

Kolloidale Plasmen unter Schwerelosigkeit: Know-How-Transfer Kiel / Greifswald

FKz: 50WM1539 / Förderzeitraum: 1.5.2015-31.12.2016

- Schlussbericht -

15.5.2017

Prof. Dr. Alexander Piel

Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 50WM1539 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

An den Universitäten Kiel (Prof. Piel) und Greifswald (Prof. Melzer) wurden seit 2003 gemeinsame koordinierte Experimente an kolloidalen (staubigen) Plasmen unter Schwerelosigkeit durchgeführt. Die Verantwortung für den Betrieb der Versuchsanlage und die administrative Vorbereitung der Parabelkampagnen lag bisher bei der Universität Kiel. Ziel des Vorhabens war die Erhaltung und Transfer dieses spezifischen Know-hows an die Gruppe von Prof. Melzer um eine langfristige Perspektive dieser Forschung unter Schwerelosigkeit zu sichern. Hierzu wurden drei Ziele verfolgt:

- a) Übertragung der technischen und administrativen Expertise im Rahmen einer gemeinsamen Parabelkampagne
- b) Verschlinkung der bisherigen Versuchsanlage für einen Betrieb mit nur noch drei Operateuren
- c) Fortsetzung der aktuellen wissenschaftlichen Untersuchungen zu Strömungsvorgängen in Wellen und Wirbeln

2. Voraussetzungen

Die Arbeitsgruppe Plasmadynamik (Prof. Piel) verfügt über eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der kolloidalen (staubigen) Plasmen im Labor (Förderung durch DFG, zuletzt SFB TR-24 Projekte A2 und A3) und unter Schwerelosigkeit (gefördert durch DLR unter FKZ 50WM0039, 50WM0339, 50WM0739, 50WM1139 und 50WM1539). Im Rahmen der DLR-Förderung wurde eine hochkomplexe Versuchsanlage ständig weiterentwickelt, die mehrere simultane Experimente der beiden beteiligten Gruppen ermöglichte.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde im Rahmen einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung des Vorhabens 50WM1139 mit dem Umbau der Versuchsanlage begonnen, der durch die Indienststellung eines neuen Parabelflugzeuges erforderlich wurde. Durch diese Maßnahme wurde sichergestellt, dass die neue Versuchsanlage bereits für einen Parabelflug im Sommer 2015 bereitstehen würde. Durch eine Vielzahl von Vorgaben von NOVESPACE für das mechanische Layout der Experimente und durch die Notwendigkeit, das bisherige aus einer einzelnen, großen Einheit bestehende Experiment in drei kleinere Module aufzulösen, ergab sich ein sehr ambitionierter Zeitplan.

Die Förderung des Vorhabens 50WM1539 begann zum 1.5.2015. Durch intensive Zusammenarbeit beider Gruppen konnte die neue Flugeinheit und die zugehörige Dokumentation termingerecht fertiggestellt und die Flugeinheit per Spedition an NOVESPACE ausgeliefert werden.

Die 27. DLR Parabelkampagne fand vom 31.8. – 11.9.2015 in Bordeaux-Merignac statt. Die Integration der Flugeinheit in das Flugzeug erwies sich infolge der intensiven

Kommunikation mit NOVESPACE bereits während der Planungsphase als problemlos. Dank der langjährigen Erfahrung des Kieler Ingenieurs (M. Poser) und der beteiligten Wissenschaftler beider Institute waren die Abläufe während der Integrationswoche und der Flugwoche bestens eingespielt.

Auf Kieler Seite wurde die Datenauswertung im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Stefan Schütt durchgeführt, der auch aktiv an den Parabelflügen teilgenommen hatte. Herr Schütt wurde nach Abschluss der Masterarbeit vom 15.8. – 30.9. als Projektmitarbeiter beschäftigt und mit weiteren Datenanalysen betraut. Er hat anschließend als Doktorand in die Arbeitsgruppe von Prof. Melzer gewechselt.

Die Flugeinheit nebst Zubehörteilen und Kamerasystemen wurde für künftige Experimente unter Schwerelosigkeit als Leihgabe an die Universität Greifswald überstellt.

Das Projekt wurde zum 31.12.2016 beendet.

4. Ausgangssituation

Die Primärziele des Vorhabens waren die Neukonzeption einer kompakteren Flugeinheit und der Know-how Transfer an die Gruppe von Prof. Melzer. Die wissenschaftliche Ausgangssituation für durchgeführten Experimente waren die detaillierten Ergebnisse zu nichtlinearen Staubdichtewellen und niederfrequenten Staubwirbeln, die in der Dissertation von Tim Bockwoldt dokumentiert wurden. Hier stand nun die vertiefte Frage im Raum, ob es möglich ist, anhand der Partikelströmungen im Wellenfeld Aufschlüsse über die Potentialstruktur der Welle zu gewinnen. Hierzu wurden mit einem neuen Kamerasystem die Trajektorien einzelner Partikel im Wellenfeld verfolgt.

5. Zusammenarbeit

In diesem Vorhaben stand der enge administrative, technische und wissenschaftliche Austausch mit der Arbeitsgruppe von Prof. Melzer, Universität Greifswald im Vordergrund.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

1.1 Neuer Versuchsaufbau

Die bewilligten Mittel wurden für die Beschäftigung von Personal und Hilfskräften, sowie als Sachmittel für den Umbau des Experiments und die Durchführung der Parabelkampagne eingesetzt. Reisekosten sind entstanden für die Teilnahme an der Parabelkampagne, für die Überstellung der Flugeinheit nach Greifswald, sowie für eine nationale und eine internationale Tagung.

Die Konstruktion des Racks für Vakuumerzeugung / Gashandling (links) und des eigentlichen Experimenttracks (rechts) der neu konzipierte Flugeinheit ist in Abb. 1 dargestellt. Man beachte die Maßnahmen zur mechanischen Versteifung der Rahmenkonstruktion.



Abb. 1 Experimenteller Aufbau während der Aufbauphase

Die Messanordnung für die Beobachtung der Staubwellen in der Plasmakammer wird aus Abb. 2 ersichtlich. Es werden eine Hochgeschwindigkeitskamera (links) und eine Übersichtskamera (rechts) eingesetzt, die das gestreute Licht eines Laserfächers beobachten.

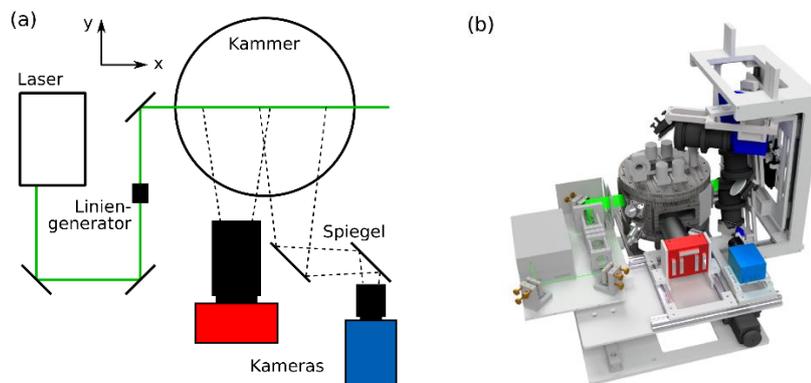


Abb. 2 (a) Plasmakammer, Laserfächer und Kamerasysteme für Staubwellenbeobachtung. (b) Kombination mit dem stereoskopischen Kamerasystems (rechte Hälfte)

Eine Ansicht des Versuchsaufbaus in der Testphase zeigt Abb.3. Lasersystem und zwei Kameras sind auf einem Verschiebetisch montiert, um die Beobachtungsebene in der Staubwolke frei wählen zu können. Das Stereoskopie-System ist noch nicht integriert.

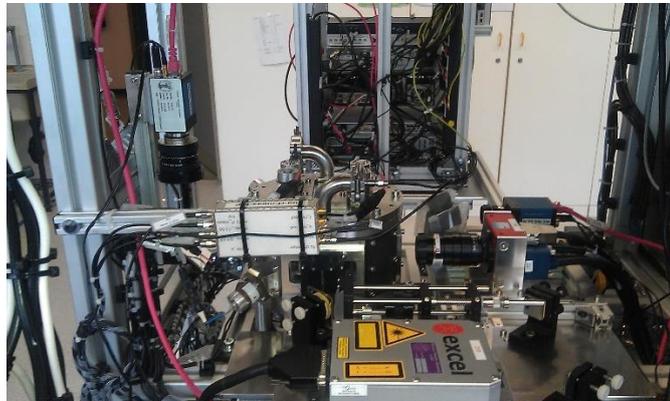


Abb. 3 Ansicht von Beleuchtungslaser und Kamerasystem für Staubbeobachtung

Der Aufbau des gesamten Experiments, bestehend aus drei Racks, im Parabelflugzeug ist in Abb. 4 dargestellt. Das Rack hinten links enthält die Experimentsteuerung sowie Vakuumerzeugung und Gashandling. An der Front findet sich der Hauptbildschirm für die Steuerung der Experimentabläufe. Rechts hinten befindet sich das Experimentrack mit Plasmakammer und Kamerasystemen. Das vordere Rack enthält die verschiedenen Rechnersysteme für die Hochgeschwindigkeitskameras und Stereoskopiekameras.



Abb. 4 Gesamtexperiment nach Integration in das Parabelflugzeug.

1.2 Ausgewählte Ergebnisse: Wellenexperimente

Das Phänomen selbsterregter Staubdichtewellen wird ersichtlich aus der Momentaufnahme der Übersichtskamera in Abb. 5(a). Der Bildausschnitt zeigt die rechte Hälfte der Plasmawolke. Im Zentrum der Staubwolke findet sich das bekannte „void“, ein staubfreier Bereich. Die vom Plasmazentrum ausgehende Ionenströmung regt die Staubdichtewelle an, die radial (und axial) auswärts propagiert. Die planen Elektroden der Hochfrequenzentladung sind oben und unten am Bildrand erkennbar. In den Raumladungsschichten vor den Elektroden befindet sich kein Staub.

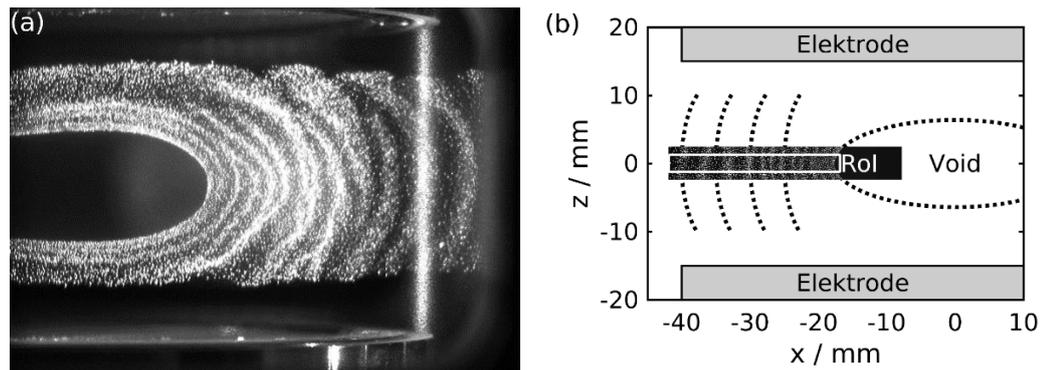


Abb. 5 (a) Snapshot der Staubdichtewelle (Übersichtskamera). (b) Auswahl einer „region of interest“ (RoI) im Blickfeld der Hochgeschwindigkeitskamera.

Zur Analyse der Dichtewellen wird eine region of interest im Gesichtsfeld der Hochgeschwindigkeitskamera ausgewählt (Abb. 5(b)), in der die Wellenfronten näherungsweise als ebene Wellen angesehen werden können. In diesem Ausschnitt ist sowohl die Verfolgung einzelner Partikeltrajektorien möglich als auch eine Mittelung über die Höhe des Bildausschnittes zur Bestimmung der lokalen Staubdichte.

Durch die Verfolgung der individuellen Partikeltrajektorien mit der Hochgeschwindigkeitskamera stehen uns gleichzeitig die Position und instantane Geschwindigkeit jedes einzelnen Teilchens zur Verfügung. Hieraus können wir Phasenraumportraits gewinnen, aus denen das Phänomen eingefangener Teilchen im Wellenfeld („trapping“) ersichtlich wird. Dieses sind Partikel, die sich mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle bewegen und dadurch effizient Energie mit der Welle austauschen können.

Wir verwenden dazu zwei verschiedene Darstellungsarten (Abb. 6), (a) die stroboskopische Darstellung des Wellenfeldes, bei der Bilder überlagert werden, die zu Zeitpunkten aufgenommen wurden, an denen ein Wellenberg den gleichen Ort erreicht hat. In dieser Darstellung werden mehrere Wellenlängen des Wellenfeldes dargestellt. In der Darstellung (b) werden die Daten aus drei benachbarten Wellenlängen zusammengeführt, indem die Relativposition jedes Partikels zum Wellenfeld ausgewertet wird. Gefangene Teilchen finden sich bei der Geschwindigkeit $-c_{DDW}$, da sich die Welle im Bildfeld der Hochgeschwindigkeitskamera nach links bewegt.

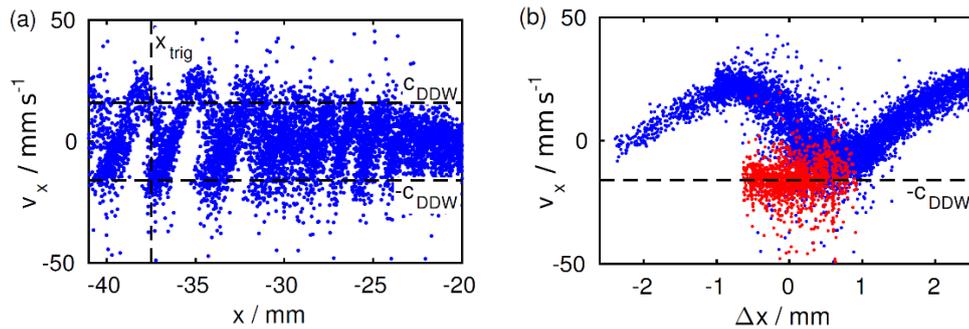
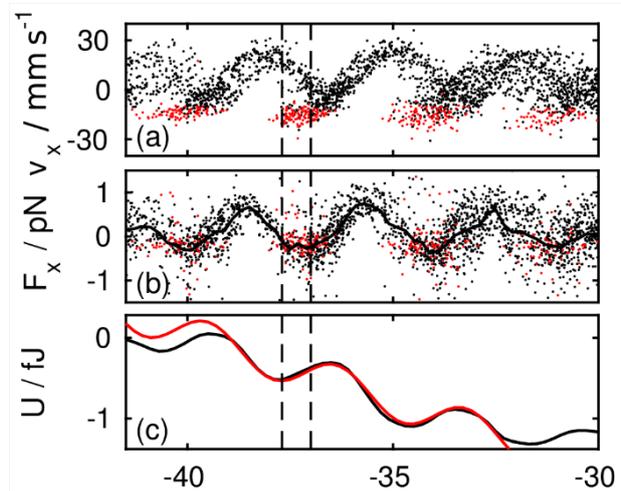


Abb. 6 (a) Stroboskopische Phasenraumdarstellung. (b) Kumulierter Phasenraum aus Relativpositionen. Gefangene Teilchen sind rot markiert.

Aus den Bahnkurven der einzelnen Teilchen lässt sich, nach Korrektur für Reibungskräfte, die Potentialverteilung im Wellenfeld ermitteln. Diese Analyse wird anhand der stroboskopischen Phasenraumdarstellung durchgeführt.

Abb. 7 Rekonstruktion der Potentialverteilung aus dem stroboskopischen Phasenraum. (a) Phasenraum, (b) lokale Kraft auf Partikel, (c) potentielle Energie im Wellenfeld.



Die sich ergebende Potentialstruktur ist von anderen Autoren [1] als „inclined washboard potential“ bezeichnet worden. Die mittlere Neigung dieses Potentials kann mit dem ambipolaren elektrischen Feld im Plasma identifiziert werden. Somit ergibt sich die Möglichkeit, diese wichtige Kenngröße auch in Gegenwart des Staubes zu bestimmen. In staubfreien Plasmen könnte man das ambipolare Feld mit Langmuirsonden ermitteln. Letztere würden jedoch infolge ihrer elektrischen Vorspannung den Staub verdrängen, so dass keine Messung in Gegenwart des Staubes mit Sonden erzielt werden kann. Diese Ergebnisse sind in einer Masterarbeit dokumentiert [2]. Eine Publikation zu diesem spezifischen Aspekt ist in Vorbereitung.

1.3 Ausgewählte Ergebnisse: Uphill Diffusion

Ein weiteres wichtiges Ergebnis dieser Parabelkampagne war die federführend von Greifswalder Seite verfolgte Fragestellung nach der Entmischung von Partikelwolken bei sehr kleinen Größenunterschieden. Diese Ergebnisse sind gemeinsam in dem führenden Journal „Physical Review Letters“ publiziert worden [3]. Für Details sei auf den Abschlussbericht der Greifswalder Kollegen verwiesen.

2. Zahlenmäßige Nachweise

Die zahlenmäßige Verwendung der Zuwendung ist dem Finanzbericht zu entnehmen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Experimente unter Schwerelosigkeit sind von zentraler Bedeutung für die Untersuchung von dreidimensional ausgedehnten kolloidalen (staubigen) Plasmen. Die von uns verfolgten Fragestellungen betreffen Prozesse auf kurzen Zeitskalen, die im Rahmen von Parabelflügen studiert werden können. Sie sind dadurch komplementär zu Experimenten auf der International Space Station (ISS), die langskalige Prozesse untersuchen können. Es ist gelungen, das Know-how der Kieler Gruppe für die Planung und Durchführung von Experimenten auf Parabelflügen im Detail an die Greifswalder Gruppe zu übertragen. Ferner ist die Kontinuität dieser Forschung gesichert worden, indem rechtzeitig zur Verfügbarkeit des neuen Parabelflugzeuges ein von Grund auf neu konzipiertes modulares Experiment aufgebaut und erfolgreich eingesetzt werden konnte.

4. Voraussichtlicher Nutzen

Die durchgeführten Untersuchungen dienen der Grundlagenforschung, so dass eine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung nicht absehbar ist. Die Untersuchungen dienen zur Ausbildung von Masterstudenten und Promovenden. Insbesondere die in der Projektorganisation erworbenen Managementfähigkeiten und die erfolgreiche Teamarbeit mit internationalen Partnern aus der Industrie (NOVSPACE) haben den Absolventen zusätzliche berufliche Skills vermittelt, die sie auf dem Arbeitsmarkt zu gefragten Fachleuten mit breitem physikalischen und organisatorischen Background gemacht haben.

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens durch Dritte

Das Gebiet der nichtlinearen Wellen in kolloidalen Plasmen hat zu einigen Hundert theoretischen Arbeiten geführt, die vielfältige Verästelungen der Fragestellungen aufgegriffen haben. Die experimentellen Untersuchungen auf diesem Gebiet sind dagegen vergleichsweise rar. Während der Projektlaufzeit wurden folgende Entwicklungen experimentell verfolgt:

- Die Untersuchung von Wellenvorgängen in kolloidalen Plasmen unter Schwerelosigkeit ist eines der wissenschaftlichen Ziele des PK-4 Experiments, das nunmehr auf der International Space Station installiert worden ist [4].

- Nichtlineare Effekte wurden an 2D-Staubsystemen in Bezug auf die Kopplung zwischen optischen und akustischen Phononen in Laborexperimenten zur mode coupling instability untersucht [5]. Diese Instabilität ist für das Schmelzen von Monolayer-Systemen verantwortlich. Der lokale Einsatz der Instabilität führt zur Ausbildung einer Schmelzfront.

- Die von uns studierten dust-acoustic waves sind aktuell auch Gegenstand von Untersuchungen in Verbindung mit elektrisch floatenden Hindernissen [6]. Die Kombination der elektrischen Feldstruktur um das Hindernis mit der Feldverteilung in dem verwen-

ten DC-Plasma kann die Wellenausbreitungsrichtung und die Verformung der Wellenfronten erklären. Diese Experimente erweitern frühere Beobachtungen in einer größeren Plasmaanlage [7].

- Eine andere Form nichtlinearer Prozesse bei dust-acoustic waves wurde bei fremderregten Wellen in einem Hochfrequenzplasma beobachtet. Eine Welle großer Amplitude bricht dabei in eine Kette aus dust-acoustic solitons auf [8].

6. Veröffentlichungen der Ergebnisse

- Referenz [3] wurde bei Physical Review Letters publiziert
- Die Veröffentlichung von Teilen der Masterarbeit [2] ist in Vorbereitung
- „*Electric Field Reconstruction and Particle Trapping in Nonlinear Dust-Density Waves*“, S. Schütt, M. Himpel, A. Piel, A. Melzer, Posterbeitrag P7-7, DPG Frühjahrstagung, Bremen (2017)

III. Literaturverzeichnis

- [1] M.-C. Chang, L.-W. Teng und L. I, *Micro-origin of no-trough trapping in self-excited nonlinear dust acoustic waves*, Physical Review E 85, 046410 (2012).
- [2] Stefan Schütt, *Experimentelle Untersuchungen zu nichtlinearen Effekten in Staubbichtwellen*, Masterarbeit, CAU Kiel, 2016.
- [3] C. Killer, T. Bockwoldt, S. Schütt, M. Himpel, A. Melzer, A. Piel, *Phase separation of binary particle systems with small size disparities using a dusty plasma*, Phys. Rev. Lett. 116, 115002 (2016)
- [4] M. Y. Pustynnik et al, *Plasmakristall-4: New complex (dusty) plasma laboratory on board the International Space Station*, Rev. Sci. Instrum. 87, 093505 (2016)
- [5] T. B. Röcker et al, *Nonlinear regime of the mode-coupling instability in 2d plasma crystals*, Europhys. Lett. 106, 45001 (2014)
- [6] M. Choudhari et al, *Propagation characteristics of dust-acoustic waves in presence of a floating cylindrical object in the dc discharge plasma*, Phys. Plasmas 23, 083705 (2016)
- [7] J. K. Meyer et al, *Interaction of a biased cylinder with a flowing dusty plasma*, J. Plasma Phys. 79, 677 (2013)
- [8] A. Boruah et al, *Observation of dust acoustic multi-solitons in a strongly coupled dusty plasma*, Phys. Plasmas 23, 093704 (2016)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) SCHLUSSBERICHT
3. Titel Kolloidale Plasmen unter Schwerelosigkeit – Know-how-Transfer Kiel / Greifswald	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Piel, Alexander	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Broschüre
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Experimentelle und Angewandte Physik Christian-Albrechts-Universität zu Kiel D-24098 Kiel	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 50WM1539
	11. Seitenzahl 9
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 8
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 7
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung In langjährigen gemeinsamen Parabelkampagnen wurde ein umfangreiches technisches und wissenschaftliches Know-how in Kiel und Greifswald aufgebaut. Durch dieses Projekt sollte die spezielle Kieler Expertise zu Planung, Bau, Vorbereitung und Durchführung von Experimenten auf Parabelflügen an die Greifswalder Gruppe zur Fortführung dieser Forschungsrichtung übertragen werden. Hierzu wurde im Rahmen der 27. DLR PFC (2015) Entwicklung, Bau und administrative Vorbereitung eines neuen Flugexperimentes gemeinsam vorangetrieben. Die besondere Herausforderung bestand in der Neukonzeption der Flughardware unter den geänderten Randbedingungen des neuen Zero-g Parabelflugzeuges, die eine Aufteilung der bisherigen Experimenteinheit in drei modulare Racks erforderten. Durch weitergehende Automatisierung konnte gleichzeitig die angestrebte Reduktion des Bedienpersonals von vormals fünf auf drei Personen erreicht werden. Der sehr ambitionierte Zeitplan wurde mit termingerechter Ablieferung des neuen Experiments korrekt eingehalten. Das neue Experiment hat alle Messaufgaben der koordinierten Kieler und Greifswalder Experimente wie erwartet erfüllt. Über die primäre Zielsetzung des Know-how Transfers hinaus konnten die bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen zu nicht-linearen Wellenphänomenen erfolgreich fortgesetzt und ein neuer Zugang zu elektrischen Feldern in kolloidalen Plasmen eröffnet werden.	
19. Schlagwörter Komplexes Plasma, Microgravity, Staubbichtewelle	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) FINAL REPORT
3. title Colloidal Plasmas Under Microgravity – Know-how Transfer Kiel / Greifswald	
4. author(s) (family name, first name(s)) Piel, Alexander	5. end of project Dec 31, 2016
	6. publication date planned
	7. form of publication brochure
8. performing organization(s) (name, address) Institute for Experimental and Applied Physics Kiel University D-24098 Kiel, Germany	9. originator's report no.
	10. reference no.
	11. no. of pages 9
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 8
	14. no. of tables
	15. no. of figures 7
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>In a long-term series of joint parabolic flight campaigns, a comprehensive technical and scientific expertise has been accumulated in Kiel and Greifswald. The present project aimed at securing the specific know-how of the Kiel group in planning, preparation and performing experiments on parabolic flights and transferring it to the Greifswald group for continuing this direction of research. Within the 27th DLR PFC in 2015, the development, construction and administrative preparation of a new flight experiment was pursued in a joint effort. The particular challenge lay in the new concept for the flight hardware under the constraints of the new Zero-g aircraft, which forced splitting the experiment into three modular racks. By increasing the degree of automation, the operating crew could be reduced from five to three persons. The very ambitious schedule could be met with on-time delivery of the new flight hardware. The new experimental setup has successfully fulfilled all expectations of the coordinated experiments. Beyond the primary goals of a know-how transfer, previous scientific investigations on non-linear wave phenomena could be successfully continued, which opened a new access to measuring electric fields in colloidal plasmas.</p>	
19. keywords Complex plasma, microgravity, dust density wave	
20. publisher	21. price