

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Eine kontinuierliche Teilchenquelle
für die Erzeugung von Plasma
mit Pulslasern

U. Schwenn, R. Sigel

IPP IV/47

Mai 1973

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

IPP IV/47 U. Schwenn
R. Sigel

A continuous droplet source
for plasma production with
pulse lasers

May 1973 (in German)

Abstract: The principle of a continuous droplet source for plasma production with a repetitively pulsed laser is described. A prototype has been successfully operated with water.

I N H A L T

Seite

1. EINLEITUNG	2
2. TRÖPFCHENERZEUGUNG DURCH ANREGUNG VON INSTABILITÄTEN IN EINEM FLÜSSIGKEITSSTRAHL	4
3. EXPERIMENTELLE ANORDNUNG	5
a) Teilchenquelle	5
b) Teilchenselektion	6
c) Druckreduzierung	7
4. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE	8
a) Anregung	8
b) Selektion	9
c) Druckbereich	11
5. ZUSAMMENFASSUNG	12
6. LITERATURVERZEICHNIS	14

1. EINLEITUNG

Einem Vorschlag von Dawson /1/ folgend wurden in den letzten Jahren in einer Reihe von Laboratorien /2 - 10/ experimentelle Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, mit einem Puls laser Plasma zum Füllen magnetischer Feldkonfigurationen zu erzeugen. Das Prinzip einer solchen Plasmaquelle ist das folgende: Ein kleines Teilchen aus fester Materie wird in das Innere eines Magnetfeldes, z.B. eines Stellarators, gebracht und dort mit der fokussierten Strahlung eines Puls lasers ionisiert und aufgeheizt. Das so erzeugte Plasma breitet sich anschliessend im Magnetfeld aus. Das Studium seines Verhaltens ist im Rahmen der Untersuchungen zum magnetischen Einschluss von Fusionsplasmen von Interesse.

Zur Verwirklichung dieses Konzepts ist es notwendig, kleine Teilchen aus vorzugsweise leichten Elementen herzustellen und exakt in den Brennfleck des Lasers zu bringen. Teilchen aus Stoffen, die bei Raumtemperatur fest sind (z.B. LiD, C (CH₂)_n, Al) wurden meist an dünnen Quarzfäden oder freischwebend in elektrostatischen Wechselfeldern aufgehängt /2 - 7/. Teilchen aus festem Deuterium wurden aus einem heliumgekühlten Kryostaten ausgestossen und im freien Fall mit dem Laserstrahl getroffen /8 - 10/. Die seitliche Streuung der Teilchen bei der zuletzt erwähnten Technik sowie das umständliche und diffizile Ersetzen der Teilchen nach jedem Schuss bei mechanischer oder elektrischer Aufhängung machen alle diese Verfahren mehr oder weniger ungeeignet für die Füllung grossvolumiger Magnetfelder (Durchmesser > 10 cm).

Andererseits wird mit dem raschen Fortschreiten der Lasertechnologie dieses Verfahren der Plasmaerzeugung zunehmend interessanter. Beispielsweise könnten heute bereits gepulste CO₂-Laser mit einer Repetitionsfrequenz bis zu 1 kHz und einer mittleren Leistung von 10 kW zur Plasmaerzeugung eingesetzt werden. Für die Anwendung dieser Laser zur Plasmaerzeugung ist es allerdings notwendig, eine adäquate Teilchenquelle zu entwickeln. Eine solche Teilchenquelle sollte es ermöglichen, Teilchen, insbesondere solche aus festem Deuterium, mit einem Durchmesser in der Grössenordnung 100 μ kontinuierlich und exakt auch über grössere Distanzen in das Innere einer Vakuumkammer bzw. in den Brennfleck des Lasers zu injizieren.

Um die Möglichkeiten repetitiv gepulster Laser ausnützen zu können, sollte die Quelle vom Prinzip her Repetitionsfrequenzen bis in den kHz-Bereich zulassen. Neben der Anwendung zur Plasmaerzeugung für das Füllen von Magnetfeldern wäre eine solche Teilchenquelle, ebenfalls in Verbindung mit repetitiv gepulsten Lasern und einem geeigneten Feld für magnetischen Einschluss, als Quelle für hochgeladene Ionen von Interesse /11/. Teilchen aus festem Deuterium-Tritium sind schliesslich für die Brennstoffzufuhr in stationären oder gepulsten Fusionsreaktoren vorgesehen. In naher Zukunft würde eine solche Quelle die Möglichkeit bieten, das noch ungelöste Problem der Ablation solcher Brennstoffteilchen in einem hochenergetischen Plasma zu untersuchen.

In diesem Bericht wird über Versuche mit einer Teilchenquelle hoher Folgefrequenz berichtet, die für diese Zwecke geeignet erscheint. Ihr liegt das folgende Prinzip zugrunde (Abb.1): Aus einem Vorratsgefäss wird das in Teilchenform gewünschte Material als dünner Flüssigkeitsstrahl durch eine Düse gespritzt (etwa flüssiges Deuterium aus einem mit flüssigem Helium gekühlten Vorratsgefäss). Durch gezielte Anregung von Instabilitäten im Strahl, etwa mit Hilfe eines Schallwellenstrahlers im Vorratsgefäss, lässt sich der Flüssigkeitsstrahl in eine regelmässige Folge gleicher Tröpfchen aufspalten. Wird in der Nähe der Düse ein elektrisches Feld erzeugt, so tragen die Tröpfchen bei ihrer Erzeugung eine elektrische Ladung. Dies ermöglicht es, einzelne Tröpfchen mit Hilfe eines gepulsten und mit dem Tröpfchenstrahl (Schallwellenstrahler) synchronisierten elektrostatischen Ablenkungsfeldes abzulenken und an einer Blende zu selektieren. Über die variable Frequenz des Schallwellengenerators und durch periodische Selektion von Einzelteilchen lässt sich die Injektionsfrequenz der Tröpfchen in die Vakuumkammer stets der Schussfolge des Lasers anpassen. Elektrisch geladene Teilchen können ausserdem voraussichtlich mit grosser Genauigkeit in den Brennfleck des Lasers injiziert werden. Dies kann dadurch geschehen, dass der Ort der Düse mit einer elektrostatischen Linse in den Brennfleck des Lasers abgebildet wird. In diesem Fall werden auch bei etwaigen seitlichen Schwankungen des Tröpfchenstrahls die Teilchenbahnen stets durch den Brennfleck des Lasers laufen. Da die Teilchen ins Vakuum injiziert werden sollen, muss im allgemeinen zwischen

der Düse und der Experimentierkammer differentiell gepumpt werden. Bei Deuterium beispielsweise beträgt der Dampfdruck am Tripelpunkt ($18,7^{\circ}\text{K}$) 130 Torr; er kann im Raum um die Düse voraussichtlich nicht unterschritten werden, da die Düse sonst durch Verdampfungskühlung zufrieren würde. Bedingt durch den kleinen Tröpfchendurchmesser kann das differentielle Pumpsystem allerdings mit kleinen Blendenöffnungen aufgebaut und daher mit mässiger Pumpleistung betrieben werden. Die Tröpfchen selbst werden im allgemeinen durch Verdampfungskühlung auf ihrem Weg in die Vakuumkammer gefrieren und den Brennfleck des Lasers in fester Form erreichen.

In diesem Bericht werden Versuche beschrieben, die mit Wassertröpfchen durchgeführt wurden. Ziel dieser Versuche ist es zu zeigen, ob das hier vorgeschlagene Prinzip realisiert werden kann und zu klären, welche experimentellen Schwierigkeiten dabei auftreten. Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden im Frühjahr und Sommer 1971 durchgeführt.

2. TRÖPFCHENERZEUGUNG DURCH ANREGUNG VON INSTABILITÄTEN IN EINEM FLÜSSIGKEITSSTRAHL

Das hier verwendete Prinzip zur Tröpfchenerzeugung wurde erstmals von Lord Rayleigh /12/ ausführlich untersucht. Danach ist ein laminarer Flüssigkeitsstrahl instabil bezüglich Störungen längs der Strömungsrichtung. Solche Störungen können z.B. Druckschwankungen oder Verunreinigungen sein. Durch die Oberflächenspannung schnürt sich der Strahl ein und zerfällt im allgemeinen in eine Folge von Tropfen unterschiedlicher Grösse (siehe Abb.2). Regt man den Strahl jedoch mit einer geeigneten periodischen Störung an, so kann man die Bildung äquidistanter, gleich grosser Tröpfchen erreichen. Dies soll in Abb.3 erläutert werden: Der Strahl mit dem Durchmesser $\varnothing = 2a$ strömt mit der Geschwindigkeit c aus der Kapillare. Erzeugt man periodische Störungen der Frequenz γ , so bilden sich regelmässige Einschnürungen mit der Wellenlänge $\lambda = c/\gamma$, die zur Aufspaltung im Tröpfchen führen. Nach Lord Rayleigh /12/ soll sich λ von $7a$ bis $14a$ variieren lassen; grösste Anwachs-

raten erhält man für $\lambda = 9a$. Volumen und Tröpfchenradius berechnen sich in Abhängigkeit von a und λ zu

$$V_{Tr} = \frac{4\pi}{3} r^3 = \pi a^2 \lambda; \quad r = \sqrt[3]{\frac{3}{4} a^2 \lambda} \quad (1)$$

Die Anregung lässt sich auf verschiedenen Wegen erreichen, etwa durch Stimmgabeln, Schwingspulen oder Piezoquarze, je nach der gewünschten Grösse und Folgerate der Tröpfchen. Nach anfänglichen Versuchen mit einer Schwingspule wurde eine Apparatur entwickelt, die zur Anregung einen Ultraschallgenerator nach dem Magnetostruktionsprinzip verwendet.

3. EXPERIMENTELLE ANORDNUNG

Es sollten folgende Punkte untersucht werden: Anregung bzw. Tröpfchenerzeugung, Aufladung und Ablenkung sowie Einzeltröpfchenselektion und Einschleusen der Teilchen in ein Vakuum. Die Schnittzeichnung Abb.3 zeigt den Aufbau, Abb.4 das Funktionsschema der endgültigen Anlage. Die Versuche wurden zunächst mit Wasserdurchgeführt, um den Aufwand an Pumpen und Kryotechnik nicht zu gross werden zu lassen.

a) Teilchenquelle

Magnetische Werkstoffe kontrahieren sich unter der Wirkung eines Magnetfeldes parallel zu den Feldlinien. Maximale Längenänderungen lassen sich bei in Resonanz betriebenen Weichnickelstäben erreichen. Die Eigenfrequenzen berechnen sich nach Bergmann /13/ zu

$$\gamma_k = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

E ist der Elastizitätsmodul, ρ die Dichte und $K = 1, 2, \dots$ die Ordnungszahl der Oberschwingung. Die Grundschiwingung eines 10 cm langen Nickelstabes beträgt 24,3 kHz. Die maximale Längenänderung $\Delta l/l$ bei Weichnickel beträgt $\approx 10^{-4}$, dazu braucht man ein Magnetfeld von 500 Gauss. Zur Erzeugung von Tröpfchen von 100 ... 400 μ Durchmesser mit Strömungsgeschwindigkeiten von 4 ... 8 m/sec

benötigt man Frequenzen im Bereich 10 ... 15 kHz. Deshalb wurde ein Weichnickelstab von 20 cm Länge, entsprechend einer Grundschwingung von 12,15 kHz verwendet. Die Anregung erfolgte mit einer Zylinderspule (Induktivität = 2,5 mH), die über den Stab geschoben wurde.

Die Konstruktion des Anregungstopfes zeigt Abb.4. Der Nickelstab wird lediglich im Deckel des Zylinders eingespannt. Dies geschieht durch 2 Teflonscheiben und 2 O-Ringen zur Dichtung. Die Spule sitzt beweglich ungefähr in der Mitte des Stabes. Das untere Ende des Stabes ist ca. 2 mm von der Ausflussöffnung für die Flüssigkeit entfernt; die von ihm ausgehenden Schallwellen regen die gewünschten Instabilitäten im Strahl an. In die Austrittsöffnung wurden wegen ihrer Härte und sorgfältigen Herstellung durchbohrte Uhrsteine aus künstlichem Rubin eingesetzt. Diese wurden in eine Schraubfassung gepresst und waren so leicht auswechselbar. Durch Verwendung von Steinen mit verschiedenen Durchmessern konnte der Strahldurchmesser variiert werden. Die Wasserzufuhr und Druckregulierung erfolgt durch den Nachfüllstutzen, das Einjustieren des Strahls auf die Blende durch Neigen des auf einem O-Ring gelagerten Topfes.

b) Teilchenselektion

Eine Teilchenselektion ist aus zwei Gründen notwendig:

- Für die eingangs erwähnten Anwendungen benötigt man in weiten Grenzen variable Teilchenzahlen.
- Die Abstände der Teilchen sollten bei Plasmaexperimenten zumindest ungefähr gleich dem Durchmesser des Magnetfeldes sein, d.h. der natürliche Teilchenabstand ($\approx \lambda$) ist viel zu klein.

Die Aussonderung einzelner Tröpfchen erfolgt durch gepulste Aufladung und elektrostatische Ablenkung, schematisch dargestellt in Abb.6. Liegt die Ladelektrode an Masse, bleiben die Tröpfchen neutral, werden nicht abgelenkt und fliegen an der Blende vorbei. Legt man während der Abschnürung eines Teilchens einen Impuls an die Elektrode, so wird es geladen und kann durch die Ablenkelektrode auf eine Bahn durch die Blende gebracht werden.

Zur Erzeugung der Ladeimpulse und zur Ansteuerung der Stroboskopblitzlampen wurde eine elektronische Steuerung entwickelt, deren Prinzipschaltbild in Abb.7 dargestellt ist. (Der Aufbau erfolgte bis auf die Impulsendstufen mit integrierten Bausteinen.) Die Steuerung ermöglicht die Umwandlung des sinusförmigen Signals zur Spulenansteuerung in Rechteckimpulse, eine bis zu 1600-fache Frequenzteilung, eine getrennte Phasenverschiebung für Ladeimpuls und Blitzlampentriggerung, sowie die Verstärkung des Ladeimpulses auf ca. 500 V. Er ist 50 μ sec lang, sodass nur ein Teilchen geladen wird.

c) Druckreduzierung

Ein Betrieb der Tröpfchenquelle und der Selektion ist bei Drücken von einigen 100 Torr ohne weiteres möglich. Die Teilchen werden jedoch i.a. in einem Vakuum benötigt. Deshalb müssen die Tröpfchen durch Blenden geschleust werden, die zur Druckreduzierung dienen. Erzeugt man die Tröpfchen bei 100 ... 760 Torr, so wird die Strömungsgeschwindigkeit des Gases in der Blende um ein Vielfaches höher als die Teilchengeschwindigkeit. Dadurch werden die Tröpfchen aber verformt, beschleunigt und zerrissen. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen erzeugt man die Tröpfchen schon in einem Vorvakuum von einigen Torr und benützt die Blende für die Selektion gleichzeitig als erste Stufe für die weitere Druckreduzierung. Da die Tröpfchen beim Durchgang durch die erste Blende noch flüssig sind, wurde die Blende beheizt, um ein Benetzen durch zerplatzte Tröpfchen zu verhindern. Die dazu erforderliche Heizleistung von 10 - 20 W wird von einer 60 W-Heizwicklung auf die aus Kupfer gedrehte Blende übertragen. Den Aufbau zeigt Abb.4. Die erste Blende erfüllt also zwei Funktionen, Selektion und Druckreduzierung. Nach ihr lässt sich durch ein differentielles Pumpsystem aus mehreren Blenden, die auch zur Fokussierung des Strahls ausgenützt werden können, der Druck weiter herabsetzen. Die Tröpfchen sind dann schon gefroren und der Aufbau der nächsten Blenden kann wesentlich einfacher erfolgen. Deshalb wurde hier nur die erste Blende aufgebaut, gefolgt von einer Kühlfalle zur stärkeren Druckreduzierung, die mit flüssiger Luft gekühlt wird.

Die Gesamtanlage ist in Abb.5 schematisch dargestellt. Die Erzeugung der Tröpfchen durch den Anregungstopf AT und die Aufladung bzw. Selektion findet im Raum V1 statt. Der Druck P_1 in V1 wird durch die Pumpen 1 und W aufrechterhalten. Das Wasser wird aus dem Vorratsbehälter durch den Druck P_0 durch die Austrittsöffnung gedrückt ($P_0 - P_1 = 1 - 700$ Torr).

Die Lampe 1 dient zur stroboskopischen Beobachtung der Erzeugung und Selektion, Lampe 2 erlaubt die Kontrolle der durch die Blende 1 und die Kühlfalle gelaufenen Teilchen im Gebiet V2. H1 bis H6 sind Ventile, die zum Anfahren der Anlage und zur Druckkontrolle während des Betriebes dienen.

4. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

a) Anregung

Die Teilchenquelle wurde mit Strahldurchmessern von 100μ bzw. 140μ erprobt. Die Anregungsspule wurde mit einem Leistungsverstärker angesteuert, der an 200Ω maximal 300 V Spitzenspannung abgeben konnte. Das entspricht einem Magnetfeld von ca. 100 Gauss im Inneren des Stabes, das sich als gut ausreichend erwies. Durch die Halterung des Stabes mit einem Ende in Wasser ergab sich eine Verschiebung des Resonanzpunktes von $11,5$ auf 13 kHz, sowie eine deutliche Verbreiterung der Resonanzkurve gegenüber dem Betrieb in Luft.

In Tabelle 1 sind der Variationsbereich und die optimalen Werte für die verschiedenen Parameter der Anregung und Strahldurchmesser angegeben: ν = Anregungsfrequenz, $\Delta P = P_0 - P_1$ Druckdifferenz, c = Strömungsgeschwindigkeit, ϕ = Tröpfchendurchmesser, λ = Wellenlänge.

Das Subskript $_{max}$ bezeichnet die Werte für optimale Anregung und Stabilität.

Tabelle 1

	2a = 140 μ	2a = 100 μ	
γ	3 ... 15	3 ... 24	kHz
Δp	100 ... 700	100 ... 760	Torr
c	3 ... 12	2.5 ... 10	m/sec
λ	500 ... 900	350 ... 650	μ
ϕ	250 ... 400	150 ... 250	μ
γ_{\max}	13	13	kHz
Δp_{\max}	200 ... 250	250 ... 300	Torr
c_{\max}	7	5.8	m/sec
λ_{\max}	540	450	μ
ϕ_{\max}	260	190	μ

Das Volumen der Teilchen betrug ca. $8,3 \times 10^{-6}$ bzw. $3,5 \times 10^{-6}$ cm^{-3} , jeweils auf die optimalen Werte bezogen (für 140 bzw. 100 μ Uhrsteine).

Der Variationsbereich für λ stimmt mit dem von Rayleigh /12/ angegebenen überein, konnte aber wegen der Resonanzkurve der Anregung nicht voll ausgenutzt werden. Abweichungen um $\pm 15\%$ von λ_{\max} bzw. γ_{\max} waren unkritisch. In diesem Bereich war über mehr als 20 min ein stabiler Betrieb möglich, zeitlich begrenzt nur durch das Fassungsvermögen des Vorratsgefäßes. Eine leichte Verschlechterung ergab sich durch die Eigenerhitzung des Nickelstabes und die damit verbundene Abnahme des Wirkungsgrades der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie. Dieser Effekt lässt sich aber durch Kühlung bzw. stärkeres Ansteuern des Stabes ausgleichen.

b) Selektion

Die Höhe der Lade- und Ablenkspannungen ist bei Atmosphärendruck unkritisch. 3 bis 5 kV waren bei der beschriebenen Anordnung möglich. Das entspricht spezifischen Ladungen von 10^{-10} bis 10^{-9}

Coulomb/g. Bei niederen Drücken (einige Torr) bildeten sich jedoch Gasentladungen, die die Lade- bzw. Ablenkspannung auf 800 und 1200 V begrenzten.

Die Ladung der Tröpfchen hängt sehr stark von der Position der Lochblende ab. Die höchste Ladung erhält man, wenn die Blende gerade an dem Abschnürungspunkt ist (A in Abb.3).

Die Ladeimpulse hatten eine Höhe von ca. 500 Volt bei einer Dauer von 50 μ sec und einer Anstiegszeit von 10 μ sec. Die zeitliche Synchronisierung der Aufladung mit der Anregung ist mit der Zeitverzögerung von 0 ... 100 μ sec vorzunehmen. Abb.8 zeigt die Auslenkung eines Tröpfchens 10 cm nach der Aufladung ($U_L = 500$ V, $U_A = 1300$ V), sie beträgt ca. 1,4 mm. Die kleinen Auslenkungen der benachbarten Tröpfchen können durch beginnende Gasentladungen und damit verbundenen Aufladungen verursacht sein. Die Trennung von Neutralstrahl und geladenen Teilchen zeigen Abb.9 und 10. In Abb.9 ist deutlich die Justierung des Neutralstrahls neben die Blendenöffnung zu erkennen. Bei Abb.9 trifft der Neutralstrahl gerade die Kante der Blende, daher zerplatzen die Tröpfchen in alle Richtungen. Das führt zu Kollisionen und Ablenkungen der Teilchen, die man durch die Blende schleusen will. In Abb.9 ist der Strahl richtig einjustiert.

Besonders interessant ist natürlich die Stabilität der Auslenkung. Wir unterscheiden zwischen Kurz- und Langzeitstabilität, d.h. ändert sich die Auslenkung und Justierung der Teilchen über einige Perioden (der Auslenkungsfrequenz) und bleibt sie über längere Zeit (einige Sekunden bis Minuten) konstant? Der erste Punkt wurde durch mit der Auslenkung synchronisierte Mehrfachbelichtungen untersucht. Das Ergebnis zeigt Abb.10 für 25- bzw. 120fache Belichtung. Die Helligkeitsverteilung verdeutlicht die zeitliche und örtliche Streuung, die für fast alle Teilchen (> 60 %) weniger als 1/10 des Durchmessers beträgt. Die verbleibenden Abweichungen werden u.a. von Druckschwankungen im Anregungsstopf und Gasentladungen zwischen Lade- und Ablenkelektrode hervorgerufen.

Einmal einjustiert, blieb die Auslenkung über mehrere Minuten stabil, durch leichtes Nachjustieren (ca. jede Minute) liess sich ein kontinuierlicher Betrieb über 15 - 20 Minuten aufrecht erhalten, begrenzt durch das Fassungsvermögen des Vorratsbehälters.

c) Druckbereich

Im Hinblick auf die eingangs erwähnten Anwendungen wurde untersucht, unter welchen Druckbedingungen die Erzeugung und Selektion mit der beschriebenen Anlage durchführbar ist.

Bei Normaldruck (≈ 760 Torr) im Volumen V1 und V2 (siehe Abb.4) ergaben sich keine Schwierigkeiten. Zunächst wurde nun versucht, den Druck in V2 zu erniedrigen, während in V1 weiterhin Normaldruck herrschte. Ein Einschleusen der Tröpfchen durch die Blende in V2 gelang nicht. Durch die Gasströmung in der Blende werden die Teilchen gegen die Wand geschleudert oder zerrissen, wenn der Druck P2 in V2 kleiner als P1/10 wird.

Grundsätzlich hat man die Möglichkeit, die Drucksprünge in den ersten Stufen des Pumpsystems so niedrig zu halten, dass diese Effekte vermieden werden. Einfacher ist es jedoch, den Druck P1 bei der Teilchenerzeugung in V1 kleiner zu machen, um die Gasströmung in der ersten Blende abzuschwächen.

Eine Erzeugung von Tröpfchen bei Drucken kleiner als dem Tripelpunkt der Flüssigkeit entsprechend (4,7 Torr für H₂O bzw. ca. 50 Torr für H₂) ist nicht durchführbar, da entweder der Strahl schon in der Austrittsöffnung gefriert, oder die Tröpfchen wegen der schnellen Abkühlung platzen.

Reguliert man P1 auf 2 ... 5 Torr, so lässt sich P2 auf ca. 0,1 Torr senken. Unter diesen Bedingungen entstand Abb.11, die durch Mehrfachbelichtung (15 Blitze von je 20 μ sec Dauer, daher die verwischten senkrechten Konturen) 15 cm hinter der ersten Blende aufgenommen wurde. An dieser Stelle sind die Tröpfchen hinter der Kühlfalle schon gefroren. Die zeitliche und örtliche Streuung

der in dem 2,5 x 2,5 mm grossen Gebiet fotografierten Tröpfchen entspricht der in Abb.9 und 10, wenn man die Geometrieeffekte berücksichtigt. Die ausserhalb liegenden Teilchen können z.B. durch Kollision mit Bruchstücken zerplatzender Neutralteilchen abgelenkt worden sein. Die beobachtete seitliche Streuung der Teilchen (2,5 mm auf 15 cm Weg) würde ohne weitere Massnahmen dazu führen, dass nur relativ selten ein Teilchen den Brennfleck des Lasers (Durchmesser \leq Teilchendurchmesser) passieren würde. In einer folgenden Ausbaustufe der Quelle müsste durch Abbildung der Düse in den Brennfleck des Lasers (wie bereits in der Einleitung erwähnt) dafür gesorgt werden, dass die Teilchenbahnen sich im Brennfleck schneiden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein Modell einer kontinuierlichen Teilchenquelle für Plasmaerzeugung mit repetitiv gepulsten Lasern gebaut und erprobt. Die Quelle wurde mit Wasser betrieben; es wurden Wassertröpfchen mit einem Durchmesser von 150 - 400 μ und einer Folgefrequenz von 3 - 24 kHz erzeugt. Die Tröpfchen wurden elektrisch geladen; durch Synchronisation der Ladespannung mit dem Tröpfchengenerator konnten einzelne Tröpfchen in kontrollierter Weise abgelenkt und durch eine Lochblende geführt werden. Zur Simulation der Injektion von Tröpfchen ins Vakuum wurde unterhalb dieser Blende abgepumpt; in das mit den eingesetzten Pumpen erreichbare Vakuum von 0,1 Torr konnten die Tröpfchen ohne Schwierigkeiten eingeschleust werden.

An dem hier beschriebenen Versuchsaufbau fehlt noch ein vollständiges differentielles Pumpsystem, das die Einschleusung von Teilchen ins Hochvakuum (10^{-6} Torr) erlaubt, sowie eine elektrostatische Fokussierung des Teilchenstrahls in den Brennfleck des Lasers. Spezifische Probleme der Erzeugung von Teilchen aus Deuterium wurden hier nicht untersucht; eine solche Quelle muss die notwendigen Einrichtungen für die Handhabung flüssiger Gase bei tiefen Temperaturen besitzen. Obwohl also noch Probleme beträchtlichen Umfangs zu lösen sind, konnte das Prinzip einer

solchen Quelle demonstriert und praktische Erfahrungen mit einer Reihe von wichtigen Komponenten gesammelt werden.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- 1 J. M. Dawson, Phys. Fluids 7, 981 (1964)
- 2 A.F. Haught, D.H. Polk and W.J. Fader, Phys. Fluids 13, 2842 (1970)
- 3 E.W. Sucof, J.L. Pack, A.V. Phelps, A.G. Engelhardt, Phys. Fluids 10, 2035 (1967)
- 4 E. Fabre, H. Lamain, Phys. Lett. 29A, 497 (1969)
- 5 M.J. Lubin, H.S. Dunn, W. Friedmann, in Plasma physics and controlled nuclear fusion research, Intern. Atomic Energy Agency, Vienna 1969, Vol. 1, p. 945
- 6 J.P. Bayard, J.P. Boujot, M. Mattioli, J.L. Soulé, Int. Rep. EUR-CEA-FC548, Fontenay-aux-Roses 1970
- 7 R.G. Tuckfield, F. Schwirzke, Plasma Phys. 11, 11 (1969)
- 8 U. Ascoli-Bartoli, B. Brunelli, A. Caruso, A. de Angelis, G. Gatti, R. Gratton, F. Parlange, H. Salzmann, in Plasma physics and controlled nuclear fusion research, Intern. Atomic Energy Agency, Vienna 1969, Vol. I, P. 923
- 9 G. Francis, D.W. Atkinson, P. Avivi, J.E. Bradley, C.D. King, W. Millar, P.A.H. Saunders, A.F. Taylor, Phys. Lett. 25A, 486 (1967)
- 10 H. Krause, P. Sachsenmaier, H. Salzmann, R. Sigel, Int. Rep. IPP IV/3 Garching 1970
- 11 N.Y. Peacock, R.S. Pease, Culham, Report CLM-P 196
- 12 Lord Rayleigh, Proc. Roy. Soc. (London) 29, 71 (1879)
- 13 L. Bergmann, Der Ultraschall, 5. Aufl. S. Hirzel Verlag, Stuttg.

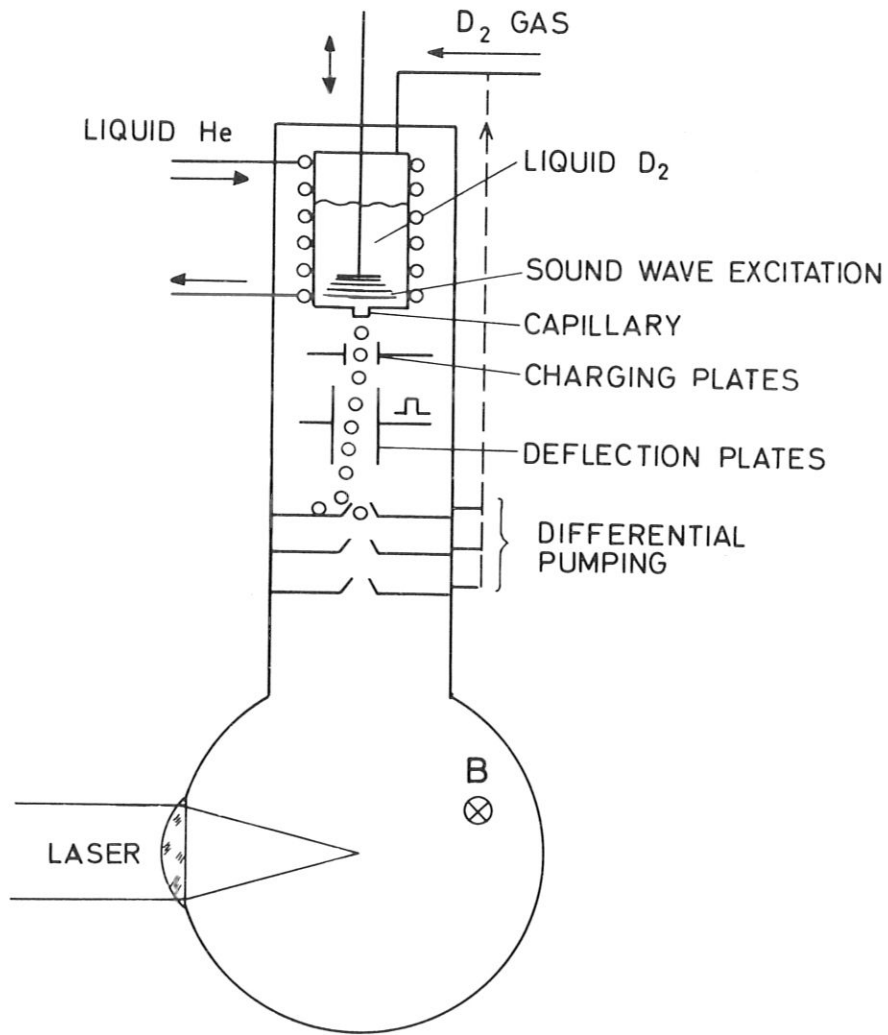


Abb. 1 Prinzip einer kontinuierlichen Teilchenquelle

SELBSTAUFSPALTUNG



Abb. 2
Selbstaufspaltung
eines Flüssigkeits-
strahls

PERIODISCHE ANREGUNG

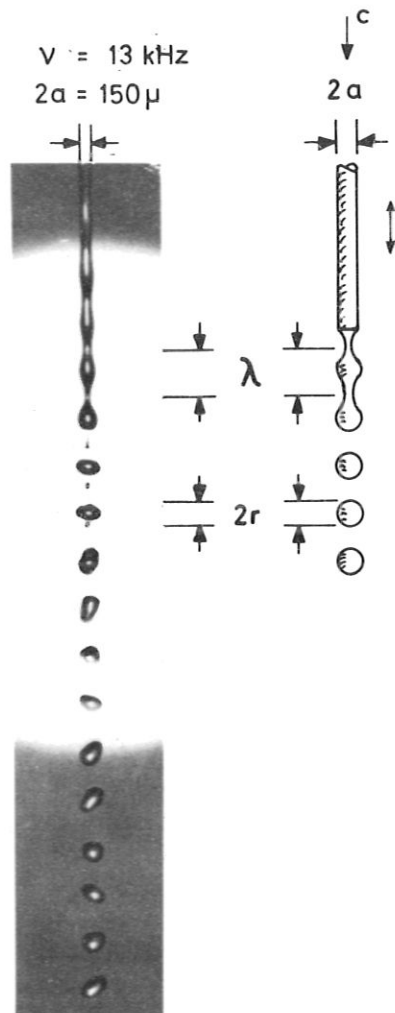


Abb. 3
Periodische Anregung:
 c = Strömungsgeschw.,
 $2a$ = Strahldurchmesser,
 λ = Wellenlänge,
 $2r$ = Tröpfchendurchm.

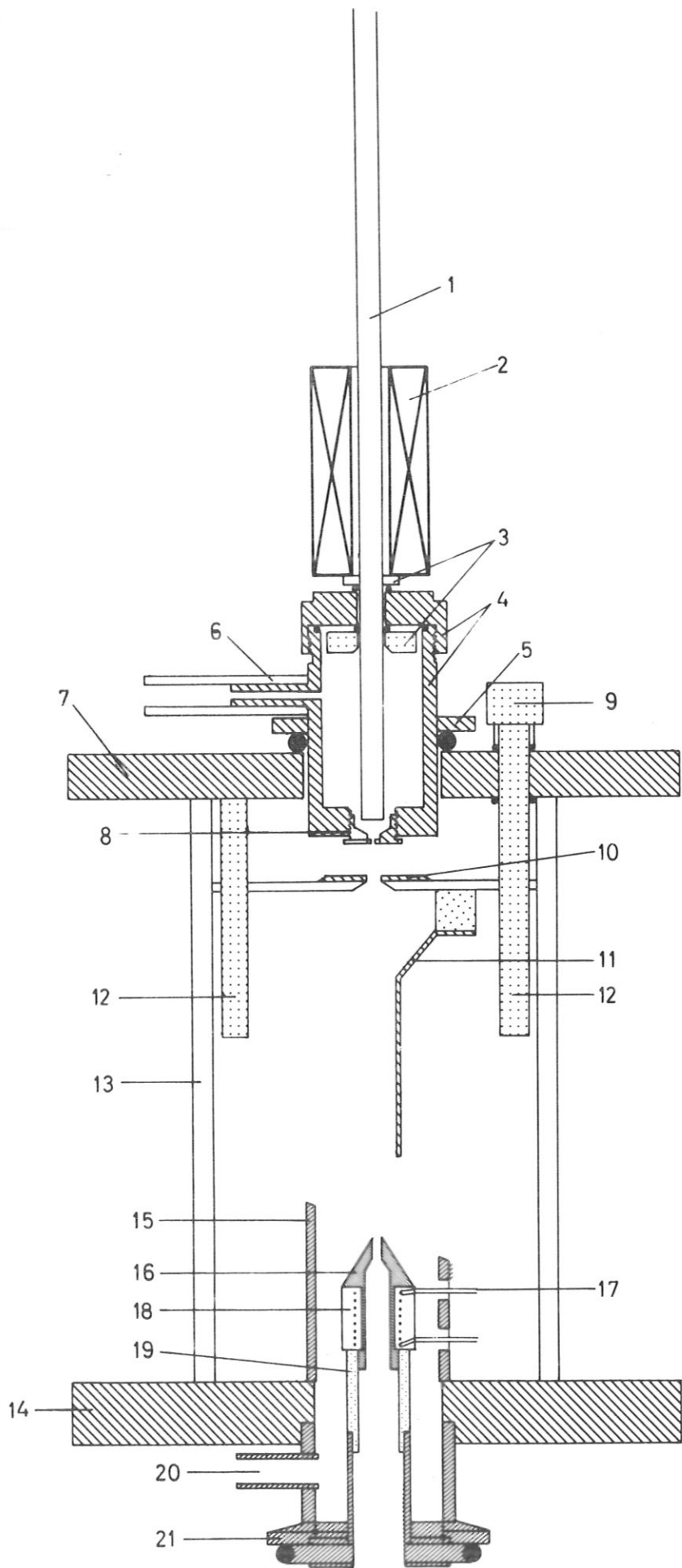


Abb. 4

Schematischer Aufbau
der Teilchenquelle

- 1) Nickelstab
- 2) Anregungsspule
- 3) Stabhalterung
- 4) Anregungstopf mit Deckel
- 5) Topflagerung auf O-Ring zur Strahljustierung
- 6) Nachfüllstutzen
- 7) Deckplatte
- 8) Schraubbare Uhrsteinhalterung
- 9) Drehknopf zur Höhenverstellung der Elektroden
- 10) Ladeelektrode
- 11) Ablenkelektrode
- 12) Führungsstangen
- 13) Plexiglaswand
- 14) Bodenplatte
- 15) Auffangrohr für Neutralteilchen
- 16) Kupferblende
- 17) Heizstromzuführung
- 18) Heizwicklung
- 19) Keramikrohr zur Wärmeisolation
- 20) Absaugrohr für Neutralstrahl
- 21) Flanschverbindung zur Pumpe

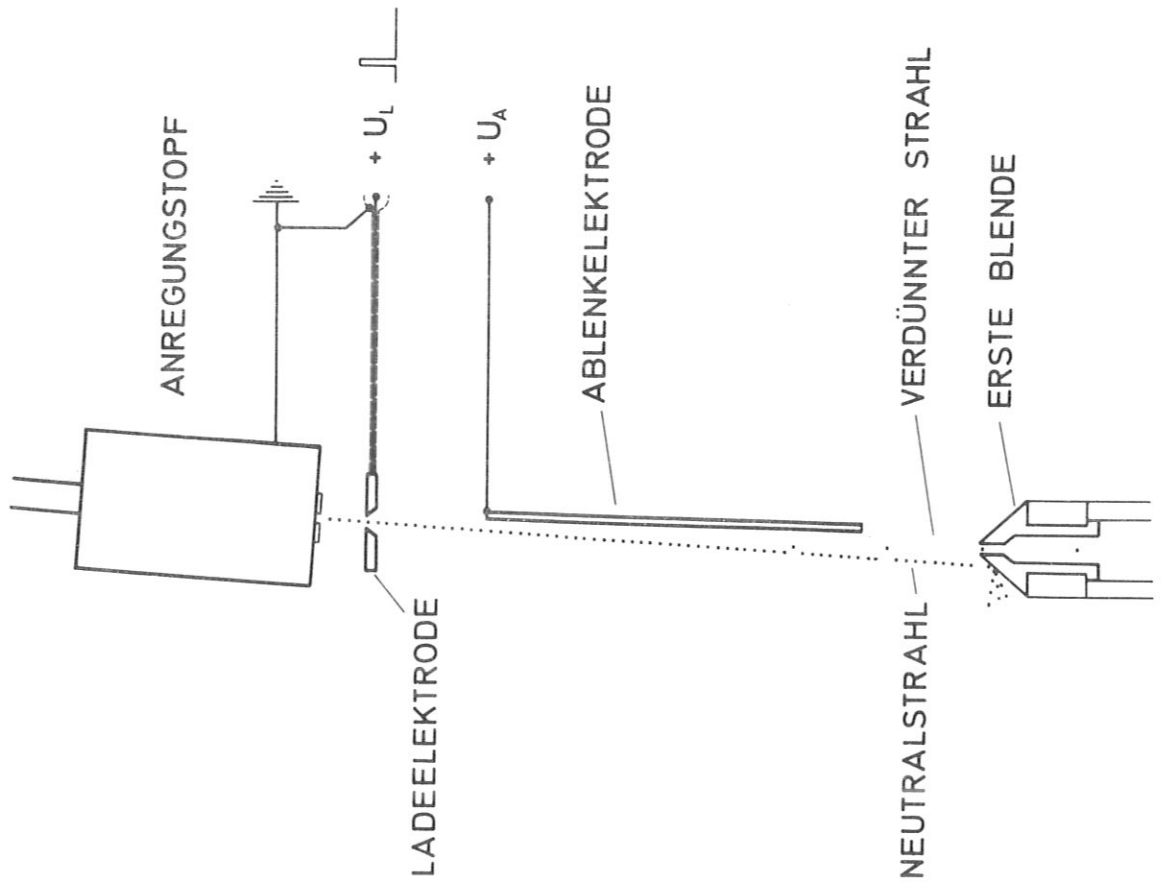


Abb. 6 Prinzip der Teilchenselektion durch gepulste Aufladung

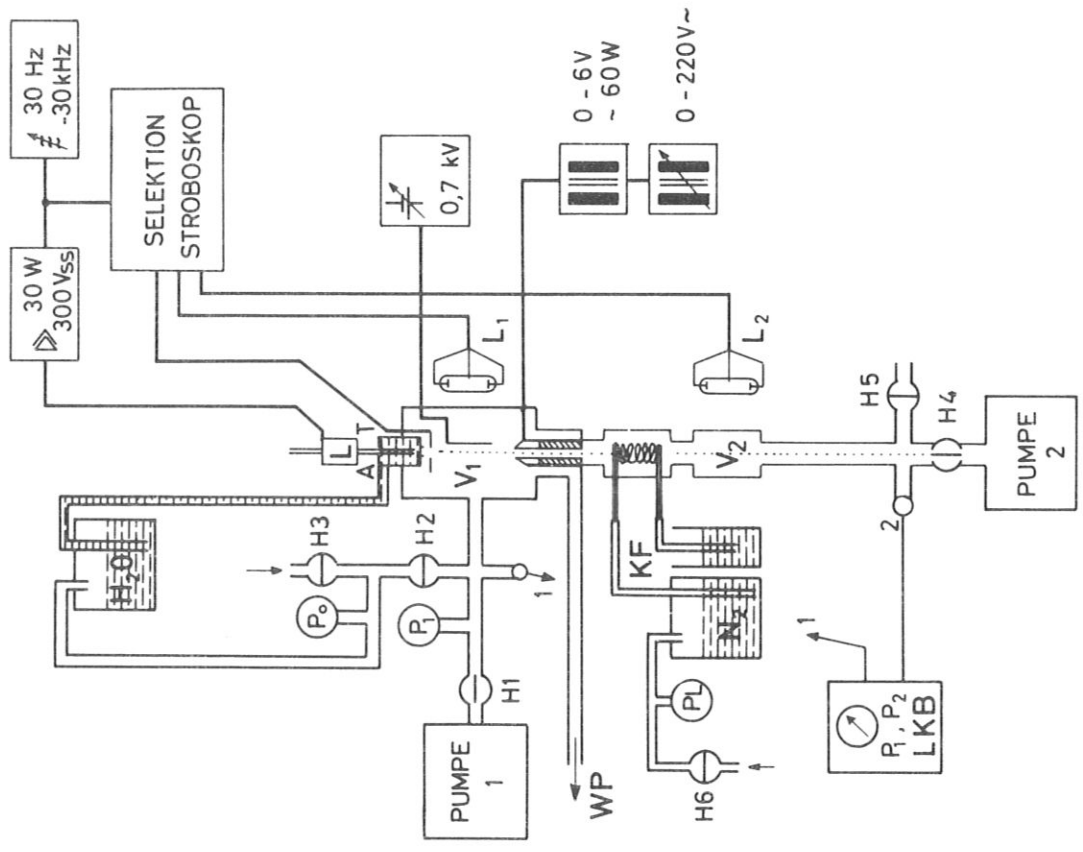


Abb. 5 Funktionsschema der Teilchenquelle

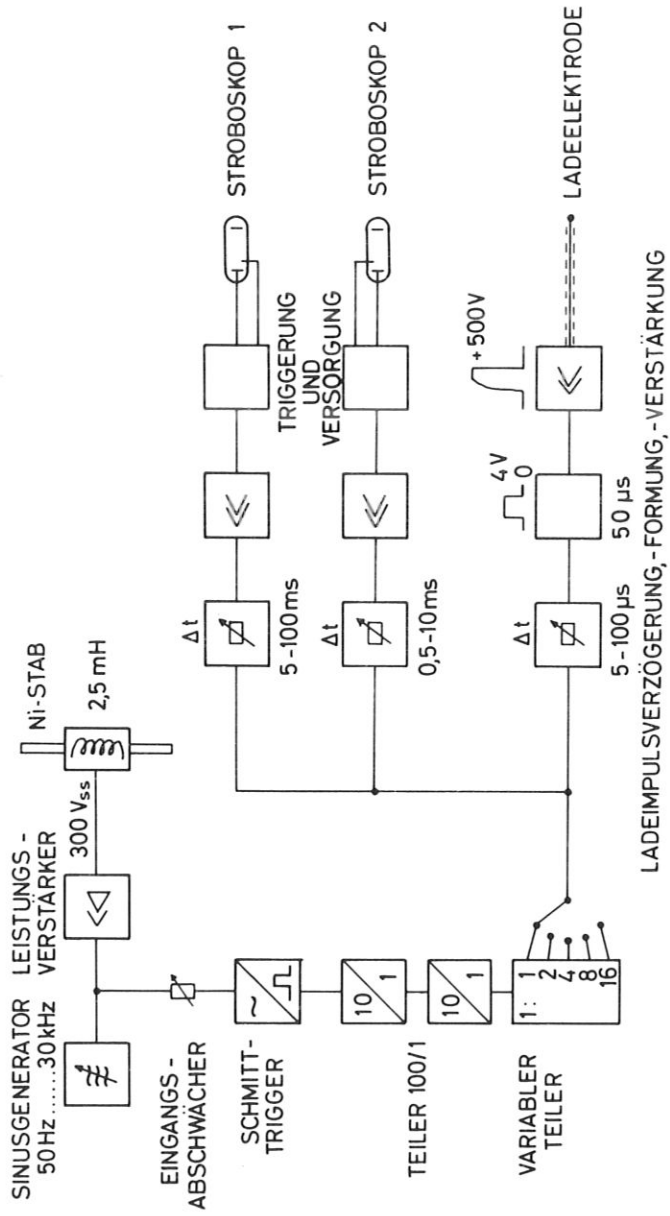
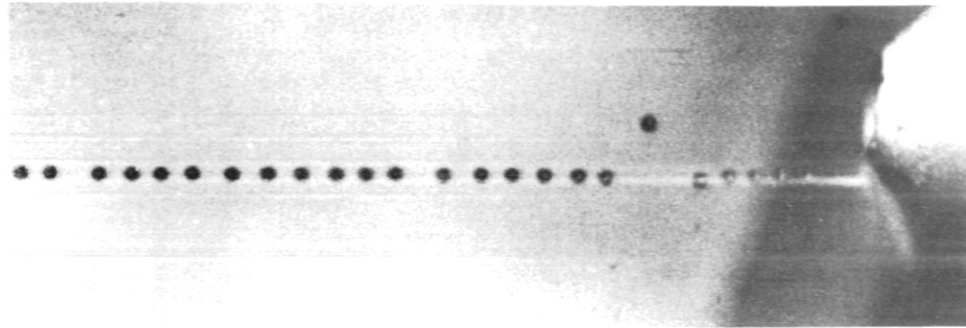


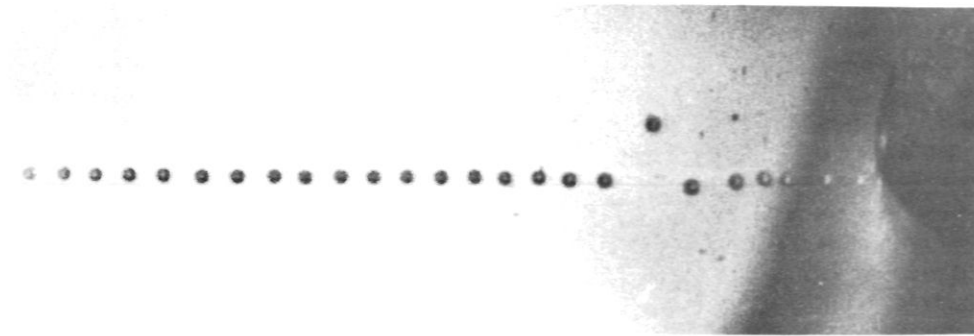
Abb. 7 Prinzipschaltbild der Steuerelektronik

≈ 600 μ



1,5 mm

a



1,5 mm

b

Abb. 8 Auslenkung eines Tröpfchens, Belichtungszeit ca. 0,5 μsec

Abb. 9 Justierung des Strahls auf die Blende

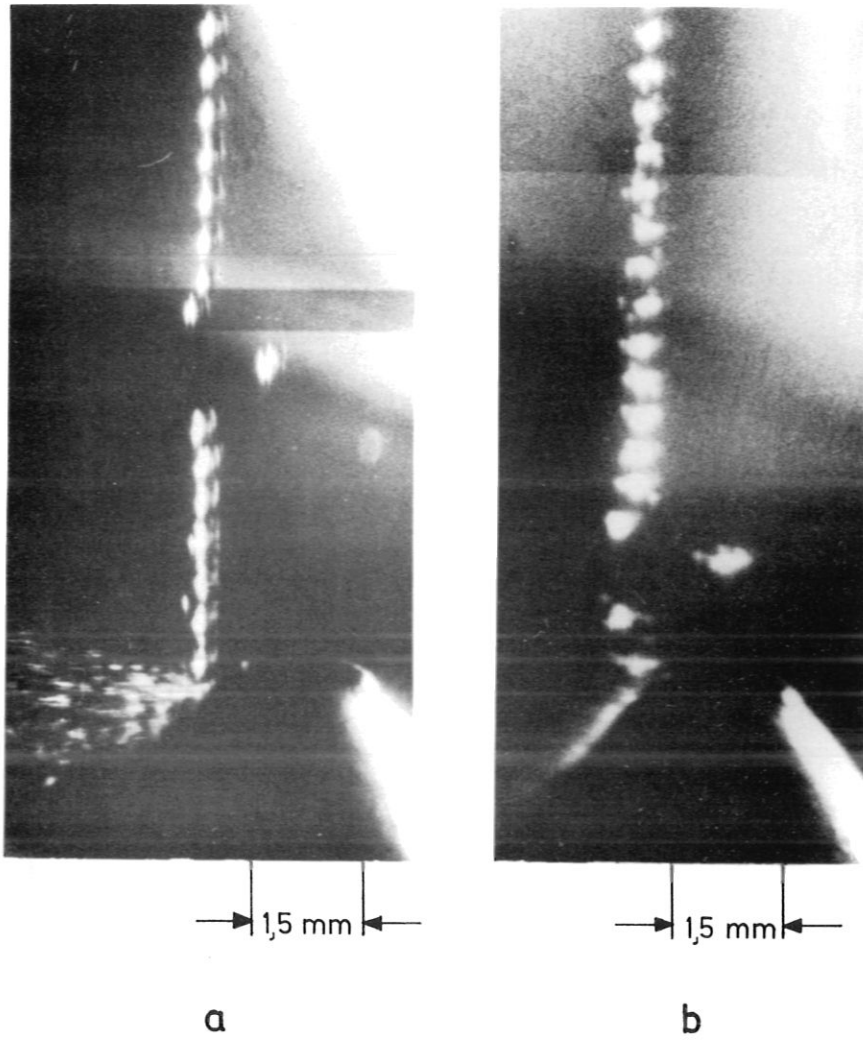


Abb. 10a 25-fache Belichtung; 10b 120-fache Belichtung zur Bestimmung der Langzeitstabilität

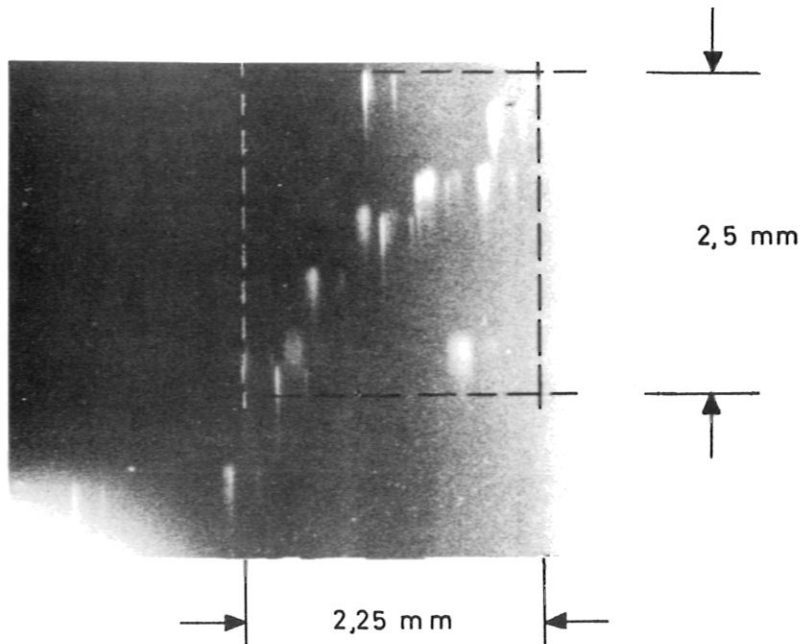


Abb. 11 15-fache Belichtung von Tröpfchen ca. 15 cm hinter der ersten Blende