

AUF EINE STARRE WAND  
Untersuchung der Vorgänge  
beim Auftreffen von Deuterium-Pellets  
auf eine starre Wand

Manfred Thöner

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

IPP 1/207

April 1982

von der Fakultät für Maschinenbau der



**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

**8046 GARCHING BEI MÜNCHEN**

**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**  
**GARCHING BEI MÜNCHEN**

Untersuchung der Vorgänge  
beim Auftreffen von Deuterium-Pellets  
auf eine starre Wand

Manfred Thöner

IPP 1/207

April 1982

*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.*

UNTERSUCHUNG DER VORGÄNGE  
BEIM AUFTREFFEN VON DEUTERIUM-PELLETS  
AUF EINE STARRE WAND

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTOR-INGENIEURS  
von der Fakultät für Maschinenbau der  
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte  
DISSERTATION

von  
DIPL.-ING. MANFRED THÖNER  
aus Göttingen

Tag der mündlichen Prüfung: 22. April 1982  
Hauptreferent: Professor Dr. R. Klingelhöfer  
Korreferent: Professor Dr. E. W. Becker

Abstract

Pellets accelerated with a centrifuge - for refuelling thermonuclear plasmas - ought not to be noticeably deformed, let alone destroyed. This happens if the relative velocity between the pellet and the rotor catching it is too high.

This report describes an apparatus for determining the variation in shape of deuterium pellets as a function of the relative velocity. In this method the pellet, produced by extrusion, is electromagnetically accelerated by means of metal carriers from which they are separated and shot at a stationary, rigid wall. The impact of the pellet on the target is recorded in seven pictures by spark cinematography and the impact velocity is measured with light barriers.

The critical impact velocity for cylindrical deuterium pellets is found to be 48 m/s. Up to this relative velocity deuterium pellets retain their shape, irrespective of the direction of incidence.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Einrichtungen zur Herstellung und Beschleunigung zylindrischer Deuterium-Pellets	
2.1 Experimentelles Verfahren	6
2.2 Technische Ausführung	
2.2.1 System zur Erzeugung des Deuteriumstabes	8
2.2.2 Der He-Verdampferkryostat zur Abkühlung der Scheiben	8
2.2.3 Scheiben als Träger der Pellets	10
2.2.4 Die elektromagnetische Beschleunigung der Scheiben mit dem Pellet	12
2.2.5 Abschlußbasis, Auffänger und Target	16
2.2.6 Vorkühlstufen und Strahlungsabschirmung	19
2.2.7 Transportmechanik und Magazin	23
2.2.8 Temperaturmessung	28
3. Einrichtungen zur Auswertung von Aufprallexperimenten	
3.1 Geschwindigkeitsmessung des freifliegenden Pellets	31
3.2 Kurzzeitfotografie des Pellet-Aufpralls auf das Target	32
3.3 Automatische Steuerung der Vorgänge	35
4. Vorversuche mit Wachszyklindern	37
5. Aufprallexperimente mit Deuterium-Pellets	
5.1 Durchführung der Versuche	41
5.2 Ergebnisse der Aufprallexperimente	44
6. Diskussion	48
Literatur	50

## 1. Einleitung

Bei Kernfusionsexperimenten mit magnetischem Einschluß gehen dem Plasma Teilchen durch Diffusion rechtwinklig zum Magnetfeld verloren /1/. Diese gelangen zwar größtenteils nach der Wechselwirkung mit der umgebenden Wand wieder in das Plasma zurück ("recycling"), aber da der Recycling-Koeffizient stets kleiner als eins ist, müssen - um einen stationären Zustand aufrechterhalten zu können - Teilchen von außen nachgeliefert werden. In einem gezündeten Deuterium-Tritium-Plasma gehen zudem Teilchen durch Abbrand verloren.

Als Nachfüllmethoden sind u.a. der Kaltgaseinlaß, die Clusterinjektion und der Einschub von Teilchen aus gefrorenem Wasserstoff bzw. Deuterium, sogenannte Pellets, bekannt /1, 2, 3, 4/.

Um gewünschte Dichteprofile und Gesamtteilchenzahlen des Plasmas zu erzielen und aufrechtzuerhalten, werden z.Z. der Gaseinlaß und die Pelletinjektion angewendet. Der Einschub von Pellets hat gegenüber dem Gaseinlaß den Vorteil, daß das Pellet grundsätzlich auch im Inneren des Plasmas als Teilchenquelle wirken kann: es wird beim Kontakt mit den Plasmateilchen nach und nach von seiner Oberfläche her abgetragen. Die um das Pellet entstehende Gaswolke schirmt dieses vor ionisierenden Stößen der Plasmaelektronen ab, die einen Großteil ihrer Energie an das relativ dichte Neutralgas abgeben /4/. Es wird erwartet, daß man durch den Einschub solcher Pellets bei gezielter Wahl der Pelletgröße, -geschwindigkeit und -injektionsrate eine definierte Verteilung der Plasmadichte erreichen kann.

Da ein kleines Verhältnis von Oberfläche zu Volumen für größere Eindringtiefen des Pellets ins Plasma günstiger ist, sollten die Pellets möglichst Kugelform haben. Bei den Verfahren, bei denen die Pellets auf die für den Einschub notwendige Geschwindigkeit beschleunigt werden, sind die Pellets i.a. aus herstellungstechnischen Gründen zylinderförmig, wobei der Durchmesser und die Höhe des Zylinders vergleichbar gewählt werden. In jedem Fall muß das

Pellet bei der Beschleunigung formstabil bleiben, damit ein reproduzierbares Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und damit eine reproduzierbare Eindringtiefe ins Plasma gewährleistet ist.

Als Pelletbeschleunigungsverfahren werden z.Z. die gasdynamische Beschleunigung mit dem Leichtgasgewehr und die mechanische Beschleunigung mittels Zentrifuge angewendet /3, 4/.

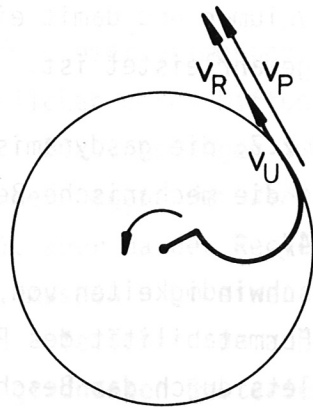
Mit dem Leichtgasgewehr konnten bisher Geschwindigkeiten von mehr als 1000 m/s erreicht werden /5, 6/. Die Formstabilität des Pellets wurde hierbei von der Ummantelung des Pellets durch das Beschleunigungsrohr unterstützt. Nachteilig ist bei diesem Verfahren die relativ geringe mögliche Repetitionsfrequenz von weniger als einem Schuß pro Rohr und Minute. Zur Erzielung einer für größere Fusionsanordnungen angestrebten Einschußfrequenz bis zu 50 Hz wäre daher der zeitlich gesteuerte Einsatz einer Vielzahl solcher Injektions-einrichtungen mit hoher Wiederholfrequenz erforderlich. Dabei würde insbesondere das Abpumpen des Beschleunigungsgases über ein Schleusensystem ein erhebliches technisches Problem darstellen.

Hinsichtlich der erforderlichen Repetitionsfrequenz erscheint die Beschleunigung mit der Zentrifuge wesentlich aussichtsreicher, wenn man z.B. das in Abb. 1 dargestellte Prinzip anwendet /7, 8/<sup>+</sup>:

Auf einer flachen Scheibe, die sich mit maximal möglicher Umfangsgeschwindigkeit dreht, steht eine geeignet geformte Wand, die das mit kleiner Geschwindigkeit auf die Scheibe fallende Pellet erfaßt und nach außen abschleudert. Wird das radial beschleunigte Pellet durch eine geeignete Führung so umgelenkt, daß es die Zentrifuge tangential verläßt, so kann es im Prinzip die doppelte Umfangsgeschwindigkeit erreichen /8/.

Nachteilig ist bei allen Zentrifugenkonstruktionen, daß die Abschleuderrichtung empfindlich von den Anfangsbedingungen der Beschleunigung abhängt. Die Streuung der Abschleuderrichtung wird

<sup>+</sup>Neben dem in Abb. 1 dargestellten scheibenförmigen Rotor sind auch stabförmige sowie speziell geformte Rotoren vorgesehen /9/.



$$v_R = v_U$$

$$v_P = 2 v_U$$

$v_P$  = Geschwindigkeit des Pellets im Laborsystem

$v_U$  = Umfangsgeschwindigkeit der Zentrifuge

$v_R$  = Relativgeschwindigkeit zwischen dem Pellet und der Zentrifuge

Abb. 1: Scheibenförmige Zentrifuge mit einer halbkreisförmigen Führung zur Beschleunigung der Pellets

umso kleiner je größer der Abstand zwischen der Rotorachse und dem Ort ist, an dem das Pellet in die Führung eingebracht wird. Dabei darf das Pellet jedoch nicht infolge zu großer Relativgeschwindigkeit merklich verformt werden, denn es soll sein günstiges Verhältnis von Oberfläche zu Volumen für das Eindringen ins Plasma beibehalten. Da keine dynamischen Eigenschaften von durch Extrusion erzeugtem, polykristallinen Deuterium, das für das Beschleunigungsverfahren benutzt wird, bekannt sind (es liegen nur Daten aus statischen Zugversuchen an gezüchteten Proben vor /10, 11, 12/) und experimentell keine kritische Relativgeschwindigkeit ermittelt ist /13/, läßt sich das Optimalproblem nicht theoretisch lösen.

In der vorliegenden Arbeit sollten daher die Voraussetzungen für ein experimentelles Studium der Vorgänge beim Auftreffen von Deuterium-Pellets auf eine starre Wand geschaffen werden. Für die Arbeit stand ein bei Zimmertemperatur arbeitender Wirbelstrombeschleuniger zur Verfügung /13/, mit dem zunächst Voruntersuchungen unter Verwendung von Wachs-Teilchen durchgeführt wurden.

Die Hauptaufgabe bestand dann in der Anpassung und Ergänzung der



vorhandenen Einrichtungen entsprechend den durch das Arbeiten bei tiefer Temperatur gegebenen Anforderungen.

Erste Aufnahmen des Aufpralls von Deuterium-Pellets auf das Target zeigen, daß es bei Aufprallgeschwindigkeiten größer als  $\approx 48 \frac{m}{s}$  zu einer Abbröckelung vom Pellet kommt, wenn es nicht axial auftrifft. Beim Aufprall des Pellets mit Geschwindigkeiten größer als  $\approx 56 \frac{m}{s}$  tritt teilweise - abhängig vom Aufprallwinkel - die Zerstörung des Pellets durch Bruch ein. Für Aufprallgeschwindigkeiten größer als  $\approx 62 \frac{m}{s}$  zerbricht das Pellet unabhängig vom Aufprallwinkel; dabei konnte in der Anfangsphase des axialen Aufpralls eine "Abtragung" des Pellets an der Targetoberfläche beobachtet werden.

## 2. Einrichtungen zur Herstellung und Beschleunigung zylindrischer Deuterium-Pellets

### 2.1 Experimentelles Verfahren

Die technische Entwicklung der Apparatur, mit der zylindrische Pellets aus festem Deuterium erzeugt und auf Geschwindigkeiten beschleunigt werden, die für Untersuchungen der Vorgänge beim Aufprall auf ein starres Target interessieren, stützt sich auf das folgende experimentelle Verfahrensschema:

- Erzeugung eines Stabes aus festem Deuterium durch Extrudieren
- Extrusion in das Töpfchen einer abgekühlten Metallscheibe
- Separierung eines zylindrischen Pellets vom Stab durch Abschneiden (Wegschieben der Scheibe)
- Transport der mit dem Pellet beladenen Scheibe zur Abschlußbasis
- Elektromagnetische Beschleunigung der Scheibe und des Pellets mit einem Wirbelstrombeschleuniger
- Mechanische Abbremsung der Scheibe durch einen Auffänger zwecks Trennung des Pellets von der Scheibe
- Geschwindigkeitsmessung des freifliegenden Pellets
- Kurzzeitfotografie des aufprallenden Pellets auf das Target

Da der Tripelpunkt des Deuteriums bei 18,71 K und 0,171 bar liegt /10/, wird für die Erzeugung der Deuterium-Pellets und für deren Umgang ein kryotechnisches Verfahren mit flüssigen Helium als Kühlmittel angewendet. Die Experimente finden in der Experimentierkammer einer Hochvakuum-Apparatur statt, in der sich zwei He-Verdampferkryostaten befinden: Der eine dient der Staberzeugung (Abb. 2 - {1} -) (s. Abschnitt 2.2.1), der andere der Abkühlung der Scheiben (Abb. 2 - {2} -) (s. Abschnitt 2.2.2). Das Hochvakuum wird von Turbomolekularpumpen erzeugt und aufrechterhalten.

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Komponenten der Apparatur detailliert beschrieben.

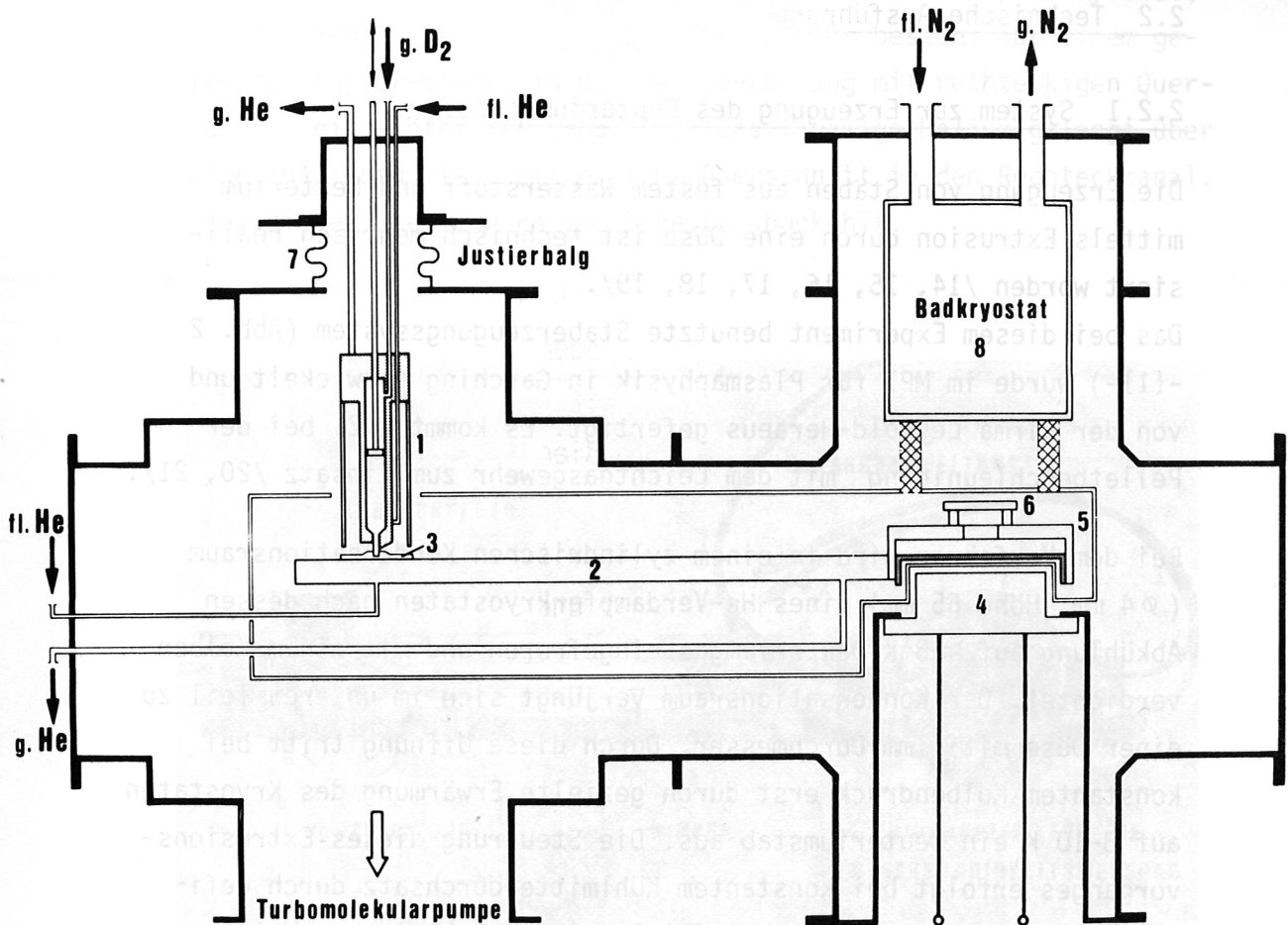


Abb. 2: Prinzip des experimentellen Verfahrens:

Ein Stab aus festem Deuterium wird in das Töpfchen einer abgekühlten Scheibe {3} extrudiert. Durch Abscheren wird ein zylindrisches Pellet vom Stab separiert und die mit dem Pellet beladene Scheibe über die Spule eines Wirbelstrombeschleunigers {4} (s. Abschnitt 2.2.4) geschoben. Nach der elektromagnetischen Beschleunigung und der mechanischen Abbremsung der Scheibe durch den Auffänger {5} fliegt das Pellet frei weiter und prallt gegen das Target {6}.

{1} He-Verdampferkryostat zur Erzeugung des Deuteriumstabes

{2} He-Verdampferkryostat zur Abkühlung der Scheiben

{8} flüssig-Stickstoff-Badkryostat zur Abkühlung des Strahlungsschildes und der Vorkühlstufe (s. Abschnitt 2.2.6)

## 2.2 Technische Ausführung

### 2.2.1 System zur Erzeugung des Deuteriumstabes

Die Erzeugung von Stäben aus festem Wasserstoff und Deuterium mittels Extrusion durch eine Düse ist technisch mehrfach realisiert worden /14, 15, 16, 17, 18, 19/.

Das bei diesem Experiment benutzte Staberzeugungssystem (Abb. 2 -{1}-) wurde im MPI für Plasmaphysik in Garching entwickelt und von der Firma Leybold-Heraeus gefertigt. Es kommt z.Z. bei der Pelletbeschleunigung mit dem Leichtgasgewehr zum Einsatz /20, 21/.

Bei dem Verfahren wird in einem zylindrischen Kondensationsraum ( $\varnothing 4$  mm, Höhe 65 mm) eines He-Verdampferkryostaten nach dessen Abkühlung auf  $\approx 5$  K Deuteriumgas eingefroren und mit einem Kolben verdichtet. Der Kondensationsraum verjüngt sich im unteren Teil zu einer Düse mit 1 mm Durchmesser. Durch diese Öffnung tritt bei konstantem Kolbendruck erst durch gezielte Erwärmung des Kryostaten auf 8-10 K ein Deuteriumstab aus. Die Steuerung dieses Extrusionsvorganges erfolgt bei konstantem Kühlmitteldurchsatz durch definierte Temperaturveränderung mittels einer elektrischen Heizung. Das Staberzeugungssystem wurde für dieses Experiment mit einer balggedichteten Justiervorrichtung (Abb. 2 -{7}-) versehen, um es im kalten, gefüllten Zustand relativ zum Töpfchen bewegen zu können.

### 2.2.2 Der He-Verdampferkryostat zur Abkühlung der Scheiben

Damit das feste Deuterium beim Kontakt mit der Scheibe (Abb. 2 -{3}-), in deren Töpfchen der Deuteriumstab extrudiert wird, bei dem umgebenen Druck (Hochvakuum) nicht sublimiert ( $10^{-7}$  Torr  $\hat{=}$  der Gleichgewichtstemperatur von 5,35 K /10/), muß die Scheibe auf eine Temperatur abgekühlt werden, die niedriger ist als die Gleichgewichtstemperatur des Deuteriums. Die tiefe Temperatur der Scheibe muß auch bei den weiteren Verfahrensschritten aufrechter-

halten werden. Diese Aufgabe übernimmt ein He-Verdampferkryostat, der als Schiene konzipiert ist (Abb. 3). Er besteht aus einem gefrästen Kupfer-Block, in dem die He-Leitung mit rechteckigen Querschnitt eingelötet ist (Abb. 18). Das flüssige Helium gelangt über eine Zuleitung mit kreisförmigen Querschnitt in den Rechteckkanal. Nahe dieser Stelle wird die Scheibe abgekühlt.

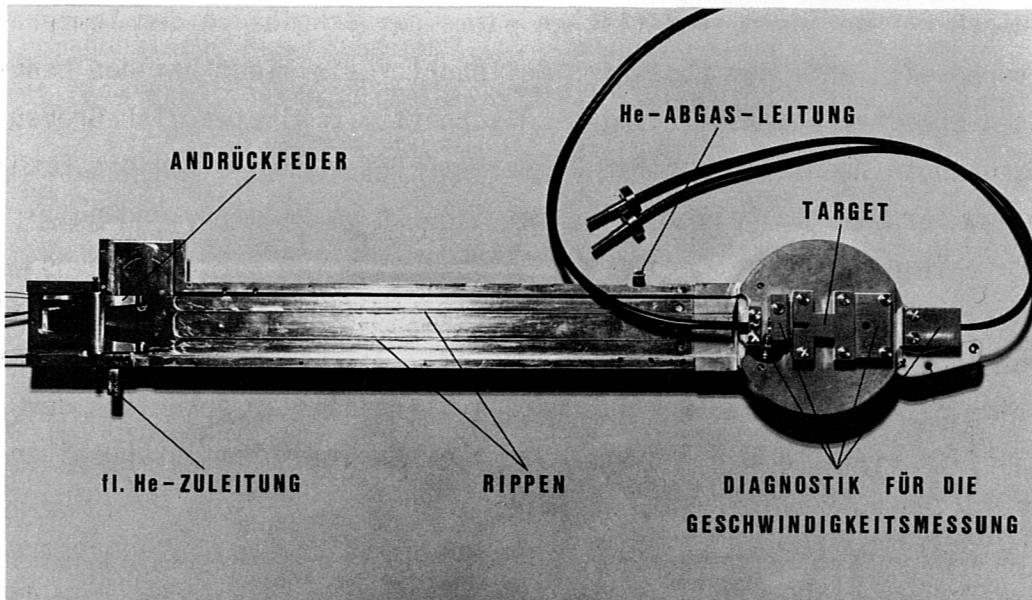


Abb. 3: Der als Schiene konzipierte He-Verdampferkryostat mit der Andrückfeder zur thermischen Kontaktierung der Scheibe, mit den Rippen, auf denen die Scheibe transportiert wird, sowie dem Target und der Diagnostik zur Geschwindigkeitsmessung (s. Abschnitt 2.2.5 und 3.1)

Um den Wärmeübergang zu erhöhen, wird die Scheibe durch eine Andrückfeder aus Bronzefederblech auf den Kryostaten gepreßt. Nachdem die Scheibe abgekühlt und gefüllt ist (s. Abschnitt 5.1), wird sie auf zwei Rippen zur Abschlußbasis transportiert. Dazu wird ein Schlitten benutzt, der über ein Stahlseil mittels einer Magnet-

schiebedurchführung bewegt wird (s. Abschnitt 2.2.7). Der Schlitten wird ebenfalls von der Andrückfeder auf den Kryostaten gepreßt und hat somit die gleiche Temperatur wie die Scheibe. Bevor er die gefüllte Scheibe zum Abscheren des Zylinders vom Deuteriumstab und zum Weitertransport erreicht, bewirkt der Schlitten, daß der Druck der Bronzefeder aufgehoben wird. Dadurch können die Scheibe und der Schlitten fast reibungsfrei bewegt werden.

Wegen der geringen spezifischen Wärme der Scheibe in dem Temperaturbereich nahe dem absoluten Nullpunkt - sie liegt bei den benutzten Scheiben aus Aluminium (s. Abschnitt 2.2.3) etwa vier Größenordnungen niedriger als bei Zimmertemperatur /22/ - muß die Erwärmung der mit dem Pellet beladenen Scheibe verhindert werden.

Beim Transport der Scheibe zur Abschlußbasis muß Wärmeezeugung durch Reibung möglichst vermieden werden. Dazu wurde der Kryostat hartverchromt (Schichtdicke einige  $\mu\text{m}$ ). Gleichzeitig werden damit eine gleichbleibende Oberflächenbeschaffenheit am Abkühlort der Scheibe erreicht und dadurch gute thermische Kontaktierungseigenschaften aufrechterhalten.

Um Einstrahlung von Energie zu verhindern, ist die Transportstrecke der Scheibe durch Metallschilde abgedeckt, die die Temperatur des Kryostaten haben. Aus dem gleichen Grund sind alle Bauteile, die die gefüllte Scheibe in ihrer Abschlußlage umgeben (Auffänger, Ausstoßhebel etc. - s. Abschnitt 2.2.5 und 2.2.7) mit dem Verdampferkryostaten thermisch kontaktiert.

### 2.2.3 Scheiben als Träger der Pellets

An die Scheiben, die das Pellet aufnehmen, transportieren und beschleunigen, sind folgende Forderungen gestellt:

- sie müssen die Zylinderform der Pellets, die durch Abscheren vom festen Deuteriumstab hergestellt werden, beim Abschervorgang gewährleisten;
- sie müssen einen guten thermischen Kontakt zum Kryostaten haben, da sie bis auf wenige Kelvin abgekühlt werden müssen;

- sie müssen aus Reproduzierbarkeitsgründen geometrisch gleich sein;
- sie sollten eine hohe elektrische Leitfähigkeit im Anwendungsbereich besitzen, damit die Wärmeproduktion in der Scheibe durch Wirbelstromverluste (s. Abschnitt 2.2.4) möglichst klein bleibt und damit auch die Gefahr des Energietransfers auf das Deuterium-Pellet;
- sie sollten einen relativ hohen Wert  $\frac{\sigma}{\rho}$  aufweisen, dem die elektromagnetische Beschleunigung (s. Abschnitt 2.2.4) proportional ist ( $\sigma$  = elektrische Leitfähigkeit,  $\rho$  = Dichte).

Diese Forderungen werden am besten von Aluminium erfüllt.

Zur Herstellung geeigneter Trägerscheiben werden aus 1 mm starken Aluminiumblech Scheiben gestanzt ( $\varnothing 29,9$  mm), in die ein Töpfchen ( $\varnothing 1$  mm, Höhe 0,9 mm) zentrisch geprägt wird. Damit das Töpfchen durch die Prägung auch bis zur Scheibenoberfläche, die als Abscherenebene dient, zylindrisch wird und dort eine ausgeprägte Kante aufweist (Abb. 8), ist eine Mindesthärte des Materials von  $BH > 35$  erforderlich (BH = Brinellhärte).

Reinaluminium Al 99,99, das aufgrund der höheren Leitfähigkeit gegenüber verunreinigtem Aluminiumblech bevorzugt werden sollte, erfüllt diese Forderung jedoch nicht: es ist zu weich. Daher fiel die Wahl auf Reinaluminiumblech Al 99,5 F13 DIN 1712 (Werkstoff-Nr. 3.055.30). Die elektrische Leitfähigkeit gegenüber Reinaluminium verringert sich bei Abkühlung in dem flüssig-He-Temperaturbereich um etwa eine Größenordnung /23/; ebenso ist mit einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit gegenüber Reinaluminium um den Faktor 10 zu rechnen /24/.

Für die benutzte Charge wurde die Brinellhärte BH 43 gemessen.

Der Prägevorgang bedingt eine schwache Krümmung der Töpfchenscheibe. Um einen guten thermischen Kontakt mit dem Kryostaten zu erreichen, wird die schwach konvexe Auflagefläche der Töpfchenscheibe plan geschliffen und mit  $15 \mu\text{m}$  Diamantpaste poliert (eine Steigerung des Andruckes zur Erhöhung des Wärmeüberganges ist aus konstruktiven Gründen nicht vorteilhaft).

Um Oxidschichten zu vermeiden, die den Wärmeübergang reduzieren /25, 26/, werden die Töpfchenscheiben gebeizt und galvanisch vergoldet (Schichtdicke 2-3  $\mu\text{m}$ ). Für den Eintauchvorgang ins Elektrolytbad wurde eine Einspannvorrichtung entwickelt, die bei diesem Bearbeitungsschritt gewährleistet, daß die Töpfchenscheibe plan bleibt.

#### 2.2.4 Die elektromagnetische Beschleunigung der Scheiben mit dem Pellet

Die Beschleunigung der mit dem Pellet beladenen Scheiben erfolgt mit einem Wirbelstrombeschleuniger, der auf der abstoßenden Wirkung zweier magnetischer Dipole basiert:

Ein sich zeitlich ändernder Strom in einer Spule induziert in einer zentrisch darüberliegenden Metallscheibe einen Wirbelstrom. Durch die Kraft, die die Ströme aufeinander ausüben, stoßen sich Scheibe und Spule ab.

Befindet sich auf der wegfliegenden Scheibe ein Teilchen, so wird dieses mit der Scheibe beschleunigt. Bremst man die Scheibe ab, ohne das Teilchen zu behindern, so fliegt es aufgrund seiner Trägheit frei weiter.

Abb. 4 zeigt das Funktionsschema: über einen Ladewiderstand wird der Kondensator eines Stoßstromentladungskreises auf die erforderliche Hochspannung geladen. Nach Zündung der Funkenstrecke entlädt sich der Kondensator über das Lastkabel und die Beschleunigungsspule.

Bei der Entwicklung des Wirbelstrombeschleunigers am MPI für Plasmaphysik in Garching /13/ in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Luft- und Raumfahrttechnik der TU München /27, 28/, mit der im Hinblick auf die Nachfüllung thermonuklearer Plasmen begonnen wurde /29, 30, 31/, erwies sich eine Beschleunigungsspule als günstig, die aus zwei flachen symmetrisch übereinanderliegenden Spiralen mit je 10 Windungen besteht. Diese wurden aus Isolations- und Festigkeitsgründen in Epoxidharz-Glaseidengewebe und Kapton-



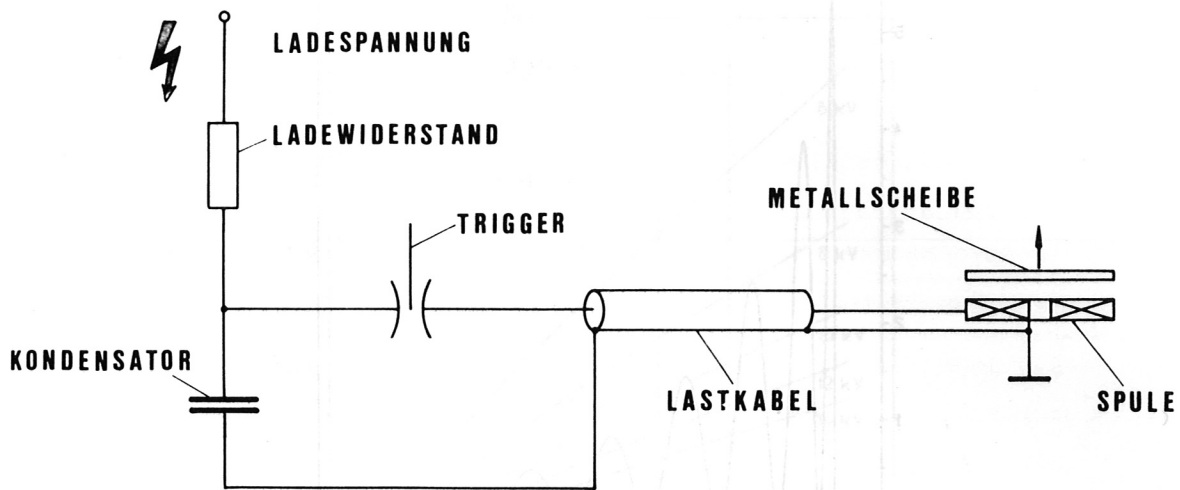


Abb. 4: Das Funktionsschema des Wirbelstrombeschleunigers

Folie (Fa. Du Pont) eingebettet und mit Araldit vergossen (Abb. 8). Als Träger der zu beschleunigenden Teilchen dienten Scheiben bzw. Ringe aus Aluminium /13/.

Für die Beschleunigung von Deuterium-Pellets wurde der Hochspannungsentladungskreis so dimensioniert, daß durch Variation der Ladespannung die gewünschten Geschwindigkeiten eingestellt werden können.

Aus den gewählten Daten läßt sich die Kraft auf die Aluminiumscheibe, die Geschwindigkeit und die Flugzeit der Scheibe in Abhängigkeit von der Flugstrecke jeweils für unterschiedliche Ladespannungen des Kondensators berechnen /32/ (Abb. 5, 6 und 7).

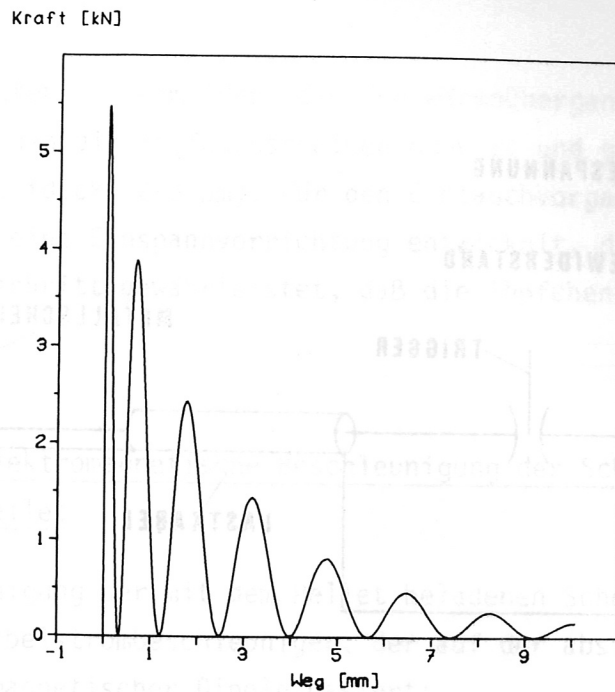


Abb. 5: Die Kraft, die bei der Beschleunigung auf die Aluminiumscheibe wirkt, in Abhängigkeit von der Flugstrecke für eine Ladespannung des Kondensators von 8 kV

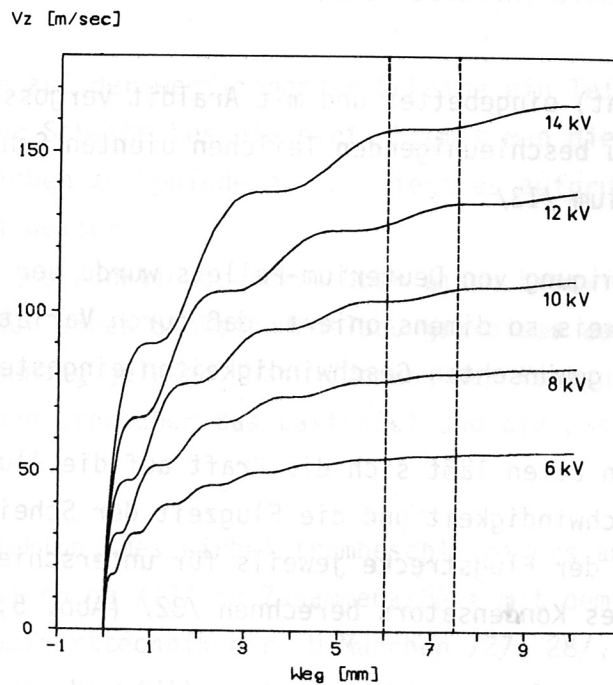


Abb. 6: Die Geschwindigkeit der Aluminiumscheibe in Abhängigkeit von der Flugstrecke für verschiedene Ladespannungen des Kondensators.  
Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Orte, an denen die Scheiben durch den Auffänger abgebremst werden: bei den Experimenten mit Deuterium-Pellets nach einer Flugstrecke von 7,5 mm, bei den Vorversuchen mit Wachs nach 6 mm.

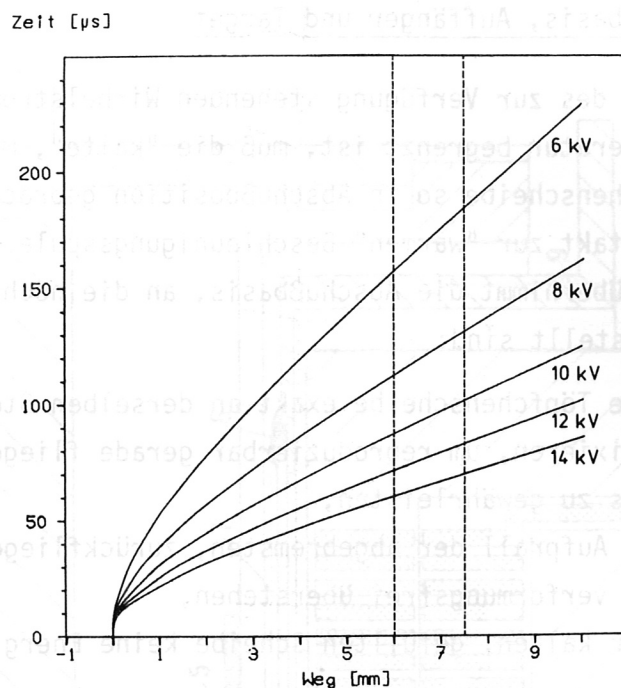


Abb. 7: Die Flugzeit der Aluminiumscheibe in Abhängigkeit von der Flugstrecke für verschiedene Ladespannungen des Kondensators.

Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Orte, an denen die Scheiben durch den Auffänger abgebremst werden: bei den Experimenten mit Deuterium-Pellets nach einer Flugstrecke von 7,5 mm, bei den Vorversuchen mit Wachs nach 6 mm.

Parameter des Wirbelstrombeschleunigers:

Kapazität:  $C = 8,1 \mu\text{F}$

Frequenz:  $f = 22,5 \text{ kHz}$

Induktivität der Spule:  $L_{\text{Sp}} = 5,67 \mu\text{H}$

Zuleitungsinduktivität:  $L_z = 0,5 \mu\text{H}$

Abstand Spule-Scheibe vor der Beschleunigung:  $z_0 = 4,4 \text{ mm}$

Windungshöhe der Spulenspirale = 6 mm

Windungsabstand = 1,5 mm

Abmessung der zylindrischen Al-Scheibe:  $\varnothing 29,9 \text{ mm}$ , Höhe 1 mm

Dichte des Aluminiums:  $\rho = 2,72 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Elektrische Leitfähigkeit im angewandten Temperaturbereich (4-5 K):

$\sigma = 1,7 \cdot 10^7 \text{ S/cm}$  (Annahme) (s. Abschnitt 2.2.3).

### 2.2.5 Abschlußbasis, Auffänger und Target

Da der Betrieb des zur Verfügung stehenden Wirbelstrombeschleunigers auf Zimmertemperatur begrenzt ist, muß die "kalte", mit dem Pellet beladene Töpfchenscheibe so in Abschlußposition gebracht werden, daß sie keinen Kontakt zur "warmen" Beschleunigungsspule hat.

Diese Aufgabe übernimmt die Abschlußbasis, an die noch weitere Forderungen gestellt sind:

- sie muß jede Töpfchenscheibe exakt an derselben Stelle zentral zur Spule fixieren, um reproduzierbar gerade fliegende Scheiben bzw. Pellets zu gewährleisten,
- sie muß den Aufprall der abgebremsten, zurückfliegenden Töpfchenscheibe verformungsfrei überstehen,
- sie darf der kalten, gefüllten Scheibe keine Energie zuführen und
- sie soll sich möglichst dicht über der "warmen" Spule befinden, da die magnetische Feldstärke stark mit dem Abstand Spule - Scheibe abnimmt /33/.

Diese Forderungen werden von einer Kupferscheibe erfüllt, die so geschlitzt ist, daß das Beschleunigungsmagnetfeld sie symmetrisch durchdringen kann und nur elastische Schwingungen der Scheibensegmente auftreten, die durch induzierte Wirbelströme in den Segmenten hervorgerufen werden. Die Cu-Scheibe ist 1,5 mm dick und symmetrisch alle  $45^{\circ}$  geschlitzt (Schlitzbreite 0,3 mm) und geht außen in einen Zylindermantel über (Abb. 8).

Die Fixierung der Töpfchenscheiben übernimmt ein gefräster Zentrierkegel, der der geprägten Scheibe genau angepaßt ist; als Anschlag dienen zwei symmetrisch zur Bewegungsrichtung der ankommenden Scheibe angeordnete Stifte. Die technische Ausführung zeigt Abb. 9.

Die Abschlußbasis ist in einem Cu-Hohlzylinder mit einem 5 mm dicken Deckel eingepaßt. Der Deckel dient als Auffänger zur mechanischen Abbremsung der beschleunigten Scheiben (Beschleunigungsstrecke 7,5 mm) (Abb. 8).

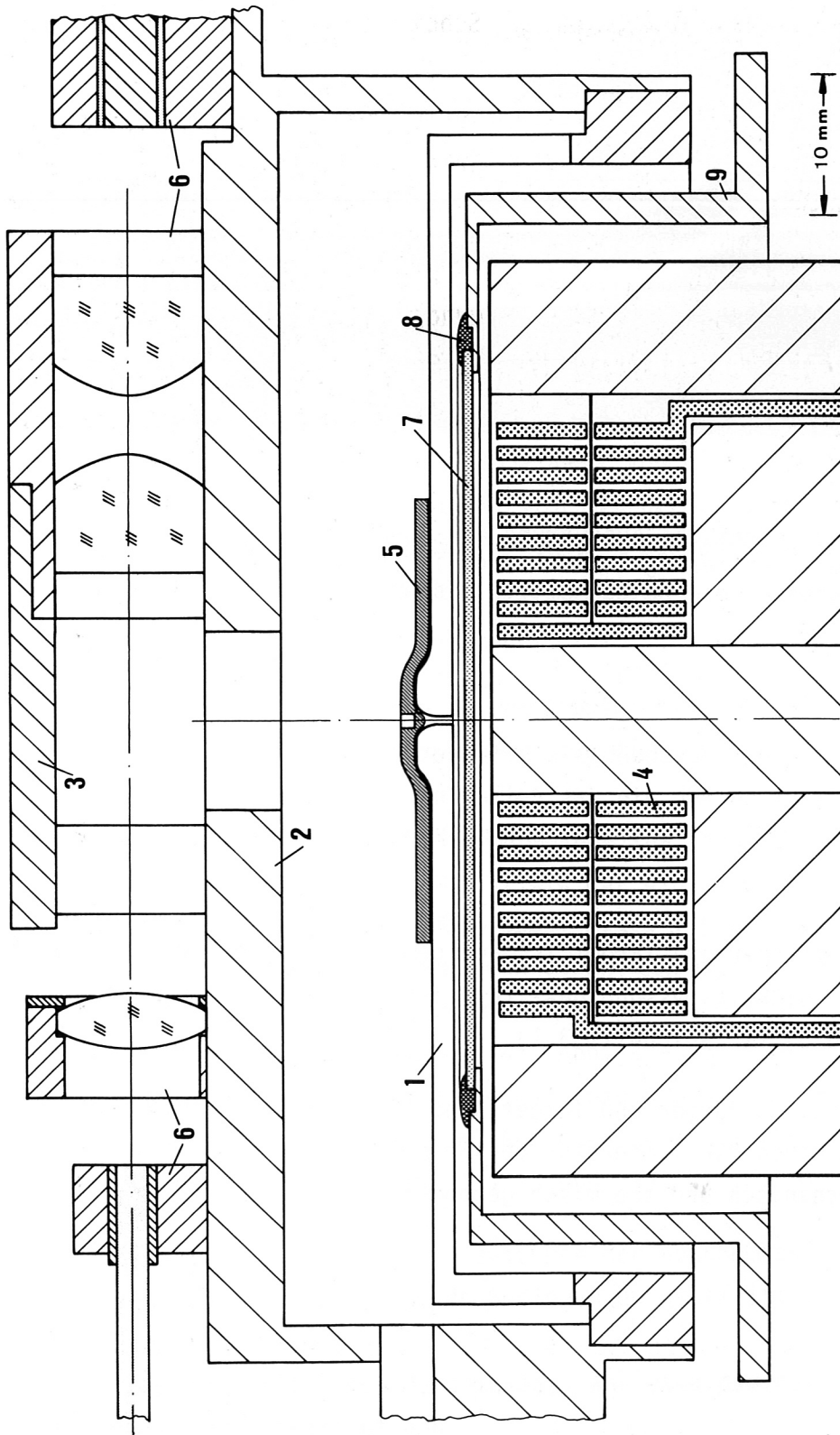


Abb. 8: Darstellung der Abschlußbasis {1}, des Auffängers {2}, des Targets {3} und der Beschleunigungs-  
spule {4} im Schnitt mit der Töpfchenscheibe {5} und den Diagnostikeinrichtungen für die  
Messung der Pelletgeschwindigkeit {6} (s. Abschnitt 3.1).  
Die Aluminiumoxid-Scheibe {7} zur Strahlungsabschirmung (s. Abschnitt 2.2.6) ist mit Epoxid-  
harz Stycast 2850 GT {8} in die Abschirmscheibe {9} eingeklebt.

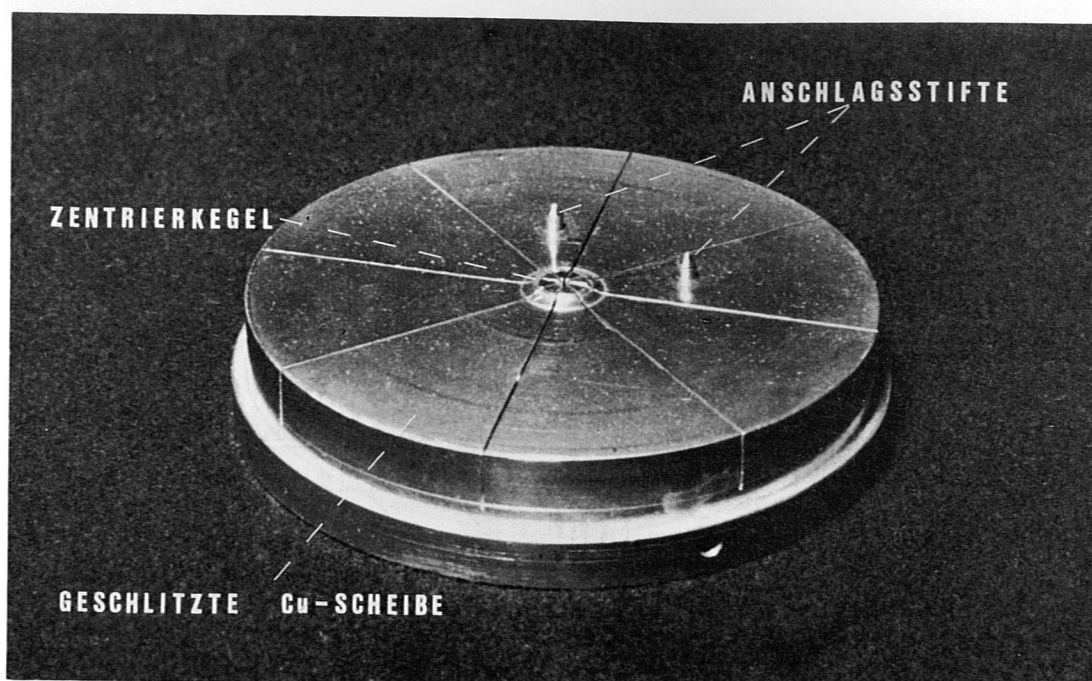


Abb. 9: Die technische Ausführung der Abschußbasis.  
Der Zentrierkegel dient der Fixierung der Töpfchenscheibe, die beiden Stifte als Anschlag

Zentrisch über der Abschußbasis befindet sich im Auffänger eine Bohrung  $\varnothing$  12 mm, durch die das Pellet nach der Trennung von der Scheibe frei weiterfliegt und nach 15 mm auf das Target aus Kupfer trifft.

Zwischen Auffänger und Target ist auf dem Cu-Deckel die Diagnostik zur Geschwindigkeitsmessung des freifliegenden Pellets angeordnet (Abb. 3 und 8) (s. Abschnitt 3.1).

Abschußbasis, Auffänger und Target sind vergoldet (Schichtdicke  $\approx 5 \mu\text{m}$ ) und haben die Temperatur des He-Verdampferkryostaten, an den sie mechanisch und thermisch gekoppelt sind.

### 2.2.6 Vorkühlstufen und Strahlungsabschirmung

Die Töpfchenscheiben passieren, bevor sie den He-Verdampferkryostaten erreichen, zwei Vorkühlstufen: 77 K und He-Abgas-Temperatur.

Konstante Vorkühlbedingungen von 77 K werden durch einen flüssig-Stickstoff-Badkryostaten ( $V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ) aufrechterhalten, mit dem die Vorkühlstufe thermisch verbunden ist. Die zweite Vorkühlstufe ist an den durch die He-Abgas-Leitung gekühlten Strahlungsschild gekoppelt (Abb. 10).

Die Vorkühlstufen sind als Führungskanal für die Scheiben ausgeführt und so bemessen, daß jede jeweils vier Scheiben aufnehmen kann (Abb. 15). Bei einer Schußfrequenz von einer Scheibe pro 10 min hat somit jede Scheibe 40 min mit der entsprechenden Vorkühlstufe Kontakt. Da die Oberfläche des Führungskanals zudem glanzverkupfert und vergoldet ist, wird auf zusätzlichen Andruck der Scheiben, um den Wärmeübergang zu erhöhen, verzichtet.

Der als Schiene konzipierte He-Verdampferkryostat ist, um die Energieeinstrahlung zu vermindern, von einem Strahlungsschild aus Kupferblech umgeben, der vergoldet ist und die Temperatur des He-Abgases hat. Dieser Strahlungsschild ist in einen Strahlungsabschirmung (Cu) eingebaut, die auf eine Temperatur von 77 K abgekühlt wird (Abb. 10). Dabei kühlt die aus dem Kryostaten austretende He-Leitung direkt den Strahlungsschild, während der 77 K-Strahlungsschild über Wärmebrücken mit dem flüssig-Stickstoff-Badkryostaten verbunden ist (Abb. 2 - {8} -).

Zur mechanischen Abstützung und gleichzeitig als thermische Isolationsstrecke dienen Stahl-Röhrchen  $10 \times 0,1$  (X5 Cr Ni 19 8- Werkstoff-Nr. 1.4301) (Abb. 10, 11 und 12).

An die Strahlungsabschirmung zwischen der Abschlußbasis und der "warmen" Spule waren folgende Bedingungen gestellt:

- nicht metallisch,
- $< 1 \text{ mm}$  dick mit einem Durchmesser, der etwa dem der Spule von  $62 \text{ mm}$  entspricht und
- hohe Wärmeleitfähigkeit bei 77 K.

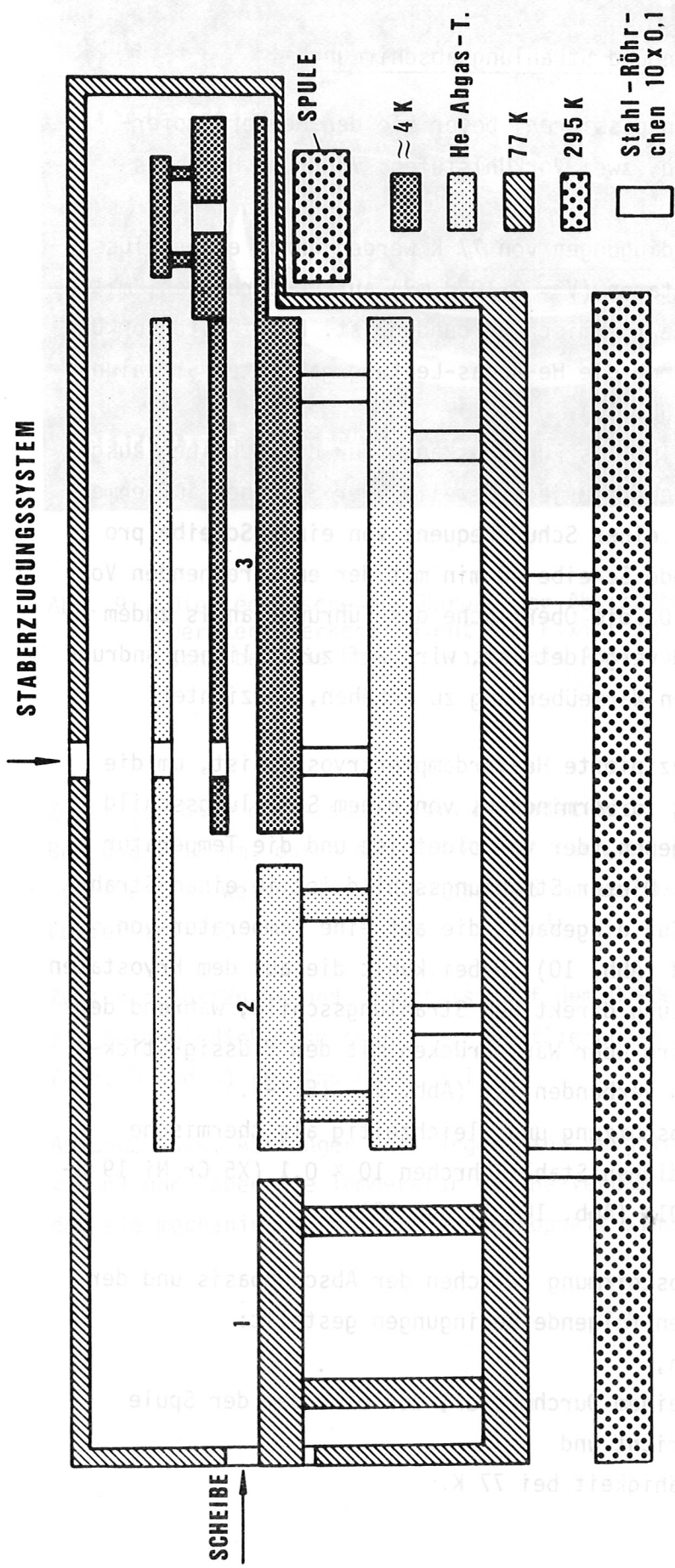


Abb. 10: Schematische Darstellung der Temperatur einzelner Komponenten, der Vorkühlstufen und der Strahlungsabschirmungen sowie der Stahl-Röhrchen, die zur mechanischen Abstützung und thermischen Isolation dienen.

- {1} Vorkühlstufe - abgekühlt auf 77 K
- {2} Vorkühlstufe - abgekühlt auf He-Abgas-Temperatur
- {3} He-Verdampferkryostat - abgekühlt auf  $\approx 4\text{ K}$ , angekoppelt die Abschußbasis, der Auffänger und das Target



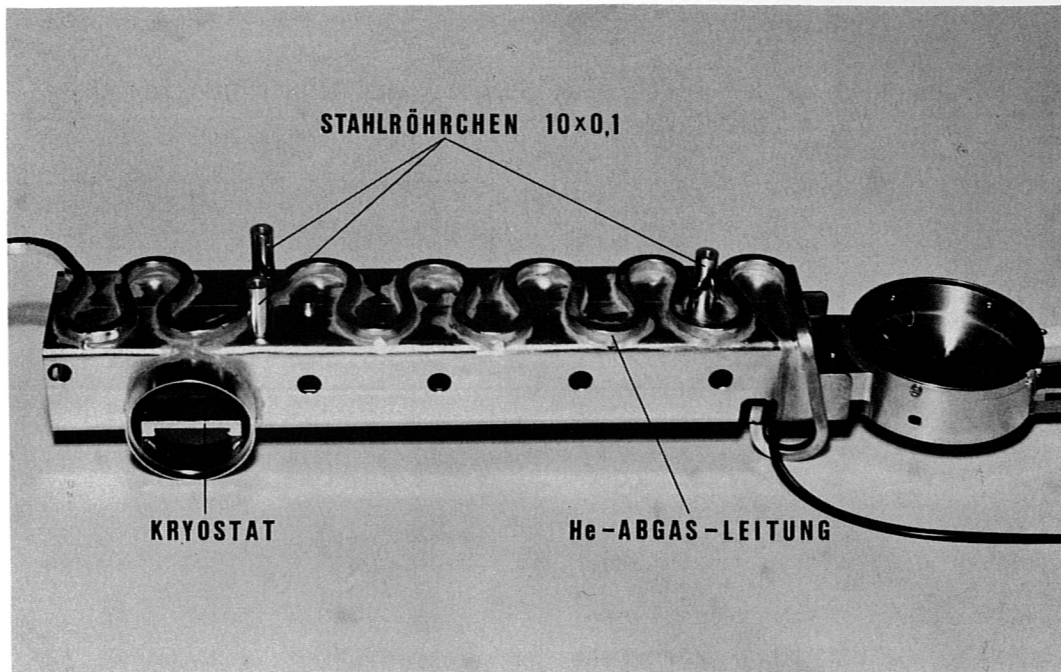


Abb. 11: Der He-Abgas-gekühlte Strahlungsschirm von unten mit dem Kryostaten und mit drei Stahl-Röhrchen 10 x 0,1 zur mechanischen Abstützung und thermischen Isolation

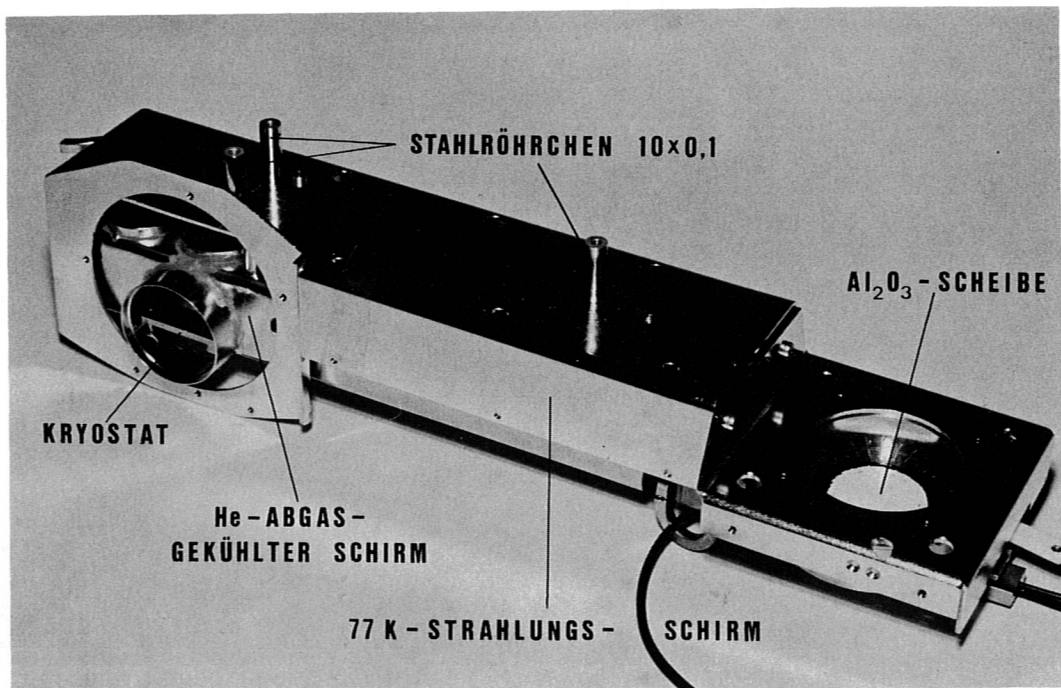


Abb. 12: Der 77 K-Strahlungsschirm, der He-Abgas-gekühlte Strahlungsschirm und der Kryostat von unten mit der Aluminiumoxid-Scheibe als Strahlungsschirm zwischen Abschlußbasis und Spule sowie drei Stahl-Röhrchen zur mechanischen Abstützung und thermischen Isolation

Die Forderungen werden durch eine Scheibe aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 0,65 mm dick,  $\varnothing 50$  mm, erfüllt /34/ (Abb. 8 und 12). Sie wurde in eine Abschirmscheibe aus Kupfer zentrisch eingeklebt; dazu wurde wegen günstiger Kontaktierungseigenschaften (hohe Wärmeleitfähigkeit und niedriger Ausdehnungskoeffizient) das Epoxidharz Stycast 2850 GT (Emerson & Cuming GmbH) benutzt.

Abb. 13 und 14 zeigen den in die Strahlungsschilde integrierten He-Verdampferkryostaten und das vollständig 77 K abgeschirmte System.

Um die Energieeinstrahlung bei der Beobachtung des Extrusionsvorganges mit der Fernsehkamera zu reduzieren, wird die Lichtintensität der Beleuchtung klein gehalten und ein Wärmeabsorptionsfilter (KG 3, Fa. Spindler & Hoyer) benutzt. Auch als Fenster zur Beobachtung der Extrusion dient ein solcher Absorptionsfilter, der in dem 77 K-Strahlungsschild eingebaut ist.

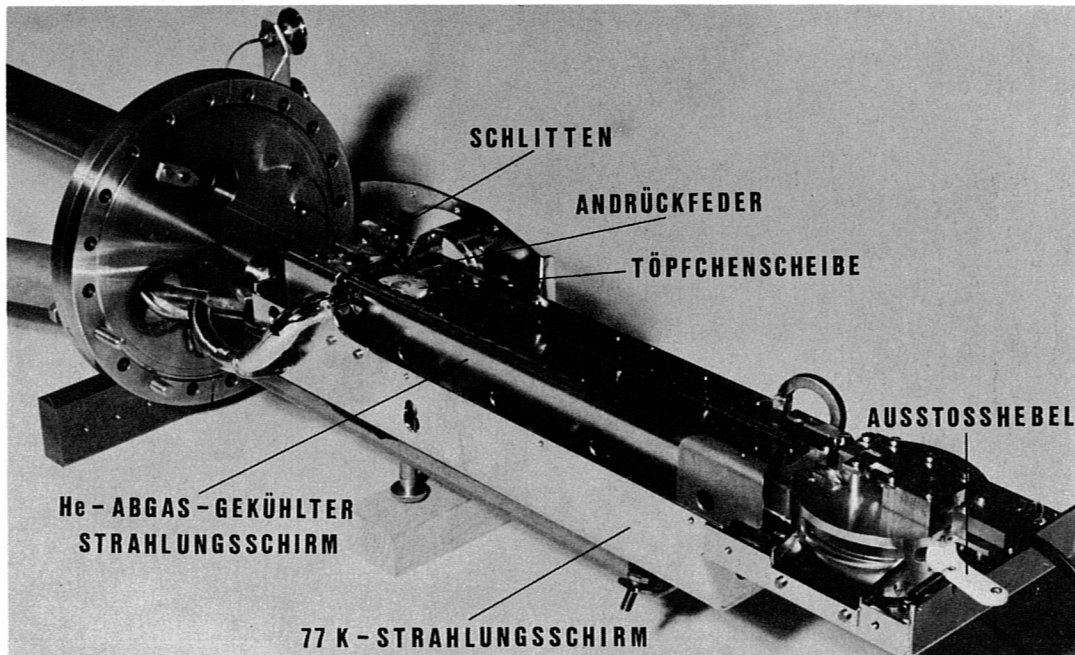


Abb. 13: Der He-Verdampferkryostat mit dem Schlitten, der Andrückfeder und der Töpfchenschleibe, umgeben von dem He-Abgas-gekühlten und flüssig-Stickstoff-gekühlten Strahlungsschild

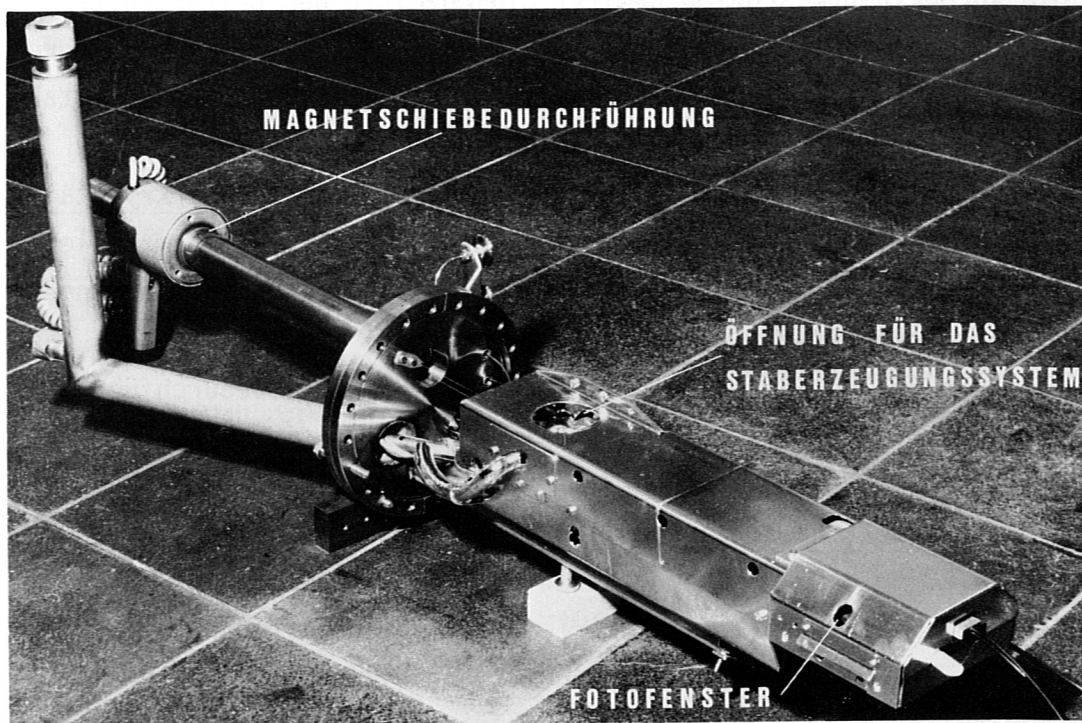


Abb. 14: Der vollständig strahlungsabgeschirmte He-Verdampferkryostat.  
Zu erkennen ist die Öffnung für das Staberzeugungssystem und das Fenster für die Kurzzeitfotografie des Pellet-aufpralls (s. Abschnitt 3.2) sowie die Magnetschiebedurchführung zur Bewegung des Schlittens (s. Abschnitt 2.2.7)

### 2.2.7 Transportmechanik und Magazin

Die Bewegung der Scheiben erfolgt über eine speziell entwickelte Mechanik. Dabei werden drei Magnet-Schiebe-Durchführungen eingesetzt: ein Magnetkern, der im Vakuum in einem Führungsrohr (Stahl X5 Cr Ni 19 8 - Werkstoff-Nr. 1.4301) auf Bronzerollen gelagert ist, wird durch manuelles Schieben einer außen auf dem Rohr befindlichen Magnetspule bewegt.

#### Transport vom Magazin zum He-Verdampferkryostaten

(Hub  $\approx 40$  mm): Ein Schieber, der eine Scheibe aus dem Magazin stößt, ist über ein Kugelgelenk direkt an den Magnetkern gekoppelt.

Die ausgestoßene Scheibe bewirkt gleichzeitig den Weitertransport aller Scheiben, die die Vorkühlstufen bis zum Kryostaten passieren und bringt damit auch eine Scheibe in Füllposition unter das Staberzeugungssystem (Abb. 15).

Transport auf dem als Schiene konzipierten He-Verdampferkryostaten (Hub  $\approx 300$  mm): Der abgekühlte Schlitten, der die mit dem Pellet beladene Scheibe in Abschußposition oberhalb der Beschleunigungsspule transportiert, wird über ein Stahlseil  $0,4$  mm  $\varnothing$  bewegt, das über ein Rollensystem mit dem Magnetkern der Schiebedurchführung verbunden ist (Abb. 15). Das Stahlseil dient gleichzeitig als thermische Isolationsstrecke.

Transport der abgeschossenen Scheiben von der Abschußbasis (Hub  $\approx 50$  mm): Die abgeschossenen Scheiben werden mittels eines "kalten" Hebels aus Teflon über eine Rampe ausgestoßen (Abb. 13, 15 und 18). Die Bewegung des Magnetkerns wird dabei über ein Stahlseil  $0,4$  mm  $\varnothing$  auf den Hebel übertragen; die Rückstellung des Hebels in Ausgangsposition wird durch eine Zugfeder bewirkt.

Das Magazin besteht aus einem Aluminiumrohr mit elliptischem Querschnitt, das in regelmäßigen Abständen eingesägt ist, so daß 70 Scheiben übereinander deponiert werden können (Abb. 16). Es befindet sich vertikal in einer Schiene, in der der elliptische Magazinquerschnitt ausgespart ist, so daß die untere Scheibe im Magazin auf der Schiebeebe liegt. Die elliptische Form verhindert einerseits die Verdrehung des Magazins aus der gewünschten Lage, andererseits das Kippen des Magazins, da die Hauptachse der Ellipse so dimensioniert ist, daß sich das Magazin in einem senkrecht angebrachten Rohr (NW 35) selbst führt.

Wird die untere Scheibe mit dem Schieber weggeschoben, so fällt das Magazin durch freien Fall so weit, bis die nächste Scheibe auf der Schiebeebe zu liegen kommt.

Nachdem die letzte Scheibe aus dem Magazin geschoben ist, fällt das Magazin durch die Schiene in ein dafür vorgesehenes Rohr. Über eine mechanische Dreh-Schiebe-Durchführung kann die Schiene nun so weit zurückgezogen werden, daß ein Pendelschieber zur

Die ausgestoßene Scheibe bewirkt gleichzeitig den Weitertransport aller Scheiben, die die Vorkühlstufen bis zum Kryostaten passieren und bringt damit auch eine Scheibe in Füllposition unter das Staberzeugungssystem (Abb. 15).

Transport auf dem als Schiene konzipierten He-Verdampferkryostaten (Hub  $\approx$  300 mm): Der abgekühlte Schlitten, der die mit dem Pellet beladene Scheibe in Abschußposition oberhalb der Beschleunigungsspule transportiert, wird über ein Stahlseil 0,4 mm  $\varnothing$  bewegt, das über ein Rollensystem mit dem Magnetkern der Schiebedurchführung verbunden ist (Abb. 15). Das Stahlseil dient gleichzeitig als thermische Isolationsstrecke.

Transport der abgeschossenen Scheiben von der Abschußbasis (Hub  $\approx$  50 mm): Die abgeschossenen Scheiben werden mittels eines "kalten" Hebels aus Teflon über eine Rampe ausgestoßen (Abb. 13, 15 und 18). Die Bewegung des Magnetkerns wird dabei über ein Stahlseil 0,4 mm  $\varnothing$  auf den Hebel übertragen; die Rückstellung des Hebels in Ausgangsposition wird durch eine Zugfeder bewirkt.

Das Magazin besteht aus einem Aluminiumrohr mit elliptischem Querschnitt, das in regelmäßigen Abständen eingesägt ist, so daß 70 Scheiben übereinander deponiert werden können (Abb. 16). Es befindet sich vertikal in einer Schiene, in der der elliptische Magazinquerschnitt ausgespart ist, so daß die untere Scheibe im Magazin auf der Schiebeebe liegt. Die elliptische Form verhindert einerseits die Verdrehung des Magazins aus der gewünschten Lage, andererseits das Kippen des Magazins, da die Hauptachse der Ellipse so dimensioniert ist, daß sich das Magazin in einem senkrecht angebrachten Rohr (NW 35) selbst führt.

Wird die untere Scheibe mit dem Schieber weggeschoben, so fällt das Magazin durch freien Fall so weit, bis die nächste Scheibe auf der Schiebeebe zu liegen kommt.

Nachdem die letzte Scheibe aus dem Magazin geschoben ist, fällt das Magazin durch die Schiene in ein dafür vorgesehenes Rohr. Über eine mechanische Dreh-Schiebe-Durchführung kann die Schiene nun so weit zurückgezogen werden, daß ein Pendelschieber zur

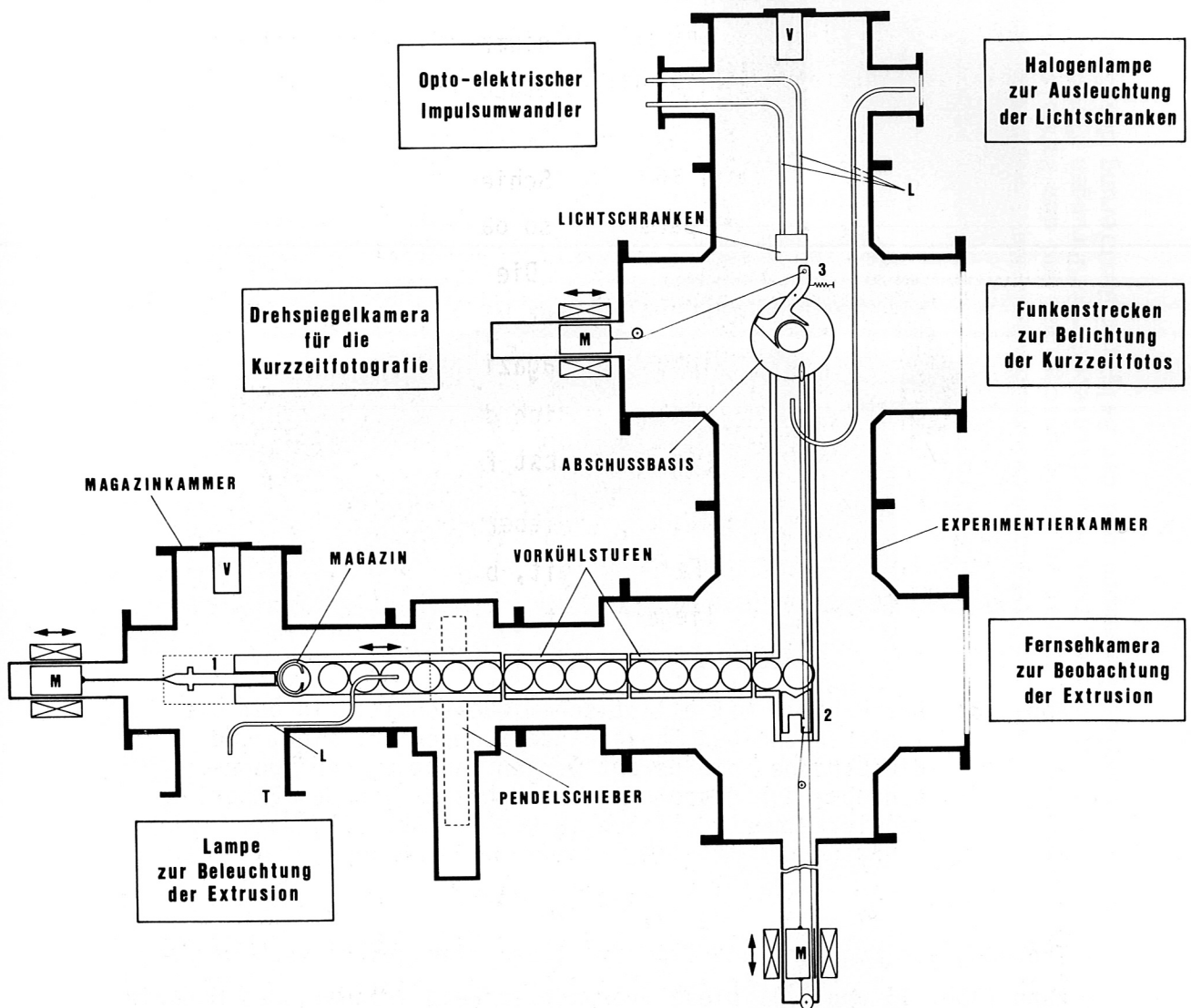


Abb. 15: Schematische Darstellung der Apparatur mit der Magazin- und Experimentierkammer und dem Pendelschieber zur Trennung der Kammern sowie den drei - mittels Magnetschiebedurchführungen {M} bewegten - Bauteilen für den Transport der Scheiben:  
 {1} Schieber - {2} Schlitten - {3} Ausstoßhebel.  
 Zu erkennen ist zudem die räumliche Anordnung der Beobachtungs- und Diagnostikeinrichtungen (s. Abschnitt 3 und 5.1).  
 {L} = Lichtleiter - {V} = Vakuummeßbröhre  
 {T} = Turbomolekularpumpe (s. Abb. 17).

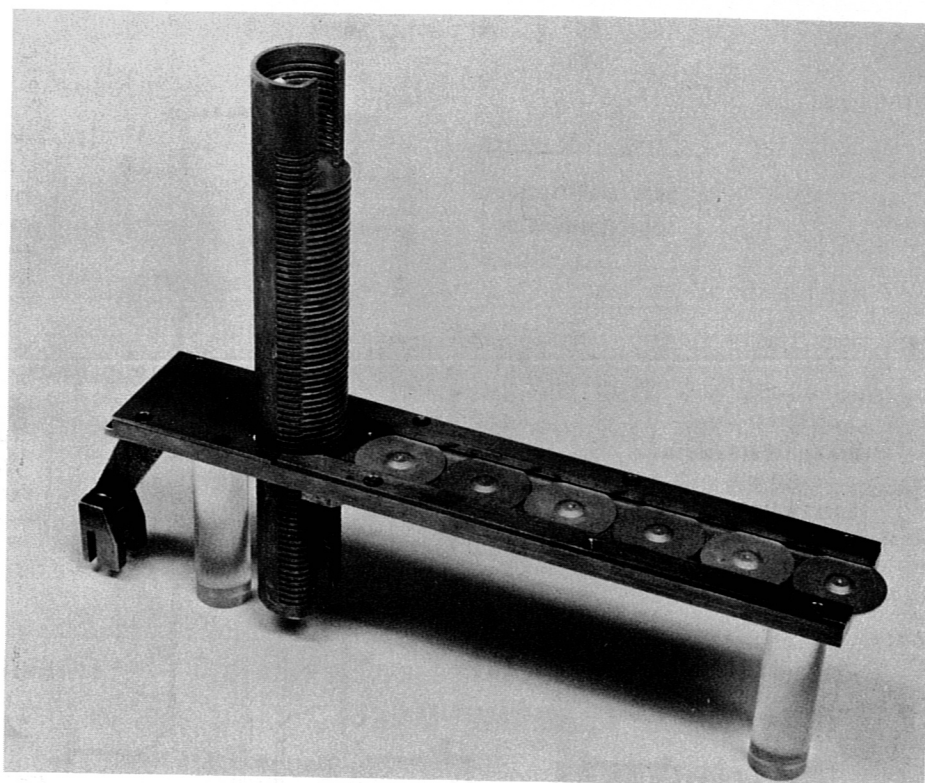


Abb. 16: Das Magazin mit elliptischem Querschnitt, in dem die Töpfchenscheiben übereinandert deponiert sind, und die Schiene, die bewegt werden kann, um den Trennschieber zur Absperrung der Magazin- von der Experimentierkammer schließen zu können (Abb. 15)

Trennung von Magazin- und Experimentierkammer geschlossen werden kann (Abb. 15 und 17). Diese Trennmöglichkeit erlaubt, das Magazin mit Scheiben nachzufüllen, ohne daß der "kalte" Teil der Apparatur belüftet zu werden braucht.

Zur Nachfüllung wird die Magazinkammer mit Argon geflutet und anschließend das gefüllte Magazin oberhalb der Schiene deponiert. Befindet sich die ellipsenförmige Öffnung in der Schiene nach dem Abpumpen der Magazinkammer und dem Öffnen des Pendelschiebers wieder unter dem Magazin, wird über eine Durchführung das Magazin freigegeben, das durch sein Gewicht in die vorgesehene Position in der Schiene fällt (Fallhöhe  $\approx 15$  mm).

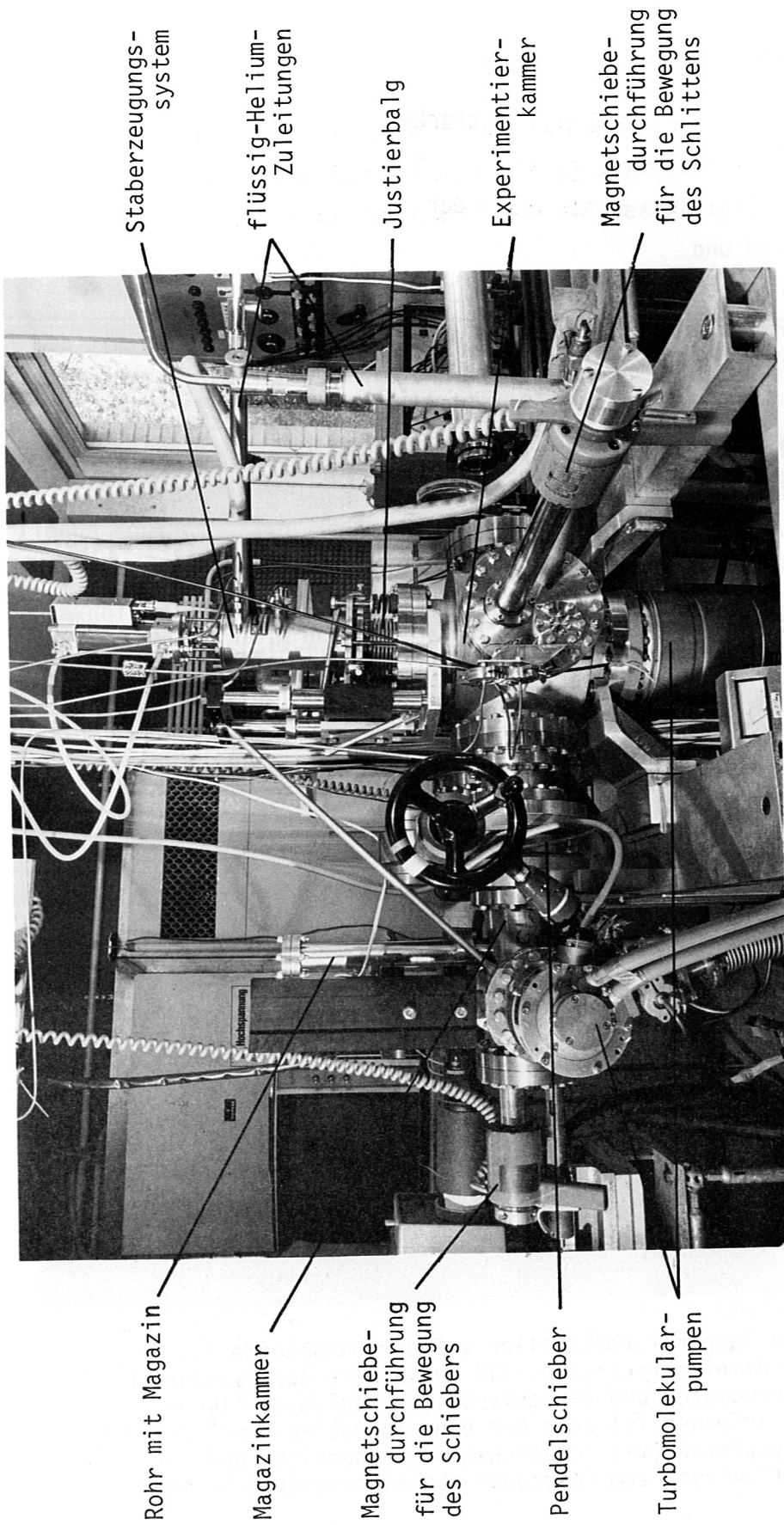


Abb. 17: Die Apparatur für die Untersuchung der Vorgänge beim Auftreffen von Deuterium-Pellets auf eine starre Wand. Das Foto zeigt die Experimentierkammer mit dem Staberzeugungssystem und den flüssig-Helium-zuleitungen sowie die Magazinkammer mit dem Vorrat an Töpfenscheiben und dem Pendelschieber zur Trennung der Kammern. Zu erkennen sind auch zwei Magnetschiebedurchführungen für die Bewegung der Scheiben, die zwei Turbomolekularpumpen und der Balg zur Justierung des Staberzeugungssystems.



### 2.2.8 Temperaturmessung

Die Temperatur des als Schiene ausgelegten He-Verdampferkryostaten wird an zwei Stellen mit je einem Dampfdruckthermometer bestimmt:

1. nahe der Eintrittsstelle des flüssigen Heliums in den Kryostaten und
2. nahe der Abschlußbasis (Abb. 18).

Das Dampfdruckthermometer besteht aus einer Meßkammer, die mit dem Kryostaten thermisch gekoppelt ist und die mit  $\text{He}^4$ -Gas gefüllt wird, das in dem interessierenden Temperaturbereich kondensiert. Über eine Kapillare ist die Meßkammer mit einem Druckmeßsystem verbunden, das den sich einstellenden Gleichgewichtsdampfdruck mißt [35, 36, 37]. Der Druck wird über Druckaufnehmer 0-2 bar (Fa. Schaevitz) mittels Schreiber registriert.

Da kein Medium existiert, das in dem Temperaturintervall zwischen 4,5 K und 13,8 K kondensiert, ist in diesem Bereich eine Temperaturbestimmung mit dem Dampfdruckthermometer nicht möglich.

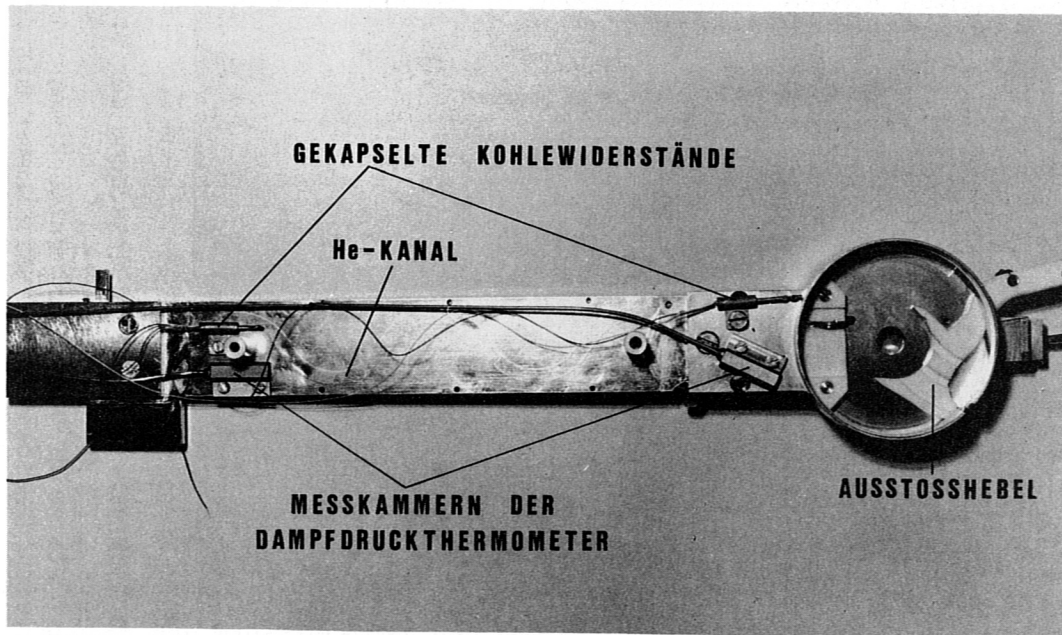


Abb. 18: Die Temperaturmeßstellen auf der Unterseite des He-Verdampferkryostaten: die Meßkammern der Dampfdruckthermometer und die gekapselten Kohlewiderstände. Zu erkennen ist auch der eingelötete He-Kanal des Kryostaten (mit rechteckigem Querschnitt) und der Teflonhebel zum Ausstoßen abgeschossener Scheiben

In diesem Bereich wird die Temperatur mit dem He-Konstant-Volumen-Gas-Thermometer bestimmt /37/. Für genaue Messungen muß dabei berücksichtigt werden, daß die Meßkammer (Volumen V) eine niedrigere Temperatur hat als die Druckmeßanordnung (Volumen  $V_0$ ).

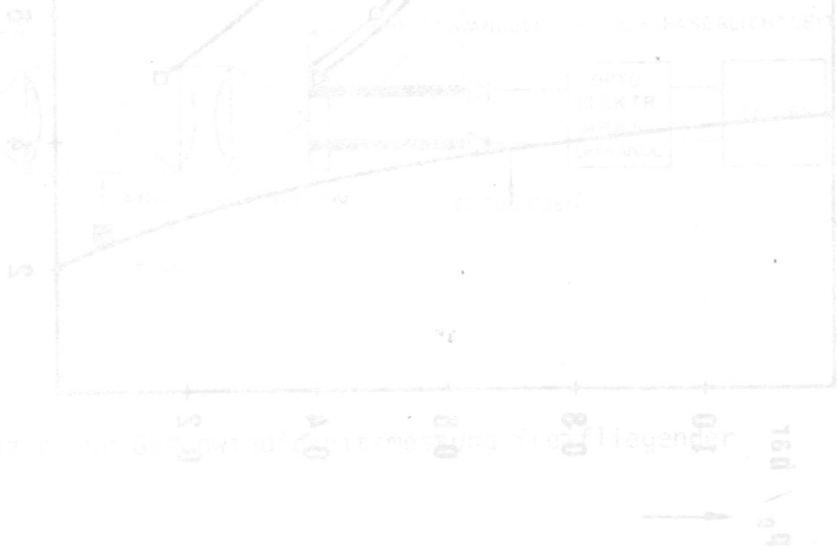
Als Temperatur-Druck-Funktion ergibt sich:

$$T = \frac{T_0}{\frac{p_0}{p} + \left( \frac{p_0}{p} - 1 \right) \cdot \frac{V_0}{V}}$$

Das Verhältnis  $\frac{V_0}{V}$  der Meßanordnung wird mit gekapselten Kohlewiderständen /38/ geeicht, die nahe den Meßkammern mit der Kaltfläche Kontakt haben (Abb. 18).

Für die Eichung wird die Meßkammer mit  $nH_2$  gefüllt und der Kryostat abgekühlt. Im  $nH_2$ -Dampfdruckbereich mißt man zu der bekannten Temperatur den elektrischen Widerstand. Ist die Meßkammer wieder mit Helium gefüllt, läßt sich für diesen gemessenen Widerstandswert der Helium-Gas-Druck bei dieser Temperatur bestimmen: aus dem p/T-Wertepaar ergibt sich  $\frac{V_0}{V}$  der Meßanordnung (Abb. 19).

In das System für die Herstellung der Deuteriumstäbe sind ebenfalls eine Dampfdruck-Meßkammer und ein mit Stycast 2850 GT kontaktierter Kohlewiderstand integriert.



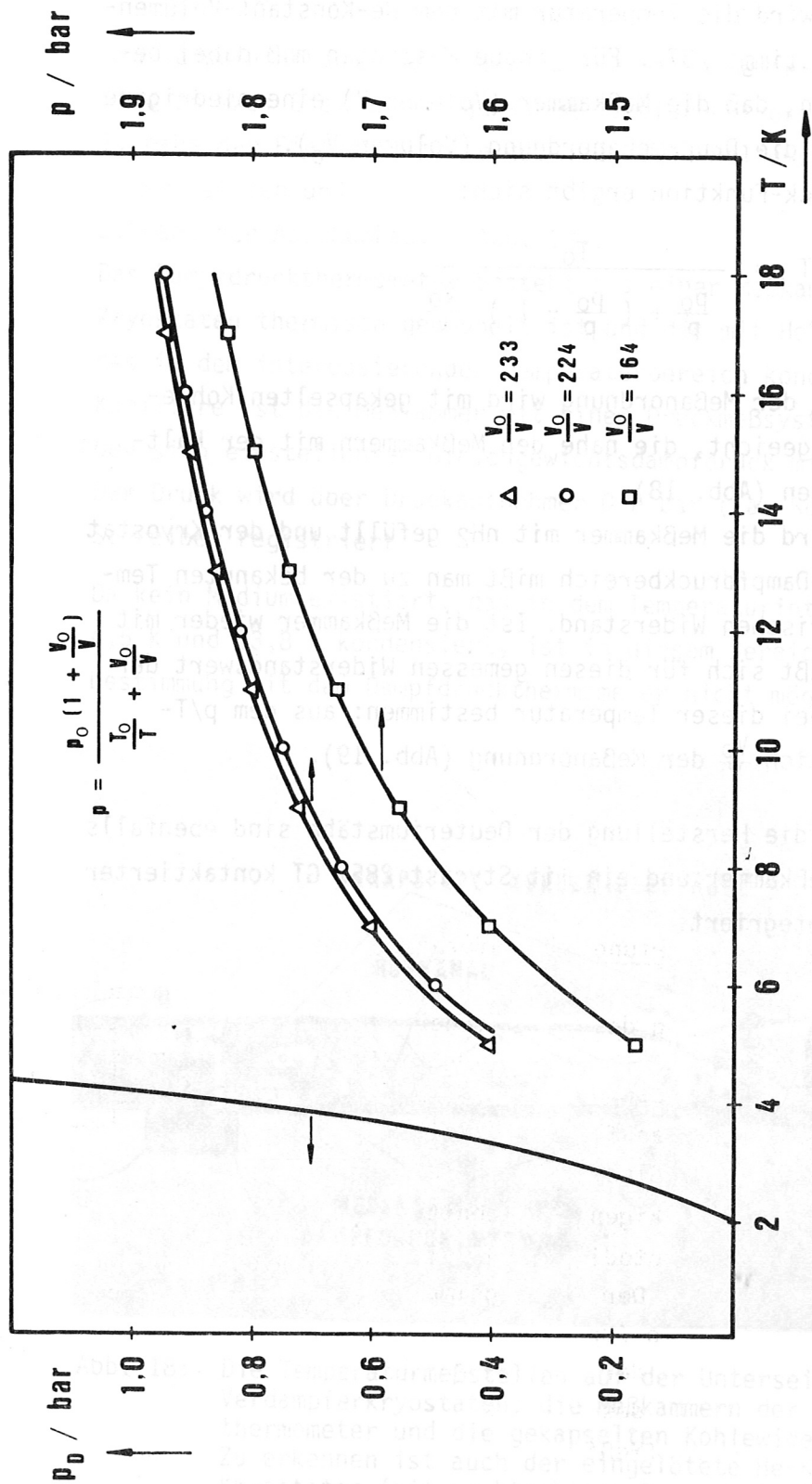


Abb. 19: Druck-Temperatur-Abhängigkeit des Heliumgases in den Meßkammern der Dampfdruckthermometer für Temperaturen  $> 5$  K für  $T_0 = 295$  K und  $p_0 = 2$  bar, geeicht für die Meßanordnung sowie die Dampfdruckkurve  $p_D(T)$  für  $He^4/37/$ .

- $\Delta$  = Meßkammer bei der Eintrittsstelle des flüssigen Heliums in den Verdampferkryostat (Füllposition der Scheibe)
- $\circ$  = Meßkammer bei der Austrittsstelle des gasförmigen Heliums aus den Kryostaten (nahe der Abschußbasis)
- $\square$  = Meßkammer des Staberzeugungssystems
- $V_0$  = Volumen des Druckmeßsystems;  $V$  = Meßkammervolumen
- $T_0$  = Temperatur des Volumens  $V_0 \hat{=}$  Umgebungstemperatur
- $p_0$  = Fülldruck der Meßanordnung bei  $T_0$

### 3. Einrichtungen zur Auswertung von Aufprallexperimenten

#### 3.1 Geschwindigkeitsmessung des freifliegenden Pellets

Die Bestimmung der Pelletgeschwindigkeit erfolgt mittels Lichtschranken: dabei dunkelt das fliegende Pellet nacheinander zwei beleuchtete, spaltförmige Glasfaserlichtleiterbündel ab. Diese passen optisch den rechteckigen Querschnitt der Lichtleiterspalte an den kreisförmigen der Fotodioden an, die als opto-elektrische Wandler eingesetzt werden. Der Ausgangsimpuls der Dioden wird verstärkt und der zeitliche Impulsabstand mit einem elektronischen Zähler gemessen. Da sowohl der Abstand der Lichtleiterspalte als auch der Abbildungsmaßstab des Pellets bekannt ist, ergibt sich die Pelletgeschwindigkeit (Meßfehler  $\lesssim 5\%$ ).

Das Meßprinzip zeigt Abb. 20. Die technische Ausführung ist in Abb. 3 und 8, die räumliche Anordnung in Abb. 15 und 22 zu erkennen.

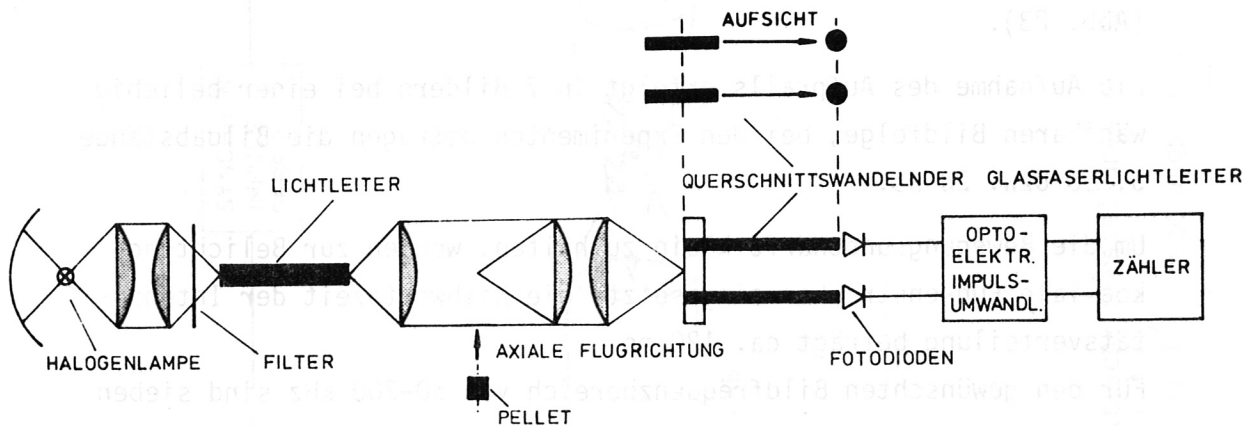


Abb. 20: Das Prinzip der Geschwindigkeitsmessung freifliegender Pellets

### 3.2 Kurzzeitfotografie des Pellet-Aufpralls auf das Target

Für die zeitliche Auflösung des Aufpralls des zylindrischen Pellets auf das Target wird eine Drehspiegelkamera (Fa. Beckman & Whitley, Modell 200) eingesetzt. Die Rotation des Spiegels wird dabei durch eine Druckluftturbine bewirkt. Der reproduzierbare Hochlauf wird durch Expansion eines abgeschlossenen Volumens ( $V_0 = 0,15 \text{ m}^3$ ,  $p_0 = 1,4 \text{ bar}$ ) erreicht.

Zur Triggerung der Kurzzeitfotografie wurde eine Synchronisationselektronik entwickelt: Bei der Rotation des Spiegels wird pro Umlauf induktiv ein Synchronimpuls erzeugt. Die Zeitdifferenz zwischen den Synchronimpulsen, die der Spiegelfrequenz entspricht, wird mit einem eingestellten Soll-Impulsabstand verglichen, der der gewünschten Soll-Frequenz des Spiegels und damit der gewünschten Spiegelgeschwindigkeit entspricht. Diese wiederum ist festgelegt durch den gewünschten zeitlichen Bildabstand zur fotografischen Auflösung des Aufpralls. Wird beim Hochlauf der Turbine dieser Sollwert erreicht, so wird ein Triggersignal erzeugt, das den gesamten fototechnischen Funktionsablauf (Abb. 21) und den Beschleunigungsvorgang steuert (Abb. 23).

Die Aufnahme des Aufpralls erfolgt in 7 Bildern bei einer beliebig wählbaren Bildfolge; bei den Experimenten betragen die Bildabstände 5, 10 bzw. 20  $\mu\text{s}$ .

Um die Bewegungsunschärfe klein zu halten, werden zur Belichtung koaxiale Funkenstrecken eingesetzt: die Halbwertszeit der Intensitätsverteilung beträgt ca. 120 ns.

Für den gewünschten Bildfrequenzbereich von 50-200 kHz sind sieben getrennt anzusteuernde Funkenstrecken notwendig; da die Ausleuchtung des aufprallenden Pellets bei jeder Aufnahme in derselben Ebene erfolgen muß und die Funkenstrecke eine räumliche Ausdehnung hat, wird das Licht über einen 7-Kanal-Glasfaserlichtleiter an einem Ort gesammelt (Abb. 21 und 22).

Zur Triggerung der Blitze muß die Gesamtflugzeit des Pellets bekannt sein. Daher wird mit einem elektronischen Zähler die Zeit

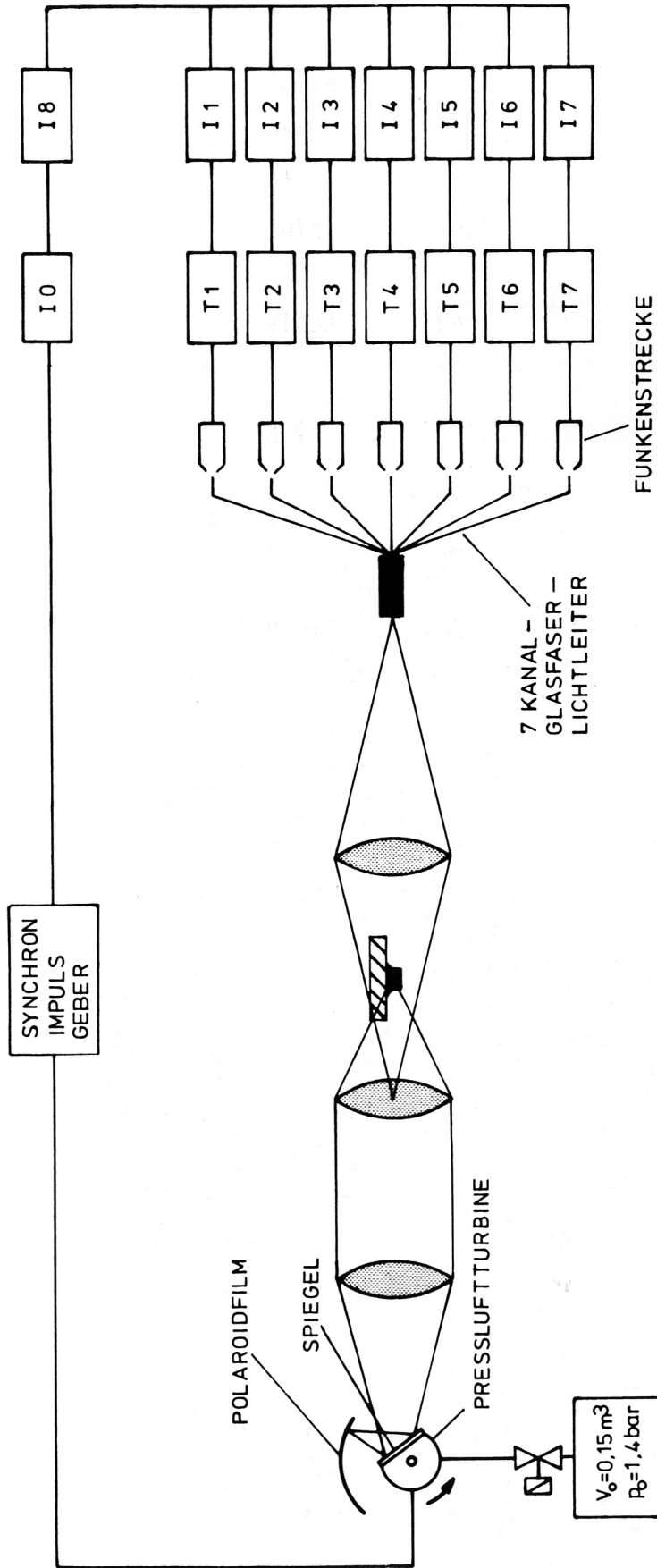
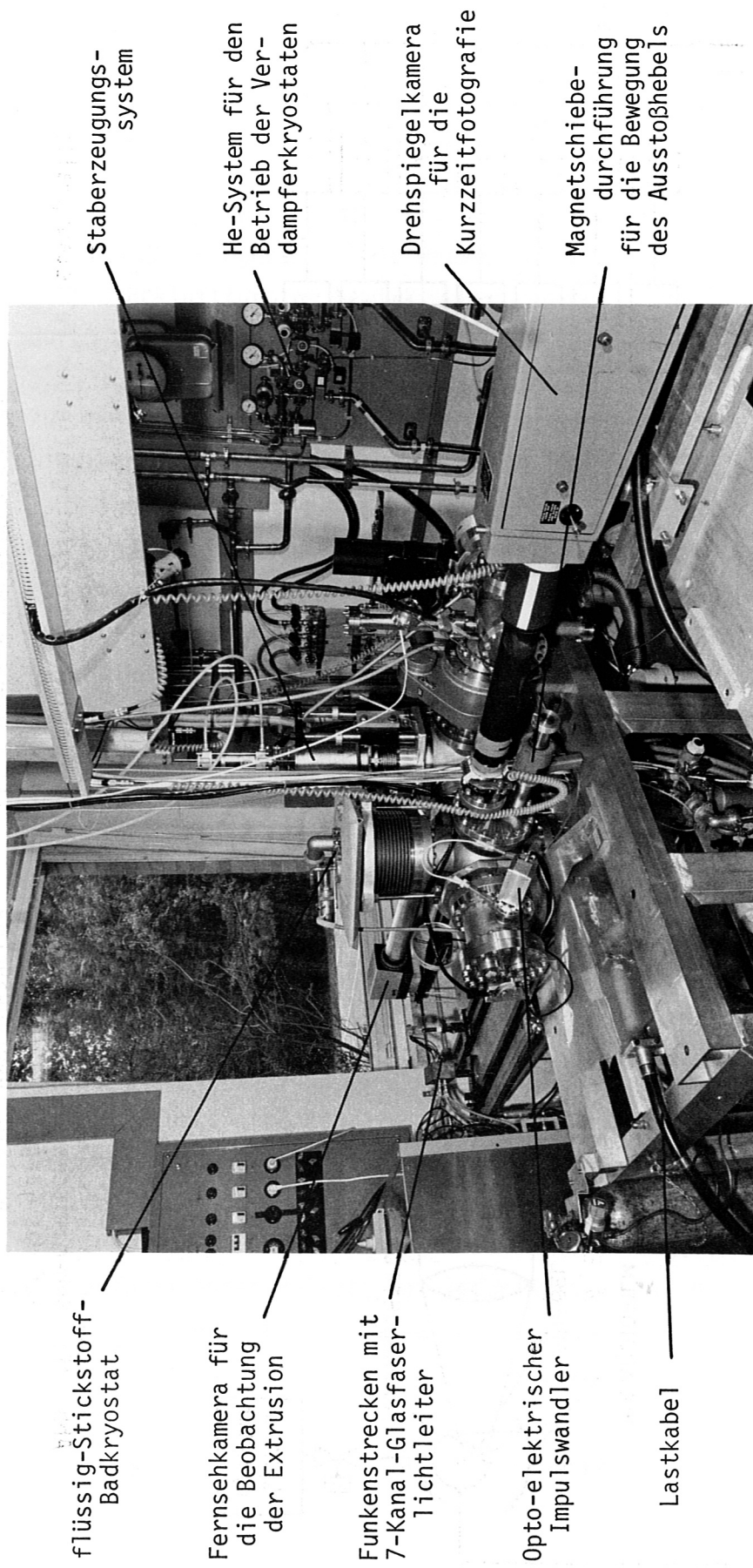


Abb. 21: Schematische Darstellung der Anordnung für die Kurzzeitfotografie des Pelletaufpralls auf das Target.

{I} = Impulsverzögerungsgerät - {T} = Hochspannungsimpulsgerät



flüssig-Stickstoff-Badkryostat

Fernsehkamera für die Beobachtung der Extrusion

Funkenstrecken mit 7-Kanal-Glasfaserlichtleiter

Opto-elektrischer Impulswandler

Lastkabel

Staberzeugungssystem

He-System für den Betrieb der Verdampferkryostaten

Drehspiegelkamera für die Kurzzeitfotografie

Magnetschiebe-durchführung für die Bewegung des Ausstoßhebels

Abb. 22: Apparatur zur Erzeugung freifliegender Deuterium-Pellets mit den Einrichtungen zur Fotografie des Pelletaufpralls auf das Target. Zu erkennen sind zudem Teile des He-Systems für den Betrieb der Verdampferkryostaten, der flüssig-Stickstoff-Badkryostat sowie Komponenten des Wirbelstrombeschleunigers, der Diagnostik und der Transportmechanik

zwischen der Triggerung der Funkenstrecke des Hochspannungsstoßkreises und dem Erreichen der Lichtschranke durch das Pellet registriert. Mit der gemessenen Geschwindigkeit und dem bekannten Abstand der Lichtschranke zum Target ergibt sich die Flugzeit des Pellets.

Bei den Experimenten lagen - entsprechend der Geschwindigkeit - die Flugzeiten der Pellets in dem Bereich zwischen 300-600  $\mu$ s. Außerdem muß die Position des Drehspiegels zum Zeitpunkt der Triggerung definiert und einstellbar sein. Die Synchronisation wird durch eine relative Winkelverschiebung des Spiegels zum induktiven Synchronimpulsgeber erreicht. Diese Verschiebung ist sowohl von der Spiegelfrequenz als auch von der Gesamtflugzeit des Pellets abhängig.

Als Filmmaterial bewährte sich der hochempfindliche Polaroidfilm Typ 410.

### 3.3 Automatische Steuerung der Vorgänge

Die Steuerung der Beschleunigung und die Meßwertaufnahme laufen auf Knopfdruck automatisch ab: nach manuell ausgelöster Entladung des elektrischen Kreises werden nach 2 s der Kondensator und der Triggerkreis geladen. Diese Vorgänge sind nach 3 s beendet. Anschließend wird die Turbine der Drehspiegelkamera durch das Öffnen des Kesselventils gestartet. Hat der Spiegel die Sollfrequenz erreicht, wird der Hochspannungsstoßkreis und die Kurzzeitfotografie getriggert und nach weiteren 5 s der Stoßstromkreis geerdet.

Das gesamte Funktionsschema ist in Abb. 23 als Blockschaltbild dargestellt.



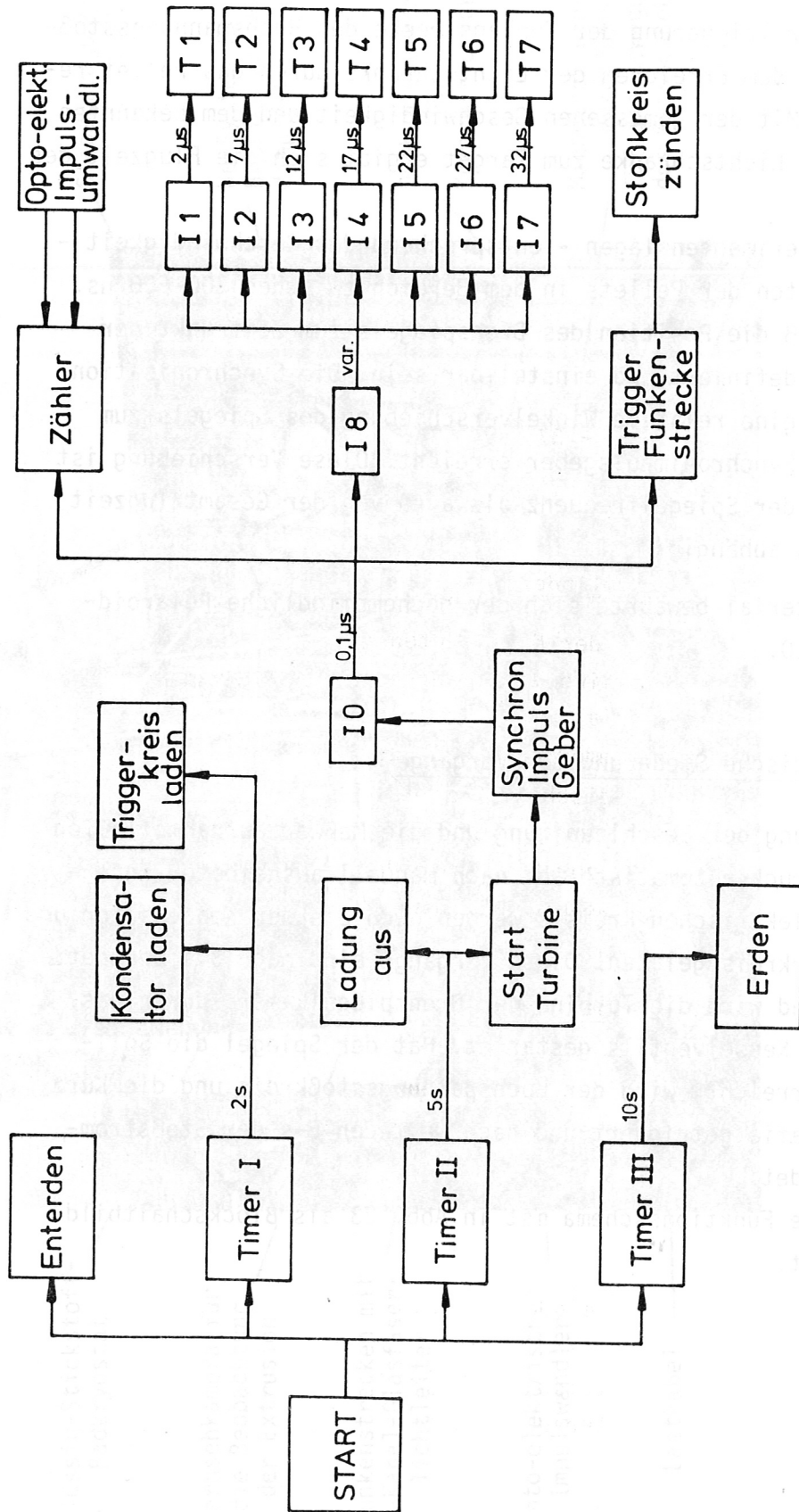


Abb. 23: Blockschaubild der automatisch ablaufenden Vorgänge bei der Beschleunigung und der Meßwertaufnahme.  
 {I} = Impulsverzögerungsgerät  
 {T} = Hochspannungsimpulsgerät der Funkenstrecke für die Belichtung der Kurzzeitfotos  
 (die Zeitangaben sind typische Verzögerungszeiten bei den Experimenten)

#### 4. Vorversuche mit Wachszyllindern

Bevor mit der Konstruktion der Komponenten für das kryotechnische Verfahren begonnen wurde, sind Vorversuche mit Wachszyllindern gemacht worden. Dieses Material wurde gewählt, weil es die relativ einfache Handhabung bei Zimmertemperatur erlaubt und erwartet wird, daß es sich bezüglich plastischer Eigenschaften ähnlich verhält wie festes Deuterium /39/.

Die Vorexperimente dienen zur Erprobung des Beschleunigungsverfahrens, der Diagnostikeinrichtungen und der Einsatzfähigkeit geschlitzter Kupferscheiben als Abschlußbasis.

##### Durchführung der Vorversuche

Auf eine über der Beschleunigungsspule liegenden Aluminiumscheibe ( $\varnothing$  29,9 mm, Dicke 1 mm) wird im Zentrum axial ein Wachszyllinder ( $\varnothing$  2 mm, Höhe 2 mm) positioniert. Es werden Zylinder aus Bienenwachs (Cera flava puriss. DAB 7) und Paraffin (P. durum, Erstarungspunkt 50 - 56<sup>0</sup> C) benutzt, die in einem Schmelzziehverfahren hergestellt werden.

Die mit dem Wachszyllinder beladene Scheibe wird beschleunigt und nach 6 mm mechanisch durch einen Auffänger abgebremst. Durch eine Bohrung im Auffänger - zentrisch zur aufprallenden Scheibe - fliegt das Wachsteilchen frei weiter und trifft nach weiteren 30 mm Flugweg auf ein starres Target.

Der Auffänger und das Target sind aus Isolations- und Festigkeitsgründen aus Epoxidharz-Glasseidengewebe (Hgw 2372, DIN 7735).

Die Experimentieranordnung zeigt Abb. 24.

Zur Vermeidung von Störungen durch Luftumströmungen (Kippen der Zylinder) finden die Wachsversuche im Feinvakuum statt.

Unterschiedliche Aufprallgeschwindigkeiten der Teilchen werden durch Variation der Ladespannung des Kondensators erreicht. Bei den gewählten Stoßkreisdaten (s. Abschnitt 2.2.4) tritt während der Beschleunigungsphase keine plastische Verformung der Wachszyllinder auf (die statische Druckfließspannung beträgt für Bienen-

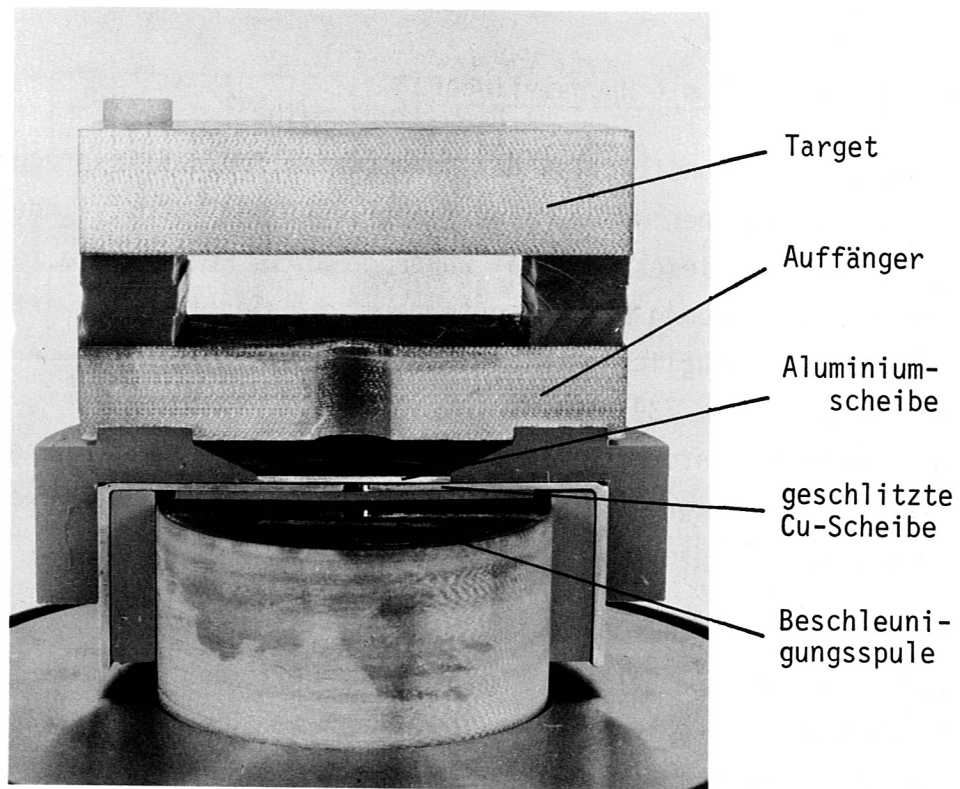


Abb. 24: Die Versuchsanordnung der Vorexperimente mit Wachs-  
zylindern.  
Alle Komponenten außer der Beschleunigungsspule sind  
im Schnitt zu erkennen.

wachs 14,5 bar, für Paraffin 13,7 bar - sie wurde aus Kraft-Stau-  
chungs-Kurven ermittelt, die bei Druckversuchen an Wachsproben im  
Staatlichen Materialprüfamt für Maschinenbau der TU München aufge-  
nommen wurden /40/).

Abb. 25 zeigt als Beispiel ein typisches Kurzzeitfoto des Aufpralls  
eines Paraffinzylinders auf das Target.

#### Ergebnisse der Vorversuche

- Der Wirbelstrombeschleuniger ist geeignet, Zylinder so zu be-  
schleunigen, daß sie nach der Trennung von der Aluminiumscheibe  
frei und axial stabil fliegen.
- Sowohl die Flugrichtung als auch die Geschwindigkeit der Zylinder  
ist reproduzierbar.

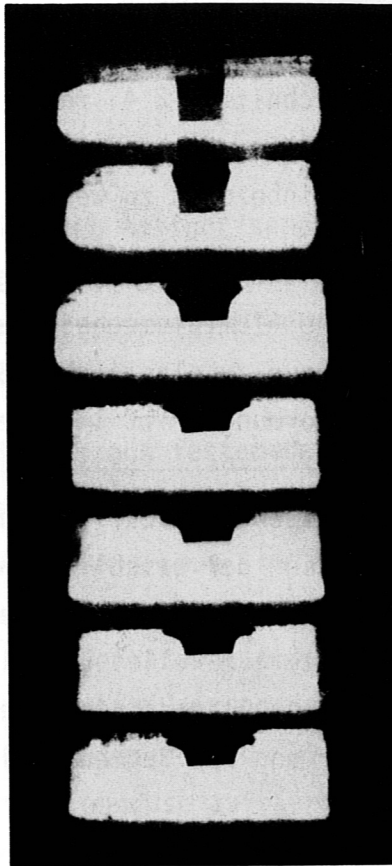


Abb. 24: Kurzzeitfotografie des Aufpralls eines Paraffinzylinders auf das Target.

Bildfolge: von oben nach unten

Flugrichtung: von unten nach oben

Blitzabstand: alle  $5 \mu\text{s}$

Aufprallgeschwindigkeit:  $125,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Damit konnte gezeigt werden, daß noch nicht untersuchte Effekte wie angeregte Schwingungen der Aluminiumscheibe und die durch die Fertigung gegebene minimale Abweichung des magnetischen und geometrischen Mittelpunktes keinen merklichen Einfluß auf die stabile Flugbahn des Zylinders haben.

- Die Dämpfung des Beschleunigungsmagnetfeldes durch geschlitzte Kupferscheiben zwischen Spule und Aluminiumscheibe hat nur geringen Einfluß auf die Teilchengeschwindigkeit ( $< 10\%$ ).

Dieses Ergebnis bestätigt, daß die Berechnung der Beschleunigung der Aluminiumscheibe (s. Abschnitt 2.2.4) realistische Orientierungswerte liefert, ohne daß die symmetrisch geschlitzte Kupferscheibe ins Rechenprogramm einbezogen zu werden braucht.

- Die Segmente einer 1 mm dicken, symmetrisch geschlitzten Cu-Scheibe zwischen Spule und Aluminiumscheibe werden durch die induzierten Wirbelströme nur zu elastischen Schwingungen ange-regt, eine bleibende Verformung tritt im Anwendungsbereich nicht auf.
  - Der Aufprall der abgebremsten, zurückfliegenden Aluminiumscheibe verursacht keine Deformation der geschlitzten Kupferscheibe.
- Diese Erkenntnisse waren wichtige Voraussetzungen für die Ausführung der Abschlußbasis im Deuterium-Pellet-Experiment, bei dem jede Scheibe reproduzierbar in Abschlußlage fixiert sein muß. Das wäre bei einer plastischen Verformung der Segmente nicht mehr gewährleistet.

Die Vorversuche mit Wachs ermöglichten zudem, die gewünschte Zuverlässigkeit für die Geschwindigkeitsmessung und die Kurzzeitfotografie zu erreichen.

## 5. Aufprallexperimente mit Deuterium-Pellets

### 5.1 Durchführung der Versuche

Für Experimente, bei denen zylindrische Deuterium-Pellets erzeugt, elektromagnetisch beschleunigt, von der Trägerscheibe getrennt und gegen ein starres Target geschossen werden, hat sich folgender Funktionsablauf bewährt:

#### I. Erzeugung eines Stabes aus festem Deuterium

- Abkühlen des Verdampferkryostaten des Staberzeugungssystems
- Einstellen der Basistemperatur ( $\approx 3,8$  K) durch Drosseln der flüssig Helium-Zufuhr
- Einstellen der Einkondensationstemperatur ( $\approx 5,2$  K) durch Einschalten der elektrischen Heizung bei konstantem He-Durchfluß
- Einlassen des Deuteriumgases ( $nD_2$  99,7 %) in den Kondensationsraum, bis die Extrusionsdüse zufriert
- Füllen des Systems bis zu einem  $D_2$ -Gasdruck von 500 mbar
- Einkondensieren des  $D_2$ -Gases im Kondensationsraum ( $\varnothing 4$  mm)
- Verdichten des eingefrorenen Deuteriums durch Belastung mittels eines druckluftgetriebenen Kolbens (5 bar)
- Langsames Erhöhen der Kryostatentemperatur durch elektrisches Heizen bei konstanter Kolbenbelastung und konstantem He-Durchsatz bis zur Extrusionstemperatur ( $\approx 8,5$  K)
- Extrusion des Deuteriumstabes von 1 mm Durchmesser
- Einstellen der gewünschten Extrusionsgeschwindigkeit durch minimale Temperaturänderung durch Variieren des Heizstromes
- Extrusion, bis der Stab den warmen, als Schiene konzipierten He-Verdampferkryostaten berührt
- Stoppen der Extrusion durch Abkühlen des Kryostaten auf Basistemperatur durch Abschalten der Heizung
- Abscheren des ersten ausgestoßenen Stabes durch den Schlitten ("Abfall" - bedingt durch den Einkondensationsvorgang).

Der Einkondensationsvorgang und die Verdichtung des Deuteriums werden ausschließlich mit Meß- und Anzeigeräten des Staberzeugung-

gungssystems kontrolliert. Die Extrusion wird von einer Fernsehkamera, die den Vorgang auf einen Monitor (60-fache Vergrößerung) überträgt, optisch aufgezeichnet und anhand des Bildes manuell geregelt. Nach Beendigung des Extrusionsvorganges wird die für die Beobachtung erforderliche Beleuchtung ausgeschaltet, um die Zufuhr von Strahlungsenergie zu vermeiden.

## II. Abkühlung des als Schiene konzipierten He-Verdampferkryostaten und der Scheibe

Vor der Erzeugung des Deuteriumstabes wird der flüssig-Stickstoff-Badkryostat gefüllt und die Flüssigkeitsspiegelhöhe danach durch automatische Nachfüllung konstant gehalten. Somit wird gewährleistet, daß der Strahlungsschild und die Vorkühlstufe schon die Temperatur von 77 K haben, bevor mit der Abkühlung des He-Verdampferkryostaten begonnen wird.

Die Abkühlung der Schiene erfolgt bei maximal möglichem He-Durchsatz (Abkühlzeit ca. 15 min). Ist eine Kryostatentemperatur von  $\approx 10$  K erreicht, wird die flüssig He-Zufuhr manuell langsam gedrosselt, bis sich der Bereich der Zweiphasenströmung im He-Rechteckkanal an dem Ort stabilisiert hat, an dem die Scheibe abgekühlt und gefüllt wird ( $\hat{=}$  Meßstelle).

Nun wird eine Scheibe aus dem Magazin geschoben, die bewirkt, daß eine Scheibe in die Füllposition unter das Staberzeugungssystem gebracht wird. Durch eine definierte Bewegung des Schlittens mittels der Magnetschiebedurchführung ( $\approx 8$  mm) wird erreicht, daß die Andrückfeder sowohl den Schlitten als auch die Scheibe an den He-Verdampferkryostaten andrückt (Abkühlzeit  $\approx 10$  min).

## III. Justieren, Füllen, Abscheren und Transport

Damit der Deuteriumstab beim Extrudieren ins Töpfchen trifft, wird das kalte, gefüllte System zur Staberzeugung mittels der Justiervorrichtung so eingestellt, daß sich der Stab genau senkrecht über dem zylindrischen Töpfchen der Scheibe befindet. Nachdem die Einstellung fixiert ist, ist die Füllposition reproduzierbar, da die Scheiben alle identische Abmessungen haben und deren Lage zum Stab durch

einen speziellen Anschlag festgelegt ist.

Der Füllvorgang ist entsprechend der eingestellten Extrusionsgeschwindigkeit in 10-30 s beendet; er wird eingeleitet durch die sprunghafte Erhöhung der Temperatur des Kryostaten des Staberzeugungssystems: zunächst von der Basistemperatur auf die Einkondensationstemperatur und dann auf die Extrusionstemperatur, bei der sich der Deuteriumstab anfängt zu bewegen. Wenn der Stab den Boden des zylindrischen Töpfchens erreicht hat, kommt es zu einer sichtbaren Reduzierung der mittels Kamera und Monitor beobachteten Extrusionsgeschwindigkeit. Die elektrische Heizung des Kryostaten wird nun abgeschaltet, so daß die Bewegung des Stabes sofort stoppt. Nun wird der Zylinder vom Stab separiert, indem die Töpfchenscheibe mit den darinsteckenden Teil des Stabes durch den Schlitten weggeschoben wird (die Temperatur des festen Deuteriums beträgt dabei  $\approx 3,8$  K). Durch diesen Abschervorgang wird eine relativ gerade Scherfläche erzielt.

Die mit dem Pellet beladene Scheibe wird anschließend zur Abschlußbasis oberhalb der Spule transportiert.

Damit sind Abscher- und Transportvorgang beendet, die ca. 2 s dauern.

#### IV. Beschleunigung und Meßwertaufnahme

Nachdem die Scheibe durch den Schlitten in Abschlußposition gebracht und durch den Zentrierkegel der Abschlußbasis fixiert ist, erfolgt nach 5-10 s durch manuelle Auslösung automatisch die Beschleunigung der Scheibe und die Meßwertaufnahme (Abb. 23).

Anschließend wird die abgeschossene Scheibe durch den Ausstoßhebel über eine Rampe vom Kryostaten geschoben.

Bevor eine neue, vorgekühlte Scheibe in Füllposition gebracht wird und sich der Füllvorgang, das Abscheren, Transportieren und Beschleunigen wiederholt, wird der He-Verdampferkryostat, der die Scheiben abkühlt, kurz (ca. 30 s) durch das Absperren der flüssig He-Leitung erwärmt. Damit wird erreicht, daß das inzwischen an der Kryostatenoberfläche angefrorene Deuterium sublimiert und eine thermische Isolationswirkung zwischen abzukühlender Töpfchenscheibe und Kryostat verhindert wird /41/.

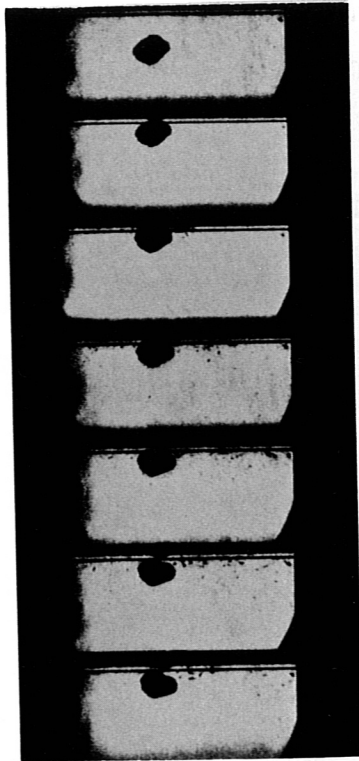


## 5.2 Ergebnisse der Aufprallexperimente

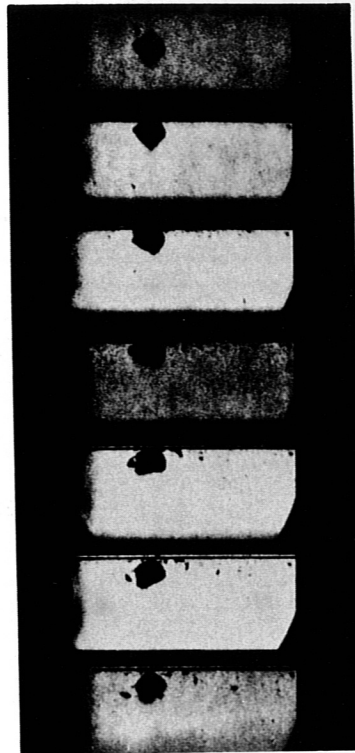
Aus der zeitaufgelösten Fotografie des Anfluges und des Aufpralls von Deuterium-Pellets auf das starre Target zeichnet sich folgendes ab:

Das Verhalten der Pellets beim Auftreffen läßt sich in vier Bereiche einteilen, die durch verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten begrenzt sind.

- I. Bei Aufprallgeschwindigkeiten kleiner als  $\approx 48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  prallt das Pellet unabhängig vom Auftreffwinkel ohne erkennbare Formänderung (Zerbröckelung, Bruch) vom Target zurück.
- II. In dem Geschwindigkeitsbereich zwischen  $\approx 48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $56 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  kommt es beim Aufprall - wenn das Pellet nicht axial auf das Target auftrifft - zu einer Abbröckelung vom Pellet, bei der einzelne kleine Teile vom Pellet absplittern (Abb. 26). Das Pellet überlebt den Aufprall ohne Bruch und prallt nach einer Kontaktzeit von 40-60  $\mu\text{s}$  ohne erheblichen Materialverlust vom Target zurück.
- III. Das Intervall der Aufprallgeschwindigkeit zwischen  $\approx 56 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $62 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  läßt sich als Grenzbereich definieren, innerhalb dem die Formstabilität des Pellets nicht mehr gegeben ist: beim Aufprall kommt es in diesem Bereich teilweise zur Zerstörung des Pellets durch Bruch - insbesondere bei nicht axialem Auftreffen. In anderen Fällen konnte beobachtet werden, daß das Pellet den Aufprall unter teilweiser Abbröckelung übersteht.
- IV. Bei Aufprallgeschwindigkeiten größer als  $\approx 62 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  wird das Pellet in jedem Fall durch Bruch zerstört, bei nicht axialer Auftreffrichtung innerhalb einer Kontaktzeit von 20-30  $\mu\text{s}$  (Abb. 27). Bei annähernd axialem Aufprall tritt dagegen das Zerschlagen des Pellets i.a. erst nach einer Kontaktzeit von mindestens 50  $\mu\text{s}$  ein. Innerhalb der Anfangsphase des axialen Aufpralls ( $> 35 \mu\text{s}$ ) kommt es zu einer merklichen "Abtragung" des Pellets an der Targetoberfläche, bei der abbröckelndes Material am Target radial vom Pellet "abwandert". Diese "Abtragung" wird mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit ausgeprägter (Abb. 28).

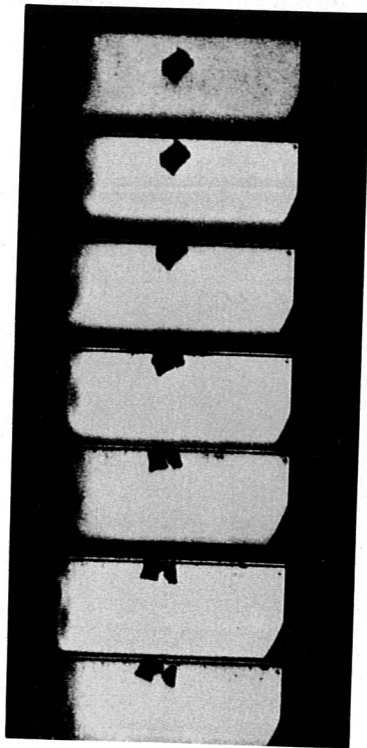


$$v_A = 50,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$
$$\Delta t = 20 \mu\text{s}$$



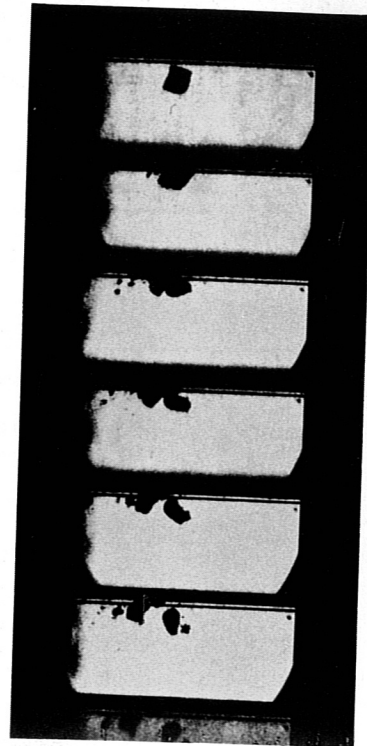
$$v_A = 51,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$
$$\Delta t = 20 \mu\text{s}$$

Abb 26: Fotos von Deuterium-Pellets beim nicht axialem Aufprall auf das Target, bei dem es zur Abbröckelung vom Pellet kommt, ohne daß das Pellet zerbricht.  
Bildfolge: jeweils von oben nach unten  
Pelletflugrichtung: jeweils von unten nach oben  
 $v_A$  = Aufprallgeschwindigkeit  
 $\Delta t$  = Blitzabstand



$$v_A \approx 63,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta t = 10 \mu\text{s}$$



$$v_A = 63,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta t = 20 \mu\text{s}$$

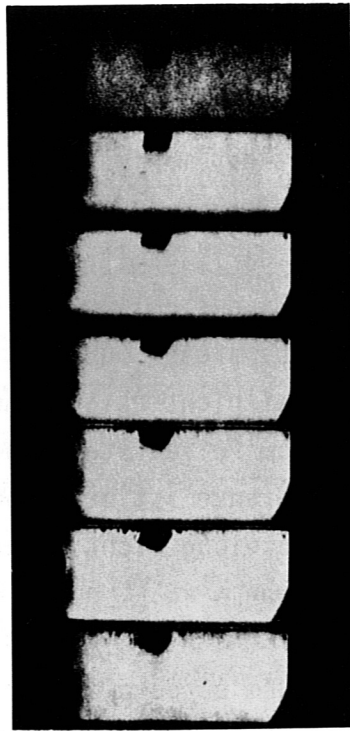
Abb. 27: Fotos von Deuterium-Pellets beim nicht axialem Aufprall auf das Target, bei der es zur Zerstörung des Pellets durch Bruch kommt.

Bildfolge: jeweils von oben nach unten

Pelletflugrichtung: jeweils von unten nach oben

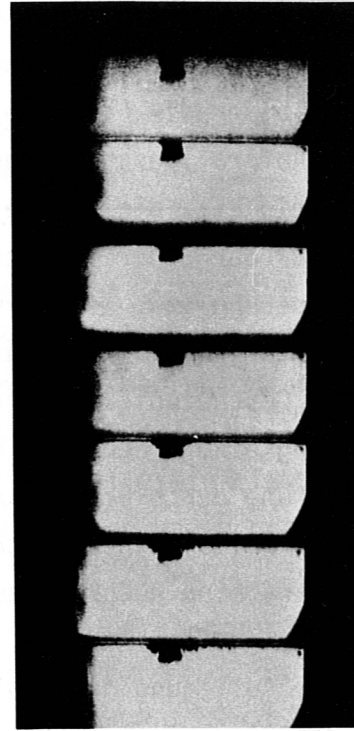
$v_A$  = Aufprallgeschwindigkeit

$\Delta t$  = Blitzabstand



$$v_A = 64,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta t = 5 \mu\text{s}$$



$$v_A = 70,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta t = 5 \mu\text{s}$$

Abb. 28: Fotos von der Anfangsphase des axialen Aufpralls von Deuterium-Pellets auf das Target, innerhalb der es zu einer "Abtragung" des Pellets an der Targetoberfläche kommt; diese "Abtragung" wird mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit ausgeprägter.

Bildfolge: jeweils von oben nach unten

Pelletflugrichtung: jeweils von unten nach oben

$v_A$  = Aufprallgeschwindigkeit

$\Delta t$  = Blitzabstand

## 6. Diskussion

Aus den Aufprallexperimenten von Deuterium-Pellets auf eine starre Wand ist eine kritische Aufprallgeschwindigkeit ermittelt worden, oberhalb der die Formstabilität des Pellets nicht mehr gegeben ist. Diese Aufprallgeschwindigkeit entspricht der maximalen Relativgeschwindigkeit, die das Pellet bei der Aufnahme durch die Führungsstruktur der Zentrifuge zu dieser haben darf, damit keine merkliche Formänderung bzw. Zerstörung auftritt. Da das Pellet den Aufprall auch unter ungünstigem Auftreffwinkel überstehen muß, ist die kritische Geschwindigkeit erreicht, wenn bei nicht axialer Auftreffrichtung eine erhebliche Abbröckelung vom Pellet stattfindet bzw. Zerstörung durch Bruch eintritt. Diese Grenze ist bei  $\approx 56 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  erreicht. Falls auch eine teilweise Abbröckelung nicht tolerierbar ist, darf eine Aufprallgeschwindigkeit von  $\approx 48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  nicht überschritten werden.

Bei der Auslegung der Zentrifuge muß zudem berücksichtigt werden, daß die Geschwindigkeitsmessung mit einem Fehler von  $\lesssim 5\%$  behaftet ist. Möglicherweise erklärt sich damit auch das unterschiedliche Aufprallverhalten der Pellets im Grenzbereich von  $56 - 62 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , in dem sowohl eine Zerstörung durch Bruch als auch ein annähernd unversehrter Rückprall vom Target beobachtet wurde.

Außer dem Einfluß des Auftreffwinkels ist mit einer Abhängigkeit der Grenzgeschwindigkeit von der Pellettemperatur zu rechnen. Bei den Aufprallexperimenten dürfte die Temperatur der Pellets in dem Bereich zwischen  $\approx 4,3 \text{ K}$  und  $5,6 \text{ K}$  gelegen haben. Die untere Temperaturgrenze ist bestimmt durch die gemessene Temperatur des Kryostaten beim Abschluß (Meßstelle nahe der Abschlußbasis) - die obere durch der dem gemessenen Druck in der Experimentierkammer ( $2-3,6 \cdot 10^{-7} \text{ Torr D}_2$ ) entsprechenden Gleichgewichtstemperatur der Sublimationsdruckkurve des Deuteriums ( $5,5-5,6 \text{ K} / 10/$ ).

Auch beim Einsatz der Zentrifuge für die Pelletbeschleunigung wird in einer Hochvakuumapparatur unter vergleichbaren Druckverhältnissen gearbeitet werden. Es ist deshalb zu erwarten, daß dabei das

Pellet eine Temperatur hat, die innerhalb des oben genannten Bereiches liegt und es innerhalb dieses relativ kleinen Intervalls zu keiner wesentlichen Veränderung der mechanischen Eigenschaften /42/ und damit zu keiner erheblichen Verschiebung des Grenzwertes der Aufprall- bzw. Relativgeschwindigkeit kommt. Auch der Herstellungsprozeß der Pellets für die Zentrifuge gleicht dem hier benutzten Extrusionsverfahren.

Bei den Aufprallexperimenten hatte das Target eine Temperatur von 4-5 K, um zu vermeiden, daß Wärme auf das Pellet eingestrahlt wurde, während die Zentrifuge bei Zimmertemperatur betrieben werden wird. Abschätzungen zum Wärmeübergang von einer warmen Oberfläche auf das Pellet lassen jedoch erwarten, daß sich an dem bei tiefer Temperatur des Targets beobachteten Formänderungsverhalten wegen der relativ kurzen Kontaktzeit des Pellets mit dem Target (10-60  $\mu$ s je nach den Aufprallbedingungen) auch bei einer Targettemperatur von 295 K nichts Wesentliches ändern würde.

Abschließend ist zu bemerken, daß die Kenntnis der maximal tolerierbaren Aufprallgeschwindigkeit auch bei der Überführung des beschleunigten Pellets ins Plasma eine Rolle spielt. Obwohl die Streuung der Abschleuderrichtung, unter dem das Pellet die Zentrifuge verläßt, den kleinstmöglichen Wert annimmt, wenn bei der Aufnahme des Pellets durch die Zentrifuge die höchstzulässige Relativgeschwindigkeit ausgenutzt wird, so behält die Streuung dennoch stets einen endlichen Wert. Das Führungsrohr, durch das das Pellet zum Plasma fliegt, muß deshalb - wiederum unter Beachtung der höchstzulässigen Relativgeschwindigkeit bei einem eventuellen Kontakt des Pellets mit der Wand des Führungsrohres - so ausgelegt werden, daß keine wesentliche Formänderung bzw. keine Zerstörung des Pellets auftritt.

Literatur

- /1/ J. Raeder et al.  
"Kontrollierte Kernfusion"  
Studienbuch Physik, Teubner Verlag Stuttgart (1981)
- /2/ E. W. Becker et al.  
"Development and Construction of an Injector Using Hydrogen Cluster Ions for Nuclear Fusion Devices"  
Bericht KfK 2016, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1973)
- /3/ S. L. Milora  
"Review of Pellet Fueling"  
J. Fus. Energ. 1 (1981), 15
- /4/ C. T. Chang et al.  
"The feasibility of pellet re-fuelling of a fusion reactor"  
Nucl. Fus. 20 (1980), 859
- /5/ S. L. Milora u. C. A. Foster  
"Pneumatic hydrogen pellet injection system for the ISX-tokamak"  
Rev. Sci. Instrum. 50 (1979), 482
- /6/ Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching  
Jahresbericht 1979, S. 96
- /7/ C. A. Foster u. S. L. Milora  
"Hydrogen Pellet Injection Apparatuses"  
Bull. Am. Phys. Soc. 23 (1978), 790
- /8/ W. Amenda u. R. S. Lang  
"Nachfüllung von Plasmamaschinen durch Pelletinjektion mittels Zentrifuge"  
Bericht IPP 1/187, MPI für Plasmaphysik, Garching (1981)
- /9/ C. Andelfinger  
Persönliche Mitteilung, MPI für Plasmaphysik, Garching (1981)
- /10/ H. M. Roder et al.  
"Survey of the Properties of Hydrogen Isotopes Below Their Critical Temperatures"  
NBS Technical Note 641 (1973)
- /11/ D. N. Bol'Shutkin et al.  
"Plastic Deformation and Stress Relaxation in Solid Normal Deuterium"  
Sov. Phys. Sol. St. 12 (1970), 119
- /12/ D. N. Bol'Shutkin u. Y. E. Stetsenko  
"Plastische Deformation von festem Wasserstoff und Deuterium"  
(Transl.) Trudy Fiz.-Tekh. Inst. Niz. Temp. AN UKrSSR 1 (1968), 118

- /13/ Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching  
Jahresbericht 1978, S. 74 ff.
- /14/ H. Krause  
"Apparatur zur Herstellung fester Deuteriumstäbchen"  
Bericht IPP IV/43, MPI für Plasmaphysik, Garching (1972)
- /15/ W. D. Friedman et al.  
"Target fabrication and positioning techniques for laser  
fusion experiments"  
Rev. Sci. Instrum. 45 (1974), 1245
- /16/ H. Baumhacker et al.  
"Experiments for Filling Magnetic Confinement Machines with  
Laser produced Plasmas. Preliminary Results."  
Proc. 9th Symp. Fus. Techn. (SOFT) (1976), 873
- /17/ C. A. Foster u. S. L. Milora  
"ORNL pellet acceleration program"  
Proc. Fus. Fuel. Workshop, Princeton N. J.  
CONF. - 771129 (1977), 117
- /18/ A. N. Markow et al.  
"Preparation of solid hydrogen targets for laser fusion  
research"  
Sov. J. Quant. Electr. 7 (1977), 641
- /19/ A. Nordskov et al.  
"A Light-Gas Gun for Acceleration of Pellets of Solid D<sub>2</sub>"  
Report M-2245, Risø, Denmark (1980)
- /20/ H.-J. Forth et al.  
"Kryostat für die Erzeugung und Beschleunigung von Deuterium-  
Pellets zum Einsatz in Kernfusionsanlagen"  
Vakuum-Techn. 30 (1981), 102
- /21/ Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching  
Jahresbericht 1980, S. 23
- /22/ G. G. Haselden  
"Cryogenic Fundamentals"  
Acad. Press, London /New York 1971
- /23/ W. G. Fastowski et al.  
"Kryotechnik"  
Akademie Verlag, Berlin 1970
- /24/ V. J. Johnson  
"Properties of materials at low temperature - A Compendium"  
Pergamon Press, Oxford/London/New York/Paris 1961



- /25/ R. Berman u. C. F. Mate  
"Thermal Contact at Low Temperatures"  
Nature 182 (1958), 1661
- /26/ R. B. Jacobs u. C. Starr  
"Thermal Conductance of Metallic Contacts"  
Rev. Sci. Instrum. 10 (1939), 140
- /27/ P. Lell u. H. Kuczera  
"Entwicklung eines elektromagnetischen Teilchenbeschleunigers"  
Bericht RT-TB 78/2, TU München (1978)
- /28/ E. Igenbergs et al.  
"Development of an electromagnetic pellet-generator"  
Bericht RT-TB 79/1, TU München (1979)
- /29/ J. N. Chubb  
"A linear Induction Accelerator for Fuel Injection into a  
Fusion Reactor"  
Report F.R.S.G. (1968) P4, Culham
- /30/ P. H. Miller  
19. APS-Meeting Plasma Physics, Atlanta Nov. 7-11 (1977)
- /31/ K. Büchl  
"Pelletinjection als Mittel zur Nachfüllung von Fusionsplasmen"  
Bericht IPP 4/163, MPI für Plasmaphysik, Garching (1977)
- /32/ K. Büchl  
Persönliche Mitteilung, MPI für Plasmaphysik, Garching (1979)
- /33/ W. R. Smythe  
"Static and dynamic electricity"  
Third Edition, McGraw-Hill Book Company 1968, S. 291
- /34/ Y. S. Touloukian et al.  
"Thermophysical Properties of Matter"  
Vol. 2, IFI/Plenum, New York/Washington 1970
- /35/ G. Klipping u. F. Schmidt  
"Temperaturbestimmung mit dem Dampfdruckthermometer"  
Kältetechn. 17 (1965), 382
- /36/ R. Barron  
"Cryogenic Systems"  
McGraw-Hill Book Company 1966
- /37/ Leybold-Heraeus GmbH  
Kryotechnisches Arbeitsblatt 5/70, Köln

- /38/ Leybold-Heraeus GmbH  
"Informationen aus der Kryotechnik"  
Blatt ZF 2/13.0 (1969) UN
  
- /39/ D. Dimock et al.  
"Pellet Acceleration-Studies Relating to the Refuelling of  
a Steady-state Fusion Reactor"  
Report No. 332, Risø, Denmark (1975)
  
- /40/ Prüfprotokoll der Druckversuche  
Staatliches Materialprüfamt für den Maschinenbau,  
TU München (1981)
  
- /41/ B. Ya. Gorodilov et al.  
"Thermal conductivity of solid deuterium"  
Sov. J. Low Temp. Phys. 3 (1977), 750
  
- /42/ Y. E. Stetsenko et al.  
"Influence of Zero Energy on the Plastic Deformation of  
Hydrogen"  
Sov. Phys. Sol. St. 14 (1972), 149

Ich möchte an dieser Stelle und auf diese Weise allen danken, die durch ihre Hilfe zur Durchführung der Doktorarbeit beigetragen haben.

Herrn Professor Dr. E. W. Becker und Herrn Professor Dr. R. Klingelhöfer danke ich für ihr der Arbeit entgegengebrachtes Interesse und für ihre Förderung bei der Durchführung der Promotion.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. C. Andelfinger für die stete Förderung der Arbeit und für wertvolle Anregungen und Diskussionen.

Der Max-Planck-Gesellschaft bin ich für die Möglichkeit zur Durchführung der Arbeit zu Dank verpflichtet.

Herrn W. Drechsler sage ich Dank für seine Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Experimente.

## Lebenslauf

Name: Manfred Thöner

geboren: 14. 3. 1953 in Göttingen

Eltern: Alfred Thöner, Lokführer a. D.  
Hildegard Thöner, geb. Grund

Schulbildung: 1959 - 1963 Volksschule Weende  
1963 - 1964 Gerhart-Hauptmann-Mittelschule  
Göttingen  
1964 - 1968 Realschule Weende  
1968 - 1971 Felix-Klein-Gymnasium Göttingen

Studium: 1971 - 1978 Universität Karlsruhe  
Fachrichtung Chemieingenieurwesen  
April 1974 Vordiplom  
April 1978 Hauptdiplom  
WS 77/78 Diplomarbeit am Institut für  
Kernverfahrenstechnik der Universität  
und des Kernforschungszentrums  
Karlsruhe  
Thema: "Einfluß geringer Fremdgaszu-  
sätze auf die Kondensations-  
neigung von Wasserstoff bei  
einer Düsenexpansion"

01.10.1978 Beginn der Doktorarbeit am  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik  
in Garching