

Ein Fokusedetektor als Hilfsmittel bei
der Fokussierung eines Lasers auf ein
Target

Focusdetector as an Aid for Focusing a
Laser on a Target

K. Büchl

3/82

Dezember 1968

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

IPP 3/82 - K. Büchl

Focusdetector as an Aid

GARCHING BEI MÜNCHEN

ing a Laser on

a Target

December 1968 (in German)

Ein Fokusdetektor als Hilfsmittel bei
der Fokussierung eines Lasers auf ein
Target

Focusdetector as an Aid for Focusing a
Laser on a Target

Abstract

K. Büchl

3/82

Dezember 1968

An apparatus is described which assesses the focus of a laser on a surface. An image of the focus is scanned by fiber optics. A moving slit together with a photodetector behind the fibers detects, whether a fiber is illuminated or not. When the focus coincides with the surface of the target, the number of illuminated fibers is a minimum. The apparatus is especially advantageous for adjustment when the radiation is not visible, for example, with neodymium lasers or with frequency doubled radiation from ruby lasers.

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.

Dezember 1968 (in German)

Abstract

An apparatus is described which assesses the focus of a laser on a surface. An image of the focus is scanned by fiber optics. A moving slit together with a photodetector behind the fibers detects, whether a fiber is illuminated or not. When the focus coincides with the surface of the target, the number of illuminated fibers is a minimum. The apparatus is especially advantageous for adjustment when the radiation is not visible, for example, with neodymium lasers or with frequency doubled radiation from ruby lasers.

verschiedene Winkeldivergenzen des Laserstrahles bei gleicher Linse die Verschiebung der MFD-Ebene demonstriert. Die Justierung ist also von Laserstrahl selber und von der Fokussierungslinse abhängig. Da Hochleistungslaser nur während Bruchteilen von Mikrosekunden emittieren, ist es notwendig, den Laserstrahl zu simulieren. Die Einstellung der MFD-Ebene kann oft durch direkte Beobachtung des Simulationsstrahles mit dem Auge erfolgen. Es ist aber wesentlich angenehmer, eine objektive fotoelektrische Methode zu benutzen. Eine solche Methode wird zur Notwendigkeit, wenn man nicht im sichtbaren Spektralbereich, also z. B. mit dem im Infrarot emittierenden Neodymlaser (1,05 μ) oder mit Frequenzverdopplung beim Rubinlaser (0,347 μ) arbeitet.

Fokussiert man einen Laserstrahl genügend hoher Leistung mit einer Linse auf ein Target, dann entsteht im Brennpunkt ein Plasma, dessen Temperatur und Masse von der auf der Oberfläche des Targets vorhandenen Energiestromdichte abhängt. In den meisten Fällen wird man versuchen, die Targetoberfläche mit der Ebene maximaler Energiestromdichte zusammenfallen zu lassen. Für bildfehlerfreie Linsen fällt diese Ebene mit der Brennebene der Linse zusammen, wenn ein Laserstrahl mit der Winkeldivergenz null verwendet wird. Da für Hochleistungslaser im allgemeinen wegen der hohen Strahlenbelastung keine auf Linsenfehler korrigierten Objektive benutzt werden und außerdem jeder Laser eine mehr oder weniger große Winkeldivergenz besitzt, fällt die Ebene maximaler Energiestromdichte (MESD) keineswegs immer mit der Fokalebene (F) zusammen. Das soll an einigen Beispielen demonstriert werden. In Abb. 1a ist eine bildfehlerfreie Linse angenommen. In diesem Fall fallen Fokalebene und MESD-Ebene nicht zusammen, wenn sich die Winkeldivergenz über den Querschnitt des Laserstrahles ändert. Im Beispiel wird angenommen, daß die Winkeldivergenz nahe der optischen Achse größer ist als am Rand des Strahles. Daß bei Linsen mit sphärischer Aberration (Abb. 1b) eine gemeinsame Fokalebene für alle Zonen der Linse nicht mehr angegeben werden kann, ist bekannt. In Abb. 1c und 1d wird für verschiedene Winkeldivergenzen des Laserstrahles bei gleicher Linse die Verschiebung der MESD-Ebene demonstriert. Die Justierung ist also vom Laserstrahl selbst und von der Fokussierungslinse abhängig. Da Hochleistungslaser nur während Bruchteilen von Mikrosekunden emittieren, ist es notwendig, den Laserstrahl zu simulieren. Die Einstellung der MESD-Ebene kann oft durch direkte Beobachtung des Simulationsstrahles mit dem Auge erfolgen. Es ist aber wesentlich angenehmer, eine objektive fotoelektrische Methode zu benutzen. Eine solche Methode wird zur Notwendigkeit, wenn man nicht im sichtbaren Spektralbereich, also z. B. mit dem im Infrarot emittierenden Neodymlasern ($1,05 \mu$) oder mit Frequenzverdopplung beim Rubinlaser ($0,347 \mu$) arbeitet.

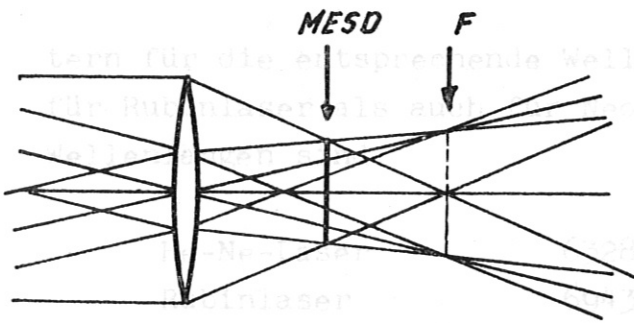


Abb. 1a

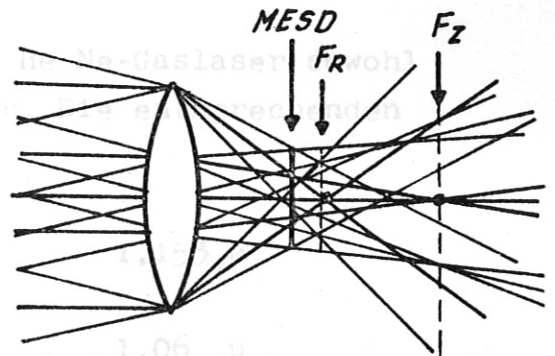


Abb. 1c

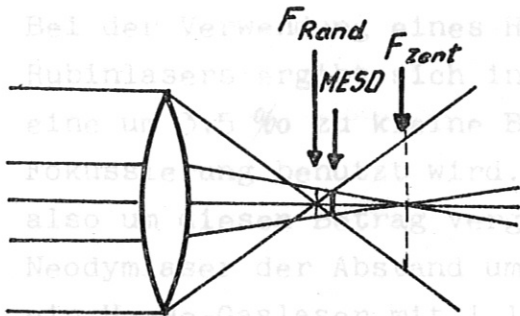


Abb. 1b

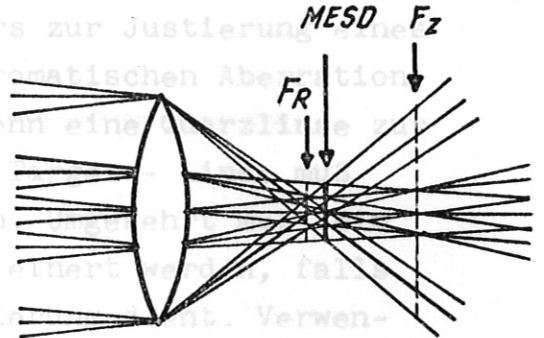


Abb. 1d

Abb. 1 Unterschied zwischen Fokalebene und MESD-Ebene

- 1a fehlerfreie Linse, Laserstrahl mit endlicher Winkeldivergenz,
- 1b sphärische Aberration, Laserstrahl mit endlicher Winkeldivergenz,
- 1c sphärische Aberration, Laserstrahl mit großer Winkeldivergenz,
- 1d sphärische Aberration, Laserstrahl mit kleiner Winkeldivergenz.

Simulation des Laserstrahles

Auf das Problem der Simulation des Laserstrahles soll nur soweit eingegangen werden, wie es hier von Bedeutung ist. Die wichtigsten zu simulierenden Größen sind neben der Lage der Strahlachse im Raum die Verteilung der Energiestromdichte in Abhängigkeit vom Durchmesser des Strahles und vom Winkel zur Achse (Winkeldivergenz). Um genügend Intensität zu erhalten, verwendet man meist statt Punktlichtquellen mit Fil-

Winkel θ abhängt. Der Zusammenhang ist gegeben durch

tern für die entsprechende Wellenlänge He-Ne-Gaslaser sowohl für Rubinlaser als auch für Neodymlaser. Die entsprechenden Wellenlängen sind:

He-Ne-Laser	6328 Å	1,153 μ
Rubinlaser	6943 Å	-
Neodymlaser	-	1,06 μ

Bei der Verwendung eines He-Ne-Gaslasers zur Justierung eines Rubinlasers ergibt sich infolge der chromatischen Aberration eine um 3,5 ‰ zu kleine Brennweite, wenn eine Quarzlinse zur Fokussierung benutzt wird. Der Abstand Target - Linse muß also um diesen Betrag vergrößert werden. Umgekehrt muß beim Neodymlaser der Abstand um 2,5 ‰ verkleinert werden, falls ein He-Ne-Gaslaser mit 1,15 μ zur Justierung dient. Verwendet man hier die Wellenlänge 6328 Å zur Justierung dann beträgt die Korrektur der Brennweite bereits 2 ‰, das sind bei $f = 10$ cm schon 2 mm. Anstelle der Simulation der Leistungsverteilung über den Querschnitt begnügt man sich meist mit der Simulation des Strahldurchmessers. Dazu ist es erforderlich, den Gaslaserstrahl (1-3 mm \varnothing) auf den etwa zehnfachen Durchmesser aufzuweiten. Das hat zur Folge, daß die Winkeldivergenz des Gaslaserstrahles (ca. 2 mrad) um einen Faktor zehn reduziert wird. Sie ist dann mehr als eine Größenordnung kleiner als die des zu simulierenden Rubinlaserstrahles. Die Simulation ist noch hinreichend gut, wenn der durch die Linsenfehler bedingte Fokusbereich auch über den durch die Winkeldivergenz des Rubinlasers erzeugten dominiert. Das trifft auf Brennweiten $\ll 10$ cm zu, wenn die Winkeldivergenz des Laserstrahls in der Gegend von 5 mrad liegt. Für Neodymlaser ist die Simulation gut, da deren Winkeldivergenzen im allgemeinen unter 1 mrad liegen. Bei der Justierung liegt dann der in Abb. 1b angegebene Fall vor.

Eine Simulation der Winkeldivergenz läßt sich durch Keilplatten in ein oder zwei Richtungen erreichen. Dadurch wird das ursprüngliche Lichtbündel in zwei aufgespaltet, die einen Winkel φ gegeneinander haben (Abb. 2), der vom Einfallswinkel α und dem Keilwinkel τ abhängt. Der Zusammenhang ist gegeben durch

Abb. 2 Simulation der Winkeldivergenz eines Lasers durch eine Keilplatte

$$\varphi = \arcsin \left\{ n \sin \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \sin \alpha \right) + 2\tau \right] \right\} - \alpha \quad (1)$$

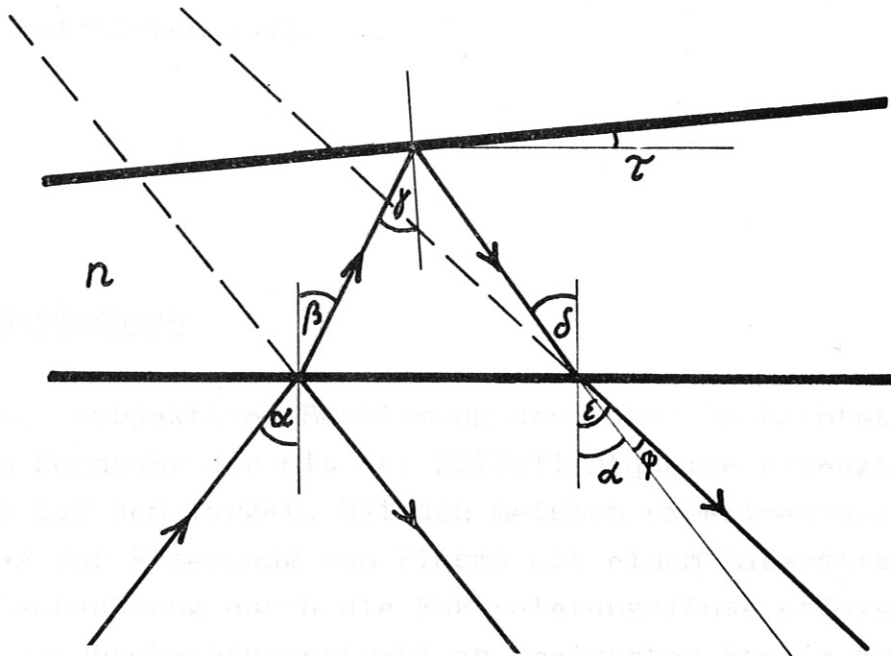


Abb. 2 Reflexion an einer Keilplatte

Für zwei verschiedene Keilplatten ist diese Beziehung in Abb. 3 ausgewertet.

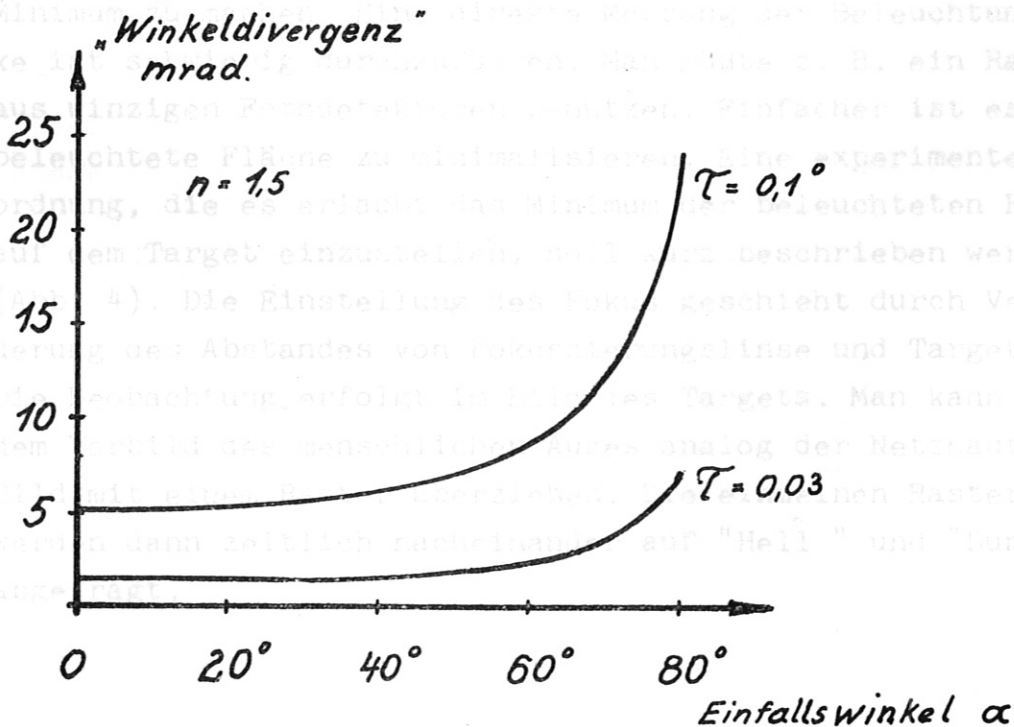


Abb. 3 Simulation der Winkeldivergenz eines Lasers durch eine Keilplatte

In vielen praktischen Fällen werden die einfache Aufweitung und die Aufspaltung des Gaslaserstrahles ausreichend sein. Im weiteren wird angenommen, daß eine genügend gute Simulation existieren soll.

Die Meßmethode

Bei der subjektiven Bestimmung des Fokus beobachtet man mit einem Fernrohr den mit der Hilfslichtquelle erzeugten Lichtkreis auf dem Target. Bei den meisten experimentellen Anordnungen zur Erzeugung von Plasma mit einem Laserstrahl muß die Beobachtung durch die Fokussierungslinse erfolgen. Dabei wird der Beobachtungsstrahl an geeigneter Stelle aus dem Laserstrahlengang ausgespiegelt. Wenn man die subjektive Beobachtung durch eine objektive Methode ersetzen will oder im Infrarot bzw. Ultraviolett ersetzen muß, so erzeugt man ein Bild des beleuchteten Targets und versucht entweder die Beleuchtungsstärke gemittelt über die beleuchtete Fläche zu einem Maximum oder die beleuchtete Fläche selbst zu einem Minimum zu machen. Eine direkte Messung der Beleuchtungsstärke ist schwierig durchzuführen. Man müßte z. B. ein Raster aus winzigen Fotodetektoren benutzen. Einfacher ist es, die beleuchtete Fläche zu minimalisieren. Eine experimentelle Anordnung, die es erlaubt das Minimum der beleuchteten Fläche auf dem Target einzustellen, soll kurz beschrieben werden (Abb. 4). Die Einstellung des Fokus geschieht durch Veränderung des Abstandes von Fokussierungslinse und Target. Die Beobachtung erfolgt im Bild des Targets. Man kann nach dem Vorbild des menschlichen Auges analog der Netzhaut das Bild mit einem Raster überziehen. Die einzelnen Rasterpunkte werden dann zeitlich nacheinander auf "Hell" und "Dunkel" abgefragt.

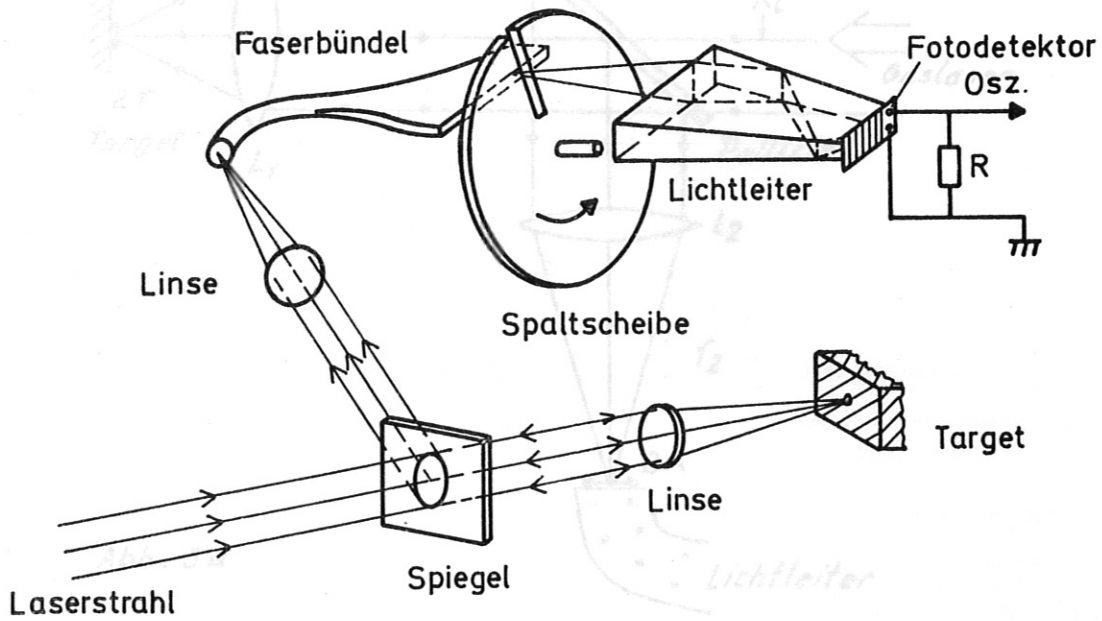


Abb. 4 Aufbau des Fokusedektors

Die Rasterung wird mit einem Lichtfaserbündel, welches auf der Bildseite kreisförmigen Querschnitt besitzt, vorgenommen. Das andere Ende des Faserbündels ist zu einem Spalt aufgefächert. Dieser wird auf einen Fotodetektor abgebildet. Durch einen bewegten Querspalt werden die einzelnen Fasern zeitlich nacheinander abgefragt. Die Einstellung der Ebene, in der das Lichtbündel den kleinsten Querschnitt besitzt, erfolgt dadurch, daß man die Anzahl lichtführender Fasern zu einem Minimum macht.

Abb. 5c

Abb. 5 Optischer Strahlengang
5a experimentelle Anordnung,
5b-c Strahlengang

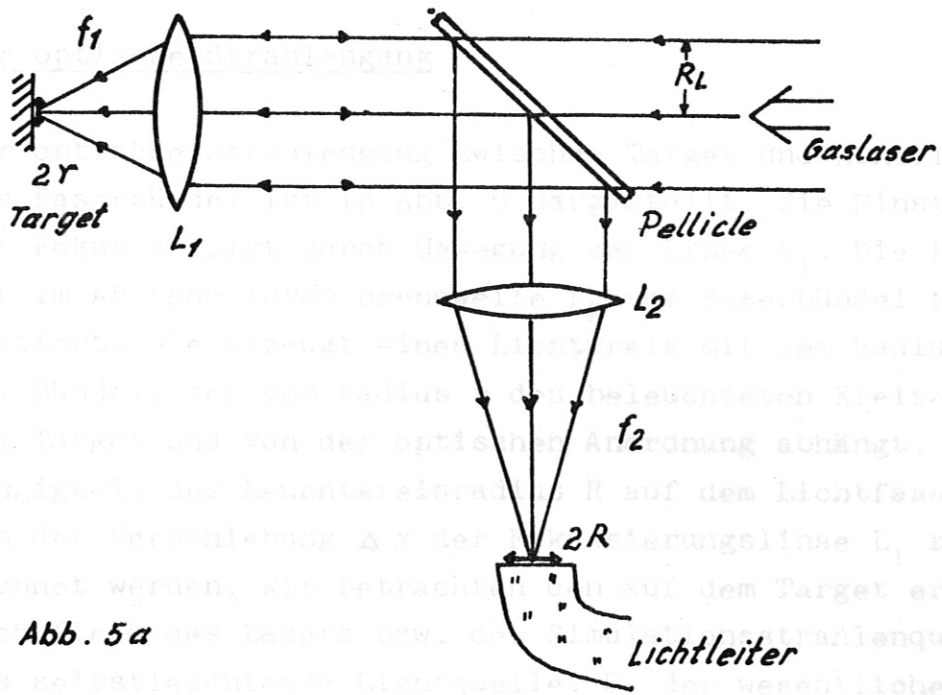


Abb. 5a

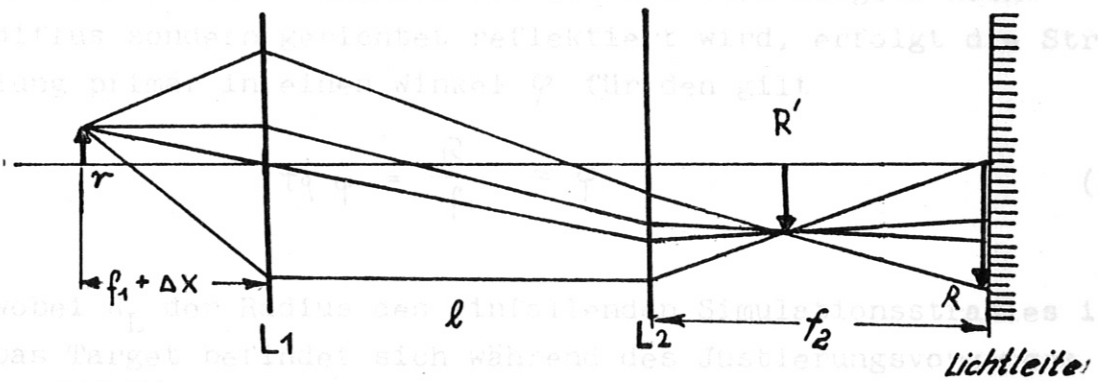


Abb. 5b

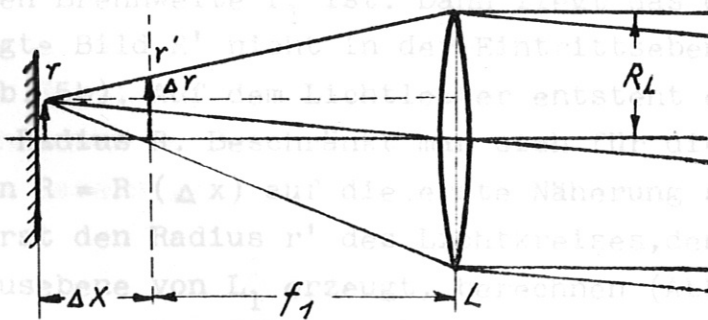


Abb. 5c

Abb. 5 Optischer Strahlengang

5a experimentelle Anordnung,

5b-c Strahlengang

Der optische Strahlengang

Der optische Strahlengang zwischen Target und Eintritt in das Faserbündel ist in Abb. 5 dargestellt. Die Einstellung des Fokus erfolgt durch Bewegung der Linse L_1 . Die Linse L_2 ist im Abstand ihrer Brennweite f_2 vom Faserbündel fest einjustiert. Sie erzeugt einen Lichtkreis mit dem Radius R auf dem Bündel, der vom Radius r des beleuchteten Kreises auf dem Target und von der optischen Anordnung abhängt. Die Abhängigkeit des Leuchtkreisradius R auf dem Lichtfaserbündel von der Verschiebung Δx der Fokussierungslinse L_1 soll berechnet werden. Wir betrachten den auf dem Target erzeugten Lichtfleck des Lasers bzw. der Simulationsstrahlenquelle als selbstleuchtende Lichtquelle. Da der wesentliche Teil des einfallenden Lichtes bei den üblichen Targets nicht diffus sondern gerichtet reflektiert wird, erfolgt die Strahlung primär in einen Winkel φ für den gilt

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_L}{f_1} \approx \varphi \quad (2)$$

wobei R_L der Radius des einfallenden Simulationsstrahles ist. Das Target befindet sich während des Justierungsvorganges meist in einer Entfernung von der Linse L_1 , die nicht gleich deren Brennweite f_1 ist. Dann liegt das durch L_1 und L_2 erzeugte Bild R' nicht in der Eintrittsebene des Faserbündels (Abb. 5b). Auf dem Lichtleiter entsteht ein Lichtkreis mit dem Radius R . Beschränkt man sich für die Berechnung der Funktion $R = R(\Delta x)$ auf die erste Näherung so kann vereinfacht zuerst den Radius r' des Lichtkreises, den das Target in der Fokusebene von L_1 erzeugt, berechnen (Abb. 5c). Steht das Target vor dem Fokus, so handelt es sich um einen virtuellen Lichtkreis.

$$r' = r + \Delta r \quad (3)$$

$$\frac{\Delta r}{\Delta x} = \frac{R_L - r}{f_1 + \Delta x} \approx \frac{R_L}{f_1} \quad (4)$$

$$r' = r + R_L \frac{\Delta x}{f_1} \quad (8) \quad (3a)$$

Durch die Linsen L_1 und L_2 wird nun r' auf den Eingang des Lichtleiters abgebildet.

$$R = \frac{f_2}{f_1} \cdot r' \quad (5)$$

$$R = \frac{f_2}{f_1} \left(r + R_L \frac{\Delta x}{f_1} \right) \quad (5a)$$

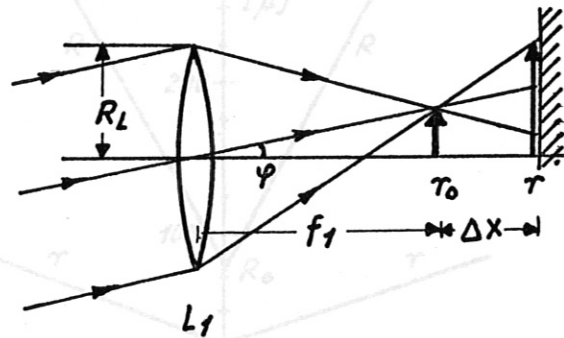


Abb. 6 Erzeugung des Lichtkreises auf dem Target

Abb. 7 "Fokus"radien als Funktion der Verschiebung der Linse L_1

Der Fokusradius r selbst hängt natürlich von Δx ab. Wir beschränken uns auf den Fall, daß r durch die Winkeldivergenz φ des Lasers gegeben ist. Dann gilt nach Abb. 6

$$\frac{R_L + r}{R_L + r_0} = \frac{f_1 + \Delta x}{f_1} \quad (6)$$

und

$$r = r_0 + \frac{\Delta x}{f_1} R_L \quad (7)$$

r_0 entspricht dabei dem minimalen Fokusfleck.

Durchmesser von r_0 $r_0 = f_1 \cdot \varphi$ (für $\Delta x = 0$) wird $2 R_{\text{min}}$ = 200μ , wobei es werden etwa drei Fasern ausgeleuchtet. Die Teilstrahlengänge aufeinander ergibt somit im Minimum 3 Impulse. Somit gilt unter Verwendung von (2)

$$R \approx \frac{f_2}{f_1} \varphi (f_1 + 2 \Delta x) \quad (9)$$

Aus Abb. 7 ist ersichtlich, daß r und R für $\Delta x = 0$ ihr Minimum haben. Der Durchmesser des Lichtfleckes auf dem Lichtleiter wächst mit Δx stärker als der auf dem Target. Das ist für die Justierung günstig.

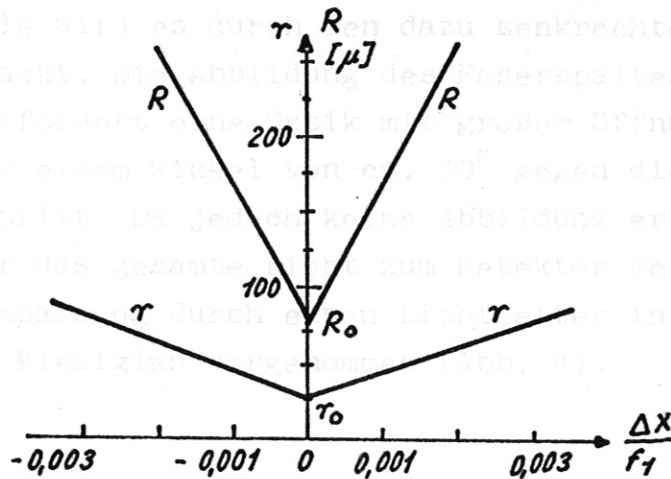


Abb. 7 "Fokus"radien als Funktion der Verschiebung der Linse L_1 Detektoren

Aus der gewählten Anordnung ergeben sich zwei Hauptforderungen an die Detektoren. Sie sollen eine große Empfindlichkeit besitzen, da nur ein Teil des Lichtes ausgespiegelt werden kann und ein großer Teil schon durch verlorengeht. Die Fläche der Detektoren soll groß sein, um den Lichtleiter nicht stark zu verengern. Bei großen Flächenunterschieden der Eintritts- und Austrittsflächen, d.h. großen Winkeln, versagen die einfachen Kegellichtleiter.

- $\varphi = 0,25$ mrad (He-Ne-Gaslaser aufgeweitet)
- $f_1 = 100$ mm $r_0 = 25 \mu$
- $f_2 = 300$ mm
- $R_L = 15$ mm $\frac{f_2}{f_1} = 3$

In diesem Fall ist der Justierstrahlengang dem vorhandenen Faserbündel gut angepaßt. Die einzelne Glasfaser hat einen geeigneten Arbeitswiderstand überträgt das Element noch

Durchmesser von $70\ \mu$. Im Minimum (für $\Delta x = 0$) wird $2 R_{\min} = 150\ \mu$, d.h. es werden etwa drei Fasern ausgeleuchtet. Die fotoelektrische Abtastung ergibt somit im Minimum 3 Impulse. Bei Dejustierung sind es vier und mehr (Abb. 8).

Ist R_{\min} kleiner als ein Fiberradius, dann kann der Fokus nicht genau festgelegt werden. Ungünstig ist auch der andere Fall, daß bei R_{\min} so viele Fasern beleuchtet werden, daß die Zahl der Impulse auf dem Oszillographenschirm nicht mehr mit einem Blick erfaßt werden kann.

Nach dem Austritt des Lichtes aus dem spaltförmigen Ende des Faserbündels wird es durch den dazu senkrechten rotierenden Spalt zerhackt. Die Abbildung des Faserspalttes auf den Fotodetektor erfordert eine Optik mit großer Öffnung, da das Licht unter einem Winkel von ca. 30° gegen die Achse aus den Fasern austritt. Da jedoch keine Abbildung erforderlich ist, sondern nur das gesamte Licht zum Detektor geführt werden soll, wird die Anpassung durch einen Lichtleiter in Form eines Obeliskens aus Plexiglas vorgenommen (Abb. 4).

Die fotoelektrischen Detektoren

Aus der gewählten Anordnung ergeben sich zwei Hauptforderungen an die Fotodetektoren. Sie sollen eine große Empfindlichkeit besitzen, da nur ein Teil des Lichtes ausgespiegelt werden kann und auch vorher schon Licht verlorengeht. Die Fläche der Fotodetektoren soll groß sein, um den Lichtleiter nicht stark zu komplizieren. Bei großen Flächenunterschieden der Eintritts- und Austrittsfläche, d.h. großen Winkeln, versagen die einfachen Kegellichtleiter.

Für die Justierung mit einem Gaslaser der Wellenlänge $6328\ \text{\AA}$ wurde ein Silizium-Solarelement BPY 45 (Siemens) benutzt. Mit einem geeigneten Arbeitswiderstand überträgt das Element noch

Frequenzen im Kilohertzbereich, wie sie beim Abtasten auftreten. Die Impulse werden auf einem Oszillographen sichtbar gemacht (Abb. 8).

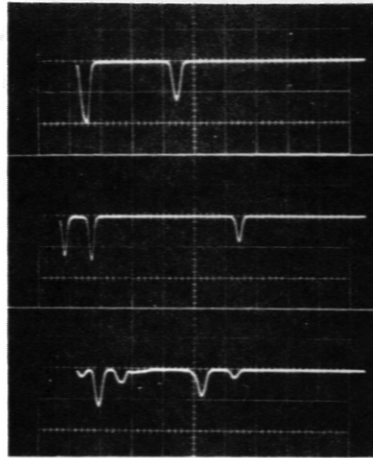


Abb. 8 Fotodetektorimpulse, Entfernung Linse L_1 - Target
8a gleich der Brennweite,
8b wenig von der Brennweite verschieden,
8c stark von der Brennweite verschieden.

Im justierten Zustand treten 3 Impulse auf. Wird nun der Abstand Fokussierungslinse - Target geändert, so erscheinen zuerst 4 und später noch mehr Impulse. Die verschiedenen Impulshöhen ergeben sich aus der ungleichmäßigen Beleuchtung der verschiedenen Lichtfasern. Das Faserbündel selbst ist nicht geordnet. Dadurch sind die Impulse nicht benachbart. Das ist ebenfalls bei den lichtführenden Fasern zu beobachten.

Für die Wellenlänge $1,15 \mu$ geht die Empfindlichkeit des Solarelementes stark zurück. Es ist in diesem Bereich günstiger Germanium-Fotodetektoren (z. B. APY 12) oder Multiplier mit geeigneter Fotokathode (S 1, S 20, ~~S 10~~) zu benutzen. Letzere verfügen über große empfindliche Flächen, dafür ist der meßtechnische Aufwand bei Germaniumdetektoren wesentlich kleiner. In beiden Fällen ist es von Vorteil, einen Lichtleiter, der für den entsprechenden Spektralbereich durchlässig sein muß, zur Anpassung zu benutzen.

Durch das Prinzip der Zerlegung des Fokusflecks bzw. seines Bildes durch ein Lichtfaserbündel und der zeitlich nacheinander erfolgenden Abfrage der einzelnen Fasern durch ein Fotoelement ist eine fotoelektrische Einstellung der bei der Plasmaerzeugung durch Laser interessierenden Stelle maximaler Energiestromdichte möglich. Das erweist sich als besonders vorteilhaft im Infrarot (Neodymlaser) und im Ultraviolett (1. Harmonische der Rubinlaserstrahlung).

This IPR report is intended for internal use.

IPR reports express the views of the authors at the time of writing and do not necessarily reflect the opinions of the Institut für Plasmaphysik or the first or none of the authors on the subject.

Neither the Institut für Plasmaphysik, nor the European Commission, nor any person acting on behalf of either of these:

1. Gives any guarantee as to the accuracy and completeness of the information contained in this report, or that the use of any information, knowledge, method or process disclosed therein may not constitute an infringement of a patent or other rights; or
2. Assumes any liability for damage or injury from the use of any information, knowledge, method or process disclosed in this report.