

Thomas Rapp

**FRANZIS**  
EXPERIMENTE



**Experimente mit  
selbstgebauten Lasern**

# Inhalt

<b>1 Grundlagen</b> .....	11
1.1 Die stimulierte Inversion .....	11
1.2 Der Laserresonator .....	13
1.2.1 Superstrahler .....	14
1.3 Der Pumpvorgang .....	14
1.3.1 Optisches Pumpen .....	15
1.3.2 Elektrisches Pumpen .....	15
1.3.3 Chemisches Pumpen .....	15
1.3.4 Thermisches Pumpen .....	15
1.4 Systematik der Laser .....	15
1.4.1 Festkörperlaser .....	16
1.4.2 Flüssiglasers .....	16
1.4.3 Gaslaser .....	16
1.4.4 Halbleiterlaser .....	16
1.4.5 Freier Elektronen-Laser .....	16
1.5 Gaslaser .....	17
1.5.1 Neutralgaslaser .....	17
1.5.2 Ionenlaser .....	17
1.5.3 Moleküllaser .....	17
<b>2 Optische Komponenten</b> .....	19
2.1 Laserspiegel .....	19
2.1.1 Optische Metallspiegel .....	19
2.1.2 Dielektrische Interferenzspiegel .....	21
2.2 Fenster .....	23
2.2.1 Brewsterfenster .....	23
2.3 Spiegelmontierung .....	24
2.4 Optische Pumpenanordnungen .....	25
2.5 Justierung eines Laserresonators .....	27
<b>3 Vakuumtechnik</b> .....	31
3.1 Vakuumpumpen .....	31
3.2 Druckmessgeräte .....	34
3.2.1 Membran- oder Bourdonmanometer .....	34
3.2.2 Halbleitermanometer .....	34
3.2.3 Piranidruckmessgerät .....	35

3.2.4	Penningmanometer	36
3.2.5	Visuelle Druckmessung mit Glimmentladung	38
3.3	Ventile	39
3.4	Vakuumkonstruktionen	41
3.5	Lecksuche	43
3.6	Kleine Sputteranlage	43
<b>4</b>	<b>Elektrik</b>	<b>49</b>
4.1	Hochspannungsgeneratoren	49
4.1.1	Einfaches Netzteil	49
4.1.2	HV-Generatoren mit Kfz-Zündspule	50
4.1.3	HV-Pulsgeneratoren	50
4.1.4	HV-Sinusgenerator	51
4.2	Spezielle Bauelemente	52
4.2.1	Hochspannungstransformatoren	52
4.2.2	Hochspannungskondensatoren	53
4.2.3	Hochspannungsschalter	55
4.2.4	Pumplichtquellen	61
4.3	Pulsschaltungen für Gaslaser	63
4.3.1	LC-Inversionsschaltung	65
4.3.2	Blumleinschaltung	65
4.3.3	Koaxiale Pulsschaltung	66
4.3.4	Impulstransformator	66
4.3.5	Marxgenerator	67
4.3.6	Wanderwellenerregung	67
4.3.7	Ladeschaltungen	68
4.4	Pumpschaltungen für Festkörper- und Flüssiglaser	69
4.4.1	Parallele Triggerung	69
4.4.2	Serielle Triggerung	70
4.4.3	Triggerung durch Überspannung	71
4.4.4	Kondensatorbänke, Blitzlampen und Ladenetzeile	71
4.5	Betrieb von CW-Festkörperlasern	73
<b>5</b>	<b>Selbstbauprojekte</b>	<b>75</b>
5.1	Der Stickstofflaser	75
5.1.1	TEA-Stickstofflaser	77
5.1.2	TE-Stickstofflaser	83
5.1.3	Laser mit Bandleitungen	90
5.1.4	Laser mit aufgerollten Bandleitungen	93
5.1.5	Longitudinaler Stickstofflaser	96
5.1.6	Longitudinaler N <sub>2</sub> -Laser mit LC-Inversionsschaltung	99
5.1.7	Weitere TE-Laser	102
5.2	CO <sub>2</sub> -Laser	104
5.2.1	CW-Niederdruck CO <sub>2</sub> -Laser	106

5.2.2	Laser mit Balastwiderständen nach Beaulieu	113
5.2.3	CO <sub>2</sub> -TEA mit Vorionisation durch Gleitentladung	116
5.2.4	CO <sub>2</sub> -TEA-Laser mit Vorionisation mit Funkenstrecken	120
5.3	Ionenlaser	124
5.3.1	Ionenlaser aus altem HeNe-Rohr	125
5.3.2	Eigenaufbau eines Ionenlasers	127
5.4	Metалldampfaser	133
5.4.1	Bleidampfaser	133
5.4.2	Mangandampfaser	136
5.4.3	Calciumdampfaser	137
5.4.4	Kupferdampfaser	139
5.4.5	Eigengeheizter Kupferlaser	146
5.4.6	Kupferhalogenid-Laser	147
5.4.7	Weitere Metалldampfaser	154
5.4.8	Metалldampf-Hohlkathodenlaser	154
5.4.9	Sputterlaser	156
5.5	Dye-Laser/Farbstofflaser	159
5.5.1	Transversal gepumpte Farbstofflaser	159
5.5.2	Longitudinal gepumpte Farbstofflaser	163
5.5.3	Farbstofflaser mit koaxialer Blitzlampe	164
5.5.4	Farbstofflaser mit elliptischer Pumpkammer	171
5.6	Festkörperlaser	177
5.6.1	Rubinlaser	177
5.6.2	Rubinlaser mit elliptischer Pumpkammer	179
5.6.3	Riesenimpuls	189
5.6.4	Neodym	190
5.6.5	DPSS-Laser (diode pumped solid state laser)	194
5.7	Submillimeterlaser	197
5.8	Röntgenlaser	204
<b>6</b>	<b>Messtechnik</b>	207
6.1	Messung der Leistung und Energie	207
6.1.1	Fotozellen	210
6.1.2	Fotodioden	211
6.1.3	Fotowiderstände	212
6.1.4	Thermische Detektoren	213
6.2	Messung der Pulsdauer	215
6.3	Messung der Wellenlänge	216
6.4	LED-Fotometer	218
6.5	Einfaches Spektrometer	221
6.5.1	Einfaches Gitterspektrometer	223
	<b>Anhang</b>	233
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	277
	<b>Farbteil</b>	F1

## 2 Optische Komponenten

### 2.1 Laserspiegel

Die wichtigsten optischen Bauteile eines Lasers sind die Spiegel des Resonators. Abgesehen von suprastrahlenden Laserübergängen, sind diese Spiegel und ihre Justierung entscheidend für die Funktion des Lasers. In der Lasertechnik werden hauptsächlich drei Spiegeltypen verwendet. Erstens die althergebrachten Metall- bzw. metallisierten Spiegel, zweitens die dielektrischen Interferenzspiegel und drittens reflektierende Prismen mit Totalreflektion.

#### 2.1.1 Optische Metallspiegel

Vielfach verwendet und verwendbar sind Spiegel aus metallischen Schichten, die meist auf Glassubstrate aufgebracht werden. Für die Lasertechnik können meist nur Oberflächenspiegel verwendet werden, d. h., die spiegelnde Metallfläche ist auf der Vorderseite des Glases aufgebracht. Bei Zierspiegeln sitzt die Schicht meist hinter dem Glas, um eine Zerstörung zu verhindern. Je nach aufgebrachtener Metallschicht hat der Spiegel unterschiedliche Eigenschaften, die sich im Reflektionskoeffizienten und dessen spektralem Verlauf zeigen.

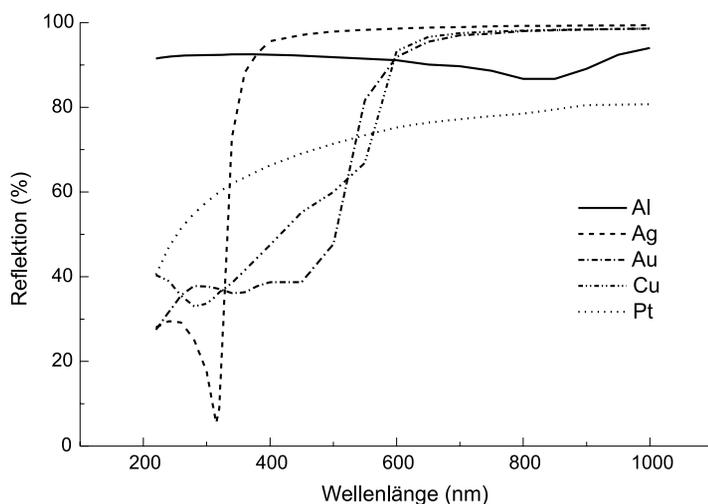


Abb. 2.1: Reflektionsverlauf verschiedener Metalle

Das sonst gut reflektierende Silber hat gerade bei 330 nm einen tiefen Einbruch im Reflektionsverlauf ist also für Stickstofflaser gänzlich unbrauchbar. Ebenso ist zu bedenken, dass die Angaben (genaue Zahlenwerte im Tabellenanhang) für frisch aufgedampfte optimale Schichten gelten. Vor allem Silberschichten degenerieren durch Umwelteinflüsse relativ schnell, sodass die Reflektion absinkt. Während einfache Metallspiegel für 100%-Spiegel für viele Laser mit höheren Verstärkungskoeffizienten ausreichend sind, ist die Sachlage beim halbdurchlässigen Auskoppelspiegel schwieriger. Durch eine Verkleinerung der Schichtdicke des Metalls nimmt zwar die Reflektion ab und die Transmission zu, aber leider steigt auch die Absorption der Schicht stark an. Die Kurve zeigt den Verlauf von Reflektion, Transmission bei zunehmender Schichtdicke des Metallfilms, gemessen bei einer Wellenlänge von 1  $\mu\text{m}$ .

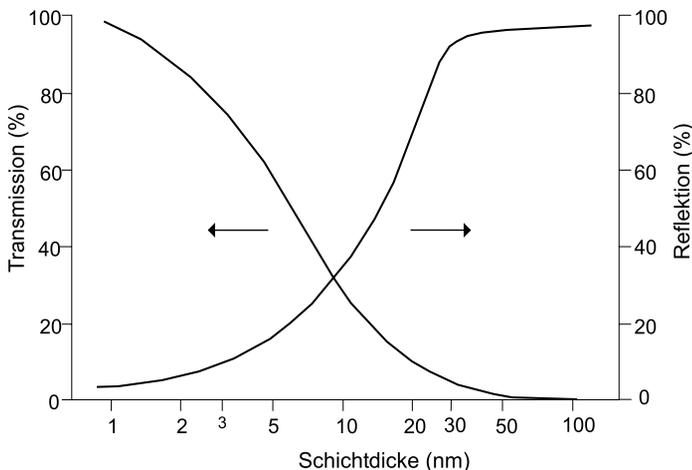


Abb. 2.2: Reflektion und Transmission einer Silberschicht

Tabelle 2.1: Reflektion und Transmission einer Silberschicht

Reflektion	Transmission	Absorption
10 %	75 %	15 %
20 %	52 %	28 %
30 %	34 %	36 %
40 %	24 %	36 %
50 %	18 %	32 %
60 %	13 %	27 %
70 %	10 %	20 %
80 %	8 %	12 %
90 %	6 %	4 %

Die Werte zeigen, dass selbst bei 1  $\mu\text{m}$  Wellenlänge die Absorption sehr große Werte annimmt. Für Laser mit höherer Ausgangsleistung wird die Spiegelschicht durch die hohe Absorption schnell zerstört.

### 2.1.2 Dielektrische Interferenzspiegel

Wesentlich günstigere Verhältnisse findet man bei dielektrischen Spiegelschichten. Auch eine dielektrische Oberfläche reflektiert einfallendes Licht. Der Reflektionsfaktor hängt von den Brechzahlen der Schicht und des umgebenden Mediums ab.

$$R = (n_s - n_o)^2 / (n_s + n_o)^2$$

R = Reflektionsfaktor

$n_s$  = Brechzahl Schicht

$n_o$  = Brechzahl Medium

Normales optisches Glas (BK7) mit einer Brechzahl von 1,51 reflektiert somit 4 % des einfallenden Lichts. Diese Reflektion kann durch das Aufbringen weiterer Schichten mit unterschiedlichen Brechzahlen erhöht werden. Meist werden  $\lambda/4$ -Schichten aus zwei Materialien abwechselnd aufgedampft. Mit Zinksulfid ( $n = 2,35$ ) und Kryolit ( $n = 1,35$ ) erreicht man mit zehn Schichten einen Reflektionsfaktor von 99 % und mit 20 Schichten 99,99 %. Die Absorption dieser Spiegel bei richtiger Herstellung ist sehr klein.

Nur mit solchen Spiegeln ist die Realisierung von Lasern mit kleiner Verstärkung wie der bekannte HeNe-Laser möglich. Leider sind solche Spiegel im Selbstbau nicht herstellbar, da aufwendige Sputter- oder Aufdampfanlagen benötigt werden. In der Industrie werden jedoch solche Spiegel vielfach verwendet, da sie in der Massenproduktion keine wesentlich höheren Kosten als Metallspiegel verursachen. Viele optische oder optischelektrische Apparate enthalten Interferenzspiegel. Hin und wieder können auch billige Massenprodukte für diese Zwecke zweckentfremdet werden. Beispielsweise bestehen sogenannte dichroitische Filter für Halogenlampen aus dielektrischen Interferenzschichten. Folgende Kurven zeigen den spektralen Verlauf verschiedener Filter.

Da dielektrische Filter keine oder nur wenig Absorption aufweisen, wird das nicht transmittierte Licht reflektiert. Der blaue Filter reflektiert also gut im Bereich von 550 bis 650 nm, der gelbe Filter im violetten Bereich bei 400 bis 450 nm. Der rote Filter ist für einen weiten Bereich von 450 bis 600 nm zu gebrauchen, der gelbe Filter schließlich für den grünen Bereich von 500 bis 550 nm.

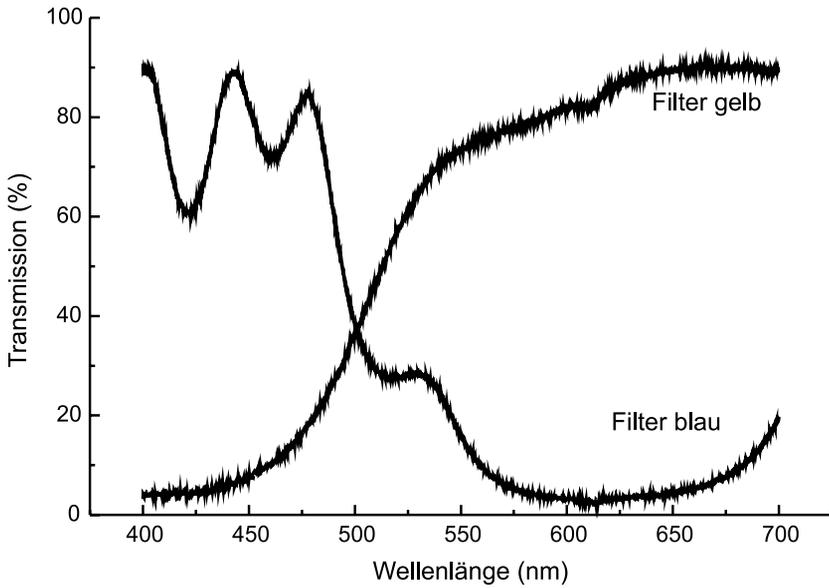


Abb. 2.3: Spektraler Verlauf des blauen und gelben Filters

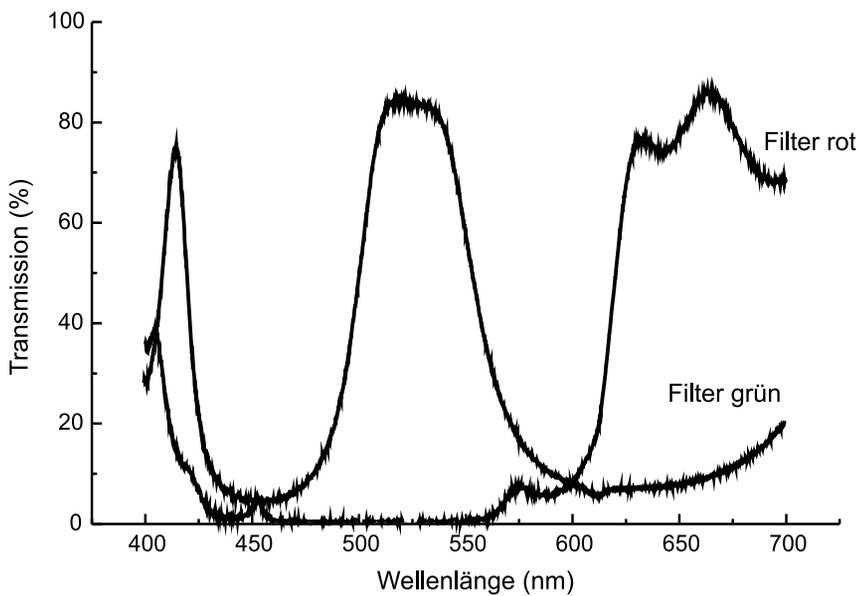


Abb. 2.4: Spektraler Verlauf des roten und grünen Filters

# 5 Selbstbauprojekte

Im Folgenden werden verschiedene Vorschläge zum Selbstbau von Laserapparaturen vorgestellt. Je nach Laser sind die Anforderungen an Erfahrung und Geschicklichkeit des Bastlers und an seine Ausstattung sehr unterschiedlich. Für den Anfänger ist vor allem der Stickstofflaser geeignet. Deshalb wurden diese Laser ausführlich beschrieben. Bei den anspruchsvolleren Projekten, deren Nachbau einige Erfahrungen im Umgang mit Lasern voraussetzt, wurde auf genaue Maßangaben verzichtet. Meist sind die genauen Abmaße ohne Bedeutung. Es spielt keine Rolle, ob z. B. ein Laserrohr 12,7 oder 12 mm Durchmesser hat. Bei der Durchsicht amerikanischer Veröffentlichungen stößt man öfter auf solche Werte, die durch die Umrechnung von Inchmaßen entstehen. Wichtiger ist die Erhältlichkeit der Teile. Selbstverständlich werden aber bei kritischen Maßen dementsprechende Angaben gemacht.

## 5.1 Der Stickstofflaser

Der wohl am einfachsten zu bauende Laser ist der im ultravioletten Bereich strahlende Stickstofflaser. Als der Stickstofflaser 1963 von Heard<sup>(1)</sup> untersucht wurde, fand er zunächst keine besondere Aufmerksamkeit, geschah dies doch zu einer Zeit, als fast täglich neue Laserübergänge entdeckt wurden. Mit Anregungspulsen von 150 kV erreichte Heard Ausgangspulse mit nur 10 Watt Leistung. Erst später wurde das große Potenzial dieses Lasersystems erkannt und mit besser geeigneten Anregungsbedingungen Leistungen im Megawattbereich erzielt.

Der Laserübergang, dessen Hauptlinie bei 337 nm liegt, findet im elektronisch angeregten Stickstoffmolekül zwischen den  $C^3 \Pi_u$ - und  $B^3 P_g$ -Niveaus statt.

Eine Besonderheit liegt in der sehr unterschiedlichen Lebensdauer der beiden Laserniveaus. Während das obere Niveau nur eine Lebensdauer von circa 40 ns besitzt, ist die Lebensdauer des unteren metastabilen Niveaus mit einigen Millisekunden sehr lang.

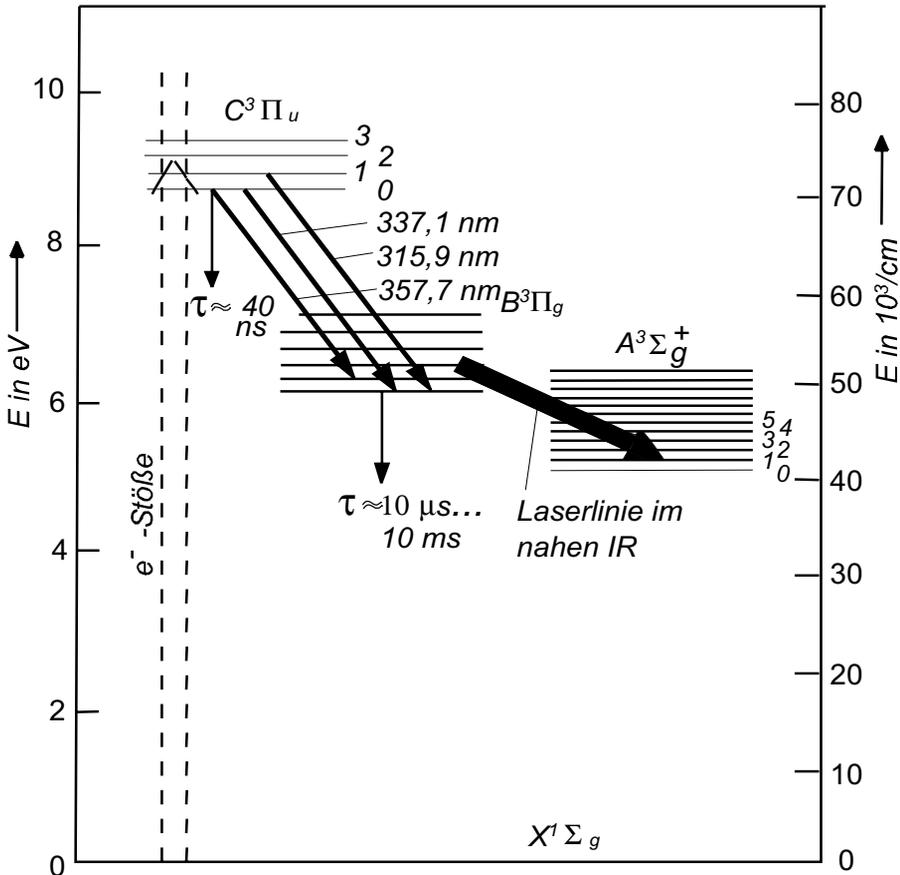


Abb. 5.1: Energieniveaus des Stickstoffmoleküls

Durch diese Verhältnisse ergeben sich Konsequenzen für den erfolgreichen Laserbetrieb. Der Stickstofflaser kann nur gepulst betrieben werden, da sich eine Inversion durch die kurze Lebensdauer des oberen Niveaus schnell abbaut. Um überhaupt eine Inversion zu erreichen, muss die Anregung in sehr kurzer Zeit erfolgen. Praktisch wird das durch schnelle, stromstarke Hochspannungspulse erzielt. Im Gegensatz zum üblichen Aufbau von Gaslasern wird der Stickstofflaser transversal gepumpt, das heißt, das erregende elektrische Feld wirkt quer zur optischen Achse des Lasers. So wird erreicht, dass die Impedanz der Entladestrecke trotz größerer Laserlängen klein bleibt und deshalb mit gut handhabbaren Spannungen von einigen zehn Kilovolt hohe Ströme erreicht werden können.

Eine hohe Wiederholrate wird durch die lange Lebensdauer des unteren Niveaus erschwert, da Moleküle, die sich im unteren Niveau befinden, für den Inversions-/Emissions-Zyklus nicht zur Verfügung stehen.

Will man eine hohe Wiederholrate erreichen, muss entweder der Stickstoff durch hohe Flussraten schnell ausgetauscht werden oder das untere Laserniveau durch Stöße schnell entleert werden. Eine hohe Stoßrate kann durch hohen Druck oder kleine Gefäßabmessungen erreicht werden.

Wird der Stickstofflaser derart betrieben besitzt das Lasermedium eine sehr hohe Verstärkung, die Werte von über 100 dB/m erreichen kann. Deshalb werden Stickstofflaser meist im Superstrahlungsmodus betrieben. Gerade diese Eigenschaft macht den Stickstofflaser für Selbstbauer interessant, da keine hochwertigen Spiegel und schwierig zu justierenden Resonatoren verwendet werden müssen. Daneben ist Stickstoff ein billiges, ungiftiges Gas und unter bestimmten Betriebsbedingungen kann der Stickstofflaser sogar mit Luft betrieben werden.

Bei geeigneter Konstruktion kann der Stickstofflaser auch bei hohem Druck bis hin zum normalen Luftdruck funktionieren und ist somit in der Lage, in offener Bauweise in normaler atmosphärischer Luft zu arbeiten. Allerdings sind diese Hochdrucklaser nicht ganz so einfach zum Laufen zu bringen wie Stickstofflaser, die bei Unterdruck betrieben werden, sodass dem Neuling auf dem Gebiet des Laserbaus geraten wird, sich erst einmal an einer Unterdruckversion zu versuchen.

### 5.1.1 TEA-Stickstofflaser

Einer der Vorteile des TEA-Betriebs ist die Möglichkeit des Betriebs bei normalem Luftdruck, der ein Vakuumsystem überflüssig macht. Um aber bei diesem hohen Druck eine homogene Glimmentladung zwischen den Elektroden zu erreichen, müssen einige Voraussetzungen geschaffen werden. Wird dies nicht beachtet, erhält man nur konzentrierte Funkenüberschläge, mit denen kein Laserbetrieb möglich ist.

Für die Ausbildung einer homogenen Glimmentladung ist eine Vorionisation des Entladevolumens notwendig. Besonders kritisch werden die Verhältnisse bei Betrieb mit Luft statt mit reinem Stickstoff, da der zu 20 % in der Luft enthaltene Sauerstoff mit seinen elektronegativen Eigenschaften die homogene Entladung behindert.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die schon kurze natürliche Lebensdauer des oberen Laserniveaus von 40 ns durch den hohen Druck weiter verringert wird und Werte von einigen Nanosekunden erreicht. Die Pumpenergie muss dem System in ähnlich kurzer Zeit zugeführt werden. Das ist nur in Aufbauten möglich, bei denen störende parasitäre Induktivitäten auf ein Minimum reduziert wurden. Möglich ist das mit koaxialen oder Bandleitungssystemen. Um hohe Ströme zu erreichen, müssen die Impedanzen der Anordnung klein gehalten werden, deshalb verwendet man meist die auch konstruktiv einfacheren Bandleitungssysteme. Aufbauten mit diskreten Kondensatoren wie bei TE-Betrieb erfüllen die Bedingungen nicht. Beschaltet wird der Laser nach dem bei kurzen Pulsen sehr bewährten Blumleinprinzip. Durch eine besondere geometrische Anordnung von Laserkanal, Bandleitungen und Funkenstrecke wird manchmal versucht, eine Wanderwellenanregung des Lasers zu erzielen. Die Wirksamkeit solcher Anordnungen ist allerdings auch unter Experten umstritten.

Unstrittig ist jedoch die Wirksamkeit der Vorionisation. Besonders einfach ist die von Bergmann<sup>(2)</sup> 1972 eingeführte Anordnung, bei der die Vorionisation durch eine energiearme Oberflächenentladung erreicht wird. Zu diesem Zweck werden die oberen Beläge der Bandleitungen bis unter die eigentlichen Elektroden des Laserkanals geführt und bilden dort einen Spalt, der etwas größer als der Abstand der Laserelektroden ist. Wird die Bandleitung erregt, bildet sich dort auf dem Dielektrikum des Spaltes zwischen den Elektroden eine Gleitentladung, deren harte UV-Strahlung das Gas zwischen den Laserelektroden ionisiert. Nach ausreichender Vorionisation bildet sich dort dann die gewünschte homogene Volumenentladung.

Eine nachbausichere Konstruktion verwendet für die Bandleitung 0,6 mm dünnes, beidseitig kaschiertes Platinenmaterial aus glasfaserverstärktem Epoxid (FR4). Die Kupferstruktur auf der Oberseite wird entsprechend der Zeichnung ätzzfest mit Tesafilm oder Klebefolie abgedeckt und mit einer der üblichen Lösungen geätzt. Auf der Unterseite kann die Kupferschicht auf der ganzen Fläche stehen bleiben. Die in der Zeichnung angegebenen Maße müssen nicht genau eingehalten werden und können dem vorhandenen oder beschaffbaren Material angepasst werden. Kritisch ist nur die Breite des zwischen den oberen Elektroden vorhandenen Spalts. Dieser Spalt, in dem die für die Funktion des Lasers entscheidende Vorionisation stattfindet, hat im vorliegenden Modell eine Breite von 6 mm. Wichtig ist auch, dass die Elektroden überall einen Abstand von mindestens 2 cm zum Rand der Platine einhalten, da sonst unerwünschte Überschläge zum unteren Belag stattfinden können. Aus dem gleichen Grund werden die Ecken der Kupferflächen mit einem Radius versehen. Der in der rechten Elektrode frei geätzte Kreis wird für die Funkenstrecke benötigt. Die Kapazität der fertigen Platine beträgt 2 nF pro Kondensatorfläche.

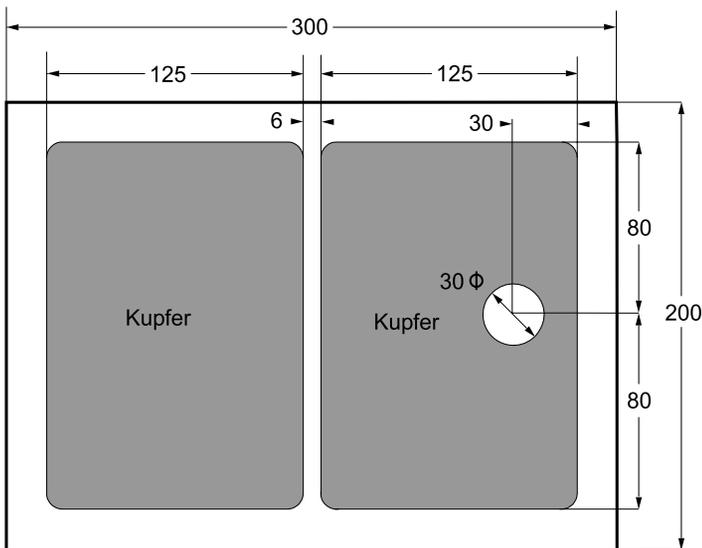


Abb. 5.2: Abmaße der Kondensatorplatine

Die 160 mm langen Elektroden des Laserkanals bestehen aus Flachmaterial, Aluminium, Kupfer oder Messing und sind 20 mm breit und 4 mm dick. Die innen liegenden Kanten, welche den Kanal bilden, haben einen halbkreisförmigen Querschnitt und müssen sorgfältig gearbeitet werden. Am einfachsten wäre die Verwendung fertiger Profile mit entsprechendem Querschnitt. Verwendet man Messing oder Kupfer, hat man auch die Möglichkeit, aus einem Rund- und einem Flachmaterial die Elektroden zu löten. Bei Aluminium muss man zu Feile, Schmirgelleinen und Polierpaste greifen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Vorderkante gerade bleibt. Legt man die beiden fertigen Elektroden Kante an Kante aufeinander, darf kein Spalt dazwischen zu sehen sein. Auch die äußeren Ecken müssen abgerundet werden.

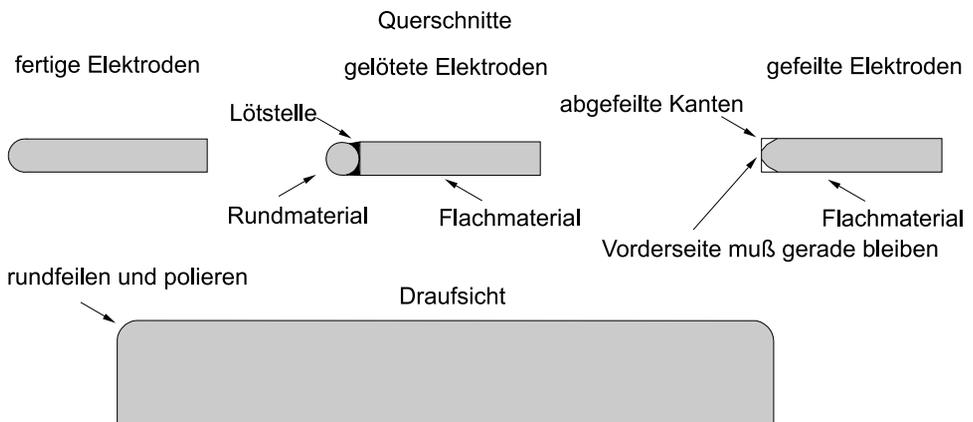


Abb. 5.3: Herstellung der Elektroden

Neben den Laserelektroden ist die Schaltfunkenstrecke der wichtigste Bestandteil des TEA-Lasers. Die Funkenstrecke muss eine möglichst kleine Eigeninduktivität aufweisen und wird deshalb direkt auf die Kondensatorplatte gelötet. Auch der geringe Elektrodenabstand von 3 mm trägt zur kleinen Induktivität bei. Um trotz des geringen Abstands eine ausreichende Durchschlagspannung zu erreichen, wird die Funkenstrecke mit Überdruck betrieben oder Pulsladung zum Betrieb des Lasers angewandt. Für die Elektroden der Funkenstrecke werden M5-Hutmutter eingesetzt.

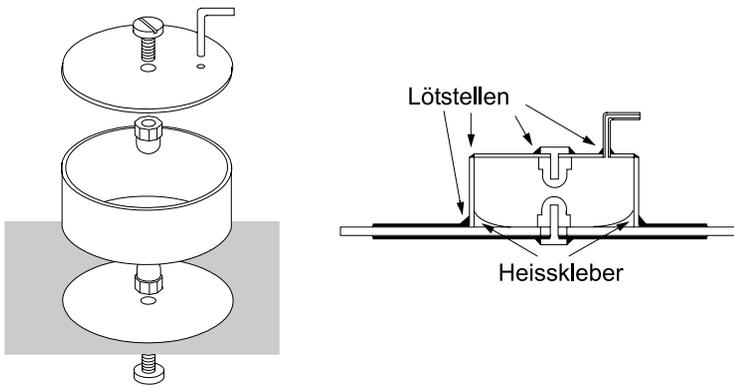


Abb. 5.4: Die Funkenstrecke

Der Körper der Funkenstrecke besteht aus einem Stück Messingrohr, das auf die Platine gelötet wird. Am inneren Umfang des Rohrs wird zur Isolation ein Wulst mit der Heißklebepistole gelegt. Nachdem die Elektroden aus M5-Hutmuttern mit Messingschrauben auf der Platine und am Messingdeckel befestigt sind, wird der Deckel auf das Rohr gelötet und somit die Funkenstrecke hermetisch verschlossen. Ein dünnes, im Deckel eingelötetes Kupferrohr dient zur Füllung der Funkenstrecke mit dem Arbeitsgas. Alle Lötvorgänge an der Platine müssen vorsichtig vorgenommen werden, da sich bei Überhitzung leicht die Kupferfolie vom Trägermaterial löst. Am besten wird das Rohr mit dem Lötbrenner vorgewärmt, auf die Platine gelegt und schnell am äußeren Umfang mit dem LötKolben verlötet. Die Höhe des Rohres wurde so gewählt, dass die Hutmuttern einen Abstand von 2,5 mm haben. Bei diesem Abstand beträgt die Überschlagspannung bei Normaldruck 10,5 kV.

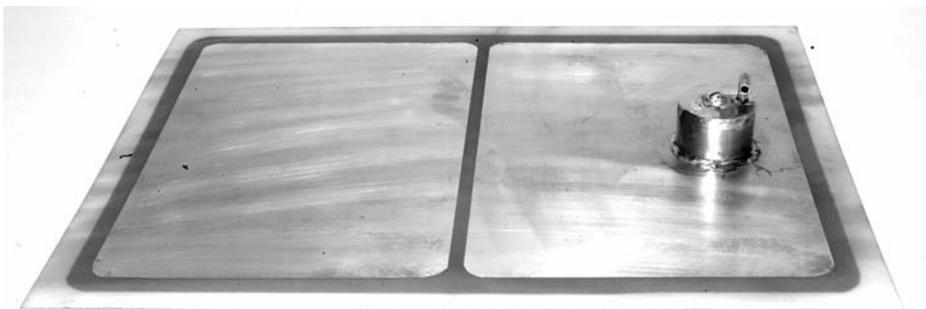


Abb. 5.5: Die fertige Bandleitung mit aufgelöteter Funkenstrecke

Die Elektroden des Laserkanals sind aus Flachmessing,  $10 \times 2,5$  mm, und Rundmessing mit 4 mm Durchmesser gelötet. Die Elektroden werden auf einen Plexiglasstreifen geschraubt, sodass sich zwischen ihnen ein 150 mm langer und 2,5 mm breiter Kanal bildet. In diesen Plexiglasstreifen wird ein Nippel zur Gaszuführung eingeschraubt. Die Spiegelplatte besteht aus einem Plexiglasplättchen, welches an der Stirnseite der Oberplatte befestigt ist. Der

Spiegel selbst ist auf eine runde Metallplatte geklebt. Hierfür wurde ein Stück von einem Scannerspiegelstreifen benützt. Justiert wird der Spiegel mit drei Muttern, als Konterfeder dient ein gepresster O-Ring. Mit vier Kunststoffschrauben wird die Oberplatte mit den Elektroden gegen eine Unterplatte und somit gegen die zwischengelegte Bandleitung gepresst. Auf der Oberplatte ist auch die Ladedrossel angebracht. Die Drossel besteht aus 30 Windungen isolierten Drahts auf einem Ferritringkern. Diese Drossel wird nur benötigt, wenn zur Versorgung des Lasers eine Pulsladungsschaltung zur Anwendung kommt. Bei Gleichstrombetrieb kann sie durch einen Widerstand von einigen Kiloohm ersetzt werden.

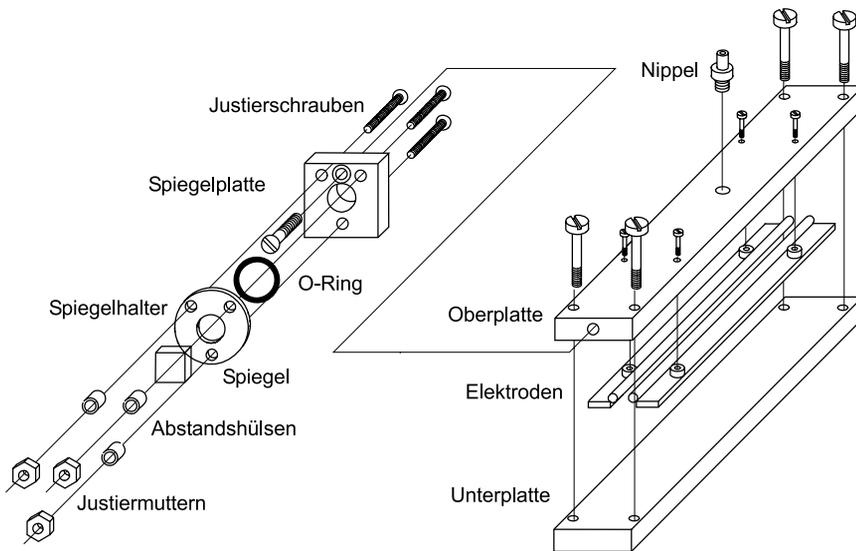


Abb. 5.6: Zusammenbau der Kammer und des Spiegelhalters

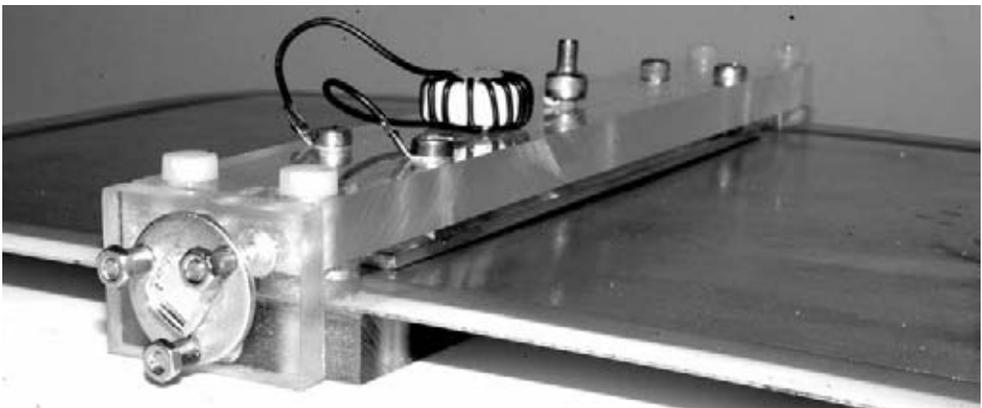


Abb. 5.7: Die Spiegelhalterung

Die Durchschlagspannung der Funkenstrecke beträgt 10,5 kV und steigt weitgehend linear mit dem Betriebsdruck. Bei 13 kV wird beim Betrieb mit atmosphärischer Luft die Laserschwelle (ohne Spiegel) erreicht. Der Druck in der Funkenstrecke wird mit einer Fahrradpumpe aufgebaut. Dazu wird von einem alten Fahrradschlauch das Ventilröhrchen abgesägt und an der Sägestelle ein Röhrchen angelötet, das über einen Schlauch an den Nippel der Funkenstrecke angeschlossen wird. Über ein T-Stück kann noch zur Kontrolle des Drucks ein Manometer angeschlossen werden.

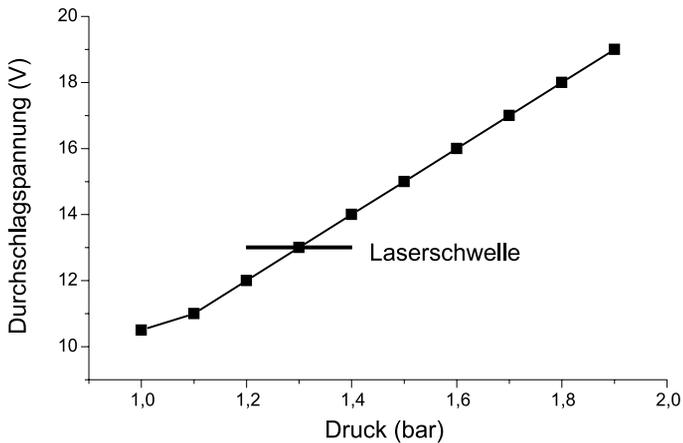


Abb. 5.8: Druck/Spannungs-Abhängigkeit der Funkenstrecke



Abb. 5.9: Der Betrieb des TEA-Lasers mit Luft

Für einen problemlosen Betrieb wird der Laser zusammen mit einem Netzteil in ein passendes Gehäuse eingebaut.

### 5.1.2 TE-Stickstofflaser

Für den Bau eines einfachen Niederdruck-Stickstofflasers (TE-Laser) sind keine speziellen Teile notwendig. Der Laser besteht aus folgenden Komponenten: der Laserkammer, dem Speicherkondensator mit Hochspannungsschalter, dem Hochspannungsnetzteil und dem Vakuumsystem.

Da der Betriebsdruck des Lasers bei 50 bis 150 mBar liegt, ist zum Evakuieren der Kammer eine Pumpe erforderlich. Eine Rotationspumpe oder eine gute Membranpumpe erfüllt diese Voraussetzungen. Auch der Selbstbau der Pumpe aus einem Autoreifenkompressor oder einem Kühlschrankskompressor ist möglich. Weiterhin wird ein Manometer mit dem Messbereich 0 bis 1000 mBar benötigt, z. B. ein Bourdon- oder Membranmanometer. Die Einstellung des Betriebsdrucks wird mit einem Drosselventil vorgenommen.

Das zentrale Bauteil ist die Laserkammer, welche aus Plexiglas geklebt wird. Statt Plexiglas kann auch das billigere Polystyrol (Bastelglas) verwendet werden, das allerdings den Nachteil besitzt, beim Bohren leicht zu springen. Auf jeden Fall sollte das Material durchsichtig sein, damit man später das Aussehen der Entladung kontrollieren kann.

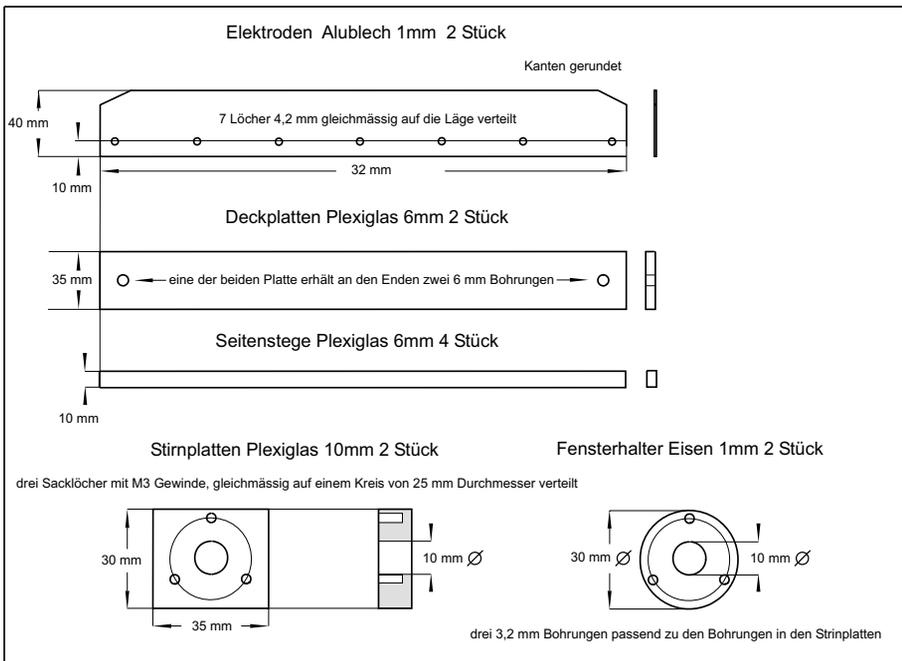


Abb. 5.10: Teile der Laserkammer

Die Elektroden bestehen aus dünnem Alublech, sie werden entsprechend der Zeichnung zugeschnitten. An den inneren Längsseiten werden mit Sandpapier die Kanten abgerundet. Dabei ist zu beachten, dass die Seiten insgesamt gerade bleiben, wenn man die Bleche aneinander legt, darf kein größerer Spalt dazwischen zu sehen sein. Bevor nun die Elektroden verklebt werden, sollte man die äußeren Befestigungslöcher gebohrt haben. Die obere und untere Kammerchale werden aus jeweils drei Plexiglasstreifen geklebt. Hat man entsprechendes Werkzeug (Fräse) zur Verfügung, können die Schalen natürlich auch aus Vollmaterial gefertigt werden. In die obere Schale werden zwei Plexiglasröhrchen eingeklebt, die als Pumpstutzen dienen. Zwei dickere Platten dienen als vorderer und hinterer Verschluss der Kammer. Die Platten haben eine zentrale 10 mm Bohrung und drei Sacklöcher mit M3-Gewinde. Diese M3-Gewindebohrungen dienen zur Befestigung und Justierung des Fenster- bzw. Spiegelhalters mittels M3-Schrauben. Für diese Halter werden große M10-Beilagscheiben, sogenannte Karosseriescheiben, verwendet. Während die meisten Maße der Teile unkritisch sind und nicht genau eingehalten werden müssen, ist darauf zu achten, dass der von den Elektroden gebildete Spalt über die ganze Länge die konstante Breite von 8 mm aufweist.

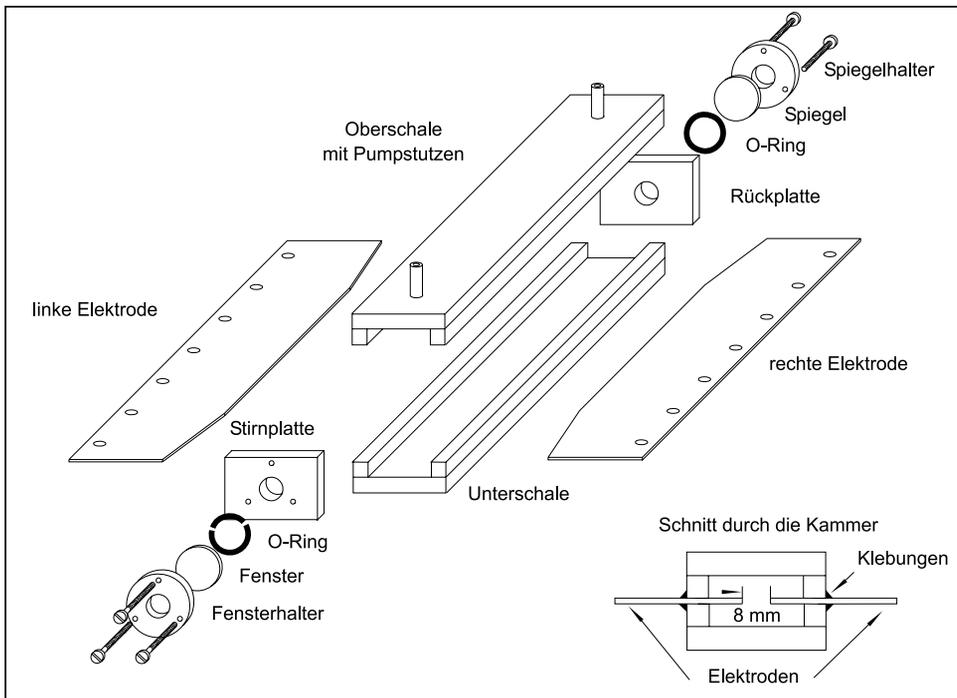


Abb. 5.11: Explosionszeichnung der Laserkammer

Für die Klebungen wird am besten „UHU Plus Endfest 3000“ verwendet. Durch vorsichtiges Erwärmen mit einem Haarföhn kann der Härtingsprozess beschleunigt werden.

Die fertige Kammer wird mit einer Pumpe auf Dichtigkeit geprüft. Dazu wird die Pumpe an dem einen Stutzen angeschlossen und am dem anderen Stutzen überprüft ein Manometer den Druck. Es sollte ein Enddruck von mindestens 10 mbar erreicht werden und der Druck in der Kammer sollte nach dem Abklemmen des Pumpschlauches nur langsam ansteigen. Sollten aber Lecks auftreten werden sie mit dünnflüssigem (erwärmtem) UHU Plus beseitigt.

Die Kondensatorbank kann auf zwei Arten realisiert werden. Zum einen die elektrisch gesehen bessere und auch billigere Variante mit Bandleitungen, die aber viel Fläche braucht und so etwas unhandlich ist. Die andere Ausführung mit diskreten Kondensatoren liefert zwar etwas langsamere Pulse und ist teurer, da die Kondensatoren gekauft werden müssen, dafür ist sie aber wesentlich kompakter.

### *Laser mit diskreten Kondensatoren in LC-Schaltung*

Für die Kondensatorbank eignen sich nur keramische Hochspannungskondensatoren in der so genannten „Doorknop“-Ausführung. Diese Kondensatoren besitzen eine niedrige Eigeninduktivität und erlauben die nötigen hohen Impulsströme. Die Gesamtkapazität der Bank sollte einige Nanofarad betragen, bei einer Betriebsspannung von 20 bis 40 kV. Hat man die Wahl, sollte man lieber mehrere Kondensatoren mit kleinerer Kapazität wählen als wenige mit hoher Kapazität. Bei mehreren Kondensatoren teilen sich die Ströme besser auf und auch die Eigeninduktivität der Bank wird verringert. Passende Kondensatoren neu zu kaufen wäre sehr teuer aber, sie werden immer wieder auf Flohmärkten und bei Ebay zu einem annehmbaren Preis angeboten. Geschaltet wird der Laser als „LC-Inversions“-Schaltung, eine Abart der Blumlein-Schaltung mit diskreten Bauelementen.

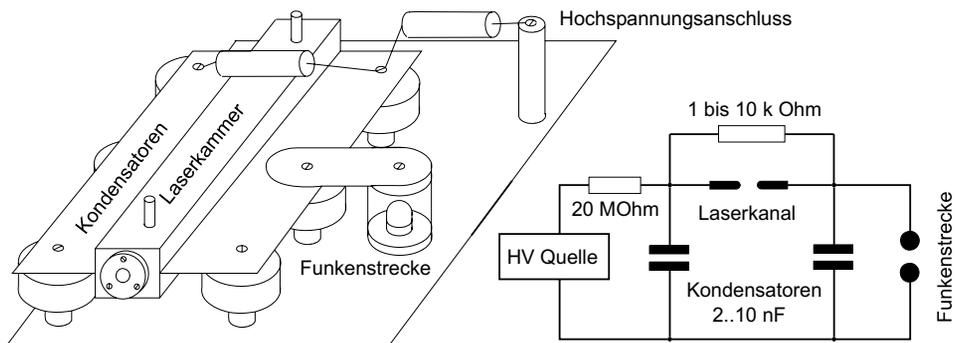


Abb. 5.12: Kondensatorbeschaltung des Blumlein-Schemas

Die Zeichnung (Abb. 5.12) zeigt den gedrängten Aufbau der Schaltung, die niedrige Induktivitäten und somit hohe Impulsströme erlaubt.



Abb. 5.13: Der fertige Blumlein-Laser

Das Bild (Abb. 5.13) zeigt den fertigen Laser, dessen Kondensatorbank aus acht keramischen Hochspannungskondensatoren besteht. Diese Kondensatoren des Herstellers Sharp haben eine Betriebsspannung von 40 kV und eine Kapazität von je 820 pF.

Zum Schalten wird eine Funkenstrecke verwendet. Die Elektroden der Funkenstrecke bestehen aus M8-Hutmutter, welche zur Geräuschdämpfung in ein Kunststoffrohr eingebaut sind. Der Abstand der Elektroden und somit die Durchschlagsspannung kann durch das Unterlegen von Beilagscheiben geändert werden. Von den beiden Deckeln wird einer mit dem Rohr verklebt, der andere mit drei Schrauben befestigt. So kann die Funkenstrecke jederzeit wieder geöffnet werden, um sie zu reinigen oder einen anderen Elektrodenabstand einzustellen.

Die Funkenstrecke wird hier im freilaufenden Modus betrieben. Das bedeutet, sie erhält kein Triggersignal, sondern zündet nach Erreichen der Durchbruchspannung von selbst. Will man den Laserpuls zu einem bestimmten Zeitpunkt auslösen, muss noch eine Triggerelektrode angebracht werden. Diese kann aus einem spitzen Metallstift bestehen, welcher in den Raum zwischen den Elektroden ragt und durch einen Hochspannungspuls aus einer Zündspule erregt wird.

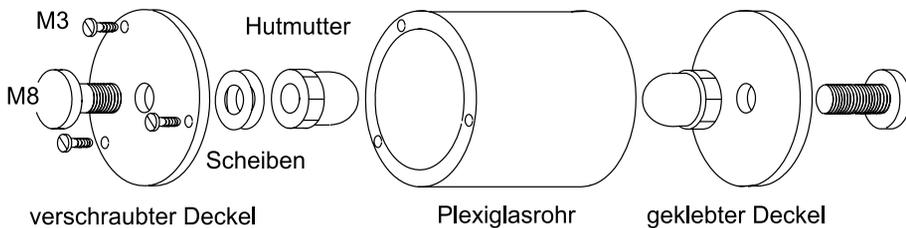
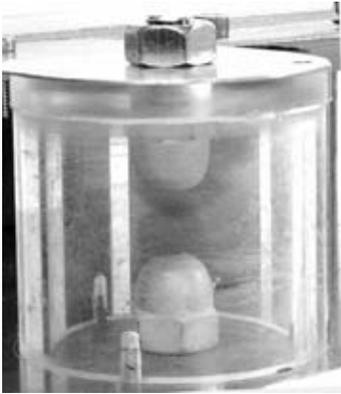


Abb. 5.14: Bestandteile der Funkenstrecke



Abstand der Elektroden	Durchschlagsspannung
3,5 mm	12 kV
5,0 mm	16,5 kV
6,5 mm	20 kV
8,0 mm	23 kV
9,5 mm	26 kV

Abb. 5.15: Funkenstrecke und ihre Parameter

Obwohl der Laser auch im Superstrahlungsmodus arbeiten kann, bringt doch ein Resonator bestehend aus Spiegel und Fenster eine deutliche Erhöhung der Ausgangsleistung. Als Spiegel eignet sich nur ein Oberflächenspiegel mit einer Spiegelschicht aus Aluminium. Derartige Spiegel kann man zum Beispiel aus einem alten Scanner ausbauen. Spiegel aus einem alten Laserdrucker sind meist nicht geeignet, da sie oft aus dielektrischen Schichten aufgebaut sind, welche die UV-Strahlung des Stickstofflasers nur schwach reflektieren. Für das Auskoppelfenster ist ein Quarzplättchen geeignet oder zur Not auch ein Fenster aus Glas. Durch die drei Schrauben des Fensterhalters und die zwischengelegten O-Ringe werden der Spiegel und das Fenster vakuumdicht und doch justierbar an den Stirnseiten der Laserkammer befestigt. Spiegel und Fenster werden senkrecht zum Laserkanal und parallel zueinander justiert. Das geschieht am besten nach einer der in Kapitel 2 „Optische Komponenten“ beschriebenen Methoden.

Ist alles montiert und justiert, werden das Vakuumsystem, die Stickstoffversorgung und die Hochspannungsquelle angeschlossen. Nachdem die Kammer möglichst weit abgepumpt worden ist, wird das Nadelventil der Stickstoffversorgung geöffnet und ein Druck von 50 mBar eingestellt. Wird nun die Hochspannung eingeschaltet, wird bei jedem Impuls der Funkenstrecke die bläulichviolette Endladung zwischen den Laserelektroden sichtbar und ein Laserstrahl emittiert, der durch die hellblaue Fluoreszenz eines weißen Schreibpapiers sichtbar wird. Ist kein Laserspot zu sehen und ist die Entladung von vielen einzelnen Funken durchsetzt, ist der Druck in der Kammer zu hoch. Ist aber die Entladung homogen und trotzdem keine Lasertätigkeit feststellbar, ist der Druck zu niedrig.



Abb. 5.16: Betrieb des Blumlein-Lasers

Bei einer Einstellung der Funkenstrecke auf eine Spannung von 26 kV wurde vom Verfasser Lasertätigkeit in einem Druckbereich von 20 mBar bis 400 mBar erhalten. Der ultraviolette Laserstrahl wird durch die hellblaue Fluoreszenz auf einem weißen Karton sichtbar gemacht. Diese Fluoreszenz entsteht durch die im Karton enthaltenen Weißmacher-Farbstoffe. Diese Farbstoffe, die sich im Übrigen auch für den Betrieb in einem Farbstofflaser eignen, dienen dazu, durch bläuliche Fluoreszenz das Papier weißer erscheinen zu lassen.

Beim Betrieb mit Luft statt Stickstoff sind sowohl der Arbeitsbereich (etwa 50 mBar) als auch die Leistung deutlich kleiner. Einen sehr weiten Druckbereich erlaubt eine Gas Mischung aus Stickstoff und Helium im Verhältnis 1:1. Damit arbeitet der Laser noch bei Atmosphärendruck, also wenn das Gas nur durch die Kammer strömt und keine Pumpe verwendet wird.

Arbeitet der Laser, kann man versuchen, die Justierung des Resonators zu optimieren, was aber nur bei ausgeschalteter Hochspannung erfolgen sollte. Zur besseren Beobachtung des Laserspots kann das Rohr der Funkenstrecke wie auf dem Foto mit schwarzem Papier umhüllt werden, das das grelle Licht der Funkenentladung abschirmt.

## Die Ladungstransferschaltung

Mit den vorhandenen Bauteilen kann der Laser auch in der Ladungstransferschaltung betrieben werden, dazu muss nur der Aufbau etwas geändert werden.

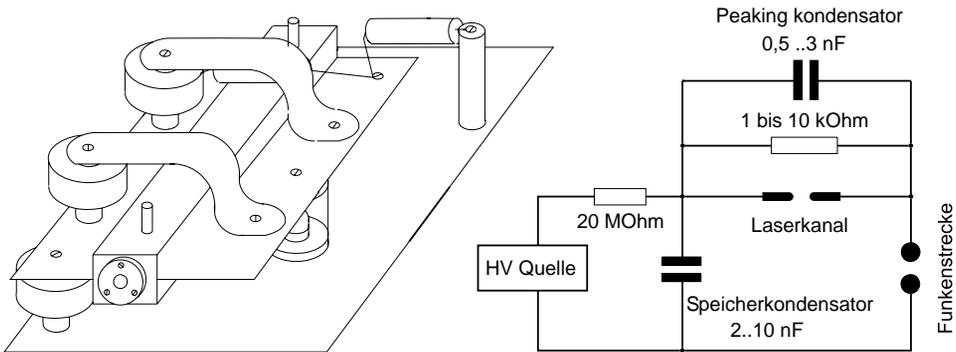


Abb. 5.17: Die Ladungstransferschaltung

Die Kondensatoren an der rechten Elektrode werden oben auf die linke Elektrode montiert und mit Kupferblechstreifen mit der rechten Elektrode verbunden. Diese Kondensatoren bilden die so genannte Peaking-Kapazität deren Gesamtwert etwa ein Drittel der Kapazität der Speicherkondensatoren betragen soll. Die Dauer des Laserpulses ist bei der Ladungstransferschaltung etwas länger als bei der Blumleinschaltung, was zum Pumpen von Farbstofflasern vorteilhaft sein kann.

Beim Aufbau besteht die Speicherkapazität aus vier 820 pF Kondensatoren, die Peaking-Kapazität aus zwei dieser Kondensatoren. Beim Betrieb des Lasers ist kein großer Unterschied zur vorgehenden LC-Inversionsschaltung festzustellen.

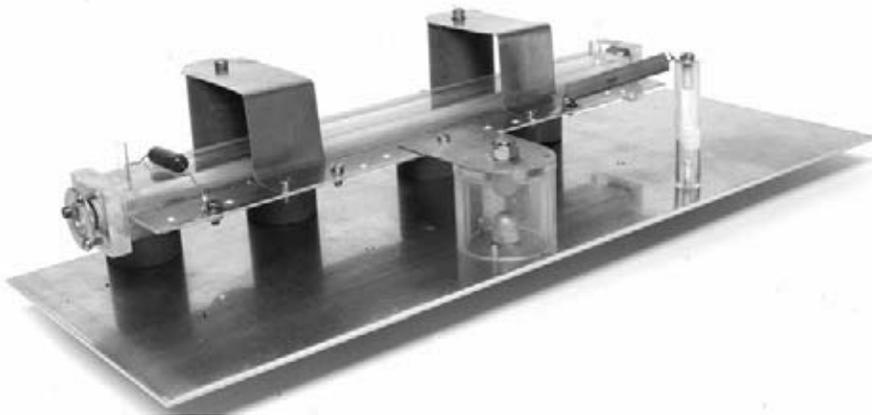


Abb. 5.18: Der Laser mit Ladungstransferschaltung



Abb. 5.19: Der Ladungstransferschaltungslaser im Betrieb

### 5.1.3 Laser mit Bandleitungen

Beim Laser mit Bandleitungen werden die Kondensatoren aus drei Metallplatten, die durch eine Isolierfolie getrennt sind, gebildet. Das ganze Sandwich ist auf einer stabilen Bodenplatte aufgebaut. Da diese Bodenplatte keine elektrische Funktion erfüllt, kann sie aus beliebigem Material sein. Die Kondensatorplatten hingegen müssen aus gut leitendem Aluminium- oder Kupferblech sein. Eine Stärke von 0,5 mm ist ausreichend.

Eine besondere Bedeutung kommt der Isolierschicht zu, die dünn sein muss, um eine hohe Kapazität der Kondensatoren und eine niedrige Impedanz der Bandleitung zu erhalten. Gleichzeitig muss die Schicht in der Lage sein, eine hohe Spannung auszuhalten ohne durchzuschlagen. Diese Anforderungen erfüllen Folien oder dünne Platten aus PVC, Polystyrol, Plexiglas und Epoxid. Ein Material erster Klasse ist Polyimid (Handelsname Kap-

ton), das aber leider teuer und schwierig zu erhalten ist. Ebenfalls hervorragende Eigenschaften weist Glasfaserepoxid (FR4) auf, das Material, aus dem Leiterplatten gefertigt werden. Beim einseitig beschichteten Platinenmaterial ist durch die Kupferbeschichtung auch schon die untere Elektrode vorhanden. Hier bietet sich ein weites Feld, durch eigene Experimente passendes Material zu finden. Hinweise bieten die im Anhang enthaltenen Tabellen.

Die beiden oberen Kondensatorbeläge sind mit den Elektroden der Laserkammer verschraubt und abgewinkelt, damit sie auf einer möglichst großen Fläche auf der Isolierschicht aufliegen. Am Rand muss ein Streifen von circa 2 cm freigelassen werden, um Überschläge zu vermeiden. Das Kondensatorpaket wird mit Kunststoffstreifen gegen die Bodenplatte gepresst.

Die Funkenstrecke besteht aus zwei flachen Metallstreifen, die an den gegenüberliegenden Enden halbrund gefeilt werden. Eine Elektrode wird mit dem unteren Kondensatorbelag verschraubt, die andere mit einer Kunststoffplatte auf den linken oberen Belag gepresst. Diese Kunststoffplatte, welche die Funkenstrecke abdeckt, dämpft auch das laute Entladungsgeräusch.

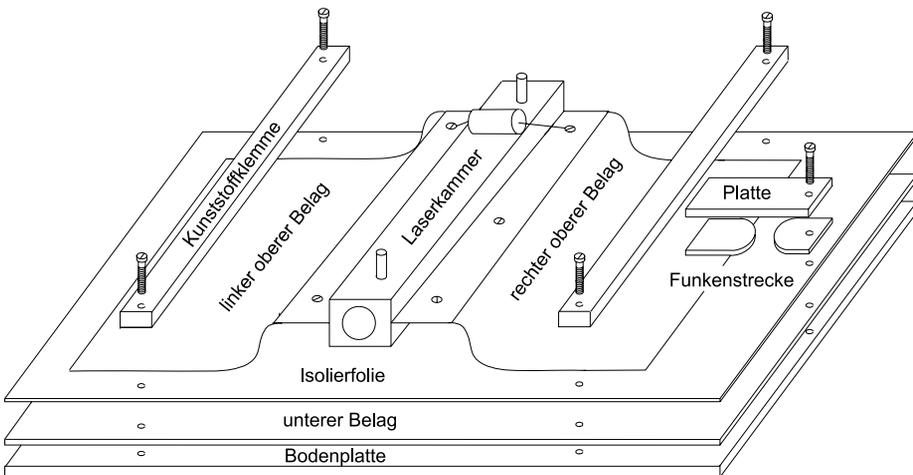


Abb. 5.20: Der Aufbau mit Bandleitungen

Der provisorische Aufbau verwendet eine große Aluplatte als Bodenplatte, eine Polyimidfolie zur Isolation und Kupferfolie für die oberen Beläge. Die Kunststofffolie hat eine Dicke von 0,25 mm und das Kupferblech ist ebenfalls 0,25 mm dick. Da an den Belägen keine Lötverbindung vorkommen darf, kann man statt der Kupferfolie auch billigere Alufolie verwenden. Die beiden oberen Beläge sind  $240 \times 290$  mm bzw.  $200 \times 290$  mm und haben eine Kapazität von 7 nF und 6 nF. Bei einem Abstand der Funkenstreckenelektroden von 4 mm beträgt die Durchschlagspannung 11 kV. Schon bei dieser vergleichsweise kleinen Spannung arbeitet der Laser mit Luft bei einem Druck von 50 mBar.

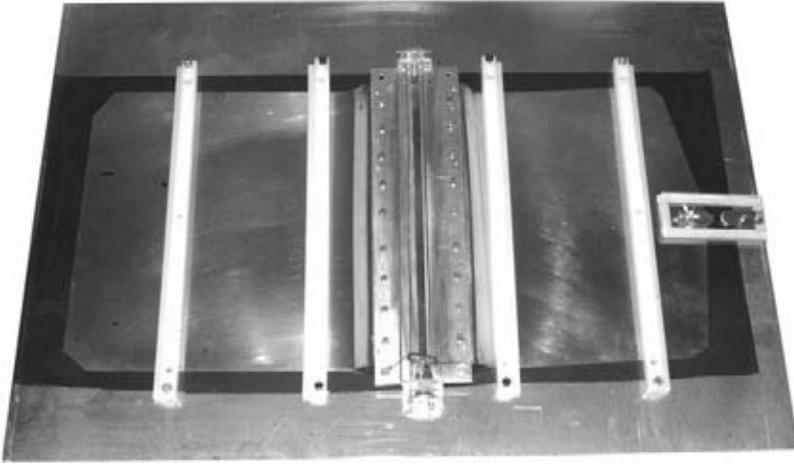


Abb. 5.21: Provisorischer Aufbau der Bandleitungen

Dabei fällt auf, dass die Entladung wesentlich homogener ausfällt, als bei den bisher beschriebenen Stickstofflasern mit diskreten Kondensatoren. Der Grund dafür und für die kleinere Schwellenspannung ist im deutlich schnelleren Strompuls der Bandleitungen mit ihrer geringen Eigeninduktivität zu suchen. Der Nachteil des Lasers ist die große Fläche, die er einnimmt. Durch diese große freiliegende Fläche werden auch starke elektromagnetische Störungen abgestrahlt, die elektrooptische Messungen fast unmöglich machen.



Abb. 5.22: Betrieb des Bandleitungslasers

### 5.1.4 Laser mit aufgerollten Bandleitungen

Eine Möglichkeit, den Laser mit Bandleitungen kompakter zu gestalten, besteht darin, die Bandleitungen zu einer Walze aufzurollen. Dieser Aufbau wurde zum ersten Mal von A. J. Schwab<sup>(3)</sup> beschrieben.

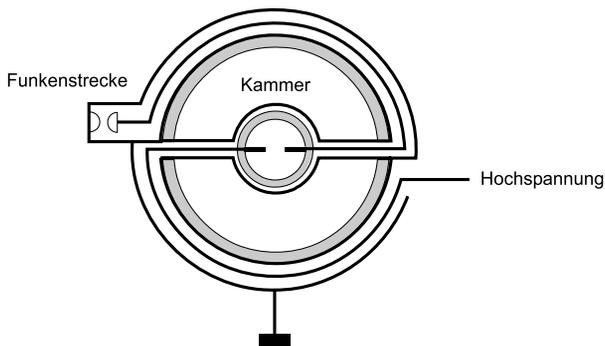


Abb. 5.23: Aufbau des walzenförmigen Lasers

Für diesen Aufbau wird eine röhrenförmige Laserkammer gebaut, die besser in die zylinderförmige Geometrie passt. Der Körper der Laserkammer besteht aus einem Plexiglasrohr mit 30 mm Durchmesser, 3 mm Wandstärke und 50 cm Länge. Die 30 cm langen Elektroden aus Flachmessing ( $5 \times 2$  mm) und Vierkantmessing ( $5 \times 5$  mm) werden auf Durchführungen aus M3-Messingschrauben gelötet, die durch entsprechende Löcher im Plexiglasrohr nach außen geführt sind. Zur Abdichtung der Löcher und Befestigung der Schrauben wird UHU Plus verwendet.

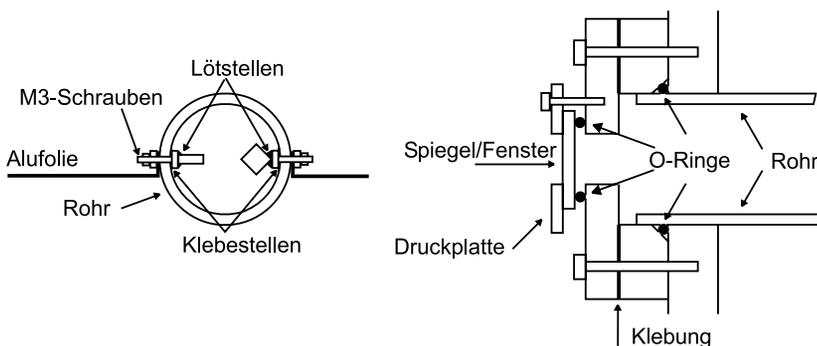


Abb. 5.24: Detail des Rohres und der Spiegelhalterung

Das Laserrohr wird zwischen zwei Plexiglasplatten befestigt. Auf diese Endplatten werden die Spiegelhalter aufgeschraubt. Zwischen Spiegelhalter und Endplatten gepresste O-Ringe dichten das Laserrohr ab. Auf die Spiegelhalter wird unter Zwischenlage von weiteren

O-Ringen das Fenster/der Spiegel mit Druckplatten gepresst. Mit drei Schrauben sind Spiegel und Fenster in ihrer Neigung justierbar. Zwei Röhrchen, die seitlich in die Spiegelhalter geklebt werden, dienen zur Gaszuführung uals Saugstutzen. Die Beläge der Bandleitung sind aus 0,1 mm starker Alufolie, für die dazwischen liegende Isolation werden fünf Lagen Bucheinbandfolie verwendet. Die innen liegenden Beläge werden an die Elektroden des Laserrohrs geschraubt, die außen liegenden Beläge bilden die Masse. Die Bandleitungen werden entsprechend der Skizze auf das äußere Stützrohr aufgewickelt.

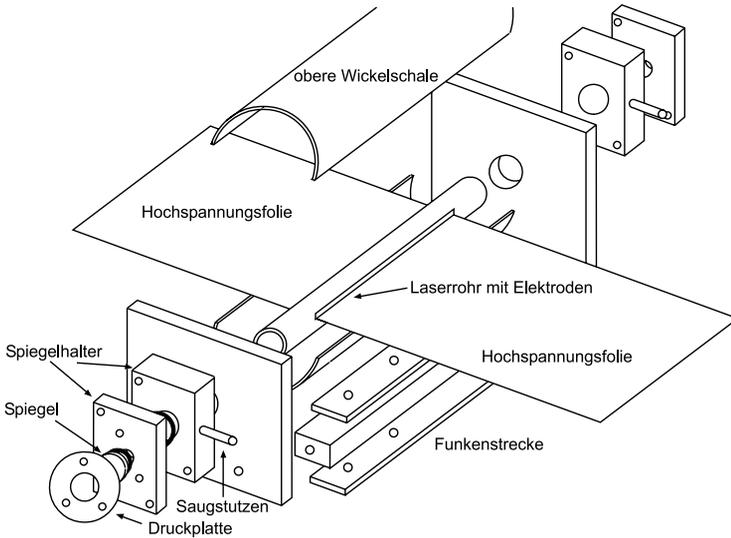


Abb. 5.25: Teile des walzenförmigen Lasers

Das Rohr zum Aufwickeln der Bandleitungen ist ein 125 mm PVC-Abwasserrohr, das der Länge nach aufgesägt wurde. Die beiden Bandleitungen sind 30 cm breit und circa 50 cm lang und ihre Kapazität beträgt 12 bzw. 14 nF.

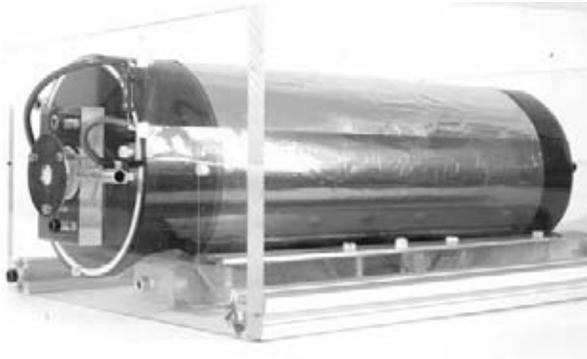


Abb. 5.26: Bild des walzenförmigen Lasers

Das Netzteil verwendet eine einfache Schmitttrigger-Oszillatorschaltung Erzeugung einer in der Pulsdauer einstellbaren Rechteckschwingung. Die Frequenz der Schaltung liegt bei 20 kHz und das Potentiometer P1 gestattet eine Veränderung des Tastverhältnisses zwischen 0 und 50 %. Vier weitere Schmitttrigger treiben die beiden VmosFet-Leistungstransistoren, in deren Drainleitungen die Primärwicklung der Zündspule liegt. 24 V, 50-VA-Trafo liefert nach Gleichrichtung und Glättung die von ca. 30 V.

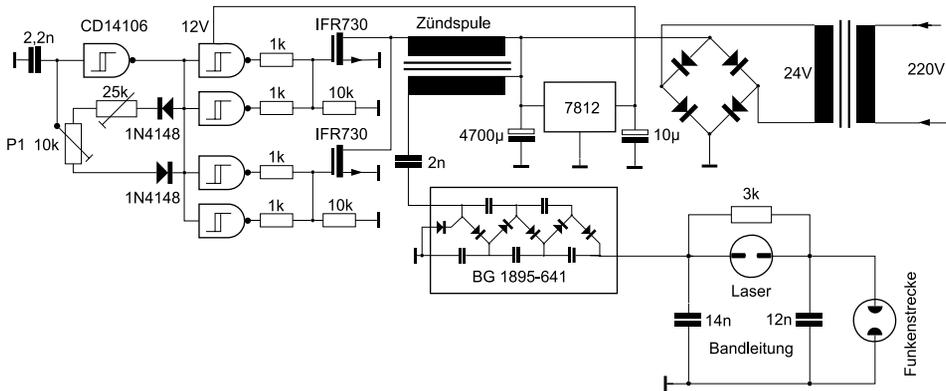


Abb. 5.27: Schaltplan des Netzteils

Ein Spannungsregler versorgt die Vorstufen mit 12 V. Die hochgespannte Wechselspannung an der Sekundärseite der Zündspule wird mit einer TV-Kaskade gleichgerichtet und vervielfacht. Die Ausgangsspannung der Kaskade lädt die Kondensatoren der Bandleitung bis zur Durchbruchspannung der Funkenstrecke. Durch die Zündung der Funkenstrecke wird die Blumleinschwingung erzeugt, die den Laserpuls auslöst. Bei einer Durchbruchspannung der Funkenstrecke von 12 kV kann eine Wiederholrate von 10 Hz erreicht werden.

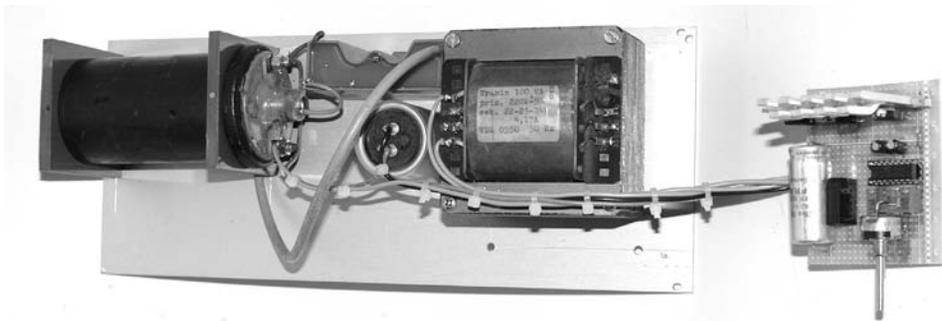


Abb. 5.28: Aufbau des Netzteils

Die Ausgangsenergie des Lasers ist selbst bei Betrieb mit Luft von etwa 80 mbar ausreichend, um eine Rhodamin-6G-Lösung zur Superstrahlung zu pumpen.

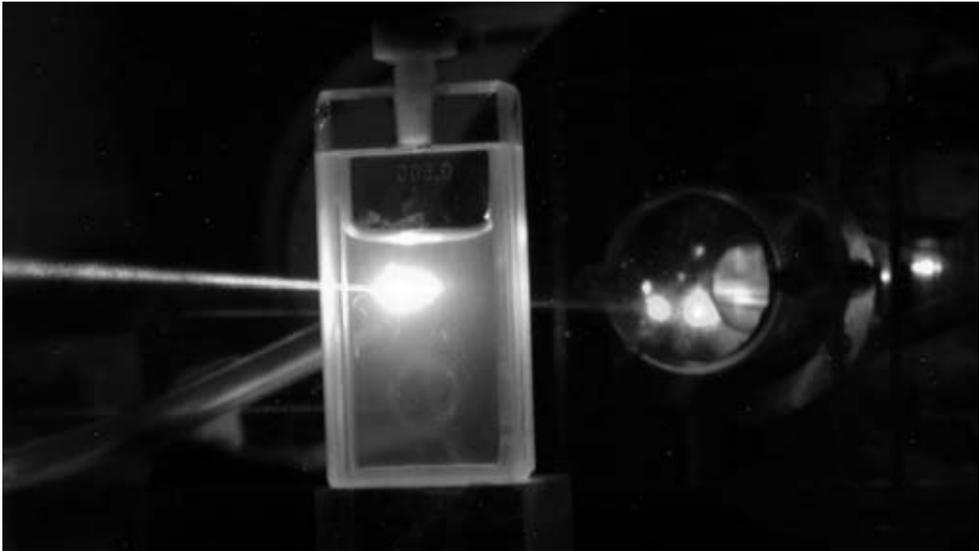


Abb. 5.29: Superstrahlung einer Rhodamin-6G-Lösung

Das Bild (Abb. 5.29) zeigt den mit Rauch sichtbar gemachten Laserstrahl der Farbstoffküvette. Der pumpende UV-Strahl des Stickstofflasers ist für die Kamera unsichtbar.

### 5.1.5 Longitudinaler Stickstofflaser

Ein Stickstofflaser mit longitudinaler Elektrodenanordnung ist noch einfacher zu bauen als der im vorigen Kapitel beschriebene TE-Laser. Allerdings ist zum Betrieb ein niedrigerer Druck, also eine bessere Vakuumpumpe, notwendig. Der Betriebsdruck liegt bei etwa 5 bis 10 mBar. Dieser Druck erfordert eine Rotationspumpe; eine Wasserstrahl-, Kolben- oder Membranpumpe reichen hier nicht mehr aus. Will man aber tiefer in die Laserei einsteigen, wird eine einstufige oder besser zweistufige Rotationspumpe auf jeden Fall erforderlich werden.

Der Laser besteht aus einem Glas- oder Quarzrohr, an dessen Enden die Elektroden angebracht sind. Die Elektroden dienen auch dem Vakuum- und Gasanschluss und tragen die Spiegel bzw. Fenster. Die Elektroden sind aus Kupfer- oder Messingrohr gelötet. Die Abdichtung zum Entladungsrohr besorgt ein Stück Siliconschlauch. Auf die äußeren Enden der Elektroden werden dicke Beilagscheiben zur Befestigung der Spiegel/Fenster aufgelötet. Spiegel und Fenster werden mit weiteren Beilagscheiben unter Zwischenlage von O-Ringen auf die Scheiben gepresst. Die O-Ringe dichten die Entladungsröhre ab und arbeiten auch als Gegenfeder für die erforderliche Justierung des Spiegels. Dazu dienen je drei M3-Schrauben die durch drei um 120° versetzte Bohrungen am Rand der Scheiben gehen. Die auf die Rohre gelöteten Scheiben erhalten M3-Gewinde, die anderen Scheiben 3,2 mm

Durchgangsbohrungen. Mit diesen drei Schrauben werden die Spiegel/Fenster in ihrer Lage justiert und können genau senkrecht zum Entladungsrohr und parallel zueinander eingestellt werden. In beide Elektrodenrohre werden noch Löcher gebohrt und kurze Rohrstücke als Pumpstutzen bzw. Gaszuführung eingelötet.

Äußerst wichtig ist die gute Befestigung der Elektroden auf der optischen Bank, nur so bleibt die Justierung der Spiegel stabil. Zu diesem Zweck werden an die Elektrodenröhrchen Flachmessingstücke gelötet. Mit diesen Halterungen können die Elektroden direkt auf die Kondensatoren bzw. die Funkenstrecke geschraubt werden. Mit diesem Aufbau erhält man die für kurze Pulse notwendigen kleinen Leitungslängen. Für den Betrieb mit Stickstoff sollte das Entladungsrohr nicht zu lange sein, 20 bis 30 cm ergeben eine ausreichende Verstärkung, ohne dass die erforderliche Betriebsspannung zu hohe Werte erreicht. Dieser Aufbau eignet sich bei etwas geänderten Parametern auch für eine Vielzahl anderer Lasersysteme.

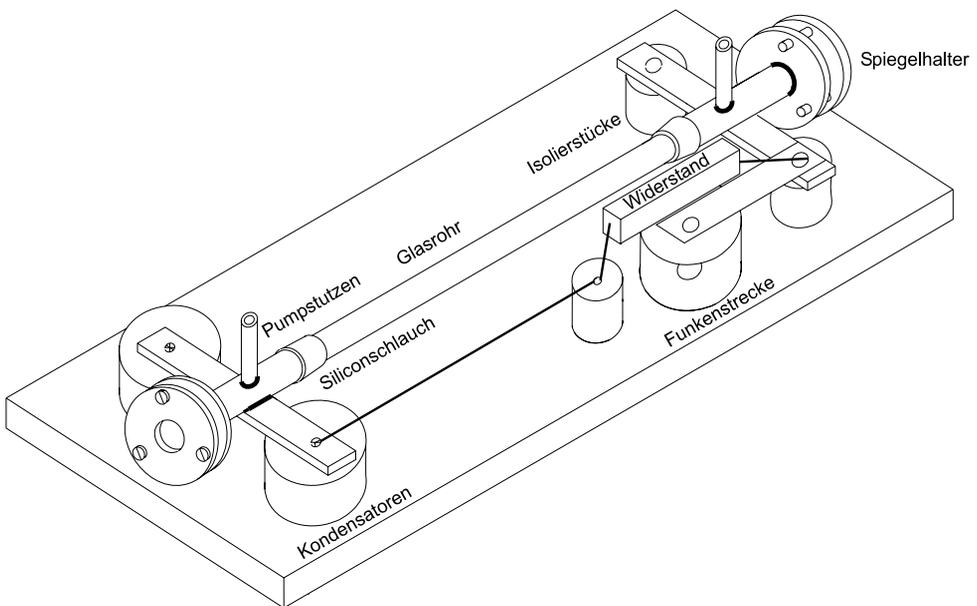


Abb. 5.30: Der longitudinale Stickstofflaser

Der Laser wurde entsprechend der Zeichnung (Abb. 5.30) aufgebaut. Die Grundplatte ist ein massives Alufachmaterial. Genauso gut kann ein stabiles Alu-U-Profil verwendet werden, welches ebenso verwindungssteif, aber viel leichter und billiger ist. Als Energiespeicher dienen zwei der schon bei den vorigen Lasern verwendeten Keramik Kondensatoren mit je 820 pF.

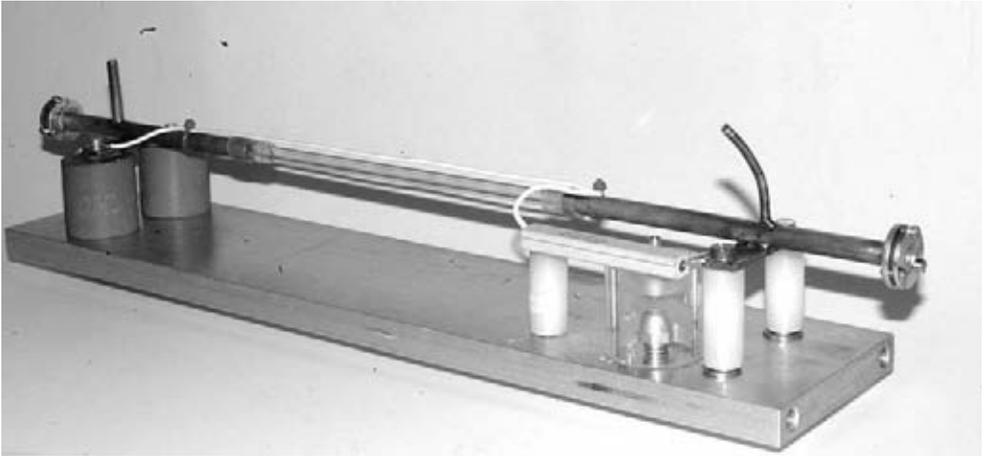


Abb. 5.31: Aufbau des longitudinalen Lasers

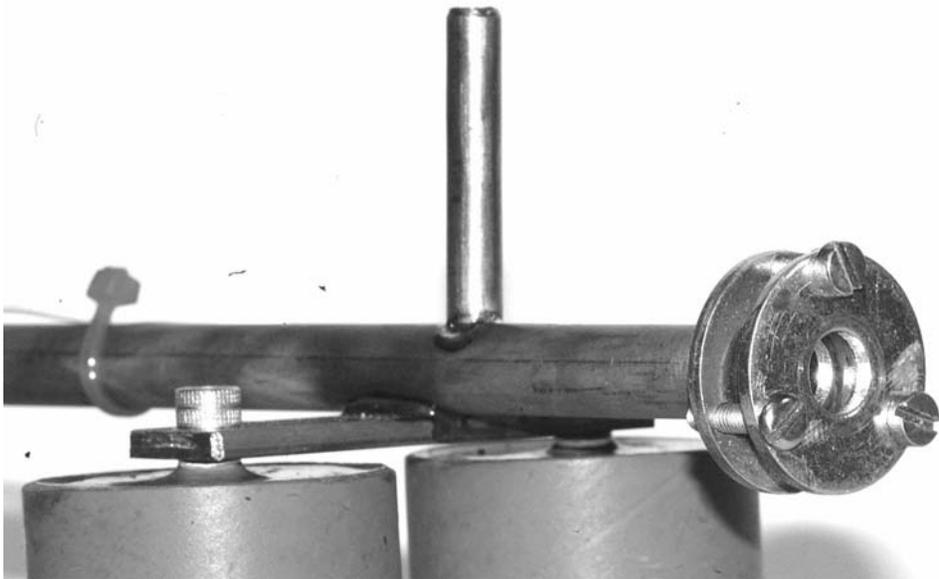


Abb. 5.32: Detailansicht der Spiegelbefestigung

Bei dem hohen Betriebsdruck von einigen Millibar besteht keine Gefahr der Beschädigung des Spiegels durch Ionen aus der Entladung. So können die Spiegel direkt auf den Elektrodenrohren befestigt werden.

Die Funkenstrecke besteht, wie gewohnt, aus einem Plexiglasrohr und zwei M8-Hutmutter. Der Ladewiderstand ist ein gewendelter Drahttyp im Keramikgehäuse und besitzt einen Wert von  $10\text{ k}\Omega$ . Diese Widerstände haben sich schon bei anderen Anwendungen (Marxgenerator) als hochspannungsfest erwiesen und ertragen die  $25\text{-kV}$ -Pulse ohne Ausfälle.

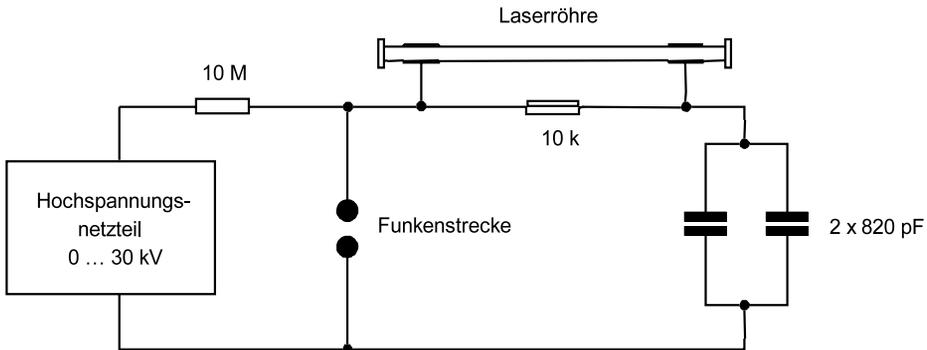


Abb. 5.33: Die elektrische Schaltung des Lasers

Das Entladerohr aus Glas hat einen Innendurchmesser von  $3\text{ mm}$  und ist  $37\text{ cm}$  lang. Den Abschluss bilden ein rundes Glasplättchen als Fenster auf der einen und ein Aluspiegel auf der anderen Seite. Nachdem die Spiegel mit einem HeNe-Laser justiert wurden und das Rohr auf  $5\text{ mBar}$  abgepumpt ist, erhält man bei einer Spannung von  $25\text{ kV}$  ohne weiteres die bekannte Stickstoffemission bei  $337\text{ nm}$ .

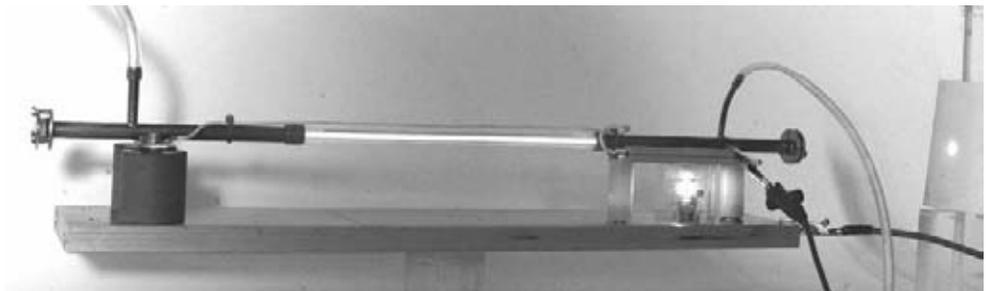


Abb. 5.34: Der Laser in Betrieb, rechts der Spot

### 5.1.6 Longitudinaler N<sub>2</sub>-Laser mit LC-Inversionsschaltung

Auch die longitudinale Elektrodenanordnung kann mit einer LC-Inversionsschaltung arbeiten. Durch eine geschickte Anordnung der Bauteile kann der Laser sogar besonders kompakt aufgebaut sein.

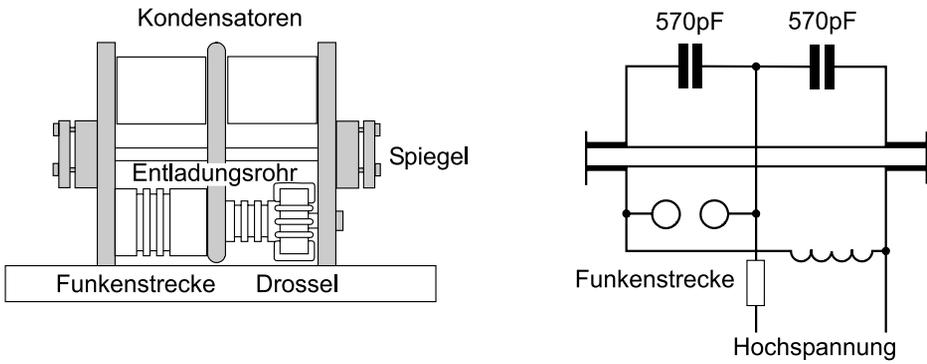


Abb. 5.35: Aufbau des longitudinalen Lasers mit LC-Inversionsschaltung

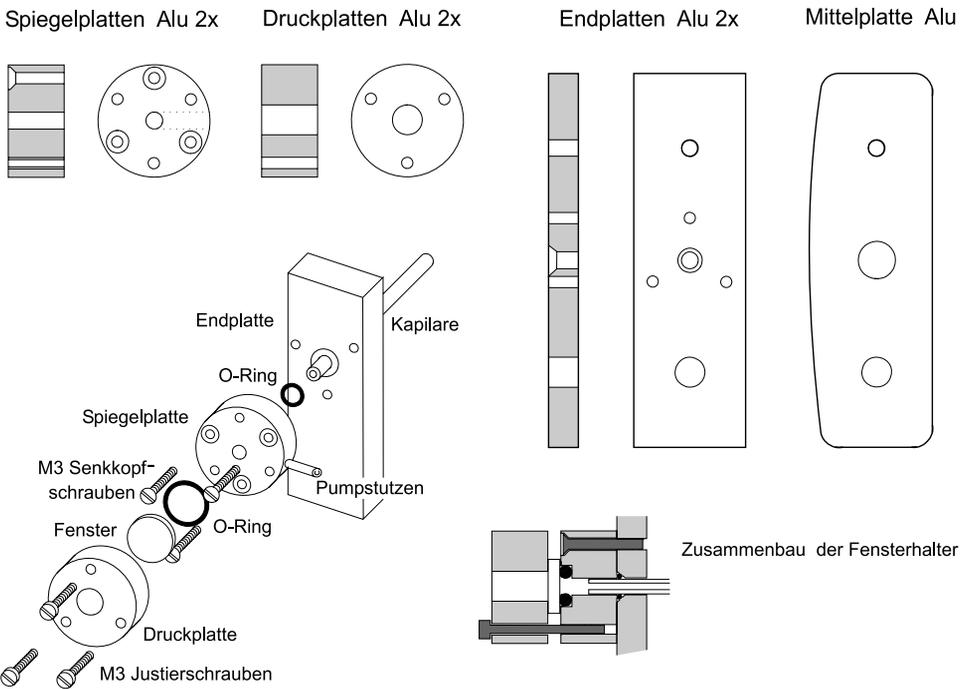


Abb. 5.36: Bestandteile des Lasers

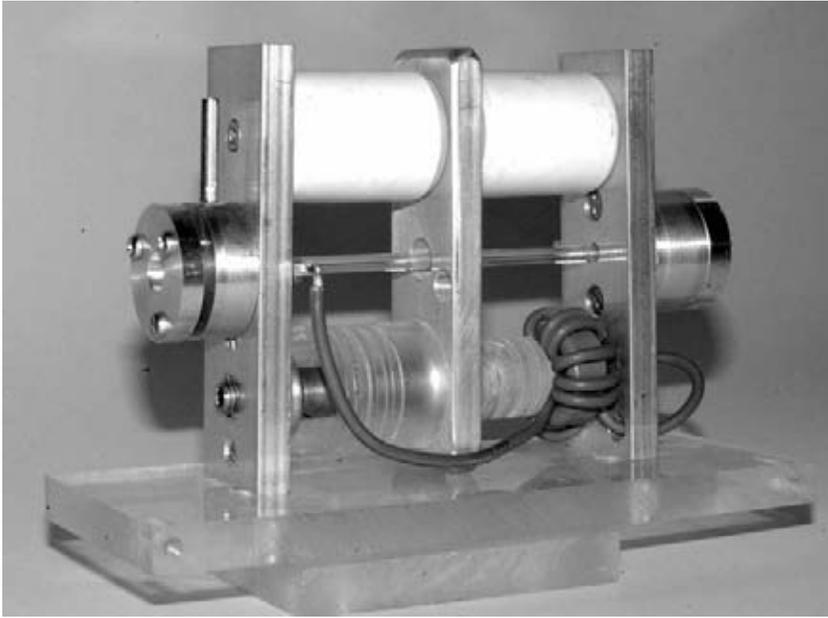


Abb. 5.37: Kleiner N<sub>2</sub>-Laser in longitudinaler Anordnung

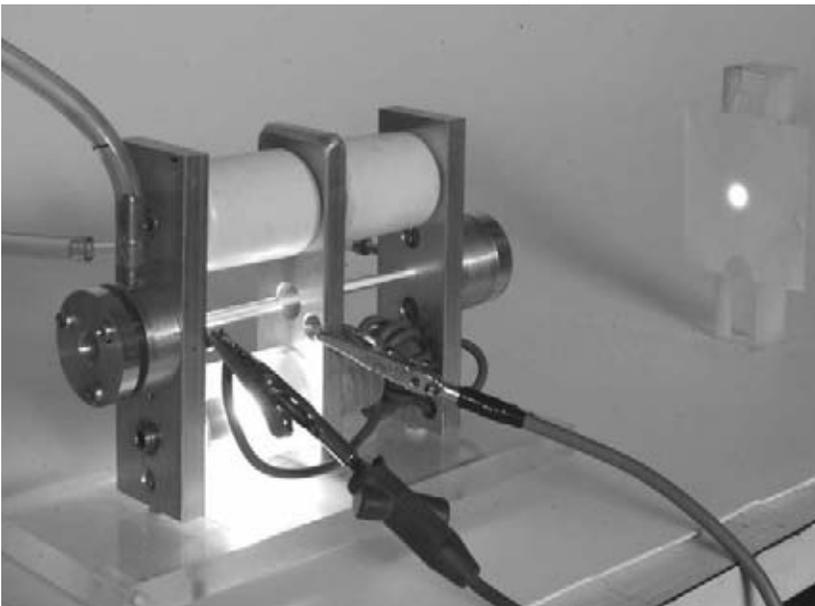


Abb. 5.38: Der kleine Laser in Betrieb

### 5.1.7 Weitere TE-Laser

Es gibt eine Reihe weiterer Lasersysteme, die mit ähnlichen Anregungsbedingungen wie die TE-Stickstofflaser arbeiten.

Neben den eben besprochenen Laserübergängen im neutralen  $N_2$ -Molekül existieren noch laserfähige Übergänge im ionisierten  $N_2^+$ -Molekül. Die hierfür verwendete Gasmischung besteht zur Hauptsache aus Helium, dem einige Promille Stickstoff beigemischt sind. Angeregt wird das Gas in transversalen Entladungen unter hohem Druck bis zu einigen Bar<sup>(4)</sup>. Die Ausstrahlung besteht aus mehreren Linien im UV- und im violetten Bereich mit der Hauptemission bei 428 nm.

Neben vielen weiteren sollen hier noch Excimerlaser, Neonlaser und Wasserstofflaser genannt werden. Die weit verbreiteten Excimerlaser, die in vielen Anwendungen den Stickstofflaser abgelöst haben, arbeiten mit Molekülen, die aus einem Edelgas- und einem Halogenatom bestehen. Diese Moleküle sind nur im angeregten Zustand stabil, im Grundzustand zerfallen sie schnell in ihre Bestandteile. So bieten diese Systeme ideale Voraussetzungen für eine Inversion, da der Grundzustand nur wenig besetzt ist. Die angeregten Moleküle werden aus den Elementen in einer Gasentladung durch Elektronenstoß erzeugt. Verwendet werden alle Kombinationen aus Argon, Krypton, Xenon, Chlor und Fluor. Auch zwei Edelgasatome können zu einem angeregten Excimer zusammenfinden und nach dem Laserübergang wieder in den Grundzustand zerfallen.

Tab.: Verschiedene Excimerlaser

$Ar_2^*$	126 nm	Anregung durch relativistische Elektronen (> 500 keV)
$Kr_2^*$	145 nm	
$Xe_2^*$	172 nm	
$ArCl^*$	170 nm	Anregung in TE-Anordnung
$ArF^*$	193 nm	
$KrCl^*$	222 nm	
$KrF^*$	248 nm	
$XeCl^*$	308 nm	
$XeF^*$	351 nm	

Trotz der hervorragenden Eigenschaften eignen sich Excimerlaser kaum zum Selbstbau, da die Betriebsgase zum Teil teuer und zum Teil sehr aggressiv und hochgiftig sind.

Der Neonlaser<sup>(5)</sup> kann mit den gleichen Aufbauten, die der Stickstofflaser verwendet, betrieben werden. Aber auch das Edelgas Neon ist teuer und die erzielbaren Leistungen sind bei der Emission von 540 nm deutlich kleiner als beim Stickstoff. Eine Laseremission des Wasserstoffmoleküls findet im Lyman-Band bei 160 nm statt. Der Laser arbeitet im so genannten VUV-Bereich (Vakuum Ultraviolett), in dem die Strahlung von den meisten Gasen, auch Luft, absorbiert wird. Mit 0,8 ns ist hier die Lebensdauer des oberen Niveaus extrem kurz und ähnlich wie beim Stickstoff das untere Niveau metastabil, sodass nur mit außerordent-

lich schnellen Pumpimpulsen eine Inversion erzeugt werden kann. Mit entsprechend induktionsarm aufgebauten TEA-Schaltungen können solche Anforderungen erfüllt werden<sup>(6)</sup>. Auch Übergänge im noch kurzwelligeren Werner-Band bei 116 nm können invertiert werden. Allerdings ist das bisher nur mit relativistischen Elektronen und nicht mit elektrischer TE-Anregung gelungen.

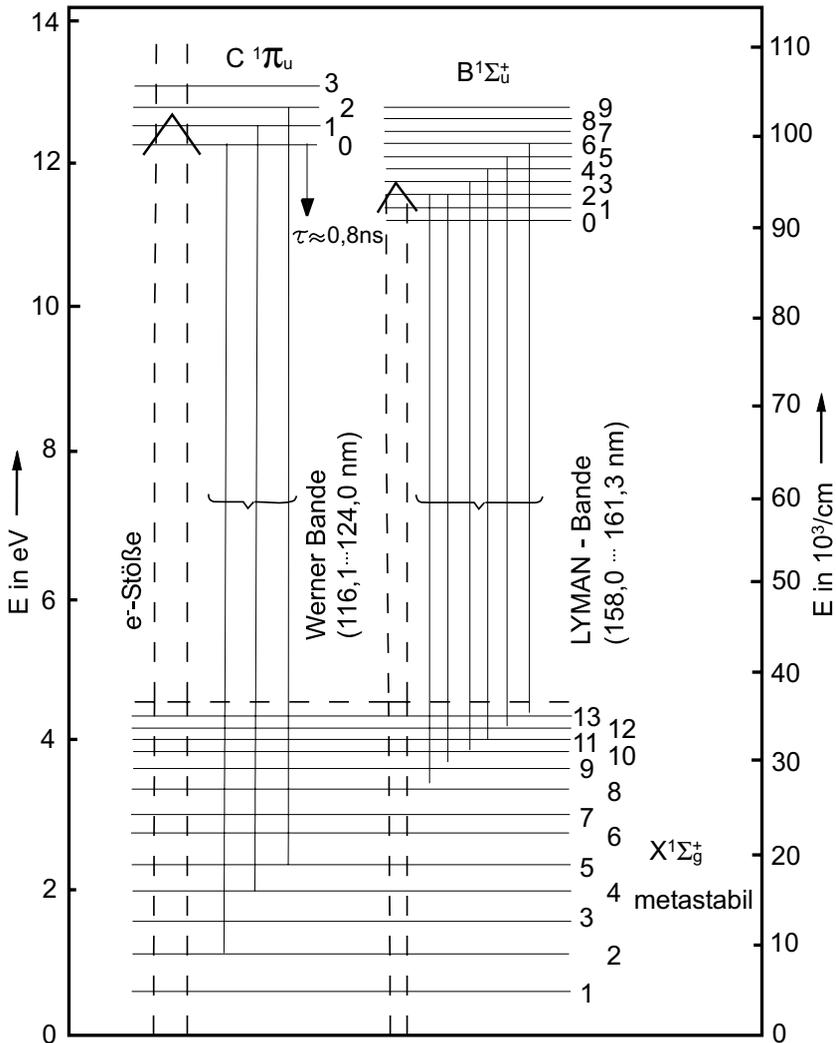


Abb. 5.39: Niveauschema des Wasserstoffmoleküls

# Stichwortverzeichnis

## A

Acetonitril 198  
Afterglow 138  
Alkalihalogenide 104  
Autokollimationsfernrohre 27  
Avalanche-Schaltung 215

## B

Ballongas 41, 137, 257  
Beugungsgitter 130, 216  
Bewegungsmelder 213  
Bleiselenid 212  
Bleisulfid 212  
Blumleinschaltung 65, 77  
Boosterentladung 74  
BPW34 211, 219  
BPX 48 226  
Brewsterfenster 23, 124  
Brewsterwinkel 23, 127

## C

CCD-Zeilensensoren 223  
Closecoupled 26

## D

Dämpfung 72  
Delphi 228, 263  
Dichroitische Filter 21  
Dielektrische Spiegelschichten 21  
Digitalkamera 135, 192  
Doorknop 85, 118  
Drucksensor 35

## E

Einmachglas 44  
Elliptische Pumpkammer 171, 12  
Elliptische Pumpkammer 26  
Energieniveau 11  
Excimerlaser 102

## F

Faxpapier 108  
Feldstörungstyp 58, 173  
Fotodiodenzeile 223  
FR4 78, 91

## G

Gasdynamische Laser 15  
Germanium 23, 107, 242, 252  
Golayzelle 199  
Golddampfaser 147  
Gunndiode 201

## H

Halogenlampe 21, 38, 63, 226  
HCN 197, 238  
Heißeleiter 207  
Heizer 134  
Hohlkathoden 154  
Hohlleiter 201  
Hutmutter 55

## I

IC-Schaltung (interacting circuit) 138  
Ignitrons 71  
Impulstransformator 50, 66  
Infrarotaufnahmen 135  
Interferenzfilter 220, 227  
Inversion 11  
Ionisationsmanometer 36

## K

Kalorimetrische Messung 207  
Kaltkathodenmanometer 36  
Kantenfilter 222  
Kanthal 140, 239  
Kapton 90, 242  
Kfz-Zündspule 50  
Klystron 197  
Knudsenzahl 42

Kohlegrieß 143  
Kohlestäbe 143  
konfokale 13  
Kreispumpe 176  
Kryptocyanin 190, 245  
Kryptonbogenlampe 62  
KTP (Kaliumtitanatphosphat) 193  
Küvette 23, 159

**L**

Ladedrossel 81, 150  
Ladungstransferschaltung 89  
Langpassfilter 222  
Lasersonator 13  
Lawineneffekt 215  
LC-Inversionsschaltung 65  
LED 218  
Leitwert 42  
Liebigkühler 106  
Lochkopplung 104, 118  
Löschfunkenstrecke 57, 148  
Luftballon 42, 188

**M**

Malachitgrün 190, 245  
Marxgenerator 67  
Membranpumpe 32  
Mikrowellengenerator 197  
MOT (microwave oven transformer) 52

**N**

Nadelventile 39  
Naphtolgrün 190, 245  
Neontransformatoren 49  
Netztrenntrafo 51

**O**

Oberflächengleitentladung 113  
Oberflächenspiegel 19, 87  
OBIT (oil burner ignition transformer) 52

**P**

Peaking-Kondensator 67  
Pincheffekt 205  
Prisma 217  
Pulsaserdiode 215

Pumpdiode 195  
Pyroelektrischer Detektor 213

**R**

Rasierklinge 188, 14  
Reflektionskoeffizient 19, 241  
Resonanzladung 68  
Rhodamin 6G 159, 244, 11

**S**

Schlauchklemme 39  
Schlierenbildung 164  
Schottkydiode 202  
Seilzuggetriebe 223  
Simmerbetrieb 71  
Sputtertarget 45  
Strahlaufweitung 28  
Superstrahler 14, 27  
Swagelock 41

**T**

Teleskop 28  
Thermoelement 213  
Triacs 51  
Trigatron 58  
Triggerdraht 69, 131  
Turbopumpe 46

**V**

Videodetektor 202  
Vorionisation 77

**W**

Wanderwellenerregung 67  
Wasserkondensator 205  
Wasserstofflaser 102, 204  
Wasserstrahlpumpe 33  
Weißlichtinterferenzspiegel 229  
Weißmacher 88  
Wendellampen 25

**Y**

Ytong 134

**Z**

Zylinderlinse 160