Heizung von Fusionsplasmen mit induzierten Strömen und elektromagnetischen Wellen

Andreas Hirczy

9. Februar 2000

Zusammenfassung

In diesem Referat wird kurz in die Verfahren zur Heizung von Fusionsplasmen eingeführt. Heizungsvarianten auf Basis von Teilcheneinschuß werden nicht behandelt.

Warum Heizen

- zum Erreichen der zur Fusion notwendigen Temperatur $T \geq 10\,\mathrm{keV}(\approx 10^8\,\mathrm{K})$, bis die Heizung durch Fusion ausreicht
- Ausgleich für Energieverluste ($\frac{3}{2}kT$ pro Teilchen)
  Abschätzung am Beispiel eines Torus mit quasineutralem, sauberem Plasma:

$$r = 0.5\,\mathrm{m} \qquad R = 4\,\mathrm{m}$$

$$n = n_{ion} = n_{elek} = 10^{20}\,\mathrm{m}^{-3}$$

$$T = T_{ion} = T_{elek} = 10\,\mathrm{keV} \approx 1.6 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{J}$$

$$\tau_e = 1\,\mathrm{s}$$

$$V_P = 2\pi^2 r^2 R \approx 20\,\mathrm{m}^3$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{E}{\tau_e} \\ &= \frac{V_P \cdot 2nT}{\tau_e} \\ &\approx 64\,\mathrm{MW} \end{aligned}$$

Übersicht der Heizmethoden

- Ohmsche Heizung
- Heizung mit elektromagnetische Wellen im Bereich der Radiofrequenzen (RF, *radio frequency*) unter Ausnutzung von Resonanzeffekten
  - ECRH, *electron cyclotron resonant heating*
  - LHH, *lower hybrid heating*
  - ICRH, *ion cyclotron resonant heating*
  - *cavity resonance*
- *collisional magnetic pumping*
- Einschuß von Neutralteilchen (NBI, *neutral beam injection*)

Ohmsche Heizung

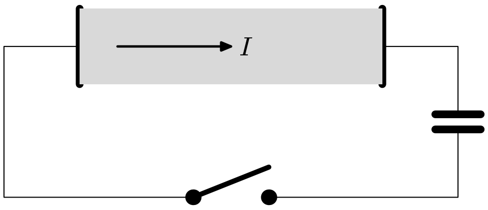
- Ohmsche Heizung wird vor allem im Tokamak verwendet, ist dort aber auch zwangsläufig mit dem toroidalen Strom zur Stabilisierung verbunden.
- Ohmsche Heizung ist vor allem bei niedrigen Temperaturen (bis zu einigen keV) effizient, bei höheren Temperaturen ist der Widerstand des Plasmas gering:

$$
\begin{aligned}
R_p &\propto Z_{eff} \cdot T^{-3/2} \\
P_H &= I_p \cdot U \\
&\propto I_p^2 \cdot Z_{eff} \cdot T^{-3/2}
\end{aligned}
$$

- Zu hohe Ströme beeinträchtigen die Stabilität des Plasmas.
- Verunreinigung (höheres Z_{eff}) erhöhen die Heizleistung, verursachen aber auch größere Energieverluste durch Strahlung.

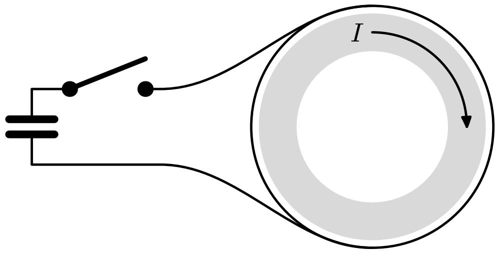
Ohmsche Heizung: Einkopplung

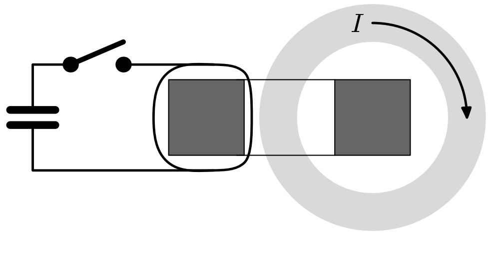
Elektroden: typische Anwendung: Z-Pinch



magnetische Induktion: typische Anwendung: Tokamak

Das toroidale Plasma bildet die Sekundärwicklung eines Transformators; primärseitig muß ein über längere Zeit kontinuierlich steigender Strom angelegt werden. Die magnetische Kopplung kann mit oder ohne Eisenkern ausgeführt sein.





Radiofrequenzresonanzheizung

- Bei der Radiofrequenzresonanzheizung wird durch Einstrahlung elektromagnetischer Wellen geheizt. Die Frequenz muß so gewählt werden daß im Plasma Resonanz und damit Absorption auftritt.
- Absorption soll vor allem im Inneren des Plasmas auftreten; denn wenn bereits am Rand geheizt wird, können einige unerwünschte Effekte auftreten:
  - Temperatur- und Dichteverteilung sind gegenläufig
  - teilweise Reflexion der Wellen am Rand
  - Sputtern der Wand wegen der heißen Randschichten des Plasmas
  - Plasma-Instabilitäten

  Weil das Magnetfeld mit dem großen Radius R des Torus abnimmt, kann die Lage der Absorptionszone im Allgemeinen gut gesteuert werden.
- Wellen mit einer Frequenz kleiner der Elektronen-Plasma-Frequenz

  $$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}$$

  regen die Elektronen im Plasma zum Mitschwingen an. Sie werden deshalb bei häufigen Kollisionen zwischen den Elektronen bereits in den Randschichten absorbiert.

Wenn dese Kollisionen selten auftreten, wird ein großer Teil der Welle reflektiert.

- Wellen können sich im Plasma fortpflanzen, wenn die Elektronendichte die *critical number density*

$$n_c = \frac{\omega^2 \epsilon_0 m_e}{e^2 E}$$

nicht überschreitet; sonst wird die einlaufende Welle reflektiert.

- Beim Plasma unter Einfluß eines Magnetfeldes werden 2 Moden unterschieden:

  ordinary mode: Das Magnetfeld und das elektrische Feld der Welle sind parallel; das Verhalten des Systems entspricht weitgehend dem Fall ohne Magnetfeld.

  extraordinary mode: Das Magnetfeld und das elektrische Feld der Welle stehen normal aufeinander. Die Welle kann sich auch bei Überschreiten der *critical number density* und Unterschreiten der Elektronen-Plasma-Frequenz im Plasma ausbreiten.

- Der Gesamtwirkungsgrad der angeführten Methoden liegt bei $\eta \approx 0.2 \ldots 0.5$.

ICRH: Die Frequenz der eingestrahlten Welle entspricht der Ionen-Zyklotron-Frequenz

$$\omega_{ci} = \frac{qB}{m_i c} \approx 30 \ldots 60\,\mathrm{MHz}$$

oder harmonischen Vielfachen davon.

Wegen der Wellenlängen im Meterbereich ($\lambda \approx 5 \ldots 10\,$m) sind für effiziente Abstrahlung große Antennen ($\geq \lambda/4$) nötig; darüberhinaus breiten sich diese Wellen als Alfvén-Wellen in dünnem Plasma schlecht aus, die Antennen müssen daher nahe am Plasmarand angebracht werden. Allerding sind die verwendeten Frequenzen gut beherrschbar und die Wellen mit gängiger Technik erzeugbar.

ECRH: Die Frequenz der Welle entspricht der Elektronen-Zyklotron-Frequenz

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e c} \approx 100 \ldots 200\,\mathrm{GHz}.$$

- Die Elektronen werden direkt angeregt und geben ihre thermische Energie durch Stöße teilweise an die Ionen ab.
- Die Welle breitet sich gut im Vakuum aus; wegen der kurzen Wellenlängen ($3 \ldots 1,5\,$mm) kann das offenen Ende eines Hohlleiters in der Behälterwand (mit etwas Impedanzanpassung) als Antenne verwendet werden.
- Die Erzeugung von Wellen hoher Energie ist bei diesen Frequenzen aufwendig und teuer.

LHH: Das *lower hybrid resonance heating* arbeitet im Frequenzbereich von $\omega \approx 1 \ldots 5\,$GHz ($\lambda \approx 6 \ldots 30\,$cm).

- Die Energie wird durch Landau-Dämpfung auf die Ionen und Elektronen übertragen. Die Partikel werden durch die Potentialmaxima im elektrischen Feld eingeholt und beschleunigt („surfen“).

- Die Resonanzfrequenz ist von der Plasmadichte abhängig, deshalb ist die Heizzone nicht so einfach kontrollierbar wie bei ICRH/ECRH.
- Als Antenne können wie beim ECRH die offenen Enden von Hohlleitern verwendet werden.
- Durch geschickte Anordnung der Antennen in Arrays und unter Beachtung der relativen Phasen der abgestrahlten Wellen kann Energie tangential in Elektronen mit hoher Temperatur eingekoppelt werden. Dadurch wird auf nicht induktive Weise ein Strom im Plasma angeregt.

cavity resonance: Die eingestrahlte Welle steht in Resonanz mit dem Behälterinnenraum; daher kann wegen der möglichen hohen Feldstärken auch bei geringer Absorption eine substantielle Heizleistung erzielt werden.

Collisional electric pumping

Dem statischen Magnetfeld wird ein vergleichsweise schwaches magnetisches Wechselfeld niedriger Frequenz ω überlagert. Das magnetische Moment μ eines gyrierenden Ions ist annähernd konstant, weil die Änderung des Magnetfeldes langsam gegenüber der Gyrationsfrequenz ist:

$$\mu = \frac{mv_\perp^2}{2B} = \frac{E_\perp}{B} = \mathrm{const.}$$

$$\frac{d\mu}{dt} = 0 = \frac{1}{B}\frac{dE_\perp}{dt} - \frac{E_\perp}{B^2}\frac{dB}{dt}$$

$$\frac{dE_\perp}{dt} = \frac{E_\perp}{B}\frac{dB}{dt}$$

Im zeitlichen Mittel ändert sich die Energie dadurch nicht. Durch die periodische Änderung der Energie $E_\perp$ wird die Gleichverteilung der gesamten Partikelenergie $E = E_\perp + E_{||}$ gestört. Bei Stößen mit anderen Teilchen kann dieses Gleichgewicht wiederhergestellt werden. Damit wird Energie von $E_\perp$ zu $E_{||}$ übertragen.

Damit diese Art der Heizung effizient funktioniert, muß die Stoßfrequenz zwischen den Ionen und die treibende Frequenz ω klein verglichen mit der Gyrationsfrequenz sein. Außerdem müssen die entsprechenden Periodendauern kleiner als die Aufenthaltszeit der Ionen im modulierten Bereich sein.