



Mikrometeorite

Sternenstaub für jeden



Wo verstecken sich Mikrometeorite?

Die winzigen kosmischen Besucher sind seltener im Vergleich zu terrestrischen Partikeln, als diese Bildkollage vermuten lässt. Die vom Autor Thilo Hasse (TH) als Mikrometeorite (MM) identifizierten Objekte sind hier durch das Kürzel THMM gekennzeichnet. Ihre typischen Durchmesser betragen einen bis wenige zehntel Millimeter. Es ist keineswegs einfach, Mikrometeorite von der überwiegenden Zahl der von Menschen gemachten Partikel zu unterscheiden, die unter anderem durch industrielle Prozesse entstehen können. Auch deshalb haben sich Wissenschaftler bei der Erforschung der kosmischen Partikel jahrzehntelang auf Gebiete fernab jeder Zivilisation beschränkt.

Täglich treffen etwa 100 Tonnen außerirdischen Staubs auf unseren Planeten. Viele dieser Partikel rieseln als Mikrometeorite auf die Erdoberfläche. Es ist möglich, die kosmische Materie auch im städtischen Umfeld aufzuspüren. Beim Identifizieren hilft eine frei verfügbare Anwendung auf der Basis künstlicher Intelligenz. Und im Rahmen von Citizen-Science-Projekten können alle Interessierten wissenschaftlich mitwirken.

Im Jahr 2009 hat der norwegische Berufsmusiker Jon Larsen ein Schlüsselerlebnis: Auf dem weiß gedeckten Frühstückstisch im Garten liegt plötzlich ein winziger schwarzer Krümel, der kurz zuvor noch nicht da war. Sollte dieses Steinchen soeben vom Himmel gefallen sein? Milliarden Jahre alter Sternenstaub? Zwar geht das Fundstück kurz darauf wieder verloren, doch der Gedanke lässt ihn nicht mehr los. Von nun an sammelt er Staub rund um den Erdball, wann immer er mit seinem Jazz-Quartett »Hot Club de Norvège« auf Tournee ist. Im Jahr 2015 folgt dann die Sensation: Jon Larsen findet den ersten Mikrometeoriten im urbanen Umfeld gleich vor seiner Haustür, den er gemeinsam mit Wissenschaftlern verifizieren kann (siehe SuW 6/2020, S. 42).

Weitere sechs Jahre später sind weltweit hunderte Mikrometeoritenjäger unterwegs auf der Suche nach den kosmischen Sphärulen. Viele von ihnen tauschen ihre Erfahrungen in der dafür eingerichteten Facebook-Gruppe unter www.facebook.com/groups/mikrometeoriten aus oder fragen dort um Unterstützung an. Immer mehr frei zugängliche Informationen und hochaufgelöste Fotos der Partikel sowie die wachsende Expertise unter den Mikrometeoritenjägern ermöglichen inzwischen vielfach schon eine Bestätigung der kosmischen Herkunft ohne teure wissenschaftliche Geräte. Die überwiegende Mehrzahl aller bisher gefundenen Mikrometeorite sind weniger als einen halben Millimeter groß; sie haben typische Durchmesser von 100 bis 400 Mikrometern. Ein Mikrometer (1 µm) ist der tausendste Teil eines Millimeters.

Die große Herausforderung liegt nun darin, unter dem Stereomikroskop mögliche Kandidaten von denjenigen Teilchen zu unterscheiden, die definitiv nicht aus dem Weltall stammen: natürlich vorkommende Partikel wie Fulgurite, also Schmelzprodukte, die beim Einschlag eines Blitzes (lateinisch: Fulgur) entstehen, vor allem aber von Menschen gemachte Teilchen, wie sie bei Schweiß- und anderen Bauarbeiten, in Hochöfen, Feuerwerken oder durch den Bremsabrieb diverser Fahrzeuge freigesetzt werden. Die Menge des irdischen Staubs übersteigt diejenige des kosmischen Staubs millionenfach.

Der Schlüssel zum Erkennen der Mikrometeorite liegt darin, dass sie abhängig von ihrer originären stofflichen Zusammensetzung und der Temperatur, der sie beim Eindringen in die Erdatmosphäre ausgesetzt waren, charakteristische Merkmale aufweisen: Durch die Wechselwirkung mit der Lufthülle unseres Heimatplaneten kommt es teilweise oder meist gänzlich zum Aufschmelzen der Partikel mit anschließender Rekrystallisation. Dieser Prozess verleiht den Partikeln ihr besonderes Aussehen. Dementsprechend lassen sich Mikrometeorite unterschiedlichen Typenklassen zuordnen.

Wie findet man kosmische Staubkörnerchen?

Auch wenn Mikrometeorite statistisch betrachtet überall gleichermaßen häufig auf die Erde niederfallen, so hat man nur an ausgewählten Orten gute Chancen, diese auch zu finden. In einer von Menschen bewohnten Umgebung eignen sich diejenigen Stellen am besten, an denen der Eintrag von Material nur über die Luft stattfindet und wo sich dieses Material über lange Zeiträume hinweg ansammeln kann, beispielsweise auf Flachdächern oder in nicht zu gut drainierten Dachrinnen.

Auf großen industriellen Flachdächern kommen schnell 100 Kilogramm oder mehr an Material zusammen. Dieses setzt sich in erster Linie aus Sandkörnern, organischen Partikeln, industriellen Kügel-

chen und mitunter auch Verwitterungsprodukten vom Dach selbst zusammen. Darin verstecken sich vielleicht einige dutzend bis wenige hundert Mikrometeorite mit einem Gesamtgewicht in der Größenordnung von etwa einem Milligramm.

Wegen der geringen Anzahl der kosmischen Partikel in den Dachablagerungen muss man das Material zunächst vorfiltern, bevor man es durchsucht. Als Filter dienen unterschiedliche Methoden: Der Einsatz eines starken Magneten zur Extraktion magnetischer Teilchen, die Nutzung von Sieben zum Aussortieren zu großer oder zu kleiner Partikel und das Separieren der schweren, mineralischen von den leichteren, organischen Partikeln im Wasserbad.

Erst dann lassen sich unter dem Stereomikroskop in einer Probe von wenigen Gramm die Mikrometeorite herausuchen. Dazu muss man wissen, woran man diese optisch von den zahlreichen irdischen Teilchen unterscheiden kann. Einige Typen lassen sich leichter von den oft sehr ähnlichen industriellen Kügelchen unterscheiden als andere. Manche Typen von Mikrometeoriten, bekannt aus Sammlungen aus der Antarktis, werden bislang im städtischen Gebiet nur selten oder gar nicht gefunden beziehungsweise erkannt.

Um zu erlernen, wie sich die aus dem Weltraum stammenden Partikel zwischen den Kügelchen irdischen Ursprungs erkennen lassen, bedarf es einiger Geduld und Ausdauer, denn oft sind es

Erfolgreiche Klassifizierung

Die Tabelle enthält die Identifikationswahrscheinlichkeiten der von einer Bilderkennungssoftware als Mikrometeorite (MM) beziehungsweise Nicht-Mikrometeorite (Nicht-MM) klassifizierten Objekte. Die beiden Gruppen von Ergebnissen basieren auf einem Datensatz von 296 der Software unbekanntem Testbildern (Modell 1, links) sowie einem weiteren Datensatz mit 366 Testbildern (Modell 2, rechts). Mit Modell 1 wurden 81 Prozent der Nicht-Mikrometeorite (Nicht-MM) vom Programm korrekt als solche erkannt; bei den echten Mikrometeoriten (MM) sind es sogar 96 Prozent. Nur vier Prozent der Nicht-MM wurden mit Modell 1 fälschlicherweise als MM klassifiziert; umgekehrt wurden 19 Prozent der MM falsch als Nicht-MM eingestuft. Mit beiden Modellen wurde das Ziel erreicht, mehr als 90 Prozent der MM korrekt zu klassifizieren.

wahre Eigenschaft →	Modell 1		Modell 2	
	Nicht-MM	MM	Nicht-MM	MM
klassifiziert als ↓				
Nicht-MM	81%	19%	84%	16%
MM	4%	96%	7%	93%

nur schwache Erkennungsmerkmale, auf die man unter dem Stereoskop zurückgreifen kann. Hilfreich sind die zunehmend im Internet frei verfügbaren Lichtfotografien und Informationen. Allerdings kursieren dort auch zahlreiche Fehlinterpretationen. Doch neuerdings können auch Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) das Erkennen unterstützen.

Verifikation mittels künstlicher Intelligenz

Wie bereits dargestellt, erfordert die korrekte Verifikation von Mikrometeoriten entsprechendes Fachwissen und eine längere Auseinandersetzung mit der Thematik, um Mikrometeorite von Nicht-Mikrometeoriten unterscheiden zu können. Im Folgenden wird ein KI-basierter Ansatz vorgestellt, der Maschinelles Lernen (ML) für die MM-Erkennung verwendet und eine erste Orientierung bietet.

Im Bereich des maschinellen Lernens hat die Bildererkennung im letzten Jahrzehnt große Fortschritte gemacht. Spezielle neuronale Netze – die Convolutional Neural Networks (CNNs) – stellen heute den Goldstandard in der Bildererkennung dar. Damit liegt es nahe, mittels eines entsprechenden CNN zu versuchen, Mikrometeorite (MM) von Nicht-Mikrometeoriten (Nicht-MM) zu unterscheiden. CNNs lernen häufig mit Standardanwendungen basierend auf Bildern aus dem Internet. Viel lehrreicher und – wie sich im Folgenden zeigen wird – viel nützlicher ist es, neue Anwendungsgebiete zu erschließen, die auch einen Mehrwert für die Praxis bieten. In zwei Lehrveranstaltungen des Koautors Waldhör an der FOM Hochschule für Oekonomie und Management in Nürnberg entwickelten die Studierenden Carina Ditzl, Stephan Smith, Carsten Spitznagel und Marco Weingart sowie Marcel Merkel und Robin Voigt zwei unterschiedliche ML-Modelle, die eine solche Erkennung ermöglichen. Ihr Ziel war es, Mikrometeorite mit einer 90-prozentigen Sicherheit identifizieren zu können.

Der beinahe wichtigste Schritt in der Erarbeitung eines ML-Modells ist die Datensammlung, in diesem Fall die Fotografien von Mikrometeoriten und Nicht-Mikrometeoriten. Eine Bildklassifizierung funktioniert dann sehr gut, wenn umfangreiches Bildmaterial zur Verfügung steht: Normal sind hier Größenordnungen von 50000 Bildern pro Klasse aufwärts. Dies war in diesem Fall illusorisch, da geschätzt derzeit etwa 10000 Funde aus dem urba-

Beispiele einer Verifikation

Hier wurden drei CNN-Modelle mit unterschiedlichen Parametern zur Bilderkennung angewendet. Die Zahlenangaben zu den Modellen 1 bis 3 können grob als Wahrscheinlichkeiten interpretiert werden: Die Werte unter »+« und »-« bezeichnen die Wahrscheinlichkeit für eine Klassifikation als Mikrometeorit (MM) beziehungsweise Nicht-MM. »Vote« betrachtet das Gesamturteil unter Einbeziehung aller drei Modelle: MM (»True«) oder Nicht-MM (»False«). Die Spalte gibt zudem an, wie viele der drei Modelle für einen MM votierten. Beispielsweise bedeutet »1/3«, das nur eines der Modelle dafür votierte. Ebenfalls angegeben ist die Wahrscheinlichkeit für eine Klassifikation als Nicht-MM (-) beziehungsweise MM (+). Bild 1 zeigt gemäß Expertenurteil keinen Mikrometeoriten (MM); das Partikel wurde jedoch als solches klassifiziert (»True«). Die Bilder 2 (Nicht-MM), 4 und 5 (MM) wurden korrekt klassifiziert. Bild 3 zeigt einen MM, der jedoch nicht als solcher erkannt wurde (»False«); vermutlich weicht er durch die abgeschnitten wirkende Fläche zu sehr von den durch die Erkennungssoftware erlernten MMs ab.

Nr.	Bild	Expertenurteil	Modell 1		Modell 2		Modell 3		Modell 1-3 Vote
			-	+	-	+	-	+	
1		Nicht-MM	0,162	0,838	0,269	0,731	0,269	0,731	MM 3/3 -0,23 +0,77
2		Nicht-MM	0,645	0,355	0,731	0,269	0,270	0,730	Nicht-MM 1/3 -0,55 +0,45
3		MM	0,848	0,152	0,731	0,269	0,269	0,731	Nicht-MM 1/3 -0,62 +0,38
4		MM	0,156	0,844	0,269	0,731	0,269	0,731	MM 3/3 -0,23 +0,77
5		MM	0,414	0,586	0,269	0,731	0,269	0,731	MM 3/3 -0,32 +0,68

(1 und 2) Jesus Cejles, (3) Scott Peterson, (4 und 5) Thilo Hasse

nen Raum existieren dürften und nicht von allen Bildern existieren. Durch die Bereitschaft zum Mitwirken aus der Mikrometeoriten-Community konnten zwar insgesamt 1262 MM- und 731 Nicht-MM-Bilder gesammelt werden, dies entspricht jedoch nicht der Menge von Bildern, die eine gute Klassifizierungsleistung ermöglichen würde. Mit diversen Tricks wie dem Rotieren der Bilder lässt sich deren Anzahl aber vervielfachen.

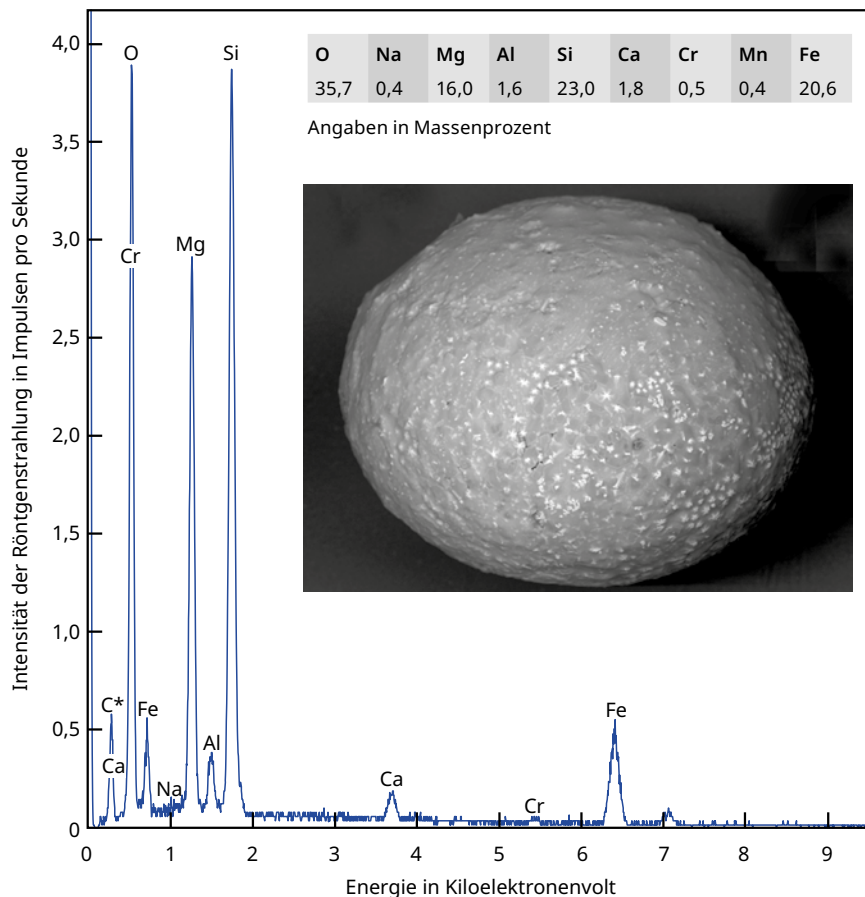
Die Bilder werden optional in einem weiteren Schritt aufbereitet. Beispielsweise werden Hintergrundrauschen und Beschriftungen entfernt, eine einheitliche Hintergrundfarbe eingefügt und auf eine Größe von 141 × 141 (128 × 128) Pixel skaliert. Dies soll vor allem vermeiden, dass das Modell nichtrelevante Aspekte wie Beschriftungen erlernt und damit auf Grund dieser Merkmale die Bilder klassi-

fiziert. Nachdem dieser Schritt erfolgreich abgeschlossen worden ist, kann das Modell trainiert werden. Für jede Aufnahme liegt nun eine binäre Klassifikation vor: MM oder Nicht-MM.

Ohne auf die Details einzugehen, sei hier das weitere Vorgehen kurz skizziert. In mehreren Schritten werden Filter und Faltungen auf die Bilder angewendet. Diese werden in ein vollständig verbundenes neuronales Netzwerk gespeist, das als Ergebnis in zwei Ausgabeneuronen die Klassenzugehörigkeit zwischen 0 und 1 ausgibt. Dazu werden alle Bilder in Trainings- und Testbilder eingeteilt. Das Modell lernt anhand der Trainingsbilder, generiert hiermit ein Modell und wendet anschließend sein Wissen (Modell) auf die Testbilder an – und somit auf Bilder, die das Modell noch nie gesehen hat. Um ein optimales Modell zu ermitteln, werden

Fingerabdruck eines Mikrometeoriten

Für das mit einem Rasterelektronenmikroskop untersuchte kosmische Partikel (kleines Bild) ergibt sich ein annähernd chondritisches Elementenspektrum (Grafik), gemessen an der Partikeloberfläche. Entlang der X-Achse ist die Energie der Röntgenstrahlung in Kiloelektronenvolt (keV) aufgetragen. Sie lässt Rückschlüsse zu, um welches Element es sich handelt. Die Y-Achse gibt die Intensität der Röntgenstrahlung in Impulsen pro Sekunde an; sie gibt Aufschluss über die Menge des Elements. Typisch sind ein hoher Peak von Sauerstoff (O), hohe Peaks von Magnesium (Mg) und Silizium (Si), ein niedrigerer Peak von Aluminium (Al) dazwischen, ein ausgeprägter Peak von Eisen (Fe) und ein kleiner Peak von Kalzium (Ca). Oft, aber nicht immer erkennbar, sind auch Spitzen von Chrom (Cr) und Nickel (Ni) bei 7,5 keV. Andere nicht beschriftete Maxima sind bereits genannten Elementen zuzuordnen. Der im Diagramm angezeigte Kohlenstoff (C*) entstammt der für die Analyse notwendigen elektrisch leitfähigen Bedampfung der Probe und ist nicht Bestandteil des Mikrometeoriten selbst.



21. Mai 2022
Zürich

Spektrum LIVE
Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft

SPEKTRUM-LIVE-VERANSTALTUNG

Flug im Space- oder Flugsimulator & Vortrag Risk Management im Cockpit

Seien Sie einmal selbst Pilotin oder Pilot bzw. Astronautin oder Astronaut und fliegen Sie im B777-Flugsimulator, und/oder erforschen Sie im Space-Simulator Galaxien, Sternennebel und Planeten. Genießen Sie einen spannenden Vortrag zum Thema »Risk Management im Cockpit« sowie ein Apéro-Catering, nehmen Sie an einem Wettbewerb teil und tauschen Sie sich mit einem aktiven B777-Kapitän in fachkundigen Gesprächen aus.

Spektrum-Live-Veranstaltung in Kooperation mit Fly & Race Simulations GmbH

Infos und Anmeldung:
[Spektrum.de/live](https://www.spektrum.de/live)

FLY & RACE SIMULATIONS GMBH

sehr viele Modelle mit unterschiedlichen Parametern erzeugt, und das beste Modell wird dann zum Klassifizieren verwendet.

Die Ergebnisse der Klassifizierung mit den Testbildern sind sehr aussagekräftig und lassen sich tabellarisch in Form einer so genannten Konfusionsmatrix darstellen (siehe »Erfolgreiche Klassifizierung«, S. 82). Das Ziel, mehr als 90 Prozent aller MMs korrekt als solche zu erkennen, wurde klar erreicht beziehungsweise sogar übertroffen. Man sieht auch, dass die Erkennung der Nicht-MM mit knapp über 80 Prozent etwas schlechter ausfällt. Ein Grund hierfür liegt im ungleichen Verhältnis von MM- zu Nicht-MM-Bildern. Für das Trainieren standen viermal mehr MM- als Nicht-MM-Bilder zur Verfügung, was die schlechtere Erkennungsquote erklärt. Könnte man diese in gleich großer Anzahl bereitstellen, so würde auch die Erkennungsrate ansteigen.

Bei weiteren Tests wurden neue Bilder aus der Facebook-Gruppe »Mikrometeoriten« dem System vorgelegt und die Resultate mit Beurteilungen durch Experten verglichen. Zusätzlich wurden ein anderer Ansatz mit »Fake-MM-Bildern« erprobt: Hierbei erzeugt ein Generator (»Fälscher«) MM-Bilder, und ein Diskriminator (»Polizist«) versucht, Fakes von Nicht-Fakes zu unterscheiden. Beide schaukeln sich hoch, bis eine bestimmte Bildqualität erreicht wird. Erwartungsgemäß wurden hierbei die Fake-Bilder auch als MM klassifiziert (siehe »Beispiele einer Verifikation«, S. 83).

Auf der Website www.sternwarte.at/mm-verify ist es möglich, eigene Bilder hochzuladen und eine KI-basierte Einordnung der Bilder zu erhalten. Man sollte die Bewertung der KI als Unterstützung bei der Verifizierung betrachten und ihr nicht blind vertrauen, sondern – vor allem in problematischen Fällen – auch auf Expertenmeinungen zurückgreifen. Zu bedenken ist auch, dass die Klassifikation von der Güte der Aufnahme abhängt. Zwar wird das Bild vom Modell auf 141×141 beziehungsweise auf 128×128 Pixel (je nach Modell) skaliert, dennoch sollte die Originalaufnahme eine höhere Qualität aufweisen. Vor allem Bilder mit nicht ausreichender Tiefenschärfe können hier Probleme bereiten, aber auch für menschliche Experten ist eine korrekte Identifikation in solchen Fällen schwierig.

Es bleibt festzuhalten, dass sich die Methoden des maschinellen Lernens sehr gut eignen, um Mikrometeorite zu erkennen.

Damit lassen sich Bilder, die von der KI eindeutig als MM oder Nicht-MM klassifiziert wurden, von einer weiteren zeitaufwändigen Begutachtung durch Experten ausschließen, was viel Zeit spart. Verbessert werden können die Modelle durch eine erhöhte Anzahl von Bildern, insbesondere durch Nicht-Mikrometeorite, sowie durch Bilder, die eine geringere Tiefenschärfe aufweisen als diejenigen, die derzeit die Basis der Auswertung bilden.

In einem weiteren Schritt sollen eine automatische Segmentierung einzelner Stäube aus Mikroskopaufnahmen heraus erfolgen und eine anschließende automatische Verifizierung der einzelnen Objekte. Ein Fernziel wäre auch, Mikrometeorite mittels KI zusätzlich nach ihrem Typ zu klassifizieren. Ob dies möglich ist, hängt von der Anzahl der Bilder pro Typ ab. Die aktuelle Anzahl ist dafür nicht ausreichend. Weitere Verbesserungen lassen sich durch eine Erhöhung der Pixelanzahl, etwa auf 512×512 oder 1024×1024 , erzielen. Hierfür reicht aber auch die derzeit zur Verfügung stehende Rechenleistung zum Trainieren der Bilder nicht aus.

Verifikation in der Wissenschaft

Für eine zweifelsfreie Bestimmung und tiefergehende Analyse sowie zum Identifizieren der Exemplare ohne deutliche Erkennungsmerkmale ist ein Rasterelektronenmikroskop erforderlich. Spätestens hier kommen Forschungseinrichtungen ins Spiel, da in der Regel nur sie solche Geräte zur Verfügung haben. Im Vakuum wird dort die Probe mit einem Elektronenstrahl beschossen. So lassen sich zum einen sehr hochauflösend die Oberflächen der Mikrometeorite erfassen und zum anderen deren Elementzusammensetzungen bestimmen (siehe »Fingerabdruck eines Mikrometeoriten«). Letztere sind bei kosmischen Partikeln auffällig homogen. Man spricht von chondritischer Zusammensetzung und meint damit die Mengenverhältnisse der

In sieben Schritten zum eigenen Mikrometeoriten

Bei der systematischen Suche nach kosmischen Partikeln in einem urbanen Umfeld gibt es vieles zu beachten, denn hier lauern Fehler, die zum Misserfolg führen können. Über die Fehlerquellen, die Vorgehensweise und die benötigte Ausrüstung informiert der Experte Thilo Hasse ausführlich auf seiner neuen Website www.micrometeorites.org.

Probenahmestandort ermitteln



Betreuungsgenehmigung einholen



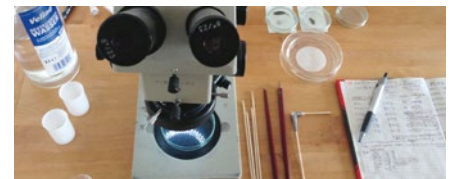
Beprobung vornehmen



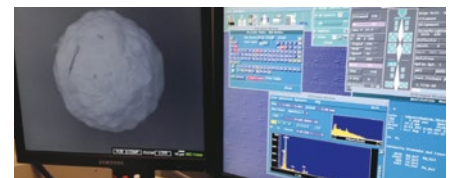
Probe aufbereiten



Probe nach Mikrometeoriten durchsuchen



Funde charakterisieren und verifizieren



Funde dokumentieren und aufbewahren



Thilo Hasse

Elemente – so, wie sie in der frühen Wolke unseres Sonnensystems im Bereich der terrestrischen Planeten vorgeherrscht haben.

Die meisten Kleinstpartikel, die von kleinen Asteroiden oder von Kometen stammen, waren bis heute keinem Prozess zur Trennung schwerer und leichter Elemente ausgesetzt, wie dieser in Planeten mit einem flüssigen Inneren stattfindet. Auch wenn einige flüchtige Elemente beim Durchtritt der Partikel durch die Erdatmosphäre teilweise oder vollständig verdampfen, so bleibt insgesamt eine annähernd chondritische Zusammensetzung erhalten. Sie wird am Rasterelektronenmikroskop zu einem hilfreichen Bestimmungsmerkmal für Mikrometeorite.

Sammelst du noch oder forschst du schon?

Das Entdecken von außerirdischen Staubpartikeln vor der eigenen Haustür übt auf viele Menschen eine große Faszination

aus. Doch lässt sich damit auch Wissenschaft betreiben? Bisherige Erkenntnisse über die Zusammensetzung und die Prozesse, denen kosmische Teilchen innerhalb unseres Sonnensystems unterliegen, stammen von wissenschaftlichen Expeditionen zur Bergung von Mikrometeoriten in abgelegenen Gebieten der Erde – vor allem in der Antarktis –, vom Einfangen kleinster Staubpartikel aus dem interplanetaren Raum (englisch: Interplanetary Dust Particles, IPD) mittels spezieller Flugzeuge in der Stratosphäre, von Weltraummissionen, die Staub von Kometen, Asteroiden, oder von anderen Planeten analysieren oder von modellierten Prozessen sowie von theoretischen Überlegungen.

Mikrometeorite in urbanen Gebieten stellen eine neue Informationsquelle dar, die von vielen engagierten Personen erschlossen werden kann. Tatsächlich haben diese Mikrometeorite auch eini-

ge Vorteile gegenüber denen, die beispielsweise aus dem ewigen Eis oder aus Moränenablagerungen der Antarktis geborgen werden. So ist das Alter der Fundorte – nämlich der Hausdächer – weitgehend bekannt und vergleichsweise sehr gering. Entsprechend gelten die bei uns gefundenen Mikrometeorite als »frisch« und weisen kaum Verwitterungsspuren auf. Dies macht es einfacher, sie als kosmische Materie zu erkennen, und zwar allein schon durch die Analyse ihrer Oberfläche und ohne die sonst üblichen Querschnitte und der damit verbundenen Zerstörung der Proben.

Zudem ist das geringe terrestrische Alter für manche weitergehenden Analysen von Vorteil, zum Beispiel bei der Sauerstoffisotopenanalyse. Diese erlaubt Aussagen über die Zeiträume, in denen die Partikel im Weltraum harter Sonnenstrahlung ausgesetzt waren, und liefert so Indizien über deren Entstehungsort.

Fundstücke aus dem All

Hier sehen wir Mikrometeorite mit nur einigen Jahren irdischer Verwitterungszeit, gefunden auf Hausdächern (obere Reihe), und Mikrometeorite mit tausenden Jahren Verwitterungszeit gefunden in Ablagerungen am Mount Raymond in der Antarktis (untere Reihe). Die »frischen« urbanen Mikrometeorite lassen aufschlussreiche Details erkennen: An der Oberfläche von THMM90 glänzt ein kaum verwitterter heller Metalltropfen. THMM288 enthält große Olivinkristalle in einer glasigen Matrix. THMM552 zeigt einen lang ausgezogenen Fortsatz mit differenzierter Zusammensetzung der kristallisierten Schmelze, THMM550 einen kleinen spitzen Fortsatz, der auf eine geringe Schmelztemperatur hindeutet.

Bei THMM614 fällt eine scharfe Kante auf, an welcher der hintere Teil des Partikels im noch flüssigen Zustand möglicherweise abgesprengt worden ist. THMM138 ist ein weniger stark aufgeschmolzenes Partikel, das keine rundliche Tropfenform ausgebildet hat, bevor es wieder erkaltete und kristallisierte. RAY35, RAY65 und RAY44 weisen terrestrische Kristallumbildungen auf: Eine Gelbfärbung weist auf das Kalium-Eisen-Sulfatmineral Jarosit hin. Bei RAY35 ist ein Metalltropfen vermutlich durch Verwitterung abgefallen. RAY65 und RAY44 weisen Löcher auf, wo unbeständige Minerale verwittert sind. Alle vier Partikel unten lassen kaum ursprüngliche kristalline Strukturen an ihrer Oberfläche erkennen.



Thilo Hasse

Dass schon während der Bildung unseres Sonnensystems auch einzelne prä-solare Minerale, also Sternenstaub von unterschiedlichen Ursprungsternen, in die Gesteinskörper eingebaut wurden, lässt sich heute an unterschiedlichen Isotopenverhältnissen verschiedener Elemente erkennen. Ihre Analyse wird ebenfalls für die Herkunftsbestimmung und Zuordnung der vielfältigen Körper im Sonnensystem herangezogen.

Auf Grund des geringen terrestrischen Alters der Mikrometeorite auf Dächern sind oft Charakteristika erhalten geblieben, die bei den seit Jahrtausenden auf der Erde verweilenden Partikeln meist längst der Verwitterung beziehungsweise Umwandlungsprozessen zum Opfer gefallen sind. Die meist stärkere Verwitterung der von wissenschaftlichen Expeditionen geborgenen Mikrometeorite, vor allem an ihren Oberflächen, ist auch ein Grund dafür, dass die Klassifikation und Charakterisierung in der Wissenschaft bislang vorrangig mit Hilfe von Querschnitten der Partikel vorgenommen werden. Durch das Erschließen der Mikrometeorite mit geringem irdischen Alter könnte dem Charakterisieren anhand ihrer Oberflächenmerkmale eine größere Bedeutung zukommen.

Bürgerwissenschaftler engagieren sich

Auch innerhalb der Forschung besteht ein großes Interesse, dieses junge Arbeitsfeld zu erschließen. So werden Citizen-Science-Projekte aufgebaut, um interessierte Bürger einzubeziehen, und Experten, die sich in ihrer Freizeit damit beschäftigen, kooperieren mit Wissenschaftlern. Bereits im Jahr 2019 hat das Museum für Naturkunde in Zusammenarbeit mit der Freien Universität in Berlin ein solches erstes Projekt durchgeführt: Hierbei war die Berliner Bevölkerung aufgerufen, die Fachwissenschaftler bei der Suche nach Mikrometeoriten zu unterstützen. Aus einer Vielzahl von Anmeldungen wurden 20 Interessierte ausgewählt, die nach einer kurzen Einführung selbstständig den zuvor auf Berliner Hausdächern gesammelten Staub nach Mikrometeoriten durchsuchten. Eine Ausweitung des Projekts steht in Aussicht.

Seit Anfang 2020 besteht an der Walter-Hohmann-Sternwarte (WHS) in Essen eine Fachgruppe »Mikrometeoriten« (siehe SuW 7/2020, S. 88). Auch hier soll ein Citizen-Science-Projekt auf-

gesetzt werden, bei dem sich die Bürgerwissenschaftler je nach Interesse unterschiedlich weit einbringen können. So wird an der WHS derzeit ein Labor eingerichtet, das neben Mikroskopen auch eine Fotostation bereithält. Damit lassen sich Makroaufnahmen der einzelnen Mikrometeorite mit extrem hoher Tiefenschärfe erstellen. Mit benachbarten Universitäten und einem privaten Institut stehen Kooperationspartner mit Rasterelektronenmikroskopen zur Verfügung, die weitergehende Untersuchungen ermöglichen.

Jon Larsen ruft weltweit alle Interessierten dazu auf, sich an der Suche nach Mikrometeoriten zu beteiligen. So trage die Forschung darüber dazu bei, mehr über die Entstehung unseres Sonnensystems, der Planeten und nicht zuletzt des Lebens auf der Erde zu erfahren. Jon Larsen selbst ist Ende 2019 aus seiner Musikband ausgestiegen, um sich gänzlich den Mikrometeoriten widmen zu können. Die Arbeit hat gerade erst begonnen. ■



Thilo Hasse ist promovierter Landschaftsökologe und arbeitet als Produktmanager in einem Verlag. Er widmet sich seit einigen Jahren als Gastwissenschaftler am Museum für Naturkunde in Berlin dem Thema Mikrometeorite und betreibt dazu eine Internetseite.



Klemens Waldhör ist Professor für Wirtschaftsinformatik an der FOM Hochschule für Oekonomie und Management in Nürnberg. Er beschäftigt sich in seinen wissenschaftlichen Arbeiten mit künstlicher Intelligenz und Machine Learning. Seit seiner Jugend ist er begeisterter Amateurastronom und Mitglied der Kepler-Sternwarte in Linz.



Peter Gärtner ist Diplom-Ingenieur der Informatik und Mitglied der Walter-Hohmann-Sternwarte in Essen. Seit Anfang 2020 leitet er dort die Fachgruppe »Mikrometeorite«. Fast zeitgleich gründete er die Facebook-Gruppe »Mikrometeoriten«, der MM-Interessierte aus aller Welt angehören.

Literaturhinweise

- Binnewies, S., Sparenberg, R.:** Geheimnisvolles Leuchten: Das Zodiakallicht. Sterne und Weltraum 10/2021, S. 68–74
- Ditl, C. et al.:** Erkennung und Klassifikation von Mikrometeoriten mit KI / Image Recognition, FOM Hochschule für Oekonomie und Management, 2021
- Genge, M. J. et al.:** The classification of micrometeorites. Meteoritics and Planetary Science 43, 2008
- Genge, M. J. et al.:** An urban collection of modern-day large micrometeorites: Evidence for variations in the extraterrestrial dust flux through the Quaternary. Geology 45, 2017
- Mannel, T. et al.:** Kometenstaub unter der Lupe. Sterne und Weltraum 3/2017, S. 22–27
- Merkel, M., Voigt, R.:** Bildverarbeitung/analyse – Mikrometeoriten erkennen. Seminararbeit. FOM Hochschule für Oekonomie und Management, 2021
- Stork, R.:** Sternenstaub auf dem Dach. Sterne und Weltraum 6/2020, S. 42–46
- Suttle, M. D. et al.:** Evaluating urban micrometeorites as a research resource – A large population collected from a single rooftop. Meteoritics and Planetary Science 56, 2021
- Trieloff, M. et al.:** Die Jagd nach interstellarem Staub. Sterne und Weltraum 3/2018, S. 24–35

Dieser Artikel und Weblinks:

www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1981657

W I S Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1421039