

Ein CO₂-Gas-Laser zur kontinuierlichen
Heizung der Plasmaquelle
in den "Wendelstein"-Stellaratoren

M. Lipa

IPP 2/73 November 1968

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

IPP 2/73

M. Lipa

A CO₂-Gas Laser for Continuous Heating of the Plasma Source in the "Wendelstein"-Stellarators

Ein CO₂-Gas-Laser zur kontinuierlichen Heizung der Plasmaquelle in den "Wendelstein"-Stellaratoren

M. Lipa

Abstract

A CO₂-Gas Laser IPP 2/73 radiates November 1968 in the wavelength region around 10,6 μm, has been built. This light power is high enough to heat the plasma source - a tantalum sphere of 3 mm diameter - up to an equilibrium temperature of 2600 °K.

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

Einleitung

IPP 2/73

M.Lipa

A CO₂-Gas Laser for Continuous Heating of the Plasma Source in the "Wendelstein"-Stellarators (in German)

November 1968

Abstract

A CO₂-Gas Laser which radiates about 150 Watts in the wavelength region around 10,6 μm, has been built. This light power is high enough to heat the plasma source - a tantalum sphere of 3 mm diameter - up to an equilibrium temperature of 2600 °K. Nicht-Konstanz der Kugeltemperatur als nachteilig. Weiterhin war durch Verfeinerung der experimentellen Technik eine Verlängerung der Teilchenlebensdauer in den Sekundenbereich zu erwarten. Somit erwies sich ein stationärer Betrieb des Experimentes und damit eine kontinuierliche Heizung als unumgänglich. Zu diesem Zweck wurde vorgeschlagen, die Kugel durch Bestrahlung von Licht auf die gewünschte Temperatur zu heizen [2]. Dazu sollte der Strahl eines CO₂-Gas-Lasers geeigneter Leistung auf die Kugel fokussiert werden. Es war daran gedacht, die vergleichsweise geringe Absorption der langwelligeren Ultrarot-Strahlung des CO₂-Lasers (Wellenlänge 10,6 μm) auf der metallischen Oberfläche der Kugel durch eine entsprechende Erhöhung der primären Lichtleistung zu kompensieren. Dazu sollte es genügen, das zylindrische Resonatorvolumen des Lasers entsprechend zu verlängern. In der Literatur werden Werte von 60-80 Watt Lichtleistung pro Meter Resonatorlänge angegeben [3].

Die zur Heizung der Kugel erforderliche Leistung berechnet sich aus der bei der Kugeltemperatur T abgestrahlten Leistung L:

$$L = 0,5 \cdot \sigma \cdot T^4$$

Einleitung

Experimentelle Untersuchungen über die mittlere Teilchenlebensdauer von thermischen Cäsium-Plasmen im toroidalen Magnetfeld des Stellarators "Wendelstein Ib" ließen den Schluß zu, daß unter bestimmten Versuchsbedingungen der Teilchenfluß quer zum Magnetfeld in der gleichen Größenordnung lag, wie man aufgrund resistiver Diffusion in einem Stellaratorfeld erwarten würde [1]. Bei diesen Experimenten wurde das Plasma erzeugt durch Kontaktionisation von Cs-Atomen auf der Oberfläche einer heißen Tantal-kugel, die im Magnetfeld aufgehängt war. Die Heizung der Kugel erfolgte durch Beschuß energiereicher Elektronen. Während der Einschaltdauer des Magnetfeldes (ca. 1 sec) war der Elektronenstrahl unterbrochen und die Temperatur der Kugel sank nach Maßgabe ihrer Wärmekapazität.

Für die Interpretation der Experimente erwies sich die Nicht-Konstanz der Kugeltemperatur als nachteilig. Weiterhin war durch Verfeinerung der experimentellen Technik eine Verlängerung der Teilchenlebensdauer in den Sekundenbereich zu erwarten. Somit erwies sich ein stationärer Betrieb des Experimentes und damit eine kontinuierliche Heizung als unumgänglich. Zu diesem Zweck wurde vorgeschlagen, die Kugel durch Bestrahlung von Licht auf die gewünschte Temperatur zu heizen [2]. Dazu sollte der Strahl eines CO₂-Gas-Lasers geeigneter Leistung auf die Kugel fokussiert werden. Es war daran gedacht, die vergleichsweise geringe Absorption der langwelligen Ultrarot-Strahlung des CO₂-Lasers (Wellenlänge 10,6 µm) auf der metallischen Oberfläche der Kugel durch eine entsprechende Erhöhung der primären Lichtleistung zu kompensieren. Dazu sollte es genügen, das zylindrische Resonatorvolumen des Lasers entsprechend zu verlängern. In der Literatur werden Werte von 60-80 Watt Lichtleistung pro Meter Resonatorlänge angegeben [3].

Die zur Heizung der Kugel erforderliche Leistung berechnet sich aus der bei der Kugeltemperatur T abgestrahlten Leistung L:

$$L = 0 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Dabei ist O die Oberfläche der Kugel

$$\sigma = 5,75 \cdot 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ Grad}^{-4}$$

ϵ = totale Emissivität der Kugel bei der Temperatur T [4].

Damit läßt sich die gesamte Wärmestrahlung einer Tantalkugel von 3 mm Durchmesser bei verschiedenen Temperaturen T berechnen.

$T = 2000$ °K	$\epsilon = 0,20$	$L = 5,2$ W
2300 °K	$0,24$	$10,9$ W
2600 °K	$0,28$	$20,8$ W

Diese Strahlungsleistung muß der Kugel in Form von Strahlung des CO_2 -Lasers bei der Wellenlänge $10,6 \mu\text{m}$ zugeführt werden. Bei einmaligem Auftreffen des Laserstrahls wird von der Kugel der Bruchteil A der auffallenden Laserleistung absorbiert. Zahlenwerte für A lassen sich aus Literaturangaben für kürzere Wellenlängen [4] extrapolieren und betragen etwa $0,18$ bei 2400 °K. Demnach müßte bei einmaligem Auffall die Laserleistung zwischen 29 und 116 W betragen, um die oben angegebenen Temperaturen zu erreichen. Gelingt durch geeignete Maßnahmen eine mehrmalige Reflexion des Laserlichtes auf der Oberfläche des Tantalkörpers, so erhöht sich der effektive Absorptionskoeffizient und die erforderliche Strahlungsleistung des einfallenden Laserlichtes kann entsprechend kleiner sein.

Wirkungsweise des CO_2 -Lasers

Im CO_2 -Laser werden die optischen Übergänge zwischen zwei Vibrations-Rotations-Zuständen im Grundzustand des CO_2 -Moleküls ausgenutzt. Die Anregung der CO_2 -Moleküle in das obere Laserniveau erfolgt durch Stöße mit den energiereichen Elektronen einer Gasentladung. Ein Zusatz von Stickstoff erhöht die selektive Besetzung des oberen Laserniveaus, da die Energieniveaus der Schwingungszustände des Stickstoff-Moleküls etwa gleichweit voneinander entfernt sind wie die des Kohlendioxid-Moleküls, so daß ein sehr intensiver Austausch von Schwingungsquanten durch Stöße

zwischen den Molekülen beider Gase stattfindet. Ein Zusatz von Helium erhöht die Wahrscheinlichkeit, durch Stöße das untere Laserniveau der CO_2 -Moleküle in den Grundzustand zu entleeren, wonach sie zu einer weiteren Anregung in das obere Laserniveau verfügbar werden.

Wie erwähnt, erfolgt die Anregung in das obere Laserniveau in einer Gasentladung, die als Glimmentladung zwischen zwei ringförmigen Elektroden brennt. Das Resonatorsystem wird von zwei Spiegeln gebildet, die sich an beiden Enden des Entladungsrohres befinden und koaxial mit der Entladungsachse angeordnet sind. Einer der Spiegel ist halbdurchlässig oder durchbohrt, durch ihn wird ein Teil der im Resonatorsystem schwingenden Lichtenergie ausgekoppelt. Aus Gründen der Zweckmäßigkeit wurde bei der im folgenden beschriebenen Anordnung ein durchbohrter Planspiegel verwendet. Der zweite Spiegel ist ein Hohlspiegel, dessen reflektierende Fläche ein Segment einer Kugelfläche ist. Für diese "hemisphärische" Anordnung lassen sich aus der Theorie der Resonatorsysteme unter vereinfachenden Annahmen gewisse Beziehungen zwischen der Länge des Resonatorsystems, dem Krümmungshalbmesser des Hohlspiegels und der räumlichen Verteilung der Lichtenergie im Resonator (charakterisiert durch die "spot-size") herleiten. Dabei ist die Länge des Resonators durch die erforderliche Lichtleistung gegeben. Der Durchmesser der Spiegel (bzw. des Entladungsrohres) soll 2 bis 4mal größer als die "spot-size" sein. Es folgen Werte für den Krümmungsradius des Hohlspiegels, die 2 bis 20fach größer sind als die Länge des Resonators.

Die so berechneten Werte geben einen Begriff von der erforderlichen Größenordnung. Für das unten beschriebene System, dessen Verwendungszweck vorgegeben war, erwies es sich als praktisch, Krümmung des Hohlspiegels und Durchmesser der Auskoppelöffnung zu variieren, bis ein optimaler Heizeffekt erreicht war. Weitere zu variierende Parameter waren Gasdruck und -zusammensetzung, welche auch die Eigenschaften der Gasentladung bestimmen sowie die Durchflußgeschwindigkeit des Gasgemisches.

Konstruktion und Aufbau

Das Entladungsgefäß des Lasers besteht aus einem 2500 mm langem Duran-Glasrohr mit einer lichten Weite von 64 mm. Der dazu konzentrische Kühlmantel, ebenfalls Duran-Glas, mit einem inneren Durchmesser von 80 mm ist an den Enden mit dem Entladungsgefäß verschmolzen. Über einen angeglasten Vacon-Zylinder mit angeschweißtem Kompensations-Metallbalg ist der kompakte Glaskörper spannungsfrei zwischen zwei V2A-Flansche aufgehängt.

Die Glimmentladung brennt zwischen zwei Wolfram-Ringelektroden (54 mm Durchmesser und 10 mm Breite), die von drei Wolfram-Stützen (2 mm Durchmesser) gehalten werden. Letztere sind ihrerseits isoliert in den Vacon-Zylindern geschmolzen. Die Ringelektroden befinden sich etwa 20 mm innerhalb der Endanglasung, so daß der thermisch belastete Glaskörper an dieser Stelle noch von dem Kühlmittel (Wasser) überdeckt wird.

Der Resonator-Hohlraum wird von einer hemisphärischen Anordnung, mit einem Spiegelabstand von rund 3000 mm gebildet. Die beiden vergoldeten Metallspiegel - ein Hohlspiegel, Material 90 MnV8 mit $f = 10\ 000$ mm, und ein Planspiegel, Material V2A mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Auskoppelbohrung von 10 mm, sind auswechselbar in V2A-Flansche gehalten und als ganzes kardanisch gelagert. Die Justierung der Spiegel erfolgt über je zwei Feingewindeschrauben (x-y-Achse), die während einer Umdrehung ein Schwenken der Spiegel um $\delta = 25^\circ$ erlauben. Die Spiegel sind innerhalb des Entladungsraumes angebracht, um eine vollständige Kompaktheit des Lasers zu gewährleisten und eventuellen technischen Schwierigkeiten mit "Brewster-Fenstern" aus dem Wege zu gehen.

Der Laserstrahl ($\lambda = 10,6\ \mu\text{m}$) tritt durch ein NaCl-Fenster aus, das wahlweise auch durch geeignete NaCl-Linsen zu ersetzen ist. Die zentrische Gaszuführung erfolgt auf der Seite des Hohlspiegels und erlaubt gleichzeitig über verschiedene seitliche Kanäle eine gewisse Kühlung des Spiegels. Das Gasgemisch wird kontinuierlich über ein T-Stück auf seiten des Planspiegels abgepumpt. Der gesamte Laseraufbau ist stabil in einer Aluminium \perp -Schiene montiert und kann somit ohne Dejustierung transportiert werden.

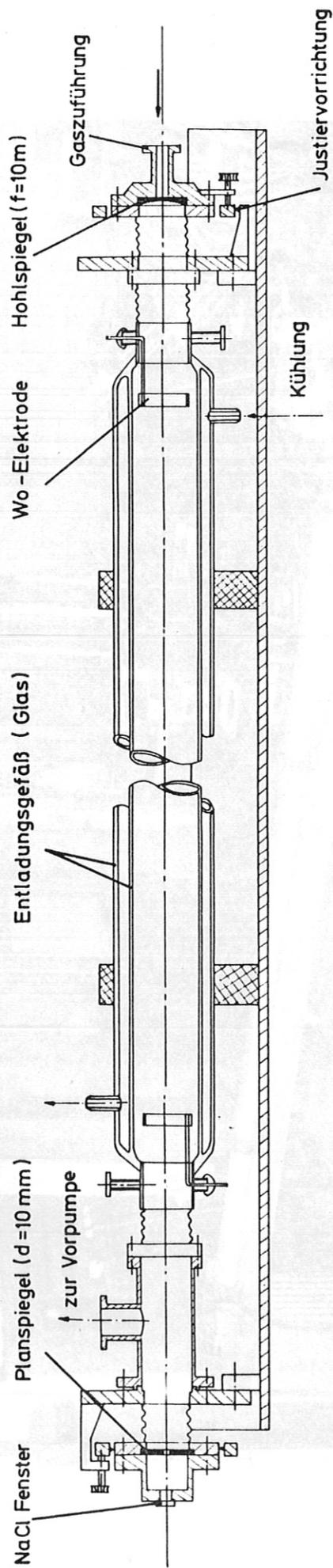


Fig. 1 Schnittzeichnung des CO₂-Lasers.

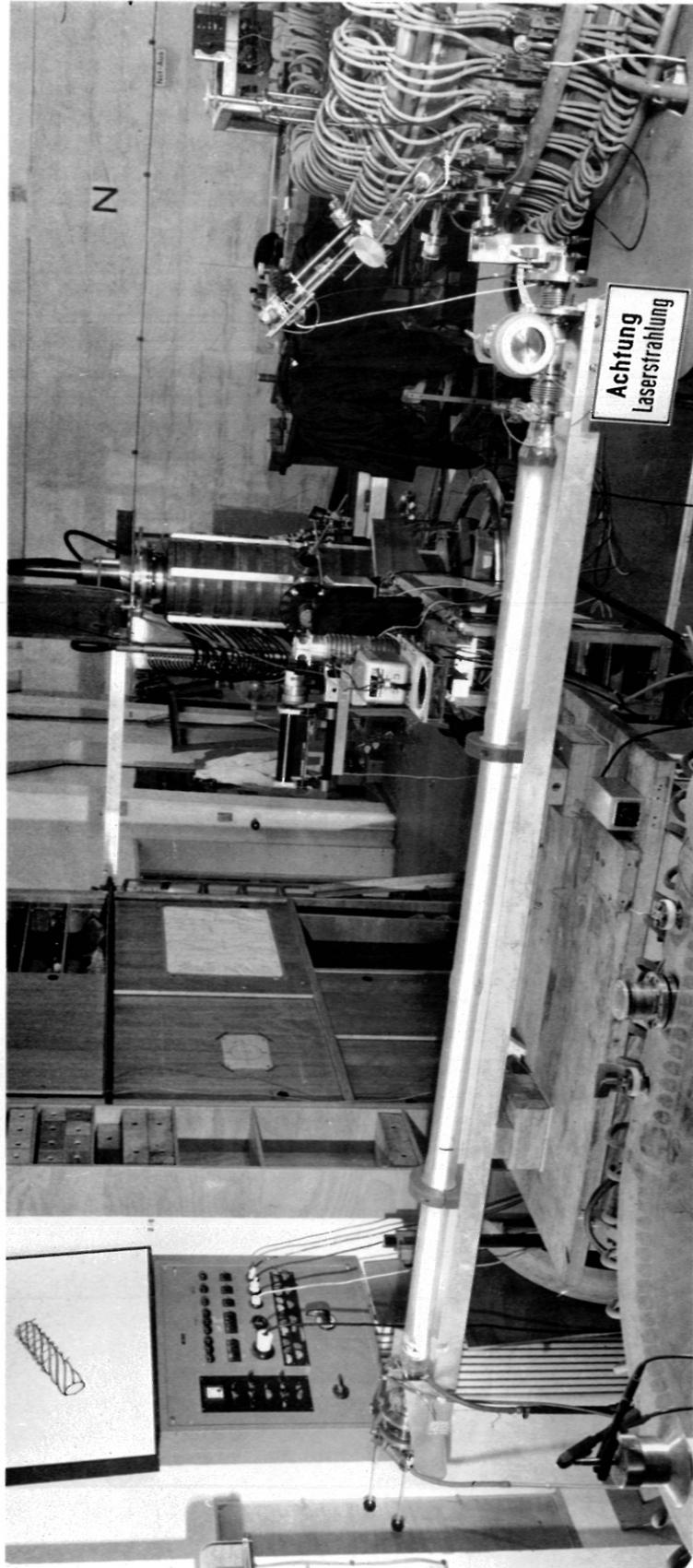


Fig. 2 Improvisierte Aufstellung des CO_2 -Lasers
am Experiment "Wendelstein II".

Elektrische Einrichtung

Die Stromversorgung erfolgt durch ein Netzgerät mit regelbarer Ausgangsspannung. In Serie dazu liegt ein fester Vorwiderstand von 60 k Ω . Dadurch werden Strom und Spannung am Laser auf 7 kV bzw. 250 mA begrenzt. Die Kathode des Lasers wurde geerdet, da sich an diesem Ende des Entladungsrohres die Auskoppelbohrung befand, die später unmittelbar an den Stellarator W II angeflanscht werden sollte. Außerdem war die Planspiegelhalterung mit der Kathode über einen 100-M Ω -Widerstand verbunden um ein Aufladen derselben zu vermeiden. Gasflaschen und Drosselventile liegen ebenfalls auf Erdpotential. Die Anode (auf der Hohlspiegelseite) liegt spannungsmäßig hoch. Eine Drosselstelle in der Gaszuleitung sollte elektrische Durchschläge vermeiden.

Gasversorgung

Die Partialdrücke von Helium, Stickstoff und Kohlendioxid werden separat an Dosierventilen eingestellt. Nach Auffinden der optimalen Zusammensetzung des Gasgemisches ist nur noch das Öffnen der Flaschenhähne erforderlich. Das Gasgemisch wird kontinuierlich über einen NW32-Flansch von einer Vorpumpe D 25 abgesaugt.

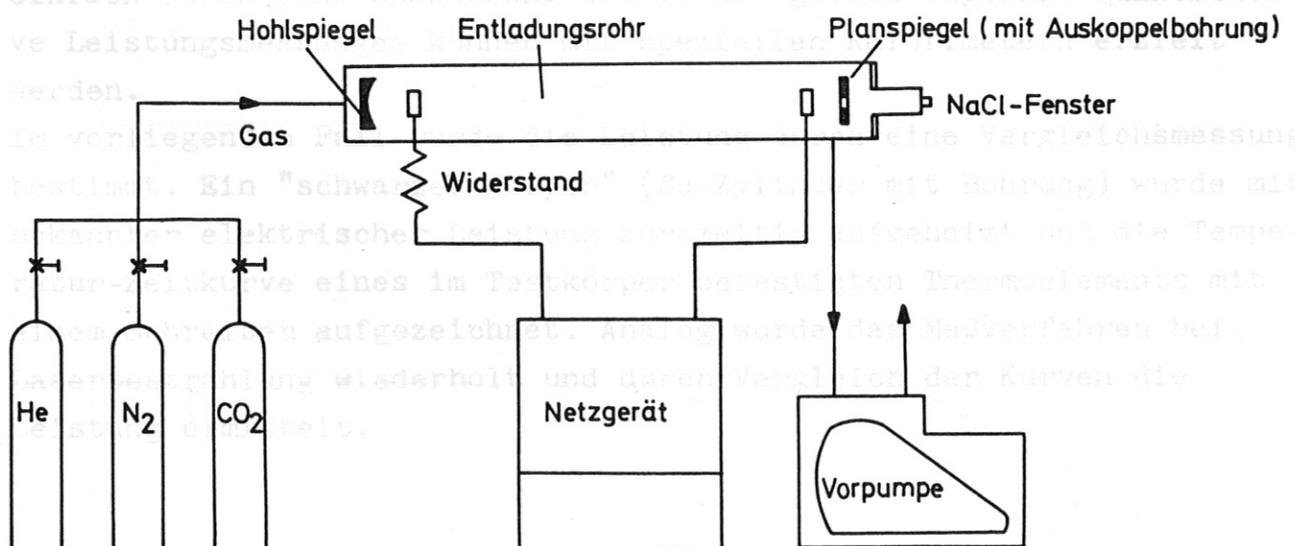


Fig. 3: Prinzipskizze des CO₂-Laser-Systems

Betriebsdaten

Elektrodenspannung U	6 kV
Entladungsstrom I	200 mA
Zündspannung	≈ 10 kV
(bei Gesamtgasdruck von 6 Torr und Elektrodenabstand von 2500 mm)	
Gaszusammensetzung	$p_{\text{He}} = 5 \text{ Torr}$ $p_{\text{N}_2} = 0,8 \text{ Torr}$ $p_{\text{CO}_2} = 0,5 \text{ Torr}$
Gasgeschwindigkeit im Entladungsrohr	$v \approx 6 \text{ m/s}$
Wellenlänge des emittierten Lichtes	10,6 μm
Lichtleistung N	≈ 150 W
Laserstrahldurchmesser	10 mm

Indikationsmethoden

Bei niedriger Laserleistung, z.B. 1 W, kann die ultrarote Laserstrahlung bei Auftreffen auf ein mit UV-Licht (366 nm) bestrahltes Thermo-Graphic-Paper "sichtbar" gemacht werden; dies zeigt sich einfach durch eine Schwärzung des vorher gelben Papiers. Quantitative Leistungsmessungen können mit speziellen Kalorimetern erzielt werden.

Im vorliegenden Fall wurde die Leistung durch eine Vergleichsmessung bestimmt. Ein "schwarzer Körper" (Cu-Zylinder mit Bohrung) wurde mit bekannter elektrischer Leistung kurzzeitig aufgeheizt und die Temperatur-Zeitkurve eines im Testkörper befestigten Thermoelements mit einem Schreiber aufgezeichnet. Analog wurde das Meßverfahren bei Laserbestrahlung wiederholt und durch Vergleich der Kurven die Leistung ermittelt.

Fig. 4 Temperatur-Zeitkurve des Cu-Testkörpers.

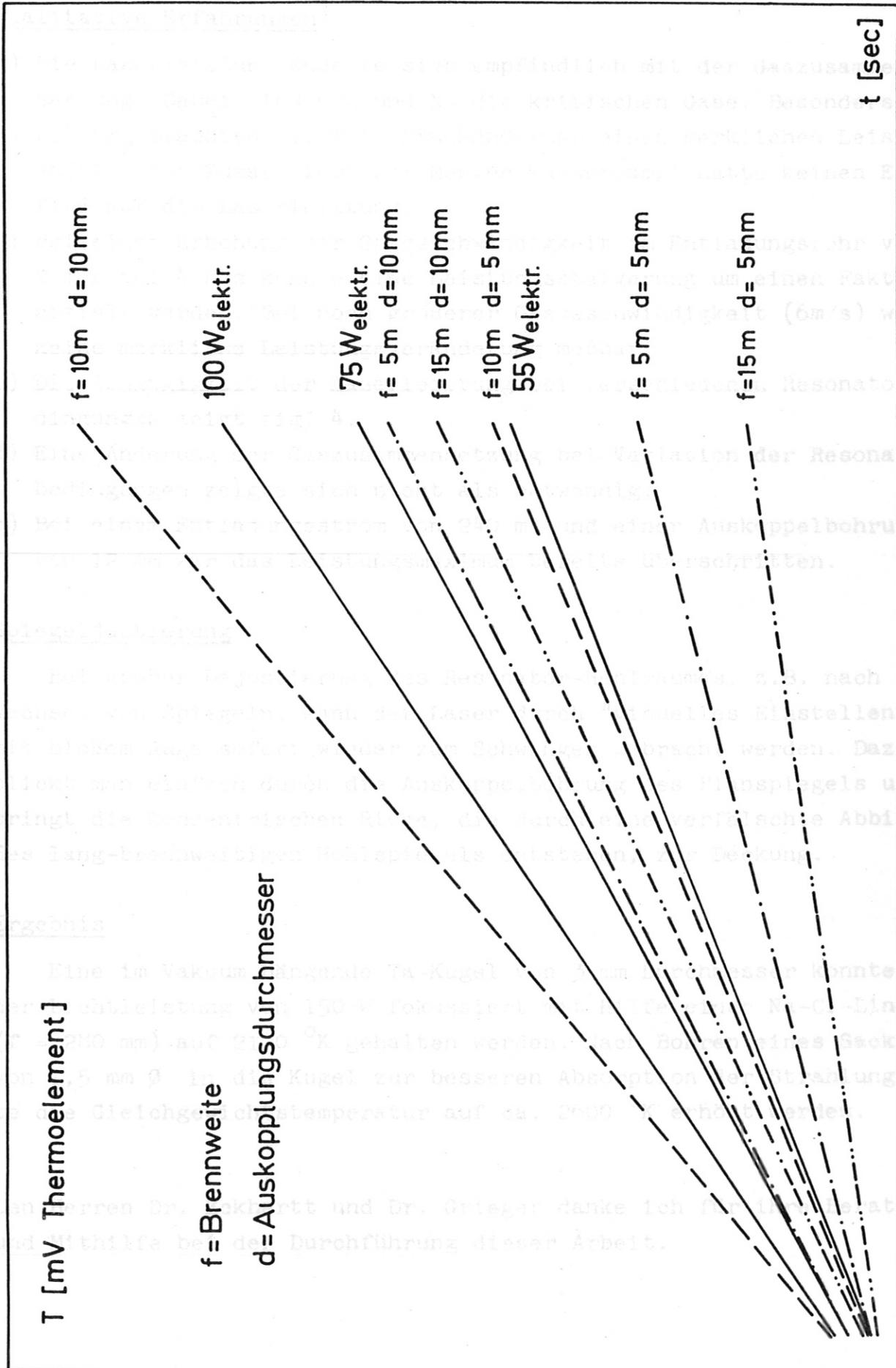


Fig. 4 Temperatur-Zeitkurve des Cu-Testkörpers.

Qualitative Erfahrungen

- a) Die Laserleistung änderte sich empfindlich mit der Gaszusammensetzung. Dabei sind CO_2 und N_2 die kritischen Gase. Besonders bei CO_2 brachten 0,1 Torr Druckänderung einen merklichen Leistungsabfall. Der Zusatz geringer Mengen Wasserdampf hatte keinen Einfluß auf die Laserleistung.
- b) Bei einer Erhöhung der Gasgeschwindigkeit im Entladungsrohr von 2 m/s auf 4 m/s konnte eine Leistungssteigerung um einen Faktor 2 erzielt werden. Bei noch größerer Gasgeschwindigkeit (6m/s) war keine merkliche Leistungsveränderung meßbar.
- c) Die Abhängigkeit der Laserleistung bei verschiedenen Resonatorbedingungen zeigt fig. 4.
- d) Eine Änderung der Gaszusammensetzung bei Variation der Resonatorbedingungen zeigte sich nicht als notwendig.
- e) Bei einem Entladungsstrom von 240 mA und einer Auskoppelbohrung von 12 mm war das Leistungsmaximum bereits überschritten.

Spiegeljustierung

Bei grober Dejustierung des Resonator-Hohlraumes, z.B. nach dem Wechsel von Spiegeln, kann der Laser durch "visuelles Einstellen" mit bloßem Auge sofort wieder zum Schwingen gebracht werden. Dazu blickt man einfach durch die Auskoppelbohrung des Planspiegels und bringt die konzentrischen Ringe, die durch eine verfälschte Abbildung des lang-brennweitigen Hohlspiegels entstehen, zur Deckung.

Ergebnis

Eine im Vakuum hängende Ta-Kugel von 3 mm Durchmesser konnte mit der Lichtleistung von 150 W fokussiert mit Hilfe einer Na-Cl-Linse ($f = 280$ mm) auf 2100°K gehalten werden. Nach Bohren eines Sackloches von 1,5 mm \varnothing in die Kugel zur besseren Absorption der Strahlung, konnte die Gleichgewichtstemperatur auf ca. 2600°K erhöht werden.

Den Herren Dr. Eckhartt und Dr. Grieger danke ich für ihre Beratung und Mithilfe bei der Durchführung dieser Arbeit.

Literaturangaben

- [1] E.Berkl
D.Eckhartt
G.v.Gierke
G.Grieger
Phys.Rev.Letters 17, 906 (1966)
- [2] Jahresbericht 1967 Institut für
Plasmaphysik, Garching, S. 30
- [3] D.R.Whitehouse
Microwaves - Laser-Technology
Section, July 1967
- [4] Temperature. Its Measurement and
Control in Science and Industry.
Vol. 3, part 2, p. 519.
Reinhold Publ. Corp., New York 1962