

Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg  
Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Gesundheit

Projektarbeit im Studiengang Zukunftstechnologien  
über das Thema:

**Detektion von Fehlmessungen der Divertor Langmuir Sonden des  
Stellaratorexperiments W7-X für OP2.2/OP2.3**

vorgelegt von:

Lisa Steiniger

Bornaische Straße 186a

04279, Leipzig

li.steiniger@gmx.de

Matrikelnummer: 00898522

Abgabe: 08.02.2026

Interner Betreuer: Prof. Dr. Michael Wick

Externer Betreuer: Arun Pandey

# Abstract

# Inhaltsverzeichnis

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| Abstract                            | II |
| 1 Einleitung                        | 1  |
| 2 Langmuir Sonden                   | 3  |
| 3 Detektion von Fehlmessungen       | 4  |
| 4 Ergebnisse und Auswertung         | 5  |
| 5 Diskussion                        | 6  |
| 6 Zusammenfassung                   | 7  |
| 7 Ausblick                          | 9  |
| Literatur                           | 9  |
| 8 Appendix A: Formelzeichen         | 10 |
| 9 Appendix B: Abkürzungsverzeichnis | 12 |

# 1 Einleitung

Fusion stellt eine Möglichkeit der sauberen Energiegewinnung dar, die durch den weltweit steigenden Energiebedarf und die Bedrohung durch den Klimawandel immer mehr Interesse auf sich zieht. Dabei wird die Eigenschaft von Fusionsreaktionen - also dem Verschmelzen zweier Atomkerne zu einem schwereren Atomkern sowie unter Umständen einem subatomaren Teilchen - genutzt, dass ein Teil der Masse der Ausgangsstoffe in Energie umgewandelt und abgestrahlt wird. In der Regel wird die Reaktion der Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium als am erfolgsversprechendsten betrachtet, da sie mit höherer Wahrscheinlichkeit schon bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen abläuft. Bisher gibt es allerdings noch kein Kraftwerk, das Fusion als wirtschaftliche Energiequelle nutzt. Es wird jedoch an verschiedenen Reaktorkonzepten geforscht, um ein solches zu realisieren.

Eines der größten Probleme beim Bau eines Fusionsreaktors ist der Einschluss des Plasmas, in dem die Fusionsreaktionen ablaufen. Der Grund dafür liegt in den hohen Plasmatemperaturen von mehreren 100 Mio. °C und damit einhergehenden thermischen Belastungen, denen kein Material standhält. Auf Dauer akzeptabel sind nur 10 MW/m<sup>2</sup>, was bei direktem Kontakt zwischen Material und Plasma überschritten wird. Demnach muss der Plasmaeinschluss anderweitig gestaltet werden. Die vielversprechendsten Ansätze sind Inertialeinschluss und magnetischer Einschluss. Bei letzterem schließt ein toroidal geschlossenes und poloidal verdrilltes Magnetfeld das Plasma ein. Zur Realisierung eines solchen Magnetfelds gibt es wieder zwei Hauptkonzept - Tokamaks und Stellaratoren. Auf das Prinzip eines Stellarators wird an dieser Stelle genauer eingegangen.

Stellaratoren kennzeichnen sich durch die Eigenschaft, dass ihr Magnetfeld ausschließlich durch externe Spulen erzeugt wird. Das bedeutet, es ist kein Plasmastrom notwendig, um das Magnetfeld aufzubauen. Dieser Umstand bringt den Vorteil mit sich, dass kontinuierlicher Betrieb möglich ist und Instabilitäten durch Änderung des Plasmastroms geringer ausfallen. Der Preis dafür ist eine komplexe Geometrie der Spulen und der Wegfall vollständiger toroidaler Symmetrie. Stattdessen tritt modulare Symmetrie in Reaktor und Magnetfeld auf.

Der Stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Greifswald ist eine der größten und am weitesten entwickelten Anlagen dieser Art. Er ist seit 2015 in Betrieb und untersucht vornehmlich Wasserstoffplasmen (H<sup>+</sup>). Die Anlage sowie das Magnetfeld weisen eine fünfzählige toroidale Symmetrie auf, die sich in der Unterteilung in fünf Module (M1-M5) widerspiegelt. Außerdem besteht jedes Modul

aus zwei identischen,  $180^\circ$ -rotationssymmetrischen Halbmodulen (HM) - einem oberen und einem unterem.

Durch das Anlegen verschiedener Spulenströme kann eine Vielzahl Magnetfeldkonfiguration gefahren werden, die sich in der Form des eingeschlossenen Plasma unterscheiden. Sie alle teilen sich jedoch den allgemeinen Plasmaaufbau aus dem im Inneren liegenden besonders heißen Core Plasma und den außen herum angeordneten kühleren magnetischen Inseln, welche das Randplasma bilden. Getrennt sind diese Bereiche durch die sogenannte Separatrix. Während das Core Plasma geschlossene Magnetfeldlinien aufweist, werden die der magnetischen Inseln von Wandkomponenten des Plasmagefäßes geschnitten.

Die am häufigsten vertretenen Magnetfeldkonfigurationen sind die Low-Iota Konfiguration DBM, die Standardkonfiguration EIM, die High-Mirror Konfiguration KJM und die High-Iota Konfiguration FTM. Iota ist dabei die Kenngröße der Rotationstransformation und drückt die Verdrillung des Magnetfelds aus. Für jede Magnetfeldkonfiguration variiert die Position der magnetischen Inseln und damit auch die Position, an der die Wandkomponenten ihre Magnetfeldlinien schneiden. Die dadurch entstehende Kontaktfläche wird Strikeline genannt und kennzeichnet sich durch höhere Teilchenflussdichten der auftreffenden Teilchen. Dadurch wird diese Region stärker erhitzt und muss entsprechend widerstandsfähig sein. Aus diesem Grund liegt die Strikeline auf dem High Heat Flux Carbon Fibre Composite Divertor, einem wassergekühlten Wandelement, das solchen thermischen Belastungen standhält.

Pro Halbmodul gibt es eine Divertoreinheit. Diese wird unterteilt in vertikale und horizontale Targets, welche durch den Pumpspalt getrennt sind. Weiterhin kann nach Targetmodulen (TMs) und innerhalb dieser in Targetelemente (TEs) unterschieden werden. Zusätzlich können noch drei Bereiche des Divertors festgelegt werden: Der low-iota Bereich, der zentrale Teil und die high-iota Region. Diese Bezeichnungen rühren von der Position der Strikeline für Magnetfeldkonfigurationen mit unterschiedlichen Iota-Werten her. Starke Magnetfeldverdrillung (hohes Iota) wie bei FTM erzeugt eine Strikeline im high-iota Bereich des Divertors, schwache Verdrillung (niedriges Iota) wie bei DBM, EIM und KJM eine Strikeline im low-iota Bereich.

## 2 Langmuir Sonden

Um das Verhalten des Plasmas während einer einzelnen Entladung beobachten zu können, ist eine Vielzahl unterschiedlicher Diagnostiken in W7-X verbaut, die die Bestimmung verschiedener Plasmaparameter erlaubt. Zu diesen Diagnostiken zählen unter anderem die im Plasmagefäß angebrachten Langmuir Sonden (LS).

Auf den Wandelementen von W7-X – konkret auf dem Divertor in Modul 5 (M5) – sind 36 LS montiert. Sie befinden sich an symmetrischen Positionen der oberen und unteren Divertoreinheit (DU, je 18 LS pro DU) im high- und low-iota Bereich (4 LS bzw. 14 LS) und ermöglichen dort unter anderem die Messung von Elektronendichte und Elektronentemperatur. Aufgrund der hohen thermischen Lasten von  $100 \text{ MW/m}^2$  –  $200 \text{ MW/m}^2$  können die Sonden dem Plasma nicht dauerhaft ausgesetzt sein, da das Material schmelzen und die Sonden zerstört würden. Stattdessen handelt es sich um sogenannte Pop-up Langmuir Sonden, die in Intervallen ins Plasma ein- und ausgefahren werden. Das resultiert in einer diskontinuierlichen Messung etwa aller 2-3 s.

Die Funktionsweise einer LS ist die Folgende: Die Stromstärke an der Probe wird in Abhängigkeit der an der Sonde angelegten Spannung gemessen, welche zwischen -180 V und 20 V variiert wird. Die Bestimmung der Elektronendichte und -temperatur basiert dann auf der Auswertung der Stromstärke-Spannungskurve. Im Normalfall ist diese im Elektronenanlaufstrombereich – dem für die Bestimmung relevanten Teil der Kurve – exponentiell.

### 3 Detektion von Fehlmessungen

Für zwei der 36 LS in W7-X ist bekannt, dass es in unregelmäßigen Abständen bei einzelnen Messungen zu Fehlmessungen mit unrealistischen Werten für Elektronendichte und -temperatur kommt. Diese werden durch einen Abfall des Widerstands zwischen Sonde und Ground verursacht, der den Bereich der abgedeckten Spannungswerte schmälert. Es werden beispielsweise nur noch -160 V als unteres Limit erreicht, die exponentielle Form der Kurve ist nicht länger gegeben. Dadurch ist die Bestimmung der Plasmaparameter beeinträchtigt und die ermittelten Werte nicht länger realitätsnah. In besonders gravierenden Fällen können auch Kurzschlüsse verursacht werden, die die elektrischen Bauteile im Schaltkreis mit den LS beschädigen können.

Die Gründe für diese spontanen, zeitlich begrenzten Widerstandsabfälle sind nicht bekannt. Im Verdacht stehen jedoch kohlenstoffhaltige Ablagerung auf den Keramikfassungen der LS. Die Fassungen sollten eigentlich isolierend sein, durch die Ablagerungen kann allerdings elektrische Leitfähigkeit erreicht werden. Dazu passt auch die gehäufte Beobachtung dieses Phänomens bei erhöhtem Vorkommen von Kohlenstoff-Flakes im Plasma.

Es existiert bislang keine Programmroutine, die diese Spannungsabfälle erkennen kann und demnach auch keine Liste mit betroffenen Messungen. Dadurch sind alle Daten dieser beiden LS unzuverlässig und nur unter Vorbehalt zu verwenden. Um dieses Problem zu lösen, muss eine systematische Überprüfung aller Messungen der betroffenen LS erfolgen. Dadurch kann eventuell auch eine Systematik hinter dem Auftreten der Widerstandsabfälle gefunden werden. Das könnte Rückschlüsse auf die Gründe dieses Phänomens sowie Strategien zur Vermeidung desselben ermöglichen.

Eine derartige Routine würde voraussichtlich auf der Analyse der erreichten Spannungswerte basieren. Außerdem müssen der Anschluss der Sonde an den Schaltkreis geprüft und die Einflüsse durch kurzschlussbedingte Schäden an Vorwiderständen in Betracht gezogen werden. Anschließend müssen für betroffene Messungen Betriebs- und Plasmaparameter ausgelesen und verglichen werden, sodass eine mögliche Systematik erkennbar wird.

## 4 Ergebnisse und Auswertung



## 5 Diskussion

## 6 Zusammenfassung

Wendelstein 7-X ist ein Experiment vom Typ Stellarator, dessen Plasmaeinschluss auf einem toroidalen Magnetfeld mit poloidaler Verdrillung beruht. Dieses kann in verschiedenen Magnetfeldkonfigurationen auftreten und weist abhängig davon unterschiedlich viele magnetische Inseln mit variierenden Positionen auf. Sie sind vom Core Plasma separiert, ihre Magnetfeldlinien werden vom High Heat Flux Carbon Fibre Composite Divertor geschnitten. Die Position dieser Schnittstelle, der sogenannten Strikeline, hängt - wie die der Inseln selbst - von der Magnetfeldkonfiguration ab. Die Hauptgruppen sind die Low-Iota Konfiguration (DBM), die Standardkonfiguration (EIM) und die High-Mirror Konfiguration (KJM) mit einer Strikeline im low-iota Bereich des Divertors sowie die High-Iota Konfiguration (FTM) mit einer Strikeline im high-iota Bereich des Divertors. Die Strikeline ist die Region mit der ausgeprägtesten Wechselwirkung zwischen Plasma und Divertor, da dort die den geschnittenen Magnetfeldlinien folgenden geladenen Teilchen auftreten.

Durch ihre Energie und Reaktivität haben die auftreffenden Ionen einen erodierenden Effekt auf den Divertor. Das abgetragene Material wird zum Teil direkt wieder abgelagert, zum Teil gelangt es als Verunreinigung ins Plasma. Dort kann das erodierte Material zur erhöhten Abstrahlung von Energie führen. Außerdem begrenzt die Erosion die Lebensdauer des Divertors.

Das Verständnis der in W7-X ablaufenden Erosionsprozesse (erosion-deposition) ist daher essentiell zur Optimierung des Divertors und der Kontrolle der Verunreinigungskonzentrationen im Plasma. Diese Arbeit untersuchte aus diesem Grund die Erosion durch Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff im low-iota und high-iota Bereich des HHF-CFC-Divertors von W7-X in OP2.2 und OP2.3. Dazu wurden Bruttoerosion, Brutodeponierung und Nettoerosion aus den Messwerten der Elektronentemperatur, der Elektronendichte und Oberflächentemperatur des Divertors berechnet, welche von Langmuir Sonden und Infrarot-Kamerasystemen bereitgestellt wurden. Zusätzlich zu den Messwerten wurden Einfallswinkel der Magnetfeldlinien und Ionen auf den Divertor sowie Ionenkonzentrationen von Wasserstoff  $H^+$ , Kohlenstoff  $C^{2+}$  und Sauerstoff  $O^{3+}$  abgeschätzt. Durch Hochrechnungen ergab sich eine nettoerodierte Schichtdicke für die Kampagnen OP2.2 und OP2.3.

Die durchschnittliche Elektronendichte bewegte sich zwischen  $(1,12 \pm 0,25) \times 10^{18}/m^3$  und  $(2,79 \pm 0,01) \times 10^{19}/m^3$  in OP2.2 und zwischen  $(4,58 \pm 0,04) \times 10^{17}/m^3$  und  $(8,64 \pm 1,53) \times 10^{18}/m^3$  in OP2.3. Für die mittlere Elektronentemperatur reichten die Werte in OP2.2 von  $(5,99 \pm 2,60)$  eV bis  $(24,47 \pm 0,30)$  eV und in OP2.3 von  $(8,49 \pm 0,21)$  eV bis  $(28,42 \pm 2,70)$  eV. Die gemittelte Oberflächentemperatur des Di-

vertors bewegten sich in OP2.2 im Rahmen von 310 K bis 436 K und von 312 K bis 344 K in OP2.3.

Die durchschnittlichen Nettoerosionsraten lagen in der gesamten OP2.2 bei maximal  $(1,29 \pm 0,03)$  nm/s. Bei einer Plasmazeit von 20 371 s resultierte das in einer nettoerodierten Maximalschichtdicke von  $(0,0260 \pm 0,0005)$  mm. In OP2.3 ergaben sich  $(0,83 \pm 0,01)$  nm/s als Maximum der durchschnittlichen Nettoerosionsrate der Kampagne, was bei 28 329 s Plasmazeit eine maximal abgetragene Schichtdicke von  $(0,0240 \pm 0,0003)$  mm bedeutete. In beiden Kampagnen wurde dieser Maximalabtrag im Bereich der Strikeline der Standardkonfiguration beobachtet, was dem low-iota Bereich des Divertors und einem Abstand von 0,13 m vom Pumpspalt entspricht. Dieser Verlauf spiegelte sich auch in den durchschnittlichen Plasmaparametern der Kampagnen wieder. Wird aus den abgetragenen Schichtdicken auf die Masse des nettoerodierten Kohlenstoffstaubs pro Quadratmeter mit dem Plasma in Kontakt stehender Fläche geschlossen, so wurde für OP2.2 ein Wert von  $(30,66 \pm 12,61)$  g erreicht. Für OP2.3 waren es  $(60,15 \pm 23,93)$  g.

Plasmaparameter und maximale Nettoerosionsraten waren in OP2.2 höher, durch die längere Plasmazeit in OP2.3 waren die maximal nettoerodierten Schichtdicken jedoch in beiden Kampagnen ähnlich. Trotzdem war die nettoerodierte Masse von Kohlenstoff in OP2.3 durch die höheren nettoerodierten Schichtdicken auch abseits der Strikeline der Standardkonfiguration höher als in OP2.2. Zwar wurden die Parameter- und Schichtdickenverläufe beider Kampagnen von der Standardkonfiguration dominiert, spiegelten in OP2.3 aber auch die im Mittelbereich der low-iota Region des Divertors erhöhten Plasmaparameter und Schichtdicken der Low-Iota Konfiguration wieder. Das passt zur Zusammensetzung der Plasmazeit, die in OP2.2 zu 56,35 % und in OP2.3 zu 51,06 % aus EIM bestand. DBM war mit 18,26 % in OP2.3, aber nur 0,48 % in OP2.2 vertreten. KJM und FTM hatten weniger Einfluss. Das ist darauf zurückzuführen, dass ihre Strikeline nicht im low-iota Bereich auf dem horizontalen Target liegt, wo die meisten Daten für  $n_e$  und  $T_e$  erfasst wurden. Die High-Mirror Konfiguration hat ihre Strikeline zwar im low-iota Bereich des Divertors, jedoch primär auf dem vertikalen Target. Die High-Iota Konfiguration hat ihre Strikeline hingegen in der high-iota Region des Divertors, deren Erosionsprozesse wegen ihrer schlechteren Datenlage weniger aussagekräftig waren.

Der Vergleich der Nettoerosionsraten mit früheren Abschätzungen aus OP1.2b zeigte Übereinstimmungen in Verlauf und Werten. Die maximale Nettoerosionsrate an der Strikeline der Standardkonfiguration lag in OP1.2b bei 1,1 nm/s bis 2,5 nm/s. Auch die nettoerodierte Masse an Staub lieferte ähnliche Ergebnisse wie andere Hochrechnungen, die 48,9 g in OP2.2 und 66,7 g in OP2.3 prognostiziert hatten. Ein Vergleich mit experimentell bestimmten Werten war nicht möglich, da diese nicht vorliegen.

Generell passen die Ergebnisse dieser Arbeit gut zu den Erwartungen und weichen nur wenig von anderen Abschätzungen ab. Dennoch ist durch die vielen nötigen Annahmen und Intra- sowie Extrapolationen die Unsicherheit in den Ergebnissen groß. Genauere Untersuchungen zur exakteren Festlegung von Inputparametern wie der Ionenkonzentration würden die Belastbarkeit der Ergebnisse erhöhen.

## 7 Ausblick

## 8 Appendix A: Formelzeichen

|            |  |
|------------|--|
| $e$        | – Index für elektronenbezogene Größen  |
| $i$        | – Index für ionenbezogene Größen   |
| $ero$      | – Index für erosionsbezogene Größen  |
| $dep$      | – Index für deponierungsbezogene Größen  |
| $c$        | – Lichtgeschwindigkeit im Vakuum   |
| $h$        | – Plancksches Wirkungsquantum  |
| $k_B$      | – Boltzmann Konstante  |
| $N_A$      | – Avogadrozahl   |
| $t$        | – Zeit   |
| $g$        | – Wahrscheinlichkeitsverteilung der Teilchenenergie                              |
| $U$        | – Energiedichte in Planckschem Strahlungsgesetz,<br>Spannung bei Langmuir Sonden |
| $f$        | – Frequenz   |
| $\lambda$  | – Wellenlänge  |
| $I$        | – Intensität in Bezug auf Licht,<br>Stromstärke bei Langmuir Sonden              |
| $l$        | – Länge der Strikeline   |
| $A$        | – Fläche des Divertors, die mit dem Plasma in Berührung kommt                    |
| $M$        | – Molare Masse   |
| $Z$        | – Kernladungszahl  |
| $m$        | – Masse  |
| $n$        | – Teilchendichte   |
| $\rho$     | – Materialdichte   |
| $f_i$      | – Ionenkonzentration   |
| $q_i$      | – Ionisationszustand   |
| $T$        | – Temperatur   |
| $T_s$      | – Oberflächentemperatur des Targets  |
| $\Gamma$   | – Teilchenflussdichte  |
| $\Delta$   | – Schichtdicke   |
| $Y$        | – Zerstäubungsausbeute   |
| $Y_{chem}$ | – Ausbeute durch chemische Erosion   |

$Y^{damage}$  – Teil von  $Y$  für Ionen-induzierte Desorption  
 $Y^{therm}$  – Teil von  $Y$  für Ionen-induzierte Desorption  
 $Y^{surf}$  –  $Y$  für thermisch aktivierte Kohlenwasserstoff-Emission  
 $Y^{self}$  – Selbstzerstäubungsausbeute  
 $s_n$  – Nuklearer Wirkungsquerschnitt (nuclear stopping cross section) für  
 Krypton-Kohlenstoff Potential  
 $s_n^{TF}$  – Nuklearer Wirkungsquerschnitt (nuclear stopping cross section)  
 für Thomas-Fermi Potential  
 $E$  – Energie des auftreffenden Ions  
 $E_{TF}$  – Thomas-Fermi Energie  
 $E_{th}$  – Schwellenenergie für physikalische Zerstäubung  
 $E_{thd}$  – Schwellenenergie für Ionen-induzierte Desorption  
 $E_{ths}$  – Schwellenenergie für thermisch aktivierte Kohlenwasserstoff-Emission  
 $E_s$  – Sublimationswärme  
 $\epsilon$  – Reduzierte Energie  
 $a_L$  – Lindhard Screening-Länge  
 $\gamma_k$  – Kinematischer Faktor  
 $\alpha_0$  – Korrekturfaktor  
 $\alpha$  – Einfallswinkel der Ionen auf den Divertor zur der Flächennormalen  
 $\alpha_{max}$  –  $\alpha$  mit maximaler physikalischer Zerstäubungsausbeute  
 $\zeta$  – Einfallswinkel der Magnetfeldlinien auf den glatten Divertor gemessen  
 von der Oberfläche zum Lot  
 $\Phi$  – Toroidaler Winkel  
 $P_{reddep}$  – Wahrscheinlichkeit der Wiederablagerung  
 $s$  – Haftungskoeffizient  
 $Q_y$  – Fitparameter  
 $f_y$  – Yamamura Parameter  
 $b, c, f, Y_0$  – Fitparameter für Modell nach [**BehrischEckstein**]  
 $c_i, s_i, C_d$  – Parameter für chemische Erosion nach [**PWI-Dirk**]  
 $C, D, c^{sp3}$  – Parameter für chemische Erosion nach [**RothChemErosion**]  
 $Z_{eff}$  – Absoluter Ladungszustand des Plasmas

## 9 Appendix B: Abkürzungsverzeichnis

W7-X – Wendelstein 7-X

PFC – Plasma Facing Component, Wandkomponente im Plasmagefäß

HHF-CFC-Divertor – High Heat Flux Carbon Fibre Composite Divertor

M – Modul von W7-X

DU – Divertoreinheit

TM – Targetmodul des Divertors

TE – Targetelement des Divertors

LCFS – Last Closed Flux Surface

DBM – Low-Iota Magnetfeldkonfiguration

EIM – Standard Magnetfeldkonfiguration

KJM – High-Mirror Magnetfeldkonfiguration

FTM – High-Iota Magnetfeldkonfiguration

ECRH – Electron Cyclotron Resonance Heating

ICRH – Ion Cyclotron Resonance Heating

NBI – Neutral Beam Injection

CXRS – Charge Exchange Recombination Spectroscopy

DRGA – Diagnostic Residual Gas Analyzer

HEXOS – High Efficiency XUV Overview Spectrometer

LOS – Lines of Sight