

## Schlussbericht 50WM2142

### STARK: Stabile Triboelektrische Aggregation durch Reibung und Kollisionen

#### I. Kurze Darstellung zu

##### 1. Aufgabenstellung

Planetenenstehung beginnt mit Mikropartikeln, die in protoplanetaren Scheiben kollidieren, aneinander haften bleiben und so zu größeren Aggregaten wachsen. Ab Millimeter Größe ist die kinetische Energie jedoch so groß, dass die geringen Haftkräfte nicht mehr ausreichen zur Bindung. Die Kollisionen werden wieder elastisch und Partikel prallen voneinander ab. Um sich jedoch weiter zu Kilometer großen Planetesimalen entwickeln zu können, müssen die Partikel Zentimeter bis Dezimeter Größe erreichen. Ein weiteres Wachstum der Millimeter Partikel ist daher nach aktuellem Stand notwendig. Dies ist jenseits der Haftung durch einfache van der Waals Kräfte möglich, wenn sich die Partikel in den Stößen triboelektrisch aufladen. Diese neue, elektrostatische Wachstumsphase ist sehr effektiv, wie in anderen Vorhaben gezeigt wurde. Bisher wurden in Untersuchungen aber solide sub-mm Partikel verwendet und keine oberen Grenzen für das Wachstum bestimmt.

Die Zielsetzung von STARK war es daher, in Mikrogravitationsexperimenten zu untersuchen, ob sich Staubaggregate ebenfalls aufladen und zu größeren Clustern aus Aggregaten wachsen, um realistische Bedingungen in protoplanetaren Scheiben zu simulieren. Im Hinblick auf Grenzen des Wachstums sollten Experimente auf einem Suborbitalflug durchgeführt werden, um das Wachstum von elektrostatischen Clustern und seine Grenzen genauer untersuchen zu können.

##### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben knüpft an das vergangene Vorhaben LANNISTER an, in dem die Untersuchungen mit soliden Partikeln im Vordergrund standen. Die generelle elektrostatische Wachstumsphase konnte z.B. in Steinpitz et al. (2020, Nature Physics) erstmals konkretisiert werden. STARK ist eine logische Fortsetzung dieser Arbeiten. Für die Forschung ist Mikrogravitation notwendig, da eine freie Beobachtung von Stößen, Wachstum und eine Ladungsbestimmung sonst nicht möglich ist. Insbesondere ist für einige Aspekte eine Mikrogravitationsdauer von Minuten notwendig. Hierfür gab es zu Beginn des Vorhabens Optionen für einen Suborbitalflug im Förderprogramm der ESA und auf einer Testplattform eines spanischen Betreibers (PLD-Space). Das Vorhaben ist neben der Planetenbildung angekoppelt an eine Community, die sich generell mit Reibungselektrizität beschäftigt. Hiervon profitiert das Vorhaben, setzt mit der Planetenbildung und den Mikrogravitationsexperimenten aber einen eigenen Schwerpunkt.

##### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben hatte eine einfache Planungsstruktur. Experimentelle Hardware wurde an der Universität Duisburg-Essen in Zusammenarbeit mit dem Fallturm in Bremen ausgehend von früheren Experimenten angepasst, um Staubaggregate, ihre Aufladung und

Wachstum zu untersuchen. Dies geschah in mehreren Fallturmkampagnen pro Jahr. Zwischen diesen Kampagnen wurden die Ergebnisse ausgewertet und publiziert. Dies geschah im wesentlichen gemäß ursprünglicher Planung. Die Corona-Pandemie erforderte kleinere terminliche Anpassungen, hatte aber insgesamt wenig Einfluss auf den allgemeinen Verlauf des Vorhabens. Alle Themenkomplexe konnten erfolgreich untersucht werden.

Auch der Suborbitalflug auf einer Fluggelegenheit der ESA (CHIP, MASER 15) wurde sehr erfolgreich umgesetzt und lieferte eine sehr reiche Datenbasis. Ein weiterer Suborbitalflug mit PLD Space konnte allerdings nicht mehr stattfinden bzw. wurde diese Plattform von PLD Space wieder eingestellt. Die Frage, ob die Plattform des Betreibers für wissenschaftliche Experimente nach den Erfordernissen der Experimente dieses Vorhabens geeignet gewesen wäre, um sie in Zukunft planmäßig einsetzen zu können, konnte daher nicht beantwortet werden. Für die wissenschaftlichen Ergebnisse des Vorhabens war dies jedoch unkritisch, da in der MASER 15 Kampagne alle Fragestellungen des Vorhabens bereits bearbeitet werden konnten.

4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

- Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Die Experimente des Vorhabens basierten zunächst auf Eigenentwicklungen in vorangegangenen Vorhaben (LANNISTER), um Versuche im Fallturm Bremen durchzuführen. Die Aufbauten wurden leicht modifiziert. Die Konzepte sind ebenfalls in die Entwicklung des Suborbitalfluges durch SSC (Swedisch Space Cooperation) eingeflossen. SSC bekam von der ESA den Auftrag das Experiment (CHIP) zu entwickeln.

Es kommen kommerzielle Komponenten zum Einsatz. Darüber hinaus nutzt das Vorhaben keine spezifischen Schutzrechte oder Verfahren anderer.

- Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

1. Bogdan, T., Pillich, C., Landers, J., Wende, H., and Wurm, G., Drifting inwards in protoplanetary disks I: Sticking of chondritic dust at increasing Temperatures, *Astronomy and Astrophysics*, 638:A151 1-10, 2020.
2. Chiang, E., Youdin, A. N., Forming planetesimals in solar and extrasolar nebulae, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38:493-522, 2010.
3. Demirci, T., Krause, C., Teiser, J., and Wurm, G., Onset of planet formation in the warm inner disk: Colliding dust aggregates at high temperature, *Astronomy and Astrophysics*, 629:A66 1-6, 2019.
4. Desch, S. J., Cuzzi, J. N., The generation of lightning in the solar nebula, *Icarus*, 143:87-105, 2000.
5. Grosjean, G., Wald, S., Sobarzo, J. C., and Waitukaitis, S., A quantitatively consistent, scale-spanning model for same-material tribocharging, *arXiv e-prints*, 2006.07120, 2020.
6. Gundlach, B., Schmidt, K. P., Kreuzig, C., Bischoff, D., Rezaei, F., Kothe, S., Blum, J., Grzesik, B., and Stoll, E., The tensile strength of ice and dust aggregates and its de-

- pendence on particle properties, *MNRAS*, 479, 1273-1277, 2018.
- 7.Haeberle, J., Schella, A., Sperl, M., Schroeter, M., and Born, P., Double origin of stochastic granular tribocharging, *Soft Matter* 14, 4987–4995, 2018.
  - 8.Johansen, A., Blum, J., Tanaka, H., Ormel, C., Bizzarro, M., and Rickman, H., The multifaceted planetesimal formation process, in:
  - 9.Jungmann, F., Bila, T., Kleinert, L., Mölleken, A., Möller, R., Schmidt, L., Schneider, N., Utzat, D., Volkenborn, V., and G. Wurm, Collisional charging in view of cosmic radiation in (pre)-planetary atmospheres, *Icarus*, 355:114127 1-7, 2021.
  - 10.Jungmann, F., Steinpilz, T., Teiser, J., and Wurm, G., Sticking and restitution in collisions of charged sub-mm dielectric grains, *Journal of Physics Communications*, 2:095009 1-12, 2018.
  - 11.Kruss, M., Demirci, T., Koester, M., Kelling, T., Wurm, G., Failed Growth at the Bouncing Barrier in Planetesimal Formation, *The Astrophysical Journal*, 827, 110, 2016.
  - 12.Kruss, M. and Wurm, G., Composition and size dependent sorting in preplanetary growth: Seeding the formation of mercury-like planets, *Planetary Science Journal*,1:23 1-6, 2020
  - 13.Kruss, M. and Wurm, G., Seeding the formation of mercurys: An iron sensitive bouncing barrier in disk magnetic fields, *Astrophysical Journal*, 869:45 1-6, 2018.
  - 14.Lacks, D. J. and Sankaran, R. M., Contact electrification of insulating materials, *J. Phys. D*, 44:453001, 2011.
  - 15.Lee, V., Waitukaitis, S. R., Miskin, M. Z., Jaeger, H. M., Direct observation of particle interactions and clustering in charged granular streams, *Nature Physics*, 11:733-737, 2015.
  - 16.Love, S. G., Pettit, D. R., Messenger, S. R., Particle aggregation in microgravity: Informal experiments on the International Space Station, *Meteoritics and Planetary Science*, 49:732-739, 2014.
  - 17.Méndez Harper, J. and Dufek, J., The effects of dynamics on the triboelectrification of volcanic ash, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121:8209-8228, 2016.
  - 18.Muranushi, T. Dust-dust collisional charging and lightning in protoplanetary discs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 401:2641-2664, 2010.
  - 19.Musiolik, G. and Wurm, G., Contacts of water ice in protoplanetary disks - laboratory experiments, *Astrophysical Journal*, 873:58 1-6, 2019.
  - 20.Shinbrot, T. and Herrmann, H. J., Granular matter: Static in motion, *Nature*, 451:773-774, 2008.
  - 21.Siu, T., Cotton, J., Mattson, G., and Shinbrot, T., Self-sustaining charging of identical colliding particles, *Physical Review E*, 89, 52208, 2014.
  - 22.Steinpilz, T., Jungmann, F., Joeris, K., Teiser, J., and Wurm, G., Measurements of electrical dipole moments and a Q-patch model of collisionally charged grains, *New Journal of Physics*, 22:093025 1-8, 2020.
  - 23.Steinpilz, T., Musiolik, G., Kruss, M., Jungmann, F., Demirci, T., Aderholz, M., Kollmer, J. E., Teiser, J., Bila, T., Guay, E., Wurm, G., ARISE: A Granular Matter Experiment on the International Space Station, *Review of Scientific Instruments*, 90:104503 1-8, 2019a.

24. Steinpilz, T., Joeris, K., Jungmann, F., Wolf, D., Brendel, L., Teiser, J., Shinbrot, T., Wurm, G., Electrical Charging Overcomes the Bouncing Barriers in Planet Formation, *Nature Physics*, 16:225-229, 2019b.
25. Waitukaitis, S. R., Lee, V., Pierson, J. M., Forman, S. L., and Jaeger, H., Size-dependent same-material tribocharging in insulating grains, *Physical Review Letters*, 112, 218001, 2014.
26. Wurm, G., Schmidt, L., Steinpilz, T., Boden, L., and Teiser, J., A Challenge for Martian Lightning: Limits of Collisional Charging at Low Pressure, *Icarus*, Volume 331, p. 103-109, 2019.
27. Yoshimatsu, R., Araújo, N. A. M., Wurm, G., Herrmann, H. J., and Shinbrot, T., Self-charging of identical grains in the absence of an external field, *Scientific Reports*, 7:39996 1-11, 2016.
28. Zhaolin, G., Wei, W., Junwei, S., Chuck Wah, Y, The role of water content in triboelectric charging of wind-blown sand, *Scientific Reports*, 3, 1337, 2013.
29. Zsom, A, Ormel, C. W., Güttler, C., Blum, J., and Dullemond, C. P., The outcome of protoplanetary dust growth: pebbles, boulders, or planetesimals? II. Introducing the bouncing barrier, *Astronomy and Astrophysics*, 513, A57, 2010.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Die Entwicklung des Vorhabens fand in der ausführenden Stelle (Fakultät für Physik, Universität Duisburg-Essen) statt. Die Durchführung der Fallturmexperimente wurde technisch begleitet vom ZARM (FAB) in Bremen. Ergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit theoretischen Kollegen lokal vor Ort (Prof. Wolf) diskutiert. Neue Fragestellungen, die sich aus den Ergebnissen entwickelten, wurden für ein Folgevorhaben (CHAP) mit der Gruppe von Prof. Waitukaitis am IST in Wien erarbeitet.

## II. Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Ein wesentlicher Teil der Zuwendung in Form von Personalkosten und Reisemitteln wurde für die Durchführung von Experimenten und deren Analyse verwendet. Konkrete Ziele und erreichte Ergebnisse waren dabei die folgenden.

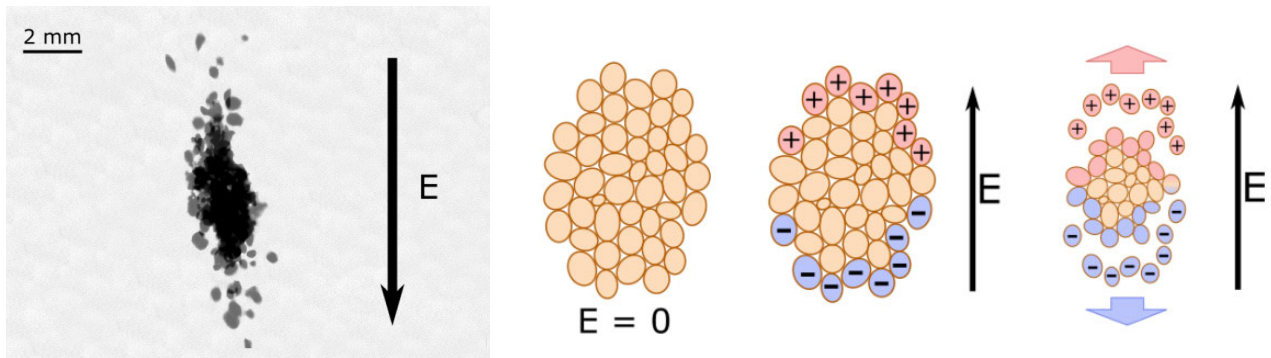
### **Ziel: Elektrische Aufladung von Staubaggregaten**

Vor STARK war unklar, ob die Aufladung von Staubaggregaten ähnlich verläuft wie die Aufladung von monolithischen Partikeln und ob sie sich überhaupt signifikant aufladen. Die Arbeiten verliefen hier in verschiedenen Schritten. Zunächst wurden Staubaggregate hergestellt, indem Mikrometer großer Staub mit einem konventionellen Rüttler vibriert wurde. Aufgrund der Kollisionen bilden sich dann Aggregate bis zu einer Größe von ca. 1 mm. Dies entspricht der Art und Weise, wie Aggregate in protoplanetaren Scheiben bis zur *Bouncing Barrier* entstehen.

*Leitfähige Partikel:* Bei ersten Experimenten unter normaler Atmosphäre erwies sich die Aufladung dieser Aggregate in wechselseitigen Stößen zunächst als gering. Die Analyse ergab hier, dass die Aggregate aufgrund der großen inneren Oberfläche ohne weitere Behandlung relativ leitfähig sind. Dies ergab sich nach umfangreichen Analysen, bei denen verschiedene Experimente kombiniert und unter anderem ein neuer Aufbau realisiert wurde, um elektrische Leitfähigkeiten des Materials konkret zu messen (Becker et al. 2024).

In einem externen elektrischen Feld können sich Staubaggregate aufgrund der Leitfähigkeit aber auch sehr effektiv aufladen im Kontakt mit einer Oberfläche. Dies führt zu einer Kraft, die die Aggregate von Oberflächen loslösen kann. Während dies nicht der ursprünglichen Motivation entsprach, bot dies zum ersten mal die Möglichkeit, diesen Ablöseprozess ohne Gravitation zu quantifizieren. Bedeutung hat dies für eolische Aktivität auf der Erde, die mit elektrischer Aktivität verbunden ist, aber auch für die Loslösung von Partikeln auf anderen planetaren Oberflächen (Onyeagusi et al. 2023, Kruss et al. 2021).

Als extremes Beispiel dieser Ablösung wurde ein neuer Mechanismus gefunden, der Planetesimale in elektrostatischen Feldern auflösen kann (Onyeagusi et al. 2024). Beobachtung und Modell dieser Arbeit sind in Abb. 1 dargestellt. Hierbei werden sequentiell die äußeren Schichten eines Clusters aus Aggregaten erodiert. Diese Anwendung liegt nicht im Fokus des Vorhabens. Inwieweit sich auf diese Weise erstmals eine Möglichkeit ergibt, elektrostatische Aktivitäten in protoplanetaren Scheiben durch so entstehende Partikelkonzentrationen zu detektieren (andere Möglichkeiten sind derzeit nicht bekannt) ist noch offen.



**Abb. 1.** Cluster aus Staubaggregaten werden im Experiment sequentiell in einem externen elektrischen Feld schichtweise aufgelöst (links). Die Abbildung rechts zeigt das Modell zur Polarisierung, Ladungstrennung und Erosion (Onyeagusi et al. 2024).

*Isolatoren:* Unter den Bedingungen protoplanetarer Scheiben sind die Staubaggregate sehr lange im Vakuum, so dass sich auch Wasser auf den inneren Oberflächen schliesslich verflüchtigt. Dies wurde im Experiment durch Heizen des Materials erreicht. In diesem Fall führen Kollisionen der Aggregate zur Aufladung. Oben erwähnte Experimente zur Leitfähigkeit und Entladung zeigen, dass Partikel ihre Ladung unter den Bedingungen protoplanetarer Scheiben über Wochen bis Jahre behalten sollten (Becker et al. 2024). Die Ladung auf den Aggregaten liegt in der gleichen Größenordnung wie die Ladung auf monolithischen Partikeln. Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, dass Staubaggregate die gleiche weitere Wachstumsphase zu größeren Aggregat-Clustern durchlaufen könnten wie die zuvor verwendeten sphärischen Millimeterproben, so dass dieses Ziel erreicht wurde.

### **Ziel: Kollisionsverhalten geladener Staubaggregate**

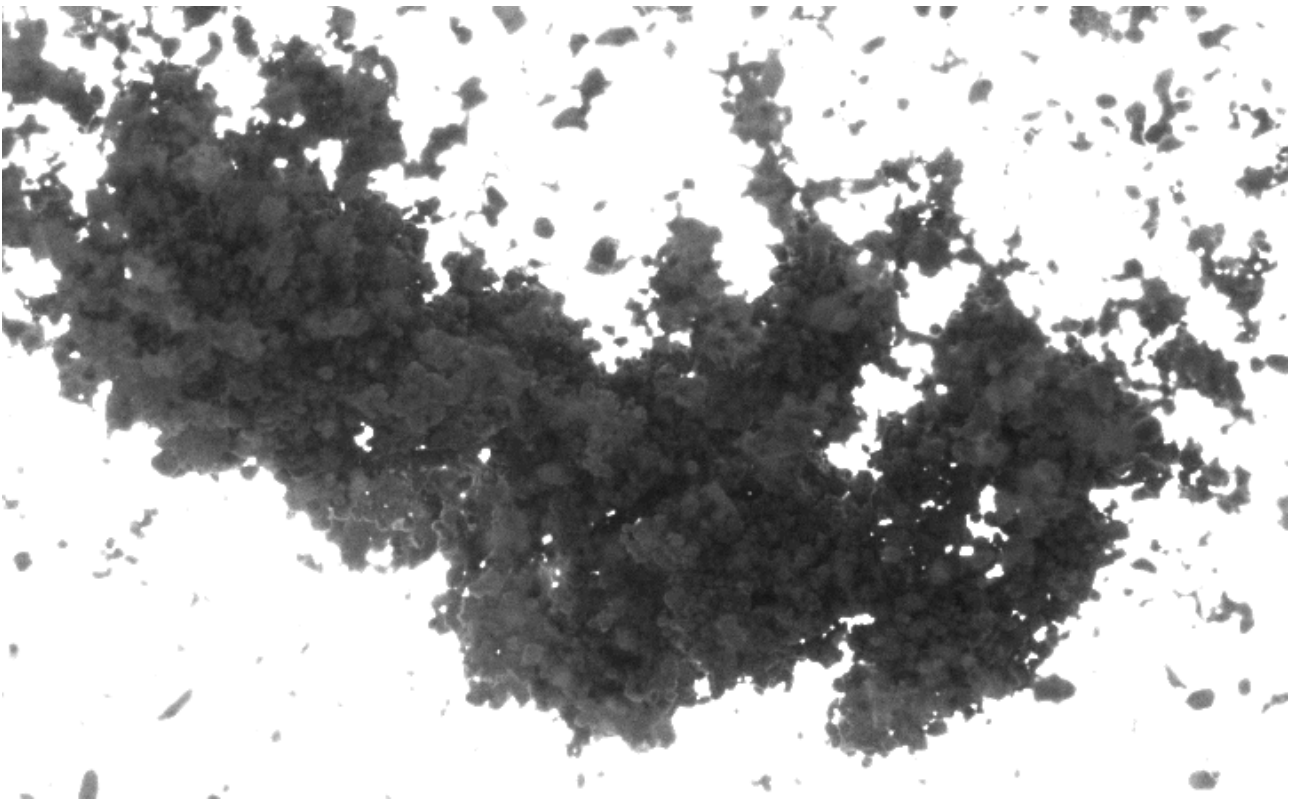
Kollisionen von Aggregaten führen zunächst zum Bouncing und Aufladung bevor sich stabilere Cluster bilden können. Anders als bei den bisherigen monolithischen Partikeln sind die Staubpartikel innerhalb der Aggregate aber nur durch Oberflächenkräfte (und elektrostatischer Kräfte) gebunden. Daher kann es zur Abspaltung von Staubpartikeln und sehr kleinen Aggregaten kommen. Dies ist zum einen für protoplanetare Scheiben von Bedeutung, da sich hier auch bei der Planetesimalbildung immer eine Population von kleinen Partikeln in der Scheibe befindet, was dazu passt, dass Staub über die gesamte Lebensdauer der Scheiben beobachtet wird. In unserem Fall interessant, sind die kleinen Fragmente geladen. So können sie in (proto)-planetaren Atmosphären zur elektrischen Aktivität beitragen (Onyeagusi et al. 2023b).

Eine Herausforderung bei dem Prozess, Staubaggregatstöße zu beobachten, die zur Haftung führen, ist die relativ breite Größenverteilung. Dies führt dazu, dass große Aggregate in der Regel positiv, kleinere negativ geladen sind (Wurm et al. 2024, Grünebeck et al. in Vorbereitung). Um einseitige Polaritäten zu verhindern, die haftenden Stößen entgegenstehen, musste der experimentelle Aufbau neu konstruiert werden, um das gesamte

Material in der Experimentkammer zu halten. Dies schafft zum einen die Grundlagen für ein Folgevorhaben (PANDORA) um gezielt Stöße bei verschiedenen Parametern zu untersuchen, was über Vorhaben STARK hinaus geht. In STARK konnte jedoch die Aggregation unter Vakuumbedingungen erstmals beobachtet werden (siehe nächster Punkt).

### Ziel: Aggregation unter Vakuumbedingungen

Es war das eigentlich Ziel oder wissenschaftliches Hauptziel, zu belegen oder widerlegen dass nicht nur monolithische, monodisperse Proben sondern auch Staubaggregate aufgrund der Aufladung zu großen Clustern wachsen können. In Abb. 2 sind Staubaggregat-Cluster gezeigt, die durch Stöße von Aggregaten und kleineren Clustern entstanden. Dieses Ziel wurde daher eindrucksvoll erreicht - auch Staubaggregate können, aufgeladen durch Stöße, effektiv zu größeren Clustern wachsen. Ihre instabile Aggregatnatur steht dem nicht entgegen (Onyeagusi et al. in Vorbereitung).



**Abb. 2.** Cluster (Länge 2..3 cm), der aus triboelektrisch geladenen sub-mm Aggregaten gewachsen ist.

## Ziel: Langzeit-Experiment zur Bildung großer Cluster aus monolithischen Partikeln

Im Verlauf des Vorhabens wurde die Vorbereitung eines Langzeitexperiments (längere Mikrogravitationsdauer) weiter verfolgt, um das Wachstum von Clustern detailliert beobachten zu können. Ein solches Experiment wurde während der Laufzeit des Vorhabens auf einem Suborbitalflug (CHIP, MASER 15) erstmals durchgeführt. Es verlief wie geplant und lieferte eine Datensatz, der weit über Vorhaben STARK hinausgeht und derzeit in Vorhaben CHAP analysiert wird. Es konnte erstmals das Wachstum von mehreren Zentimeter großen Strukturen im Detail beobachtet werden. Erstes Ergebnis ist eine konkrete Geschwindigkeit, ab wann solche Cluster erodiert werden. Diese ersten Arbeiten wurden zur Publikation eingereicht (Teiser et al. 2024 eingereicht).

## Ziel: Anwendung auf die Planetenbildung

Die meisten der zahlreichen Publikationen des Vorhabens setzen die Ergebnisse in den Kontext der Planetenentstehung. Konkret ist die Hauptanwendung, dass durch die triboelektrische Aufladung stabilere Cluster entstehen können. Dies gilt auch für Staubaggregate. Dadurch unterstützen die experimentellen Befunde immer weiter, dass man eine Größenordnung größere Partikel entstehen lassen kann, was die weiteren Prozesse der Planetesimalbildung erleichtern.

**Ladungserhaltung:** Nicht ursprüngliches Ziel, aber eine der vielleicht interessantesten Entdeckungen war die bei der Auswertung alter Daten gefundene Tatsache, dass bei Kollisionen die Gesamtladung auf den kollidierenden Partikeln nicht erhalten bleibt (Jungmann et al. 2022). Im Falle von Staubaggregaten ist das noch leicht erklärbar bzw. ein kleiner Effekt im Vergleich zum Ladungsverlust oder Gewinn durch abgetrennte Fragmente. Bei monolithischen Partikeln, die kein Material verlieren, ist das nicht auf diese Art zu erklären. Hier wurde in Folgeuntersuchungen festgestellt, dass in der Tat Ionen während einer Kollision entstehen, die in die Umgebung abgegeben werden. Dies ist für protoplanetare Scheiben von großer Bedeutung, da dadurch das Gas auch in wenig ionisierten Gebieten im Inneren ionisiert werden kann, was die Physik und Chemie der Scheibe beeinflusst (Wurm et al. 2023, Penner et al. 2024).

### 2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (gerundet)

Wissenschaftliche MitarbeiterInnen	213.000 Euro
Beschäftigungsentgelte	5.000 Euro
Gegenstände (>400/800 Euro)	24.000 Euro
Reisekosten	27.000 Euro

### 3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mikrogravitation ist ein wesentlicher Faktor des Vorhabens. Das Wachstum, die Ladungs-

bestimmung und detaillierte Beobachtung von Kollisionen sind im irdischen Labor so nicht möglich. Für die Entwicklung, Durchführung und Auswertung der Experimente war die kontinuierliche Arbeit der MitarbeiterInnen zwingend notwendig.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.

Es handelt sich bei den Arbeiten und Ergebnissen um Grundlagenforschung. Alle Ziele wurden erreicht und die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in Fachzeitschriften publiziert und stehen zur Verfügung. Als solche sind sie für Modelle der Planetesimalbildung verwendbar. Die umfangreiche Datenbasis insbesondere des Suborbitalfluges konnte nicht mit allen Aspekten innerhalb von STARK ausgewertet werden und ist Grundlage des Vorhabens CHAP. Da in kurzen Zeiten geladene Staubaggregatcluster erzeugt werden können, ist es nun ebenfalls möglich, Einzelkollisionen gezielt zu induzieren und zu studieren. Dies ist Inhalt des neuen Vorhabens PANDORA geworden.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Elektrostatische Aufladung ist aktives Arbeitsgebiet in verschiedenen internationalen Arbeitsgruppen, deren Aufzählung diesen Schlussbericht übersteigen würde. Hierbei wurden und werden verschiedene Grundlagen der Aufladung diskutiert, u.a. die Bedeutung von Wasser oder Adsorbaten auf Partikeloberflächen. Die Arbeiten sind komplementär zu den Arbeiten in Vorhaben STARK. Konkrete Experimente zur Clusterbildung geladener Staubaggregate insbesondere unter Mikrogravitation außerhalb des Vorhabens sind derzeit nicht bekannt.

Im Umfeld der Planetesimalbildung gibt es ebenfalls zahlreiche Arbeiten. In keiner davon gibt es neue, alternative Wege zur Entstehung. Aktuelle Teleskope (ALMA, James Webb) zeigen allerdings immer detailliertere Strukturen in protoplanetaren Scheiben, die oft mit Druckmaxima erklärt werden, die Partikel konzentrieren. An dieser Stelle sind größere Partikel hilfreich bzw. durch elektrostatische Wechselwirkungen möglich, so dass die Arbeiten aus STARK hier gut eingeordnet werden können.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.

Die Publikation der Ergebnisse erfolgte in folgenden Beiträgen:

### Reviews

1. G. Wurm and J. Teiser, Aspects of Planet Formation in (Microgravity) Experiments, *Nature Reviews Physics*, <https://doi.org/10.1038/>, 2021.

**Beiträge in referierten Fachzeitschriften**

2. F. C. Onyeagusi, J. Teiser, and G. Wurm, Clusters of Tribocharged Dust Aggregates as Progenitors to Planetesimals, *some astrophysical journal*, (in preparation), 2024.
3. C. Grünebeck, F. C. Onyeagusi, J. Teiser and G. Wurm, Size Dependent Polarities in Ensembles of Tribocharged Dust Aggregates, *some physical Journal*, (in preparation), 2024.
4. J. Teiser, J. Penner, F. C. Onyeagusi, K. Joeris, J. Kollmer, D. Daab., and G. Wurm, Growing Superlarge Pebbles in Protoplanetary Disks Limited by Collisional Erosion, *Nature Astronomy*, (submitted), 2024.
5. T. Becker, G. Völke, T. Steinpitz, F. C. Onyeagusi, J. Teiser, and G. Wurm, Tribocharged Solids in Protoplanetary Disks: Internal and External Discharge Timescales, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 533:413-422, 2024.
6. J. Penner, J. Teiser, and G. Wurm, Gas Phase Ions in Protoplanetary Disks from Collisions of Solids, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 529:L159-163, 2024.
7. F. C. Onyeagusi, J. Teiser, T. Becker, and G. Wurm, The Dissolution of Planetesimals in Electrostatic Fields, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 529:L159-163, 2024.
8. F. C. Onyeagusi, C. Meyer, J. Teiser, T. Becker, and G. Wurm, Charged Atmospheric Aerosols from Charged Saltating Dust Aggregates, *Atmosphere*, 14:1065 1-10, 2023b.
9. L. Schönau, J. Teiser, T. Demirci, K. Joeris, T. Bila, F. C. Onyeagusi, M. Fritscher, and G. Wurm, Forbidden Planetesimals, *Astronomy and Astrophysics*, 672:A169 1-6, 2023.
10. F. C. Onyeagusi, F. Jungmann, J. Teiser, and G. Wurm, Lifting Dust Aggregates from Planetary Surfaces in Electric Fields, *Planetary Science Journal*, 4:13 1-7, 2023.
11. G. Wurm, F. Jungmann, and J. Teiser, Ionizing Protoplanetary Disks in Pebble Collisions, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, 517:L65-L70, 2022.
12. F. Jungmann, F. C. Onyeagusi, J. Teiser, and G. Wurm, Charge Transfer of Pre-Charged Dielectric Grains Impacting Electrodes in Strong Electric Fields, *Journal of Electrostatics*, 117:103705 1-7, 2022.
13. F. C. Onyeagusi, J. Teiser, N. Schneider, and G. Wurm, Measuring Electric Dipole Moments of Trapped Sub-mm Particles, *Journal of Electrostatics*, 115:103637 1-6, 2022.
14. F. Jungmann, M. Kruss, J. Teiser, and G. Wurm, Aggregation of Sub-mm Particles in Strong Electric Fields Under Microgravity Conditions, *Icarus*, 373:114766 1-7, 2022.
15. M. Kruss, T. Salzmann, E. Parteli, F. Jungmann, J. Teiser, L. Schönau, and G. Wurm, Lifting of Tribocharged Grains by Martian Winds, *Planetary Science Journal*, 2:238 1-9, 2021.
16. F. Jungmann, H. van Unen, J. Teiser, and G. Wurm, Violation of Triboelectric Charge Conservation on Colliding Particles, *Physical Review E*, 104:L022601 1-4, 2021.

17. F. Jungmann and G. Wurm, Observation of Bottom-up Formation of Charged Aggregates Related to Pre-planetary Evolution Beyond the Bouncing Barrier, *Astronomy and Astrophysics*, 650:A77 1-7, 2021.
18. J. Teiser, M. Kruss, F. Jungmann, and G. Wurm, A Smoking Gun for Planetesimal Formation: Charge Driven Growth into a New Size Range, *Astrophysical Journal Letters*, 908:L22 1-6, 2021.

### Konferenzbeiträge

19. C. Onyeagusi, J. Teiser, and G. Wurm, From Dust Till Dawn - How Dust Aggregates grow to Planetesimals with Tribocharging (Talk), *European Planetary Science Congress*, Berlin, 2024 (angemeldet).
20. F. C. Onyeagusi, J. Teiser, K. Joeris, and G. Wurm, CHIP - Creating Planets in a Jar, (Poster), *Protostars and Planets VII*, Kyoto, Japan, 2023.
21. F. C. Onyeagusi\*, F. Jungmann, J. Teiser, and G. Wurm, Lifting Dust Aggregates in Electric Fields, (Talk\*), *European Planetary Science Congress*, Granada, 2022.
22. F. C. Onyeagusi, J. Teiser, G. Wurm, Growing Bigger and Bigger with Collisional Charging, (Poster), *Planetary Formation and Evolution*, Berlin, 2022.
23. F. Jungmann, F. C. Onyeagusi, J. Teiser, and G. Wurm, Drop Tower Experiments Reveal Charge Transfer by Ions on Dielectric Grains (Poster), *Heraeus Seminar: Mesoscopic Triboelectricity - from Patches to Particles to Planets*, (Virtual), 2022.
24. F. C. Onyeagusi, J. Teiser, N. Schneider, and G. Wurm, Alignment and Aggregation of Sub-mm Particle Clusters through Dipole Moments in Large Electric Fields (Poster), *Heraeus Seminar: Mesoscopic Triboelectricity - from Patches to Particles to Planets*, (Virtual), 2022.
25. F. C. Onyeagusi, F. Jungmann, J. Teiser, and G. Wurm, Alignment and Aggregation of Sub-mm Particle Clusters in Large Electric Fields (I-Poster), *American Geophysical Union*, New Orleans, 2021.
26. F. Jungmann\*, J. Teiser, M. Kruss, T. Steinpitz, K. Joeris, and G. Wurm, Charge Moderated Preplanetary Growth from Single Grains to Giant Aggregates (Virtual Talk\*), *European Planetary Science Congress (Virtual)*, 2021.
27. G. Wurm, F. Jungmann, H. van Unen, N. Voellings, L. Schönau, and J. Teiser, Does Leakage of Charge in Particle Collisions Kill the Concept of Deadzones? (Virtual Talk\*), *European Planetary Science Congress (Virtual)*, 2021.

# Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts  STARK: Stabile Triboelektrische Aggregation durch Reibung und Kollisionen	
3b. Titel der Publikation  Die Ergebnisse wurden in verschiedenen wissenschaftlichen Zeitschriften unter verschiedenen Titeln publiziert.	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n))  Wurm, Gerhard	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2024
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Fachjournale
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Universität Duisburg-Essen Fakultät für Physik Lotharstr. 1 47057 Duisburg	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 50WM2142
	11a. Seitenzahl Bericht 11
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben 47
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 2
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung  In protoplanetaren Scheiben entstehen Millimeter große Aggregate aus Mikrometergroßen Staubpartikeln durch Kollisionen und Haftung der Staubpartikel. Diese Wachstumsphase führt dann zunächst zu einer Phase, in der die Aggregate kompaktieren, die Stöße elastisch werden und so kein weiteres Wachstum mehr stattfindet.  Die Entstehung größerer Cluster aus Aggregaten ist möglich, wenn sich die Aggregate in den Stößen elektrostatisch aufladen. In früheren Arbeiten wurde dieser Prozess mit sphärischen, monolithischen Partikeln untersucht. Offen und Hauptziel des Vorhabens war die Frage zu beantworten, ob sich auch realistischere Staubaggregate aufladen und sich daraus größere, stabile Cluster bilden können. Hierzu wurden Experimente am Fallturm Bremen durchgeführt.  In mehreren Kampagnen wurde das Verhalten verschiedener Staubproben untersucht. Während elektrisch minimal leitfähige Proben sich stark durch äußere elektrische Felder beeinflussen lassen und z.B. von planetaren Oberflächen abgelöst werden können, konnte in der Tat gezeigt werden, dass sich nicht leitfähige Proben stark aufladen und zur Bildung von Clustern führen können, die mindestens eine Größenordnung über der Größe der Aggregate liegen. Entladungsexperimente zeigen, dass der Ladungszustand auch über lange Zeitskalen erhalten bleiben kann. Damit wurde das Ziel des Vorhabens erreicht.  Die Zentimeter großen Cluster können sich durch weitere Prozesse in protoplanetaren Scheiben zu km-großen Planetesimalen und weiter zu Planeten entwickeln. Triboelektrische Aufladung ist ein möglicher Prozess, um aus (sub)-Millimeter Partikeln mehreren Zentimeter große Cluster entstehen zu lassen.	
19. Schlagwörter Planetenentstehung, protoplanetare Scheibe, Planetesimale, Triboelektrizität	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report
3a. Report Title  STARK: Stabile Triboelektrische Aggregation durch Reibung und Kollisionen	
3b. Title of Publication  Results are published in scientific journals under various titles	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s))  Wurm, Gerhard	5. End of Project 31.03.2024
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date
	7. Form of Publication Scientific journals
8. Performing Organization(s) (Name, Address)  University of Duisburg-Essen Faculty of Physics Lotharstr. 1 47057 Duisburg	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 50WM2142
	11a. No. of Pages Report 11
	11b. No. of Pages Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	12. No. of References 47
	14. No. of Tables 0
	15. No. of Figures 2
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract  In protoplanetary disks, millimeter sized aggregates form from micrometer sized dust by sticking collisions. This growth phase then leads to a next phase, where the aggregates become compacted, and collisions become elastic. This way, the aggregates only bounce off each other in further collisions.  However, the formation of larger clusters of these aggregates is possible if the aggregates electrostatically charge in these collisions. In earlier works, this charge moderated growth was studied, using spherical, monolithic particles. It is an open question and was the main goal of STARK to answer if also the more realistic dust aggregates charge in collisions and if larger clusters emerge from this. Therefore, experiments at the drop tower in Bremen were carried out.  In several campaigns the behavior of different dust samples was studied. On one side, slightly electrically conductive samples can be influenced strongly by external electric fields and, e.g., be lifted from planetary surfaces. On the other side, it could indeed be shown that non-conductive samples charge strongly in collisions and lead to the formation of clusters, at least an order of magnitude larger than the aggregates. Discharge experiments show that the charge state can be sustained over long periods. Therefore, the main goal of the project was reached.  The centimeter sized clusters can evolve further to km-sized planetesimals and further to planets. Triboelectric charging is one possible process to form the necessary centimeter to decimeter clusters from (sub)-millimeter particles.	
19. Keywords planet formation, protoplanetary disk, planetesimal, triboelectric charging	
20. Publisher	21. Price