

Nichtlineare Wellen in staubigen Plasmen unter Schwerelosigkeit

FKZ: 50 WM 1139

- Schlussbericht -

22.10.2015

A. Piel, T. Bockwoldt

Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
D-24098 Kiel

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 50WM1139 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellungen	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen	4
3. Planungen und Ablauf des Vorhabens	4
4. Ausgangssituation	5
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II Eingehende Darstellungen	7
1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	7
2. Zahlenmäßige Nachweise	13
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	13
4. Voraussichtlicher Nutzen	13
5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens durch Dritte	14
6. Veröffentlichungen der Ergebnisse	15
III Literaturverzeichnis	15

I Kurze Darstellungen

1. Aufgabenstellung

Das Ziel des Vorhabens war, ein vertieftes Verständnis von dynamischen nichtlinearen Prozessen in fluiden Zuständen komplexer Plasmen zu erhalten. Dazu wurden Experimente unter Schwerelosigkeit durchgeführt, bei denen Staubdichtewellen und deren Interaktion mit dem Plasma mit verschiedenen Hochgeschwindigkeitskameras untersucht wurden.

Komplexe – oder *staubige* – Plasmen enthalten im Gegensatz zu klassischen Plasmen neben Elektronen und Ionen makroskopische Partikel. Diese laden sich negativ auf, wechselwirken über abgeschirmte Coulombkräfte miteinander und sind meist stark gekoppelt. Durch eine gerichtete Ionenströmung entstehen bei richtiger Wahl der Parameter selbst-erregte Staubdichtewellen („dust-density waves“, DDWs). Diese wurden erstmals in einem anodischen Plasma von Thompson [1] beobachtet und als staub-akustische Welle (DAW) [2] identifiziert. Seit ihrer experimentellen Entdeckung wurden die DDWs weltweit in verschiedenen Entladungstypen beobachtet und untersucht [3]-[8].

Die Untersuchungen des Vorhabens lassen sich in drei Gruppen gliedern:

I. Untersuchung von Synchronisationsphänomenen in Staubdichtewellen

Diese Untersuchungen sollten der Vertiefung des Verständnisses der vom Antragsteller gefundenen Bildung von Frequenzdomänen dienen. Insbesondere war aufgrund der bis dato kleinen Datenbasis der Einfluss der Entladungsparameter (z.B. Gasdruck, Plasmadichte, Partikelgröße und -dichte) unbekannt. Des Weiteren sollte die Rolle der beobachteten Phasendefekte ergründet und das Verhältnis der aufgestellten Modelle zu dem vorliegenden Phänomen untersucht werden.

II. Untersuchung der Interaktion von Plasma und Staubdichtewelle

In Experimenten zur Interaktion zwischen Plasma und Welle sollte der in vorherigen Messungen der Antragsteller nachgewiesene prinzipielle Einfluss der DDW auf die Entladung verfeinert werden. Dabei lag das Interesse vor allem auf der zeitlichen Auflösung der Modulation des Plasmas während einer Wellenperiode und auf dem Einfluss der Wellen auf die Strom-Spannungscharakteristik.

III. Untersuchung der Einzelpartikeldynamik in Staubdichtewellen

Die geplanten Experimente mit hoher Orts- und Zeitauflösung sollten Erkenntnisse über den Antriebsmechanismus der Wellen und die Kräfte im Wellenfeld lie-

fern. Unter anderem wurde ein Auftreten kinetischer Effekte in Form von mehrdeutigen Geschwindigkeitswerten erwartet, die das System als (lokal) schwach gekoppelt, d.h. gasartig, identifizieren würden.

2. Voraussetzungen

Die Kieler Arbeitsgruppe „Plasmadynamik“ (Prof. Piel) verfügt über eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der komplexen Plasmen im Labor (Förderung durch DFG) und unter Schwerelosigkeit (durch die DLR-Vorläufervorhaben 50WM0039, 50WM0339 und 50WM0739). Insbesondere konnte für die im Berichtszeitraum durchgeführten Untersuchungen die bestehende Experimenthardware weiterentwickelt werden.

3. Planungen und Ablauf des Vorhabens

Der Projektverlauf ist in folgender Tabelle dargestellt:

Termin	Vorgang
01.01.2011	Projektbeginn
01.2011-08.2011	Technische Änderungen am bestehenden Aufbau; Vorbereitungen zur Teilnahme an der 18. DLR PFC
09.2011	Teilnahme an der 18. DLR PFC <ul style="list-style-type: none"> - Experimente zur Wechselwirkung DDW-Plasma - Experimente zur Kettenbildung - Experimente zur Wechselwirkung zwischen Partikeln und der Staubwolke - Parametervariationen und Biasmodulation
10.2011-06.2012	Datenanalyse
03.2012-08.2012	Präsentation von Ergebnissen auf nationalen und internationalen Tagungen sowie Veröffentlichung in Journalen
07.2012-08.2012	Vorbereitungen zur Teilnahme an der 20. DLR PFC
09.2012	Teilnahme an der 20. DLR PFC <ul style="list-style-type: none"> - Experimente zum Einfluss von Druck und Leistung auf die Wechselwirkung zwischen DDWs und dem Plasmaglow - Sondenmessungen zur Wechselwirkung DDW-Plasma - Erprobung der Schließung des Voids durch

	Biasmodulation - Einsatz von Fluoreszenzpartikeln für die Stereoskopiediagnostik
10.2012-01.2013	Nachbereitung und Datenanalyse
02.2013	Präsentation von Ergebnissen auf nationaler Tagung
02.2013-03.2013	Vorbereitung zur Teilnahme an der 22. DLR PFC
04.2013	Teilnahme an der 22.DLR PFC - Experimente zum Einfluss der Staubdichte auf die Bildung von kommensurablen Frequenzclustern - Beobachtung von Modulationen des Plasmaleuchtens in verschiedenen Spektralbereichen - Manipulation der Wellen mittels Biasmodulation - Sondenmessung in Anwesenheit von Staubdichtewellen und Plasmamodulationen
05.2013-11.2014	Datenanalyse, Präsentation von Ergebnissen auf nationalen und internationalen Tagungen, Erstellung von Publikationen
ab 12.2014	Konzeption und technische Vorbereitung eines neuen Experimentaufbaus für das DLR-Anschlussprojekt 50WM1539

4. Ausgangssituation

Im Vorläufervorhaben 50WM0739 war bei der Analyse der raumzeitlichen Frequenzverteilung beobachtet worden, dass die Frequenz nicht wie im Huygenschen Bild in Ausbreitungsrichtung konstant bleibt, sondern sich sprunghaft ändert. Dabei traten Frequenzdomänen auf – Gebiete einer Frequenz, die sich zu benachbarten Gebieten durch einen Frequenzsprung abgrenzen (s. Abb. 1). Interessanterweise ließen sich die Frequenzen der Domänen nicht durch kleinzahlige Verhältnisse beschreiben, sie wurden daher als *inkommensurabel* angesehen. In numerischen Rechnungen zeigte eine Kette von gekoppelten van-der-Pol Oszillatoren vergleichbare Phänomene und wurde von den Antragstellern als Modell vorgeschlagen.

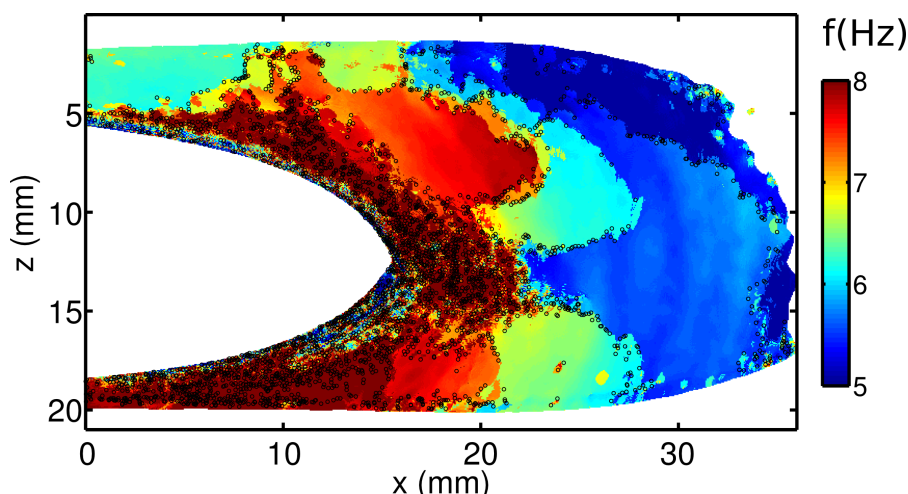


Abbildung 1: Räumliche Frequenzverteilung in einem Wellenfeld. Das Wellenfeld bricht in Bereiche (Domänen) mit unterschiedlicher, aber annähernd konstanter Frequenz auf. Die Phasendefekte (schwarze Kreise) treten ausschließlich an den Grenzen der Frequenzdomänen auf.

Für allgemeinere Aussagen und ein tieferes Verständnis des Auftretens der inkommensurablen Frequenzdomänen fehlte die Datenbasis, sodass die Beobachtung von Staubdichtewellen bei einer weiten Parametervariation einen Schwerpunkt im Berichtszeitraum bildete.

Die Aufnahme der Einzelpartikeldynamik in Staubdichtewellen war zu Beginn des Berichtszeitraums wenig erforscht. Erst die Einführung empfindlicherer Hochgeschwindigkeitskameras machte die Dynamik überhaupt zugänglich.

Ebenfalls im Vorläuferprojekt 50WM0739 konnte bei gleichzeitiger Beobachtung der Staubdichte und des Plasmaleuchtens der erhebliche (zeitlich gemittelte) Einfluss des Staubs auf die Entladung dokumentiert werden. Die Beobachtung einer Fluktuation des Plasmaleuchtens in Anwesenheit von Staubdichtewellen brachte die Diagnostik des Vorläuferprojekts aufgrund der geringen Signalintensität an ihre Grenzen. Trotzdem konnte eine wellenartige Oszillation des Plasmaleuchtens mit der Frequenz der DDWs beobachtet werden. Die Verwendung eines lichtstärkeren Objektivs und anderer optischer Filter zur Verbesserung der Empfindlichkeit sollte im Berichtszeitraum detailliertere Untersuchungen der Fluktuationen des Plasmaleuchtens ermöglichen.

Der im Vorläuferprojekt erstellte experimentelle Grundaufbau konnte mit den notwendigen Anpassungen der Diagnostiken weiter verwendet werden.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Ein wesentliches Element des Vorhabens war die Fortführung der Kooperation mit Prof. Melzer (Universität Greifswald), der im Rahmen des Projekts 50WM1138 den vom Kieler Team betriebenen experimentellen Aufbau mit einer eigenen, stereoskopischen Kameradiagnostik ergänzte. Mithilfe dieser Diagnostik sollte die dreidimensionale Verfolgung von Partikeln in Wellen untersucht werden. Dabei wurde erstmals der Einsatz von fluoreszierenden Partikeln zur Reduktion der sichtbaren Partikelzahl in ausgedehnten Staubwolken unter Schwerelosigkeit erfolgreich getestet [9].

Ebenso wurde die Zusammenarbeit mit Prof. Goree (University of Iowa) fortgeführt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Modellierung der Expansion von Staubwolken [10].

II Eingehende Darstellungen

1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Die Zuwendungen wurden vor allem für die Beschäftigung von zunächst zwei und später einem Postdoc sowie von einem Doktoranden eingesetzt. Des Weiteren wurden die Reisekosten für die drei, jeweils zweiwöchigen Kampagnen in Bordeaux und für nationale und internationale Tagungen aus den Zuwendungen finanziert. Die übrigen Mittel flossen in den Unterhalt und die Weiterentwicklungen des experimentellen Aufbaus. Details sind dem Finanzbericht zu entnehmen.



Abbildung 2: Experimenteller Aufbau in Flugkonfiguration.

Abbildung 2 zeigt den experimentellen Aufbau, eingebaut ins Flugzeug. Im großen Haupttrack (im Bild hinten) befinden sich die Steuercomputer, die Vakuum- und Gasinfrastruktur, der Hochfrequenzgenerator sowie diverse Peripheriegeräte. Im rechten Drittel des Haupttracks befindet sich das eigentliche Experiment, welches zur Abschirmung der Laserstrahlung von einem lichtdichten Containment umgeben ist. Die Hauptdiagnostiken bilden insgesamt sechs Kameras (3x Stereoskopie, 2x Staub-Plasma-Diagnostik, 1x

Hochgeschwindigkeitskamera), die über die im kleineren Rack verbauten Rechner gesteuert werden. Das Experiment wird von fünf Personen bedient, von denen zwei die Experimentparameter auf je einem Monitor überwachen und kontrollieren. Eine weitere Person ist für die Hochgeschwindigkeitsdiagnostik zuständig, eine Person für die Stereoskopie und die fünfte für die Koordination und Protokollierung der Messabläufe.

I Untersuchung von Synchronisationsphänomenen in Staubdichtewellen

Bei den Untersuchungen der Synchronisation und Bildung von Frequenzdomänen in den Wellenfeldern der Staubdichtewellen, konnten durch Variation der Parameter neben Frequenzdomänen mit inkommensurablen Frequenzverhältnissen nunmehr auch Staubwolken mit kommensurablen Frequenzen beobachtet werden, die auf sub- oder superharmonische Synchronisation deuten. Ein Beispiel für ein solches Wellenfeld ist in Abb. 3 dargestellt. Über weite Bereiche setzt sich die Frequenz f_0 durch, während nahe des Voids eine Domäne der Harmonischen $2f_0$ und am Rand eine Domäne der Subharmonischen $f_0/2$ beobachtet wird.

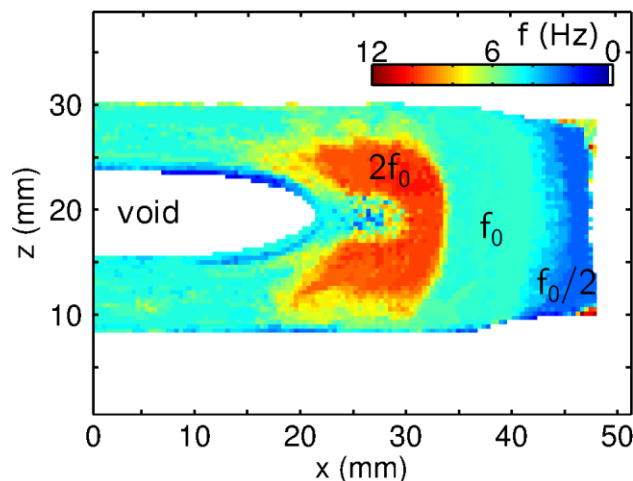


Abbildung 3: Frequenzen in einem Wellenfeld von Staubdichtewellen. Neben der ausgeprägten Frequenz f_0 werden auch die Harmonische $2f_0$ und die Subharmonische $f_0/2$ beobachtet.

Eine Vielzahl der bei verschiedenen Parametern beobachteten Wellenfelder wurden den Kategorien „kommensurabel“, „inkommensurabel“ und „Mischtyp“ zugeordnet, um Hinweise auf die Bedingungen zur Bildung (in)kommensurabler Frequenzdomänen zu erhalten. Wie die Gruppierungen in Abb. 4(a) zeigen, bilden sich kommensurable Domänen bevorzugt bei einer größeren Staubmenge und einem geringen Gasdruck. Beides sind Bedingungen für eine geringe Dämpfung der Wellen.

Des Weiteren wurde in Anwesenheit von Staubdichtewellen eine Oszillation der Voidgröße gemessen. Beim Vergleich der Frequenzen der Wellen mit jener der Voidoszillation, wie in Abb. 4(b), zeigt sich, dass diese im Falle der kommensurablen Frequenzdomänen vergleichbar sind. Da in diesen Fällen auch eine Oszillation der Intensität des Plasma-

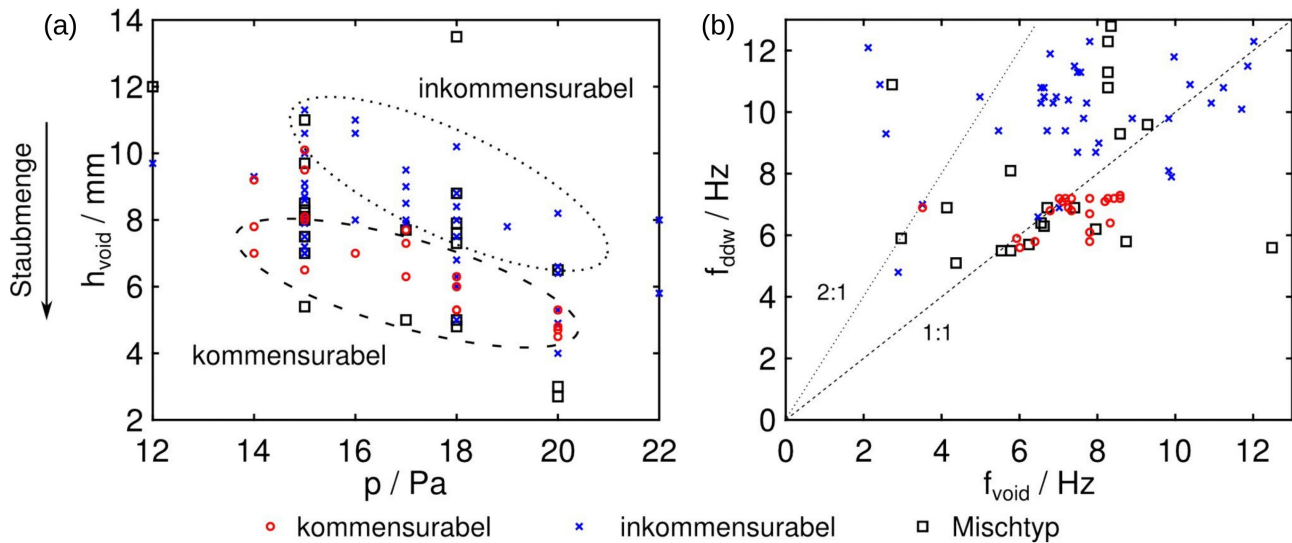


Abbildung 4: (a) Auftreten von kommensurablen bzw. inkommensurablen Frequenzdomänen in Abhängigkeit von der Staubmenge und dem Gasdruck. Kommensurable Frequenzverhältnisse treten bevorzugt bei niedrigem Gasdruck und großer Staubmenge auf – also bei einer geringen Dämpfung der Wellen. (b) Abhängigkeit der Frequenz der Wellen zur Frequenz einer Oszillation des Voids. Im Falle kommensurabler Frequenzdomänen (rote Kreise) haben Welle und Voidschwingung in etwa die gleiche Frequenz.

leuchtens auf der gleichen Frequenz auftritt, muss von einer Wechselwirkung zwischen Entladung und Wellen ausgegangen werden, die die Bildung von kommensurablen Domänen begünstigt.

Die Modellierung der Staubdichtewellen durch eine Kette von gekoppelten van-der-Pol Oszillatoren konnte verfeinert werden und den van-der-Pol Oszillator als Modell etablieren. Zur Berücksichtigung einer Wechselwirkung der Entladung mit den Staubdichtewellen wurde die Modulation der Entladung sowohl durch eine global ansetzende Kraft als auch durch eine parametrische Erregung in dem Modell ergänzt. Numerische Rechnungen zeigten, dass prinzipiell beide Ansätze in der Lage sind, Domänen inkommensurabler Frequenzen auf kommensurable Frequenzverhältnisse zu zwingen [11].

Die Untersuchungen von Synchronisationsphänomenen in Staubdichtewellen im Berichtszeitraum konnten somit wie geplant das Verständnis der Bildung der Frequenzdomänen vertiefen. Durch die Entdeckung der kommensurablen Frequenzdomänen in Wellenfeldern der Staubdichtewellen wurde das Bild der Domänen wesentlich erweitert. Die ursprünglich geplante Untersuchung der Rolle der Phasendefekte musste zugunsten der neu gefundenen Domänen zurückgestellt werden.

II Untersuchung der Interaktion von Plasma und Staubdichtewelle

Die Analyse des Plasmaleuchtens in Anwesenheit von Staubdichtewellen zeigte, wie bereits erwähnt, dass sich im Plasma eine globale Oszillation ausbildet, die meist auf der Frequenz einer gefundenen Oszillation der Voidgröße liegt. Durch die verbesserte Dia-

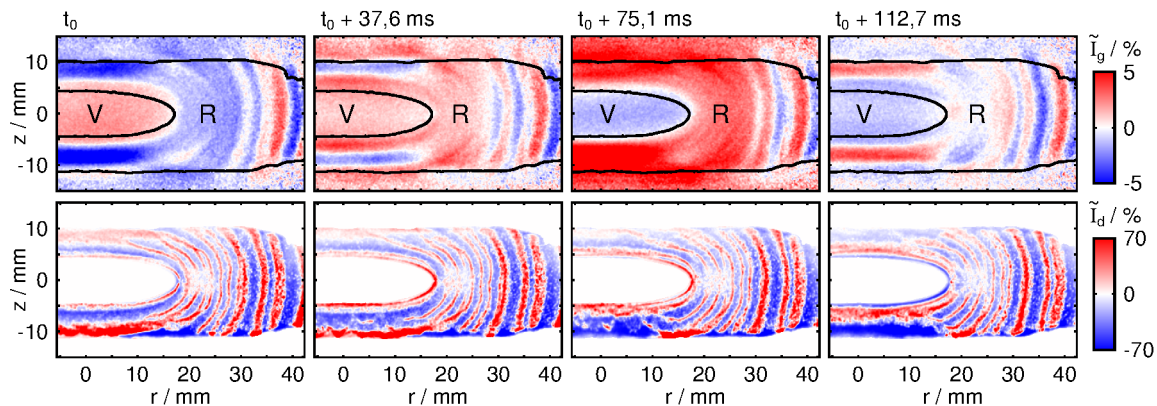


Abbildung 5: Momentaufnahmen der Fluktuationen des Plasmaleuchtens (obere Reihe) und der Staubdichte (untere Reihe) für vier Zeitpunkte einer Periode (etwa 0,2s) der Oszillation des Plasmaleuchtens. Die Kontur der Staubwolke ist den Fluktuationen des Plasmaleuchtens überlagert.

gnostik des Plasmaleuchtens konnte dessen Oszillation zeitlich und räumlich ausreichend hoch aufgelöst werden, um verschiedene Bereiche und Moden zu identifizieren. Abbildung 5 zeigt Aufnahmen von etwa einer Periode dieser Oszillation. In der oberen Reihe sind die momentanen Änderungen des Plasmaleuchtens gegenüber dem zeitlichen Mittelwert dargestellt, in der unteren Reihe analog dazu die Änderungen der Staubdichte zu denselben Zeitpunkten. Rote Bereiche entsprechen erhöhte Intensität bzw. Staubdichte, blaue verringerte Intensität bzw. Staubdichte. Während in der gesamten Staubwolke Staubdichtewellen als rote und blaue Streifen zu erkennen sind, oszilliert das Plasmaleuchten im Void (V) und radial außerhalb des Voids (R) jeweils als ganzes, bildet also keine Wellen. Neben dieser einfachen Mode wurden auch komplexere Oszillationen beobachtet, die den Zusammenhang zwischen Vidoszillation und Oszillation des Plasmaleuchtens verdeutlichten.

Am Rand der Staubwolke ($r > 30 \text{ mm}$), bei großen Wellenlängen und hohen Modulationsgraden der Staubdichte, wird auch eine wellenartige Modulation des Plasmaleuchtens beobachtet. Diese bildet die lokale Struktur der Staubdichte ab, die erst im genannten Bereich ausreichend stark moduliert ist, um das Plasmaleuchten sichtbar zu beeinflussen. Es findet also eine erkennbare Rückwirkung des Wellenvorgangs auf die lokalen Entladungsvorgänge statt.

Somit konnte, wie geplant, das Bild der Interaktion zwischen Staubdichtewelle und Plasma weiter verfeinert werden und insbesondere die zeitliche Modulation des Plasmaleuchtens aufgelöst werden. Dabei wurde sowohl eine starke globale Komponente als auch eine lokale Wechselwirkung zwischen Staub und Plasma offenbar. Während bei der lokalen Wechselwirkung angenommen werden kann, dass die Staubdichte das Plasmaleuchten moduliert, bleibt bei der globalen Wechselwirkung die Frage zu klären, ob einer der Prozesse dominiert und somit als Ursache für den anderen dient, oder ob es sich um eine gegenseitige Beeinflussung handelt.

III Untersuchung der Einzelpartikeldynamik

In Kooperation mit der Gruppe von Prof. Melzer (Universität Greifswald) wurde die dreidimensionale Bewegung von Partikeln in Staubdichtewellen analysiert. Die Ergebnisse sind in einer gemeinsamen Publikation veröffentlicht Fehler: Referenz nicht gefunden und im Abschlussbericht des Vorhabens von Prof. Melzer kommentiert.

Die Untersuchung der Einzelpartikeldynamik mittels Hochgeschwindigkeitsdiagnostik in 2D wurde den anderen 2D-Untersuchungen hintangestellt und soll im Anschlussvorhaben weiter verfolgt werden. Jedoch konnte in begleitenden Laboruntersuchungen das gleichzeitige Auftreten von Vor- und Rückströmungen im Wellenfeld beobachtet und ein Modellansatz für diese kinetischen Effekte gefunden werden [12].

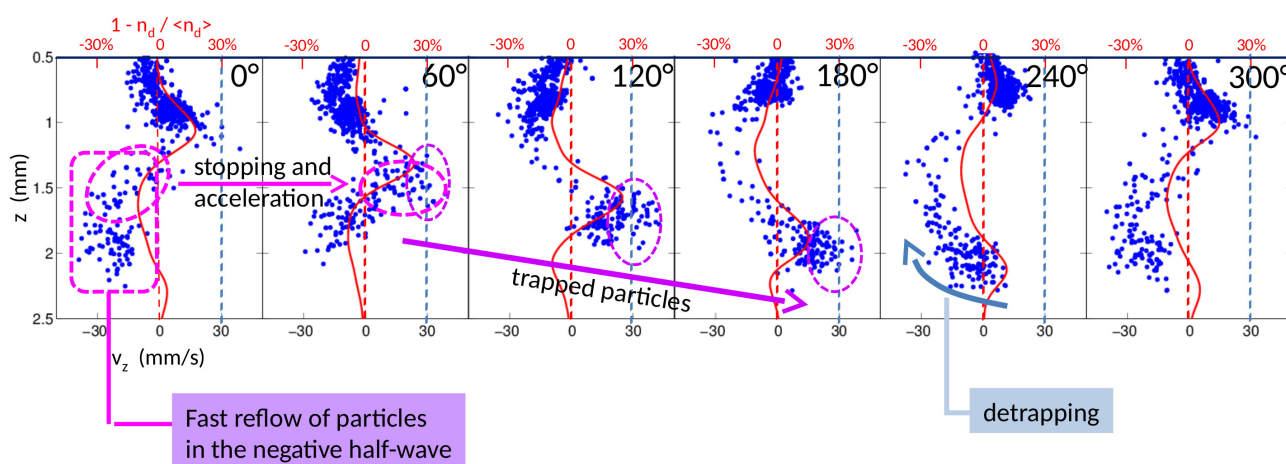


Abbildung 6: Phasenraumdiagramme von Partikeln einer in z -Richtung propagierenden Staubdichtewelle während einer Periode. Die bei 0° und 60° zurückströmenden Partikel werden vom nachfolgenden Wellenberg gestoppt und beschleunigt, dass sie zum Teil als trapped particles dem nachfolgenden Wellenberg vorweg laufen ($60^\circ - 180^\circ$).

Abbildung 6 zeigt den z - v_z -Phasenraum einer Staubdichtewelle, die in z -Richtung propagiert zu sechs verschiedenen Zeitpunkten einer Periode. Jeder Punkt entspricht einem einzelnen Staubpartikel. Deutlich zu erkennen sind die kinetischen Effekte vor allem in den Bergen der Staubdichtewelle (Partikelgruppen mit $v_z > 0$), wo mehrdeutige Geschwindigkeitswerte auftreten. Dort konnten Partikelpopulationen identifiziert werden, die beim Rückströmen im Wellental vom nachfolgenden Berg gestoppt und anschließend derart beschleunigt werden, dass sie als sogenannte trapped particles dem Wellenberg vorweg laufen (Abb. 6 60° - 180°). Nur durch Stöße mit anderen Partikeln oder am Rand der Staubwolke gelangen die trapped particles wieder in ein Wellental und strömen zurück (Phasenraum bei 240°).

Die begleitenden Laboruntersuchungen haben das Verständnis der Staubdichtewellen, insbesondere bei hohen Amplituden, bereits erheblich vertieft und sind wertvoll für die Planung zukünftiger Untersuchungen im Anschlussvorhaben.

IV Untersuchung des Antriebsmechanismus großskaliger Wirbel

Ergänzend zu den ursprünglichen Zielen konnten in den gewonnenen Messdaten großskalige Wirbel in der Staubwolke beobachtet werden. Diese *Vortices* sind in der Literatur bereits bekannte, für ihren Antrieb gab es aber zwei Erklärungsansätze, die kontrovers diskutiert wurden. Einerseits wurde die Ionenwindkraft, andererseits ein Ladungsgradient in der Staubwolke für die Wirbel verantwortlich gemacht. Durch verfeinerte Modellierungen konnte im Berichtszeitraum gezeigt werden, dass die Kombination beider Ansätze die Topologie der Strömungen bestimmt.

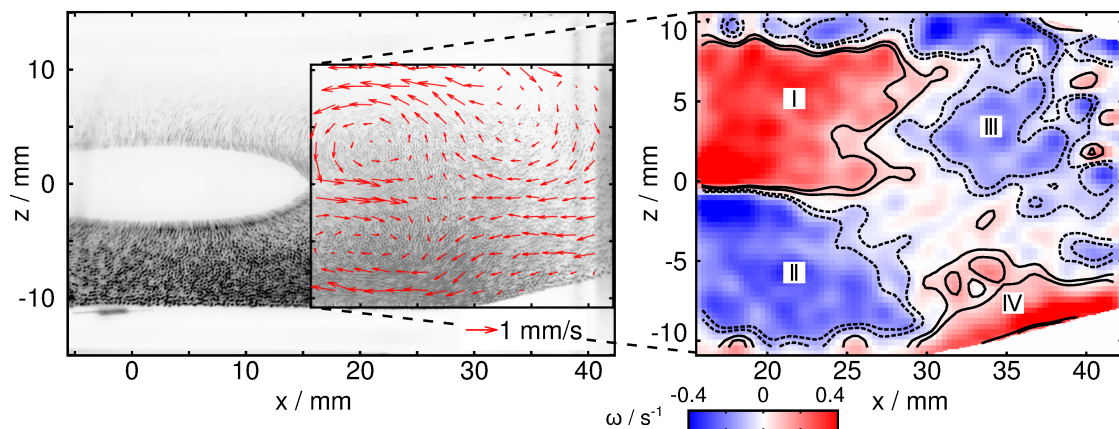


Abbildung 7: Aufnahme einer Staubwolke mit überlagertem Geschwindigkeitsfeld und die daraus berechnete Vortizität dieses Feldes. In der Vortizität wird die quadrupolartige Struktur der Wirbel deutlich.

In Abb. 7 ist eine Staubwolke mit auftretenden Wirbeln dargestellt. Im überlagerten Rahmen zeigt das Geschwindigkeitsfeld bereits deutlich die Wirbelströmung in der Partikelwolke. Wird – durch Bildung der Rotation des Geschwindigkeitsfeldes – die Vortizität berechnet (rechtes Bild in Abb. 7), wird die Topologie deutlicher: Rote Bereiche entsprechen einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn, blaue im Uhrzeigersinn. Die Modellierungen zeigten, dass diese quadrupolartige Topologie gerade dann entsteht, wenn beide Antriebsmechanismen berücksichtigt werden.

Des Weiteren konnte durch die Einführung einer vereinheitlichten Beschreibung mittels Vortextransportgleichung verdeutlicht werden, dass nicht allein ein Gradient der Ladung oder der Ionenwindkraft für den Antrieb verantwortlich ist, sondern dass die Gradienten zum elektrischen Feld verschert sein müssen. Ein weitgehendes Verständnis des prinzipiellen Vortexantriebs ist nunmehr erreicht, eine Weiterentwicklungen der Vorstellungen und Entladungsmodellierungen ist jedoch erforderlich.

V Numerische Simulationen der Expansion eines Yukawa-Balls

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit Prof. Goree von der University of Iowa wurde die Expansion eines Yukawa-Balls numerisch simuliert. Fehler: Referenz nicht gefunden. Ein Yukawa-Ball ist eine Kugel aus geladenen Partikeln, welche aufgrund des abschirmenden

Hintergrundplasmas über ein Yukawa-Potential (abgeschirmtes Coulomb-Potential) wechselwirkt. Im Gegensatz zur Expansion einer Kugel aus geladenen Partikeln ohne abschirmenden Hintergrund ist die effektive Wechselwirkung auf einige nächste Nachbarn beschränkt, sodass Informationen über Dichteänderungen mit endlicher Geschwindigkeit durch die Partikelwolke transportiert werden. Wird das Confinement des Yukawa-Balls „abgeschaltet“, führt dies zu einer nicht selbst-ähnlichen Expansion der Partikelwolke. Es konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass sich mit einer charakteristischen Verzögerung Schichten vom Ball ablösen. Die äußerste Schicht erhält bereits einen nennenswerten Anteil der gesamten kinetischen Energie und deren Partikel werden bis auf Schallgeschwindigkeit beschleunigt.

Während die Simulationen sowohl ein weiteres Verständnis der im Vorläuferprojekt untersuchten staubfreien Bereiche hinter Projektilen (*Cavities*) ermöglichten, können sie möglicherweise auch Einblicke in die Mechanismen der Staubdichtewellen geben. In diesen entsprechen die Wellenberge einer Anhäufung von geladenen Partikeln, die sich mit Schallgeschwindigkeit bewegt und naturgemäß einer ständigen Yukawa-Expansion unterliegen muss. Zukünftige Untersuchungen der Einzelpartikeldynamik in den Wellenbergen könnten unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den durchgeführten Simulationen das Verständnis der Staubdichtewellen weiter vertiefen.

2. *Zahlenmäßige Nachweise*

Die zahlenmäßige Verwendung der Zuwendungen ist dem Finanzbericht zu entnehmen.

3. *Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit*

Experimente unter Schwerelosigkeit sind von zentraler Bedeutung für die Untersuchung dreidimensional ausgedehnter komplexer Plasmen. Die uns interessierenden Fragestellungen betreffen Prozesse auf kurzen Zeitskalen, die im Rahmen von Parabelflügen studiert werden können. Sie sind dadurch komplementär zu Experimenten auf der ISS, die langskalige Prozesse untersuchen können.

4. *Voraussichtlicher Nutzen*

Die durchgeführten Experimente dienen der Grundlagenforschung, sodass eine wirtschaftliche Verwendung der Ergebnisse nicht unmittelbar absehbar ist.

Die Untersuchungen führten zum einen jedoch zu Publikationen in Fachzeitschriften und zum anderen dienten sie der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Neben zwei Bachelorarbeiten zu angrenzende Fragestellungen der im Berichtszeitraum untersuchten Phänomene führten die Untersuchungen auch zu einer Promotion.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens durch Dritte

Aus der Vielzahl aktueller Arbeiten auf dem Gebiet komplexer Plasmen werden im Folgenden einige der Untersuchungen mit Bezug zum Vorhaben des Berichtszeitraums aufgeführt.

I Frequenzdomänen und Phasendefekte

Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung von Frequenzdomänen [13] und zur globalen Synchronisation [14] wurden von Williams durchgeführt. Dabei konnte bei Anlegen einer externen Modulation beobachtet werden, dass sich die durch die Modulation bestimmte Mode mit einer zeitlichen Verzögerung global durchsetzt. Im Gegensatz dazu geht diese globale Synchronisation instantan beim Abschalten der Modulation verloren.

Das Auftreten und die Evolution von Phasendefekten wurden vor allem in der Gruppe von Lin I (Taiwan) untersucht [15], [16]. Dort wurden vor allem Details der Defekteigenschaften, wie zum Beispiel ihr oft paarweises Auftreten, näher analysiert.

II Wechselwirkung zwischen Staub und Plasma

In spektroskopischen Messungen des Plasmaleuchtens haben Killer et al. einen Übergang der Elektronenheizung in einen neuen Mode bei Zugabe von Staubpartikeln beobachtet [17]. In diesem werden die Elektronen statt nur in der Randschicht im gesamten Plasmabulk geheizt. Mit vergleichenden Simulationen kamen die Autoren zu dem Schluss, dass die Bindung von Elektronen am Staub eine geringere Leitfähigkeit des Plasmas verursacht und dies wiederum zu einem erhöhten elektrischen Feld im Plasmabulk führt.

III Dynamik der Einzelpartikel

Chang et al. [18] haben durch Tracking von Partikeln in Staubdichtewellen die Kräfte auf diese und deren effektives Potential in der Welle bestimmt. Aus dem Potential in Form eines *tilted washboards* erklären die Autoren, warum Partikel prinzipiell vor Wellenbergengefangen sein können und warum nicht auch in den Wellentälern.

IV Entstehung und Antrieb großskaliger Wirbelströmungen

In einer zweidimensionalen Simulation eines staubigen Plasmas analysierten Schwabe et al. [19] durch sukzessive Zugabe von Partikeln das Einsetzen einer Wirbelströmung. In der weiteren Untersuchung der Wirbel fanden die Autoren unter anderem Hinweise auf Turbulenz.

In einer Parallelplatten-DC-Entladung erzeugten Kaur et al. [20] einen starken Gradienten in der Plasmadichte durch Hinzufügen eines Metallrings auf der Elektrode. Dadurch

konnten die Autoren Wirbelströmungen in der Staubwolke erzeugen. Da der Dichtegradient vor allem die Ionenwindkraft beeinflusst, folgerten sie, dass der Gradient die Hauptursache für die beobachteten Wirbel sein musste.

6. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind in Fachzeitschriften und Konferenzbeiträgen veröffentlicht und im Anhang beigefügt.

- **Chain of coupled van der Pol oscillators as model system for density waves in dusty plasmas**
K. O. Menzel, O. Arp und A. Piel, Phys. Rev. E **83**, 016402 (2011)
- **Modeling Dust-Density Wave Fields as a System of Coupled van der Pol Oscillators**
K. O. Menzel, T. Bockwoldt, O. Arp und A. Piel, IEEE Trans. Plasma Sci. **41**, 735 (2013)
- **Interactions Between Dust-Density Waves and Plasma Glow**
T. Bockwoldt, K. O. Menzel, O. Arp und A. Piel, IEEE Trans. Plasma Sci. **41**, 769 (2013)
- **Collisional and collisionless expansion of Yukawa balls**
A. Piel und J. Goree, Phys. Rev. E **88**, 063103 (2013)
- **On the origin of dust vortices in complex plasmas under microgravity conditions**
T. Bockwoldt, K. O. Menzel, O. Arp und A. Piel, Phys. Plasmas **21**, 103703 (2014)
- **Stereoscopy of dust density waves under microgravity: Velocity distributions and phase-resolved single-particle analysis**
M. Himpel, T. Bockwoldt, C. Killer, K. O. Menzel, A. Piel und A. Melzer, Phys. Plasmas **21**, 033703 (2014)

III Literaturverzeichnis

- [1] C. Thompson et al., Phys. Plasmas **4**, 2331 (1997)
- [2] N.N. Rao et al., Planet. Space Sci. **38**, 543 (1990)
- [3] E. Thomas und M. Watson, Phys. Plasmas **6**, 4111 (1999)
- [4] V. Molotkov et al., J. Exp. Theor. Phys. **89**, 477 (1999)
- [5] S. Ratynskaia et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 085001 (2004)

- [6] A. Zobnin et al., J. Exp. Theor. Phys. **95**, 429 (2002)
- [7] S. Khrapak et al., Phys. Plasmas **10**, 1 (2003)
- [8] A. Barkan et al., Phys. Plasmas **2**, 3563 (1995)
- [9] M. Himpel et al., Phys. Plasmas **21**, 033703 (2014)
- [10] A. Piel und J. Goree, Phys. Rev. E **88**, 063103 (2013)
- [11] K. O. Menzel et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **41**, 735 (2013)
- [12] S. Schütt, *Dichtewellen in der Randschicht eines komplexen Plasmas*, Bachelorarbeit, (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel 2013)
- [13] J.D. Williams, Phys. Rev. E **89**, 023105 (2014)
- [14] J.D. Williams, Phys. Rev. E **90**, 043103 (2014)
- [15] M.-C. Chang et al., Phys. Plasmas **20**, 083703 (2013)
- [16] Y.-Y. Tsai und L. I, Phys. Rev. E **90**, 013106 (2014)
- [17] C. Killer et al., Phys. Plasmas **20**, 083704 (2013)
- [18] M.-C. Chang et al., Phys. Rev. E **85**, 046410 (2012)
- [19] M. Schwabe et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 115002 (2014)
- [20] M. Kaur et al., Phys. Plasmas **22**, 033703 (2015)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Nichtlineare Wellen in staubigen Plasmen unter Schwerelosigkeit	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Piel, Alexander, Bockwoldt, Tim	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2015
	6. Veröffentlichungsdatum 22.10.2015
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Experimentelle und Angewandte Physik Christian-Albrechts-Universität zu Kiel 24098 Kiel	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 50WM1139
	11. Seitenzahl 16
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 20
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 7
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Ziel des Vorhabens war, ein vertieftes Verständnis von dynamischen nichtlinearen Prozessen in fluiden Zuständen komplexer Plasmen zu erhalten. Dazu wurden Experimente unter Schwerelosigkeitsbedingungen auf Parabelflügen durchgeführt, bei denen Staubdichtewellen und deren Interaktion mit dem Plasma sowie Staubströmungen mit verschiedenen Hochgeschwindigkeitskameras untersucht wurden. Die Untersuchungen zur Bildung von Frequenzdomänen in den Wellenfeldern lieferten ein vertieftes Verständnis der Synchronisationsphänomene und offenbarten die Bevorzugung von kommensurablen Frequenzverhältnissen bei geringer Dämpfung der Wellen. Weiterhin wurde die Wechselwirkung zwischen Staubdichtewellen und dem Plasma detailliert charakterisiert und zeigte sowohl eine lokale als auch eine globale Komponente. Zusätzlich zu den ursprünglichen Zielen konnten wichtige Beiträge zum Verständnis des Antriebsmechanismus großskaliger Wirbel in ausgedehnten komplexen Plasmen geliefert werden. Die Ergebnisse des Vorhabens trugen somit aktiv zu einem internationalen Forschungsgebiet bei.	
19. Schlagwörter komplexes Plasma, Microgravity, Staubdichtewellen, Plasmaglow, Vortices	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) final report	
3. title Nonlinear waves in dusty plasmas under microgravity		
4. author(s) (family name, first name(s)) Piel, Alexander Bockwoldt, Tim	5. end of project 30.04.2015	
	6. publication date 22.10.2015	
	7. form of publication	
8. performing organization(s) (name, address) Institut für Experimentelle und Angewandte Physik Christian-Albrechts-Universität zu Kiel 24098 Kiel	9. originator's report no.	
	10. reference no. 50WM1139	
	11. no. of pages 16	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53170 Bonn	13. no. of references 20	
	14. no. of tables 1	
	15. no. of figures 7	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The goal of this project was to gain a deeper understanding of the dynamical nonlinear processes in fluid states of complex plasmas. For that, experiments under microgravity conditions on parabolic flights were carried out, investigating the dust-density waves and their interaction with the plasma as well as dust flows by means of high speed cameras. The investigations on the formation of frequency clusters in the wavefields gave a deeper understanding of these synchronization phenomena and revealed the preferred generation of frequency clusters with commensurable frequencies at low damping rates. Furthermore, the interaction between dust-density waves and the plasma has been characterized in detail and showed a local as well as a global component. In addition to the original goals important contributions could be made to the understanding of the driving mechanism of large-scale vortices in extended complex plasmas. The results of the project thus contributed to an active, international field of research.		
19. keywords complex plasma, microgravity, dust-density waves, plasma glow, vortices		
20. publisher	21. price	