



Melina Arvanitou

Bestimmung der Leistungsdeposition der Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH) durch deren Modulation während Plasmaexperimenten am Wendelstein 7-X

IPP 2023-08
Juni 2023

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc)
an der Technischen Universität Berlin
im Studiengang Physik ¹



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR PLASMAPHYSIK



Bestimmung der Leistungsdeposition der Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH) durch deren Modulation während Plasmaexperimenten am Wendelstein 7-X

Technische Universität Berlin
Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

Melina Arvanitou

Matrikelnummer: 391380

Betreuer: Dr. Matthias Hirsch, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Erstgutachter: Prof. Dr. Robert Wolf, Technische Universität Berlin, IPP
Zweitgutachter: Prof. Dr. Wolf-Christian Müller, Technische Universität Berlin

¹Diese Version beinhaltet, gegenüber der an der Technischen Universität Berlin eingereichten Version, geringfügige Korrekturen.

Eidstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Melina Arvanitou, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, 15.03.2023

Melina Arvanitou

Berlin, Datum

Vollständiger Name

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	2
2.1	Elektron-Zyklotron-Emission (ECE)	2
2.1.1	Radiometer	2
2.1.2	Emissionsspektrum	4
2.1.3	Optische Dicke	5
2.2	Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH)	8
2.3	Leistungsdeposition	9
3	Methode zur Bestimmung der Leistungsdeposition	11
3.1	Datenvorbereitung	11
3.1.1	Conditional Averaging	13
3.1.2	Filter	16
3.2	Steigungsbestimmung	17
3.3	Teilchendichte n_e	20
3.3.1	Thomson-Streuung	21
3.3.2	Teilchendichte n_e aus ECE-Daten	21
3.4	Leistungsdeposition	23
3.4.1	Leistungsdichte	23
3.4.2	Insgesamt deponierte Leistung	24
4	Anwendung der Automatisierung	27
4.1	Leistungsdeposition bei verschiedenen Modulationsfrequenzen	27
4.1.1	Signal-Rausch-Verhältnis	28
4.1.2	Aussagekraft der Leistungsdeposition	29
4.2	Einbezug des Zoom-Systems	32
5	Zusammenfassung und Ausblick	34
	Literatur	36

Abbildungsverzeichnis

1	Illustration des Prinzips der ECE.	3
2	Beispiel von Emissionsspektren der ECE	5
3	Illustration eines Torusstücker mit normalem effektiven Radius ρ	6
4	Beispiel der mit TRAVIS berechneten T_e - und n_e -Profile	7

5	Schematische Darstellung des Programmaufbaus der Automatisierung	11
6	Schematische Darstellung des Programmteils „DataPrep“	12
7	Exemplarische Darstellung der Bestimmung der Triggerpunkte anhand des Schaltverhaltens der ECRH	14
8	Exemplarische Darstellung der mit Conditional Averaging gemittelten Temperaturverläufe der ECE	15
9	Exemplarische Darstellung der Filtermethode im Programmteil „DataPrep“ . . .	16
10	Schematische Darstellung des Programmteils „Slope“	17
11	Unterscheidung der Fitzeiträume δ	18
12	Beispiel zur Steigungsbestimmung $\Delta \frac{d}{dt} T_e$	20
13	Schematische Darstellung des Programmteils „Density“	20
14	Beispiel eines Teilchendichteprofiles aus der Thomson-Diagnostik	21
15	Exemplarische Darstellung der berechneten Teilchendichte n_e aus den Daten der ECE	22
16	Schematische Darstellung des Programmteils „PowerProfile“	23
17	Exemplarische Darstellung eines Leistungsdichtedepositionsprofils einer on-axis-Heizung	24
18	Exemplarische Darstellung eines Leistungsdepositionsprofils einer on-axis-Heizung	26
19	Exemplarische Darstellung eines Leistungsdepositionsprofils einer off-axis-Heizung	27
20	Vergleich der ECE Messsignale verschiedener Modulationsfrequenzen	29
21	Vergleich der Leistungsdeposition verschiedener Modulationsfrequenzen	30
22	Exemplarische Darstellung eines Emissionsspektrums der ECE mit Einbezug Zoom-System	32
23	Exemplarische Darstellung eines Leistungsdepositionsprofils mit Einbezug des Zoom-Systems	33

1 Einleitung

Der Wendelstein 7-X (W7-X) ist das weltweit größte Fusionsexperiment vom Typ Stellarator. Durch supraleitende Spulen wird ein Magnetfeld erzeugt, in welchem das bis zu 10^8 K heiße Plasma eingeschlossen wird. Die Feldlinien des Magnetfelds bilden ineinander geschachtelte Flussflächen, auf welchen sich durch Stöße der Plasmateilchen ein Temperatur- und Druckgleichgewicht im Plasma einstellt. Senkrecht der Magnetfeldlinien werden die Teilchen im Plasma zu einer Gyrationbewegung gezwungen. Durch diese Gyrationbewegung emittieren die Elektronen Zyklotronstrahlung, die sogenannte Elektron-Zyklotron-Emission (ECE).

Die Plasmaheizung am W7-X, die sogenannte Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH), nutzt diesen Umstand aus, um mithilfe von Mikrowellenstrahlung die Elektronen im Plasma zu dieser Gyrationbewegung anzuregen. Typischerweise liegt in der Plasmamitte ein Magnetfeld von $B = 2,5$ T an, sodass die Elektronen mit einer Gyrationfrequenz von 70 GHz und deren Harmonischen anregbar sind. Die Mikrowellenstrahlung der ECRH wird am W7-X durch Gyrotrons mit einer Frequenz von 140 GHz erzeugt, welche der zweiten harmonischen Resonanzfrequenz der Elektronen entspricht. Die angeregten Elektronen geben durch Stöße ihre Energie an die Ionen im Plasma ab, sodass die Ionen auf Temperaturen gebracht werden, bei welchen Kernfusion möglich ist.

Um den Ort der Leistungsdeposition der ECRH im Plasma zu bestimmen, wird die Leistung eines Gyrotrons periodisch moduliert. Anhand der Temperaturänderung als Reaktion der ECE auf die Modulation können Rückschlüsse auf die deponierte Leistung gezogen werden.

Zur Temperaturbestimmung der Elektronen wird am W7-X die Strahlungsemission der ECE gemessen. Da unter den gegebenen Bedingungen das Plasma als Schwarzkörper angesehen werden kann, ist die Intensität der Schwarzkörperstrahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zu der Strahlungstemperatur T_{Rad} im Plasma. Zur Bestimmung dieser Strahlungsemission wird am W7-X ein Radiometer mit insgesamt 32 Kanälen verwendet, wobei jeder Kanal einen diskreten Frequenzbereich abtastet. Durch die Abhängigkeit der Zyklotronfrequenz von der Stärke des lokalen Magnetfeldes kann so jeder gemessenen Frequenz ein definitiver Ort im Plasmaquerschnitt zugeordnet werden. Durch diese Zuordnung und die Untersuchung der sofortigen Reaktion der Temperatur auf das Modulieren der ECRH kann ein örtlich aufgelöstes Leistungsdepositionsprofil erstellt werden.

Diese Bachelorarbeit baut auf der Arbeit von Céline Dyhring [1] auf, in welcher sie gezeigt hat, dass diese Methode zur Bestimmung der Leistungsdeposition der lokal deponierten Leistung aussagekräftig ist. Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die von ihr gezeigte Methode in ein automatisiertes Verfahren zur Anwendung im aktiven Experimentbetrieb am W7-X zu formulieren.

2 Theorie

Am Wendelstein 7-X (W7-X) wird das Plasma mithilfe eines starken, verdrillten Magnetfeld eingeschlossen. Dieses wird durch nicht-planare Spulen um ein torusförmiges Plasmagefäß erzeugt. Die Spulen liefern jeweils eine toroidale und poloidale Magnetfeldkomponente. Beim mehrmaligen Umlaufen der magnetischen Feldlinien um den Torus mit großem Radius R entstehen ineinander geschachtelte Flussflächen um eine magnetische Achse. Auf diesen magnetischen Flussflächen stellen sich durch Stöße konstante Bedingungen für Temperatur und Dichte und somit ein konstanter Druck der Plasmateilchen ein. Typischerweise nimmt im Tokamak das Magnetfeld entlang einer Sichtlinie zum Toruszentrum hin zu, da die toroidalen Spulen dort näher zusammenstehen. In dem dreidimensionalen Magnetfeld von Stellaratoren, wie dem W7-X, gibt es allerdings Stellen entlang der Sichtlinie, an denen das Magnetfeld konstant bleibt. Dies ist für diese Arbeit allerdings nicht weiter von Belang.

2.1 Elektron-Zyklotron-Emission (ECE)

Senkrecht der Magnetfeldlinien werden die Teilchen im Plasma durch die Lorentz-Kraft auf eine helikale Bahn gezwungen. Diese Gyrationbewegung sorgt für das Emittieren von Zyklotronstrahlung durch Elektronen, der sogenannten Elektron-Zyklotron-Emission (engl. *Electron Cyclotron Emission*). Die Zyklotronstrahlung hat dabei die Zyklotronfrequenz ω_{cr} und ist abhängig vom Magnetfeld B sowie der Elektronenmasse m_e [2]:

$$\omega_{cr} = n \cdot \frac{e \cdot B}{m_e} \quad (1)$$

2.1.1 Radiometer

Durch die Abhängigkeit vom Magnetfeld $B(R)$ kann jede Zyklotronfrequenz ω_{cr} einer Harmonischen $n \in N$ einem definitiven radialen Ort R im Plasmaquerschnitt zugeordnet werden (siehe Abbildung 1 oben). Dafür wird am W7-X ein Radiometer mit insgesamt 32 Kanälen verwendet, welches mit dem Frequenzbereich von 126 GHz bis 162 GHz die gesamte zweite Harmonische $n = 2$ abdeckt. Jeder Kanal tastet, mit einer Samplefrequenz von maximal 2 MHz, einen diskreten Frequenzbereich Δf_i ab. f_i ist dabei die charakteristische mittlere Frequenz des Radiometerkanals. Die Kanäle, welche eine charakteristische Frequenz unterhalb der Frequenz im Plasmazentrum besitzen, liegen dabei auf der Niederfeldseite (engl. **Low Field Side**) und die Kanäle oberhalb der Plasmafrequenz im Zentrum auf der Hochfeldseite (engl. **High Field Side**).

In Abbildung 1 ist der Sichtbereich des Radiometers illustriert. Oben ist die Abhängigkeit des Magnetfeldes B vom großen Torusradius R dargestellt. Der Radius R_0 markiert die Plasmamitte

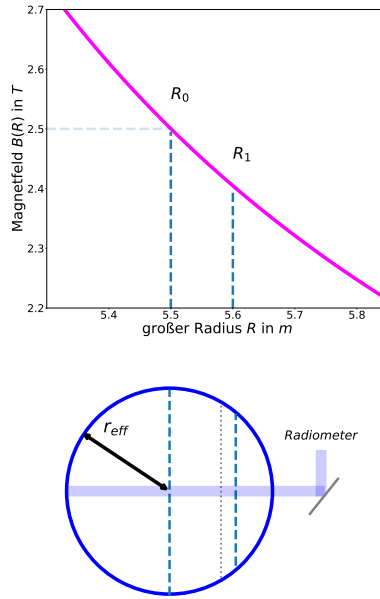


Abbildung 1: Illustration des Prinzips der ECE. Oben ist die Abhängigkeit des Magnetfeldes B von dem großen Radius R dargestellt. R_0 stellt dabei die Plasmamitte bei $B = 2,5$ T dar. Aufgrund der radialen Auflösung und der gewählten Sichtlinie des Radiometers ist in der vertikalen die Variation wesentlich geringer und kann am gewählten Messort nahezu konstant betrachtet werden. Das untere Bild zeigt den idealisiert angenommenen kreisförmigen Torusquerschnitt mit dem effektiven Radius r_{eff} und der Sichtlinie des ECE-Radiometers. Diese Abbildung basiert auf der Quelle [3].

bei einem Magnetfeld von $B = 2,5$ T und einer Plasmafrequenz von $f = 140$ GHz. Das Bild unten zeigt einen idealisiert angenommenen kreisförmigen Torusquerschnitt mit eingezeichneter Sichtlinie (blau) des Radiometers. Das Radiometer basiert auf einer inhärent breitbandigen Gauß-Strahl-Teleskop-Optik zur Realisierung eines gaußförmigen Strahlenprofils entlang der Radiometersichtlinie. Wichtig dabei ist zu erwähnen, dass der Strahldurchmesser der Optik eine entscheidende Rolle für die Messsignale der ECE spielt. Ist der Strahldurchmesser sehr groß gewählt, so wird ein großer Teil der Flussfläche, bzw. gegebenenfalls mehrere Flussflächen, wegen der vertikalen Ausdehnung des Stahlprofils abgetastet. Ist der Strahl dagegen fokussiert, so ist eine hohe räumliche Auflösung möglich. Das Radiometer ist mit einem starken und sehr schmalbandigen Notch-Filter bei exakt 140 GHz zur Unterdrückung des Hintergrundes nicht-absorbierter Leistung der ECRH-Heizstrahlen ausgestattet (siehe Abschnitt 2.2) [3]. Für die Positionierung der Sichtlinie des Radiometers wird ausgenutzt, dass sich bei Stellaratoren das Magnetfeld toroidal ändert. Diese Eigenschaft von Stellaratoren erlaubt es, für die Sichtlinie des Radiometers einen toroidalen Ort zu wählen, an welchem die 140 GHz nicht in der Plasmamitte liegen. An dieser Sichtlinie kann somit die Temperatur des Plasmazentrums ungestört vom

140 GHz Hintergrund beobachtet werden.

2.1.2 Emissionsspektrum

Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz kann aus der Intensität I der abgestrahlten Schwarzkörperstrahlung die Elektronentemperatur T_e bestimmt werden. Aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz mit der Energie E , dem Planck'schen Wirkungsquantum h und der Boltzmannkonstante k_B lässt sich die Temperatur T bestimmen:

$$E(f, T) = \frac{hf}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \quad (2)$$

Die Frequenzen der ECE liegen im Bereich der Mikrowellenstrahlung, wodurch $hf \ll k_B T$ gilt. Das Strahlungsgesetz kann damit nach Rayleigh-Jeans ($e^x - 1 \approx x$) genähert werden. Mit Anwendung dieser Näherung wird die Energie und damit die Intensität direkt proportional zur Temperatur, mit $E(f, T) \approx k_B T$ [4].

Die hohe Temperatur der Elektronen im Plasma führt neben einer Dopplerverschiebung, aus Bewegungen parallel zum Magnetfeld, auch zu relativistischen Einflüssen auf die Zyklotronfrequenz ω_{cr} . Die Dopplerverschiebung, entsprechend der Bewegung parallel zum Magnetfeld, wird durch den Winkel Θ der Strahlungsemission zum Magnetfeld bestimmt und ist mit $\cos(\Theta) > \frac{v_t}{c}$ proportional zur thermischen Geschwindigkeit $v_t = \sqrt{(T_e/m_e)}$. Um diesen Effekt vernachlässigen zu können, wird die Sichtlinie des ECE-Radiometers senkrecht zum Magnetfeld gewählt [3]. Der Einfluss der relativistischen Massenzunahme um einen Faktor $m_e \cdot \gamma = \frac{m_e}{\sqrt{1 - \frac{v_t^2}{c^2}}}$ kann al-

lerdings nicht vernachlässigt werden. Die Zyklotronfrequenz $\omega_{cr} = n \cdot \frac{nB}{m_e \cdot \gamma}$ ist damit also nicht mehr alleine vom Magnetfeld B abhängig. Die Abhängigkeit von der thermischen Geschwindigkeit v_t führt zu einer Rotverschiebung proportional zur Elektronentemperatur T_e [4].

Die bei einer Frequenz emittierte Strahlungstemperatur T_{Rad} entsteht damit zum einen durch Elektronen mit sehr hoher Temperatur und entsprechend großer Rotverschiebung, aber einem großen, weiter entfernten Magnetfeld. Zum anderen durch kalte Elektronen mit kleiner Rotverschiebung und niedrigerem Magnetfeld, näher am Betrachter.

Vom Radiometer wird diese Strahlungstemperatur T_{Rad} gemessen, von welcher angenommen wird, dass sie die Elektronentemperatur T_e am Messort wiedergibt, ohne Effekte des Strahlungstransports und damit der optischen Dicke des Plasmas zu berücksichtigen. Da hier ein perfekter Schwarzkörper angenommen wird und im Rahmen dieser Bachelorarbeit lediglich das Steigungsverhalten der Temperatur und nicht die absolute Temperatur untersucht wird, kann für die Strahlungstemperatur T_{Rad} und die Elektronentemperatur T_e ein linearer Zusammenhang angenommen werden. Daher werden im Folgenden die zeitliche Änderung der

Strahlungstemperatur T_{Rad} und der Elektronentemperatur T_e als äquivalent angesehen. Die Strahlungstemperatur T_{Rad} aufgetragen über die Frequenzen des Radiometers liefern ein frequenz aufgelöstes Emissionsspektrum. Beispiele für solche Temperatur-Emissionsspektren sind in Abbildung 2 gezeigt.

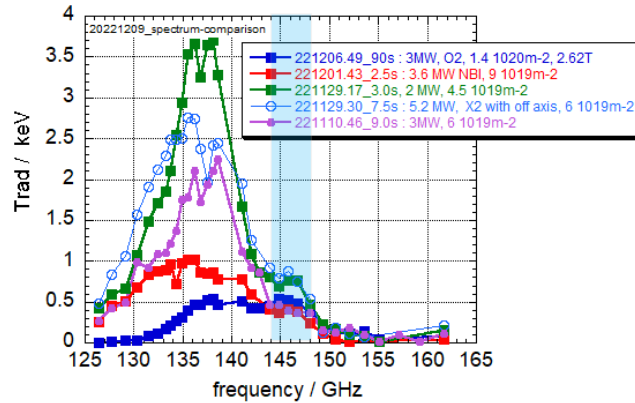


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung von verschiedenen Strahlungstemperatur-Emissionsspektren der ECE. Die Strahlungstemperatur T_{Rad} ist aufgetragen über die Frequenzen f des ECE-Radiometers. Jede Frequenz ist charakteristisch für einen Kanal des Radiometers und die Strahlungstemperaturen sind den ECE-Messdaten verschiedener Versuche entnommen.

2.1.3 Optische Dicke

Für eine gegebene Frequenz wird die Tiefe der Schicht, aus welcher die gemessene Strahlung stammt, das heißt die Ortsauflösung der ECE und damit auch, inwieweit Bedingungen eines schwarzen Körpers vorliegen, durch die optische Dicke des Plasmas bestimmt. Sie hängt neben der Elektronentemperatur T_e , der Teilchendichte n_e und der Polarisationsrichtung der emittierten Zyklotronstrahlung auch davon ab, welche Harmonische betrachtet wird. Unter den Bedingungen von den Plasmaexperimenten am W7-X ist davon auszugehen, dass das Plasma für die ordentliche Mode (O-Mode) der ersten Harmonischen und die außerordentliche Mode (X-Mode) der zweiten Harmonischen am optisch dicksten ist. Die O-Mode stellt dabei die Polarisationsrichtung der Zyklotronstrahlung parallel zum Magnetfeld und die X-Mode senkrecht zum Magnetfeld dar. Für diese Polarisationsrichtungen kann das Plasma als Schwarzkörper angesehen werden, es besitzt also einen Absorptions- und Emissionskoeffizienten nahe $\tau = 1$.

Frequenzen unterhalb der Plasmafrequenz sind im Plasma nicht ausbreitungsfähig, wodurch es zum Cut-Off kommt. Diese liegt für Fusionsplasmen gerade im Bereich der verwendeten Mikrowellen und steigt mit der Elektronendichte n_e . Die Polarisationsrichtung der zweiten

harmonischen X-Mode besitzt eine höhere Cut-Off-Teilchendichte als die erste harmonische O-Mode. Dadurch wird erstere bevorzugt für die ECE-Temperaturmessung am W7-X verwendet, um bei möglichst hohen Dichten messen zu können [2].

Die Annahme eines perfekten Schwarzkörpers, dessen Emission nur von der Temperatur bestimmt wird, ist allerdings lediglich in der Plasmamitte gegeben. Am Plasmarand ist das Plasma transparenter oder damit *optisch grau*. In einem optisch grauen oder halbtransparentem Plasma hängt die Intensität der ECE von der endlichen optischen Tiefe und damit auch von der Plasmadichte ab. Die Messungen der Strahlungstemperatur T_{Rad} am Plasmarand beinhalten damit ebenfalls Informationen über die Teilchendichte n_e .

Zur Berechnung der Lokalisierung der ECE Emission und damit den Ort der ECRH Absorption, sowie die Teilchendichte n_e aus den Radiometerdaten am Plasmarand, wird ein 3-D Raytracing- und Strahlungstransport-Programm namens TRAVIS (engl., **TR**Acing **VI**Sualised) verwendet. Das Programm wird am W7-X unter anderem zur Strahlenverfolgung im Plasma genutzt. Durch das Aufstellen von Ray-Tracing Gleichungen und Lösen mit der Gleichung der optischen Dicke kann damit die Absorption und Reemission einzelner Mikrowellenstrahlen der ECRH durchs Plasma berechnet werden. Sind das T_e -Profil sowie das Teilchendichteprofil (n_e -Profil) bekannt, kann sowohl der Strahlenverlauf der ECRH-Heizbeams und deren Absorption als auch der Ursprungsort der ECE-Emission bestimmt werden. Um aus dem gemessenen Spektrum (siehe Abbildung 2) ein Profil der Elektronentemperatur, und am Plasmarand auch eine Information über die Elektronendichte, zu ermitteln, muss für jeden Messkanal, also jeder Messfrequenz, der zugehörige Messort bestimmt werden.

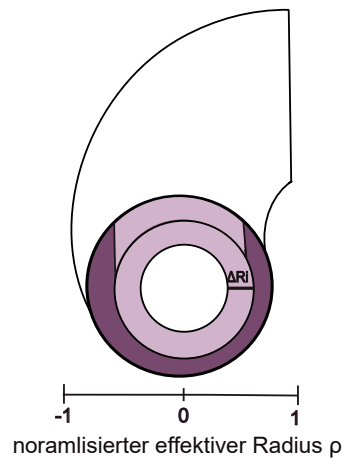


Abbildung 3: Illustration eines idealisierten Torusstückes eines Stellarators. Angedeutet sind die schlauchförmigen Volumina mit dem zugehörigen Radius ΔR_i und der Skalierung des normalisierten effektiven Radius ρ

Im Folgenden wird als Ortskoordinate der normalisierte effektive Radius ρ anhand des großen Torusradius R bestimmt. Die Abbildung 3 zeigt den idealisierten kreisförmigen Torusquerschnitt mit zugehörigem Radius ΔR_i und entsprechend dem normalisierten effektiven Radius ρ . Der normalisierte effektive Radius des Torus wird am W7-X mithilfe des Programmes VMEC (engl., **V**ariational **M**oments **E**quilibrium **C**ode) bestimmt. Dieses berechnet das magnetohydrodynamische Gleichgewicht. Der daraus resultierende mittleren Radius der Flussfläche wird dann als Funktion einer Flussgröße definiert [5]. Da jeder Kanal die Zyklotronstrahlung bei einem festen Magnetfeld und damit an dem zugehörigen Ort R im Plasma misst, kann jeder Frequenz auch ein normalisierter effektiver Radius ρ zugeordnet werden. Berechnet werden die normalisierten effektiven Radien ρ , indem jeweils der Mittelpunkt der Strahlenemission pro Kanal mit TRAVIS gefunden wird. Dabei sucht TRAVIS den Schwerpunkt der Strahlungsemission pro Radiometerkanal und legt die linke und rechte Grenze so fest, dass damit 95% der Strahlungsemission für diesen Frequenzbereich abgedeckt sind [6]. Damit wird jeder Frequenz ein um den ganzen Torus herumlaufendes schlauchförmiges Volumenelement ein mittleren normalisierten effektiven Radius ρ_m mit Grenzen ρ_l und ρ_r zugeordnet. Der Ort ρ_0 gibt dabei den Mittelpunkt des poloidalen Querschnitts an.

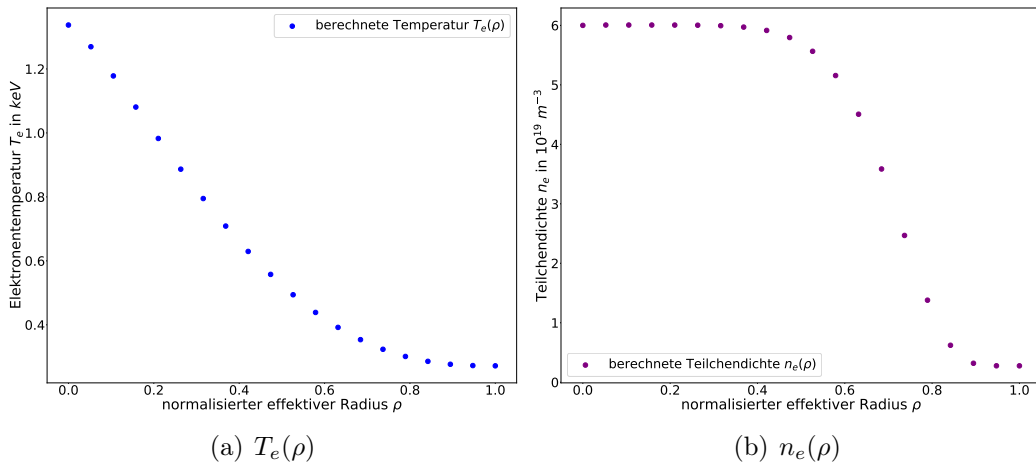


Abbildung 4: Darstellung der aus den ECE-Messungen ermittelten Profile von (a) Temperaturverlaufs T_e der ECE und der (b) Teilchendichte n_e des Versuches 20221123.014 zum Zeitpunkt $t = 3,3\text{s}$. Aufgetragen sind die berechneten Werte für Elektronentemperatur T_e und Teilchendichte n_e jeweils über den normalisierten effektiven Radius ρ . Die Teilchendichte wurde berechnet aus den Messdaten des ECE Radiometers und des Laser-Interferometers über die Vorwärtsanalyse berechnet, da die ECE im optisch dichten Plasmazentrum keine Information über die Zentraldichte beinhaltet.

Wegen der komplexen Abhängigkeit des gemessenen Spektrums von T_e , n_e und dem Magnetfeld werden letztere über eine Vorwärtsanalyse iterativ bestimmt [7]. Trägt man damit berechnete Elektronentemperatur T_e bzw. Teilchendichte n_e über den für das Radiometer berechnete

normalisierte effektive Radian auf, so entstehen das vorhergesagte Temperaturspektrum, exemplarisch dargestellt in Abbildung 4 (a) und ein Teilchendichteprofil, dargestellt in Abbildung 4 (b). Die Teilchendichte wurde hier mit Messdaten des ECE Radiometers und des Laser-Interferometers berechnet. Genaueres zu der Berechnung der Teilchendichte ist in Abschnitt 3.3.2 erläutert.

2.2 Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH)

Für die sogenannte Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizung (engl. *Electron Cyclotron Resonance Heating*) wird ebenfalls die beschriebene Gyrationbewegung der Elektronen genutzt. Die Gyrationbewegung dient dabei zum Aufheizen der Elektronen im Plasma. Der W7-X besitzt das weltweit größte System für die ECRH, bestehend aus insgesamt 10 Gyrotrons mit jeweils bis zu 1 MW Heizleistung und derzeit erreichter Gesamtleistungen bis zu 8 MW. Die Gyrotrons emittieren Mikrowellenstrahlung mit einer Frequenz von 140 GHz, welche unter dem 2,5 T starkem Magnetfeld des W7-X der zweifachen Zyklotronfrequenz ω_{cr} der Elektronen entspricht [8]. Diese liegt wie vorher beschrieben im Messbereich des ECE-Radiometers, weswegen dieses mit einem starken und sehr schmalbandigen Notch-Filter bei exakt 140 GHz zur Unterdrückung der hohen Streustrahlungsleistung der ECRH ausgestattet ist. Die Mikrowellenstrahlung wird beim W7-X über ein quasi-optisches Spiegelsystem von den Gyrotrons 40 m zum Torus übertragen. Die Strahlenleistung jedes Gyrotrons wird dabei vor Eintritt in das System über eine Diode gemessen, die vorher mit einer kalorimetrischen Last verglichen und damit kalibriert wurde [9].

Durch die Kopplung der resonanten Heizung an das Magnetfeld kann das Plasma an verschiedenen Stellen geheizt werden [10]. Die Gyrotrons emittieren, wie bereits erwähnt, Mikrowellenstrahlung der festgelegten Frequenz 140 GHz. Bei einem Magnetfeld von 2,5 T entspricht dies der zweifachen Zyklotronfrequenz und die Mikrowellenstrahlung wird absorbiert. Ist der Mikrowellenstrahl entlang der Plasmaachse auf die Plasmamitte gerichtet, wo genau diese 2,5 T herrschen, spricht man von einer „on-axis“-Heizung. Die Bauweise des Stellarators erlaubt es, eine toroidale Position für eine Sichtlinie zu finden, bei der das Plasmazentrum mit der ECE-Diagnostik beobachtet werden kann, ohne durch den Notch-Filter gegen die ECRH Streustrahlung behindert zu sein. So kann entsprechend die on-axis-Heizung trotz des Notchfilters beobachtet werden.

Der Mikrowellenstrahl der Gyrotrons kann durch einen Spiegel um einen Winkel Θ poloidal abgelenkt und damit auf eine andere Stelle im Plasma gerichtet werden. Dort trifft die emittierte Mikrowellenstrahlung auf eine andere Flussfläche, wo sie wieder bei einem Magnetfeld von 2,5 T absorbiert wird. In diesem Fall spricht man von einer „off-axis“-Heizung.

Neben der einfachen Einkopplung in das Gesamtsystem, bietet die ECRH als Heizmethode weitere entscheidende Vorteile. Bei der ECRH werden die Elektronen direkt geheizt. Die hei-

ßen Elektronen geben ihre Energie dann an die Ionen im Plasma ab. Dieser Umstand wird bei der ECRH am W7-X genutzt, um die spätere Heizung durch α -Teilchen in Fusionsplasmen zu simulieren. Die α -Teilchen geben dann ihre Energie durch Stoßprozesse an die Elektronen ab, welche wiederum die Ionen heizen [8]. Durch direkte Heizung der Elektronen ist die ECRH als Heizmethode präzise einsetzbar. Die ECRH zeichnet sich im Fall von Schwarzkörperabsorption durch lokale Wärme- und Leistungsdeposition aus und liefert damit ein wohl definiertes Heizprofil. Das direkte Heizen der Elektronen vermeidet bei Leistungsbetrachtung den Einbezug des späteren Wärmetransports, wodurch die Deposition der Heizleistung präzise zu beeinflussen und zu analysieren ist. Die Absorption der Mikrowellenstrahlung lässt sich damit aus der Änderung der Elektronentemperatur T_e bestimmen.

Andere Heizmethoden heizen eher die Ionen im Plasma. Zum einen wird direkte Ionenheizung wie bei der *Neutral Beam Injection (NBI)* und die Erzeugung von schnellen Ionen bei der *Ion Cyclotron Resonance Heating (ICRH)* genutzt [8]. Obwohl diese Heizmethoden ähnliche Iontemperaturen wie die ECRH erzeugen, muss die Energie der geheizten Ionen erst durch Stöße an Elektronen abgegeben werden. Erst durch das abbremsen der Ionen durch Stöße mit den Elektronen zeigt sich allmählich eine Reaktion der Elektronentemperatur T_e auf die Heizung. Das führt dazu, dass keine unmittelbare Reaktion von T_e auf die Heizung wie bei der ECRH zu erkennen ist. Der Einfluss von Wärmetransportprozessen in der Elektronentemperatur T_e resultiert dementsprechend auch in einem breiterem Depositionsprofil, da die tatsächliche deponierte Heizleistung schwerer von Wärmewellen, also dem Transport der Wärmeenergie über die Elektronen, zu trennen ist [11].

Um Wärmetransporteffekte genauer beobachten zu können, wird die ECRH moduliert. Die Modulation der Gesamtleistung der ECRH kann durch die Leistungsmodulation von einzelnen Gyrotrons erreicht werden. Möglich sind dabei beliebige Wellenformen bis zu einer Frequenz von 10 kHz [9]. Durch die Variation der Wellenformen und der Modulationsfrequenz können Wärmetransporte beeinflusst werden und dadurch andere Umstände betrachtet werden. Die Variation der Frequenz wird ebenfalls verwendet, um durch spätere Mittelung von Messdaten durch eine höhere Anzahl von Modulationsperioden ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis erhalten zu können. Obwohl bei der Modulation die Leistung von einzelnen Gyrotrons nur teilweise heruntergefahren wird, wird im Folgenden die Modulation der Gyrotrons als *An- und Ausschaltvorgang* der ECRH bezeichnet.

2.3 Leistungsdeposition

Eine solche Modulation wird im Folgenden benutzt, um die deponierte Leistung P_{ECRH} der ECRH im Plasma zu bestimmen. Zunächst wird die Energiebilanz des Plasmas am Ort der

ECE-Messung betrachtet:

$$P_{ECRH} = \frac{dW}{dt} + P_{loss} \quad (3)$$

W ist dabei die Energie des Plasmas und P_{loss} schließt alle Verluste durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung ein.

Da es sich bei der Modulation um eine Leistungsänderung durch das Schalten der ECRH handelt, wird die Energiebilanz über einen beliebig kleinen Zeitraum δ vor und nach dem Schaltzeitpunkt t_s der ECRH betrachtet. Mit $t_1 = t_s - \delta$ und $t_2 = t_s + \delta$ gilt:

$$\Delta P_{ECRH} = P_{ECRH}(t_2) - P_{ECRH}(t_1) \quad (4)$$

$$= \left(\frac{dW(t_2)}{dt} - P_{loss}(t_2) \right) - \left(\frac{dW(t_1)}{dt} - P_{loss}(t_1) \right) = \Delta \frac{dW}{dt} + \Delta P_{loss} \quad (5)$$

Mit der Annahme, dass es sich bei dem Plasma um ein ideales Gas handelt, ergibt sich für die Energie des Plasmas pro Volumenelement

$$W = \frac{3}{2} k_B [T_e(r, t) N_e(r, t) + T_i(r, t) N_i(r, T)] \quad (6)$$

mit Boltzmannkonstante k_B , den Elektronen- bzw. Iontemperaturen T_e bzw. T_i und den Teilchenzahlen für Elektronen und Ionen N_e und N_i .

Für $\delta \rightarrow 0$, kann angenommen werden, dass der Wärmetransport zwischen Elektronen und Ionen so gering ist, dass dieser in der Energiebilanz vernachlässigbar ist. Durch die Vernachlässigung von Stoßprozessen kann also die Iontemperatur T_i und Ionenteilchenzahl N_i als konstant angenommen werden und für die zeitliche Änderung gilt damit $\Delta T_i N_i = 0$. Die Teilchenzahl der Elektronen N_e kann durch das Vernachlässigen von Stoßprozessen ebenfalls als konstant angenommen werden. Der Verlustterm ΔP_{loss} fällt mit der Annahme weg, dass Wärmetransportprozesse im Allgemeinen Prozesse sind, die langsamer sind, als der betrachtete Zeitraum $t_2 - t_1$. Für die Leistungsänderung der ECRH gilt mit dieser Betrachtung:

$$\Delta P_{ECRH} = \frac{3}{2} k_B N_e \left(\frac{d}{dt} T_e(t_2) - \frac{d}{dt} T_e(t_1) \right) = \frac{3}{2} k_B N_e \left(\Delta \left(\frac{d}{dt} T_e \right) \right) \quad (7)$$

Gleichung (7) bestimmt die Leistungsänderung der ECRH P_{ECRH} proportional zur Temperaturänderung der Elektronen $\Delta \left(\frac{d}{dt} T_e \right)$ für ein Volumenelement, das durch einen Kanal des ECE-Radiometers charakterisiert wird. Die Änderung der Temperatur $\Delta \left(\frac{d}{dt} T_e \right)$ kann also mit der ECE-Diagnostik für jeden Kanal des Radiometers bestimmt werden. Dadurch entsteht ein räumlich aufgelöstes Leistungsdepositionsprofil. Der Zeitraum δ wird dabei als „direkt“ vor und nach dem Schaltzeitpunkt t_s angesehen und soll ausreichend klein gewählt werden. Es ist zu

beachten, dass Experimente am *ASDEX Upgrade* [12] zeigen, dass die ECRH Leistung an einer toroidal lokalisierten Stelle am Plasma deponiert und sich verzögert auf der Flussfläche verteilt. Diese Verzögerung liegt für den ASDEX Upgrade im Bereich von $50 \mu\text{s}$. Auch beim W7-X sind die ECRH Depositionszone und die ECE-Messung räumlich toroidal getrennt. Für die folgende Auswertung bedeutet das, dass der aus den Messdaten bestimmte Reaktionszeitpunkt der ECE auf das Schalten der ECRH um die beschriebenen Verzögerung von dem tatsächlichen Reaktionszeitpunkt verschoben ist. Die zeitliche Auflösung der Messung der ECE wäre zwar ausreichend, um diesen Zeitpunkt genau zu bestimmen, da es sich aber bei dem betrachteten Plasma um einen angenommenen Schwarzkörper handelt, existiert in den Messdaten der ECE aufgrund der Schwarzkörperstrahlung immer ein Rauschen, welches nicht beliebig klein ist. Aufgrund dieser „natürlichen“ Fluktuation bzw. Streuung der ECE ist der exakte Zeitpunkt, an welchem sich die Leistung auf der betrachteten Flussfläche verteilt, nicht bestimmbar. Daher bedeutet „direkt“ vor und nach dem Schaltzeitpunkt im Folgenden $\delta > 50 \mu\text{s}$ und damit die erste sichtbare Reaktion der ECE auf das Schalten der ECRH [11].

3 Methode zur Bestimmung der Leistungsdeposition

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine Automatisierung für die Berechnung von räumlich aufgelösten Leistungsdepositionsprofilen der ECRH aus den Messdaten der ECE zu erstellen. Diese soll im aktiven Experimentbetrieb des W7-X dazu dienen, eine erste Auswertung zur Leistungsdeposition bereitstellen zu können. Die gewählte Programmiersprache ist Python und zur besseren grafischen Übersicht ist die Automatisierung zusätzlich in JupyterNotebook darstellbar. Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau der Automatisierung. Das Programm ist in vier Unterprogramme aufgeteilt, wobei jedes auf dem jeweils vorherigen basieren. Die Reihenfolge der Unterprogramme ist daher nicht variierbar.

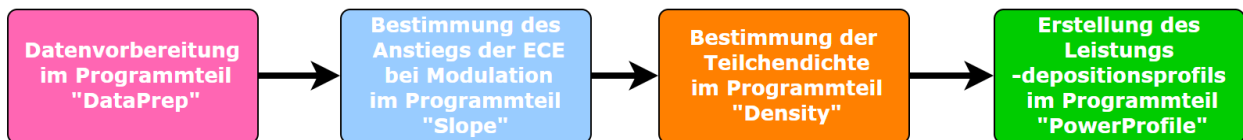


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Programmaufbaus der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Automatisierung zur Erstellung eines Leistungsdepositionsprofils aus Messdaten der ECE

3.1 Datenvorbereitung

Die gemessenen Daten der ECE sind durch diverse Einflüsse stark verrauscht und müssen zur weiteren Verarbeitung zunächst vorbereitet werden.

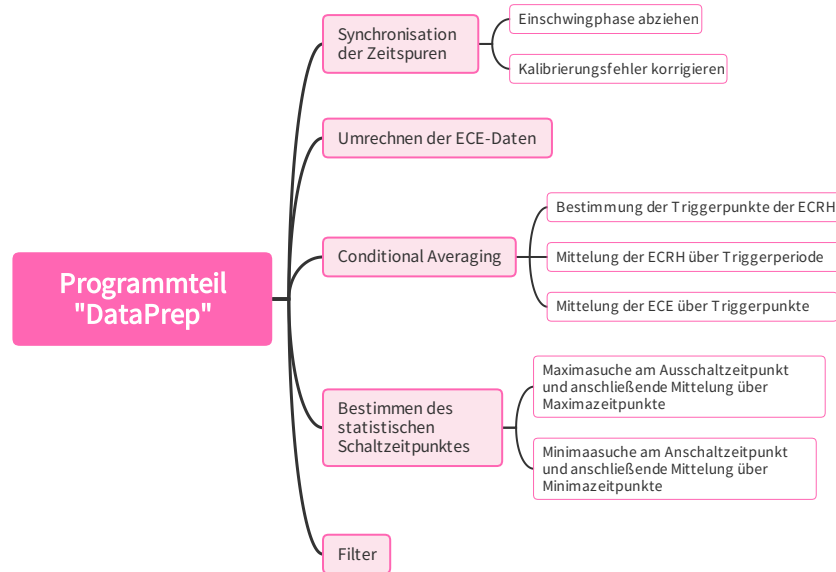


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Programmteils „DataPrep“ der beschriebenen Automatisierung zur Erstellung eines Leistungsdepositionsprofils der ECRH durch deren Modulation

Wie in der schematischen Darstellung in Abbildung 6 zu sehen, müssen diverse Schritte zur Vorbereitung der Messdaten durchlaufen werden. Die Messdaten der ECRH und ECE werden durch unterschiedliche Datenerfassungssysteme aufgenommen. Während die Zeitspuren der ECE für jeden einzelnen Kanal des Radiometers bereits synchron laufen, kann es durch technische Probleme in den Datenerfassungssystemen zu Unterschieden in den Zeitspuren zwischen ECRH und ECE kommen. Um diese Eventualität in der Automatisierung zu berücksichtigen, werden zuerst die Zeitspuren der ECRH und der ECE synchronisiert. Wird ein Gyrotron geschaltet, entstehen zunächst Nebenfrequenzen in der Einschwingphase, bevor die angestrebten 140 GHz erreicht werden. Zu sehen sind diese Nebenfrequenzen meist durch einen kurzzeitigen (< 2 ms) Peak in den ECE-Signalen während der Einschwingphase der Gyrotrons. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Peak die erste Reaktion der ECE auf das Schalten der ECRH darstellt. Der Peak ist allerdings gegebenenfalls nicht in jedem einzelnen Kanal der ECE zu sehen. Da aber die einzelnen ECE-Signale zeitlich synchron sind, können diese zu einem einzigen Signal aufaddiert werden. Es entsteht ein breites ECE-Signal, welches im weiteren Verlauf keine weitere Zweckmäßigkeit hat, außer die erste Reaktion der ECE auf das Schalten der ECRH zu bestimmen. Legt man den Zeitpunkt des detektierten Peaks als Anfangszeitpunkt der ECE fest, können so die Zeitspuren jedes einzelnen Kanals mit der Zeitspur der ECRH synchronisiert werden.

Da die Daten der ECE-Kanäle im Experimentbetrieb in *bit* gemessen werden, müssen diese zur

weiteren Verwertung in keV wie folgt umgerechnet werden:

$$T_{rad}[keV] = \frac{T[bit]}{\Delta U/[V]} \cdot a_{rel}[kev/V] \cdot D_{RZ} \cdot \frac{D_{IF}}{G} \quad (8)$$

Neben einem festen Umrechnungswert von $\Delta U/[V] = 5513 \frac{bit}{V}$ wird für jeden Kanal anhand seiner Reaktion auf eine bekannte Temperaturerhöhung ein Kalibrierungsfaktor a_{rel} multipliziert. Dieser ist für jeden Kanal individuell und wird in der Automatisierung aus dem Datenarchiv abgerufen. Zusätzlich einbezogen werden die diagnostikspezifischen Verstärkungs- bzw. Abschwächungskoeffizienten des Radiometers D_{IF} und G . Der Abschwächungskoeffizient ergibt sich aus der *Zwischenbereichsfrequenzdämpfung* D_{IF} . D_{IF} ist die Dämpfung des breitbandigen Abschwächers, jeweils am Eingang des Empfängers für die Niederfeldseite (Kanäle 1-16) oder der Hochfeldseite (Kanäle 17-32). Dadurch unterscheidet sich D_{IF} für LFS und HFS und ist im Datenarchiv in dB angegeben. Diese lassen sich in Faktoren umrechnen, als typische Umrechnungsfaktoren werden $\frac{2}{3}/dB$ für die HFS bzw. $5/dB$ für die LFS verwendet. Ist also $D_{IF,LFS} = 3dB$, so entspricht dies einem Faktor von $D_{IF,LFS} = 2$. Analog, ist $D_{IF,HFS} = 20dB$, so ist der Faktor $D_{IF,HFS} = 100$. Der Verstärkungsfaktor G , des in jedem Kanal auf die Detektordiode folgenden Videoverstärkers, ist ebenfalls aus dem Datenarchiv abrufbar und kann ebenfalls von Kanal zu Kanal variieren [13].

3.1.1 Conditional Averaging

Bei Betrachtung der ECE-Signale fällt auf, dass diese teilweise sehr verrauscht sind. Um die verrauschten Daten der ECE dennoch nutzen zu können, wird das *Conditional Averaging* verwendet. Dabei ist zu beachten, dass neben systembedingtem Rauschen auch eventuelle tatsächliche statistische Schwankungen im ECE-Signal herausgefiltert werden.

Die Modulation der ECRH ist ein periodischer Vorgang. Das Verhältnis (ausgeschaltetes Gyrotron : angeschaltetes Gyrotron), auch *duty cycle* genannt, kann dabei im Experimentbetrieb variiert werden.

Die Abbildung 7 zeigt beispielsweise eine Modulation der ECRH im duty cycle 3 : 1. Durch das Definieren sogenannter Triggerpunkte wird ein Bereich festgelegt, über welchem alle Perioden der Modulation gemittelt werden und so Rauscheffekte verringert werden können. In der Automatisierung werden die Triggerpunkte über eine Höhenunterscheidung gefunden. Zunächst werden alle An- bzw. Ausschaltzeitpunkte $t_{s,an}$ bzw. $t_{s,aus}$ in den Datenspuren der ECRH gesucht. Diese sind in der Regel durch steile, vertikale Anstiege zu erkennen und in Abbildung 7 in blau ($t_{s,aus}$) bzw. grün ($t_{s,an}$) markiert.

Ausgehend von einem Ausschaltvorgang $t_{s,aus1}$ wird der Abstand zum vorherigen Anschaltvorgang $t_{s,an1}$ berechnet und die Mitte dieses Abstands als Start-Triggerpunkt (rot gestrichelt)

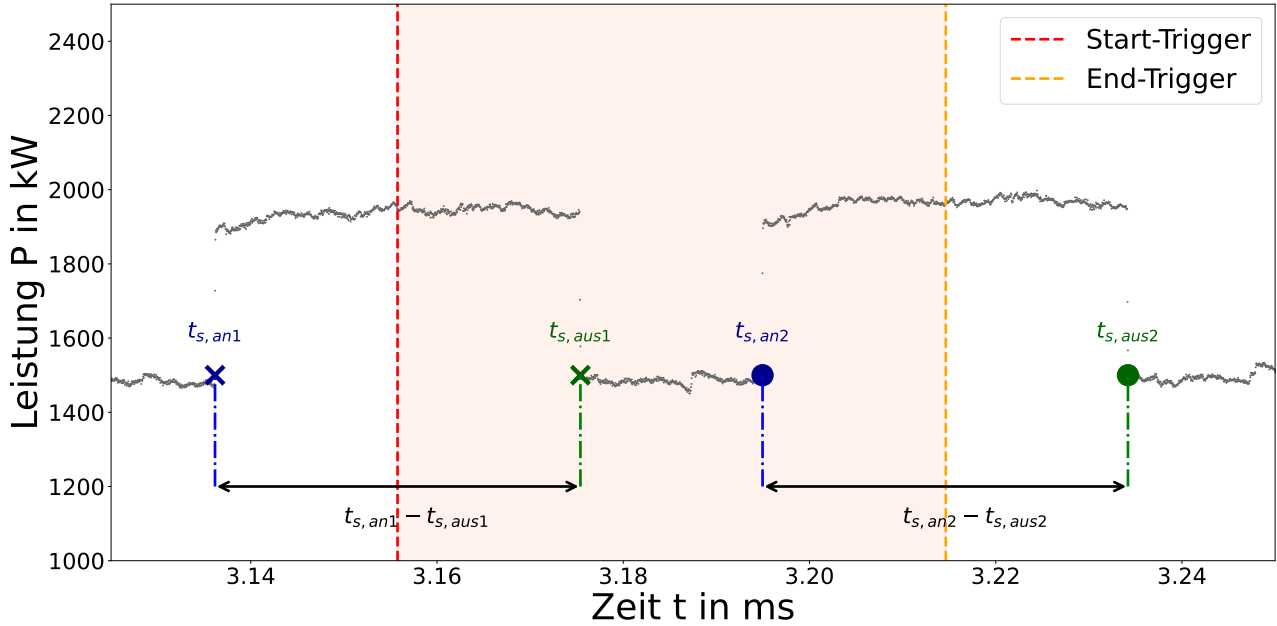


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Bestimmung der Triggerpunkte anhand des Schaltverhaltens der ECRH. Gezeigt ist der Versuch 20221215.015 im Zeitintervall 3,13 – 3,25 ms. Die rot gestrichelte Linie stellt beispielhaft einen Start-Triggerpunkt und die orange gestrichelte Linie einen End-Triggerpunkt dar, die rot hinterlegte Fläche die daraus entstehende Mittelungsperiode für das Conditional Averaging.

festgelegt. Der End-Triggerpunkt (orange gestrichelt) wird entsprechend durch den Abstand $t_{s,an2} - t_{s,aus2}$ festgelegt. Durch das Mitteln über diese Triggerpunkte entsteht eine Periode (rot hinterlegt) mit je einem Aus- und Anschaltzeitpunkt des Gyrotrons. Die darauffolgenden Triggerpunkte bzw. Perioden bestimmen sich analog. Die Mittelung über diese Perioden ist, da es sich um einen automatisierten Prozess handelt, unabhängig vom Modulationsverhältnis oder der Modulationsfrequenz. Außerdem kann durch die Form der Periode sichergestellt werden, dass kein Informationsverlust durch Mittelung über die Schaltzeitpunkte t_s entsteht und ebenfalls keine erneute numerische Mittelung gemacht werden muss. Für die Triggerpunkte der ECRH werden im Anschluss die Datenspuren der ECE gemittelt.

Zu sehen ist in Abbildung 8, dass die ECE nicht für alle Kanäle direkt auf das Schalten der ECRH reagiert und der Reaktionszeitpunkt t_r damit vom Schaltzeitpunkt der ECRH t_s abweicht. Diesen Reaktionszeitpunkt t_r zu finden, ist eines der Grundprobleme der Automatisierung. Im weiteren Verlauf gilt es genau die Kanäle, welche direkt (siehe Abschnitt 2.3) auf das Schalten der ECRH reagieren, abzuschätzen. Diese liegen rund um die Depositionszone der ECRH, während Volumina, welche weiter weg von der Depositionszone liegen, verzögert reagieren. Liegt ein Kanal weiter weg von der Depositionszone, wird dort nicht direkt Leistung deponiert. Erst durch Wärmewellen erreicht die Heizung den entsprechenden Kanal und die

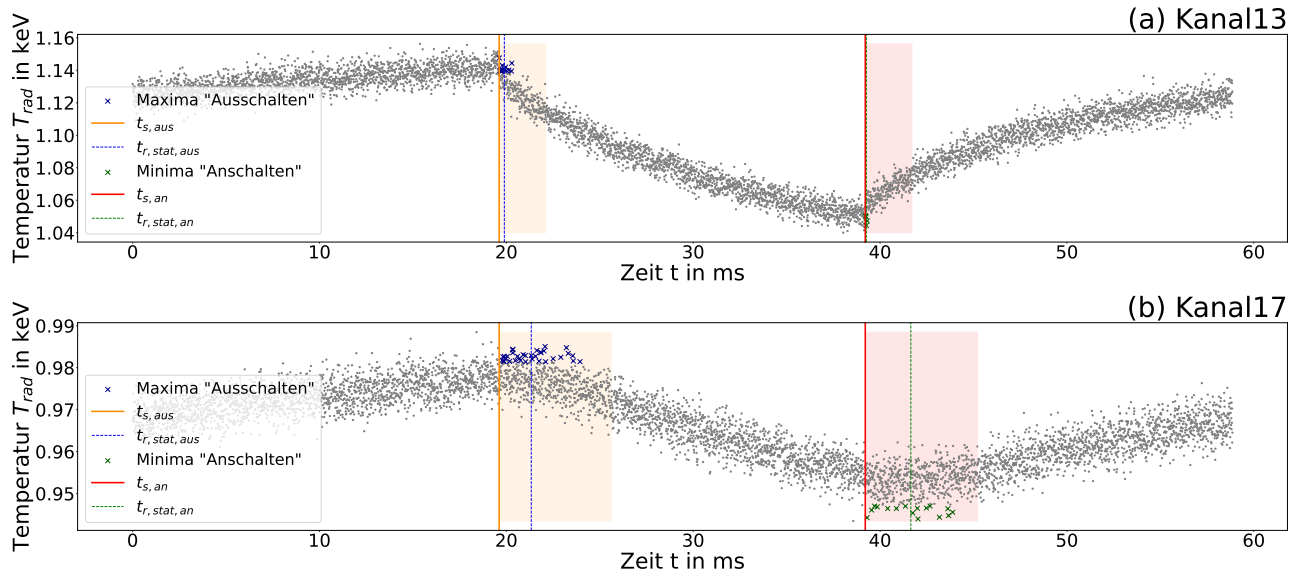


Abbildung 8: Darstellung des Temperaturverlaufes T_{Rad} der ECE des Versuches 20221123.014 für (a) Kanal 13 und (b) Kanal 17 des Radiometers. Gezeigt sind der gemittelte An- bzw. Ausschaltzeitpunkt $t_{s,aus} \approx 19.62 \pm 0.05$ ms bzw. $t_{s,an} \approx 39.21 \pm 0.05$ ms der ECRH, sowie die statistisch bestimmten Reaktionszeitpunkte $t_{r,stat,an}$ bzw. $t_{r,stat,aus}$ der ECE.

Temperatur ändert sich erst mit einer Verzögerung.

Um den tatsächlichen Reaktionszeitpunkt t_r der ECE auf das Schalten der ECRH zu bestimmen, wird zunächst eine statistische Vorauswertung am Schaltzeitpunkt t_s gemacht. Da im Experimentbetrieb mit Rohdaten gearbeitet wird, kann nicht unterschieden werden, ob es sich bei den zu erkennenden Extrema lediglich um Rauscheffekte handelt oder um tatsächliche Temperaturschwankungen der ECE. Dieser statistische Reaktionszeitpunkt $t_{r,stat}$ dient im Anschluss lediglich als Orientierungshilfe der Fitbereiche des Anstiegs und nicht als genaue Bestimmung des Reaktionszeitpunktes t_r .

Zur Bestimmung des statistischen Reaktionszeitpunktes $t_{r,stat}$ in der Automatisierung werden lokale Maxima beziehungsweise Minima rund um die Schaltzeitpunkte t_s gesucht. Gefunden werden die Extrema mithilfe einer „Peakfinder“-Funktion. Diese sucht eine bestimmte Anzahl, je nach Datenmenge des abgerufenen Signals, von Extrema in einem Bereich von 2,5 ms für die Kanäle 1 – 16. Für die Kanäle 17 – 32 werden die Extrema in einem Bereich von 5 ms gesucht, da die Kanäle auf der HFS in der Regel verrauschter sind. Die Positionen der lokalen Extrema werden zeitlich gemittelt und ergeben so den statistischen Reaktionszeitpunkt $t_{r,stat}$. In Abbildung 8 sind die Bereiche, in denen die Extrema bestimmt werden, orange (Minima) beziehungsweise rot (Maxima) hinterlegt. Die Zeitpunkte $t_{r,stat}$ (blau/grün) sind in gestrichelten vertikalen Linien dargestellt, analog zu den Zeitpunkten t_s (rot/orange) der ECRH.

3.1.2 Filter

Da es sich bei dieser Bachelorarbeit um die Erstellung einer Automatisierung der verwendeten Methode handelt, müssen diverse Eventualitäten der Messung einbezogen werden. So werden Kanäle, welche ein zu verrauschtes Signal liefern, aus dem weiteren Auswerteprozess ausgeschlossen. Der Anstieg vor und nach dem Ausschaltvorgang wird dafür jeweils mit einer linearen Funktion gefittet. Der Fitbereich ist hierbei festgelegt durch die Schaltzeitpunkte $t_{s,aus}$ und $t_{s,an}$ der ECRH, das heißt ohne Berücksichtigung des genauen Verlaufs von T_{Rad} .

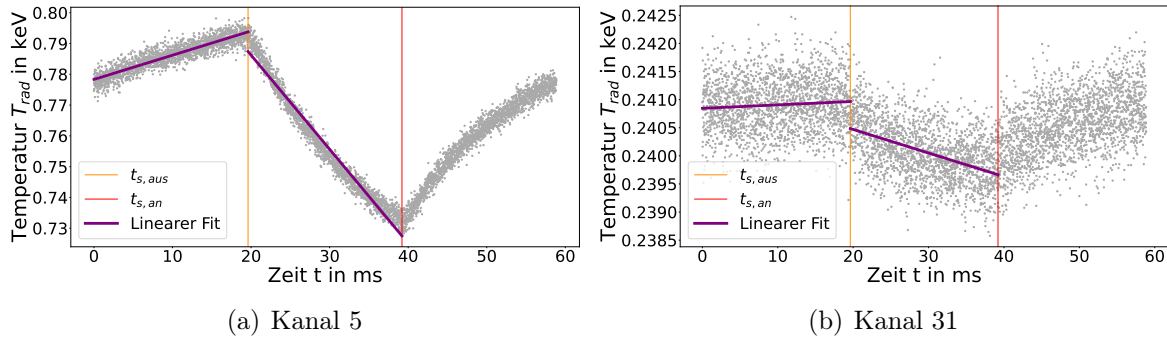


Abbildung 9: Darstellung des Temperaturverlaufs T_{Rad} von (a) Kanal 5 und (b) Kanal 31 des Radiometers des Versuchs 20221123.014 mit linearem Fit vor und nach Schaltzeitpunkt $t_{s,aus}$ als Beispiel der Anstiegsänderung und daraus resultierenden Filterung. Die Fitbereiche sind festgelegt durch die Schaltzeitpunkte t_s der ECRH.

Ist die Steigung der linearen Funktion, abgesehen von einer kleinen, vorher definierten, Abweichung, vor und nach dem Schaltvorgang gleich, wird der Kanal von dem automatisierten Programm herausgefiltert. Diese Methode dient lediglich der ersten Filterung von Kanälen, bei denen kaum eine Steigung zu erkennen ist. In der Automatisierung werden daher alle Kanäle herausgefiltert, bei denen die linearen Fitfunktionen eine kleinere Steigungsdifferenz als $0.02 \cdot f$ besitzen. Dieser Wert zeigte in der Anwendung der Automatisierung eine große Effektivität. f gibt dabei die normierte und dimensionslose Periodenlänge der Modulation an. So kann die Steigungsdifferenz mit der wechselnden Periodenlänge durch andere Modulationsfrequenzen automatisch skaliert werden. Ein Beispiel für die Filterung ist in Abbildung 9 gezeigt. Zu sehen ist zum einen der Kanal 5, welcher eine klare Anstiegsänderung vor und nach dem Ausschalten der ECRH zeigt. Kanal 31 zeigt wiederum ein stark verrauschtes Signal, mit kaum erkennbaren Steigungsänderung am Schaltzeitpunkt $t_{s,aus}$. Letzterer wird daher von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Außerdem ausgeschlossen werden Kanäle des Radiometers, welche zu nah am Plasmarand liegen, sprich Kanäle der Nummern 1 – 3 und 28 – 32, da hier wegen des optisch nur grauen Plasmas nicht mehr von einer lokalen Temperaturmessung ausgegangen werden kann (siehe Abschnitt 2.1.2). Zur manuellen Filterung ist ebenfalls ein Tool eingebaut, um gegebenenfalls Kanäle, welche zu nahe an der Gyrotronfrequenz liegen oder anderweitig

unbrauchbar sind, filtern zu können. Kanäle, die nahe an der Gyrotronfrequenz liegen, haben noch einen Einfluss von dem Notch-Filter des Radiometers. Das kann einerseits zu einem sehr verrauschten Messergebnis führen, zum anderen aber auch zu falschen Werten in der Temperatur. Wegen der sehr geringen Intensitäten an dieser Stelle können die Kalibrierungsfaktoren hier nur abgeschätzt werden.

3.2 Steigungsbestimmung

Sind die Messdaten präpariert, wird der tatsächliche Anstieg $\Delta \frac{d}{dt} T_{Rad}$ gefittet, um daraus dessen Änderung mit dem Schaltvorgang zu bestimmen (siehe Formel (7)). Um den genauen Anstieg der ECE direkt nach dem Schalten des Gyrotrons zu bestimmen, muss zum einen eine geeignete Fitfunktion f gefunden werden, zum anderen muss auch der Fitbereich δ entsprechend sinnvoll gewählt sein.

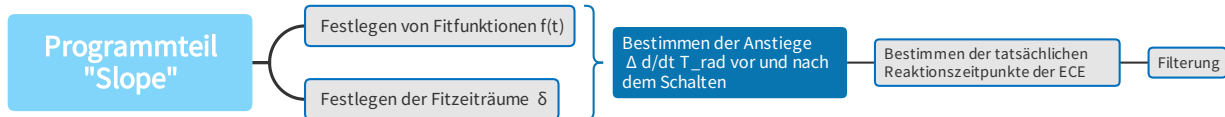


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Programmteils „Slope“ der beschriebenen Automatisierung zur Erstellung eines Leistungsdepositionsprofils der ECRH durch deren Modulation

Die Fitzeiträume δ werden dafür in δ_{vor} und δ_{nach} unterschieden. Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau des Programmabschnittes zur Bestimmung der Steigung der Temperatur.

Der Temperaturverlauf der ECE zeigt als Reaktion auf das Schalten der ECRH einen exponentiellen Verlauf. Dieser ist exemplarisch für den Kanal 9 des Versuchs 20221215.015 in Abbildung 11 dargestellt. Zu sehen ist der Ausschaltvorgang der ECRH, jeweils linear und exponentiell gefittet vor und nach dem Schaltvorgang $t_{s,aus}$. Die Fitfunktionen sind dabei wie folgt:

$$f_l(t) = a_l \cdot t + b_l \quad (9)$$

$$f_e(t) = a_e + b_e \cdot e^{-\frac{t}{c_e}} \quad (10)$$

Die blau hinterlegten Bereiche zeigen dabei die Fitzeiträume δ_{vor} und δ_{nach} . In dem Fall der langsamen Modulation von 17 Hz, welche in diesem Beispiel gezeigt ist, nähert sich die Temperatur des Plasmas *vor* dem Schaltzeitpunkt $t_{s,aus}$ bereits einem Gleichgewicht an. Der exponentielle Temperaturanstieg kann also gut mit einer linearen Steigung genähert werden, sodass die exponentielle und lineare Funktion einen ähnlichen Steigungswert liefern. In Abbildung 11 zeigt

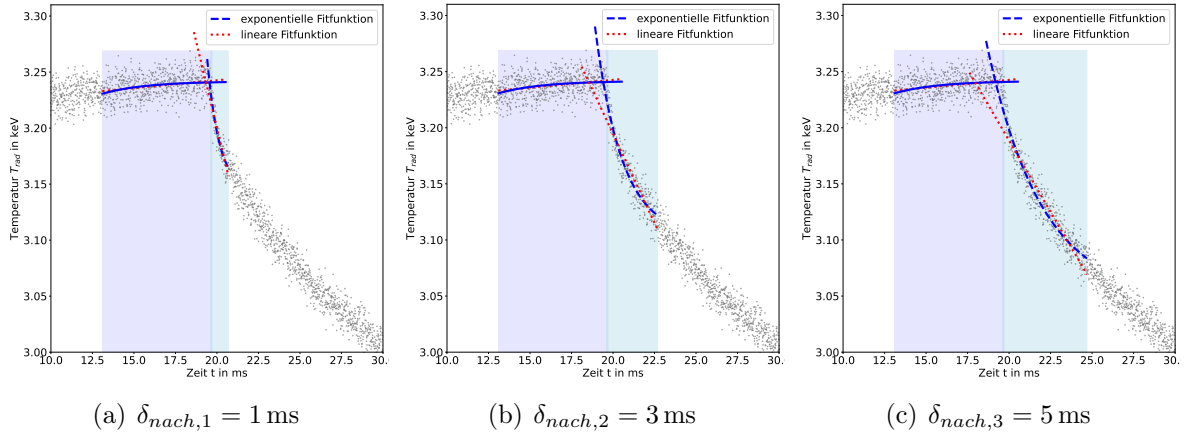


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der Möglichkeiten zum Fitten eines Temperaturverlaufs T_{Rad} der ECE beim Ausschaltvorgang der ECRH. Gezeigt ist der Kanal 9 des Versuchs 20221215.015. Die Bereiche vor und nach dem Schaltzeitpunkt $t_{s,aus}$ sind jeweils exponentiell (11, 12) gefittet für die Fitzeiträume (a) $\delta_{nach,1} = 1 \text{ ms}$, (b) $\delta_{nach,2} = 3 \text{ ms}$ und (c) $\delta_{nach,3} = 5 \text{ ms}$.

sich dieses Verhalten im nahezu identischen Verlauf der exponentiellen (blau) und linearen Fitfunktion (rot) vor $t_{s,aus}$.

Nach dem Ausschalten der ECRH fällt der Temperaturverlauf der ECE erst schnell ab, bis sich die Temperatur *beginnt* wieder einem Gleichgewicht anzunähern. Der Anstieg direkt nach $t_{s,aus}$ repräsentiert damit die Reaktion der ECE auf das Schalten der ECRH. Dadurch muss δ_{nach} entsprechend klein gewählt werden, um den Einfluss von Wärmetransporteffekten auszuschließen. Abbildung 11 (a) zeigt den Anstieg nach $t_{s,aus}$ für $\delta_{nach,1} = 1 \text{ ms}$. Zu sehen ist hier, dass sowohl die lineare als auch die exponentielle Fitfunktion sich gut an den Verlauf der ECE anpassen. Die lineare Funktion passt sich jedoch genau um den entscheidenden Zeitpunkt $t_{s,aus}$ nicht mehr so gut an und wird damit ungenau. Die Abbildungen 11 (b) und (c) zeigen zusätzlich die Verläufe der Fitfunktionen für $\delta_{nach,2} = 3 \text{ ms}$ bzw. $\delta_{nach,3} = 5 \text{ ms}$. Bei größer werdendem δ passt sich die lineare Funktion immer schlechter an den Temperaturverlauf an. Die exponentielle Funktion wird für diese Fitintervalle ebenfalls um $t_{s,aus}$ ungenau.

Das Intervall, auf welchen der exponentielle Anstieg linear angenähert werden kann, ist damit begrenzt und sehr klein zu wählen. Andererseits muss die Auflösung der Messdaten mit einbezogen werden. Je kleiner der Fitbereich, desto deutlicher ist der Einfluss der Streuung der Messdaten und ihrer begrenzten Anzahl bemerkbar. Zu wählen ist also, aufgrund des Signal-Rausch-Verhältnis und der Anzahl der Messdaten, als ein vernünftiger Kompromiss ein $\delta_{nach} \approx 1 \text{ ms}$ um eine Fitfunktion optimal um $t_{s,aus}$ anpassen zu können. Die Intervalllänge ist damit Ergebnis einer Optimierung. Die exponentielle Funktion liefert für dieses Intervall ein präziseres Ergebnis als die lineare Funktion.

Die Steigungen vor und nach dem An- bzw. Ausschalten der ECRH wird in der Automatisierung durch die folgenden exponentiellen Funktionen bestimmt:

$$f_{e,aus}(t) = a_{e,aus} + b_{e,aus} \cdot e^{-\frac{t}{c_{e,aus}}} \quad (11)$$

$$f_{e,an}(t) = a_{e,an} + b_{e,an} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{c_{e,an}}}) \quad (12)$$

Der Index *an* bzw. *aus* steht in diesem Fall dafür, ob im betrachteten Intervall die ECRH an- bzw. ausgeschaltet ist. Beispielsweise wird also beim Betrachten des Ausschaltvorgangs der Anstieg vor $t_{s,aus}$ mit $f_{e,an}(t)$ und der Anstieg nach $t_{s,aus}$ mit $f_{e,aus}(t)$ gefittet.

Um alle Informationen, wie beispielsweise das Erreichen eines Gleichgewichts, einzubeziehen, wird der Fitzeitraum vor den Schaltzeitpunkten $t_{s,an}$ bzw. $t_{s,aus}$ großzügig auf $\delta_{vor} = 10fms$ festgelegt. f gibt dabei auch hier die normierte und dimensionslose Periodenlänge der Modulation an, sodass der Fitbereich für jede Modulationsfrequenz automatisch skaliert wird. Der Fitbereich nach den Schaltzeitpunkten δ_{nach} wird in der Automatisierung mithilfe einer Schleife festgelegt, welche sicherstellt, dass jeder Kanal gefittet wird. δ_{nach} ist dabei festgelegt auf das Intervall $1f - 3f$ ms. In Abschnitt 4.1.2 wird dieser Umstand genauer beschrieben.

Abbildung 12 zeigt einen exemplarisch, nach dem eben beschriebenen Verfahren, gefitteten Temperaturverlauf der ECE.

Der Schnittpunkt der Fitfunktionen bestimmt den tatsächlichen Reaktionszeitpunkt t_r der ECE auf das Schalten der ECRH. Die Zeitverzögerung $\Delta t = t_s - t_r$ ist die entscheidene Größe für die Bestimmung der Leistungsposition. Überschreitet Δt einen Schwellenwert, so kann davon ausgegangen werden, dass der betrachtete Kanal zu verzögert reagiert. Ist dies der Fall, reagiert die ECE an dieser Stelle des Plasmas nicht direkt auf das Schalten der ECRH und ist damit zur Ermittlung der Leistungsdeponierung unbrauchbar. In der Automatisierung wird dieser Umstand zum Filtern weiterer Kanäle verwendet, sodass beim Erstellen des Leistungsprofils lediglich Kanäle, an welchen direkt Leistung von der ECRH deponiert wird, berücksichtigt werden. Zur Bestimmung dieses Schwellenwertes der Zeitverzögerung wird über die 8 niedrigsten Δt gemittelt. Die Anzahl hat dabei keinen physikalischen Hintergrund. Es zeigt sich lediglich in der Anwendung der Automatisierung eine große Wirksamkeit bei der Erstellung eines Leistungsdepositionsprofils.

Nach Durchlauf dieses Programmabschnittes ist also die Temperaturänderung der Elektronen $\Delta \frac{d}{dt} T_e$ nach Schalten der ECRH bekannt und durch die Filterung über einen Grenzwert der Verzögerung auch die ungefähre Position im Plasma, an welcher die Leistung der ECRH deponiert wird.

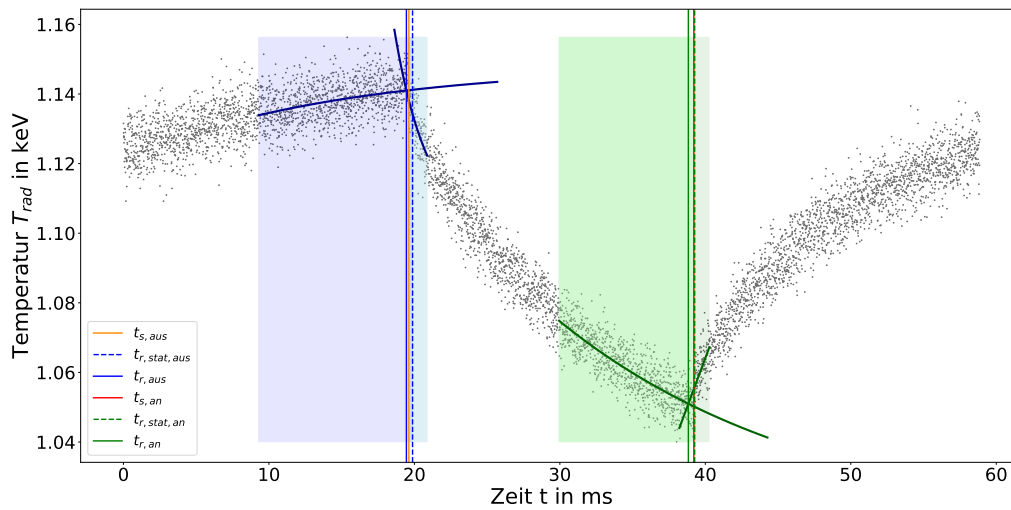


Abbildung 12: Darstellung des Temperaturverlaufs T_{Rad} der ECE des Versuchs 20221123.014. Gezeigt ist der Kanal 13, jeweils exponentiell (11, 12) gefittet vor und nach $t_{r,stat}$. Die farblich hinterlegten Bereiche bestimmen die Fitzeiträume δ und die vertikalen Linien die Schaltzeitpunkte der ECRH bzw. Reaktionszeitpunkte der ECE auf die ECRH.

3.3 Teilchendichte n_e

Um die Änderung der Leistung durch das Modulieren der ECRH ΔP_{ECRH} nach Gleichung (7) zu berechnen, muss die Teilchenzahl N_e der Elektronen bestimmt werden. Dazu wird der Zusammenhang $N_e = n_e \cdot V$ ausgenutzt, wobei V ein definiertes Volumen darstellt und n_e die Teilchendichte der Elektronen. Die Abbildung 13 zeigt die schematische Darstellung des zugehörigen Programmteils in der Automatisierung.

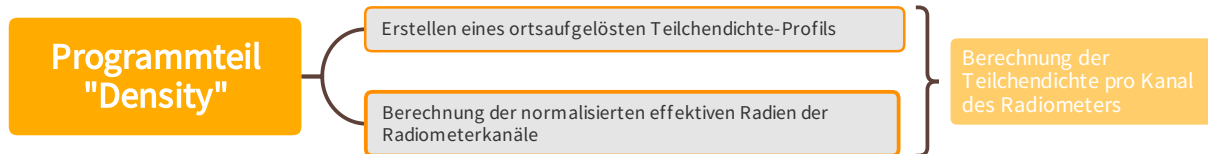


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Programmteils „Density“ der beschriebenen Automatisierung zu Erstellung eines Leistungsdepositionsprofils der ECRH durch deren Modulation

3.3.1 Thomson-Streuung

Zur Bestimmung der Teilchendichte n_e sind am W-7X mehrere Verfahren geeignet, wie beispielsweise die Thomson-Streuungs-Diagnostik [14]. Diese nutzt die elastische Streuung von Photonen an geladenen Elektronen (Thomson-Streuung) aus. Der Aufbau der Diagnostik ermöglicht die Detektion der Intensität I des Streulichtes über ein diskretes Streuvolumen. Die gestreute Intensität ist proportional zu der Teilchendichte n_e in diesem Volumen. Die Intensität wird anhand der Raman-Streuung an Stickstoffmolekülen kalibriert. Für diese Moleküle ist der Streuquerschnitt bekannt und ihre Dichte lässt sich im Streuvolumen über den Druck im Plasmagefäß variieren [14]. Ein Beispiel eines solchen Teilchendichteprofiles ist in Abbildung 14 dargestellt. Hierbei ist die Teilchendichte n_e über den Torusradius R_{eff} aufgetragen und mit einem Polynom vierten Grades gefittet.

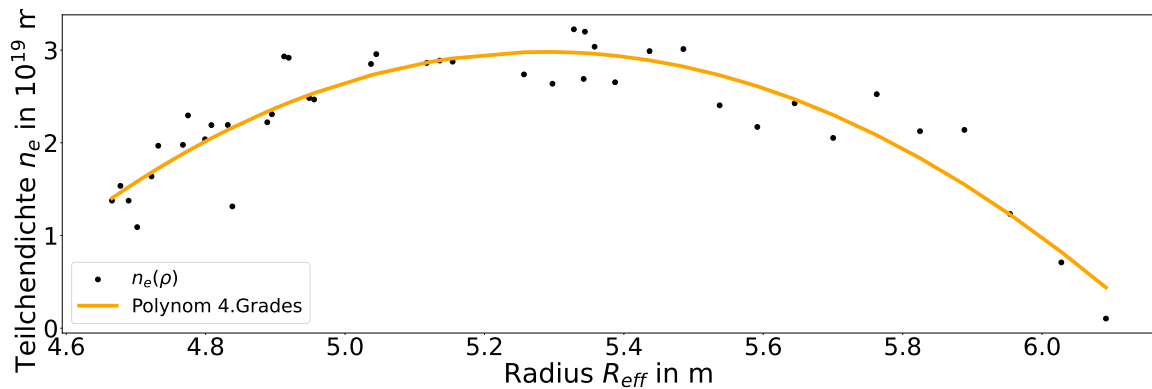


Abbildung 14: Exemplarische Darstellung des Teilchendichteprofiles resultierend aus der Thomson-Streuungsdiagnostik des Versuches 20180823.042. Gezeigt ist die Teilchendichte n_e über den Torusradius R_{eff} .

3.3.2 Teilchendichte n_e aus ECE-Daten

Da die Messwerte der Thomson-Diagnostik nicht immer zur Verfügung stehen, kann gegebenenfalls auf eine andere Methode zur Bestimmung der Teilchendichte n_e behelfsweise zurückgegriffen werden. Diese Methode beruht auf der *Bayes'schen Datenanalyse* der ECE-Daten selbst. Ebenfalls wird die Tatsache genutzt, dass am Plasmarand, wo das Plasma optisch grau ist, die ECE auch eine Information über die Teilchendichte enthält [7]. Als Datenquellen werden hier das ECE-Radiometer selbst sowie das Laser-Interferometer verwendet. Während die Daten des Radiometers Informationen über die Teilchendichte am Plasmarand liefert (siehe Abschnitt 2.1.3), misst das Laser-Interferometer die mittlere Dichte im gesamten Plasma und damit auch entlang der Sichtlinie des Radiometers. Durch die Kombination der Datenquellen kann so auf ein ortsaufgelöstes Strahlentemperatur- und Teilchendichte-Profil vorhergesagt werden. Ein Vorteil

gegenüber der Thomson-Diagnostik besteht darin, dass die Messdaten des Interferometers lediglich von der vom Medium erzeugten Phasenverschiebung abhängt und nicht von der Intensität. So wirkt sich der Intensitätsverlust durch eventuelle Verschmutzungen vom Vakuumfenster bei der Detektion der Rückstreuung nicht auf das Ergebnis der Teilchendichte aus.

Es hat sich gezeigt, dass die Teilchendichte n_e berechnet aus den ECE-Daten mit den experimentellen Daten größtenteils übereinstimmen. In dem hier verwendeten Verfahren werden die n_e -Profile durch folgende Parametrisierung repräsentiert [7]:

$$n_e(\rho) = a(g - h + (1 + h - g)(1 - \rho^p)^q + h(1 - e^{-\rho^2/w^2})) \quad (13)$$

a ist dabei die Höhe des Mittelpunkts, g die Höhe am Rand, h die Tiefe und w die Breite der Vertiefung in der Mitte des Profils. p und q sind Steigungsparameter und ρ der normalisierten effektiven Radius.

Um aus dieser Parametrisierung die gesuchte Teilchendichtedichte n_e für die Kanäle des Radiometers zu erhalten, wird in die in (13) gezeigte Parametrisierung $n_e(\rho)$ die normalisierten effektiven Radien eingesetzt, welche korrespondierend zu den Frequenzen der Radiometer Kanäle berechnet worden sind. Ein Beispiel für ein solches Teilchendichte-Profil ist in Abbildung (15) gezeigt.

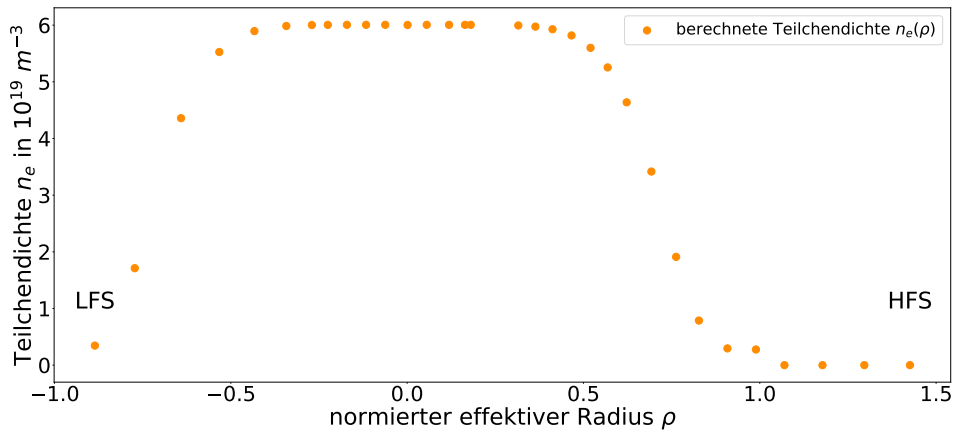


Abbildung 15: Darstellung der aus den ECE-Daten berechneten Teilchendichte des Versuches 20221123.014 nach Bayes'scher Datenanalyse mit experimentellen Daten des ECE-Radiometers und des Laser-Interferometers. Dargestellt ist die Teilchendichte n_e über den effektiven Radius ρ , welche mithilfe des Raytracing Programms TRAVIS für die Kanäle des Radiometers berechnet wurden.

3.4 Leistungsdeposition

In diesem Abschnitt der Automatisierung wird zunächst die Leistungsdichte p_{ECE} berechnet. Anschließend wird das von den jeweiligen ECE-Kanälen charakterisierte Plasmavolumen ermittelt, um über Integration die insgesamt deponierte Leistung zu bestimmen. Abbildung 16 zeigt die schematische Darstellung dieses Programmteils.

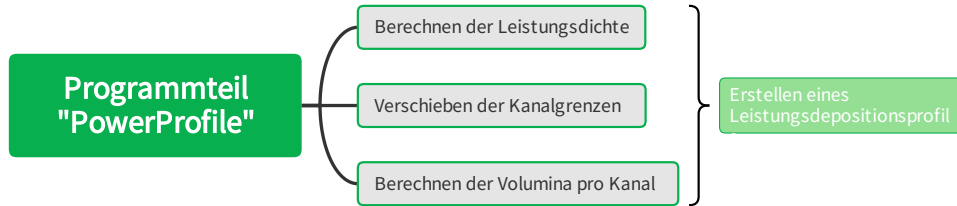


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Programmteils „PowerProfile“ der beschriebenen Automatisierung zu Erstellung eines Leistungsdepositionsprofils der ECRH durch deren Modulation

3.4.1 Leistungsdichte

Zunächst wird die lokal gemessene Leistungsdichte p_{ECE} für die Kanäle des ECE-Radiometers berechnet, welche im T_{Rad} -Profil eine sofortige Reaktion auf das Schalten der ECRH gezeigt haben (siehe Abschnitt 3.2). Mithilfe von Formel (7), der Teilchendichte n_e und der Temperaturänderung $\Delta \frac{d}{dt} T_{Rad}$ wird die Leistungsdichte p_{ECE} wie folgt berechnet:

$$\Delta p_{ECE} = \frac{3}{2} k_B \cdot n_e \left(\Delta \left(\frac{d}{dt} T_{Rad} \right) \right) \quad (14)$$

Die erhaltenen Leistungsdichten für jeden relevanten Kanal werden über den normalisierten effektiven Radius ρ aufgetragen und liefern ein orts aufgelöstes Leistungsdichteprofil, welches exemplarisch für den Versuch 2022123.014 in Abbildung 17 dargestellt ist.

Mit einem solchen Profil kann bereits Aussage darüber getroffen werden, an welchen Orten im Plasmaquerschnitt Leistung deponiert worden ist. In diesem Beispiel wird die Leistung sowohl auf der LFS als auch auf der HFS nahe an der Plasmamitte deponiert. Damit kann darauf geschlossen werden, dass in diesem Versuch die Leistung des modulierten Gyrotronstrahls nahezu on-axis deponiert wurde. Die beiden Depositionspeaks sind symmetrisch um das Plasmazentrum bei $\rho = 0$, wobei es vorher eine leichte systematische Verschiebung in Richtung der Niederfeldseite zu erkennen war. Diese Verschiebung könnte durch die Berechnung der normalisierten

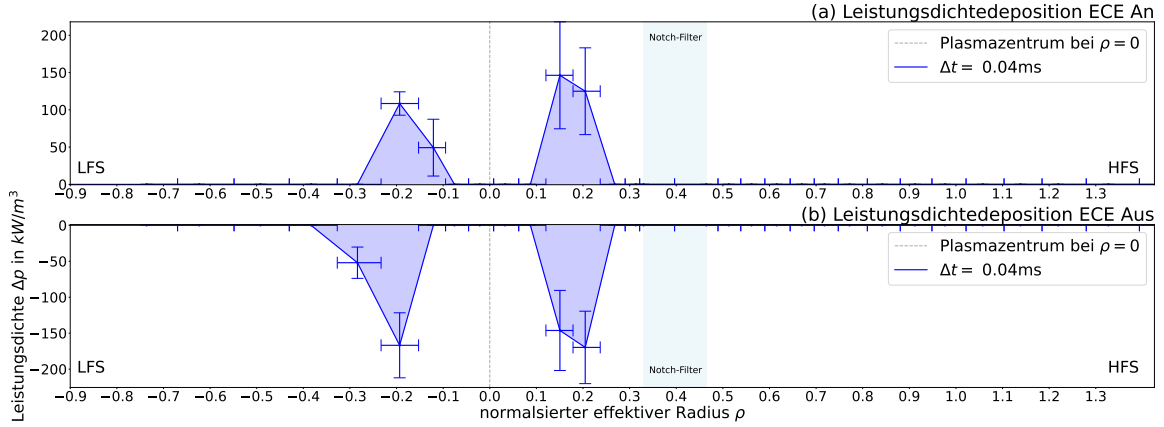


Abbildung 17: Darstellung der Leistungsdichteänderung über den normalisierten effektiven Radius für den (a) Anschaltvorgang und (b) den Ausschaltvorgang der ECRH im Versuch 20221123.014. Der hellblau hinterlegte Bereich stellt die Umgebung des Notch-Filters des Radiometers um 140 GHz dar. Die grau gestrichelte Linie markiert das Plasmazentrum bei $\rho = 0$. Die Fehlerbalken berücksichtigen einen abgeschätzten Fehler für die Teilchendichte sowie einen statistischen Fehler für die bestimmte Temperaturänderung. Kalibrierungs- und systematische Fehler werden hier nicht berücksichtigt.

effektiven Radien aus dem lokalen Magnetfeld B zustande kommen. TRAVIS berechnet die effektiven Radien nach der Strahlungsemission pro Kanal und markiert als effektiven Radius die Stelle, an welchem der Großteil der Strahlungsemission herkommt. Mit der Annahme, dass diese Positionen dadurch gegebenenfalls fehlerhaft sein könnten, verschiebt sich die Achse des normalisierten effektiven Radius. Zum Entgegenwirken dieser Verschiebung und den daraus resultierenden Fehler in der Voluminaberechnung wird in der Automatisierung eine Korrektur zur Symmetrienerhaltung eingebaut. Der Schwerpunkt der Leistungsdichtendepositionspeak wird dafür bestimmt. Ausgehend von der Überlegung, dass beide Schwerpunkte denselben Abstand zum Plasmazentrum haben sollten, wird die Achse der normalisierten effektiven Radius entsprechend verschoben.

Die Fehlerbalken resultieren von den statistischen Fehlern der bestimmten Temperaturänderung $\Delta \frac{d}{dt} T_{Rad}$ und einem abgeschätzten Fehler für die Teilchendichte n_e . Systematische Fehler und Unsicherheiten der Kalibrierfaktoren werden hier nicht berücksichtigt. Die tatsächlichen Fehler sind also größer als hier dargestellt.

3.4.2 Insgesamt deponierte Leistung

Für die Berechnung der Leistung P_{ECE} aus der Leistungsdichte p_{ECE} wird jedem Kanal ein Volumen V zugeordnet. Dieses berechnet sich aus den berechneten normalisierten effektiven Radien. Jedem Kanal i wird ein radial sichtbarer Bereich ΔR_i zugeordnet (siehe Abschnitt

2.1.2). Durch die Frequenzlücken zwischen den Kanälen wird am manchen Stellen allerdings keine Strahlungstemperatur gemessen. Da dort die Temperatur nicht einfach null gesetzt werden kann, werden die Sichtbereiche ΔR_i der einzelnen Radiometerkanäle bis zu den Grenzen $\Delta \rho_{l,i}$ bzw. $\Delta \rho_{r,i}$ der anliegenden Kanäle erweitert. Somit wird das Plasmagefäß lückenlos von den Radiometersichtbereichen abgedeckt.

Zur Bestimmung des Volumens für jeden Kanal wird angenommen, dass der W7-X einen perfekten Torus mit einem Radius $R_0 = 5,5$ m darstellt. Die Flussflächen können demnach als Schläuche betrachtet werden, deren Breite von den neuen Kanalgrenzen mit $\Delta R_i = |\rho_{l,i} - \rho_{r,i}|$. Die Länge $l = 2\pi R_0$ der Schläuche ist entsprechend der Umfang des Torus, sodass sich das Volumen jedes Flussflächenbereichs, also jedem Kanalsichtbereich, ergibt mit:

$$\Delta V_i = V_{i+1} - V_i \quad (15)$$

$$= 2 \cdot \pi^2 \cdot R_0 \cdot (|\rho_{l,i}^2 - \rho_{r,i}^2|) \quad (16)$$

Um jetzt die Leistungsänderung zu bestimmen, wird das Volumen ΔV_i jedes Kanals i mit der Leistungsdichteänderung multipliziert, sodass sich für die von der ECRH während der Modulation deponierte Gesamtleistung ergibt:

$$P_{ECE} = \sum_i \Delta p_{ECE,i} \cdot \Delta V_i \quad (17)$$

Die Leistungsänderung kann analog zur Leistungsdichte über den normalisierten effektiven Radius aufgetragen werden und ist exemplarisch für den Versuch 20221123.014 in Abbildung 18 dargestellt.

Zu sehen ist hier ebenfalls die Deponierung der Leistung auf der LFS und HFS nahe an der Plasmamitte, was bei diesem Versuch erneut auf eine on-axis-Heizung schließen lässt. Da die Volumina anhand der Kanalgrenzen berechnet werden, ist an den Werten der Leistung die klare Verteilung dieser Volumina um den Plasmaquerschnitt zu erkennen. Die Volumina der Kanäle werden in Richtung der Plasmamitte immer kleiner und zum Plasmarand wieder größer. Auch hier sind die beiden Depositionsbeaks symmetrisch um das Plasmazentrum $\rho = 0$.

Die Gesamtleistung der Modulation kann nun über das Integral der Depositionsbeaks bestimmt werden. Um die Aussagekraft der berechneten Gesamtleistung zu validieren, wird diese nach Formel (17) berechnet und mit der Leistungsänderung der ECRH verglichen. Letztere wird aus dem Höhenunterschied bei angeschaltetem und ausgeschaltetem Gyrotron während der Modulation aus den Messdaten der ECRH berechnet.

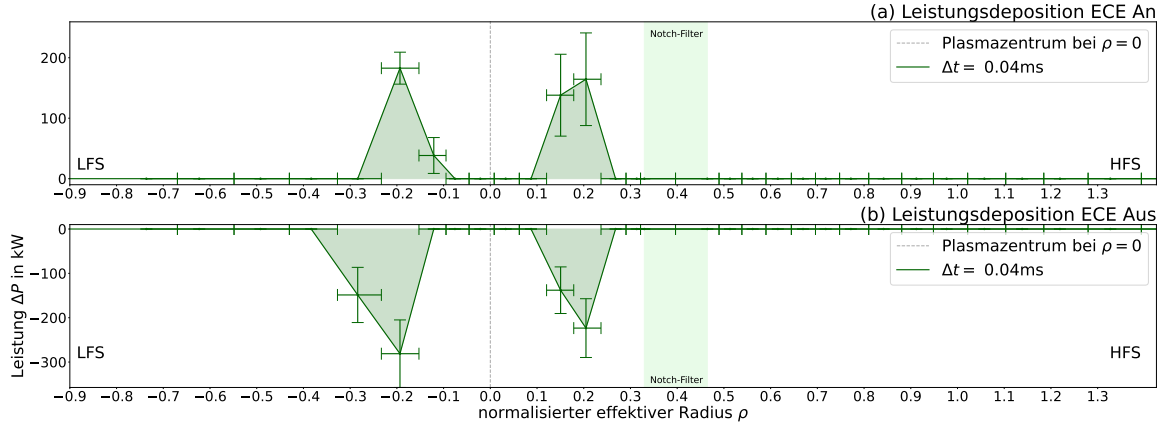


Abbildung 18: Darstellung der Leistungsänderung im jeweiligen Messvolumen eines Kanals über den normalisierten effektiven Radius für den (a) Anschaltvorgang und (b) den Ausschaltvorgang der ECRH im Versuch 20221123.014. Der hellgrün hinterlegte Bereich stellt die Umgebung des Notch-Filters des Radiometers um 140 GHz dar. Die grau gestrichelte Linie markiert das Plasmazentrum bei $\rho = 0$. Die Fehlerbalken berücksichtigen einen abgeschätzten Fehler für die Teilchendichte sowie einen statistischen Fehler für die bestimmte Temperaturänderung. Kalibrierungs- und systematische Fehler werden hier nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Vergleich der Leistungsänderung des Gyrotronstrahls der ECRH ΔP_{ECRH} , gemessen mit einer kalibrierten Diode, mit der berechneten Leistungsänderung der ECE ΔP_{ECE}

ΔP_{ECRH} in kW	$\Delta P_{ECE,an}$ in kW	$\Delta P_{ECE,aus}$ in kW
631 ± 2	530 ± 210	-790 ± 260

In Tabelle 1 ist zu sehen, dass die Leistungsänderung bestimmt aus dem Höhenunterschied der Modulation der ECRH ΔP_{ECRH} sowohl für den An- als auch den Ausschaltvorgang innerhalb der Fehlergrenzen der aus der ECE berechneten Leistungsänderung ΔP_{ECE} liegt. Dabei ist zu erwähnen, dass sich die Fehler lediglich aus dem statistischen Fehler für die Bestimmung der Temperaturänderung und einem abgeschätzten Fehler für die Teilchendichte ergibt. Da die Teilchendichte aus einer Kalkulation stammen, sind für die verwendeten Werte keine Fehler bekannt. Des Weiteren sind keine systematischen Fehler, wie die Genauigkeit der Fitzeitfenster, mit einbezogen worden. Ebenfalls auf die Fehler der ECE-Kalibrierfaktoren wurde verzichtet, wobei diese die Fehlergrenzen vermutlich stark erweitern würden.

Ein Beispiel für eine nominell off-axis geheizte Entladung ist in Abbildung 19 zu sehen. Analog zur on-axis-Heizung sind die Depositionspeaks in etwa symmetrisch zur Plasmamitte, haben hier jedoch einen deutlich größeren Abstand. Auffällig ist, dass die Depositionspeaks hier etwas breiter sind als bei der on-axis-Heizung. Bei der off-axis-Heizung wird meistens mit der O-Mode geheizt. Diese besitzt einen geringeren Absorptionskoeffizienten als die X-Mode, sodass keine

so lokale Depositionszone wie bei der on-axis-Heizung entsteht.

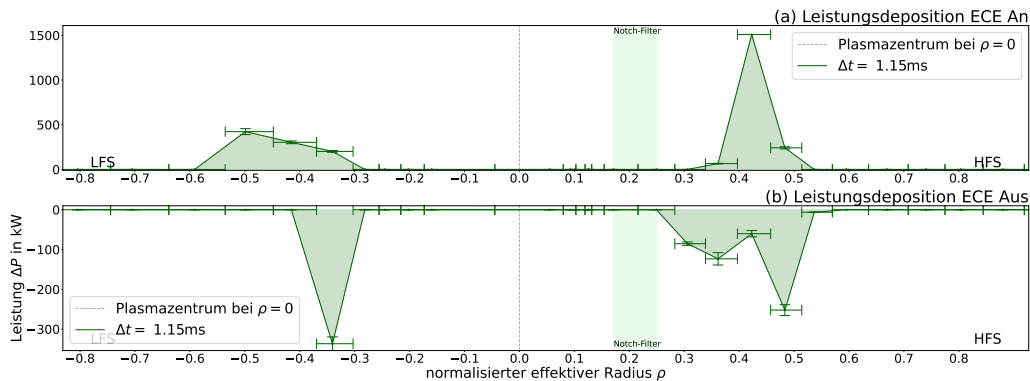


Abbildung 19: Darstellung der Leistungsänderung über den normalisierten effektiven Radius für den (a) Anschaltvorgang und (b) den Ausschaltvorgang der ECRH im Versuch 20180823.042. Der hellgrün hinterlegte Bereich stellt die Sichtlücke des Radiometers um 140 GHz dar. Die grau gestrichelte Linie markiert das Plasmazentrum bei $\rho = 0$. Die Fehlerbalken berücksichtigen einen abgeschätzten Fehler für die Teilchendichte sowie einen statistischen Fehler für die bestimmte Temperaturänderung. Kalibrier- und systematische Fehler werden hier nicht berücksichtigt. Warum die mit dieser Methode gefundene Leistungsdeposition unterschiedlich für das An- und Abschalten der Gyrotrons auf der Hoch- und Niederfeldseite ausgeprägt ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr untersucht werden.

4 Anwendung der Automatisierung

Um die automatisierte Auswertung für die Leistungsdeposition der Modulation der ECRH in den aktiven Experimentbetrieb einkoppeln zu können, müssen alle Eventualitäten für Ungenauigkeiten in Betracht gezogen werden. Im folgenden Kapitel werden zwei zusätzliche Optimierungsmöglichkeiten zur Anwendung der Automatisierung zur Erstellung von Leistungsdepositionsprofilen untersucht.

4.1 Leistungsdeposition bei verschiedenen Modulationsfrequenzen

Der Vorteil, ein Leistungsdepositionsprofil aus einer Modulation mit höherer Frequenz zu erstellen, bestünde darin, dass sich das Signal-Rausch-Verhältnis verbessern würde. Wird bei einer höheren Frequenz, als die standardisierten 17 Hz, moduliert, wird über denselben Zeitraum über eine größere Anzahl von Perioden gemittelt und das Rauschen könnte somit verringert werden.

So würde nachträgliches Glätten der Messdaten und den damit verbundenen eventuellen Informationsverlust vermieden werden. Andererseits wird der Fit des Temperaturverlaufs vor und nach dem Schalten, siehe Abbildung 12, mit zu kurz gewähltem Zeitfenster immer ungenauer. Um diese Annahme zu untersuchen, werden im Folgenden drei Versuche miteinander verglichen. Bei den betrachteten Modulationen sind die Grundbedingungen gleich gehalten worden. Geheizt wurde on-axis mit insgesamt fünf Gyrotrons und einer maximalen Gesamtleistung von 3100 kW. Moduliert wurden gleichzeitig die Gyrotrons *C5* und *E1* in einem duty cycle (3 : 1).

4.1.1 Signal-Rausch-Verhältnis

Um Aussage über das Signal-Rausch-Verhältnis treffen zu können, wird für jeden Versuch der Kanal 8 des Radiometers ohne jegliche Glättung betrachtet. Dieser Kanal entspricht einer Frequenz von 133,76 GHz und reagiert meistens direkt bei einer on-axis Heizung.

Die Abbildung 20 zeigt den Verlauf der Strahlungstemperatur T_{Rad} nach Conditional Averaging, aber ohne nachträgliches Glätten für die Modulationsfrequenzen 17 Hz, 83,33 Hz und 166,66 Hz. Zu erkennen sind in Abbildung 20 (a) und (b) der typische Verlauf der Reaktion der ECE auf das Schalten der ECRH. Es fällt auf, dass für eine Modulation mit 17 Hz das Signal deutlich verrauschter ist, als für 83,33 Hz. In Abbildung 20 (c) zeigt sich dieser Verlauf nicht. Die Dichte der Messpunkte ist zum einen deutlich geringer, da Abbildung 20 (c) ein kürzeres Zeitfenster zeigt. Außerdem sind An- und Ausschaltzeitpunkte schlechter zu erkennen. Das könnte unter anderem daran liegen, dass die Modulationsfrequenz $f_{mod} = 166,66$ Hz zu schnell ist, als dass alle Radiometerkanäle ein gleichwertiges Messsignal liefern könnten. Das bedeutet, auch wenn eine erhöhte Modulationsfrequenz das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verbessern kann, wie in Abbildung 20 (b) zu erkennen, muss darauf geachtet werden, dass die Messrate der Diagnostik gegebenenfalls erhöht werden müsste. In Abbildung 20 (c) liegt das Messvolumen des Kanals offenbar etwas außerhalb der Depositionszone. Es ist zu sehen, dass 2 ms noch zu kurz sind, als dass die ankommende Wärmewelle des vorherigen Schaltzeitpunktes $t_{s,aus}$ ganz abgeklungen ist. Der An- und Ausschaltvorgang überlagern sich, sodass $T_{Rad} = const.$ entsteht. Im Zeitfenster nach $t_{s,an}$ ist der Abstieg der Temperatur für den Ausschaltvorgang schließlich zu sehen, circa 1,5 ms vor dem beginnenden Anschaltvorgang und dem erneuten Steigen der Temperatur. Für den Messort, Kanal 8, ist die Depositionszone anscheinend so weit entfernt, dass die Laufzeit der Wärmewelle mit 2 ms zu groß ist, um das Schalten der ECRH eindeutig zu bestimmen. Die Effekte der aktuellen Zeitfenster überlagern sich hier also mit denen des vergangenen Zeitfensters. Liegt der Messort näher an der Depositionszone, ist die Laufzeit der Wärmewelle deutlich kleiner und die Schaltzeitpunkte wieder erkennbar und auswertbar. Im gezeigten Beispiel könnte bei einer Modulationsfrequenz von 83,33 Hz in der Automatisierung auf eine nachträgliche Glättung verzichtet werden und der Kanal 8 bei 166,66 Hz würde aufgrund der Filtermethoden für eine weitere Auswertung ausgeschlossen werden.

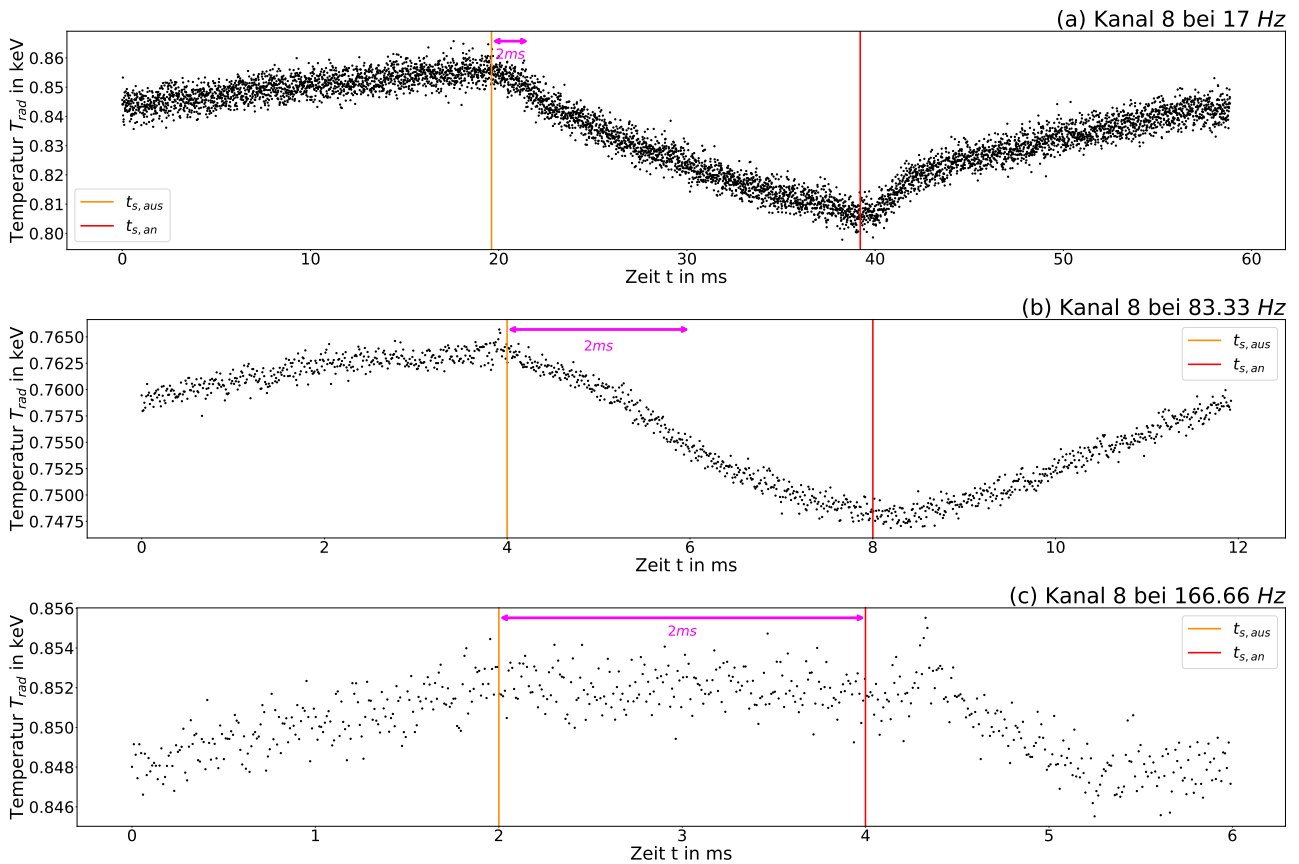


Abbildung 20: Darstellung des Temperaturverlaufes T_{Rad} der ECE für den Kanal 8 der Versuche (a) 20221123.014 bei einer Modulationsfrequenz von 17 GHz, (b) 20221123.018 bei einer Modulationsfrequenz von 83,33 GHz und (c) 20221123.016 bei einer Modulationsfrequenz von 166,66 GHz. Gezeigt werden durch vertikale Linien auch die durch Conditional Averaging bestimmten mittleren An- bzw. Ausschaltzeitpunkt $t_{s,aus}$ bzw. $t_{s,an}$ der ECRH. Geheizt wurde jeweils mit fünf Gyrotrons und einer maximalen Gesamtleistung von 3100 kW. Moduliert wurde im Verhältnis (3:1) durch die Gyrotrons $C5$ und $E1$. Die rosafarbenen Pfeile, welche jeweils eine Länge von 2 ms besitzen, sollen verdeutlichen, dass sich bei erhöhten Modulationsfrequenz auch die Periodenlänge ändert und damit die x-Achse in der Darstellung.

4.1.2 Aussagekraft der Leistungsdeposition

Um Aussage über die deponierte Leistung treffen zu können, werden für alle drei Modulationsfrequenzen des Versuchstages 20221123 jeweils ein Leistungsdepositionsprofil nach der in Kapitel 3 beschriebenen Methode erstellt.

Die Abbildung 21 zeigt die resultierenden Leistungsdepositionsprofile bei verschiedenen Mo-

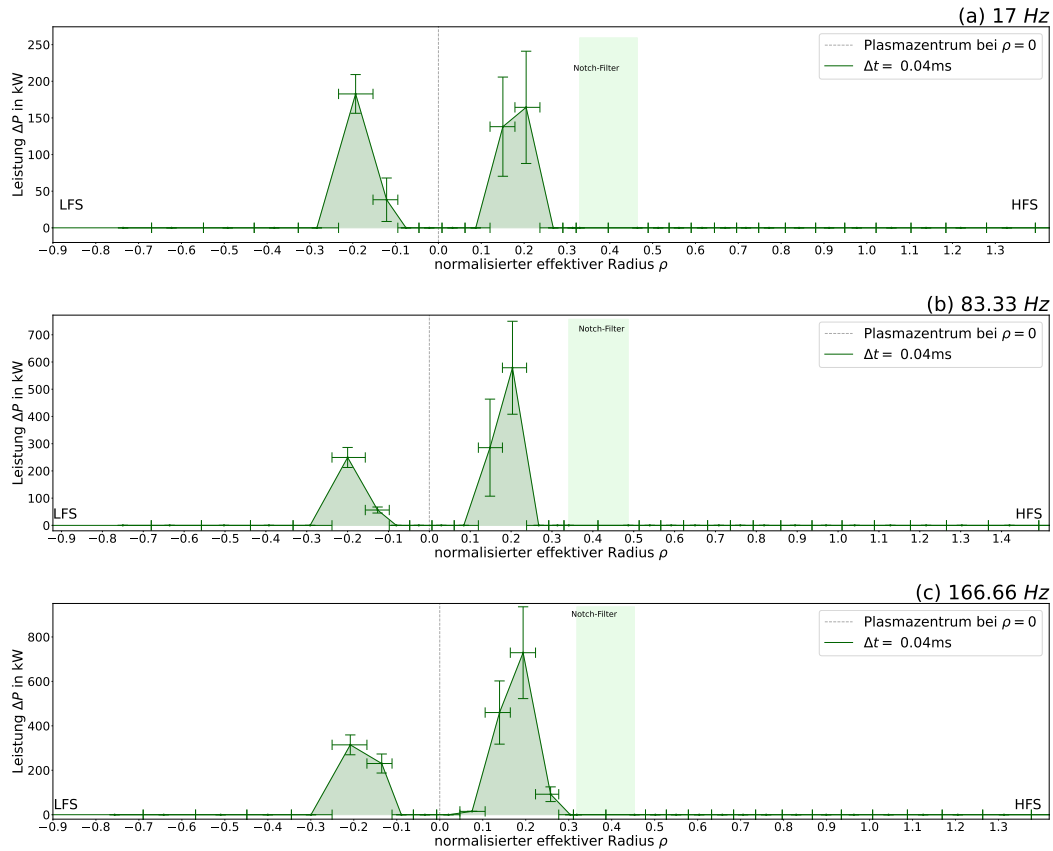


Abbildung 21: Darstellung der Leistungsdepositionsprofile $\Delta P(\rho)$ der Versuche (a) 20221123.014 bei einer Modulationsfrequenz von 17 Hz, (b) 20221123.018 bei einer Modulationsfrequenz von 83,33 Hz und (c) 20221123.016 bei einer Modulationsfrequenz von 166,66 Hz. Dargestellt sind die deponierte Leistungsänderungen ΔP über den normalisierten effektiven Radius der einzelnen Radiometerkanäle. Der hellgrün eingefärbte Bereich zeigt die Sichtlücke des ECE-Radiometers rund um 140 GHz (grün gestrichelte Linie). Die grau gestrichelte Linie kennzeichnet das Plasmazentrum bei dem effektiven Radius $\rho = 0$.

modulationsfrequenzen. Alle drei Abbildungen zeigen dieselbe symmetrische Deposition um die Plasmamitte. Es fällt auf, dass nur die Peaks für eine Modulationsfrequenz von 17 Hz (Abbildung 21 (a)) eine gleiche Höhe zueinander aufweisen.

Vergleicht man nun die Werte der Gesamtleistung, Tabelle 2, ist klar zu sehen, dass nur für 17 Hz ΔP_{ECRH} in den Fehlergrenzen von ΔP_{ECE} liegt. Dies ist auf die Schwierigkeiten durch das automatisierte Auswerten zurückzuführen. Wie bereits erwähnt, wirkt sich das Ändern der Modulationsfrequenz auf das Signal-Rausch-Verhältnis aus. Demzufolge können zwar auch im Regelfall verrauschter Kanäle verwendet werden, allerdings kann es auch dazu führen, dass sich nicht genug Datenpunkte für eine präzise Auswertung finden lassen. Für $f_{mod} = 166,66$ Hz

Tabelle 2: Vergleich der berechneten Leistungsänderung der ECE ΔP_{ECE} für verschiedene Modulationsfrequenzen

Versuch	f_{mod}	ΔP_{ECRH} in kW	$\Delta P_{ECE,an}$ in kW	$\Delta P_{ECE,aus}$ in kW
.014	17 Hz	631 ± 2	530 ± 210	-790 ± 260
.018	83,33 Hz	370 ± 10	1200 ± 400	-170 ± 20
.016	166,66 Hz	570 ± 3	1840 ± 470	-1560 ± 410

ist bereits in Abbildung 20 (c) zu sehen, dass die Datenpunkte deutlich weniger und verteilter sind. Da kann bereits in der Bestimmung des statistischen Schaltzeitpunktes eine Ungenauigkeit entstehen, welche sich in das Festlegen des Fitbereichs ziehen kann.

In der Automatisierung wird der Fitbereich nach dem Schalten mithilfe einer Schleife festgelegt. Angefangen mit $\delta = 0.5 \cdot f$ ms werden die exponentiellen Funktionen dem Anstieg *nach* dem Schalten ab $t_{r,stat}$ angepasst und geprüft, ob mit der Funktion *vor* dem Schalten ein Schnittpunkt gefunden wird. Ist das nicht der Fall, wird der Fitbereich auf $\delta = 1 \cdot f$ ms erhöht und erneut nach einem Schnittpunkt gesucht. Die Schleife wird so lange durchlaufen, bis entweder ein Schnittpunkt gefunden oder der Zeitraum $\delta = 3 \cdot f$ ms erreicht wird. Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt, ist ab diesem Zeitraum nicht mehr sicherzustellen, dass die Fitfunktion sich gut an den Temperaturverlauf anpasst. Der Faktor f stellt sicher, dass sich der Fitzeitraum der veränderten Zeitachse für eine höhere Modulationsfrequenz anpasst. Eingebaut wurde diese Methode, um sicherzustellen, dass von möglichst vielen Kanälen das kleinstmögliche Fitintervall betrachtet wird. Dadurch haben allerdings nicht alle Kanäle denselben Fitzeitraum, wodurch es zu Unterschieden in der Steigungsanpassung kommen kann. Der Wert der Steigung ist also durch das Fitverfahren mit einem Fehler behaftet. Daraus resultierend ist demnach auch ein größerer Fehler im Wert der Leistung.

Außerdem sind ebenfalls die Werte der Teilchendichte mit einem Fehler behaftet. Im hier gezeigten Beispiel ist die Teilchendichte n_e anhand der ECE-Daten berechnet worden und der Anteil der Teilchendichte in den Fehlerbalken der Leistung ist lediglich abgeschätzt. Auch im Falle der Berechnung der Teilchendichte n_e aus der Thomson-Diagnostik liefern die Werte einen Anteil in der Fehlerbetrachtung.

Unter Einbezug von weiteren systematischen Fehlern und ebenfalls den Unsicherheiten der Kalibrierfaktoren, welche vermutlich einen großen Anteil in den Fehlergrenzen der Leistung hätten, kann davon ausgegangen werden, dass zumindest für $f_{mod} = 83,33$ Hz die Leistungsänderung der ECRH ΔP_{ECRH} in den Fehlergrenzen von ΔP_{ECE} liegen würde. Demnach eignen sich die Modulationsfrequenzen 17 Hz und 83,33 Hz zur Erstellung von aussagekräftigen Leistungsdepositionsprofilen unter Einbezug von diversen Fehlerquellen und gegebenenfalls einer Glättung der ECE-Daten bei einer langsamen Modulation.

4.2 Einbezug des Zoom-Systems

Zusätzlich zum normalen Radiometer existiert ein *Zoom-System*. Es besteht aus 16 Kanälen und deckt mit diesen einen schmalen Frequenzbereich von insgesamt 4 GHz ab. Beginnend ab einem Lokaloszillator bei 122,06 GHz kann der Frequenzbereich, in welchem das Zoom-System misst, mithilfe eines zusätzlich abstimmbaren Lokaloszillators, verschoben werden. Da der Frequenzabstand zwischen den Kanälen lediglich 250 MHz beträgt, kann so ergänzend zu den Radiometermessungen für den ausgewählten Frequenzbereich detaillierte Messergebnisse gesammelt werden.

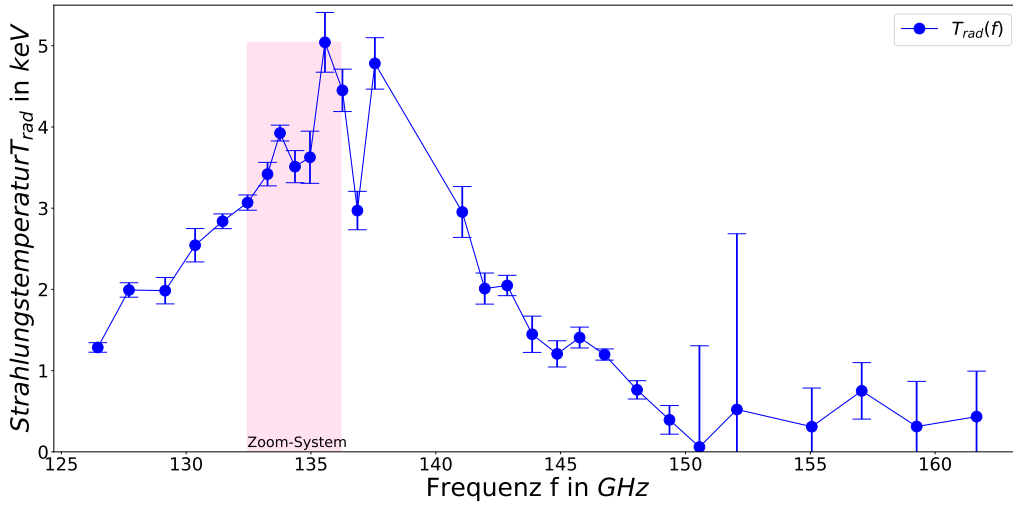


Abbildung 22: Exemplarische Darstellung eines Strahlungstemperatur-Emissionsspektrums der ECE mit markierter Position des Zoom-Systems. Die Strahlungstemperatur T_{Rad} ist aufgetragen über die Frequenzen f des ECE-Radiometers. Jede Frequenz ist charakteristisch für einen Kanal des Radiometers und die Strahlungstemperaturen sind den ECE-Messdaten des Versuches 20221215.015 am Zeitpunkt $t = 3,2s$ entnommen. Der rosa hinterlegte Bereich zeigt den Frequenzbereich, in welchem das Zoom-System bei diesem Versuch misst. Die Fehlerbalken sind anhand der Unsicherheit der Kalibrierfaktoren berechnet.

Die Abbildung 22 zeigt ein Beispiel für ein Emissionsspektrum des Radiometers. Der rosa hinterlegte Bereich stellt den Frequenzbereich des Zoom-Systems dar, wenn dieses an der Plasmamitte liegt. Das bedeutet, der Frequenzbereich, in dem das Zoom-System misst, liegt hier bei 132,5 – 134,2 GHz. Um die Frequenzen f_{zoom} der 16 Zoomkanäle zu bestimmen, muss zunächst die Oszillatorfrequenz f_{Lo} mithilfe der Oszillatorspannung U_{Lo} durch ein Polynom vierten Grades bestimmt werden [15, 16]:

$$f_{Lo} = 12.121 + 0.1137 \cdot U_{LO} + 0.0516 \cdot U_{LO}^2 - 0.0029 \cdot U_{LO}^3 + 0.000048 \cdot U_{LO}^4 \quad (18)$$

Aus dieser und den Filterfrequenzen f_{filter} ergibt sich damit die folgende Formel zur Bestimmung des Frequenzbereichs des Zoom-Systems [15, 16]:

$$f = 122,06 \text{ GHz} + 2 \cdot f_{LO} + f_{filter} \quad (19)$$

Da das Zoom-System, genau wie das normale Radiometer, die Strahlungstemperatur T_{Rad} misst, kann auch für den gemessenen Frequenzbereich des Zoom-Systems ein Leistungsdepositionsprofil erstellt werden. Wenn die Depositionszone gerade von dem Zoom-System getroffen wird, ermöglicht dies eine genauere Ortsauflösung der Leistungsdeposition.

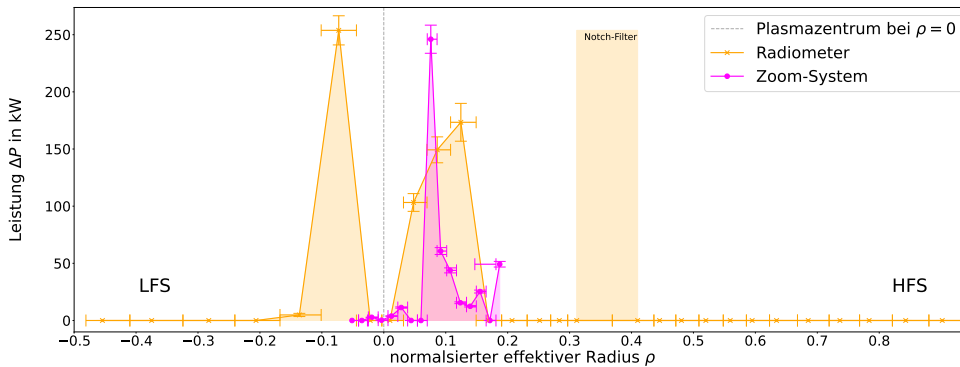


Abbildung 23: Darstellung der Leistungsänderung über den normalisierten effektiven Radius für den Versuch 20221215.015. In Orange ist das Leistungsdepositionsprofil des Radiometers dargestellt. In Rosa ist das entsprechende Profil des Zoom-Systems gezeigt. Die Messungen des Zoom-Systems wurden mithilfe der Radiometer-Kalibrierfaktoren skaliert. Die Fehlerbalken ergeben sich analog aus dem statistischen Fehler der Steigungsänderung und dem abgeschätzten Fehler der Teilchendichte.

In Abbildung 23 ist ein solches Profil dargestellt. In Orange ist das Leistungsdepositionsprofil des Radiometers hinterlegt. Zu sehen ist wieder eine symmetrische Deposition um die Plasma-mitte. In rosa ist das Profil des Zoom-Systems dargestellt. Dieses befindet sich, analog zum gezeigten ECE-Spektrum, auf der HFS und ergänzt den Depositionspeak des Radiometers an dieser Stelle. Da zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Bachelorarbeit keine Kalibrierfaktoren für das Zoom-System vorhanden sind, wurden für die jeweiligen bit-Werte der Zoom-System-Kanäle passende Kalibrierfaktoren des Radiometers verwendet. Da aus den technischen Daten des Radiometers [13] bekannt ist, dass die Variation der Kalibrierfaktoren von Kanal zu Kanal groß ist, kann keine aussagekräftige Leistungsdichte berechnet werden. Es kann also nur der Ort der Leistungsdeposition bestimmt werden. Die Werte der Leistungsänderung für das Zoom-System

besitzen leider keine Aussagekraft und daher keine Vergleichsmöglichkeit. Um dem entgegenzuwirken, könnte in zukünftigen Experimenten am W7-X für jede neu getroffene Einstellung des Zoom-Systems, also jeder neu eingestellten Oszillatorfrequenz f_{Lo} , eine Relativkalibrierung mittels Rauschröhre für das Zoom-System gemacht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Modulation der Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH) und der daraus resultierenden Temperaturänderung beim An- und Ausschalten der Gyrotrons können orts aufgelöste Leistungsdepositionsprofile erstellt werden.

Aufbauend auf der Arbeit von Céline Dyhring [1] konnte die Methode zur Bestimmung des Ortes der Leistungsdeposition aus den Daten der Elektronen-Zyklotron-Emission (ECE) in ein automatisiertes Verfahren zur Anwendung in den aktiven Experimentbetrieb am Wendelstein 7-X (W7-X) eingearbeitet werden.

Ein 32-Kanal ECE-Radiometer misst die Strahlungstemperatur T_{Rad} , welche durch Systemrauschen und die statistischen Fluktuationen der Schwarzkörperstrahlung selbst ein recht veräusertes Signal darstellen kann. Mithilfe von *Conditional Averaging* werden die Modulationsperioden im ECE-Signal gemittelt, sodass jeweils ein An- und Ausschaltzeitpunkt der ECRH betrachtet werden kann. Nach einer statistischen Auswertung an den Schaltzeitpunkten der ECRH $t_{s,an}$ und $t_{s,aus}$ werden die Anstiege direkt vor und nach den Schaltzeitpunkten jeweils exponentiell gefittet. Die gefitteten Anstiege liefern die Temperaturänderung $\Delta \frac{d}{dt} T_{Rad}$ unmittelbar am Schaltzeitpunkt und bilden die Basis zur Berechnung der deponierten Leistungsdichte. Filtermethoden innerhalb der Automatisierung sorgen dafür, dass nur die Kanäle des Radiometers betrachtet werden, welche direkt nach dem Schalten der ECRH eine Reaktion in der Strahlungstemperatur T_{Rad} zeigen.

Mit der Teilchendichte n_e , berechnet aus der Thomson-Streuung-Diagnostik oder aus der ECE selbst über eine Vorwärtsanalyse via TRAVIS [7], kann so die deponierte Leistungsdichte Δp_{ECE} bestimmt werden. Ein orts aufgelöstes Leistungsdepositionsprofil kann im Anschluss mithilfe des normalisierten effektiven Radius ρ , ebenfalls berechnet über TRAVIS, erstellt werden. Durch Berechnung der charakteristischen Volumina pro ECE-Kanal kann damit auch die von ECRH deponierte Gesamtleistung ΔP_{ECE} im Plasma integriert werden.

Der Vergleich mit der Leistungsänderung des Gyrotronstrahls der ECRH ΔP_{ECRH} , gemessen mit einer kalibrierten Diode, deuten darauf hin, dass mit den erstellten Leistungsdepositionsprofilen eine fundierte Aussage über den Ort und Wert der deponierten Leistung getroffen werden kann.

Untersuchungen bei drei verschiedenen Modulationsfrequenzen zeigen, dass durch schnellere Modulation gegebenenfalls ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis in den Messdaten der ECE erreicht werden kann. Da es sich allerdings um ein automatisiertes Verfahren handelt, können die dadurch auftretenden Änderungen in den Fitzeitfenstern Einfluss auf den Wert der resultierenden Gesamtleistung haben. Jedoch stimmt die symmetrische Verteilung der deponierten Leistung in den Profilen überein, weswegen davon auszugehen ist, dass bei der hier untersuchten Methode die Modulationsfrequenz keinen großen Einfluss auf den Ort der deponierten Leistung hat.

Zusätzlich wird das Zoom-System untersucht. Es handelt sich dabei um ein weiteres 16 Kanal Radiometer mit einem schmalen 4 GHz Sichtbereich. Im erstellten Leistungsdepositionsprofil ist zu sehen, dass die deponierte Leistung korrespondierend zur Positionierung des Zoom-Systems auf dem ECE-Spektrum ausgewertet werden kann.

Über die Möglichkeit, damit eventuell räumlich höher aufgelöste Profile der Leistungsdeposition zu erhalten, konnte zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Bachelorarbeit noch keine Aussage getroffen werden, da die Zoom-Kanäle, spekulativ mit den Radiometermessungen kalibriert, vermutlich stark von der Realität abweichen. Grundsätzlich bietet das Zoom-System allerdings eine Möglichkeit zur Erweiterung der Auflösung der Leistungsdepositionsprofile. Um in der Zukunft nicht nur die mit TRAVIS errechneten Orte der Leistungsdeposition, sondern auch die Breiten der Depositionszonen zu vergleichen, wird es notwendig sein, die Kanäle des Zoom-Systems zumindest relativ zueinander zu kalibrieren. Dazu könnte in kommenden Versuchen für jede neu eingestellte Oszillatorfrequenz f_{LO} mithilfe einer Rauschröhre eine Relativkalibrierung durchgeführt werden.

Des Weiteren bietet eine systematische Untersuchung von Depositionszonen verschiedener Gyrotronstrahlen und Strahlparameter, wie für on- und off-axis oder Stromtrieb, eine zukünftige Anwendungsmöglichkeit der beschriebenen Automatisierung.

Zuletzt bietet die hier programmierte Automatisierung das Potenzial, in eine automatisierte Auswertung für den aktiven Experimentbetrieb am Wendelstein 7-X eingebettet zu werden. So kann während des Messbetriebs bereits eine erste Auswertung zur Leistungsdeposition bereitgestellt werden. Aktuell wird eine automatisierte Auswertung am W7-X erst etabliert.

Literatur

- [1] Céline Dyhring, Leistungsdepositions-messung durch Modulation der Elektron-Zyklotron-Resonanz-heizung im Wendelstein 7-X, Bachelorarbeit Physik, 2022, Technische Universität Berlin, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
- [2] Hans-Jürgen Hartfuss / Thomas Geist, *Fusion Plasma Diagnostics with mm-Waves - An Introduction*, 1. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim 2013
- [3] M. Hirsch et al, ECE Diagnostic for the initial Operation of Wendelstein 7-X, 2019, EPJ Web of Conferences **203**, 03007
- [4] I.H Hutchinson, *Principles of Plasma Diagnostic - Second Edition*, 2. Auflage, Cambridge University Press, 2002
- [5] J C Schmitt et al, Radial coordinate maps, radial vectors, and binormal vectors for 5/6, 5/5 and 5/4 edge island domains in W7-X, 2022, Plasma Phys. Control. Fusion **64** 055022
- [6] N.B. Marushchenko et al, Ray-tracing code TRAVIS for ECR heating, EC current drive and ECE diagnostic, 2014, Computer Physics Communications **185** 165–176
- [7] Neha Chaudhary et al, Electron temperature profile from optically grey X3-mode of electron cyclotron emission at Wendelstein 7-X using Bayesian analysis, 2022 Plasma Phys. Control. Fusion **64** 055016
- [8] H.P. Laqua et al, High-performance ECRH at W7-X: experience and perspectives, 2021, Nucl. Fusion **61** 106005
- [9] T. Stange et al, Advanced electron cyclotron heating and current drive experiments on the stellarator Wendelstein 7-X, 2017, EPJ Web of Conferences **157**, 02008
- [10] R C Wolf et al, Electron-cyclotron-resonance heating in Wendelstein 7-X: A versatile heating and current-drive method and a tool for in-depth physics studies, 2019 Plasma Phys. Control. Fusion **61** 014037
- [11] K K Kirov et al, ECRH power deposition studies in ASDEX Upgrade, 2002, Plasma Phys. Control. Fusion **44** 2583
- [12] A. Hermann et al, Chapter 1: ASDEX Upgrade - Introduction and Overview, 2003, Fusion Science and Technology Fusion Science and Technology, **44:3**, 569-577
- [13] U. Höfel et al, Bayesian modeling of microwave radiometer calibration on the example of the Wendelstein 7-X electron cyclotron emission diagnostic, 2019, Review of Scientific Instruments **90**, 043502
- [14] S.A. Bozhenkov et al, The Thomson scattering diagnostic at Wendelstein 7-X and its performance in the first operation phase, 2017, JINST **12** P10004

- [15] M.Hirsch, ECE zoom device, Dokumentation **1-QME34-T0000**, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
- [16] Ch. Fuchs and H. J. Hartfus, Review of Scientific Instruments, 2001, Review of Scientific Instruments **72**, 383

Danksagung

An dieser Stelle, möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Matthias Hirsch, der mir jederzeit mit Antworten und Rat zur Seite stand. Ich bin sehr dankbar für die umfassende Betreuung, sowohl in meiner Zeit am IPP in Greifswald vor Ort, als auch während der Erstellung meiner Bachelorarbeit in Berlin und für die Gespräche über Plasmaphysik sowie den Wendelstein 7-X, durch die ich in der ganzen Zeit sehr viel lernen durfte.

Ein weiterer Dank gilt meinem Erstgutachter Prof. Dr. Robert Wolf, der mir ermöglicht hat, meine Bachelorarbeit am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik zu schreiben. Außerdem bedanke ich mich bei Prof. Dr. Wolf-Christian Müller, dass er sich als Zweitgutachter zur Verfügung gestellt hat.

Zusätzlich möchte ich mich bei meiner Kollegin Hjördis Bouvain bedanken, für die inspirierenden und motivierenden Gespräche während meiner Zeit am IPP und für die Unterstützung und Motivation während des Erstellens meiner Bachelorarbeit. Mein Dank gilt ebenfalls Dr. Neha Chaudhary für die Betreuung in meiner Zeit am IPP in Greifswald.

Des Weiteren möchte ich mich besonders bei meinen Eltern für die Unterstützung während meines Studiums und der Ermöglichung meines bisherigen Weges bedanken. Zuletzt gilt besonderer Dank meinem Bruder Sidney Arvanitis, welcher mich stets motiviert, inspiriert und bedingungslos unterstützt hat.