

Refuelling of plasma machines by
pellet injection with a centrifuge

Nachfüllung von Plasmamaschinen durch
Pelletinjektion mittels Zentrifuge

W. Amenda, R.S. Lang

IPP 1/187

März 1981



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

8046 GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Refuelling of plasma machines by
pellet injection with a centrifuge

Nachfüllung von Plasmamaschinen durch
Pelletinjektion mittels Zentrifuge

W. Amenda, R.S. Lang

IPP 1/187

März 1981

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.

Abstract

In refuelling plasma machines with large plasma diameter and high density and temperature the gas intake is likely to be insufficient. This applies particularly to plasma machines operated with divertor. Great importance is thus attached to refuelling by injection of frozen hydrogen pellets. It is also hoped that the plasma parameters can be influenced by pellet injection.

Till now pneumatic pellet injectors and centrifuges have been used to attain pellet velocities above 200 m/s. This paper affords an insight into the present performance of pellet injection by centrifuge. Besides the rotor material and geometry, the shape of the accelerating channel and its significance in relation to the forced acceleration of pellets is also treated. The problem of preparing solid hydrogen and introducing it into the accelerating channel and the influence of this on the exit scatter of pellets are discussed. The peripheral equipment required for centrifugal acceleration, such as pellet diagnostics, pellet beam tube into the plasma, and control synchronization facilities, are briefly touched on.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Pelletinjektion mittels Ultrazentrifuge	2
2.1 Prinzip	2
2.2 Quelle für Wasserstoffpellets	4
2.2.1 Bereitstellung von Wasserstoffstäbchen	4
2.2.2 Schneide- und Einfütterungsvorrichtungen	7
2.3 Zentrifuge	8
2.3.1 Rotormaterial und Rotorgeometrie	8
2.3.2 Geometrie der rotierenden Führungsstrecke und ihr Einfluß auf das Pellet	10
2.3.2.1 Gerade Führungsstrecke	11
2.3.2.2 Halbkreisförmige Führungsstrecke	13
2.3.2.3 Kombinierte Führungsstrecke	15
2.3.2.4 Führungsstrecke mit konstanter Zwangskraft	16
2.3.2.5 Bewertung der Führungsstrecken und ihre Anwendung	18
2.4 Hilfseinrichtungen für den Pelleteinschuß	19
2.4.1 Pelletdiagnostik	19
2.4.2 Pellet-Strahlrohr	19
2.4.3 Steuerung, Synchronisation und Überwachung	21
3. Plasmaparameter und Pelletinjektion am Beispiel von ASDEX	22
4. Schlußbetrachtung	26

1. Einleitung

Der hier vorliegende Bericht wurde angefertigt, obwohl die Realisierbarkeit von großen Pelletgeschwindigkeiten mittels Zentrifuge noch unsicher ist. Die Anforderungen von Plasmamaschinen der gegenwärtigen und nächsten Generation an diese Nachfüllmethode sind hoch im Vergleich zu den wenigen ersten Erfahrungen, die bislang über die Beschleunigungsmethode vorliegen. Neben zahlreichen ungelösten technologischen Problemen ist es besonders die Unkenntnis der dynamischen Belastbarkeit von festen Wasserstoffisotopen, die derzeit eine sichere Aussage verhindert.

Das Nachfüllen durch Injektion einzelner oder mehrerer Pellets wird sich als notwendig erweisen, wenn der Gaseinlaß bei den großen Plasmadurchmessern unzureichend ist oder nicht die gewünschten Dichteprofile ergibt. Auch wird es von großem Interesse sein, zu sehen, welchen Einfluß eine dichte Folge von injizierten Pellets auf Verunreinigungen, auf "Disruptions" und "Recycling" haben wird (interessante Ergebnisse werden auch vom Zusammenwirken mit der Neutralteilcheninjektion erwartet).

Bisher wurden zur Beschleunigung von Pellets auf eine Geschwindigkeit von mehr als 200 m/s nur zwei Methoden angewandt. Zum einen ist dies der Einsatz von Leichtgaskanonen. Sie können im Abstand von Minuten "gefeuert" werden und haben Pelletgeschwindigkeiten bis zu 1000 m/s erreicht. Hiermit wurde bereits Pelletinjektion ins Plasma von ISX-A, ISX-B, Dante und W VII A durchgeführt (1,2,3,4,5).

Zum anderen ist die Beschleunigung mittels Zentrifuge demonstriert worden. Dabei wurde eine Schußrate von 150 Hz⁶⁾ und eine Pelletgeschwindigkeit von ca. 300 m/s erreicht^{6,7)}.

Aus diesen Feststellungen läßt sich ablesen, daß vorerst die Leichtgaskanone große Pelletgeschwindigkeiten liefert, aber eine geringe Schußfrequenz besitzt. Eine Entwicklung von Vielschußkanonen großer Pelletgeschwindigkeit mit hoher Repetitionsfrequenz ist wahrscheinlich möglich, jedoch schwierig. Im Gegensatz dazu wird eine große Pelletinjektionsfrequenz verbunden mit großer Pelletzahl mit einer Zentrifuge leichter zu verwirklichen sein. Ob auch hohe Geschwindigkeiten erreicht werden können, muß noch gezeigt werden.

2. Pelletinjektion mittels Ultrazentrifuge

2.1 Prinzip

Anhand der Abb.1 soll das Prinzip vorgestellt werden. Fester Wasserstoff wird in Form von Pellets in den Beschleunigungskanal einer Ultrazentrifuge eingeleitet. Man unterscheidet zwischen zwei Einfütterungsmethoden. Bei der direkten Einfütterung (Abb.1a) wird Wasserstoff in Stabform aus einer Quelle direkt in die Aufnahmeöffnung des Beschleunigungskanals einer Zentrifuge eingeschoben. Die Aufnahmeöffnung ist so gestaltet, daß sie Pellets von dem Wasserstoffstab abtrennen kann. In der Abb.1b ist die indirekte Einfütterung dargestellt. Eine Schneide- und Einfütterungsvorrichtung trennt von dem eingeschobenen Wasserstoffstab Pellets ab und schleudert diese vor die Aufnahmeöffnung des Beschleunigungskanals. Der feste Wasserstoff besitzt

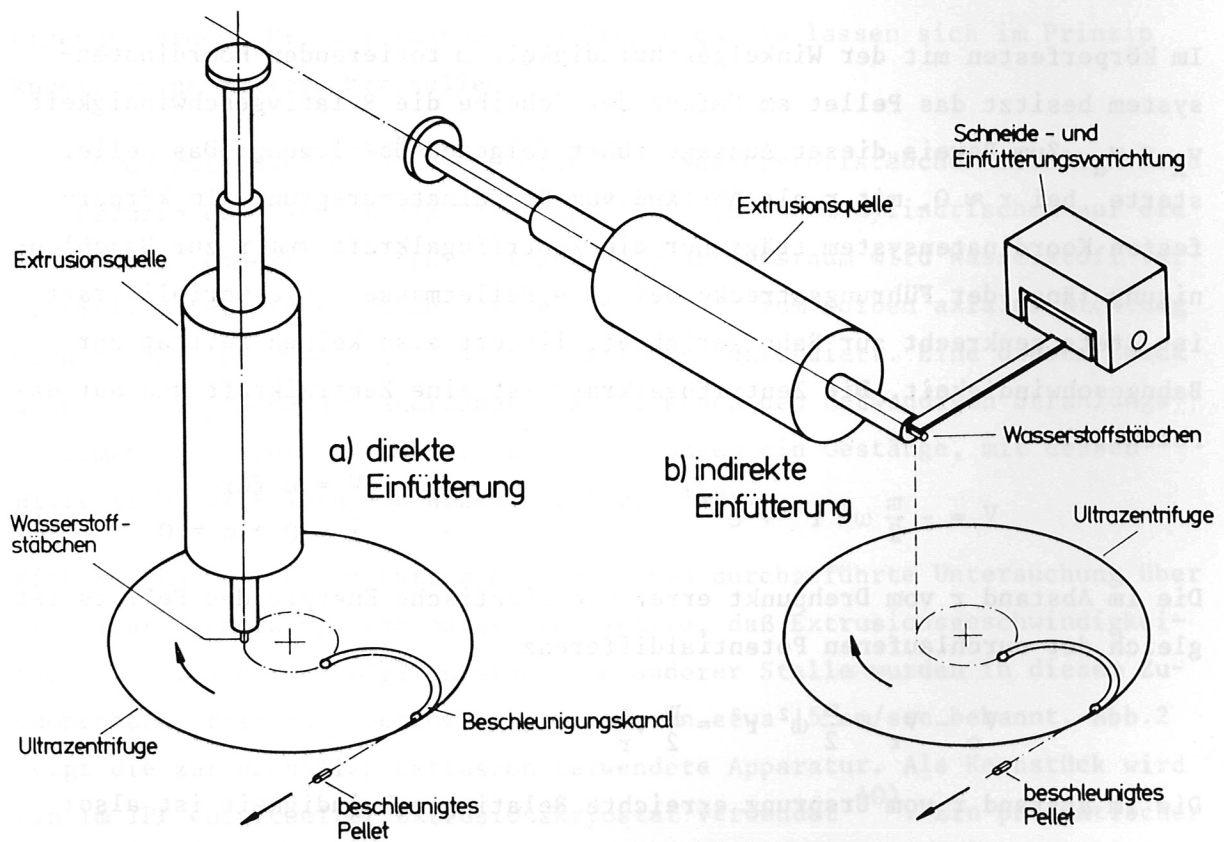


Abb.1: Schematische Darstellung der Methoden zur Einleitung von festem Wasserstoff in Zentrifugen. (a) direkte Einfütterung, (b) indirekte Einfütterung.

nur geringe Festigkeit. Im Beschleunigungskanal ist das Pellet hohen Zwangskräften ausgesetzt. Eine zylindrische Gestalt der Pellets ist daher wegen der großen Auflagefläche günstig im Vergleich zu anderen Pelletgeometrien (z.B. Kugelgestalt).

Die vom Beschleunigungskanal aufgenommenen Pellets durchlaufen die Beschleunigungsstrecke innerhalb eines Bruchteils einer Zentrifugenumdrehung. Die Pellets verlassen den Kanal mit der Geschwindigkeit v_p und je nach Vorgeschichte mit mehr oder weniger großer Austrittswinkelstreuung. Der Drehwinkel φ , um den sich die Zentrifuge während des Beschleunigungsvorganges dreht, ist abhängig vom geometrischen Verlauf des Beschleunigungskanals.

Die Pelletgeschwindigkeit v_p ist abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit v_u des Rotors (mit dem Radius R und der Winkelgeschwindigkeit ω), der Relativgeschwindigkeit des Pellets v_R und der Richtung der Führungsstrecke am Pelletaustrittsort.

Im körperfesten mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierenden Koordinatensystem besitzt das Pellet am Umfang der Scheibe die Relativgeschwindigkeit $v_R = v_u$. Zum Beweis dieser Aussage führt folgende Überlegung: Das Pellet starte bei $r \approx 0$, mit r als Abstand vom Koordinatenursprung. Im körperfesten Koordinatensystem trägt nur die Zentrifugalkraft $m\omega^2 r$ zur Beschleunigung längs der Führungsstrecke bei ($m =$ Pelletmasse). Die Corioliskraft ist stets senkrecht zur Bahn gerichtet, liefert also keinen Beitrag zur Bahngeschwindigkeit. Die Zentrifugalkraft ist eine Zentralkraft und hat das Potential

$$V = - \frac{m}{2} \omega^2 r^2 + c$$

$$V = 0 \text{ für} \\ r = 0 \rightarrow c = 0$$

Die im Abstand r vom Drehpunkt erreichte kinetische Energie des Pellets ist gleich der durchlaufenen Potentialdifferenz

$$V_o - V_r = \frac{m}{2} \omega^2 r^2 = \frac{m}{2} v_r^2$$

Die im Abstand r vom Ursprung erreichte Relativgeschwindigkeit ist also:

$$v_r = \omega r$$

Damit ist die Pelletrelativgeschwindigkeit am Scheibenumfang gleich der Umfangsgeschwindigkeit, $v_R = v_u$.

Ist Θ der Winkel zwischen Tangente an die Scheibe und Richtung der Führungstrecke am Ort des Austritts, so läßt sich mit $v_R = v_u$ die Pelletgeschwindigkeit v_p im raumfesten Koordinatensystem angeben durch

$$v_p^2 = 2v_u^2 (1 - \cos (180^\circ - \Theta))$$

Ein Pellet, das auf einer rotierenden Zentrifugenebene längs einer Führungstrecke beschleunigt wird, verläßt demnach die Zentrifuge unter Vernachlässigung der Reibung mit der Geschwindigkeit

$$v_p = 2v_u \cdot \cos \frac{\Theta}{2} \quad (1)$$

2.2 Quelle für Wasserstoffpellets

2.2.1 Bereitstellung von Wasserstoffstäbchen

Wie oben bemerkt, ist es günstig, Pellets in Form von kleinen Zylindern zu wählen. Diese Pellets können mit der Stanzquelle oder der Stäbchenquelle erzeugt werden. Mit der sogenannten Tropfenquelle lassen sich im Prinzip kugelförmige Pellets herstellen ⁸⁾.

Bisher überwiegend verwendete Quellen für Wasserstoffstäbchen arbeiten nach dem Prinzip des Extrusionskryostaten ^{9,10)}. In einem zylindrischen auf die notwendige Temperatur eingestellten Kondensationsraum wird Wasserstoff verfestigt. Unter Druckausübung mittels Kolben in zum Kolben axialer Richtung wird durch eine Düse ein Wasserstoffstäbchen extrudiert. Eine diesem Zweck dienende Tieftemperaturanordnung besitzt neben den notwendigen Strahlungsschirmen, Halterungen und Versorgungsleitungen ein Gestänge, mit dessen Hilfe sich der Kolben von außen betätigen läßt.

Eine von uns mit einem Extrusionskryostaten durchgeführte Untersuchung über erzielbare Stäbchengeschwindigkeiten zeigte, daß Extrusionsgeschwindigkeiten bis ca. 5 cm/sec möglich sind. Von anderer Stelle wurden in diesem Zusammenhang erzielbare Geschwindigkeiten von etwa 15 cm/sec bekannt. Abb.2 zeigt die zur schnellen Extrusion verwendete Apparatur. Als Kernstück wird ein im IPP entwickelter Extrusionskryostat verwendet ¹⁰⁾. Ein pneumatischer Antrieb erlaubt es, durch dosiertes Ausströmen des sich unterhalb des Antriebskolbens befindlichen Öls eine vom Zustand des Deuteriums nahezu unabhängige konstante Kolbengeschwindigkeit einzustellen. Der Schnellverschluß im Extrusionskanal verhindert ein zu starkes Abdampfen des verfestigten Deuteriums in den Vakuumraum und läßt es zu, das im Kondensationsraum be-

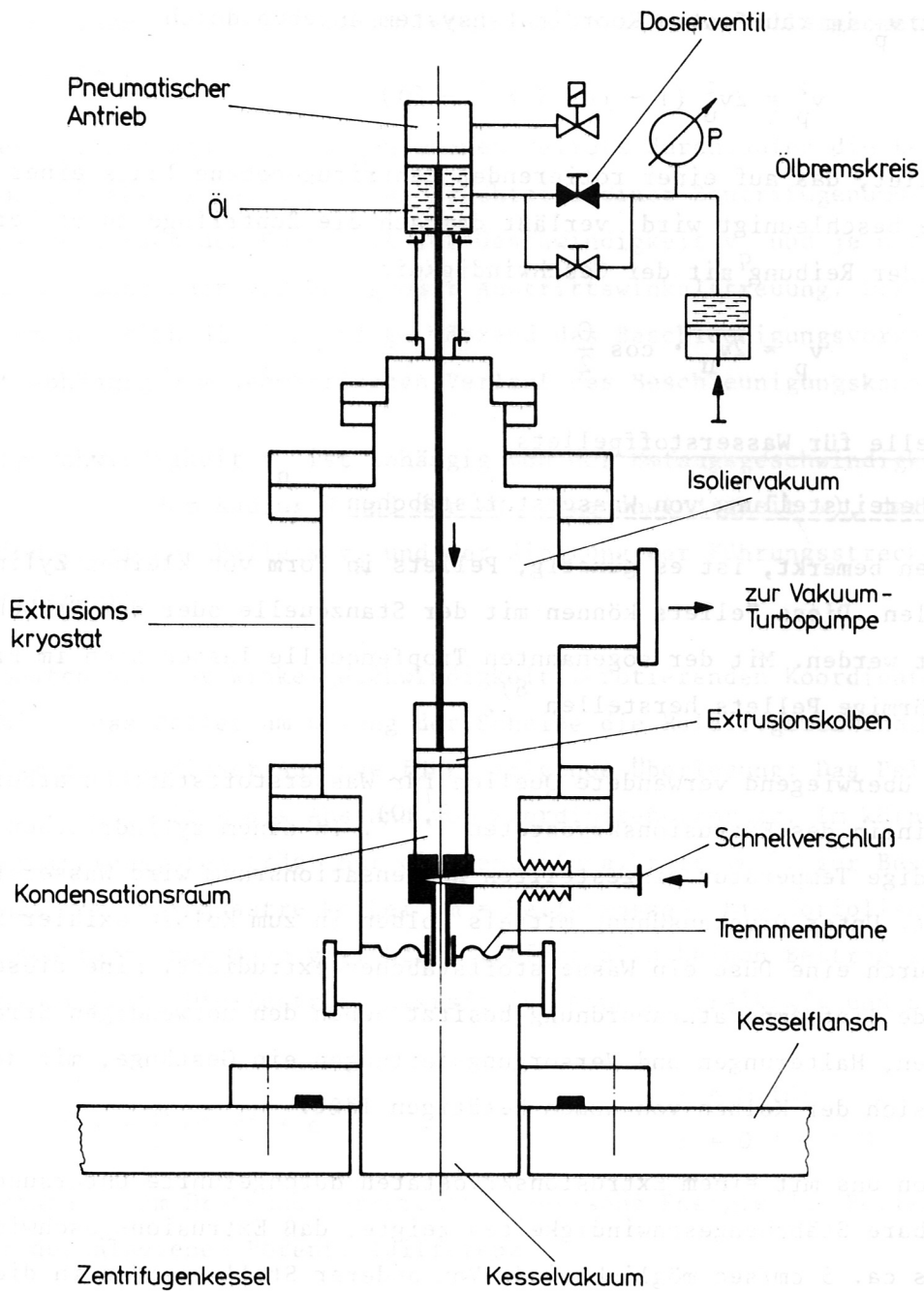


Abb.2: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaues zur schnellen Extrusion von festem Wasserstoff.

findliche, verfestigte Deuterium zwischendurch zu verflüssigen (homogenes Eis). Ohne Schnellverschluss wäre ein unerwünscht hoher Deuteriumverlust gegeben, da beim Wasserstoffisotop Deuterium entsprechend der zur schnellen Extrusion günstigen Temperatur (ca. 16 K) ein Dampfdruck von 30 Torr gehört. Um einen unzulässig hohen Druckanstieg im Isoliervakuum des Kryostaten während der schnellen Extrusion zu verhindern, wurde zwischen Kesselvakuum und Isoliervakuum eine Trennmembrane eingebaut. Mit dieser Apparatur konnte kein eindeutiger Einfluß des Verformungsverhältnisses (Verhältnis der Querschnitte vor und nach der Extrusion) auf die Grenzgeschwindigkeit festgestellt werden. Auch eine Veränderung der Verformungszone von konischem Einlauf bis zum kastenförmigen Einlaufprofil lieferte oberhalb der bereits genannten Grenzgeschwindigkeit von 5 cm/s keine zuverlässige Extrusion; sie wird instabil. Der extrudierte Zylinder zeigt Krater in der Oberfläche, Einschnürungen und reißt teilweise ganz ab, oder der Kryostateninhalt wird nur in Bruchstücken mit hohem Gasanteil herausgeschleudert.

Nicht untersucht wurde der Einfluß der Reinheit des Deuteriums, der kristallinen Struktur, sowie der ortho- und para-Zusammensetzung auf die mögliche Extrusionsgeschwindigkeit. Möglicherweise läßt sich daraus die Diskrepanz zwischen unseren und den von anderer Seite bekannt gewordenen Extrusionsgeschwindigkeiten erklären.

Mit der oben genannten erzielbaren Geschwindigkeit für Wasserstoffstäbchen läßt sich die zur ASDEX-Nachfüllung erforderliche Stäbchenbereitstellung grundsätzlich erfüllen. Schwierigkeiten in genauer Reproduzierbarkeit im Hinblick auf rechtzeitige Bereitstellung der Stäbchen, Pelletgestalt und Pelletfestigkeit sind jedoch nicht auszuschließen. Somit muß unter Umständen für eine betriebssichere Nachfüllanordnung an ASDEX ein besseres Verfahren zur Bereitstellung der Wasserstoffstäbchen ins Auge gefaßt werden. Dies dürfte für die Nachfüllung der Plasmamaschinen der nächsten Generation ohnehin erforderlich sein.

(2) (Pelletchase und Rotorebene parallel)

Wegen der besseren Führungseigenschaften des Beschleunigungskanals wird man seinen Durchmesser nur wenig größer als den Pelletdurchmesser wählen. Dem sind jedoch Grenzen gesetzt wegen der Genauigkeit der Synchronisation von Mittelstromvorgang und der Stellung des Zentrifugarms.

2.2.2 Schneide- und Einfütterungsvorrichtungen

Wie in Kap. 2.1 angedeutet, sind zwei Einfütterungsmethoden (Abb. 1) denkbar. Bei der direkten Einfütterung wird der Wasserstoffstab mit der geforderten Geschwindigkeit in den Aufnahmebereich des Beschleunigungskanals eingeschoben. Die Aufnahmeöffnung des Kanals ist mit einer geeigneten Schneide versehen. Die Austrittsstreuung der beschleunigten Pellets hängt weitgehend von der präzisen Einhaltung der Startbedingungen bezüglich Ort und Zeit ab. Es gehört zu den Vorzügen dieser Einfütterungsmethode in bezug auf minimale Austrittswinkelstreuung optimale Startbedingungen zu erfüllen.

Bei annehmbaren Rotordurchmessern liegen die Drehfrequenzen der Zentrifuge bei annähernd 500 Hz, entsprechend einer Umlaufzeit von 2 ms. Will man eine Pelletlänge von 1 mm erreichen, so muß die Vorschubgeschwindigkeit des Wasserstoffstabes 50 cm/s betragen. Diese Bereitstellungsgeschwindigkeit kann durch die schnelle Extrusion (siehe 2.2.1) nicht zuverlässig erreicht werden.

Bei der indirekten Einfütterung wird zwischen bereitgestelltem Wasserstoffstab und Zentrifugenscheibe eine Vorrichtung zum Schneiden und Einfüttern der Pellets erforderlich. Diese Vorrichtung kann aus einem rotierenden Messer ¹¹⁾ oder einem hubartig bewegten Messerarm ¹²⁾ bestehen. Das Messer muß in jedem Fall sowohl ein exaktes Schneiden als auch ein zielsicheres Treffen der Aufnahmeöffnung des Beschleunigungskanals gewährleisten. Beim Abtrennen des Pellets besteht die Gefahr, daß dieses am Messer haften bleibt. Daher muß die Temperatur des Messers geeignet gewählt werden. Außerdem muß der Messerarm das Pellet auf eine Mindestgeschwindigkeit beschleunigt haben, denn nur so kann das Pellet während einer Rotorumdrehung unverletzt in den Beschleunigungskanal gelangen. Diese Einfütterungsgeschwindigkeit v_e beträgt bei einer Zentrifugenfrequenz ν_z und einem Pelletdurchmesser d :

$$v_e = d \cdot \nu_z \quad (2)$$

(Pelletachse und Rotorebene parallel)

Wegen der besseren Führungseigenschaften des Beschleunigungskanals wird man seinen Durchmesser nur wenig größer als den Pelletdurchmesser wählen. Dem sind jedoch Grenzen gesetzt wegen der Genauigkeit der Synchronisation von Einfütterungsvorgang und der Stellung des Zentrifugenarms.

2.3 Zentrifuge

2.3.1 Rotormaterial und Rotorgeometrie

Für Plasmamaschinen großer Dichte und hoher Temperatur sind, wie Modellrechnungen ergeben, Pelletgeschwindigkeiten oberhalb 1000 m/s erforderlich. Wie in Kapitel 2.1 gezeigt, ergibt sich die Pelletgeschwindigkeit v_p in Abhängigkeit von der Rotorumfangsgeschwindigkeit v_u zu

$$v_p = 2 v_u \cdot \cos \frac{\theta}{2} .$$

Dabei wurde θ als der Winkel zwischen Rotortangente und Richtung des Beschleunigerkanals definiert.

Bei in die Rotortangente einmündendem Beschleunigungskanal ist demnach die erzielbare Pelletgeschwindigkeit das 2-fache der Rotorumfangsgeschwindigkeit. Die bei einem geraden Beschleunigungskanal erzielte Pelletgeschwindigkeit beträgt z.B. das $\sqrt{2}$ -fache der Rotorumfangsgeschwindigkeit.

Jedoch ist die mit einer Zentrifuge erreichbare Pelletgeschwindigkeit beschränkt durch die Festigkeit des Rotorwerkstoffs und des zu beschleunigenden Pelletmaterials.

Die Grenzumfangsgeschwindigkeit v_u^{\max} für eine rotierende Beschleunigungsstruktur (Arm oder Scheibe, gleicher Dicke oder konstanter Spannung) ist vom Verhältnis σ_b / ρ (σ_b = Bruchfestigkeit, ρ = Dichte des Materials) und von der Formgebung abhängig (siehe z.B. Dubbel Bd.I):

Ebene Scheibe gleicher Dicke

$$v_u^{\max} = \left(\frac{\sigma_b}{0,414 \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Armförmiger Rotor gleicher Dicke

$$v_u^{\max} = \left(\frac{2\sigma_b}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

(Bei der Scheibe wird vorausgesetzt, daß das zum Bau verwendete Material im gesamten Scheibenbereich sich bezüglich der Zugfestigkeit isotrop verhält.)

Arm- und scheibenförmiger Rotor mit konstanter Spannung

$$v_u^{\max} = \left(\frac{2\sigma_b}{\rho} \ln \frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

d_1 = Stab- bzw. Scheibendicke innen

d_2 = Stab- bzw. Scheibendicke außen

Diese Beziehung (5) gilt für einen Rotor, dessen Dicke mit wachsendem Radius gegen Null geht. In der Praxis wird der Rotor aber an der Stelle, an der er die Dicke d_2 erreicht, abgeschnitten. Damit ist die Spannung nicht mehr konstant und in der Rotormitte geringer als die Bruchspannung. Der Sicherheitsfaktor $S = \sigma_b / \sigma$ ist bei einem Dickenverhältnis d_1/d_2

$$S = \frac{1}{1 - \frac{d_2}{d_1}}$$

Für homogene Materialien und in der letzten Zeile für bevorzugtes Verbundmaterial zeigt die folgende Tabelle die Grenzggeschwindigkeit. Für den Arm konstanter Spannung wurde ein Dickenverhältnis $d_1/d_2 = 25$ angenommen. Für den bei der Dicke d_2 abgeschnittenen Arm ergibt dies einen Sicherheitsfaktor $S = 1,04$.

Material	ρ [kg/m ³]	σ_b [N/m ²]	σ_b/ρ [Nm/kg]	Arm gleich.	Arm konst.
				Dicke v_u^{\max} [m/s]	Spannung v_u^{\max} [m/s]
Al.-Leg.	$2,8 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^8$	$12 \cdot 10^4$	490	880
Sonderstahl	$7,8 \cdot 10^3$	$24 \cdot 10^8$	$31 \cdot 10^4$	780	1410
Titan-Leg.	$4,6 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^8$	$26 \cdot 10^4$	720	1300
Beryllium-Leg.	$1,9 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^8$	$22 \cdot 10^4$	660	1180
CF-Epoxid	$1,6 \cdot 10^3$	$18 \cdot 10^8$	$112 \cdot 10^4$	1500	--

Faseranteil = 65%

Scheibenförmige Rotoren mit Querschnitten entsprechend den obengenannten stabförmigen Rotoren lassen keine wesentlich höhere maximale Umfangsgeschwindigkeit zu. Sie besitzen aber auf Grund der größeren gespeicherten Energie (mehr als eine Größenordnung) im Falle eines Bruchs ein noch höheres Gefährdungspotential und wurden daher in der obigen Tabelle nicht berücksichtigt. Doch auch ein armförmiger Rotor aus Sonderstahl oder aus

einer Titanlegierung erfordert bei diesen Umfangsgeschwindigkeiten und der Neigung in große Bruchstücke zu zerbrechen, umfangreiche Schutzmaßnahmen.

Das Sicherheitsproblem wird wesentlich einfacher zu lösen sein, wenn man einen stabförmigen Rotor aus Verbundmaterial (Kohlefaser-Epoxid) verwendet. Beim Bruch zerfällt der Rotor in kleine Epoxidharzteilchen und einzelne Faserteilchen. Somit kann ein Durchschlagen des Zentrifugegehäuses schon mit geringen Wandstärken verhindert werden. Das Gewicht des armförmigen CF-Rotors (Länge = 1 m) samt Stahlnabe wird bei weniger als 10 kg liegen. Die aus statisch ermittelten Zugfestigkeitswerten errechnete Grenzumfangsgeschwindigkeit liegt je nach CF-Material zwischen 1400 und 1500 m/s. Hieraus erhält man für den stabförmigen Rotor eine maximale Pelletgeschwindigkeit von ca. 2000 m/s (s. Gleichung (4)).

Als Antrieb für den Kohlefaserstab mit Stahlnabe kann eine Turbomolekularpumpe mit entsprechend geändertem Rotor benutzt werden. Damit kann das Problem der vakuumdichten Durchführung der Antriebswelle in das Hochvakuum umgangen werden.

2.3.2 Geometrie der rotierenden Führungsstrecke und ihr Einfluß auf das Pellet

Zur Beschleunigung von Pellets auf einer Zentrifuge müssen diese längs einer Strecke zwangsgeführt werden. Dies kann durch einen Kanal, eine Röhre oder durch einen Führungssteg geschehen. Es werden vier verschiedene Bahnen (Abb. 3) im rotierenden System, hier Führungsstrecke genannt, beschrieben: Die gerade Führungsstrecke (a), die halbkreisförmige Führungsstrecke (b), die aus (a) und (b) kombinierte Führungsstrecke (c) und die Führungsstrecke mit konstanter Zwangskraft (d). Ihre charakteristischen Auswirkungen auf das Pellet, wie z.B. Geschwindigkeit, Zwangsbeschleunigung und Streuung des Austrittswinkels werden angegeben. Bei diesen Betrachtungen wird die Reibung vernachlässigt und die eventuelle stoßartige Pelletaufnahme durch die Führungsstrecke nicht berücksichtigt.

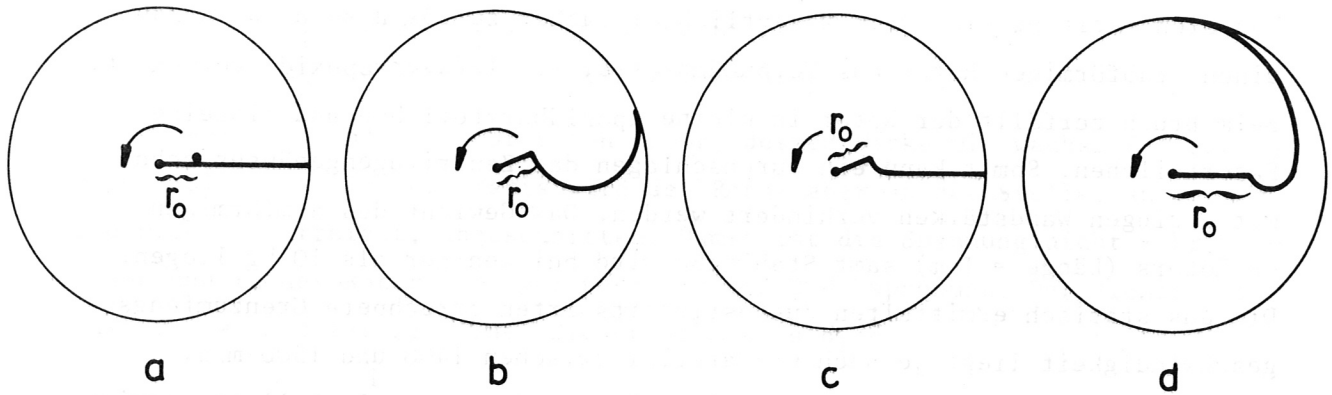


Abb.3: Beispiele von Führungsstrecken:

- (a) gerade -,
- (b) halbkreisförmige -,
- (c) kombinierte Führungsstrecke.
- (d) Strecke konstanter Zwangskraft

2.3.2.1 Gerade Führungsstrecke

Nach der Beziehung (1)

$$v_p = 2v_u \cdot \cos \frac{\theta}{2}$$

verläßt ein beschleunigtes Pellet die gerade Führungsstrecke mit der Geschwindigkeit

$$v_p = \sqrt{2} \cdot v_u$$

$$v_u = \text{Rotorumfangsgeschwindigkeit}$$

Die während des Beschleunigungsvorgangs auf das Pellet ausgeübte Zwangsbeschleunigung b_z ist gleich der Coriolisbeschleunigung (s. z.B. A. Sommerfeld, Mechanik)

$$b_z = 2 \omega^2 r \tag{6}$$

r = Abstand von der Drehachse

ω = Winkelgeschwindigkeit des Rotors

Die Gleichung für die Bahn des Pellets lautet:

$$r = \frac{1}{2} \left(r_0 + \frac{v_0}{\omega} \right) \cdot e^{\omega t} + \frac{1}{2} \left(r_0 - \frac{v_0}{\omega} \right) \cdot e^{-\omega t} \quad (7)$$

r_0 : Abstand zwischen Drehachse und Einspeisepunkt

v_0 : Anfangsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$
im rotierenden Koordinatensystem

$\varphi(t) = \omega \cdot t$: Drehwinkel nach der Zeit t .

Die Einleitung eines Pellets in den Aufnahmebereich des Beschleunigungssteges ist mit einer Ortsungenauigkeit sowohl in der r - als auch in der φ -Koordinate behaftet. Dies bedingt eine Streuung des Austrittswinkels α um $\Delta\alpha_r \pm \Delta\alpha_\varphi$. Dabei ist α definiert als der Winkel zwischen Rotortangente am Ort des Austritts und der Richtung des austretenden Pellets. Bei einer Schwankung von r_0 um Δr erhält man für $r_0 \ll R$ eine Streuung $\Delta\alpha_r \approx \Delta r / r_0$. Eine Ungenauigkeit $\Delta\varphi$ in der φ -Koordinate führt zu einem Streuwinkel $\Delta\alpha_\varphi = \Delta\varphi$.

Während das Pellet in der Führungsstrecke beschleunigt wird, dreht sich der Rotor um den Beschleunigungswinkel φ_R . Aus der Bahngleichung des Pellets ergibt sich für $v_0 = 0$

$$\varphi_R = \ln \left(\frac{R}{r_0} + \left(\left(\frac{R}{r_0} \right)^2 - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (8)$$

Für $v_0 = \omega \cdot r_0$ ergibt sich aus der Bahngleichung die einfache Beziehung

$$\varphi_R = \ln \frac{R}{r_0} \quad (9)$$

Denn die relative Startgeschwindigkeit des Pellets in der Rotationsebene im Abstand r_0 von der Drehachse ist im allgemeinen gleich der Umfangsgeschwindigkeit $\omega \cdot r_0$.

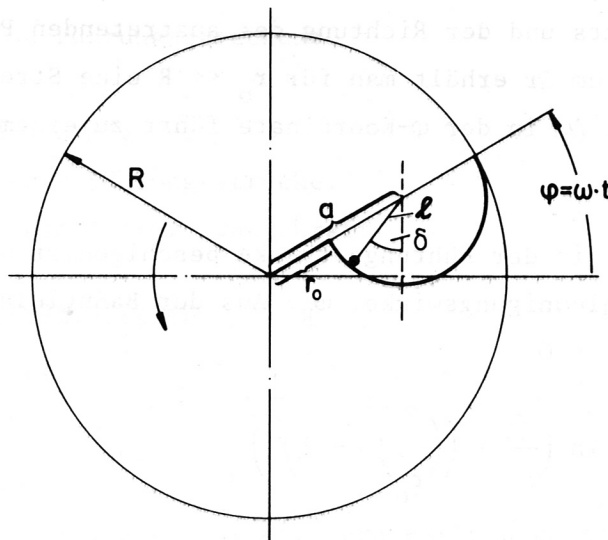
2.3.2.2 Halbkreisförmige Führungsstrecke

Wie aus Gl.1 ersichtlich, beträgt die Pelletgeschwindigkeit bei tangentialem Austritt

$$v_p = 2 v_u$$

Um eine Aussage über die Zwangsbeschleunigung während des Beschleunigungsvorganges machen zu können, wird zunächst die Bewegungsgleichung für das Pellet aufgestellt. Mit den aus der unten stehenden Skizze ablesbaren Bezeichnung lautet sie

$$\ddot{\delta} - \frac{a}{\ell} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\delta - \omega t) = 0 \quad (10)$$



Diese Gleichung wurde numerisch gelöst. In Abb.4 ist die Zwangsbeschleunigung b_z auf das Pellet als Funktion seines Abstands vom Drehpunkt für einen Scheibenradius $R = 12$ cm und einer Drehfrequenz von 500 Hz dargestellt.

Parameter ℓ ist der Radius der halbkreisförmigen Führungsstrecke. Man sieht, daß die maximale Zwangsbeschleunigung stets über dem Wert $4v_u^2/R = 4,7 \cdot 10^6$ m/s² liegt, diese am Ende der Führungsstrecke erreicht und mit abnehmendem ℓ rasch zunimmt.

Für die Austrittswinkelstreuung $\Delta\alpha_r$ erhält man unter der Voraussetzung $\Delta r_o \ll \ell$ (Bezeichnung siehe auch Fall (a))

$$\Delta\alpha_r = + \operatorname{arc\,tg} \frac{(2\ell \Delta r_o)^{\frac{1}{2}}}{r_o + \Delta r_o} \quad (11)$$

Eine Ortsungenauigkeit $\Delta\varphi$ beim Einfüttern des Pellets bewirkt wieder wie im Fall (a) eine Austrittswinkelstreuung $\Delta\alpha_\varphi = \Delta\varphi$. Die gesamte Austrittswinkelstreuung beträgt demnach

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_r \pm \Delta\alpha_\varphi \quad (12)$$

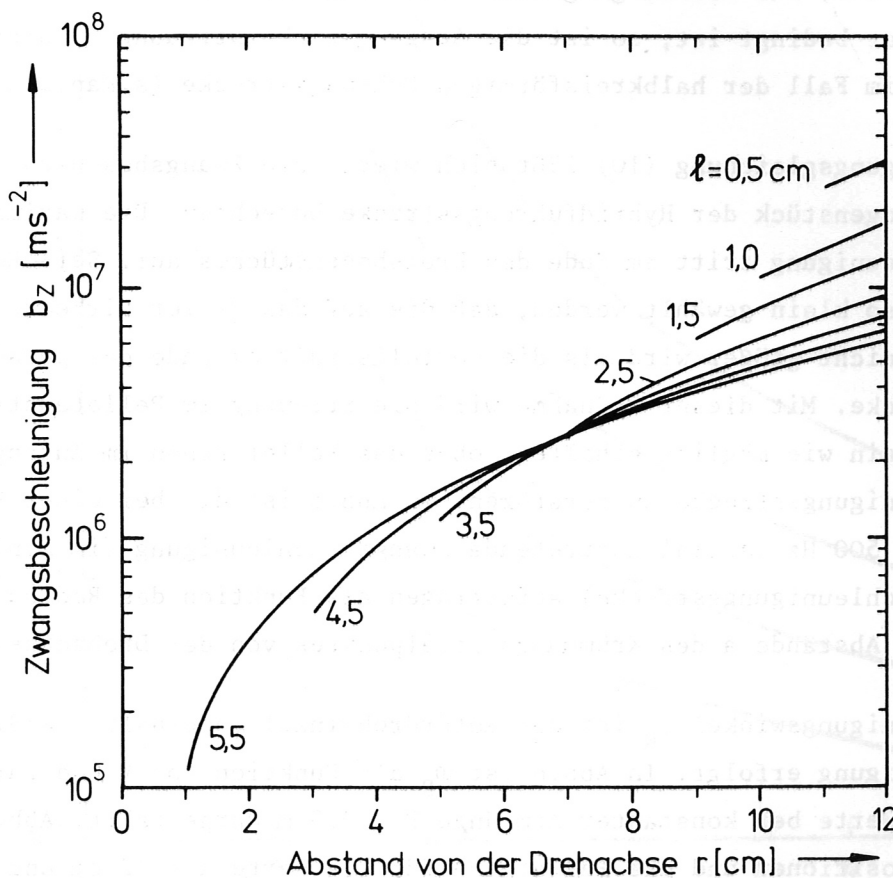


Abb.4: Zwangsbeschleunigung auf das Pellet als Funktion des Abstandes r von der Rotordrehachse für den Fall der halbkreisförmigen Führungstrecke mit verschiedenen Krümmungsradien ℓ . Winkelgeschwindigkeit $\omega = 3142 \text{ s}^{-1}$.

2.3.2.3 Kombinierte Führungsstrecke

Wie in Kapitel 2.3.1 erwähnt, bietet die Verwendung von armförmigen Rotoren gegenüber scheibenförmigen gewisse Vorteile. Werden jedoch armförmige Rotoren mit gerader Führungsstrecke ausgerüstet, so haben sie den Nachteil der stoßartigen Pelletaufnahme. Abhilfe schafft hier eine kreisförmige Einleitungsstrecke im Nabenbereich des Rotors. Die gesamte Führungsstrecke besteht also aus einem Kreisbogenstück am Anfang und einem daran anschließenden geraden Führungsstück. Die erzielbare Pelletgeschwindigkeit beträgt wie beim geraden Führungssteg

$$v_p = \sqrt{2} \cdot v_u$$

Setzt man voraus, daß die Ausgangswinkelstreuung durch die Streuung der Startparameter bedingt ist, so ist die Ausgangswinkelstreuung $\Delta\alpha$ hier die gleiche wie im Fall der halbkreisförmigen Führungsstrecke (s.Kap.2.3.2.2).

Mit der Bewegungsgleichung (10) läßt sich wieder die Zwangsbeschleunigung b_z im Kreisbogenstück der Hybridführungsstrecke berechnen. Die maximale Zwangsbeschleunigung tritt am Ende des Kreisbogenstückes auf. Sein Radius kann gerade so klein gewählt werden, daß die auf das Pellet wirkende Zwangskraft nicht größer wird als die Corioliskraft am Ende der geraden Führungsstrecke. Mit dieser Maßnahme wird die Streuung im Pelletaustrittswinkel so klein wie möglich gehalten, ohne das Pellet schon im Anfangsteil der Beschleunigungsstrecke zu zerstören. In Abb.5 ist die bei einer Rotorfrequenz von 500 Hz maximal auftretende Zwangsbeschleunigung (im Einleitungs- teil der Beschleunigungsstrecke) aufgetragen als Funktion des Radius ℓ für verschiedene Abstände a des Krümmungsmittelpunktes von der Drehachse.

Der Beschleunigungswinkel φ_R ist der Rotordrehwinkel innerhalb dem die Pelletbeschleunigung erfolgt. In Abb.6 ist φ_R als Funktion von ℓ und für verschiedene a -Werte bei konstanter Armlänge $R = 0,5$ m dargestellt. Abb.7 zeigt 3 Armpositionen und die Pelletbahn für die Werte $a = 12$ cm und $\ell = 2$ cm. Aus dieser Darstellung kann außerdem für diese speziellen Einleitungsparameter (a, ℓ) der Beschleunigungswinkel φ_R für verschiedene Armlängen R entnommen werden.

2.3.2.4 Führungsstrecke mit konstanter Zwangskraft

Von den vielen denkbaren Formen der Führungsstrecken ist noch die mit tangentialem Pelletaustritt und konstanter Zwangsbeschleunigung auf das Pellet erwähnenswert. Der Krümmungsradius am Ausgang sei annähernd gleich dem Scheibenradius R . Demnach beträgt die Zwangsbeschleunigung $4 \omega^2 R$ und bleibt konstant längs des gesamten Beschleunigungsweges. Diese Führungsstrecke beginnt bei $R/2$ und besitzt den oben gezeigten Verlauf ¹³⁾.

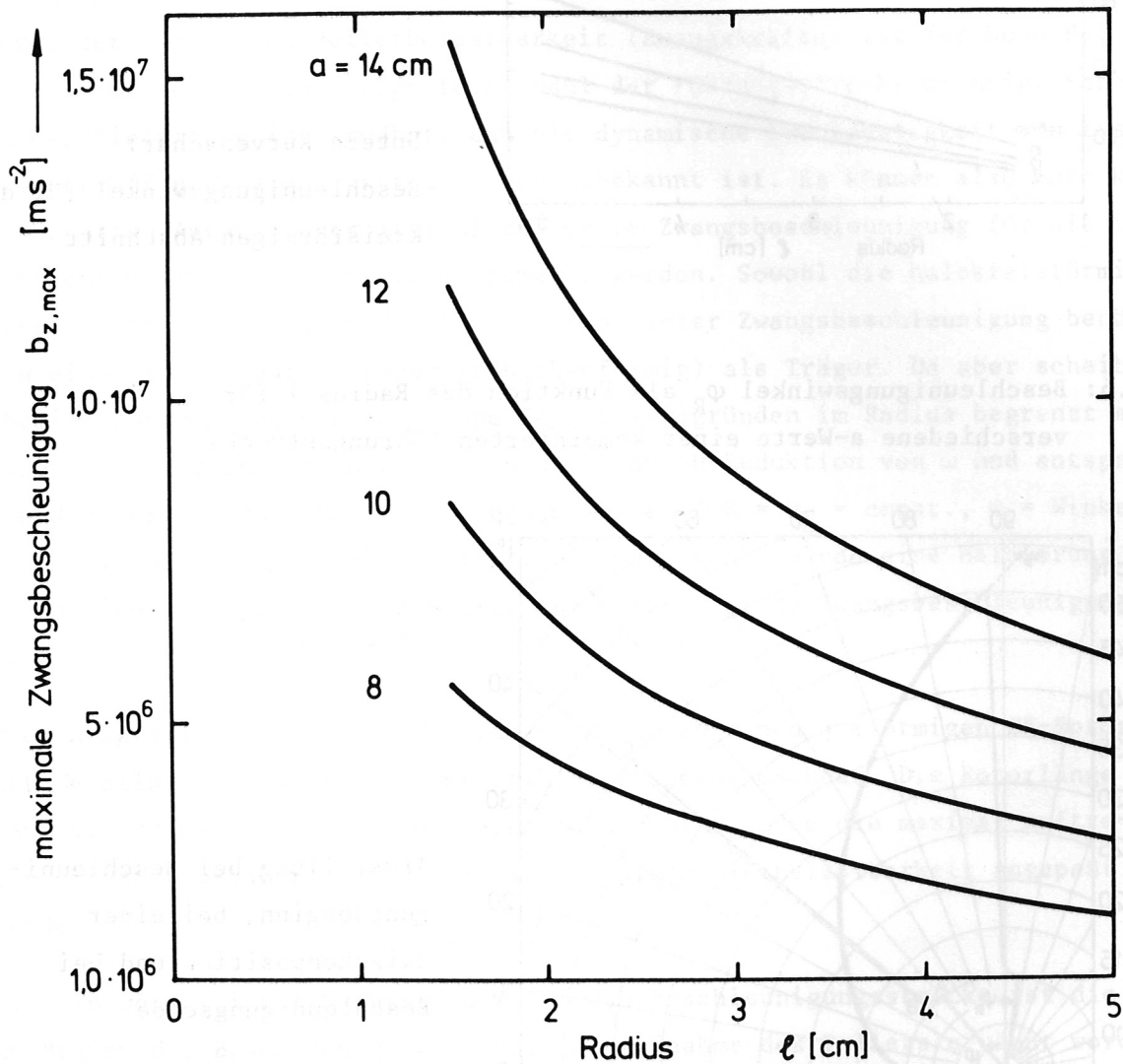
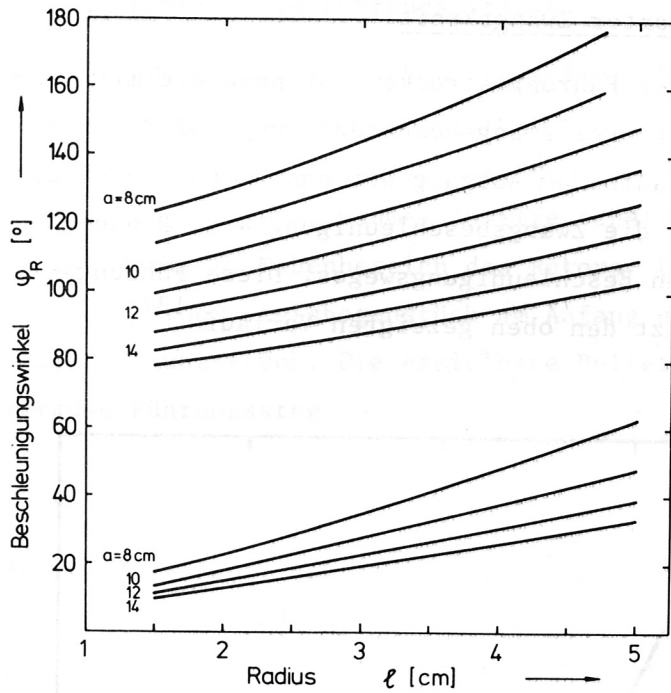


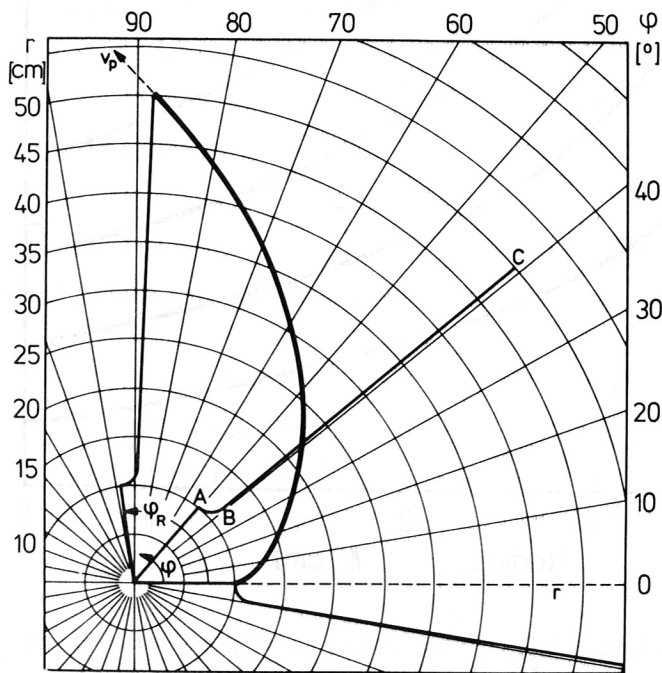
Abb. 5: Maximale Zwangsbeschleunigung $b_{z,max}$ im kreisförmigen Teil einer kombinierten Führungsstrecke. a : Abstand in cm zwischen Rotordrehachse und Krümmungsmittelpunkt des kreisförmigen Teils.



Obere Kurvenschar:
Beschleunigungswinkel für
die gesamte Führungsstrecke

Untere Kurvenschar:
Beschleunigungswinkel für den
kreisförmigen Abschnitt

Abb.6: Beschleunigungswinkel φ_R als Funktion des Radius l für verschiedene a -Werte einer kombinierten Führungsstrecke.



Armstellung bei Beschleunigungsbeginn, bei einer Zwischenposition und bei Beschleunigungsende

Abb.7: Bahnkurve des Pellets bei Verwendung einer kombinierten Führungsstrecke. $a = 12$ cm, $l = 2$ cm. AB kreisförmige, BC gerade Führungsstrecke.

2.3.2.5 Bewertung der Führungsstrecken und ihre Anwendung

Bei gleicher Pelletaustrittsgeschwindigkeit wird durch die gerade Führungsstrecke, die Hybridstrecke und die Strecke konstanter Zwangsbeschleunigung die minimal mögliche Zwangskraft auf das Pellet ausgeübt. Im halbkreisförmigen Beschleunigungskanal ist die maximale Zwangsbeschleunigung auf das Pellet abhängig vom Krümmungsradius. Sie ist für alle möglichen Krümmungsradien größer als bei den drei anderen genannten Geometrien (bei gleichen Armlängen bzw. gleichen Scheibenradien).

Wegen der begrenzten Pelletbelastbarkeit (Zwangskräfte) ist für hohe Pelletgeschwindigkeiten die geeignete Auswahl der Führungsstrecke wichtig. Schon in der Einleitung ist erwähnt, daß die dynamische Druckfestigkeit von festem Wasserstoff und seinen Isotopen noch unbekannt ist. Es können also noch keine gesicherten Angaben über maximal zulässige Zwangsbeschleunigung für die in Betracht kommenden Pelletgrößen gemacht werden. Sowohl die halbkreisförmige Führungsstrecke als auch die Strecke konstanter Zwangsbeschleunigung benötigen einen flächenhaften Rotor (scheibenförmig) als Träger. Da aber scheibenförmige Rotoren aus Gewichts- und Gefährdungsgründen im Radius begrenzt sind, kann die Zwangsbeschleunigung auch nicht durch Reduktion von ω und entsprechender Vergrößerung von R verringert werden ($\omega R = v_u = \text{const.}$, ω = Winkelgeschwindigkeit, R = Scheibenradius). Wie man sieht, würde eine Halbierung von ω und eine Verdoppelung von R eine nur halb so große Zwangsbeschleunigung ergeben.

Die Integration einer Hybridführungsstrecke in einen armförmigen CF-Rotor mit Metallnabe (z.B. Titan oder Stahl) erscheint machbar. Die Rotorlänge kann bis zu einigen Metern betragen, und somit könnte die maximal auftretende Zwangsbeschleunigung teilweise an die Pelletbelastbarkeit angepaßt werden.

Als ein wesentlicher Nachteil der geraden Beschleunigungsstrecke ist die zu Beginn der Beschleunigung stoßartige Aufnahme des Pellets erwähnt worden. Sie führt zu einer unerwünschten Vergrößerung der Pelletaustrittsstreuung, und außerdem kann bei zu großer Stoßgeschwindigkeit das Pellet zerstört werden. Diese Nachteile werden durch die kombinierte Führungsstrecke stark abgeschwächt. Das Pellet wird dort - sofern es ohne Streuung eingefüttert

wird - weich aufgenommen und beschleunigt. Das Pellet ohne Streuung in den Beschleunigungskanal einzubringen, wird nicht realisierbar sein. Man wird versuchen, diese Schwankungen in den Startbedingungen möglichst gering zu halten und ihre Auswirkungen zu reduzieren, z.B. durch ein rohrförmiges Anfangsstück.

Foster im ORLN erreichte bei Verwendung eines halbkreisförmigen und röhrenförmigen Beschleunigungskanals eine Pelletausgangsstreuung von 2° ¹⁴⁾. Die Pelleteinfütterung erfolgte dabei durch Extrusion eines Deuteriumstabes in den Aufnahmebereich des Zentrifugenrotors, und die Pellets wurden durch die Rohröffnung des Beschleunigungskanals geschnitten.

2.4 Hilfseinrichtungen für den Pelleteinschuß

2.4.1 Pelletdiagnostik

Wichtige Eigenschaften des eingeschossenen Pellets sind seine Masse und seine Geschwindigkeit. Es sollte wenigstens auf $\pm 10\%$ genau bekannt sein, wie groß die mit einem Pellet eingeschossene Teilchenzahl ist. Bei homogener Dichte und zylindrischer Gestalt des Pellets kann man sich mit einer Volumenbestimmung durch räumliche Fotografie zufriedengeben. Falls die Pelletmasse gut reproduzierbar ist, kann die Massenbestimmung auf ein einzelnes Pellet beschränkt werden.

Die Pelletgeschwindigkeit läßt sich durch Lichtschranken mit genügend schneller Ansprechzeit bestimmen. Auch hier gilt das oben Gesagte: Ist die Streuung der Geschwindigkeit nicht größer als $\pm 10\%$, so wird es vermutlich ausreichend sein, die Geschwindigkeit eines Pellets zu bestimmen.

2.4.2 Pellet-Strahlrohr

Die Einleitung der beschleunigten Pellets nach Verlassen der Zentrifuge in die Plasmamaschine geschieht über ein evakuiertes Strahlrohr. Während der Erzeugung und Beschleunigung des Pellets ist ein unerwünschter Gasanfall nicht zu vermeiden. Um eine Beeinträchtigung des Plasmas zu verhindern, muß das Pellet-Strahlrohr mit einem entsprechenden Blendensystem bzw. schnellen Ventilen und geeigneten Pumpen versehen werden.

Die Zielfläche am Plasmaort ist abhängig von der Pelletstreuung des Pelletinjektors und seiner Entfernung zum Plasma. In der Regel sollen die Pellets möglichst am selben Ort im Plasma deponiert werden. Bei einem oben (s. 2.3.2.5) erwähnten Pelletstreuungswinkel von 2° und einer wohl gering veranschlagten Entfernung von 3 m beträgt die Zielfläche 10,5 cm im Durchmesser. Ist man gezwungen, den Pelletinjektor außerhalb einer Gefährdungszone zu installieren, dann beträgt z.B. bei einer Entfernung von 20 m die Zielfläche 70 cm im Durchmesser. Man sieht, daß bei so großen Abständen zwischen Injektor und Plasmamaschine eine Reduktion der Zielfläche alleine schon wegen der notwendigen großen Öffnung am Entladungsgefäß wünschenswert ist. Um dieses zu erreichen, wurden im Risø National Laboratory Pellets durch ein enges Führungsrohr geleitet¹⁵⁾. Bei Pelletgeschwindigkeiten bis zu 150 m/s und bei bis zu 20 m Rohrlänge betrug der durchschnittliche Material- und Geschwindigkeitsverlust etwa 25%. Dabei war das Rohr zu einer Spule mit einem Radius von 1 m aufgewickelt. Durch geeignete Wahl der Parameter für das Führungsrohr können die Verluste eventuell noch reduziert werden. Ob diese Überleitungsmethode auch noch im Geschwindigkeitsbereich 1000 bis 2000 m/s geeignet ist, kann derzeit nicht beantwortet werden. Die Einleitung der Pellets in das Führungsrohr stellt in diesem Zusammenhang noch ein besonderes Problem dar. Bei Einleitung der streuenden Pellets in das Pelletführungsrohr über einen Trichter besteht die Gefahr, daß die Pellets die Trichterwand unter einem von Stoß zu Stoß rasch steiler werdenden Winkel treffen. Dies führt zu einer Vergrößerung der Austrittswinkelstreuung und im ungünstigsten Fall sogar zu einer Richtungsumkehr der Pellets. Bei zu großer Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Trichter- bzw. Rohrwand werden die Pellets auf Grund ihrer begrenzten Stoßfestigkeit bei der Reflektion zerstört. So beträgt z.B. bei einer Pelletgeschwindigkeit von 2000 m/s und bei 2° Streuwinkel die Transversalgeschwindigkeit bereits 35 m/s.

2.4.3 Steuerung, Synchronisation und Überwachung

Die rechtzeitige Bereitstellung und Einleitung von verfestigtem Wasserstoff bei der direkten oder indirekten Einfütterung in den Rotor (s. Abb.1) bedingt entsprechende Anforderungen an Steuerung, Synchronisation und Überwachung. Neben der internen Quellensteuerung für Laden und Ausstoß des Wasserstoffs, worüber an anderer Stelle ausführlich berichtet wurde ¹⁰⁾, ist eine steuerungstechnische Anbindung an den Rotor, bei der indirekten Einfütterung auch an den Hacker, erforderlich. Das Start- und Stoppsignal des so erweiterten Systems erfolgt von der Plasmamaschine. Der Ablauf eines wählbaren Füllprogramms in Pelletfrequenz und Zeitdauer muß so möglich sein, daß auch ein Abbruch nach einer wählbaren Zahl von eingeschossenen Pellets erfolgen kann. Auch eine während des Plasmaeinschusses in Abhängigkeit von gewünschten Plasmaparametern geregelte Pelletfrequenz wäre vorteilhaft. Zwischen Bereitstellung des Wasserstoffs und der Rotordrehung (Bereich der Einfütterung) muß eine Synchronisierung erfolgen. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Rotordrehzahl variabel ist und das Pelletfolgeintervall in ganzzahligen Vielfachen der Umlaufzeit des Rotors wählbar sein muß. Der Fehler in der Synchronisation sollte nicht größer sein als $\pm 50 \mu\text{s}$ sein. Die Streuung in der Vertikalkoordinate der Pellets entspricht dann $\pm 0,25 \text{ mm}$, wenn bei der indirekten Einfütterung in den Rotor Einleitungsgeschwindigkeiten von 5 m/s angenommen werden.

Wichtig für den Betrieb der Pellet-Nachfüllapparatur ist nicht zuletzt eine wirkungsvolle Überwachung. Diese erstreckt sich auf die Frequenz und die eventuell auftretende Unwucht des Rotors sowie die allgemeine Bereitschaft der Gesamtapparatur. Überschreitet z.B. die Unwucht einen bestimmten kritischen Wert, so muß neben der sofortigen Abschaltung des Rotorantriebs das Einschußventil geschlossen werden. Das Plasma wäre so gegen Fremdgaseinbruch und bei Verwendung eines Rotors aus Verbundmaterial, gegen das Eindringen von Kohlefasern und Epoxidharzstücken geschützt. Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang, den durch Vakuumbruch im Rotorkessel und Stäbchenquelle freierwerdenden gespeicherten festen Wasserstoff (Aufwärmung) unschädlich zu machen. Hierzu muß zur rechten Zeit das Vakuumsystem in geeigneter Weise mit Inertgas gefüllt und über eine Abgasleitung gespült werden. Außerdem muß auch der Raum, in dem die Pellet-Nachfüllapparatur steht, bezüglich der Wasserstoffkonzentration überwacht werden.

3. Plasmaparameter und Pelletinjektion am Beispiel von ASDEX

Für ASDEX ist ein Dichteregime (mittlere Dichte) von $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ vorgesehen. Somit variiert bei einem Plasmavolumen von 5 m^3 die Gesamtionenzahl N_{p1} von $1 \cdot 10^{20}$ bis $5 \cdot 10^{20}$.

Die Frage ist nun, in welchen Raten die Pelletnachfüllung im Verhältnis zum Plasma erfolgen soll. Es erscheint sinnvoll, die Verhältniszahl $f = N_p / N_{p1}$ einzuführen. Hierbei ist N_p die Zahl der Wasserstoffatome im Pellet. Im Gespräch sind f-Zahlen von $f = 0.1$ bis $f = 1$. An dem Experiment ISX-B wurde demonstriert, daß von der Stabilität des Plasmas her gesehen sogar $f > 1$ zulässig sein kann ²⁾.

Je nach Betriebsweise von ASDEX wird man mit einem mehr oder weniger großen Recycling zu rechnen haben. Für die Nachfüllung am anspruchvollsten ist ein Betrieb mit zu vernachlässigendem Recycling und maximaler mittlerer Dichte ($1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) mit der zusätzlichen Annahme, daß nach jeweils einer Teilcheneinschlußzeit τ_N die Gesamtionenzahl im Plasma durch den Divertor abgepumpt wird. Während der Zeit τ_N muß im Mittel also die Gesamtionenzahl N_{p1} durch Pellets nachgeliefert werden. Für $\tau_N = 50 \text{ ms}$ und $f = N_p / N_{p1} = 1$ erhält man so eine Pelletinjektionsfrequenz von 20 Hz. Nimmt man an, daß man während der Brenndauer von 10 s maximal 1 s nachfüllen muß, so sind in dieser Zeit 20 Pellets einzuschießen. Verwendet man Pellets zylindrischer Gestalt mit einer Länge h , die gleich dem Durchmesser d sei, so beträgt die Pelletlänge $h = 2,2 \text{ mm}$ und das Volumen des Pellets $8,5 \text{ mm}^3$. Soll jedoch wegen zu großer Dichte- und Temperaturschwankungen im Plasma nur $N_{p1}/10$ mit jedem Pellet eingeschossen werden ($f = 0,1$), so verringert sich der Pelletdurchmesser um den Faktor $10^{-1/3}$, die Injektionsfrequenz ν_p erhöht sich auf 200 Hz und die Gesamtzahl der Pellets auf 200 Stück bei gleich gebliebener eingeschossener Gesamtmasse.

Die oben getroffenen Annahmen für die ASDEX Nachfüllung verlangen also von der quasikontinuierlichen Pelletinjektion für einen Plasmaschuß die Bereitstellung eines 4,4 cm langen und 0,22 cm dicken Wasserstoffstabes mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 4,4 cm/s. Der Vorrat an festem Wasserstoff für die Pelleterzeugung muß daher mindestens $0,17 \text{ cm}^3$ betragen.

Um allgemein Pelletdaten aus den Vorgabegrößen von Plasmen einfach ableiten zu können, wurden folgende Beziehungen in Form eines Nomogramms Abb.8 dargestellt. Hierbei wird vereinfachend angenommen, daß nach der Zeit τ_N die Gesamtteilchenzahl des Plasmas nachgefüllt werden muß.

$$N_p = f \cdot N_{p1} ; \quad f = \frac{N_p}{N_{p1}}$$

Bei Pellets mit zylindrischer Gestalt beträgt ihre Länge,

$$l_d = \frac{4N_p}{d^2 \pi \rho^*}$$

Oder bei Pellets gleicher Länge und Dicke $h = l_d = d$,

$$h = \left(\frac{4N_p}{\pi \rho^*} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(2,16 \cdot 10^{-20} N_p \right)^{\frac{1}{3}}$$

Hier ist ρ^* die Zahl der D-Atome pro Volumeneinheit mit $\rho^* = 5,87 \cdot 10^{19} \text{ mm}^{-3}$ eingesetzt.

$$\nu_p = \frac{1}{\tau_N \cdot f}$$

Beispiel zum Gebrauch des Nomogramms: Es sei $N_{p1} = 1 \cdot 10^{20}$ und $f = 0,1$, dann folgt aus dem ersten Schritt im Nomogramm $N_p = 1 \cdot 10^{19}$. Bei einem Pelletdurchmesser von $d = 0,5 \text{ mm}$ erhält man im zweiten Schritt $l_d = 0,9 \text{ mm}$. Der Sonderfall $l_d = d$ ergibt $h = 0,6 \text{ mm}$. Für ein vorgegebenes $\tau_N = 50 \text{ ms}$ folgt im dritten Schritt die Pelletfrequenz $\nu_p = 200 \text{ s}^{-1}$.

Außer den schon erwähnten notwendigen Daten für die Pelletinjektion ist es natürlich wichtig, zu wissen, mit welcher Geschwindigkeit ν_p die Pellets ins Plasma eingeschossen werden müssen. Diese hängt einerseits ab von den Plasmaparametern, wie Dichte, Temperatur und deren Profile, andererseits aber auch wesentlich vom Pelletdurchmesser. Um Anhaltswerte für die Einschußgeschwindigkeit zu gewinnen, wurden für verschiedene Pelletgeschwindigkeiten und Pelletdurchmesser bei den interessierenden Plasmaparametern Depositionskurven errechnet. Diese Rechnungen wurden mit Hilfe des im ORNL entwickelten Codes "Pellet" durchgeführt¹⁶⁾. Die Abb.9 zeigt Ergebnisse für verschiedene Datensätze von ASDEX.

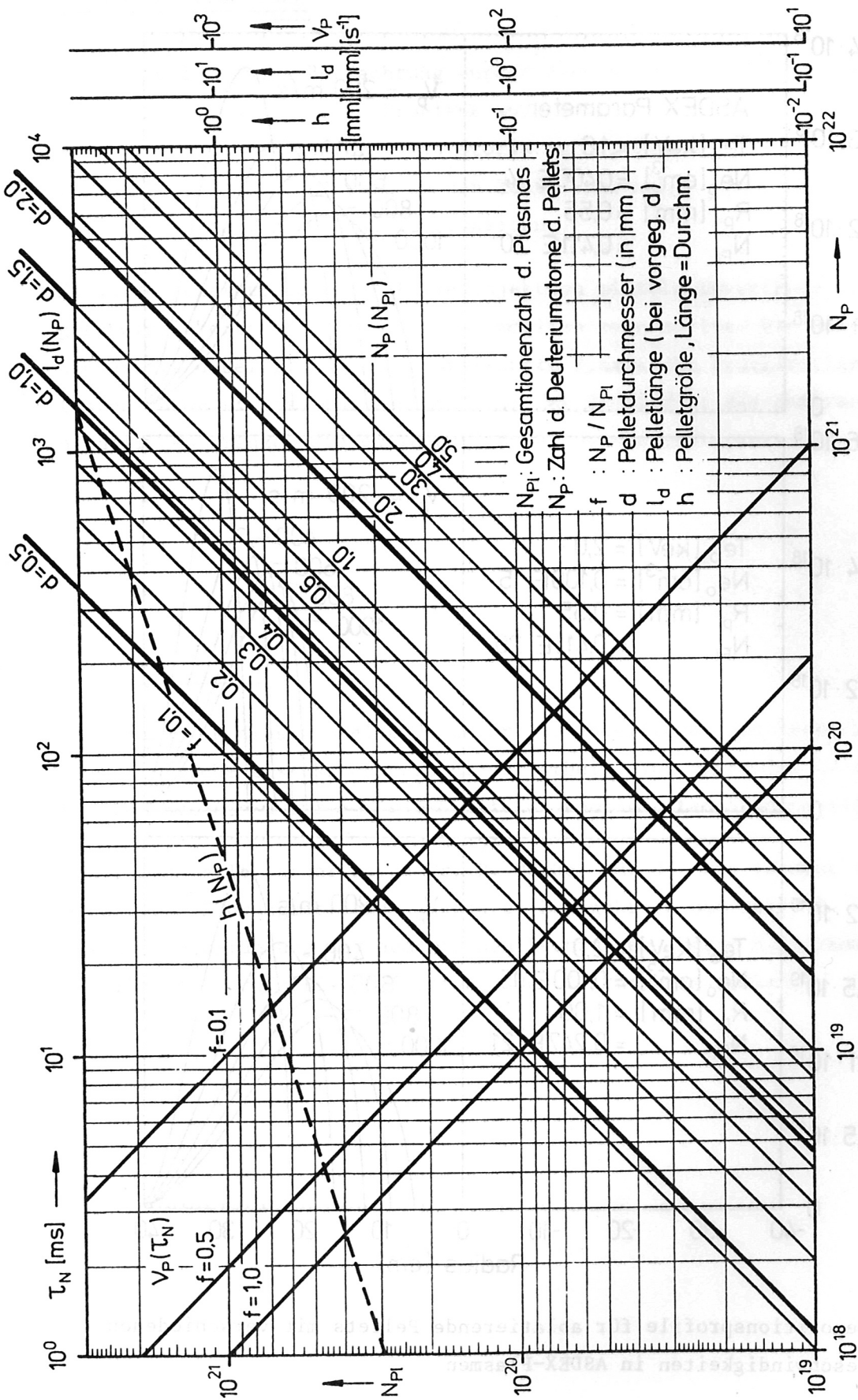


Abb. 8: Nomogramm zur Ermittlung von Pelletdaten für die Nachfüllung von ASDEX: Zahl der erforderlichen D-Atome N_p im Pellet für ein vorgegebenes N_{PI} und f ; aus N_p bestimmt sich die Länge l_d der zylindrischen Pellets der Dicke d ; unter Beibehaltung der zylindrischen Form der Pellets, deren Länge l_d gleich ihrem Durchmesser d ist, sei h die Pelletkenngröße ($h = l_d = d$), die aus N_p ermittelt wird. Bei zusätzlicher Vorgabe von τ_N kann die Pelletinjektionsfrequenz ν_p bestimmt werden.

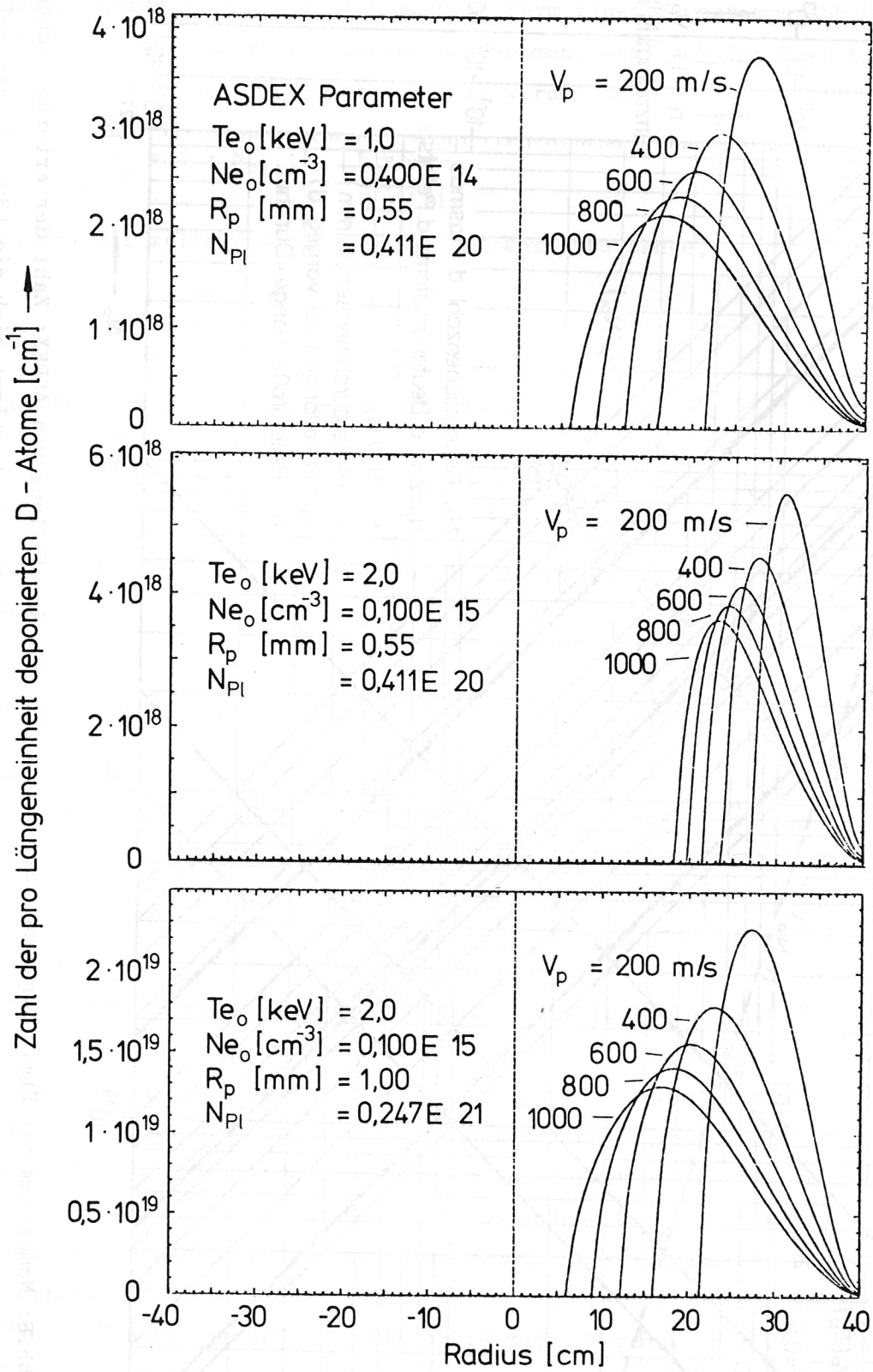


Abb.9: Depositionsprofile für ablatierende Pellets mit verschiedenen Geschwindigkeiten in ASDEX-Plasmen

4. Schlußbetrachtung

In der vorliegenden Betrachtung wurden die bei der zentrifugalen Pelletbeschleunigung auftretenden Probleme aufgezeigt. Diese sind insbesondere die Bereitstellung des festen Wasserstoffs in Stabform, das Schneiden der Pellets und deren Einfütterung in den Zentrifugenkanal sowie die Beschleunigung der Pellets auf große Geschwindigkeiten.

Es wurde gezeigt, daß eine Pelletinjektion mittels Zentrifuge bis zu Pelletgeschwindigkeiten von ca. 2000 m/s möglich sein sollte. Die wesentliche Unsicherheit dabei ist die noch unbekannte dynamische Druckfestigkeit des festen Wasserstoffs, die zusammen mit der Festigkeit des Rotormaterials die natürlichen Grenzen dieses Injektionsverfahrens bedingen.

Wir danken an dieser Stelle Herrn Dr. C. Andelfinger und Herrn Dr. K. Büchl für hilfreiche Diskussionen zu dieser Arbeit. Von Herrn Dr. C. Andelfinger kam der Hinweis auf die Möglichkeit zur kombinierten Führungsstrecke.

Unser Dank gilt ferner Herrn Dr. P. Merkel für die Überlassung von Ergebnissen zur Führungsstrecke konstanter Zwangskraft und Herrn E. Springmann für die Durchführung der numerischen Rechnungen. Herrn H. Birkmeier möchten wir für die sorgfältige Anfertigung der Zeichnungen danken.

Literaturverzeichnis:

Die das gesamte Arbeitsgebiet umfassende Literatur ist in den beiden folgenden Übersichtsartikeln zu finden:

C.T. Chang et al., The Feasibility of Pellet Re-Fuelling of a Fusion Reactor, Nucl.Fus., 20, 859 (1980)

S.L. Milora, Review of Pellet Fueling, Journ.of Fusion Energy, 1, 15 (1981)

1 S.L. Milora, C.A. Foster, P.H. Edmonds, Phys.Rev.Lett.42, 97 (1979)

2 S.L. Milora, Bull.Am.Phys.Soc.24, 1010 (1979)

3 S.L. Milora, Oak Ridge Nat.Lab.Report, ORNL/TM 7422 (1980)

4 V. Andersen, M. Gadeberg, P.B. Jensen, P. Nielsen, Post Sess., APS Meeting, Boston 1979

5 K. Büchl, W. Riedmüller, W VII A-Team, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 4, 906 (1981)

6 S.L. Milora, J.of Fusion Energy 1, 15 (1981)

7 IPP Jahresbericht 1979, S.97

8 W. Riedmüller, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Report IPP 4/188 (1980)

9 W.D. Friedman, G.M. Halpern, B.A. Brinker, Rev.Sci.Instr.45, 1245 (1974)

10 W. Amenda, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Report IPP 4/151 (1977)

11 C.A. Foster, S.L. Milora, Proc.Fusion Fueling Workshop, Princeton, N.J., DoE Conf.-771129 (1978) p.117

12 T.R. Jarboe, W.R. Baker, Rev.Sci.Instr.45, 431 (1974)

13 P. Merkel, IPP Garching, private Mitteilung

14 C.A. Foster, ORNL, Oak Ridge Nat.Lab., private Mitteilung

15 H. Sørensen, RNL, Risø, private Mitteilung

16 W.A. Houlberg, M.A. Iskra, H.C. Howe, S.E. Attenberger, Oak Ridge Nat. Lab. Report ORNL/TM-6549