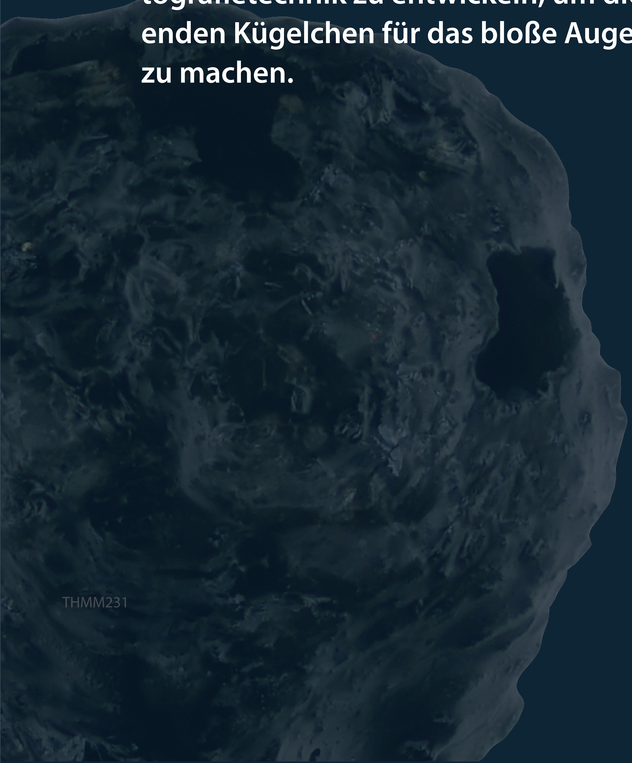
Mikro-meteoriten

Staub aus dem All - überall!

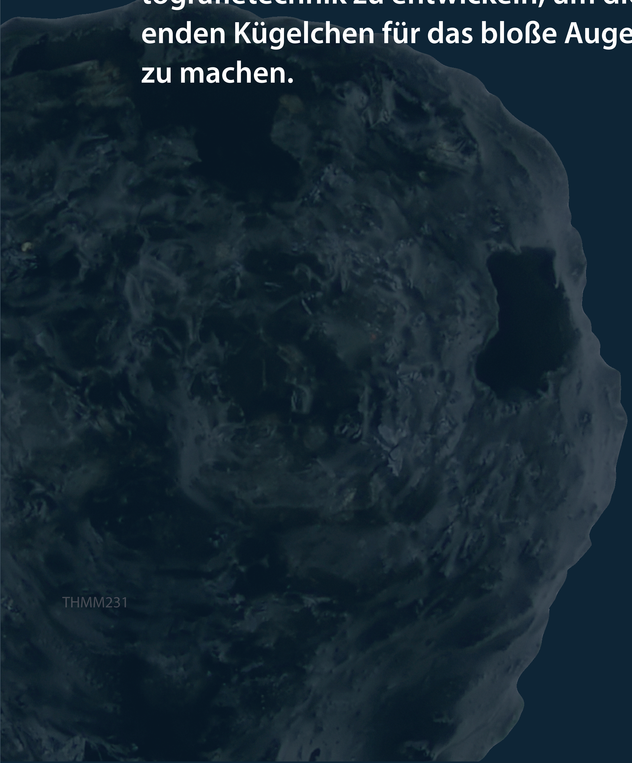
Winzig klein, überall verteilt und beständig kommt Nachschub aus dem Weltall: Mikrometeoriten sind kosmische Staubteilchen, die für uns meist unbemerkt tagtäglich auf die Erde treffen.
Beim Eintritt in die Atmosphäre werden die bis zu millimeter-großen Gesteinspartikel aufgeheizt und kühlen wieder ab - dabei entstehen faszinierende Skulpturen aus Kristallen und Glas.
Lange galt es als unmöglich, die winzigen Partikel aus dem fernen All in besiedelten Gebieten zwischen all dem irdischen Staub und industriellen Verschmutzungen nachzuweisen.
Zwei Forschenden aus Norwegen ist es gelungen, Mikrometeoriten auf Hausdächern und in Dachrinnen zu finden und eine besondere Fotografietechnik zu entwickeln, um die faszinierenden Kügelchen für das bloße Auge sichtbar zu machen.



Mikro-meteoriten

Staub aus dem All - überall!

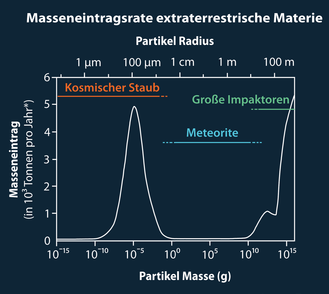
Winzig klein, überall verteilt und beständig kommt Nachschub aus dem Weltall: Mikrometeoriten sind kosmische Staubteilchen, die für uns meist unbemerkt tagtäglich auf die Erde treffen.
Beim Eintritt in die Atmosphäre werden die bis zu millimeter-großen Gesteinspartikel aufgeheizt und kühlen wieder ab - dabei entstehen faszinierende Skulpturen aus Kristallen und Glas.
Lange galt es als unmöglich, die winzigen Partikel aus dem fernen All in besiedelten Gebieten zwischen all dem irdischen Staub und industriellen Verschmutzungen nachzuweisen.
Zwei Forschenden aus Norwegen ist es gelungen, Mikrometeoriten auf Hausdächern und in Dachrinnen zu finden und eine besondere Fotografietechnik zu entwickeln, um die faszinierenden Kügelchen für das bloße Auge sichtbar zu machen.



THMM151

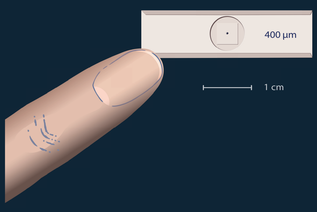
Was ist ein Mikrometeorit?

Die Erde wird täglich von rund 100 t kosmischen Staubs getroffen - das sind rund 40.000 t pro Jahr! Dabei handelt es sich vorwiegend um kosmische Staubkörnchen, große Brocken sind selten. Die meisten dieser winzigen Partikel verglühen in der Atmosphäre und können bei Dunkelheit als Sternschnuppen beobachtet werden. Rund 1.600 t davon überstehen pro Jahr die Passage durch die Atmosphäre und landen als Mikrometeoriten (MM) auf der Erdoberfläche.[4]



*Große Impaktoren sind sehr selten, liefern aber bei einem Ereignis - z.B. dem Riesereignis - Größenordnungen von millionen Tonnen kosmischen Materials. Der hohe Masseneintrag der winzigen Mikrometeoriten ergibt sich hingegen aus der großen Anzahl der fallenden Partikel pro Jahr.
Abbildung modifiziert nach Hecht, Milke und Greshake (2021, S.9); durch die Autoren verändert nach Plane et al. 2018 [5]

Anders gesagt: pro Jahr fällt ein Partikel mit einem Durchmesser von 0,1 mm auf eine Fläche von 1 m².[6] Kosmischer Staub ist überall!
Die kosmischen Staubpartikel sind aber mit einer Größe von durchschnittlich 100 bis 400 µm mit bloßem Auge kaum zu erkennen und deshalb sehr schwer zu finden.



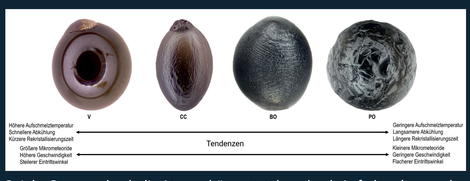
Der Ursprung der Mikrometeoriten ist vielfältig und nicht abschließend geklärt. 98 % der Staubkörnchen > 50 µm stammen wohl von sehr ursprünglichen Asteroiden (Chondrite), etwa 50 % der Partikel < 50 µm werden zumeist mit Kometen in Verbindung gebracht.[7] Ein Teil stammt wahrscheinlich auch von unserem äußeren Nachbarn im Sonnensystem, dem Mars.[8]

Planeten, Asteroiden und Kometen konnten bislang durch wissenschaftliche Analysen als Mutterkörper von Mikrometeoriten identifiziert werden.
Oben: Mars, , zusammengesetzt aus 102 Viking-Orbiter-Aufnahmen. NASA/JPL-Caltech. Mitte: künstlerische Darstellung eines Asteroiden, N. Bartmann (ESA/Webb), ESO/M. Kornmesser and S. Brunier, N. Risinger (skysurvey.org). Unten: Komet Halley, augenommen durch Sonde Giotto, ESA/MPAe Lindau.

Durch das Aufschmelzen beim Eintritt in die Atmosphäre und anschließende Rekristallisation beim Abkühlen und Erhärten entstehen charakteristische Merkmale der kleinen Staubperlen. Entsprechend dem Grad der Veränderung, die die Partikel bei der Passage durch die Atmosphäre erfahren, kann eine Einordnung in folgende Kategorien erfolgen:

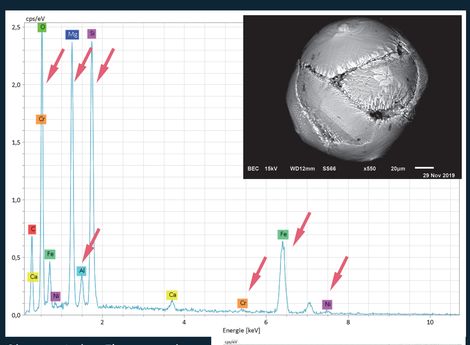
- **aufgeschmolzen** (melted) = kosmische Kugeln (cosmic spherules, CS)
- **teilweise aufgeschmolzen** (partially melted/scoriaceous)
- **nicht geschmolzen** (unmelted)

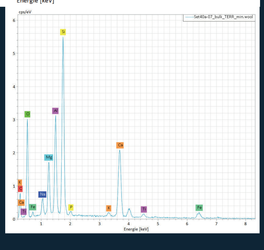
Eine weitere Einteilung in Typen erfolgt anhand der mineralogischen Zusammensetzung:
S-Typ: silikatreiche Mikrometeoriten
I-Typ: reich an Eisenoxid
G-Typ: Mischung aus den Vorangehenden, silikatisches Glas mit Magnetitkristallen
Zwischen diesen Typen existieren verschiedenste Übergangsformen.[9] Auch die Oberflächentextur, die bei der Passage durch die Atmosphäre entsteht, wird zur Einteilung in verschiedene Typen genutzt.



Bei der Passage durch die Atmosphäre entstehen durch Aufschmelzen und anschließende Rekristallisation verschiedene Oberflächentexturen der Mikrometeorite: V = vitreous, CC = cryptocristalline, BO = barred olivine, PO = porphyritic olivine. *Abbildung: Thilo Hasse, micrometeorites.org*

Aber was macht die kleinen Staubkörnchen so besonders? Ihr außerirdischer Ursprung offenbart sich in verschiedenen chemischen Analysen. Mit diesen kann man z.B. die Element- und Mineralzusammensetzung der Mikrometeoriten ermitteln, die Rückschlüsse auf die Mutterkörper (Asteroiden, Kometen, Planeten…) zulassen. Isotopenanalysen geben Aufschluss über die Herkunft (inneres/äußeres Sonnensystem) und das Alter der kosmischen Partikel. So erzählen Sie uns von der Entwicklung und der Dynamik unseres Sonnensystems.





Oben: typisches Elementspektrum eines chondritischen MM (rote Pfeile) mit hohen Peaks für Sauerstoff (O), Magnesium (Mg) und Silizium (Si) und dazwischen einem kleinen Peak für Aluminium (Al), einem deutlichen Eisenpeak (Fe) und geringen Mengen an Chrom (Cr) und Nickel (Ni). Dazu die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines MM. Rechts: Elementspektrum eines terrestrischen Partikels aus Mineralwolle (*Quelle: Thilo Hasse*).

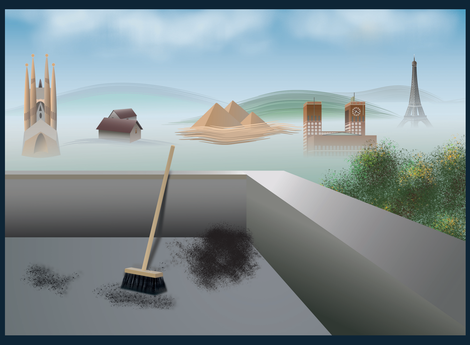
THMM231

Auf der Suche – Meteorites und Meteowrongs

Seit Jon Larsen 2015 den ersten urbanen Mikrometeoriten entdeckte, machen sich nicht nur Fachleute, sondern auch Hobbyforscher auf die Suche nach den kosmischen Staubpartikeln vom (heimischen) Dach. Aber was macht die Suche zu einer Herausforderung - wie sollte man vorgehen und was muss man beachten?

Der Weg zum eigenen Mikrometeoriten – Schritt für Schritt

1. Probennahme an geeignetem Standort



Ideal für die Suche sind vom alltäglichen Geschehen wenig beeinflusste Flächen unter freiem Himmel mit windgeschützten Bereichen, in denen sich Material sammeln kann, z.B.
- Flachdächer mit umgebendem Rand
- Regenrinnen …

Hier wird der „Schmutz" zusammengefegt und für die spätere Sortierung in beschrifteten Tüten (Ort/ Datum) mitgenommen.

2. Aufreinigen der Proben

Dies geschieht nach Jon Larsens Methode am besten in einer weißen Schale mit warmem Wasser und einem Tropfen Spülmittel unter Rühren. Organischer Schmutz löst sich, grobe Anteile (Blätter, Vogelkot…) schwimmen an der Oberfläche, schwerere Partikel sammeln sich am Grund. Das Wasser wird vorsichtig abgegossen und der Vorgang wiederholt, bis keine Trübung des Wassers mehr eintritt. Der übriggebliebene Rest am Grund der Schüssel wird auf einem flachen Teller getrocknet.

3. Abtrennung der Feinfraktion

Da Mikrometeoriten in der Regel zwischen 0,1 und 0,4 mm groß sind, können sie mit einem Teesieb (Maschenweite 0,5 mm) aus der gereinigten Fraktion herausgefiltert werden.

4. Herausfiltern magnetischer Partikel

Ein großer Anteil der kosmischen Staubkörnchen ist magnetisch und kann mit einem Magneten aufgenommen werden. Dieser wird in eine Ziploc-Tüte verpackt, eine zweite Tüte wird über die Hand mit dem Magneten gestülpt. Nun wird mit dem Magneten über die Partikel gestrichen. Eine dritte, größere und beschriftete Ziploc-Tüte wird bereitgehalten, um die Partikel aufzunehmen, die herabfallen, wenn die Hand mit dem Magneten aus der zweiten Tüte gezogen wird.

5. Sortierung unter dem Mikroskop

Es sind ein Stereomikroskop mit mind. 63-facher Vergrößerung, Vergleichsbilder von bereits identifizierten Mikrometeoriten und etwas Erfahrung nötig, um Mikrometeoriten unter all den ähnlichen irdischen Partikeln zu erkennen.

6. Verifizierung im Labor

Zur eindeutigen Bestätigung eines Mikrometeoriten wird ein Rasterelektronenmikroskop oder eine Elektronenstrahlmikrosonde benötigt. Diese finden sich i.d.R. nur in Forschungslaboren.

Meteorites und Meteowrongs

Die größte Herausforderung besteht darin, Mikrometeoriten (engl. micrometeorites) aus den Millionen von sehr ähnlichen Partikeln auf städtischen Dächern herauszufiltern. Zahlreiche natürliche und industrielle Prozesse produzieren Partikel, die von den kosmischen Kügelchen optisch kaum zu unterscheiden sind:
- Blitzeinschlag
- Feuerwerk
- Abrieb an Fahrzeugen
- Schleifen, Sägen, Schweißen…

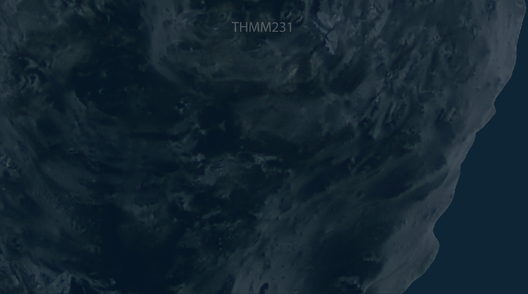
Mikrometeoriten (links) und industrielle Partikel (rechts) sind optisch kaum zu unterscheiden. *Aufnahmen: Thilo Hasse*

Letztlich können nur chemische Analysen endgültige Klarheit darüber liefern, ob ein Staubpartikel wirklich aus den Weiten des Alls stammt. Aber ein geübtes Auge kann auch unter dem Mikroskop anhand verschiedener morphologischer Merkmale bereits eine gute Vorauswahl treffen.

Detaillierte Suchanleitungen:

Jon Larsen

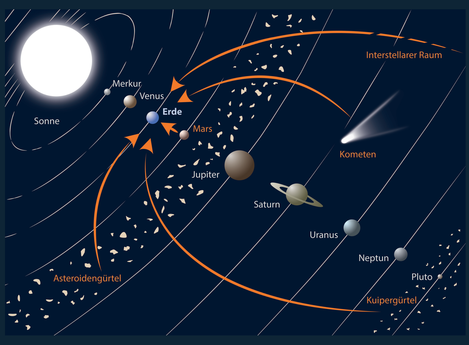
Thilo Hasse



Mikrometeoriten in der Wissenschaft

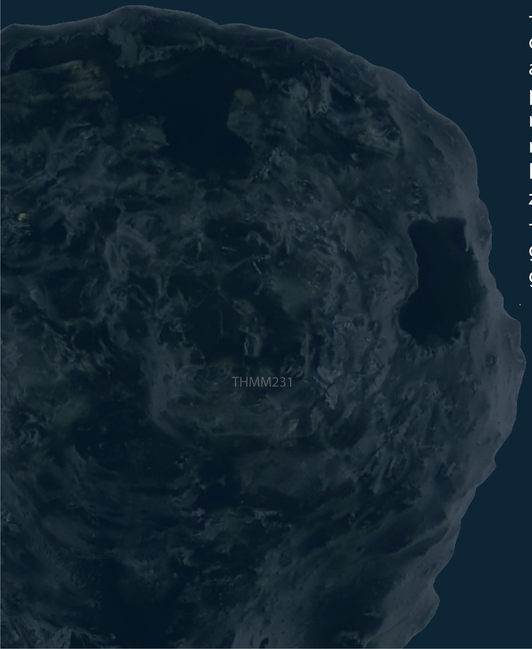
Was sagen uns Mikrometeoriten?

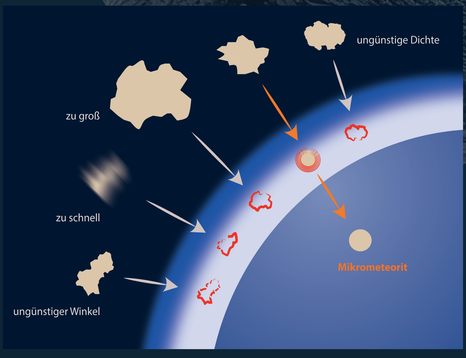
Mikrometeoriten sind kosmische Staubteilchen, die die Erdoberfläche erreichen. Dort können sie im Eis, in Sedimenten oder sogar auf Hausdächern gefunden werden. Einige dieser mikroskopischen Körper können Informationen über das Sonnensystem liefern, die größere Meteoriten nicht besitzen.
Es gibt kosmische Staubteilchen, die keine wesentlichen Veränderungen durch z.B. hohe Temperatur oder Schockwellen durchgemacht haben. Manche von ihnen haben Eigenschaften, durch die sie sich auch beim Eintritt in die Erdatmosphäre nur kaum verändern. Solche Teilchen erlauben einen tiefen Einblick in die ursprüngliche Materie des Sonnensystems, wie ihn übliche Meteoriten nicht geben können.[10]
Aber auch die Herkunft kosmischer Staubteilchen ist weit vielfältiger als die der größeren Brocken. Daher kann mit ihnen eine größere Vielfalt an Himmelskörpern im Sonnensystem erkundet werden. Viele Partikel stammen sehr wahrscheinlich aus Zusammenstößen im Asteroidengürtel und von Material aus dem Staubschweif von Kometen.[11] Aber es gibt auch Hinweise auf Marsstaub, der den Planeten verließ [8], auf Partikel aus dem Kuipergürtel jenseits der Neptunbahn[12,13], und sogar auf interstellare Staubteilchen aus der Galaxis, die in das Sonnensystem eintreten.[14]



Übersicht über diskutierte Quellen kosmischen Staubs, der ins innere Sonnensystem Richtung Erde gelangt (nicht maßstabsgetreu).

Wie viele solcher Partikel schließlich die Erde erreichen und in welcher Form hängt allerdings von einem Mix an Kräften ab. Manche der Kräfte wirken sich auf kleine Teilchen völlig anders aus als auf größere.[11] Mit der Erforschung von Mikrometeoriten lassen sich daher auch diese Kräfte besser erschließen, die im interplanetaren Raum oder beim Durchgang durch die Erdatmosphäre auf kleiner Skala eine wichtige Rolle spielen.





Schematische Darstellung der wichtigsten Faktoren, die das Schicksal ankommender kosmischer Staubteilchen beim Eintritt in die Erdatmosphäre bestimmen.

Auch spielt die Erforschung von Mikrometeoriten eine immer größere Rolle bei der Frage zur Entstehung des Lebens auf der Erde. Manche Partikel sind zu einem hohen Anteil aus den chemischen Elementen zusammengesetzt, die die Basis für die Bausteine des Lebens bilden. Die Rate des Zustroms solcher Teilchen in der Frühzeit der Erde wird im Vergleich zu heute als viel höher angenommen.[16] Daher könnten solche Mikrometeoriten eine sehr wichtige Rolle bei der chemischen Evolution und der Entstehung des Lebens gespielt haben.

Wie findet man das alles heraus?

Damit Mikrometeoriten von irdischen Staubteilchen unterschieden und so ihre besondere Botschaft entschlüsselt werden kann, ist die Erfassung des kosmischen „Fingerabdrucks" sehr wichtig. Um Täuschungen zu vermeiden, werden dazu möglichst mehrere unabhängige Untersuchungsmethoden herangezogen. Erst wenn alle Ergebnisse in dieselbe Richtung, also einen kosmischen Ursprung, verweisen, erhält ein Partikel die Zuordnung „Mikrometeorit". Geeignete Analysemethoden sind vor allem strukturelle Analysen (optische Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie), chemische und mineralogische Untersuchungen (z.B. Röntgenspektroskopie, Ramanspektroskopie) und Messung von Isotopenverhältnissen mittels Massenspektroskopie.

Welche Geheimnisse behalten sie bisher noch für sich?

Mikrometeoriten sind ein faszinierender Forschungsgegenstand, da vieles über sie noch ungelöst ist. Aktuelle Fragen sind vor allem:
- Sind unter den Mikrometeoriten auch Staubteilchen vom Mars sowie Partikel von Mutterkörpern aus dem Sonnensystem jenseits des Neptuns (Kuipergürtel)? Messungen von Raumsonden, himmelsmechanische Berechnungen und Funde von Mikrometeoriten mit sehr seltsamer Zusammensetzung[12] legen das immerhin als Möglichkeit nahe. Um das zu klären, ist jedoch weitere Forschung notwendig.
- Welche Rolle können Mikrometeoriten bei der Frage gespielt haben, wie das Wasser auf die frühe Erde gelangte?

Von Erdbeeren und Mikrometeoriten

Project Stardust

2009 sitzt der norwegische Jazz-Gitarrist Jon Larsen auf seinem Balkon beim Frühstück und isst Erdbeeren. Plötzlich fällt ihm ein winziges, schwarzes Pünktchen auf dem Tisch vor ihm auf, das Augenblicke zuvor noch nicht da war...

So beginnt die Geschichte des Project Stardust, der engen Freundschaft von Jon und Jan - und der urbanen Mikrometeorite.

Mikrometeorite wurden bereits Ende des 19. Jahrhunderts als „kosmischer Staub"[1] in arktischem Eis und Tiefseesedimenten[2] nachgewiesen. Der Begriff „Mikrometeorit" wurde 1949 von Fred Whipple geprägt[3], der darunter noch alle Arten kosmischen Staubs zusammenfasste. 70 Jahre später waren zahlreiche Funde aus entlegenen Gebieten wie Arktis und Antarktis bekannt und wissenschaftlich bearbeitet worden. Aber alle Wissenschaftler waren sich einig: Funde von Mikrometeoriten in urbanen Gebieten sind aufgrund der Überdeckung mit großen Mengen an Staub, Schmutz und industriellen Partikeln unmöglich.

Jon ist fasziniert von der Vorstellung, dass ein milliarden Jahre alter Partikel aus den Weiten des Alls einfach so auf seinem Tisch gelandet war - und dass Mikrometeoriten eigentlich überall zu finden sein müssten! Er liest sich in das Thema ein und beginnt 2010 mit der Suche auf städtischen Dächern rund um die Welt.

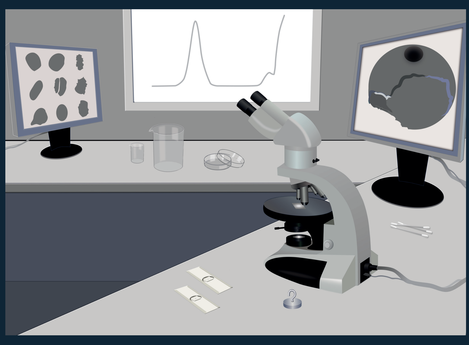
2015 gelingt Jon der erste Fund eines urbanen norwegischen Mikrometeoriten - NMM 1. Angetrieben von seinem Erfolg setzt Jon die Suche fort und veröffentlicht seine Ergebnisse, um auch andere zur Suche anzuregen. Aber um zu wissen, wonach man suchen muss, braucht man erstmal Bilder der Objekte. Jon nimmt Kontakt zu dem Mineralogen Jan Braly Kihle auf, der bereits eindrucksvolle Meteoritenfotos für die NASA angefertigt hatte. Gemeinsam entwickeln sie eine Technik zur Fotografie der winzigen Objekte.

Das Ergebnis sind über 600 hochauflösende Aufnahmen von fantastischen Einzelobjekten - und eine innige Freundschaft zwischen Jon und Jan. Gemeinsam gründen sie das Project Stardust, in dem sie über ihre Arbeit informieren und immer neue Fotos der kleinen kosmischen Kunstwerke präsentieren.

Jon arbeitet heute als Gastwissenschaftler an der Universität Oslo und inspiriert Menschen weltweit, sich selbst auf die Suche nach den einzigartigen kosmischen Staubkörnchen zu machen.

Citizen-Science-Projekt Berlin

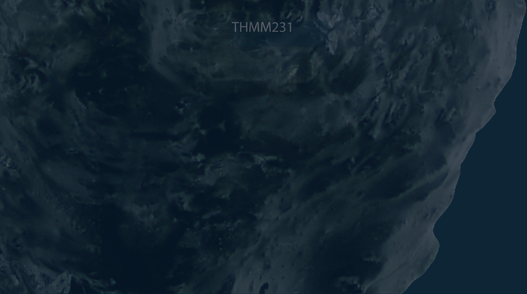
2015 wird der Landschaftsökologe und Verlagsmitarbeiter Thilo Hasse auf das Thema Mikrometeoriten aufmerksam und beginnt seinerseits mit der Suche. Er wird schnell fündig, aber es sind chemische Analysen nötig, um die kosmischen Staubkörner sicher von irdischen Partikeln zu unterscheiden.



Thilo Hasse wendet sich an die freie Universität und das Museum für Naturkunde Berlin. Der Mineraloge Ralf Milke[†] und der Impaktforscher Lutz Hecht unterstützen Hasse mit technischer Ausrüstung und Know-How. Bald entdecken sie gemeinsam weitere Mikrometeorite von den Dächern der Hauptstadt - und deren großes Potential für die Wissenschaft.
So stammen die winzigen Mikrometeoriten aus den Tiefen des Alls und können uns viel erzählen - über ferne Bereiche unseres Sonnensystems und seine Geschichte, vielleicht sogar von der Entstehung des Lebens...

Aber es gibt viele Dächer in Berlin - und in Deutschland - und die Suche ist aufwendig! Schnell ist der Gedanke da, die Bevölkerung einzubinden. Im Jahr 2019 startet dann auch die Pilotphase eines Bürgerforschungs- oder Citizen Science-Projekts der Freien Universität, der Technischen Universität und des Museums für Naturkunde Berlin in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). 20 Bürger Berlins werden unter zahlreichen Bewerbern ausgewählt und unterstützen die Wissenschaftler bei der Suche und bei der Identifikation der Mikrometeorite im Labor. Das Projekt soll als Kooperation der TU und FU Berlin und der Vrije Universiteit Brussel mit längerfristiger Förderung fortgeführt werden.

Mittlerweile wurden vermutlich weit über 10.000 Mikrometeorite im urbanen Raum gefunden.



Impressum

Ausstellungskonzeption / Gestaltung
Prof. Dr. Stefan Hölzl
Dr. Lina Seybold
Karin Heck
Dr. Frank Trixler

Layout / Illustration
Karin Heck
Hana Turhyt

Ausstellungsbau / Technik
Roland Schumacher

Bildmaterial / Leihgaben / Beratung
NMM:
Jan Braly Kihle (Project Stardust / Institute for Energy Technology IFE)
Jon Larsen (Project Stardust)
THMM:
Dr. Thilo Hasse

Prof. Dr. Lutz Hecht (Museum für Naturkunde Berlin / FU Berlin)
Monika Waigand

Literatur

[1] Nordenskiöld A. E. (1874): On the cosmic dust which falls on the surface of the earth with the atmospheric precipitation. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 4, Volume 48, 1874 - Issue 321: Supplement

[2] Murray J. & A. F. Renard (1891): Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of HMS Challenger in the years 1872 to 1876. HM Stationery Office

[3] Whipple F. L. (1949): The theory of micrometeorites. Popular Astronomy, Vol. 57, p. 517

[4] Suttle M. D. & L. Folco (2020): The extraterrestrial dust flux: Size distribution and mass contribution estimates inferred from the Transantarctic Mountain (TAM) micrometeorite collection. Journal of Geophysical Research: Planets, 125, Issue 2

[5] Plane, J.M.C., Flynn, G.J., Määttänen, A., Moores, J.E., Poppe, A.R., Carrillo-Sanchez, J.D. & Listowski, C. (2018): Impacts of cosmic dust on planetary atmospheres and surfaces. Space Science Reviews, 214: 23. doi.org/10.1007/s11214-017-0458-1

[6] Larsen J. (2017): In Search of Stardust. Amazing Micrometeorites and Their Terrestrial Imposters. Quarto Publishing Group USA Inc.

[7] Genge M. J., van Ginneken M. & M. D. Suttle (2020): Micrometeorites: Insights into the flux, sources and atmospheric entry of extraterrestrial dust at Earth. Planetary and Space Science, 187. Article Number 104900.

[8] Jorgensen, J. L., Benn, M., Connerney, J. E. P., Denver, T., Jorgensen, P. S., Andersen, A. C., & Bolton, S. J. (2021). Distribution of interplanetary dust detected by the Juno spacecraft and its contribution to the Zodiacal Light. Journal of Geophysical Research: Planets, 126(3), e2020JE006509.

[9] Genge M. J., Engrand C., Gounelle M. & S. Taylor (2008): The classification of micrometeorites. Meteoritics & Planetary Science 43, Nr 3, 497–515

[10] Flynn, G. J., Nittler, L. R., & Engrand, C. (2016). Composition of cosmic dust: sources and implications for the early solar system. Elements, 12(3), 177-183

[11] Koschny, D., Soja, R. H., Engrand, C., Flynn, G. J., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A. C., Malaspina, D., Nakamura , T., Poppe, A. R., Sterken, V. J. & Trigo-Rodríguez, J. M. (2019). Interplanetary dust, meteoroids, meteors and meteorites. Space science reviews, 215, 1-62

[12] Keller, L. P., & Flynn, G. J. (2022). Evidence for a significant Kuiper belt dust contribution to the zodiacal cloud. Nature Astronomy, 6(6), 731-735

[13] Dartois, E., Engrand, C., Brunetto, R., Duprat, J., Pino, T., Quirico, E., L. Remusat, N. Bardin, G. Briani, S. Mostefaoui, G. Morinaud, B. Crane, N. Szwec, L. Delauche, F. Jamme, Ch. Sandt, P. Dumas, (2013). Ultra-Carbonaceous Antarctic micrometeorites, probing the Solar System beyond the nitrogen snow-line. Icarus, 224(1), 243-252.

[14] Sterken, V. J., Westphal, A. J., Altobelli, N., Malaspina, D., & Postberg, F. (2019). Interstellar dust in the solar system. Space Science Reviews, 215, 1-32

[15] Hecht, L., Milke, R. & Greshake, A. (2021). Urbane Mikrometeorite: Citizen Science in den Geowissenschaften. GMIT, 84, 8-21

[16] Maurette, M., Gounelle, M., Duprat, J., Engrand, C., & Matrajt, G. (2000). The Early Micrometeorites Accretion Scenario and the Origin of Earth's Hydrosphere. In ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC CONFERENCE SERIES (Vol. 213, pp. 263-284). ASP; 1999