

1 Einführung

Über LASER zu schreiben, ist eine kleine Kunst, bestehen doch bereits zahlreiche Beiträge über dieses zweifellos höchst aufschlussreiche Thema. Trotzdem soll hier ein pragmatischer Ansatz skizziert werden, nicht zuletzt aus Gründen des Selbstbaus, was die Angelegenheit - zumindest für einige - interessant macht. Der Schwerpunkt der Beitragsserie liegt denn auch auf eindeutig auf dem praktischen Teil.

Als Basislektüre sind folgende Titel zu empfehlen:

- Fritz Kneubühl, Markus W. Sigrist: Laser (Vieweg + Teubner)
- Thomas Rapp: Experimente mit selbstgebaute Lasern (Franzis)¹

Der LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ist eine konsequente Fortsetzung des MASER-Prinzips im optischen Spektrum. Heutige Industrielaser arbeiten mit UV, Farblight und IR. Der erste funktionsfähige Laser wurde von Maiman (1960) mit einem Rubin- stab nach dem Fabry-Pérot-Prinzip gebaut und von der Gelehrtenwelt zunächst stiefmütterlich behandelt. In der Folge entstanden die unterschiedlichsten Lasertypen, so dass ein Übersichtsschema angebracht ist.

LASER-Typologie
Gas-Laser (Atome, Moleküle, Ionen) Stickstoff, Argon, Helium-Neon, Wasserstoff, Kohlendioxid u.a.m.
Metалldampf-Laser Kupfer-, Blei-, Quecksilberdampf u.a.m.
Excimer-Laser Chlor, Fluor in Edelgasen (Halogenide)
Festkörper-Laser Cr:Rubin, Titan:Saphir, Nd:YAG u.a.m.
Halbleiter-Laser (Diodenlaser) Gallium-Arsenid, Zink-Selenid, Gallium-Nitrid
Farbstoff-Laser (Dye Laser) organische Farbstoffe (Rhodamine) in Lösungen

Abb. 1-1: Laservielfalt

Inzwischen sind selbst Röntgenlaser keine Seltenheit. Der "Freie Elektronen Laser" (XFEL) verkörpert diese Entwicklungsstufe. In Kalifornien steht bereits ein Superlaser mit "der Brennkraft eines Sterns". Wie bereits beim Maser geht es darum, die Besetzungsinversion der atomaren oder molekularen Energieniveaus gezielt zu beeinflussen. Im Unterschied zum Maser

¹ <http://www.puls laser.de/>

sind dazu drei- oder vierwertige Niveaustufen unabdingbare Voraussetzung. Der entsprechende Übergang in das metastabile Niveau wird zur stimulierten Emission genutzt. Bei nur zwei Energiestufen würde das abgestrahlte Licht sogleich wieder absorbiert, so dass keine fortlaufende Lichtverstärkung erzielbar wäre.

Rein theoretisch hat Einstein (1916) grundsätzliche Überlegungen zur Inversion und Stimulation beigesteuert: "Zur Quantentheorie der Strahlung." Nach A.E. sind deshalb die sog. Einstein-Koeffizienten benannt.²

(Was viele vielleicht nicht wissen, ist, dass sich Einstein öfters mit Aspekten der statistischen Physik beschäftigte.)

2 Stickstoff-LASER

Einer der einfachsten (im Selbstbau zu verwirklichenden) Laser ist der Stickstofflaser, der von Heard (1963) erstmals untersucht wurde ohne seinerzeit auf grössere Aufmerksamkeit zu stossen. Inzwischen ist das glücklicherweise anders.

Allgemein gehört der N₂-Laser zu den *vibronischen* Lasern. Darunter versteht man Laser, bei denen Vibrationsniveaus verschiedener elektronischer Zustände involviert sind. Infolge der grossen Verstärkung wird die Besetzungsinversion der N₂-Moleküle in einem Durchgang abgebaut, so dass der N₂-Laser auch ohne Resonatorspiegel als "Superstrahler" (bei einem Gasdruck zwischen einigen mbar bis über 1 bar) betrieben werden kann. Meist wird jedoch eine Optik eingesetzt, um so die effektive Weglänge im laseraktiven Medium - und damit die Strahlintensität - zu erhöhen. Zudem wird damit der Strahldivergenz entgegen gewirkt.

Die Emissionsspektren liegen im sichtbaren und ultravioletten Bereich. Das neutrale N₂-Molekül ermöglicht über 440 Laseremissionslinien, von denen für unsere Zwecke der bereits erwähnte Übergang im UV relevant ist (insbesondere die intensivste Linie von 337 nm). Es handelt sich um einen Übergang des elektronischen Zustandes $C^{3\Pi}_\mu \rightarrow B^{3\Pi}_g$.

Einer Analyse von Davis und Rhodes zufolge besteht dieser Laserübergang aus einer Vielzahl von dicht beieinander liegenden Rotationsübergängen. Daraus resultiert die vergleichsweise grosse Bandbreite von 0.1 nm der Emission. Die Besetzung des oberen Niveaus erfolgt direkt durch Elektronenstoss aus dem Grundzustand - meist in einer Gasentladung. Der N₂-Laser ist somit ein Dreiniveau-Laser. Der vibronische Übergang ist "self-terminating"; denn die Lebensdauer des unteren metastabilen Zustandes ist wesentlich länger, als die des oberen Inversionsbandes. Die hervorgehenden Laserpulse besitzen eine Dauer von bis zu 5 ns. Die max. Pulsfrequenz ist dadurch auf 100 Hz beschränkt.

Der für unsere Zwecke geeignete Laser-Übergang mit seiner Hauptlinie von 337 nm befindet sich zwischen den zwei oberen Niveaus. Die energiereichste Besetzung besitzt eine nur sehr kurze Lebensdauer von 40 ns, das mittlere Niveau hingegen weist eine solche von einigen Millisekunden auf. Weil sich demzufolge die Inversion schnell abbaut, kann der Stickstofflaser nur im Pulsverfahren betrieben werden. Dies geschieht mittels Hochspannungsimpulsen (10 bis

² <http://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinkoeffizienten>

30 kV), wodurch die damit bewirkte Stossionisation zum Lasereffekt beiträgt. Eine grosse Wiederholrate wird durch die lange Lebensdauer des unteren Niveaus erschwert, weil die dort befindlichen N_2 -Moleküle für den Inversions-Zyklus erst nach Ablauf ihrer Verweildauer erneut zur Verfügung stehen. Die Wiederholrate lässt sich aber steigern, dadurch, dass der Stickstoff das Entladungsrohr durchströmt (und somit stets Moleküle im Grundzustand vorhanden sind) oder auch, indem der Gasdruck erhöht wird. Durch die gegenseitigen Stöße der Moleküle entleert sich das untere Niveau dann schneller.

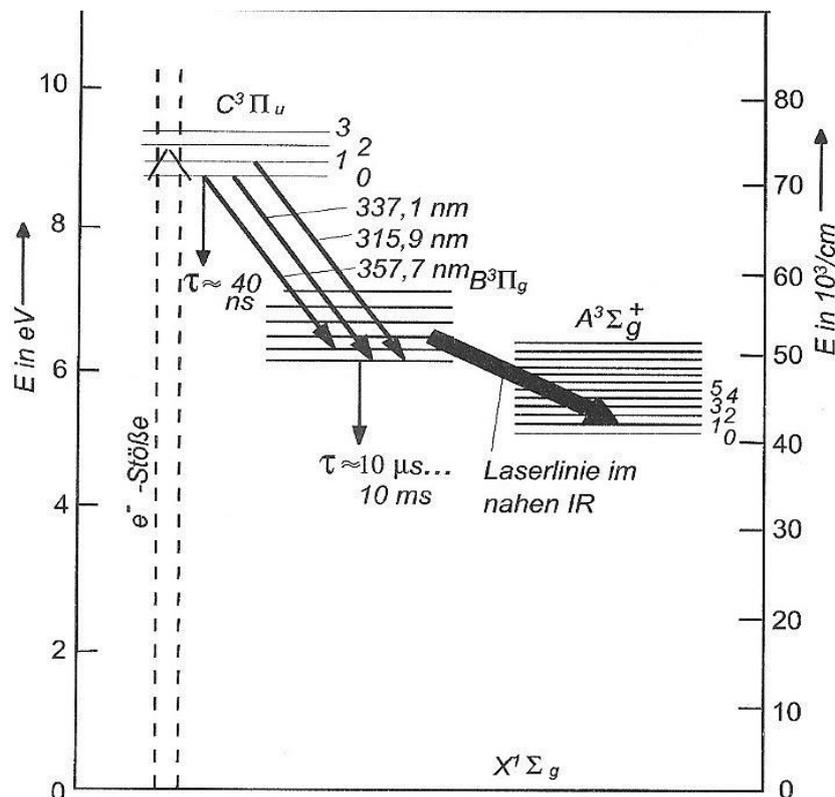


Abb. 2-1: Niveauschema des N_2 -Moleküls³

Stickstofflaser werden dort eingesetzt, wo kurze Pulse mit hohen Pulsleistungen im UV benötigt werden, also vorwiegend zum Pumpen von Farbstofflasern. Inzwischen wurde der N_2 -Laser weitgehend durch den Excimerlaser verdrängt, welcher wesentlich grössere Pulsspitzenleistungen und Pulsenergien generiert. Für Selbstbauzwecke ist der N_2 -Laser aber nach wie vor die preisgünstigste Lösung.

2.1 TE-Stickstofflaser

Meist werden Stickstofflaser transversal betrieben (sog. TE-Laser), d.h. dass das stimulierende elektrische Feld quer zur optischen Achse verläuft. Trotz grösserer Kammerlängen kann so die Impedanz der Entladestrecke niedrig gehalten werden (was für kurze Pulse nötig ist). Es sind Verstärkungen bis über 100 dB/m erzielbar. Deshalb wird der Stickstofflaser oft im sog. "Superstrahlmodus" betrieben. In diesem Fall sind keine stirnseitigen Spiegel nötig, was die Konstruktion erheblich vereinfacht. Auch eine longitudinale Entladung zwischen zwei stirnseitigen

³ Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzis)

Elektroden ist möglich. Solches erlaubt kürzere und kompakte Bauformen, ist aber weniger ergiebig.

Aufgrund der Stickstoffbefüllung ist eine höhere Leistung zu erwarten als beim mit Luft betriebenen TEA-Laser. Der Betriebsdruck liegt zwischen 50 bis 150 mbar, so dass eine Drehschieberpumpe empfehlenswert ist. Auch eine Membranpumpe leistet gute Dienste. Ein zusätzlicher Stutzen dient dem Anschluss eines Bourdon-Manometers.

Für die ca. 160 mm langen Elektroden der Entladungsstrecke wird Flachmaterial (20 x 4) aus Aluminium, Kupfer oder Messing verwendet. Die dem Entladungskanal zugewandten Kanten und Ecken werden angefeilt und poliert, um eine runde Kontur zu erhalten. Es ist strikte auf Parallelität zu achten.

Die Kondensatorbank kann - wie bereits erwähnt - durch eine Bandleitung (Blumlein-Generator) realisiert werden. Die Gesamtkapazität soll lediglich einige nF betragen. Ansonsten verwendet man keramische HV-Kondensatoren in "Doorknop"-Ausführung.

Betrieben wird der TE-Stickstoff-Laser mit der LC-Inversionsschaltung.

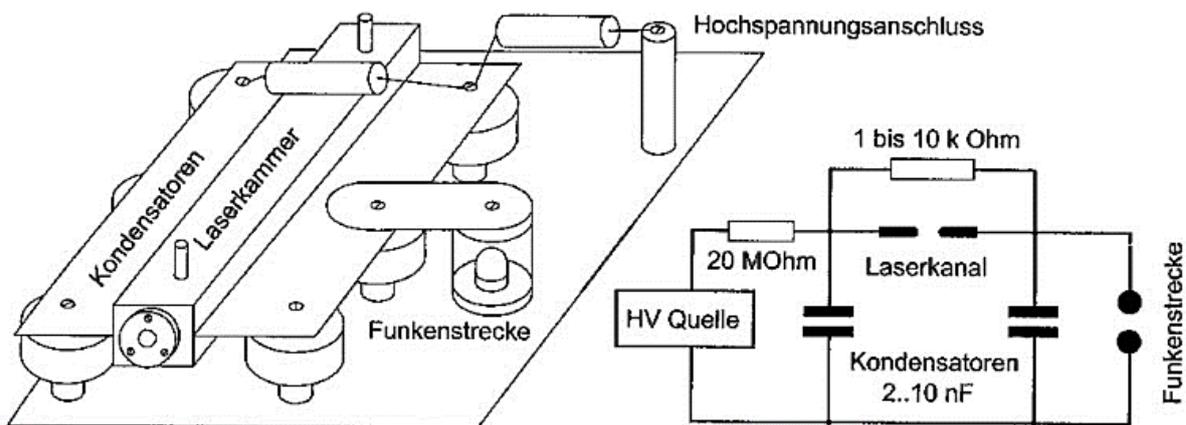


Abb. 2-2: Kondensator-Beschaltung gemäss Blumlein-Schema⁴

Parallel zum Laserkanal kann zudem ein Peaking-Kondensator montiert werden.

Funktionsfähiger Blumlein-Stickstoff-Laser:

http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/blumlein_te-laser.jpg

2.2 TEA-Stickstofflaser

Schliesslich kann der Stickstofflaser sogar unter Atmosphärendruck betrieben werden (sog. TEA-Laser), so dass Vakuumsysteme weitgehend entfallen. Die genannten Gründe prädestinieren diesen Laser geradezu für den Selbstbau.

Einer der Vorteile dieser Variante ist die Möglichkeit des Betriebs unter normalem Atmosphärendruck, so dass das Vakuumsystem entbehrlich wird. Unter bestimmten Voraussetzungen ist sogar der Betrieb mit normaler Luft anstatt reinem Stickstoff möglich. Die elektronegativen Sauerstoffmoleküle erschweren zwar eine homogene Gasentladung. Ein weiteres Erschwernis

⁴ Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzis)

ist der hohe Druck, wodurch das ohnehin kurzlebige obere Energieniveau zusätzlich zur Entleerung angeregt wird. Die Pumpenergie muss dem System somit in vergleichbar kurzer Zeit zugeführt werden. Parasitäre Induktivitäten sind zu minimieren und Kapazitäten klein zu halten. Solches ist mit Bandleitungen (Blumlein-Schaltung) gut möglich. Diskrete Kondensatoren müssen dabei durch leitende dünne Bleche oder Folien aus Aluminium ersetzt werden.

Bandleitung mit Funkenstrecke:

<http://sites.google.com/site/futurephysics//Home/blumlein.jpg>

Für Bandleitungen eignen sich bspw. beidseitig kaschierte Leiterplatten (Cu-Dicke 0.6 mm) aus glasfaserverstärktem Epoxid (FR4). Die Oberseite wird nach bekanntem Ätzverfahren behandelt, die Unterseite bleibt wie sie ist. Die Kapazität beträgt etwa 2 nF pro Kondensator. Für die benötigte Funkenstrecke wird eine kreisförmige Fläche ausgeätzt, in welche die 'Spark gap' passt.

Die Laserkammer wird aus Plexiglas gefertigt und mit einem handelsüblichen Epoxidharzkleber verleimt. Stirnseitig wird die Kammer mit Grundplatten abgeschlossen, die auch Träger der Optik sind. Als Elektroden dienen zwei Alubleche, deren Kanten zur Vermeidung unerwünschter Spitzen- und Koronaentladungen wie üblich mit Sandpapier und Poliertuch bearbeitet wurden.

Besonderes Augenmerk ist der Vorionisation zu widmen. Zu diesem Zweck wird die von Bergmann (1972) eingeführte Oberflächenentladung eingesetzt. Die Geometrie des Bandleitersystems führt zu einer mit der Lichtwelle synchron laufenden Entladung. Die Beläge der Bandleitungen werden dazu bis unter die eigentlichen Laserelektroden geführt. Der Elektroden spalt soll im vorliegenden Beispiel eine Breite von 6 mm vorweisen. Bei Erregung bildet sich im Spalt eine Gleitentladung aus. Die dabei einsetzende UV-Strahlung bewirkt eine Vorionisation des Gases. Danach erst setzt die uniforme Volumenentladung ein.

TEA-Laser (Betrieb mit Luft):

<http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/tea-laser.jpg>

2.3 Zubehör für den Selbstbau

1) Eine freilaufende **Funkenstrecke** lässt sich mit einfachen Mitteln herstellen. Als Elektroden werden Hutmutern verwendet. Um das beim Durchschlag unvemeidliche Knallen zu dämpfen, wird das Elektrodenpaar in einem Gehäuse verschlossen. Weil die Schlagweite auch vom Gasdruck abhängt, kann bei Bedarf ein Stutzen für eine Pumpe (Füllgas) montiert werden.

Einfache Funkenstrecke:

<http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/funkenstrecke.jpg>

2) Soll die Funkenstrecke getriggert werden, muss zusätzlich zu den zwei Hauptelektroden eine dünne **Triggerelektrode** montiert werden, an die eine Zündspule angeschlossen wird. Bewährt hat sich z.B. das *Trigatron*, wo die eine Hauptelektrode durchbohrt wird, um einen isolierten Drahtstift einzuführen, mittels welchem die (getriggerte) Zündung eingeleitet wird.

3) Soll das Gasvolumen schnell entionisiert werden, kommt eine **Löschfunkenstrecke** zum Einsatz, bestehend aus mehreren in kleinem Abstand und isoliert voneinander befestigten Blechen. Auch mit einem *Wasserstoff-Thyratron* lassen sich vergleichbare Pulsraten im kHz-Bereich erzielen.

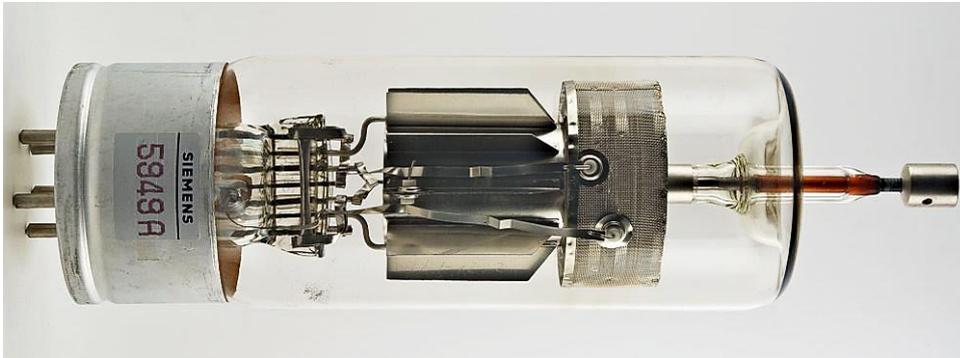


Abb. 2-3: Siemens Wasserstoff-Thyratron⁵

4) Die **Spiegeloptik** lässt sich mit einfachen Mitteln realisieren. Für den Vollspiegel wird ein metallisiertes Glas verwendet, wie solches in Scannern anzutreffen ist. Aluminiumbedampfte halbdurchlässige Spiegel für den Austrittsstrahl lassen sich auch mit einer selbstgebauten Sputteranlage herstellen. Oft genügt bereits ein Austrittsfenster aus gewöhnlichem Glas (BK7). Die Transmission beträgt in diesem Fall etwa 92 %.

5) Gelegentlich wird das **Laserfenster** nicht senkrecht zum Strahl angebracht, sondern unter einem bestimmten und für das jeweilige Material charakteristischen sog. *Brewsterwinkel*:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \begin{array}{l} n_1 = \text{Brechzahl des umgebenden Mediums} \\ n_2 = \text{Brechzahl des Fenstermaterials} \end{array}$$

Es existiert somit ein Winkel, unter dem Licht einer Polarisationsrichtung reflexfrei das Material durchdringt. Die Spiegeloptik befindet sich dann ausserhalb der Laserkammer.

6) Justiert werden die Spiegel mit einer selbstgebauten **Dreipunkthalterung**. Der Spiegel liegt dazu auf einem O-Ring auf.

Spiegelhalterung:

<http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/spiegelhalter.jpg>

Für den semi-professionellen Einsatz hat sich dieses System ausreichend bewährt. Weitere Varianten eines Stickstoff-Lasers sind dem Buch von Rapp zu entnehmen.

⁵ <http://lampes-et-tubes.info/th/th029.php?l=e>

3 Kupferdampf-LASER

Dieser zu den MetalldampfLasern zählende Typus - den z.B. die Pink Floyd Group bei ihren Bühnenshows einsetzte - kann mit einigem Geschick im Eigenbau realisiert werden. Charakteristisch ist der smaragdgrüne breite Strahl, der sich aus zwei Hauptlinien konstituiert. Die grüne Linie besitzt eine Wellenlänge von 511 nm, die etwas schwächere gelbe Linie strahlt bei 578 nm. Der KupferdampfLaser kann wegen seiner ordentlichen Verstärkung sogar im Superstrahlmodus betrieben werden. Gelegentlich werden KupferdampfLaser als Pumplichtquellen für FarbstoffLaser oder in der Medizin zur Zerstörung von Tumoren mittels photodynamischer Therapie eingesetzt.

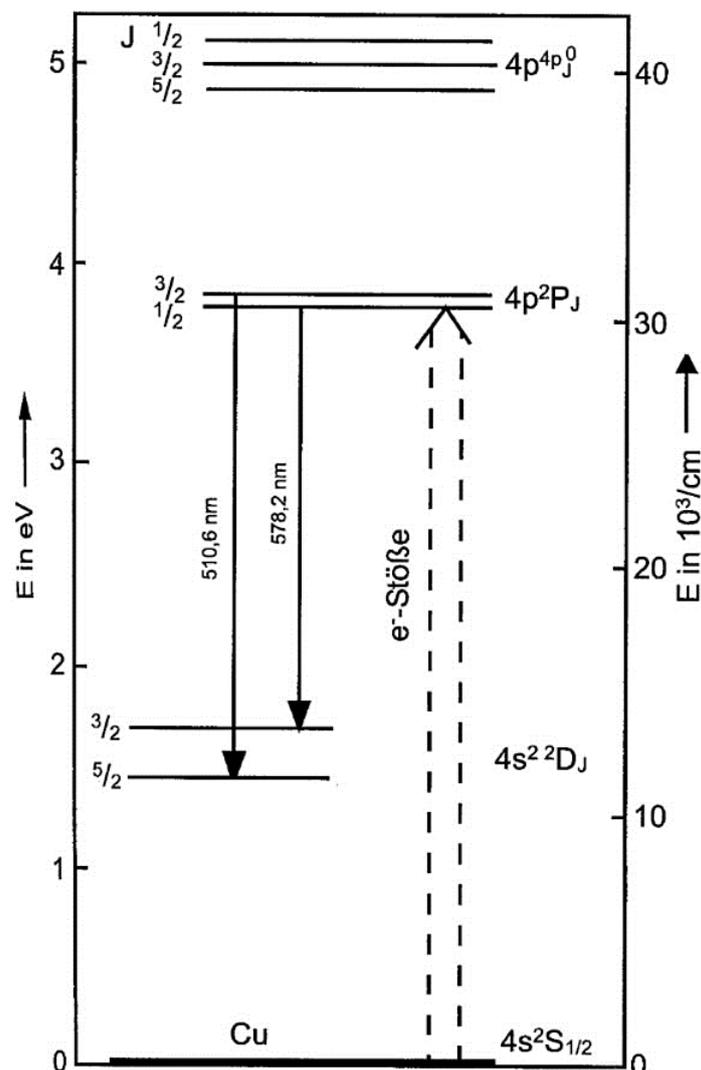


Abb. 3-1: Niveauschema des KupferdampfLasers⁶

Die Besetzung des oberen Laserniveaus erfolgt durch Elektronenstossanregung von Metallatomen im Grundzustand. Infolge der langen Lebensdauer des unteren Niveaus gegenüber Relaxation ist die Bedingung für einen kontinuierlichen Betrieb nicht erfüllt, so dass dieser Laser nur gepulst betrieben werden kann. Wie bspw. der verwandte GolddampfLaser gehört auch

⁶ Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzis)

der Kupferdampfaser zu den selbstterminierten Lasersystemen.

Nachteilig wirkt sich die hohe Betriebstemperatur von über 1'350 °C aus, weil damit der Schmelzpunkt für den preislich günstigen Widerstandswerkstoff 'Kanthal' (1'320 °C) für den Rohrheizer bereits überschritten wird und derjenige für das Quarzglas (1'500 °C) in die Nähe rückt. Bevorzugt sind daher Rohre aus Aluminiumoxid oder Keramik und Heizdrähte aus Platin-Rhodium, die jedoch relativ teuer sind. Anstelle der PtRh-Drähte eignen sich auch Siliciumstäbe. Tantal-, Wolfram- oder Molybdänbänder sind dagegen heikel, weil sie in einer Schutzgasatmosphäre betrieben werden müssen, was die Konstruktion wiederum unnötig komplizierter macht. Eine einfachere Möglichkeit bietet sich in der Verwendung von dünnen Kohlestäben (Grafitelektroden) an.

Bedampft man lediglich in entsprechend kurzen Intervallen kann trotzdem mit Kanthaldraht von 1 mm Durchmesser und Quarzglas gearbeitet werden. Die innenliegende Heizung (80 Windungen) wird direkt auf das Entladungrohr der Laserstrecke gewickelt. Darüber wird ein zweites Quarzrohr mit Glasfaserisolation geschoben. Den äusseren Abschluss bildet eine Wasserkühlung, bestehend aus einem dünnwandigen Stahlrohr mit Kupferkühlschlange. Fixiert wird der Rohrofen beidseitig mit passenden Briden.

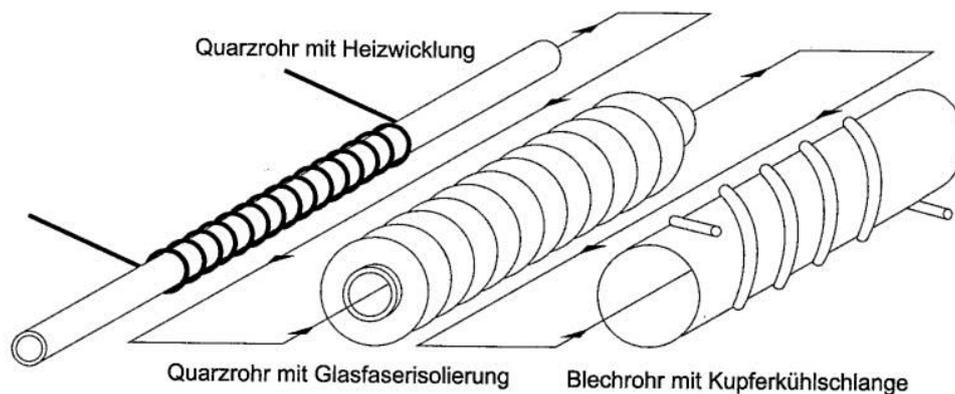


Abb. 3-2: Aufbau des Rohrofens⁷

Der Kupferdampfaser ist ähnlich wie der longitudinale Stickstofflaser aufgebaut. Die Entladungsstrecke (Quarzrohr) besitzt eine Länge von ca. 300 mm (bei einem Aussendurchmesser von 10 mm und einer Wandstärke von 0.5 mm). Die stirnseitigen Elektroden bestehen aus Kupferrohr, auf welches auch der Träger für die Optik (Spiegel bzw. Fenster) und der Pumpstutzen angelötet werden. Die vakuumdichte Verbindung zum eigentlichen Laserrohr besteht aus Silikonschlauch. Zur Befestigung der Elektroden auf Isolatoren - oder auch direkt an einen Kondensator - dienen angelötete Stäbe aus Flachkupfer oder Messing. Als Montagegrund dient eine massive Aluplatte, auf der sich die übrigen Komponenten (Kondensator, Drossel und Funkenstrecke) befinden. Die elektrischen Verbindungen werden aus Kupferblech gefertigt, um so die Induktivitäten gering zu halten. Als Optik dient ein metallisierter 100 % Spiegel sowie ein Austrittsspiegel aus Glas. Vor der eigentlichen Inbetriebnahme muss das Laserrohr mit Kupferschrott bestückt werden. Danach wird die Optik justiert und der Laser abgepumpt. Nach Erreichen des Grobvakuum wird über ein Reduzierventil das Puffergas Helium einge-

⁷ Rapp: Experimente mit selbstgebaute Lasern (Franzis)

lassen, bis der Druck auf etwa 2 bis 5 mbar ansteigt. Danach wird der Rohrfen langsam hochgefahren und die Hochspannungsversorgung aktiviert.

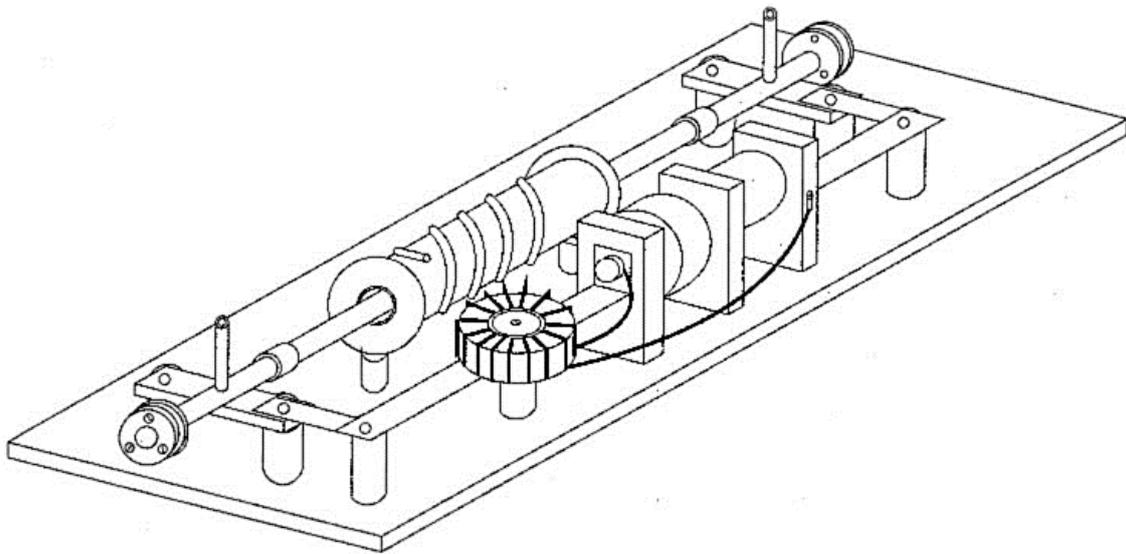


Abb. 3-3: Aufbau des KupferdampfLasers⁸

Betrieben wird der KupferdampfLasers mit einer simplen Kondensatorentladung über einer freilaufende Funkenstrecke. Für die benötigte Hochspannung wird ein Streufeldtrafo eingesetzt, wie solche für Oelfeuerungen (OBIT) oder Leuchtreklamen (Neontrafo) verwendet werden. Bei Netzbetrieb zündet der Lasers somit mit einer Pulsrate von 100 Hz.

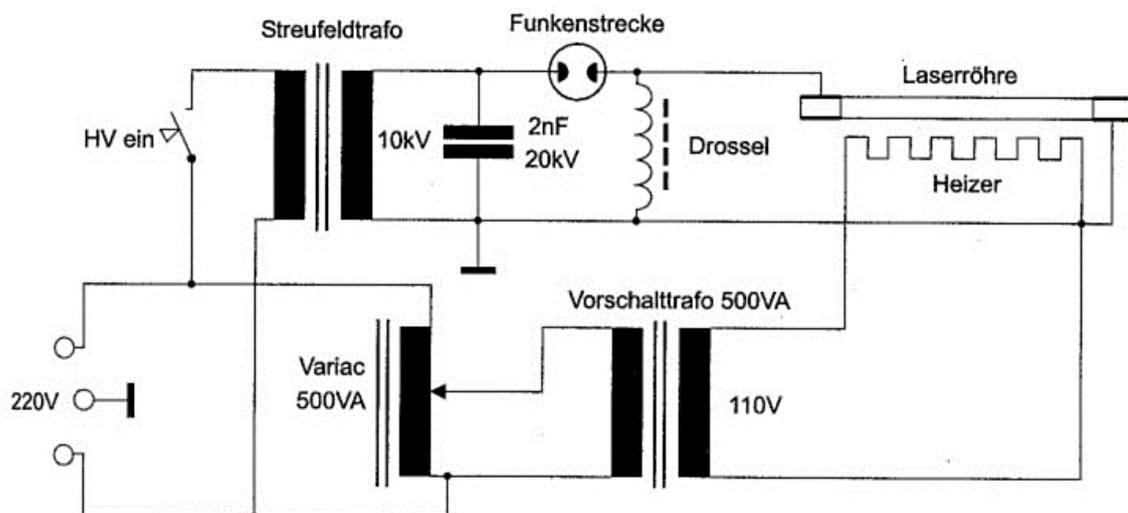


Abb. 3-4: Beschaltung des KupferdampfLasers⁹

Die zur Laserstrecke parallel verdrahtete Drossel besitzt 10 Windungen auf einem Ringkern. Die Heizleistung für den Rohrfen stammt aus einem Regeltrafo (500 VA), dem ein Trenntrafo mit 110 V Sekundärspannung nachgeschaltet ist.

⁸ Ebenda

⁹ Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzis)

4 Rubin-LASER

Der Rubinlaser wurde von Theodor Maiman (1927-2007) gebaut und war der erste funktionsfähige Laser überhaupt. In einem Labor der Hughes Aircraft Company in Culver (Kalifornien) erzeugte Maiman am 16. Mai 1960 die ersten Laserpulse. Dafür benutzte er einen an den Enden verspiegelten Rubinkristall, der von einer spiralförmigen Gasentladungslampe (Blitzröhre) umgeben war. Die sich akkumulierenden Lichtblitze liefen solange im Rubinstab hin und her, bis der eine Spiegel, der halbdurchlässig war, durchbrochen werden konnte.

Die theoretischen Vorarbeiten stammten von Charles H. Townes, welcher bereits in die Entwicklung des MASER's (1952-54) involviert gewesen war.¹⁰ Zusammen mit den russischen Physikern Nikolai Bassow und Alexander Prochorow (welche unabhängig von Townes das LASER-Prinzip erforschten) erhielt Townes im Jahr 1964 den Nobelpreis für Physik.

An der EXPO 64 (Abt. Wissenschaft und Schule) wurden einem erstaunten Publikum Interferenzphänomene mit kohärentem Laserlicht vordemonstriert. In den Anfangsjahren wurden gepumpte Rubinlaser für optische Radarsysteme genutzt.

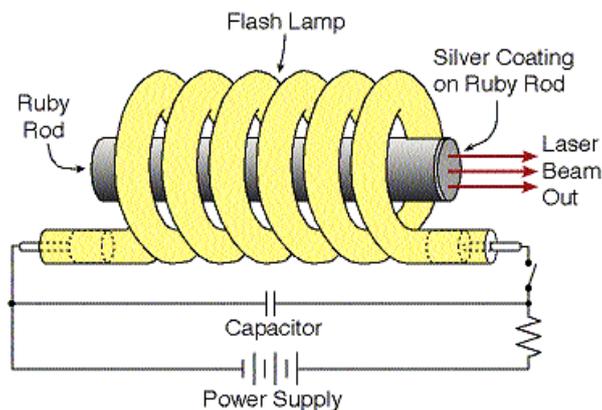


Abb. 4-1: Konstruktionsprinzip des Rubinlasers¹¹

Das aktive Medium eines konventionellen **Solid state lasers** besteht aus Kristallen oder Gläsern mit Abmessungen von einigen cm Länge, die geringfügig mit optisch aktiven Ionen (z.B. Cr⁺⁺⁺) oder seltenen Erden (Nd⁺⁺⁺) dotiert sind. Der heutzutage wichtigste Festkörperlaser ist der **Neodymlaser**. Dem Rubinlaser kommt somit nur noch eine historische Bedeutung zu. Für den Selbstbau handelt es sich aber nach wie vor um ein interessantes Projekt.

1) Um einen **Rubinlaser** zu bauen, muss zunächst ein zylindrischer Rubinstab vorhanden sein. Der Kristall wird nach der Herstellung gemäß dem Verneuil'schen Verfahren durch Temperung mechanisch entspannt; dazu wird er bis auf 2'050 °C erwärmt und danach langsam während 120 Stunden abgekühlt. Aus ehemaligen Beständen finden sich ab und zu industriell verspiegelte (mit dielektrischen Reflexionsschichten bedampfte) und geschliffene, polierte und gelegentlich mit Saphirüberzug versehene Rubinstäbe von etwa 70 bis 100 mm Länge und 1/4 " im Durchmesser. Ebay z.B. bietet sich dafür als Tauschbörse an.

¹⁰ MASER = **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

¹¹ Bildquelle: <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-6/F6s2t1p5.htm>

Rubin besteht aus mit Chrom dotiertem Korund. Der Cr^{+++} Anteil beträgt nur 0.05 Gewichtsprozent. Die Anregung erfolgt durch optisches Pumpen mit Blitzröhren oder auch Diodenlasern. Mit dem Rubin vergleichbare Systeme finden sich beim Alexandrit und beim mit Titan dotierten Saphir. Im Kontext handelt es sich um ein **Dreineveau-System**. Rubin besitzt zwei Absorptionsbänder (blau und grün) im sichtbaren Spektrum, die für die charakteristische rote Farbe verantwortlich sind. Um überhaupt einen Effekt zu erzielen, müssen mehr als die Hälfte aller Cr^{+++} Ionen in das obere Laserniveau gepumpt werden. Die Ionen in den F-Bändern zerfallen strahlungslos in das metastabile Laserniveau $2E$, um innert 1 ns zu thermalisieren, wobei sich der Rubinkristall erwärmt. Dieses Niveau ist in zwei Zustände aufgespalten deren Lebensdauer 3 ms beträgt. Die von diesen Zuständen ausgehenden Laserübergänge R_1 und R_2 sind erzwungene Dipolübergänge. Normalerweise erfolgt die Lasertätigkeit auf der etwas stärkeren R_1 -Linie bei 694 nm (Rotlicht).

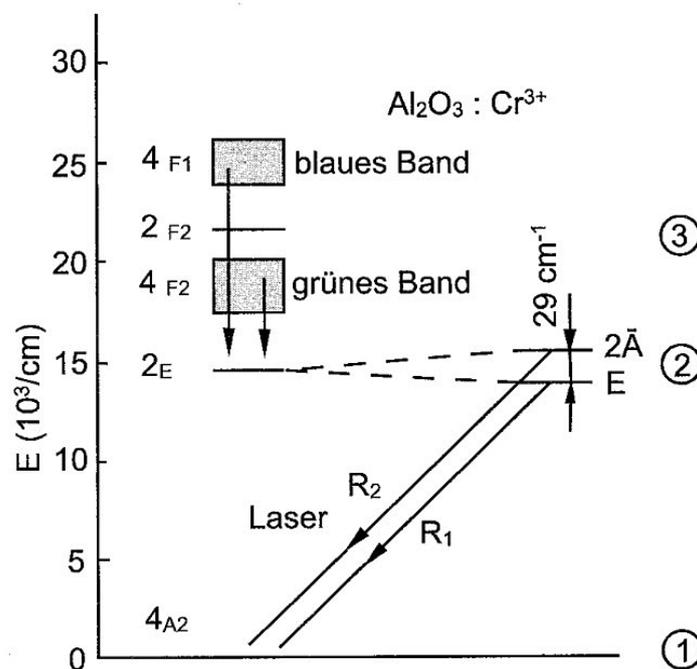


Abb. 4-2: Niveauschema des Rubins¹²

Im Rubin wandert das Licht als stehende Welle zwischen den Silberspiegeln hin und her; dabei sind gewisse Resonanz- und Rückkopplungsbedingungen nach dem *Fabry-Pérot-Prinzip* zu erfüllen. Die Forderung ist erfüllt, wenn im Fabry-Pérot-Resonator der Spiegelabstand ein Vielfaches der halben Wellenlänge ist:

$$k \cdot \lambda = 2D ; k = 1, 2, 3, \dots, n$$

Die Stirnflächen müssen auf 0,1 Mikrometer genau planparallel geschliffen sein. Die aus dem metastabilen - unter Aussendung roten monochromatischen Lichtes - in den Grundzustand fallenden Chromatome bauen eine kohärente Strahlung auf, die bei genügender Intensität den teildurchlässigen Spiegel als scharf gebündelter Strahl verlässt. Es sind verschiedene Moden möglich. Zur Stimulation tragen zur Hauptsache diejenigen Strahlen bei, die parallel zur optischen Achse verlaufen. Schräge Strahlen verlassen den Resonator bereits nach wenigen

¹² Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzsis)

Reflexionen. Ein kohärenter Wellenzug kann sich ohne Weiteres bis auf 1'000 km Länge erstrecken.

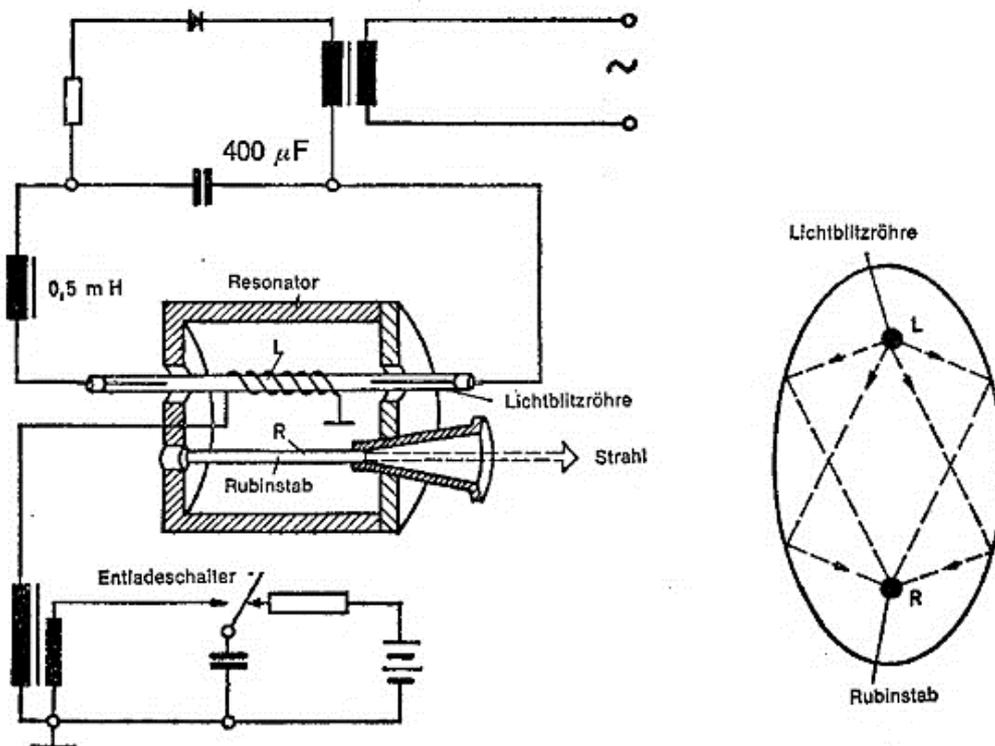


Abb. 4-3: Prinzipschaltung eines Rubinlasers mit elliptischer Zylinderkammer¹³

Charakteristisch beim gepumpten Rubinlaser sind sog. *Spikes*, die als kurze aufeinander folgende Lichtstöße in Erscheinung treten.

2) Neben einem Rubinkristall braucht es eine **Pumplichtquelle** in Form einer starken Blitzlampe (Weisslichtquelle). Für einen Selbstbau-Rubinlaser sind min. 10^3 Joule Pumpleistung nötig. Dazu gehört eine leistungsfähige Kondensatorbank.

Kondensatorbank mit Ladegerät:

<http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/kondensatorbank.jpg>

Laserkopf (Pumpkammer und Röhren):

http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/laserkopf_ru.jpg

Die von Maiman ursprünglich verwendete Wendelröhre dürfte nicht einfach zu beschaffen sein, so dass eine stabförmige Blitzlampe (Quarzrohr) verwendet wird. Um den Wirkungsgrad zu maximieren, wird eine elliptische Pumpkammer benutzt. Die Kegelschnittgeometrie kommt uns hierzu zu Hilfe. Lampe und Rubin werden in den Fokalfpunkten angeordnet. Das aus dem einen Brennpunkt austretende Pumplicht trifft somit immer auf den im zweiten Brennpunkt befindlichen Rubin.

Es gilt die Formel:

¹³ Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzis)

$$e = 2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{s}\right)^2} \right)$$

e = Abstand der Brennpunkte
a = grosse Ellipsenachse
b = kleine Ellipsenachse

Die Exzentrizität sollte möglichst klein sein, um einen maximalen Wirkungsgrad zu erzielen. Als Kammer eignet sich bspw. ein dünnwandiges (innen poliertes) Alurohr, das im Schraubstock in die gewünschte elliptische Form gepresst wird. Eine versilberte Innenfläche wäre die beste Lösung. Um den Laser zu pumpen, ist eine dazu geeignete Schaltung erforderlich.

Für die Zündung der Blitzlampe wird eine "serielle Triggerung" verwendet. Zündelement ist ein Thyristorpulser, der über eine Kfz-Zündspule einen 30 kV Impuls erzeugt. Mit dem Puls wird ein HV-Kondensator geladen, bis es zur Zündung der Funkenstrecke kommt. Über einen Übertrager wird danach die Blitzlampe gezündet.

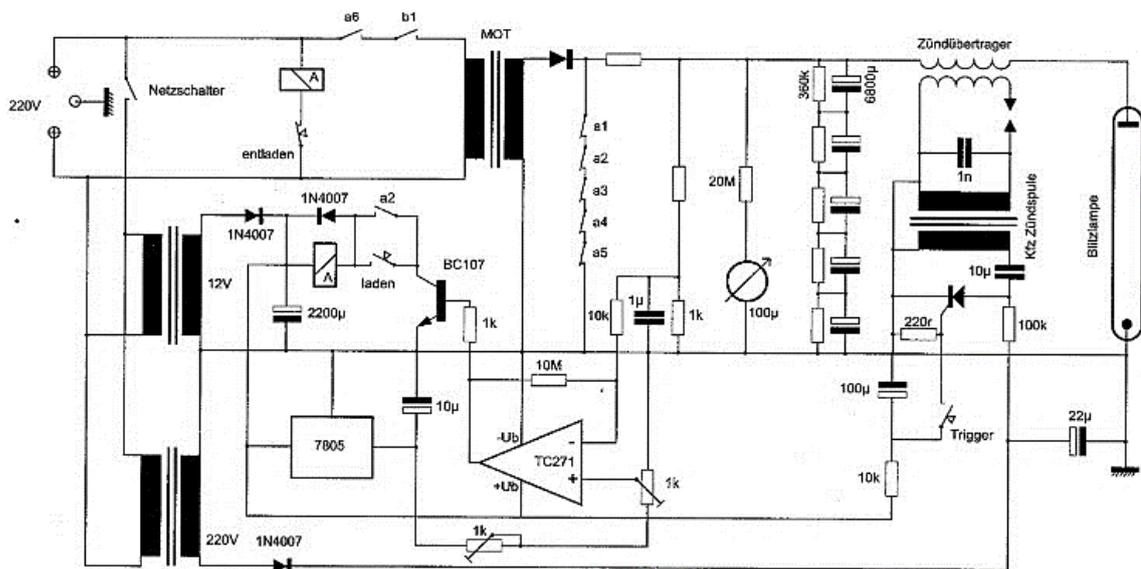


Abb. 4-4: Ladegerät mit Zündschaltung Blitzlampe¹⁴

3) Der Rubinlaser bietet die Möglichkeit, einen **Riesenimpuls** zu generieren. Die hohe Leistung des Riesenimpulses ermöglicht bspw. Effekte wie den *Airbreakdown*, wo mitten im Raum durch Ionisation der Luft ein kräftiger Funke entsteht. Zur Verstärkung wird der Strahl mit einer Linse fokussiert. Um einen Riesenimpuls zu erzeugen, wird während des Pumpens der Resonator optisch gesperrt, so dass der Laser trotz anwachsender Inversion nicht anschwingen kann. Wird der Lichtweg zum richtigen Zeitpunkt freigegeben, entlädt sich die gespeicherte Energie spontan in einem einzigen Lichtblitz statt in mehreren Spikes. Dieser Vorgang ist reversibel.

Massgebend für diese Betriebsart ist der optische Schalter, der den Strahlengang blockiert oder freigibt. Die mechanische Variante benutzt rotierende Spiegel oder rotierende Blenden. Wesentlich schneller, aber auch aufwendiger, sind optische Schalter wie *Kerrzelle* und *Pockelszelle*, welche bei Anlegen einer elektrischen Spannung die Polarisationsrichtung des passierenden Lichtstrahls drehen. Werden zusätzlich Polarisatoren im Strahlengang angeordnet,

¹⁴ Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzis)

kann der Lichtstrahl gesperrt oder freigegeben werden. Ein bekanntes Polarisationsfilter ist das *Nicolsche Prisma*. Auch Glasplatten mit dünnen Schichten parallelgerichteter Kristalle aus Chininsulfat kommen gelegentlich zur Anwendung.

Für den Eigenbau ist diese professionelle Möglichkeit nicht einfach realisierbar. Es bietet sich stattdessen das Prinzip der "sättigbaren Absorption" an. Bestimmte organische Farbstoffe (wie z.B. Kryptocyanin, Malachitgrün, Naphtholgrün und Nachtblau) werden bei Sättigung mit Licht plötzlich transparent. Als besonders geeignet erweisen sich Farbstoffe, deren Absorptionsspektrum bei 694 nm (R1-Linie des Rubinkristalls) liegt. Montiert man eine Küvette mit einem solchen Farbstoff im Resonator, kann der Laser trotz zunehmender Inversion nicht schwingen. Bei einer bestimmten Lichtintensität wird die Farbstoffzelle jedoch innert weniger Nanosekunden durchlässig, so dass ein Riesenimpuls entsteht.

Das alles und vieles mehr lernt man anlässlich eines Studiums der technischen Physik. Wer die Möglichkeit besitzt, sollte zuvor eine Berufslehre als Physikalaborant absolvieren. Damit ist die neben der Theorie erforderliche Praxis gewährleistet. Gute Technische Universitäten resp. Hochschulen befinden sich bspw. in Zürich und Lausanne, ferner in Illmenau, Duisburg-Essen und Graz - wobei auch andere Schwerpunkte als Optik vorhanden sind. In Duisburg sind es Dünnschichttechnologie, Plasmaerzeugung und Plasmadiagnostik, Metallphysik und Materialwissenschaft, Physik dünner Schichten und Oberflächenphysik. Ich möchte mit meinem Vortumjunge Menschen für die Technische Physik begeistern, habe aber auch nichts dagegen, wenn einer Pharmazie oder Psychologie studiert.

Weitere für den Selbstbau geeignete Laser (CO₂-Laser, Farbstofflaser Kupfer-Jodid-Laser, Metalldampf-Hohlkathodenlaser) finden sich im Buch von Rapp.

5 Physikalisch-technische Kenntnisse

5.1 Hochspannungsquellen

Beim Gaslaser benötigen wir die Hochspannung für die Ionisation des Laserrohrs, beim Festkörperlaser zur Speisung einer Pumplichtquelle (Blitzlampe). Wer sich bereits mit dem Tesla-Generator auseinandergesetzt oder diesen selbst nachgebaut hat, dürfte keinerlei Schwierigkeiten mit der Beschaffung oder Herstellung eines geeigneten Hochspannungsteils (10 kV bis 30 kV) bekunden.

Unter den vielen Möglichkeiten kommen als HV-Quellen in Frage:

- a) **Obit's** (Oil Burner Ignition Transformer), das sind Zündtrafos von Oelbrennern, die man aus alten Geräten ausschaltet.
- b) **Neontrafos**, hier ist aufgrund der Leistung einige Vorsicht angebracht; es sollten sich nur instruierte Personen damit befassen.
- c) **Kfz-Zündspulen**, die sich in jedem Auto finden; ein Besuch bei einem Teile-Verwerter lohnt sich bestimmt.
- d) **Hochspannungskaskaden** aus TV-Geräten oder aus diskreten Bauteilen erstellte Kaskaden.

- e) **Marxgeneratoren** für kräftige Stossspannungen.
- f) **Impulstransformatoren**, die mit Thyratrons, VMOSFET's oder Funkenstrecken betrieben werden.
- g) **Einschenkel-Hochspannungstransformatoren** mit nachgeschaltetem Diodengleichrichter.
- h) **Funkeninduktoren** (Rühmkorff-Spulen), die mit einem Wagnerschen Hammer als Unterbrecher arbeiten.
- i) **Bandgeneratoren** für hohe Gleichspannungen, wenn sehr lange Entladungsstrecken ionisiert werden sollen.

Brauchbare Beispiele für 'Solid states' Hochspannungsgeneratoren finden sich bei:

- Günter Wahl: Tesla Energie (Franzis)

Der Eigenbau von Hochspannungstransformatoren wird ausführlich beschrieben bei:

- Matthias Kallenberger: Experimente mit selbstgebaute Jakobsleitern (Franzis)

Nicht zuletzt sollte man sich auch theoretisch mit Hochspannungstechnik befassen und dazu geeignete Fachliteratur konsumieren, um sich so ein solides Grundwissen zu erarbeiten.

Empfehlenswert ist z.B.:

- Andreas Küchler: Hochspannungstechnik (Springer)

Als "High Voltage Kondensatoren" kleiner Kapazität eignen sich die sog. "Doorknop-Ausführungen" mit Keramikdielektrikum, die auch Pulsspannungen mit steilem du/dt verkräften. Solche findet man preisgünstig auf Ebay sowie bei Funk- und Elektronikbörsen. Für mittlere Spannungen eignen sich Becherkondensatoren mit Polypropylen-Folie.



Abb. 5-1: HV "Doorknop" Capacitor



Abb. 5-2: Becherkondensator¹⁵

Wasserstoffthyratrons und Boosterdioden, die zum Teil aus sowjetischen Beständen stammen, sind über Tauschbörsen und/oder Händler zu beschaffen.¹⁶

5.2 Technische Optik

In der Optik - insbesondere der nichtlinearen - wurden in den vergangenen Jahren enorme Fortschritte erzielt, so dass sich ein Studium der physikalischen Technik empfiehlt. An der Fachhochschule in Buchs SG (FHO) wird z.B. im Studiengang *Systemtechnik* die Vertiefungs-

¹⁵ <http://www.3d-meier.de/tut15/Seite92.html>

¹⁶ <http://www.die-wuestens.de>

richtung *Photonik* angeboten.

Als Studienbücher eignen sich nach meinem Gusto:

- Eugene Hecht: Optik (De Gruyter)
- Ludwig Bergmann, Clemens Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik – Optik (De Gruyter)

Anm.: Im selben Jahr, als Darwin sein in den Augen der Wissenschaftler fulminantes Werk "The Origin of Species" herausgab, wurde von Kirchhoff ein bis anhin rätselhaftes Phänomen, die Schwarzkörperstrahlung, untersucht. Die Problematik war enorm schwierig, so dass sich weitere Forscher wie Stefan, Boltzmann, Wien und Jeans-Rayleigh mit der Thematik befassten. Schliesslich gelang es einem bis dato wenig bekannten Physiker namens Max Planck (1858-1947), das Rätsel in Fleissarbeit zu lösen. Die bahnbrechende neue Erkenntnis lautete: Licht ist gequantelt und breitet sich in Form diskreter Energiepakete aus. Obwohl Planck selbst noch nicht so recht daran glauben mochte, übernahm ein unkonventioneller junger Denker im "Amt für geistiges Eigentum" in Bern dieses revolutionäre Konzept, bereinigte Plancks Arbeit von noch anhaftenden Fehlern und schrieb 1905 eine eigene Arbeit mit dem Titel: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt zum photoelektrischen Effekt" (wofür er 17 Jahre später den Nobelpreis erhielt). Damit waren die Grundlagen der Quantenphysik gelegt, welche rund 50 Jahre später zum LASER führten.

Nun zu den einschlägigen Beispielen:

1) Die infrarote Strahlung eines **Nd:YAG-Lasers** (1'060 nm) kann auf einfache Weise durch Frequenzverdopplung in grünes Licht (532 nm) umgewandelt werden. Dazu werden die nicht-linearen Eigenschaften bestimmter optischer Materialien ausgenutzt, darunter KDP (Kaliumdihydrogenphosphat) und KTP (Kaliumtitanatphosphat). So ist KTP in nahezu allen grünen Laserpointern zu finden. Dazu wird der KTP-Kristall mit einem Nd:YAG-Kristall verklebt und mit Spiegelschichten versehen.

Die Frequenzverdopplung (Erzeugung der 2. Harmonischen) wurde erstmals 1961 von Franken et al. an der Univ. von Michigan beobachtet, als ein 3 kW Puls roten Lichtes (694 nm) von einem Rubinlaser auf einen Quarzkristall fokussiert wurde. Ein Bruchteil der einfallenden Welle wurde in die 2. Harmonische umgewandelt, die im UV (347 nm) liegt. Theoretisch handelt es sich um eine nicht einfache Sache. Für eine vollständige Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Polarisation und elektrischer Feldstärke benötigt man daher den *Suszeptibilitätstensor*.

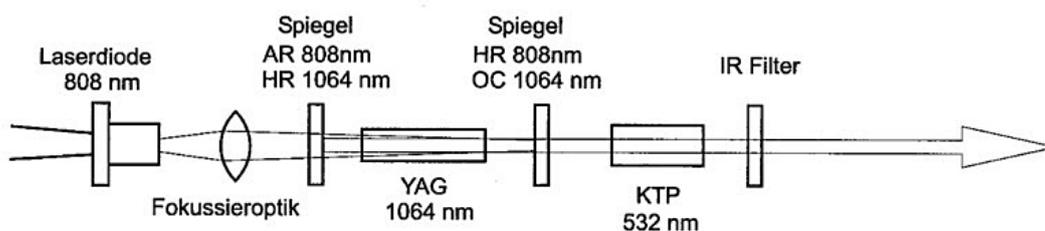


Abb. 5-3: Konstruktionsprinzip eines diodengepumpten Festkörperlaser mit Frequenzverdopplung¹⁷

¹⁷ Rapp: Experimente mit selbstgebaute Lasern (Franzis)

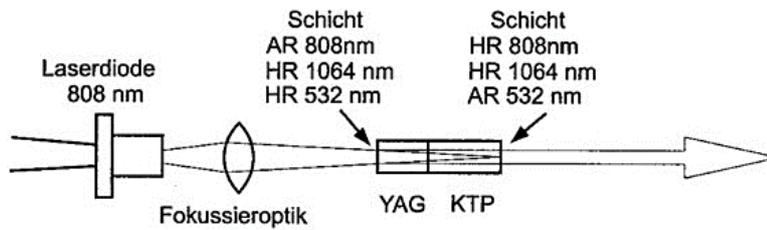


Abb. 5-4: Prinzip des grünen Laserpointers¹⁸

Nebst KTP wird häufig auch KDP zur Frequenzverdopplung eingesetzt. Dieser nichtlineare Kristall ist piezoelektrisch, durchsichtig und negativ einachsiger Doppelbrecher. Dazu kommt: Ist der einfallende Strahl (Grundfrequenz) ein ordentlicher Strahl, so entsteht die 2. Harmonische als außerordentlicher Strahl. 2) Eine weitere Spezialität aus der nichtlinearen Optik ist die Frequenzmischung, die sich ebenfalls im Photonenbild erklären lässt.

Während bei der Erzeugung der 2. Harmonischen ein "Summenphoton" maßgebend war, ist es bei der Mischung ein "Differenzphoton". Dazu wird in einen nichtlinearen Kristall (Lithiumniobat) eine intensive Welle (Pumplicht) eingestrahlt, welche auf eine schwache Signalwelle niedrigerer Frequenz - die verstärkt werden soll - trifft. Das Pumplicht wandelt sich dabei in Signallicht und eine Differenzwelle (Idlerlicht) auf. Auf diese Weise werden sowohl Signal als auch Idlerwelle verstärkt.

Ein optischer Oszillator nach diesem Prinzip wurde 1965 realisiert. Die planparallelen Stirnseiten des nichtlinearen Kristalls sind so beschichtet, dass ein *Fabry-Pérot-Resonator* entsteht. Signal- und Idlerfrequenz - als Resonanzfrequenzen des Resonators - liegen bei etwa 1'000 nm. Bei genügender Intensität des Pumplichtes wird dessen Mode in Schwingungsmoden des Signal- und *Idlerlichtes* übertragen; dabei wird kohärente Strahlungsenergie mit den entsprechenden Frequenzen frei. Durch kontinuierliche Änderung des Brechungsindex - etwa durch Anlegen eines variablen elektrischen Feldes - wird der Oszillator durchstimmbare. Der optisch-parametrische Oszillator ist somit eine laserähnliche, in einem weiten Bereich zwischen IR und UV abstimmbare Quelle kohärenter Strahlung.

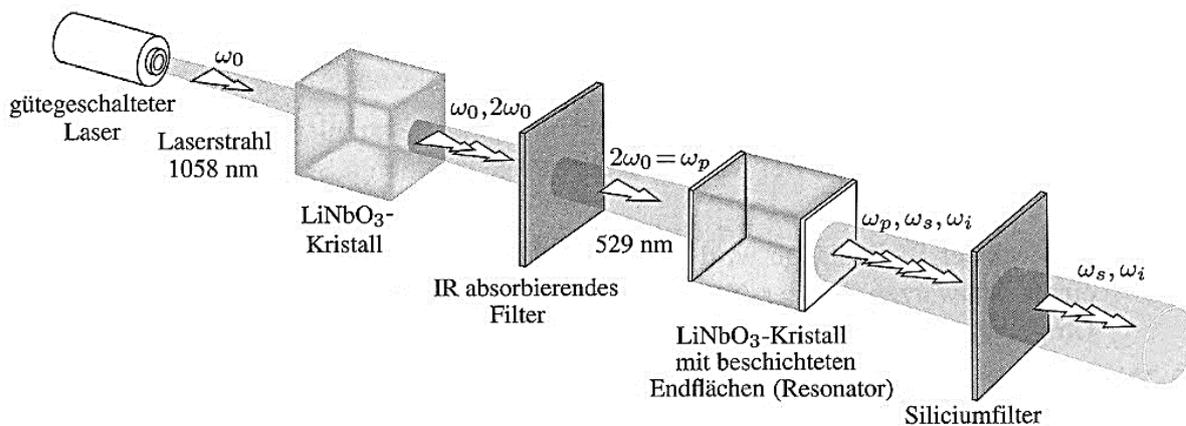


Abb. 5-5: Optisch-parametrischer Oszillator¹⁹

2) Sogar ein einfacher **Röntgenlaser** lässt sich mit einschlägiger Praxiserfahrung im Selbstbau

¹⁸ Ebenda

¹⁹ Hecht: Optik (De Gruyter); nach J.A. Giordmaine, R. C. Miller: Phys. Rev. Letters 4 (1965)

realisieren. Über 30 Jahre lang lieferte der Wasserstofflaser kohärente Strahlung mit der bis dahin kleinsten Wellenlänge im sog. Wernerband (116 nm). Erst Ende der neunziger Jahre änderte sich dies mit dem Röntgenlaser von Rocca. Dieser Laser wird mit extrem ionisiertem Argon betrieben und erzeugt eine stimulierte Strahlung bei 46.9 nm.

Im Aufbau gleicht der Röntgenlaser einem coaxialen Gaslaser. Das in einer Kapillare enthaltene Argongas wird durch einen Hochspannungsimpuls vorionisiert und durch einen zweiten stromstarken Puls zu einem Z-Pinch komprimiert. Dabei entstehen sehr hohe Temperaturen, die den erforderlichen Ionisationsgrad erst ermöglichen. Weil in diesem Bereich optische Resonatoren nichts taugen und die Lebensdauer der involvierten Niveaus ohnehin sehr kurz ist, kommt nur das Superstrahlungsprinzip in Frage.

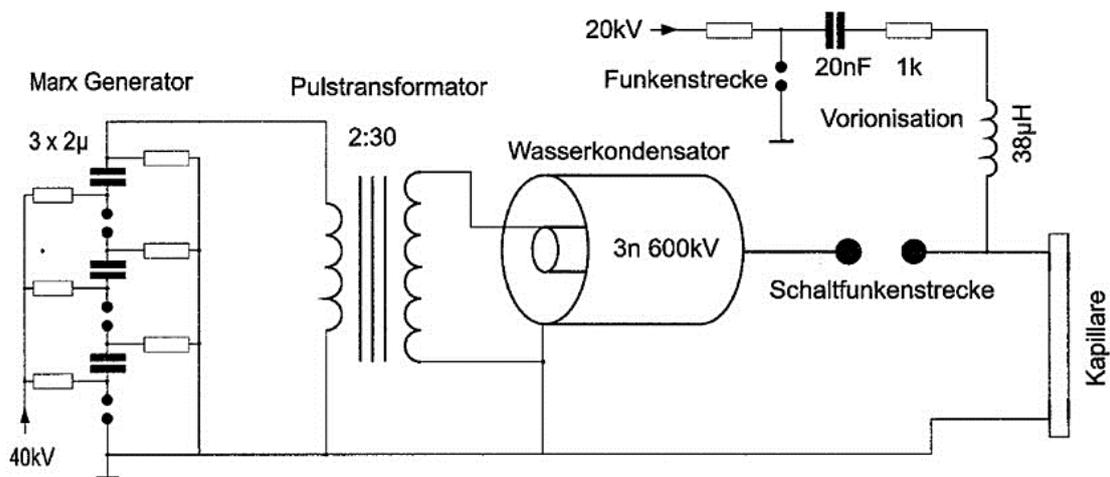


Abb. 5-6: Röntgenlaser mit Pulstransformator²⁰

Während der Vorpuls mit einigen 100 Ampere durch eine Kondensatorentladung erzeugt wird, benötigt man für den Hauptpuls von mehreren 10 kA eine hohe Spannung von bis zu 500 kV, die aus einer Quelle mit niedriger Impedanz stammen muss. Nebst einem Marxgenerator, einem Pulstransformator und einer Funkenstrecke wird ein Wasserkondensator mit einer Kapazität von etwa 3 nF verwendet. Dieser besteht aus einem zylindrischen Gefäß mit Reinwasser ($\epsilon_r \approx 80$) als Dielektrikum. Bei Erreichen der max. Ladespannung entlädt sich der Wasserkondensator über Funkenstrecke und Laserrohr. Die Verzögerung von wenigen μ s zwischen Vor- und Hauptentladung muss sehr sorgfältig eingestellt werden, damit ein Pincheffekt zustande kommt.

Die emittierte Laserstrahlung liegt bei 46.9 nm und gehört somit zur weichen Röntgenstrahlung. Weil diese Wellenlänge von Gasen stark absorbiert wird, muss die Strecke bis zum Nachweisdetektor im Vakuum verlaufen. Dies erfordert eine differentielle Pumpstufe und somit einigen Aufwand. Nachgewiesen werden die Röntgenpulse mit einem Photomultiplier mit Fluoreszenzkonvertern oder mit offenen Channelplates. Der Versuch stellt an den Amateur gewisse Anforderungen und ist eigentlich wenig attraktiv, weil der Laserpuls nur als Peak auf dem KO gesehen werden kann. Trotzdem ist es eine Herausforderung, weil sich nicht viele damit rühmen können, zu Hause einen Röntgenlaser zu betreiben.

²⁰ Rapp: Experimente mit selbstgebauten Lasern (Franzsis)

5.3 Vakuum-Messtechnik

Nicht zuallerletzt wäre es wünschenswert, wenn z.B. das Vakuum der Laserkammer oder auch die Energie des Laserstrahls elektronisch gemessen werden könnten. Doch selbst semi-professionelle Geräte und Sensoren sind nicht billig - vom Profiequipment des Messtechnikers ganz zu schweigen, so dass sich hier die Möglichkeit des Selbstbaus in bestimmten Grenzen anbietet.

5.3.1 Messinstrumente

Die einfachste Variante, ein Grobvakuum (bis 1 mbar) zu messen, geschieht mit handelsüblichen mechanischen Vakuummetern, darunter dem *Bourdon*-Vakuummeter (Rohrfeder), dem Kapselfeder- und dem Membranvakuummeter.



Abb. 5-7: Bourdon Vakuummeter²¹

Für das Feinvakuum (bis 10^{-3} mbar) eignet sich u.a. die *Pirani*-Messzelle, für das Hochvakuum (bis 10^{-7} mbar) werden Ionisationsvakuummeter (darunter die *Penning*-Messzelle und die *Bayard-Alpert*-Röhre) eingesetzt.

Es gibt noch zahlreiche weitere Messverfahren, die hier jedoch nicht näher ausgebreitet werden. Im Demtröder, Experimentalphysik Bd. 1, ist der Vakuumphysik übrigens ein eigenes Kapitel gewidmet.

Bei tiefergehendem Interesse an der Thematik empfiehlt sich:

- Karl Jousten (Hrsg.): Wutz Handbuch Vakuumtechnik (Springer Vieweg)
- Jobst H. Kerspe: Vakuumtechnik in der industriellen Praxis (expert-verlag GmbH)

a) Die **Piranimeszelle** (Wärmeleitfähigkeitszelle, Abb. 5-8) basiert auf der druckabhängigen Wärmeleitung. Meist wird ein elektrisch beheizter Draht aus Wolfram verwendet, dessen Widerstand bekanntlich von der Temperatur abhängig ist. Der Draht wird auf konstanter Temperatur gehalten und mit einem Thermopaar gemessen; die Stromaufnahme ist ein Maß für die Gasdichte. Bei geringem Druck sind in einer Volumeneinheit weniger Gasmoleküle vorhanden, so dass sich dies auch auf die Glühfadentemperatur auswirkt. Wegen der Nichtlinearität des Messsignals muss eine gaspezifische Eichkurve erstellt werden.

Einem Vorschlag von Rapp folgend, kann die Piranimesszelle mit einfachen Mitteln selbst hergestellt werden. Als passendes Gehäuse eignet sich dasjenige eines Schwingquarzes (HC 6 U). Nachdem der Quarz entfernt wurde, wird ein Glühlämpchen mit aufgetrenntem Glaskolben an die Sockelstifte angelötet. Abschliessend wird das Gehäuse mit dem Sockel vakuumdicht verleimt. Im Bereich von 0.1 bis 1 mbar sind damit brauchbare Ergebnisse erzielbar.

b) Etwas aufwendiger gestaltet sich die Herstellung einer **Penningmesszelle** (Abb. 5-9), mit welcher Vakua $\leq 10^{-3}$ mbar erfasst werden. Diese Zelle gehört zu den Kaltkathoden-Ionisa-

²¹ <https://www.vacom.de/>

tionsvakuummetern. Die Penningzelle nutzt den druckabhängigen Strom einer Gasentladung zur Messung. Auch hier empfiehlt sich die Aufnahme einer Eichkurve. Als Gehäuse wird wieder dasjenige eines Schwingquarzes verwendet. Als Hochspannungsanode (2 kV) für die Gasentladung dient eine Drahtwindung resp. Ringelektrode, die an die Sockelstifte angelötet wird. Das Gehäuse selbst dient als Kathode und liegt auf Gerätemasse.

Bei niedrigem Druck muss der Elektronenweg erhöht werden, um brauchbare Resultate zu erhalten. Dies geschieht mit einem äusseren Magnetfeld, das die Elektronen auf eine zykloidenförmige Bahn zwingt, so dass sich genügend Stösse mit Gasteilchen ergeben. Seitlich werden deshalb zwei Permanentmagnete ins Gehäuse eingepasst und vakuumdicht verleimt.

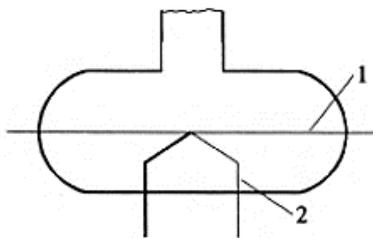


Abb. 5-8: Messprinzip nach Pirani

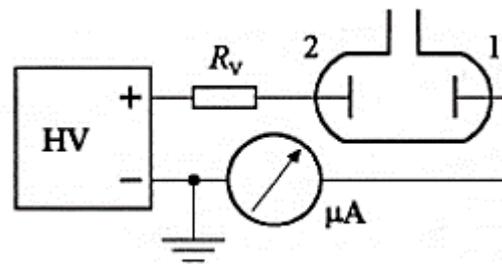


Abb. 5-9: Messprinzip nach Penning

Piranimesszelle (Selbstbau):

<http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/piranizelle.jpg>

Penningmesszelle (Selbstbau):

<http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/penningzelle.jpg>

5.3.2 Energiemessung des Strahls

Beim Laserstrahl interessiert je nach Anwendung die Wellenlänge, die Pulsdauer und die Energie. Wir beschränken uns abschliessend auf die Energie. Bei intensiven Lasern ist eine kalorimetrische Messung die einfachste Möglichkeit. Mit einem CO₂-Laser bspw. lässt sich Wasser in einem Gefäss erwärmen. Aus dem Temperaturanstieg wird dann die Leistung bestimmt. Andere Verfahren verwenden einen Heissleiter in Brückenschaltung.

a) Ein optisches Messverfahren benutzt eine Photozelle (90 CV), die auch für kurze Pulse geeignet ist. Die Photonenenergie muss aber grösser als die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials sein, so dass mit dieser Messmethode vorwiegend UV-Strahlung (Stickstofflaser) detektiert wird. Das integrierte Ausgangssignal (RC-Glied) ist ein Mass für die Energiedichte des Strahls. Auch Photodioden und Photowiderstände sind für bestimmte Spektralbereiche verwendbar.

b) Für den IR-Bereich eignen sich *pyrometrische* Elemente, wie sie in Bewegungsmeldern anzutreffen sind. Diese sind auf Wellenlängen von 10 µm abgestimmt (der Bereich, in dem die thermische Strahlung von Warmblütlern ihr Maximum besitzt). Solche Detektoren eignen sich somit gut für CO₂-Laser.