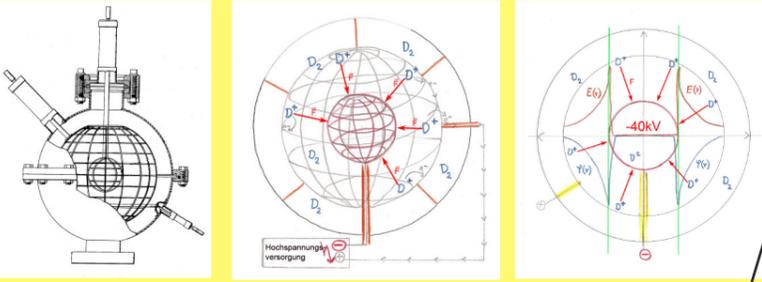


# Inertial Electrostatic Confinement Fusion

## Methode und neuartige Entwicklung zur Effizienzsteigerung

### Klassischer Versuchsaufbau



#### Nachteile:

- Ionisation der Moleküle nur durch -Feldionisation zwischen Gitterkathode und Anode
- Stoßionisation hervorgerufen durch Elektronenstrom
- hoher Verlust durch Elektronenstrom

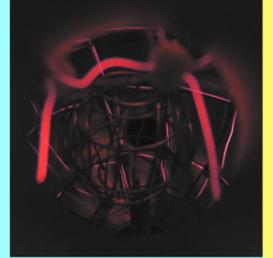
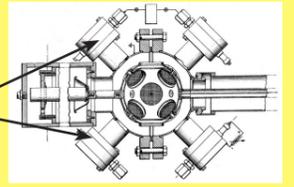
ungleichmäßige energetische Verteilung der beschleunigten Ionen!

### Möglichkeiten zur Problembewegung

- Erhöhte Ionisation durch Einsatz von
  - Ionenkanonen → nur punktuelle Ionisation möglich
  - Radioaktive Strahler → ökologisch bedenklich

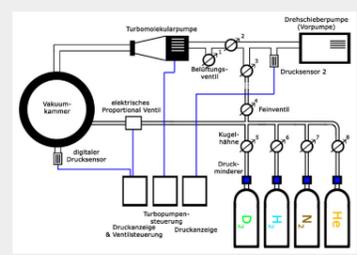
unsere Alternative:  
**-Filamentdrähte**

Eine neuartige *Filamentdrahtbespannung* wird außerhalb der Gitteranode durch Niederspannung zum Glühen gebracht. An der Gitterkathode liegt eine Spannung von ca. +1000V an, sodass ein elektrisches Feld zwischen Filamentdrahtbespannung und Anode besteht. Es werden nun Elektronen aus dem Material des Glühdrahts herausgelöst und zur Gitteranode beschleunigt. Die so beschleunigten Elektronen können nun in einer Kettenreaktion durch Stoßionisation viele Deuteriummoleküle zu Deuteronen umwandeln.



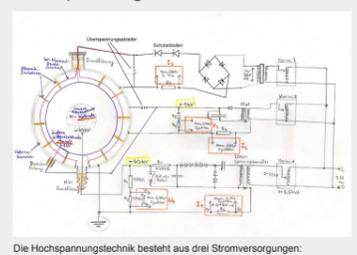
### Technische Realisierung

#### Vakuum- und Gastechnik



Da das Fusionsplasma nur bei geringen Gasdichten und Drücken entstehen kann, wurde im Versuchsaufbau eine Drehschieberpumpe mit einer Turbomolekelpumpe kombiniert. Durch kontrollierte Gaszufuhr von Helium, Stickstoff, Wasserstoff oder Deuterium können Plasmen mit verschiedenen Gasen erzeugt und verglichen werden. Über ein Proportionalventil kann durch variablen Gasstrom der Druck reguliert und mit einem digitalen Drucksensor gemessen werden.

#### Hochspannungstechnik

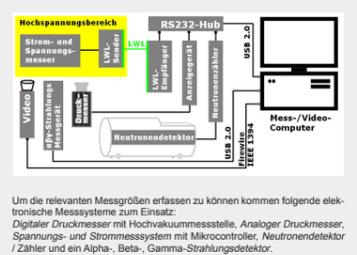


Die Hochspannungstechnik besteht aus drei Stromversorgungen:
 

- Kathodenversorgung
- Anodenversorgung
- Filamentdrahtversorgung

 Jede der Ausgangsspannungen kann über Regeltransformatoren stufenlos geregelt werden. Die Kathodenstromversorgung ist essentiell für die Beschleunigung der Deuteronen zur Gitterkathode. Mit der Anodenversorgung wird ein elektrisches Feld zwischen Filamentdraht und äußerer Gitterkugel erzeugt. Geheizt werden die Filamentdrähte durch eine Niederspannungsversorgung.

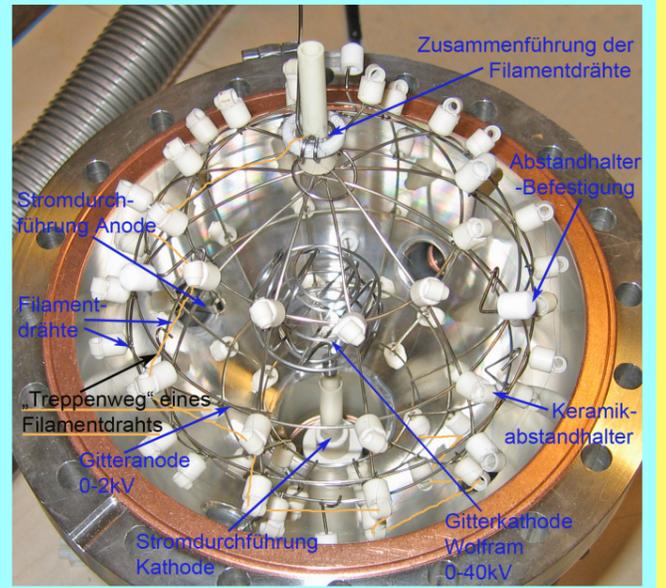
#### Messtechnik



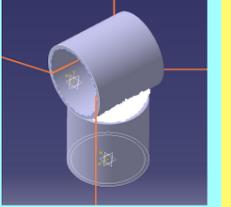
Um die relevanten Messgrößen erfassen zu können kommen folgende elektronische Messsysteme zum Einsatz:
 

- Digitaler Drucksensor mit Hochvakuummessstelle, Analoger Drucksensor, Spannungs- und Strommesssystem mit Mikrocontroller, Neutronendetektor / Zähler und ein Alpha-, Beta-, Gamma-Strahlungsdetektor.

 Die Kommunikation mit den Messgeräten erfolgt überwiegend über RS-232. Um alle Daten mit einem PC in Echtzeit speichern zu können werden alle RS-232 Signale über ein RS-232-to-USB Hub zusammengefasst und über ein USB-Kabel zum PC übertragen. Dort werden die Daten mit einer LabVIEW Anwendung erfasst, verarbeitet, dargestellt und gespeichert. Die Software übernimmt neben der Datenerfassung auch einige Berechnungen zu aktuellen Werten wie Fusionsrate und Leistungsaufnahme.



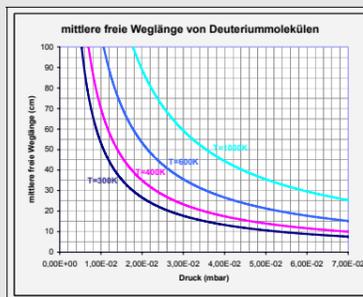
Die Wolfram-Filamentdrähte laufen jeweils parallel zur Gitteranode in einem Abstand von ca. 1cm. In einer aus Filamentdrähten bestehenden Gitterkugel würden, wenn oben und unten mit einer Spannungsquelle angeschlossen ist, nur die vertikalen Dräht zum Glühen gebracht. Um dennoch die gesamte Gitterkathode mit glühenden Filamentdrähten zu umspannen wurden diese treppenförmig durch Abstandhalter geführt.



#### Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist auf einem Plattformwagen aufgebaut. Bereits zu Beginn der Planung wurde festgesetzt, dass die Hochspannungsversorgung streng vom Niederspannungsbereich, der Messtechnik und der realistischen Parapherie getrennt wird. In der linken Hälfte der Unterlage des Wagens befindet sich die Hochspannungstechnik. Rechts sind wichtige Steuerungs- und Messgeräte, die Drehschieberpumpe sowie die Gasflaschen und Messgeräte, die Drehschieberpumpe sowie die Gasflaschen und Messgeräte, die Drehschieberpumpe sowie die Gasflaschen und Messgeräte.

### Experimentelle Ergebnisse



Die *mittlere freie Weglänge* von Gasmolekülen (Durchmesser  $d$ ) hängt von Temperatur und Druck des Gases ab:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}d^2 p}$$

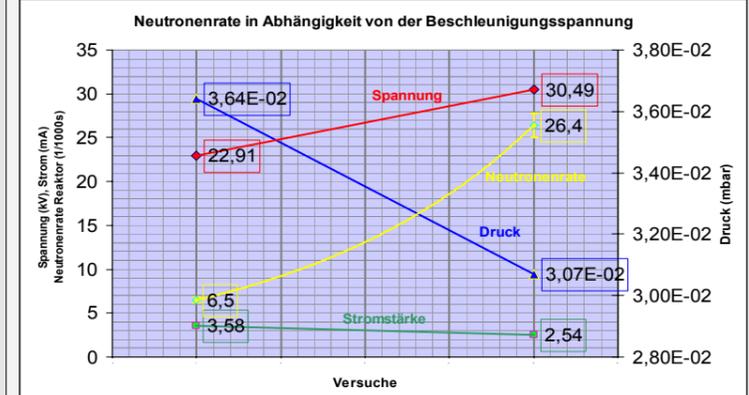
Bei der Erzeugung von Fusionsplasmen sollte der Gasdruck in der Vakuumkammer einen bestimmten Höchstwert nicht überschreiten, da sonst die Beschleunigungsstrecke zwischen Gitterkathode und Anode nicht mehr stoßfrei durchlaufen werden kann. Der Gasdruck in der Kammer sollte dabei höchstens so eingestellt werden, dass die mittlere freie Weglänge mindestens die Hälfte des Kammerdurchmessers beträgt. Mit dem vorliegenden Versuchsaufbau sind also nur Gasdrücke von  $p < 7 \cdot 10^{-2}$  mbar sinnvoll.

Im Versuch muss jedoch ein Kompromiss zwischen geringem Gasdruck und Stromstärke gefunden werden. Der Druck sollte so niedrig eingestellt werden, dass die Stromstärke bei der anliegenden Spannung gerade noch groß genug ist um ein Plasma zu erzeugen.

Um die physikalischen Zusammenhänge der Fusionsrate zu verstehen wurden verschiedene Experimente bei annähernd gleicher Stromstärke, jedoch unterschiedlicher Beschleunigungsspannung durchgeführt. Die Neutronenrate hängt im Wesentlichen von der Beschleunigungsspannung ab.

$$R_n = \frac{4\pi r^2}{k_n} \cdot R_n(\text{Detektor}) \cdot f_D$$

$r$  Abstand des Detektors zum Mittelpunkt der Vakuumkammer (cm)  
 $k_n$  Konversionsfaktor Neutronen  $k_n(2,45MeV) = 1,5 \frac{\mu Sv}{h \cdot cm^2 \cdot s}$   
 $R_n(\text{Detektor})$  Zählrate des Neutronendetektors (1/s)  
 $f_D$  Faktor des Detektors zum Umrechnen von  $R_n$  in H (im Versuch  $f_D = 3,866 \frac{\mu Sv \cdot s}{h}$ )



Für Effizienzvergleiche ist es sinnvoll die für die Produktion eines Neutrons notwendige *Eingangsenergie* zu berechnen:

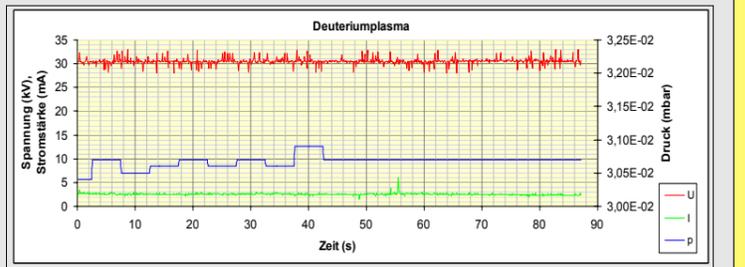
$$\frac{W}{\text{Neutron}} = \frac{\int_{t_1=0}^{t_2} P(t) dt}{N_{\text{Neutronen}}} = \frac{\int_{t_1=0}^{t_2} U(t) \cdot I(t) dt}{N_{\text{Neutronen}}}$$

#### Vorgehensweise zur Erzeugung von Fusionsplasmen bei hohen Spannungen

Das Verhalten der jeweiligen Plasmen hängt sehr stark von dem Gas in der Vakuumkammer ab. Die Stromstärke hängt sowohl von der Beschleunigungsspannung als auch von dem Druck in der Vakuumkammer ab.

- Die Stromstärke ist umso größer
- je höher der Druck
- je höher die Beschleunigungsspannung ist.

Bei Versuchen muss besonders darauf geachtet werden, dass die Stromstärke nicht zu groß ist. Erfahrungsgemäß führen hohe Stromstärken ( $> 20mA$ ) zu einer nicht mehr kontrollierbaren Kettenreaktion. Die Gitterkathode fängt an hellrot zu glühen und es werden zunehmend Elektronen von der Gitterkathode emittiert. *Hochspannungsüberschläge* und ein *instabiles Plasma* sind die Folge. Zum Erzielen von hohen Beschleunigungsspannungen ist es daher hilfreich das Plasma bei hohem Druck und niedriger Spannung zu zünden.



Messwerte		Berechnungen					
Versuchsdauer	Druck	Kathodenstromstärke	Kathodenstromstärke	Leistung	Neutronenrate	Eingangsenergie je Fusionsneutron	Fusionsleistung
$t = 86s$	$\bar{p} = 3,07 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$	$\bar{I} = -30,50kA$	$\bar{U} = 2,54mV$	$\bar{P} = 77,6W$	$R_n = 26,365/s$	$E/n = 2,9 \cdot 10^{-13} J/n$	$P_{fus} = 31mW$
$\Delta t = 3s$	$\sigma_p = 9 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$	$\sigma_I = 0,65kV$	$\sigma_U = 0,20mV$	$\Delta \bar{P} = 5,9W$	$\Delta R_n = 1350/s$	$\Delta E/n = 2,8 \cdot 10^{-13} J/n$	$\Delta P_{fus} = 1,6mW$

#### Anwendungsmöglichkeiten:

- Ein IEC-Gerät mit verbesserter Ionisationsmethode durch Filamentdrähte könnte in verschiedenen Bereichen als transportable Neutronenquelle dienen:
  - Grundlagenforschung
  - IEC-Neutronenaktivierungsanalyse
  - künstliche Erzeugung von Isotopen
  - neuartige Gepäckdurchleuchtungsgeräte

- #### Vorteile:
- Die transportable Neutronenquelle ist
    - kompakt.
    - abschaltbar.
    - regulierbar in Neutronenemission.

#### Zukünftige Projektpläne

- Detaillierte Untersuchung der Fusionsleistung mit
- unterschiedlichen Drücken und Spannungen
  - Filamentdrähten und Einsatz der Gitteranode
  - verschiedenen Gitterkathoden (variabler Durchmesser und Maschenanordnung)
  - Betrieb im Hochvakuum  $p < 10^{-5}$  mbar
  - spektroskopischen Analysen zur Bestimmung von Plasmatemperatur und Dichte
  - Einsatz von Protonendetektoren zur Lokalisation der Fusionsreaktionen

weitere Informationen abrufbar unter [www.bigel-labs.de](http://www.bigel-labs.de)