

AiF-Forschungsvorhaben 15302 BG »ProbePlas Sondentechnik in der Plasmatechnik«

1. Zwischenbericht

Berichtszeitraum: September 2007 – Dezember 2007

Forschungstelle 1: Fraunhofer IST
Projektverantwortliche: Dr. Volker Sittinger

Projektmitarbeiter: Dr. Andres Pflug, Dr. Bernd Szyszka,
Berthold Kühnert

Forschungstelle 2: INP Greifswald
Projektverantwortliche: Dr. Ruben Wiese

Projektmitarbeiter: M. Hannemann, S. Brieg

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Projektstruktur	4
3	Diskussion der Randbedingungen an die Sondenbauweise bei Durchlaufbetrieb	6
3.1	Versuchsanlagen und Beschichtungsprozesse	7
3.2	Einsatzgrenzen der Sonden	7
4	Signal-, Datenerfassung und Datenverarbeitung der Sonden	9
4.1	Gegenfeldanalysator	9
4.1.1	Daten aus der Messung	10
4.1.2	Bestimmung des Sekundärelektronenstroms	10
4.2	Thermosonde	11
4.2.1	Aufbau	12
4.2.2	Änderungen im Rahmen des Projektes	12
4.2.3	Datenprotokoll	13
4.3	Langmuirsonde	13
4.3.1	Aufbau	13
4.3.2	Änderung und Weiterentwicklung	14
5	Literatur	15

1 Kurzfassung

Die bisher im Berichtszeitraum geleisteten Arbeiten beschränken sich auf die Vorbereitung und Durchführung des KickOff-Treffens, sowie dem Aufbau von Sputteranlagen am Fraunhofer IST und am INP Greifswald, welche im Rahmen des Projektes zur Plasmacharakterisierung eingesetzt werden.

Im Rahmen der Durchführung des KickOff-Treffens wurde den Teilnehmern das Projekt erläutert und mit diesen die Projektschwerpunkte festgelegt. Es wurden die Randbedingungen der Sondenbauweise im Hinblick auf deren Einsatz bei den Industriepartnern sowie die Infrage kommenden Versuchsanlagen und Beschichtungsprozesse diskutiert. Des Weiteren wurden an den beiden Instituten Sputteranlagen aufgebaut bzw. in Betrieb gesetzt.

Im Folgenden wird die Sondendatenerfassung der einzelnen Sonden vorgestellt.

Für den Gegenfeldanalysator wurde zudem in einem ersten Schritt eine Auswerte Routine in ORIGIN entwickelt, die im weiteren Verlauf des Projektes auf die gemeinsame Plattform (LabView) umgesetzt werden soll. Die bisher vorhandene Software zur Datenerfassung wurde von einer alten LabView Version (5.1) auf die neue LabView Version (8.0) umgesetzt.

Für die Thermosonde wurde an einem neuen Konzept der Ansteuerung der Sonde gearbeitet, bei dem keine separate Elektronik zwischen Computer und Sonde geschaltet werden muss. In einem ersten Schritt wurden entsprechende Prozeduren erarbeitet, die in die bisher vorhandene Software der passiven Sonde eingearbeitet und mit Erfolg erprobt wurden.

Weiterhin wurde mit der Erarbeitung eines neuen Programms für die Auswertung der Meßdaten der Langmuirsonde begonnen. Bei dieser Sonde wird insbesondere an der Modifizierung des Mechanismus beim „Sondenglühen“ gearbeitet. Dieser Schritt ist zur Vorbereitung der Sonde vor jeder Messung erforderlich und muss automatisiert ablaufen können.

2 Projektstruktur

Das Projekt ProbePlas behandelt die Optimierung unterschiedlicher Sondentechniken zur Monitorierung von Plasmaprozessen sowie deren Einbettung in eine einheitliche Softwareumgebung zur Messdatenerfassung, Auswertung und Protokollierung.

Das Projektkonsortium setzt sich aus den beiden ausführenden Instituten, Fraunhofer IST und INP (neuerdings Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V.) sowie einem projektbegleitenden Ausschuss zusammen, in dem derzeit die den folgenden Firmen vertreten sind:

Advanced Energy Industrie GmbH
Brilliant 234. GmbH
CIS-Solartechnik GmbH und Co. KG
GFE Metalle und Materialien GmbH
Interpane Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH & Co KG
IFU Diagnostic Systems GmbH
Melec GmbH
Sentech Instruments GmbH
Zirox Sensoren und Elektronik GmbH

Die folgenden Sondentechniken sollen in diesem Projekt zum Einsatz kommen:

Thermosonde (INP)
Langmuirsonde (INP)
Gegenfeldanalysator (IST)
 λ -Sonde (Zirox, IST)
OES, zeitaufgelöst (IFU)
Energieaufgelöstes Massenspektrometer, »Plasmamonitor« (INP)

Der Arbeitsinhalt des Projekts ist durch die folgenden Arbeitspakete strukturiert:

AP1 – Anforderungskatalog

Ermittlung der Grenzen der Bauteilabmessung sowie der Anforderungen an die Messtechnik / das Datenprotokoll für die Auswertung / Protokollierung

AP2 – Aufbau und Weiterentwicklung

Optimierung der Sonden anhand der in AP 1 diskutierten Randbedingungen

AP3 – Testen und Optimierung

Die optimierten Sonden werden an einer Versuchsanlage getestet. Hierfür werden eine In-line-Sputteranlage am IOT, Uni-Braunschweig sowie eine neue Versuchsanlage am INP zum Einsatz kommen.

AP4 – Automatisierung

Dieses Arbeitspaket umfasst die Ansteuerung der Sonden unter einer einheitlichen Softwareumgebung Labview®, die Entwicklung von automatisierten Auswerteroutinen sowie die Kommunikation zwischen Hardwareansteuerung und – teilweise modellgestützter – Auswertung.

AP5 – Feldversuche

Die optimierten Sonden werden zusammen mit der neu entwickelten Ansteuerung und Auswertung in Feldversuchen an Anlagen aus dem projektbegleitenden Ausschuss getestet. Die hierfür in Frage kommenden Beschichtungsanlagen sind noch zu diskutieren.

3 Diskussion der Randbedingungen an die Sondenbauweise bei Durchlaufbetrieb

Bei der Architekturglasbeschichtung beträgt die Schlitzhöhe der Transportspalte maximal 20 mm, d. h. die maximale Sondenhöhe im Durchlaufbetrieb ist auf 10-15 mm begrenzt (Interpane). Eine SunControl-Schicht besteht aus 10-15 Einzelschichten; ein Sonden-Durchlauf wäre also eine wünschenswerte Alternative zu entsprechend zahlreichen, stationär angebrachten Sonden.

Die Maximale Bauteilhöhe 10-15 mm wurde auch seitens Sentech und CIS-Solartechnik (~20 mm) bestätigt.

Die Messwert-Übertragung kann z. B. per Datalogging-Einheit erfolgen. Zum Beispiel könnte ein »Supermole®« Temperaturlogger, wie er am Fraunhofer IST schon eingesetzt wird (siehe <http://www.ecd.com/emfg/instruments/mole/>), zur Datenübertragung dienen. Eine andere Alternative besteht darin, die Messdaten via Funk zu übertragen, was auch in Vakuum-Beschichtungsanlagen funktionieren kann.

Das größere Problem ist die Energieversorgung einer mitfahrenden Sonde. Ein weiterer Punkt ist die Messzeit. In Architekturglasanlagen beträgt die Transportgeschwindigkeit ca. 6-8 m/min, kann aber für Testzwecke auch temporär auf 0.1 m/min gedrosselt werden. Auf Roll-to-Roll Coatern wie bei CIS-Solartechnik entfällt die Möglichkeit einer mitfahrenden Sonde aufgrund der Transportmechanik / der Substratkrümmung an den Enden.

Die meisten Sonden dürften Temperaturen oberhalb 170 °C (Lötinn-Schmelzpunkt) nicht aushalten, was für einige Beschichtungsprozesse – z. B. hochleitfähige TCOs – problematisch sein kann. Einige Sonden – insbesondere auch die λ -Sonde – reagieren empfindlich auf reaktive Gase wie P, Cl, F, Halogene.

Fast alle Sonden werden durch parasitäre Beschichtung im Laufe der Zeit beeinträchtigt. Bei der Langmuirsonde und beim Gegenfeldanalysator müssen in regelmäßigen Abständen die Gitter gereinigt bzw. der Sondendraht ausgeglüht werden, um Drifts infolge Beschichtung zu verhindern.

Bei der Langmuirsonde besteht zusätzlich das Problem, dass die Sonde ins Beschichtungsplasma hineinragen muss und dass grundsätzlich Scans über eine bestimmte Strecke von Interesse sind, während Einpunkt-Messungen eher wenig relevant sind.

Einige Sonden können empfindlich auf das Zuschalten von RF-Quellen reagieren, beobachtet wurde das am Fraunhofer IST bei einer λ -Sonde. Ob dies einen physikalischen Hintergrund hat oder durch elektrisches Übersprechen verursacht wird, ist derzeit unklar.

3.1 Versuchsanlagen und Beschichtungsprozesse

Seitens des Fraunhofer IST wird unter anderem eine neue Laboranlage am IOT / Universität Braunschweig erweitert und für das Testen der Sondenbauteile zum Einsatz kommen. Als Versuche sind insbesondere Beschichtung von Ti und geregelte Beschichtung von TiO₂ geplant.

Am INP Greifswald wird in Kürze ein relativ großer und flexibler Versuchsreaktor mit einem Volumen von ca. 1 m³ zur Verfügung stehen.

Die Firma Sentech plant nächstes Jahr die Installation einer eigenen Versuchsanlage für Applikation bei Sentech. Auch hier wird die Möglichkeit gegeben sein, ein bis zwei stationäre Sonden zu testen.

Bei der Firma CIS-Solartechnik kommen aufgrund der Roll-to-Roll Transportgeometrie nur stationäre Sonden in Frage.

Bei der Firma Interpane wäre auch ein Durchlaufbetrieb mit verminderter Geschwindigkeit möglich, sofern das Problem der Bauhöhe und der mitfahrenden Stromversorgung gelöst wäre.

3.2 Einsatzgrenzen der Sonden

In Tabelle 1 sind die Einsatzgrenzen der verwendeten Sonden den jeweiligen Prozessen zugeordnet. Bei manchen Sondentypen ist bisher noch unklar inwieweit Sie bei dem jeweiligen Prozess eingesetzt werden können. Dies muss durch Testen der Sondentypen im jeweiligen Prozess herausgefunden werden.

Tabelle 1: Zuordnung von zu untersuchenden Prozessen und Sondentypen

		Prozess					
		DC	MF	RF	HPPMS	RIE	Ionenquelle
Sonden	Thermo	x	integral	integral	integral	integral	integral
	Langmuir	x	zeitaufg.	zeitaufg.	?	?	
	RFA	x	integral	integral	-	integral	integral
	Lambda	x	integral	integral	integral	-	
	OES	x	zeitaufg.	zeitaufg.	zeitaufg.	zeitaufg.	zeitaufg.
	Plasma-Monitor	x	integral	integral	integral	integral	integral

Eine Zusammenfassung der technischen Parameter der einzelnen Sonden sowie der meßbaren physikalischen Größen ist in Tabelle 2 dargestellt. Für die Prozeßsicherheit ist die Reproduzierbarkeit der Meßwerte (relativer Fehler) entscheidend. Für wissenschaftliche Untersuchungen kann durch erhöhten Kalibrierungsaufwand die Genauigkeit der Absolutwerte gesteigert werden, was in diesem Projekt jedoch nicht im Vordergrund steht.

Tabelle 2: Darstellung der Charakteristik der einzelnen Sondentypen

Sonde	Druckbereich	Meßgröße	Meßbereich	Meßfehler Abs./rel. *	Laterale Auflösung	Bemerkung
Thermosonde	beliebig	Energieeinstrom	0,1 ... 100 J/cm ² s	30 % / 5 %	5 mm	
Langmuirsonde	0,1 ... 100 Pa	Elektronendichte	10 ¹⁵ ... 10 ¹⁸ /m ³	20 % / 5 %	5 mm	Nicht möglich bei Einsatz als Doppelsonde
		Elektronentemperatur	0,1 ... 10 V	20 % / 5 %		
		Plasmapotential	± 200 V	1 V / 5 %		
		Floatingpotential	± 200 V	1 V / 5 %		
Gegenfeldanalysator	0,1 ... 2 Pa	Ionenstromdichte	1 µA ... 1 mA	30 % / 5 %	5 mm	
		Ionenenergieverteilung	1 ... 250 eV	30 % / 5 %		

4 Signal-, Datenerfassung und Datenverarbeitung der Sonden

Da die einzelnen Sonden auf unterschiedlichen Plattformen arbeiten war Ziel des Arbeitspaketes 1 eine gemeinsame Plattform für die Sonden zu erstellen im Einzelnen werden die momentan Erfassung der Sondensignale sowie die Auswertung der Daten vorgestellt. Gleichfalls werden die im Projektzeitraum durchgeführten Änderungen der Software erläutert.

4.1 Gegenfeldanalysator

Gegenfeldanalysatoren wurden zur Vermessung von Ionenströmen in Plasmaprozessen entworfen. Grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet stammen von Ingram et al. [Ing88, Ing90].

Am IST werden Gegenfeldanalysatoren schon seit geraumer Zeit eingesetzt. Die ersten Entwürfe wurden Ende der 90er getätigt, im Jahre 1998 wurde ein erstes System aufgebaut. Die Daten Auswertung erfolgte bisher manuell.

Die Software wurde im Projektzeitraum teilweise neu konzipiert und auf eine aktuelle LabView-Versionen umgestellt.

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau des Gegenfeldanalysators sowie die Steckerbelegung zum Ansteuern und Auslesen der Messsignale.

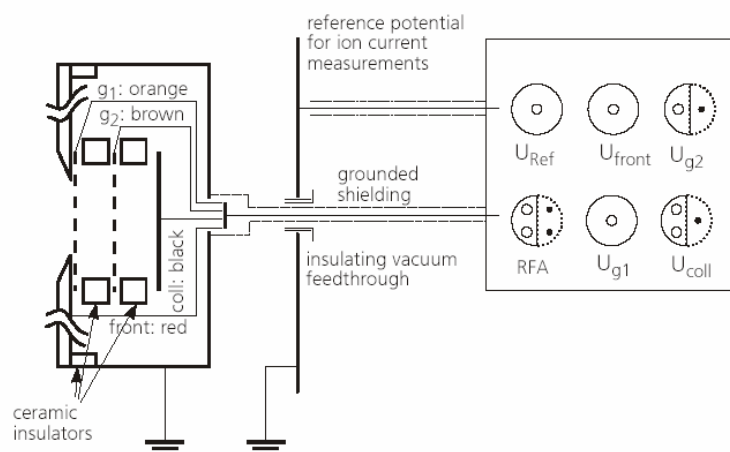


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Gegenfeldanalysators sowie der Steckerbelegung zur Erfassung der Messsignale.

Hierbei wird für die Vorgabe der Spannung an Gitter 2 eine Spannungsquelle E3612A von Agilent Technologies verwendet. Das Sourcemeter 2410 von Keithley legt eine Spannung an den Kollektor U_{coll} und misst den Strom an der RFA Buchse. Im Normalbetrieb wird die Frontplatte U_{front} und das erste Gitter U_{g1} geerdet sowie U_{ref} wird mit der Anlagenerde verbunden. Die Signalerfassung erfolgt mittels GPIB über das ein LabView Tool

4.1.1 Daten aus der Messung

Die Messung liefert allein den Kollektorstrom als Funktion der Kollektorspannung. Aus dieser Messung lassen sich alle anderen Größen ableiten. In der ursprünglichen Software-Version findet eine weitere Auswertung automatisiert statt. Dies wurde bisher leider nicht als förderlich angesehen, da oftmals Korrekturen oder Glättungen an den Spektren vorgenommen werden müssen. Im weiteren Verlauf des Projektes wird eine automatisierte Auswertung auf Basis von LabView erfolgen, dieses bietet die Vorteile:

- Visuelle Kontrolle bei Datenauswertung
- Glättung der Spektren ist möglich
- Automatisierter Export zu ORIGIN
- Gemeinsame Basis für die Kopplung der unterschiedlichen Sonden

Aus Zeitgründen wurde deshalb im Projektzeitraum für die Datenauswertung ein Origin Tool erstellt.

4.1.2 Bestimmung des Sekundärelektronenstroms

Eine typische Kennlinie für einen DC-Sputterprozess vor jeglicher Datenaufbereitung ist in Abbildung 2 gezeigt. Über das Vorzeichen des Stroms kann man diskutieren, in der derzeitigen Konvention ist der Strom negativ, wenn mehr Ionen als Elektronen den Kollektor erreichen.

Zunächst muss der Sekundärelektronenstrom bestimmt werden.

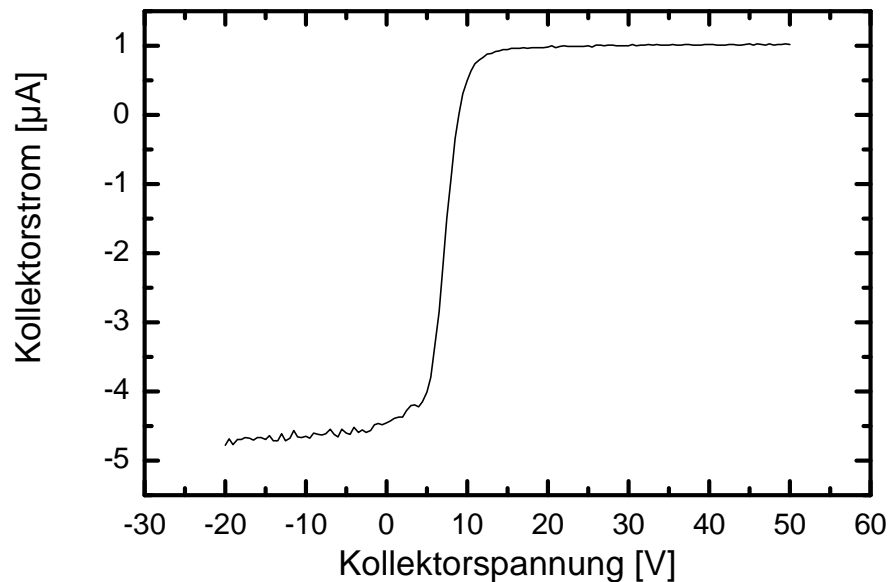


Abbildung 2: Kollektorstrom als Funktion der Kollektorspannung für einen DC-Sputterprozess.

Dies kann jetzt mit ORIGIN gemacht werden. In den letzten Auswertungen wurde hier durchweg eine lineare Funktion angefitet, da der Sekundärelektronenstrom durchaus von der Kollektorspannung abhängen kann. Dazu wird folgende vorgehensweise gewählt:

- Importieren der Spektren in ORIGIN, für jedes ein eigenes Fenster
- Die Spalte mit der Kollektorspannung muss als X-Spalte ausgewählt sein, der Kollektorstrom als Y-Achse
- Markieren der Spalte mit dem Kollektorstrom, Fit-Assistent aufrufen (Analyse/Nichtlinearer Kurvenfit/Fit-Assistent)
- Bei „Bereich der unabhängigen Variable“ den Bereich auswählen, in dem der Kollektorstrom für hohe Kollektorspannungen in Sättigung geht, d.h. sich nicht mehr ändert
- Auswahl der linearen Funktion als Fitfunktion (Keine Gewichtung vornehmen)
- Unter Fitkontrolle den Fit anschauen
- Fertigstellen!

4.2 Thermosonde

Der Energieeinstrom am Substrat bei plasmatechnologischen Prozessen ist von großer Bedeutung für die Eigenschaften der aufwachsenden Schicht bzw. der

behandelten Oberfläche. Am INP liegen langjährige Erfahrungen zur Messung des Energieeinstromes mit der sog. „passiven Thermosonde“ vor. Diese Sonde arbeitet jedoch nicht kontinuierlich und ist deshalb für den Einsatz zur Regelung und Überwachung von Prozessen nur bedingt geeignet. Aus diesem Grunde wurde am INP schon vor Beginn des Projektes eine kontinuierlich messende aktive Sonde entwickelt.

4.2.1 Aufbau

Bei dieser Sonde ist keine Kalibrierung notwendig und außerdem werden Umgebungseinflüsse sowie die Wärmeableitung durch die Zuleitungen und Halterungen der Sonde kompensiert. Die bei Beschichtung sich ändernde Wärmekapazität der Sonde ist ebenfalls ohne Einfluss auf den Messwert. Die Sonde wird mittels einer geregelten elektrischen Heizung auf eine vorgegebene Arbeitstemperatur gebracht, wobei die zur Aufrechterhaltung des thermischen Gleichgewichtes zugeführte Heizleistung gemessen wird. Der Energieeintrag durch externe Wärmequellen wird durch Herabsetzung der Heizleistung kompensiert und direkt in J/cm^2s angezeigt. Am INP wurde erfolgreich ein Labormuster dieser aktiven Sonde (siehe Abbildung 3) aufgebaut und erprobt.

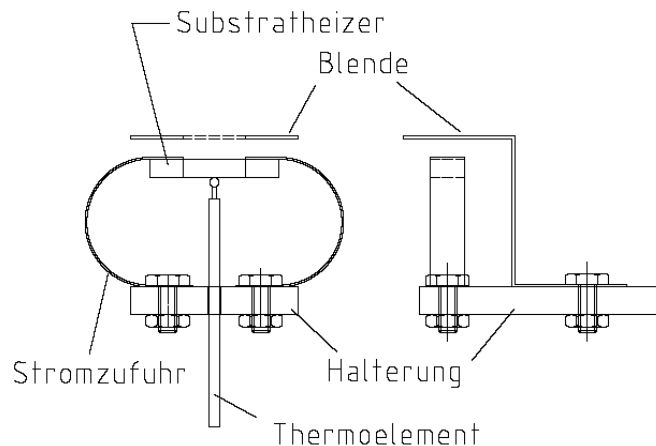


Abbildung 3: Aufbau der aktiven Thermosonde

4.2.2 Änderungen im Rahmen des Projektes

Dieses Labormuster wird mit einer speziellen dafür entwickelten Elektronik angesteuert. Um dieses Sonde im Rahmen des Projektes mit anderen Sonden auf eine Plattform zu bringen, ist eine direkte Kopplung der Sonde mit einem PC notwendig. Dazu muss ein entsprechend passender AD/DA-Wandler in den

PC integriert werden, der die Temperaturwerte der Sonde erfassen und die Stromversorgung der Sondenheizung steuern kann. Ein im PC installierte Software muss die Temperaturwerte vom AD-Wandler übernehmen, mittels geeigneter Regelalgorithmen verarbeiten und über den DA-Wandler Steuersignale an ein separates Anpassglied ausgeben, das den Strom der Sondenheizung entsprechend einstellt. Das ganze muss in Echtzeit oder mit einer Taktzeit von mindestens 10 Hz erfolgen.

Erste Versuche zur Erfassung der Sondentemperatur wurden mit AD-Wandler der Firma ADDI-Data durchgeführt. Die dazu notwendigen Treiber und Ansteuerrountinen wurden programmiert und in der vorhandenen Software für die passive Thermosonde getestet. Durch ihren modularen Aufbau können diese Treiber und Routinen auch in der noch zu erarbeitenden Software für die aktive Sonde ohne Änderung verwendet werden.

4.2.3 Datenprotokoll

Das Datenprotokoll der aktiven Thermosonde hat folgenden Aufbau:

Tsoll	Tist	Pref	Pist	Pdelta
xxx;	xxx;	xxx;	xxx;	xxx;
...

Dabei sind:

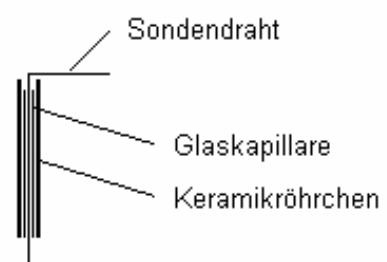
Tsoll	die Solltemperatur der Sonde
Tist	die Ist-Temperatur der Sonde
Pref	die notwendige Energiezufuhr ohne Energieeinstrom
Pist	die tatsächliche zugeführte Energie (Heizleistung)
Pdelta	die Differenz Pref – Pist, die den Wert des an der Sonde ankommenden Energiestromes darstellt.

Diese Werte werden in einer ASCII-Datei bereitgestellt und können so von anderen Plattformen verarbeitet werden.

4.3 Langmuirsonde

4.3.1 Aufbau

Die Messung mit der Langmuirsonde ist eine relativ alte Meßmethode. Schon 1920 haben Langmuir und Mitarbeiter diese Methode zur



Bestimmung von Plasmaparametern eingesetzt.

Ein im Vergleich zur Ausdehnung des Plasmas kleiner elektrischer Leiter wird in Kontakt mit dem Plasma gebracht und die Strom-Spannungs-Charakteristik, die so genannte Sondenkennlinie gegen eine Entladungselektrode oder eine sehr große Gegenelektrode aufgenommen. Daraus lassen sich mit Hilfe verschiedener mathematischer Methoden grundlegende interne Parameter des umgebenden Plasmas bestimmen, wie z.B.:

- das Floatingpotential U_f der Sonde
- das Plasmapotential U_p am Ort der Sonde
- die Elektronentemperatur T_e bzw. die mittlere Energie der Elektronen
- die Elektronendichte n_e
- die Elektronenenergieverteilungsfunktion (EEVF)

4.3.2 **Änderung und Weiterentwicklung**

Um diese Sonde im Rahmen des Projektes für eine automatisierte Messung einsetzen zu können, muss zunächst das Problem des Ausheizens der Sonde geklärt werden. Vor jeder Messung, zumindest aber nach jeder Verunreinigung der Sondenoberfläche (Restgas, Arbeitsgase, Beschichtung) muss diese in einem Glühvorgang einer Selbstreinigung unterzogen werden. Dazu muss durch die Sonde ein entsprechend ausreichend hoher Strom fließen, der sie zum Glühen bringt. Dieser Strom ist in besonders starkem Maße vom Arbeitsdruck in der Kammer, der Gasart, der Plasmadichte sowie von der Sondenometrie abhängig und kann in der Regel nicht vor der Messung bestimmt werden. Aus diesem Grunde müssen geeignete Kriterien gefunden werden, um den zum Glühen notwendigen Sondenstrom so zu wählen, dass die Sondentemperatur zum Einen genügend hoch ist, damit der Selbstreinigungseffekt einsetzt, und zum anderen nicht zu hoch ist und eine Zerstörung oder vorzeitige Alterung der Sonde eintritt.

Dazu wurden einige mögliche Verfahren favorisiert, die in weiteren Experimenten getestet werden müssen, wie z.B.:

- die optische Bestimmung der Sondentemperatur
- Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den Umgebungsbedingungen der Sonde und des zum Glühen notwendigen Stromes
- genauere Untersuchung der Sondenkennlinie bei Erreichen der Glühtemperatur, um Abbruchkriterien herauszufinden
- Kontaktierung der Sonde und Einspeisung des Glühstromes durch einen mechanischen Manipulator

5 Stand der Arbeiten und Verwendung der Zuwendung

Im Kalenderjahr 2007 sind am Fraunhofer IST umfangreiche Arbeiten zur Umrüstung der Anlagentechnik sowie zu Erstellung des Anforderungskatalog (AP1) gelaufen. Am INP Greifswald wurde Arbeiten zur Planung und der Beauftragung einer neuen Sputteranlage vorgenommen. Anhand der Sitzung des PAs wurden zukünftige Sonden Geometrien für die diversen Anlagen des PAs diskutiert. Die Messprotokolle sowie Anforderungen an die Messtechnik wurden zwischen beiden Instituten ausgetauscht und eine gemeinsame Plattform für die Ansteuerung und Auswertung der unterschiedlichen Sonden diskutiert.

Die Bearbeitung des Arbeitspakete 1 erfolgte durch wissenschaftliche und technische Mitarbeiter des Fraunhofer IST und INP Greifswald, wofür die Zuwendungen entsprechend dem Arbeitsplan genutzt wurden.

6 Literatur

- Ing88 INGRAM, S. G.; BRAITHWAITE, N. ST. J.: *Ion and electron energy analysis at a surface in an RF discharge*. In: Journal of Physics D: Appl. Phys. 21 (1988), S. 1496-1503
- Ing90 INGRAM, S. G.; ANNARATONE, B.; OHUCHI, M.: *Design and use of a gridded probe in a low-pressure rf argon discharge*. In: Review of Scientific Instruments 61 (1990), S. 1883-1891