

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
2.1 Allgemeiner Aufbau einer Langmuir Sonde	6
2.2 Messprinzip einer Langmuir Sonde	6
2.2.1 I-V-Kurve einer idealen Langmuir Sonde	7
2.2.2 Berechnung der Elektronentemperatur	8
2.2.3 Floating Potential und Berechnung des Plasmapotentials	8
2.2.4 Berechnung der Elektronendichte	9
2.2.5 I-V-Kurve einer realen Langmuir Sonde	9
2.3 Langmuir Sonden in Wendelstein 7-X	9
3 Detektion von Fehlmessungen	12
3.1 Detektion von Widerstandsabfällen	13
3.1.1 Analyse des abgedeckten Spannungsbereichs	13
3.1.2 Analyse des Widerstands des Schaltkreises	13
3.2 Bestimmung der Charakteristika der Entladung	13
3.2.1 Auslesen der Betriebsparameter	13
3.2.2 Auslesen der Plasmaparameter	13
4 Ergebnisse und Auswertung	14
5 Diskussion	15
6 Zusammenfassung	16
7 Ausblick	17
Literatur	17
8 Appendix A: Formelzeichen	19
9 Appendix B: Abkürzungsverzeichnis	21
10 Appendix C: Tabellenwerte	22

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.

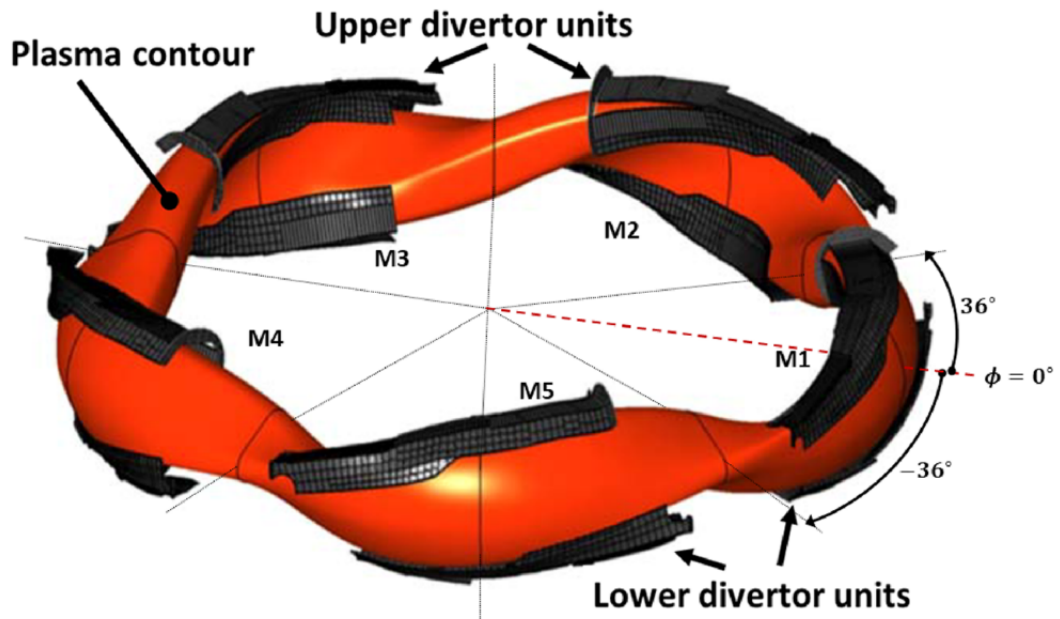


Abbildung 1.1: Plasmakontur der Standardkonfiguration EIM (orange) und Position der Divertoreinheiten (schwarz) in den fünf Modulen M1-M5 von Wendelstein 7-X. Die Abbildung wurde in [2] veröffentlicht.

Der allgemeine Aufbau des durch das Magnetfeld eingeschlossenen Plasmas ist der Folgende: Im Inneren liegt das besonders heiße Core Plasma, darum 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.

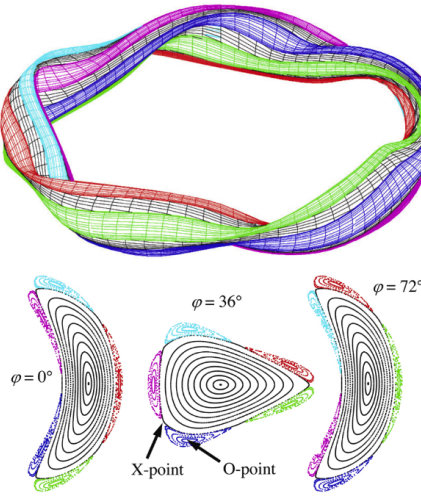


Abbildung 1.2: Form des Plasmas in der Standardkonfiguration EIM mit Core Plasma (schwarz) und magnetischen Inseln (farbig). Oben ist die Plasmakontur des gesamten Torus dargestellt, unten die zugehörigen Poincare Plots. Diese zeigen die geschlossenen magnetischen Flussflächen in Querschnitten des Plasmas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

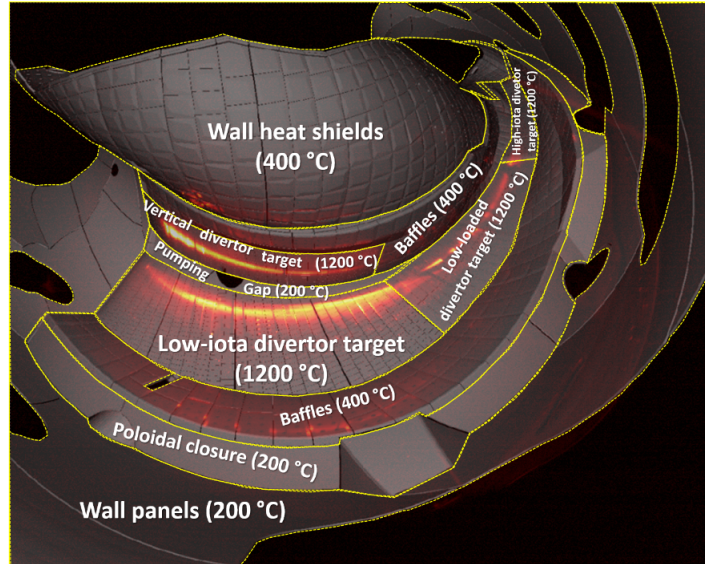


Abbildung 1.3: In-vessel view einer Divertoreinheit mit den einzelnen Wandkomponenten und den maximal zulässigen Temperaturen. Mittig dargestellt ist der Divertor, welcher die höchste thermische Belastung aushält. Die Abbildung wurde in [3] veröffentlicht.

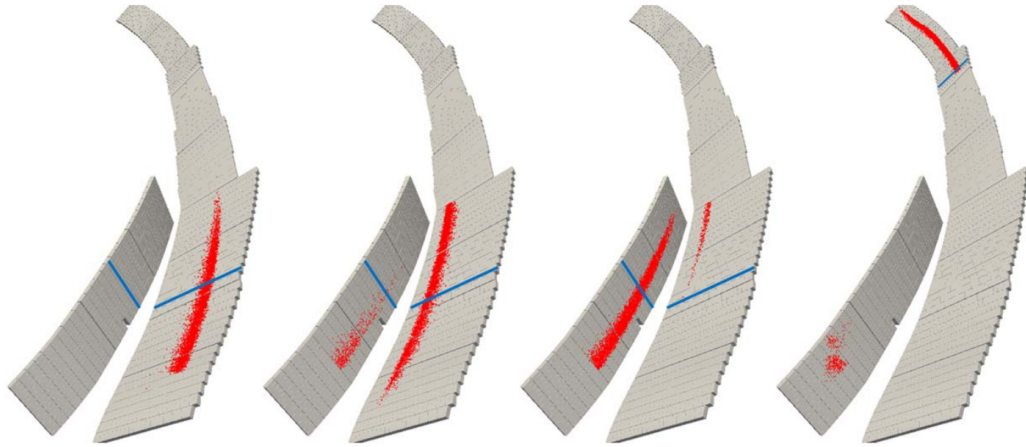


Abbildung 1.4: Position der Strikeline (rot) auf dem Divertor für verschiedene Magnetfeldkonfigurationen. Von links nach rechts: Low-Iota Konfiguration DBM, Standardkonfiguration EIM, High-Mirror Konfiguration KJM und High-Iota Konfiguration FTM. Diese Abbildung wurde aus [1] entnommen.

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.

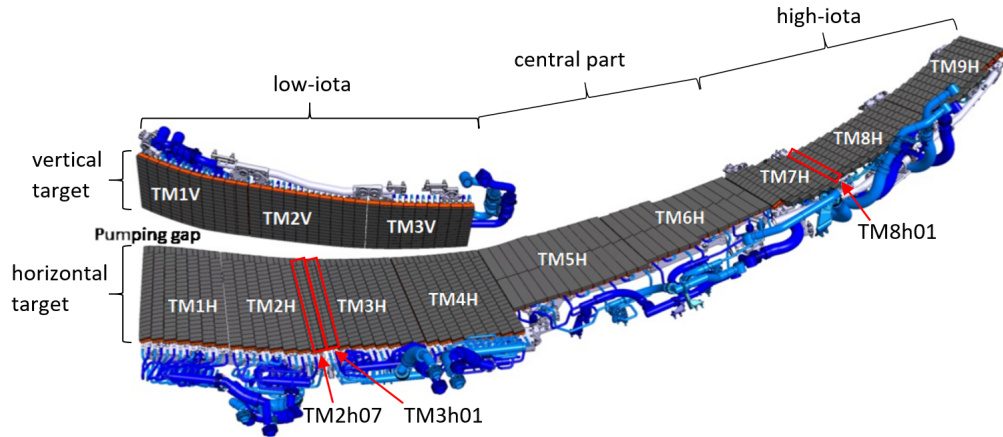


Abbildung 1.5: CAD Modell einer Divertoreinheit bestehend aus den durch den Pumpspalt getrennten vertikalen und horizontalen Targets. Weiterhin ist die Unterteilung in Targetmodule (TMs), bestehend wiederum aus Targetelementen möglich. Die drei Bereiche low-iota, central part und high-iota stellen ebenfalls 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 und 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, 9 und 10 beinhalten die Erklärung der Formelzeichen und Abkürzungen sowie Tabellen zu W7-X.

2 Langmuir Sonden

Langmuir Sonden sind gängige Messinstrumente in verschiedensten Anwendungen von Plasmen. So kommen sie auch in der Fusionsforschung als Diagnostik zur Bestimmung der Elektronendichte und Elektronentemperatur vor. Sie bieten den Vorteil eines verhältnismäßig einfachen Aufbaus - stark heruntergebrochen handelt es sich um einen Draht, der ins Plasma gehalten wird. Der genauere Aufbau wird im Folgenden noch einmal erläutert. Nicht ganz so einfach wie der Aufbau ist hingegen die Interpretation der Messungen. Auf das Messprinzip und die Bestimmung der Plasmaparameter aus den Messdaten wird nach der Beschreibung des Aufbaus eingegangen. Zuletzt werden in diesem Kapitel die Besonderheiten der Langmuir Sonden in W7-X für OP2.2 und OP2.3 angeführt.

2.1 Allgemeiner Aufbau einer Langmuir Sonde

Die Bestimmung von Plasmaparametern mithilfe einer Langmuir Sonde basiert auf der grundlegenden Idee, einen Draht ins Plasma zu halten und die Stromstärke in Abhängigkeit eines variierenden Sondenpotentials zu messen. Um ein zuverlässig funktionierendes Messinstrument zu haben, ist ein Draht allein allerdings nicht ausreichend. Den allgemeinen Aufbau einer Langmuir Sonde legt dieser Abschnitt dar.

Der ins Plasma eingeführte Draht muss aus einem gegenüber thermischen Lasten widerstandsfähigem Material wie Wolfram gefertigt sein und weist in der Regel einen sehr geringen Durchmesser von 0,1 mm bis 1 mm auf. Er ist in einem Keramikröhrchen befestigt - zumeist aus Aluminiumoxid - welches ihn bis auf die 2 mm bis 10 mm lange Spitze umgibt und vom Plasma abschirmt. Dieses Röhrchen sollte möglichst dünn sein, um den Einfluss auf das Plasma gering zu halten, muss aber weit genug sein, als dass der Draht es nicht berührt. Der Grund dafür ist, dass der Kontakt des Drahts zu leitenden Ablagerungen auf der Keramik verhindert werden soll. Der an den isolierten Draht angeschlossene Schaltkreis muss vom Plasma isoliert werden, beispielsweise durch eine gesonderte Vakuumkammer.

2.2 Messprinzip einer Langmuir Sonde

Das Messprinzip von Langmuir Sonden basiert auf der Bestimmung der Stromstärke in Abhängigkeit der an der Sonde angelegten, variierenden Spannung. Aus der Analyse der sich ergebenden Stromstärke-Spannungs-Kurve (I-V-Kurve) können Rückschlüsse auf die vorherrschenden Plasmaparameter gezogen werden. Darauf wird in diesem Ab-

schnitt eingegangen. Zunächst müssen allerdings die allgemeinen Konventionen eingeführt werden, die bei der Betrachtung der I-V-Kurven von Langmuir Sonden üblich sind.

Die an die Sonde angelegte Spannung V_p wird in der Regel in Bezug zum Plasmapotential V_s (Space Potential) gesetzt, sodass als Spannung V die Differenz $V_p - V_s$ angegeben wird. Weiterhin sind Elektronenströme I_e mit positivem Vorzeichen versehen, während Ionenströme I_i ein negatives Vorzeichen tragen. Zuletzt wird hier noch das Floating Potential V_f eingeführt, welches bei einem gemessenen Nettostrom $I = I_e + I_i$ von 0 mA vorliegt. Das ist der Fall, wenn Ionen- und Elektronenströme einander ausgleichen.

2.2.1 I-V-Kurve einer idealen Langmuir Sonde

Eine ideale Langmuir Sonde hat eine I-V-Kurve, welche in drei Hauptbereiche aufgeteilt und Abb. ?? entnommen werden kann. Für $V_p \ll V_s$ werden durch das in Bezug auf das Plasmapotential negative Potential der Sonde Ionen angezogen, wohingegen Elektronen abgestoßen werden. Es werden vornehmlich Ionenströme gemessen, sodass der Nettostrom durch die Sonde negativ ist. Dieser Bereich wird als Ionensättigungsbereich bezeichnet. Für steigendes Sondenpotential mit $V_p < V_f$ bleibt der Nettostrom negativ, der Betrag nimmt jedoch ab bis schließlich bei $V_p = V_f$ kein Nettostrom mehr gemessen wird. Wird V_p weiter erhöht, wobei aber $V_p < V_s$ gilt, so wird der Nettostrom positiv mit steigendem Betrag. Es handelt sich um den sogenannten Elektronenanlaufstrombereich, bei Maxwell-verteilten Geschwindigkeiten für Elektronen und Ionen ist der Anstieg hier exponentiell. Bei $V_p \approx V_s$ knickt der Verlauf des Nettostroms in Abhängigkeit des Sondenpotentials ab und steigt nur noch sehr langsam weiter. Die Sonde befindet sich dann im Elektronensättigungsbereich, in dem durch das höhere Potential der Sonde in Bezug auf das Plasmapotential Elektronen angezogen und Ionen abgestoßen werden. Dass I weiter steigt hängt damit zusammen, dass das elektrische Sheath, welches die Sonde umgibt sich ausdehnt. Dadurch dehnt sich der Einzugsbereich der Sonde aus und die Anzahl der die Sonde erreichenden Elektronen nimmt langsam zu.

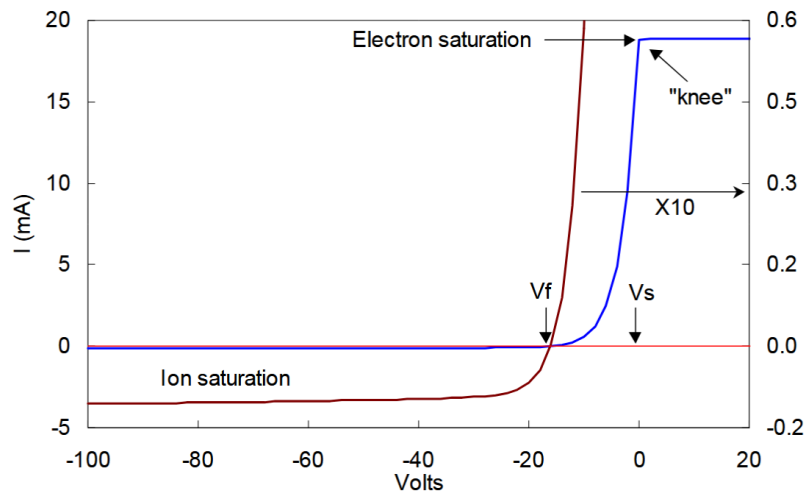


Abbildung 2.1: Stromstärke-Spannungs-Kurve einer idealen Langmuir Sonde, veröffentlicht in [3].

2.2.2 Berechnung der Elektronentemperatur

Aus dem Verlauf der I-V-Kurve im Elektronenanlaufstrombereich kann die Elektronentemperatur in (eV) bestimmt werden. Das kann dem folgenden Zusammenhang entnommen werden:

$$I_e = I_{es} \exp \left(e \frac{V_p - V_s}{k_B T_e} \right) \quad (2.1)$$

$$= A n_e e \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \exp \left(e \frac{V_p - V_s}{k_B T_e} \right) \quad (2.2)$$

Dabei ist A die Fläche der Sondenspitze, k_B die Boltzmannkonstante und e die Elementarladung, während m_e die Elektronenmasse und I_{es} den Elektronensättigungsstrom bei $V_p = V_s$ bezeichnet. Dieser Formel ist zu entnehmen, dass der Verlauf von $\ln(I_e(V_p))$ linear mit dem Anstieg $1/T_{e,eV}$ ist, wobei die Elektronentemperatur hier in eV gegeben ist. Der Grund dafür ist die Umrechnung von $T_{e,K}$ in $T_{e,eV}$ durch die Multiplikation mit $k = k_B/e$. Es gilt:

$$\begin{aligned} \ln(I_e) &= \ln(I_{es}) + e \frac{V_p - V_s}{k_B T_e} \\ &= \ln(I_{es}) - e \frac{V_s}{k_B T_e} + e \frac{V_p}{k_B T_e} \\ &= \text{const} + \frac{e}{k_B T_e} V_p \quad . \end{aligned}$$

2.2.3 Floating Potential und Berechnung des Plasmapotentials

Um das Plasmapotential zu bestimmen wird normalerweise das Floating Potential aus dem Verlauf der I-V-Kurve abgelesen. Aus der Definition von V_f - dem Vorliegen eines Nettostroms von 0 A - ergibt sich die Berechnung für V_s . Dazu werden die Formeln für I_e und I_i benötigt. Während der Elektronenstrom nach Formel 2.2 berechnet werden kann, ist für den Ionenstrom eine Abschätzung nach dem Bohm-Kriterium möglich. I_i beträgt dann

$$I_i = -\alpha n_e e A \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}} \quad (2.3)$$

mit der Ionenmasse m_i und $\alpha = n_{p,edge}/n_{p,main}$, wobei die Plasmadichte an der Grenze des Sheath der Langmuir Sonde mit der des Hauptplasmas ins Verhältnis gesetzt wird. Üblicherweise ist $\alpha = 0.6$. Da bei $V_p = V_f$ Ionen- und Elektronenstrom den selben Betrag haben, müssen Formel 2.2 und 2.3 gleichgesetzt werden:

$$-\alpha n_e e A \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}} = A n_e e \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \exp \left(e \frac{V_f - V_s}{k_B T_e} \right)$$

$$-\alpha\sqrt{\frac{1}{m_i}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi m_e}} \exp\left(e\frac{V_f - V_s}{k_B T_e}\right) \quad .$$

Umstellung ergibt

$$\begin{aligned} -\alpha\sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} &= \exp\left(e\frac{V_f - V_s}{k_B T_e}\right) \\ V_s &= V_f + \frac{k_B T_e}{e} \ln\left(\alpha\sqrt{\frac{2\pi m_e}{4m_i}}\right) \end{aligned}$$

für das Plasmapotential.

2.2.4 Berechnung der Elektronendichte

Die Berechnung der Elektronendichte ist am kompliziertesten und von den höchsten Fehlern betroffen. Das ist bedingt durch die ungenaue Bestimmung des Ionensättigungsstroms, aus welchem anschließend n_e berechnet wird. Auf das genaue Vorgehen wird hier nicht eingegangen.

2.2.5 I-V-Kurve einer realen Langmuir Sonde

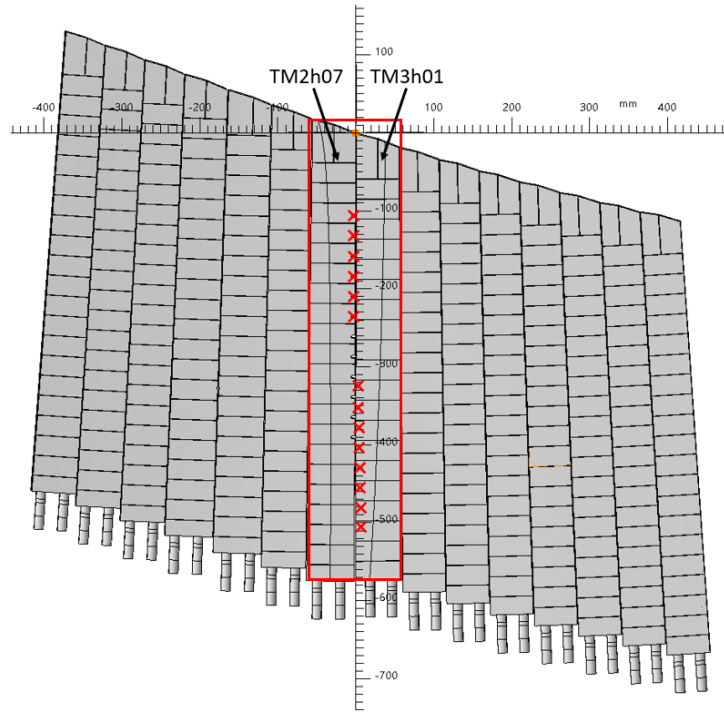
Eine reale Langmuir Sonde zeigt einen vom Ideal abweichenden Verlauf der I-V-Kurve. So ist der Betrag von I_{es} hier aufgrund von Kollisionen im Plasma sowie der Präsenz eines Magnetfelds niedriger. Auch ist der scharfe Knick bei $V_p \approx V_s$ abgerundet, wodurch seine Position schwerer zu bestimmen ist. Zusätzlich erschwerend auf die Bestimmung von V_s wirkt sich der Umstand aus, dass das Plasma in der Nähe der Sonde mit dieser interagiert. Demnach ist das dortige Plasmapotential nicht identisch mit dem des ungestörten Plasmas abseits der Sonde.

Neben den bereits genannten Schwächen und Schwierigkeiten zeigen Langmuir Sonden auch systematische Fehler und Operationsbeschränkungen. Beispielsweise neigen sie zur Unterschätzung der Elektronentemperatur, da Sekundärelektronen mitgemessen werden. Das sind durch Impulsübertrag aus der Sonde herausgeschlagene Elektronen, die durch das Sondenpotential wieder von der Sonde angezogen werden und zum Nettostrom beitragen. Neben diesem Effekt verändert die Erosion der Sonde auch die Größe ihrer Oberfläche, die allerdings in die Berechnungen eingeht. Des Weiteren sind Langmuir Sonden in elektrischen Feldern als Messinstrumente unbrauchbar.

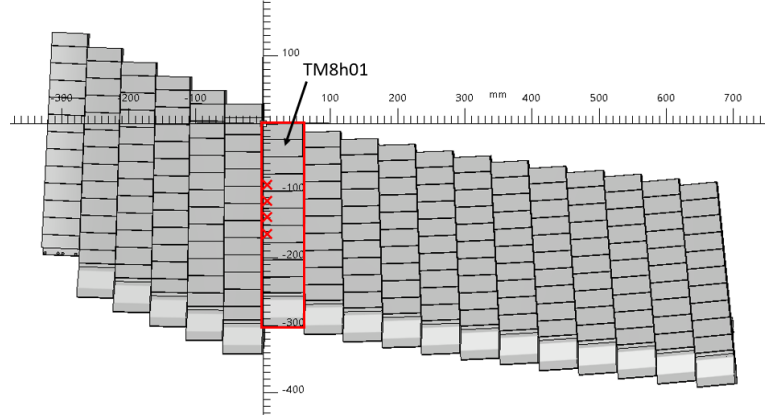
2.3 Langmuir Sonden in Wendelstein 7-X

Auf den Wandelementen von W7-X – konkret auf dem Divertor in (M5) – sind 36 LS montiert. Sie befinden sich an symmetrischen Positionen der oberen und unteren Divertoreinheit (DU), je 18 Stück pro DU. Davon befinden sich vier im high-iota und 14 im low-iota Bereich, wo sie unter anderem die Messung von Elektronendichte und Elektronentemperatur ermöglichen. Die Positionen sind in Abb. 2.2 als rote Kreuzchen

markiert. Die toroidalen Winkel und genauen Positionen können Tab. 10.2 entnommen werden.



(a) Low-iota Bereich, TM2h07 und TM3h01



(b) High-iota Bereich, TM8h01

Abbildung 2.2: Position der Langmuir Sonden (rote Kreuze) auf den Targetelementen (rote Kästen). Der Pumpspalt ist jeweils auf der Seite mit dem Koordinatenursprung (oben).

Aktuell erreicht W7-X eine Elektronendichte von standardmäßig $3 \times 10^{19}/\text{m}^3$ bis $6 \times 10^{19}/\text{m}^3$ und einer Gesamtheizleistung von bis zu 8 MW sowie Entladungszeiten von maximal 8 min. In Zukunft soll die Gesamtheizleistung auf 10 MW und die Dauer einer Entladung auf 30 min steigen. Aufgrund der damit verbundenen, schon jetzt sehr ho-

hen thermischen Lasten von $100 \text{ MW/m}^2 - 200 \text{ MW/m}^2$ bei direktem Kontakt mit dem Plasma können die Sonden dem Plasma nicht dauerhaft ausgesetzt sein. Das Material würde schmelzen und die Sonden würden zerstört. Statt stationären Sonden handelt es sich deshalb um sogenannte Pop-up Langmuir Sonden aus Wolfram, die in Intervallen ins Plasma ein- und ausgefahren werden. Das resultiert in einer diskontinuierlichen Messung etwa aller 2-3 s.

Pro Messung ist eine Langmuir Sonde dem Plasma für höchstens 50 ms ausgesetzt, bevor sie zum Abkühlen wieder aus dem Plasma zurück gezogen wird. In den 50 ms sind die Haltezeit und die Dauer des Zurückziehens inbegriffen. Für die Messung liegt an den Langmuir Sonden eine Sinusspannung an die sich zwischen -180 V und 20 V bewegt. Dieser Bereich wird während einer Messung mehrfach durchlaufen, wobei die Sonden-spannung V_p erfasst wird. Zusätzlich wird die Spannung V_b gemessen, die in einem identischen Parallelschaltkreis ohne Langmuir Sonde vorliegt. Die Differenz $V = V_p - V_b$ stellt das bereinigte Spannungssignal dar, welches möglichst frei vom Einfluss der langen Leitungen zu den Sonden ist. Die Stromstärke I_p kann nun unter Kenntnis des Vorwiderstandswerts R_s berechnet werden. Dieser liegt bei 5Ω , einzusetzen in $I_p = V/R_s$.

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 kann einerseits auf der Analyse der erreichten Spannungswerte basieren. Da allerdings durch kurzschlussbedingte Schäden an Vorwiderständen mitunter auch in normalen Messungen ohne Widerstandsabfall keine -180 V mehr erreicht werden, kann dieses Kriterium nur als Indikator dienen. Daher wird ein weiterer Prüfmechanismus etabliert, der den Widerstand des ganzen Schaltkreises testet. Zusätzlich muss der Anschluss der Sonde an den Schaltkreis geprüft werden. Anschließend müssen für betroffene Messungen Betriebs- und Plasmaparameter ausgelesen und verglichen werden, sodass eine mögliche Systematik erkennbar wird. Die genaue Umsetzung dieses Vorgehens wird im Folgenden erklärt.

3.1 Detektion von Widerstandsabfällen

3.1.1 Analyse des abgedeckten Spannungsbereichs

Der abgedeckte Bereich der Spannung liegt im Idealfall bei -180 V bis 20 V . Als einfachster Indikator kann daher der Maximal- und Minimalwert von V für jede Periode des Sinussignals bestimmt und mit diesen Limits verglichen werden (globale Maxima einer Periode). Dabei wird eine Toleranz von % angesetzt.

Wie bereits erwähnt bedeuten niedrigere Maximal- oder Minimalspannungen jedoch nicht zwangsläufig einen Widerstandsabfall. Ist bei einem vorangegangenen Widerstandsabfall durch die hohe Stromstärke der Vorwiderstand R_s beschädigt worden, so können danach die normalen Spannungslimits nicht länger erreicht werden. Das ist dann unabhängig von erneuten Widerstandsabfällen. Damit Messungen, die davon betroffen sind, nicht als Fehlmessungen deklariert werden, kann zusätzlich geprüft werden, wie sich die Extremwerte der Spannung entwickeln. Ist in einer Periode noch ein Minimum von -150 V erreicht worden, in der nächsten hingegen nur noch -125 V , so kann von einer Fehlmessung ausgegangen werden. Sind die Werte der Extrema hingegen konstant, so muss eine genauere Untersuchung erfolgen, um eine sichere Einordnung in korrekte oder Fehlmessung vorzunehmen.

3.1.2 Analyse des Widerstands des Schaltkreises

Eine Möglichkeit, genauer nachzuprüfen, ob ein Widerstandsabfall oder ein beschädigter Vorwiderstand die Ursache eines zu geringen Spannungsbereichs sind, kann der Gesamtwiderstand des Schaltkreises bestimmt werden. Dazu wird die von Widerstandsabfällen unbeeinflusste Inputspannung V_{in} durch I_p dividiert. Ausgeschlossen werden von der Analyse solche Wertepaare mit $|V_{in}| < 0,5\text{ V}$, da diese automatisch zu sehr niedrigen Widerstandswerten führen würden. Anschließend werden immer 50 Widerstandswerte gemittelt und gegen den Grenzwert von $300\ \Omega$ geprüft. Liegen sie darunter, wird die Messung als Fehlmessung betrachtet.

3.2 Bestimmung der Charakteristika der Entladung

3.2.1 Auslesen der Betriebsparameter

Magnetfeldkonfiguration, experiment description, program abort, cryo pump status, gas inlets

3.2.2 Auslesen der Plasmaparameter

Heizleistung und -quelle, Prad und frad (detachment), HHeRatio, ne, Te, Iplasma, Wdia

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_{reddep}	– 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

10 Appendix C: Tabellenwerte

Tabelle 10.1: Anteile der wichtigsten Magnetfeldkonfigurationen an der Plasmazeit in OP2.2 und OP2.3 von Wendelstein 7-X.

Konfiguration	Iota	OP2.2			OP2.3		
		Entlad- ungen	Plasmazeit		Entlad- ungen	Plasmazeit	
			(s)	(%)		(s)	(%)
DBM	low	17	99	0,48	121	5173	18,26
EIM	standard	989	11478	56,35	1024	14466	51,06
KJM	standard	320	3040	14,92	383	4171	14,72
FTM	high	148	1533	7,52	289	3047	10,76
FMM	high	118	1358	6,67	48	485	1,71
sonstige	-	210	2862	14,05	478	4688	16,55
alle	-	1802	20371	100	2343	28329	100

Tabelle 10.2: Die Positionen der Langmuir Sonden (LS) ist definiert als Abstand vom Pumpspalt und je nach Divertorabschnitt (DA) kategorisiert als high- oder low-iota. Die zugehörigen toroidalen Messpositionen auf der unteren und oberen Divertoreinheit (DU) sind gegeben als Φ .

LS	Target	DA	Position in (m)	Φ in ($^{\circ}$) obere DU	Φ in ($^{\circ}$) untere DU
00	TM2h07	low-iota	0,106	298,5	277,6
01			0,132	298,5	277,6
02			0,158	298,5	277,6
03			0,183	298,5	277,6
04			0,209	298,5	277,6
05			0,235	298,5	277,6
06	TM3h01		0,325	298,5	277,6
07			0,351	298,5	277,6
08			0,377	298,5	277,6
09			0,403	298,5	277,6
10			0,429	298,5	277,6
11			0,454	298,5	277,6
12			0,480	298,5	277,6
13			0,506	298,5	277,6
14	TM8h01	high-iota	0,092	272,9	303,2
15			0,117	272,9	303,2
16			0,133	272,9	303,2
17			0,158	272,9	303,2