzen.

### ***1.4 Anwendung von Lasern***

Insgesamt gibt es weites Anwendungsfeld. Besonders in der Industrie zur Materialbearbeitung, aber auch zur Erzeugung von Plasma und zum Beschriften werden Laser verwendet. In diesen Bereichen ist eine besonders hohe Energie nötig.

Eine mögliche Betriebsart von Lasern ist das Pulsen, wobei der Strahl in kurzen Intervallen Energie abgibt. Dafür können Leistungsspitzen bis in den MW-Bereich hinein abgegeben werden. Dieser Aspekt ist besonders in der Medizin z.B. am Auge sehr wichtig. Hiermit hat sich neben den Präzisionsmessungen und der Nachrichtenübertragung auch ein weiteres Tätigkeitsfeld für den Laser erschlossen. Auch im alltäglichen Leben findet man den Einsatz von Lasern, so bei Laserdruckern, Strichcodelesern, CD-Playern und für die Holografie.

## 2. Methoden

### 2.1 Qualitätsprüfung der Laserkristallstäbe

Laserstäbe, die in einen Laser eingebaut werden sollen, müssen bestimmten Anforderungen entsprechen. Besonders wichtig ist hierbei, dass die beiden Endflächen des Stabes zueinander parallel sind und senkrecht auf dem Umfang stehen.

Eine einfache Art, dies zu überprüfen, ist die Prüfung mit Hilfe eines Autokollimationsfernrohres (AKF).

#### 2.1.1 Prüfung mit AKF

Zuerst wird der zu untersuchende Kristallstab vorsichtig auf eine v-förmige Schiene gelegt. In gleicher Höhe und geringer Entfernung von etwa 15 cm wird das AKF aufgestellt.

Bei diesem Prüfgerät wird ein einfacher Lichtstrahl in Form eines Lichtkreuzes ausgesandt. Trifft dieses Licht auf die vordere Endfläche des Stabes, wird dort ein Teil reflektiert und gelangt zurück zum AKF, wo es auf einer skalierten Mattscheibe zu sehen ist. Durch Verstellen des AKF wird das Lichtkreuz direkt bei Skalierung 0/0 eingestellt, auf diese Weise fällt das Ablesen später leichter. Der andere, nicht bereits reflektierte Teil des Lichtes gelangt im Kristallstab bis zur hinteren Endfläche. Ist diese nun nicht exakt parallel zu der vorderen Fläche wird der Strahl schräg zum ersten Strahl reflektiert und wird versetzt auf der Mattscheibe abgebildet. Da diese skaliert ist, kann der Winkelunterschied zwischen den beiden Flächen direkt abgelesen werden. Bei sehr geringen Abweichungen erkennt man die Verschiebung auf der Mattscheibe nur daran, dass das abgebildete Lichtkreuz etwas breiter ist. Für eine Einordnung, ob der Stab noch zum Einsatz im Laser zu gebrauchen ist, reicht diese Genauigkeit jedoch völlig aus, da die maximale Abweichung  $10''$  beträgt und man größere Abweichungen erkennen würde.

Für eine Untersuchung der Lage der Endflächen zum Umfang wird der Kristallstab in der Schiene vorsichtig gedreht. Da wieder eines der beiden Lichtkreuze im Zentrum der Skalierung ist, wird auch hier das Ablesen leichter. Sind die beiden Endflächen nun nicht parallel zum Umfang, verändert sich die Lage der Lichtkreuze. Eines von ihnen bewegt sich kreisförmig um den Mittelpunkt der Skalierung. Um die Abweichung zu bestimmen wird auf der Ska-

lierung der Radius des Kreises abgelesen, den das Kreuz beschreibt. Die maximal zulässige Abweichung von den  $90^\circ$  beträgt  $5'$ .

Erfüllt ein Kristallstab eines der beiden Kriterien nicht, ist er für den Einbau in einem Laser nicht geeignet. In der Hoffnung auf genauere Messergebnisse bei der Abweichung der Parallelität wurde ein zweites Verfahren eingeführt:

### 2.1.2 Die Parallelitätsüberprüfung mit Hilfe eines Lasers

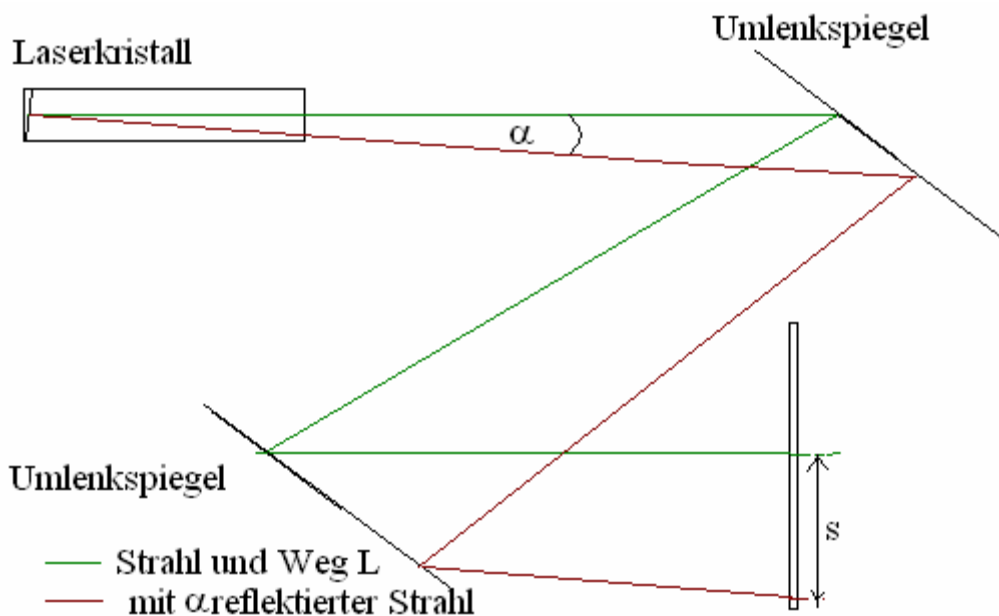


Abbildung 7

Eine weitere Möglichkeit, die Endflächen auf ihre Parallelität zu überprüfen ist die mit Hilfe eines Lasers. Ein einfacher Helium-Neon-Laser sendet Licht aus, welches über den Aufbau verkürzende, zueinander parallele Umlenkspiegel in den Kristallstab eingebracht wird (Abb.7) und dort, wie auch schon beim AKF, teilweise an der vorderen Endfläche, teilweise aber auch an der hinteren Endfläche reflektiert wird. Wenn die Flächen nicht parallel sind wird auch das reflektierte Licht nicht parallel zurückgeworfen. Die beiden Strahlen laufen immer weiter auseinander, so dass man auf einer Mattscheibe oder auch einfach auf einem Blatt Papier den Abstand der beiden Lichtpunkte feststellen kann. Unter Einbeziehung des Abstandes  $L$  zwischen hinterer Kristallendfläche und Mattscheibe kann man nach  $\tan \alpha = s/(2L)$  den Winkelunterschied  $\alpha$  der beiden Endflächen bestimmen, wobei  $s$  der Abstand der Lichtpunkte auf dem Papier ist.

Hier ergibt sich jedoch die Schwierigkeit, dass die Bestimmung des Abstandes der Lichtpunkte nicht mit Hilfe eines Messschiebers bewerkstelligt werden konnte, da dieser aus Metall war und das Laserlicht reflektiert hätte. Aus Sicherheitsgründen musste deshalb auf Papier ein Behelfslineal gezeichnet werden, mit welchem man jedoch nicht genau genug messen konnte. Als kleinster zu messender Abstand ergaben sich 2mm. Bei einer Länge  $L$  von 295cm ergab sich als kleinstmöglicher Winkel  $1,75'$ . Somit war es also nicht möglich, noch kleinere Abweichungen in der Parallelität der Endflächen zuverlässig festzustellen.

## 2.2 Justierung des Hauptexperimentes

Das Ziel des Hauptexperimentes bestand darin, den Einfluss von Resonatorlänge und Reflexionsgrad auf die Eigenschaften des Lasers zu untersuchen. Dabei wurden speziell die Leistung bei unterschiedlichen Stromstärken, die Strahldivergenz und die Kippstabilität betrachtet. Zuerst wurde das Experiment nach Abb.8 aufgebaut. Dabei wurde schon der zu untersuchende Laserkopf eingebaut.

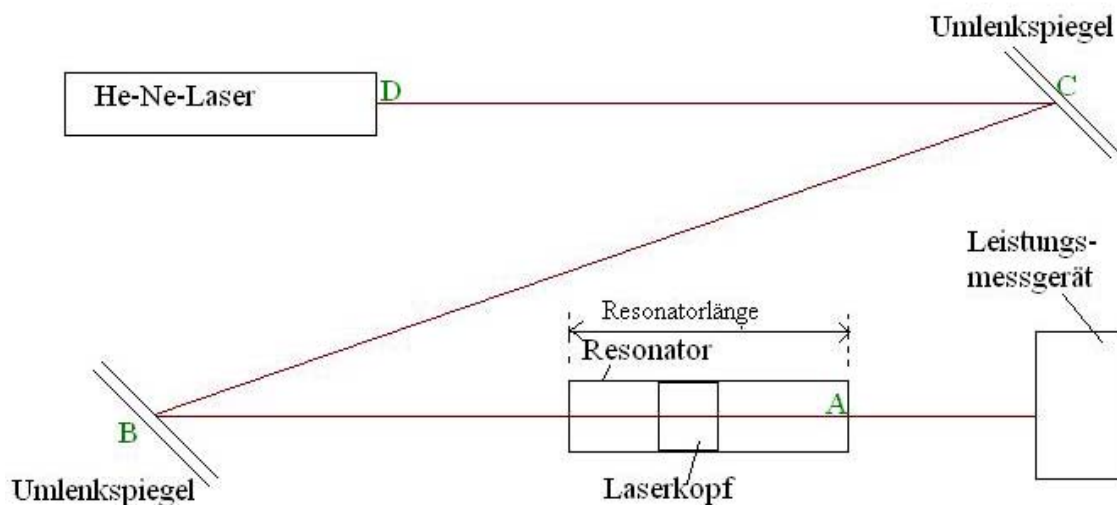


Abbildung 8

Um nun zu gewährleisten, dass die beiden Endspiegel des Resonators richtig eingestellt sind, damit der Laser funktionieren kann, muss justiert werden.



### **2.2.1 Grobjustierung**

Zur Grobjustierung wird ein Helium-Neon-Laser verwendet, dessen Strahl durch den Resonator verläuft, an der Stelle A wird dies mit Hilfe eines Blattes Papier überprüft.

Wenn auf A noch kein Lichtfleck erscheint, muss zuerst an B der Spiegel mit Hilfe der Stellenschrauben so verändert werden, dass der Strahl tatsächlich A erreicht. Erst dann ist es möglich, dass der Strahl am Auskoppelspiegel, also bei A, reflektiert wird und schließlich bei D auf einer Mattscheibe erscheint. Um das zu erreichen, muss abwechselnd an C und B die Stellung der Spiegel verändert werden: Man orientiert sich dabei am Mittelpunkt zwischen Ausgangsstrahl und Reflex an B und versucht durch Justieren an C den Ausgangsstrahl auf diesen Mittelpunkt zuzubewegen. Dieser Vorgang des Einstellens an B und C muss häufig mehrmals wiederholt werden, bis der Reflex auf der Mattscheibe bei D mittig erscheint.

Da der Strahl mehrmals an den unterschiedlichen Spiegeln reflektiert wird ergeben sich bei D mehrere Reflexe. Überlagern sich diese möglichst genau, wird an A der Auskoppelspiegel noch leicht in der Stellung verändert, bis sich die Reflexe überlagern und Interferenzringe entstehen. Damit ist die Grobjustierung abgeschlossen und der Laser müsste aufgrund der Stellung der Endspiegel funktionieren.

### **2.2.2 Feinjustierung**

Mit dem Helium-Neon-Laser kann der Resonator jedoch nicht so genau justiert werden, dass der Laser später auch die größtmögliche Leistung erbringt. Dazu muss man den Laser in Betrieb nehmen. Zuerst wird überprüft, ob der Laser überhaupt funktioniert, indem eine Stromstärke von etwa 20 A eingestellt wird. Bei dieser Stromstärke bringen fast alle Laser eine messbare Leistung. Sollte sich dabei keine Leistung mit dem Leistungsmessgerät nachweisen lassen, muss noch einmal die Grobjustierung durchgeführt werden. Eine häufige Fehlerquelle stellt das Nichterfassen eines der Reflexe an D dar, welcher somit falsch liegt. Erhält man jedoch eine Leistung, kann weiter justiert werden. Es werden abwechselnd die beiden Endspiegel sorgsam verstellt. Dabei kann sehr gut beobachtet werden, ob die Umstellung einen positiven Effekt auf die Leistung hat. In diesem Fall ändert man die Stellung des Spiegels so lange, bis keine Leistungssteigerung mehr zu erreichen ist. Auch hier müssen beide Spiegel mehrmals eingestellt werden, da sich bei Änderung des einen auch Veränderungen bezüglich der Reflektion beim anderen ergeben. Auf diese Art und Weise kann allein durch Justieren

viel Leistung mit dem Laser erreicht werden. Beachtenswert ist, dass dieses aufwändige Verfahren bei jedem neuen Laser Anwendung findet, der verkauft werden soll, auch wenn durch die Routine der Ausführenden der Vorgang nicht so viel Zeit benötigt wie bei einem Anfänger.

### ***2.3 Überprüfen der optimalen Arbeitstemperatur***

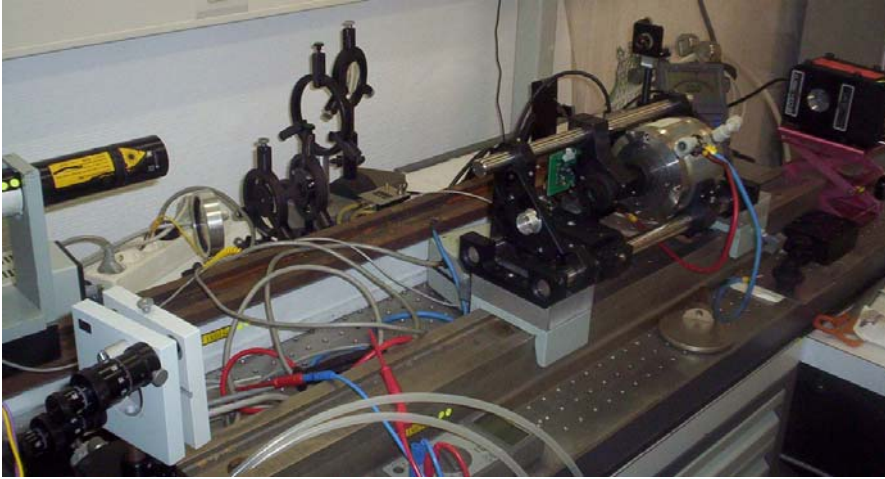
Die zu untersuchenden Laserköpfe arbeiten diodengepumpt. Das Ziel ist es demnach, die optimale Temperatur zu finden, bei der die Dioden den Kristallstab am effizientesten anregen und dadurch die meiste Leistung hervorbringen.

Für den fertig justierten Laserkopf wird eine Stromstärke festgelegt, hier 20A. An der gleichzeitig die Temperatur regelnden Kühlwasseranlage wird die jeweilige Temperatur eingestellt, ist diese erreicht, wird die Leistung vom Leistungsmessgerät abgelesen. Gleichzeitig wird auch immer die Spannung gemessen. Dies geschieht aber nur zur Überprüfung, da sie eigentlich konstant bleiben müsste. Schließlich wird die Temperatur als Optimaltemperatur bestimmt, bei der die höchste Leistung gemessen wurde.

Diese Messung ist sehr wichtig für die darauf folgenden, da diese nur bei eingestellter Optimaltemperatur aussagekräftige Ergebnisse liefern. Demnach muss diese Untersuchung auch für jeden Laserkopf neu durchgeführt werden, da bei jedem die Dioden etwas anders im Zusammenspiel wirken können.

### ***2.4 Untersuchung der Leistung mit verschiedenen Auskoppelspiegeln und Resonatorlängen***

Um den Einfluss verschiedener Auskoppelspiegel auf die Leistung eines Lasers zu überprüfen, werden mit verschiedenen Laserköpfen Leistungskennlinien aufgenommen, bei denen jeweils unterschiedliche Auskoppelspiegel in den Resonator eingesetzt werden. Der Aufbau entspricht dem in Abbildung 9.



**Abbildung 9** Aufbau des Experimentes, rechts im Bild der Resonator

Zuerst wird der ausgewählte Spiegel, mit einem Reflexionsgrad von 52%, 76,3%, 86% oder 92%, am Ende des Resonators eingesetzt und dieser dann wie beschrieben justiert. Bei der für den Laserkopf ermittelten Optimaltemperatur wird dann der Laser bei unterschiedlichen Stromstärken betrieben, um herauszufinden, bis wohin sich seine Leistung steigern lässt, wo sich die Laserschwelle<sup>3</sup> befindet und ob die Leistung eventuell bei höheren Strömen stark abknickt. Dazu werden zuerst sehr niedrige Ströme verwendet und in 0,1A-Schritten vorgegangen, bis die Schwelle gefunden ist. Ab diesem Schwellstrom werden nur noch die ganzzahligen Strombeträge untersucht. Hierbei ist es nicht üblich, über 32A hinauszugehen, da die Belastung für den Laser sonst zu hoch wäre, wenn dieser nicht explizit für so große Ströme konstruiert ist.

Das Auswechseln der Auskoppelspiegel muss mit großer Vorsicht erfolgen, da keine Verunreinigungen auf die Oberfläche gelangen dürfen. Diese würden sich bei Laserbetrieb stark erhitzen und in das Glas einbrennen, wodurch der Spiegel unbrauchbar werden würde.

Zusätzlich zu den unterschiedlichen Auskoppelspiegeln werden auch verschiedene Resonatorlängen untersucht, so dass jeder der Auskoppelspiegel je einmal bei einer Länge von 35cm und 20cm überprüft wird. Somit lassen sich besonders leistungsstarke Kombinationen erkennen.

---

<sup>3</sup> Laserschwelle ist die Stromstärke, bei der der Laser anfängt, Leistung zu erbringen.

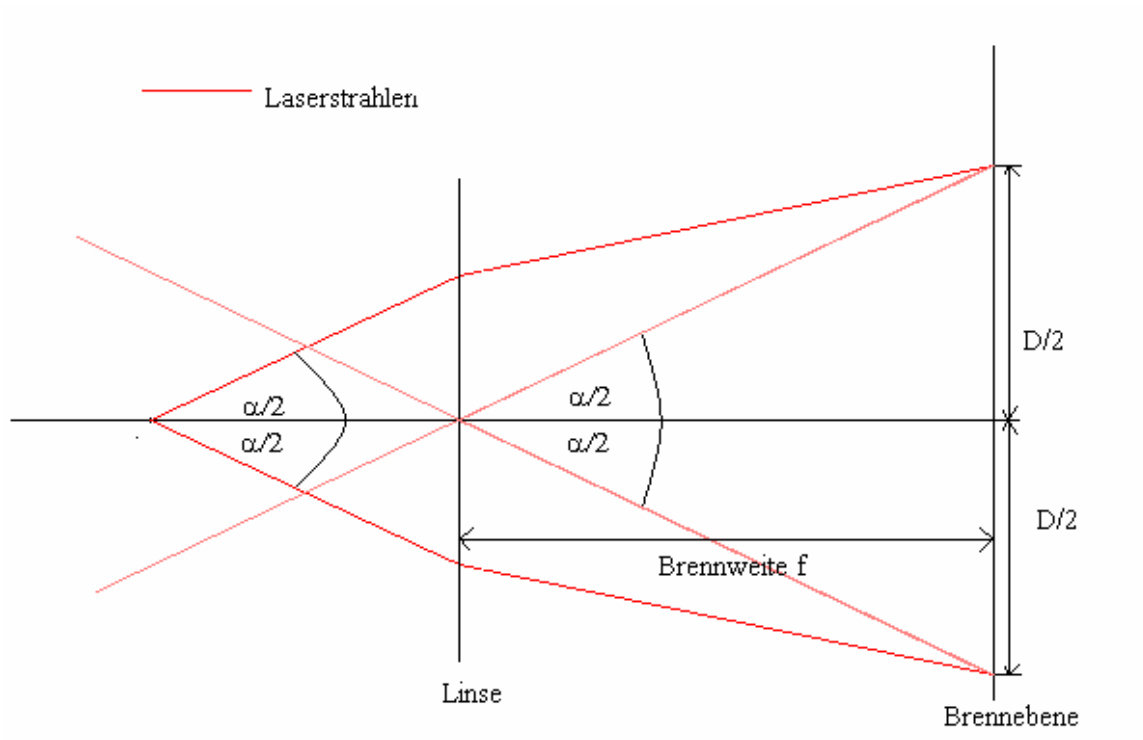
## **2.5 Untersuchung der Strahldivergenz mit verschiedenen Resonatorlängen**

Wenn sich bei vorangegangenen Untersuchungen sehr hohe Leistungen ergeben haben, stellt sich die Frage, ob die Strahlqualität auch bei sehr guten höheren Leistungen noch gewährleistet werden kann. Der Laserstrahl bleibt monochromatisch und kohärent, allerdings ist er nicht mehr nur auf einen kleinen Punkt gerichtet; die Divergenz vergrößert sich.

Zur Untersuchung der Divergenz wird folgendermaßen vorgegangen:

Eine Linse wird hinter den Resonatoraufbau mit einem Auskopplungsgrad von 86% aufgestellt, so dass der erzeugte Laserstrahl durch sie hindurch gelangt. In ihrer einfachen Brennweite, hier bei 120cm, werden kleine Stücke geschwärztes Photopapier an einem brennfesten Ständer befestigt. Der leicht durch ein Keramikplättchen zu unterbrechende Laserstrahl wird bei unterschiedlichen Strömen von 15A, 20A, 25A und 30A und den Resonatorlängen 20cm und 35cm auf diese Papierstücke gerichtet. Nach einer Strahldauer von etwa 2s wird der Strahl unterbrochen und auf dem Photopapier ist ein schwarzer Fleck zu erkennen. Dieser Fleck ist durch die hohe thermische Belastung an dieser Stelle entstanden, da der Laserstrahl dort so breit ist. Hier ist besonders darauf zu achten, dass das Papier nicht tatsächlich zu brennen anfängt.

Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass beim Durchgang durch die Konvexlinse der Strahl gebrochen wird. Mit Hilfe der Konstruktion von parallelen Lichtbündeln ergibt sich der halbe Abstand  $D$  des oberen Begrenzungsstrahls als Auftreffpunkt des ungebrochenen Mittelpunktstrahls. Dieser besitzt den gleichen Winkel wie der Ausgangsstrahl. Wird mit dem unteren Teil des Laserstrahls genauso verfahren, so erhält man aus dem Quotienten des Durchmessers  $D$  und der einfachen Brennweite  $f$  den Tangens des Divergenzwinkels. Bei sehr kleinen Winkeln gilt außerdem die Annäherung  $\tan\alpha = \alpha$ .

**Abbildung 10**

Mit Hilfe der genannten Gleichung  $D/f = \alpha$  lässt sich der Divergenzwinkel in rad berechnen.

So kann verglichen werden, welchen Einfluss unterschiedliche Resonatorlängen auf die Strahlqualität haben. Da unterschiedliche Laserköpfe verwendet werden, können die gewonnenen Erkenntnisse als allgemein erklärt werden.

## **2.6 Überprüfung der Kippstabilität eines Resonatoraufbaus**

Lasere werden häufig verkauft und versandt, deshalb ist es wichtig zu überprüfen, ob sie schon beim Transport durch eventuelle Dejustierungen nicht mehr funktionstüchtig sind und wenig bzw. keine Leistung mehr bringen. Weitere Dejustierungen können auch durch ungünstige klimatische Bedingungen, wie hohe Temperaturen, oder Schwingungen in Werkhallen auftreten. Um diese Anfälligkeit zu untersuchen, wird ein Laserkopf in einen Resonator der Länge 35cm und in einen der Länge 20cm mit einem Auskopplungsgrad von 86% eingebaut. Zuerst wird er auf die optimale Leistung bei optimaler Temperatur justiert. Mit einem schon zuvor verwendeten Autokollimationsfernrohr (AKF) wird zuerst der momentane Justierzustand betrachtet. Es müssen wieder zwei Lichtkreuze zu sehen sein, eines der Reflexion an der Stabendfläche, eines, das stärkere davon, der Reflexion an dem Auskoppelspiegel. Dieser Justierungszustand ist der Optimalzustand, der nach und nach durch Verstellen des Auskoppelspiegels verändert wird. Um diese Veränderung zu bestimmen, wird der Ort, an dem das Lichtkreuz des Spiegels ist als Ursprung angesehen. Wie in einem Koordinatensystem wird zunächst die eine Richtung, also Koordinate, dieses Kreuzes verändert und somit auch die Stellung des Spiegels zur Stabendfläche, danach wird mit der anderen Koordinate gearbeitet. In jede Richtung wird in Abständen von je 30'' eine Änderung um 3' vorgenommen und jedes Mal der Schwellenstrom sowie die Leistung des Lasers bei 20A gemessen. Auf diese Art und Weise kann bestimmt werden, ob und wie stark der Laser anfällig auf Dejustierungen reagiert.

### 3. Auswertung

#### 3.1 Qualitätsprüfung der Kristallstäbe

##### 3.1.1 Überprüfung der Parallelität der Endflächen und der Rechtwinkligkeit bezüglich des Umfanges mit AKF

Um zu entscheiden, ob ein Kristallstab noch im Laser eingesetzt werden darf, müssen zwei Spezifikationen erfüllt sein:

Die beiden Endflächen dürfen maximal um 10'' von der Parallelität abweichen. Außerdem darf sich der Winkel der Endflächen zum Umfang nur um höchstens 5' von 90° unterscheiden. Wenn auch nur eine dieser beiden Bedingungen nicht erfüllt ist, gilt der Stab als untauglich. Bei den elf untersuchten Kristallstäben erfüllten drei nicht die Parallelität der Endflächen, bei drei anderen standen die Endflächen nicht senkrecht auf dem Umfang (siehe Tabelle 1).

Nr. des Kristalls	Parallelitätsabweichung	Winkelabweichung zum Umfang	Kristall tauglich
F66256	<10''	6'	nein
F66241	<15''	2'	nein
F66233	<10''	2'	ja
F10130	<15''	2'	nein
F1019	<10''	4'	ja
F66212	<10''	2'	ja
F1020	<10''	4'	ja
F66223	<10''	6'	nein
F66309	<15''	1,5'	nein
F66249	<10''	7'	nein
F66267	<10''	3'	ja

**Tabelle 1**

Somit wurden sechs von elf, also mehr als die Hälfte der Stäbe, als nicht tauglich erklärt. Dazu muss jedoch gesagt werden, dass extra schlechte Stäbe für die Untersuchung ausgewählt wurden, da ansonsten der erwünschte Übungseffekt nicht eingetreten wäre, wenn keine Fehler hätten erkannt werden können.

### 3.1.2 Überprüfung der Parallelität der Endflächen mit He-Ne-Laser

Bei dieser Variante galt ebenfalls die Spezifikation von einer maximalen Abweichung von 5'. Die drei untersuchten Stäbe wären für den Einsatz im Laser geeignet gewesen, da keiner von ihnen diese Grenze überschritt (siehe Tabelle 2). Allerdings war das genaue Bestimmen der Gesamtlänge L nicht möglich. Aufgrund dessen, dass kein Messschieber verwendet werden konnte, wurde der Abstand der beiden Punkte auf dem Papier nicht exakt bestimmt.

Nr. des Kristallstabes	Länge in cm	Abstand s der Punkte in cm	$\tan\alpha$	$\alpha$
Test	5,6	0,4	0,0388	2'19''
Keine Angabe	4,5	0,6	0,0584	3,5'
G4321	4,5	0,8	0,078	4,67'
Grenzbestimmung	ca.5	ca.0,3	0,0291	1,75'

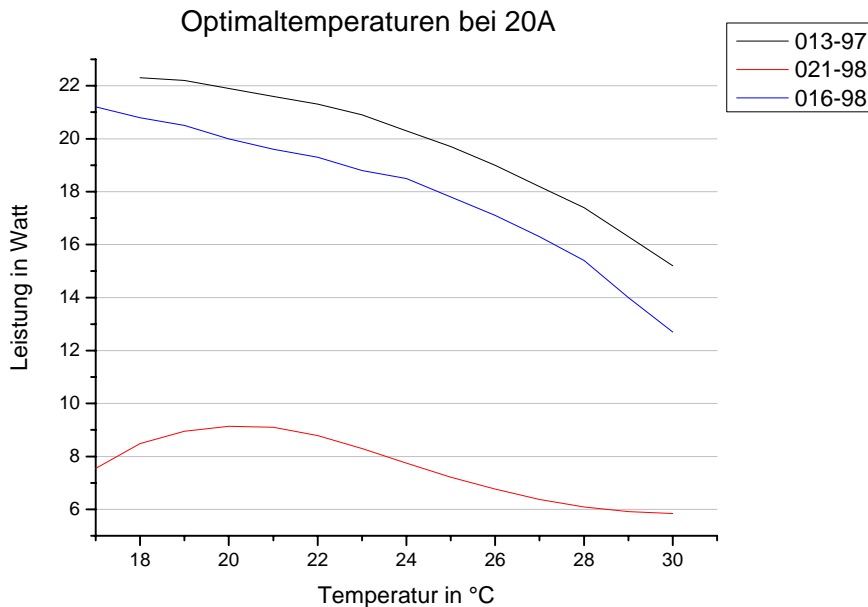
**Tabelle 2**

Durch die Rechnung ergaben sich zwar scheinbar sehr genaue Werte für die Abweichung, dies ist aber bei nicht ebenso exakten Messwerten nichts wert. Die erhoffte Verbesserung der Messtechnik trat also nicht ein, da auch ein Mindestwinkel von 1,75' vorhanden sein muss, um bei der relativ geringen Länge L überhaupt einen Abstand zwischen den Reflexen wahrnehmen zu können. Um auch kleinere Winkel bestimmen zu können, müsste die Länge L wesentlich größer gewählt werden, was aber in dem Labor nicht möglich war.



### 3.2 Optimale Arbeitstemperatur der Laserköpfe 013-97 und 016-98

Wie im Diagramm 1 zu sehen, lag die optimale Arbeitstemperatur beider Laserköpfe bei 18°C, da beide dort ihre höchstmögliche Leistung erbringen.



**Diagramm 1 (aus Protokollen 3,7,8)**

Da bei dem Laserkopf 016-98 die Messreihe sogar schon bei 17°C begonnen wurde, ist ersichtlich, dass diese Temperatur sogar noch etwas höhere Leistungen hervorgebracht hat.

Daraus lässt sich schließen, dass die eingebauten Dioden bei dieser Temperatur oder sogar bei niedrigeren Temperaturen das am besten vom Kristall zu absorbierende Licht emittieren. Beide Laserköpfe sind an sich baugleich, nur dass eine vollkommene Übereinstimmung allein wegen der Dioden nicht garantiert werden kann. Es lässt sich folgern, dass auch der Laserkopf 013-97 bei geringerer Temperatur bessere Leistung gebracht hätte. Der Grund, warum nun 18°C als Optimaltemperatur betrachtet wird, ist, dass es bei geringeren Temperaturen zu Kondensation von Wasser aus der Luft im Laserkopf kommen kann. Dies würde den Laser stark beschädigen. Um das zu vermeiden werden auch etwas weniger hohe Leistungen akzeptiert.

Im Vergleich zu den beiden benannten Laserköpfen ist die Leistungskurve des Lasers 021-98 deutlich verschieden. Die nicht konstante Entwicklung der sehr geringen Leistungen trotz gleicher Stromstärke lässt vermuten, dass der ebenfalls eigentlich baugleiche Laser defekt ist. Aus diesem Grund wurde er nicht weiter in die Messungen mit einbezogen.

### 3.3 Einfluss des Auskoppelspiegels

Im Diagramm 2 ist zu erkennen, dass die Laserschwelle bei niedrigeren Strömen liegt, wenn der Reflexionsgrad höher ist. Das heißt, der Laser funktioniert schon bei kleiner Stromstärke.

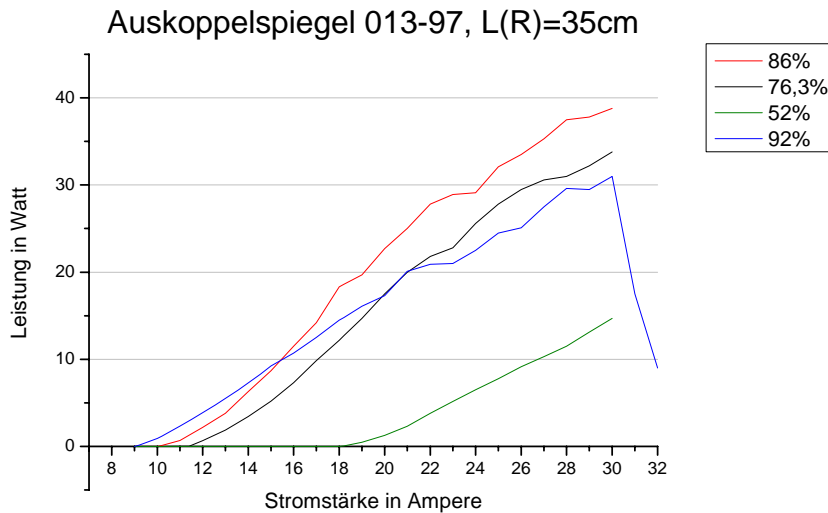


Diagramm 2 (aus Protokollen 4,5)

Auch bei der Versuchsreihe mit demselben Laserkopf 013-97, aber auf 20cm verkürztem Resonator, ist der Zusammenhang zwischen Reflexionsgrad und Laserschwelle deutlich erkennbar (Diagramm 3).

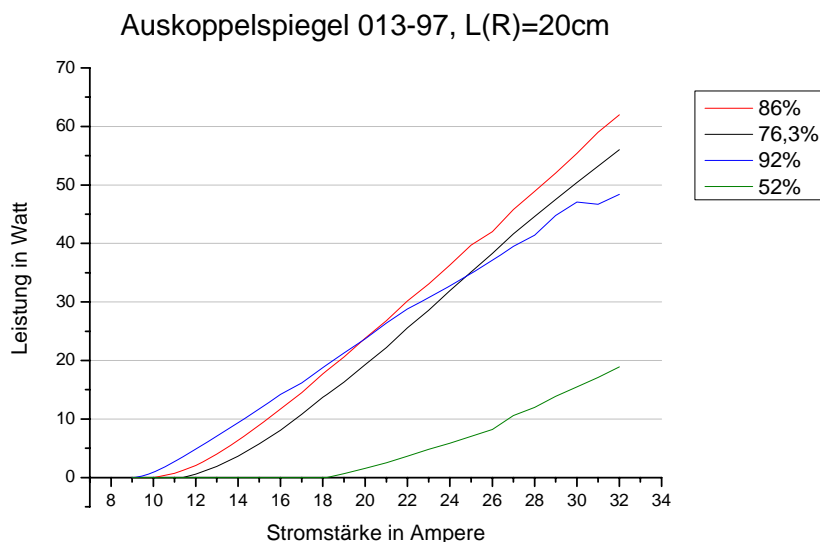
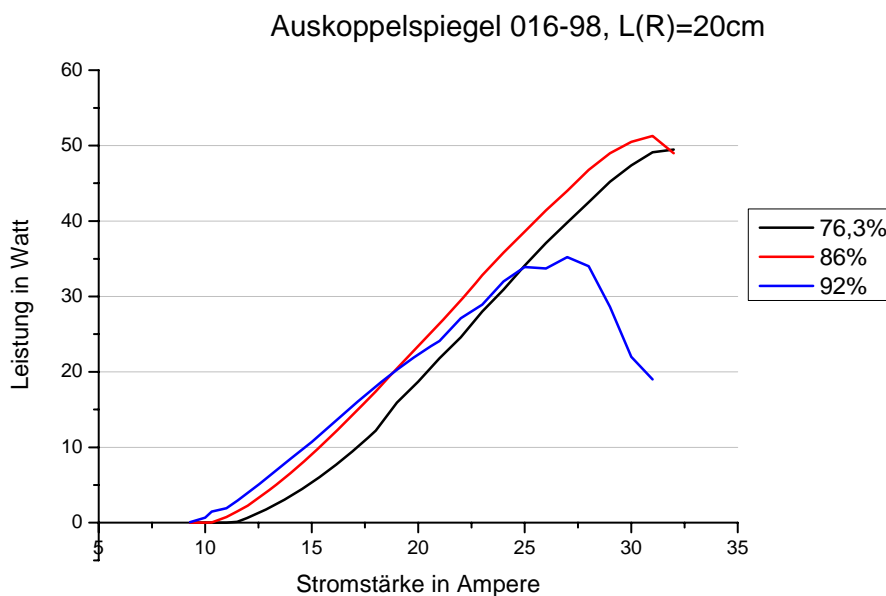


Diagramm 3 (aus Protokoll 9)

Bei beiden Resonatorlängen ist eine Verminderung des Leistungsanstiegs bei einem Reflexionsgrad von 92% zu bemerken.

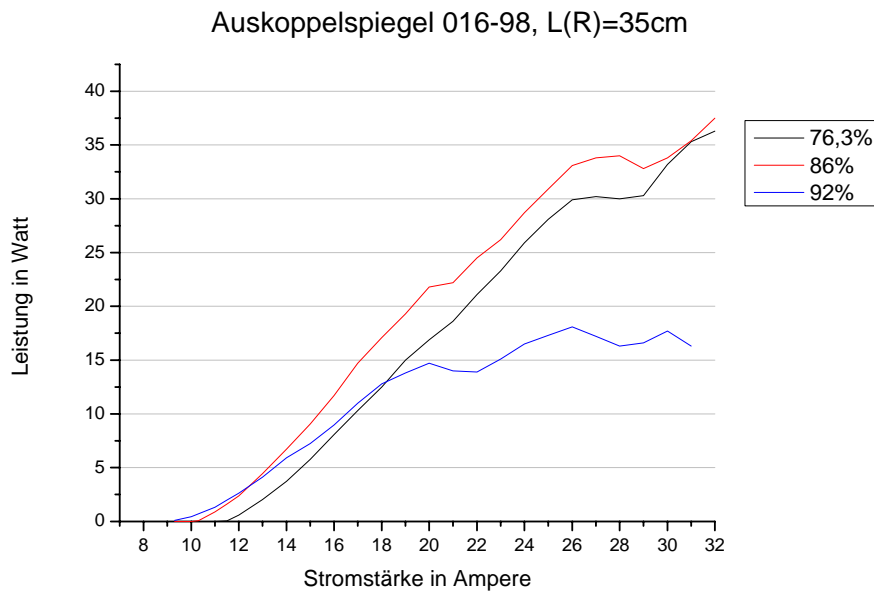
Eine allgemeine Aussage, wie der Auskoppelspiegel die Leistung beeinflusst, ist nicht möglich. Betrachtet man die Werte, ohne den Auskoppelspiegel von 92% mit einzubeziehen, so kann man sagen, dass bei einem höheren Reflexionsgrad die Leistung höher liegt. Dies ließe sich dadurch erklären, dass mehr Strahlen im Resonator verbleiben und somit den Kristall mehrmals durchlaufen können. Dadurch wird dieser mehrfach angeregt und die Leistung des Gerätes verstärkt. Dies erklärt auch die niedrigere Laserschwelle: Werden nicht so viele Photonen ausgekoppelt, verbleiben also mehr im Resonator, können mehr weitere Photonen aus dem Material herausgelöst werden. Die Schwelle, ab der die Leistung messbar ist, wird schon bei geringer Stromstärke erreicht. Insgesamt kann für den Laser 013-97 gesagt werden, dass er seine höchste Leistung mit einem Reflexionsgrad von 86% bringt.

Bei der Untersuchung des Lasers 016-98 (Diagramm 4) wurden leicht unterschiedliche Beobachtungen gemacht.



**Diagramm 4 (aus Protokoll 9)**

Während bis zu einer Stromstärke von 19A der höchste Reflexionsgrad, also 92%, auch tatsächlich die meiste Leistung erbringt, steigt seine Leistung bei höheren Strömen nicht mehr so schnell an wie die der anderen. Ab einer Stromstärke von 25A bricht er deutlich zusammen und die Leistung sinkt sehr schnell. Das Verhalten des niedrigeren Schwellenstromes kann beobachtet werden, ebenso wie bei einer Resonatorlänge von 35cm (Diagramm 5).



**Diagramm 5 (aus Protokoll 9)**

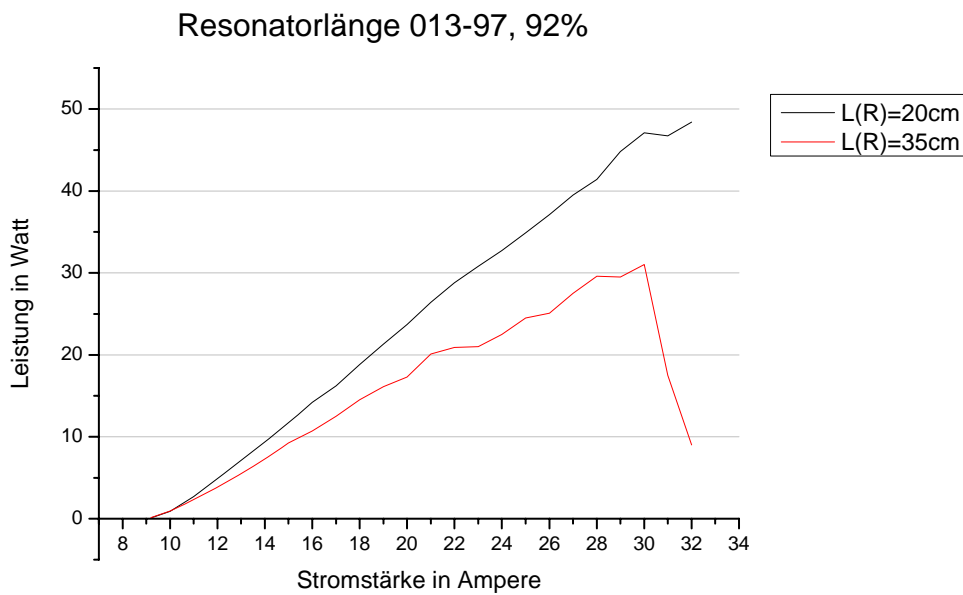
Bei einem Resonatoraufbau mit der Länge von 35cm jedoch wird wieder das Phänomen offensichtlich, dass der Auskoppelspiegel mit 92% nicht soviel Leistung bringt wie erwartet. Diesmal ist kein so starkes Abknicken ersichtlich wie bei 25A und einer Resonatorlänge von 20cm, aber eine Stagnation kann beobachtet werden. Im Hinblick auf maximale Leistung und somit einen hohen Wirkungsgrad ist der Reflexionsgrad von 86% am effektivsten.

Bemerkenswert ist, dass mit dem 52%-Auskoppelspiegel der Laser trotz mehrmaligen Justierens keine Leistung festgestellt werden konnte, aus diesem Grund existieren auch keine Messreihen. Hier wird deutlich, dass obwohl beide Laserköpfe eigentlich baugleich sind, doch erhebliche Unterschiede auftreten können.

Für die Konstruktion von Lasern nehmen die Auskoppelspiegel eine wichtige Position ein, da mit ihrer Hilfe ganz gezielt Leistungen für den fertigen Laser vorherbestimmt werden können.

### **3.4 Einfluss der Resonatorlänge**

Werden Leistungskennlinien gleicher Aufbauten, also auch mit gleichem Auskoppelspiegel, aber unterschiedlicher Resonatorlänge verglichen (siehe Diagramm 6), so fällt auf, dass der kürzere Resonator wesentlich höhere Leistungen bringt.



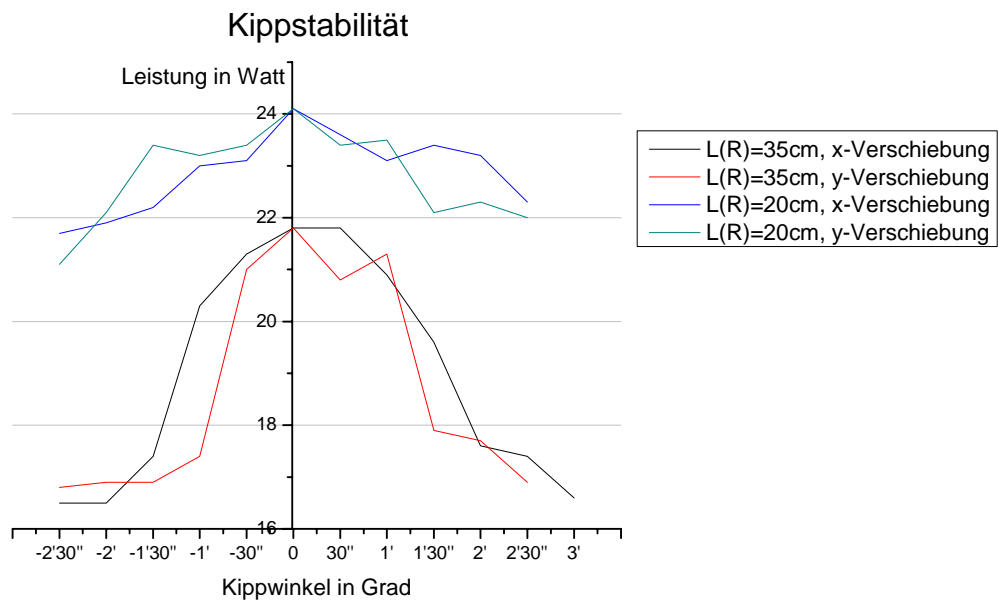
**Diagramm 6 (aus Protokoll 5)**

Dies lässt sich auch bei anderen Auskoppelspiegeln feststellen ebenso bei dem anderen Laserkopf (siehe Protokoll 4;5;9).

Beim Laserkopf 016-98 gibt es jedoch eine Ausnahme. Im Versuch mit dem 92%igen Auskoppelspiegel stagniert die Leistung bei einer Resonatorlänge von 20cm wie bereits zuvor beschrieben. Im Vergleich mit dem längeren Resonator ist in diesem einen Fall die Leistung nicht höher. Trotzdem kann die oben genannte Verallgemeinerung, dass bei einem kürzeren Resonator die Leistung höher ist, weiterhin gelten.

### **3.5 Kippstabilität bei unterschiedlichen Resonatorlängen**

Bei Betrachtung des Diagramms 7 wird auf jeden Fall eines sofort ersichtlich: Laser reagieren auch auf geringe Dejustierungen schon mit großen Einbrüchen bei der Leistung. Es ist dabei nicht relevant, welche der beiden Koordinaten verändert wird. Die Leistungsänderung ist etwa gleich stark.



**Diagramm 7 (aus Protokoll 10)**

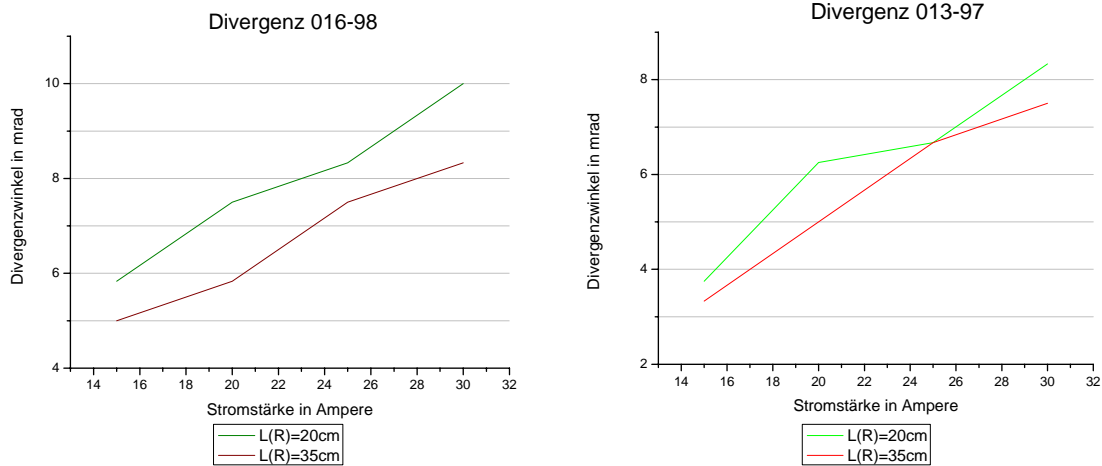
Vergleicht man allerdings die Leistungseinbrüche bei verschiedenen Resonatorlängen wird man feststellen, dass bei einem kürzeren Resonator die Einbrüche in der Leistung nicht ganz so stark sind. Wo bei der Länge von 35cm bei einer Veränderung von 2'30'' ein Verlust von 4,4W auftrat, sind es bei 20cm Länge nur 2,2W.

Dies könnte damit erklärt werden, dass bei einem längeren Resonator die Winkelveränderung einen größeren Wegunterschied ergibt und somit der mehrfach reflektierte Laserstrahl eventuell nicht mehr auf die Spiegel trifft. Kommt es hier zu Ungenauigkeiten muss ein Leistungseinbruch erwartet werden.

Kürzere Resonatoren sind also stabiler, beim Transport nicht ganz so empfindlich und somit besser geeignet. Wenn man jedoch einmal die geringen Winkel betrachtet, um die der Spiegel dejustiert wurde und die schon solche großen Veränderungen hervorgerufen haben, ist auch für die kürzeren Resonatoren stabil nur ein relativer Begriff.

### 3.6 Divergenz

Bei beiden Laserköpfen 016-98 und 013-97 wurde der Einfluss der Resonatorlänge auf die Divergenz des Strahls überprüft. In den Diagrammen 8 und 9 wird ersichtlich, dass ein kürzerer Resonator bei gleicher Stromstärke eine wesentlich höhere Strahldivergenz aufweist, besonders deutlich wird dies beim Laser 016-98.



#### Diagramme 8 und 9 ( aus Protokoll 6)

Unabhängig von der Resonatorlänge lässt sich der Zusammenhang zwischen höherer Stromstärke und größerer Divergenz erkennen. Um eine optimale Strahlqualität zu erhalten sollte demnach nicht mit sehr hohen Strömen gearbeitet werden, um den Strahldurchmesser so gering wie möglich zu halten. Hier muss abgewogen werden, worauf der Schwerpunkt liegt: Auf höherer Leistung bei hoher Stromstärke oder guter Strahlqualität.

## 4. Zusammenfassung

Das Ziel meiner Forschung war es, die Zusammenhänge zwischen dem Aufbau eines Laserresonators und seiner erbrachten Leistung herzustellen.

Aus den Vorbetrachtungen und der mehrmaligen Durchführung der Messungen geht hervor, dass die Ergebnisse wie erwartet ausgefallen sind. Deshalb können die angewandten Methoden als geeignet angesehen werden. In der Anwendung sind sie zwar sehr zeitaufwändig, insbesondere da während der Messungen die Optimaltemperatur immer eingehalten werden musste und der Temperaturregler dafür sehr viel Zeit in Anspruch nahm.

Es ist auch wichtig, diese Messungen mit jedem der Laserköpfe durchzuführen, wie an dem Laserkopf 021-98 ersichtlich, kann nicht davon ausgegangen werden, dass jeder die Leistung erbringt, für den er entwickelt wurde.

Es wurde deutlich, dass ein kürzerer Resonator mehr Leistung erbringt und bei Kippen des Auskoppelspiegels nicht so empfindlich reagiert wie ein längerer Resonator. Jedoch ist die Divergenz wesentlich größer als die eines längeren Resonators, die Strahlqualität ist schlechter. Bei den Auskoppelspiegeln ergab sich, dass ein geringerer Reflexionsgrad weniger Leistung erbringt als ein Resonator mit höherem Reflexionsgrad. Diese Erkenntnis muss bei der Herstellung abgewogen werden, je nachdem, welche Eigenschaften der Laser besitzen muss und mit welchen Nachteilen deshalb gerechnet werden muss.

Für die praktische Anwendung resultieren für die verschiedenen Resonatoren unterschiedliche Möglichkeiten: Kürzere Resonatoren mit hoher Leistung sind demnach zur Materialbearbeitung geeignet, bei der größere Flächen betroffen sind. Laser mit kürzeren Resonatoren sind stabiler, bei dem Einsatz in Maschinenhallen werden sie durch auftretende Schwingungen nicht so schnell an Leistung einbüßen. Längere Resonatoren mit der geringen Divergenz eignen sich hingegen besser für Feinarbeiten, z.B. in der Medizin. Wegen der geringeren Kippstabilität müssen allerdings besonders sorgfältig mechanische oder thermische Belastungen vermieden werden.





## 5. Anhang

### 5.1 Protokolle

Protokoll 1

Überprüfung der Parallelität der Endflächen und der Rechtwinkligkeit bezüglich des Umfanges

Name: Josefine Proll

Datum: 16.2.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Autokollimationsfernrohr  
Metallschiene  
Zu untersuchende Kristallstäbe

Durchführung: siehe Methoden 2.1.1.

Ergebnisse:

Nr. des Kristalls	Parallelitätsabweichung	Winkelabweichung zum Umfang	Kristall tauglich
F66256	<10''	6'	nein
F66241	<15''	2'	nein
F66233	<10''	2'	ja
F10130	<15''	2'	nein
F1019	<10''	4'	ja
F66212	<10''	2'	ja
F1020	<10''	4'	ja
F66223	<10''	6'	nein
F66309	<15''	1,5'	nein
F66249	<10''	7'	nein
F66267	<10''	3'	ja

## Überprüfung der Parallelität der Endflächen mit He-Ne-Laser

Name: Josefine Proll

Datum: 02.03.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Helium-Neon-Laser

Zwei Umlenkspiegel

Maßband

Als Lineal beschriftetes Blatt Papier

Metallschiene

Zu untersuchende Kristallstäbe

Durchführung: siehe Methoden 2.1.2.

Ergebnisse:

Gemessene Gesamtlänge  $L=290\text{cm}$ Aus Aufbauskitze ermittelt:  $\tan\alpha = (1/2 s) / L$ Dabei ergibt sich die Länge  $L$  aus  $L = l_{\text{Stab}} + l_{\text{außerhalb}}$ 

Nr. des Kristallstabes	Länge in cm	Abstand $s$ der Punkte in cm	$\tan\alpha$	$\alpha$
Test	5,6	0,4	0,0388	2'19''
Keine Angabe	4,5	0,6	0,0584	3,5'
G4321	4,5	0,8	0,078	4,67'
Grenzbestimmung	ca.5	ca.0,3	0,0291	1,75'

## Optimale Arbeitstemperatur des Lasers 013-97

Name: Josefine Proll

Datum: 06.04.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Helium-Neon-Laser

Zwei Umlenkspiegel

Lineal

Zu untersuchender Laserkopf Nr. 013-97

Leistungsmessgerät

Spannungsmessgerät

Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung

Durchführung: siehe Methoden 2.3.

Resonatorlänge 35cm

Stromstärke 20A

Ergebnisse:

$\vartheta$ in C°	P in W	U in V
18	22,3	10,46
19	22,2	10,47
20	21,9	10,44
21	21,6	10,44
22	21,3	10,43
23	20,9	10,42
24	20,3	10,41
25	19,7	10,41
26	19,0	10,40
27	18,2	10,39
28	17,4	10,38
29	16,3	10,37
30	15,2	10,37

Diagramm 1, Seite 24

## Einfluss des Auskoppelspiegels

Name: Josefine Proll

Datum: 13.04.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Helium-Neon-Laser

Zwei Umlenkspiegel

Lineal

Zu untersuchender Laserkopf Nr. 013-97

Leistungsmessgerät

Spannungsmessgerät

Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung

Auskoppelspiegel mit Reflexionsgrad 52%, 76,3%, 86%, 92% für  $\lambda=1064\text{nm}$ 

Durchführung: siehe Methoden 2.4.

T=18°C

Resonatorlänge 35cm

Ergebnisse:

Stromstärke in Ampere	P in W, Reflexionsgrad 86%	P in W, Reflexions- grad 76,3%	P in W, Reflexions- grad 92%	P in W, Reflexions- grad 52%
9	0	0	0	0
9,2	0	0	0	0
10	0	0	0	0
10,2	0,12	0	0	0
11	0,7	0	0	0
11,4		0,03	0	0
12	2,18	0,67	0	0
13	3,8	1,87	0,01	0
14	6,3	3,42	0,39	0
15	8,68	5,2	1	0
16	11,5	7,3	1,31	0
17	14,2	9,85	1,94	0
18	18,3	12,2	2,35	0
18,2				0,05
19	19,7	14,7	2,76	0,5
20	22,7	17,5	3,21	1,26
21	25	20	3,35	2,32
22	27,8	21,8	3,61	3,81
23	28,9	22,8	4,45	5,18
24	29,1	25,6	4,88	6,51
25	32,1	27,8	5,33	7,76
26	33,5	29,5	6,3	9,15
27	35,3	30,6	6,2	10,3
28	37,5	31	6,14	11,5
29	37,8	32,2	6,02	13,1
30	38,8	33,8	5,98	14,7

Diagramm 2, Seite 25

Einfluss des Auskoppelspiegels

Name: Josefine Proll

Datum: 20.04.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Helium-Neon-Laser

Zwei Umlenkspiegel

Lineal

Zu untersuchender Laserkopf Nr. 013-97

Leistungsmessgerät

Spannungsmessgerät

Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung

Auskoppelspiegel 52%, 76,3%, 86%, 92%

Durchführung: siehe Methoden 2.4.

T=18°C

Resonatorlänge 35cm und 20cm

Ergebnisse:

	L(R)=35cm	L(R)=20cm			
Stromstärke in Ampere	P in W, Reflexions- grad 92%	P in W, Reflexions- grad 86%	P in W, Reflexions- grad 76,30%	P in W, Reflexions- grad 92%	P in W, Reflexions- grad 52%
9	0	0	0	0	0
9,2	0,14	0	0	0,08	0
10	0,91	0	0	0,9	0
10,2		0,1	0		0
11	2,33	0,7		2,7	0
11,4			0,04		0
12	3,88	2,08	0,61	4,9	0
13	5,5	4	1,9	7,05	0
14	7,27	6,35	3,65	9,4	0
15	9,23	8,95	5,76	11,7	0
16	10,7	11,7	8,08	14,2	0
17	12,5	14,5	10,8	16,2	0
18	14,5	17,7	13,7	18,8	0
18,2					0,04
19	16,1	20,6	16,3	21,3	0,67
20	17,3	23,8	19,3	23,7	1,59
21	20,1	26,8	22,2	26,4	2,54
22	20,9	30,2	25,6	28,8	3,67
23	21	33,1	28,6	30,8	4,82
24	22,5	36,3	31,9	32,7	5,88
25	24,5	39,7	35,1	34,9	7,04
26	25,1	42	38,3	37,1	8,22
27	27,5	45,8	41,6	39,5	10,6
28	29,6	48,9	44,6	41,4	12
29	29,5	52	47,5	44,8	13,9
30	31	55,4	50,4	47,1	15,5
31	17,5	59	53,2	46,7	17,1
32	9	62	56	48,4	18,9

Diagramm 2, Seite 25 und Diagramm 6, Seite 25

## Divergenz

Name: Josefine Proll

Datum: 20.04.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Zu untersuchender Laserköpfe Nr. 013-97, 016-98, 021-98

Leistungsmessgerät

Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung

Auskoppelspiegel 86%

Messschieber

Linse mit  $f=1,20\text{m}$ 

Lineal

Fotopapier, geschwärzt

Durchführung: siehe Methoden 2.5.

 $T=18^\circ\text{C}$ 

Resonatorlänge 35cm und 20cm

Ergebnisse:

## Laserkopf 013-97

L(R)=20cm	l in A	d in mm	$\alpha$ berechnet in mrad
	15	4,5	3,75
	20	7,5	6,25
	25	8	6,6667
	30	10	8,3333
L(R)=35cm	15	4	3,3333
	20	6	5
	25	8	6,6667
	30	9	7,5

## Laserkopf 016-98

L(R)=20cm	l in A	d in mm	$\alpha$ berechnet in mrad
	15	7	5,8333
	20	9	7,5
	25	10	8,3333
	30	12	10
L(R)=35cm	15	6	5
	20	7	5,8333
	25	9	7,5
	30	10	8,3333

## Laserkopf 021-98

L(R)=20cm	I in A	d in mm	$\alpha$ berechnet in mrad
	15	3	2,5
	20	6	5
	25	8	6,6667
	30	9	7,5
L(R)=35cm	15		
	20	4	3,3333
	25	6	5
	30	6	5

Von Laserkopf 021-98 wurden Messungen gemacht, jedoch wurde zuvor bereits festgestellt, dass er nicht funktionstüchtig ist. Aus diesem Grund wird er nicht in die Auswertung mit einbezogen.

Diagramm 8, Seite 30 und Diagramm 9, Seite 30



## Optimale Arbeitstemperatur des Lasers 021-98

Name: Josefine Proll

Datum: 25.05.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Helium-Neon-Laser

Zwei Umlenkspiegel

Lineal

Zu untersuchender Laserkopf Nr. 021-98

Leistungsmessgerät

Spannungsmessgerät

Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung

Durchführung: siehe Methoden 2.3.

Resonatorlänge 20cm

Stromstärke 20A

Ergebnisse:

T in °C	P in W
17	7,55
18	8,48
19	8,95
20	9,14
21	9,1
22	8,79
23	8,3
24	7,75
25	7,22
26	6,77
27	6,37
28	6,09
29	5,91
30	5,84

Diagramm 1, Seite 24

## Optimale Arbeitstemperatur des Lasers 016-98

Name: Josefine Proll

Datum: 01.06.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Helium-Neon-Laser

Zwei Umlenkspiegel

Lineal

Zu untersuchender Laserkopf Nr. 016-98

Leistungsmessgerät

Spannungsmessgerät

Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung

Durchführung: siehe Methoden 2.3.

Resonatorlänge 35cm

Stromstärke 20A

Ergebnisse:

T in °C	P in W
17	21,2
18	20,8
19	20,5
20	20
21	19,6
22	19,3
23	18,8
24	18,5
25	17,8
26	17,1
27	16,3
28	15,4
29	14
30	12,7

Diagramm 1, Seite 24

## Einfluss des Auskoppelspiegels

Name: Josefine Proll

Datum: 08.06.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Helium-Neon-Laser

Zwei Umlenkspiegel

Lineal

Zu untersuchender Laserkopf Nr. 016-98

Leistungsmessgerät

Spannungsmessgerät

Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung

Auskoppelspiegel 52%, 76,3%, 86%, 92%

Durchführung: siehe Methoden 2.4.

T=18°C

Resonatorlänge 35cm und 20cm

Ergebnisse:

L(R)=20cm

I in A	P in W, Reflexionsgrad 52%	P in W, Reflexionsgrad 76,3%	P in W, Reflexionsgrad 86%	P in W, Reflexionsgrad 92%
9,3	0	0	0	0,08
10	0	0	0	0,68
10,3	0	0	0,04	
11	0	0	0,75	1,92
11,5	0	0,09		
12	0	0,68	2,25	3,91
13	0	1,94	4,33	6,18
14	0	3,53	6,56	8,45
15	0	5,33	9,03	10,7
16	0	7,32	11,7	13,2
17	0	9,69	14,5	15,6
18	0	12,2	17,4	18
19	0	15,9	20,5	20,3
20		18,7	23,4	22,3
21		21,8	26,4	24,1
22		24,6	29,5	27,1
23		28	32,8	28,9
24		30,9	35,8	32
25		34,1	38,6	33,9
26		37,1	41,4	33,7
27		39,8	44	35,2
28		42,5	46,8	34
29		45,2	49	28,6
30		47,4	50,5	22
31		49,1	51,3	19
32		49,5	49	

L(R)=35cm

I in A	P in W, Reflexionsgrad 52%	P in W, Re- flexionsgrad 76,3%	P in W, Reflexions- grad 86%	P in W, Reflexions- grad 92%
9,3		0	0	0,1
10		0	0	0,44
10,3		0	0,08	
11		0	0,88	1,33
11,5		0,06		
12		0,58	2,37	2,63
13		2,03	4,45	4,13
14		3,74	6,72	5,92
15		5,77	9,05	7,24
16		8,08	11,7	8,95
17		10,3	14,7	11
18		12,5	17,1	12,8
19		15	19,3	13,8
20		16,9	21,8	14,7
21		18,6	22,2	14
22		21,1	24,5	13,9
23		23,3	26,2	15,1
24		25,9	28,7	16,5
25		28,1	30,9	17,3
26		29,9	33,1	18,1
27		30,2	33,8	17,2
28		30	34	16,3
29		30,3	32,8	16,6
30		33,2	33,8	17,7
31		35,3	35,4	16,3
32		36,3	37,5	

## Anmerkungen:

Beim Messen mit dem 52%-Auskoppelspiegel konnte die Schwelle auch über einer Stromstärke von 19A nicht gefunden werden. Deshalb wurden bei 20cm über 19A und bei 35cm Resonatorlänge überhaupt keine Messungen vorgenommen.

Diagramm 3, Seite 25 , Diagramm 4, Seite 26 und Diagramm 5 , Seite 27

## Kippstabilität bei unterschiedlichen Resonatorlängen

Name: Josefine Proll

Datum: 22.06.2005

Ort: Göschwitz bei Jena, LOS

Geräte: Autokollimationsfernrohr  
 Zu untersuchender Laserkopf Nr. 016-98  
 Leistungsmessgerät  
 Kühlwasseranlage mit Temperaturregelung  
 Auskoppelspiegel 86%

Durchführung: siehe Methoden 2.6.

T=18°C

Resonatorlänge 35cm und 20cm

Ergebnisse: Diagramm 7, Seite 29

Schritt	Verschiebung		P in W(20A)	Schwellenstrom in A
	x	y		
0	0	0	21,8	10,3
1	30"		21,8	10,2
2	1'		20,9	10,3
3	1'30"		19,6	10,7
4	2'		17,6	11
5	2'30"		17,4	11,3
6	3'		16,6	11,3
7	-30"		21,3	10,3
8	-1'		20,3	10,3
9	-1'30"		17,4	10,3
10	-2'		16,5	10,6
11	-2'30"		16,5	10,4
0	0	0	21,8	10,3
1		0 30"	20,8	10,3
2		0 1'	21,3	10,4
3		0 1'30"	17,9	10,7
4		0 2'	17,7	10,7
5		0 2'30"	16,9	10,8
6		0 -30"	21	10,5
7		0 -1'	17,4	10,6
8		0 -1'30"	16,9	10,8
9		0 -2'	16,9	10,9
10		0 -2'30"	16,8	11

## 5. Anhang

L(R)=20cm

Schritt	Verschiebung		P in W(20A)	Schwellenstrom in A
	x	y		
0	0	0	24,1	10,2
1	30"	0	23,6	10,2
2	1'	0	23,1	10,3
3	1'30"	0	23,4	10,3
4	2'	0	23,2	10,4
5	2'30"	0	22,3	10,5
6	-30"	0	23,1	10,2
7	-1'	0	23	10,3
8	-1'30"	0	22,2	10,4
9	-2'	0	21,9	10,4
10	-2'30"	0	21,7	10,5
0	0	0	24,1	10,2
1	0	30"	23,4	10,2
2	0	1'	23,5	10,2
3	0	1'30"	22,1	10,4
4	0	2'	22,3	10,5
5	0	2'30"	22	10,5
6	0	-30"	23,4	10,2
7	0	-1'	23,2	10,2
8	0	-1'30"	23,4	10,3
9	0	-2'	22,1	10,5
10	0	-2'30"	21,1	10,6

## **5.2 Quellenverzeichnis**

- (1) Grehn, J; Krause, J. (Hrsg.); Physik, Hannover 2003, 3. Auflage
- (2) Eichler, Hans Joachim und Eichler, Jürgen; Laser, Hightech mit Licht, Heidelberg 1995, 1. Auflage
- (3) JENOPTIK Laserdiode GmbH (Hrsg.), Hochleistungsdiodenlaser, Allgemeine Nutzerinformation, Jena 2003, 2. Ausgabe
- (4) Knoke, Stefan; Der Scheibenlaser etabliert sich, Pluspunkte sind Effizienz und Zuverlässigkeit (Artikel), 2004

### **5.3 Literaturverzeichnis**

- (1) Iffländer, Reinhard; Festkörperlaser zur Materialbearbeitung, Heidelberg 1990, 1.Auflage,
- (2) Knerr, Richard, Lexikon der Physik, Vom Atom zum Universum, München 2000, Sonderauflage



## 5.4 Bildquellenverzeichnis

Privat:

Abbildung 1 .....	- 6 -
Abbildung 2.....	- 6 -
Abbildung 3.....	- 7 -
Abbildung 4.....	- 8 -
Abbildung 5 <i>Grehn, J; Krause, J. (Hrsg.); Physik, Hannover 2003, Seite 432</i> .....	- 11 -
Abbildung 6 <i>Eichler, Hans Joachim und Eichler, Jürgen; Laser, Hightech mit Licht Heidelberg 1995, Seite 73</i> .....	- 11 -
Abbildung 7.....	- 14 -
Abbildung 8.....	- 15 -
Abbildung 9.....	- 18 -
Abbildung 10.....	- 20 -

### **5.5 Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Ausarbeitung in eigenständiger Arbeit verfasst habe. Mehr als die angegebenen Quellen habe ich nicht verwendet, außerdem sind alle zitierten Textstellen als solche gekennzeichnet.

Schulpforte, den 10. November 2005