



# Laserresonator

Versuch Nr. 6  
Vorbereitung - 21. Januar 2013

Ausgearbeitet von Martin Günther und Nils Braun

# 1 Vorwort

Im Folgenden Versuch wird ein vormontierter Titan-Saphir-Laser justiert und in den Laserbetrieb gebracht.

Der Begriff Laser ist ein Akronym für "light amplification by stimulated emission of radiation". Wie im folgenden Abschnitt erklärt, sind Laser in der Lage, monochromatisches kohärentes Licht abzustrahlen. Außerdem gehören Laserpulse, die durch Modelocking (siehe 5) erzeugt werden können, meist zu den kürzesten Ereignissen, die experimentell zur Verfügung stehen.

## 2 Funktionsweise eines Lasers

Ein Lasermedium verstärkt, wie das Akronym schon aussagt, Licht durch stimulierte Emission. Um dies zu erklären, benötigt man die Quantenmechanische Betrachtung eines Zustandsübergangs zwischen den zwei *Laserniveaus*.

Die Laserniveaus sind dabei z.B. durch atomare elektronische Energieterme bzw. -Bänder in Festkörpern, oder Vibrationsniveaus wie im Fall des Titan-Saphir-Lasers gegeben. Zustandsübergänge können hauptsächlich durch folgende vier Prozesse stattfinden:

- Strahlungslose Prozesse ereignen sich beispielsweise beim Zusammenstoß zweier Atome. Hierbei geht die Energie entweder in eine Anregung des anderen Atoms (Diese Art von Prozess benutzt man beim Pumpen von He:Ne-Lasern) oder in Wärme über.
- Absorption bedeutet, dass ein Photon seine Energie an ein Elektron<sup>i</sup> abgibt und dabei "vernichtet" wird. Das Elektron geht dabei in einen höheren Energieterm über.
- Spontane Emission ist der zur Absorption inverse Prozess. Hierbei fällt ein Elektron spontan auf einen energieärmeren Zustand und gibt dabei ein Photon ab. Die Wahrscheinlichkeit für die spontane Emission bestimmt dabei die Lebensdauer des oberen Zustands.
- Stimulierte Emission findet statt, wenn ein Photon der richtigen Energie auf einen angeregten Zustand trifft. In diesem Fall kann das Elektron ebenfalls ein Photon emittieren, das dann aber dieselben Eigenschaften (also Energie, Richtung, Phase und Polarisation) wie das eintreffende Photon hat.

Die Energiedifferenz zwischen den Laserniveaus ist dabei gerade die Energie des absorbierten bzw. emittierten Photons.

---

<sup>i</sup>Bei Vibrationsübergängen werden keine Elektronen angeregt, sondern quantisierte Schwingungen, aber das Verhalten ist analog

Wenn wir mit  $N_1$  und  $N_2$  die Besetzungszahl der Laserniveaus bezeichnen und  $I$  die Intensität der Strahlung ist, so sieht man schnell die Wahrscheinlichkeiten für

- Absorption  $B_{12}N_1I$
- Spontane Emission  $A_{21}N_2$
- Stimulierte Emission  $B_{21}N_2I$

ein. Die Proportionalitätskonstanten  $A$  und  $B$  werden auch *Einstein-Konstanten* genannt.

Wenn man erreicht, dass die stimulierte Emission zum häufigsten Prozess wird, erhält man eine lawinenartige Verstärkung von "identischen" Photonen, also einen kohärenten Strahl. Hierzu müssen insbesondere mehr Elektronen im oberen Zustand sein als dies im thermischen Gleichgewicht der Fall wäre. Man spricht von *Besetzungsinversion*. Außerdem muss die Intensität groß genug sein.

Beim Titan-Saphir-Laser erreicht man die Besetzungsinversion durch optisches *pumpen*. Das bedeutet, dass man Elektronen mit einem zweiten Laser vom Grundzustand in einen höheren Zustand anregt (Absorption), woraufhin sie durch strahlungslose Prozesse oder spontane Emission ins obere Laserniveau fallen und für den Laser zur Verfügung stehen. Vom unteren Laserniveau fallen sie dann wieder in den Grundzustand. Das Pumplicht muss somit eine kürzere Wellenlänge haben als das erhaltene Laserlicht.

An die Niveaus müssen also folgende Anforderungen gestellt werden: Der Übergang vom oberen Pump- zum oberen Laserniveau sowie vom unteren Laserniveau zum Grundzustand muss schnell vonstatten gehen (niedrige Lebensdauer). Das Obere Laserniveau sollte keine erlaubten Übergänge außer ins untere Laserniveau haben, und auch die Wahrscheinlichkeit für spontane Emission sollte gering genug sein, dass der Zustand eine ausreichende Lebensdauer hat.

Sobald die Besetzungsinversion groß genug ist, beginnt die Lasertätigkeit. Die hierfür benötigte Pumpleistung nennt man *Laserschwelle*.

### 3 Frequenzverdopplung

Der im Versuch verwendete Pump Laser ist ein Frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser. Dieses Medium gibt normalerweise Laserstrahlung der Wellenlänge 1064nm ab. Um den Ti:Saphir-Kristall pumpen zu können, muss man die Frequenz verdoppeln und erhält (grünes) Licht der Wellenlänge 532nm. Die Frequenzverdopplung beruht auf nichtlinearen optischen Materialien, in denen Zwei-Photonen-Prozesse vorkommen können. Dabei "verschmelzen" zwei Photonen zu einem einzigen mit doppelter Energie und halber Wellenlänge. Da dafür zwei Photonen "zur selben Zeit am selben Ort" sein müssen, geht die Wahrscheinlichkeit solcher Prozesse mit dem Quadrat der Intensität (statt linear, wie ein-Photonen-Prozesse) und ist nur bei sehr intensiver Laserstrahlung nutzbar.

## 4 Optischer Resonator

Nur Lasermedien mit sehr hoher Verstärkung (z.B. Stickstofflaser) können ohne Spiegel arbeiten. Hier "vervielfältigen" sich Photonen durch stimulierte Emission lawinenartig und erzeugen schon nach einem Durchlauf einen kohärenten Strahl. Bei den meisten Lasermedien ist die Verstärkung aber so gering, dass die spontane Emission überwiegt.

Deshalb reflektiert man den Lichtstrahl auf beiden Seiten mit Spiegeln zurück ins aktive Medium. Man erhält einen optischen Resonator. Um die Intensität im Resonator hoch zu halten, wird nur ein sehr geringer Teil der Leistung durch einen der Endspiegel ausgekoppelt, der eine etwas geringere Reflektivität aufweist. Dieser Laserstrahl kann dann für Experimente benutzt werden.

### 4.1 Konfokale Resonatoren

Bei der Verwendung zweier planparalleler Spiegel würde das Licht nach mehreren Reflexionen "abwandern", wenn es nicht genau senkrecht auf die Spiegel trifft. Daher ist es notwendig, das Licht zu fokussieren.

Ein einfacher und gebräuchlicher Aufbau besteht aus zwei konkaven Spiegeln, deren Abstand doppelt so groß ist wie ihre Brennweite. Das bedeutet, dass die Brennpunkte zusammenfallen. Brennpunktstrahlen werden nach der Reflexion also zu Parallelstrahlen und umgekehrt. Nach viermaliger Reflexion geht jeder Strahl wieder genau in sich selbst über, unabhängig von seiner ursprünglichen Ausrichtung. Der Strahl ist somit "im Resonator gefangen"

### 4.2 Resonatormoden

Bei der wellenoptischen Behandlung eines optischen Resonators stellt man fest, dass sich nur bestimmte Wellenlängen (stehende Wellen) im Resonator aufhalten können. Die optische Weglänge muss nämlich ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein. Das Lasermaterial kann daher meist mehrere mögliche Wellenlängen anregen, die man *longitudinale Moden* nennt.

Außerdem gibt es *transversale Moden*, die sich in der Strahlenoptik durch verschiedene Laufwege des Lichts erklären lassen. Hier wird der Lichtstrahl erst nach mehreren Durchläufen durch den Resonator wieder genau in sich selbst reflektiert. Das Strahlprofil ist quasi mit einer stehenden Welle in Querrichtung überlagert und zeigt einen oder mehrere Knoten (Nullstellen der Intensität). Im Versuch kann man transversale Moden durch Verstellen der Spiegel anregen.

### 4.3 Dielektrische Spiegel

Die erreichbare Laserintensität hängt sehr stark von den Verlusten im Resonator ab. Dies liegt daran, dass das Licht sehr oft hin- und herreflektiert wird und sich dadurch auch winzige Verluste schnell aufsummieren. Gerade die Resonatorspiegel sollten daher eine hohe Reflektivität aufweisen.

Noch besser als Metallspiegel sind hier *dielektrische Spiegel* geeignet. Sie bestehen aus sehr vielen dünnen Schichten mit verschiedenem Brechungsindex. Obwohl an jeder Schicht nur ein Teil des Lichts reflektiert wird, tritt bei Schichtdicken von einem Viertel der Wellenlänge konstruktive Interferenz auf. Dielektrische Spiegel sind also für einen bestimmten Wellenlängenbereich praktisch perfekte Spiegel, für andere Wellenlängen sind sie dagegen halbtransparent.

In unserem Fall ist es dadurch möglich, den Titan-Saphir-Kristall im selben Lichtweg zu pumpen, ohne dass das intensive Pumplicht (das eine andere Wellenlänge hat) den gewünschten Laserstrahl überlagert. Dafür muss der Pumpstrahl aber hinter dem Aufbau aufgefangen und absorbiert werden ("beam dump").

#### 4.4 Brewsterwinkel

Eine weitere Quelle von Verlusten sind Reflexionen an den Stirnflächen des Lasermediums. Diese lassen sich aber vermeiden, wenn man die Flächen im Brewsterwinkel anordnet. Dies ist der Winkel, bei dem der reflektierte und der transmittierte (gebrochene) Strahl senkrecht aufeinander stehen.

Wenn das Licht in Richtung des reflektierten Strahles polarisiert ist, wird es vollständig gebrochen und es gibt theoretisch überhaupt keine Reflexionsverluste. Die Erklärung dafür ist, dass man die die Atome an der Grenzfläche als Dipolstrahler ansehen kann, die niemals in ihrer Polarisationsrichtung strahlen können.

Als Folge dieser Anordnung ist das Laserlicht sehr gut linear polarisiert. Komponenten mit anderer Polarisierung werden durch die Reflexionsverluste unterdrückt.

## 5 Modelocking

Eine besondere Anwendung des Lasers ist der Pulsbetrieb (im Gegensatz zum Dauerstrich- oder "continuous wave"-Betrieb). Die naheliegendste Methode, um kurze Laserpulse zu erzeugen, ist stoßweises Pumpen z.B. mit einer Blitzlampe. Eine weitere Möglichkeit ist die *Güteschaltung*, bei der die Verluste im Laserresonator während des Pumpens künstlich hochgehalten werden. Erst beim Abschalten dieser zusätzlichen Verluste schwingt der Laser an und gibt die gespeicherte Energie als intensiven Puls ab. Mit solchen Lasern sind Pulsdauern im Mikrosekunden-Bereich möglich.

Bei noch kürzeren Impulsdauern im Femtosekunden-Bereich spielt die Frequenz-Zeit-Unschärfe eine starke Rolle. Die Fourier-Transformierte eines kurzen Pulses überdeckt einen Frequenzbereich der Größenordnung  $\Delta\omega \approx (\Delta t)^{-1}$ . Umgekehrt bedeutet dies, dass solch ein Puls aus vielen verschiedenen Frequenzen (Resonatormoden) zusammengesetzt werden muss. Man braucht daher ein Lasermedium, das in einem entsprechend breiten Spektralbereich arbeiten kann. Beim Titan-Saphir-Laser ist dies durch die Vibrationsübergänge gegeben, die eine hohe Energieunschärfe aufweisen. Lasermedien, die durch atomare Elektronenübergänge arbeiten (z.B. He-Ne-Laser) haben dafür meist zu

schmale Spektren.

Im Dauerstrichbetrieb sind die Phasenbeziehungen zwischen den Moden zufällig und es addieren sich nur die Intensitäten. Um Pulse zu erzeugen, muss man dafür sorgen, dass alle Moden zu einem Zeitpunkt in Phase sind. Dies nennt man *Modelocking*. Da hier die Feldstärken aller beteiligten Moden addiert werden, geht die Intensität der Pulse mit dem Quadrat der beteiligten Moden und kann dadurch sehr groß werden.

Beim Titan-Saphir-Laser ist Modelocking zum Beispiel durch Ausnutzung des Kerr-Effekts möglich. Materialien mit Kerr-Effekt (so auch der Ti:Sa-Kristall selbst) haben eine intensitätsabhängige Brechzahl und können bei hohen Intensitäten als *Kerr-Linse* wirken. Damit ist es möglich, den Resonator so zu bauen, dass nur die starken Laserpulse korrekt fokussiert werden, während die kontinuierliche Strahlung unterdrückt und unter der Laserschwelle gehalten wird.

Angewandt werden solche Femtosekundenlaser überall dort, wo man schnelle Prozesse beobachten will (z.B. Ultrakurzzeit-Spektroskopie) oder extreme Intensitäten benötigt (z.B. Röntgenlaser, Multiphotonenmikroskopie, Materialbearbeitung).

## 6 Vermessung der Spektren

### 6.1 Glasfasern

Wir benutzen eine Glasfaser, um das Laserlicht zum Spektroskop weiterzuleiten. Glasfasern sind lange, dünne Glaszylinder, in denen man z.B. durch Dotierung verschiedene Brechungsindizes erreicht. In Längsrichtung kann sich das Licht ausbreiten, während es in Querrichtung hin- und herreflektiert wird und die Faser nicht verlassen kann. Gleichzeitig sind die Fasern so dünn, dass sie biegsam werden und als "Kabel" für Licht dienen.

Dickere Fasern können zwar mehr Licht aufnehmen, aber es können sich dann auch (wie beim optischen Resonator erläutert) mehrere transversale Moden ausbilden, die sich in Längsrichtung unterschiedlich schnell ausbreiten. Man spricht von einer *Multimode-Faser*. Da wir nur Wellenlängen bestimmen wollen, und nicht z.B. den genauen zeitlichen Verlauf eines Laserpulses, stört dieses Verhalten aber hier nicht.

### 6.2 Spektrometer

Ein Spektrometer misst die Wellenlänge von Licht. Meist wird das (hier durch die Glasfaser) einfallende Licht z.B. durch Interferenz an optischen Gittern in seine Bestandteile aufgespalten. Die Intensität der entstehenden Teilstrahlen wird dann gemessen und als Spektrum aufgetragen.

Anhand der Breite des Spektrums im Frequenzbereich kann die Länge der entstehenden Pulse im Modelocking-betrieb und somit die Eignung als Puls laser abgeschätzt werden. Dies alleine sagt natürlich noch nichts darüber aus, ob der Pulsbetrieb auch in der Praxis möglich wäre. Das Spektrum kann sich durchaus noch ändern, wenn man zusätzliche optische Elemente in den Resonator einbaut.