



# *LASER*

*KLEIS MAURICE*

*4 C 6*

*2018 / 2019*

*TUTEUR:*

*PIERRE OBERTIN*

## Inhaltsverzeichnis

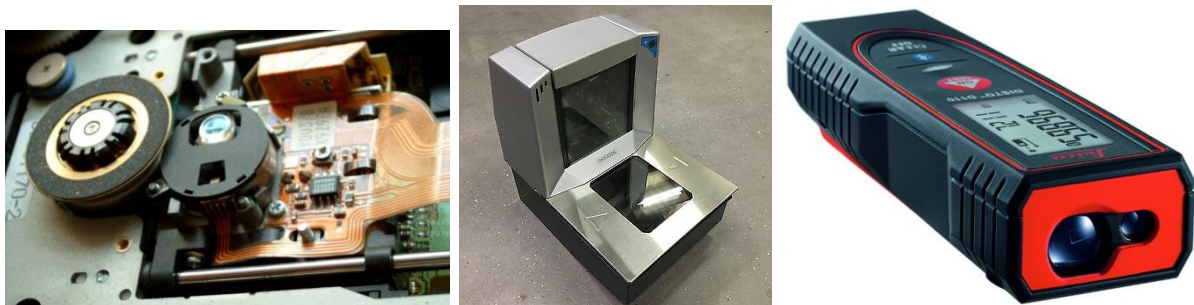
1	DER LASER.....	1
2	ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN .....	3
2.1	WELLENCHARAKTER-PHÄNOMENE.....	5
2.1.1	REFLEKTION .....	5
2.1.2	BEUGUNG .....	5
2.1.3	BRECHUNG .....	6
2.1.4	INTERFERENZ.....	7
2.2	TEILCHENCHARAKTER-PHÄNOMENE.....	9
2.2.1	PHOTOEFFEKT.....	9
2.2.2	ELASTISCHER STOSS.....	9
2.3	LASERLICHT UND POLARISIERUNG .....	10
2.3.1	POLASIERUNG.....	11
3	LASER.....	14
3.1	GRUNDAUFBAU EINES LASERS .....	14
3.1.1	LASERMEDIUM UND UNTERTEILUNGEN DER LASER.....	15
3.2	DAS LASERMEDIUM.....	15
3.2.1	ERZUGUNG VON LASERLICHT DURCH STIMULIERTE EMISSION.....	15
3.2.2	LÄNGSGESTRÖMTE UND QUERGESTRÖMTE LASER.....	22
3.3	ENERGIEPUMPE.....	23
3.3.1	ELEKTRISCHE ANREGUNG.....	24
3.3.2	OPTISCHE ANREGUNG.....	27
3.3.3	ANREGUNG DURCH EINE CHEMISCHE REAKTION .....	31
3.3.4	INDIREKTE AN- UND ABREGUNG.....	32
3.3.5	RELAXION AN GLASWAND UND KAPILLARRÖHRCHEN .....	33
3.3.6	VERLUSTE.....	33
3.4	LASERRESONATOR.....	33
3.4.1	SPIEGEL UND TEILDURCHLÄSSIGE SPIEGEL .....	35
3.4.2	RESONATORANORDNUNGSARTEN.....	37
3.4.3	MODEN.....	41
3.4.4	FASERLASER.....	43
3.4.5	BREWSTER FENSTER .....	46
3.5	DAUERSTRICH- UND PULSBETRIEB.....	47
3.5.1	DAUERSTRICHBETRIEB.....	47

3.5.2	PULSBETRIEB .....	47
4	DIE DREI LASERTYPEN UND DEREN AUSFÜHRUNGEN .....	54
4.1	GASLASER .....	54
4.1.1	METALLDAMPFLASER .....	58
4.1.2	EXCIMERLASER .....	62
4.1.3	KOHLENDIOXIDLASER .....	63
4.2	FESTSTOFFLASER .....	65
4.2.1	LASERDIODE.....	71
4.3	FARBSTOFFLASER .....	75
5	EXPERIMENT.....	77
5.1	KURZE ERKLÄRUNG UND RESULTAT.....	77
5.2	DER AUFBAU DES EXPERIMENTES IN BILDERN .....	78
5.3	DAS RESULTAT IN BILDERN.....	80
5.4	ZURÜCKRECHNEN DER WELLENLÄNGE DES LASERS .....	81
6	HAUPTQUELLEN.....	83

# 1 DER LASER

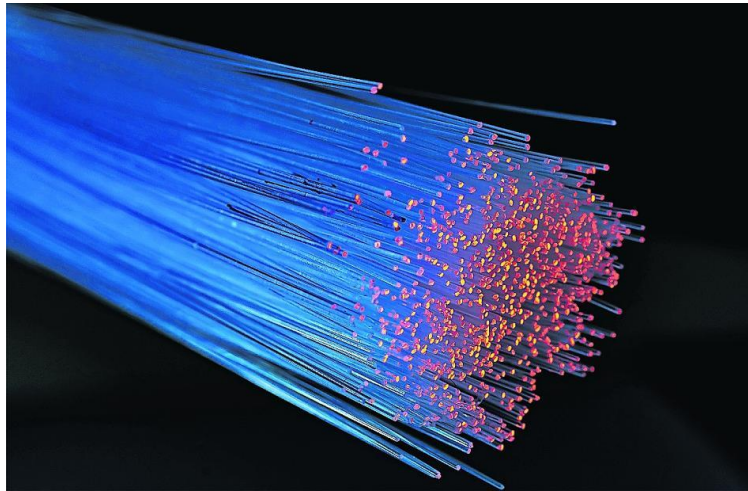
Vom Laser haben die meisten sicherlich gehört oder diesen schon einmal benutzt, sei es zum Lesen einer CD im Computer oder als digitales Messgerät von Entfernungen. Der Laser ist heutzutage alltäglich. Er findet sich in Scannern in den Kassen, mit ihm werden in der Industrie alle möglichen dünneren Bleche präzise zugeschnitten, zur Behandlung von Kurz- und Weitsichtigkeit bei Patienten, .... Es ist quasi unmöglich den Laser im technischen Bereich zu ignorieren. Der Laser löst bei vielen Leuten trotz den unzähligen alltäglichen Lichtquellen eine gewisse Faszination aus und scheint auch in der Gesellschaft als eine besondere Lichtquelle zu gelten. Man könnte meinen, dass ein Laserstrahl nur ein stark gebündelter Strahl ist, was er auch meistens ist. Doch dieser ist tatsächlich besonders, denn er verfügt über Eigenschaften, die nirgends sonst in der Umwelt und sonst wo vorkommen, sondern nur im Laserstrahl. Dass der Laser etwas besonderes sein muss zeigen die unzähligen neuen technischen Geräte und Erfindungen, welche ohne den Laser nicht denkbar gewesen wären. So können zum Beispiel unglaublich kurze Geschehnisse im Nano- und Femto- Sekundenbereich mithilfe des Lasers untersucht werden. Auch die Tatsache, dass der Laser schon 1960 (Rubinlaser) erfunden wurde und heute immer noch ein topaktuelles Thema in vielen technischen Sparten und Entwicklungszentren ist, zeigt von der hohen technischen Bedeutung des Lasers. Auch fast 60 Jahre nach dieser Erfindung sind schon sehr viele Erfindungen und Ausführungen des Lasers aufgetaucht und trotzdem wird heute noch an neuen Typen und Ausführungen getüftelt. Heute können im weltstärksten Laser (Puls laser) für eine sehr kurze Zeit Lichtenergien von 300 Terawatt erzeugt werden! Dies entspricht 300.000.000.000.000 Watt. Nur mit dem Laser ist es möglich Licht derart zu manipulieren und gewisse Phänomene zu untersuchen. Doch wie diese besondere Lichtquelle funktioniert ist in der Tat sehr kompliziert und ist vielen ein Rätsel. Trotzdem ist die Funktionsweise des Lasers eine sehr interessante Angelegenheit.

In dieser Arbeit möchte ich daher die allgemeine Funktionsweise von Lasern behandeln. Doch zuerst muss einmal geklärt werden, was sich hinter dem Namen „Laser“ eigentlich verbirgt. Der Name „LASER“ ist eine Abkürzung aus englischen Wörtern und lautet „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“. Zu Deutsch wäre dies „Lichtverstärkung durch stimulierte (erzwungene) Emission (Aussendung) von Strahlung“ und beschreibt die zentrale Funktionsweise grob. Um zu beginnen wird aber zunächst das Produkt des Lasers genauer unter die Lupe genommen.



Verschiedene mit Laser arbeitende alltägliche Geräte, wobei der bläuliche Laser in einem CD-Laufwerk verbaut ist (links). In der Mitte dient der Laser zum scannen von Barcodes in einem Tischscanner (hier ausgebaut). Auf dem rechten Bild ist ein typisches Laserbetriebenes Entfernungsmessgerät abgebildet.

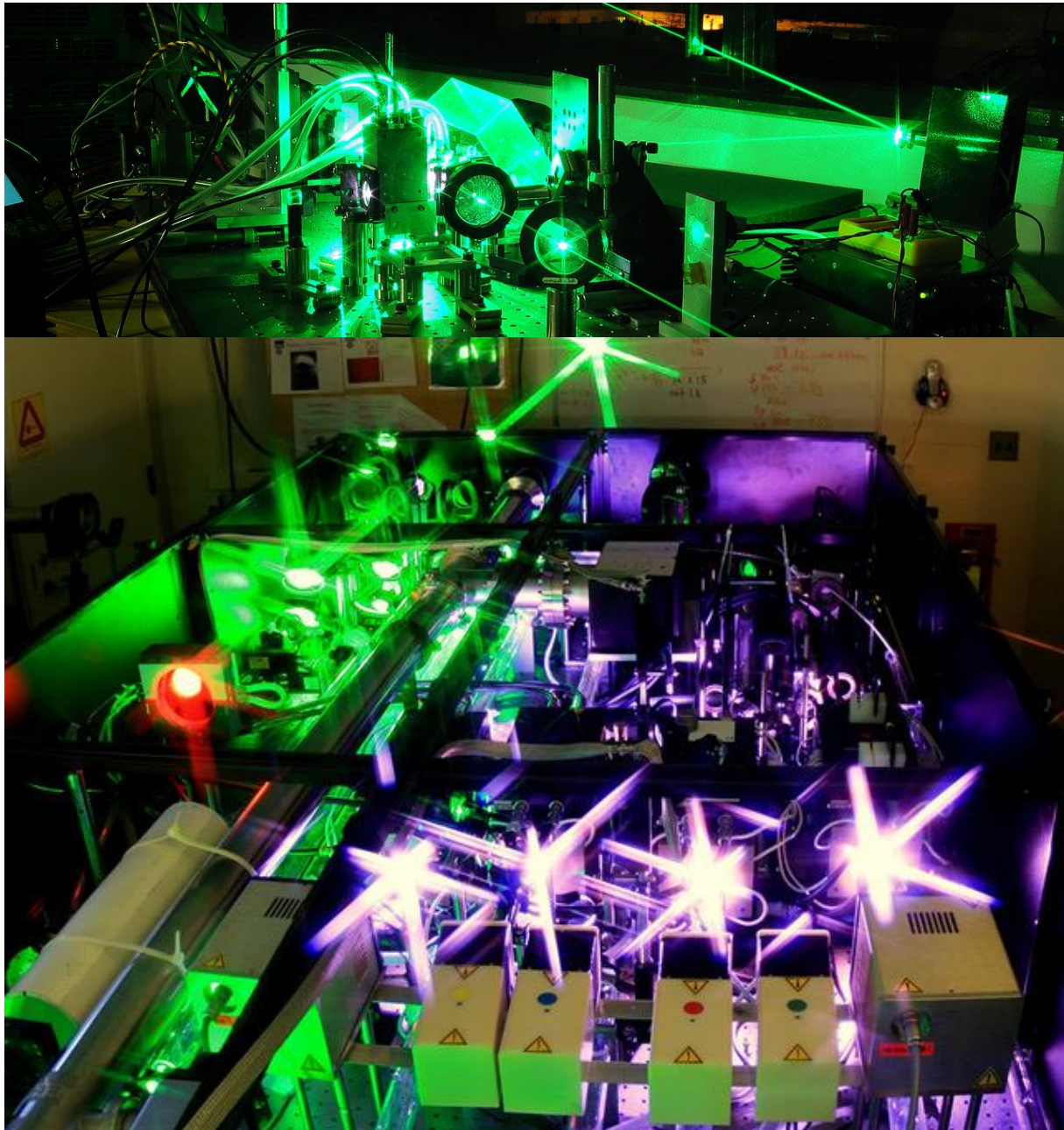




Ein etwas versteckteres, aber auch alltägliches Anwendungsgebiet ist die Glasfaserübertragung. Mit der Leitung von durch Laser erzeugten Lichtimpulsen durch lichtleitende Glasfaser, wird eine extrem schnelle Datenübertragung auf Lichtgeschwindigkeit erreicht.



Auch in der Industrie spielt der Laser, meist in Form eines CO<sub>2</sub>-Lasers eine wichtige Rolle, wenn es darum geht Platten, insbesondere Metallplatten sauber zuzuschneiden, zu schweißen oder zu bearbeiten.



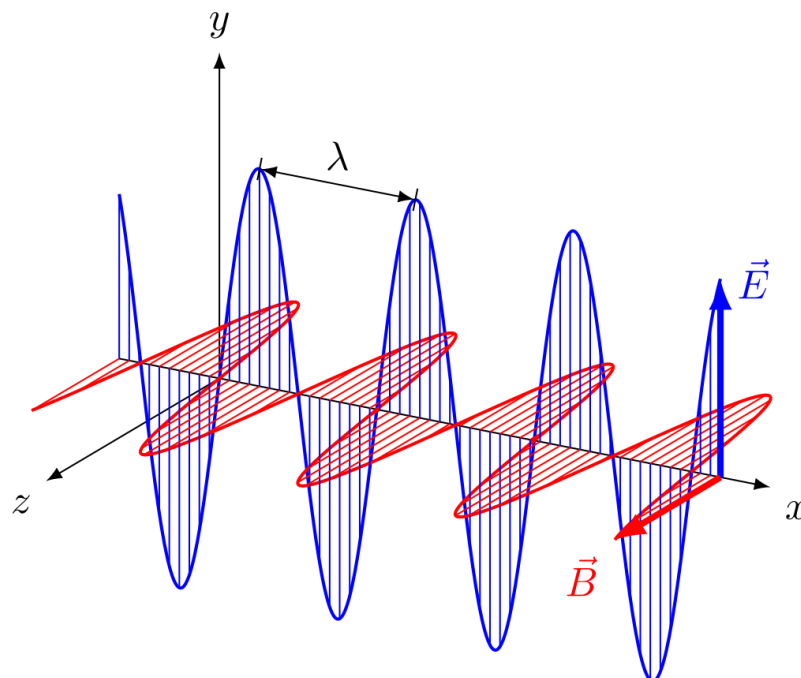
Diese beiden Bilder zeigen Laser, welche zu Forschungszwecken dienen, wobei wie bereits erwähnt, enorme Leistungen erzeugt werden können.

## 2 ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN

Laser emittieren bekanntlich sichtbares Licht in einer sehr gebündelten Form. Laser können allerdings auch Licht im Infrarot- und sogar im Ultraviolett- Bereich emittieren. Das sichtbare Licht, sowie das nicht sichtbare Infrarot- und Ultraviolett- Licht haben etwas gemeinsam. Sie alle sind eine Art elektromagnetische Strahlung. Ein Lichtstrahl setzt sich so aus sehr vielen elektro-magnetischen Wellen zusammen. Eine elektromagnetische Welle besteht aus einem schwingenden elektrischen



Feld und einem parallel dazu schwingenden magnetischen Feld, welche sich in eine bestimmte Richtung ausbreiten. Beide Felder breiten sich jeweils in Form einer wandernden Wellenlinie aus. Dabei steht die Wellenlinie des elektrischen Feldes bei einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle im Normalfall im Querschnitt genau senkrecht zu der Welle des magnetischen Feldes. Von der Seite betrachtet, liegt die horizontal verlaufende magnetische Welle genau in der Mitte der Welle des elektrischen Feldes, so dass sich im Querschnitt ein Kreuz bildet. Die Linie in der die beiden Felder aufeinandertreffen ist die Nulllinie. Somit erkennt man Amplituden (oberhalb der horizontal verlaufenden magnetischen Welle oder Nulllinie herausragend) und umgekehrte Amplituden (unter der horizontal verlaufenden magnetischen Welle oder Nulllinie herausragend). Das gleiche gilt für die magnetische Welle. Wenn die Welle des elektrischen Feldes nach oben ausschlägt, schlägt die Welle des magnetischen Feldes gleichzeitig und mit gleicher Amplitude nach vorne aus. Wenn die Welle des elektrischen Feldes dann nach unten ausschlägt, so schlägt die Welle des magnetischen Feldes gleichermaßen nach hinten aus. Dieser Prozess geht immer so weiter entlang der Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle. Die Höhe der Amplituden des elektrischen, beziehungsweise magnetischen Feldes gibt deren Stärke an. Desto höher die Amplitude der elektrischen Welle, beziehungsweise magnetischen Feldes, desto höher die elektrische Feldstärke, beziehungsweise magnetischen Flussdichte des magnetischen Feldes (Stärke des magnetischen Feldes). Der Abstand zwischen zwei positiven, respektiv zwischen zwei negativen Amplituden des elektrischen Feldes, gibt die Wellenlänge und Frequenz der elektromagnetischen Welle an. Eine elektromagnetische Welle hat einerseits einen Wellen-Charakter und gleichzeitig einen teilchenähnlichen Charakter. Eine elektromagnetische Welle hat einen Wellen-Charakter, da für Wellen folgende typische Phänomene auftreten: Reflektion, Beugung, Brechung und Interferenz.

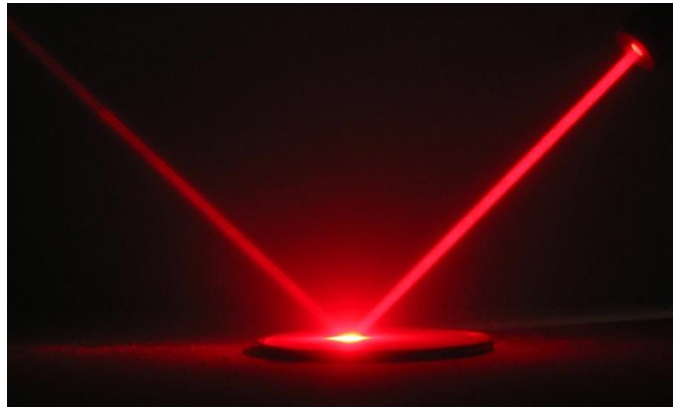


Hier sieht man das typische Bild einer elektromagnetischen Welle. Hierbei liegt die Ausbreitungsrichtung auf der x-Achse und breitet sich nach rechts aus. Die nach der z-Achse gerichteten roten Auslenkungen stellen die Auslenkungen des magnetischen Feldes dar und die nach der y-Achse gerichteten blauen Auslenkungen, die des elektrischen Feldes. Dabei geben die entsprechenden Feldvektoren die Auslenkungsrichtung und Stärke des jeweiligen Feldes an. Der angedeutete Abstand entspricht der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle, wobei das Lambda immer für diese Wellenlänge steht.

## 2.1 WELLENCHARAKTER-PHÄNOMENE

### 2.1.1 REFLEKTION

Bei der Reflektion, werden die elektromagnetischen Wellen an glatten Oberflächen in dem gleichen Winkel wie sie auf der Oberfläche auftreffen, auch wieder abgestrahlt. Die auftreffenden elektromagnetischen Wellen werden nebenbei an diesen Oberflächen immer zum anderen Teil absorbiert. Stark reflektierende Oberflächen, wie zum Beispiel beim Spiegel, sind dabei möglichst glatt gehalten und absorbieren wenig. Beispielsweise wird beim sichtbaren Licht, wenn zum Beispiel eine rote Oberfläche unter weißem Licht (worin sich alle Farben des Lichtspektrums befinden) steht, fast nur die roten Lichtstrahlen reflektiert und die Lichtstrahlen anderer Farbe absorbiert (wobei die Energie der absorbierten Lichtstrahlen größtenteils in Wärme umgewandelt wird). Bei schwarzen Oberflächen werden so sehr viele Lichtstrahlen aller Farben des eintreffenden Lichtes absorbiert.

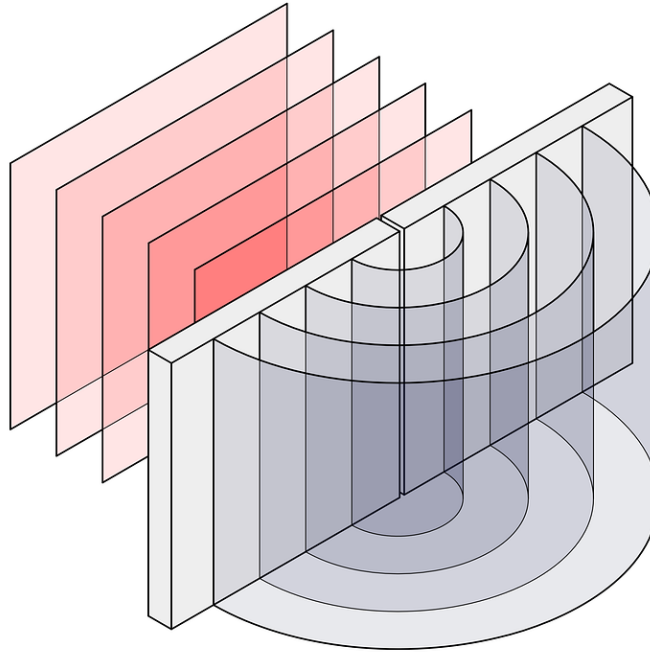


Reflektion eines roten Laserstrahls an einem Spiegel.

### 2.1.2 BEUGUNG

Die Beugung von elektromagnetischen Wellen entsteht, wenn ein nicht durchlässiges Hindernis, zum Beispiel eine dünne Wand, teilweise in oder an einen Strahl aus elektromagnetischen Wellen hineinreicht und diesen anstößt. Das kann allerdings auch ein Block, an dem die Strahlen entlang einer Seite verlaufen, sein. Die gerade verlaufenden Strahlen, welche unmittelbar an der Wand vorbei wandern, werden dann hinter der Wand mehr oder weniger aus ihren geraden Bahnen vom Strahl nach der Seite an der das Hindernis stand, abgelenkt. Beim Block würde das hinter der Ecke entstehen. Bei einem kreisförmigem Loch in dem Hindernis, dessen Durchmesser kleiner als die Wellenlänge der gerade auf das Loch auftreffenden elektromagnetischen Strahlen ist, werden die Strahlen hinter dem Loch in einer Halbkugel in absolut alle Richtungen gestreut. Bei einem Schlitz in der Wand, dessen Breite kleiner ist als die Wellenlänge der gerade auf den Schlitz auftreffenden elektromagnetischen Strahlen, werden die Strahlen hinter dem Schlitz in einer Halbzylinderförmigen Ausbreitung (dessen Höhenorientierung der Orientierung der Längsachse des Schlitzes entspricht) gestreut.

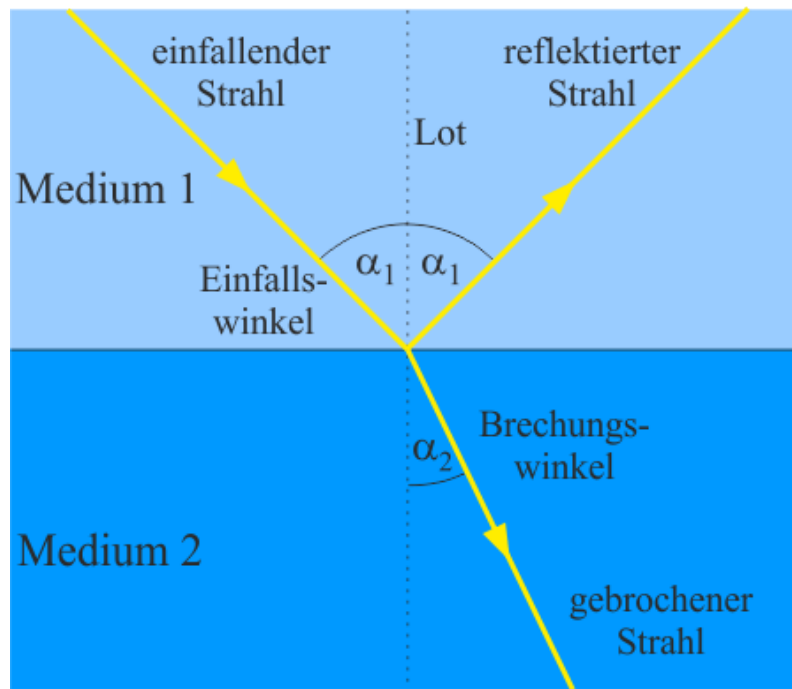




Hier ist das letzte Beispiel mit dem Schlitz im Hindernis grafisch dargestellt. So treffen die elektromagnetischen Wellen gerade auf den Schlitz, wobei die Flächen die wandernden Amplituden der vielen Strahlen darstellen. Man erkennt gut die zylindrische Streuung durch die Beugung des Lichtes.

### 2.1.3 BRECHUNG

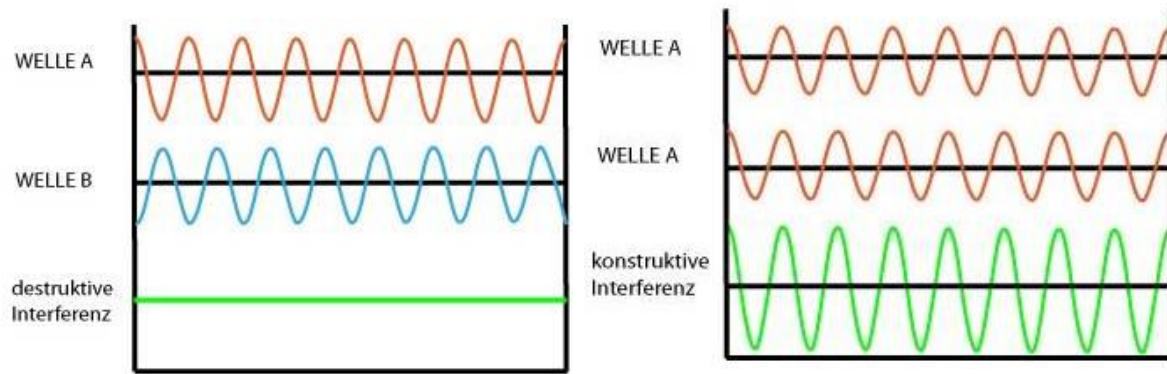
Die Brechung von Wellen tritt bei der Grenze zwischen zwei durchlässigen Materien verschiedener Dichte (bei Licht immer optischen Dichte) auf. Dabei werden die elektromagnetischen Strahlen (zum Beispiel: Licht) beim Durchlaufen der Grenze alle in eine andere Richtung abgelenkt. Wenn Lichtstrahlen zum Beispiel in einem beliebigen Winkel von der Luft mit einer geringeren optischen Dichte auf das Meer mit einer höheren optischen Dichte auftreffen, werden diese teilweise reflektiert und verlaufen zum anderen Teil etwas abgelenkt zu der Senkrechten hin, welche senkrecht zu der Grenze zwischen Luft und Wasser (in diesem Beispiel genau vertikal) ausgerichtet ist. Beim Übergang von einem dichteren in eine weniger dichtere Materie passiert genau das Gegenteil. Hierbei wird der Lichtstrahl beim Übergang in die zweite Materie auch teilweise reflektiert und teilweise von der Senkrechten zu der Grenze zwischen den beiden Materien weg abgelenkt. Wenn beim Übergang von einer dichteren in eine weniger dichtere Materie der Lichtaufreffwinkel zwischen dem Lichtstrahl und der Grenze der beiden Materien klein genug ist, wird der Strahl im zweiten Medium so gebrochen, dass er genau an der Grenzfläche entlang verläuft. Wird dieser Winkel noch kleiner, dann wird der Lichtstrahl komplett reflektiert und tritt nicht in das weniger dichtere Medium ein.



Dieses Bild repräsentiert die Brechung des Sonnenlichtes, beim Übergang von der Luft (Medium 1) zum Wasser (Medium 2). Das Lot stellt hier die imaginäre Senkrechte zur Grenze zwischen Luft und dem Wasser dar, zu der der gebrochene Strahl hin gebrochen wird.

#### 2.1.4 INTERFERENZ

Bei der Interferenz überlagern sich zwei oder mehrere Wellen. Treffen zwei elektromagnetische Wellen in einer Richtung auf einer Linie genau aufeinander, so interferieren diese beiden Wellen. Dabei addieren sich die jeweiligen positiven und die negativen Amplituden der beiden Wellen an dem Ort an dem sie aufeinandertreffen und resultieren eine einzige Welle mit veränderten Amplituden. Wenn zum Beispiel zwei Wellen gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude genau in Phase aufeinandertreffen (wenn also die positiven Auslenkungen der einen Welle genau auf die positiven Auslenkungen der zweiten Welle aufeinandertreffen), erhält die daraus resultierende Welle doppelt so große Auslenkungen in beide Richtungen. Dieser Fall der perfekten Überlagerung wird konstruktive Interferenz genannt. Wenn wir das exakt gleiche Beispiel nehmen mit dem Unterschied, dass die zweite aufeinandertreffende Welle um eine halbe Amplitude verschoben zu der ersten Welle ist, so, dass die negativen Auslenkungen der einen Welle auf die positiven Auslenkungen der anderen Welle auftreffen und die positiven Auslenkungen der einen Welle auf die negativen Auslenkungen der anderen Welle auftreffen, dann addieren sich alle Auslenkungen auf null und alle Auslenkungen heben sich auf, die Welle erloschen. Dieser Fall heißt dann destruktive Interferenz. Natürlich können die zwei oder mehrere aufeinandertreffende Wellen auch um jeden beliebigen Wert zwischen einer ganzen oder halben Amplitude zueinander verschoben sein, und eine andere Welle resultieren mit vergrößerten oder verkleinerten Auslenkungen, das Prinzip der Addition der Ausgangswellen bleibt jedoch das gleiche. Beim frontalen Aufeinandertreffen von zwei oder mehreren Wellen können diese auch für einen Moment eine einzige Welle bilden, bis diese dann wieder auseinander driften. Dabei müssen die Amplitude und die Wellenlänge der aufeinandertreffenden Wellen allerdings gleich sein.



Im linken Bild wird die perfekte destruktive Interferenz beschrieben. So sind die beiden Ausgangswellen (Welle A und B) hier um genau eine halbe Wellenlänge zueinander verschoben und löschen sich aus. So ist die resultierende Welle flach (grüne Linie). Rechts ist die perfekte Überlagerung von zwei phasengleichen Wellen (identische Wellen) dargestellt. So besitzt die daraus folgende Welle doppelt so hohe Amplituden.

Auch wenn elektromagnetische Wellen einen Wellencharakter besitzen, benötigen sie nicht, wie zum Beispiel die Schallwellen, ein Medium, in dem sie sich ausbreiten können. Elektromagnetische Wellen können sich, je nach welcher Wellenlänge, in Materie (gasförmig, flüssig oder fest) fortbewegen und auch immer im Vakuum. Man muss dabei erwähnen, dass elektromagnetische Wellen sich nur im Vakuum mit der höchst möglichen und konstanten, also unveränderlichen Geschwindigkeit fortbewegen: mit der Lichtgeschwindigkeit (299.792.458 m/s). Durch Medien (Materie) bewegen sich elektromagnetische Wellen etwas langsamer fort, aber immer noch sehr schnell. Die genaue Geschwindigkeit hängt von vielen Faktoren ab.

Elektromagnetische Wellen besitzen wie gesagt gleichzeitig zum Wellencharakter einen Teilchencharakter. Hierbei werden die elektromagnetischen Wellen mit sehr vielen winzigen Quantenteilchen dargestellt, die der Welle des elektromagnetischen Feldes nach strömen und so die elektromagnetische Welle selber bilden. Diese Teilchen (Quantenteilchen) werden Photonen genannt. Diese haben keine elektrische Ladung, sind sehr klein, haben keine Masse und wiegen somit auch nichts. Die Photonen transportieren eine feste Quantität an Energie. Die Menge dieser Energie hängt allerdings von der Frequenz der elektromagnetischen Welle ab. Bei Erhöhung der Frequenz, erhöht sich somit auch die Energie der einzelnen Photonen. Allerdings erhöht sich die Energie der einzelnen Photonen nicht proportional zur Frequenz. Dieses Teilchenmodell kommt zur Erklärung von Phänomenen in Zusammenhang mit elektromagnetischen Wellen zum Tragen, wo der Teilchencharakter der elektromagnetischen Welle eine wichtige Rolle spielt und das Wellenmodell irrelevant ist, wie zum Beispiel bei der Entstehung von Laserlicht im Laser. Ein paar Beispiele für teilchentypische Phänomene, welche auch auf die elektromagnetischen Wellen zutreffen sind der Photoeffekt und der elastische Stoß mit Elektronen.

## 2.2 TEILCHENCHARAKTER-PHÄNOMENE

### 2.2.1 PHOTOEFFEKT

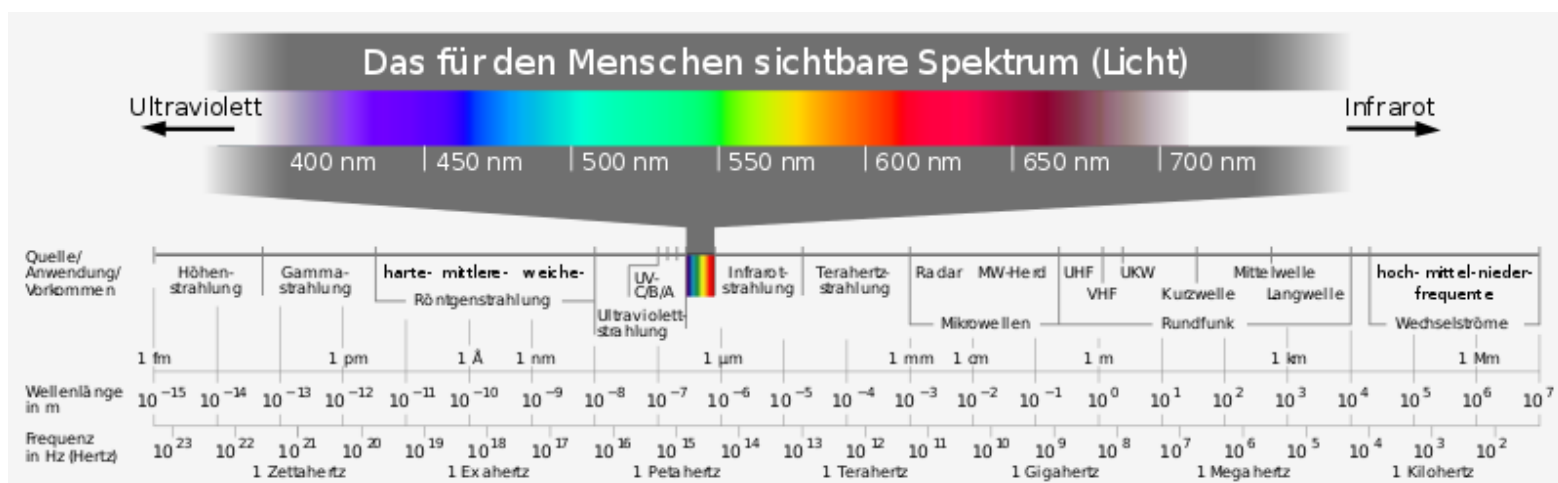
Beim Photoeffekt treffen elektromagnetische Strahlen auf eine Oberfläche und lösen bei den Atomen des Materials Elektronen aus deren Elektronenschale, da die um das Atom kreisenden Elektronen ein Photon absorbieren, also aufnehmen. Mit der aufgenommenen Energie des Photons können diese Elektronen ihre elektromagnetische Bindung an den Atomkern überwinden und ihre Bahnen verlassen. Die Elektronen werden also aus dem Material von den Photonen herausgelöst. Damit diese Elektronen herausgelöst werden müssen die auftreffenden Photonen allerdings genug Energie besitzen, also mindestens die Energie haben wie die Bindungsenergie zwischen dem Atomkern und dem herauszulösenden Elektron. Das heißt, dass die Frequenz (Wellenlänge) der auftreffenden elektromagnetischen Wellen dementsprechend hoch genug sein muss. Da die Bindungsenergie (Elektronegativität) zwischen Atomkern und der Valenzelektronen von Element zu Element variiert, ist die Minimumfrequenz zum Photoeffekt bei jedem Element mehr oder weniger anders.

### 2.2.2 ELASTISCHER STOß

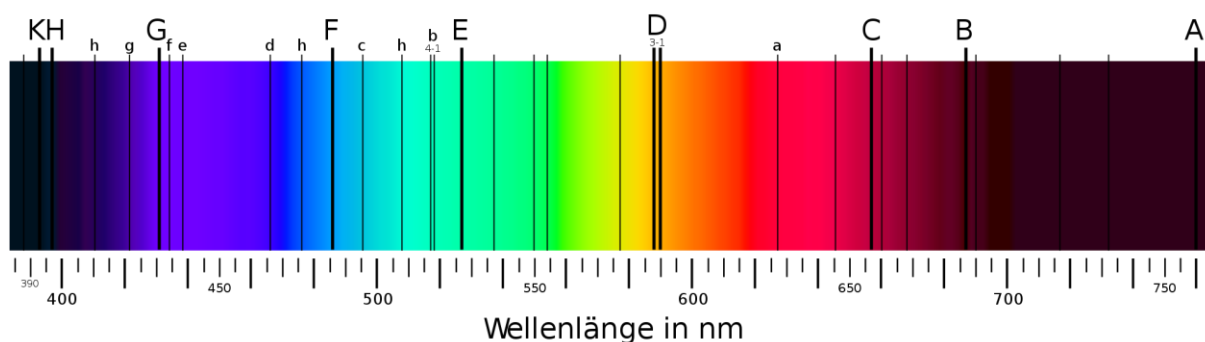
Der elastische Stoß beschreibt den Zusammenprall eines Photons auf ein stehendes Elektron. Dabei besitzt das Photon eine bestimmte Frequenz. Wenn das Photon auf das stehende Elektron aufprallt, erfährt das Elektron eine Beschleunigung. Beim Zusammenstoß wird das Photon je nach dem in einem mehr oder weniger großen Winkel aus seiner Bahn abgelenkt. Aus diesem Winkel kann man übrigens die Bahn berechnen, der das Elektron folgt. Das ganze läuft so ab wie wenn die erste Billardkugel auf eine zweite stehende Billardkugel auftrifft. Dabei wird die erste Billardkugel beim Aufprall allerdings abgebremst, da diese verlorene kinetische Energie (Bewegungsenergie) auf die zweite Billardkugel übertragen wurde. Beim Photon ist das allerdings etwas anders. Da auch das Photon Energie an das Elektron abgegeben hat, müsste dieses sich nun eigentlich langsamer fortbewegen. Da die Lichtgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle allerdings eine Konstante und somit unveränderlich ist und Energie nicht hergestellt werden kann, hat sich die Wellenlänge vergrößert, beziehungsweise Frequenz verkleinert. Dabei hat das Photon an Energie verloren.

Ein sehr wichtiger Aspekt zu den elektromagnetischen Wellen ist die Wellenlänge oder Frequenz. Bei Erhöhen der Frequenz, verringert sich übrigens die Wellenlänge. Die Wellenlänge von elektromagnetischen Wellen reicht von 10.000.000 ( $10^7$ ) Metern bis 0,000.000.000.000.001 ( $10^{-15}$ ) Metern oder von 100 Herz bis  $10^{23}$  Herz. Dabei bildet sich ein sehr großes Spektrum von elektromagnetischer Strahlung, welche sich in folgende Bereiche unterteilen lässt (von niederfrequent bis hochfrequent aufgezählt): Wechselstromstrahlung (was durch wechselnde elektrische Ströme ausgelöst werden kann), Radiowellenstrahlung, Mikrowellenstrahlung, Terahertzstrahlung, Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung), das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichtes (380 Nanometer bis 780 Nanometer), Ultraviolettstrahlung, Röntgenstrahlung, Gammastrahlung (neben Alpha- und Beta- Strahlung Teil der Atomstrahlung) und kosmische Strahlung (Höhenstrahlung). Ab der Ultraviolettstrahlung (miteinbegriffen) ist Radioaktivität möglich. Dabei haben Photonen genug Energie um Moleküle aufzulösen und zu zerstören. Wie man auf folgendem Bild erkennen kann macht das sichtbare Lichtspektrum mit all deren Farben nur einen sehr kleinen Teil des gesamten Spektrums der elektromagnetischen Strahlung aus.





Dieses Bild zeigt das gesamte Frequenzband der elektromagnetischen Wellen, wobei die einzelnen Frequenz-Bereiche der elektromagnetischen Strahlen eingetragen sind und sich unten Angaben zur entsprechenden Wellenlänge, beziehungsweise Frequenz befinden.



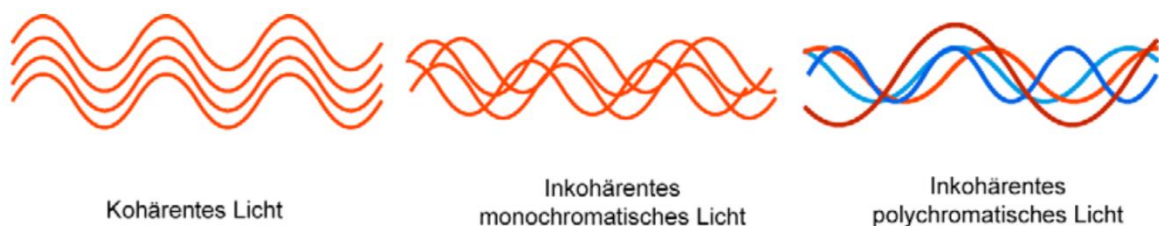
Hier ist das für den Menschen sichtbare Spektrum mit deren Farben genauer abgebildet.

Für den Laser sind allerdings nur die Infrarotstrahlung, das sichtbare Lichtspektrum und die Ultraviolettstrahlung wichtig, da Laser nur in diesem Frequenzbereich elektromagnetische Wellen emittieren.

### 2.3 LASERLICHT UND POLARISIERUNG

Laserlicht ist allerdings nicht vergleichbar mit natürlichem Licht oder mit dem Licht einer Glühlampe, einer Leuchtstoffröhre, einer LED, ... und kommt auch so nicht in der natürlichen Umwelt vor, obwohl sich Laserlicht im gleichen elektromagnetischen Wellen-Spektrumsbereich befinden kann, wie alle anderen genannten Lichtquellen auch. Also muss es andere Unterschiede geben. Laser emittieren einen extrem gebündelten und gerade verlaufenden Lichtstrahl, bei dem praktisch keine Streuung stattfindet (Laser müssen allerdings nicht immer unbedingt einen derart gebündelten Lichtstrahl ausstrahlen). Dabei ist eine äußerst hohe Energiedichte im Laserstrahl enthalten. So ist es möglich, dass verschiedene Laser eine Fläche so groß wie ein Vorgarten eines Schlosses von der Erde aus auf dem Mond erleuchten könnten, was einer Distanz von 384.400 Kilometern entspricht. Bei

herkömmlichen Lichtquellen, werden die Lichtstrahlen in einem bestimmten Winkel (je nach Lampentyp) mehr oder weniger in absolut alle Richtungen verstreut. Bei einer Glühlampe sind die einzelnen Lichtstrahlen unter anderem nicht endlos (solange die Glühlampe eingeschaltet ist) und haben ganz unterschiedliche Längen und Wellenlängen. Beim Laser sind die einzelnen produzierten Lichtstrahlen (solange der Laser angeschaltet ist) endlos und ununterbrochen. Das Laserlicht ist, anders wie bei herkömmlichem Licht, monochromatisch. Das bedeutet, dass der Laserlichtstrahl aus nur einer einzigen nicht gemischten Farbe besteht, welche auch für den Menschen unsichtbar sein kann. Genauer betrachtet haben die unzähligen parallel verlaufenden elektromagnetischen Wellen alle fast die absolut gleiche Wellenlänge. Nebenbei sind die elektromagnetischen Wellen kohärent, was besagt, dass diese parallel verlaufenden Wellen in Phase zueinander schwingen, so dass sich die Wellenberge und Wellentäler aller Lichtstrahlen genau übereinander, beziehungsweise nebeneinander befinden und die einzelnen elektromagnetischen Wellen nicht zueinander verschoben sind. So bildet sich ein absolut gleichmäßiges Wellenmuster. Ein weiteres charakteristisches Merkmal des Laserlichtes ist die gleichmäßige Polarisierung der ausgesendeten elektromagnetischen Wellen, welche in der Regel linear ist. Die Polarisation von Licht spielt bei Lasern eine äußerst wichtige Rolle.

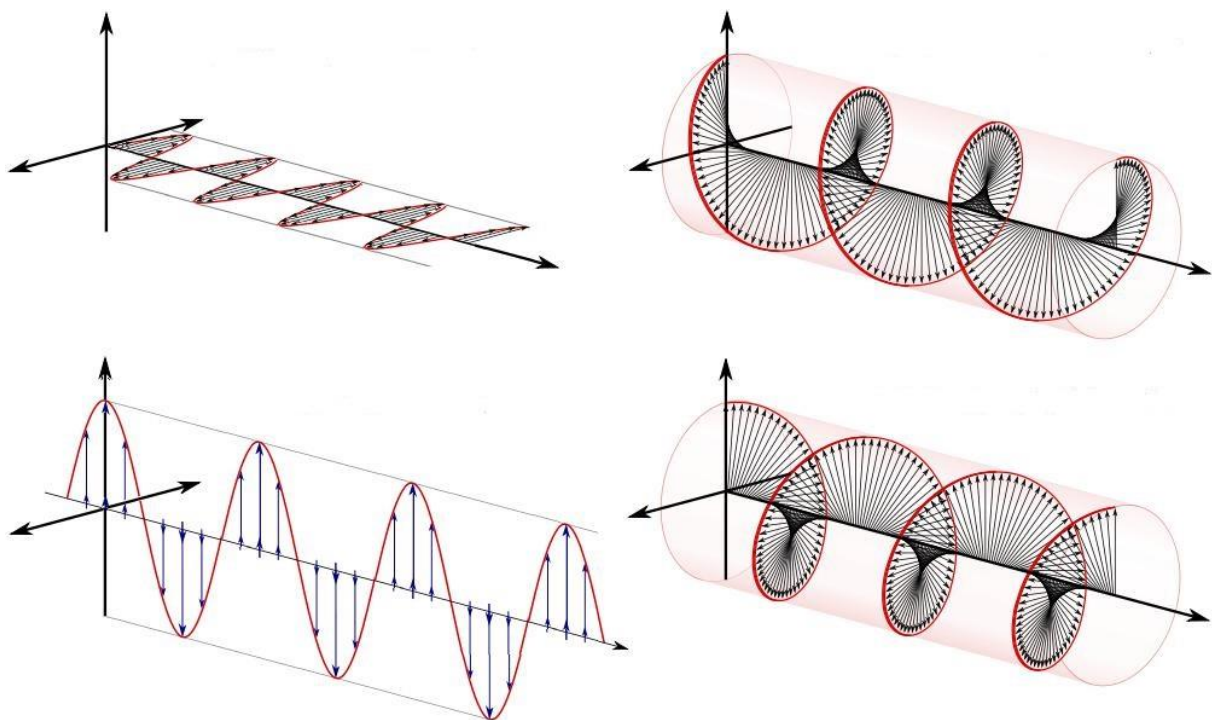


Rechts ist elektromagnetische Strahlung abgebildet, welche den normalen Lichtstrahlen entspricht. In der Mitte ist einfarbiges, monochromatisches Licht dargestellt. Die Strahlen des linken Lichtes schwingen in Phase zu einander und sind kohärent und somit auch monochromatisch.

### 2.3.1 POLASIERUNG

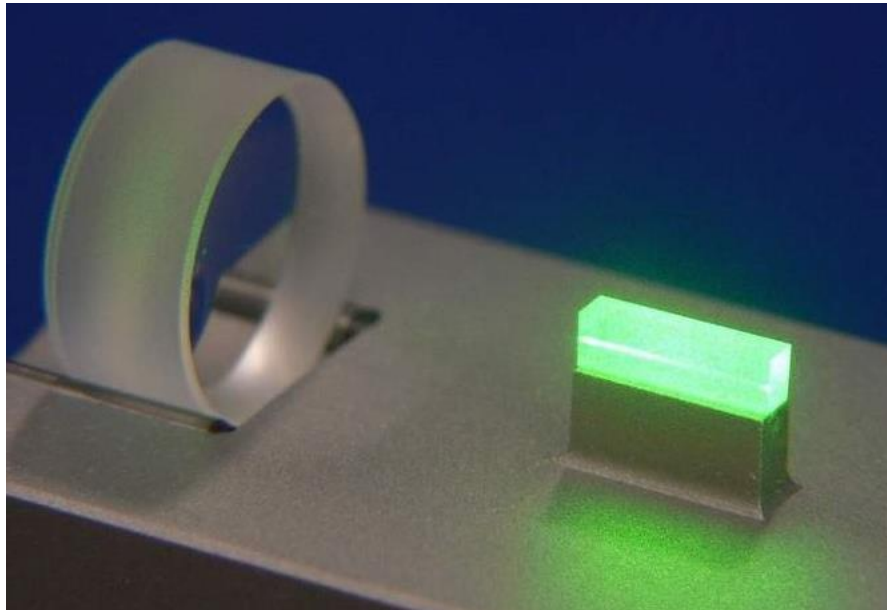
Die Polarisierung einer elektromagnetischen Welle, welche aus einer elektrischen- und magnetischen- Welle besteht, beschreibt die Orientierung der Welle des entweder elektrischen- oder des magnetischen- Feldes auf ihrer Ausbreitungsrichtung (Nulllinie). Normalerweise wird nur die Welle des elektrischen Feldes betrachtet. Die Welle des elektrischen Feldes kann im Querschnitt in einem beliebigen Winkel zur horizontalen-, beziehungsweise vertikalen- Achse stehen. Gewöhnliches Licht ist ohne weitere Polarisationsfilter und abgesehen von Reflexionen und Brechungen unpolarisiert (da dort je nach Auftreffwinkel elektromagnetische Strahlen nur mit der gleichen Polarisation zurückgeworfen, beziehungsweise durchgelassen werden können). Hierbei variiert dieser Winkel zwischen den unterschiedlichen elektromagnetischen Wellen. Die elektromagnetischen Wellen sind also auf ihrer Nulllinie zueinander verdreht. Bei linear polarisierten Lichtstrahlen ist dieser Winkel bei den einzelnen elektromagnetischen Wellen immer gleich, das bedeutet, dass die elektromagnetischen Wellen des Lichtstrahls nicht zueinander verdreht sind. Dies trifft auf Laserlicht zu, wenn dieses linear polarisiert ist. Zusammengefasst, sind die Laserstrahlen in einem Laserstrahl in allen Hinsichten exakte Kopien. In bestimmten Fällen, wie zum Beispiel bei

Lasern, die zum zuschneiden von Metall (um saubere Schnittkanten zu erhalten) genutzt werden, sind zirkular polarisierte elektromagnetische Wellen notwendig. Dabei breiten sich die Wellen des elektrischen Feldes in Form einer Spirale aus, wobei die Ausbreitungslinie der elektromagnetischen Welle in dem Zentrum der Spirale liegt. Dies wird möglich, in speziellen doppelbrechenden Kristallen ( $\lambda/4$ -Plättchen), bei dem ein eintreffender linear polarisierter Lichtstrahl in zwei senkrecht zueinanderstehenden, linear polarisierten Lichtstrahlen aufgeteilt wird, welche sich überlagern. Das bedeutet, dass die zwei Wellen des elektrischen Feldes von den zwei überlagerten linear polarisierten Lichtstrahlen im Querschnitt ein genau senkrecht Kreuz bilden. Parallel dazu wurden diese zwei Wellen des elektrischen Feldes verschoben und verlaufen nicht mehr in Phase. Die daraus resultierende Wellenlinie des elektrischen Feldes ist zirkular und bildet eine Spirale. Je nach Verzögerung (Verschub) der beiden Wellen, was mit der Verdrehung des auf das  $\lambda/4$ -Plättchen auftreffenden linear polarisierten Lichtes gesteuert werden kann, bildet die resultierende Spirale im Querschnitt entweder eine Ellipse oder einen Kreis. Nebenbei wird noch die Rotationsrichtung der zirkulären polarisierten elektromagnetischen Welle in Bezug auf die Ausbreitungsachse unterschieden.



Links sind zwei linear polarisierte elektromagnetische Wellen abgebildet, wobei die obere Welle horizontal und die untere vertikal polarisiert ist. Bei dem Bild ist natürlich nur die elektrische Welle der elektromagnetischen Welle abgebildet. Rechts sind hingegen zirkular polarisierte Wellen dargestellt. Hierbei ist die obere Welle rechts (in Bezug zur Ausbreitungsrichtung) zirkular polarisiert und die untere links zirkular polarisiert.

Es gibt auch spezielle doppelbrechende Kristalle, mit denen es möglich ist die Frequenz der Laserstrahlung einer festen Frequenz unter bestimmten Bedingungen zu verdoppeln. Dies wird auch in Zusammenhang mit Lasern verwendet, so dass ein im Infrarotbereich emittierender Laser durch diesen Kristall Laserstrahlung der halben Wellenlänge, nämlich grünes Licht erzeugen kann.



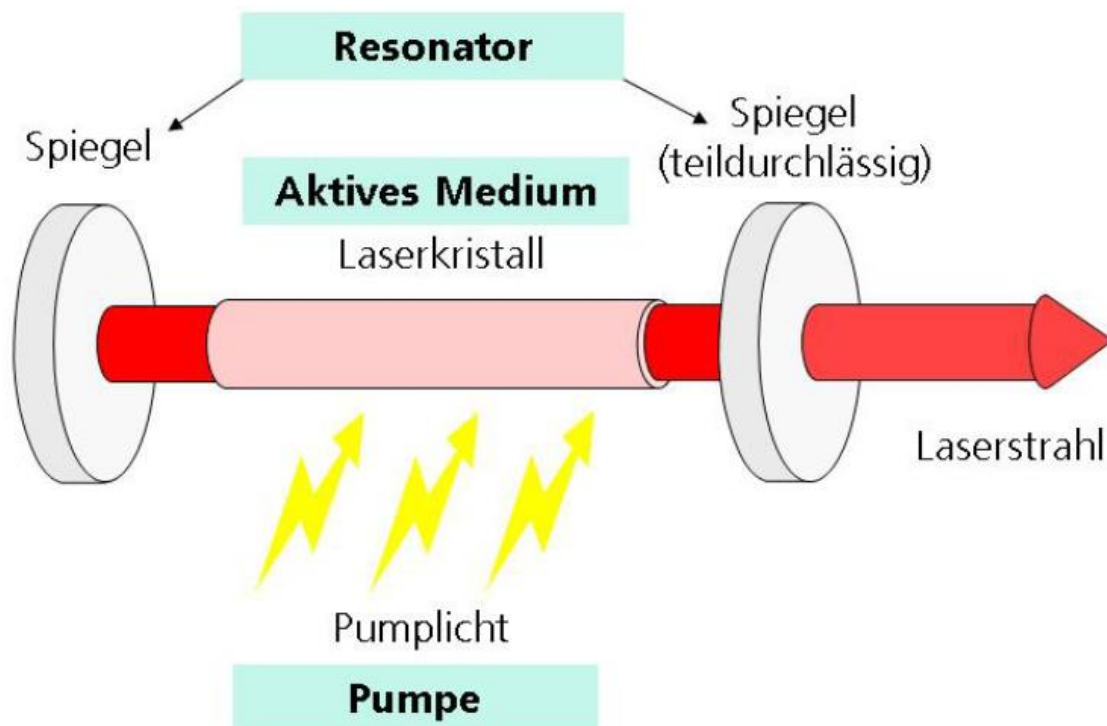
Praktische Umsetzung eines Frequenzverdoppelnden Kristalls in einem Lasersystem. Hier wird die infrarote Laserstrahlung eines Nd:YAG-Lasers in grüne Laserstrahlung umgewandelt. Leider kann man hier auf dem Bild den Laserstrahl nicht sehen.



## 3 LASER

### 3.1 GRUNDAUFBAU EINES LASERS

Ein typischer Laser ist grundsätzlich aus drei Hauptelementen aufgebaut: der Energiepumpe, dem Lasermedium und dem Laserresonator. Die Energiepumpe ist außerhalb des Lasermediums angebracht oder direkt in dem Lasermedium integriert und versorgt das Lasermedium mit Energie. Das Lasermedium ist das Herz des Lasers und produziert das Laserlicht in Zusammenarbeit mit dem Laserresonator durch stimulierte Emission. Zwei Spiegel sind als optischer Resonator an den beiden Enden des Lasers befestigt und verstärken die Laserlichtproduktion. Dabei ist ein Spiegel teildurchlässig. An ihm tritt der finale Laserstrahl aus.



Dieses vereinfachte Bild zeigt den Grundaufbau aller Laser. Hierbei führt die Energiepumpe (nicht abgebildet), welche hier als optische Pumpe ausgeführt ist, Energie in das aktive Medium ein. Das Lasermedium ist in diesem Fall fest und stabförmig ausgeführt. Dieses produziert Laserlicht, welches an den beiden Endspiegeln zurückreflektiert wird und an dem rechten Spiegel teilweise ausgekoppelt wird. Bei den unterschiedlichen Laserarten und Ausführungen unterscheiden sich lediglich die verwandten Arten und Ausführungen der einzelnen Hauptkomponenten. Dieses Grundprinzip teilen allerdings alle Laser.

### *3.1.1 LASERMEDIUM UND UNTERTEILUNGEN DER LASER*

Das Lasermedium von Lasern kann in verschiedenen Aggregatzuständen vorkommen. Alle Laser werden grob nach diesem Aggregatzustand eingeordnet. Ist das Lasermedium gasförmig, so ist dieser ein Gaslaser. Bei festem Aggregatzustand des Lasermediums, gehört der Laser zu den Festkörperlaser. Seltener ist das Lasermedium in einem flüssigen Aggregatzustand. Wenn dies der Fall ist, spricht man von einem Farbstofflaser. Nebenbei gibt es noch den Freier-Elektronenlaser, welcher zwar auch einen Laserstrahl emittiert, jedoch zur Erzeugung dieses Laserstrahls ein komplett anderes Prinzip verwendet und in dem Sinne nicht wirklich ein Laser ist, da keine stimulierte Emission in ihm stattfindet.

## *3.2 DAS LASERMEDIUM*

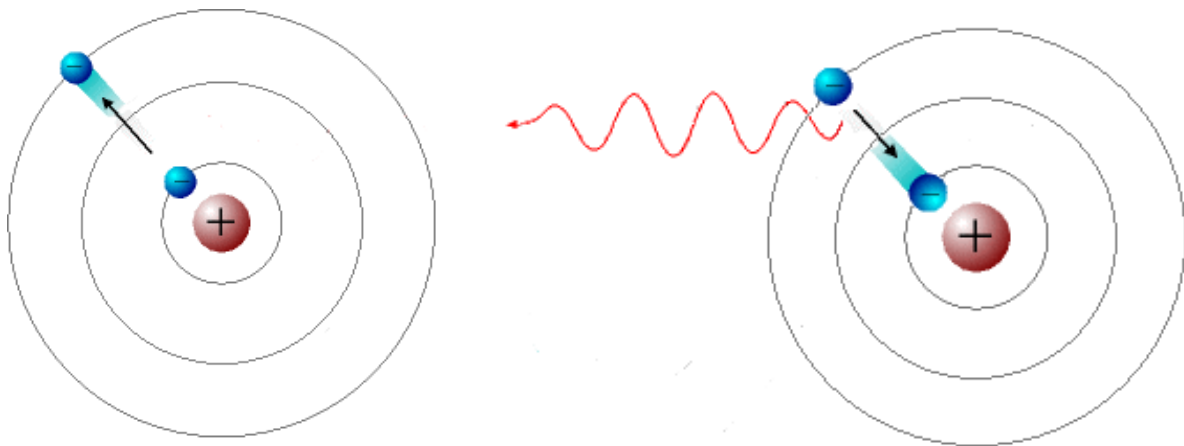
Bei Gaslasern befindet sich das gasförmige Lasermedium in einer luftdicht verschlossenen Röhre. Diese Röhre besteht dabei oft aus Glas. Das Lasermedium selber ist ein Gasgemisch aus in der Regel mehreren Gasen. Davon ist ein Gas der laseraktive Stoff in dem die stimulierte Emission stattfindet. Das andere Gas respektiv Gase dienen meist dem Pumpvorgang und geben die Pumpenergie indirekt an den laseraktiven Stoff ab. Die zusätzlichen Gase können allerdings auch zur Wärmeevakuierung dienen. Bei Farbstofflasern befindet sich das flüssige Lasermedium auch in einem geschlossenen, meist aus Glas bestehenden Behälter. Hierbei schwimmt der laseraktive Stoff in einem durchsichtigen Lösungsmittel. Feststofflaser bestehen aus einem festen, durchsichtigen Kristall oder Glas, dem sogenannten Wirtskristall. Dieser ist innen mit dem entsprechenden laseraktiven Stoff dotiert (angereichert).

### *3.2.1 ERZEUGUNG VON LASERLICHT DURCH STIMULIERTE EMISSION*

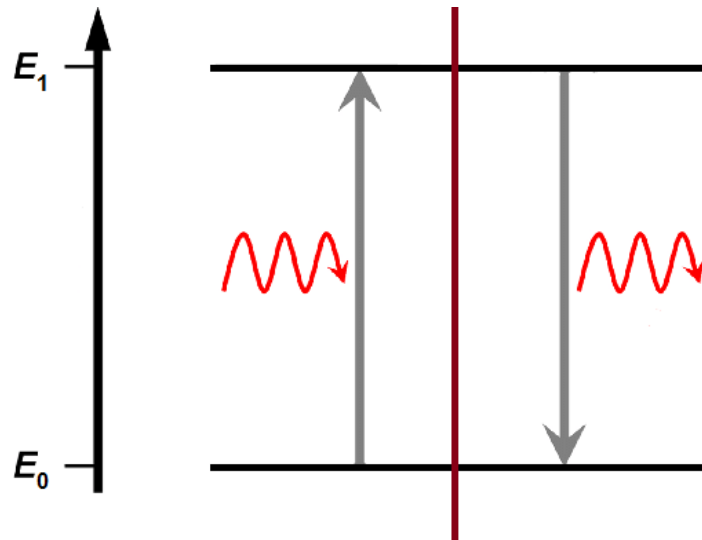
#### *3.2.1.1 SPONTANE EMISSION*

Zum Verstehen der stimulierten Emission des Laserlichts, muss man erst einen genauen Blick in die Erzeugung von Licht in üblichen Lichtquellen werfen (spontane Emission). Wenn zum Beispiel eine Eisenbramme in einem Stahlwerk erhitzt wird, fängt diese mit zunehmender Temperatur im Ofen an zu glühen. Dabei werden den Eisenatomen Energie in Form von Wärme zugeführt, während sich das Atom im Grundzustand befindet. Alle Elektronen befinden sich also auf ihren normalen Elektronenschalen. Die zugeführte Energie absorbieren (nehmen) die Elektronen in dem Eisen (auf). Nun besitzen manche Elektronen genug Energie um von dem Grundzustand in den angeregten Zustand zu springen. Dabei wechselt ein Elektron von seiner Elektronenschale in eine äußere hochenergetischere Elektronenschale. Es können übrigens auch mehrere Elektronen in einem Atom angeregt werden. Da die angeregten Elektronen immer versuchen sich in dem Grundzustand zu befinden, fallen die angeregten Elektronen nach einer sehr kurzen Zeit, welche etwa  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  Sekunden beträgt, die sich aber je nach Material unterscheidet, wieder in ihren Grundzustand zurück und befinden sich dann auf ihrer Ausgangselektronenschale. Dies kann je nach Stoff über ein oder mehrere Zwischenniveau(s) erfolgen, wobei die Elektronen auch auf denen Zwischenniveaus eine gewisse Zeit verbringen. Da das Elektron beim Zurückfallen Energie verlieren muss und Energie nicht einfach so verschwinden kann, emittiert das zurückfallende Elektron ein Photon, also elektromagnetische Strahlung. Übergänge auf Zwischenniveaus, können allerdings auch strahlenlos

erfolgen. Desto größer die Differenz zwischen dem angeregten Zustand und dem Grundzustand ist, desto mehr Energie muss ein Elektron aufnehmen um auf den angeregten Zustand angehoben zu werden und desto größer ist die Energie des abgegebenen Photons. Die Energie des Photons setzt sich aus deren Frequenz, multipliziert mit dem Planckschen Wirkungsquantum (eine Verhältniskonstante). Also hat Licht mit Photonen mit einer höheren Energie eine höhere Frequenz. So strahlt ein erhitztes Eisenstück unter etwa 550° C Infrarotstrahlung ab, was für uns als Wärmestrahlung wahrnehmbar ist. Erhitzt man das Eisenstück jedoch weiter und führt somit noch mehr Energie den Eisenatomen zu, so dass diese auf ein noch höheres Niveau gehoben werden, so wird zusätzlich teilweise elektromagnetischer Strahlung höherer Frequenz abgestrahlt und fängt das Eisenstück an rötlich zu glühen. Bei noch mehr Energiezuführung, werden immer mehr zusätzliche Photonen teilweise noch höherer Frequenz und im sichtbaren Bereich abgegeben. Die Farbe des Glühens kann sogar bis ins bläuliche und weiter reichen. Bei dem Wolframfaden der Glühbirne werden nahezu alle möglichen Frequenzen im sichtbaren Bereich emittiert, so dass die Glühbirne weißes Licht emittiert. Allerdings umfasst das resultierende Licht allmögliche Wellenlängen und besteht aus unpolarisierten, unkohärenten, unterschiedlich langen und unterbrochenen elektromagnetischen Wellen. Dies liegt daran, dass die Elektronen nicht alle auf das gleiche Energieniveau angeregt werden und so unterschiedliche Frequenzen abstrahlen. Außerdem ist die Aussendung und Richtung des wandernden Photons rein zufällig. Hierbei spricht man daher von spontaner Emission.



Hier sieht man eine spontane Emission auf der Atomebene. Im linken Bild wird ein Elektron durch Energiezufuhr, was durch verschiedene Möglichkeiten, auch durch Absorption eines anderen Photons passieren kann, auf eine äußere Bahn angehoben. Im anderen Bild, fällt dieses Elektron über eine oder mehrere Ebenen wieder auf seine Ausgangs-Elektronenschale zurück und gibt dabei ein Photon einer bestimmten Frequenz ab. Nun befindet sich das Atom wieder im Grundzustand.



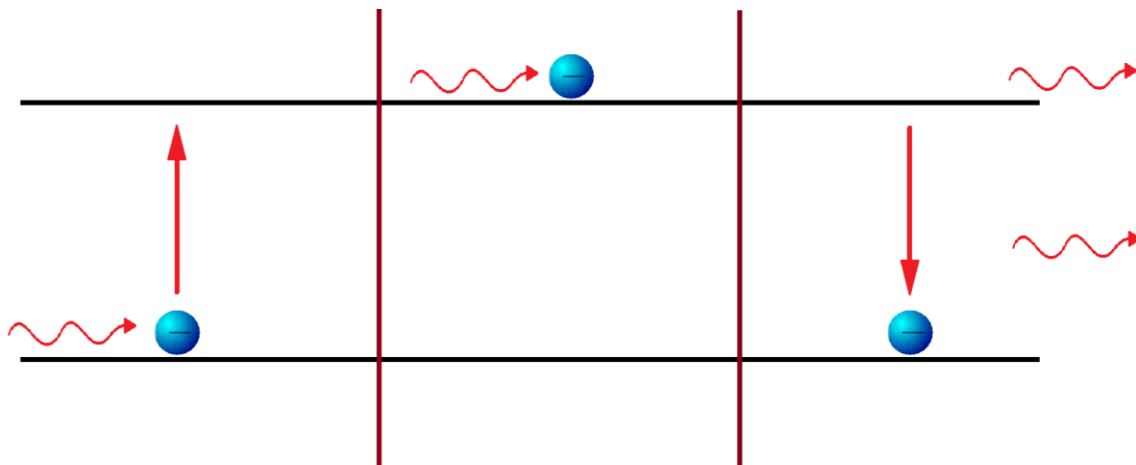
Solche Übergänge werden im Fachbereich wie in diesem Bild in einem Schema abstrakter dargestellt. So wird hier das Elektron, auf der linken Seite des Bildes (hier durch eine elektromagnetische Welle) angeregt. Dabei stellen die schwarzen horizontalen Ebenen, die Elektronenschalen (Bahnen) dar. So ist  $E_0$  der Grundzustand und  $E_1$  der angeregte Zustand (welcher von der Anregungsenergie abhängt). Auch hier gibt das zurückfallende Elektron ein Photon ab.

### 3.2.1.2 STIMULIERTE EMISSION UND FUNKTIONSWEISE DES LASERS

Die stimulierte (erzwungene) Emission verhält sich im Laser durch eine kontrollierte Energiezufuhr und einem geeigneten laseraktiven Stoff dabei anders. Der laseraktive Stoff, welcher sich im Lasermedium (unabhängig von dessen Aggregatzustand) befindet und ein Bestandteil davon bildet, muss wie bei der spontanen Emission auch zunächst mit Energie bereichert werden. Dies geschieht über die sogenannte Pumpe, welche sich im (bei Gaslasern) oder außerhalb vom Lasermedium befinden kann. Das Lasermedium wird meist durch Stöße mit anderen Elektronen und Teilchen gepumpt. Es wird jedoch auch sehr oft optisch (mithilfe von Licht), direkt elektrisch oder selten thermisch (zum Beispiel durch exothermische chemische Reaktionen) gepumpt. Das Prinzip der stimulierten Emission beruht darauf, dass ein bereits angeregtes Elektron, was sich nun auf einem höheren Energieniveau befindet, von einem Photon getroffen wird, der gleichen Wellenlänge, wie die des Photons, das das angeregte Elektron aussenden würde, wenn dieses auf den Grundzustand zurückfallen würde (spontane Emission), also der Energiedifferenz zwischen angeregtem- und Grundzustand. Dann passiert nämlich folgendes: das getroffene Elektron fällt auf den Grundzustand zurück und sendet dabei parallel zu dem Photon, was das Elektron getroffen hat, ein neues Photon aus. Das Photon was auf das Elektron aufgetroffen ist verschwindet dabei nicht, sondern hat das Elektron dazu stimuliert (erzwungen), sein Photon frühzeitig auszustrahlen und auf seinen Grundzustand zurückzufallen. Das neu ausgesendete Photon ist eine exakte Kopie von dem des ersten Photons (was das Elektron stimuliert hat). Die beiden elektromagnetischen Wellen bewegen sich in die gleiche Richtung, schwingen in Phase, sind kohärent und gleich polarisiert. Nun könnte man meinen, dass die beiden Photonen weitere angeregte Elektronen dazu stimulieren neue Kopien zu erstellen und eine Kettenreaktion auszulösen. Dann hätte man einen Laser. Da die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon ein Elektron im angeregten Zustand stimuliert allerdings gleich groß ist, wie die Wahrscheinlichkeit ein Elektron im Grundzustand auf das zweite angeregte Niveau zu heben, findet keine Kettenreaktion, beziehungsweise Lichtverstärkung statt, wenn sich gleich viele Elektronen oder



mehrere im Grundzustand befinden. Nebenbei fallen auch ständig Elektronen durch spontane Emission zurück in den Grundzustand. Um eine Kettenreaktion und Lichtverstärkung zu erreichen müssen sich also mehr Elektronen im angeregten Zustand befinden als im Grundzustand. Wenn dies der Fall ist, spricht man von einer Besetzungsinversion. Dies kommt so nie in der Natur und Umwelt vor, und wird nur durch künstliches, ständiges und kontrolliertes Pumpen eines laseraktiven Stoffes erreicht. Um eine Besetzungsinversion zu erreichen, ist in der Regel auch der Laserresonator notwendig, welcher die Photonen wieder und wieder durch das Lasermedium leitet und so zu einer höheren Wahrscheinlichkeit zur Stimulation eines gehobenen Elektrons beiträgt. Die Besetzungsinversion ist der eigentliche Knackpunkt des Laserlichtes und das was den Laser überhaupt ermöglicht. Damit eine Besetzungsinversion überhaupt stattfinden kann und der Laser funktionieren kann, muss der eigentliche laseraktive Stoff im Lasermedium mindestens drei Energieniveaus haben. Die bis jetzt genannten Beispiele besaßen nur zwei Niveaus (Grundzustand und angeregter Zustand) und sind somit ein zwei-Niveau-System. Es gibt allerdings auch Stoffe und Verbindungen mit drei oder sogar vier Niveaus und diese besitzen somit ein, beziehungsweise zwei zusätzliche Zwischenniveaus.

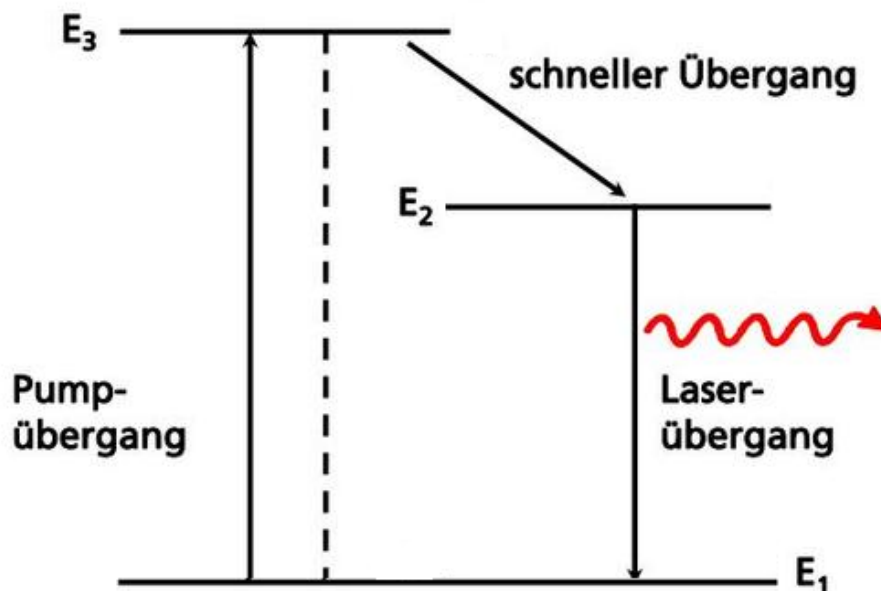


Hier sieht man das Prinzip der stimulierten Emission. Hierbei wird das Elektron auch zuerst mit einer gewissen Frequenz auf das angeregte Niveau gehoben (links). Wenn dieses angeregte Elektron nun in seiner Verweilzeit auf diesem Niveau von einem Photon der geeigneten Frequenz getroffen wird (Mitte), wird das Elektron dazu stimuliert in den Grundzustand zurück zu kehren und sendet ein identisches Photon aus.

#### 3.2.1.2.1 DREINIVEAUSYSTEM

Bei Stoffen oder Verbindungen, die über ein Dreiniveausystem verfügen, existiert zusätzlich zu dem Grundzustand und dem angeregten Niveau, welcher auch Laserniveau genannt wird (da auf diesem Niveau die stimulierte Emission in einem Laser stattfindet), ein zusätzliches „Zwischenniveau“ oberhalb des Laserniveaus. Die Energiedifferenz zwischen diesem dritten Niveau zu dem Laserniveau ist dabei typischerweise viel kleiner als die des Laserniveaus und des Grundniveaus. Nun erfolgt das Pumpen des Lasers nicht direkt auf das Laserniveau, sondern auf das zusätzliche dritte Niveau. Somit ist die Energie (Frequenz) des pumpenden Photons (bei optischer Anregung), beziehungsweise die Energie, die zur Anhebung auf das dritte Energieniveau benötigt wird, immer größer als die Energie (Frequenz) des abgestrahlten Photons beim Übergang vom Laserniveau auf das Grundniveau. Somit hat die elektromagnetische Pumpstrahlung bei optischer Anregung keinen direkten Einfluss (durch Stimulation) auf die in einer Kettenreaktion entstehende Strahlung bei der Stimulation von Elektronen auf dem Laserniveau. Nun können Pump- und Laserstrahlung nicht miteinander

konkurrieren und sind getrennt. Die Verweilzeit auf dem dritten Niveau ist sehr kurz und viel kürzer als die auf dem Laserniveau. Der Übergang vom zusätzlichen höchsten Niveau auf das Laserniveau erfolgt normalerweise strahlungslos, kann jedoch auch Strahlung erzeugen. Dabei gibt das Elektron etwas Wärmeenergie ab. Auf dem Laserniveau haben die Elektronen eine viel längere Aufenthaltszeit, bevor sie durch spontane Emission oder durch stimulierte Emission wieder in den Grundzustand fallen. Dort werden sie im Laser wieder durch die kontinuierliche Pumpleistung auf das höchste Niveau angehoben. Wäre dies nicht der Fall, würden sich keine Elektronen mehr im angeregten Zustand befinden und die Kettenreaktion kommt zum Erliegen. Mit Stoffen die ein Dreiniveausystem besitzen, kann nun ein Laser konstruiert werden, da die Pumpstrahlung die Elektronen hier nur anhebt und nicht gleichzeitig angeregte Elektronen wieder in den Grundzustand stimuliert. So ist es möglich eine Besetzungsinversion herzustellen und mehr Elektronen im angeregten Zustand zu halten als im Grundzustand (Besetzungsinversion).

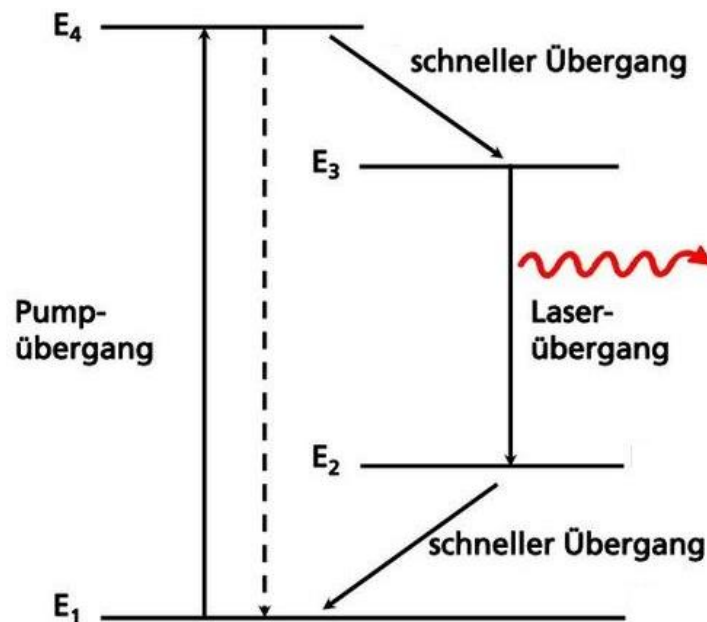


Hier ist ein Übergangsschema eines laseraktiven Stoffes mit einem Dreiniveausystem abgebildet. Dabei stellt  $E_1$  das Grundniveau,  $E_3$  das obere zusätzliche dritte Niveau und  $E_2$  das Laserniveau dar. Man kann gut erkennen, dass durch das dritte Niveau die notwendige Pumpenergiedifferenz größer ist, als die Laseremissionsdifferenz und somit getrennt ist. Bei einer Besetzungsinversion, würden sich auf dem Laserniveau die meisten Elektronen befinden.

### 3.2.1.2.2 VIERNIVEAUSYSTEM

Neben dem Dreiniveausystem existiert auch ein Vierniveausystem, mit dem es auch möglich ist eine Lichtverstärkung zu erreichen. Das Vierniveausystem ist eigentlich so wie das Dreiniveausystem, nur mit dem Unterschied, dass sich ein weiteres, viertes Zwischenniveau zwischen dem Laserniveau und dem Grundniveau befindet. Dabei ist die Energiedifferenz von dem Laserniveau und dem vierten Niveau wesentlich größer als die des vierten Niveaus und des Grundniveaus. Die Elektronen werden auch hier, wie beim Dreiniveausystem, von der Pumpenergie in das oberste Niveau gehoben und gelangen dann von dort aus normalerweise strahlungsfrei nach einer sehr kurzen Zeit auf das

Laserniveau. Von dort aus gelangen sie entweder nach einer langen Zeit durch spontane Emission oder frühzeitig durch stimulierte Emission auf das zusätzliche vierte Niveau. Auf dem vierten Niveau hat das Elektron, wie auf dem obersten Niveau, nur eine sehr kurze Verweilzeit. Dann fällt es auch hier meist durch Abgabe von Wärme wieder auf den Grundzustand zurück, bevor das Elektron wieder von der Pumpenergie angehoben wird. Mit dem Vierniveausystem ist es also auch möglich eine Besetzungsinversion herzustellen, da auch hier die Pumpenergie größer ist als die abgestrahlte Energie beim Übergang vom Laserniveau in das vierte Niveau. Mit dem Vierniveausystem lässt sich eine ziemlich geringe Elektronenanzahl in dem Grundzustand realisieren. Stoffe und Verbindungen mit Vierniveausystemen eignen sich sehr gut als laseraktiver Stoff.



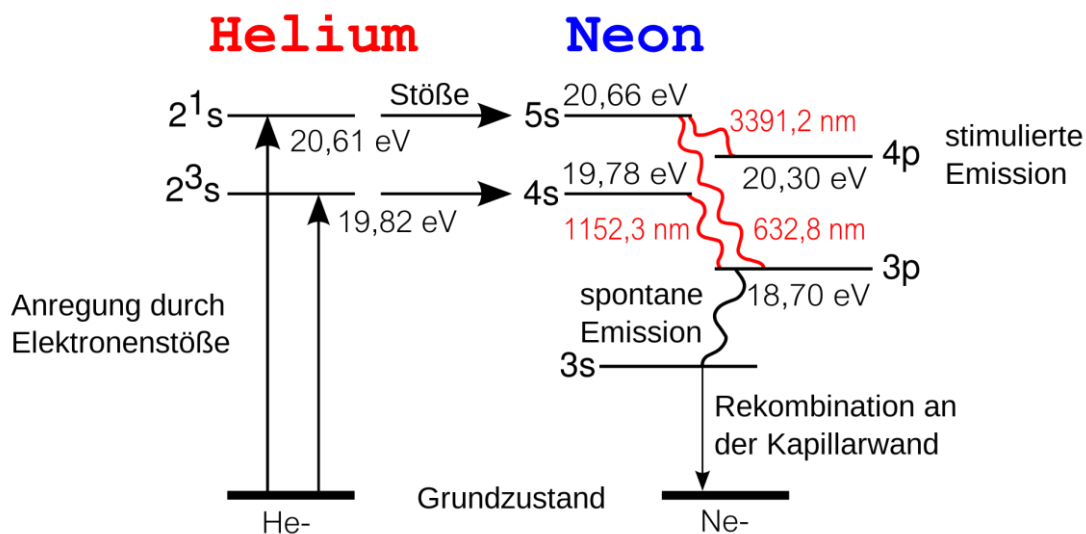
Hier ist ein Vierniveausystem schematisch dargestellt. Das Vierniveausystem ähnelt dem Dreiniveausystem, mit dem Unterschied, dass es ein weiteres Zwischenniveau gibt. Dieses stellt  $E_2$  dar.  $E_1$  ist auch hier der Grundzustand, wobei  $E_4$  das Pumpniveau und  $E_3$  das Laserniveau ist. Auch der Übergang von  $E_2$  auf  $E_1$  erfolgt strahlungslos, respektiv durch Wärmeabgabe.

Es gibt auch noch Mehrniveausysteme mit mehr Niveaus als das Vierniveausystem. Die meisten Laser haben ein Vier- oder Mehrniveausystem. Das Prinzip zur Herstellung einer Besetzungsinversion ist allerdings das gleiche.

### 3.2.1.2.3 UNTERSTUFEN

Nebenbei gibt es auch Laser, was oft Gaslaser sind, bei denen eine oder mehrere der typischen Energiestufen, wobei auch das Laserniveau enthalten sein kann, in zwei oder mehrere unterschiedlich hohe Energieniveaus aufgeteilt sind. Die Energiedifferenz dieser Unterstufen ist in den meisten Fällen sehr klein. Es können übrigens alle Niveaus (außer Grundniveau) in ein oder mehrere Unterniveaus unterteilt sein. Diese zwei oder mehrere „Unter-Niveaus“ gibt es, da dieser laseraktive Stoff von zwei verschiedenen Stößen, unterschiedlicher Stärke (bei indirekter Anregung) durch den beigemengten Stoff angeregt werden kann, beziehungsweise durch zwei unterschiedliche Pump-Frequenzen (bei optischer Anregung) gespeist wird. Durch diese verschiedenen möglichen Pumpenergie Mengen werden die Elektronen auf zwei unterschiedliche obere Niveaus gehoben. Auf welches dieser „Unter-Niveaus“ der laseraktive Stoff angeregt wird ist rein zufällig. So befinden sich,

je nach laseraktivem Stoff nach Übergängen aus den „Zwischen-Niveaus“ der oberen Stufe, Elektronen auf zwei unterschiedlichen Laserniveaus. Wenn diese Elektronen nach einer Zeit von dem Laserniveau auf ein unteres Niveau fallen, emittieren diese aufgrund der unterschiedlichen Energiedifferenzen, zwischen den beiden „Unter-Laserstufen“ zum unteren Niveau, Photonen zwei unterschiedlicher Frequenzen. Dieses Unterniveau kann dabei auch unterteilt sein. So können sich in diesen Lasern zwei verschiedene Frequenzen durch stimulierte Emission zur Laserstrahlung ausbilden. Dabei kann, nach Bedarf, eine dieser Frequenzen beim optischen Resonator absorbiert oder durch zusätzliche optische Bauteile absorbiert werden. Beim Kohlenstoffdioxidlaser gibt es zum Beispiel zwei Laserniveaus. So entstehen parallel zwei Laserstrahlungen verschiedener Frequenzen. Es kommt jedoch häufiger vor, dass Laser mehrere Frequenzen gleichzeitig produzieren.



Hier sieht man ein komplexeres Beispiel eines Helium-Neon-Lasers, bei dem die einzelnen Energieniveaus in verschiedene Unterstufen unterteilt sind. So existieren unterschiedliche Energiedifferenzen und es entstehen beim Betrieb gleichzeitig Photonen dreier unterschiedlicher Frequenzen.

Laseraktive Stoffe und Verbindungen müssen also über ein Drei-, Vier- oder Mehrniveausysteme verfügen um den Laser zu ermöglichen. Dabei sollen die Verbleibzeiten auf den zusätzlichen Zwischenniveaus möglich kurz sein. Wobei die Verbleibzeit auf dem Laserniveau so lang wie möglich sein sollte. Natürlich soll es bei dem Stoff nicht möglich sein, dass Elektronen direkt aus dem obersten Niveau in den Grundzustand zu gelangen. Stoffe, welche all die genannten Kriterien erfüllen, eignen sich erst als laseraktiver Stoff.

#### 3.2.1.2.4 EMISSIONSLINIEN

Viele laseraktive Stoffe können jeweils mehrere verschiedene Frequenzen durch verschiedene Übergänge vom Laserniveau auf ein tieferes Niveau erzeugen. Diese Frequenzen werden Emissionslinien genannt. Ein laseraktiver Stoff kann dabei mehrere hundert verschiedener dieser Emissionslinien aufweisen. Man kann also mit ein und demselben laseraktiven Stoff Laserstrahlung verschiedener Frequenzen produzieren. Diese Emissions-Frequenz legt man mit der Pumpenergie fest, also wie hoch die Energie ist, mit der das Elektron aus dem Grundzustand gehoben wird. Bei einer optischen Pumpe wäre dies zum Beispiel das Einstellen der Frequenz des Pumplichtes. Wird diese Frequenz erhöht, so wird auch das Elektron aus dem Grundzustand auf ein noch höheres Niveau gehoben. Wie viele Zwischenniveaus (Niveausystem) es dabei gibt hängt vom laseraktiven



Stoff ab. Durch die noch höhere Hebung des Elektrons, hat sich auch die Energiedifferenz zwischen dem laseraktiven Niveau und dem tiefer gelegenen Niveau vergrößert. So hat sich auch die Wellenlänge des entweder durch spontane oder durch stimulierte Emission verkleinert. Auf diese Weise kann man bei vielen Lasern ihre Emissionswellenlänge einstellen. Dabei ist typischerweise eine Emissionslinie besonders stark, bei der die stimulierte Emission am stärksten und effizientesten abläuft, so ist auch die Lichtverstärkung dort auch am größten und der Laser kann bei dieser Emissionsfrequenz die höchsten Leistungen erzeugen. Viele andere Emissionslinien sind nur sehr schwach und sind für den Betrieb des Lasers ungeeignet. Daher arbeiten die Laser meist trotzdem auf nur einer Frequenz.

### *3.2.1.3 FUNKTIONSWEISE DER LICHTVERSTÄRKUNG*

Wie bereits erwähnt, werden beim Einschalten des Lasers die Elektronen im laseraktiven Stoff durch die Pumpenergie angehoben und fallen nach einer Zeit auf das Laserniveau. Nun herrscht bereits eine Besetzungsinversion. Die sich auf dem Laserniveau befindenden Elektronen fallen, trotz langer Verbleibzeit, irgendwann durch spontane Emission auf ein Zwischenniveau oder das Grundniveau. So kommt es, dass manche Elektronen dies tun und dabei jeweils ein Photon einer des laseraktiven Stoffes abhängigen Frequenz ausstrahlen. Diese Photonen beginnen nun irgendwann auf Elektronen zu treffen, die sich auf dem Laserniveau befinden und stimulieren diese dazu jeweils ein exakt gleiches Photon abzustrahlen. Auch wenn die Chance, dass ein Photon ein sich auf dem Laserniveau befindliches Elektron trifft sehr gering ist, hat das Photon Milliarden von Chancen, um ein solches Elektron zu treffen, da das Lasermedium bei einer Besetzungsinversion voll von solchen angeregten Elektronen ist. Da eine Besetzungsinversion herrscht, tritt so eine Kettenreaktion ein und es entsteht eine Lichtverstärkung und das Laserlicht entsteht.

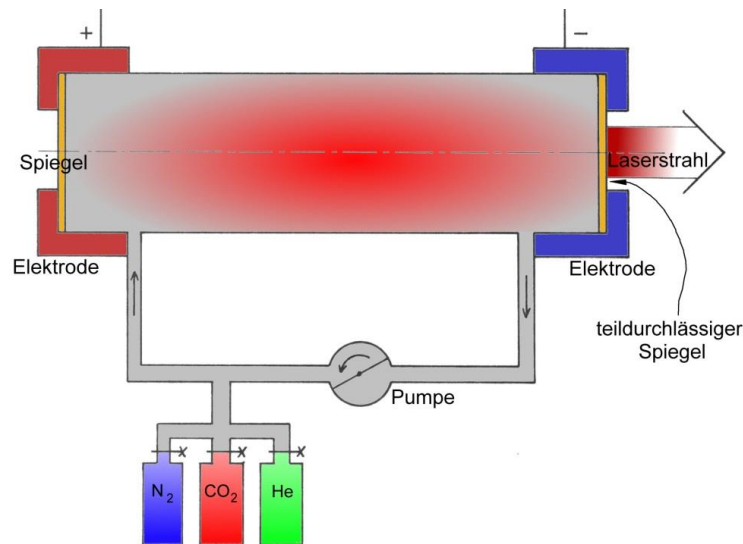
### *3.2.2 LÄNGSGESTRÖMTE UND QUERGESTRÖMTE LASER*

Bei Gas- und Farbstofflaser ist es möglich, dass das Lasermedium, ob gasförmig oder flüssig, in einem geschlossenen Kreislauf strömt. Dann spricht man von einem geströmten Laser. Dies hat den Zweck, je nach Lasertyp, die einzelnen Stoffe des Lasermediums nachzufüllen, da es bei manchen Gaslasern nämlich aufgrund unvermeidlicher chemischer Prozesse dazu kommen kann, dass die laseraktiven Stoffe und Verbindungen oder andere nötige Stoffe des Lasermediums zu anderen unbrauchbaren Stoffen reagieren. Dann muss eine kontrollierte Nachfüllung des betroffenen Stoffes garantiert sein. Farbstofflaser sind in der Regel immer geströmt, da die starke Belastung des Farbstoffes durch das optische Pumpen, was meist durch einen anderen Laser erfolgt, zum Ausbleichen des Farbstoffes führt. Dann würde der Lasereffekt des Laserstrahls verschwinden. Wenn der Farbstofflaser allerdings geströmt ist, werden die Farbstoffverbindungen durch den ständigen Austausch nicht so stark belastet und bleichen nicht aus. Laser werden allerdings meistens auch zur Kühlung des Lasermediums geströmt. Dazu wird das Lasermedium über ein Rohr nach außen, durch eine oder mehrere Pumpe(n), durch einen Wärmetauscher hindurch und wieder zurück in den Laser geleitet. Die Pumpe baut eine Zirkulation des Lasermediums auf. So kann das heiße Lasermedium bei durchfließen des Wärmetauschers ihre Wärme über die Rohrwände an die um das Rohr zirkulierende Kühlflüssigkeit abgeben. Dabei fließt die Kühlflüssigkeit durch eine Schnecke um das Lasermedium leitende Rohr. Die Kühlturbine kann aber auch im Inneren des Lasermedium-Kreislaufes integriert sein. Auf diese Weise wird das Lasermedium gekühlt. Bei Nachfüllung sind über Anschlussventile an dieses Zirkulationsrohr Nachfüllbehälter (ein Nachfüllbehälter pro Stoff) angeschlossen, welche reine Nachfüllgase enthalten. Diese Nachfüllventile werden bei Bedarf geöffnet und der nötige Stoff wird

nachgefüllt. Um den erwünschten Druck bei einer Nachfüllung des Stoffes aufrecht zu erhalten, befindet sich bei Gaslasern auch eine Vakuumpumpe an dem Kreislauf.

### 3.2.2.1 LÄNGSGESTRÖMT

Bei Längsgeströmten Lasern sind die Ein- und Ausgangsrohre jeweils an einem Ende des länglichen Lasermedium-Gefäßes an der Mantelwand des Gefäßes angeschlossen. Damit ergibt sich bei Betrieb eine Längsströmung durch das ganze Lasermedium-Gefäß. Diese Methode wird am meisten angewandt.



Das Bild zeigt einen längsgeströmt Kohlenstoffdioxidlaser. Dabei durchströmt das gasförmige Lasermedium das Gefäß der Längsachse nach. Außen befindet sich eine Pumpe und einzelne Nachfüllbehälter für Stickstoff, Kohlendioxid und Helium.

### 3.2.2.2 QUERGESTRÖMT

Sehr selten kommt es vor, dass Laser, insbesondere bei sehr leistungsstarken Lasern, als quergeströmter Laser ausgeführt sind. Dazu sind mehrere Anschlüsse längs an der Gefäßwand (Mantelwand) gegenüber platziert. So hat die Strömung nur einen sehr kurzen Weg vom Eingang bis zum Ausgang, quer durch das Gefäß. Dies garantiert einen schnellen Lasermediumaustausch, also eine hohe Austauschkapazität, beziehungsweise eine hohe Kühlkapazität bei entsprechenden Wärmetauschern.

## 3.3 ENERGIEPUMPE

Die Energiepumpe ist das Bauteil, was man eigentlich einschaltet, wenn man den Laser einschaltet. Der Rest des Lasers wirkt im Grunde nur lichtumwandelnd und lichtverstärkend. Um den Laser einzuschalten und in Gange zu halten, muss dem Lasermedium kontinuierlich Energie zugeführt werden, was mit der sogenannten Energiepumpe erreicht wird. Diese Energieform kann dabei unterschiedlich sein, welche auch sehr vom Aggregatzustand des Lasermediums abhängt. Diese Energieform kann optisch (mit elektromagnetischer Strahlung), elektrisch sowie durch Stöße mit Teilchen erfolgen. Manche Laser erzeugen ihre Besetzungsinversion durch im Lasermedium stattfindende kontrollierte chemische Reaktionen. Wichtig dabei ist, dass die anregenden Photonen,

Elektronenstöße, etc. die gewisse Energie haben, die der Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem gewünschten angeregten Zustand entspricht. Die Anregung des laseraktiven Stoffes erfolgt bei manchen Gaslasern indirekt. Das heißt, dass zuerst ein anderer mit im Lasermedium enthaltener Stoff angeregt wird, welcher diese Energie an das Lasermedium weitergibt.

### **3.3.1 ELEKTRISCHE ANREGUNG**

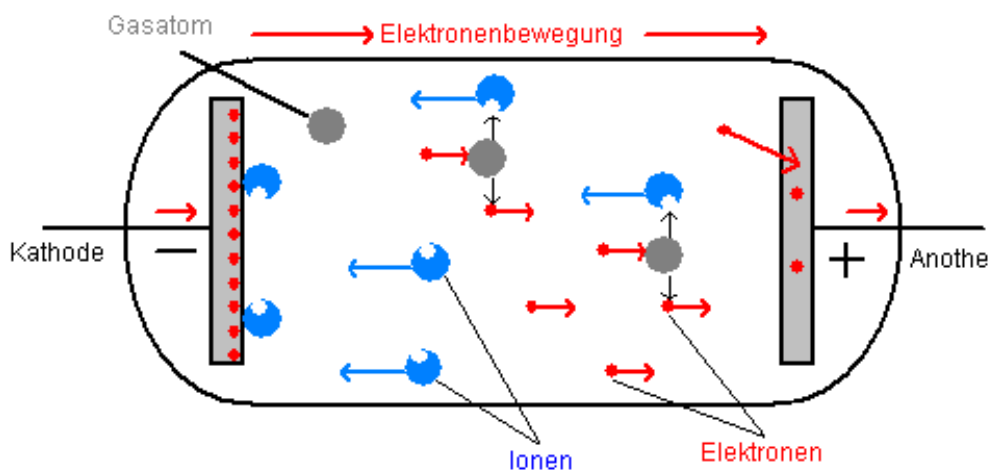
Die elektrische Anregung kommt bei Gaslasern sehr oft zum Einsatz. Dabei sind zwei Elektroden in dem Glasgefäß, worin sich das Lasermedium befindet, angeordnet. Nun wird mittels einer elektrischen Spannung eine Gasentladung in diesem Glasgefäß erzeugt, um das Lasermedium anzuregen. Bei der elektrischen Anregung wird der laseraktive Stoff immer durch Stöße mit sich fortbewegenden Elektronen, beziehungsweise Elektronenaufnahme Elektronen angeregt. Elektrische Anregungen sind allerdings auch in Laserdioden zu finden, wobei ein Gleichstrom diese anregt. Die Funktionsweise der Anregung der Laserdiode wird allerdings später aufgegriffen.

#### **3.3.1.1 ELEKTRISCHE ANREGUNG DURCH EINE GASENTLADUNG**

Bei dieser Methode ist das Gas, mit dem das Glasgefäß gefüllt ist, elektrisch nicht leitend. Das Glasgefäß ist dabei verschlossen. An den beiden Enden befindet sich jeweils eine Anode aus Metall beziehungsweise eine Kathode aus Metall. Diese sind im Laser so angeordnet, dass diese den entstehenden Laserstrahl nicht behindern. Sie können zum Beispiel in zwei Ausbuchtungen der geschlossenen Glasröhre untergebracht sein. Sie können aber auch als Metallgitter in der Glasröhre selbst vorhanden sein. Die Löcher im Metallgitter sollen hier den Laserstrahl hindurch lassen. Damit die Gasentladung überhaupt stattfinden kann, müssen ein paar Atome ionisiert sein. Das heißt, dass bei diesen Atomen jeweils minimum ein Elektron herausgeschlagen wurde. Dies geschieht zum Beispiel durch den Einfluss der Höhenstrahlung, welche vom Weltall aus teilweise auf die Erde gelangt. Diese hochfrequente elektromagnetische Strahlung schlägt bei manchen Atomen Elektronen heraus. Bei Anlegen einer Gleich- oder auch Wechselspannung, entsteht ein Elektronenüberschuss an der Kathode und ein Elektronenmangel an der Anode sowie ein spannungsabhängiges elektrisches Feld zwischen den Elektroden. Die nun freigeschlagenen Elektronen werden durch das elektrische Feld beschleunigt und bewegen sich in Richtung Anode. Gleichzeitig beginnen die Ionen (Atome mit fehlenden Elektronen) durch das elektrische Feld langsamer, durch ihre höhere Masse, sich in die entgegengesetzte Richtung zu bewegen. Wenn diese positiv geladenen Ionen dann auf die Kathode (Elektronenüberschuss) auftreffen, nimmt dieses Ion so viele Elektronen auf und neutralisiert sich damit wieder. Beim Aufprall werden zusätzliche Elektronen aus der Kathode herausgeschlagen. Diese herausgeschlagenen Elektronen werden auch wiederum beschleunigt in Richtung Anode. Auf dem Weg dahin treffen diese auf andere neutrale Atome und Ionen. Die positiv geladenen Ionen ziehen sich dabei mit den Elektronen an. Beim Zusammenprall mit den Ionen, regen die Elektronen diese Ionen auf ein höheres Energieniveau an und neutralisieren diese Ionen dabei. Dabei wird in Gasentladungslampen durch spontane Emission Licht einer gewissen Wellenlänge ausgesendet, entsprechend der Energiedifferenz zwischen Grundzustand und angeregtem Niveau, welche vom Gas abhängt. Im Laser wird der laseraktive Stoff oder ein beigemengter Stoff zur indirekten Anregung hingegen angeregt. Die Elektronen, welche nicht von einem Ion aufgenommen wurden, werden lange genug oder durch das elektrische Feld stark genug (bei extrem starkem elektrischen Feld) beschleunigt, sodass die kinetische Energie (Bewegungsenergie) hoch genug ist, um andere neutrale Atome zu ionisieren, sodass immer neue Ionen entstehen und der ganze Prozess nicht zum Erliegen kommt. So entsteht eine gewisse Kettenreaktion. Bei einem ionisierenden Aufprall, werden die Elektronen dabei natürlich dementsprechend abgebremst, schlagen dabei ein weiteres Elektron

heraus und ionisieren das Atom. Die zur Anode wandernden Elektronen können dabei beliebig viele neutrale Atome ionisieren, wenn deren kinetische Energie dazu ausreicht. Wenn diese Elektronen an der Anode ankommen, werden diese von der Anode aufgenommen. Nun fließt ein Strom, da bei der Kathode Elektronen aufgenommen, beziehungsweise herausgeschlagen werden und Elektronen an der Anode eingefangen werden.

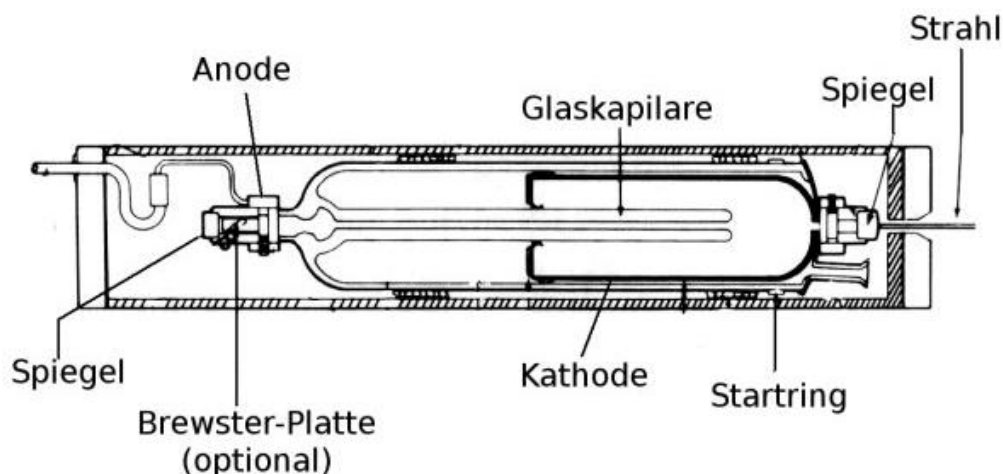
Die benötigte Spannung hängt dabei von dem Abstand zwischen Anode und Kathode ab, sowie von der benötigten Energie, um das jeweilige Gas zu ionisieren und vom Gasdruck ab. Wenn der Gasdruck zum Beispiel niedriger ist, befinden sich weniger Atome im Gefäß und haben dabei einen größeren Abstand zueinander. Die Elektronen werden über eine längere Distanz beschleunigt und erreichen dabei eine höhere kinetische Energie, bis sie auf ein neutrales Atom auftreffen und dieses ionisieren, also muss das beschleunigend wirkende elektrische Feld nicht so stark sein. Und so muss die angelegte Spannung nicht so hoch sein. Glimmentladungen sind zum Beispiel Gasentladungen, die unter einem niedrigen Druck erfolgen. Glimmentladungen werden auch zum Pumpen von Gaslasern eingesetzt. Das Gegenteil ist der Fall bei einem höheren Gasdruck. Die sogenannte Zündspannung ist bei einer Gasentladung höher als die Betriebsspannung. Dies liegt daran, dass die am Anfang ionisierten Ionen und Elektronen sich anziehen und sich sofort neutralisieren wollen, also muss das elektrische Feld und die angelegte Spannung sehr hoch sein. Wenn der ganze Prozess im Gange ist und viele Elektronen unterwegs sind, muss das elektrische Feld nicht mehr so stark sein. Bei Lasern kann die Betriebsspannung einige kV erreichen. Es ist wichtig den Stromfluss zur Gasentladung durch Widerstände, Spulen, etc. zu begrenzen, da ansonsten durch die Kettenreaktion ein Lichtbogen auftritt, was zur Zerstörung der geschlossenen Glasröhre führen kann.



Schematische Darstellung einer Gasentladung, welche im Lasermedium parallel zur Laserstrahlproduktion stattfindet. Beim Betrieb der Gasentladung ist das Gas elektrisch leitend, da Ionen (blau) an der Kathode (links) Elektronen (rot) heraus schlagen und diese zur Anode (rechts) wandern. Es fließt also Strom. Durch Stöße mit neutralen Atomen (grau), werden diese ionisiert, so dass ständig neue Ionen entstehen.

Eine Sonderform der Glimmentladungsröhre ist die Bauweise mit einer Hohlkathode. Diese Methode findet auch eine große Anwendung als Energiepumpe mittels Gasentladung bei Gaslasern. Hierzu ist die metallene Kathode in Form eines Topfes ausgeführt und an einem inneren Ende des Glasgefäßes befestigt. Im Boden befindet sich ein Loch, um den entstehenden Laserstrahl nicht zu behindern. Mit der Hohlkathode wird beim Betrieb eine höhere Dichte (Anzahl) an Ionen und Elektronen erreicht,

ohne dabei eine Bogenentladung zu provozieren und alles zu zerstören. Durch die erhöhte Anzahl an Elektronen im Lasermedium, wird auch eine höhere Pump-Effizienz erreicht. Der Grund ist die deutlich größere Fläche der Kathode und die verkleinerte innere Fläche des Glasgefäßes. Da sich immer positive Ionen durch Kollisionen an der Glasgefäßwand entsprechend viele Elektronen aufnehmen und sich so neutralisieren, treten Verluste auf. Bei der Hohlkathode hingegen werden diese Entladungen reduziert, so dass mehr Ionen Elektronen aus der Kathode herausschlagen und so zur Glimmentladung beitragen und eine höhere Konzentration an Ladungsträger im Lasermedium erzeugen. Durch die größere Fläche der Kathode ist auch die elektrische Belastung des Materials geringer. Die Anode ist dabei üblicherweise nicht größer gestaltet. Mit Hohlkatoden ausgestattete Glimmentladungspumpen können mit höheren Strömen betrieben werden.



Querschnitt eines mit einer Hohlkathode ausgestatteten Gaslasers. In diesem Fall bildet die Hohlkathode die schwarz dargestellte U-ähnliche Form, welche sich im rechten Bereich des Glasgefäßes befindet.

### 3.3.1.2 ELEKTRISCHE ANREGUNG DURCH HOCHFREQUENZ

Die normale Anregung durch Gasentladung hat einen großen Nachteil, denn die Elektroden werden durch die Gasentladung stark belastet und auch sehr heiß. Diese entwickeln dort Brandstellen. Um dies zu vermeiden werden viele neuere Gaslaser mit Hochfrequenz angeregt. Ab einer Frequenz von 1kHz, spricht man von Hochfrequenz. Beim Laser können Frequenzen von bis zu einigen MHz eingesetzt werden. Bei der Hochfrequenzanregung sind die beiden Elektroden außerhalb des geschlossenen Behälters, der das Lasermedium enthält, angebracht. An ihnen wird ein Wechselstrom sehr hoher Frequenz angelegt. Das entstehende elektrische Feld, wozwischen sich das Lasermedium befindet, ändert dabei auch ständig seine Richtung. Die wenigen, am Anfang durch Ionisation notwendigen herausgeschlagenen Elektronen, werden nun nach Anlegen der Spannung in Richtung Anode beschleunigt. Die positiven Ionen werden hingegen in Richtung Kathode gezogen. Da sich die Polarität der Elektroden ständig ändert, müssen die Ionen und Elektronen auch ständig ihre Richtung ändern. Dabei stoßen diese wie bei der Gasentladung aneinander. Auch hier ionisieren Elektronen mit genügend kinetischer Energie neutrale Atome, während Elektronen niedrigerer Bewegungsenergie Ionen neutralisieren und dabei diese auf ein höheres Energieniveau anregen. So werden auch hier die laseraktiven Atome durch Stöße mit den sich hin- und her bewegendenden Elektronen angeregt. Mit der Hochfrequenzanregung ist es also auch möglich eine Gasentladung innerhalb des Lasermedium-Behälters zu generieren, mit dem Unterschied, dass das Lasermedium (Gas) hier keinen Strom zwischen den Elektroden transportiert. Das Gas leitet also keinen Strom, da



die geladenen Teilchen sich sozusagen mehr oder weniger an Ort und Stelle hin und her bewegen. Durch das ständige Umkehren der Bewegung, bleiben die geladenen Teilchen in Bewegung.

### 3.3.1.3 ANREGUNG MIT EINEM ELEKTRONENSTRAHL

Eine andere seltenere Methode ist die Anregung mit einem Elektronenstrahl. Hierbei wird in einer Elektronenkanone der sogenannte Elektronenstrahl erzeugt. In der Elektronenkanone werden Elektronen freigesetzt. Dies geschieht überwiegend durch einen Glühdraht, welcher über einen hohen elektrischen Widerstand verfügt und somit glüht. Dabei werden Elektronen ausgestreut. Aufgrund der negativen Ladung der Elektronen, werden diese durch eine an einem Ende befestigten Kathode und einer am anderen Ende befestigten Anode und dem entstehenden elektrischen Feld, stark in Richtung Anode beschleunigt. So entsteht ein Strahl aus sich schnell fortbewegenden Elektronen. Auch hier werden die Atome im gasförmigen Zustand durch Kollisionen mit Elektronen aus diesem Elektronenstrahl auf ein angeregtes Niveau gehoben.



Ein durch äußere Felder ringförmig verlaufender Elektronenstrahl. Dieser dient in diesem Falle allerdings nicht zum Pumpen eines Lasers. Man kann den erzeugten Elektronenstrahl (violett) hier besonders gut erkennen, aufgrund der Aussendung von Licht, was durch das beigemengte Gas erzeugt wird.

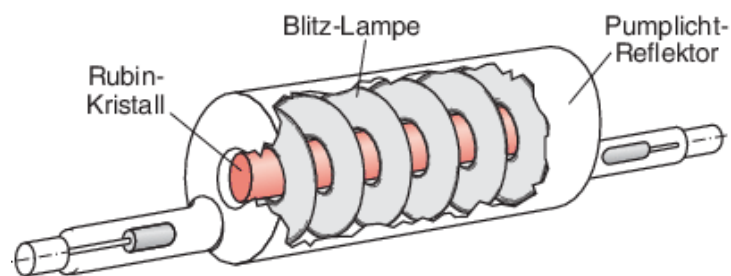
### 3.3.2 OPTISCHE ANREGUNG

Die optische Anregung kann generell bei allen Laserarten als Energiepumpmethode fungieren. Bei Feststofflasern und Farbstofflasern kommt zum Pumpen ausschließlich die optische Anregung zum Einsatz, da sie die einzig effektive Pumpmethode ist. Bei der optischen Anregung wird eine starke Lichtquelle außerhalb des Lasers platziert. Diese Lichtquelle gibt elektromagnetische Strahlung einer geeigneten Frequenz ab. Dabei muss der Behälter, in dem sich das Lasermedium befindet, für die elektromagnetische Strahlung durchlässig sein. Dabei soll das Lasermedium selbst die elektromagnetische Strahlung soweit wie möglich absorbieren und deren Energie aufnehmen. Für die optische Anregung von Lasern gibt es mehrere geeignete Lichtquellen. Tatsächlich werden bei Feststofflasern nur +3% der in die optische Pumpe eingespeisten Energie auch in Laserstrahlung

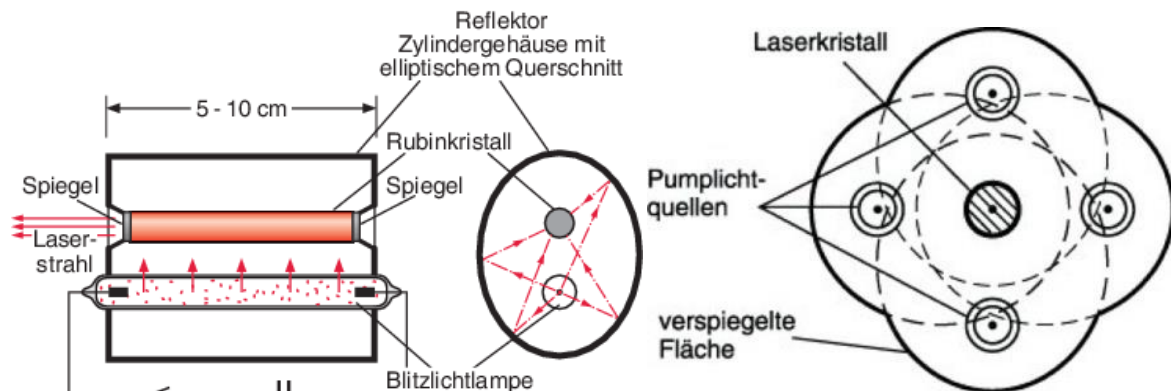
umgewandelt, da nur ein gewisser Teil des Lichtspektrums für die Anregung geeignet ist. Der Rest des Spektrums ist Verlust.

### 3.3.2.1 GASENTLADUNGSRÖHREN

Bei der optischen Anregung können auch Gasentladungsröhren als Energiepumpe dienen. Hierbei befindet sich die Gasentladungsröhre allerdings außerhalb vom Lasermedium und ist nicht darin integriert. Diese Gasentladungsröhre fungiert als Gasentladungslampe. So ist es hierbei nicht das Ziel das Lasermedium direkt anzuregen, sondern die Atome in der Gasentladungsröhre, durch spontane Emission Licht, also elektromagnetische Strahlung zum Leuchten zu bringen und über das produzierte Licht das Lasermedium anzuregen. Die Gasentladungslampe besteht eigentlich nur aus einer geschlossenen Glasröhre und hat an beiden Enden jeweils zwei gasdicht eingebaute Elektroden. Das Funktionsprinzip unterscheidet sich dabei nicht von dem der beschriebenen Gasentladung. Es gibt viele verschiedene Gasentladungslampen zum Pumpen von Lasern, die sich im Lichtspektrum und im Gasdruck unterscheiden. Um so viel wie möglich Pumpenergie in das Lasermedium einzubringen, muss so viel Licht wie möglich von der stabförmigen Gasentladungslampe zum Lasermedium gelangen. Bei dem Rubinkristalllaser (Feststofflaser) zum Beispiel, ist die Gasentladungslampe in einer Spirale um den stabförmigen laseraktiven Stab gewindet. Das Ganze ist von einer nach innen reflektierenden Hülle umgeben. Bei moderneren Lasern ist die Karkasse, in dem sich der laseraktive Stab und die gerade(n) stabförmige(n) Gasentladungslampe(n) befinden, im Querschnitt elliptisch. Dabei sind die Innenwände natürlich mit einer reflektierenden Schicht ausgestattet. Im Querschnitt befinden sich der laseraktive Stab und die Gasentladungslampe jeweils in einer der beiden Ausbuchtungen der Ellipse. Bei mehreren Gasentladungslampen sieht der Querschnitt, wie eine Blume aus, Dabei befinden sich der laseraktive Stab in der Mitte dieser Blume und die verschiedenen Leuchtröhren jeweils in einer Ausbuchtung. Mit dieser speziell gewählten Form wird erreicht, dass auch das abgestrahlte Licht auf der Rückseite der Leuchtröhre über den Reflektor das Lasermedium erreicht.



Das Bild bildet das beschriebene Beispiel des Rubinkristalllasers ab. So ist die nach innen reflektierende Hülle aufgeschnitten, so dass man die wendelförmige Blitzlampe erkennen kann.

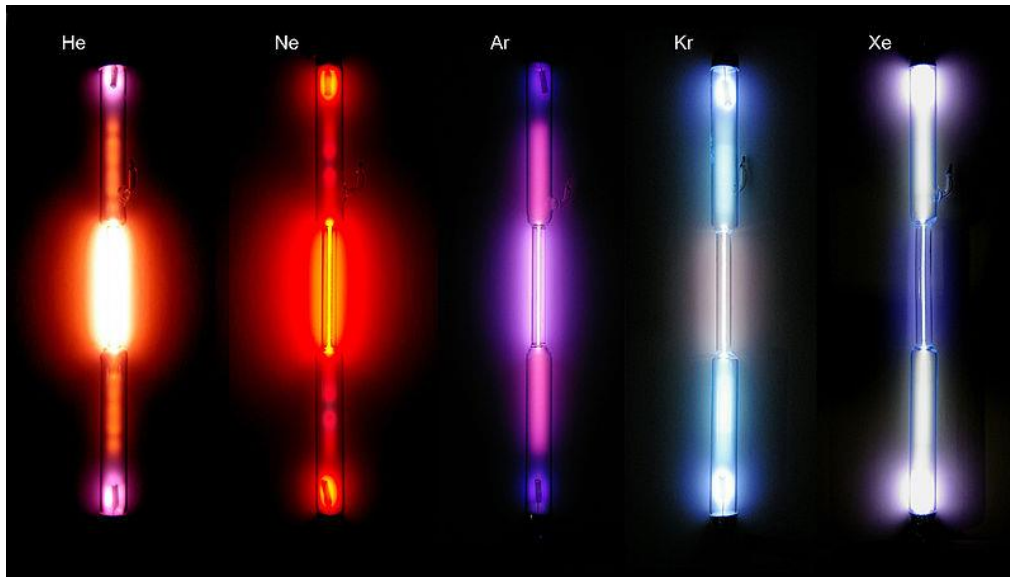


Die modernere Ausführung eines optisch angeregten Feststofflasers. Links sieht man einen Längs- und Querschnitt eines mit einer Gasentladungsröhre gepumpten Feststofflasers. Im Querschnitt sind zusätzlich Strahlenverlauf-Möglichkeiten des Lichtes der Gasentladungslampe rot eingetragen. Im rechten Bild ist der blumenförmige Querschnitt eines mit mehreren Gasentladungslampen gepumpten Feststofflasers zu erkennen.

Für den Laser verwendete Gasentladungslampen geben bei Stromanlegung kontinuierlich Licht ab. Somit kann der Laser hiermit auch im Dauerstrichbetrieb arbeiten. Solche Gasentladungs-Lampen können mit vielen verschiedenen Gasen befüllt sein wie zum Beispiel: Xenon, Neon, Quecksilber, Natrium, Argon, .... Diese Gasentladungslampen haben dabei unterschiedliche Spektren, aus denen sich deren abgegebenes Licht zusammensetzt. Die Auswahl der Gasentladungslampen beschränkt sich auf die Gasentladungslampen, die in ihrem Lichtspektrum am meisten Licht geeigneter Wellenlänge(n) zum Pumpen des Lasers aufweist.

Neben den kontinuierlich arbeitenden Gasentladungslampen, gibt es auch sogenannte Blitzlampen, welche sehr oft zur Anregung eines Lasers verwendet werden. Wie ihr Name schon verrät, werden Blitze in dieser speziellen Form der Gasentladungslampe erzeugt. Dabei arbeitet die Blitzlampe nicht kontinuierlich, sondern gepulst. Der Grund hierfür ist der Kondensator, der die Blitzröhre mit Strom speist. Dieser lädt sich ständig auf und gibt seine gesamte geladene Energie dann in kurzen Pulsen ab. Durch diese starken Strompulse, wird für einen kurzen Moment in der Blitzlampe ein Lichtbogen, also ein Blitz, erzeugt. Dabei muss die Lampe sehr viel Hitze und Druck standhalten können. Bei den Pulsen können unglaubliche Leistungen von über 100.000W erzeugt werden. Das Gas, mit dem die Röhre zum Pumpen von Lasern befüllt ist, ist entweder Xenon oder Krypton. Da die Pumplichtquelle hier nur gepulst arbeitet, kann auch der Laser nur gepulst arbeiten, was oft bei Feststofflasern angewandt wird.

Mit Xenon gefüllte Gasentladungslampen geben ein sehr tageslichtähnliches Licht ab.



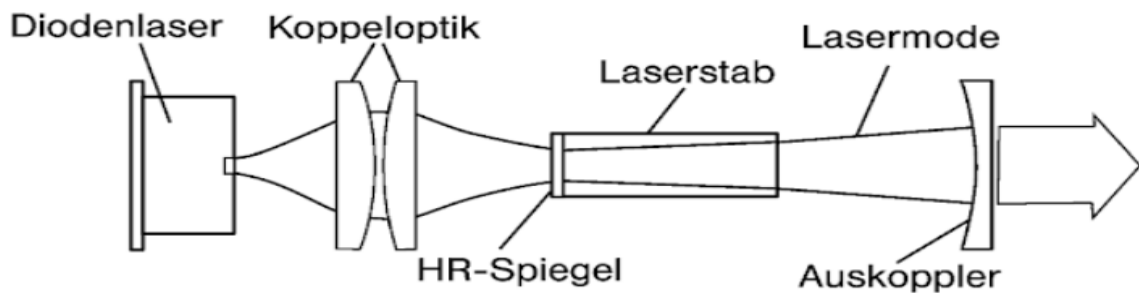
Fünf Gasentladungsröhren bei Betrieb, welche alle mit einem unterschiedlichen Gas befüllt sind. Diese Gase sind (von links nach rechts): Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon.

### 3.3.2.2 PUMPEN MIT EINEM ZWEITEN LASER

Es kommt auch vor, dass Laser, insbesondere Farbstofflaser, mit einem zweiten Laser einer anderen Bauart gepumpt sind. Auch hier beschränkt sich die Auswahl auf Laser mit einer geeigneten Wellenlänge. Die Pumplaser können von jeglichem Typ sein, unter anderem auch der Nd:YAG-Laser und Argonlaser. Sehr oft sind dies jedoch ein oder mehrere Laserdioden, welche später im Detail beschrieben werden. Durch das Pumpen mit Lasern kann ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden. Denn durch die hohe Bündelung des Laserstrahls, geht sehr wenig Licht verloren. Bei der Verwendung von Laserdioden als Pumpquelle, kann ein Wirkungsgrad (Eingangsleistung und Laserlichtleistung) von bis zu 50% erreicht werden. Dies liegt daran, dass das Laserlicht aus praktisch nur einer Wellenlänge besteht und diese dann voll ausgenutzt werden kann. Auch die hohe Lebensdauer von Laserdioden ist ein großer Vorteil. Um das Lasermedium anzuregen, durchläuft der Laserstrahl Glasplatten, Linsen und andere optische Bauteile, um den Strahl auf das ganze Lasermedium (Kristall) optimal zu verteilen. Grundsätzlich unterscheidet man bei Feststofflasern zwei Methoden um dies zu erreichen: longitudinal und transversal gepumpte Laser.

#### 3.3.2.2.1 LONGITUDINAL

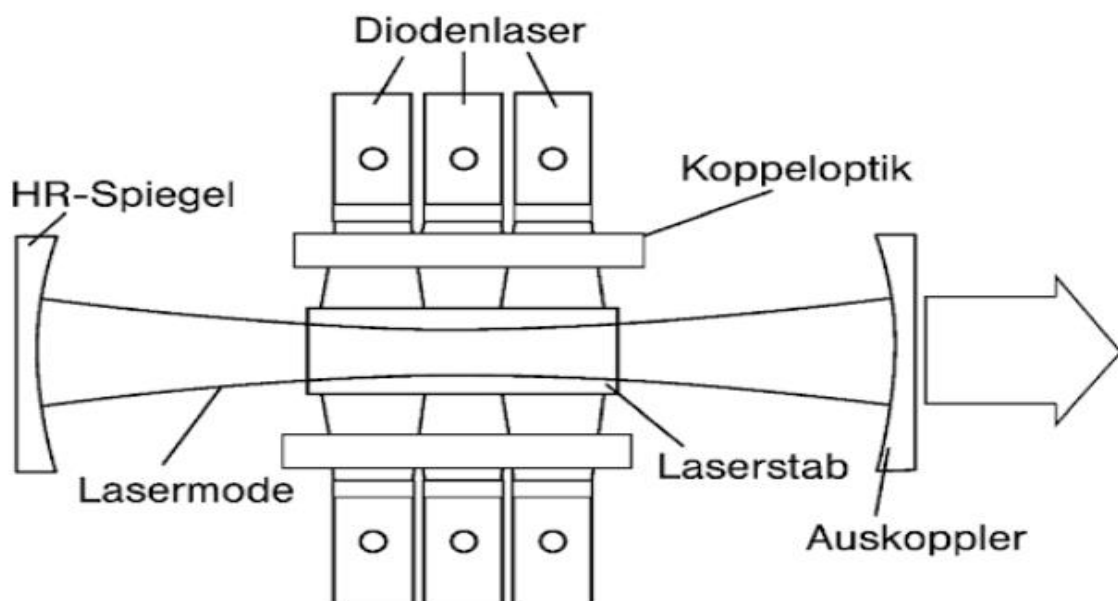
Bei longitudinal gepumpten Feststofflasern, wird das Laserlicht des Pumplasers zuerst über Linsen auf das eine Ende des stabförmigen laseraktiven Kristalls fokussiert. Dabei durchläuft es eventuell einen einseitig durchlässigen Spiegel des Resonators. Das Pumplicht kann übrigens auch aus den Laserstrahlen von mehreren Pumplasern zusammengesetzt sein. Das Pumplicht durchläuft dabei den laseraktiven Kristall in der Längsachse. Dabei erfolgt der Austritt der Laserstrahlung am anderen Ende des laseraktiven Stabs.



Aufbau eines longitudinal gepumpten Feststofflasers. Dieser ist mit dem Laserlicht einer Laserdiode, welches über eine Koppeloptik auf den laseraktiven Stab gebündelt ist, gepumpt. Der HR- Spiegel und der Auskoppler stellen dabei den Laserresonator des Laserstab dar.

### 3.3.2.2 TRANSVERSAL

Bei der transversalen Methode erzeugen in der Regel mehrere Laserdioden, welche in der Reihe (es können auch mehrere Reihen sein) entlang der Längsachse um den stabförmigen laseraktiven Kristall platziert sind, Laserlicht. Dieses Laserlicht durchläuft dann auch optische Linsen, radial durch die Mantelfläche des Stabs in den laseraktiven Kristall. Durch die größere Eintrittsfläche des Laserlichtes, kann man hier mehr Leistung in den laseraktiven Kristall einspeisen, da die thermische Belastung des Lichtes (auf das Material) auf eine größere Fläche aufgeteilt ist.



Dieses Bild zeigt einen transversal gepumpten Laserstab, wobei sich die einzelnen Komponenten nur in der Anordnung unterscheiden.

### 3.3.3 ANREGUNG DURCH EINE CHEMISCHE REAKTION

Seltener vorzufinden sind chemische Laser. Hierbei kommt es zu einer kontrollierten chemischen Reaktion im Lasermedium. Dazu werden zwei in der Regel gasförmige Reaktionsstoffe in eine Kammer (worin auch das Laserlicht entsteht) eingeleitet, welche dann zu einem neuen Molekül reagieren, wobei normalerweise ein nicht eingebundenes Atom übrig bleibt. Die Reaktion ist dabei exotherm, es wird also Energie freigesetzt. Das neu entstandene Molekül hat diese freigesetzte

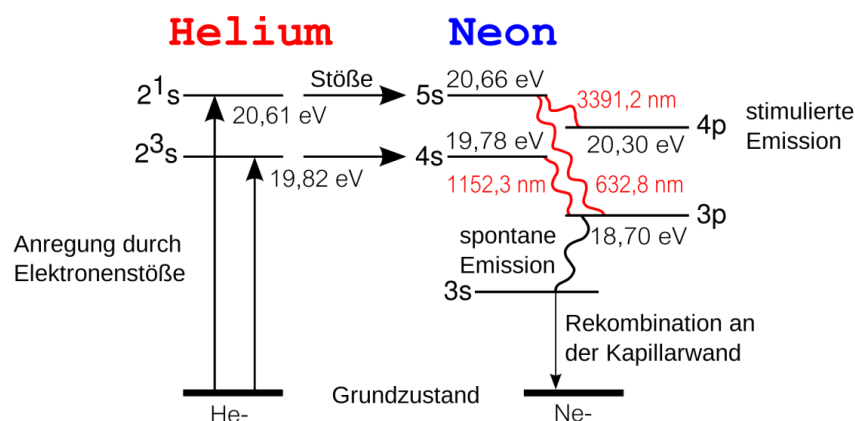


Energie in Form von Vibrationsenergie gespeichert. Dabei haben die einzelnen Atome im Molekül eine winzige mechanische Schwingung. Somit ist das neu entstandene Molekül angeregt. In diesem angeregten Molekül entsteht auch die Laserstrahlung durch die stimulierte Emission. Dieses Molekül kann aber auch als indirekter Anreger fungieren. Dabei ist der Laser geströmt, es kommen also immer neue Reaktionsgase nach und die reagierten Stoffe werden gleichzeitig nach der Reaktion abgeleitet.

### 3.3.4 INDIREKTE AN- UND ABREGUNG

Bei Gaslasern ist es nicht selten, dass dieser indirekt angeregt ist. Beispiele dafür sind der Kohlendioxidlaser und der Helium-Neon Laser. Man spricht hierbei auch von resonanter Energieübertragung. Dabei wird die Pumpenergie nicht direkt dem laseraktiven Stoff zugeführt, sondern in erster Linie einem beigemischten Gas, deren Moleküle beziehungsweise Atome die aufgenommene Energie sehr lange aufrechterhalten können. Solche gasförmigen Verbindungen, respektiv Atome, sind zum Beispiel  $N_2$ -Moleküle oder Helium-Atome. Diese Teilchen werden dabei natürlich angeregt und befinden sich auf einem höheren Energieniveau. Diese kann sogar in Form von Vibrationsenergie gespeichert sein. Die nun angeregten Teilchen können dabei diesen angeregten Zustand sehr lange aufrechterhalten, da spontane Übergänge und Emission physikalisch nicht möglich sind. So dienen die beigemengten Teilchen als eine Art Zwischenenergiespeicher. Die Teilchen im angeregten Zustand geben ihre Energie irgendwann in einer Kollision mit einem laseraktiven Teilchen an dieses weiter. Dabei ist es sehr wichtig, dass die angeregten Energiestufen der beiden kollidierenden Teilchen möglichst nahe beieinander liegen, denn die nicht übertragene Energie, aufgrund der Energiestufendifferenz, geht als unbrauchbare Wärme verloren. Es können auch zwei verschiedene Energieportionen zwischen den laseraktiven Teilchen und beigemengten energiespeichernden Teilchen übertragen werden, falls die beigemengten Teilchen auf zwei verschiedene angeregte Niveaus angeregt werden können.

Das gleiche Prinzip der Energieübertragung kann auch dazu angewandt werden, dass die laseraktiven Teilchen, bei einem Vierniveausystem oder Mehrniveausystem, ihre nach der Abgabe eines Photons Energie so an einen anderen beigemengten Stoff abgeben, um von der vierten Energiestufe in den Grundzustand zurückzukehren.



Hier sieht man das Energieschema eines Helium-Neon-Lasers, wobei das Helium erst angeregt (hier zwei mögliche Anregungsenergien) wird und seine Energie schließlich über einen Stoß mit einem Neon-Atom indirekt an diesen überträgt.

### 3.3.5 RELAXION AN GLASWAND UND KAPILLARRÖHRCHEN

Zur Relaxion des laseraktiven Stoffes oder des beigemengten Stoffes in Form von indirekter Abregung ist es in einem Gaslaser oft so gelöst, dass diese Teilchen ihre Energie durch Stöße mit der Glaswand des Glasgefäßes an diese wieder abgeben, um wieder in den Grundzustand zurückzukehren. Dazu kann in einem Gaslaser, insbesondere mit Hohlkathoden ein Kapillarröhrchen vorhanden sein. Dieses Kapillarröhrchen ist ein Röhrchen, welches sich im Inneren auf der Mittelachse des zylindrischen Glasgefäßes befindet. Dabei ist es an einem Ende des Gefäßes angegossen und ragt in den Hohlraum hinein. Durch das Röhrchen bildet sich beim Betrieb der Laserstrahl aus, so stört das Röhrchen den Laserstrahl nicht. Auch dieses Kapillarröhrchen dient auf die gleiche Weise zur Relaxion der Teilchen.

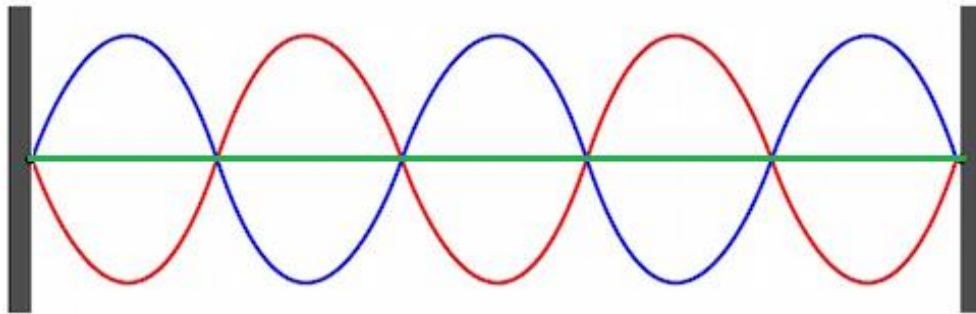
### 3.3.6 VERLUSTE

Da im Laser die meiste, vor allem bei mit Lampen gepumpten Lasern, beziehungsweise ein Großteil der Energie gar nicht in den Laserstrahl umgewandelt wird, und durch das restliche, nicht anregende Spektrum, sowie durch strahlenlose Übergänge, in Form von Hitze verloren geht, ist eine Kühlung des Lasermediums nötig. Diese Kühlung ist bei flüssigen und gasförmigen Lasermedien wie bereits erklärt, in der Regel durch das Einbinden von Kühlschnecken in einem geströmten System ausgeführt. Bei anderen Lasern wird die Kühlung auch oft durch Übertragen der Wärme auf eine zirkulierende Flüssigkeit ausgeführt. Aber auch das Übertragen auf Metallkörper mit Kühlrippen ist besonders bei Lasern kleinerer Leistung üblich. Dabei stellt die durch die Kühlrippen vergrößerte Fläche eine bessere Wärmeübertragung an die Luft dar.

## 3.4 LASERRESONATOR

Die stimulierte Emission wird durch mehrere spontane Emissionen ausgelöst. So vermehren sich diese Photonen in einer Kettenreaktion. Die sich vermehrenden Photonenlawinen haben allerdings alle eine andere Richtung, aufgrund der zufälligen Emissionsrichtung der auslösenden spontanen Emission. So würden diese Photonenlawinen das Lasermedium in allen Richtungen verlassen (falls das Lasermedium-Gefäß, bei Gaslasern durchsichtig ist) und es würde allerdings keine Laserstrahlung geben. Um nun daraus einen extrem gebündelten Laserstrahl zu generieren, ist der optische Laserresonator nötig. Beim optischen Resonator ist jeweils ein Spiegel an jeder Endseite des Lasermediums platziert. Diese sind parallel und nach innen hin, wo sich das Lasermedium (egal welchen Aggregatzustandes) befindet, reflektierend. So kommt es, dass beim Betrieb vom Laser nur die sich vermehrenden Photonenlawinen, die sich genau auf der Längsachse des Lasers bewegen und senkrecht auf die Spiegel treffen, im Lasermedium gehalten werden. Diese Lawinen werden dann in sich hinein reflektiert und passieren wieder das Lasermedium, werden dann am anderen Spiegel wieder in sich hinein reflektiert, .... Dieser Prozess geht dann immer so weiter. Eine immer (auf beiden Seiten) in sich hinein reflektierende elektromagnetische Welle, wird als stehende Welle bezeichnet. Hierbei entsteht durch die Interferenz eine spezielle resultierende Welle, deren Nullpunkte (dort wo sich die Welle auf der Nulllinie befindet), hier Knotenpunkte genannt, an Ort und Stelle stehen bleiben und die Auslenkungen (auf eine positive Amplitude folgt immer eine negative und auf eine negative Amplitude folgt immer eine positive) sich periodisch von Null bis auf eine gewisse positive, beziehungsweise negative Amplitude vergrößern und dann wieder auf null verkleinern und sich danach wieder auf die gegenteilige Amplitude vergrößern. Dann verkleinern sich diese wieder auf null und der ganze Prozess wiederholt sich erneut. Dieses Phänomen der stehenden

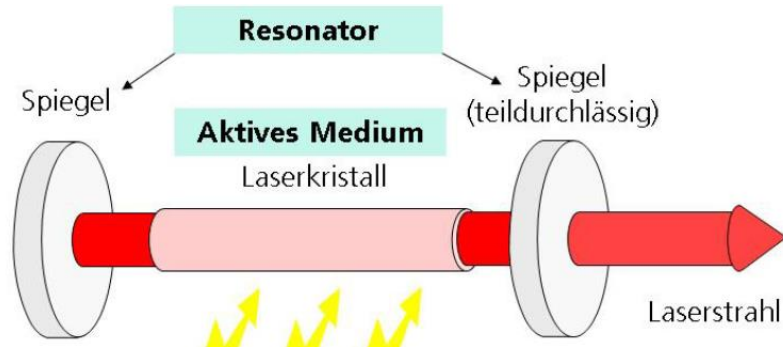
Welle tritt nur bei bestimmten Wellenlängen oder bei multiplen dieser Frequenz im Resonator auf. Diese Frequenz wird von dem Resonator festgelegt, sprich Resonatorart und Spiegelabstand.



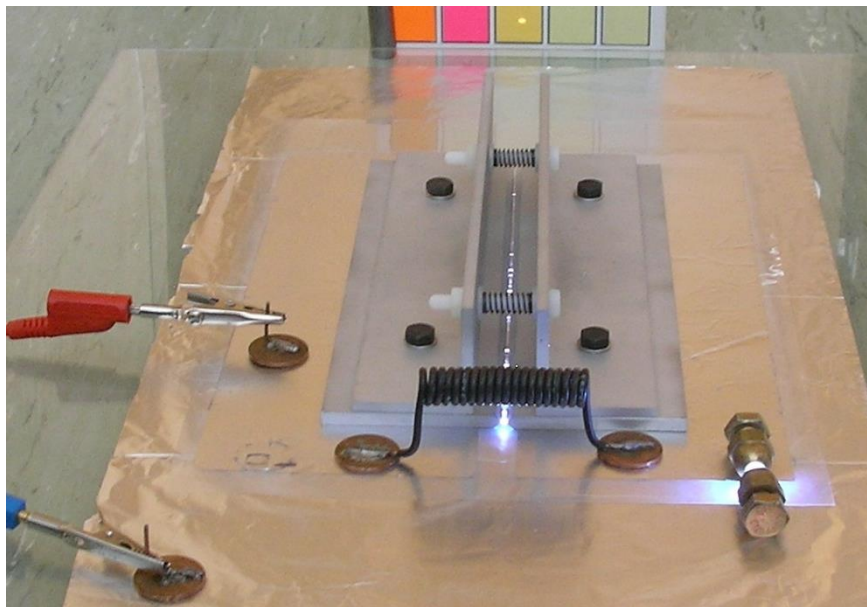
Das Schema zeigt eine stehende Welle zwischen den Resonatorspiegeln zu zwei verschiedenen Zeitpunkten dar (rote und blaue Welle). Die Punkte, an denen sich die rote und die blaue Linie treffen, sind die Knotenpunkte, welche ortsfest sind. Die Nulllinie ist dabei grün dargestellt. Die Amplituden der blauen Welle nehmen zeitlich ab zur Nulllinie und schwellen dann negativ an. So wäre dies nun die rote Welle, welche dann wieder abnimmt und wieder in die blaue Formation anschwillt.

Alle Photonenlawinen, die sich auf einer anderen Linie bewegen, verlassen den Laser als Verluststrahlung. Auch Lawinen, die Spiegel nicht genau senkrecht treffen, gehen entweder sofort nach einer Reflexion oder nach mehreren Reflexionen (deren Anzahl von dem Auftreffwinkel abhängt, umso senkrechtnäher dieser ist, umso öfter wird die Lawine reflektiert) an den Resonatorspiegeln nach außen hin verloren. Da sich am Anfang dann doch sehr viele spontane Emissionen ereignen, ist es sehr wahrscheinlich, stehende Wellen zu generieren. Die Photonenlawinen, die immer in sich hinein reflektiert werden, stimulieren natürlich auch auf dem Weg durch das Lasermedium weitere Elektronen des laseraktiven Stoffs dazu neue Photonen mit den gleichen Eigenschaften zu erzeugen. So nehmen diese Photonenlawinen ständig zu und sind schon bald deutlich in der Überzahl. Um nun daraus einen Laserstrahl zu erzeugen, ist es erforderlich, dass einer der beiden Spiegel teildurchlässig ist. Dieser reflektiert das auftreffende Licht also teilweise, lässt aber gleichzeitig auch einen Teil des Lichtes durch, welcher bei fast allen Lasern typischerweise deutlich kleiner ist als der reflektierende Teil. Das genaue Verhältnis hängt dabei von der Verstärkungsfähigkeit des Lasermediums, die von dem jeweiligen laseraktiven Stoff abhängt, und den Verlusten ab. Die durch den teildurchlässigen Spiegel entkommene elektromagnetische Strahlung ist die finale Laserstrahlung. Trotz dem größeren reflektierenden Teil, nehmen die gewünschten Photonenlawinen nicht unendlich weit zu, da die Pumpleistung, sowie Verluste diese begrenzen. Der reflektierende Effekt des Resonators muss groß genug sein, um die Laserschwelle zu überschreiten. Dazu müssen die Photonenlawinen durch die Reflektoren so oft durch das Lasermedium geworfen werden, dass diese die meisten Elektronen auf dem Laserniveau stimulieren und diese Photonenlawinen Überhand gewinnen gegenüber anderen Photonenlawinen. Um dies zu ermöglichen, darf der durch den teildurchlässigen Spiegel ausgekoppelte Teil auch nicht zu groß sein. Nur unter diesen Bedingungen, kann der Laser Laserstrahlung erzeugen. Es gibt allerdings auch Feststofflaser, die ohne optischen Resonator auskommen. Dies sind die Superstrahler. Der Superstrahler ist genau wie ein Laser aufgebaut, nur mit dem Unterschied, dass das Lasermedium, ein laseraktiver Kristall, in eine Achse sehr lang gebaut ist, so dass Photonenlawinen, die sich in diese Richtung bewegen, sich so stark vermehren, dass am Ende Laserstrahlung austritt. Es gibt auch Superstrahler, welche ein Gas als Lasermedium besitzen. Die schlechteren Eigenschaften der

Laserstrahlung, sowie deren festen Leistung, sind jedoch große Nachteile gegenüber Lasern mit Resonator. Nebenbei gibt es auch noch Laser mit nur einem Spiegel auf einer Seite. Der optische Resonator muss im Laser sehr genau ausgerichtet sein, um die optimale Laserstrahlung zu erzeugen, da der Laserresonator viele Eigenschaften der finalen Laserstrahlung bestimmt. Sogar die Temperatur der Spiegel hat einen Einfluss auf die Eigenschaften der Laserstrahlung.



Die grundsätzliche Anordnung des optischen Resonators mit den beiden Spiegeln.



Experimentaufbau eines offenen Stickstoff-Superstrahlers, welcher die Luft als Lasermedium nutzt. Der Superstrahler benötigt keine Endspiegel, um den Laserstrahl zu erzeugen. Dieser Superstrahler erzeugt nach beiden Seiten hin einen Laserstrahl, wovon einer auf der hinteren gelben Fläche zu sehen ist

### 3.4.1 SPIEGEL UND TEILDURCHLÄSSIGE SPIEGEL

Normale Spiegel, wie wir sie Zuhause kennen, sind Glasplatten, welche mit einer sehr dünnen Aluminium- oder sogar Silberschicht beschichtet sind. Diese Schicht ist dabei extrem glatt, damit das auftreffende Licht nicht gestreut wird. Bei Lasern muss der Spiegel so viel wie möglich reflektieren und geringe Absorptionen aufweisen. Hier kommen als Resonatorspiegel jedoch meist Metallspiegel zum Einsatz. Dabei ist die reflektierende Schicht sehr glatt poliert. So glatt, dass die Höhenunterschiede dieser Metalloberfläche kleiner sind als die Wellenberglänge des zu reflektierenden Lichtes. Bei der Fertigung von Resonatorspiegeln liegt die Toleranz bei nur einigen

wenigen Nanometern. Die Spiegel sind aus Metall, auch um die entstehende Hitze besser ableiten zu können, da Metall die Wärme gut leitet. Dazu sind die Spiegel oft an einen Wasserkühlkreislauf angeschlossen. Die Resonatorspiegel sind entweder aus einem einzigen Aluminium-, Molybdän-, Kupfer-, Silizium- oder sogar Silber- oder Goldstück gefertigt. Die Resonatorspiegel können aber auch je nach dem mit einem solchen Metall beschichtet sein, wobei ein anderes Metall als Träger genutzt wird. Bei den Resonatorspiegeln ist meist eine Korrosionsschutzschicht aufgetragen und sind auch noch mit anderen Metallen, wie zum Beispiel Nickel, beschichtet, um den Spiegel beständiger gegen äußere Einflüsse zu machen. Es existieren auch sogenannte dielektrisch beschichtete Spiegel. Hierbei ist in der Regel ein transparentes Material, wie Quarzglas, Kristalle, etc. auf die Metalloberfläche aufgetragen. Das auftreffende Licht wird beim Auftreffen auf diese Schicht teilweise reflektiert und zum anderen Teil durchgelassen. Das durchgelassene Licht wird nun von der Metalloberfläche in die gleiche Richtung reflektiert. Dabei interferieren diese reflektierten Lichtstrahlen miteinander, da das auf der Metalloberfläche reflektierte Licht aufgrund der Dicke der transparenten Schicht phasenverschoben ist. So spielt die Dicke der transparenten Schicht auch eine wichtige Rolle. Der reflektierte Strahl kann durch die Interferenz verstärkt oder ausgelöscht werden, dieses bestimmt die Dicke der transparenten Schicht. Durch die zusätzliche Reflexion der transparenten Schicht, wird der Metallspiegel unterstützt und die Effektivität erhöht, so können hiermit bis zu fast 99,9% des eingestrahnten Lichtes reflektiert werden. Bei normalen Metalloberflächen liegt dieser Anteil in der Regel bei 92%-97%.



Für den Laser geeignete Kupferspiegel verschiedener Größen.

Der teildurchlässige Spiegel lässt einen Teil des Lichtes durch und reflektiert den anderen Teil. Der teildurchlässige Spiegel arbeitet auch mit dieser Technik. Hierbei sind mehrere Schichten von transparenten Materialien aufeinander geschichtet. Diese Schichten haben dabei alle eine andere Dichte, welche von gering bis hoch, beziehungsweise umgekehrt nacheinander folgend angeordnet ist. Das auftreffende Licht wird auch hier teilweise reflektiert und teilweise durchgelassen. Das durchgelassene Licht wird beim Eintritt in die nächste Schicht wieder aufgrund der anderen Dichte teilweise reflektiert und teilweise durchgelassen. So geht das immer weiter, bis die letzte Schicht erreicht ist. Das reflektierte Licht interferiert auch hier wieder. Das Licht, was die letzte Schicht verlässt ist das durchgelassene Licht. Das Verhältnis vom durchgelassenen und reflektierten Licht wird von der Wellenlänge, Materialauswahl, Auftreffwinkel sowie der Anzahl der Schichten



bestimmt. Bei den im Laser eingesetzten teildurchlässigen Spiegeln ist der reflektierende Teil in der Regel größer als der durchlässige Teil.

Eine weitere Möglichkeit des teildurchlässigen Spiegels ist eine sehr dünne Metallbeschichtung eines transparenten Trägermaterials. Diese Metallschicht ist dabei maximal 50 Mikrometer dick. Auch hier gelangt ein Teil des Lichtes durch die extrem dünne Metallschicht.



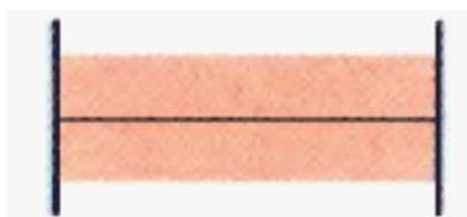
Verschiedene beschichtete teildurchlässige Laserresonator-Spiegel.

### 3.4.2 RESONATORANORDNUNGSARTEN

Es gibt mehrere verschiedene Art und Weisen, wie die Form der Spiegel des optischen Resonators aussehen kann. Der Resonator soll dabei stabil sein, was besagt, dass die hin- und herlaufenden Photonenlawinen den Resonator aufgrund dessen Form nicht verlassen können (bei optimalem Linienverlauf), egal wie oft sie hin- und herlaufen, abgesehen von dem ausgekoppelten Teil der Lawinen. Mit diesen verschiedenen Anordnungen, können das Ausnutzungsvolumen des Lasermediums, sowie die Laserstrahleigenschaften bestimmt werden. Im folgenden werden die verschiedenen gängigen stabilen Resonatoren aufgezählt:

#### 3.4.2.1 PLANARER RESONATOR

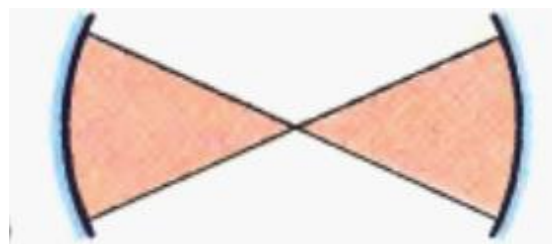
Der planare Resonator ist die einfachste Form eines optischen Resonators und besteht aus zwei runden planparallelen (zwei parallelen Flächen) Spiegeln. Die Spiegel sind beim planaren Resonator flach ausgeführt. Hierbei sind die beim Betrieb entstehenden stehenden Wellen genau der Längsachse nach orientiert. Das Ausnutzungsvolumen des Lasermediums entspricht dabei dem zylindrischen Zwischenraum der beiden Spiegel.



Querschnitt eines planaren Resonators, wobei das Ausnutzungsvolumen orange und ein stabiler Beispiel-Strahlenverlauf als schwarze Linie dargestellt ist.

### 3.4.2.2 KONZENTRISCHE RESONATOREN

Hierbei sind die beiden seitlich angebrachten Spiegel gewölbt. Dabei entspricht die Wölbung der Gegenform einer Kugel, dessen Radius genau dem halben Abstand der beiden Resonatorspiegel entspricht. So bildet der Ausnutzungsraum hier zwei Kegel, deren Spitzen in der Mitte des Resonators aufeinandertreffen, deren Grundfläche denen der Fläche der Spiegel entspricht. Dabei ergibt sich eine Art Brennpunkt genau in der Mitte des Resonators. Somit ist die Ausnutzung des Raums zwischen den Resonatorspiegeln zwar kleiner als die bei dem planaren Resonator. Die sich der Längsachse nach bewegendenden Photonenlawinen können nur, wenn sie genau in der Mitte der Spiegel auftreffen, eine stehende Welle generieren. Diese Möglichkeit existiert bei jedem hier genannten Resonator. Zusätzlich können Photonenlawinen, die in einer optimalen Bahn, mit der Bedingung, dass diese durch den Brennpunkt verläuft, auf die Spiegel auftreffen auch stehende Wellen erzeugen. Beim konzentrischen Resonator müssen sich die gewünschten Photonenlawinen nicht unbedingt auf der Längsachse bewegen.

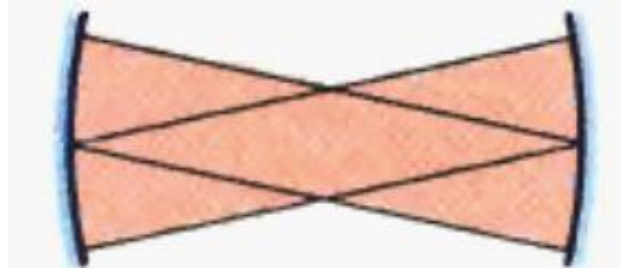


Querschnitt eines konzentrischen Resonators, wobei das Ausnutzungsvolumen orange etwas kleiner ist, als beim planaren Resonator. Die schwarzen Linien sind zwei mögliche stabile Strahlenverläufe.

### 3.4.2.3 KONFOKALE RESONATOREN

Konfokale Resonatoren sind eigentlich genau so, wie konzentrische Resonatoren. Der Radius der Wölbung der Spiegel entspricht allerdings einer Kugel mit dem doppelten Radius, was dem Abstand der Resonatorspiegel entspricht. Die Raumausnutzung ist ähnlich der des konzentrischen Resonators, nur mit dem Unterschied, dass die beiden Kegel halb ineinander verschmolzen sind, so dass sich deren Spitzen in der Mitte der Grundfläche des anderen Kegels befinden. Dort, wo die beiden Kegel aneinanderstoßen, bildet sich ein Brennring. Hierbei ergibt sich eine größere Raumausnutzung. Die in einer geeigneten Bahn auf den Resonatorspiegel auftreffenden Photonenlawinen, werden in sich zurückreflektiert, passieren dabei den Brennring und werden dann auf das Zentrum des gegenüberliegenden Spiegels auftreffen und dann im gleichen Winkel, wie sie aufgetroffen ist, wieder durch die gegenüberliegende Stelle am Brennpunkt auf die gegenüberliegende Stelle (in Bezug auf die vorletzte Reflektion) im Ausgangsresonatorspiegel reflektiert. Dabei ist die Distanz zum Zentrum auch die gleiche, wie die bei der vorletzten Reflektion. Nun werden die Photonenlawinen wieder in sich zurück reflektiert, laufen den ganzen Weg zurück und pendeln so hin und her. So entstehen auch hier stehende Wellen.

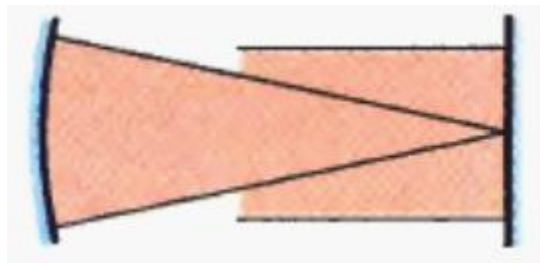
Es gibt auch noch sphärische Resonatoren noch größeren oder etwas kleinerem Ausgangsradius. Das Prinzip bleibt dabei aber das gleiche.



Querschnitt eines konfokalen Resonators mit einem Wölbungs-Radius der der Resonatorlänge entspricht. Auch hier ist das Ausnutzungsvolumen orange dargestellt. Die beiden schwarzen V sind mögliche stabile Strahlenverläufe, wobei die Spitze in der Mitte eines Spiegels und die beiden anderen Enden des V an dem gegenüberliegenden Spiegel liegen.

#### 3.4.2.4 HEMISPHÄRISCHE RESONATOREN

Hemisphärische Resonatoren haben zwei Spiegel. Der eine Spiegel ist eben und der andere Spiegel ist negativ gewölbt mit dem Radius entsprechend der Abstandslänge der beiden Spiegel. Hier bildet sich eine kegelförmige Raumausnutzung, wobei sich die Basisfläche auf dem gewölbten Resonatorspiegel befindet und die Spitze in der Mitte des flachen Spiegels befindet. Dort bildet sich ein Brennpunkt. Hier werden die Photonenlawinen, von der Mitte aus des flachen Spiegels kommend auf dem gewölbten Spiegel in sich zurück geworfen. Dann werden sie wieder auf den Mittelpunkt des flachen Spiegels auftreffen und dort auf den gegenüberliegenden Punkt auf dem gewölbten Spiegel, in Bezug auf die letzte Reflexion, reflektiert. Schließlich wird er dort wieder in sich zurück reflektiert, und läuft die ganze Bahn periodisch wieder und wieder. Nun hat man auch hier eine stehende Welle generiert.

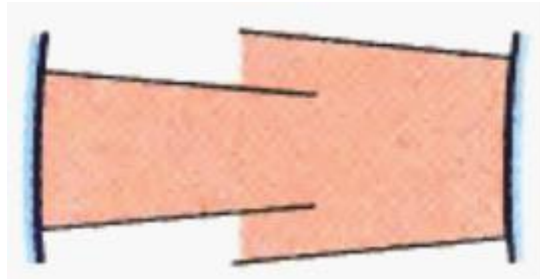


Zweidimensionale Darstellung eines hemisphärischen Resonators, wobei das schwarze V einen möglichen stabilen Strahlenverlauf darstellt. Das Ausnutzungsvolumen beschränkt sich allerdings auf das Innere dieses (im dreidimensionalen) Kegels.

#### 3.4.2.5 KONKAV-KONVEX RESONATOREN

Bei konkav-konvex Resonatoren, befindet sich auf der einen Seite ein negativ und auf der anderen Seite ein positiv (nach innen, zum Lasermedium) gewölbter Spiegel. Der Radius der Ausgangskugel der negativen Wölbung ist größer als der Abstand beider Spiegel. Die Ausgangskugel des positiv gewölbten Spiegels auf der gegenüberliegenden Seite entspricht der Abstandsdistanz minus den Radius der Ausgangskugel des negativ gewölbten Spiegels. Der Ausnutzraum ist so wie beim hemisphärischen Resonator, nur dass der Kegel auf der Seite mit der Spitze (hier beim positiv gewölbten Spiegel) gestutzt ist. Auf dem positiv gewölbten Spiegel bildet sich ein Brennring. Hierbei werden die Photonenlawinen, die in einer optimalen Bahn außerhalb vom Zentrum auf den negativ gewölbten Spiegel auftreffen, in sich zurückreflektiert und treffen dann auf den Brennring des anderen Spiegels auf und werden dann von dort aus wieder in das Zentrum des negativ gewölbten

Spiegels reflektiert, welcher die Photonenlawine dann auf den gegenüberliegenden Punkt im Brennring reflektiert. Die Photonenlawinen werden dann von dort aus auf den gegenüberliegenden Punkt des negativ gewölbten Spiegels, bezüglich der ersten Reflexion, reflektiert. Auch hier wird der Strahl in sich zurückgeworfen und eine stehende Welle entsteht.



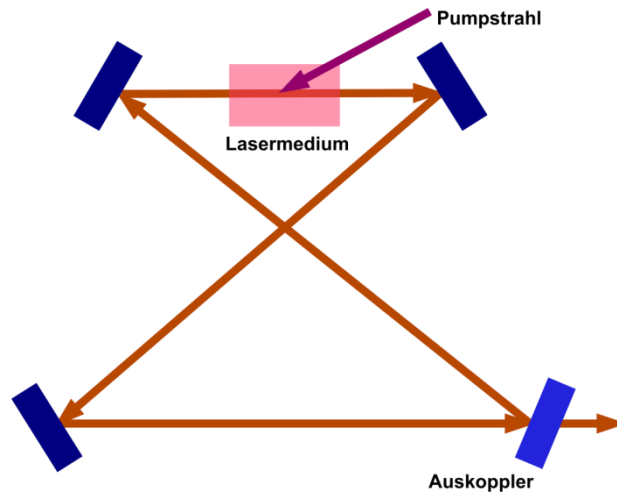
Beim Konkav- Konvex- Resonator ist eigentlich alles gleich, mit dem Unterschied, dass der Kegel gestutzt ist. Bei dieser Abbildung ist der Beispielstrahlenverlauf allerdings nicht zu Ende geführt.

Auch wenn die ausgekoppelte Strahlung bei den letzten vier genannten Reflektoranordnungsarten, zusammenläufig oder auseinanderläufig ist, kann diese wieder mit Linsen zu einem gerade verlaufenden Strahl gerichtet werden.

#### 3.4.2.6 RINGRESONATOR

Beim Ringresonator wird keine stehende Welle generiert, sondern eine immer im Kreis weiterläufige Photonenlawine. Hierbei sind vier Spiegel in einem Viereckmuster angebracht, wobei sich die Spiegel in den Ecken des Viereckmusters befinden. Zwischen zwei Spiegel an einer Außenseite des Viereckmusters, befindet sich das laseraktive Medium. Die Spiegel können auf zwei Art und Weisen ausgerichtet sein.

Die Spiegel können so ausgerichtet sein, dass die aus dem laseraktiven Medium kommenden Photonenlawinen auf einen Spiegel, der sich in der Längsachse mit dem Lasermedium befindet, auftreffen und dann von dort aus diagonal durch das Viereckmuster zum diagonal liegenden Spiegel reflektiert wird. Von dort aus wird der Strahl dann parallel zum Lasermedium an einer Außenseite des Viereckmusters entlang auf den Nachbarspiegel geworfen und dann von dort diagonal über Kreuz auf den letzten Spiegel geworfen und von dort aus wieder durch das Lasermedium reflektiert, und so weiter. So entsteht eine ewig weiterläufige Bahn, dessen Form zwei mit den Spitzen aneinander kommende Dreiecke bildet. Auch konfokale Resonatoren können bei einem bestimmten Wölbungsradius einen solchen Strahlenverlauf erzeugen.



Aufbau und Strahlenverlauf eines Ringresonators mit über Kreuz verlaufendem Strahlenverlauf.

Die vier Spiegel können aber auch so ausgerichtet sein, dass die aus dem laseraktiven Medium kommenden Photonenlawinen über alle vier Spiegel um  $90^\circ$  reflektiert werden, so dass sich diese in einer viereckigen Bahn, dem Viereckmuster nach, unendlich weiterlaufen.

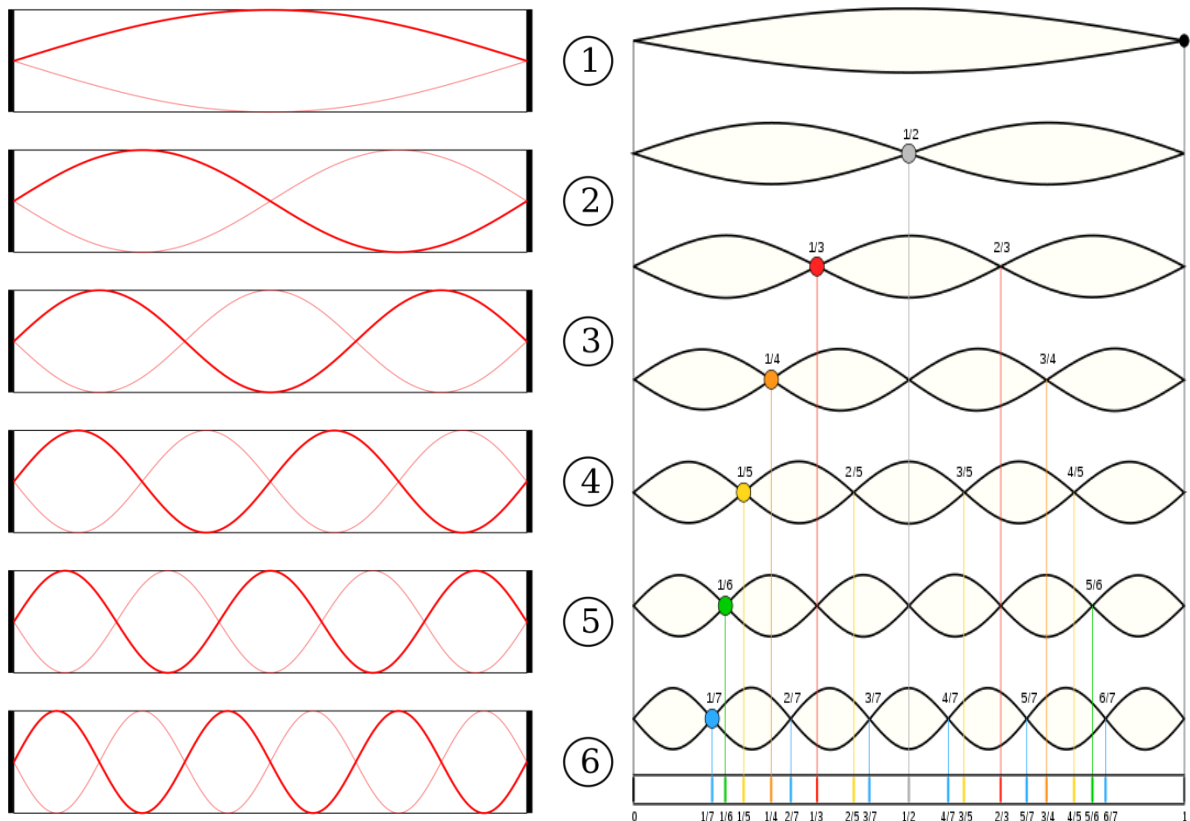
Auch beim Ringresonator ist einer der vier Spiegel ein teildurchlässiger Spiegel.

### 3.4.3 MODEN

#### 3.4.3.1 LONGITUDINALE MODEN

Longitudinale Moden sind die Frequenzmöglichkeiten, bei der es zu einer perfekten stehenden Welle kommt. Bei diesen Moden werden diese Frequenzen besonders verstärkt. Diese Moden werden vom Abstand der beiden Resonatorspiegel bestimmt. Bei passendem Abstand der Spiegel, werden die Photonenlawinen, außer bei Ringresonatoren, immer in sich hinein reflektiert und es bildet sich eine stehende Welle, welche im Raum feste Knotenpunkte besitzt. Diese Knotenpunkte sollen zwischen den Resonatorspiegeln bei den longitudinalen Moden in Längsachse so verteilt sein, dass sich zwei davon an den Spiegeln befinden. So dass die stehende Welle dazwischen eine auf- und abschwingende Auslenkung aufweist. Bei allen anderen möglichen longitudinalen Moden, befinden sich ein oder beliebig viele dieser Knotenpunkte zwischen diesen Außenknotenpunkten. Dabei haben alle Knotenpunkte den gleichen Abstand zueinander. Die longitudinalen Wellen sind also Wellenlängen, wobei die Länge des Wellenbergs, respektiv des Wellentals oder ein vielfaches davon, der exakten Länge des Resonators entspricht. Es ist auch öfters der Fall, dass sich mehrere longitudinale Moden im Laser verstärken, wenn diese Wellenlängen einem dieser Moden entsprechen. Bei diesen Moden tritt eine perfekte stehende Welle auf. Der Abstand der Resonatorspiegel wird also von der Wellenlänge des produzierten Laserlichtes so gewählt, um eine optimale Verstärkung durch konstruktive Interferenz zu erreichen. Nebenbei werden viele elektromagnetische Wellen anderer Frequenz durch destruktive Interferenz verringert. In Lasern können Moden mit stehenden Wellen,

welche mehrere hunderttausend dieser Knotenpunkte besitzen auftreten. Bei einem Laser ist es meist unerwünscht, dass mehrere verschiedene dieser Moden gleichzeitig im Laserresonator entstehen, da diese auch miteinander interferieren können. Also kann es auch zur destruktiven Interferenz kommen.



Links sind die sechs ersten longitudinalen Moden einer stehenden Welle eingetragen. Im rechten Bild sind zusätzlich die Abstände der Knotenpunkte in Bezug auf den Resonatorabstand eingetragen und unten verglichen.

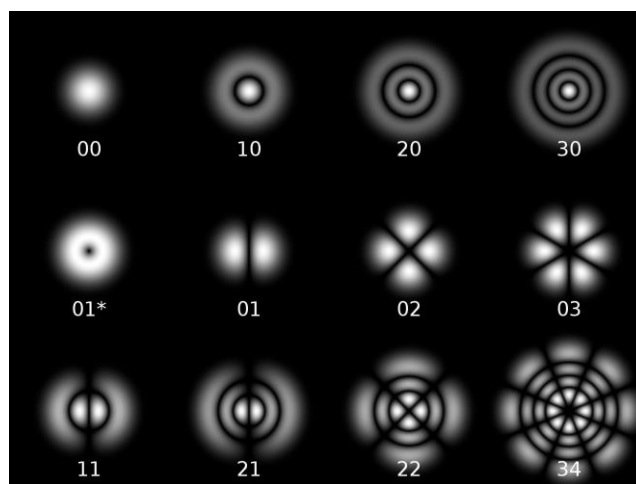
### 3.4.3.2 TRANSVERSALE MODEN

Die transversalen Moden beschreiben hingegen das auftretende Interferenzmuster, durch die Interferenz des Laserlichtes im Querschnitt der Längsrichtung (Ausbreitungsrichtung) im Resonator. Dabei spielen die Form des Resonators, sowie die Form der Spiegel eine große Rolle. Die elektromagnetischen Wellen sind nicht immer senkrecht zur optischen Achse des Resonators (Verlaufsachse der hin- und herlaufenden Photonenlawinen) in Form einer stehenden Welle orientiert, sondern verlaufen auch in andere Richtungen, was hauptsächlich durch Beugungen bei der Reflektion von den Photonenlawinen an den Spiegeln verursacht wird. Diese Beugungen sind natürlich Verluste des Lasers. So gibt es auch viele Lichtstrahlen, die schräg durch den Resonator verlaufen, in Bezug auf die optische Achse. Da die Photonenlawinen immer im gleichen Schema auf die gleiche Weise reflektiert werden, treten auch immer die gleichen Beugungen an den Spiegeln auf so werden auch immer in dem gleichen Schema Lichtstrahlen im Resonator verstreut. Diese Lichtstrahlen interferieren nun auch mit den hin- und herlaufenden Lichtstrahlen im Laserresonator durch Überlagern, da sich ihre Bahnen treffen und kreuzen. Da die gestreuten Lichtstrahlen schräg



zur laseroptischen Achse verlaufen und eine andere Weglänge zurückgelegt haben, als die hin- und herlaufenden Lichtstrahlen, sind diese etwas phasenverschoben zueinander, so treten manchmal konstruktive und manchmal destruktive Interferenzen auf. Auch die gestreuten Strahlen können sich verstärken und sogar eine stehende Welle bilden.

Wenn man nun einen Querschnitt (senkrecht zur Längsachse des Lasers) nimmt, treten durch diese Interferenz der stehenden und streuenden Wellen solche transversalen Moden auf, also Interferenzmuster. Dieses Interferenzmuster zeichnet sich auch in dem finalen Laserstrahl wieder und bildet somit deren Energieverteilung im Querschnitt des Laserstrahls. Da die Beugungen und auftretenden Moden von der Resonatorart abhängen, gibt es viele Möglichkeiten wie dieses Interferenzmuster aussehen kann. Bei einem Resonator mit gekrümmten runden Spiegeln, treten beispielsweise Muster auf, wobei sich typischerweise ein Zentrum in der Mitte befindet und sich darum mehrere Ringe befinden. Dieses Zentrum und die Ringe beschreiben dortige Wellenausschläge der stehenden Wellen. Diese Ringe nehmen zueinander langsam ab, da die Wellen verschoben sind und die Ausschläge dort geringer werden. Dort, wo sich keine Energie befindet, sind Knotenpunkte der stehenden Wellen. Dieses ringförmige Auf- und Abnehmen kommt zu Stande, da die einzelnen Lichtstrahlen im Querschnitt aufgrund ihrer Richtung einen Schub aufweisen, da der Querschnitt flach ist.

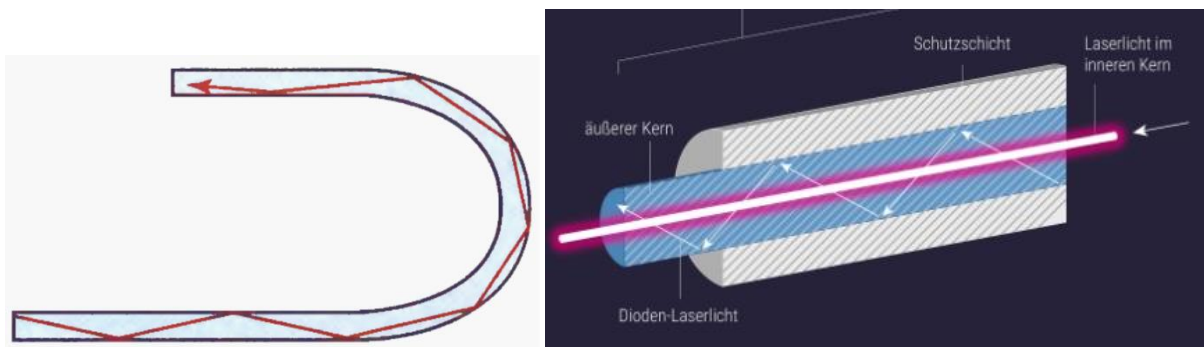


Verschiedene mögliche Interferenzmuster aus einem Laserstrahl.

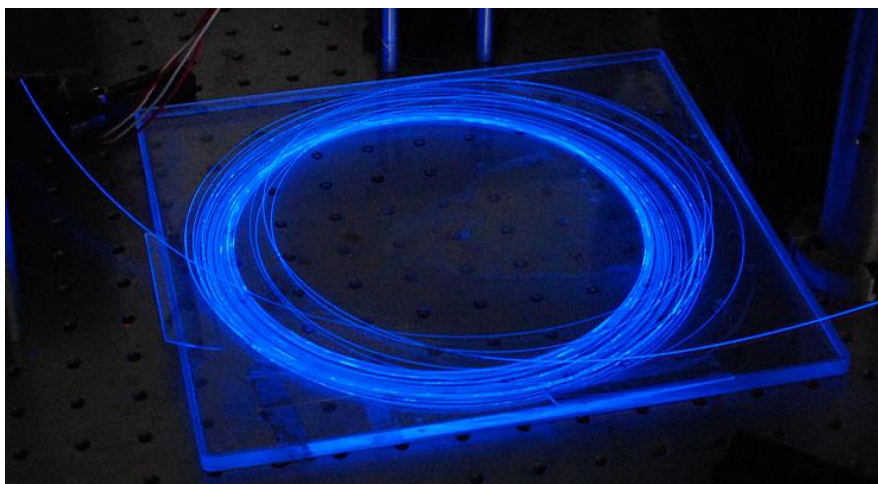
### 3.4.4 FASERLASER

Der Faserlaser ist eine besondere Form eines Feststofflasers und beherbergt einen eigenen optischen Resonator. Das Lasermedium bildet ein mehrerer Meter langer durchsichtiger, flexibler Draht. Dieser besteht aus einem Faser aus Quarzglas, mit einem Durchmesser von durchaus weniger als einem Millimeter, welcher nur in der Mitte mit dem laseraktiven Stoff dotiert ist. Der dotierte mittlere Bereich hat einen Durchmesser von nur wenigen Mikrometern. Dieser ist normalerweise außen mit einer durchsichtigen Kunststoffschicht beschichtet. Des weiteren kann die gesamte Faser mit einer Schicht ummantelt sein, welche von innen reflektierend ist. Das Pumpen des Faserlasers erfolgt an einem Ende des Drahtes in der Regel durch ein bis mehrere Laserdioden longitudinal. Der dotierte Kern des Faserlasers produziert nun sich vermehrende Photonenlawinen aufgrund des Prinzips der stimulierten Emission. Photonenlawinen, die sich der Längsachse nach bewegen nehmen rasch an

Photonen zu, wie beim Superstrahler. Da der laseraktive Faser genauso lichtleitend wirkt, wie ein Glasfaserkabel, werden auch Photonenlawinen, die mit einem geeigneten Winkel auf die Außenwand der Faser, aufgrund der Totalreflexion bei der Brechung, wieder in die Faser zurückreflektiert. Ist der Auftreffwinkel geringer als der Grenzwinkel, was vom Material abhängig ist, tritt das Phänomen der Totalreflexion auf beim Übergang vom Material mit einer höheren Dichte (Quarzglas) in ein weniger dichtes Material (Luft oder Kunststoff) und es gelangt kein Licht in das weniger dichte Material, beziehungsweise nach außen. So verlaufen diese Photonenlawinen im Zig-Zag durch die Faser und verstärken sich ebenfalls enorm. Photonenlawinen, die diesen Grenzwinkel überschreiten, gehen allerdings nach außen verloren. Trotzdem erreicht der Faserlaser durch seine lichtleitende Eigenschaft eine sehr große Lichtverstärkung durch stimulierte Emission und erreicht damit Wirkungsgrade, bezüglich der eingestrahlichten Pumpenergie und der Laserstrahlenergie von bis zu 85%. Die am anderen Ende austretende Laserstrahlung hat sehr gute Strahl-Eigenschaften. Durch diese guten Eigenschaften, findet der Faserlaser immer mehr Anwendung, insbesondere in der Industrie. Die beiden Enden des Faserlasers können zusätzlich mit Resonatorspiegeln ausgestattet sein. Auch die Länge der Faser von mehreren Metern lässt sich im praktischen Laser begrenzen, da dieser in der Mitte aufgerollt wird und die herausstehenden Enden zum Laser ausgerichtet werden.



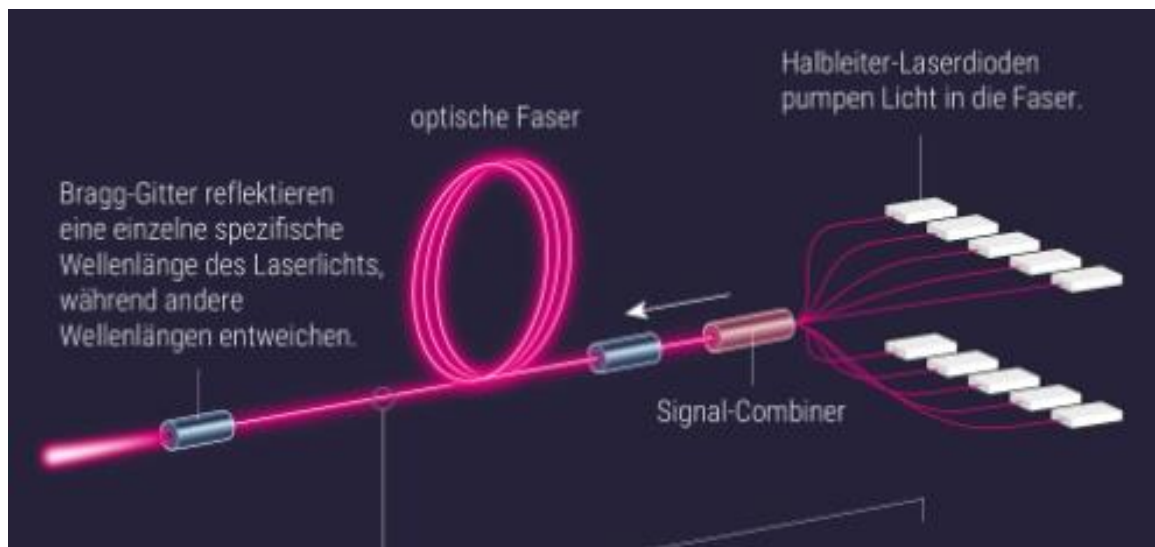
Das linke Bild zeigt einen Beispielstrahlenverlauf in einer Glasfaser, auf welchem Prinzip auch das des Faserlasers beruht. Man kann gut die lichtleitende Eigenschaft der Faser ausmachen. Im rechten Bild ist der Querschnitt einer laseraktiven Faser genau dargestellt. Dabei ist neben dem Zig- Zag verlaufenden Pumplicht auch das Laserlicht im Kern abgebildet.



Die platzsparend aufgewickelte laseraktive Faser eines Faserlasers im Betrieb.

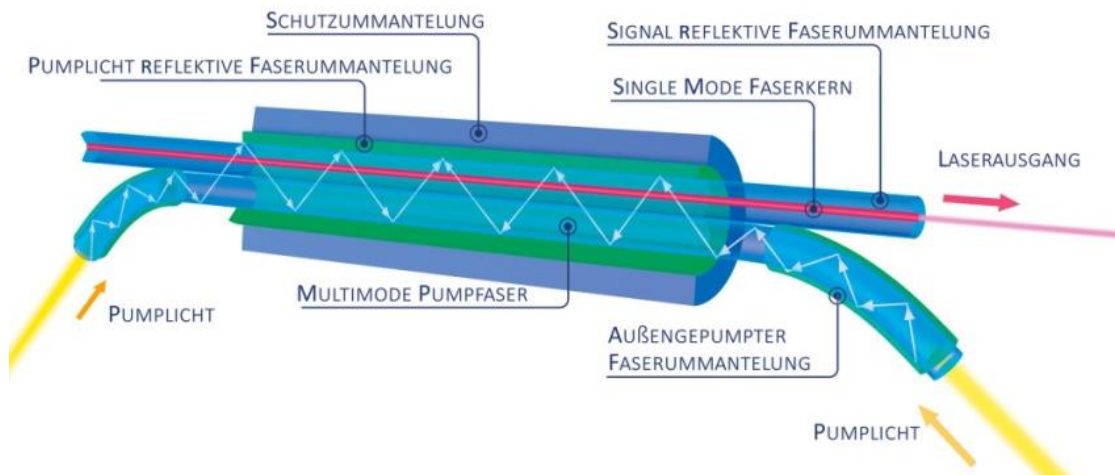
Mit dem Faserlaser ist es auch möglich spezielle Pumpmethoden zu verwenden, aufgrund der lichtleitenden Eigenschaft der Faser.

Das Pumpen einer laseraktiven Faser kann, wie erwähnt, über mehrere Laserdioden gleichzeitig erfolgen, wobei auch der einzelne Laserstrahl einer Pump-Laserdiode jeweils über ein Glasfaser zu einem Verbinder mit geringen Verlusten geleitet wird. In diesem Verbinder laufen alle Glasfaser, der jeweiligen Pumpdioden zusammen. Der Verbinder leitet diese Pumplaserstrahlen aus diesen einzelnen Glasfaser gebündelt in die laseraktive Glasfaser des Faserlasers. So kann mehr Pumplichtleistung longitudinal in den Faserlaser eingekoppelt werden.



Aufbau eines longitudinal mittels zehn Laserdioden gepumpten Faserlasers.

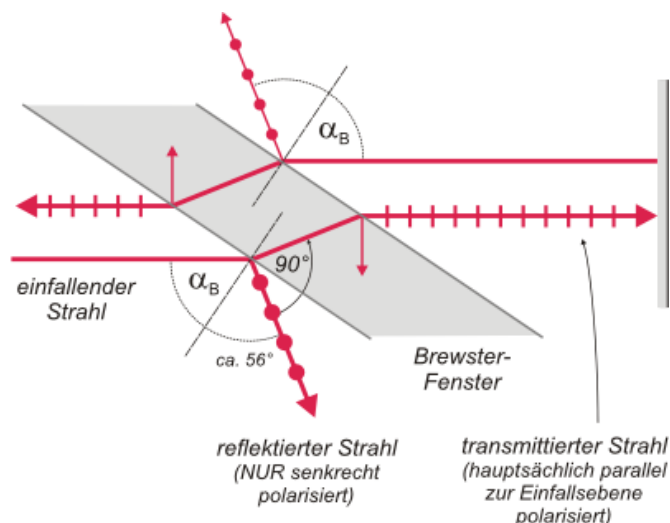
Eine weitere für Faserlaser besondere Methode ist eine transversale optische Pumpmethode des Faserlasers. Dazu verläuft hier eine Glasfaser parallel zur laseraktiven Faser in einer Hülle, wobei diese fest aneinander liegen und dort keine äußere Schicht aufweisen, welche eine andere optische Dichte besitzt. Diese Hülle ist innen hoch reflektierend. Durch die nicht laseraktive Faser wird in der Regel von beiden Seiten Pumplicht aus Laserdioden hineingeleitet. In der innen reflektierenden Hülle werden die seitlich aus der Glasfaser austretenden Pumplichtstrahlen wieder zurückgeworfen. So werden diese Pumplichtstrahlen in die Faser zurückgeleitet, da diese dort keine reflektierende Außenummantelung hat. Diese Strahlen können durch die gleiche optische Dichte der beiden Faser dann auch direkt in die laseraktive Faser übergehen. So verlaufen die Strahlen im Bereich mit der Hülle im Zig-Zag durch beide Fasern. Die Fasern sind also in dem Bereich zu einer Faser gekoppelt, wobei die äußere reflektierende Hülle die Strahlen in diesen Fasern behält. Dadurch durchläuft das Pumplicht auch die laseraktive Faser und pumpt somit den Faserlaser transversal, aufgrund des transversalen Zig-Zag Verlaufs der Strahlen.



Dieses Bild zeigt den Aufbau eines transversal gepumpten Faserlasers. Hierbei ist es so gelöst, dass sich die Pumpstrahlen, welche in einer Glasfaser fest an der laseraktiven Faser verlaufen, in beiden Fasern verteilen und den laseraktiven Kern der anderen Faser anregen, welcher Laserstrahlung erzeugt.

### 3.4.5 BREWSTER FENSTER

Brewster Fenster sind optische Elemente zur Polarisationsfilterung, welche in einem Laserresonator oft vorkommen können. Dabei befinden sie sich meist zwischen dem Lasermedium und einem Resonatorspiegel. Das Brewster Fenster ist eine Glasscheibe, welche, von oben gesehen, in dem sogenannten Brewsterwinkel zur Längsachse des Lasers schief ausgerichtet ist. So kommt es zu einem Spezialfall der Brechung, wobei nur die elektromagnetischen Wellen, welche horizontal polarisiert sind hindurch gelassen und die restlichen, anders polarisierten elektromagnetischen Wellen aus dem Laser heraus reflektiert und so herausgefiltert werden. So kommt es nur zu einer Verstärkung der horizontal polarisierten Lichtstrahlen.



Lichtbrechung an einer im Brewsterwinkel in Bezug zum Laserstrahl angeordneten Glasscheibe. Hierbei werden die senkrecht und anders polarisierten Lichtstrahlen von den horizontal polarisierten Strahlen abgelenkt und herausgefiltert.

## 3.5 DAUERSTRICH- UND PULSBETRIEB

### 3.5.1 DAUERSTRICHBETRIEB

Bisher gingen wir immer von einem Dauerstrichlaser aus. Ein Dauerstrichlaser gibt während dem Betrieb nämlich immer eine konstante Lichtstärke ab. Dabei ist das Laserlicht in der Regel sehr kohärent und monochromatisch. Besonders bei einem Dauerstrichlaser ist es wichtig, dass die Pumpquelle die Elektronen schneller auf das höhere Niveau hebt, als diese sich auf dem Laserniveau durch Übergänge auf ein unteres Niveau entladen können. Ausschließlich beim Einschalten eines Lasers (beim Übertreten der Laserschwelle) kommt es typischerweise immer, also auch bei Dauerstrichlasern, zu einem Flackern der Lichtintensität. Dieses Flackern sind sehr kurze Pulse, die durch das Zusammenspiel zwischen der Schnelligkeit des Pumpens von Elektronen und der Schnelligkeit des Entladens der sich auf der Laserschwelle befindenden Elektronen durch Abgabe eines Photons zu Stande kommen.

### 3.5.2 PULSBETRIEB

Beim Puls laser ist dies allerdings anders. So wird hier die Lichtintensität des Laserstrahls in kurzen starken Pulsen abgegeben. Die Zeit zwischen diesen Pulsen kann dabei eine andere sein als die Pulsdauer. Bei den Pulsen kann eine viel höhere Lichtintensität für eine sehr kurze Zeit erreicht werden als beim Dauerstrichbetrieb, bei gleicher Pumpenergiezuführung. Durch das ständige Abschalten des Lasers überlastet dieser auch nicht. Bei bestimmten Lasertypen sind im Pulsbetrieb extrem hohe Ausgangsleistungen möglich, welche sogar im Gigawatt-Bereich liegen. Gepulste Laser arbeiten entweder im Kurzpuls-Bereich oder im Ultrakurzpuls-Bereich. Die Pulse sind dabei so kurz, dass man mit bloßem Auge einen gepulsten Laser nicht von einem Dauerstrichlaser unterscheiden kann. Bei ultrakurzgepulsten Lasern sind sogar Pulse im Attosekundenbereich möglich. Die Ausgangsleistungen sind, abgesehen von der Leistung der Energiepumpe, steuerbar. Wenn man die Laserpulse, beziehungsweise die Zeit zwischen diesen Pulsen verkürzt, steigert sich die Ausgangsleistung des Laserstrahls. Allerdings wird das emittierte Laserlicht bei immer kürzeren Pulsen immer weniger monochromatischer. Es ist auch bei sehr vielen Laserarten der Fall, dass diese entweder im Dauerstrichbetrieb oder im gepulsten Betrieb arbeiten können. Andere Laser hingegen können in der Praktik nur im gepulsten Betrieb effektiv arbeiten, da sich bei ihnen die Elektronen auf dem Laserniveau sehr schnell durch eine starke stimulierte Emission entladen und im Dauerstrichbetrieb eine Energiepumpe sehr großer Leistung notwendig machen würde. Zum gepulsten Betrieb eines Lasers gibt es in der Regel drei verschiedene Methoden um dies zu erreichen.

#### 3.5.2.1 PULSBETRIEB DER ENERGIEPUMPE

Eine einfache Art und Weise wie man einen Laser gepulst arbeiten lassen kann, ist die Energiepumpe zu pulsen. Dabei wird die Energiepumpe in einer gewissen Frequenz ein- und ausgeschaltet, so werden dann immer mehr Elektronen aus dem Grundzustand auf ein höheres Niveau angehoben, welche sich dann beim Übertreten der Laserschwelle in einer stimulierten Emission auslösen. So nimmt die Photonenanzahl durch die spontane Emission schlagartig zu, so dass ein kurzer starker Laserpuls entsteht. Durch die starke stimulierte Emission, befinden sich bald nicht mehr genug Elektronen auf dem Laserniveau und es kommt zum Untertreten der Laserschwelle. Die entladenen Elektronen befinden sich nun wieder auf dem Grundniveau und warten auf den nächsten Puls der Energiepumpe, um angehoben zu werden. Als gepulste Energiepumpe kommen oft Blitzlampen zum

Einsatz, welche bereits aufgrund ihrer Funktionsweise gepulst arbeiten. Die Frequenz der Energiepumpe, bestimmt logischerweise die Frequenz der Laserpulse.



Eine solche Xenon-Blitzröhre produziert ein gepulstes Pumplicht, durch den vorgeschalteten Kondensator.

### 3.5.2.2 GÜTESCHALTUNG

Die Güteschaltung ist eine „Schaltung“, welche die „Güte“ des Lasers schaltet. Sie ist eine deutlich modernere Version zum Erreichen eines Pulsbetriebes. In anderen Worten unterdrückt die Güteschaltung die stimulierte Emission von Photonen, indem die Güteschaltung freie Photonen absorbiert. So, dass es möglich ist in dem Lasermedium mehr Elektronen auf das Laserniveau bringen zu können, ohne dass sich diese durch stimulierte Emission wieder sofort entladen. Mit der Güteschaltung sind Pulse im Nanosekundenbereich möglich. Durch Aufheben dieser Sperre, kommt es zu einer verstärkten Lichtentstehung im Lasermedium. Bei Güteschaltern gibt es zwei verschiedene Arten:

#### 3.5.2.2.1 PASSIVE GÜTESCHALTER

Dazu wird ein Photonenabsorber im Laser integriert, welcher nur eine bestimmte Anzahl an Photonen auf einmal aufnehmen kann. Dieser Absorber ist in der Regel eine Flüssigkeit in einem Glasgefäß. Beim Betrieb hebt die Energiepumpe immer weiter Elektronen auf das obere Energieniveau. Gleichzeitig entstehen ständig Photonen aus spontanen Emissionen, welche eigentlich die stimulierte Emission auslösen würden, welche jedoch von dem zusätzlichen Absorber aufgenommen (absorbiert) werden. Da die Energiepumpe allerdings immer mehr Elektronen auf das obere Energieniveau befördert, kommt es auch verstärkt zu spontanen Emissionen und es entstehen immer mehr Photonen. Dies geht dann so weiter bis der Absorber die zahlreichen Photonen nicht mehr aufnehmen kann. Dann ist der Absorber gesättigt und wird für die Photonen durchlässig. Wann dieser gesättigt ist hängt von dem jeweiligen Material des Absorbers ab. Diese Sättigungsschwelle bestimmt die Pulsdauer. Da nun auf einmal viele Photonen stimulierte Emission auslösen, kommt es schlagartig zur einer starken Entladung der Elektronen auf dem Laserniveau, was einen kurzen starken Laserpuls zu Folge hat.

#### 3.5.2.2.2 AKTIVE GÜTESCHALTER

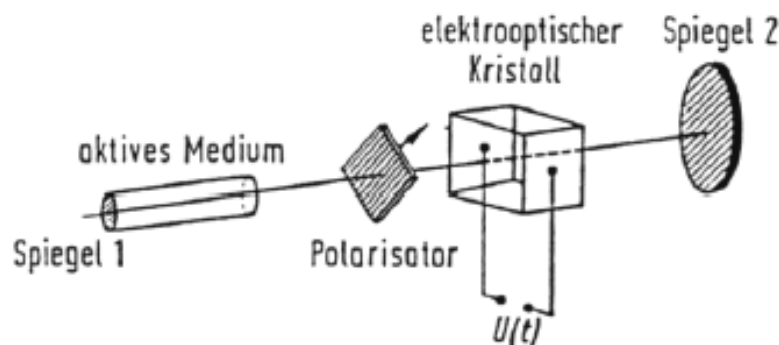
Bei aktiven Güteschaltern hingegen wird die Güte des Resonators, mit Hilfe von bestimmten Bauteilen, durch eine bestimmte externe Steuerung gezielt verbessert oder verschlechtert. Sie befinden sich in der Regel zwischen Resonatorspiegel und Lasermedium. Auch hier werden die freien Photonen bei verschlechterter Güte des Resonators, welche durch spontane Emission freigesetzt wurden, wie bei passiven Güteschaltern absorbiert. Bei den aktiven Güteschaltern können zur Schaltung der Güte des Resonators einfache nichtreflektierende Klappen über eine Drehvorrichtung den Resonatorspiegel periodisch verdecken. Diese Methode ist jedoch sehr alt und weist lange und



unpräzise Umschaltzeiten auf. Heute gängigere und extrem schnell schaltende ( $>1$  Nanosekunde) Methoden sind elektrooptische Schalter oder akustooptische Schalter.

#### 3.5.2.2.1 ELEKTROOPTISCHE SCHALTER

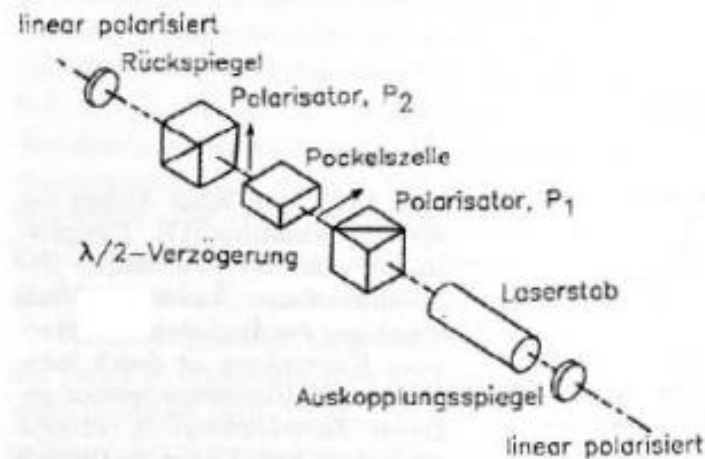
Elektrooptische Schalter sind sehr häufig angewandt und weisen die kleinsten Schaltzeiten der Güteschaltermethoden auf und machen sehr kurze Pulse möglich. Bei elektrooptischen Schaltern ist vor einem Resonatorspiegel ein Polarisator, welcher nur Licht, was in einer Richtung polarisiert ist, durchlässt (linear polarisiert) eingebaut. Zwischen dem Resonatorspiegel und dem Polarisator befindet sich ein elektrooptischer Kristall. Zum Beispiel eine Pockelszelle oder eine Kerrzelle. Die Pockelszelle besteht aus einem nichtlinearen Kristall mit zwei integrierten Elektroden. Bei Anlegung von einer bestimmten Spannung wird das aus dem Polarisator eintreffende linear polarisierte Licht zirkular polarisiert. Beim Auftreffen des Lichtes auf den Spiegel wird das Licht reflektiert. Dabei wird auch die Drehrichtung des zirkular polarisierten Lichtes gespiegelt, also umgekehrt. So wird beim Durchlaufen des elektrooptischen Kristalls, das Licht wieder linear polarisiert, welches aufgrund der verkehrten Drehrichtung senkrecht zu der Durchlasspolarisationsrichtung des Polarisators ist. So kann also kein Licht die aktive Güteschaltung passieren. Das Licht wurde im Polarisator absorbiert. Wenn man allerdings eine andere Spannung an die Pockelszelle anlegt, so dass die Zelle das durchlaufende Licht nicht umpolarisiert, durchläuft das linear polarisierte Licht den elektrooptischen Kristall ohne Umpolarisierung. Bei der Reflektion an dem Resonatorspiegel wird das zurückgeworfene Licht 1:1 ohne Polarisationsänderung reflektiert und die aktive Güteschaltung ist lichtdurchlässig.



Dieses Bild zeigt den Aufbau einer aktiven Güteschaltung mit einem elektrooptischen Schalter. So befinden sich zwischen dem Lasermedium und einem Endspiegel (2) ein Linear-Polarisator und rechts daneben ein sogenannter elektrooptischer Kristall, mit dem man in Zusammenhang mit dem Polarisator den Resonatorspiegel 2 zuschalten kann.

Es ist jedoch auch möglich, dass sich jeweils ein Polarisator vor und hinter dem elektrooptischen Kristall befindet. Dabei sind diese beiden Polarisatoren verdreht zueinander (in der Regel um  $90^\circ$ ). So passiert nur in der entsprechenden Richtung linear polarisiertes Licht den ersten Polarisator. Beim Durchlaufen des Kristalls wird das Licht bei Unveränderung der Polarisationsrichtung oder bei jeglicher Verdrehung am zweiten Polarisator absorbiert. Um die Konstruktion lichtdurchlässig zu machen, muss eine bestimmte Spannung an den elektrooptischen Kristall angelegt werden, dass dieser das eintreffende linear polarisierte Licht auch um  $90^\circ$  verdreht, um so den zweiten Polarisator

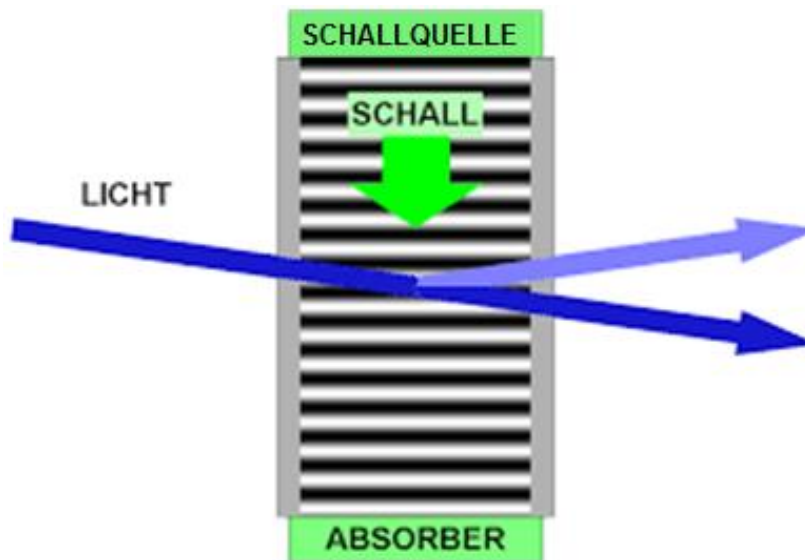
passieren zu können. Auch bei der Reflektion an dem Resonatorspiegel verändert das zurückgeworfene Licht seine Polarisationsrichtung nicht und kann den elektrooptischen Schalter wieder passieren. So ist dieser durchlässig.



Bei der Bauweise mit einer Pockelszelle befinden sich zwischen einem Resonatorspiegel und dem Lasermedium zwei um  $90^\circ$  zueinander verdrehte Linear-Polarisatoren. Dazwischen befindet sich die Pockelszelle, mit der man die Lichtdurchlässigkeit und somit auch das Verstärkungsvermögen des Resonators steuern kann.

#### 3.5.2.2.2 AKUSTOOPTISCHE SCHALTER

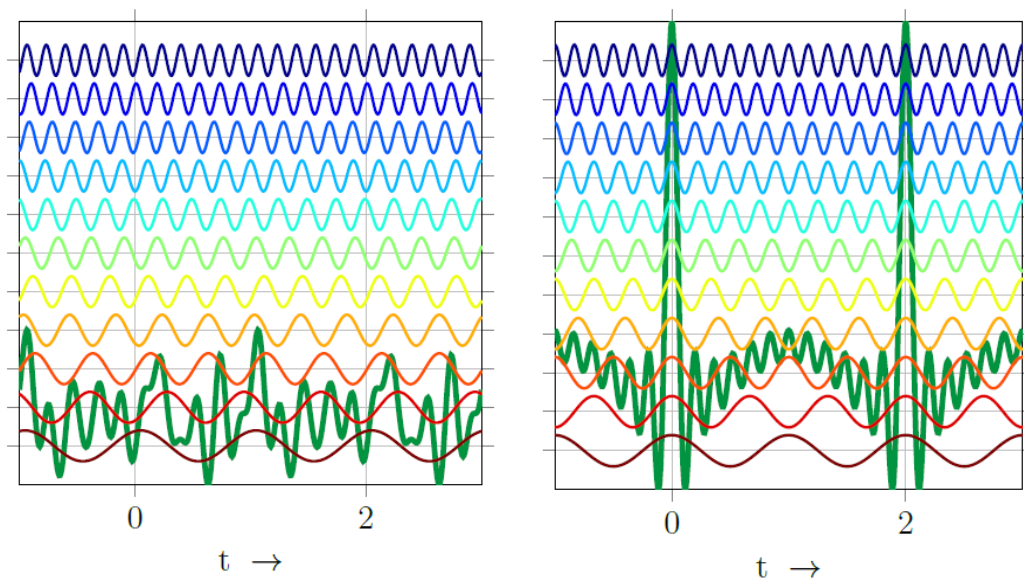
Eine andere durchaus merkwürdigere Methode ist die akustooptische Schaltung. Dazu befindet sich ein klarer Kristall oder ein Glasstück zwischen dem Lasermedium und einem Spiegel. An einer Seite des Kristalls ist eine Ultraschallquelle und an der gegenüberliegenden Seite ein Schallabsorber fest angeschlossen. Die Ultraschallwellen, welche typischerweise im Megaherzbereich liegen, bewegen sich durch den Kristall-Körper fort bis zum Schallabsorber wo diese dann aufgenommen werden. Die Ultraschallwellen stellen auch in dem Kristall, wie in der Luft, wandernde geringfügige Verdichtungen des Kristallmaterials dar. Wie wir bereits wissen tritt bei Durchlaufen von Licht durch zwei Medien, Festkörper verschiedener Dichte, Lichtbrechung auf. Das gleiche passiert auch hier mit dem Unterschied, dass die Schallwellen den zweiten dichteren Körper darstellen. Das Licht aus dem Lasermedium, was den Kristall durchläuft, wird an den Schallwellen gebrochen. Das aus dem Resonatorsystem heraus gebrochene Licht stellt Verluste dar und setzt die Laserschwelle höher. So ist die Güte des Resonators niedrig. Um nun die Resonator-Güte wiederherzustellen, wird die Frequenz der Ultraschallwellen so verändert, dass wieder das gesamte Licht den akustooptischen Schalter ohne Ablenkung passieren kann.



Schematische Darstellung eines akustooptischen Schalters, wobei die Lichtdurchlässigkeit anhand der Lichtbrechung an den körperinternen Schallwellen gezielt gesteuert werden können. Oben am Kristall befindet sich die Ultraschallquelle und unten der Schallabsorber.

### 3.5.2.3 MODENKOPPLUNG

Nur mit der Modenkopplung sind die extrem kurzen Pulse im Femto- und Attosekundenbereich möglich. Dazu werden die longitudinalen Moden zu Nutze gemacht. Beim Betrieb eines Dauerstrichlasers entstehen mehrere perfekt stehende Wellen unterschiedlicher Frequenzen, die longitudinalen Moden. Wie viele dies sind hängt davon ab, wie viele vom laseraktiven Medium produzierte (durch stimulierte Emission) Frequenzen solchen longitudinalen Moden entsprechen. Wenn das laseraktive Medium also mehr verschiedene Frequenzen erzeugt und verstärkt, können mehr Moden entstehen. Beim Einschalten des Lasers können so mehrere dieser Moden gleichzeitig entstehen, welche aber größtenteils phasenverschoben zueinander sind. Bei der Modenkopplung werden diese longitudinalen Moden, durch eine Schaltung so geschleust, dass sich nur Moden, welche sich in Phase bewegen, weiter im Lasermedium verstärken können, wobei die anderen phasenverschobenen Moden an der Schaltung absorbiert werden. Durch die phasengleiche Überlagerung der einzelnen longitudinalen Moden kommt es zu einer konstruktiven Interferenz. Auch wenn die einzelnen Moden eine andere Frequenz besitzen, ist es zum Beispiel möglich, dass eine Frequenz sich mit einer doppelt so hohen Frequenz überlagern kann. Dabei ist immer die zweite Auslenkung der doppelt so hohen Frequenz in Phase mit den Auslenkungen der ersten Frequenz. Durch die konstruktive Interferenz kommt es zu einer sehr starken Auslenkung(en), also einem Impuls(e). Die Länge dieses Impulses hängt von den einzelnen überlagerten Moden ab, welche wiederum vom Abstand der Resonatorspiegel abhängen. Desto mehr dieser Moden konstruktiv miteinander interferieren, desto stärker werden die Impulse. Die im Resonator eingeschlossenen Impulse werden dann auch schließlich jeweils über den teildurchlässigen Resonatorspiegel als Laserimpulse teilweise ausgekoppelt. Bei der Modenkopplung unterscheidet man zwischen drei Methoden, um eine solche Modenüberlagerung herzustellen.



Diese beiden Grafiken zeigen die beim Betrieb des Lasers herrschenden longitudinalen Moden. Bei dem linken Bild sind all diese Moden Phasenverschoben zueinander und interferieren zu einer relativ ausgeglichenen Welle, welche dunkelgrün dargestellt ist. Wenn diese Moden allerdings alle in Phase zueinander sind, kommt es durch die Interferenz (dunkelgrün) zu einem starken Puls, bei denen alle Moden in Phase sind. Dieses Szenario ist im rechten Bild erläutert.

#### 3.5.2.3.1 *PASSIVE MODENKOPPLUNG*

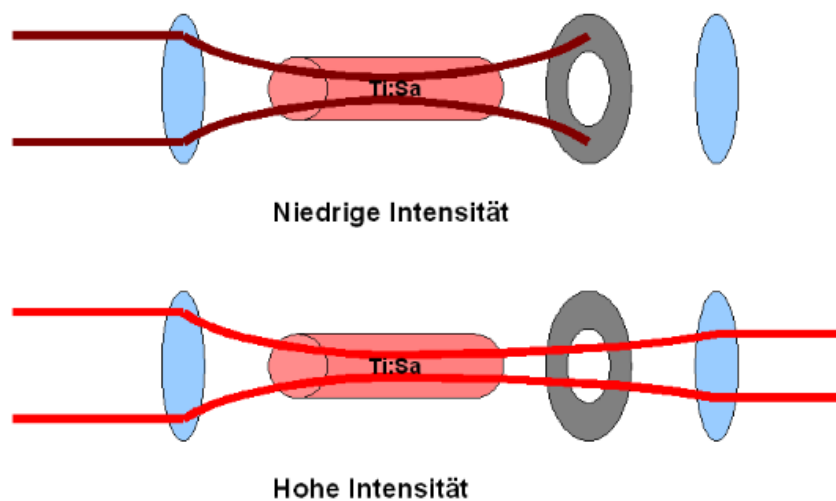
Auch bei der passiven Modenkopplung kommt, wie bei der Güteschaltung, ein sättigbarer Absorber zum Einsatz. Dieser befindet sich auch hier zwischen dem Lasermedium und einem Resonatorspiegel. Hier ist es allerdings so gelöst, dass dieser die nicht in Phase schwingenden Moden absorbiert. Der hier eingesetzte sättigbare Absorber hat auch die Eigenschaft, dass dieser bei zunehmender Lichtintensität transparenter wird. Da beim Einschalten des Lasers sich bereits Moden gebildet haben, haben sich auch ein paar davon konstruktiv überlagert und einen Lichtimpuls gebildet. Nun kommt der sättigbare Absorber ins Spiel. Da der sättigbare Absorber bei zunehmender Lichtintensität lichtdurchlässiger wird, absorbiert dieser die sich bereits gebildeten Lichtimpulse weniger als die nicht phasengleichen individuellen Moden, da diese viel schwächer sind. Diese nicht phasengleichen Moden werden so immer weiter von dem Absorber absorbiert, bis diese ganz verschwinden. Für den durch den Absorber passierenden Impuls ist der Absorber hingegen transparent. So kann dieser Impuls den Absorber ständig passieren und vom Resonatorspiegel zurückgeworfen werden und sich im Lasermedium weiter verstärken. Nun können sich nur noch Moden ausbilden, welche in Phase mit dem Lichtimpuls sind. Mit der zunehmenden Stärke des Impulses nimmt die Absorption des Absorbers immer weiter ab.

#### 3.5.2.3.2 *AKTIVE MODENKOPPLUNG*

Bei der aktiven Modenkopplung kommen auch die gleichen Methoden zum Einsatz, wie bei der aktiven Güteschaltung, sprich von elektrooptischen und akustooptischen Schaltern. Hierbei werden diese optischen Schalter extern so angesteuert, dass nur die bereits konstruktiv miteinander interferierten longitudinalen Moden, welche Pulse bilden, durchgelassen werden. So kommt es auch hier dazu, dass die anderen Moden absorbiert werden und ganz verschwinden, da sich diese nicht weiter im Lasermedium verstärken können. Wobei der sich ausgebildete Puls immer weiter im Lasermedium verstärkt.

### 3.5.2.3.3 KERR-LINSE

Bei der Modenkopplung gibt es allerdings auch noch eine dritte Methode, um einen Puls herauszufiltern. Diese Methode gehört zu der passiven Modenkopplung, ist jedoch eine sehr wichtige Art und Weise zur Modenkopplung. Dazu wird der gleichnamige „Kerr-Effekt“ zu Nutze gemacht. Dazu wird ein Kristall oder das Lasermedium selbst, falls dies auch ein Kristall (Wirtskristall) ist, in den Laserresonator integriert. Vor und hinter diesem Kristall, beziehungsweise Wirtskristall, befinden sich oft Linsen zur Fokussierung. Bei hohen Lichtintensitäten tritt in diesem Kristall der sogenannte Kerr-Effekt auf, wobei sich die Lichtbrechung im Kristall intensitätsabhängig verändert. Dabei muss man beachten, dass sich die Querschnitts-Energieverteilung des umherlaufenden Strahls (transversaler Mode) so aussieht, dass die Lichtintensität in der Mitte am höchsten ist und nach außen hin radial abnimmt. Die Moden, welche sich bereits zu einem Puls gekoppelt haben, besitzen eine höhere Lichtintensität, als die Moden, welche nicht in Phase sind. So werden diese gekoppelten Moden aufgrund des Kerr-Effektes anders gebrochen, und der Kristall wirkt wie eine Linse, welche den Strahl bündelt. Andere Moden werden hingegen fast gar nicht gebündelt und führen ihren Weg fort. Hinter dem stabförmigem Kristall ist eine ringförmige Blende installiert, welche den gebündelten Teil in der Mitte durchlässt und den nicht gebündelten Teil absorbiert, so, dass die Moden, welche nicht in Phase sind, sich auch hier weiter abbauen. Es gibt auch noch andere Bauweisen, wie man durch den Kerr-Effekt des (Wirts-) Kristalls höhere Verluste für die nicht konstruktiv miteinander interferierten Moden als für die konstruktiv miteinander interferierten Moden herstellen kann, um einen Puls laser zu erhalten. Das Prinzip ist aber das gleiche.



In der oberen Hälfte der Grafik ist ein Lichtstrahl abgebildet, welcher eine Kerrlinse (rosa) durchläuft. Durch die niedrigere Intensität wird dieser stärker abgelenkt und wird schließlich absorbiert. In der unteren Hälfte durchläuft ein Lichtstrahl hoher Intensität die Kerrlinse und wird weniger abgelenkt und kann den Absorber (grau) passieren. Die beiden äußeren Linsen (hellblau) dienen lediglich zur Begradigung des Strahls, beziehungsweise zur Fokussierung.

## 4 DIE DREI LASERTYPEN UND DEREN AUSFÜHRUNGEN

### 4.1 GASLASER

Gaslaser umfassen alle Laser, deren Lasermedium sich beim Betrieb im gasförmigen Zustand befindet. Gaslaser sind sehr häufig umgesetzt und umfassen die meisten Laserarten. Die Leistungen von Gaslasern können im Dauerstrichbetrieb 100 kW erreichen und im Pulsbetrieb sogar einige Terra-Watt. Die unterschiedlichen Gaslasertypen können, je nach Typ, Laserstrahlen mit typischen Wellenlängen im tiefen Infrarotbereich von 10.600 nm (Kohlendioxidlaser) bis hin zu Wellenlängen im tiefen UV-Bereich mit 108 nm (Argonfluorid-Excimerlaser). Das Emissions-Spektrum der Gaslaser ist damit das breiteste. Das Lasermedium kann bei Gaslasern sehr kompliziert ausfallen. So können als laseraktiver Stoff ein gasförmiger Stoff oder gasförmige Verbindungen aus verschiedenen Elementen zum Einsatz kommen. Aber auch Metalle im Gaszustand können als laseraktiver Stoff dienen. Oft erfolgt die Anregung des laseraktiven Stoffes über eine indirekte Anregung, wobei die Pumpe einen anderen Stoff (zum Beispiel Helium) anregt. Durch Stöße wird diese Energie dann auf den laseraktiven Stoff übertragen. Der gleiche Prozess kann auch als Abregung (Relaxion) des laseraktiven Stoffes dienen.

Bei manchen Lasertypen, den Ionenlasern, kommen ionisierte Gase zum Einsatz, so muss der laseraktive Stoff zuerst ionisiert werden. Dabei ist die Energiepumpe ausschließlich in Form einer inneren Gasentladung ausgeführt, um die neutralen laseraktiven Atome zu ionisieren. So werden diese laseraktiven Atome bei der Gasentladung zeitweise selber ionisiert und sind schließlich positiv geladen. Die positiv geladenen Ionen werden dann auch durch die Gasentladung oder indirekt durch einen beigemengten Stoff angeregt.

Das Lasermedium befindet sich in der Regel in einem zylindrischen geschlossenen Glasgefäß. Dabei sind die runden Resonatorspiegel seitlich montiert. Dieser hohle Glaskolben ist bei normalen Lasern etwa 30 bis 150 cm lang und hat üblicherweise einen Durchmesser von wenigen Millimetern bis einigen Zentimetern. Gaslaser sind fast immer durch eine innere Gasentladung angeregt. So sitzen auch die Elektroden im Glasgefäß. Die Gasentladungsströme können von wenigen mA bis zu 100 A und im gepulsten Betrieb sogar 1000 A reichen. Aber auch die externe Hochfrequenz-Anregung ist immer häufiger anzutreffen. Auch Ausführungen mit Anregung durch einen Elektronenstrahl gibt es. Optische Anregungen sind allerdings sehr selten.

Bei Gaslasern spielt auch der innere Druck des Lasermediums eine wichtige Rolle, insbesondere bei der Anregung durch Gasentladung (Glimmentladung). So gibt es Niederdrucklaser welche unter einem Lasermedium-Druck von einigen Pa bis 1.000 Pa arbeiten. Hochdruckgaslaser arbeiten hingegen sogar im Mega-Pa Bereich.

Zur Nachfüllung und zur Kühlung des Lasermediums ist das Glasgefäß oft in einem Kreislauf geströmt und mit Nachfüllbehältern und/oder mit Wärmetauschern und Pumpe ausgestattet.



Gaslaser finden durch ihre hohen Leistungen und vielen Ausführungen und Möglichkeiten verstärkt Anwendung in der Forschung, Medizin und aber auch in der Industrie. Durch ihre Komplexität und auch Größe sind diese Laser im Alltag normalerweise nicht anzutreffen.

Im Folgenden sind einige wichtige Gaslasertypen aufgelistet mit deren Grundeigenschaften:

### KOHLENMONOXIDLASER

Laseraktiver Stoff:	Kohlenmonoxid
Typische Pumpe:	Elektrische Anregung (Stöße)
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Wellenlängenbereich des Laserlichtes:	4800 bis 8300 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	10 mW bis 100 kW (Dauerstrichbetrieb)
Höchster Wirkungsgrad :	bis 60%
Einsatzgebiet:	Forschung



## STICKSTOFFLASER

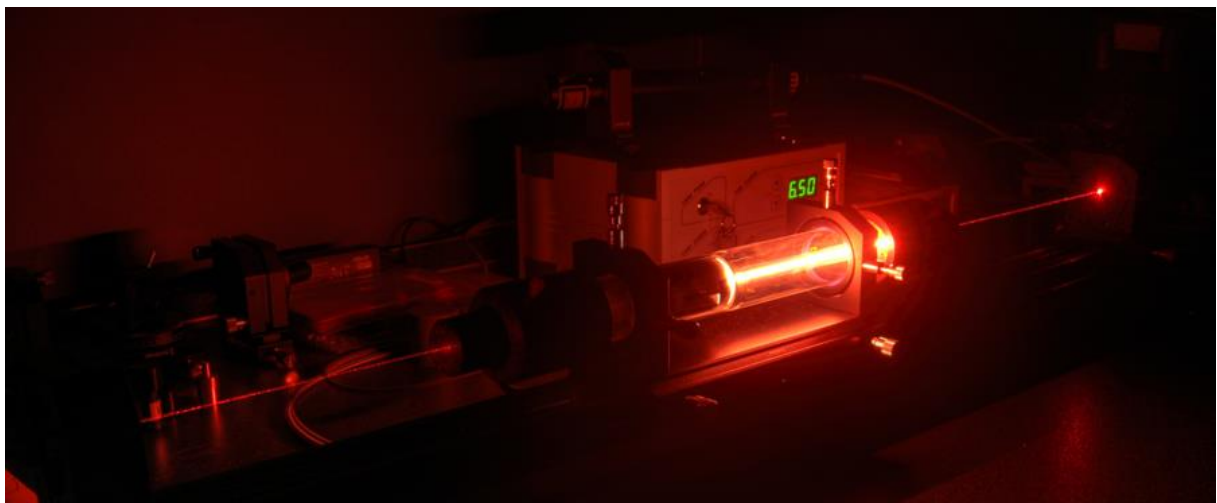
Laseraktiver Stoff:	Stickstoffmolekül aus zwei Stickstoffatomen
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Nein
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Minimalste Pulsdauer:	bis 5 ns
Hauptwellenlänge des Laserlichtes:	337,1 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	mW bis 10 MW (Pulsbetrieb)
Einsatzgebiet:	Forschung, Pumpen anderer Laser

Stickstofflaser sind aufgrund der sehr starken stimulierten Emission oft ohne optischen Resonator, als Superstrahler ausgeführt. Es ist sogar möglich die Luft aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes (78,08%) als Lasermedium zu verwenden. So gibt es auch offene Varianten



## HELIUM NEON LASER

Laseraktiver Stoff:	Neon
Stoff zur indirekten Anregung:	Helium
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja (erster Dauerstrichbetriebsfähiger Laser der Welt)
Pulsbetrieb möglich:	Nein
Hauptwellenlängen des Laserlichtes:	632,8; 1152,3; 3392,2 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	mW bis 100 mW
Einsatzgebiet:	Alltag, Messgeräte



## ARGON IONEN LASER

Laseraktiver Stoff:	positiv geladenes Argon
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlängen des Laserlichtes:	351; 457,9; 488; 514,5 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	10 mW bis 100 W
Höchster Wirkungsgrad:	2,5%
Einsatzgebiet:	Medizin, Pumpen anderer Laser



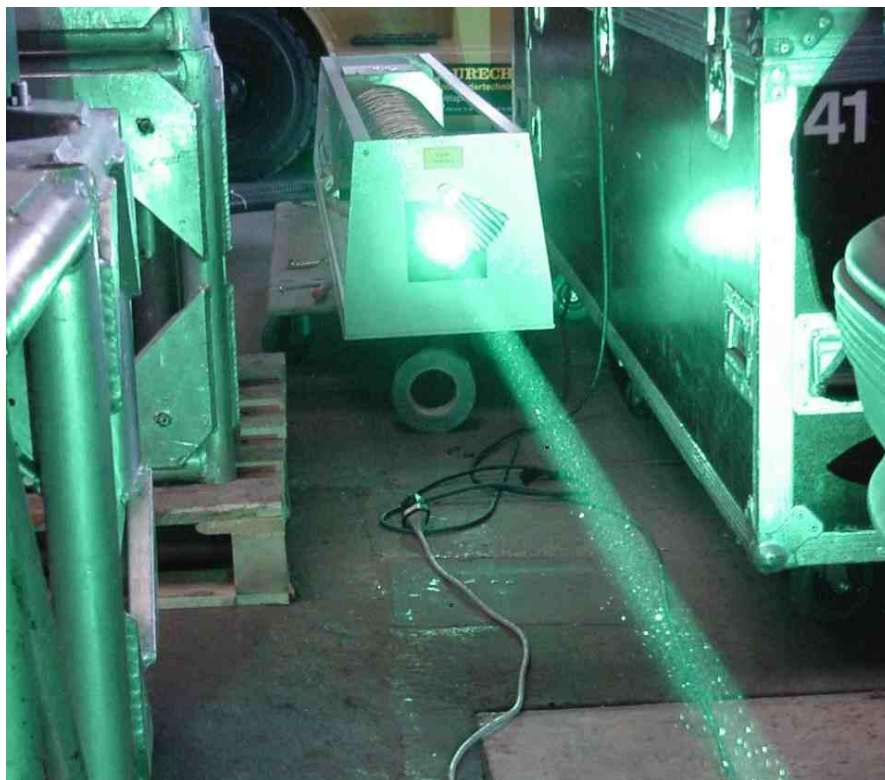
### 4.1.1 METALLDAMPFLASER

Bei Metalldampflasern wird zuerst, wenn nötig, ein Metall in einem Ofen zum gasförmigen Zustand erhitzt, wobei das gasförmige Metall selbst den laseraktiven Stoff darstellt. Die Laserkammer selbst ist dabei der Ofen. Zur Erhitzung des Metalls können dabei Temperaturen von 1.700°C herrschen (Kupferdampflaser). Metalldampflaser werden oft nur gepulst betrieben. Als Metall kann dabei Gold, Kupfer, Calcium, Mangan, Cadmium, Selen, Thallium, Blei oder Indium zum Einsatz kommen. Dabei ist ein Laser mit einem dieser Metalle jeweils ein eigener Lasertyp. Metalldampflaser enthalten zur indirekten Anregung oft Helium im Lasermedium.

Im Folgenden sind drei Metalldampflaser und deren Grundeigenschaften aufgelistet:

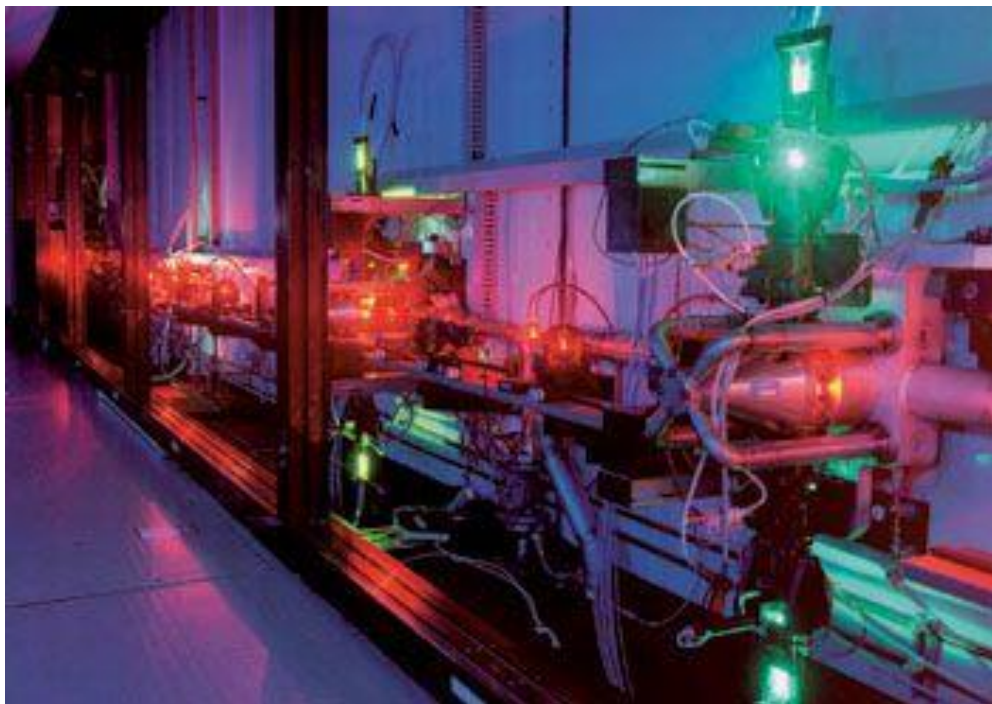
## KUPFERDAMPFLASER

Laseraktiver Stoff:	gasförmiges Kupfer
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Nein
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Minimalste Pulsdauer:	bis 15 ns
Hauptwellenlängen des Laserlichtes:	510,6; 578,2 nm
Pulsspitzenleistung:	bis 300 KW
Einsatzgebiet:	Medizin, Pumpen anderer Laser



## **GOLDDAMPFLASER**

Laseraktiver Stoff:	gasförmiges Gold
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Nein
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Minimalste Pulsdauer:	bis 10 ns
Hauptwellenlängen des Laserlichtes:	312; 627,8 nm
Pulsspitzenleistung:	bis 50 KW
Einsatzgebiet:	Medizin, Pumpen anderer Laser





## HELIUM CADMIUM LASER

Laseraktiver Stoff:	positiv geladener Cadmium-Dampf
Stoff zur indirekten Anregung:	Helium
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlängen des Laserlichtes:	325; 353,6; 441,6 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	10 bis 200 mW
Einsatzgebiet:	Materialforschung, Medizin



### 4.1.2 EXCIMERLASER

Der Excimerlaser ist eine besondere Art des Gaslasers. Das was den Excimerlaser von den anderen Lasern unterscheidet, sind die für den laseraktiven Stoff verwendeten Stoffe. Diese Stoffe sind beim Excimerlaser reine Edelgase (Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon) und reine Halogene (Fluor, Chlor, Brom, Iod und Astat). Edelgase gehen eigentlich keine Bindungen mit anderen Stoffen ein, da diese alle acht, beziehungsweise zwei (Helium), Valenzelektronen haben. Im Excimerlaser gehen diese dennoch Bindungen untereinander ein. Dabei bestehen diese Verbindungen entweder aus zwei gleichen dieser Atome (zum Beispiel zwei Argonatome) oder aus zwei unterschiedlichen (zum Beispiel ein Xenonatom und ein Chloratom) der genannten Atome. Dies ist möglich, da diese Atome durch die Energiepumpe angeregt werden, respektiv durch einen Stoß eines angeregten Atoms (indirekte Anregung). Im angeregten Zustand können diese chemischen Verbindungen tatsächlich existieren. Diese eigenartigen Verbindungen bilden somit den laseraktiven Stoff und produzieren Laserstrahlung durch stimulierte Emission. Sobald die Verbindungen wieder in den Grundzustand zurückkehren, lösen sich diese Verbindungen wieder auf. Excimerlaser emittieren auch nur Laserstrahlung im Ultraviolettbereich (108 bis 351 nm) und erreichen als einzige Lasertypen derart niedrige Wellenlängen. Excimerlaser sind fast nur gepulst betrieben. Die Pulse liegen üblicherweise im Nano- und Piko- Sekundenbereich. Dabei können für kurze Zeit Spitzenleistungen von bis zu 50 Megawatt erreicht werden.

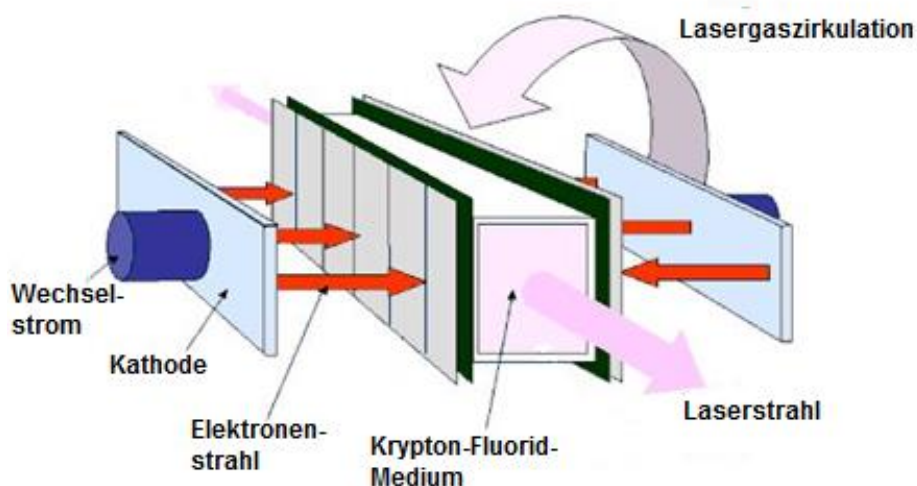
#### XENON CHLORID LASER

Laseraktiver Stoff:	Verbindung von einem Xenonatom und einem Chloratom
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Nein
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Typische Pulsdauer:	um 60 ns
Hauptwellenlänge des Laserlichtes:	308 nm
Einsatzgebiet:	Medizin, Pumpen anderer Laser



## KRYPTON FLUORID LASER

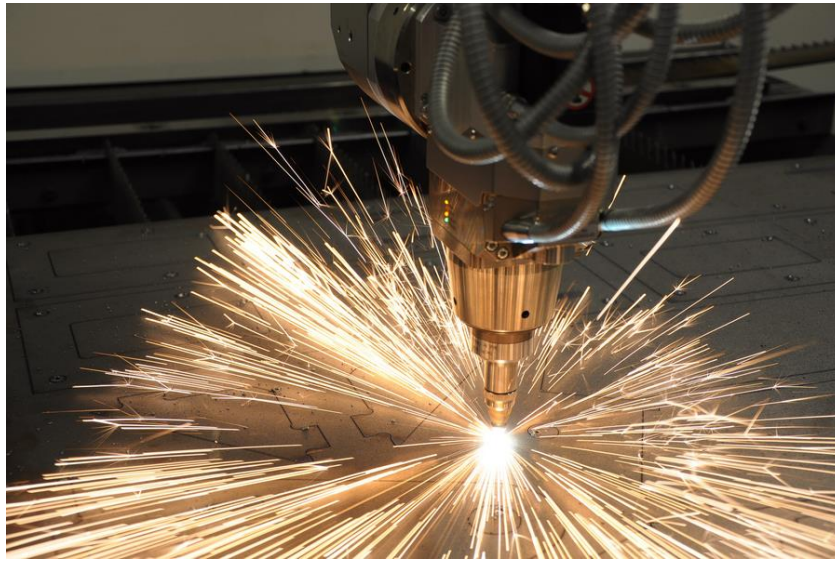
Laseraktiver Stoff:	Verbindung von einem Kryptonatom und einem Fluoridatom
Typische Pumpe:	Gasentladung
Dauerstrichbetrieb möglich:	Nein
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlänge des Laserlichtes:	248 nm
Einsatzgebiet:	Medizin, Pumpen anderer Laser



### 4.1.3 KOHLENDIOXIDLASER

In der Auflistung wurde allerdings bewusst der bekannteste und wichtigste Gaslaser weggelassen. Dieser ist der Kohlendioxidlaser. Der Kohlendioxidlaser ist sehr oft angewandt, sowohl in der Forschung als auch vor allem in der Industrie, zum sehr präzisen Zuschneiden von Stahlblechen mit einer maximalen Dicke von bis zu 3 Zentimetern. Diesen Erfolg verdankt der Kohlendioxidlaser vor allem seiner hohen Ausgangsleistungen welche bis zu 80 Kilowatt erreichen können. Der Kohlendioxidlaser kommt aber auch zum Schneiden von anderen Materialien in Frage, zum Beispiel Kunststoff. Dabei ist es wichtig, wie stark das Material die Laserstrahlen absorbiert, was von der Wellenlänge der Laserstrahlung und dem zu schneidenden Material abhängt. Der Kohlendioxidlaser emittiert dabei ausschließlich Laserstrahlung im tiefen Infrarotbereich. Dabei liegen die typischen Wellenlängen bei 10600 und 9600 nm, welche gleichzeitig im Lasermedium entstehen. Dabei kann der Kohlendioxidlaser diese Laserstrahlung sowohl im Dauerstrich, als auch im Pulsbetrieb erzeugen.

Der Wirkungsgrad von einem Kohlendioxidlaser liegt dabei typischerweise bei 15%, kann aber auch bis zu 20% erreichen.



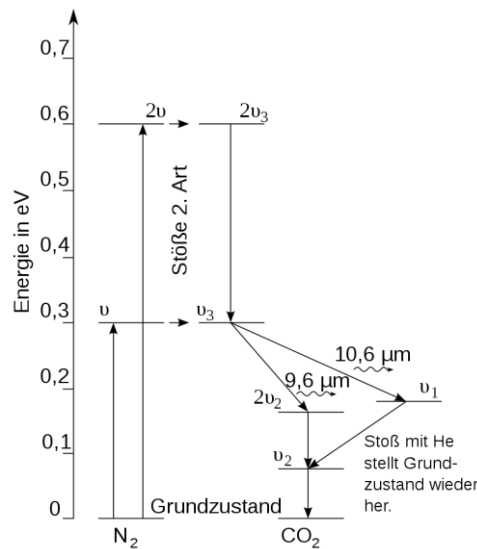
Ein CO<sub>2</sub>-Laser beim Ausschneiden von Metallteilen aus einer Stahlplatte.

#### 4.1.3.1 LASERMEDIUM

Das gasförmige Lasermedium befindet sich auch hier in einem gläsernen Gefäß. Dieses Lasermedium besteht aus Kohlendioxid, Helium und Stickstoffmolekülen (Verbindung aus zwei Stickstoffatomen). Die Kohlendioxidmoleküle stellen dabei den laseraktiven Stoff dar.

Die Pumpe ist dabei meist als interne Gasentladung ausgeführt. Es kommen jedoch auch immer mehr Hochfrequenzanregungen zum Einsatz. Auch Anregungen mittels Elektronenstrahl sind durchaus angewandt. Dabei regt diese Energiepumpe die Stickstoffmoleküle zuerst an. Die Stickstoffmoleküle können dabei zwei verschiedene mögliche Energiemengen speichern. Dabei werden diese in Vibration versetzt, wobei die einzelnen Stickstoffatome im Molekül in eine unabhängige Vibration versetzt werden. Durch einen Stoß mit jeweils einem Kohlendioxidmolekül wird dieses angeregt. Durch die zwei verschiedenen möglichen Energiemengen, die das Stickstoffmolekül an das Kohlendioxidmolekül weitergeben kann, können die Elektronen jeweils im Kohlendioxidmolekül folglich auf zwei, durch die übertragene Energiemenge festgelegte unterschiedlich hohen Energieniveaus gehoben werden. Das Niveausystem des Kohlendioxidmoleküls ist dabei je nach der auf das Elektron übertragenen Energiemenge ein Vierniveausystem oder ein Fünfniveausystem. Elektronen, welche mit einer niedrigeren der beiden möglichen Energiemengen gehoben werden, werden direkt auf das Laserniveau gehoben. Elektronen, welche hingegen mit der höheren möglichen Energie angehoben wurden, landen zuerst auf einem noch höheren Niveau und fallen dann nach einer kurzen Zeit auch auf das Laserniveau. Vom Laserniveau aus können die Elektronen dann auf zwei unterschiedliche unteren Niveaus fallen. Dabei kann ein Elektron entweder auf das eine Niveau fallen oder auf das andere. Hierbei ist die Energiedifferenz verschieden, so, dass es zur gleichzeitigen Emission von zwei verschiedenen Wellenlängen kommt, so dass zwei verschiedene Wellenlängen den Laserstrahl bilden. Diese Wellenlängen sind 9600 und 10600 nm. Von diesen beiden möglichen Niveaus fallen alle darauf befindlichen Elektronen auf ein weiteres Zwischenniveau. Damit diese Elektronen schließlich wieder in den Grundzustand zurückfinden, ist ein

Stoß mit einem Heliumatom nötig, wobei die überschüssige Energie an dieses Heliumatom übertragen wird. Das Heliumatom verliert diese Energie schließlich.



Das Energieniveauschema eines CO<sub>2</sub>-Lasers entspricht einem Vierniveausystem. Im linken Bereich ist das Pumpen eines N<sub>2</sub>-Moleküls dargestellt, welches die Energie über einen Stoß an das CO<sub>2</sub>-Molekül weiter gibt, welches im rechten Bereich des Schemas dargestellt ist.

Zur Kühlung des Kohlendioxidlasers ist der Laser oft als geströmter Laser ausgeführt. In bestimmten Bauformen der Pumpe ist es möglich, dass ständig Kohlendioxid nachgefüllt werden muss, da dieser aufgrund chemischer Prozesse aufgelöst wird. In dem Fall muss der Laser auch geströmt ausgeführt sein.

## 4.2 FESTSTOFFLASER

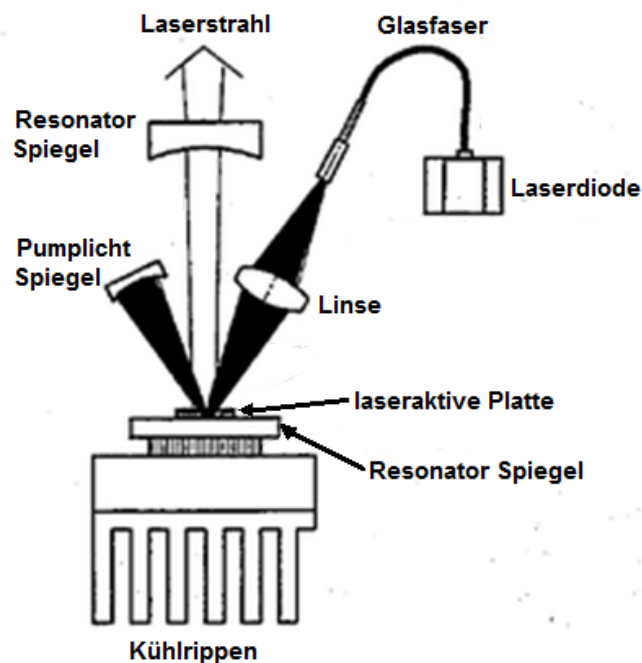
Feststofflaser stellen die zweite große Gruppe von Lasern dar. In diesem Falle ist das Lasermedium fest. Diese Laser können auch im Dauerstrich oder nur im Pulsbetrieb arbeiten oder beides. Manche Spezialausführungen dieser Lasertypen können im Pulsbetrieb auch sehr hohe Leistungen erzeugen. Die typischen Wellenlängen der zahlreichen Lasertypen reicht vom 694,3 nm (tief rot) bis hin zu 2940 nm (infrarot).

Das Pumpen des laseraktiven Stoffes erfolgt bei Feststofflasern ausschließlich optisch, da Gasentladung und elektrische Anregung nicht möglich sind. Dazu befindet sich der eigentliche laseraktive Stoff im durchsichtigen Wirtskristall, welcher ein Kristall oder Glasstück sein kann, sodass die Pumpstrahlen den laseraktiven Stoff erreichen können. Dieser Wirtskristall ist mit dem laseraktiven Stoff angereichert, weist jedoch generell eine relativ hohe Konzentration an laseraktivem Stoff auf.

Die Form des laseraktiven Kristalls (Lasermedium) ist meist als rundlicher Stab ausgeführt, kann jedoch auch als Platte vorliegen. Dabei sind die Resonatorspiegel seitlich platziert (bei Plattenform frontal). Bei stabförmigen laseraktiven Kristallen tritt jedoch eine starke Erhitzung des Laserstabs auf, da das nicht ausgenutzte Spektrum darin zum Teil absorbiert wird. Eine besondere Form des

laseraktiven Kristalls ist die Ausführung eines Faserlasers, wobei dieser auch die Aufgabe des Resonators teilweise erfüllt.

Bei scheibenförmigen laseraktiven Kristallen ist der Aufbau des Lasers allerdings etwas anders. So bildet hier eine sehr dünne (einige Mikrometer) Scheibe mit einem Durchmesser von wenigen Zentimetern den laseraktiven Kristall. Unmittelbar hinter dieser runden Platte sitzt ein Resonatorspiegel. Der gegenüberliegende teildurchlässige Spiegel hat dabei einen großen Abstand zur laseraktiven Platte. Damit unterscheidet sich der Aufbau zu anderen Lasern, bis auf die Form des laseraktiven Kristalls, nicht sonderlich. Allerdings ist es bei Scheibenlasern üblich, dass diese durch eine Laserdiode gepumpt werden. Das Licht der Laserdiode wird oft über Spiegel in eine Linse zur Fokussierung geleitet. Das konzentrierte Pumplicht trifft nun auf die laseraktive Scheibe auf und wird aufgrund des hinten montierten Resonatorspiegels reflektiert. Das reflektierte Licht wird dann durch einen extra für das Pumplicht installierten Spiegel wieder auf die Scheibe zurückreflektiert. Auf die gleiche Weise können dann ein weitere Pumplichtspiegel folgen und das Pumplicht so mehrmals auf die laseraktive Scheibe leiten. Doch der eigentliche Zweck dieser Konstruktion ist die bessere Kühlung des laseraktiven Kristalls, da dieser eine große Fläche hat, bei geringer Dicke, kann die entstehende Hitze besonders gut über diese große Fläche abgeleitet werden.



Aufbau eines Scheibenlasers, wobei eine Laserdiode als Pumplichtquelle dient. Dieses wird über Glasfaser und über Linsen auf die laseraktive Scheibe geleitet. Zusätzlich befindet sich ein Pumplichtspiegel auf der anderen Seite, um das Pumplicht besser auszunutzen. Die anfallende Hitze der laseraktiven Platte wird durch einen Resonatorspiegel hindurch über Kühlrippen an die Luft abgegeben.

Feststofflaser sind nahezu in allen denkbaren Bereichen vertreten. So kann man einen Feststofflaser in der Forschung, der Medizin aber auch in der Industrie vorfinden. In der Industrie sind die Feststofflaser sehr oft angewandt. Aufgrund einer besonderen Form des Feststofflasers ist dieser die meist eingesetzte Laserquelle im Alltag. Die Rede ist von der Laserdiode, welche später näher erklärt wird.

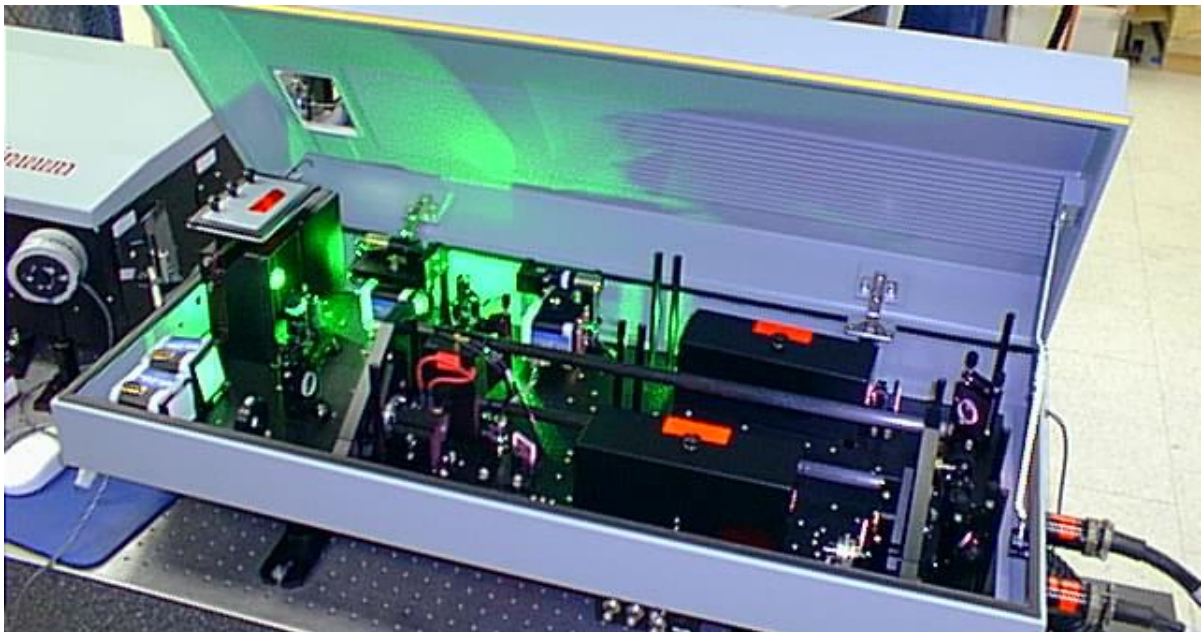


Der wohl beeindruckteste Laser aller Feststofflaser ist wahrscheinlich der Titan-Saphir-Laser, welcher als Forschungslaser zu enormen Leistungen fähig ist.

Im Folgenden sind ein paar wichtige Feststofflaser aufgezählt:

### **ND:YAG LASER**

Laseraktiver Stoff:	dreifach positiv geladene Neodymatome
Wirtskristall:	Yttrium-Aluminium Granat
Typische Pumpe:	Gasentladungslampe, Laserdiode
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlänge des Laserlichtes:	1064 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	1 W bis über 10 kW
Spitzenleistung bei Pulsbetrieb:	bis über 100 MW
Höchster Wirkungsgrad:	Gasentladungslampe bis 5%, Laserdiode bis 50%
Einsatzgebiet:	Industrie, Pumpen anderer Laser, Medizin

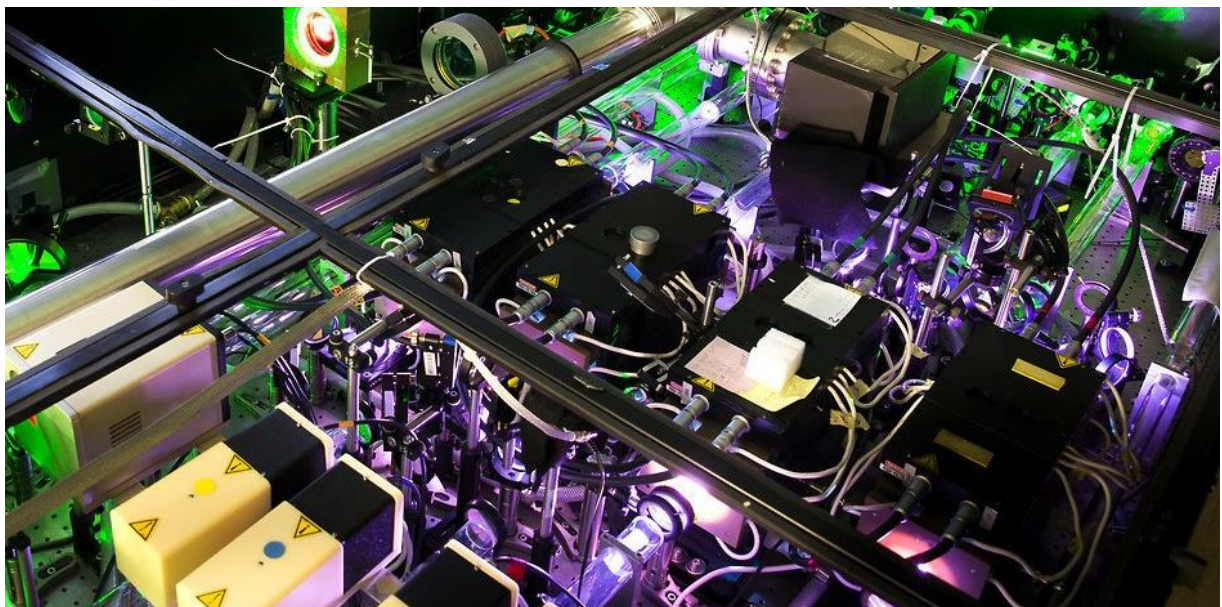


Das grüne Laserlicht entsteht durch die Frequenzverdopplung des Laserlichtes des Nd:YAG-Lasers.

## Ti:SA LASER

Laseraktiver Stoff:	dreifach positiv geladene Titanatome
Wirtskristall:	Saphirkristall
Typische Pumpe:	andere Laser
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlängen des Laserlichtes:	700 bis 1000 nm
Absolut minimalste Pulsdauer:	minimal bis 4 fm! (Modenkopplung)
Ausgangsleistungsbereich:	1 W bis über 10 kW
Spitzenleistung (Pulsbetrieb):	mW bis TW, maximal bis 300 TW
Höchster Wirkungsgrad:	Gasentladungslampe bis 5%, Laserdiode bis 50%
Einsatzgebiet:	Forschung

Die Titan:Saphir Laser erreichen in einer Sonderversion die absolut kürzesten Pulsdauern und höchsten Ausgangs-Lichtleistungen der Welt. Der leistungsstärkste Laser der Welt ist ein Ti:Sa-Laser und erreicht eine Ausgangs Spitzenleistung von unglaublichen 300 Terawatt, 300 Billionen Watt!

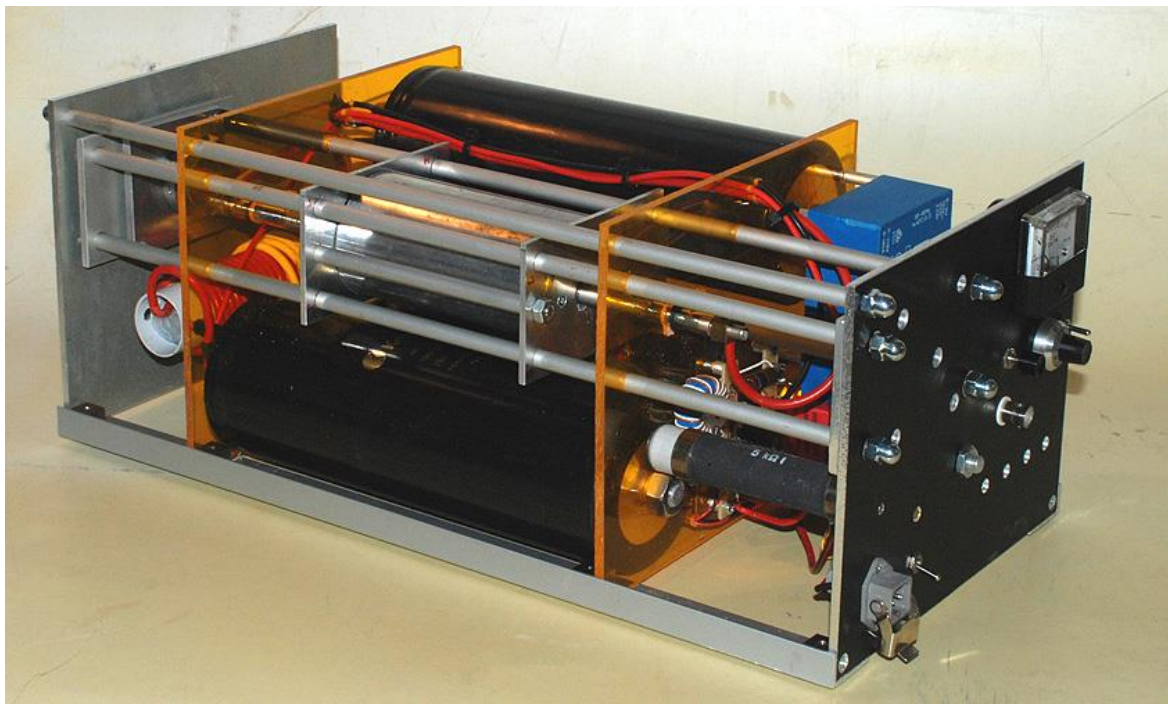


Ein Teil des weltstärksten Lasers „Hercules“, welcher ein Ti:Sa-Laser ist.

## RUBINLASER

Laseraktiver Stoff:	Chromatome
Wirtskristall:	Rubinkristall
Typische Pumpe:	Blitzlampe
Dauerstrichbetrieb möglich:	Nein
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlänge des Laserlichtes:	694,3 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	bis 100kW
Einsatzgebiet:	Forschung, Experiment

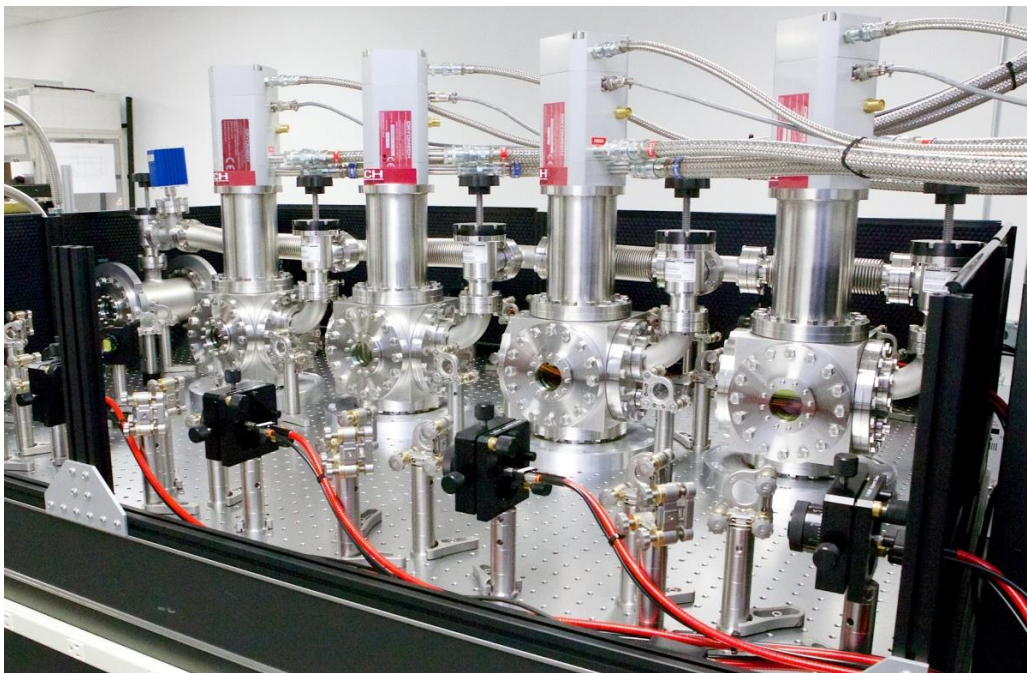
Der Rubinlaser war der erste funktionsfähige Laser der Welt.





## YB:YAG LASER

Laseraktiver Stoff:	positiv geladene Ytterbitiumatome
Wirtskristall:	Yttrium-Aluminium Granat
Typische Pumpe:	Gasentladungslampe, Laserdiode
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlänge des Laserlichtes:	1030 nm
Ausgangs-Leistungsbereich:	bis über 10 kW
Höchster Wirkungsgrad:	bis maximal 25%
Einsatzgebiet:	Industrie, Pumpen anderer Laser, Medizin



## ND:GLAS LASER

Laseraktiver Stoff:	positiv geladene Neodymatome
Wirtskristall:	Glas
Typische Pumpe:	Gasentladungslampe, Blitzlampe, Laserdiode
Dauerstrichbetrieb möglich:	Ja
Pulsbetrieb möglich:	Ja
Hauptwellenlänge des Laserlichtes:	1062 nm
Einsatzgebiet:	Industrie, Pumpen anderer Laser, Medizin



### 4.2.1 LASERDIODE

Die Funktionsweise, sowie der Aufbau einer Laserdiode unterscheiden sich im Allgemeinen sehr stark von der der restlichen Laser. Die Laserdiode ist sehr klein und kompakt aufgebaut. Mit ihr können zwar nicht die höchsten Leistungen erreicht werden, doch aufgrund ihrer Größe und der sehr günstigen Herstellung ist die Laserdiode nicht mehr aus unserem Alltag wegzudenken. Typische Anwendungsgebiete für die Laserdiode sind zum Beispiel: CD-Leser, Kassenscanner, Messgeräte (oft zur Distanz), Laserpointern, etc. Die genaue Funktionsweise der Laserdiode ähnelt der Funktionsweise der LED (Licht Emittierende Diode) bis auf kleine Unterschiede sehr viel. Beide basieren wie ihre Namen schon sagen auf der Diode, welche ein sehr wichtiges Bauelement in der Elektrotechnik ist.

#### 4.2.1.1 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DER LASERDIODE

Das Herzstück der Laserdiode bildet ein sehr kleiner Halbleiterkristall, wie bei der Led auch. Der Halbleiterkristall leitet, wie der Name schon sagt, nur halb Strom. In anderen Worten leitet dieser nur unter bestimmten Konditionen Strom. Dieser Halbleiterkristall besteht grundsätzlich aus reinem Silizium oder einem anderen Stoff der vierten Hauptgruppe. Die Siliziumatome besitzen jeweils vier Valenzelektronen auf ihrer äußersten Elektronenschale. Die Siliziumatome erfüllen damit die Oktett-Regel, indem sich diese in einem regelmäßigen Atomgitter anordnen, und bilden somit einen elektrisch nichtleitenden Kristall. Die Laserdiode ist allerdings in zwei Bereiche aufgeteilt; so ist eine Hälfte des Siliziumkristalls N-dotiert und die andere Hälfte P-dotiert. Dabei haben diese beiden Hälften einen sehr kleinen Abstand zueinander. So ist die N-dotierte Hälfte mit einem Stoff aus der fünften Hauptgruppe angereichert, welcher ein Valenzelektron mehr hat als die Siliziumatome. Damit gibt es einen Elektronenüberschuss in Form freier Elektronen in dieser Hälfte und ist somit negativ (N-dotiert) geladen. Der N-dotierte Bereich ist die Kathode der Laserdiode. Bei der entgegengesetzten Hälfte ist genau das Gegenteil der Fall. So ist die P-dotierte Hälfte mit Atomen der dritten Hauptgruppe angereichert, welche jeweils ein Valenzelektron weniger haben als die Siliziumatome. Die P-dotierte Hälfte bildet die positiv geladene Anode. Im P-dotierten Bereich gibt es durch die Dotierung Valenzelektronenlöcher im gleichmäßigen Kristallgitter. Diese Elektronenlöcher können wie die Elektronen frei wandern, indem ein Elektron eines nächsten Siliziumatoms in das Elektronenloch springt und dieses dabei neutralisiert. Dabei weist das Siliziumatom, von dem das Elektron her kommt, nun ein Elektronenloch auf, da diesem nun ein Elektron fehlt. Auf diese Weise können Elektronenlöcher wandern. Elektronenlöcher sind positiv geladen, da das Siliziumatom, dem ein Elektron fehlt, positiv geladen ist. Die beiden dotierten Hälften des Halbleiterkristalls sind grundsätzlich elektrisch leitend. Aufgrund der gleichen Ladungen der freien Elektronen in dem N-dotierten Bereich, stoßen sich diese voneinander ab und wandern zur Dotierungsgrenze. Auch die Elektronenlöcher wandern zur Dotierungsgrenze, da sich die positiv geladenen Atome abstoßen. Zusätzlich ziehen sich die freien Elektronen und die Elektronenlöcher dabei aufgrund des Ladungsunterschiedes an. Diese Wanderung wird „Diffusion“ genannt. Auf der Grenze der beiden Hälften, also im Spalt, stoßen diese dann aufeinander. Dabei springen die freien Elektronen in den P-dotierten Bereich über und füllen dort in unmittelbarer Nähe die Elektronenlöcher aus. Die Löcher und die Elektronen haben sich also rekombiniert. Dabei heben sich die Ladungen auf; so gibt es keine freien Ladungsträger in dem Bereich, da das freie Elektron in das Siliziumatom gebunden wurde. Da im N-dotierten Bereich den Atomen aus der fünften Hauptgruppe jeweils ein Elektron entnommen und im P-dotierten Bereich den Atomen mit ursprünglich drei Elektronen jeweils ein Elektron hinzugegeben wurde, werden diese unbeweglichen Atome zu Ionen und tragen dabei eine elektrische Ladung. So werden die Atome aus der fünften Hauptgruppe, denen ein Elektron fehlt, positiv geladen und die Atome aus der dritten Hauptgruppe im P-dotierten Bereich, bei denen ein Elektron zu viel ist, negativ geladen. Die unbeweglichen geladenen Ionen der beiden Halbleiterkristall-Hälften bauen so ein elektrisches Feld auf, was der Diffusion entgegenwirkt, da die positiven Ionen im N-dotierten Bereich die weiteren freien negativ geladenen Elektronen zurückhalten und die negativ geladenen Ionen im P-dotierten Bereich diese freie Elektronen abstoßen. Das gleiche gilt für die Elektronenlöcher. So werden hier die Elektronen der Atome im P-dotierten Bereich in Richtung N-dotierten Bereich vom elektrischen Feld gedrückt. So wird auch der Diffusionswanderung der Löcher entgegengewirkt. Dieses elektrische Feld wird mit jedem weiteren entnommenen Valenzelektron und gefüllten Elektronenloch stärker. So gehen die Rekombination und die Diffusion so lange fort, bis das elektrische Feld stärker ist als die Anziehung der

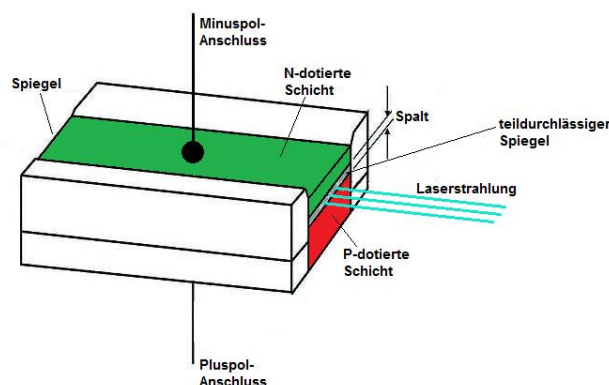


Elektronenlöcher und freien Elektronen. Wenn die Diffusion beendet ist, sind nur verschiedene Elektronen und Elektronenlöcher rekombiniert. Die restlichen Elektronen und Elektronenlöcher befinden sich weiterhin in ihren Dotierungs-Bereichen und werden daran gehindert sich zu rekombinieren.

So befinden sich auf der Grenze zwischen der N- und P- dotierten Hälfte keine freien Elektronen oder Löcher und sind so nicht stromleitend. Dieser Bereich wird Sperrschicht genannt. Dabei sind die P- und N- dotierten Bereiche außerhalb der Sperrschicht stromleitend, da sich dort freie Elektronen oder Elektronenlöcher befinden. Bei der Laserdiode ist der Halbleiterkristall an den Strom angeschlossen, so dass die Enden der beiden unterschiedlich dotierten Schichten jeweils einen Pol haben. Wenn man nun den Minuspol an die Anode und den Pluspol an die Kathode anschließt und eine Spannung anlegt, entsteht ein weiteres elektrisches Feld. Da die Ionen im P-dotierten Bereich negativ und die Ionen im N-dotierten Bereich positiv geladen sind, unterstützt man nur das von den Ionen ausgehende elektrische Feld und die Elektronen und die Elektronenlöcher werden weiter von der Dotierungsgrenze, also von der Sperrschicht, weggezogen. So wird die Sperrschicht immer größer bei Erhöhen der Spannung. Es fließt kein Strom. Die Laserdiode ist also falsch angeschlossen. Laserdioden vertragen bei Falschanschluss in der Regel maximal 5 Volt bis sie kaputt gehen.

Wenn man die Polarität allerdings wechselt (Minuspol auf Kathode und Pluspol auf Anode), wirkt das elektrische Feld der Spannung dem von den Ionen ausgehenden elektrischen Feld entgegen. Dabei werden die Elektronen im N-dotierten Bereich gegen die Sperrschicht gerückt. Im P-dotierten Bereich werden die Elektronen hingegen zum Pluspol gezogen, so wandern die Löcher zur Sperrschicht. Die Sperrschicht wird bei Erhöhen der Spannung immer kleiner. Ab einer bestimmten Spannung des angelegten Stroms, der Durchlassspannung, wird das elektrische Feld der Ionen von dem elektrischen Feld der angelegten Spannung ganz aufgehoben und nun kann Strom fließen und die Laserdiode arbeiten.

Bei Stromdurchfluss kommen in dem N-dotierten Bereich immer weitere Elektronen hinzu. Diese Elektronen wandern aufgrund der Diffusion zur Dotierungsgrenze und rekombinieren sich dann in der P-dotierten Schicht mit Löchern nahe der Grenze. Gleichzeitig werden ständig Elektronen aus dem P-dotierten Bereich am Pluspol entnommen, wobei ständig Elektronen durch Rekombination an der Grenze zur N-dotierten Schicht hinzukommen. So kommt es, dass die Elektronenlöcher entgegen der Elektronenwanderung auch zur Grenze fließen. Nun fließt ein Strom durch den Halbleiterkristall und die Laserdiode kann arbeiten.



Hier sieht man, wie die einzelnen dotierten Schichten und der Spalt der Laserdiode angeordnet sind. Außerdem sind die entsprechenden Anschlüsse, sowie der austretende Laserstrahl eingezeichnet.

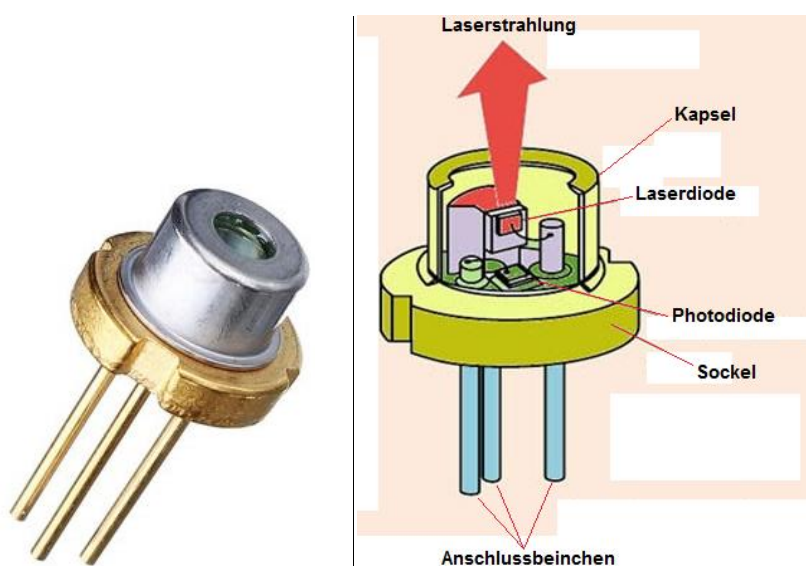
#### 4.2.1.2 ENTSTEHUNG DER LASERSTRAHLUNG

Die gewünschte Laserstrahlung entsteht dabei in der Dotierungsgrenzschicht, also in dem sehr schmalen Spalt (1 Mikrometer). Bei den ständigen Rekombinationen von den Elektronen und Elektronenlöchern, sind diese (nun gebundenen) Elektronen für eine kurze Zeit im angeregten Zustand, also auf einem höheren Energieniveau. Bei der Led entsteht die Lichtemission hauptsächlich durch spontane Emission. Bei der Laserdiode hingegen entsteht die Laserstrahlung, auch wie bei anderen Lasern, durch die Kettenreaktion der stimulierten Emission. Dazu muss der Laserdiode genug Energie in Form von Strom zugeführt werden, um eine Besetzungsinversion herzustellen. Auch im kleinen Abstand des Halbleiterkristalls ist ein optischer Resonator vorhanden. So sind zwei Spiegel (davon einer teildurchlässig) an den Endflächen des Spalts angeordnet.

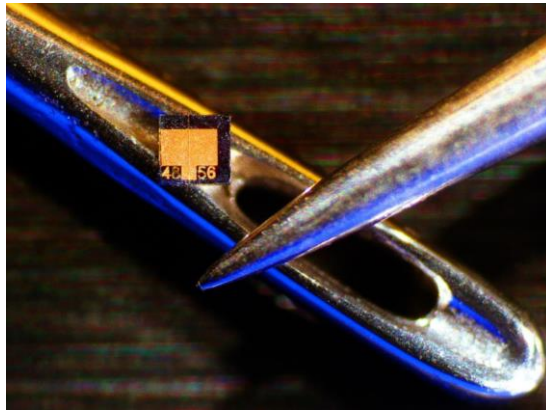
Laserdioden können sehr viele verschiedene Farben von Laserlicht aussenden. Die Wellenlänge des emittierten Laserlichtes hängt von dem verwendeten Material ab. Dazu gibt es viele verschiedene Dotierungsmöglichkeiten, wobei sehr komplexe Verbindungen üblich sind, und Mischverhältnisse der einzelnen Stoffe mit Abweichungen der Beispiel-Materialauswahl zur Erklärung der Dotierungen. Die Laserdiode kann dabei Wirkungsgrade von bis zu 70% erreichen was extrem hoch bei Lasern ist.

#### 4.2.1.3 AUFBAU

Die Laserdiode befindet sich standartgemäß in einer Kapsel, an welcher an der Oberseite eine durchsichtige Glasplatte eingebaut ist, an der die Laserstrahlung austritt. In dieser Kapsel befindet sich der Halbleiterkristall auf einem Metallsockel. Dabei ist die Emittierungsrichtung zur Glasscheibe ausgerichtet. Die Laserdiode ist, wie auch Leds, sehr wärmeempfindlich. Da diese als Nebenprodukt dennoch relativ viel Hitze produziert, ist dieser Metallsockel sehr Wärmeleitfähig und dient als Kühlung der Laserdiode, indem die Hitze des Kristalls auf den Metallsockel übertragen wird, welcher über eine größere Fläche verfügt und so die Hitze besser auf die Luft überträgt. Zusätzlich befindet sich oft in unmittelbarer Nähe zur Laserdiode, in der gleichen Kapsel, ebenfalls eine Photodiode. Ein Anschluss der Photodiode ist mit einem Pol der Laserdiode verbunden, so kommt es, dass die fertige Laserdiode drei Anschluss-Beinchen hat. Die Photodiode misst bei Betrieb der Laserdiode ihre abgegebene Lichtleistung und trägt so zur Leistungsregulierung der Laserdiode bei.



Das linke Bild zeigt eine fertige Laserdiode samt Photodiode und Hülle. Im rechten Bild ist der Querschnitt einer solchen Kapsel abgebildet. Die eigentliche Laserdiode (Kristall) ist dabei nicht größer als ein Stecknadelkopf, wie man auf folgendem Bild erkennen kann:



Vergleich der Größe der eigentlichen Laserdiode mit einem Nähadelkopf.

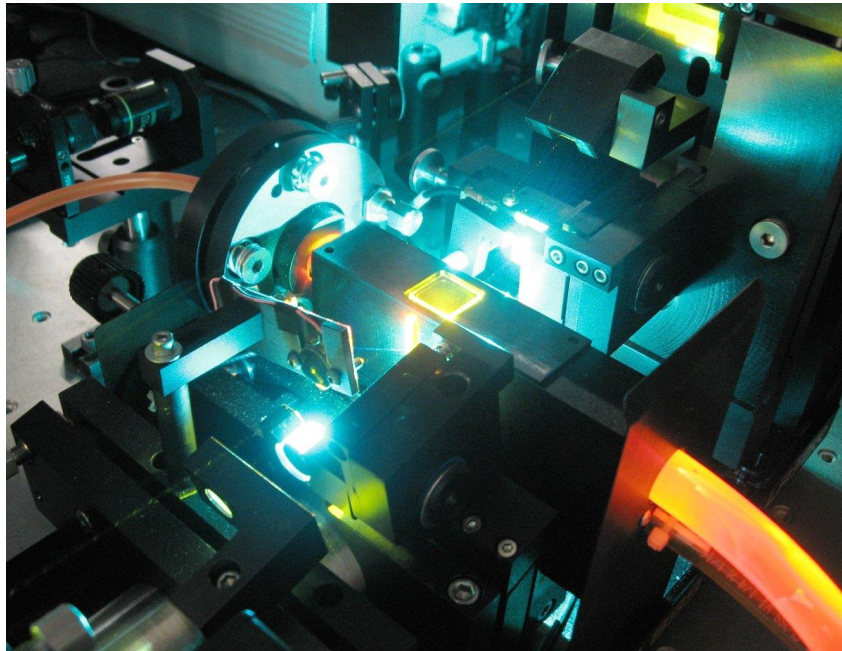
### 4.3 FARBSTOFFLASER

Farbstofflaser sind sehr komplexe Laser, welche in der Forschung häufig angewendet werden. Das Lasermedium ist bei Farbstofflasern flüssig, wobei der laseraktive Stoff Moleküle sind, welche in einem Lösungsmittel frei schwimmen. Dieses durchsichtige Lösungsmittel kann Alkohol oder auch Wasser sein. Farbstofflaser sind sehr vielseitig und können sowohl im Dauerstrich-, als auch im Puls-Betrieb arbeiten. Ihre üblichen Leistungen reichen beim Dauerstrichbetrieb bis über 100 Watt hinaus. Es ist möglich mit Farbstofflasern im Pulsbetrieb Pulsspitzen-Leistungen im Gigawattbereich zu erzeugen. Dabei kann die Pulsdauer bloß einige Pikosekunden betragen. Das Spektrum der Farbstofflaserstrahlung ist sehr weitläufig und liegt im Bereich zwischen 300 nm und 1200 nm. Es gibt einige hundert verschiedene laseraktive Moleküle, welche zur Produktion von Laserstrahlung in Farbstofflasern geeignet sind. Die Moleküle sind aber meist extrem komplex und haben teilweise enorme Ausmaße von an die hundert Atomen.

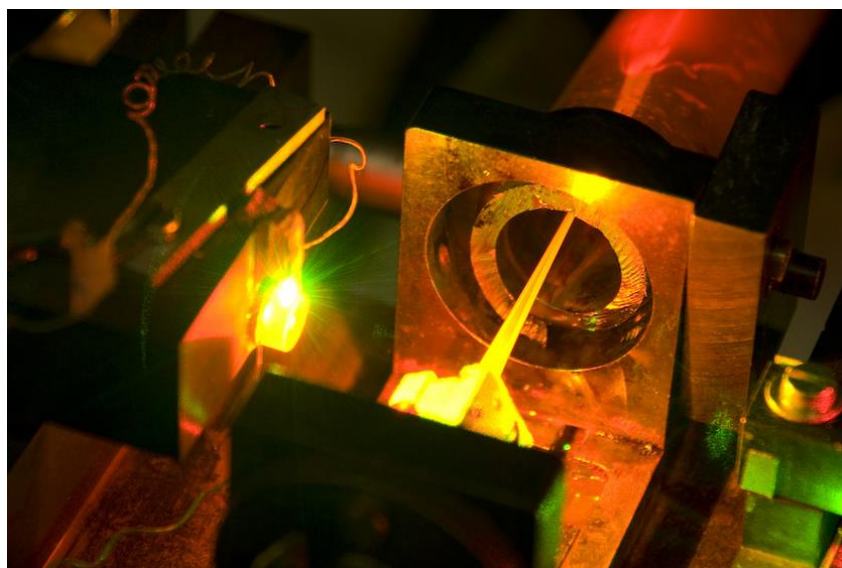
Diese laseraktiven Moleküle sind ausschließlich optisch gepumpt. Dabei kommen zum Pumpen neben Blitzlampen meistens Laserdioden oder andere geeignete Pump-Laser zum Einsatz. Bei Farbstofflasern werden die verschiedenen laseraktiven Moleküle nun durch diese Energiepumpe angeregt. Dabei werden die Moleküle auch in Vibrationen und andere mechanische Bewegungen versetzt. Diese laseraktiven Moleküle verfügen meist über sehr komplexe Vierniveausysteme. So sind die entsprechenden Angeregten-, Zwischen- und Laserniveaus bei Farbstofflasern typischerweise in sehr viele verschiedene „Unter-Niveaus“ unterteilt. So existieren sehr viele Möglichkeiten, welche Wellenlänge ein emittiertes Photon haben kann, da es eben sehr viele verschiedene Energiedifferenzen zwischen den zahlreichen Laserniveaus und den vielen unteren Niveaus gibt. Somit produziert ein Farbstofflaser ein ganz und gar nicht monochromatisches Laserlicht, da sich dieser aus diesen sehr vielen verschiedenen Frequenzen zusammensetzt, welche sich alle gleichzeitig im Resonator zu Laserstrahlung ausbilden. Doch diese vielen Emissionslinien sind ein großer Vorteil des Farbstofflasers, denn durch den Einbau eines Wellenlängenfilters im optischen Resonator können alle Frequenzen, bis auf eine einzige, herausgefiltert werden. Dieser Wellenlängenfilter lenkt die anderen Frequenzen ab und streut diese Lichtstrahlen nach außen hin ab. So entstehen zusätzliche Verluste bei diesen Frequenzen, wobei die ausgewählte Frequenz sich ungehindert im Lasermedium verstärken kann. Mit dem Verstellen dieses Filters kann man frei unter allen in dem Laserspektrum liegenden Frequenzen die Laserstrahlfrequenz auswählen. Das Laserspektrum des einzelnen laseraktiven Moleküls kann dabei bis zu 60 nm breit sein.

Da durch die sehr hohe permanente Lichtbelastung des laseraktiven Stoffes, dieser vor allem beim Dauerstrichbetrieb schnell ausbleichen würde, sind die meisten Farbstofflaser geströmt ausgeführt, so dass sich die Lichtbelastung auf die einzelnen laseraktiven Moleküle stark verringert. Aufgrund des Ausbleichens muss das Lasermedium daher regelmäßig ausgetauscht werden, da es sonst nach einer Zeit seine Laseraktivität ganz verlieren würde.

Das Lasermedium wird in der Regel durch ein sehr dünnes Glasgefäß im Laserresonator gepumpt, kann aber auch in einer flachen Fontaine in den Laserresonator eingespritzt und nachher aufgefangen werden.



Auf dem Bild ist ein mittels Argon-Ionen-Laser (hellblaues Licht) gepumpten Farbstofflaser abgebildet. Dieser Farbstofflaser ist geströmt ausgeführt.



Hier kann man einen Farbstofflaser erkennen, wobei die laseraktive Flüssigkeit in einem flachen Strahl am Pumpstrahl vorbei strömt und Laserstrahlung emittiert. In dem hinten befestigten Rohr wird diese Flüssigkeit aufgefangen und wiedergenutzt.

## 5 EXPERIMENT

Diese Arbeit schließe ich mit einem selbst durchgeführten Experiment mit einem echten Laser ab. Dieses Laser-Experiment ist das faszinierende und sehr bekannte Doppelspaltexperiment, welches am besten mit Hilfe eines Lasers zu realisieren ist. Das Doppelspaltexperiment ist ein Beweis für den Wellencharakter des allgemeinen Lichtes.

Der Aufbau dieses Experimentes ist sehr einfach.

Dazu habe ich einen Laser in einen möglichst langen und menschenleeren Raum aufgestellt. Bei dem Laser handelt es sich um eine Laserdiode, welche grünes Licht mit einer Wellenlänge von 532 nm emittiert.

Etwa 25-30 cm vor dem Laser ist eine Vorrichtung mit einer Blende aufgestellt, welche mit einem Doppelspalt ausgestattet ist. Die Breite der beiden Spalte beträgt jeweils 0,1 mm, wobei der Mittenabstand 0,5 mm beträgt.

Der Laser und diese Blende stehen auf einem rollbaren Tisch. Dabei ist der Laser so ausgerichtet, dass dieser durch den Doppelspalt auf eine weiß gestrichene Wand leuchtet. Der Abstand zwischen der Wand und der Doppelspaltblende misst 9,61 Meter.

### 5.1 KURZE ERKLÄRUNG UND RESULTAT

Beim Einschalten des Lasers passiert folgendes: der hochgradig gebündelte Laserstrahl trifft auf den Doppelspalt, wobei der Durchmesser des Laserstrahls so groß ist, dass er die beiden Spalte abdeckt.

Beim Durchlaufen der Spalte werden die gerade und parallel verlaufenden Lichtwellen gebeugt. Dabei werden diese hinter dem jeweiligen Spalt über der ganzen Breite des Spaltes rein zufällig in alle Richtungen gestreut (auf der Querschnittsebene des Spaltes). So breiten sich die gestreuten Lichtstrahlen hinter jedem Spalt räumlich gesehen, aufgrund der länglichen Spalte, sozusagen in einem immer größer werdenden Halbzylinder aus. Dabei treten auch schon geringe Interferenzen auf, da die Lichtstrahlen auf der ganzen Breite des Spaltes überall zufällig verstreut werden. So kommt es bei Lichtstrahlen, welche durch die Beugung in einem gleichen gewissen Winkel abgelenkt wurden, zu Interferenzen. Würde man nun einen Schnitt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der abgelenkten Lichtwellen machen, sind diese aufgrund der unterschiedlich zurückgelegten Weglängen gleichmäßig verschoben zueinander. So kommt es aufgrund der festen Wellenlänge örtlich abwechselnd zu destruktiven und zu konstruktiven Interferenzen. Dieses Bild tritt logischerweise bei allen Streu-Winkeln auf. Durch die Überlagerung aller Wellen kommt es so beim Einzelspalt bereits zu einem, ähnlich wie beim Doppelspalt, Interferenzmuster.

Wenn nun beim Doppelspalt diese beiden sich ausbreitenden Kegel überlagern, passiert eigentlich das gleiche. So löschen sich manche Wellen gleicher Richtung durch den Vers Schub einfach aus und andere, welche so verschoben sind, dass diese genau in Phase sich fortbewegen, werden verstärkt.

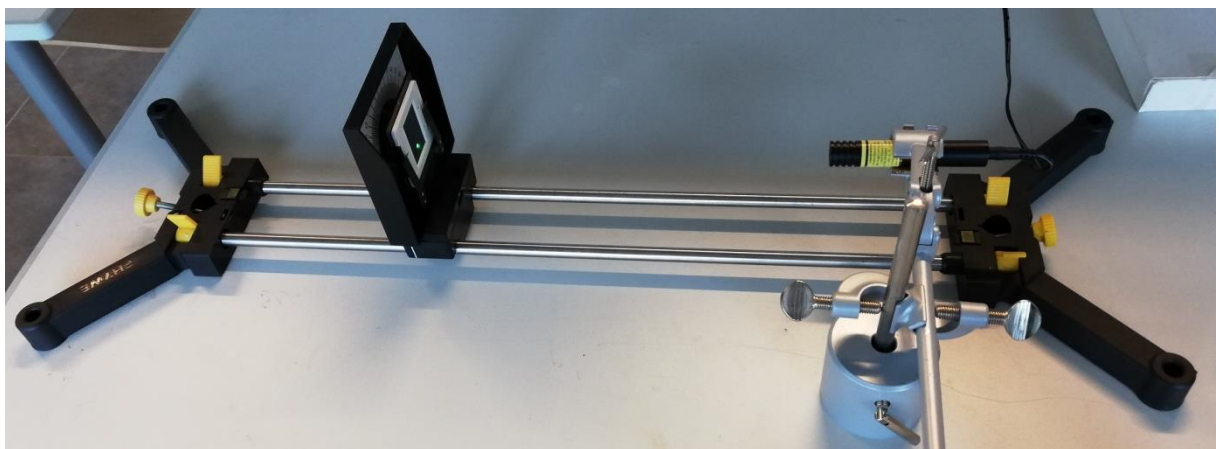
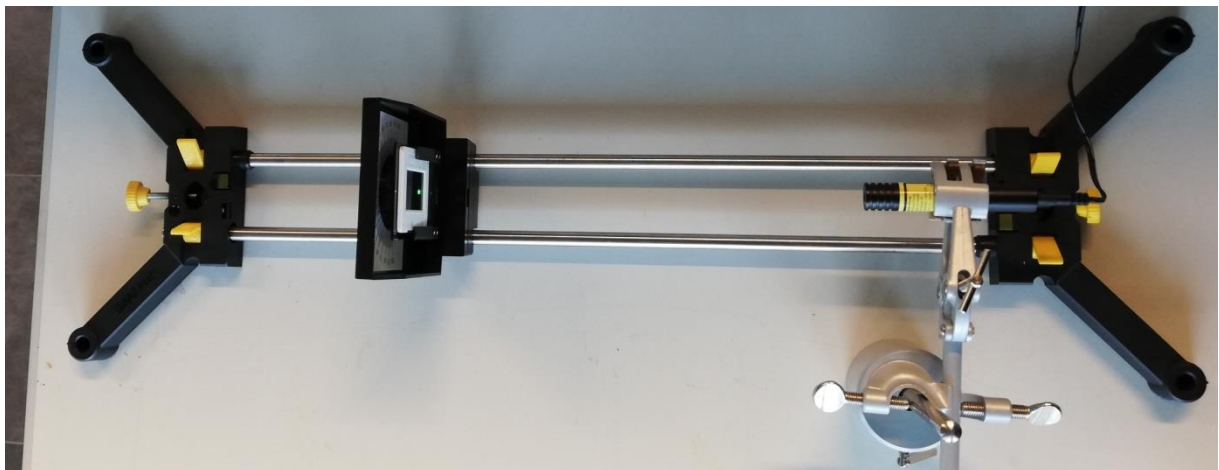
Auf der weißen Wand, welche parallel zur Doppelspaltblende steht, tritt nun ein Interferenzmuster auf, wobei die Lichtintensität örtlich durch die Interferenz abwechselnd hoch und erloschen ist. Beim



Interferenzmuster eines Einzelspaltes befinden sich ein Strich hoher Intensität in der Mitte und weitere Striche (immer mit einem gewissen Abstand zueinander) nach außen hin, welche aber sehr schnell schwächer werden. Das Interferenzmuster des Doppelspaltes ist eigentlich das gleiche wie das Interferenzmuster des Einzelspaltes, wobei die Intensitäts-Striche des Einzelspaltes sozusagen aufgrund der zusätzlichen Interferenz in viele kleinere Intensitäts-Striche mit einem gewissen Abstand zueinander unterteilt sind. Dabei nimmt die gesamte Intensität von der Mitte des Interferenzbandes nach außen hin ab. Die Breite des Interferenzbandes entspricht dem Durchmesser des Laserstrahls.

Dieses Interferenzmuster beweist, dass die elektromagnetischen Wellen auch einen Wellencharakter besitzen, da dieses Interferenzmuster nur Folge einer Interferenz (Beugung mit inbegriffen) sein kann, was nur bei Wellen auftritt. Bei einem reinen Teilchenverhalten müsste der Spalt einfach von den durchdringenden Lichtstrahlen 1:1 an der Wand abgebildet sein, da bei Teilchen keine Beugung und Interferenzen auftreten, was diese aus ihrer Bahn lenken könnte.

## 5.2 DER AUFBAU DES EXPERIMENTES IN BILDERN

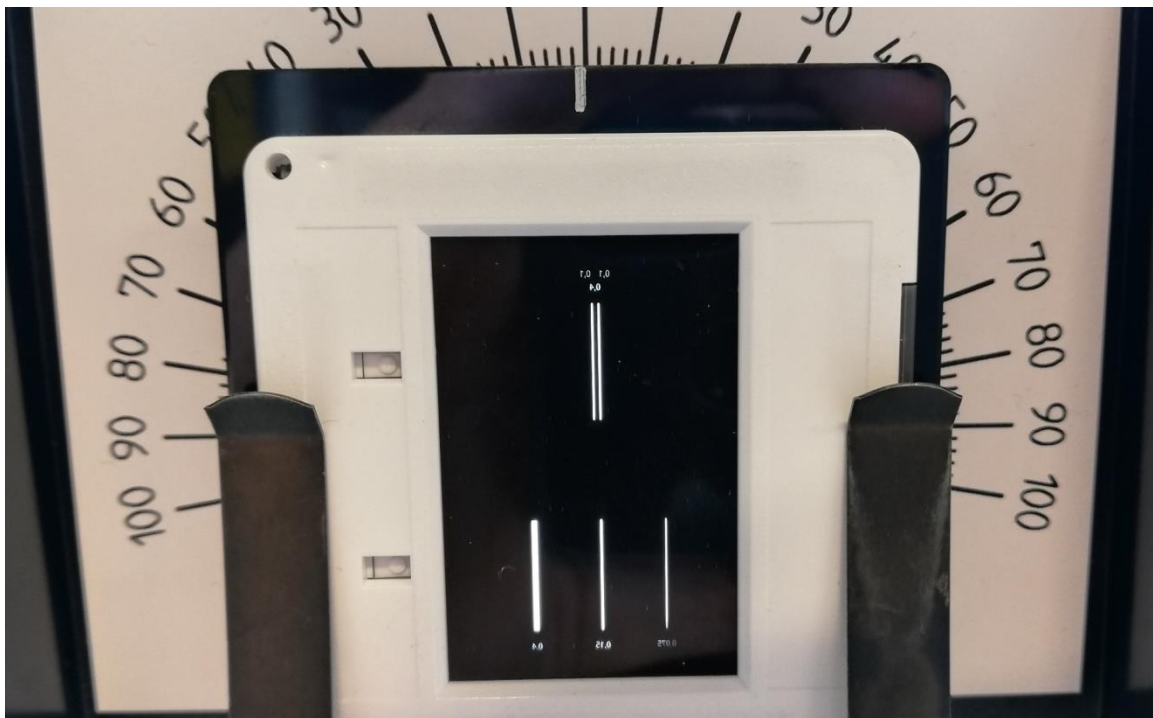


Auf diesen beiden Bildern ist der Aufbau meines Experimentes auf dem rollbaren Tisch zu sehen, wobei die auf Schienen geklemmte Doppelspaltvorrichtung links zu erkennen ist. Der Laser befindet sich hingegen auf der rechten Seite.

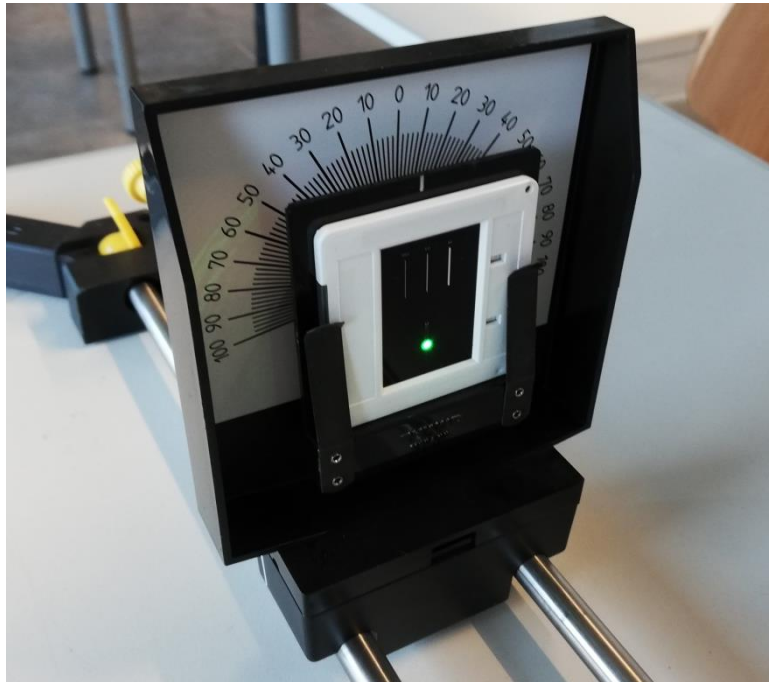




Hier sieht man die Aufhängung des Lasers genauer.

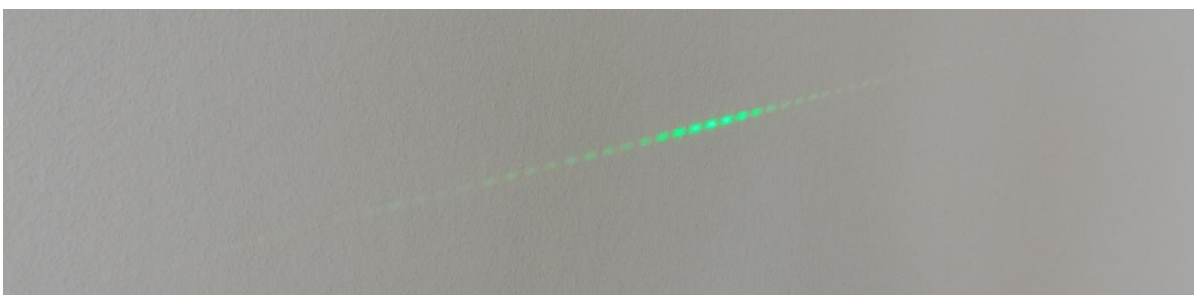
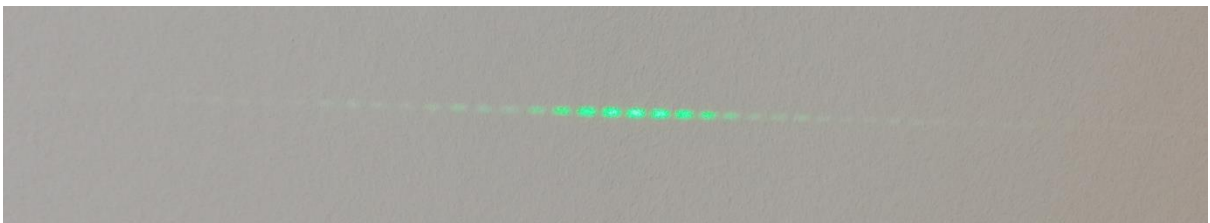


Dieses Foto zeigt die Doppelspaltsschablone näher. Der geeignete Doppelspalt befindet sich mittig oben in der schwarzen Schablone.

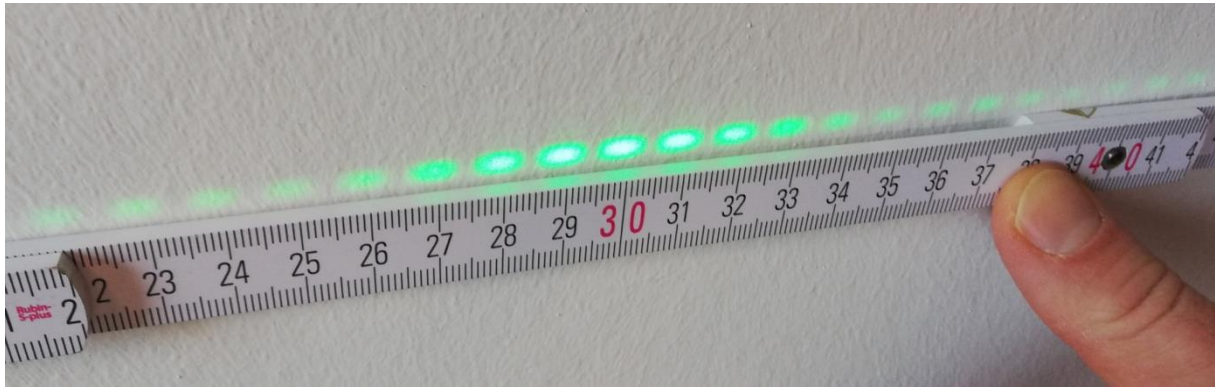


Die Doppelspaltsschablone beim Betrieb des Lasers.

### 5.3 DAS RESULTAT IN BILDERN



Das Resultat des Experimentes ist ein deutliches Interferenzmuster auf der angezielten weißen Wand, woran man sehr gut auf das Phänomen des Wellencharakters des Lichtes rückschließen kann.



Damit man sich die Größe des Interferenzmusters vorstellen kann, habe ich hier einen Zollstock unter das Muster gehalten, wobei die 30 cm-Marke des Zollstockes in der Mitte des Interferenzmusters liegt.

## 5.4 ZURÜCKRECHNEN DER WELLENLÄNGE DES LASERS

Mit Hilfe einer mathematischen Formel kann man anhand des Interferenzmusters und der gegebenen Maße die Wellenlänge des Lasers zurückrechnen.

Dazu braucht man folgende Formel:

$$i = \frac{\lambda * D}{a}$$

Wobei:

$\lambda$ = Wellenlänge des Laserlichtes (532 nm)

D= Abstand von Doppelspaltblende zur Wand (9,61 m)

i= Mittenabstand der Intensitäts-Striche (1,029411765 cm)

a= Mittenabstand der Spalte (0,5 mm)

Diese Formel wird dann so umgestellt, dass wir die Wellenlänge des Laserstrahls errechnen können:

$$\lambda = \frac{i * a}{D}$$

Nun werden die Daten in der entsprechenden SI-Einheit eingegeben:

$$\frac{1,029411765 * 10^{-2} m * 5 * 10^{-4} m}{9,61 m} = 5,355940505 * 10^{-7} m$$

Und man erhält in Nanometern: 535,5940505 nm, was der echten Wellenlänge von 532 nm sehr nahe kommt. Der Fehleranteil liegt bei nur 0,6710400284%, welcher aufkommt, da die Präzision der Messgeräte begrenzt ist.



Auf dem Vermerk des Lasers ist die tatsächliche Wellenlänge von 532 nm gut zu erkennen.

## 6 HAUPTQUELLEN

<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/laser/ausblick/laser-typen>  
<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/laser/lasermedien>  
<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/laser/versuche/helium-neon-laser>  
<https://www.leifiphysik.de/optik/lichtbrechung>  
[https://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip\\_Lasers.html](https://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip_Lasers.html)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Lasertypen](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Lasertypen)  
<https://wiki.das-labor.org/w/Kupferdampfaser>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Farbstofflaser>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Festk%C3%B6rperlaser>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Gaslaser>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Energieniveau>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Verz%C3%B6gerungsplatte>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Argon-Ionen-Laser>  
[https://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross\\_Physik\\_III\\_Kap\\_11.pdf](https://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross_Physik_III_Kap_11.pdf)  
<http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/ap-2012/ap-2012se34.html>  
<https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ihf/laserundaw.pdf>  
<https://www.youtube.com/watch?v=xFy9DNN0j4M>  
<http://www.medi-learn.de/examen/PDFs/Ph/2967986bbbe91f4419e02ba5ae9b9ae1.pdf>  
<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/3576704/Radiowellen-Clemens-Wolf.pdf>  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische\\_Welle](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle)  
<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/elektromagnetische-wellen>  
<https://www.vitatec.com/grundlagen/wechselwirkung-em-strahlung/2>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Transversalwelle>  
<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/polarisation-von-licht>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Photon>  
[https://www.keyence.de/ss/products/marking/marking\\_central/study/principle.jsp](https://www.keyence.de/ss/products/marking/marking_central/study/principle.jsp)  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Besetzungsinversion>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Blitzr%C3%B6hre>  
<https://docplayer.org/11783339-Der-laser-das-besonders-facettenreiche-wesen.html>  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Chemischer\\_Laser](https://de.wikipedia.org/wiki/Chemischer_Laser)  
<http://www.fundus.org/pdf.asp?ID=11792>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Faserlaser>

[http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Grundlagen%20der\\_Lasertechnik.pdf](http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Grundlagen%20der_Lasertechnik.pdf)  
<http://optmat.physik.uni-osnabrueck.de/scripts/laser/lasergrundlagen.pdf>  
<http://www.chemie.de/lexikon/Laser.html>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Superstrahler>  
[https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Edelgasentladungen\\_ClemensSchaefermeier\\_.pdf](https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Edelgasentladungen_ClemensSchaefermeier_.pdf)  
<https://www.uni-regensburg.de/physik/didaktik-physik/medien/VeranstMat/ExpSemgemMat/ELehre/gasentladungsroehre.pdf>  
[https://books.google.lu/books?id=DKBBwAAQBAJ&pg=PA48&lpg=PA48&dq=thermische+anregung+laser&source=bl&ots=gt071NEM5B&sig=jmRvopS1XV7UPbKY5F0lyEedIA&hl=de&sa=X&ved=2ahUKEwi61Nvt\\_tHfAhVQaIAKHSa\\_C4sQ6AEwA3oECAAAQ#v=onepage&q=thermische%20anregung%20laser&f=false](https://books.google.lu/books?id=DKBBwAAQBAJ&pg=PA48&lpg=PA48&dq=thermische+anregung+laser&source=bl&ots=gt071NEM5B&sig=jmRvopS1XV7UPbKY5F0lyEedIA&hl=de&sa=X&ved=2ahUKEwi61Nvt_tHfAhVQaIAKHSa_C4sQ6AEwA3oECAAAQ#v=onepage&q=thermische%20anregung%20laser&f=false)  
<https://www.laserfreak.net/forum/viewtopic.php?p=82972>  
<https://www.layertec.de/de/capabilities/coatings/dielectric/>  
[https://uol.de/fileadmin/user\\_upload/physik/ag/uno/download/Diplomarbeiten/Bjoern\\_Frederic\\_Piglosiewicz-Charakterisierung\\_der\\_raeumlichen\\_und\\_zeitlichen\\_Struktur\\_small.pdf](https://uol.de/fileadmin/user_upload/physik/ag/uno/download/Diplomarbeiten/Bjoern_Frederic_Piglosiewicz-Charakterisierung_der_raeumlichen_und_zeitlichen_Struktur_small.pdf)  
<https://docplayer.org/34093124-Diplomarbeit-carl-von-ossietzky-universitaet-oldenburg-diplomstudiengang-physik.html>  
<https://www.iept.tu-clausthal.de/fileadmin/files/praktika/KurzePulse.pdf>  
[https://www.youtube.com/watch?v=Dk\\_CbGJI41U](https://www.youtube.com/watch?v=Dk_CbGJI41U)  
<https://www.eval.at/lasa---laser-sicherheit-in-der-ausbildung/kapitel-1---laser-allgemein/1-5---lasertypen-und-anwendungen>  
<https://www.spektrum.de/lexikon/optik/gaslaser/1115>  
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/excimerlaser/4618>  
<https://www.spektrum.de/>  
 Farbstofflaser,  
 Feststofflaser,  
 chemische Laser,  
 unterschiedliche Lasertypen  
<https://www.produktion.de/trends-innovationen/faserlaser-diese-staerken-machen-ihn-unverzichtbar-265.html>  
<https://docplayer.org/24582712-Vorlesung-photonik-physik-des-lasers.html>  
<https://www.youtube.com/watch?v=glydm2ZvVCM>