

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	6
3 Detektion von Fehlmessungen	9
4 Ergebnisse und Auswertung	10
5 Diskussion	11
6 Zusammenfassung	12
7 Ausblick	13
Literatur	13
8 Appendix A: Formelzeichen	15
9 Appendix B: Abkürzungsverzeichnis	17

1 Einleitung

Fusion - also das Verschmelzen zweier Atomkerne zu einem schwereren Atomkern sowie unter Umständen einem subatomaren Teilchen - 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 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/m², was bei direktem Kontakt zwischen Material und Plasma überschritten wird. Demnach muss der Plasmaeinschluss anderweitig gestaltet werden. Die vielversprechendsten Ansätze sind der Inertialeinschluss und der magnetische Einschluss. Bei letzterem schließt ein toroidal geschlossenes und poloidal verdrilltes Magnetfeld das Plasma ein. Zur Realisierung eines solchen Magnetfelds gibt es wieder zwei Hauptkonzepte: 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⁺). Die Anlage sowie das Magnetfeld weisen eine fünfzählige toroidale Symmetrie auf, die sich in der Unterteilung in fünf Module (M1-M5) widerspiegelt wie Abb. 1.1 zeigt. Außerdem besteht jedes Modul aus zwei identischen, 180°-rotationssymmetrischen Halbmodulen

(HMs) - einem oberen und einem unterem. Auch diese Symmetrie teilen Anlage und Magnetfeld.

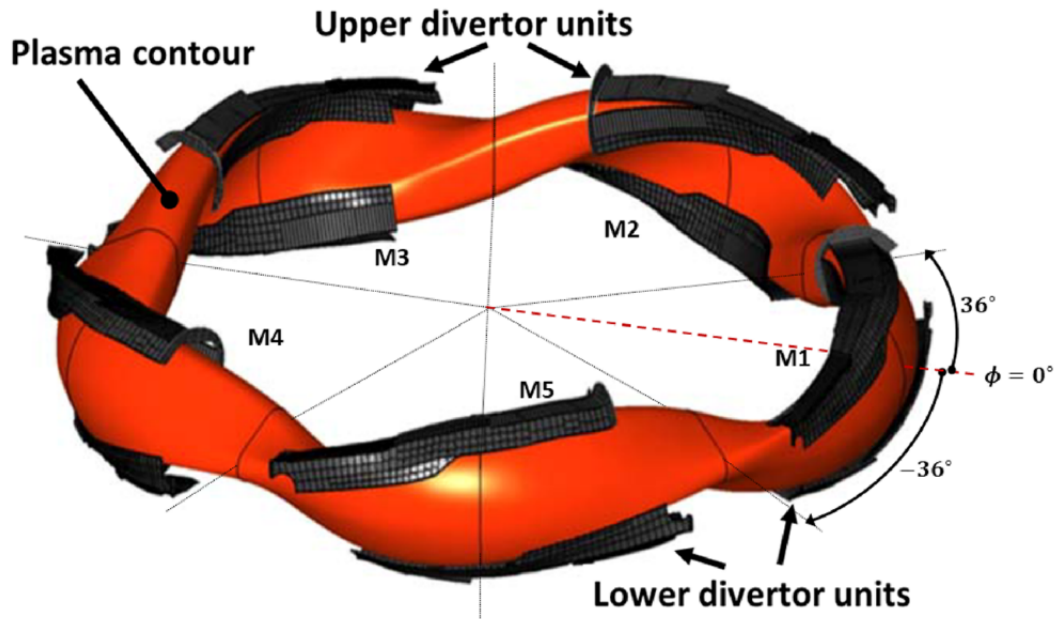


Abbildung 1.1: Plasmakontur der Standardkonfiguration EIM (orange) und Position der Divertoreinheiten (schwarz) in den fünf Modulen M1-M5 von Wendelstein 7-X. Die Abbildung wurde in [2] veröffentlicht

Der allgemeinen Aufbau des durch das Magnetfeld eingeschlossenen Plasmas ist der Folgende: Im Inneren liegt das besonders heiße Core Plasma und außen herum sind die kühleren magnetischen Inseln angeordnet, welche das Randplasma bilden. Getrennt sind diese Bereiche durch die sogenannte Separatrix, dargestellt wird diese Struktur in Abb. 1.2. Während das Core Plasma geschlossene Magnetfeldlinien aufweist, werden die der magnetischen Inseln von besonders widerstandsfähigen Wandkomponenten des Plasmagefäßes - den sogenannten Divertoren - geschnitten. Die verschiedenen Wandkomponenten werden in Abb. 1.3 veranschaulicht.

Durch das Anlegen verschiedener Spulenströme kann das Magnetfeld in einer Vielzahl von Konfigurationen gefahren werden, die sich in der Form des eingeschlossenen Plasmas unterscheiden. 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 in Abb. 1.4 gezeigte 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.

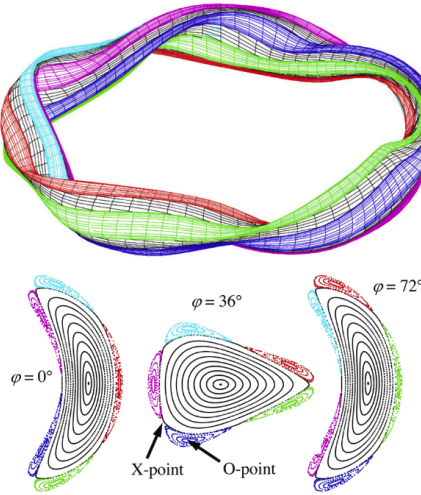


Abbildung 1.2: Form des Plasmas in der Standardkonfiguration EIM mit Core Plasma (schwarz) und magnetischen Inseln (farbig). Oben ist die Plasmakontur des gesamten Torus dargestellt, unten die zugehörigen Poincare Plots. Diese zeigen die geschlossenen magnetischen Flussflächen in Querschnitten des Plasmas bei unterschiedlichen toroidalen Winkeln. Die Position der Winkel ist Abb. 1.1 zu entnehmen. Die Abbildung wurde in [3] veröffentlicht.

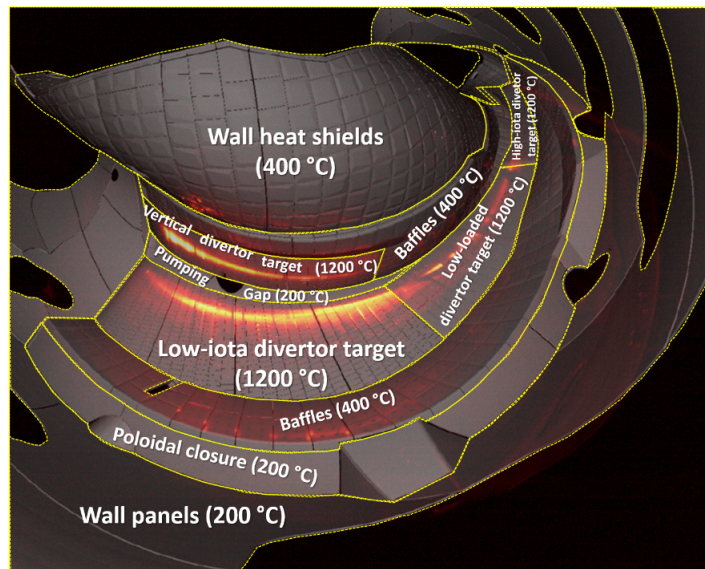


Abbildung 1.3: In-vessel view einer Divertoreinheit mit den einzelnen Wandkomponenten und den maximal zulässigen Temperaturen. Mittig dargestellt ist der Divertor, welcher die höchste thermische Belastung aushält. Die Abbildung wurde in [3] veröffentlicht.

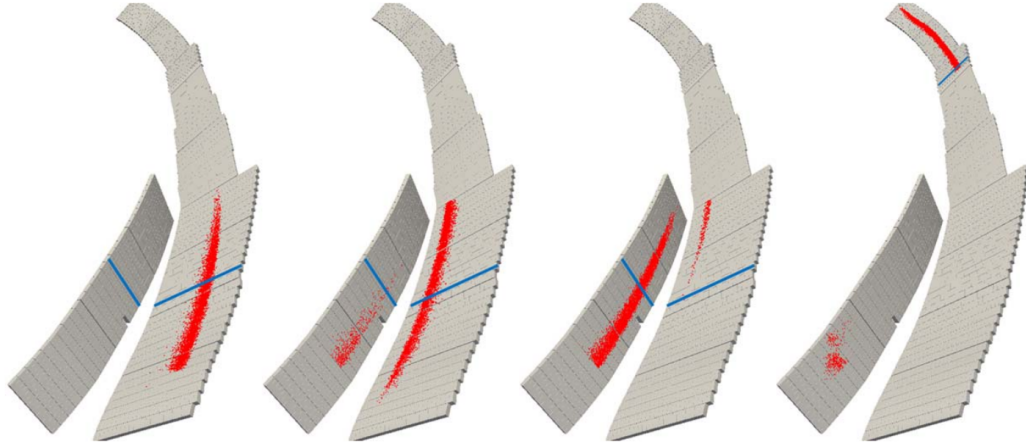


Abbildung 1.4: Position der Strikeline (rot) auf dem Divertor für verschiedene Magnetfeldkonfigurationen. Von links nach rechts: Low-Iota Konfiguration DBM, Standardkonfiguration EIM, High-Mirror Konfiguration KJM und High-Iota Konfiguration FTM. Diese Abbildung wurde aus [1] entnommen.

Pro Halbmodul gibt es eine Divertoreinheit, wie in Abb. 1.1 zu sehen ist. Der Aufbau einer solchen Einheit ist in Abb. 1.5 dargestellt und im Folgenden beschrieben. Es 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.

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 low-iota und high-iota Bereich des horizontalen Divertors angebrachten Langmuir Sonden (LS). Sie ermöglichen die Bestimmung der Elektronendichte und -temperatur im Randplasma durch die Messung der Stromstärke in Abhängigkeit der an die Sonde angelegten Spannung.

Für zwei der 36 verbauten Langmuir Sonden ist bekannt, dass in OP2.2 und OP2.3 - den neusten beiden Experimentalkampagnen - bei einigen Messungen Fehler aufgetreten sind. Elektronendichte und -temperatur erreichten unrealistische Werte, die durch einen Abfall des Widerstands zwischen Sonde und Ground verursacht wurden. Welche Messungen betroffen sind und warum dieses Phänomens aufgetreten ist, ist nicht endgültig geklärt.

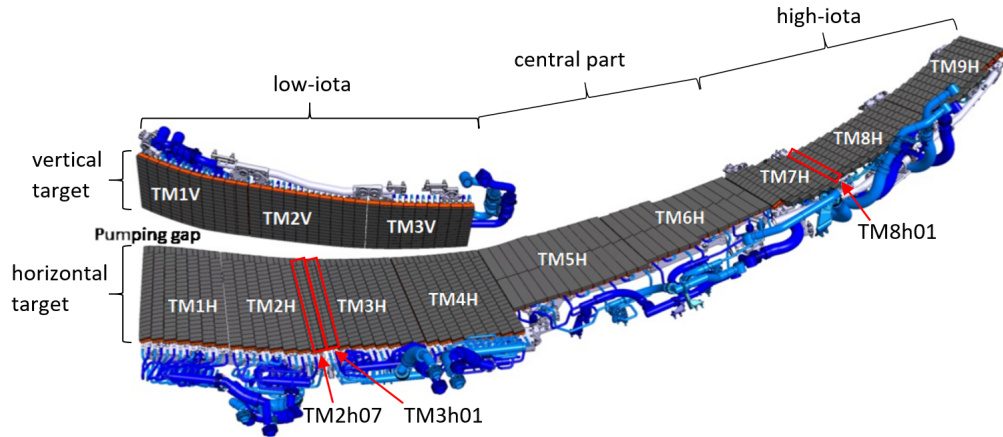


Abbildung 1.5: CAD Modell einer Divertoreinheit bestehend aus den durch den Pumpspalt getrennten vertikalen und horizontalen Targets. Weiterhin ist die Unterteilung in Targetmodule (TMs), bestehend wiederum aus Targetelementen möglich. Die drei Bereiche low-iota, central part und high-iota stellen ebenfalls eine mögliche Einteilung dar. Rot hervorgehoben sind die Targetelemente TM2h07 und TM3h01 im low-iota Bereich sowie TM8h01 im high-iota Bereich. Auf ihnen befinden sich die Langmuir Sonden. Diese Grafik basiert auf einer in [3] veröffentlichten Darstellung.

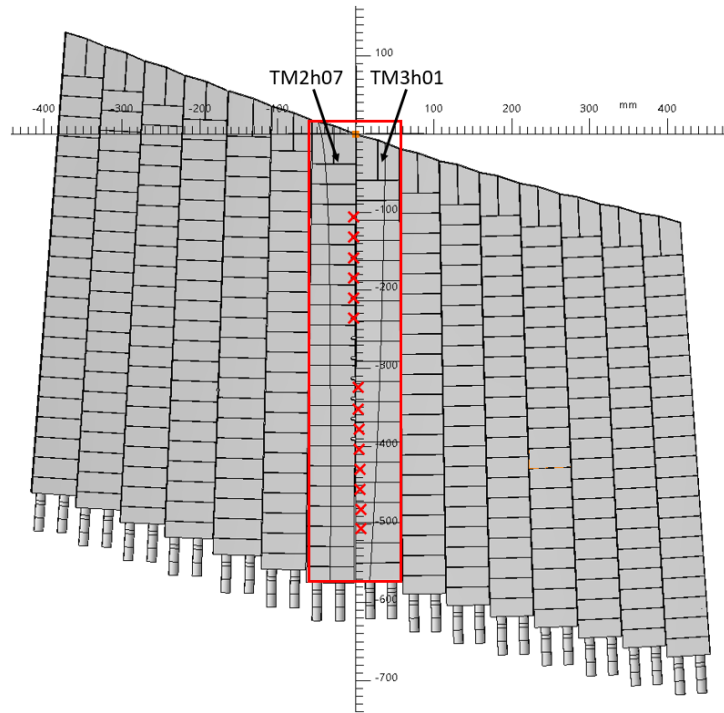
Diese Arbeit widmet sich der Untersuchung der durch Widerstandsabfälle verursachten Fehlmessungen. Eine systematische Analyse aller Messungen der beiden betroffenen Langmuir Sonden mithilfe einer neu entwickelten Programmroutine zur Detektion dieses Phänomens ermöglicht die Unterscheidung der Messwerte in zuverlässige und unzuverlässige Messdaten. Eine Erfassung der Betriebs- und Plasmaparameter zum Zeitpunkt der Fehlmessungen erlaubt außerdem Rückschlüsse auf eine potentiell dahinterstehende Systematik. Daraus können mögliche Ursachen für das Auftreten der Widerstandsabfälle abgeleitet werden. Unter Umständen ist dadurch die Behebung des Problems möglich.

In Kapitel 2 werden die Langmuir Sonden und ihre Funktionsweise allgemein und W-7X spezifisch vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt den Detektionsprozess für Fehlmessungen sowie die Datenerfassung der Betriebs- und Plasmaparameter. Anschließend werden die Ergebnisse der Analyse in Kapitel 4 präsentiert und in Kapitel 5 diskutiert. Eine kurze Zusammenfassung der Arbeit wird in Kapitel 6 gegeben, während in Kapitel 7 Erweiterungen des Projekts sowie Konsequenzen der gefundenen Ergebnisse auf den Betrieb der Langmuir Sonden in zukünftigen Experimentalkampagnen erläutert werden. Die Kapitel 8 und 9 beinhalten die Erklärung der Formelzeichen und Abkürzungen.

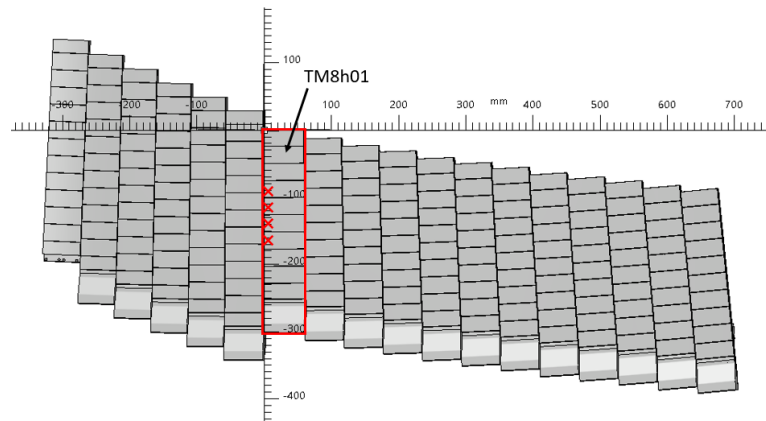
2 Langmuir Sonden

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 MW/m^2 – 200 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.



(a) Low-iota Bereich, TM2h07 und TM3h01



(b) High-iota Bereich, TM8h01

Abbildung 2.1: Position der Langmuir Sonden (rote Kreuze) auf den Targetelementen (rote Kästen). Der Pumpspalt ist jeweils auf der Seite mit dem Koordinatenursprung (oben).

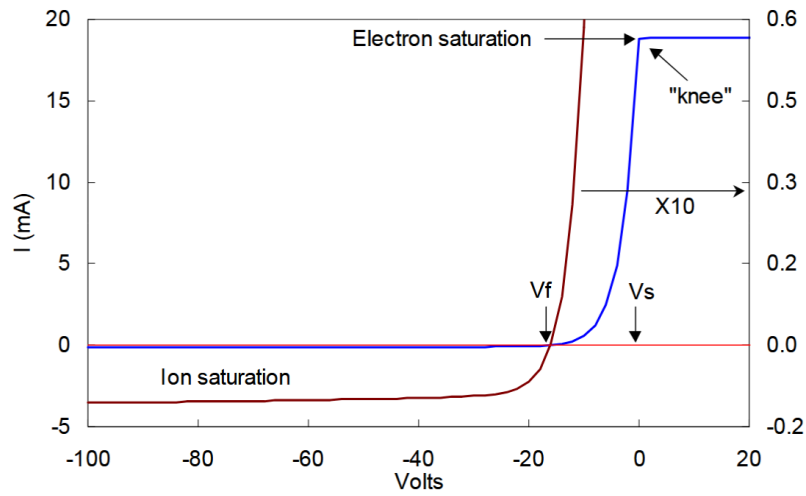


Abbildung 2.2: Stromstärke-Spannungs-Kurve einer idealen Langmuir Sonde. V_f bezeichnet das Floating Potential mit dem Nettostrom 0 A, V_s das Sättigungspotential. Der Ionensättigungsbereich ist gegeben durch ein Sondenpotential von maximal V_f , zwischen V_f und V_s wird vom Elektronenanlaufstrombereich gesprochen und bei Sondenpotentialen über V_s vom Elektronensättigungsbereich. Das Sondenpotential wird relativ zum Plasmapotential angegeben. Die Abbildung wurde in [3] veröffentlicht.

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

7 Ausblick

Literatur

- [1] T. Sunn Pedersen u. a. “First results from divertor operation in Wendelstein 7-X”. In: *Plasma Phys. Control. Fusion* **61** (2019). 348–51.
- [2] A. Pandey u. a. “Pop-up Langmuir probe diagnostic in the water cooled divertor of Wendelstein 7-X”. In: *Rev. Sci. Instrum.* **95** (2024). 043503.
- [3] A. Puig Sitjes u. a. “Real-Time Detection of Overloads on the Plasma-Facing Components of Wendelstein 7-X”. In: *Applied Sciences* **11** (2021). 11969.
- [4] R. Behrisch und W. Eckstein. *Sputtering by Particle Bombardment (Vol. 110 in Topics in Applied Physics)*. Hrsg. von Dr. C: E. Ascheron. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] D. Naujoks. *Plasma-Material Interaction in Controlled Fusion (Vol. 39 in Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics)*. Hrsg. von G. W. F. Drake, Dr. G. Ecker und Dr. H. Kleinpoppen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [6] J. Roth und C. Garcia-Rosales. “Analytic description of the chemical erosion of graphite by hydrogen ions, corrigendum”. In: *Nuclear Fusion* **37** (1997). 897.

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, Spannung bei Langmuir Sonden
f	– Frequenz
λ	– Wellenlänge
I	– Intensität in Bezug auf Licht, 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
ρ	– Materialdichte
f_i	– Ionenkonzentration
q_i	– Ionisationszustand
T	– Temperatur
T_s	– Oberflächentemperatur des Targets
Γ	– Teilchenflussdichte
Δ	– 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
 ϵ – Reduzierte Energie
 a_L – Lindhard Screening-Länge
 γ_k – Kinematischer Faktor
 α_0 – Korrekturfaktor
 α – Einfallswinkel der Ionen auf den Divertor zur der Flächennormalen
 α_{max} – α mit maximaler physikalischer Zerstäubungsausbeute
 ζ – Einfallswinkel der Magnetfeldlinien auf den glatten Divertor gemessen
 von der Oberfläche zum Lot
 Φ – Toroidaler Winkel
 P_{redp} – Wahrscheinlichkeit der Wiederablagerung
 s – Haftungskoeffizient
 Q_y – Fitparameter
 f_y – Yamamura Parameter
 b, c, f, Y_0 – Fitparameter für Modell nach [4]
 c_i, s_i, C_d – Parameter für chemische Erosion nach [5]
 C, D, c^{sp3} – Parameter für chemische Erosion nach [6]
 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