

C. Dorner

**Inbetriebnahme und Charakterisierung der
Leidenfrost Gaskanone beim Testbetrieb
am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade**

IPP 1/336

July 2006

Abstract

One of the main challenges posed recently on pellet launcher systems in fusion oriented plasma physics is the control of the plasma edge region. It turned out strong energy burst ejected from the plasma can form a severe threat for in vessel components but can be mitigated by sufficiently frequent triggering of the underlying instabilities using Hydrogen pellet injection. However, so far pellet injection systems have been developed mainly for the task of particle refuelling and hence their operational features are quite adversarial for plasma edge control. Here we report on a novel system developed under the premise of its suitability for controlling and mitigation of plasma edge instabilities. The system is based on the blower gun principle and capable to combine high repetition rates up to 143 Hz with low pellet velocities. Thus, unwanted pellet fuelling can be minimized while the flexibility of accessible injection geometry can be maximized. As a result the new system allows for an enhancement in the tokamak operation as well as for more sophisticated experiments investigating the underlying physics of the plasma edge instabilities. This report describes the design of the new system, its main operational characteristics as determined in extensive test bed runs and also its first application at the tokamak experiment ASDEX Upgrade.

Inbetriebnahme und Charakterisierung der Leidenfrost Gaskanone beim Testbetrieb am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade

Diplomarbeit

Studiengang Maschinenbau
an der Fachhochschule Regensburg

Betreuer: Prof. Dr. Gerhard Kauke Fachhochschule Regensburg
Dr. Peter Lang Max-Planck-Institut Garching
Dipl. -Ing. Christian Wittmann Max-Planck-Institut Garching
Paul Cierpka Max-Planck-Institut Garching

Bearbeiter: Christian Dorner

durchgeführt am Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik

Garching, den 26. Juni 2006

Teilergebnisse und Abbildungen dieser Arbeit sind zum Teil in englischer Sprache, da sie bereits auf der Frühjahrstagung der DPG 2006 in Augsburg unter folgendem Titel präsentiert wurden:

„Cryogenic pellet launcher adapted to control tokamak plasma edge instabilities“

C. Dorner*, P. Cierpka, J. Harhausen, G. Kauke*, P.T. Lang, C. Wittmann,
MPI für Plasmaphysik, D-85748 Garching, Boltzmannstraße 2, Germany,
* FH Regensburg, Galgenbergstraße 30, 93053 Regensburg

Kurzfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Diplomarbeiten ist die Installation und Charakterisierung der Leidenfrost Gaskanone beim Testbetrieb am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade.

Für den Fusionsreaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) entpuppt sich die Leistungsabfuhr als das Hauptproblem, da ein signifikanter Teil der aus dem Plasma abfließenden Teilchen und Energie in kurzen transienten Bursts ausgeworfen wird. Diese als ELMs (Edge Localized Modes) bezeichneten Bursts würden Leistungsdichten über den zulässigen Grenzwerten, jenseits der Zerstörungsschwellen der Einbauten erreichen. Abhilfe verschafft die Kontrolle der ELM-Aktivität, wobei durch eine Frequenzerhöhung die Spitzenleistungen entsprechend abgemildert werden. Als effiziente Methode zur kontrollierten Auslösung der ELMs wurde an ASDEX Upgrade der Einschuss von kyrogenen Pellets aus festen Deuteriumbrennstoff entwickelt. Allerdings waren bislang Pelletinjektoren in ihrer Bauart darauf ausgerichtet, große Pellets mit hoher Geschwindigkeit aber moderater Repetitionsraten zu liefern. Zur ELM-Kontrolle werden jedoch sehr kleine Pellets mit moderater Geschwindigkeit aber hohen Repetitionsraten benötigt. Daher wurde ein neues, besser adaptiertes System entwickelt basierend auf dem Prinzip des Blasrohres bei dem das Projektil im Gasstrom auf Geschwindigkeiten bis zu 300 *m/s* beschleunigt wird. Da Nachladen und Abfeuern sequentiell erfolgen kann, wurde ein Konzept angewandt, dass es ermöglicht, diese Sequenzen für zwei Pellets gleichzeitig auszuführen. Damit konnten Repetitionsraten von bis zu 143 *Hz* erreicht werden.

Die Aufgabe dieser Arbeit war es, die bereits entwickelte Leidenfrost Gaskanone am Fusionsexperiment ASEDEX Upgrade in Betrieb zu nehmen. Anschließend wurde eine Charakterisierung des Ganzen erstellt um Aussage über die Leistungsfähigkeit des Systems zu machen. Nachdem die Leidenfrost Gaskanone am Experiment installiert wurde, wurden alle umliegenden, vorhandenen Systeme an den Injektor angeschlossen und in Betrieb genommen. Dazu gehörte die Einbindung der neuen Messgeräte und Diagnostiken in die Steuerungs- und Regelungssysteme, sowie die Kalibrierung der Diagnostik. Anschließend wurden Daten gesammelt und ausgewertet, um die Leistungsfähigkeit des Pelletinjektors zu erfahren.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
1 Einführung in die Kernfusion	10
1.1 Warum brauchen wir die Kernfusion?.....	10
1.1.1 Energieverbrauch heute und in der Zukunft	10
1.1.2 Ist die Kernfusion überhaupt notwendig?	11
1.1.3 Die ökologischen Vorteile der Fusion	12
1.1.4 Wie sicher und sauber ist die Fusion.....	13
1.1.5 Kraftwerksabfälle: Vergleich der Radiotoxizität	13
1.1.6 Stand der Fusionsforschung	15
1.1.7 Europäische Fusionsanlagen	16
1.1.8 Fusionsforschung am Institut für Plasmaphysik.....	17
1.2 Grundlagen der Kernfusion	19
1.2.1 Was ist ein Plasma?.....	19
1.2.2 Was ist Kernfusion?	20
1.2.3 Fusion von Deuterium um Tritium	20
1.2.4 Zündbedingung	22
1.2.5 Heizmethoden des Plasmas.....	24
1.2.6 Der magnetische Einschluss	25
1.2.7 Stöße und Verunreinigungen	26
1.3 Das Fusionsexperiment ASDEX Upgrade	27
1.3.1 Daten des ASDEX	27
1.3.2 ITER- Projekt	29
1.3.3 Was sind ELMs (Edge Localized Modes)?	31
1.3.4 Der Leidenfrost Effekt	32
1.3.5 D ₂ -Pelletinjektor auf der Basis des Leidenfrost-Effektes.....	33
1.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung	34
2 Die Leidenfrost Gaskanone am ASDEX Upgrade	36
2.1 Anforderungen an das System	36
2.1.1 Pelletmasse und -abmessung	36
2.1.2 Pelletgeschwindigkeit	37

2.1.3	Pelletrepetitionsrate	37
2.2	Layout des Systems	39
2.2.1	Übersicht über den Aufbau des Systems	39
2.2.2	Die Pelletquelle	40
2.2.3	Die Beschleunigungseinheit	42
2.2.4	Das Pump- und Führungssystem	45
2.2.5	Das ASDEX Upgrade Vakuum System	46
2.2.6	Die Versuchsfeld- Diagnosikeinheiten	46
3	Ergebnisse des Versuchstandes aus dem Labor	49
4	Inbetriebnahme des neuen Systems am ASDEX Upgrade	53
4.1	Einbindung der neuen Komponenten am ASDEX Upgrade	53
4.1.1	Steuerung der Pumpen, Ventile und Messgeräte	53
4.2	Erfassung von Daten	54
4.2.1	Geschwindigkeitsmessung und Fotografie	54
4.2.2	Messgerät und Diagnostiken	56
4.3	Testschüsse der Pellets in den ASDEX Upgrade	58
5	Auswertung der Ergebnisse	60
5.1	Offline Messungen	60
6	Zusammenfassung	63
7	Anhang A Ausliterung und Volumina des Vakuumkessels im Pelletlabor	64
	Literaturverzeichnis	65
	Webadressen	67
	Erklärung	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Weltenergieverbrauch - Szenario 2060; Quelle: Deutsche Shell 2005.....	10
Abbildung 2: radiotoxischer Zerfall von verschiedenen Kraftwerkstypen.....	14
Abbildung 3: Fusionsanlagen in Europa im Überblick.....	16
Abbildung 4: Trennung der Gasatome in ihre Bestandteile, Elektronen und Kerne	19
Abbildung 5: Fusion zwischen Deuterium und Tritium	21
Abbildung 6: Zündung eines Deuterium-Tritium Plasmas bei Überschreitung eines bestimmten Grenzwertes vom Fusionsprodukt.	23
Abbildung 7: Principle methods of heating Plasma (Natur & Technik '95 D.A. Gorissen).....	25
Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Fusionskraftwerkes. Herstellung eines in sich geschlossenen Magnetfeld durch einen Kranz von ringförmig angeordneten Spulen (Abbildung IPP).....	26
Abbildung 9: Das Innere des ASDEX Upgrade während der Umbauphase in noch nicht vollständig montiertem Zustand (Abbildung IPP)	28
Abbildung 10: Das Innere des ASDEX Upgrade während einer Plasmaentladung und Einschuss eines Deuteriumpellets (Abbildung IPP)	29
Abbildung 11: Schematische Darstellung von ITER; links unten ist eine Person zum Größenvergleich abgebildet (Abbildung ITER).....	31
Abbildung 12: „ELM melt damage on be target“ Auswirkungen der ELMs, aufgeschmolzener Diverto von Jet	32
Abbildung 13: Leidenfrost Phänomen, kochender Wassertropfen auf heißer Herdplatte schwebt durch einen Dampffilm berührungslos darüber (Quelle: www.Wikipedia.de Stand: März 2006).....	33
Abbildung 14: Übersicht des experimentellen Aufbaues. Links mit Skalierung: Querschnitt des Tokamak ASDEX Upgrade in der C2006 Konfiguration (W beschichtete Wandelemente in schwarz, C in grau) mit einer typischen Plasmakonfiguration für ELM Untersuchungen; Rechts: Leidenfrostgaskanone schießt Pellets in den Torus [vgl. 14].	39
Abbildung 15: die Pelletquelle; Extrusions- und Vorrats-Kyrost (Quelle: Pelletlabor IPP)	41
Abbildung 16: Pelletschneide- und -beschleunigungseinheit	42
Abbildung 17: Synchronisationstiming der Spulen am Oszillographen (Quelle: Pelletlabor IPP)	43
Abbildung 18: Der prinzipielle Ablauf der Pelletproduktion und -beschleunigung (Tic- Tac) (Quelle: Pelletlabor IPP)	44

Abbildung 19: Kalibrierung des Versuchskessels im Pelletlabor (Quelle: Pelletlabor IPP).....	47
Abbildung 20: Versuchsaufbau im Pelletlabor (Quelle: Pelletlabor IPP).....	49
Abbildung 21: Pelletgeschwindigkeit gegenüber Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Helium; Pelletrepetitionsrate 40 Hz (Quelle: vgl. 14).....	50
Abbildung 22: Pelletgeschwindigkeit gegenüber Pelletrepetitionsrate; Treibgas: Helium; Treibgasdruck 3 bar _{abs} (Quelle: vgl. 14).....	51
Abbildung 23: Pelletlieferleistung gegenüber Pelletrepetitionsrate; Treibgas: Helium; Treibgasdruck: 3 bar _{abs} (Quelle: vgl. 14).....	52
Abbildung 24: Die graphische Oberfläche des WINCC, Prozessablaufes der Leidenfrost Gaskanone.....	53
Abbildung 25: Pelletfotografie; Der Vorteil dieses Systems besteht darin, dass die Pellets, unabhängig von ihrer Geschwindigkeit, immer zum richtigen Zeitpunkt fotografiert werden (Quelle: Elektronikabteilung IPP).....	55
Abbildung 26: Schattenbild des Pellets (Durchmesser 2 mm, Länge 0,5 mm) die von einer CCD- Kamera aufgenommen und über Composit- Video an einen Videorekorder gesendet wurden (Quelle: Pelletlabor IPP).....	55
Abbildung 27: Signalanzeige des 16 Kanal Oszillographen.....	57
Abbildung 28: Referenzbilder zur Orientierung (Quelle: IPP).....	58
Abbildung 29: Testschuss #21177 mit dem neuen Pelletinjektor (diagnostics: H α -Diode, camera, light barriers).....	59
Abbildung 30: Pelletgeschwindigkeit gegenüber Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Helium; Pelletrepetitionsrate 40 Hz.....	60
Abbildung 31: Pelletgeschwindigkeit gegenüber Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Deuterium; Pelletrepetitionsrate 40 Hz.....	61
Abbildung 32: Pelletgeschwindigkeit gegenüber Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Protium; Pelletrepetitionsrate 40 Hz.....	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten ASDEX Upgrade.....	28
Tabelle 2: Technische Daten ITER.....	30
Tabelle 3: Merkmale und Parameter für beide Pelletinjektoren am ASDEX Upgrade (Quelle: Eigene Darstellung nach 14).....	38

Abkürzungsverzeichnis

LEIKA	Leidenfrost Gaskanone
ELM	Edge Localized Mode
HFS	High Field Side
LFS	Low Field Side
ASDEX Upgrade	Axial Symmetrisches Divertor-Experiment Upgrade
AUG	ASDEX Upgrade
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
GV	Großvakuum
FV	Feinvakuum
HV	Hochvakuum
UHV	Ultrahochvakuum
LTI-Studie	Long Term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System
IAEA	International Atomic Energy Agency
EFDA	European Fusion Development Agreement

1 Einführung in die Kernfusion

1.1 Warum brauchen wir die Kernfusion?

1.1.1 Energieverbrauch heute und in der Zukunft

Wie sich die Versorgungs- und Nachfragestrukturen in der Zukunft entwickeln werden, kann heute niemand mit Gewissheit sagen. Unterschiedlichste Entwicklungen sind denkbar. Deswegen gebietet es die Vernunft, sich mit unterschiedlichsten Optionen auf die mögliche Vielfalt der Herausforderungen vorzubereiten. Trotzdem lässt sich, selbst wenn es in den Industrieländern gelingt, in erheblichen Umfang Energie zu sparen, zunächst ein deutlicher Anstieg der Energienachfrage für die gesamte Welt vorhersagen (vgl. Abbildung 1).

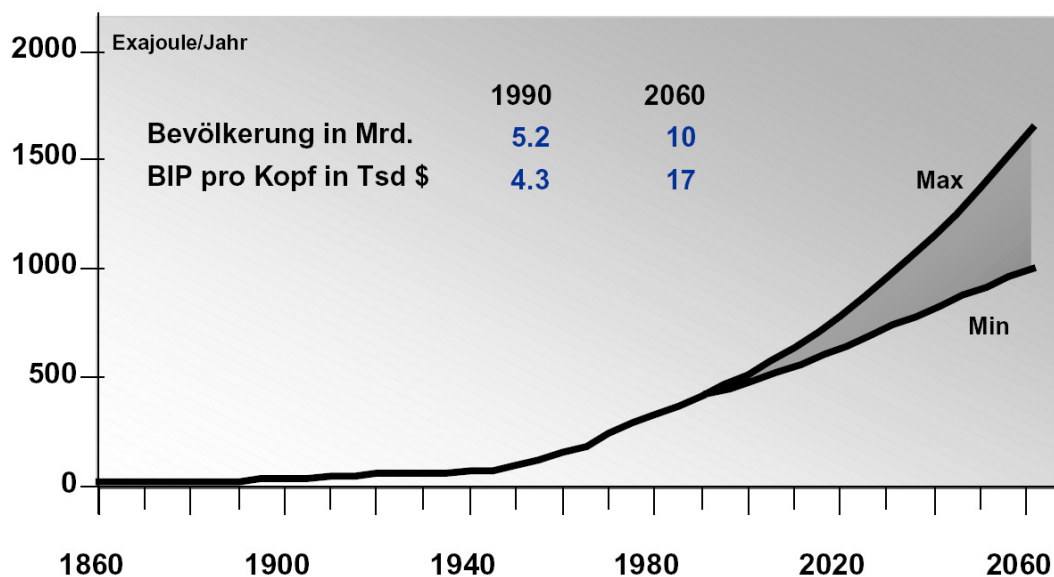


Abbildung 1: Weltenergieverbrauch - Szenario 2060; Quelle: Deutsche Shell 2005

Hierfür sprechen zwei Hauptgründe: Erstens wird die Weltbevölkerung insgesamt deutlich wachsen, auf neun, zehn oder sogar elf Milliarden Menschen. Zweitens leben die Menschen heute unter sehr unterschiedlichen Bedingungen. Die Einen haben Energie im Überfluss, die anderen leben in sehr bescheidenen, teilweise katastrophalen wirtschaftlichen Verhältnissen. Wenn alle diese Menschen am Wohlstand teilhaben wollen, dann ist mit einem deutlichen Anstieg der

haben wollen, dann ist mit einem deutlichen Anstieg der Energienachfrage zu rechnen. Allein Indien wird die Nachfrage in diesem Jahrhundert voraussichtlich versechsfachen. Für China, viele Entwicklungsländern in Afrika und anderen Teilen der Erde gilt ähnliches.

Zurzeit wird die Energienachfrage zu etwa 90% aus fossilen Energieträgern gedeckt und es spricht viel dafür, dass sich an diesen hohen Anteilen in den nächsten Jahrzehnten wenig ändern wird. In den Industrieländern bestehen nämlich feste Energieversorgungsstrukturen, die sich nur langsam verändern lassen. In den Schwellen- und Entwicklungsländern zwingt die Kapitalknappheit dazu, die billigste Lösung zu implementieren. Das bedeutet, dass zumindest in Ländern wie China und Indien die Energieversorgung von intensiver Nutzung heimischer Kohle, also weg von fossilen Energieträgern, auf alternative Energien längerfristig umgestellt werden wird. Die Auswahl an ausreichend ergiebigen Energiequellen, die Kohle, Erdöl und Erdgas ersetzen konnten, ist jedoch sehr begrenzt. Neben der Kernspaltung, Sonnenenergie und Wasserkraft bleibt als dritte Möglichkeit die Fusion. Die Fusion ist eine wichtige Option, insbesondere, weil sie sich hervorragend in die bestehenden Versorgungsstrukturen eingliedern lässt: Wo heute ein großes Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerk steht, kann später ein Fusionskraftwerk stehen. Die Brennstoffe Lithium und Deuterium werden nur in so kleinen Mengen zur Fusion verbraucht, dass die Brennstoffversorgung kein Problem darstellt.

Mit der Frage, unter welchen Bedingungen Fusion, wenn sie im Jahr 2050 zur Verfügung steht, Eingang in den europäischen Energiemarkt findet, hat sich eine detaillierte Studie des holländischen Energieforschungszentrum (BCN) beschäftigt. Die Antwort lautete, Fusion wird gebraucht, wenn die Emission an Treibhausgasen deutlich reduziert und die Kernspaltung nicht weiter ausgebaut werden soll [vgl. 1, 2, 3].

1.1.2 Ist die Kernfusion überhaupt notwendig?

Ist die Kernfusion überhaupt notwendig, wenn man bedenkt, dass in aktuellen Studien für Europa eine vollständige Deckung des Energiebedarfs in Europa durch erneuerbare Energien bis 2050 für möglich gehalten wird und in den anderen Kontinenten das Potential der erneuerbaren Energien oft noch größer ist?

Die Ergebnisse der LTI-Studie (Long Term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System) setzten voraus, dass die Menschen ihren Lebens-

stil erheblich verändern werden. Schon heute erkennt man, dass sich schon heute besonders bei jungen Leuten das Konsumverhalten erheblich verändert hat. In einer anderen Studie [5], die das Institut für experimentelle Plasmaphysik zusammen mit der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden- Württemberg erstellt hat, hielten gerade die jungen Menschen das Energiesparen nicht für eine akzeptable Option. Wenn also die LTI-Studie fordert, dass es 2050 keinen inneneuropäischen Flugverkehr mehr gibt und die Höchstgeschwindigkeit der Bahn auf 200 *km/h* und bei Pkw auf 100 *km/h* begrenzt sein soll, ist das zwar theoretisch denkbar, aber praktisch nicht sehr wahrscheinlich. Die Studie lässt außer Acht, dass in den Haushalten neue Geräte installiert werden können und zieht sogar den der Computer als Stromverbraucher nicht in Betracht gezogen. Aber gerade die Entwicklung neuer Geräte hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass der Stromverbrauch immer weiter gestiegen ist. Nur mit diesen und ähnlichen, mehr als fraglichen Annahmen gelingt es dann in der LTI-Studie, die Energienachfrage bis zum Jahr 2050 um 63% zu reduzieren.

Die Latte wird also für die erneuerbaren Energien nicht hoch gehängt, zumal die angenommenen Kostensenkungen für Photovoltaik und Solarthermie sehr optimistisch sind, aber auch bei der Beschreibung der Energieversorgung wird von sehr unrealistischen Annahmen ausgegangen [vgl. 3].

1.1.3 Die ökologischen Vorteile der Fusion

Ein großer ökologischer Vorteil der Fusion ist die Tatsache, dass beim Betrieb keine Gase erzeugt werden, die das Klima schädigen oder andere toxische Wirkungen entfalten.

Eine weitere Befürwortung der Fusion liegt in der hohen Dichte, mit der Fusionsenergie im Brennstoff des Deuterium-Tritium-Prozesses gespeichert ist. Deshalb werden in einem Kraftwerksleben nur lediglich einige zehn Tonnen der Brennstoffe Deuterium und Lithium verbraucht. Mit deren Gewinnung sind weder Bergbau noch andere signifikante Umweltschädigungen verbunden. Hinzu kommt, dass die Deuterium- und Lithiummengen für die Fusion extrem lange ausreichen würden, da sie im Wasser bzw. sogar im Meerwasser enthalten sind [vgl. 3].

1.1.4 Wie sicher und sauber ist die Fusion

Sicherheitsüberlegungen sind wegen des radioaktiven Tritiums und der energiereichen Fusionsneutronen, welche die Wände des Plasmagefäßes aktivieren, nötig. Eine wichtige, naturgesetzlich gegebene Eigenschaft eines Fusionskraftwerkes ist, dass die Anlage so konstruiert werden kann, dass sie keine Energiequellen benötigt. Wenn die Fusion außer Kontrolle gerät wird eine Sicherheitshülle von innen zerstören, d.h. ein Fusionskraftwerk kann also nicht „durchgehen“. In der Brennkammer eines Fusionskraftwerkes befindet sich stets nur soviel Brennstoff, wie gerade verbrannt wird. Etwa ein Gramm Deuterium und Tritium verteilt auf ein Volumen von rund 1000 *Kubikmetern*. Wegen dieser extrem niedrigen Dichte (250.000- *fach* dünner als die Lufthülle der Erde) besitzt ein Plasma, trotz der hohen Temperatur von ca. 100.000.000 *K*, eine kaum größere Leistungsdichte als eine normale Glühbirne. Die im Plasma gespeicherte Energie reicht somit nicht aus, um die Sicherheitshülle zu sprengen. Das Gleiche gilt für alle anderen Energiereservoirs. Ein Fusionskraftwerk wäre daher also passiv sicher [vgl. 6].

1.1.5 Kraftwerksabfälle: Vergleich der Radiotoxizität

Die Gesamtmasse der radioaktiven Materialien aus einem Fusionskraftwerk ist durch Kraftwerkstudien und durch die detaillierte Arbeit am ITER- Projekt bekannt. Sie liegt für ein Kraftwerk bei etwa 65.000 Tonnen.

30 bis 40% des radioaktiven Materials können, wenn diese nach Empfehlungen der International Atomic Energy Agency (IAEA) akzeptiert werden, ab einer Abklingzeit von maximal 100 Jahren unbegrenzt freigegeben werden ("Freigabe" ist die offizielle Nomenklatur für diesen Vorgang in Deutschland).

Für weitere etwa 60% des Materials kommt ein ganzes Spektrum von Maßnahmen in Frage. Je nach betrieblichem Aufwand, der von Fähigkeiten "von Hand" bis hin zu komplexer „Fernhantierung“ reicht, ist vollständiges Recycling und Verwendung in neuen Kraftwerken, als auch ein teilweises Recycling bis hin zur Endlagerung der Materialien möglich [3, 6].

Radiotoxicity index for power plant waste

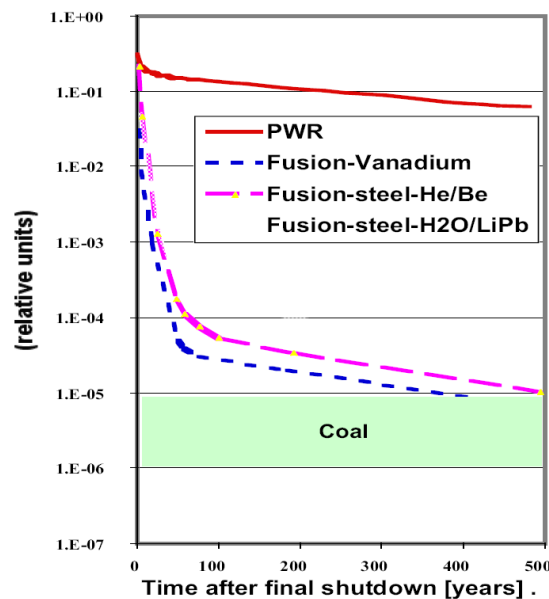


Abbildung 2: radiotoxischer Zerfall von verschiedenen Kraftwerkstypen

Die restlichen ein bis einige Prozent des Material sind „langlebig“. Dieser Anteil ist deshalb so gering, weil fusionsspezifische Materialien entwickelt wurden, die keine Legierungselemente wie Nickel, Molybdän, Kobalt oder Niob enthalten und daher auch keine langlebigen Aktivierungsprodukte entstehen könnten. Diese Elemente sind nur in geringen Spuren enthalten. Insgesamt werden all diejenigen Verunreinigungen, die zu nennenswerter langlebiger Radiotoxizität führen würden, auf sehr niedrige Konzentrationen begrenzt. Praktisch das gesamte Periodensystem der chemischen Elemente wurde in diesem Zusammenhang durch Studien im EU-Fusionsprogramm systematisch bewertet, insbesondere durch das Culham Laboratory.

Der radioaktive Brennstoffbestandteil Tritium muss sicher eingeschlossen bleiben. Die radioaktiven Freisetzung des Kraftwerks für die höchstexponierte Person entsprechen im Normalbetrieb etwa einem Prozent der natürlich vorhandenen radioaktiven Belastung der Umwelt. Auch nach einem schweren Unfall werden die Grenzwerte für die Einleitung von Evakuierungsmaßnahmen deutlich unterschritten. Durch die Neutronenbestrahlung der Winde entsteht radioaktives Material, dessen typische Abklingzeiten im Bereich von zehn bis hundert Jahren liegen. Nach 100 Jahren Abklingzeit ist der toxische Inhalt der Fusionsabfälle bereits vergleichbar mit dem Gefährdungspotenzial der gesamten Kohleasche aus einem Kohlekraftwerk, die auch stets natürliche radioaktive Stoffe (vgl. C16 = Methode zur Alterungsbestimmung) enthält

(vgl. Abbildung 2). Würden spezielle Materialien mit niedrigem Aktivierungspotenzial entwickelt werden, so könnte ein wesentlicher Teil der Materialien für neue Kraftwerke wieder verwendet werden. Es ist deshalb ein erstrebenswertes Ziel, nur die Generation mit Abfall zu belasten, welche die Energie aus dem Kraftwerk nutzt [vgl. 6].

1.1.6 Stand der Fusionsforschung

In den letzten 50 Jahren hat die Fusionsforschung in Theorie und Experiment erhebliche Fortschritte erzielt. Sie werden am deutlichsten in dem so genannten Fusionsprodukt aus den drei Plasmawerten Dichte, Temperatur und Energieeinschlusszeit. Die Forschung hat die für die Zündung nötigen Zielwerte für Temperatur, Dichte und Wärmeisolation in jeweils getrennten Experimenten erreicht.

Von den ersten Anlagen bis zu den heute größten Tokamakexperimenten konnte das Fusionsprodukt, das im Kraftwerk größer als 3×10^{22} Mio. Grad Celsius mal Sekunde pro Kubikmeter sein muss, mittlerweile um den Faktor 5.000.000 (vgl. Abbildung 6) gesteigert werden. Im Jahr 1970, als die Überlegungen zum Bau von JET (Joint European Torus) begannen, waren die weltbesten Experimente nach um einen Faktor 25.000 von der Zündbedingung entfernt.

Einem selbstständig brennenden Plasma am nächsten ist die Europäische Gemeinschaftsanlage JET in Culham/ England, das weltweit größte Fusionsexperiment. Es ist nur noch einen Faktor 5 von dem Kraftwerks-Zielwert für ein selbstständig brennendes Plasma entfernt.

Die längste Entladungsphase mit signifikanter D-T-Fusionsenergieerzeugung wurde ebenfalls an JET erreicht, wo über fünf Sekunden eine Fusionsleistung von ca. 5 MW (mit einer Gesamtenergieproduktion von 22 MJ) aufrechterhalten wurde. Die dabei von außen zugeführte Heizleistung betrug 24 MW, die während dieser Zeit zugeführte Heizenergie 120 MJ. Die vorher zur Aufheizen auf die Brenntemperatur nötige Energie war klein gegenüber der während dieser Phase zugeführten Energie. Die höchste Fusionsleistung von 16,1 MW wurde ebenfalls an JET erzielt (1997), dazu wurden dem Plasma von außen 25,7 MW zugeführt, d.h. 65% der aufgewendeten Leistung wurden per Fusion zurück gewonnen [3].

Mit ITER, welches in Cadarache/ Südfrankreich gebaut wird, will die internationale Fusionsforschung den Nachweis erbringen, dass ein Energie lieferndes Fusionsfeuer möglich ist. Anschließend soll eine Demonstrationsanlage (DEMO) folgen, die alle Funktionen eines Kraftwerkes erfüllt. Verläuft die Forschung nach diesem Plan, dann könnte nach je 20 Jahren Planung-, Bau- und Betriebszeit für ITER und seinen Nachfolger ein Fusionskraftwerk etwa Mitte des 21. Jahrhunderts wirtschaftlich nutzbare Energie liefern [vgl. 3, 6, 8].

1.1.7 Europäische Fusionsanlagen

Gegenwärtig ist JET die einzige Fusionsanlage, die mit Deuterium-Tritium-Plasmen, wie sie für ein späteres Fusionskraftwerk vorgesehen sind, experimentieren kann. Um das Experimentieren nicht unnötig zu verkomplizieren, arbeiten heute die meisten Anlagen mit Modellplasmen aus normalem Wasserstoff und Deuterium und verzichten noch auf das radioaktive Tritium.

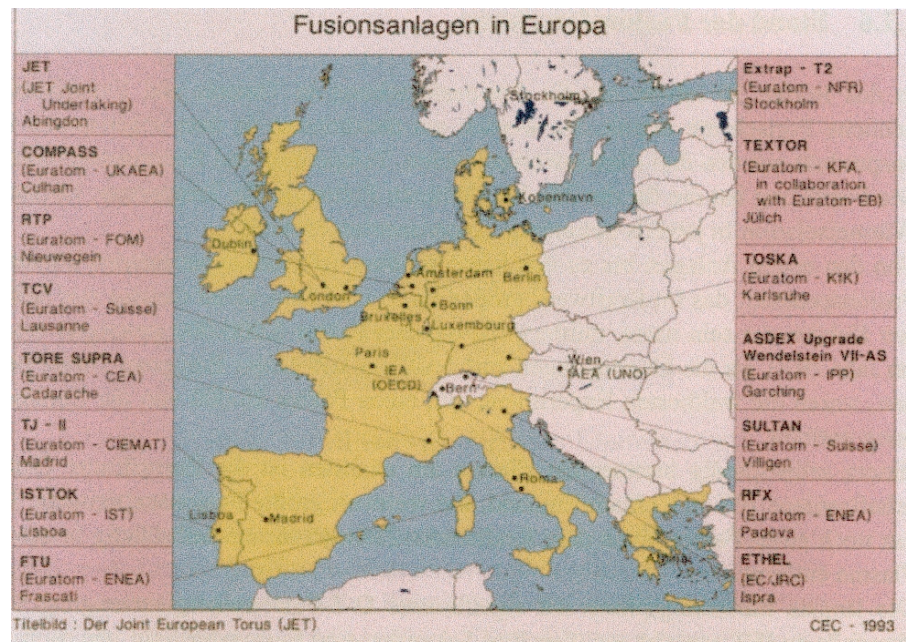


Abbildung 3: Fusionsanlagen in Europa im Überblick

Die europäischen Fusionslaboratorien (vgl. Abbildung 3) haben ihre einzelnen Anstrengungen zu einem gemeinsamen Programm zusammengeschlossen. Während die Großanlage JET das Plasmaverhalten in der Nähe der Zündung untersucht, bearbeiten die kleineren Anlagen in den nationalen Laboratorien spezielle Fragen. So wurde mit dem Experiment ASDEX Upgrade im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching eine besondere Magnetfeldanordnung „der Divertor“ getestet. Er sorgt sowohl für saubere Plasmen, als auch für die Leistungsabfuhr aus dem Plasma. Dieses Konzept wurde inzwischen weltweit übernommen.

Mit der gegenwärtig in Garching betriebenen Anlage ASDEX Upgrade werden diese Untersuchungen fortgeführt. Dabei sind Magnetspulen und Divertor sowie wesentliche Plasmaeigenschaften den Verhältnissen in einem späteren Kraftwerk angepasst. Damit erarbeitet das Experiment wesentliche Kenntnisse für den Testreaktor ITER, der erstmals ein brennendes Plasma erzeugen soll. Supraleitende Magnetspulen werden an der französischen Anlage Tore Supra getestet; mit Plasmen hoher Dichte wird im italienischen Frascati experimentiert [vgl. 6, 8].

1.1.8 Fusionsforschung am Institut für Plasmaphysik

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching wurde 1960 als ein Institut der Max-Planck-Gesellschaft gegründet und ist zugleich ein Mitglied der Hermann von Helmholtz Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. Mit rund 1.000 Mitarbeitern ist es eines der größten Zentren für Fusionsforschung in Europa.

Seit 1961 ist das IPP dem von Euratom koordinierten europäischen Fusionsprogramm assoziiert, zu dem sich die Fusionslaboratorien der Europäischen Union und der Schweiz zusammengeschlossen haben. Damit ist das IPP ebenfalls an dem europäischen Gemeinschaftsprojekt JET beteiligt, das seit Januar 2000 im Rahmen des European Fusion Development Agreement (EFDA) betrieben wird. Zahlreiche andere Kooperationen verbinden das IPP mit der weltweiten Fusionsforschung. Finanzierungsträger des IPP sind die Europäische Union, der Bund und die Bundesländer Bayern, Berlin und Mecklenburg-Vorpommern.

Im IPP in Garching und im Teilinstitut Greifswald erarbeiten elf wissenschaftliche Bereiche die physikalischen Grundlagen für ein Fusionskraftwerk. Forschungsthemen

sind Einschluss von Wasserstoffplasmen hoher Temperatur in Magnetfeldern, Heizung und Nachfüllung unter anderem mit Pellet- Injektoren von Plasmen, Diagnostizieren der Plasmaeigenschaften, die Magnetfeldtechnik, Datenerfassung und -verarbeitung, Systemstudien zur Fusion sowie Plasmatheorie, Materialforschung und Plasma- Wand- Wechselwirkung.

Hierzu betreibt das IPP in Garching zwei Großexperimente: den Tokamak ASDEX Upgrade und den inzwischen Ende 2004 stillgelegten Stellerator WENDELSTEIN 7-AS. Der Nachfolger WENDELSTEIN 7-X, der die Kraftwerkstauglichkeit des im IPP entwickelten Stelleratorkonzepts zeigen soll, entsteht gegenwärtig im IPP- Teilinstitut Greifswald in Mecklenburg- Vorpommern, das 1994 gegründet wurde.

In dem 1992 gegründeten Bereich Plasmadiagnostik in Berlin wird vor allem das Verhalten von Verunreinigungen im Plasma untersucht. Verschiedenste Messgeräte untersuchen dazu das Plasma in den Garchinger Fusionsexperimenten. Daneben betreibt die Außenstelle in Berlin den Plasmagenerator PSI, sowie die Ionenfalle EBIT.

Seit 1983 ist das IPP Gastgeber der europäischen EFDA- Studiengruppe (früher NET Studiengruppe) und beherbergt außerdem seit 1988 die Planungsgruppe für den Internationalen Experimentalreaktor ITER, die ab Januar 2007 nach Carderache umziehen werden [vgl. 3, 6].

1.2 Grundlagen der Kernfusion

1.2.1 Was ist ein Plasma?

Atomkerne sind positiv geladen und stoßen sich daher gegenseitig ab, sie können aber nur dann miteinander verschmelzen bzw. fusionieren, wenn sie sich sehr nahe kommen. Dann erst können die sich anziehenden Kernkräfte, die nur in der unmittelbaren Umgebung der Kerne wirken, die abstoßenden elektrostatischen Kräfte überwinden. Um diese zu überwinden, müssen zwei Kerne mit hohen Geschwindigkeiten aufeinander zufliegen. Die erforderlichen Geschwindigkeiten erhalten die Teilchen bei sehr hohen Temperaturen. Mit steigender Temperatur gehen alle Stoffe nacheinander vom festen in den flüssigen und anschließend in den gasförmigen Zustand über. Bei einer weiteren Erhöhung der Temperatur entsteht ein Plasma. Die Atome eines Gases sind dann in ihre Bestandteile, Elektronen und Kerne zerlegt. Dies wird in Abbildung 4 verdeutlicht.

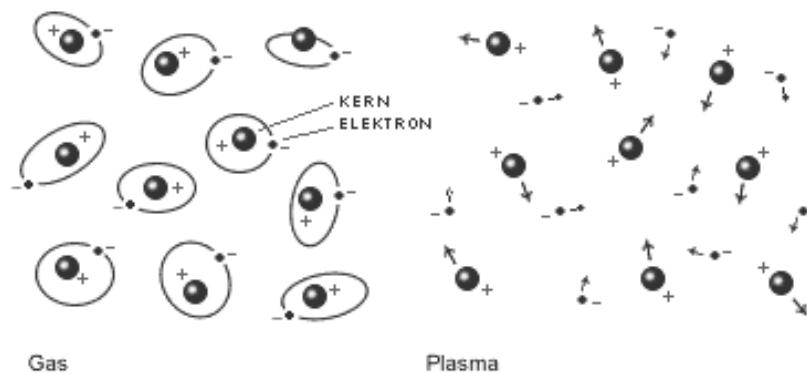


Abbildung 4: Trennung der Gasatome in ihre Bestandteile, Elektronen und Kerne

Ein Atom, dem ein oder mehrere Elektronen zu seiner Neutralität fehlen, nennt man Ion, und ein Gas, dessen Atome in seine Bestandteile aufgetrennt sind, nennt man ionisiert. Es handelt sich also um ein ionisiertes Gas, ein solches Gas weicht in seinen Eigenschaften stark von normalen Gasen ab und wird deshalb mit einem eigenen Namen als Plasma bezeichnet. Man spricht auch vom 4. Aggregatzustand der Materie.

Alltagsbeispiele sind die leuchtende Plasmasäule in einer Neonröhre, ein elektrischer Funke oder der Plasmafaden eines Blitzes. Ein Plasma ist elektrisch leitend, seine

Bewegung lässt sich daher durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen. Dies macht man sich in den Fusionsanlagen zunutze, wo man das heiße Plasma in einen Magnetfeldkäfig einschließt und so von den materiellen Wänden fernhält, die ansonsten das Plasma abkühlen könnten [vgl. 6].

1.2.2 Was ist Kernfusion?

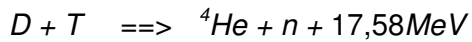
Ziel der Fusionsforschung ist es, aus der Verschmelzung von Atomkernen Energie zu gewinnen. Kernverschmelzungen sind wichtige Naturprozesse: Praktisch alle chemische Elemente sind aus der Fusion aus Wasserstoff entstanden. Fusionsreaktionen sind die Energiequellen von Sonnen und Sternen. Quelle der Fusionsenergie ist die innere Bindungsenergie der Atomkerne; die Kernbausteine sind von einer Atomsorte zur anderen verschieden stark miteinander gebunden. Je fester sie verbunden sind, desto mehr Energie muss aufgewendet werden, den Kern zu spalten, umgekehrt wird umso mehr Energie frei, wenn der Kern aus seinen Bausteinen gebildet wird. Die stabilsten Kerne besitzen die chemischen Elemente Eisen, Kobalt, Nickel oder Kupfer (Maßzahlen für ihre Masse: etwa 60). Mittels Kernumwandlungen kann man deshalb Energie durch Spaltung schwerer Kerne wie Uran oder durch Verschmelzung leichter Kerne wie Wasserstoff und seiner Isotope Deuterium und Tritium mit den Massenzahlen 1,2 und 3 gewinnen [vgl. 6].

1.2.3 Fusion von Deuterium um Tritium

Von allen möglichen Paaren leichter Atomkerne, die verschmelzen konnten, liefert die Reaktion zwischen den beiden schweren Varianten des Wasserstoffs - Deuterium und Tritium - die größte Energieausbeute bei der niedrigsten Plasmatemperatur.

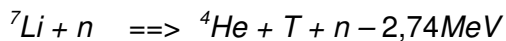
Die Fusionsbrennstoffe sind billig und auf der Erde gleichmäßig verteilt. Das Deuterium ist in nahezu unerschöpfbaren Mengen im Meerwasser zu finden. Tritium, ein radioaktives Gas mit kurzer Halbwertszeit von rund zwölf Jahren, kommt in der Natur kaum vor, es kann aber innerhalb des Kraftwerks aus Lithium gebildet werden, das ebenfalls reichlich vorhanden ist.

Fusionsreaktion:



[18]

Brutreaktion in Lithium:



[18]

Je ein Deuterium- und ein Tritiumkern verschmelzen bei der Fusionsreaktion zu einem Heliumkern, zusätzlich wird ein Neutron frei, sowie große Mengen nutzbarer Energie (Abbildung 5).

Ein Gramm Brennstoff konnte in einem Kraftwerk 90.000 *kWh* Energie erzeugen, die der Verbrennungswärme von 11 *Tonnen* Kohle entspräche. Da diese Reaktion, von allen möglichen, für einen Reaktor die bei weitem am leichtesten zu verwirklichende ist, wird man sich trotz ihrer Nachteile, des radioaktiven Tritiums und der entstehenden schnellen Neutronen, zunächst dieses Verfahrens bedienen.

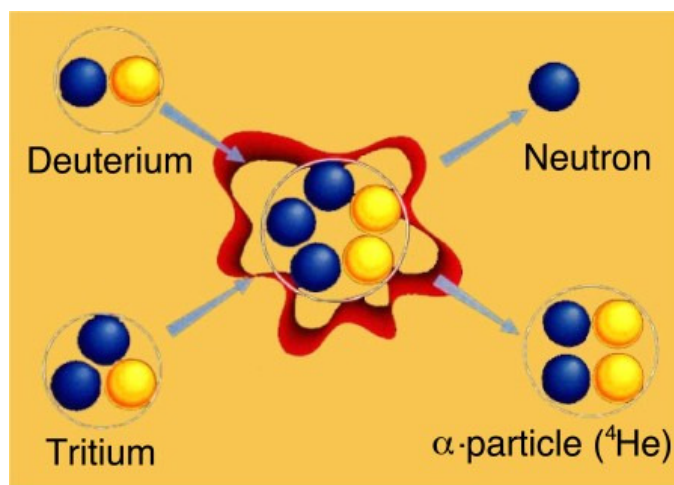


Abbildung 5: Fusion zwischen Deuterium und Tritium

Weil ein Fusionskraftwerk außerdem günstige Umwelt- und Sicherheitseigenschaften erwarten lässt, könnte die Fusion nachhaltig zur Energieversorgung der Zukunft beitragen. Mit etwa 1.000 MW wird ein Fusionskraftwerk in etwa die gleiche elektrische Leistung besitzen, wie heutige Großkraftwerke und sich insbesondere für die Grundlast-Stromversorgung eignen [vgl. 3, 6, 7, 8].

1.2.4 Zündbedingung

Wenn ein Plasma zündet laufen gerade so viele Fusionsprozesse ab, dass die Energie der dabei erzeugten Heliumkerne ausreicht, die Temperatur des Plasmas aufrechtzuerhalten. Das Plasma brennt ohne äußere Energiezufuhr weiter, die Heizung von außen kann abgeschaltet werden.

Für die Zündung sind vor allem drei Eigenschaften des Plasmas von Bedeutung: die Temperatur, die Plasmadichte und die Energieeinschlusszeit, die ein Maß für die Güte der Wärmeisolation des Plasmas ist. In einem Fusionsreaktor muss das Produkt aus diesen Werten, das so genannte Tripelprodukt, eine Mindestgröße besitzen. Die günstigsten Bedingungen für die Einschlusszeit und Dichte erhält man bei einer Temperatur von etwa 100 Millionen Grad. Dann fordert die Zündbedingung typische Einschlusszeiten von ein bis zwei Sekunden und Dichten von etwa 10^{14} Ionen pro Kubikzentimeter [vgl. 6, 7, 8].

Zündbedingung für ein Deuterium-Tritium Plasma:

Plasmaentladung 100-200 Millionen Grad

Plasmadichte ca. 10^{14} Teilchen pro Kubikzentimeter

Energieeinschlusszeit 1 – 2 Sekunden

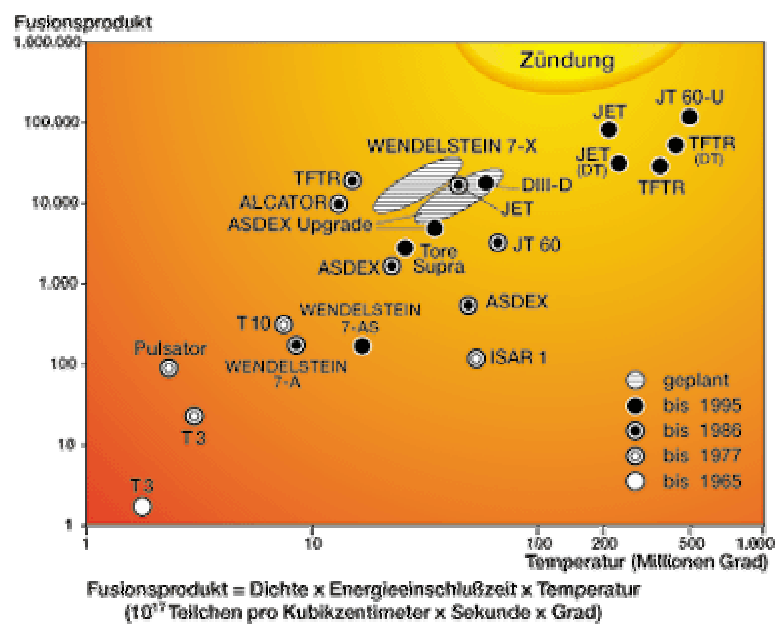


Abbildung 6: Zündung eines Deuterium-Tritium Plasmas bei Überschreitung eines bestimmten Grenzwertes vom Fusionsprodukt.

Wie die Abbildung 6 zeigt, sind im Verlauf der Fusionsforschung die Experimente dem angestrebten Ziel - der Kurve rechts oben bereits sehr nahe gekommen (JET: Culham GB; TFTR: Princeton USA; ASDEX Upgrade: Garching D; ALCATOR: Boston USA; TFTR: Frascati Italien; ISAR 1: Garching D; T3, T10: Moskau, RUS)

1.2.5 Heizmethoden des Plasmas

Um das Plasma auf die notwendige hohe Temperatur aufzuheizen, werden verschiedene Heizmethoden verwendet, oft auch in Kombination miteinander (vgl. Abbildung 7).

Ohmsche bzw. induktive Heizung:

Ein Nebenprodukt des induzierten Stromes im Plasma im TOKAMAK ist seine Heizwirkung. Da das Plasma auch einen gewissen Widerstand besitzt, heizt der induzierte Strom das Plasma in Bereichen unter 10 Mil. Grad K zusätzlich auf. Sobald das Plasma jedoch höhere Temperaturen erreicht, reduziert sich seine Heizwirkung aufgrund des abnehmenden Widerstandes des Plasmas rapide.

Hochfrequenzheizung:

Bei der Hochfrequenzheizung werden Radio- bzw. Mikrowellen mit Frequenzen um 30 MHz oder 140 GHz eingesetzt. Die durch Wellenleiter transportierten Radiowellen strahlen über Sendeantennen, die am Plasmarand montiert sind, bei bevorzugten Frequenzen große Energiemengen ins Plasma ein. Mikrowellen von 140 GHz, die sich quasioptisch, also nahezu wie normales Licht verhalten, können ohne Antenne und Wellenleiter allein über Spiegel in das Plasma eingekoppelt werden.

Neutralteilchenheizung:

Neutralatome können durch das einschließende Magnetfeld hindurch in das Plasma eindringen und werden im Plasma durch Stöße mit Elektronen und Ionen ionisiert. Die schnellen Ionen, die auf diese Weise erzeugt werden, sind nun in dem Magnetfeld ebenfalls eingeschlossen; wenn ihre kinetische Energie groß gegen die Plasmaenergie ist, geben sie an die Plasmaionen und -elektronen durch Stöße Energie ab und heizen dadurch das Plasma auf. Um die Neutralatome mit genügend hohen Energien zu erzeugen, werden Ionen durch Beschleuniger auf sehr hohe Energien gebracht und dann auf ein Target (meist H_2^- , D_2^- Gas) geschossen, wo ein Teil neutralisiert wird [vgl. 8].

Heizung des Plasmas: Vorteil des Tokamak - Prinzips

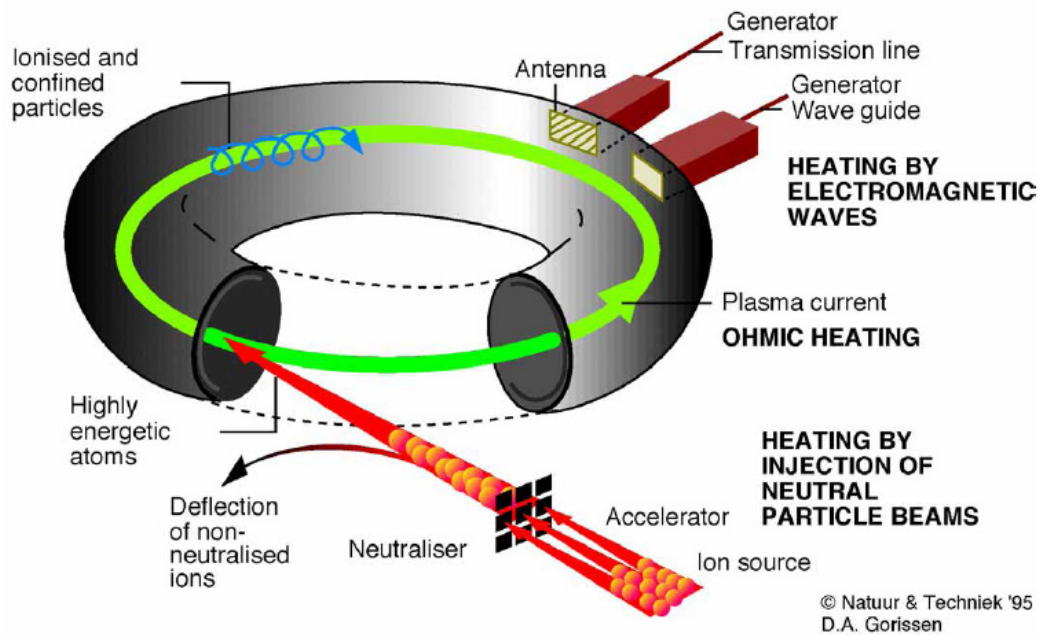


Abbildung 7: Principle methods of heating Plasma (Natur & Technik '95 D.A. Gorissen)

1.2.6 Der magnetische Einschluss

Geladene Teilchen, Ionen und Elektronen, werden in einem Magnetfeld bei Bewegungen, die eine Komponente senkrecht zur Magnetfeldrichtung besitzen, auf Kreis- und Schraubenbahnen um die Feldlinien gezwungen. Die Teilchen sind auf diese Weise an die Feldlinien gebunden. In Längsrichtung der Magnetfeldlinien können sie sich daher unbeeinflusst bewegen. In einem geeignet geformten Magnetfeldkäfig kann ein Plasma daher eingeschlossen (vgl. Abbildung 8) und von materiellen Wänden ferngehalten werden. Um zu vermeiden, dass die Teilchen an den Polen des Magnetfeldes entweichen, benutzt man Magnetfelder, die ringförmig (toroidal) in sich geschlossen sind [vgl. 6, 8].

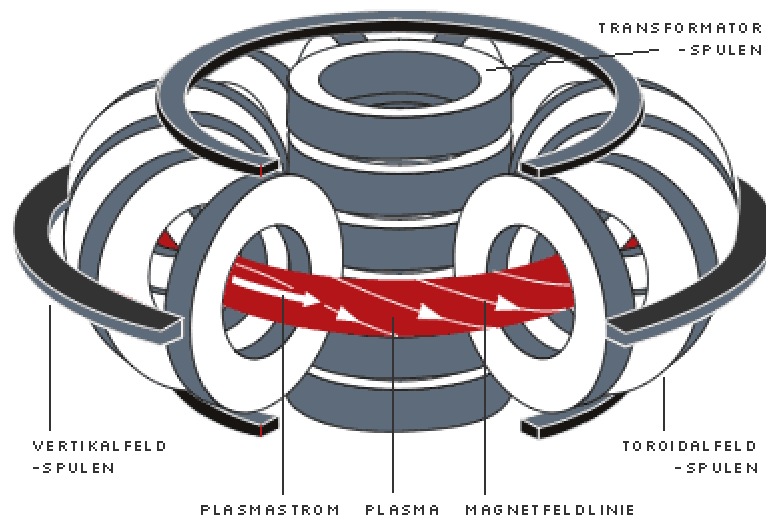


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Fusionskraftwerkes. Herstellung eines in sich geschlossenen Magnetfeld durch einen Kranz von ringförmig angeordneten Spulen (Abbildung IPP)

1.2.7 Stöße und Verunreinigungen

Stöße der Ionen im Plasma untereinander sind eine wichtige Voraussetzung für die Fusion. Nur bei einem Zusammenstoß zweier Ionen kann eine Verschmelzung stattfinden. Die meisten Stöße führen allerdings nicht zur Fusion, sondern nur zu einer Änderung von Richtung und Geschwindigkeit der aufeinander prallenden Ionen. Jeder Stoß versetzt die Ionen auf eine neue Feldlinie in der Nachbarschaft der früheren. So können Plasmateilchen nach zahlreichen Stößen, auch wenn sie zunächst im Inneren des Plasmas eingeschlossen waren, nach außen und schließlich an die Wand des Plasmagefäßes gelangen.

Stöße sind auch die Ursache dafür, dass Teilchen, die sich ursprünglich am Rand des Plasmas befanden, bis ins Innere vordringen. Auf diese Weise können auch Wandatome, die durch Plasmaionen aus der Wand des Plasmagefäßes herausgeschlagen wurden, in das Plasma eindringen. Die schweren Atome der Elemente Eisen, Nickel, Chrom, Sauerstoff oder Ähnliches sind jedoch auch bei den hohen Fusionstemperaturen nicht vollständig ionisiert. Je höher die Kernladungszahlen diese Verunreinigungen sind, desto mehr Elektronen sind noch an die Atomrümpfe gebunden, umso stärker entziehen sie dem Plasma Energie und strahlen sie als Ultraviolett- oder Röntgenstrahlung wieder ab. Auf diese Weise kühlen sie das Plasma ab, verdünnen es und verringern so die Fusionsausbeute. Oberhalb einer bestimmten Verunreinigungskonzentration kann ein Plasma überhaupt nicht mehr zünden. Die zuläs-

sige Konzentration ist für leichte Verunreinigungen wie Kohlenstoff und Sauerstoff mit einigen Prozent relativ hoch, sie sinkt jedoch mit zunehmender Ordnungszahl der Elemente und beträgt für metallische Verunreinigungen wie Eisen, Nickel oder Molybdän gerade noch wenige Promille. Die Kontrolle der Wechselwirkungen zwischen dem heißen Plasma und der Wand zur Erzeugung sauberer Plasmen ist daher eine der großen Aufgaben der Fusionsforschung und wird am IPP vor allem an dem Experiment ASDEX Upgrade untersucht.

Es werden bereits Schichten aus Bor und Silizium eingesetzt, die den gleichen Zweck erfüllen sollen und überdies sehr viel länger ihre Wirkung behalten. Diese Schichten haben aber den Nachteil, dass die Beschichtung der Gefäßwände ein sehr aufwendiger Prozess ist, der mehrere Stunden in Anspruch nimmt. Deshalb können diese Beschichtungen nicht in den kurzen Pausen zwischen den Plasmaschüssen aufgebracht werden. Beim Dauerbetrieb eines Reaktors müsste man deshalb jedes Mal den Reaktor herunterfahren, wenn eine neue Beschichtung aufgebracht werden muss [vgl. 6, 7, 8, 9].

1.3 Das Fusionsexperiment ASDEX Upgrade

1.3.1 Daten des ASDEX

Der mittelgroße Tokamak ASDEX Upgrade ist gegenwärtig die größte deutsche Fusionsanlage, es ging 1990 in Betrieb und untersucht Kernfragen der Fusionsforschung unter kraftwerkähnlichen Bedingungen. Dabei sind vor allem wesentliche Plasmaeigenschaften, wie die Plasmadichte, der Plasmadruck und die Belastung der Wände den Verhältnissen in einem späteren Fusionskraftwerk angepasst.

Eines der Hauptprobleme ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen dem heißen Brennstoff und den umgebenen Wänden. Dabei wird einerseits die Wand der Plasmakammer beschädigt und andererseits das Plasma verunreinigt. Um den entgegenzuwirken, untersucht ASDEX Upgrade eine spezielle Magnetfeldanordnung, einen Divertor. Der Divertor lenkt die äußere Randschicht des Plasmas auf Prallplatten ab, die Plasmenteilchen treffen dort abgekühlt und vom heißen Zentrum entfernt auf und werden abgepumpt. Auf diese Weise werden auch störende Verunreinigungen aus dem Plasma entfernt, zugleich wird die Wand des Plasmagefäßes geschont und eine gute Wärmeisolation des Brennstoffs erreicht [vgl. 6].



Abbildung 9: Das Innere des ASDEX Upgrade während der Umbauphase in noch nicht vollständig montiertem Zustand (Abbildung IPP)

Technische Daten

Tabelle 1: Technische Daten ASDEX Upgrade

Gesamthöhe des Experiments	7 Meter
Großer Plasmaradius:	1,625 Meter
Kleiner Plasmaradius:	0,5 Meter
Masse des Plasmas:	3 Milligramm
Magnetfeld:	3,9 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	2 Megaampere
Heizleistung und Stromtrieb:	bis 26 Megawatt
Plasmatemperatur	50 Millionen °C
Brenndauer:	10 Sekunden

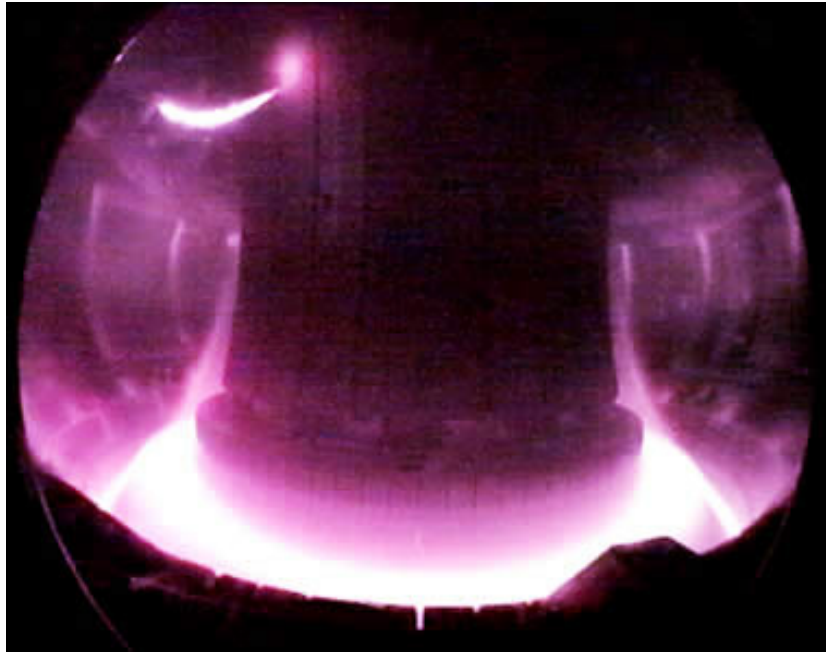


Abbildung 10: Das Innere des ASDEX Upgrade während einer Plasmaentladung und Einschuss eines Deuteriumpellets (Quelle: BROCKHAUS Mensch, Natur, Technik „Technologien für das 21. Jahrhundert“ Leipzig; Mannheim 2000)

In Abbildung 10 wird gerade ein Deuteriumpellet von der Hochfeldseite des Magnetfeldes aus in das Plasma eingeschossen (Leuchtspur). Die rote Leuchterscheinung (H- α -Linie des Wasserstoffs) ist die Strahlung von thermischem angeregtem, neutralem Wasserstoff.

1.3.2 ITER- Projekt

Der Reaktor soll die wissenschaftliche und technische Machbarkeit der Energieerzeugung aus Kernfusion demonstrieren. Als erster Testreaktor soll er netto mehr Energie liefern, als er zum Betrieb benötigt. Es wird mit einer Zehnfachen Energieverstärkung gerechnet. Das bedeutet, dass zehnmals mehr Energie freigesetzt werden soll, als zur Plasmaheizung notwendig ist. Einen wesentlichen Beitrag zur positiven Energiebilanz liefert die Baugröße, der konsequente Einsatz von Supraleitern und die Verwendung des radioaktiven Tritiums. Der Energieausstoß soll sich dabei in den Dimensionen eines herkömmlichen Kraftwerks bewegen. Mit dem Projekt sollen wesentliche Schlüsselemente getestet werden, die für eine praktische wirtschaftliche Anwendung der Kernfusion notwendig sind. Er soll außerdem Erfahrungen im Betrieb liefern, die für einen geplanten nachfolgenden Demonstrationsreaktor (DEMO) notwendig sind. Der Deuterium-Tritium-Fusionsreaktor wird im Forschungszentrum Cadarache im Süden Frankreichs zu wissenschaftlichen Zwecken erbaut.

Technische Daten

ITER funktioniert nach dem Tokamak-Prinzip: in einem toroidalen Magnetfeld wird aus Wasserstoff ein Plasmastrom erzeugt. Dieser soll auf die entsprechende Temperatur und Dichte gebracht werden, um eine Kernfusion zu ermöglichen. Nach den bisherigen Planungen (Stand 2001) sind die technischen Eckpunkte [10]:

Tabelle 2: Technische Daten ITER

Gesamtradius:	10,7 Meter
Höhe (über alles):	30 Meter
Plasmaradius:	6,2 Meter
Plasmavolumen:	837 Kubikmeter
Masse des Plasmas:	0,5 Gramm
Magnetfeld:	5,3 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	15 Megaampere
Heizleistung und Stromtrieb:	73 Megawatt
Fusionsleistung:	500 Megawatt
Energieverstärkung:	10x
Mittlere Temperatur:	100 Millionen °C
Brenndauer:	> 400 Sekunden

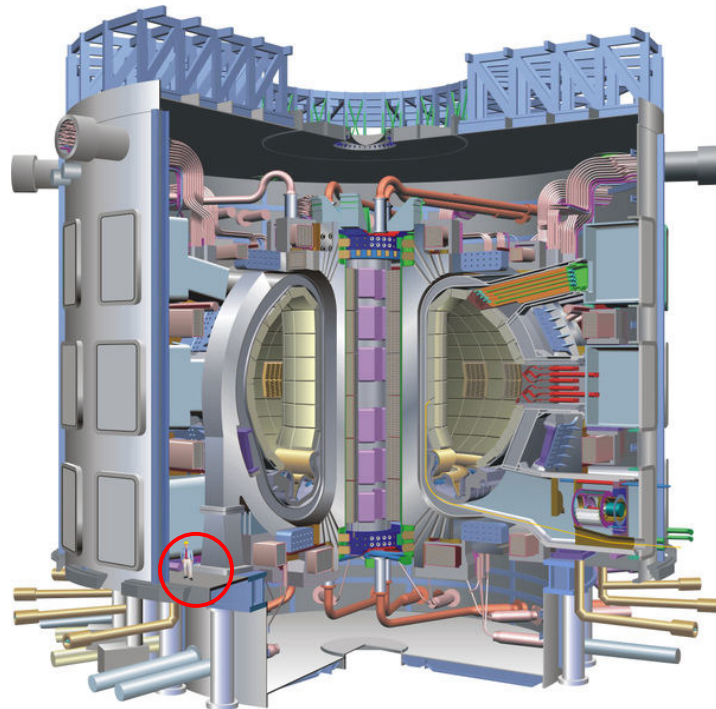


Abbildung 11: Schematische Darstellung von ITER; links unten ist eine Person zum Größenvergleich abgebildet (Abbildung ITER)

1.3.3 Was sind ELMs (Edge Localized Modes)?

Vorgesehen als Operationsszenario im Fusionsreaktor ITER ist der Typ I ELMy- H-Modus¹, ein stabiles und robustes Regime für Hochleistungsplasmen. Als Hauptproblem bei diesem Modus entpuppt sich die Leistungsabfuhr, da ein großer Teil der aus dem Plasma abfließenden Teilchen und Energie nicht kontinuierlich, sondern in kurzen transienten Bursts ausgeworfen wird. Diese als ELMs (Edge Localized Mode) bezeichneten Bursts werden durch Instabilitäten am Plasmarand hervorgerufen. Skalierungen prognostizieren für ELMs in ITER Spitzenwerte der Leistungsdichte bis zu einem Faktor 8 über Grenzwert. (siehe die Auswirkungen der ELMs in Abbildung 11). Abhilfe verspricht die Kontrolle der ELM- Aktivität, wobei durch eine Frequenzerhöhung die Spitzenleistungen abgemildert werden. Bei unseren Untersuchungen an ASDEX Upgrade wurden diverse Methoden zur kontrollierten Auslösen der ELMs untersucht. Am effizientesten erwies sich dabei der Einschuss von kryogenen Pellets aus festem Deuteriumbrennstoff (Abmessungen von ca. 1 mm). Die von den im Plasmarand verdampfenden Teilchen hervorgerufenen Strömungen erzwingen dabei das

Auslösen eines ELMs. Bei entsprechend hohen Repetitionsraten wird die Intensität dabei reduziert. Neben der Verbesserung der Operationseigenschaften eröffnet diese Methode zusätzlich die Möglichkeit, Eigenschaften und Dynamik der ELMs zu untersuchen [vgl. 11].

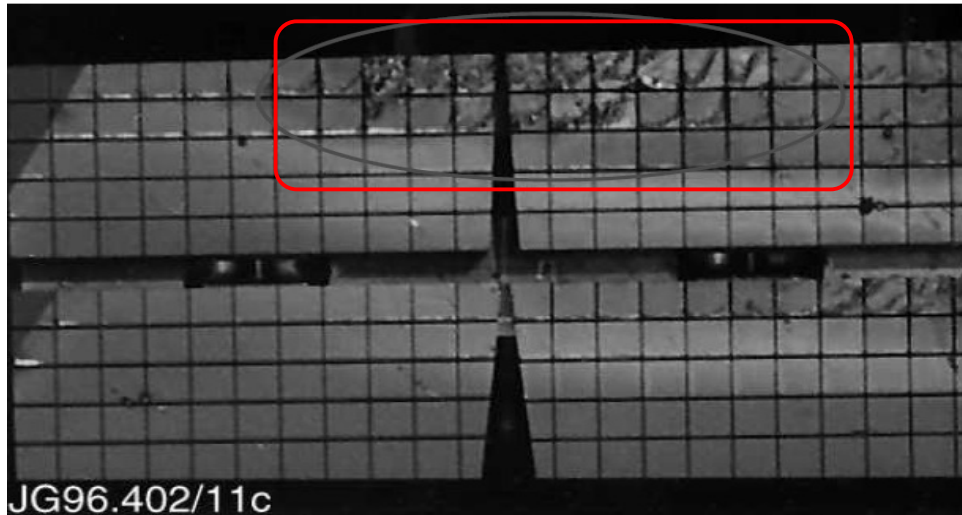


Abbildung 12: „ELM melt damage on be target“ Auswirkungen der ELMs, aufgeschmolzener Diverto von Jet

1.3.4 Der Leidenfrost Effekt

Dieses Phänomen wurde erstmals von Leidenfrost in Duisburg erforscht und in der Schrift *De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus* 1756 beschrieben. Die Schrift selbst fußte dabei auf der antiken Empedokles (oder Aristoteles) zugeschriebener Vier-Elemente-Lehre (Feuer, Wasser, Luft und Erde) und intendierte, die Herstellung von Erde aus Feuer und Wasser zu belegen. Vermutlich gelang Leidenfrost dieses Experiment, da er die Salze des harten Duisburger Wassers ausdampfte. Noch heute wird, wenn auch wissenschaftlich erklärt, mit dem Leidenfrost-Effekt ein physikalischer Effekt beschrieben, der die verzögerte Stoffumsetzung, also die zeitlich gedehnte Änderung der Aggregatzustände, meint. Dieser Effekt kann leicht bei

¹ H-Mode: Plasmazustand mit verbessertem Energieeinschluss bei starker Heizung. In diesem Zustand, der **H**igh- confinement Mode oder kurz H-Mode, erhält man - verglichen mit der L-Mode - einen deutlichen verbesserten Energieeinschluss.

einer heißen Herdplatte beobachtet werden, auf die man einen Tropfen Wasser fallen lässt. Ist die Temperatur der Oberfläche hoch genug, um eine rasche primäre Verdampfung zu erreichen, so tanzt der Wassertropfen auf einem Dampfpolster, der ihn vor der direkten Wärmeübertragung isoliert [vgl. Abbildung 13].

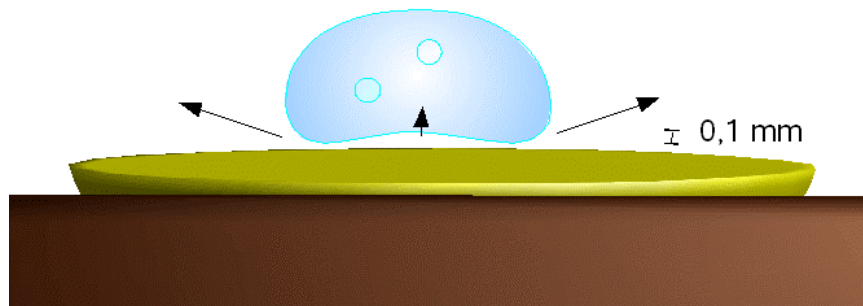


Abbildung 13: Leidenfrost Phänomen, kochender Wassertropfen auf heißer Herdplatte schwebt durch einen Dampf Film berührungslos darüber (Quelle: www.Wikipedia.de Stand: März 2006)

Der Dampf ist unter dem Wassertropfen gefangen und entweicht nur langsam. Gleichzeitig entsteht neuer Wasserdampf und der Tropfen gleitet über dem heißen. Diese gasförmige Schutzschicht entsteht auch bei flüssigem Stickstoff wenn dieser auf Gegenständen mit Zimmertemperatur trifft. Durch die Leidenfrost-Effekte ist es möglich, sich flüssigen Stickstoff (ca. -200°C) gefahrlos über die Hand laufen zu lassen oder die Hand für einen Augenblick einzutauchen. Es muss sichergestellt sein, dass der Stickstoff überall ablaufen kann und sich nicht in Mulden sammelt [vgl. 12].

1.3.5 D₂-Pelletinjektor auf der Basis des Leidenfrost-Effektes

Die Injektion kryogener Deuteriumpellets erscheinen in vielfacher Hinsicht als vorteilhaft zur Teilchennachfüllung von fusionsorientierten Plasmen. Besondere Anforderungen an das Injektionssystem werden dabei hinsichtlich Pelletgeschwindigkeit, Zuverlässigkeit sowie Repetitionsrate gestellt. Die bislang entwickelten Systeme basieren auf dem Prinzip der Gaskanone bzw. dem Zentrifugenprinzip. Beide Methoden weisen aber eine prinzipielle Beschränkung hinsichtlich der Repetitionsrate auf. Der hier vorgestellte Injektor, dessen Wirkungsweise auf dem Leidenfrost-Phänomen be-

ruht, sollte die wesentlichen Vorteile der bisherigen Methoden vereinen und eine hohe Repetitionsraten ermöglichen. In der Leidenfrost-Gaskanone wird das Pellet von einem im Vorratskryostaten gespeicherten Deuteriumstab abgeschert und in den Beschleunigungslauf transportiert. Das thermisch vom Vorratskryostat entkoppelte Gaskanonenschloss (Shuttle) befindet sich dabei auf Raumtemperatur. Aufgrund des Leidenfrost-Phänomens erfahren die Pellets beim Lade- und Beschleunigungsvorgang keine signifikante Degradation. Somit entfällt das in bisherigen Gaskanonen unabdingbare und die Repetitionsrate limitierende Kühlen des Shuttles nach jedem Injekturvorgang [vgl.13].

1.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Für den Fusionsreaktor ITER entpuppt sich die Leistungsabfuhr als das Hauptproblem, da ein signifikanter Teil der aus dem Plasma abfließenden Teilchen und Energie in kurzen transienten Bursts ausgeworfen wird. Diese als ELMs bezeichneten Bursts würden Leistungsdichten über den zulässigen Grenzwerten erreichen. Abhilfe verschafft die Kontrolle der ELM- Aktivität, wobei durch eine Frequenzerhöhung die Spitzenleistungen entsprechend abgemildert werden. Als effiziente Methode zur kontrollierten Auslösung der ELMs wurde an ASDEX Upgrade der Einschuss von kyrogenen Pellets aus festen Deuteriumbrennstoff entwickelt. Allerdings waren bislang Pelletinjektoren in ihrer Bauart darauf ausgerichtet, große Pellets mit hoher Geschwindigkeit aber moderater Repetitionsraten zu liefern. Zur ELM- Kontrolle werden jedoch sehr kleine Pellets mit moderater Geschwindigkeit aber hohen Repetitionsraten benötigt. Daher wurde am IPP ein neues, besser adaptiertes System entwickelt basierend auf dem Prinzip des Blasrohres bei dem das Projektil im Gasstrom auf Geschwindigkeiten bis zu 300 m/s beschleunigt wird. Da Nachladen und Abfeuern sequentiell erfolgen kann, wurde ein Konzept angewandt, dass es ermöglicht, diese Sequenzen für zwei Pellets gleichzeitig auszuführen. Damit konnten Repetitionsraten bis zu 143 Hz erreicht werden.

Die Aufgabe dieser Arbeit war es, die bereits entwickeltem Leidenfrost Gaskanone am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade in Betrieb zu nehmen. Anschließend wird eine Charakterisierung des Ganzen erstellt um Aussage über die Leistungsfähigkeit des Systems zu machen zu können. Nachdem die Leidenfrost Gaskanone am Experiment installiert wurde, werden alle umliegend, vorhandenen Systeme an der LEIKA

angeschlossen und in Betrieb genommen. Dazu gehört die Einbindung der neuen Messgeräte und Diagnostiken in die Steuerungs- und Regelungssysteme, sowie die Kalibrierung der Diagnostik. Anschließend werden Daten gesammelt und ausgewertet, um die Leistungsfähigkeit des Pelletinjektors zu erfahren.

Im einleitenden Kapitel wurde schon auf die Kernfusion als Ganzes näher eingegangen. In dem nun folgenden Kapitel 2 werden die technische Entwicklung der Pelletinjektion und die Komponenten des Versuchsaufbaus im Detail vorgestellt. Im Kapitel 3 werden die ersten Ergebnisse aus dem Versuchslabor behandelt. Anschließend wird im Kapitel 4 die Installation und Montage des Systems, im Kapitel 5 die Inbetriebnahme, die Erfassung von Daten, sowie die Auswertung erörtert.

2 Die Leidenfrost Gaskanone am ASDEX Upgrade

2.1 Anforderungen an das System

Ein neu entwickeltes zusätzliches Pellet- System verspricht eine Erweiterung der operativen Eigenschaften der ELM kontrollierten Szenarien. Zusätzlich verkleinert sich die ELM- Größe durch die hohe Pellet- und daraus folgende ELM- Frequenz. Zuletzt bringen Experimente mit niedriger Pelletgeschwindigkeit eine erweiternde räumliche Auflösung und die Flexibilität der Injektorgeometrie erlaubt ein besseres Verständnis der ELM- Physik. Die Voraussetzung des Systems wurde durch die Bedürfnisse der ELM- Kontrolle vorgeschrieben. Die Einschränkung liegt darin, unerwünschte Nebenbedingungen zu minimieren (z.B. das Nachfüllen) zu liefern, sondern auch an die Absicht zu denken eine bestimmte ELM- Untersuchung zu ermöglichen. Selbstverständlich muss eine zuverlässige Bedienung und Durchführung mit einer hohen Pelletlieferleistungsfähigkeit ($\epsilon = \frac{\text{Pellets geliefert}}{\text{Pellets angefordert}}$) sichergestellt werden. Aber zusätzlich

wollen wir so weit wie möglich innerhalb des Bereiches der verfügbaren Technologie bleiben um Risiken und Kosten zu vermeiden. Im Prinzip zielen wir auf die höchst mögliche Pelletfrequenz mit dem kleinst möglichen Partikelfluss und einer Pelletgeschwindigkeit so gering wie möglich ab, ohne die Kontrolle über der Pelletflugbahn zu verlieren [vgl. 14].

2.1.1 Pelletmasse und -abmessung

Von vorhergehenden Experimenten weiß man, dass die Pelletmasse m_p von nur 10^{18} D-Atomen ausreichen würde um die ELMs zu triggern. Solch eine starke Reduzierung der Pelletabmessung würde bedeuten, das ein Pellet nur $250 \mu\text{m}$ groß wäre. Herstellung, Handling und Transfer von solchen *sub- mm* großen Pellets befinden sich jenseits unserer Erfahrung. Durch die Erfahrung mit unserem Pelletnachfüllsystem weiß man, dass die Pellets die von einem extrudiertem Eisstab abstammen gebrechlicher werden je größer das Oberflächen/Umfang Verhältnis wird. Um eine ausreichende Pelletlieferleistungsfähigkeit zu gewährleisten wurde ein runder Pelletquerschnitt von 2 mm (zu dieser Zeit stand ein Extrusionkryostat- System zur Verfügung) und einer

Länge von 0,5 mm gewählt. Höchst wahrscheinlich würde diese Pelletgröße für einen optimalen Partikelfluss nicht ganz ausreichen. Deshalb wird als nächster Schritt geplant, das bestehende Extrusionskryostaten- Systems durch ein Neues mit reduzierten Pelletquerschnitt (verschiedene Abmessungen möglich) auszutauschen [vgl. 14].

2.1.2 Pelletgeschwindigkeit

Die Pelletgeschwindigkeit liegt im Bereich von 100-300 m/s. Diese Geschwindigkeit ist einerseits langsam genug um ein ausreichendes Partikeldepositionsprofil und eine erhöhte räumliche Auflösung zu bekommen, aber andererseits schnell genug um die Pelletflugbahn noch kontrollieren zu können. Deshalb wurde das Blower Gun Prinzip für die Pelletbeschleunigung gewählt verursacht durch die viskose Antriebsbeschleunigung (durch Reibung des Treibgases). In diesem Fall wurde Deuterium als Treibgas verwendet, da es kein Problem gibt wenn das Gas den Torus erreicht. Durch die Option um die Pelletgeschwindigkeit v_p zu reduzieren bei dem Verwenden von Treibgas mit niedrigem Druck kann sichergestellt werden, dass der störende Treibgasfluss in den Torus ausreichend gering erreicht [vgl. 14].

2.1.3 Pelletrepetitionsrate

Es wird eine Pelletrepetitionsrate f_p von mehr als 100 Hz vorgeschrieben um ausreichenden ELMy in einem typischen ASDEX Upgrade type-I ELMy H-mode Schuss zu triggern. Um eine möglichst große Repetitionsrate zu erhalten, hat die Leidenfrostkanone 2 Läufe, die von einem Schussrohr versorgt werden. Während die Magazinbohrung des einen Laufs durch Einschieben des D₂-Stabes in die Bohrung geladen wird, kann im anderen Lauf ein Pellet beschleunigt werden. Wenn der Magazinschieber vor den anderen Lauf bewegt wird, wird dabei das Pellet vom eingeschobenen D₂-Stab abgeschert, vor diesen Lauf platziert und sofort durch Öffnen des entsprechenden schnellen Treibgasventils beschleunigt [vgl. 19]. Dieser Vorgang wird in Kapitel 2.2 *Layout des Systems* noch genauer beschrieben.

Da das neue System zusätzlich zum bereits vorhandenen Pelletinjektor (Zentrifuge HFS- Injektion) zum Einsatz kommt, wurde das Layout des neuen Systems für die LFS- Pelletinjektion ausgelegt. Es wurden zwei unterschiedliche Injektionskanäle für

das neue System installiert. Die Injektionskanäle können jeweils zwischen den einzelnen Plasmaentladungen manuell angesteuert werden. Der erste Kanal wird auf den direkten und geraden Injektionspfad ausgerichtet. Er wird für den einfachen Gebrauch und daraus folgende hohe Zuverlässigkeit verwendet. Der zweite Injektionspfad ist gekippt und zielt auf bestimmte physikalische Untersuchungen ab [vgl. 14].

In Tabelle 3 wird der Vergleich der Hauptmerkmale und Parameter des alten Pelletnachfüllsystem und dem System für das ELM triggern beschrieben.

Tabelle 3: Merkmale und Parameter für beide Pelletinjektoren am ASDEX Upgrade (Quelle: Eigene Darstellung nach 14)

System Aufgabe	Nachfüllen (alt)	ELM triggern (neu)
Injektortyp	Zentrifuge	Blower Gun
Partikelposition	Tief	Am Rand
Startposition	HFS geneigt (72°)	LFS gerade LFS geneigt (33°)
Pelletgröße nominal (10²⁰ D)	1.7 – 4.3	0.47
Pelletgeschwindigkeit $\left(\frac{m}{s}\right)$	240 – 1000	100 – 3000
Pelletrepetitionsrate max. (Hz)	62	143

2.2 Layout des Systems

2.2.1 Übersicht über den Aufbau des Systems

Eine Übersicht über den Aufbau, der während der Experimentierkampagne 2006 (C2006) durchgeführt wird, wird in Abbildung 14 wieder gegeben.

Der rechte Teil zeigt schematisch die neue Leidenfrostgaskanone wie sie am ASDEX Upgrade installiert ist. Durch ein ca. 5 m langes Führungsrohr mit einem Innendurchmesser von 6 mm werden die Pellets von der LEIKA zum Toruseingangsschieber geschossen. Direkt nach dem Eingangsventil werden die Pellets zu einem der zwei möglichen Injektionskanälen geführt. Der linke Teil (innerhalb des Rahmens) zeigt einen Querschnitt des Tokamak ASDEX Upgrade in der C2006 Konfiguration mit der fast ausgeführten Wolframbeschichtung der Kacheln [vgl.17]. Der eine Injektorpfad zielt gerade und direkt ins Plasma mit einer Position $z = -115 \text{ mm}$ bezogen auf Torusmittelhorizontalebene. Alternativ kann das Einschießen der Pellets mit einem Winkel von 33° bezogen auf die Horizontalebene durchgeführt werden [vgl. 14].

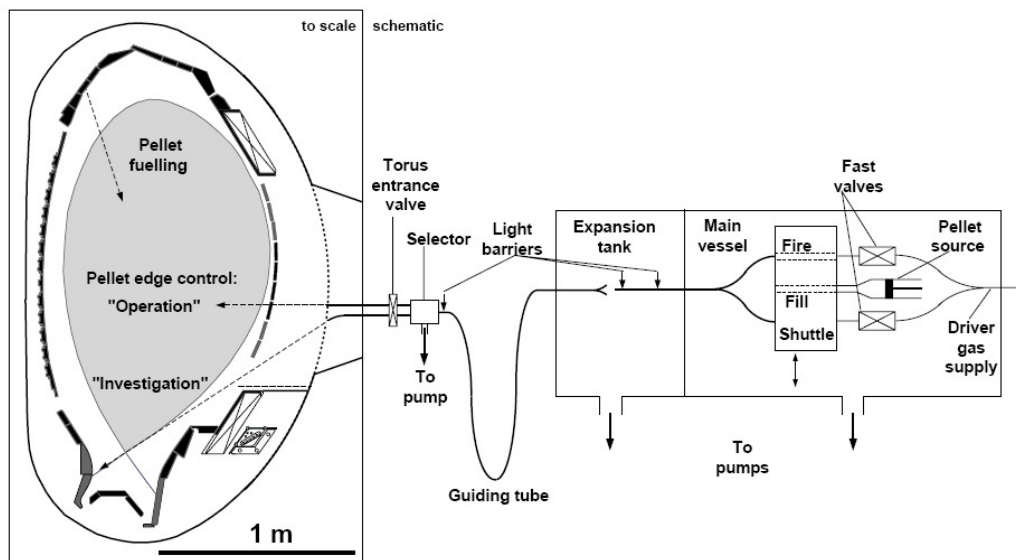


Abbildung 14: Übersicht des experimentellen Aufbaues. Links mit Skalierung: Querschnitt des Tokamak ASDEX Upgrade in der C2006 Konfiguration (W beschichtete Wandelemente in schwarz, C in grau) mit einer typischen Plasmakonfiguration für ELM Untersuchungen; Rechts: Leidenfrostgaskanone schießt Pellets in den Torus [vgl. 14].

2.2.2 Die Pelletquelle

Die Pelletquelle besteht aus zwei Kryostatsystemen. Eines für die Extrusion und einen Vorratskryostaten. Für die Kühlung beider Kryostaten wird flüssiges Helium (He) verwendet, wobei der komplette Verbrauch bei ca. 5 l/h liegt. Jeder Kryostat besitzt ein eigenes unabhängiges Kühl- und Temperaturkontrollsystem. Somit können Extrusions- und Vorratstemperatur unterschiedlich gewählt und eingestellt werden. Wenn beide Kryostaten durch das durchströmende, flüssige Helium auf ca. 5 K abgekühlt sind, wird über das Gasversorgungssystem das gewünschte angeschlossene Gas in den Extrusionskryostaten eingelassen. Das Gas wird dazu vorher in einem Gasreservoir zwischengespeichert und strömt dann beim Öffnen des Gaseinlassventils über ein Dosierventil bei ca. 1.4 bar in den Extrusionskryostaten ein. Die Extrusionsdüse ist dabei geschlossen. Das einströmende Gas kondensiert dann sofort an den Wänden des Extrusionskryostaten aus, so dass ein polykristalliner Eisschnee entsteht. Die Kryostattemperatur steigt durch die Wärmekapazität des einströmenden, warmen Gases auf ca. 18 K. Vor dem Beginn der Extrusion finden die Kompression und Randerhitzung durch 20 sec andauernde Hitzepulse statt. Dies wird gemacht um die Eisqualität und die Pelletstabilität zu verbessern. Anschließend wird das gefrorene Deuterium auf eine Temperatur von 15 K gebracht und mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 1 mm/s in einen viertelkreisförmige Ringform (Durchmesser 2 mm) mit Hilfe eines Kolbens (Fläche 6 mm² und 14 bar Druck) gedrückt. Die Länge des Ringkanals beträgt 124 mm was auch die Länge des Eisstabes bedeutet. Eine Lichtschranke, welche an der Unterseite des Vorratskryostaten befestigt ist, zeigt an wann die Extrusion und das Füllen beendet werden soll. Das Eis kann man bis zu einer Stunde und einer Temperatur von ca. 5 K im Vorratskryostaten aufbewahren. Wenn die Anforderung nach Pellets eingeht, wird der Eisstab mit Hilfe eines mechanischen Greifarmes aus dem Vorratskryostaten geschoben. Jeder einzelne Schritt hat eine Länge von 0.25 mm und benötigt 1 ms. Eine Schubpause von 2 ms muss eingehalten werden um die Vibrationen im Eis zu beruhigen [vgl. 14].

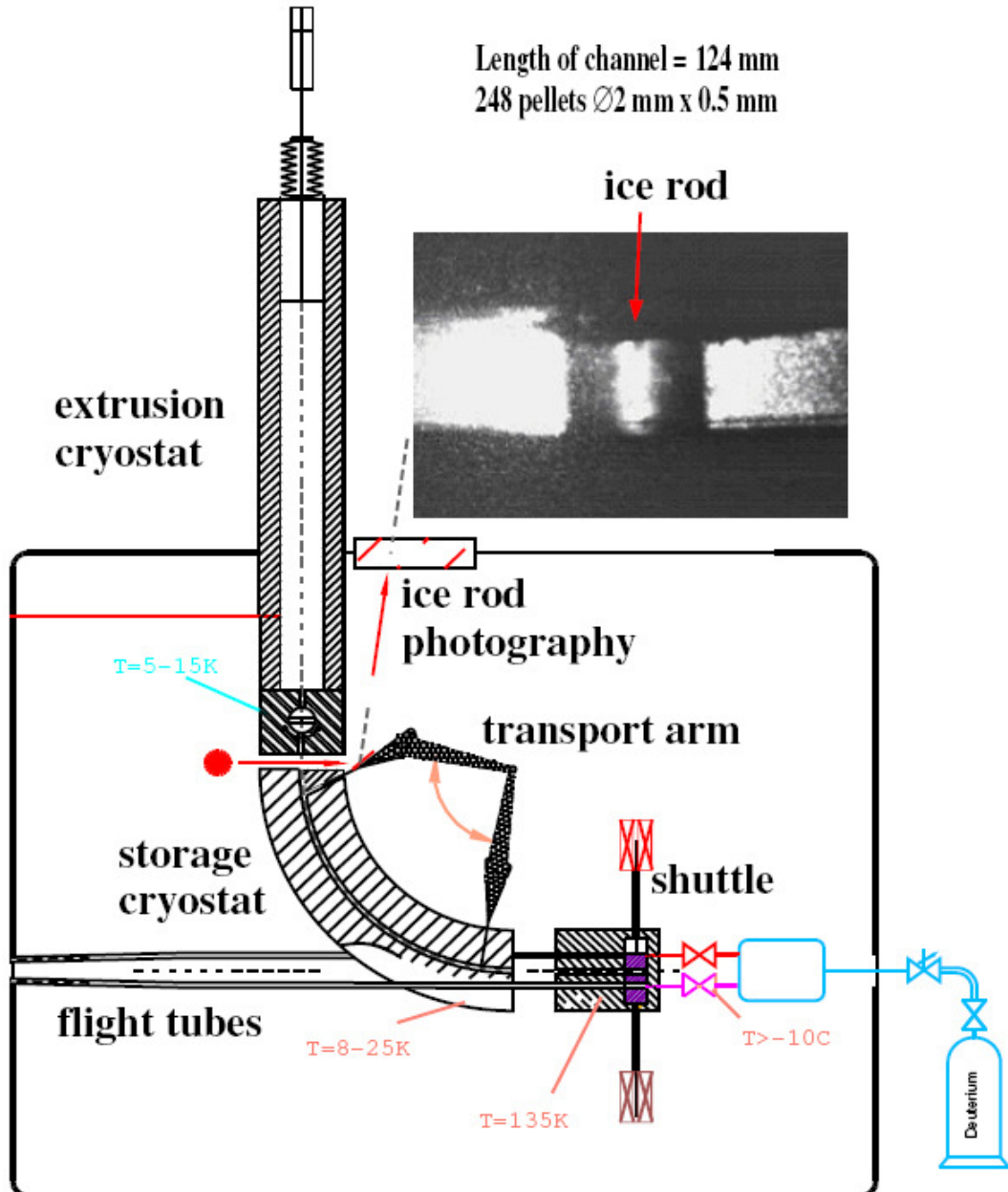


Abbildung 15: die Pelletquelle; Extrusions- und Vorrats-Kyrostat (Quelle: Pelletlabor IPP)

2.2.3 Die Beschleunigungseinheit

Das Herzstück des Injektorsystems ist das so genannte Shuttle (vgl. Abbildung 16).

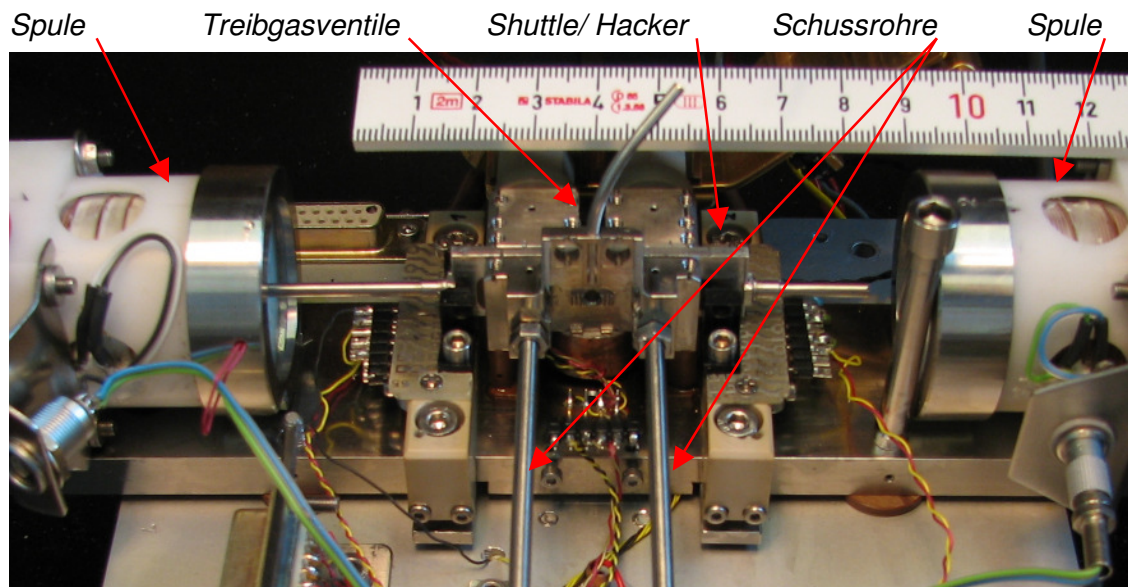


Abbildung 16: Pelletschneide- und -beschleunigungseinheit

Die Aufgabe besteht darin die Pellets abzuhacken und in zwei gleich lange und parallel laufenden Rohren mit dem Treibgas Deuterium zu beschleunigen. Das Shuttle selber besteht aus einem Aluminiumrahmen mit einem Einschluss von *VespeI*®². Es wird beweglich auf einen Schlitten befestigt und durch zwei am Ende positionierten Spulen bewegt. Wobei die Spule 1 zieht, während gleichzeitig die auf der gegenüberliegenden positionierten Spule 2 das Shuttle von sich weg drückt. Anschließend muss noch mal kurz Spule 1 am Shuttle ziehen, um das Rückprellen zu minimieren (vgl. Abbildung 17). Die endgültige Fixierung der alternierenden Position wird von zwei Neodym Permanentmagneten unterstützt.

² *VespeI*® ist ein Hochleistungs- Polyamid. Polyamide Materialien sind durch eine ringförmigen Molekularstruktur charakterisiert. Molekularstrukturen beinhalten Nitrogen. Es wird nicht schmelzen und kann von kryogene Temperaturen bis 288°C verwendet werden, Fa. Boedeker Plastics, Inc.

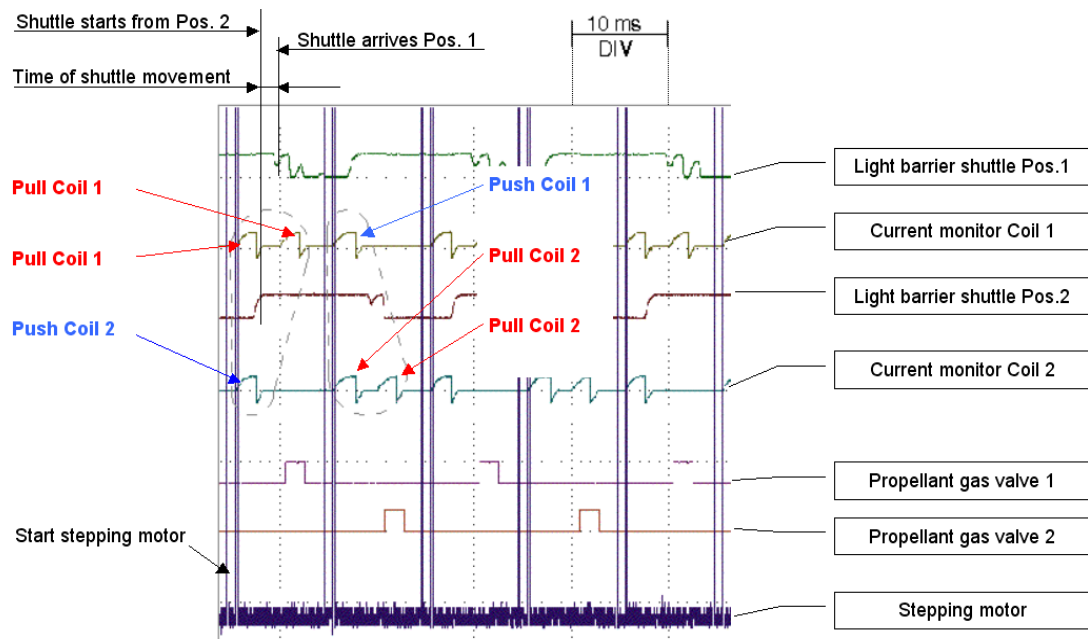


Abbildung 17: Synchronisationstiming der Spulen am Oszillographen (Quelle: Pelletlabor IPP)

Im Shuttle befinden sich zwei Bohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm , die zur Ablängung und Transport der Pellets dienen. Wenn das Shuttle die Endposition erreicht hat, liegt eine Bohrung direkt vor dem Ausgang des Vorratskryostaten. Der mechanische Schubarm schiebt das Eis in die Bohrung des Shuttles. Durch die anschließende Tic- Tac Bewegung des Shuttles, wird der sich in der Bohrung befindende Eisstab abgeschert und das entstehende Pellet wird zur Beschleunigungsposition geführt. Hier wird das Pellet mit einem kurzen Gaspuls, der durch ein kurzes Öffnen (ca. $1,2 - 2\text{ ms}$) eines Teibgasventiles³ verursacht wird, auf die gewünschte Geschwindigkeit gebracht. In derselben Zeit, wird die zweite Bohrung des Shuttles von der Startposition weg und zur Öffnung des Vorrats- Kryostaten gebracht, wodurch es erneut mit Eis gefüllt werden kann. Der prinzipielle Ablauf der Pelletproduktion und der -Beschleunigung (Tic- Tac) wird in Abbildung 18 wieder gegeben.

³ Micro-Solenoid Valves 67, 2/2- and 3/2-Way poppet directional valves; Fa. KUHNKE GmbH. Extremely powerful valve with a brass base and plastic-encapsulated magnetic system. Pressure range: 8 bar

Leidenfrost gun operation cycle:

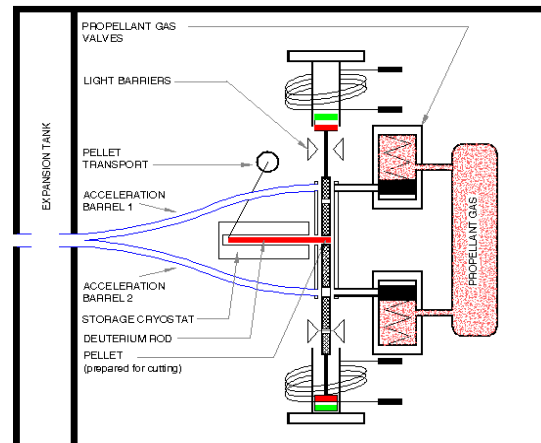
Deuteriumeisstab wurde im Extrusionskyrostaten extrudiert

Der Eisstab wird im Vorratskyrostaten aufbewahrt
(Schritt 1)

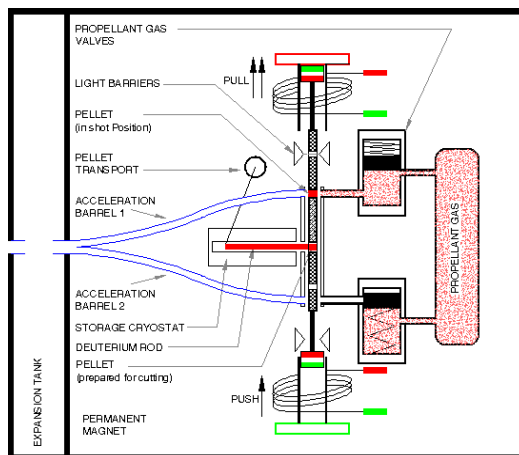
Pellet 1 wurde vom Eisstab durch das Shuttle abgeschnitten (Schritt 2)

Pellet 1 wird in Schussposition gebracht, während Pellet 2 durch das Shuttle abgeschnitten wird, Pellet 1 wird durch einen Gaspuls beschleunigt (Schritt 3)

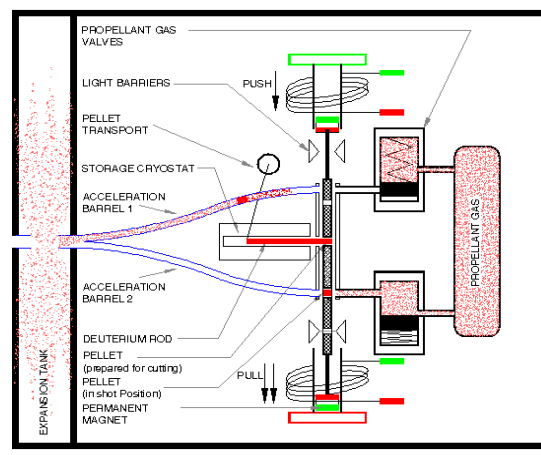
Pellet 2 wird in die zweite Schussposition gebracht und durch einen erneuten Gaspuls beschleunigt



Step 1



Step 2



Step 3

Abbildung 18: Der prinzipielle Ablauf der Pelletproduktion und -beschleunigung (Tic-Tac)
(Quelle: Pelletlabor IPP)

Nach ca. 33 cm vereinen sich die zwei Schussrohre zu einem in Trichterform zulaufenden Führungsrohr. Um eine übermäßige Pelletverdampfung zu vermeiden muss der Hacker, der zum Teil fest verbunden ist, durch Strahlung gekühlt werden. Jedoch ein zu starkes Abkühlen des Shuttles kann auch Nachteile der gleichmäßigen und präzisen Bewegung des Shuttles zur Folge haben. Die besten Ergebnisse im Labor wurden bei einer Shuttletemperatur von ca. 85 K erreicht.

2.2.4 Das Pump- und Führungssystem

Der Gasdruck muss unter 0.1 Pa gehalten werden, um signifikante Wärmeflüsse zum Kryostatsystems zu verhindern. Sobald sich die Energie, die durch das ausgestoßene Gas übertragen wird, sich der kritischen Grenze annähert, befindet man sich in einem Kreislauf. Denn dadurch verdampft das Eis im Vorrats- Kryostaten noch stärker, wodurch sich eine Erhöhung des Gasdruckes einstellt und zu einem noch größeren Wärmefluss führt. Schließlich befindet man sich in einem Destabilisierungsprozess der Kontrollparameter und ein schneller Verlust des Eisbestandes findet statt [vgl. 14].

Das Shuttle darf bei Raumtemperatur nicht zu fest montiert werden (man muss es mit der Hand noch leicht bewegen können), da es sich bei einer Betriebstemperatur von ca. 85 K verzieht und sonst festklemmen könnte. Andererseits würde ein zu locker montiertes Shuttle dazu führen, dass die Leckrate beim Beschleunigungsvorgang zu groß wird und das Vakuum im Extrusionskessel zusammenbricht. Das Shuttle hat hier eine Zusatzfunktion als Dichtung. Es darf das Treibgas nur durch die zwei vorgesehenen Bohrungen mit $\varnothing 0.5 \text{ mm}$ in die Beschleunigungskanäle lassen und nicht über die Seiten in den Hauptkessel. Die Menge an Treibgas, die über die Seiten des Shuttles in den Hauptkessel gelangen wird als Leckrate bezeichnet. Eine zu große Leckrate verursacht ein Zusammenbruch des Vakuums im Kessel 1 wodurch das extrudierte Deuteriumeis verdampft. Mit zwei Molekular-Turbopumpen (360 l/s Pumpleistung pro Pumpe) kann man das Vakuum während des Schussbetriebes aufrechterhalten. Zwei zusätzliche Pumpen des gleichen Typen dienen dazu den Expansionskessel und den Manipulator zu evakuieren.

Das Pellet- Führungssystem besteht aus einem kleinen Teflonschlauch mit einem Innendurchmesser von 6 mm . Der Abstand zwischen den Hauptkessel und dem Manipulator beträgt ca. 5 m und bildet einen sehr hohen Widerstand für jeden störenden Gasfluss. Die Ablenkung der Pellets zu einem der zwei Injektionskanäle wird durch den Manipulator erreicht und kann zwischen den Plasmaentladungen manuell verändert werden. Das System ist vom Torus- Vakuum durch einen Schieber getrennt, der nur bei den erforderlichen Bedingungen (wie Vakuum in Ordnung; Triggersignal; Interlock;...) geöffnet werden kann [vgl.15].

2.2.5 Das ASDEX Upgrade Vakuum System

Das Vakuum wird allgemein in vier verschiedenen Bereiche eingeteilt: Das Grobvakuum (GV) bei $1000 - 1 \text{ mbar}$, das Feinvakuum (FV) bei $1 - 10^{-3} \text{ mbar}$, das Ultrahochvakuum (HV) bei $10^{-3} - 10^{-7} \text{ mbar}$ und das Ultrahochvakuum (UHV) unterhalb von 10^{-7} mbar [16].

Im Plasmagefäß von ASDEX Upgrade wird das Vakuum im Normalzustand (keine Entladung, kein Gas) auf bis zu 10^{-9} mbar gehalten, um das Gefäß möglichst sauber zu halten. Während einer Entladung stellt sich der Druck, je nach Parameter, auf $10^{-4} - 10^{-1} \text{ mbar}$ im Gefäß ein.

2.2.6 Die Versuchsfeld- Diagnosikeinheiten

Das Pelletsystem ist mit einer Anzahl von Diagnostikeinheiten ausgestattet, die direkt in das System integriert wurden. Zusätzlich wurden mehrere Einheiten während der Testfase im Labor verwendet. Zur Temperaturüberwachung wurden Siliziumdioden⁴ in die Kryostatsysteme eingebaut. Ein konventionelles Videosystem wurde zur Überwachung der Eisextrusion installiert und liefert ein qualitatives Bild des Eisstabes während der Extrusion. Mit Lichtschranken⁵, die durch ein vorbeifliegendes Pellet auslöst werden, triggern einen Laser⁶. Das dadurch entstehende Schattenbild des Pellets wird von einer CCD- Kamera⁷ aufgenommen und über Composit- Video an einen Videorekorder gesendet.

Zur Charakterisierung des Pelletsystems wurden die Hauptpelletparameter v_p , m_p und ϵ gemessen. Zwei Lichtschranken, die direkt nach der Beschleunigungsstrecke installiert wurden, messen die Flugzeit der Pellets und daraus lässt sich v_p bestimmen.

⁴ Si-Diode Kat. Nr.: 890 89 mit Temperatur- Anzeigegerät Model 1901 Temperaturbereich: 1,5 bis 450 K Kat. Nr.: 136 45, Fa. LEYBOLD VAKUUM GmbH

⁵ PHOTOPS™ Series Hybrid Photodiode- Amplifier Hybrids UDT-20D a general purpose PHOTOP™ with a 20mm^2 active area, packaged in a TO-8 housing, Fa. Osiptolectronics

⁶ Pulse Laser Transmitter Serie IRLT, IRLT-0/22-030/160-PL93-A2-11, Fa. Optoelectronic/ Laser Components GmbH, Germany

⁷ CCD Black-and-White Video Camera Module XC-ST70/ST70CE, Fa. SONY Global/ Products List/ XC Small-size, high-resolution, monochrom video camera module using an interline transfer CCD image sensor.

Die Massenbestimmung m_p wurde zum einen durch Vermessen und Vergleich von mehreren 100 Pelletfotos durchgeführt. Zum anderen konnte die Masse der Pellet durch den Druckanstieg ΔP im Versuchskessel bestimmt werden.

Zuerst wurde der Versuchskessel kalibriert und ausgelitert. In Abbildung 19 werden die Schritte zur Kalibrierung des Kesselvolumens dargestellt. Deren Berechnung finden sich in Anhang A wieder.

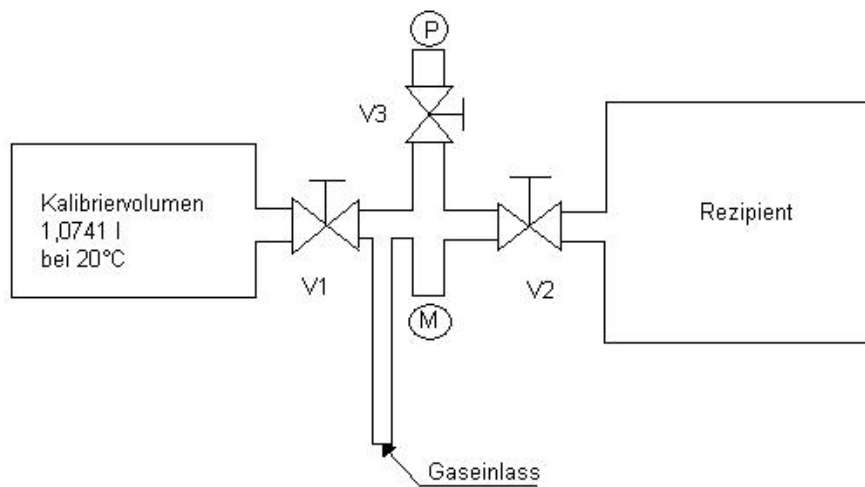


Abbildung 19: Kalibrierung des Versuchskessels im Pelletlabor (Quelle: Pelletlabor IPP)

Schritte zur Kalibrierung des Kesselvolumens:

1. Evakuieren
2. V3 zur Vakuumpumpe (P) schließen
3. Gaseinlass
4. p_{Anf} am Messgerät (M) messen
5. V1 zum Kalibriervolumen schließen
6. V3 zur Pumpe öffnen → nochmals evakuieren, V1 geschlossen
7. V3 zur Pumpe schließen
8. V1 zum Kalibriervolumen öffnen
9. p_{End} am Messgerät messen
10. Berechnung des Kesselvolumens

$$p_{Anf} \cdot V_{Kalibrier} = p_{End} \cdot V_{Gesamt} \quad (1)$$

$$V_{Kessel} = V_{Gesamt} \cdot V_{Kalibrier} \quad (2)$$

Nach dem Einschuss von Treibgas (ohne Pellets) $\rightarrow P_{\text{Treibgas}}$. Anschließend sind 100 Pellets in den Versuchskessel eingeschossen worden $\rightarrow P_{\text{Pellets}} + P_{\text{Treibgas}}$. Durch den Einschuss von Pellets minus den vorherig ermittelten P_{Treibgas} ist die Bestimmung von ΔP (Druckanstieg durch die Pellets) im Versuchskessel möglich. Durch die Teilchenzahl von Deuterium konnten man damit die Masse bestimmen. Mit beiden Varianten der Massenbestimmung (Fotovergleich und Druckanstieg im Versuchskessel) wurde ein Massenverlust der Pellets von ca. 25% festgestellt.

Neben den Anzeigen der verschiedenen Lichtschranken, wurde die erfolgreiche Pelletankunft im Zielkessel des Versuchslabors durch einen akustischen Schocksensor (Mikrofon) genau detektiert. Die Pellets wurden direkt auf das Mikrofon geschossen und durch die Höhe des Signalauschlages konnte man erkennen ob es sich um ganze Pellets bzw. nur um einzelne Pelletfragmente handelt. Dadurch war eine Bestimmung der Pelletlieferleistungsfähigkeit ϵ möglich.

Nach dem Transfer und Installation des Pelletsinjektor am ASDEX Upgrade wurden eine Anzahl von verschiedenen Diagnostikeinheiten nicht mehr gebraucht, wie zum Beispiel den akustischen Schocksensor.

Die extremen Bedingungen in einem Fusionsplasma erfordern besondere Messmethoden, um dessen Zustände wie Temperatur, Dichte, Energieinhalt, Ströme im Plasma, Verunreinigungen usw. zu untersuchen. Generell versucht man, die Eigenschaften des Plasmas zu erkunden, ohne es zu stören, indem man die Wirkungen des Plasmas nach außen untersucht. Dies sind magnetische oder elektrische Felder, geladene oder neutrale Teilchen sowie elektromagnetische Wellen, die das Plasma in einem weiten Spektralbereich vom Radio- bis zum Röntgenbereich aussendet. Neben diesen passiven Methoden werden auch aktive Verfahren eingesetzt, sofern man sicher sein kann, dass sie das Plasma nicht verändern. Besonders ergiebig ist die Einstrahlung von Laserlicht oder Mikrowellen, die durch das Plasma beeinflusst werden und so über seine Eigenschaften Auskunft geben. Auch Teilchenstrahlen werden zur Diagnose verwendet.

3 Ergebnisse des Versuchstandes aus dem Labor

Das Hauptziel der Versuche im Labor war es den operativen Parameterbereich der Leidenfrostgaskanone zu Charakterisieren und zu Optimieren. Der Aufbau der Leidenfrostgaskanone im Versuchslabor zeigt die Abbildung 20.

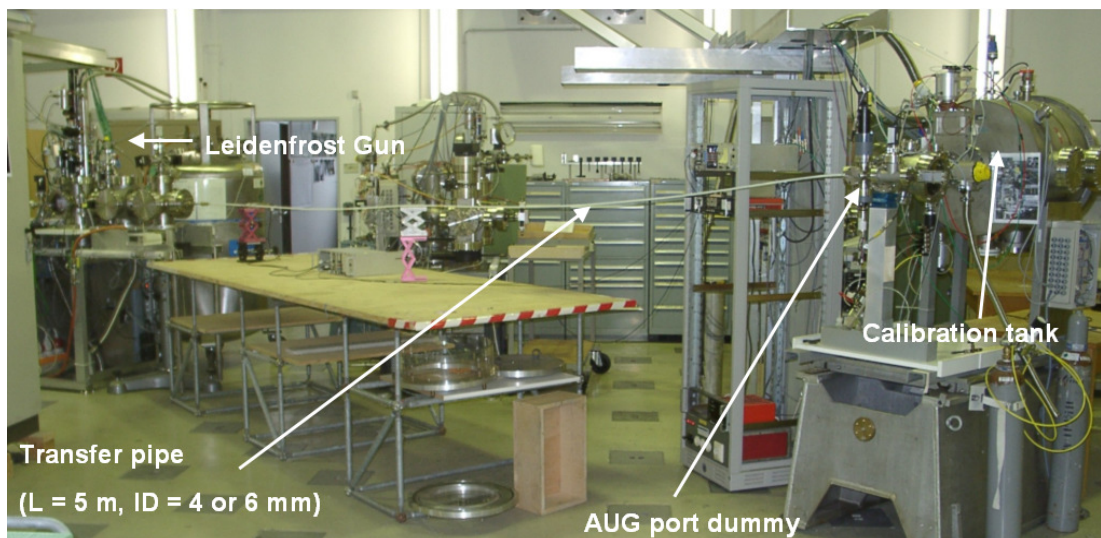


Abbildung 20: Versuchsaufbau im Pelletlabor (Quelle: Pelletlabor IPP)

Zur Charakterisierung des Pelletsystems wurden die Parameter wie Pelletgeschwindigkeit v_p , Pelletmasse m_p , Pelletlieferleistungsfähigkeit ϵ und Pelletwiederholrate f_p gemessen. Die Pelletmasse $m_p = 4.7 \times 10^{-19}$ D wurde Anfangs schon durch die verwendete Hardware (Shuttle) festgelegt. Diese Masse der Pellets dürfte ausreichen, um die ELMs in einem typischen ASDEX Upgrade type-I ELMy H-mode Schuss zu triggern.

Die maximal erreichbare Pelletwiederholrate f_p wird durch die konstruktiven Grenzen und durch die Voraussetzung eine ausreichend hohes Pelletlieferleistung ϵ zu bekommen gesetzt. Am Ende bleibt nur noch Pelletgeschwindigkeit v_p als frei wählbarer Parameter übrig. In der Regel kann man die Pelletgeschwindigkeit durch den Treibgasdruck, Treibgasart und durch die Injektionsgeometrie (Länge und Durchmesser des Schussrohres) verändern [vgl. 18]. Die Injektionsgeometrie wird durch die verwendete Hardware festgelegt. Somit können nur noch die ersten zwei Einstellmöglichkeiten verwendet werden um v_p zu variieren. Als Treibgas wurde Helium in einem

Druckbereich von 1-9 *bar* verwendet. Die Abbildung 21 zeigt die ersten Ergebnisse mit Helium. In diesem Fall wurden die Pellets mit einer Frequenz von $f_p = 40 \text{ Hz}$ in den Versuchskessel geschossen.

Wenn man sich an die höchst möglichen Pelletwiederholrate annähert sinkt, die Pelletgeschwindigkeit (bei vorgegebenem Gasdruck) ab. Die Abbildung 22 zeigt ein Beispiel, wie die Geschwindigkeit abnimmt (Treibgas Helium mit 3 *bar_{abs}*) bei zunehmender Frequenz [vgl. 14]. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich das Shuttle bei zunehmender Frequenz zur anderen Position bewegt, bevor der Treibgaspuls das Pellet mit voller Wirkung trifft. Mit zunehmender Frequenz wird die Verweildauer des Schussrohres vor dem Ventil kürzer und dadurch kann sich der Gasstrom ,verursacht durch den Treibgaspuls, nicht richtig entfalten. Somit sinkt die Beschleunigungszeit stark und die Geschwindigkeit des Pellet nimmt ab. Die höchste Pelletfrequenz bei akzeptabler Reduzierung der Geschwindigkeit lag bei $\sim 143 \text{ Hz}$ (7 *ms*).

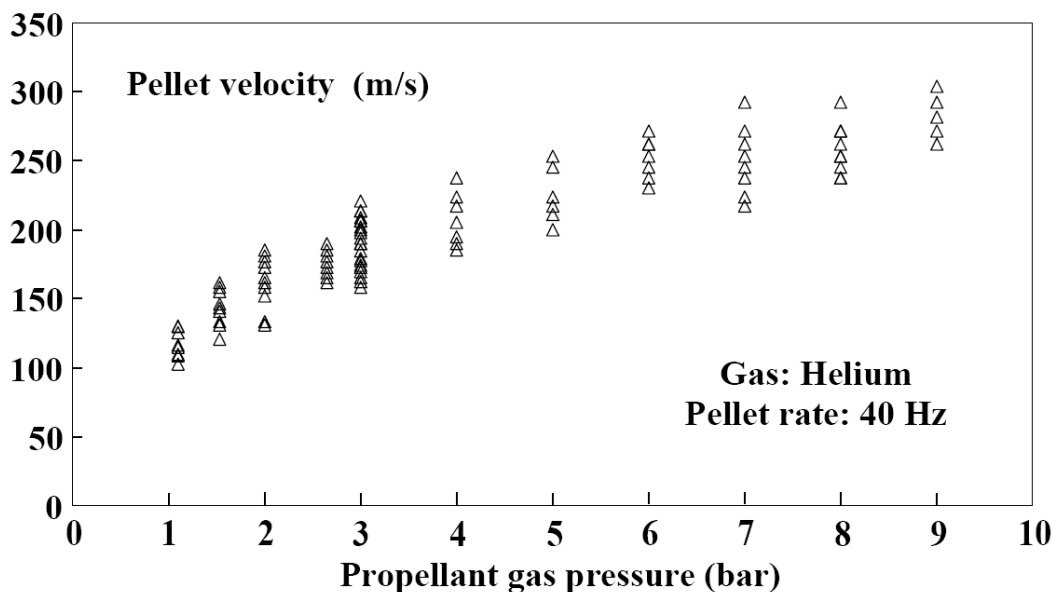


Abbildung 21: Pelletgeschwindigkeit gegenüber Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Helium; Pelletrepetitionsrate 40 Hz (Quelle: vgl. 14)

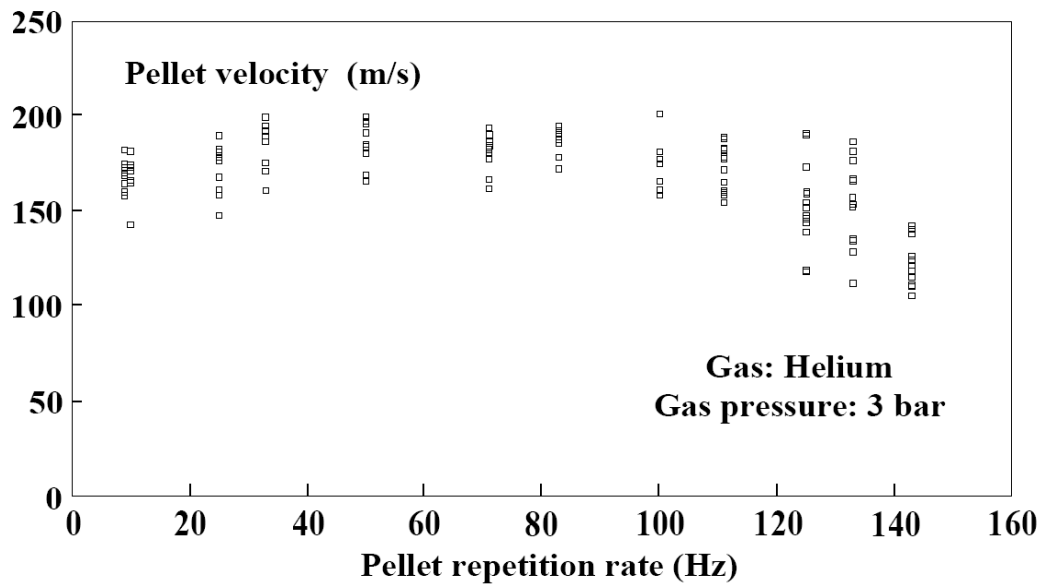


Abbildung 22: Pelletgeschwindigkeit gegenüber Pelletrepetitionsrate; Treibgas: Helium; Treibgasdruck 3 bar_{abs} (Quelle: vgl. 14)

Neben der Pelletgeschwindigkeit hat die zunehmende Frequenz auch Auswirkungen auf die Pelletlieferung. In Abbildung 23 wird ε gegenüber f_p (mit derselben Gas-konfiguration wie in Abbildung 22) aufgetragen. Über $f_p = 100 \text{ Hz}$ nimmt die Effizienz der Pelletlieferungsfähigkeit leicht ab. Die Gründe hierfür könnten in den hohen Bewegungskräften des Shuttles liegen, wodurch die Pellets zerstört werden. Zusätzlich könnten es auch daran liegen, dass die Pellets bei einer solch hohen Frequenz keine Zeit haben sich im Shuttle richtig zu positionieren bevor sie abgehakt und abgefeuert werden [vgl. 14].

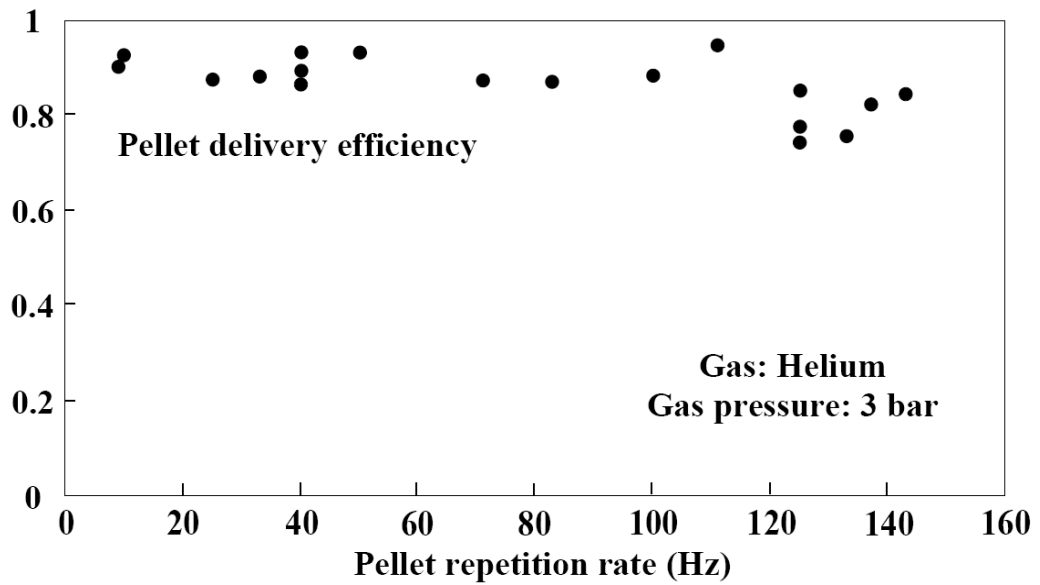


Abbildung 23: Pelletquote gegenüber Pelletrepetitionsrate; Treibgas: Helium; Treibgasdruck: 3 bar_{abs} (Quelle: vgl. 14)

Es sind dieselben Tests mit der fertig installierten Leidenfrost Gaskanone am ASDEX Upgrade und mit den Treibgasen Protium, Deuterium und wiederholt mit Helium durchgeführt. Die Ergebnisse der Pelletgeschwindigkeitsscans werden im Kapitel 5.1 diskutiert.

4 Inbetriebnahme des neuen Systems am ASDEX Upgrade

4.1 Einbindung der neuen Komponenten am ASDEX Upgrade

4.1.1 Steuerung der Pumpen, Ventile und Messgeräte

Damit das neue System in Betrieb genommen werden konnte, mussten alle neuen Komponenten in das vorhandene Steuerungs- und Regelungssystem integriert werden. Die Programmierung mit der SIMATIC- Steuerung Version Step 7 wurde in mehreren Schritten durchgeführt. Siehe Flussdiagramm für SIMATIC- Programmierung, Anhang B. Das Aktualisieren des Steuerungsprogramms WINCC beinhaltet das Integrieren der Symbole der installierten Pumpen, Messgeräten und Ventile in der Benutzeroberfläche und das Programmieren von Verknüpfungen zur SIMATIC. Die grafische Oberfläche mit den Kontrollleuchten, Ein- und Ausschaltmöglichkeiten ist in Abbildung 23 dargestellt.

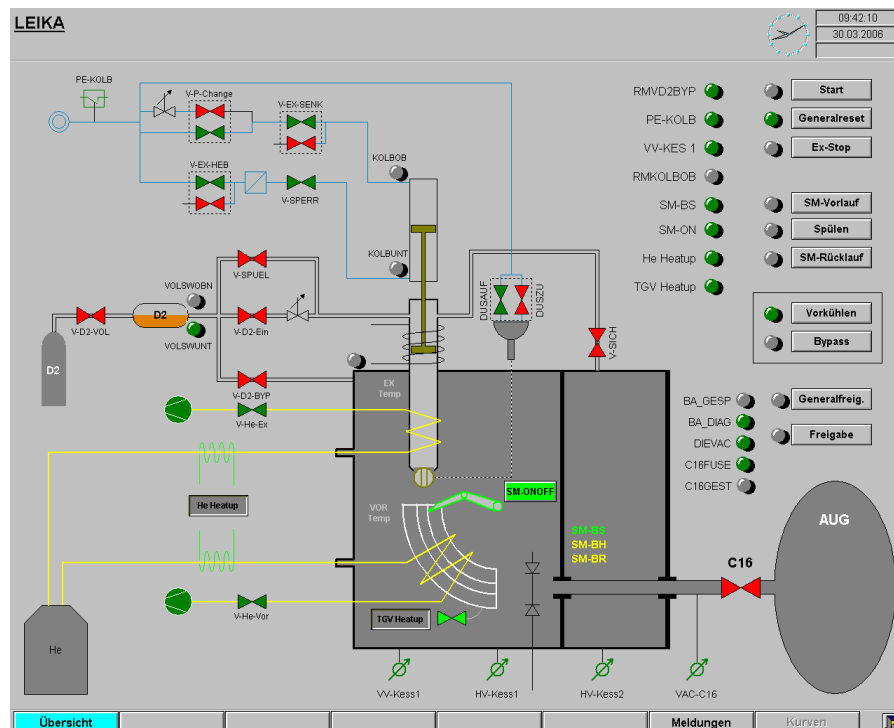


Abbildung 24: Die grafische Oberfläche des WINCC, Prozessablaufes der Leidenfrost Gaskanone

4.2 Erfassung von Daten

4.2.1 Geschwindigkeitsmessung und Fotografie

Wie in Kapitel 2.2.6 schon erwähnt, existiert in der Diagnostikeinheit ein System (LB1, LB2 und Laser1) zur Erfassung von Geschwindigkeiten und zur Aufnahme von Pelletbildern, zusätzlich ist auch kurz vor dem Manipulator am Ende des Führungsschlauches ein solches System (LB3, LB4 und Laser2) installiert. Im Detail handelt es sich um zwei Lichtschranken, die durch ein vorbei fliegendes Pellet auslöst werden und einen Laser triggert. Das vorbei fliegende Pellet durch die Lichtschranke 1 startet einen Zähler, der mit einer Frequenz von 10 MHz eine „Rampe“ raufzählt. Nach einem definierten Abstand (System 1, LB1 → LB2 = 37 mm) erreicht das Pellet die Lichtschranke 2. Diese Lichtschranke 2 stoppt und resetet den Zähler und startet ebenfalls einen Countdown der mit doppelter Frequenz von 20 MHz eine „Rampe“ runterzählt. Bei Null angekommen triggert der zweite Zähler einen Laser (LB2 → Laser = 14 mm). Der Vorteil dieses Systems besteht darin, dass die Pellets, unabhängig von ihrer Geschwindigkeit, immer zum richtigen Zeitpunkt fotografiert werden (Abbildung 27). Das dadurch entstehende Schattenbild des Pellets wird von einer CCD-Kamera aufgenommen und über Composit-Video an einen Videorekorder gesendet (Abbildung 28). Dort erfolgt mit der üblichen Abtastrate von 25 Hz (50 Halbbilder pro Sekunde) die Aufzeichnung auf einen S-VHS Videorekorder. Der Laser und die Kamera arbeiten bei 905 nm im Infrarotbereich, so dass mit Hilfe von entsprechenden Filtern störendes Streulicht wirksam vermieden werden kann. Das System 2 am Ende des Führungsschlauches ist analog zu dem gerade beschriebenen System 1 aufgebaut.

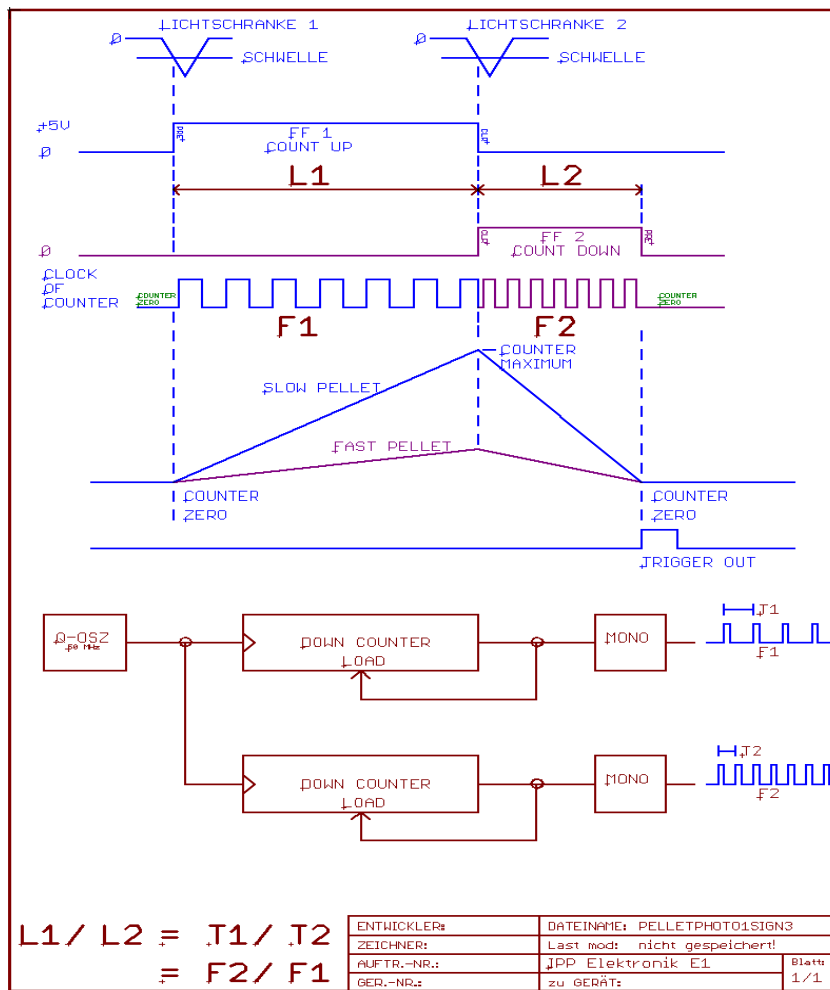


Abbildung 25: Pelletfotografie; Der Vorteil dieses Systems besteht darin, dass die Pellets, unabhängig von ihrer Geschwindigkeit, immer zum richtigen Zeitpunkt fotografiert werden (Quelle: Elektronikabteilung IPP)

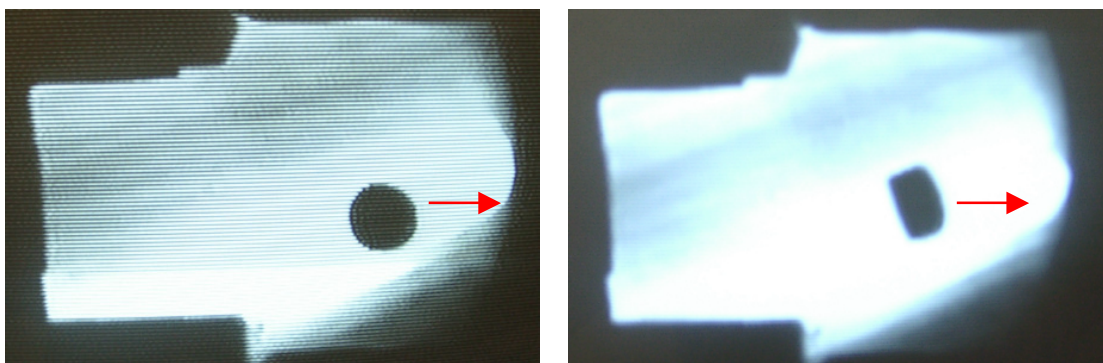


Abbildung 26: Schattenbild des Pellets (Durchmesser 2 mm, Länge 0,5 mm) die von einer CCD- Kamera aufgenommen und über Composit- Video an einen Videorekorder gesendet wurden (Quelle: Pelletlabor IPP)

4.2.2 Messgerät und Diagnostiken

Zur Aufnahme der Daten während der Versuchsreihen und Schussbetrieb am ASDEX Upgrade, wurden die Signale mit Hilfe eines digitalen 8-Kanal Oszillographen (DL 708 E von Yokogawa) und einem digitalen 16-Kanal Oszillographen (DL 750 PL von Yokogawa) aufgenommen. Die Kabelbelegung während der Pelletexperimente war zu meist wie folgt:

16-Kanal Oszillographen:

Kanal 1	-	Penlletanforderung	Kanal 9	-	Lasertrigger LB 1
Kanal 2	-	Strom Spule 1	Kanal 10	-	Lasertrigger LB 2
Kanal 3	-	Lichtschranke Shuttle 1	Kanal 11	-	Fotokamera 1
Kanal 4	-	Treibgasventil 1	Kanal 12	-	Lasertrigger LB 3
Kanal 5	-	Strom Spule 2	Kanal 13	-	Lasertrigger LB 4
Kanal 6	-	Lichtschranke Shuttle 2	Kanal 14	-	Fotokamera 2
Kanal 7	-	Treibgasventil 2	Kanal 15	-	C16- Schieber Auf / Zu
Kanal 8	-	Schrittmotor Greifarm	Kanal 16	-	D α - Diagnostik (AUG)

8-Kanal Oszillographen:

Kanal 1	-	TS 04	Kanal 5	-	nicht belegt
Kanal 2	-	TS 06	Kanal 6	-	nicht belegt
Kanal 3	-	Interlog	Kanal 7	-	nicht belegt
Kanal 4	-	C16-Schieber Auf / Zu	Kanal 8	-	nicht belegt

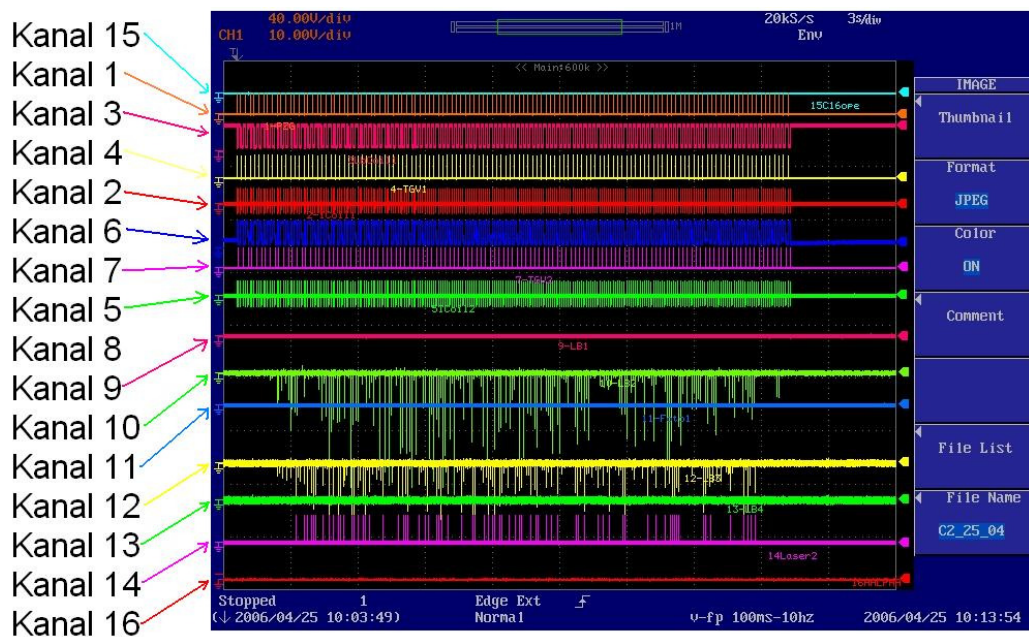


Abbildung 27: Signalanzeige des 16 Kanal Oszillographen

Der Triggerimpuls für den Start der Aufnahme kommt von einer externen Pelletanforderung. Einzelne Kanäle wurden für spezielle Zwecke ab und zu mit anderen Signalen belegt. Die Länge der Pelletsequenzen war üblicherweise so abgestimmt, dass alle Pellets innerhalb des Zeitfensters der Aufnahme aller vier Lichtschranken passieren konnten. Die notwendigen Daten wurden sofort nach der Messung auf der internen Festplatte des Oszillographen gespeichert und für eine spätere Auswertung zur Verfügung zu haben.

Die Aufnahme der Videobilder übernahmen zwei S-VHS-Videorecorder, mit Hilfe von spezieller Elektronik wurden zusätzlich Informationen eingeblendet. Es wird neben Datum und Uhrzeit auch ein Zählwerk für die Schussnummern angezeigt, damit alle durchgeführten Pelletsequenzen eindeutig und unabhängig voneinander identifiziert werden können.

4.3 Testschüsse der Pellets in den ASDEX Upgrade

Nach einer vollständigen Installation der Leidenfrost Gaskanone am ASDEX Upgrade, wurden zur Kontrolle erste Schüsse mit Deuteriumpellets in ein bestehendes Plasma durchgeführt.

Die zwei fliegenden Pellets in den Torus (vgl. Abbildung 29 und 30) zeigen, dass die Mechanik und die Elektronik der LEIKA soweit funktioniert und der Pelletinjektor betriebsfähig installiert wurde, damit eine anschließende Charakterisierung des Systems durchgeführt werden kann.

A-Port (Sector 5) Pelletinjektor

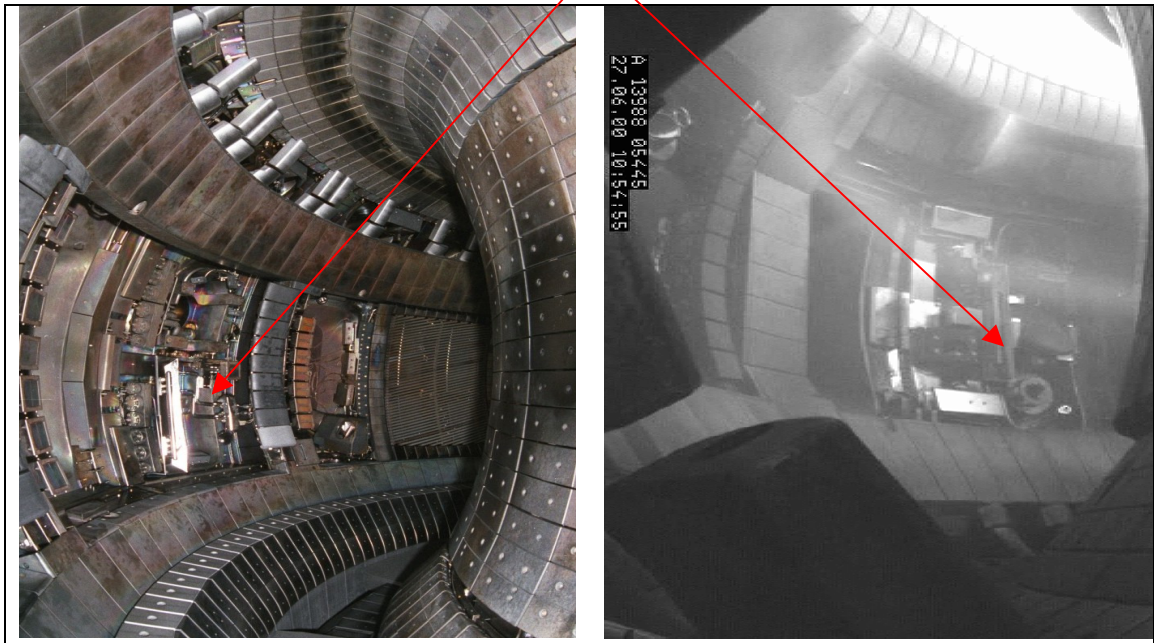


Abbildung 28: Referenzbilder zur Orientierung (Quelle: IPP)

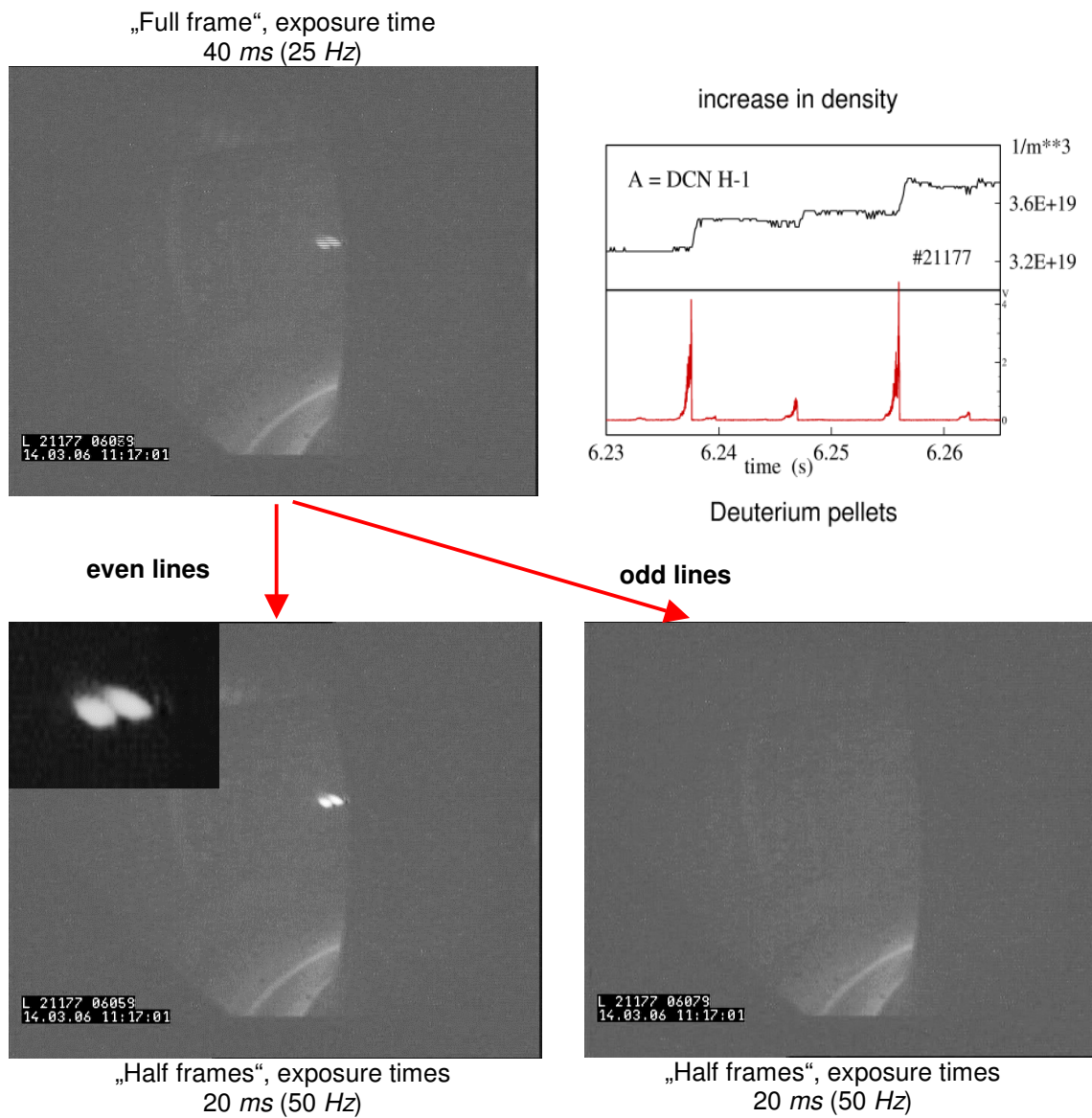


Abbildung 29: Testschuss #21177 mit dem neuen Pelletinjektor (diagnostics: H α -Diode, camera, light barriers)

5 Auswertung der Ergebnisse

Nach dem erfolgreichen Ende der Testkampagne im Versuchslabor lagen nun die Bereiche der Bedienparameter (m_p , v_p , f_p und ε) fest. Darauf hin wurde die Leidenfrost Gaskanone am ASDEX Upgrade installiert und die Sicherheitskontrollsysteme des AUG mit der LEIKA abgestimmt. In diesem Kapitel wird im Unterschied zu den im Kapitel 3 beschriebenen Versuchen nun über die Leistungsfähigkeit des Injektors hinsichtlich der Pelletgeschwindigkeit mit verschiedenen Treibgasarten Deuterium, Helium und Protium sowie Treibgasdrücken von 1- 9 bar_{abs} berichtet. Dieses Mal wurden kleinere Pellets von 1 mm Durchmesser verwendet.

5.1 Offline Messungen⁸

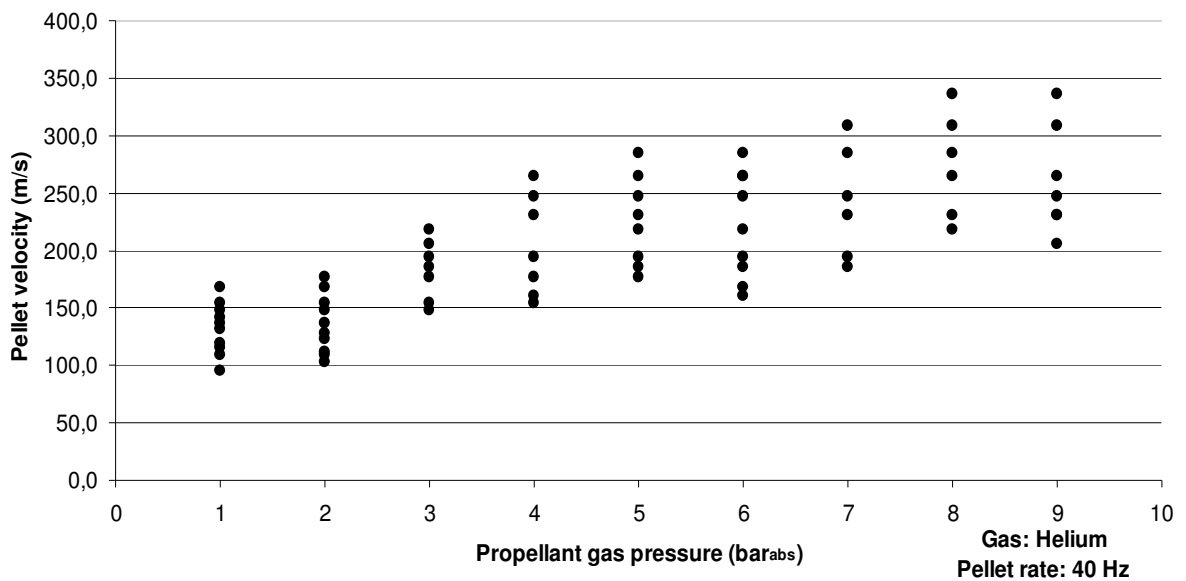


Abbildung 30: Pelletgeschwindigkeit gegen Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Helium; Pelletrepetitionrate 40 Hz

⁸ Offline Messungen sind Pelletschüsse gegen einen geschlossenen Schieber; nicht ins Plasma

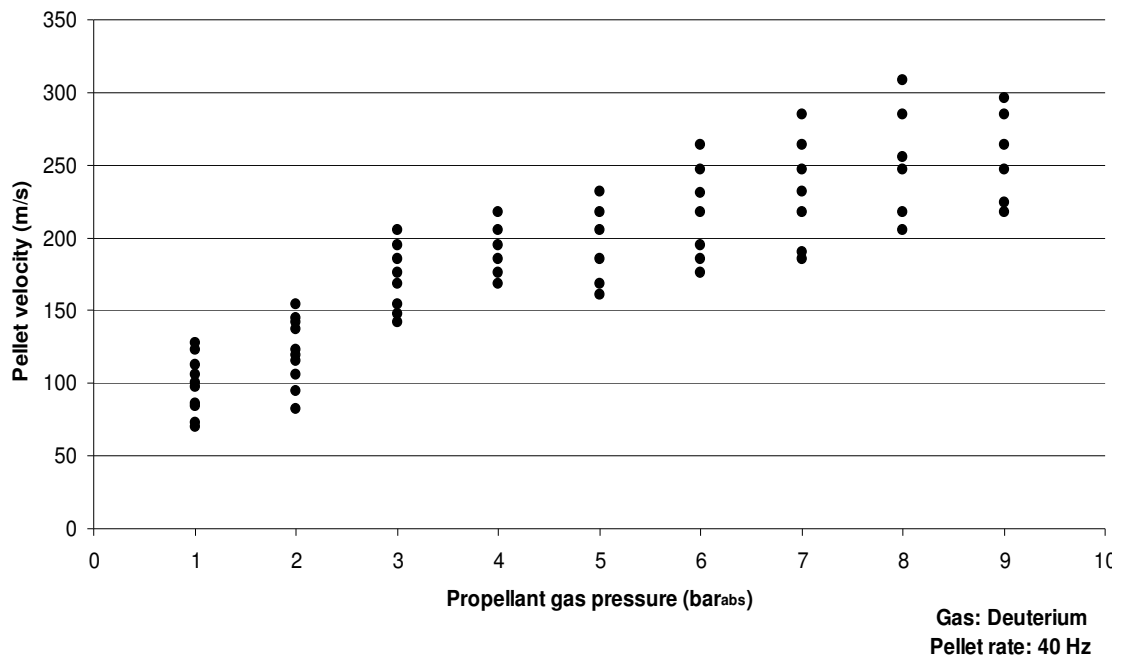


Abbildung 31: Pelletgeschwindigkeit gegen Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Deuterium; Pelletrepetitionsrate 40 Hz

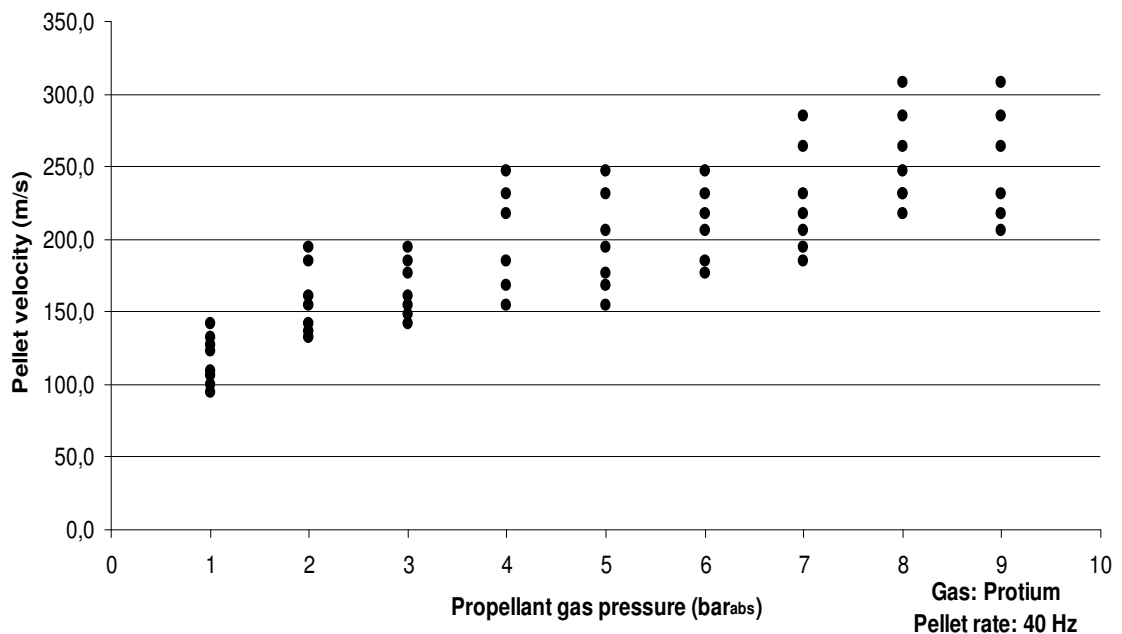


Abbildung 32: Pelletgeschwindigkeit gegen Beschleunigungsgasdruck; Treibgas: Protium; Pelletrepetitionsrate 40 Hz

Ursprünglich war zu erwarten, dass von den drei Gasen Protium 1H , Deuterium 2H und Helium 4He bei einer Pelletrate von 40 Hz die Geschwindigkeit des Protium am

höchsten ist. Dies ist dadurch begründet, dass dieses Wasserstoff- Isotop im Vergleich zu den beiden anderen Treibgasarten nur aus einem Proton und keinem Neutron im Kern besteht, also die geringste Masse aufweist und somit eine kleinere Schallgeschwindigkeit c_v besitzt. Der Geschwindigkeit des Protiums sollte das Deuterium mit mittleren Werten und letztlich das Helium mit geringsten Werten folgen.

Wie man aber aus den Abbildungen 30- 32 erkennen kann, sind die Ergebnisse der Pelletgeschwindigkeitsscans entgegengesetzt unserer Erwartungen. So weist gerade das Protium die langsamste und das Helium die schnellste Pelletgeschwindigkeit auf. Gründe für die Abweichung der Versuchsergebnisse im Gegensatz zu den physikalischen Annahmen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter geklärt, da zusätzliche Untersuchungen notwendig sind.

6 Zusammenfassung

Um ausreichenden ELMs in einer typischen ASDEX Upgrade type-I ELMy H-mode Entladung zu triggern werden an das Injektorsystem besondere Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Repetitionsrate, Pelletgröße sowie der Pelletgeschwindigkeit gestellt. Die bislang entwickelten Systeme basieren auf den Prinzipien, die bei der Gaskanone bzw. bei der Zentrifuge vorgefunden werden. Beide Methoden weisen aber eine Beschränkung bezüglich der Repetitionsrate auf. Der in dieser Arbeit vorgestellte Injektor, dessen Wirkungsweise auf dem Leidenfrost-Phänomen beruht, sollte die wesentlichen Vorteile der bisherigen Methoden vereinen, sowie eine hohe Repetitionsrate von bis zu 143 Hz zulassen.

Hauptbestand dieser Diplomarbeit war es, den Leidenfrost-Injektor am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade zu installieren und in Betrieb zu nehmen. Anschließend wurde eine Charakterisierung des Systems durchgeführt, um festzustellen, ob die gestellten Anforderungen erfüllt werden können. Im Verlauf der Versuchsreihen stellte sich heraus, dass allen Forderungen entsprochen wird.

Die Testschüsse für die Charakterisierung der Leistungsfähigkeit des Injektors wurden alle Offline durchgeführt, da durch einen defekten Generator (Stromerzeugung für den ASDEX Upgrade) zunächst für eine unbestimmte Zeit alle „Plasma-Schüsse“ abgesagt wurden. Deshalb wurden anschließende Tests gegen einen geschlossenen Schieber durchgeführt. Folglich waren keine weiteren physikalischen Untersuchungen während der letzten Versuchsphase mehr möglich.

Optimierung und Aussage über die Pelletqualität und –lieferung sind Bestand weiterer Untersuchungen, die mit Hilfe neuester Videoanalyse durch die ungarischen Kollegen von „KFKI RMKI, EURATOM Association“ übernommen werden.

7 Anhang A Ausliterung und Volumina des Vakuumkessels im Pelletlabor

Volumina Vakuumkessel – Berechnung per Hand Anbauten am Schieber (Aufbau Supersonic-Ventil Cardarache)

Messrohr am Schieber

$$d = 0,0975 \text{ m}; \quad L = 0,22 \text{ m}$$

$$V = 0,001643 \text{ m}^3 = 1,643 \text{ l}$$

4 x Anschlüsse am Messrohr

$$d = 0,04 \text{ m}; \quad L = 0,04 \text{ m}$$

$$V = 0,000201 \text{ m}^3 = 0,201 \text{ l}$$

Rohr

$$d = 0,0975 \text{ m}; \quad L = 0,66 \text{ m}$$

$$V = 0,004928 \text{ m}^3 = 4,928 \text{ l}$$

Adapter 100-150

$$d = 0,0975 \text{ m}; \quad L = 0,11 \text{ m}$$

$$V = 0,000821 \text{ m}^3 = 0,821 \text{ l}$$

2 x Anschlüsse am Rohr

$$d = 0,016 \text{ m}; \quad L = 0,03 \text{ m}$$

$$V = 1,21\text{E-}05 \text{ m}^3 = 0,012 \text{ l}$$

Kugel

$$r = 0,12 \text{ m};$$

$$V = 0,007238 \text{ m}^3 = 7,238 \text{ l}$$

Kugelabschnitte

$$h = 0,028$$

$$V = 0,000273 \text{ m}^3 = 0,273 \text{ l}$$

Kugelanschlüsse

$$d = 0,154 \text{ m}; \quad L = 0,076 \text{ m}$$

$$V = 0,001416 \text{ m}^3 = 1,416 \text{ l}$$

Vakuumkugel

$$V = 0,009524 \text{ m}^3 = 9,524 \text{ l}$$

Adapter 150 – 35

$$d = 0,035 \text{ m}; \quad L = 0,075 \text{ m}$$

$$V = 7,22\text{E-}05 \text{ m}^3 = 0,072 \text{ l}$$

Gesamtvolumen Testaufbau Ventil bis Schieber:

$$\underline{V = 0,017201 \text{ m}^3 = 17,201 \text{ l}}$$

Literaturverzeichnis

- [2] Lako, P. et al.: *Long-Term Scenarios and the Role of Fusion Power*, Laborbericht ECN-C-98-095. o.O.:1999
- [3] Bradshaw, M. A.: *Anhörung Kernfusion im Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages am 28.03.2001*, Antworten von Prof. A. M. Bradshaw., Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Garching: 2001
- [4] LTI-Research Group: *Long Term Integration of renewable Energy Sources into the European Energy System*. Heidelberg: 1998
- [5] Hörning, G. et al.: *Fusionsenergie – eine akzeptable Energiequelle der Zukunft?*, Arbeitsbericht der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Nr. 145. o. O.: 1999
- [6] IPP Öffentlichkeitsarbeit
- [9] Winter, J.: *Plasma Phys. Control. Fusion*. o.O. 1996, S. 1503-1542
- [6] WITTMANN, Chr.: *Installation und Inbetriebnahme eines Führungsrohrsystems für den repetierenden Einschuss fester Deuterium- Pellets zur Teilchennachfüllung in das Fusionsexperiment ASDEX Upgrade*. Diplomarbeit FH Regensburg, FB Maschinenbau: 2005
- [14] Lang, P.T. et al.: *Cryogenic pellet launcher adapted for controlling of tokamak plasma edge instabilities*. In Vorbereitung zur Veröffentlichung
- [15] MERTENS, V. et al.: *Fusion Science and Technology*. Garching. 2003, S. 44
- [16] o. A., *Grundlagen der Vakuumtechnik, Berechnungen und Tabelle*; Leybold Vakuum AG, Kat. Nr. 19989, Auflage 09/87

- [17] NEU, R. et al.: *Nucl. Fusion. Garching*: 2005, S. 45
- [18] GILLIARD, R. et al.: *Rev. Sci. Instrum.* O.O.: 1981, S. 51

Webadressen

- [1] <http://ipp.mpg.de/ipp2.html> (Sichtungsdatum März 2006)
- [7] <http://www.kfa-juelich.de/ipp/> (Sichtungsdatum März 2006)
- [8] <http://www.jet.efda.org/> (Sichtungsdatum März 2006)
- [10] <http://www.iter.org/index.htm> (Sichtungsdatum März 2006)
- [11] http://www.dgp-tagung.de/archive/1999/k_2.html
(Sichtungsdatum März 2006)
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Leidenfrost-Effekt>
(Sichtungsdatum März 2006)
- [13] <http://www.dgp-tagung.de/program/augsburg/p3.pdf>.
(Sichtungsdatum März 2006)

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift