

Gezielte Manipulation von Mikropartikeln in einem Plasma

Manipulation of micro-disperse particles in a process plasma

Ralf Basner, Holger Fehske, Holger Kersten, Sylvio Kosse, Gerald Schubert

Zusammenfassung

Für die Behandlung, d. h. die Oberflächenmodifizierung oder Beschichtung, von mikro-dispersen Materialien (Pulver, Granulate, Fasern etc.) in einem Prozessplasma ist das Verständnis der Plasma-Teilchen-Wechselwirkung von großem Interesse. Zu diesem Zweck werden entsprechende experimentelle Untersuchungen in einer neuartigen Apparatur PULVA-INP vorgestellt.

Summary

An optimal treatment (surface modification, coating) of micro-disperse materials (powder, granulate, fibres etc.) by a process plasma requires the understanding of plasma-particle interaction. For this purpose, related experimental investigations in a novel set-up PULVA-INP will be presented.

Einleitung

Komplexe Plasmen, in denen sich Plasma- bzw. Coulombkristalle ausbilden, stehen gegenwärtig im Zentrum plasmaphysikalischer Forschung [1]. Diese haben eine äußerst heterogene Zusammensetzung – Staubpartikel, Ionen, Elektronen, Neutralteilchen. Daraus resultieren komplexe Wechselwirkungen sowie stark separierte Energie-, Orts-, Zeit- und Massenskalen.

Prominente Beispiele sind die Strukturbildung in partikelhaltigen Plasmen unter Schwerelosigkeit [2] oder die Formation sogenannter „Coulomb-Bälle“ [3]. Ausgehend von diesen Aktivitäten entstand die Idee, mikroskopische Teilchen – die sich in einem Plasma negativ aufladen und einer Reihe von Kräften gehorchen – als *Testpartikel* zu nutzen. Aus dem Verhalten der Teilchen im umgebenden Plasma können dann beispielsweise Informationen über lokale elektrische Felder („Teilchen als elektrostatische Sonden“), den Energieeinstrom („Teilchen als thermische Sonden“) und reaktive Prozesse auf Oberflächen („Teilchen als Mikrosubstrate“) gewonnen werden. Um insbesondere den Einfluss elektrischer Felder auf die Plasma-Partikel-Wechselwirkung experimentell zu studieren, wurde vom Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik (INP) in enger Zusammenarbeit mit der Firma Kayser-Threde München eine *Adaptive Elektrode* konzipiert und vor kurzem am INP in Betrieb genommen. Damit ist über die aktive Beeinflussung von Plasma- und Teilchenparametern u. a. ein neuer Zugang zur Plasmarandschichtdiagnostik möglich.

Experimentelle Untersuchungen in PULVA-INP

In der Apparatur PULVA-INP (Abbildung 1) wird als typische Entladungsform ein asymmetrisches, kapazitiv gekoppeltes HF-

Plasma in einer Argonatmosphäre (0.1 – 100 Pa) benutzt. Die obere Elektrode dient der Einkopplung der elektrischen HF-Leistung bei einer Frequenz von 13.56 MHz und einer Amplitude von bis zu 1000 V. In Abhängigkeit von der Wahl der Parameter stellen sich im ungestörten Plasma Elektronendichten von 10^9 – 10^{11} cm⁻³, Elektronentemperaturen von 0.8 – 2.8 eV, Plasmapotentiale gegenüber der geerdeten Oberfläche von 20 – 30 V und Ionenwandstoßenergien von 5 – 23 eV ein. Die Verbindung von ungestörtem Plasma zur begrenzenden Oberfläche ist durch die sich selbst organisierende Struktur der Plasma-



Abbildung 1: Apparatur PULVA-INP zur experimentellen Untersuchung von Plasma-Teilchen-Wechselwirkungen

randschicht mit charakteristischem Potentialverlauf und entsprechenden Ladungsträgerdichteprofilen gewährleistet.

Für den Fall, dass an die begrenzende Oberfläche kein äußeres Potential angelegt wird, nehmen Elektronenstrom und Ionenstrom zur Oberfläche im zeitlichen Mittel den gleichen Wert an. Es stellt sich ein Floatingpotential ein, dessen Wert die internen Eigenschaften des Plasmas widerspiegelt. Die Variation der Betriebsparsparameter des Plasmas als globale Beeinflussung des Systems bewirkt unmittelbar Veränderungen in der gesamten Plasmarandschicht.

Im Gegensatz dazu stellt die selektive, externe Beaufschlagung von ausgewählten Oberflächenelementen mit einem Biaspotential eine lokale Beeinflussung der Plasmarandschicht und damit des Plasmas vor der Oberfläche dar. Die zeitliche Steuerung wird durch eine geeignete Zeitfunktion für das Biaspotential realisiert. Der Übergang von einem einzelnen Oberflächenelement zu einer Gruppe von Elementen wurde mit der Entwicklung der Adaptiven Elektrode vollzogen [4], die hier als untere Elektrode positioniert ist und das Instrument für die Erzeugung zeitlich und räumlich veränderlicher Strukturen in einem vorgewählten Bereich des Plasmas direkt vor der begrenzenden Oberfläche bildet. Die Adaptive Elektrode basiert auf einer Erfindung des Max-Planck Instituts für extraterrestrische Physik (Patente Nr. DE 19814871.2-45, EP 1068633 und US 6,616,987) und besteht in unserem Falle aus 101 identischen quadratischen Elektrodensegmenten (7 x 7 mm²), die von 4 größeren Elektrodensegmenten zur Anpassung von der inneren quadratischen Geometrie auf die äußere Kreisgeometrie umgeben sind. Der Abstand der Elektrodensegmente untereinander beträgt 0.4 mm. Das gesamte Feld der Elektrodensegmente wird von einem 19 mm breiten Kreisringsegment umfasst. Den äußeren Abschluss der adaptiven Elektrode bildet die geerdete Abschirmung. Alle 105 Segmente können unabhängig voneinander oder in Segmentgruppen mit bis zu ± 100 V DC-Spannung oder wahlweise AC-Spannung (Sinus, Rechteck, Dreieck) bei einer Maximalfrequenz von 50 Hz und beliebiger Phasenlage angesteuert werden. Bei drei ausgewählten Segmenten ist darüber hinaus die zusätzliche individuelle Einspeisung von Hochfrequenzleistung (13.56 MHz) bis zu 4 W vorgesehen.

Aufgrund der Variabilität in der Potentialbelegung gelingt es, ein maßgeschneidertes strukturiertes Gesamtfeld zu erzeugen. Dieses Gesamtfeld wiederum beeinflusst das Plasmapotential ortsselektiv und determiniert über zusätzliche Anziehungs- und Abstoßungskräfte die Bewegung und Positionierung von elektrisch negativ geladenen Mikroteilchen, die wegen des Kräftegleichgewichts in der Plasmarandschicht über der adaptiven Elektrode eingefangen sind. Die negative Ladung bewirkt, dass sich die Partikel horizontal immer zum Ort mit dem positivsten Potenzial bewegen. Folglich stellt die Anordnung der Partikel in der Randschicht über der adaptiven Elektrode ein Abbild der Potentialstrukturen auf der Oberfläche dar. Das in der Abbildung 2 gezeigte „Phi“ des Physik-Journals wurde auf diese Weise generiert.

Umgekehrt kann aus der Anordnung der Testteilchen vor strukturierten Oberflächen, Wänden bzw. Substraten auf die Potential- und Feldverteilungen geschlossen werden. Im Zusammenspiel mit entsprechenden Modellvorstellungen, wie sie am Institut für Physik der Greifswalder Universität entwickelt werden, können somit neue Informationen über die Plasmarandschicht gewonnen werden.

Zur Beschreibung der Musterbildung und Partikeldynamik wird in Zusammenarbeit mit Theoriegruppen der Universitäten Greifswald und Kiel zur Zeit ein modulares Programmpaket entwickelt, das Molekulardynamik und Monte-Carlo-Methoden kombinieren soll. Im einfachsten Fall lässt man das System, ausgehend von einer zufällig vorgegebenen Anfangskonfiguration von N Teilchen und den Newtonschen Bewegungsgleichungen

$$m_i \ddot{\vec{r}}_i = q_i \vec{E} + \frac{q_i}{c} \dot{\vec{r}}_i \times \vec{B} + m_i \vec{g}$$

(für $i=1 \dots N$, m_i , q_i : Masse bzw. Ladung des i -ten Teilchens, \vec{r}_i , $\dot{\vec{r}}_i$: Ort und Geschwindigkeit, \vec{g} : Schwerebeschleunigung, c : Lichtgeschwindigkeit) in eine Gleichgewichtskonfiguration relaxieren.

Das gesamte am Ort \vec{r}_i wirkende elektrische Feld \vec{E} setzt sich zusammen aus der (abgeschirmten) Coulomb-Wechselwirkung der Partikel untereinander, dem elektrischen Feld der Raumladungsschicht des umgebenden Argonplasmas und des Feldes aufgrund der Belegung der Adaptiven Elektrode. Da das Magnetfeldes \vec{B} im Gleichgewicht $\dot{\vec{r}}_i$ keine Rolle spielt, wird es

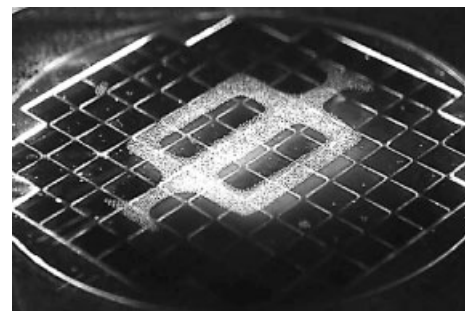


Abbildung 2: Ansammlung von Mikroteilchen (~10µm), die sich im Plasma aufladen und mittels der Adaptiven Elektrode im Kräftegleichgewicht auf charakteristische Weise angeordnet wurden.

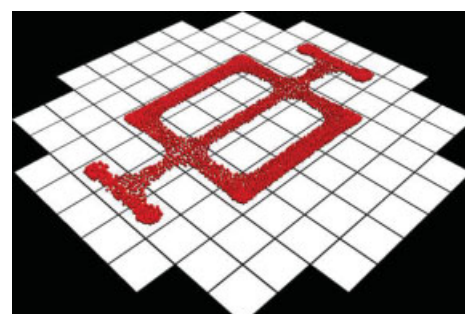


Abbildung 3: Simulation der Partikelanordnung (wie in Abbildung 2) auf der Grundlage der wirkenden Coulomb-Kräfte.

bei der Relaxation zunächst vernachlässigt und erst zur Berechnung der Dynamik berücksichtigt. Die Relaxation erfolgt durch Einführung eines stochastischen Reibungsterms, der die Streuung der Staubteilchen an Ionen und Neutralgasteilchen modelliert. Die Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer Molekulardynamik-Simulation mit 3000 Partikeln für die experimentell verwendete Potentialverteilung – trotz der vereinfachenden Modellannahmen wurde eine nahezu perfekte Übereinstimmung mit dem Experiment erzielt.

In der Zukunft sollen im Rahmen eines realistischeren Modells sowohl Aufladungs- und Polarisationsvorgänge der Testteilchen als auch die Ausbildung von Plasmarandschichten an deren Oberflächen berücksichtigt werden. Zur Charakterisierung dynamischer Eigenschaften bieten sich die gezielte Anregung einzelner Partikel mittels Wechselspannungen (kHz-Bereich) sowie die Anregung von Eigenmoden des Systems an. Dann können auch Wellenphänomene, die sich in der Teilchenwolke anregen lassen, und Wechselwirkungen mit Feldkonfigurationen zusätzlicher externer Quellen (z. B. Ionenstrahlen) eingehender studiert werden.

Literatur

- [1] New J. Phys. **5**(2003), „Focus on Complex (Dusty) Plasmas“, ed. by G.E. Morfill and H. Kersten.
- [2] V. E. Fortov, O. Petrov, G. E. Morfill, H. M. Thomas et.al., J. Exp. Theor. Phys. **96**(2003), 704.
- [3] O. Arp, D. Block, A. Piel, A. Melzer, Phys. Rev. Lett. **93**(2004), 165004.
- [4] B. M. Annaratone, M. Glier, T. Stuffer, M. Raif, H. M. Thomas, G. E. Morfill, New J. Phys. **5**(2003), 92.

Autoren

Dr. *Ralf Basner*, Dr. *Holger Kersten* und Dr. *Sylvio Kosse* arbeiten am Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik e.V. (INP) in Greifswald. R. Basner

beschäftigte sich lange mit der experimentellen Bestimmung von Ionisationsquerschnitten und ist derzeit Projektverantwortlicher für PULVA-INP. S. Kosse ist von Hause aus Theoretiker und befasst sich u. a. mit der Simulation und Modellierung von Coulomb-Systemen. Die wissenschaftlichen Interessen von H. Kersten liegen hauptsächlich auf dem Gebiet der Plasma-Oberflächen-Wechselwirkungen und der komplexen (partikelhaltigen) Plasmen. Er ist am INP für den Forschungsschwerpunkt „Mikro- und Nanodisperse Teilchen im Plasma“ verantwortlich.

Prof. *Holger Fehske* und DP *Gerald Schubert* arbeiten am Institut für Physik der Universität Greifswald. H. Fehske hat den Lehrstuhl für Theoretische Physik II (Komplexe Quanten-

systeme) inne, er beschäftigt sich vorwiegend mit der Modellierung und Simulation von komplexen Vielteilchenstemen. G. Schubert ist Doktorand in der Arbeitsgruppe von Prof. Fehske.

Kontakt:

Dr. Ralf Basner
Institut für Niedertemperatur Plasmaphysik e.V.
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße 19
17489 Greifswald
E-Mail: basner@inp-greifswald.de

PD Dr. Holger Kersten
Institut für Niedertemperatur Plasmaphysik e.V.
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße 19
17489 Greifswald
E-Mail: kersten@inp-greifswald.de