

Der Meteorit Erxleben und die frühe Kosmochemie

Prof. Dr. habil. Siegfried Niese, Am Silberblick 9, 01723 Wilsdruff
<siegfried@niese-mohorn.de>

Vor 200 Jahren, am 14. April 1812, war bei Erxleben ein Meteorit auf ein Feld gefallen, der von in der Nähe arbeitenden Landarbeitern gefunden wurde.¹ Gleich drei Chemiker analysierten ihn – ein früher Höhepunkt der Untersuchung von Meteoriten. Dieser Anlass lädt dazu ein, sich mit dem Wirken jener Chemiker zu beschäftigen, die vor zwei Jahrhunderten chemische Analysen von Meteoriten mit den Methoden der Gravimetrie ausgeführt haben. Sie wurden meist von Apothekern durchgeführt, die später an Universitäten lehrten, und sie konnten dazu die bisher bei der Analyse von Metallen, Gesteinen und Mineralen gesammelten Erfahrungen nutzen. Diese Analysen ermöglichten – ungeachtet der dem damaligen Entwicklungsstand der Analytik geschuldeten Grenzen – die Unterscheidung von Körpern, die vom Himmel gefallen waren, auf natürliche Weise auf der Erde gebildet oder durch Mensch enhand geschaffen wurden. Sie lieferten die ersten entscheidenden Beweise für die kosmische Herkunft der später als Meteoriten bezeichneten Objekte und markieren den Anfang der Kosmochemie. Wichtig erscheint mir dabei, darauf hinzuweisen, dass die Zeitspannen zwischen dem beobachteten Fall, der durchgeführten Analyse und der Veröffentlichung der Ergebnisse in der Zeit um 1800 aus heutiger Sicht meist sehr kurz waren. Den Abschluss der Untersuchung bildet ein Vergleich historischer Analyseergebnisse des Meteoriten Erxleben mit Ergebnissen, die mittels des Verfahrens der Neutronenaktivierungsanalyse gewonnen wurden.

Die ersten chemischen Analysen von Meteoriten

Die ersten chemischen Analysen von Körpern, die man später als Meteoriten erkannt hat, wurden im letzten Drittel des 18. Jahrhunderts durchgeführt. Anfang des 19. Jahrhunderts war eine Reihe von Steinmeteoriten gefallen, die man bald danach analysierte, auch wenn man sich noch darüber stritt, ob sie irdischer oder kosmischer Herkunft waren. Als chemisch untrennbare Bestandteile, d.h. als „Elemente“ wurden neben einer Anzahl von Metallen und Nichtmetallen die da-

mals noch nicht chemisch trennbaren Erden angesehen, wobei die Oxide des Magnesiums, Aluminiums, Siliciums und Calciums als Bittersalzerde oder Magnesia, Alaunerde oder Tonerde, Kieselerde und Kalkerde bezeichnet wurden. Die Elemente Calcium und Magnesium waren erst 1808, Silicium und Aluminium erst 1824 und 1825 entdeckt worden. In der Gesteinsanalyse werden auch heute noch Gehalte von Hauptbestandteilen als Oxide angegeben. Für die Analyse wurde nach dem Zerkleinern der Probe die metallische Komponente mit einem Magneten abgetrennt; Metall und Gestein wurden auch meist getrennt aufgelöst. In der Lösung des Metalls wurden Eisen und Nickel bestimmt. In der Lösung der Minerale wurden durch Fällungsverfahren die einzelnen Erden isoliert, zum Oxid verglüht und gewogen. Die mit einem Magneten abtrennbaren Eisenkörner gab man im Ergebnis als gediegenes Eisen an, das aus dem Gesteinsmaterial abgetrennte dagegen als Eisenoxid. Die Eisenkörner in der Materialprobe sah man dann bald als ein charakteristisches Merkmal eines Meteoriten an. Oft wurden die Gehalte im Metall und im Gesteinsmaterial getrennt angegeben.

Am 15. April 1769 wurden von dem französischen Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) die Ergebnisse der chemischen Analyse einer Probe des Meteoriten Luce, eines in Sarthe in Frankreich am 13. September 1768 gefallenen Gesteinskörpers, vor der *Académie des Sciences* in Paris vorgetragen. Im Ergebnis dieser ersten chemischen Analyse eines Meteoriten wurden 8,5% Schwefel, 36% Eisen und 55,5% verglasbare Erde gefunden. In der 1777 publizierten Arbeit sah man den Stein für Schwefelkies an, der unter der Rasenerde vom Blitz getroffen und teilweise aufgeschmolzen worden war.² Meteoriten sah man damals als durch Blitzeinschlag verändertes oder von Vulkanen ausgeworfenes irdisches Material an. Aus der chemischen Analyse konnte man dabei auch nicht auf eine außerirdische Herkunft schließen.

1794 publizierte der deutsche Physiker und Astronom Ernst Florens Chladni (1756-1827) seine Schrift *Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen*. Darin wies er besonders am Beispiel des Krasnojarkser Meteoriten nach, dass Meteoriten außerirdischen Ursprung sein mussten. Die von Chladni aus einer Fülle von Überlieferungen und Beobachtungen von Feuerbällen und auf die Erde gefallenen Objekten durch Ausschluss anderer Möglichkeiten entwickelte Vorstellung von einer kosmischen Herkunft war damals nicht von allen Gelehrten anerkannt. Deshalb wurde auch in den Folgejahren von einigen analysierten Meteoriten noch eine irdische Herkunft angenommen.³ Chladni bezog sich auch auf Eisenmassen, von denen zuerst 1576 Captain de Miraval von einer Expedition ins Landesinnere von Argentinien ein Stück mitbrachte, nämlich auf den sogenannten *Meson de Fierro* (Tisch aus Eisen). 1783 startete erneut

eine Expedition in das Gran Chaco, Gu alamba, zu einem Gebiet, das von der indigenen Bevölkerung *Campo del Cielo*, Feld des Himmels, genannt wurde, weil sie geglaubt haben soll, dass das Eisen vom Himmel gefallen sei. Aus den Einschlagkratern wurden bisher insgesamt ca. 100t geborgen.⁴

1799 analysierte der französische Chemiker Joseph Louis Proust (1754-1826) in Madrid ein von dort stammendes Stück Eisen und fand darin 10% Nickel. Er legte sich nicht fest, ob es natürliches oder künstliches Material war.⁵ Der hohe Nickelgehalt wurde dann bald als ein Charakteristikum für einen Meteoriten angesehen.

Die zweite Analyse eines Steinmeteoriten wurde im Jahr 1800 von Professor Barthold von der Centralschule des Oberrheins in Colmar publiziert. Er untersuchte eine Probe des so genannten Ensisheimer Donnersteins, eines am 7. November 1492 auf einem Feld hinter der Stadtmauer von Ensisheim vom Himmel gefallenen, ursprünglich 127kg schweren Meteoriten.⁶ Barthold bestimmte als erster die Oxide von Magnesium, Aluminium, Kalzium und Silizium, und fand dabei (in Masseprozenten):

| Eisen | Schwefel | Magnesia | Tonerde | Kalkerde | Kieselerde | Summe |
|-------|----------|----------|---------|----------|------------|-------|
| 20 | 2 | 14 | 17 | 2 | 42 | 97 |

Er bezeichnete seinen Stoff als eisenschüssigen Ton oder eine Eisenstufe mit Hornstein. Er sah darin keinen Grund für eine kosmische Herkunft des Steines. Während Barthold in Colmar 17% Tonerde fand, konnten die Pariser Chemiker Antoine Francois de Fourcroy (1755- 1809) und Louis-Nicolas Vauquelin (1763-1829) später keine, und der deutsche Chemiker Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) nur 1,5% Tonerde nachweisen. Man kann davon ausgehen, dass Barthold die Kieselerde im Trennungsgang zuerst nicht vollständig und dann mit der Tonerde ausgefällt hatte.

Als nächster berichtete 1802 der britische Chemiker Edward Howard (1774-1816) von bei Benares (jetzt: Varanasi, Indien) am 19. Dezember 1798 gefallenen Steinen.⁷ In einer Probe analysierte er getrennt den Schwefelkies, das gediegene Eisen, die jetzt als Chondren bezeichneten „erdartigen runden Kugeln“ und den „erdartigen Zement“, wobei er die in der Publikation ausführlich beschriebene Auftrennung dem Mineralogen Graf von Bournon zu danken hatte. Dieser hatte in den Meteoriten kleine Kügelchen entdeckt, die er „*curios globules*“ nannte, und den Eisenkies identifiziert.⁸ Mit der Entdeckung der Kügelchen hat er ein Charakteristikum der häufigsten Steinmeteoriten, der Chondriten, entdeckt.

Nach Howard waren die Gehalte an Kieselerde, Magnesia, Eisenoxid und Nickeloxid in den Kugeln und in dem Zement nahezu gleich. Howard analysierte weiterhin Proben der Meteoriten von Siena (gefallen am 16. Juli 1794), Yorkshire (am 13. Dezember 1795, 15 Uhr gefallen), den jetzt als Tabor (CZ) bezeichneten, bei Plan im damaligen Bechinger Kreis am 3. Juni 1733 gefallenen Meteoriten sowie Proben von den Eisenmeteoriten, die im *Campo del Cielo* (Argentinien), bei Krasnojarks in Sibirien und bei Ellbogen, jetzt Loket (CZ) gefunden worden waren. Er war der erste Chemiker, der die Theorie von Chladni akzeptierte, derzufolge die Meteoriten nicht von der Erde stammen, sondern vom Himmel gefallen sind und sich vor dem Fall als Meteore sicht- und hörbar gemacht haben.⁹

Der Berliner Apotheker und Chemiker Klaproth analysierte ebenfalls den Steinmeteoriten von Siena, trug die Ergebnisse vor der Akademie der Wissenschaften in Berlin am 27. Januar 1803 vor, untersuchte den Steinmeteoriten von Eichstädt (gefallen am 19. Februar 1785) und den Eisenmeteoriten von Agram (jetzt Zagreb, Kroatien). Klaproth, der die Aussagen von Howard bestätigte und erweiterte, hatte mit der Publikation gezögert, „weil man damals noch sehr geneigt war, das Faktum selbst für ein Märchen zu halten“, daraufhin sei ihm „Howard zugekommen“.¹⁰

In den Proben der Meteorsteine von Siena fanden die beiden Chemiker folgende Ergebnisse (in %):

| | Howard | Klaproth |
|-------------------------------------|---------------|-----------------|
| Gediegen Eisen | 4,8 | 2,25 |
| Nickelmetall | 1 | 0,60 |
| Schwarzes Eisenoxid | 31 | 25 |
| Bittersalzerde | 20 | 22,5 |
| Kieselerde | 42 | 44 |
| Braunsteinoxid | -- | 0,25 |
| Nickeloxid | 2 | -- |
| Verlust mit Schwefel und Nickeloxid | -- | 5,40 |

Klaproth, geboren am 1. Dezember 1743 in Wernigerode, und am 1. Januar 1817 in Berlin gestorben, entdeckte als Apotheker in Berlin 1789 die Elemente Uran und Zirkonium. Er wurde 1800 als Chemiker an die Akademie gerufen, wo er 1803 das Cer entdeckte. 1810 wurde er als Professor an die neu gegründete Berliner Universität berufen. Er gehörte zu den Begründern der chemischen Analytik, führte die Waage als analytisches Standardinstrument und die Regel „Trocknen bis zur Gewichtskonstanz“ ein, entwickelte originelle Trennungsgänge und präsentierte präzise Versuchsdurchführungen und genaue Angaben der Untersuchungsergebnisse. Er führte chemische Analysen von 300 Mineralen und mehreren Meteoriten aus und leistete einen entscheidenden Beitrag zur allgemeinen Anerkennung der Vorstellung von Chladni, dass die Meteoriten aus dem Kosmos stammen.¹¹ Die Analysen von Meteoriten beschrieb er zusammenfassend im fünften und sechsten Band seiner *Beiträge zur Chemischen Kenntnis der Mineralkörper* (1810/15).¹² In Band 6 beschrieb er auch die Analysen der in Lissa (3. September 1808) und in Smolensk (13. März 1807) gefallen Meteoriten.¹³

Vauquelin beschrieb 1803 in Kenntnis und Würdigung der von Howard durchgeführten Arbeiten seine Analysen der für ihn sehr ähnlichen, innerhalb eines Jahres gefallen, Meteorsteine in Barbotan bei Bordeaux (Juli 1789), bei Benares, (jetzt: Varanasi, Indien; 19. Dezember 1789) und in Creon (24. Juni 1790). Alle drei waren von einer schwärzlichen Schmelze glasiert und im Inneren grauweiß und mit Eisenkugeln durchsetzt. Im Stein von Benares fand Vauquelin 38% Eisen, 48% Kieselerde, 13% Talkerde und 3% Nickel. Er stellte fest, dass das Eisen teilweise oxidiert war, und dass beim Auflösen der Probe Schwefelwasserstoff freigesetzt wurde.¹⁴

1805 publizierte Proust die Analyse des am 17. November 1773 bei Sigüenza (Spanien) gefallen Meteoriten.¹⁵ Er hatte aus drei zerkleinerten Proben mit dem Magneten 17-22% Metall ausziehen können. In dem mit Salzsäure aufgelösten Metall konnte er nach Ausfällen des Eisens mit Ammoniak Nickel bestimmen. In der mit Königswasser aufgelösten Gesteinsfraktion bestimmte er 4,6% Schwefel und fällte nach Abtrennung des Eisens mit Ammoniak mit Ammoniumhydrogensulfid Mangan aus, das er durch die violettblaue Färbung der Boraxperle qualitativ nachweisen, aber wegen der geringen Menge nicht quantitativ bestimmen konnte. Der steinartige Anteil des Meteorsteins enthielt nach Proust mindestens 12% Schwefeleisen, 5% schwarzes Eisenoxid, 66% Kieselerde und 20% Magnesia.

Damit hatte man sowohl Eisenmeteoriten mit einem für Meteoriten typisch hohen Nickelanteil analysiert als auch Steinmeteoriten, die aus Körnern von Metal-

lischem, mit Magneten abtrennbarem, nickelhaltigem Eisen, kleinen braunen als Eisenkies erkannten Bestandteilen, runden harten mineralischen Kugeln unterschiedlicher Größe und einer mineralischen Grundmasse von gleicher Zusammensetzung wie die Kugeln bestehen und eine dünne dunkle aufgeschmolzene äußere Schicht besitzen.

Um so überraschter war der Wiener Chemiker Joseph Moser (1779-1863), als er eine Probe von den am 22. Mai 1808 bei Stannern (CZ) gefallenen Meteorsteinen analysierte, die ihm vom Direktor des Naturkundlichen Museums überreicht worden war: Darin fand er kein metallisches Eisen und nur 2% Bittererde, aber dafür 7,6% Tonerde und 12% Kalk. In diesen Meteoriten waren auch keine Chondren zu erkennen. Angesichts der irrtümlich von Barthold beim Meteoriten Ensisheim als Tonerde gefundenen Kieselerde wiederholte er die Analyse mehrfach, ohne zu einem anderen Ergebnis zu gelangen.¹⁶ Bereits am 17. Juli übergab er die Ergebnisse an den Museumsdirektor, der sie dann an den Herausgeber der *Annalen der Physik*, Ludwig Wilhelm Gilbert (1769-1824), schickte. Alle bisher gefundenen Steinmeteoriten hatten eine sehr ähnliche Zusammensetzung, von der diejenige der Steine von Stannern beträchtlich abwich. Das war auch ein Grund für Vauquelin, von diesen Meteoriten ebenfalls eine Analyse durchzuführen.¹⁷ Er fand 50% Kieselerde, 11% Kalkerde, 9% Tonerde, 29% Eisenoxid, 1% Manganoxid und 0,1% Nickeloxid und bestätigte damit den großen Unterschied zu den bisher analysierten Steinmeteoriten.

Der Meteorit Erxleben und die chemischen Analysen

Am 15. April 1812 war in Erxleben ein Meteorit auf ein Feld gefallen. Von 1807 bis 1813 gehörte Erxleben zum Elbedepartment des von Napoleon Bonaparte nach der Besetzung Deutschlands als Vasallenstaat gegründeten Königreiches Westphalen. Den Meteoriten Erxleben analysierte zuerst der Göttinger Chemiker Friedrich Stromeyer (1776-1835).¹⁸ Klaproth schreibt über den Meteoriten Erxleben:

Das Niederfallen dieses Meteorsteins, welches als das erste im nördlichen Deutschlande sich ereignete, uns bekannte Beispiel, um so bemerkenswerter ist, geschah am 15ten April 1812, Nachmittags um 4 Uhr, unweit dem zwischen Helmstädt und Magdeburg gelegenen Orte Erxleben, bei stiller Luft und heiterem Himmel, unter heftigen Schlägen, welche von Südost her, 12 Meilen in der Richtung sind gehöret worden.

Über die näheren Umstände, mit welchen das Phänomen begleitet gewesen, sind mehrere Augenzeugen gerichtlich vernommen worden, aus deren Erzählungen er-

hellet, dass das Herabfallen dieses Meteorolithen im Ganzen unter den nämlichen Phänomenen erfolgt ist, welcher bei allen uns bekannt gewordenen ähnlichen Begebenheiten und namentlich bei dem, nur wenige Tage zuvor am 10ten desselben Monats, Abends um 8 Uhr, im südlichen Frankreich, bei Toulouse, wahrgenommen worden. [...] Die Rinde, welche die natürliche Oberfläche aller Meteorsteine umgiebt, erscheint an dem gegenwärtigen nur als ein dünner, brauner Anflug, von mattem erdigem Ansehen. Der Stein ist dicht, hart und schwer zersprengbar. Er besteht aus einem feinkörnigen Gemenge von grauen und weißen, theils schimmernden, theils glasig glänzenden Theilen, zwischen welchen eine Menge sehr kleiner, silberweißer, stark glänzender Punkte Gedeiegen-Eisen eingesprengt sind. Aus 100 Theilen des zerriebenen Steins wurden vom Magnet 20 Theile dieser Eisenkörner angezogen. Die übrigen vom Magnet nicht anziehbaren Gemengtheile, kündigen sich, durch ihre in Speisgelb sich neigende Farbe, als Schwefelkies-Punkte an.¹⁹

Klaproth schreibt weiter, dass der „Meteorolith“ keine anderen Bestandteile besitze als andere Meteorsteine, „von welchen sie nur im quantitativen Verhältnisse abweichen; wie diese Verschiedenheit unter andern bei dem, gegen den Eisengehalt nur sehr geringen Verhältnisse des Nickels statt findet.“²⁰ Bemerkenswert fand er das Vorkommen von Chrom, das zuerst von Laugier, in dem im Jahre 1663 bei Verona und später in dem von Vaquelin zu Charsonville bei Orleans gefallenen Meteorstein, gefunden wurde.

Er erwähnte, wie schon bei einer früheren Analyse eines Meteorsteins, dass das Eisen in frisch gefallenen Meteorsteinen keine deutlichen Spuren einer Einwirkung des Sauerstoffs zeige, was die Vorstellung, dass die Erzeugung und Bildung derselben innerhalb der Region unserer Erdatmosphäre vor sich gehe, schwäche, da die Teilchen des gediegenen Eisens und des Schwefelkieses in dem stets feuchten Luftraum auch nicht eine kurze Zeit ohne deren Oxydation bestehen könnten.²¹

Der Erfurter Apotheker und Chemiker Christian Friedrich Buchholz (1770-1818) analysierte ebenfalls eine Probe des Meteoriten von Erxleben. Er beschreibt auf 30 Seiten seine Arbeitsschritte mit den erhaltenen Zwischenergebnissen sehr detailliert, so dass sie jederzeit nachvollzogen werden können.²²

In der nachfolgenden Tabelle sind die verschiedenen Formen des Eisens auf das Element umgerechnet worden. 175 Jahre nach dem Fall wurde in einer kleinen Probe mittels Neutronenaktivierungsanalyse eine Spurenelementbestimmung durchgeführt. Die dabei erhaltenen Werte für drei Hauptbestandteile und Chrom sind zum Vergleich mit aufgenommen worden.²³

**Analysenergebnisse des am 15. April 1812 gefallenen Meteoriten Erxleben,
Angaben in Masseprozenten**

| Analytiker | Stromeyer²⁴ | Klaproth²⁵ | Bucholz²⁶ | Niese et al.²⁷ |
|--|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Jahr (Publ.) | 1812 | 1812 | 1813 | 1986 |
| Probenmenge | *) | -- | 15,4 g | 0,1 g |
| Methode | Chem. Trenn. | Chem. Trenn. | Chem. Trenn. | NAA |
| Bestandteil (Formel) | | | | |
| Eisen (Fe) | 28,7 | 31 | 27,5 | 28,2 |
| Nickel (Ni) | 1,575 | 0,25 | 0,5 | 1,86 |
| Chrom (Cr) | 0,17 | 1 | | 0,35 |
| Mangan (Mn) | -- | 0,25 | 0,6 | -- |
| Kieselerde (SiO₂) | 35,52 | 35,50 | 36,6 | -- |
| Bittersalzerde (MgO) | 24,3 | 26,5 | 23,7 | -- |
| Alaunerde (Al₂O₃) | 1,60 | 1,25 | 2,25 | 1,35 |
| Kalkerde (CaO) | 1,92 | 0,5 | -- | -- |
| Schwefel (S) | 2,95 | 3,75 | 7,9 | -- |
| Verlust | 0,56 | | | |
| Natron (Na₂CO₃) | 0,75 | 1,25 | -- | -- |

*) „reichlich Material“, Mittelwert von mehreren Teilproben

Die höheren Nickelgehalte erscheinen glaubwürdiger, weil für die niedrigeren eine Mitfällung von Nickel am Eisenhydroxid verantwortlich sein könnte. Ebenso könnten die höheren Aluminiumwerte an einer vorangegangenen unvollständigen Kieselsäurefällung liegen.

Klaproth wiederholte die Analyse des Meteoriten von Stannern, in dem Moser in Wien nur 2,5% Bittererde und einen hohen Gehalt an Alaunerde gefunden hatte, was Klaproth bestätigte. Er konnte mit dem Magneten auch kein metallisches Eisen abtrennen. Damit war die „... merkwürdige Anomalie in den Bestandteilen, wodurch sich dieser Meteorstein von Stannern, von allen übrigen, bisher untersuchten, so sehr auszeichnet, sehr gut betätigt“; er betonte die Ähnlichkeit mit dem irdischen Basalt und riet zur weiteren Untersuchung dieses Typs, der wahrscheinlich ein Bruchstück aus der Kruste des Vesta-4 Asteroiden ist.²⁸

Von dem am 13. Oktober 1819, 8:00 Uhr auf einem Feld von Politz bei Köstritz gefallenen ca. 3000g schweren Meteoriten erhielt Stromeyer am 16. Dezember des gleichen Jahres eine Probe zur Analyse. Er bezeichnet ihn als dem Meteoriten von Lissa ähnlich, aber mit etwas weniger Eisen.²⁹

Im Verlauf der weiteren Entwicklung veränderten und verfeinerten sich die Analysemethoden erheblich: Neben den gravimetrischen Methoden kamen insbesondere für die Bestimmung der Nebenbestandteile und Spurenelemente seit der Entdeckung von Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) und Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) 1860 in zunehmendem Maße optische Methoden unter Nutzung der für die Elemente charakteristischen Wellenlängen zum Einsatz.

1929 wurde von Georg von Hevesy (1885-1966) die Röntgenfluoreszenzanalyse entdeckt und unmittelbar für Gesteinsanalysen angewandt. Wenig später führte die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) zu einer Revolution in der Geo- und Kosmochemie. Die 1936 von Hevesy entdeckte Neutronenaktivierungsanalyse wurde in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, nachdem in den Forschungsreaktoren höhere Neutronenflüsse zu Verfügung standen, vielfältig angewandt und spielte eine entscheidende Rolle in der Geochemie und zur Untersuchung von Meteoriten und Mondproben. Sie zeichnet sich besonders bei seltenen Elementen durch eine hohe Empfindlichkeit aus. Die Empfindlichkeit ist der kosmischen Häufigkeit angepasst, da sie wie die Elementsynthese im s-Prozess durch den Neutroneneinfang bestimmt wird. Die NAA war zu jener Zeit das empfindlichste Verfahren zur Elementanalyse, viele Elemente lassen sich ohne Zerstörung der Probe recht bequem bestimmen, die Kalibrierung kann bis auf reine Elemente zurückverfolgt und durch Isotopenverdünnung kann die Ausbeute bei chemischen Trennungen einfach bestimmt werden.

Die erste NAA von Meteoriten führten die Amerikaner Harrison Brown (1917-1986) und Edward Goldberg (1921-2008) 1949 durch. Sie bestimmten Gallium, Palladium, Gold und Nickel in 45 Eisen-Meteoriten.³⁰ Seitdem wurden mittels NAA in einer Vielzahl von Meteoriten die Gehalte an Spurenelementen be-

stimmt. Damit war die Präzisierung der solaren Elementhäufigkeiten möglich, was zu einer detaillierteren Klassifizierung der Meteoriten und zur Normierung der Elementkonzentrationen in Meteoriten und geologischen Proben auf die Gehalte der primitivsten Meteoriten, der CI-Chondrite, oder deren Vertreter Orgueil, führte. Die NAA war auch die entscheidende Methode bei der Untersuchung der vom Mond zur Erde gebrachten Proben und eröffnete mit der Bestimmung von Iridium im Ton der Kreide-Tertiär-Grenze die Forschung zu den meteorischen Impakten.

In einer kleinen Probe von 100mg des Meteoriten Erxleben wurden von uns mittels Neutronenaktivierungsanalyse eine Reihe von Spurenelementen bestimmt.³¹ Dabei haben wir im Vergleich zu anderen Meteoriten aus der Klasse der H-Chondriten einen höheren Gehalt an leichten Seltenen Erden festgestellt. Das kann einmal an der Inhomogenität des Meteoriten liegen. Möglicherweise war in der kleinen Analysenprobe ein besonders hoher Anteil an Phosphatmineralen enthalten, in denen die leichten Elemente der Seltenen Erden angereichert sind.³² Dafür sprechen auch Untersuchungen von Haas und Haskin (1991), die zeigten, dass unterschiedliche Ergebnisse zwischen 20 100mg Proben vom Meteoriten Bruderheim die gleiche Streuung aufweisen wie die Werte zwischen verschiedenen Meteoriten der LL6 bzw. LL4 Typen.³³ Dagegen war die Streuung der Konzentrationen von 45 Elementen in 6 Proben zu jeweils 0,6 bis 1g vom Meteoriten Orgueil und von je einer Probe von den zwei anderen CI-Chondriten Alais und Irvuna, die mit der induktiv-gekoppelten Plasma-Atomemissionspektrometrie bzw. der Massenspektrometrie (ICP-MS) erhalten wurden im Allgemeinen 3-5%, wenn man von Natrium, Kalium, Rubidium und Uran absieht, deren relative Standardabweichung 13-22 % betrug.³⁴

Andererseits bemerkte E. Cohen 1896 eine Ähnlichkeit der Meteoriten Erxleben und Guarena,³⁵ in dem Naburu Nakamura 1974 eine starke SEE Fraktionierung der Seltenen Erden feststellte.³⁶ So fanden auch W. Kiesel und F. Kluger bei der Analyse des Ybbsitz-Meteoriten: „Besonders auffällig ist das von der Seltenerd-elementnorm abweichende Verhalten der leichten Seltenerdelemente.“³⁷ Eine Fraktionierung sollte prinzipiell stattgefunden haben, wenn ein Körper auf einen Asteroiden trifft und dabei nicht nur alle Chondriten mit erhöhtem Eisengehalt (H-Chondriten), sondern auch die II E Eisenmeteoriten entstanden sein sollten. Darauf weisen auch die Infrarotspektren des Asteroiden 6 Hebe und der H-Chondriten und deren gemeinsames Erhitzungsalter hin.³⁸

Auch wenn die NAA in diesem Jahrhundert teilweise durch die ICP-MS abgelöst wurde, findet sie nach wie vor Anwendung zur Untersuchung kosmischer Materie. Ein Beispiel ist die Einzelkornanalyse (1 Mikrometer) von Proben vom Aste-

roiden 25143 Itokawa, die vom Hayabusa Raumschiff 2010 zur Erde gebracht wurden. Die Bestrahlung erfolgte im Reaktor der Universität Kyoto und die Messung im Untertagelabor LLRL der Kanazawa Universität bei einer Gesteinsabdeckung von 135m .³⁹ Weitere Beispiele umfassen kosmischen Staub aus Bohrungen im Eis, wo erhöhte Ir-Gehalte auf höhere Flüsse an kosmischem Staub hinweisen,⁴⁰ sowie ferner die Bestimmung von Spurenelementen in dem am 6. Mai 2000 gefallenen Meteoriten Moravka im Institut für Kernphysik der Tschechischen Akademie der Wissenschaften in Rez bei Prag.⁴¹

Summary: The meteorite Erxleben and early cosmological chemistry

200 years ago a meteorite has fallen near Erxleben between Magdeburg and Helmstedt, which was analyzed by the three German chemists Stromeyer, Klaproth and Bucholz. For this reason a survey of chemical analysis of meteorites from the first investigation in 1769 until 1820 is given. In this period the contents of main components were determined and were found to be similar for most of the stony meteorites, which contain characteristic grains of iron and iron sulfide in a mineral matrix of oxides of magnesium and silicon in German named "Bittererde" and "Kieselerde". The metal in iron meteorites and in the metallic grains of stony meteorites contains a high content of nickel, which was not found in natural iron on the earth. The British chemist Howard and Klaproth were the first, who accepted the theory of Chladni, stating that the meteorites have fallen from the sky. At the end of this survey, the results of the historic analyses are compared with results gained by using the method of neutron activation analysis.

¹ Rainer Bartoschewitz, „Bartoschewitz Meteoriten Laboratorium“ Lehmweg 53, D-38518 Gifhorn, <<http://www.meteorite-lab.homepage.t-online.de>> (8.5.2012). Er hat in der Schlosskirche in Erxleben das 3. Deutsche Meteoriten-Kolloquium organisiert, auf dem die bisher ausgiebig beschriebenen Beobachtungen zum Fall, die Verteilung einzelner Stücke an verschiedene Universitäten und Museen und die seither durchgeführten Untersuchungen vorgestellt und diskutiert wurden.

² D. Fourgeraux, L.C. Chadet und A.L. Lavoisier 1777 im *Journal de Physique*, zit. von Ursula B. Marvin, „Ernst Florens Chladni (1756-1827) and the Origins of Modern Meteorite Research“, *Meteoritics and Planetary Science* 31(1996), S. 545-588.

- ³ Ernst Florenz Friedrich Chladni, *Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen* (1794), in: Günther Hoppe (Hg.), *Über den kosmischen Ursprung der Meteorite* [mit Chladni-Biographie und Erläuterungen von Günther Hoppe], Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften 258 (Leipzig 1979).
- ⁴ <<http://home.vr-web.de/overhaus/Campo.htm>> (5.5.12).
- ⁵ Louis Proust, „Sur le fer natif du Pérou“, *Journal de Physique, de Chimie, d'Historie Naturelle et des Arts* 7 (1799), S. 148-149; siehe auch: Louis Proust, „Über das gediegene Eisen aus Tucuman“, *Gilbert's Annalen der Physik* 24 (1806), S. 297-300.
- ⁶ Charles Barthold, „Analyse de la pierre de tonnerre“, *Journal de Physique, de Chimie, d'Historie Naturelle et des Arts (An 8)* 50 (1800), S. 169-176; s. auch Ursula B. Marvin, „The Meteoritical Quincentennial: The Stone of Ensisheim 1492-1992“, *Meteoritics* 27 (1992), S. 28-72.
- ⁷ Edward Howard, „Versuche und Bemerkungen über Steine und Metalle, die zu verschiedenen Zeiten auf die Erde gefallen seyn solln, und über gediegne Eisenmassen“, *Gilbert's Annalen der Physik* 13 (1803), S. 221-227.
- ⁸ Graf von Bournon, „Schreiben an Delam éthrie, zur Beantwortung der Kritik des Herrn Patrin die aus der Luft gefallenen Steine betreffend“, *Gilbert's Annalen der Physik* 18 (1804), S. 260-268.
- ⁹ Derek W. Sears, „Edward Charles Howard and an Early British Contribution to Meteoritics“, *Journal of the British Astronomical Association* 86 (1976), S. 133-139.
- ¹⁰ Martin Heinrich Klaproth, „Bestandteile mehrerer Stein- und Metallmassen nach der chemischen Analyse von Obermedizinalrat Klaproth“, *Gilbert's Annalen der Physik* 13 (1803), S. 337-342.
- ¹¹ Wolfgang Müller, „Klaproth, Martin Heinrich“, in: Winfried R. Pötsch, Annelore Fischer, Wolfgang Müller, Heinz Cassebaum, *Lexikon bedeutender Chemiker* (Leipzig 1988), S. 238-239.
- ¹² Vgl. Martin Heinrich Klaproth, *Beiträge zur Chemischen Kenntnis der Mineralkörper Bd 5* (Berlin – Leipzig 1810); Ders., *Chemische Abhandlungen gemischten Inhalts (= Beiträge zur Chemischen Kenntnis der Mineralkörper Bd 6)* (Berlin – Stettin 1815).
- ¹³ Martin Heinrich Klaproth, „Bestandteile des Smolensker Meteoriten nach einer Analyse von Klaproth“, *Gilbert's Annalen der Physik* 33 (1809), S. 210-211.
- ¹⁴ Louis-Nicolas Vauquelin: „Über die aus der Atmosphäre herabgefallenen Steine“, *Gilbert's Annalen der Physik* 15 (1803), S. 419-428.
- ¹⁵ Louis Proust: „Über einen Meteorstein, der im J. 1773 unweit Sigena in Aragonien herabgefallen ist, und über die Meteorsteine überhaupt“, *Gilbert's Annalen der Physik* 24 (1806), S. 261-292. Der Beitrag wurde aus einem Artikel im *Journal de Physique* 60 (1805), S. 185-205 zusammengefasst.

- ¹⁶ Joseph Moser, „Darstellung der physisch-chemischen Eigenschaften der Steine, welche am 22. Mai 1808 bei und in Stannern in Mähren aus der Luft gefallen sind“, *Gilbert's Annalen der Physik* 29 (1808), S. 309-327.
- ¹⁷ Louis-Nicolas Vauquelin „Analyse der zu Stannern, in Mähren am 22. Mai 1808 herab gefallenen Aërolithen“, *Gilbert's Annalen der Physik* 33 (1808), S. 202-210.
- ¹⁸ Friedrich Stromeyer: „Analyse des zu Erxleben im Elb-Department am 15. April 1812 herabgefallenen Meteorsteins“, *Gilbert's Annalen der Physik* 42 (1812), S. 105-110. Stromeyer wurde 1800 nach dem Studium von Medizin und Botanik Dr. der Medizin. Da er sich für Chemie interessierte, ging er zuerst in das Labor von Vauquelin nach Paris, wurde 1806 Professor für Chemie und Pharmazie an der Universität Göttingen und führte dort auch Arbeiten über Minerale aus. Bei der chemischen Analyse des Meteoriten Erxleben (1812) stellte er fest, dass der erdige Bestandteil des Meteoriten Erxleben angesichts des hohen Gehaltes an Bittersalzerde und des grünlichen Farbtones vorwiegend Olivin sei. Ihm gelang 1817 die Darstellung des elementaren Cadmiums. 1819 publizierte er noch die Analysenergebnisse des Köstritzer Meteoriten. Siehe auch Wolfgang Müller, „Stromeyer, Friedrich“, in: Winfried R. Pötsch, Annelore Fischer, Wolfgang Müller, Heinz Cassebaum, *Lexikon bedeutender Chemiker* (Leipzig 1988), S. 411.
- ¹⁹ Martin Heinrich Klaproth, „VI. Meteorstein von Erxleben“, in: Ders., *Abhandlungen* (= *Beiträge Bd 6*), S. 303-306; hier S. 303-304.
- ²⁰ Klaproth, „Meteorstein“, S. 305.
- ²¹ Klaproth, „Meteorstein“. Die Ergebnisse hatte er am 3.8.1812 in der Akademie der Wissenschaften zu Berlin vorgetragen.
- ²² Christian Friedrich Bucholz, „Analyse des Aerolithen von Erxleben bei Magdeburg“, *Journal für Chemie und Physik* 7 (1813), S. 143-174.
- ²³ Siegfried Niese, Gerhard Loos, Birgit Gleisberg, Wolfgang Helbig, „Determination of trace elements and cosmogenic radio nuclides in meteorites by NAA and gamma spectrometry“, *Isotopenpraxis* 26 (1990), S. 242-245.
- ²⁴ Nach Stromeyer, „Analyse“.
- ²⁵ Nach Klaproth, „Meteorstein“.
- ²⁶ Nach Buchholz, „Analyse“.
- ²⁷ Nach Niese et al., „Determination“.
- ²⁸ Martin Heinrich Klaproth, „Analyse des Meteoriten Stannern“, in: Ders., *Abhandlungen* (= *Beiträge Bd 6*).
- ²⁹ Stromeyer, „Chemische Zerlegung des Köstritzer Meteorsteins“, *Gilbert's Annalen der Physik*, 63 (1819), S. 452.
- ³⁰ Harrison Brown, Edward Goldberg, „The Composition of Meteoritic Matter and the Origin of Meteorites“, *Science* 109 (1949), S. 347; sowie Harrison Brown, Edward Goldberg, „A preliminary report on the determination of Gallium, Palladium, Gold, and Nickel in 45 Iron-meteorites“, *Popular Astronomy* 57 (1949), S. 398-399.

- ³¹ Nach Niese et al., „Determination“.
- ³² Mitsuri Ebihara, Masatake Honda, „ Rare earth abundances in chondritic phosphates and their implications for early stage chronologies“, *Earth and Planetary Science Letters* 63 (1983), S. 433-445.
- ³³ J.R. Haas, L.A. Haskin, „ Compositional variations among whole-rock fragments of the L6 chondrite Bruderheim“, *Meteoritics* 26 (1991), S. 13-26.
- ³⁴ J.A. Barat, B. Zandra, F. Moy nier, C. Bollinger, C. Liiorzou, G. Bay on, „Geochemistry of CI chondrites: Major and trace elements, and Cu and Zn isotopes“, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 83 (2012), S. 79-92.
- ³⁵ E. Cohen, „Die Meteoriten von Laborel und Guarena“, *Annalen des Naturhistorischen Hofmuseums Wien* 11 (1896), S. 31-38.
- ³⁶ Naburu Nakamura, „Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites“, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38 (1974), S. 757-775.
- ³⁷ Wolfgang Kiesl, Fritz Kluger, „Chemische Untersuchungen am Ybbsitz-Meteorit“, *Annalen des Naturhistorischen Museums Wien* 87 A (November 1985), S. 39-46.
- ³⁸ Michael J. Gaffey, Sarah L. Gilbert „S(IV) type asteroid 6 Hebe: The probable parent body of the H-type ordinary chondrites and the II E iron meteorites“, *Meteoritics and Planetary Science* 33 (1998), S. 1281-1295.
- ³⁹ M. Ebihara et al.: „ Neutron Activation Analysis of a Particle Returned from Asteroid Itokawa“, *Science* 333 (2011), S. 1119-1121.
- ⁴⁰ Paul A. LaViolette, „ Evidence of High Cosmic Dust Concentrations in Late Pleistocene Polar Ice“, *Meteorites and Planetary Science* 20 (1985), S. 545-558.
- ⁴¹ Zdenik Randa, Jan Kucera, L. Soukal, „ Elemental characterization of the new Czech meteorite ‚Morávka‘ by neutron and photon activation analysis“, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 257 (2003), S. 275-283.