

# INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Herstellung kleiner Wasserstoffteilchen  
zur Plasmaerzeugung durch fokussierte  
Laserstrahlung

Small Solid Hydrogen Pellets made  
for Plasma Production by Laser

H. Krause, P. Sachsenmaier  
H. Salzmann, R. Sigel

IPP IV/3

Februar 1970

*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.*

IPP IV/3 H. Krause  
P. Sachsenmaier  
H. Salzmänn  
R. Sigel

Small Solid Hydrogen Pellets made  
for Plasma Production by Laser.

February 1970 (in German)

Abstract

An apparatus for producing small hydrogen pellets and injecting them into a vacuum is described. The diameter of the pellets is between 50 - 80  $\mu$ . The apparatus will be useful for plasma production by evaporating the pellets with a giant pulse laser.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. <u>Einleitung</u> .....	1
II. <u>Beschreibung der Apparatur</u> .....	3
III. <u>Experimentelle Ergebnisse</u> .....	7
1. Betrieb der Apparatur .....	7
2. Teilchenphotographie und Triggerung .....	8
3. Teilchenabmessungen .....	9
4. Teilchengeschwindigkeit .....	10
5. Teilchenstreuung .....	10
6. Druckverlauf im Vakuumkessel .....	10
IV. <u>Trefferwahrscheinlichkeit</u> .....	12
V. <u>Schluss</u> .....	13
<u>Literaturverzeichnis</u> .....	14

### I. Einleitung

Fokussiert man die intensive Strahlung eines RiesenimpulsLasers auf feste Materie, so wird diese von der Oberfläche her aufgeheizt, verdampft und ionisiert. Die entstehende Plasmawolke expandiert in den freien Raum vor dem Target. Mit diesem Verfahren der Plasmaerzeugung sollte es möglich sein, Magnetfeldkonfigurationen mit einem extrem sauberen Plasma zu füllen. Von besonderem Interesse für die Fusionsforschung ist die Möglichkeit, ein reines Wasserstoff- oder Deuteriumplasma zu erzeugen. In dieser Arbeit soll eine Apparatur beschrieben werden, mit der kleine Wasserstoff- bzw. Deuteriumteilchen hergestellt und in ein Vakuum gebracht werden können. Dort sollen sie mit Hilfe eines RiesenimpulsLasers verdampft und ionisiert werden. Angestrebt wird eine vollständige Verdampfung und Ionisierung des Teilchens, sodass keine "unverbrannten" Reste störend zurückbleiben. Aus dieser Forderung, die in den bisherigen Experimenten mit Wasserstoffteilchen nicht erfüllt werden konnte, ergeben sich folgende Bedingungen bezüglich Teilchengrösse, Laserleistung, Laser-Pulsdauer und Brennfleckgrösse /1/:

- 1) Es darf keine unverbrannte Materie aus dem Brennfleck entweichen. Expandiert die unverbrannte Materie mit der Geschwindigkeit  $c_1$ , so muss gelten:

$$r_L \geq r_0 + c_1 t_B \quad (1) \quad \begin{array}{l} r_L = \text{Radius des Brennflecks} \\ r_0 = \text{Teilchenradius} \end{array}$$

$$\text{oder } f = r_L - r_0 - c_1 t_B \geq 0 \quad (1a) \quad t_B = \text{Brennzeit}$$

Für die Brennzeit gilt die Beziehung  $t_B = \frac{r_0}{c_1} \left[ \left( \frac{6 \rho_0}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right]$

wobei  $\rho_1 \approx \rho_0 \approx 0,1 \text{ g cm}^{-3}$  (Dichte von festem  $H_2$ )

$$c_1 \approx v_2 \sqrt{\rho_2 / \rho_1}$$

und  $v_2 \approx (a r)^{1/9} \phi^{2/9}$  ,  $\rho_2 \approx (a r_0)^{-1/3} \phi^{1/3}$ .

Hierbei ist  $\phi = \frac{P}{\pi r_L^2}$   $P = \text{Laserleistung}$

und  $a = 4 \cdot 10^{29}$  cgs für Wasserstoff bei der Wellenlänge des Rubinlasers

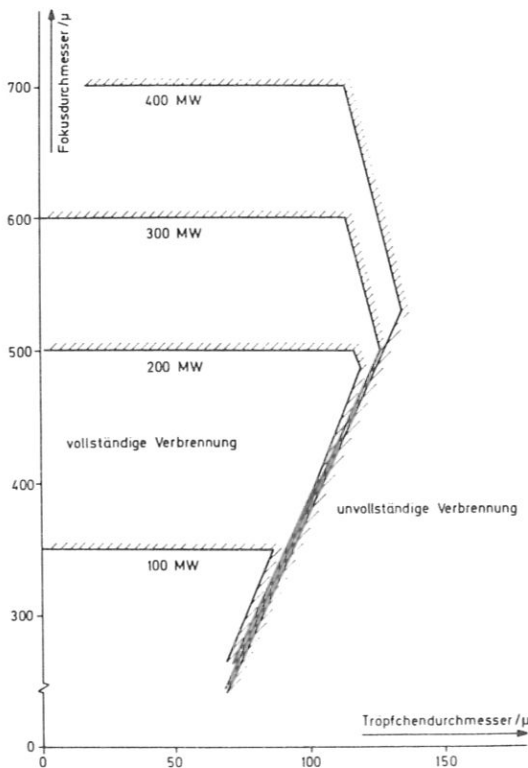
2) Die Impulsdauer  $t_L$  des Lasers muss grösser als die Brenndauer  $t_B$  für vollständige "Verbrennung" sein:

$$t_L \geq t_B \quad (2)$$

3) Die Theorie /1/ soll anwendbar sein. Dazu muss die Energieflussdichte  $\phi$  grösser als  $10^{17}$  erg sec<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> sein:

$$\phi \geq 10^{17} \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \quad (3)$$

Die Bedingung (1a) wurde numerisch für 3 verschiedene Teilchendurchmesser - 80  $\mu$ , 100  $\mu$  und 120  $\mu$  - ausgewertet. Bei festgehaltener Laserleistung (100 MW - 1 GW) wurde der Brennfleckdurchmesser in Schritten von 20  $\mu$  zwischen 60 und 700  $\mu$  variiert und jeweils  $f$  bestimmt. Ferner wurde die zugehörige Brenndauer  $t_B$  (zu Bed. (2)) und die Energieflussdichte  $\phi$  (zu Bed. (3)) berechnet.



In Abb. 1 sind sämtliche drei Bedingungen für eine Laserleistung von 100, 200, 300 und 400 MW dazu verwendet worden, die Bereiche vollständiger Verbrennung abzugrenzen.

Hieraus ergibt sich, dass für nicht extrem hohe Laserleistungen die Grösse der Wasserstoffteilchen höchstens etwa 100  $\mu$  Durchmesser betragen darf, wenn man eine vollständige "Verbrennung" erreichen will.

Abb. 1  
Bereiche vollständiger Verbrennung des Teilchens

## II. Beschreibung der Apparatur

Wasserstoffgas kann durch Abkühlung mit Hilfe von flüssigem Helium in den festen Zustand übergeführt werden. (Siedepunkt unter Atmosphärendruck  $20,39^{\circ}\text{K}$ , Tripelpunkt  $13,95^{\circ}\text{K}$ , Dampfdruck bei  $4,2^{\circ}\text{K}$  (Temperatur des siedenden Heliums)  $3,3 \cdot 10^{-7}$  Torr).

In der Literatur wurden bereits verschiedene Apparaturen beschrieben, die es gestatten, festen Wasserstoff in Form kleiner Teilchen herzustellen und in den Brennpunkt eines Laserstrahles fallen zu lassen /2 und 3/. Diese Apparaturen enthalten eine Kondensationsfläche, die im Wärmekontakt mit einem Bad flüssigen Heliums steht. Wird Wasserstoffgas eingelassen, so kondensiert dieses auf der Kühlfläche als "Wasserstoffschnee" unbekannter Dichte. Der feste Wasserstoff wird anschliessend mechanisch komprimiert und dann in Form kleiner Teilchen in die Vakuumkammer ausgestossen. Auf diese Weise konnten freifallende Teilchen mit linearen Abmessungen von etwa  $250 \mu$  hergestellt werden.

Die im folgenden zu beschreibende Apparatur unterscheidet sich in einigen wesentlichen Punkten von den erwähnten Apparaturen. Die Abkühlung des Wasserstoffgases erfolgt nicht im Kontakt mit einem Heliumbad, sondern durch strömendes Helium (Verdampferkryostat). Durch Drosseln des Heliumdurchflusses lässt sich die Temperatur der Kondensationsfläche zwischen ungefähr  $4^{\circ}\text{K}$  und Raumtemperatur beliebig regeln. Dies ermöglicht es, das Wasserstoffgas unter Durchlaufen der flüssigen Phase in den festen Zustand überzuführen. Es entsteht daher fester Wasserstoff von kristalliner Struktur und bekannter Dichte. Die Vorgänge an der Kondensationsfläche können dabei von aussen beobachtet werden. Durch ein Führungsrohr wird der Streuwinkel der ausgestanzten Teilchen hinreichend kleingehalten. Die bis jetzt erreichte minimale Teilchengrösse liegt zwischen  $50$  und  $80 \mu$ . Neben der Möglichkeit, die Temperatur der Kühlfläche kontinuierlich zu ändern, erlaubt die Verwendung eines Verdampferkryostaten /4/ die Abkühlung des Kryostaten unter guter Ausnutzung der Enthalpie des Heliums. Ausserdem kann das Experiment jederzeit ohne Heliumverlust unterbrochen werden.

Die Gesamtapparatur ist in Abb. 2 dargestellt. Sie unterteilt sich in Vakuumpapparat, Heliumkreislauf und Verdampferkryostat mit eingebauter Stanzvorrichtung

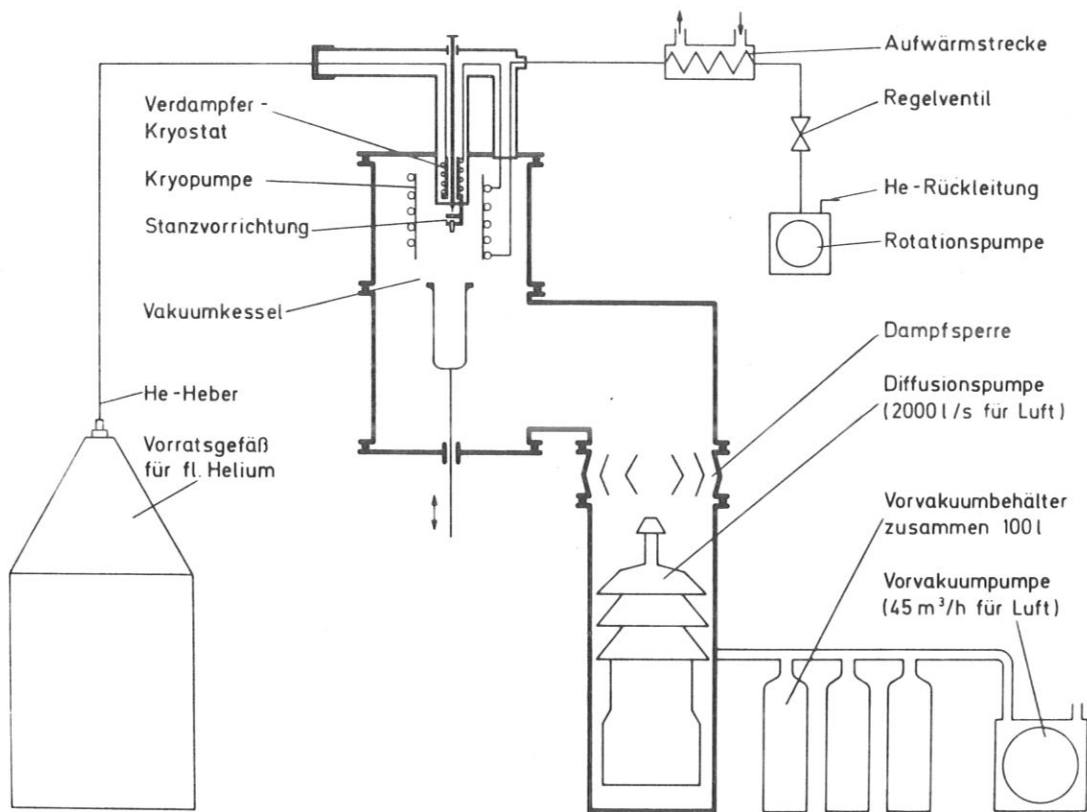


Abb. 2 Vakuumpapparat, Heliumkreislauf und Verdampferkryostat (schematisch)

Vakuumpapparat: Die Vakuumkammer wird von einer Diffusionspumpe mit vorgeschaltetem Vorvakuumbehälter und Vorvakuumpumpe evakuiert. Die Diffusionspumpe wird durch eine Kryopumpe in ihrer Wirkung unterstützt. Im abgekühltem Zustand beträgt der Druck im Vakuummessel etwa  $1 \cdot 10^{-6}$  Torr.

Heliumkreislauf: Am Ende der Heliumleitung erzeugt eine Rotationspumpe Unterdruck. Unter dessen Wirkung steigt flüssiges Helium aus dem Vorratsbehälter in den Verdampferkryostaten mit eingebauter Stanzvorrichtung, durchfließt anschliessend die Kryopumpe und wird dann in einer Aufwärmstrecke auf Zimmertemperatur erwärmt. Ein Regelventil ermöglicht es, den Heliumfluss und damit die Temperatur der Kondensationsfläche zu regeln.

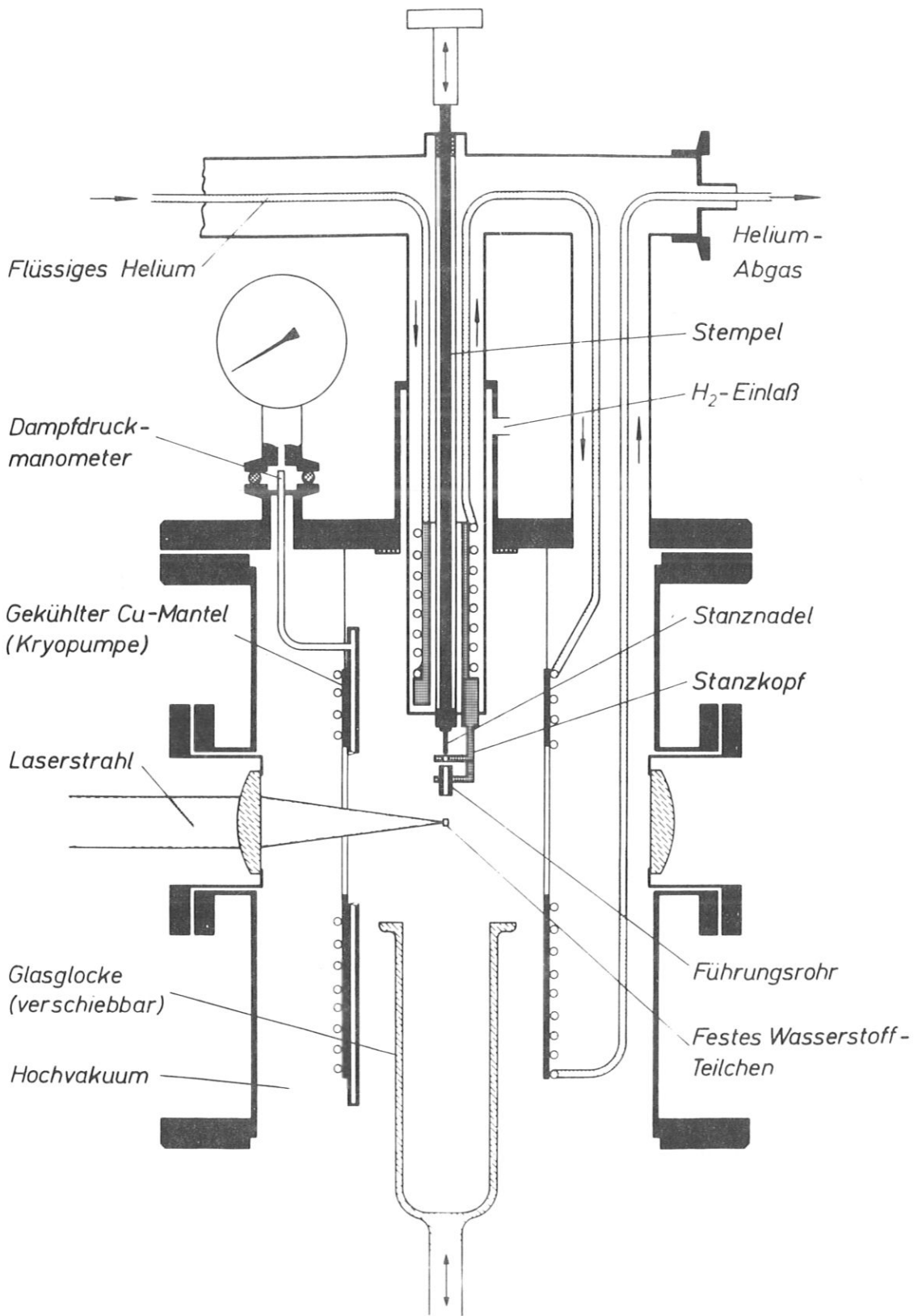


Abb. 3 Verdampferkryostat



Verdampferkryostat: Abb. 3 zeigt einen Schnitt durch den Verdampferkryostaten. Dieser ist ähnlich aufgebaut wie die Apparatur zur Herstellung der Wasserstofffolien, die in /5/ beschrieben wurde. In dem evakuierten Gehäuse des Verdampferkryostaten befindet sich der Kühlkopf. Dieser Kühlkopf ist ein dickwandiger, hohler Kupferblock, auf dem eine dichtgewickelte Kupferrohrspirale mit 3 mm Innendurchmesser hart aufgelötet ist. In diese Kühlschlange strömt flüssiges Helium und verdampft dort. Am unteren Ende des Kühltopfes befindet sich die Stanzvorrichtung zur Herstellung der Wasserstoffteilchen. Der Raum um den Stanzkopf kann durch eine verschiebbare Glasglocke vom Hochvakuum abgetrennt werden. Nach Verlassen der auf dem Kupferblock aufgelöteten Kühlschlange durchströmt das noch kalte Helium eine zweite Kühlschlange, die auf einen Kupfermantel aufgelötet ist. Dieser befindet sich im Hochvakuum und dient als Kryopumpe. Die Temperatur dieses Kupfermantels kann mit einem Dampfdruckmanometer gemessen werden.

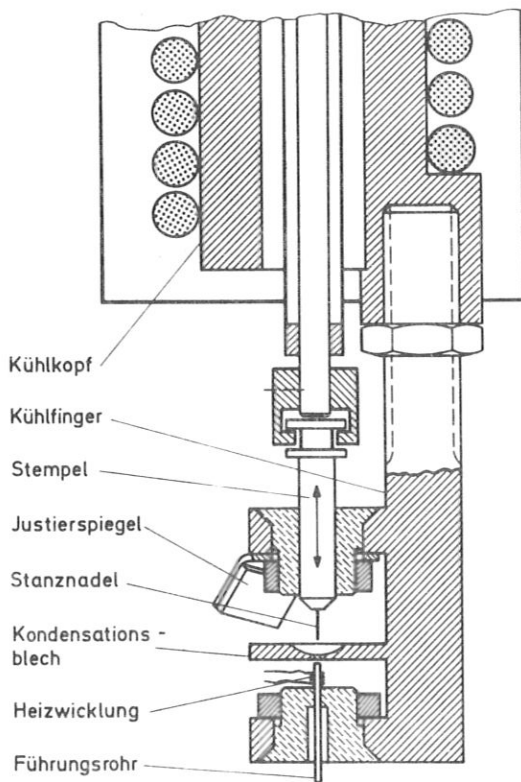


Abb. 4 Stanzvorrichtung

Die in Abb. 4 im Schnitt dargestellte Stanzvorrichtung ist aus Kupfer gefertigt und in den Kühlkopf eingeschraubt. Die Konstruktion der Stanzvorrichtung ermöglicht es, den Stempel mit der Stanznadel, die Bohrung im Kondensationsblech sowie das Führungsrohr so anzuordnen, dass sie genau fluchten. Der Schaft des Stempels ist durch eine Kupplung unterbrochen, um Verklebungen durch thermische Spannungen, die als Folge der Abkühlung auftreten, zu vermeiden. Der Stempel wird durch eine Führung aus Edelstahl spielfrei geführt. Der Durchmesser der Stanznadel beträgt 0,1 mm. Die Bohrung in dem als Kondensationsblech bezeichneten Teil der Stanzvorrichtung hat einen Durchmesser und eine Höhe von ebenfalls 0,1 mm. Das

8 mm lange Führungsrohr mit einem Innendurchmesser von 0,14 mm kann

durch eine Heizwicklung gegenüber der Umgebung angewärmt werden. Die Einführung der Stanznadel in die Bohrung des Kondensationsbleches wird mit Hilfe eines Justierspiegels kontrolliert.

Zur Herstellung eines Wasserstoffteilchens wird die Glasglocke nach oben geschoben (Abb. 2). Sie trennt damit einen Raum um die Stanzvorrichtung vom Hochvakuum ab, in den Wasserstoffgas mit einem Druck zwischen 500 und 900 Torr eingelassen wird. Die Abkühlung des Wasserstoffgases wird durch Einschalten der Rotationspumpe in Gang gesetzt und kann am Dampfdruck, der im Kondensationsraum herrscht, verfolgt werden. Die Vorgänge während der Abkühlung können von aussen durch die Glasglocke hindurch beobachtet werden. Der Fülldruck und das Volumen der Glasglocke sind so gewählt, dass sich bei der Abkühlung zunächst ein Film flüssigen Wasserstoffs auf der Kondensationsfläche niederschlägt. Infolge der Oberflächenspannung füllt sich die Bohrung in der Kondensationsfläche ebenfalls mit flüssigem Wasserstoff. Bei weiterer Abkühlung geht der flüssige Wasserstofffilm in den festen Zustand über. Der Dampfdruck unter der Glasglocke sinkt bei weiterer Abkühlung stark ab. Anschliessend wird die Glasglocke weggezogen. In der Bohrung des Kondensationsbleches verbleibt ein Teilchen aus festem Wasserstoff in der Form eines Zylinders von 0,1 mm Durchmesser und 0,1 mm Länge. Mit Hilfe des von Hand betätigten Stempels wird das Wasserstoffteilchen in das vorher durch die Heizwicklung leicht angewärmte Führungsrohr gedrückt. Bei der Berührung mit dem Führungsrohr verdampft ein geringer Teil des Wasserstoffteilchens. Das hierbei entstehende Wasserstoffgas treibt das Teilchen nach unten aus dem Führungsrohr.

### III. Experimentelle Ergebnisse

#### 1. Betrieb der Apparatur

Für das Kaltfahren der Kryoanlage werden ungefähr 15 Minuten benötigt. Der Verbrauch an flüssigem Helium hierzu beträgt ca. 1 Liter. Anschliessend ist die Apparatur betriebsbereit. Die Herstellung fester Wasserstoffteilchen kann in Abständen von ungefähr 2 Minuten erfolgen. Zur Herstellung von 100 Teilchen werden weniger als 30 Liter flüssiges Helium benötigt.

## 2. Teilchenfotografie und Triggerung

Die unterhalb des Führungsrohres freifallenden Wasserstoffteilchen wurden in verschiedenen Abständen vom unteren Ende des Führungsrohres mit einer Bildwandlerkamera fotografiert. (Abb. 5)

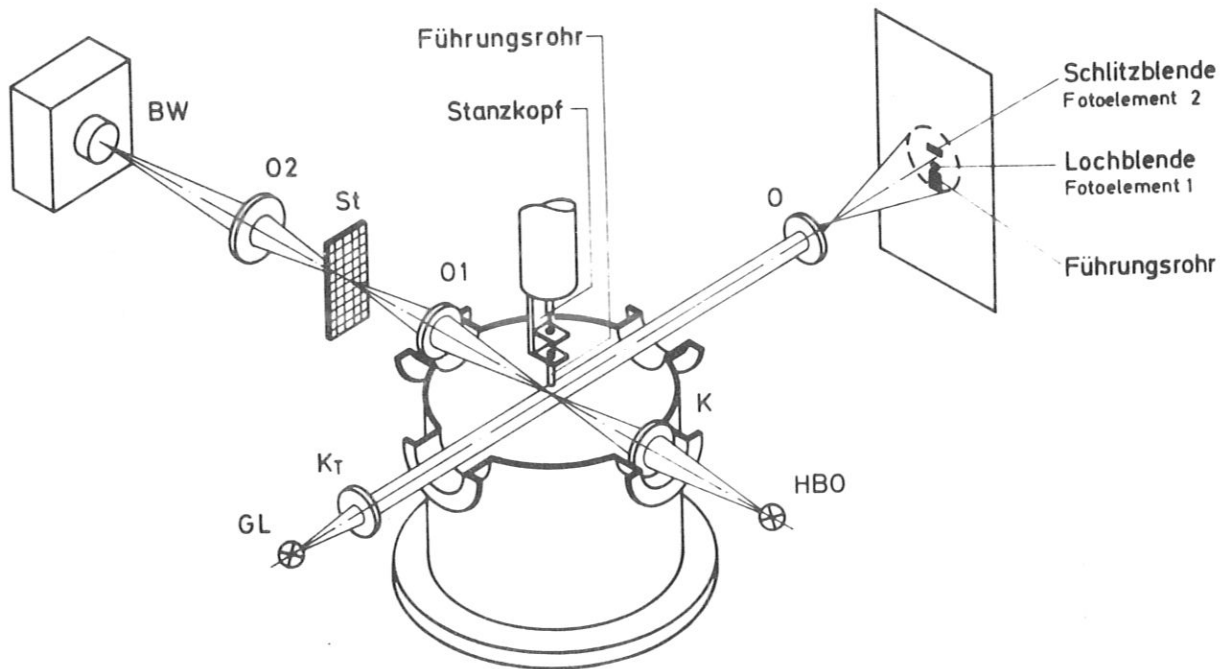


Abb. 5 Beobachtungs- und Triggerstrahlengang

Das Gesichtsfeld der photographischen Anordnung wurde mit einer Quecksilberhochdruckdampfampe HBO ausgeleuchtet. Zusammen mit dem Teilchen wurde ein Messraster St scharf auf den Film abgebildet. Die Belichtungszeit der Bildwandlerkamera betrug  $1 \mu\text{s}$ . Dabei wurden die Teilchen praktisch ohne Bewegungsunschärfe fotografiert. Senkrecht zum Beobachtungsstrahlengang befand sich ein Triggerstrahlengang. Mit Hilfe einer Linse O wurde das Ende des Führungsrohres auf einen Schirm abgebildet. Die Beleuchtung erfolgte mit Hilfe einer Glühlampe GL und eines Kondensators  $K_T$ . Unmittelbar unterhalb des Bildes des Führungsrohres befand sich im Schirm eine Lochblende, in einem variablen Abstand davon eine Schlitzblende. Hinter beiden Blenden befand sich je ein Foto-

element (Fotoelement 1 bzw. Fotoelement 2). Aus dem zeitlichen Abstand der beiden Fotosignale lässt sich die Geschwindigkeit des aus dem Führungsrohr austretenden Teilchens bestimmen. Das Signal des Fotoelementes 2 diente gleichzeitig zur Auslösung der Bildwandlerkamera.

### 3. Teilchenabmessungen

Die Grösse der Wasserstoffteilchen wurde aus den Bildwandleraufnahmen bestimmt. Abb. 6 zeigt eine Reihe von Aufnahmen für verschiedene Fülldrucke. Als Masstab dient der Aussendurchmesser des Führungsröhrchens (0,50 mm), dessen unteres Ende am oberen Bildrand zu sehen ist.

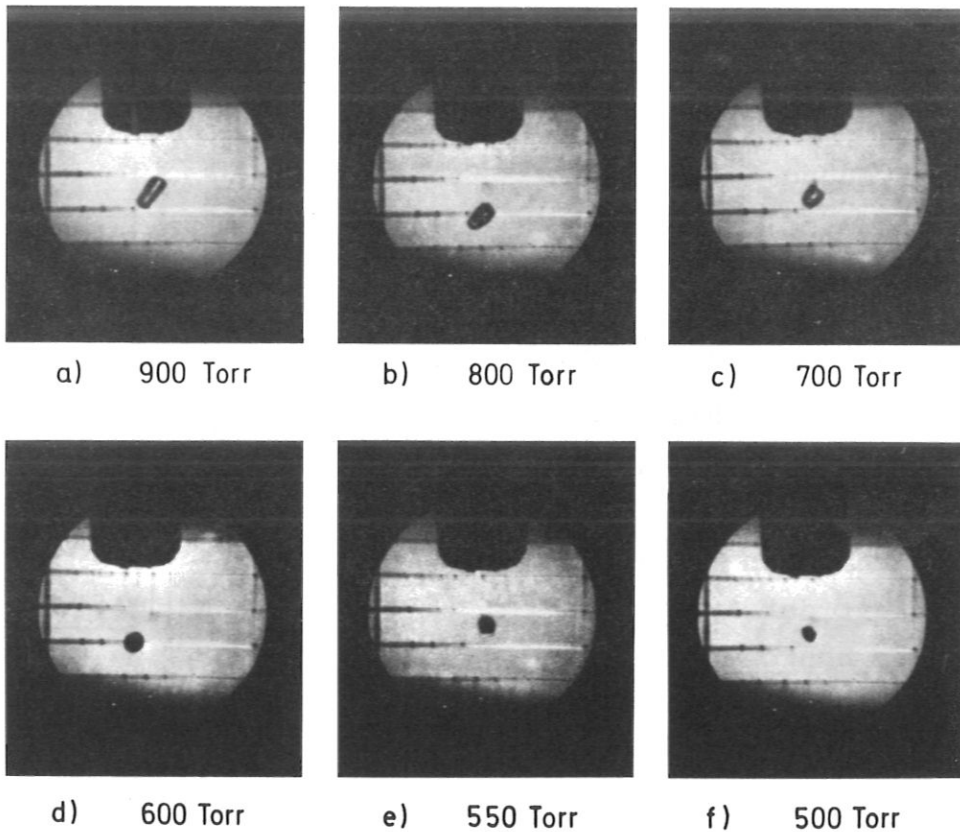


Abb. 6 Ausgestanzte Wasserstoffteilchen bei verschiedenem Gasfülldruck

Im Gegensatz zur Länge der zylindrischen Wasserstoffteilchen hängt ihr Durchmesser nur wenig vom Fülldruck ab und beträgt ca 80  $\mu$ . Die Länge der Teilchen beträgt beim Fülldruck von 900 Torr unge-

fähr das Doppelte des Durchmessers. Sie nimmt mit dem Fülldruck ab und wird bei ungefähr 500 Torr gleich dem Durchmesser der Teilchen. Durch passende Wahl des Fülldruckes und des Stromes in der Heizwicklung des Führungsrohres lassen sich Teilchen bis herunter zu 50  $\mu$  Durchmesser und Länge herstellen.

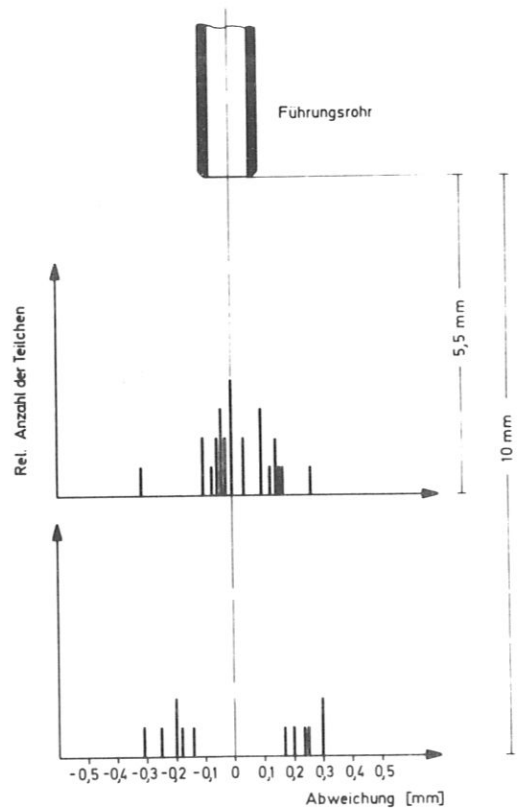
#### 4. Teilchengeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Teilchen wurde aus den Signalen der Fotoelemente ermittelt. Von den Teilchen, deren Grösse zwischen 60 und 80  $\mu$  liegt, haben 40 % eine Geschwindigkeit zwischen 5 und 6 m/sec. Wird das untere Ende des Führungsrohres mit der HBO-Lampe erwärmt, so steigt die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen auf 8 m/sec, wobei die Geschwindigkeitsstreuung der Teilchen abnimmt. Die Teilchengeschwindigkeit ist nur schwach von der Teilchengrösse abhängig. Teilchen mit einer Grösse zwischen 80 und 100  $\mu$  haben eine mittlere Geschwindigkeit von 7 m/sec.

#### 5. Teilchenstreuung

Aus den Bildwandlernaufnahmen wurde die seitliche Streuung der Teilchen in einem Abstand von 5,5 und 10 mm vom unteren Ende des Führungsrohres bestimmt (Abb. 7). Die Messungen deuten darauf hin, dass die Teilchenbahnen auf einen Hohlkegel mit der Spitze am Ausgang des Röhrehens liegen. Der Betrag der seitlichen Abweichung kann aus Abb. 7 entnommen werden.

Abb. 7  
Teilchenstreuung



#### 6. Druckverlauf im Vakuumkessel

Um zu überprüfen, ob das Wasserstoffteilchen tatsächlich in eine Vakuumatmosphäre fällt, wurde der Druckverlauf im Vakuumkessel

während der Teilchenherstellung mit einem geeichten offenen Ionisationsmanometer gemessen.

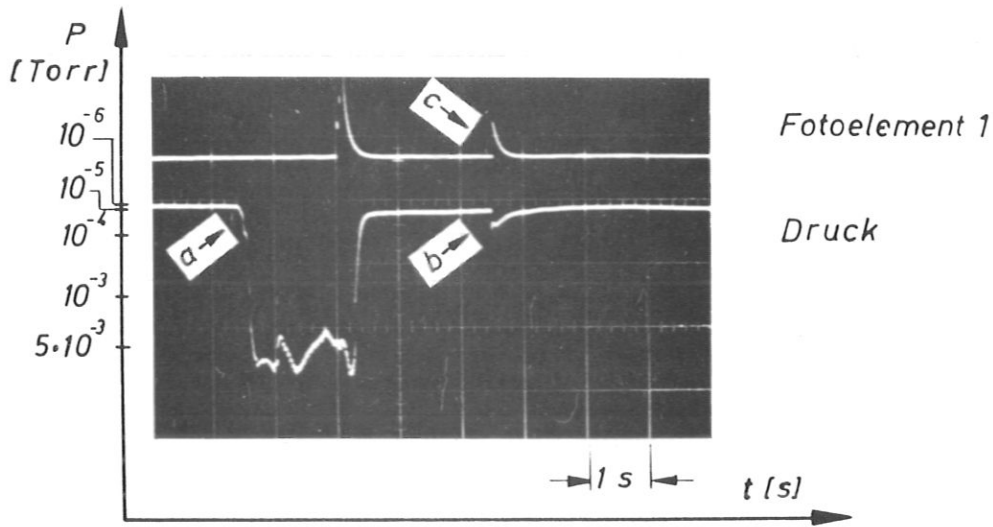


Abb. 8 a Druckverlauf in der Vakuumapparatur während der Teilchenherstellung

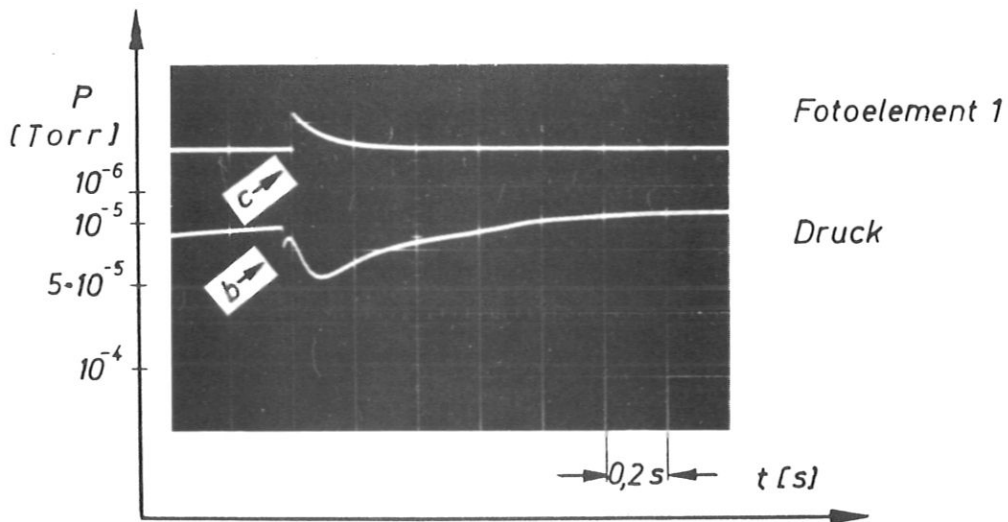


Abb. 8 b Druckverlauf in der Vakuumapparatur während des Stanzvorganges

Die Oszillogramme in Abb. 8 a und 8 b geben auf der oberen Spur die Signale des Fotoelements 1 (Lochblende) wieder, auf der unteren Spur den Druckverlauf im Vakuumkessel. Der Druck im Vakuumkessel (Abb. 8 a) beträgt anfangs ungefähr  $10^{-6}$  Torr und steigt dann beim Wegziehen der Glasglocke (Marke "a") auf ungefähr  $5 \cdot 10^{-3}$  Torr an. Nachdem die Glasglocke weit nach unten weggezogen worden ist - das erste Signal des Fotoelementes 1 auf der oberen

Spur entsteht beim Durchgang des oberen Randes der Glasglocke durch den Triggerstrahlengang - fällt der Druck im Kessel auf ungefähr  $10^{-5}$  Torr steil ab. Bei der Zeitmarke "c" tritt das Wasserstoffteilchen aus dem unteren Ende des Führungsrohres aus. Der Druckverlauf, der auf den Stanzvorgang folgt (Marke "b"), ist in Abb. 8 b mit höherer Zeitauflösung aufgenommen. Beim Ausstanzen steigt der Druck in der Kammer zunächst sprunghaft an. Da das anfallende Wasserstoffgas von der Diffusionspumpe kontinuierlich abgesaugt wird, fällt der Druck im Kessel während des freien Falls des Teilchens wieder ab. Der Druck steigt erneut an, wenn das Teilchen auf dem Boden der Vakuumkammer verdampft. Anschliessend bringt die Diffusionspumpe den Druck wieder auf den Ausgangswert zurück. Zu dem Zeitpunkt, der für den Abschuss des Teilchens in Frage kommt, liegt der Druck in der Kammer zwischen  $1 \cdot 10^{-5}$  und  $5 \cdot 10^{-5}$  Torr.

#### IV. Trefferwahrscheinlichkeit

Die Trefferwahrscheinlichkeit soll für folgenden Fall abgeschätzt werden: Teilchendurchmesser  $80 \mu$ , Laserleistung 400 MW, Lage des Brennflecks 10 mm unter dem Ende des Führungsrohres. Aus Abb. 1 geht hervor, dass für diesen Fall der Brennfleckdurchmesser für vollständige Verbrennung mindestens  $300 \mu$  betragen muss. Wir betrachten einen Fokusbrennfleckdurchmesser von  $500 \mu$ ; damit ist eine seitliche Streuung der Teilchen von  $\pm 100 \mu$  zulässig.

Nach Abb. 7 kann der Brennfleck des Lasers so gelegt werden, dass 50 % der in Abb. 7 erfassten Teilchen mit der erlaubten Streuung von  $\pm 100 \mu$  durch ihn fallen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in Abb. 7 nur diejenigen Teilchen erfasst sind, deren Geschwindigkeit im Intervall  $5,3 \text{ m/s} < v < 5,8 \text{ m/s}$  liegt. Dies sind nur ungefähr 25 % aller hergestellten Teilchen. Die Trefferwahrscheinlichkeit für den betrachteten Fall liegt daher bei ungefähr 10 %.

Die Trefferwahrscheinlichkeit kann verbessert werden, wenn man den Brennfleck näher an das untere Ende des Führungsrohres legt. Ein Mindestabstand von etwa 6 mm kann jedoch für Teilchen im oberen Geschwindigkeitsbereich nicht unterschritten werden. Dieser Abstand ist dadurch gegeben, dass der Laser erst 0,9 ms nach Zünden der Blitz-

lampen schussbereit ist. Dabei ist angenommen, dass die Blitzlampen bei Austritt des Teilchens aus dem Führungsrohr gezündet werden.

#### V. Schluss

Wie die Abschätzungen zeigen, können mit Impulslasern von einigen hundert Megawatt Leistung Teilchen aus festem Wasserstoff bis zu einer Grösse von ungefähr  $100 \mu$  vollständig verdampft werden. Es wird eine Apparatur beschrieben, mit der sich Teilchen aus festem Wasserstoff mit linearen Abmessungen zwischen  $50$  und  $80 \mu$  herstellen und ins Vakuum einschliessen lassen. Die Streuung der Teilchen bezüglich Richtung und Geschwindigkeit erlaubt es, mindestens jedes zehnte in einer Entfernung bis  $10 \text{ mm}$  vom unteren Ende des Führungsrohres mit einem fokussierten Laserstrahl zu treffen. Der Druck in der Umgebung des Teilchens ist dabei so niedrig, dass der Vorgang der Plasmaerzeugung dadurch nicht beeinflusst wird. Mit dem beschriebenen Apparat ist es daher möglich, die Wechselwirkung fokussierter Laserstrahlung mit kleinen, freifallenden Wasserstoffteilchen zu untersuchen.



Literaturverzeichnis

- 1 Caruso A., Gratton R., Int. Rep. LGI 68/2 (1968)
- 2 Cecchini A., De Angelis A., Gratton R., Int. Rep. LGI 68/8 (1968)
- 3 Francis G., Atkinson D.W., Avivi P., Bradley J.E., King C.D.,  
Millar W., Saunders P.A.H., Taylor A.F., Phys. Letters 25 A (1967),  
486
- 4 Klipping G., Kältetechnik 13 (1961), 25o
- 5 Sigel R., Krause H., Witkowski S., J. Sci. Instr. 2 (1969), 187