

Probleme der kosmischen Mineralogie

Rede bei der feierlichen Rektoratsübergabe
am 10. Mai 1963

von

WOLF v. ENGELHARDT



1 9 6 3

J. C. B. MOHR (PAUL SIEBECK) TÜBINGEN

I

Die kosmische Mineralogie ist ein Zweig der mineralogischen Wissenschaft, der heute im Zeitalter der interplanetarischen Raketen in einer intensiven und auch in der Öffentlichkeit beachteten Entwicklung steht, welche in mancher Hinsicht für die neuere Richtung vieler naturwissenschaftlicher Fächer typisch ist. Die Naturforschung unserer Tage beschränkt sich einerseits intensiver und enger denn je auf einen besonderen Gegenstands- oder Problembereich, muß dann aber oft die traditionellen Grenzen der Disziplinen und Methoden überschreiten, weil sie die wichtigsten Ergebnisse dort findet, wo benachbarte Fächer sich berühren. Produktive Arbeit auf einem Spezialgebiet setzt in vielen Naturwissenschaften heute umfassendere Kenntnisse voraus als in früheren Tagen. So wird auch, wenn ich heute von Problemen der kosmischen Mineralogie spreche, nicht nur von Mineralogie die Rede sein können, sondern ich werde vieles streifen müssen, was traditionellerweise in die Gebiete der Astronomie, der Geologie, Chemie oder Physik gehört.

Es ist zunächst zu bemerken, daß die Wortverbindung „kosmische Mineralogie“ der ursprünglichen Bedeutung des Wortes Mineralogie widerspricht. *Minae* heißt mittellateinisch das Bergwerk, *mineralia* sind die festen Stoffe, die der Bergmann nächst den Erzen, lateinisch *metalla*, aus den Tiefen der Erde holt. *Mineralogia* ist daher ursprünglich die Wissenschaft von den festen Bestandteilen der Erdrinde, die Wissenschaft vom Naturreich der Steine, das als drittes neben den Reichen der Tiere und Pflanzen steht. Kosmische Mineralogie als allgemein anerkannte Bezeichnung einer Wissenschaft, die sich mit den festen Bestandteilen des ganzen Kosmos beschäftigt, gibt

es erst, seitdem die Internationale Mineralogische Association im Frühjahr 1962 in Washington eine Kommission für kosmische Mineralogie zur Erforschung der Meteoriten gegründet hat, jener merkwürdigen Bruchstücke fester, extraterrestrischer Materie, die gelegentlich auf die Erde gelangen.

An der kosmischen Mineralogie ist aber im Grunde nur der Name neu. Der Sache nach gibt es diese Wissenschaft schon seit 170 Jahren, und wir sind in der glücklichen Lage, ihre genaue Geburtsstunde zu kennen. Sie wurde in Göttingen geboren im Herbst 1792 während eines Gesprächs des durch seine akustischen Entdeckungen bekannten Ernst Florens Friedrich Chladni mit dem Göttinger Physikprofessor Georg Christoph Lichtenberg. Lichtenberg sprach den damals unerhörten Gedanken aus, die sogenannten Feuerkugeln, gelegentlich am Himmel beobachtete Lichterscheinungen, die häufig mit lautem Krachen und Donnern und, wie immer wieder behauptet wurde, auch mit dem Niederfallen fester Massen verbunden waren, seien vielleicht nicht etwas Tellurisches, sondern etwas Kosmisches, das nicht in unserer Atmosphäre seinen Ursprung habe, sondern von außen in dieselbe eindringe und in ihr sein Wesen treibe.

Aus antiken Quellen wissen wir, daß es den Alten bekannt war, daß Stein- und Eisenmassen vom Himmel fallen. Auch im Mittelalter hat man nicht daran gezweifelt. Doch scheint die Meinung überwogen zu haben und bis in die beginnende Neuzeit hinein geglaubt worden zu sein, daß diese festen Massen in der Atmosphäre entstehen. Vielleicht konnte man sich nicht vorstellen, daß die himmlischen Sphären aus einer der irdischen so ähnlichen Materie bestehen. Jedenfalls liest man z. B. noch bei Descartes, daß Steine und Eisen, die gelegentlich vom Himmel fallen, sich durch Kondensation aus Exhalationen gebildet hätten, die durch die Kraft des Windes und der Sonne gehoben vom Erdboden emporsteigen. Die Feuerkugeln und die herabgefallenen Massen zählte man daher mit Regenbogen, Wolken, Niederschlägen, Donner und Blitz zu den Meteora, den Er-

scheinungen des Luftraumes, woran noch heute die Bezeichnung Meteorit erinnert.

Die Naturwissenschaft des 18. Jahrhunderts erkannte, daß eine Verdichtung atmosphärischer Dämpfe zu Steinen und Eisen nicht möglich ist. Da man nicht wagte, an einen außerirdischen Ursprung zu glauben, wurden alle Geschichten über vom Himmel gefallene Massen als mittelalterlicher Aberglaube verworfen. Es wird berichtet, daß durch die aufgeklärten Gebildeten des ausgehenden 18. Jahrhunderts viele Naturalienkabinette von jenen vermeintlichen Zeugnissen dunklen Aberglaubens, welche man heute mit Gold aufwiegen würde, gründlich gereinigt wurden.

Unbeeinflußt von der Stimmung und der öffentlichen Meinung seiner Zeit ist Chladni nach jenem Gespräch mit Lichtenberg allen Nachrichten und Beobachtungen nachgegangen, die für das Herabfallen außerirdischer Massen sprachen. Er sammelte und untersuchte echte Meteoriten und zeigte, daß ihre Beschaffenheit in charakteristischer Weise von der der festen Körper der Erdoberfläche abweicht. Aus einer ausführlichen Zusammenstellung alter und neuer Berichte über Feuerkugeln und Meteoritenfälle konnte er ableiten, daß diese Berichte soviel unabhängig Übereinstimmendes enthielten, daß an der Realität der Phänomene nicht zu zweifeln war. Es ist ein in der Geschichte der Naturwissenschaft gewiß ungewöhnliches Ereignis, daß ein neues Naturphänomen nicht durch Beobachtung in der Natur oder im Laboratorium, sondern durch literarische Kritik und Textinterpretation für die Wissenschaft entdeckt wurde.

Nachdem Chladnis erste Veröffentlichung 1794 kaum ernst genommen worden war, ereignete sich 1803 in Frankreich der von vielen Menschen beobachtete Steinfall von L'Aigle, dem glücklicherweise noch andere ähnliche Ereignisse in dicht besiedelten Gebieten folgten. Seitdem konnte kein Zweifel mehr bestehen; Meteoriten wurden eifrig gesammelt, die Umstände ihres Falles registriert, die Körper selbst wurden chemisch und bald auch mineralogisch unter-

sucht. Ihre Herkunft wurde diskutiert, und die Meteoritenforschung nahm ihren Anfang.

Dennoch hat es den Menschen zu Anfang des 19. Jahrhunderts große Schwierigkeiten bereitet, sich vorzustellen, daß Körper außerirdischen Ursprungs auf die Erde fallen. Man kann dies z. B. an Goethes Einstellung zum Meteoritenproblem erkennen. In dem 1811 niedergeschriebenen 11. Buch von *Dichtung und Wahrheit* erzählt er von der Besichtigung des berühmten, 1492 gefallenen Meteoriten oder, wie man damals auch sagte, Aerolithen von Ensisheim im Elsaß, wobei er rückblickend seine spätere Abwendung von der Skepsis der Aufklärung beschreibt:

„In Ensisheim sahen wir den ungeheuren Aerolithen in der Kirche aufgehangen und spotteten, der Zweifelsucht jener Zeit gemäß, über die Leichtgläubigkeit der Menschen, nicht vorahnend, daß dergleichen luftgeborene Wesen, wo nicht auf unseren eigenen Acker herabfallen, doch wenigstens in unseren Kabinetten sollten verwahrt werden.“

In der Tat hat sich Goethe später mehrfach, und mit Erfolg darum bemüht, Meteoriten für seine Sammlung zu erhalten. Doch scheint es, daß er bis zu seinem Tode der Überzeugung geblieben ist, daß es sich, ganz im Sinne von Descartes, um „luftgeborene Wesen“ handelt. So spricht er z. B. in einem Brief des Jahres 1821 von diesen Körpern als „Mineralien, die aus heiterer Luft, wo man dergleichen nicht vermutete, sich auf einmal konzentrierend herunterstürzen“.

Wir haben uns heute leicht an den Gedanken gewöhnt, daß Meteoriten außerirdischen Ursprungs sind. Jeden, der Phantasie genug besitzt, wird, wenn er einmal einen Meteoriten in die Hand nehmen kann, auch heute noch die Vorstellung rühren, daß ein solcher Körper ein Fremdling auf der uns vertrauten Erde ist und aus fernen Gegenden des Weltraums stammt. Jedenfalls sind für Wissenschaftler aus allen Ländern, in denen Naturforschung getrieben wird, Meteoriten heute große Kostbarkeiten. Besonders für seltenere Typen

und für Stücke, deren Datum und Umstände des Falls bekannt sind, zahlt man Preise wie für reines Gold, sind sie doch vorläufig die einzigen Proben der Materie des Weltraums, die man direkt untersuchen und analysieren kann.

II

Bevor ich über die Meteoriten und ihre Zusammensetzung spreche, seien in aller Kürze die Erscheinungen betrachtet, die zu beobachten sind, wenn ein Meteorit die Erde trifft.

Nach einer neueren Schätzung fällt im Durchschnitt pro Jahr ein Meteorit auf einer Fläche von 1 Million qkm. Das ergibt für die ganze Erdoberfläche 500 Meteoriten im Jahr. Da 70 % der Erde von Wasser bedeckt sind, fallen auf alle Kontinente zusammen im Jahr durchschnittlich 150 Meteoriten. Es besteht also für den einzelnen Menschen und vor allem für den einzelnen Meteoritenforscher wenig Wahrscheinlichkeit, einen Meteoritenfall zu erleben. Für die z. T. sehr auffallenden Licht- und Schallphänomene, die einen solchen Fall begleiten, sind wir daher im allgemeinen auf oft recht unzuverlässige Berichte überraschter, nicht vorbereiteter und an genaue Beobachtung nicht gewöhnter Menschen angewiesen.

Einer der ältesten Berichte über die Erscheinungen, die beim Niedergang eines Meteoriten zu sehen und zu hören sind, und zugleich einer der wahrsten und schönsten, in der klaren Sprache eines großen Dichters findet sich überraschenderweise im 2. Buch von Vergils Aeneis (II, 693–698). Ich glaube, daß dies nur wenigen Philologen bekannt ist. Die Szene ist das nächtliche, von den Griechen eroberte Troja. Der Meteorit, von Anchises sanctum sidus genannt, erscheint als ein göttliches Zeichen, Anchises, Aeneas und die Seinen zum Aufbruch rufend in ein neues Land. In wörtlicher Übersetzung heißt es: Ein donnerähnliches Geräusch ist zu hören, ein großer Stern gleitet einer Fackel gleich, mit sehr hellem Licht, hoch über dem Giebel des Hauses am dunklen Himmel dahin und verschwin-

det hinter dem waldigen Idagebirge. Als lange, gerade Straße leuchtet noch eine Weile die Spur, die er wie ein Schiff im Wasser gezogen hat, und als letztes ist Rauch wie von brennendem Schwefel am Himmel zu sehen.

Die hier beschriebenen Licht- und Schallphänomene des in größerer Entfernung niedergefallenen Meteoriten kommen dadurch zustande, daß dieser mit einer sehr hohen Geschwindigkeit, die zwischen einigen km bis 70 km/sec liegt, in die Erdatmosphäre eintritt. Durch den Aufprall entsteht schon etwa 150 km über der Erdoberfläche ein heißer, leuchtender, den Meteoriten umgebender Gasball, die sogenannte Feuerkugel, deren Durchmesser um ein Vielfaches den des Meteoriten übertrifft. In einer äußeren Zone schmilzt und verdampft der Meteorit, so daß er während des Fluges dauernd an Masse verliert. Der nachleuchtende Rauchschweif besteht aus den vom Meteoriten abgestreiften Schmelztröpfchen und dem verdampften Material.

Sehr kleine Meteoriten werden durch diese Vorgänge ganz aufgezehrt. Man sieht von ihnen nur die leuchtenden Bahnen, Ihnen allen als Sternschnuppen oder Meteore bekannt.

Größere Massen bleiben erhalten und verlieren beim Flug durch die Atmosphäre allmählich ihre kosmische Geschwindigkeit, bis sie vom sogenannten Hemmungspunkt an nur noch der Schwerkraft folgend zur Erde fallen. Dieser Hemmungspunkt liegt um so näher der Erdoberfläche, je größer Masse und Geschwindigkeit sind.

Ist die Masse des Meteoriten größer als etwa 100 t, so gibt es keinen Hemmungspunkt über der Erdoberfläche, und der Meteorit erreicht den Boden mit einem so hohen Anteil seiner kosmischen Geschwindigkeit, daß ein großer Krater erzeugt, das irdische Gestein durch Druck und Hitze erheblich verändert und der Meteorit selbst ganz oder fast vollständig verdampft wird. Der größte bekannte Meteorit – das Eisen von Hoba – hat eine Masse von 60 t.

Einige kraterförmige Hohlformen sind als Einschlagstellen von

Riesenmeteoriten erkannt worden. Der bekannteste und schönste Meteoritenkrater ist der sogenannte Barringer-Krater bei Flagstaff in Nord-Arizona mit einem Durchmesser von 1300 m und einer Tiefe von 175 m. Hier und in anderen solchen Kratern kann man noch geringe Reste des Meteoriten finden, so daß der Ursprung nicht bezweifelt werden kann. Nach Ansicht mancher Forscher ist die große, fast kreisrunde Depression des Nördlinger Ries mit 25 km Durchmesser auch durch einen großen Meteoriten erzeugt worden. Sichere Reste eines Meteoriten wurden hier noch nicht gefunden, abgesehen von mikroskopisch kleinen Eisenkugeln. So ist man hier auf Indizien angewiesen, über die auch bei uns in Tübingen die Untersuchungen noch im Gange sind.

So zeigt es sich, daß extraterrestrische Massen in ihrem ursprünglichen Zustand nur dann die Erdoberfläche erreichen können, wenn sie weder zu klein noch zu groß sind. Die kleinsten Körper verdampfen beim Flug durch die Atmosphäre, die größten beim Auftreffen auf den Boden. Die Größe der bekannten Meteoriten liegt zwischen einigen Gramm und 60 t.

Aus genauen Beobachtungen über die leuchtende Spur und die Geschwindigkeit von Meteoriten kann man ihre Bahn im interplanetarischen Raum berechnen. Dies ist bisher nur in dem einzigen Fall des 1959 niedergegangenen Meteoriten von Pribram gelungen. Die Bahn war eine stark exzentrische Ellipse mit der größten Sonnenhöhe nächst der Merkurbahn und der größten Sonnenferne im Raum der Planetoiden zwischen Jupiter und Mars. Von den kleineren Sternschnuppen gibt es zahlreiche Geschwindigkeitsmessungen, aus denen hervorgeht, daß alle diese Meteore in Ellipsenbahnen um die Sonne laufen.

Man nimmt daher an, daß die Meteoriten alle dem Sonnensystem angehören. Ihre Untersuchung kann etwas aussagen über die mittlere chemische Zusammensetzung des Planetensystems und so auch über die des Erdkörpers, von dem wir ja nur die äußerste Rinde, das sind

knapp 1 % des Volumens kennen. Außerdem kann die Meteoritenforschung, wenn sie die Bildungsgeschichte der Meteoriten erhellt, einen Beitrag liefern zur Theorie der Bildung der Planeten. Bescheidener sollte man deshalb heute lieber von planetarischer als von kosmischer Mineralogie sprechen.

Es sind heute 1648 Meteoriten bekannt, von denen 721 beim Fall beobachtet wurden – sogenannte „Fälle“ –, während 927 bloße „Funde“ sind. Die Hauptmenge der Meteoriten befindet sich in wenigen großen Sammlungen in Wien, Paris, Leningrad, London, New York und Washington. Die Tübinger Universität hat das Glück, seit 100 Jahren im Besitz einer Sammlung zu sein, die damals eine der größten Meteoritensammlungen war. Sie wurde von Carl v. Reichenbach, einem reichen Privatsammler und verdienstvollen Meteoritenforscher zusammengebracht und der Universität Tübingen testamentarisch vermacht. Mit Proben von 306 Meteoriten, d. h. fast 20 % aller bekannten, ist sie auch heute noch eine sehr bedeutende Sammlung und von hohem wissenschaftlichem Wert, da man nur über Meteoriten arbeiten kann, wenn ein genügend breites Material zur Verfügung steht.

III

Nach ihrer Zusammensetzung unterscheidet man drei große Klassen von Meteoriten: Die Steinmeteoriten bestehen wie die Gesteine der Erdrinde vornehmlich aus Silikaten, die Eisenmeteoriten aus Eisen-Nickel-Legierungen, die Stein-Eisen-Meteoriten sind Mischungen von Silikaten und Eisen-Nickel-Legierungen.

Über die Häufigkeit dieser drei Haupttypen im Weltraum könnte am ehesten eine Statistik der beobachteten Meteoritenfälle unterrichten. 92 % aller Fälle waren Steinmeteoriten, 6 % Eisenmeteoriten und 2 % Stein-Eisen-Meteoriten. Nach der Anzahl der Fälle sind also die Steinmeteoriten sehr viel häufiger als die Eisenmeteoriten. Die Verteilung ist aber anders, wenn man die Massen berücksichtigt.

Die Eisenmeteoriten sind im Durchschnitt sehr viel größer als die Steinmeteoriten. Bei den Eisenmeteoriten sind Massen von 50 bis 100 kg keine Seltenheit, viele wiegen mehrere t. Bei den Steinmeteoriten und ebenso auch den Stein-Eisen-Meteoriten liegen Stücke von Faust- bis Kopfgröße vor, solche über 50 kg sind selten, und der größte bekannte Steinmeteorit hat ein Gewicht von etwa 1 t. Der Masse nach scheinen also die Eisenmeteoriten zu überwiegen. Um auf die Häufigkeit im Weltraum zu schließen, müßte jedoch der für Stein- und Eisenmeteoriten sicher unterschiedliche Massenverlust im Weltraum und in der Atmosphäre berücksichtigt werden.

Die Eisenmeteoriten bestehen im wesentlichen aus gediegenem Eisen. Sie haben vermutlich in der Geschichte der Menschheit eine bedeutsame Rolle gespielt. Wahrscheinlich bearbeiteten prähistorische Menschen zunächst meteorisches Eisen, bevor sie es lernten, aus den Erzen das Eisen durch Schmelzverfahren zu gewinnen. Die Azteken, Mayas und Inkas, denen das Schmelzen von Eisenerzen unbekannt war, verwendeten ausschließlich meteorisches Eisen, das sie höher werteten als Gold. Aus neuester Zeit kennt man bei den Eskimos Messer und von mexikanischen Eingeborenen eine Axt aus meteorischem Eisen. Es hat den Anschein, daß in den alten Kulturlandschaften der Erde, wie etwa Mittel- und Südeuropa, im Boden heute sehr viel seltener Eisenmeteoriten gefunden werden als in den Ländern der Neuen Welt, z. B. den USA, weil schon die alten Bewohner, nicht erst die neueren Meteoritenforscher, die Eisenmeteoriten gesammelt und verbraucht haben. Nach Zeugnissen der Sprache und Schrift wird vermutet, daß den alten Kulturvölkern die Herkunft des meteorischen Eisens vom Himmel bewußt war. So besteht das sumerische Wort, der älteste überlieferte Name für Eisen, aus den bilderschriftlichen Zeichen für „Himmel“ und „Feuer“, und im Altägyptischen soll eine Bezeichnung für Eisen mit „Metall des Himmels“ zu übersetzen sein.

Es ist für die Eisenmeteoriten charakteristisch, daß dem Eisen

stets ein Nickelgehalt beigemischt ist. Dieser liegt zwischen minimal 4 % und maximal etwa 20 % Nickel, mit einem Häufigkeitsmaximum bei etwa 8 %. Das niemals fehlende Nickel ist ein untrügliches Kennzeichen, durch welches Meteoreisen von technischem Eisen und von dem auf der Erde nur außerordentlich selten natürlich vorkommenden gediegenen Eisen unterschieden werden kann. Mineralogisch besteht die Hauptmasse der Eisenmeteoriten aus zwei Kristallarten: Dem nickelarmen Kamazit und dem nickelreichen Taenit. Der Kamazit enthält rund 5 %, der Taenit zwischen 27 und 65 % Nickel. In den häufigsten Typen der Eisenmeteoriten sind Kamazit und Taenit in regelmäßigen Bändern oder Platten parallel zu den Flächen eines Oktaeders angeordnet. Auf ebenen, polierten und schwach angeätzten Schnitten erscheinen diese sich kreuzenden Lamellen der Ni-reichen und Ni-armen Kristallarten als regelmäßige Muster, die unter dem Namen der Widmannstätten-Figuren bekannt sind. Sie sind ein anderes unverwechselbares Kennzeichen des meteorischen Eisens.

Eingebettet im Nickeleisen findet sich noch eine Reihe anderer Mineralien, von denen ich nur das Eisensulfid, Troilit genannt, erwähnen möchte, das in großen runden Tropfen in der Eisenmasse schwimmt und so den flüssigen Zustand abbildet, aus dem das Kristallgefüge der Eisenmeteoriten entstanden ist.

Nickelhaltige Eisenschmelzen kann man im Laboratorium herstellen und bei der Abkühlung unter verschiedenen Bedingungen beobachten. Dabei ergibt sich, daß bei einer Temperatur von etwa 1500° C aus der Schmelze zunächst einheitliche Kristalle entstehen, sogenannte Mischkristalle, die Nickel- und Eisenatome statistisch gemischt enthalten. Bei langsamem Abkühlen unter 1000° zerfällt dieser einheitliche Kristall in die nach Nickelgehalt und Struktur unterschiedlichen Kristallarten, Taenit und Kamazit. Bei den im Laboratorium realisierbaren Versuchszeiten entsteht ein mikroskopisch feines Gefüge der beiden Mineralien. Die groben Strukturen

der Meteoriten mit den cm-breiten Kamazit- und Taenitbändern ließen sich experimentell bisher nicht herstellen. Da die Bildung von Taenit und Kamazit aus einem ursprünglich einheitlichen Kristallgitter nur durch die Bewegung von Nickel- und Eisenatomen im festen Zustand erfolgen kann, welche bei den in Frage kommenden Temperaturen um 300° C recht langsam ist, können die Strukturen der Eisenmeteoriten nur durch eine extrem langsame Abkühlung in Zeiträumen von Millionen Jahren entstanden sein. Weitere Einzelheiten in der Struktur lassen darauf schließen, daß diese Abkühlung bei einem hohen Druck von etwa 100 000 Atmosphären erfolgte.

Aus diesen Daten können wir ableiten, daß die Eisenmeteoriten aus einer nickelhaltigen Eisenschmelze im Inneren eines zuerst heißen und später kühler werdenden planetenähnlichen Körpers entstanden, der groß genug war, um die sehr langsame Abkühlung und den hohen Druck zu gewährleisten. Später muß dieser Körper in kleine und kleinste Bruchstücke zerbrochen worden sein. Die Eisenmeteoriten sind Stücke des Kerns, und man kann an ihnen auch noch Spuren dieses gewaltsamen Ereignisses feststellen. Man wird sogleich erwarten, unter den anderen Meteoriten Bruchstücke der äußeren Zonen solcher Körper zu finden.

IV

Nach ihrer Struktur und mineralogischen Zusammensetzung werden die mengenmäßig so wichtigen Steinmeteoriten in die beiden Hauptabteilungen der sogenannten Chondrite und der Achondrite zerlegt. Die Chondrite heißen so nach ihrem merkwürdigen Aufbau aus kleinen Kügelchen, Chondren genannt, während die Achondrite keine Chondren enthalten. Mit 90 % aller Steinmeteoriten sind die Chondrite die häufigsten Meteoriten überhaupt.

Alle Steinmeteoriten sind makroskopisch auf den ersten Blick nicht einfach von irdischen Gesteinen zu unterscheiden. Charakteristisch ist die schwarze Schmelzrinde, die beim Flug durch die Atmo-

sphäre entsteht. Sie besteht aus Glas, das durch oxydiertes Eisen dunkel gefärbt ist und oft in sehr schöner Weise die Strukturen der beim Flug über die Oberfläche des Steines abströmenden Schmelze zeigt. Auf Bruchflächen ist das feinkörnig graue bis braungraue Gefüge besonders für den Ungeübten wenig charakteristisch. Bei den Chondriten kann der Aufbau aus etwa millimetergroßen Kügelchen auffallen. Wegen des unauffälligen Äußeren von Steinmeteoriten wiegen unter den „Funden“, d. h. den Meteoriten, deren Fall nicht beobachtet wurde, die viel auffallenderen Eisenmeteoriten bei weitem vor.

Die nur 10 % der Steinmeteoriten ausmachenden Achondrite sind diejenigen Meteoriten, die irdischen Gesteinen am ähnlichsten sind. Auch im Dünnschliff zeigen sie unter dem Mikroskop ein Gefüge, das dem der magmatischen Gesteine der Erdrinde entspricht, welche aus einer Schmelze entstanden. Ihre Mineralien sind dieselben, wie man sie aus irdischen Gesteinen kennt. Es bedarf schon genauerer mineralogischer und chemischer Beobachtungen, um auch hier festzustellen, daß diese außerirdischen Gesteine charakteristische Züge aufweisen, die sie von allen bekannten Gesteinen der Erdrinde unterscheiden.

Die Ähnlichkeit der Achondrite mit bestimmten irdischen Gesteinen zeigt, daß sie unter ähnlichen Bedingungen entstanden sind wie Gesteine der äußeren Erdrinde. Für diese Meteoritengruppe kann man die Bildungsbedingungen am sichersten bestimmen. Die meisten Achondrite bestehen aus einem Gemenge von Plagioklas und Pyroxen mit einigen weiteren Beimengungen. Plagioklase sind Calcium-Natrium-Alumosilikate, sehr verbreitete Hauptbestandteile vieler irdischer magmatischer Gesteine. Dasselbe gilt für die Pyroxene, Metasilikate von Magnesium und Eisen, chemisch Mischungen von MgSiO_3 und FeSiO_3 . Die Kombination Plagioklas-Pyroxen entspricht dem irdischen Gestein Gabbro, die Struktur des Kristallgefüges zeigt, daß das Meteoritgestein wie der Gabbro aus einer Schmelze

kristallisierte, wobei die Abkühlung nicht plötzlich erfolgte wie bei einer vulkanischen Lava, sondern langsam, in einer gewissen Tiefe unter der Oberfläche eines planetarischen Körpers. Solche Gesteine nennen wir magmatische Tiefengesteine. Diese Achondrite sind, dem irdischen Gabbro entsprechend, extraterrestrische Tiefengesteine.

Eine nähere Untersuchung der aus Plagioklas und Pyroxen bestehenden gabbro-ähnlichen Achondrite zeigt, daß das Mengenverhältnis der beiden Mineralien gerade derjenigen Mischung entspricht, die den niedrigsten Schmelzpunkt hat. Dies beweist, daß diese Achondritschmelze das Ergebnis eines längeren Prozesses der fraktionierten Kristallisation war, indem aus einer irgendwie anders zusammengesetzten Schmelze im Verlaufe allmählicher Abkühlung Kristalle ausgeschieden und abgetrennt wurden, bis dann schließlich die bei tiefster Temperatur noch mögliche Schmelze, ein sogenanntes Eutektikum übrigblieb, die zu einem Pyroxen-Plagioklas-Gemenge erstarrte.

Langsame Abkühlung und fraktionierte Kristallisation sind nur auf einem nicht allzu kleinen planetarischen Himmelskörper möglich, der im ganzen oder in einzelnen Partien von einem Zustand hoher Temperatur zu tiefen Temperaturen überging. Die Entstehungsbedingungen der Eisenmeteoriten und der Achondrite weisen also ähnliche Züge auf, und es wäre durchaus möglich, daß beide Meteoritentypen von einem gemeinsamen Ursprungskörper oder von mehreren gleich zusammengesetzten Körpern stammen. Die Eisenmeteoriten kämen aus dem Kern, die Achondrite aus dem tieferen Teil der äußeren Partien.

V

Die bedeutendste Gruppe der Steinmeteoriten und die wichtigste Gruppe der Meteoriten überhaupt, die Chondrite, geben der Forschung heute noch die größten Rätsel auf. Ihre mineralogische Zusammensetzung ist recht einfach. Die beiden Hauptbestandteile sind

Pyroxen und Olivin, Mineralien, die wir auch von irdischen Gesteinen kennen. Pyroxen, schon bei den Achondriten erwähnt, ist ein Metasilikat von Magnesium und Eisen, eine Mischung der Substanzen MgSiO_3 und FeSiO_3 . Olivin nennt man das Orthosilikat von Magnesium und Eisen, also Mischungen von Mg_2SiO_4 und Fe_2SiO_4 . Der Unterschied zwischen Pyroxen und Olivin besteht chemisch nur im Gehalt an Kieselsäure: Pyroxen ist kieselsäurereicher als Olivin. Ob sich Pyroxen oder Olivin bildet, hängt vom Mengenverhältnis von Eisen und Magnesium zur Kieselsäure ab. Je mehr Eisen und Magnesium relativ zur Kieselsäure vorhanden sind, desto mehr Olivin muß sich bilden.

Neben den Hauptbestandteilen Olivin und Pyroxen enthalten die normalen Chondrite eine recht konstante, kleine Menge eines Calcium-Natrium-Feldspates, der sich von dem der Achondrite durch einen höheren Natriumgehalt unterscheidet. Typische Beimengungen vieler Chondrite sind ferner gediegenes Nickeleisen, wie wir es von den Eisenmeteoriten her kennen, und das ebenfalls schon erwähnte Eisensulfid Troilit. In geringeren Mengen kommt eine Reihe weiterer Mineralien vor, die sehr interessant sind, da sie z. T. auf der Erde nicht gefunden wurden, auf die ich aber heute nicht eingehen kann. Der ganz andere Mineralbestand der kleinen, aber besonders interessanten Gruppe der kohligen Chondrite ist noch später zu betrachten.

Die normalen Chondrite unterscheiden sich nach den Mengenverhältnissen der Hauptbestandteile Pyroxen, Olivin und Nickeleisen, sowie nach dem Eisengehalt der Pyroxene und Olivine, so daß sich mehrere, mineralogisch definierte Untergruppen aufstellen lassen. Alle bekannten Chondrite, 550 an der Zahl, gefallen zu den verschiedensten Zeiten und an den verschiedensten Plätzen der Erdoberfläche, bilden jedoch trotz dieser Unterschiede eine sehr einheitliche Gruppe. Dies erkennt man, wenn man der chemischen Analyse die Gehalte der elementaren Hauptbestandteile außer Sauerstoff,

d. h. im wesentlichen die der Elemente Si, Al, Mg, Fe, Ca, Na berechnet. Man findet dann nämlich für alle Chondrite fast identische Prozentzahlen. Dies bedeutet, daß die mineralogischen und chemischen Unterschiede unter den Chondriten in der Hauptsache durch unterschiedliche Sauerstoffgehalte, oder chemisch ausgedrückt: durch verschiedene Oxydationsgrade oder Reduktionsgrade der Substanz bedingt sind. Die sauerstoffärmsten Chondrite enthalten eisenfreien Magnesiumpyroxen und am meisten metallisches Eisen mit Nickel, welches übrigens in den Chondriten niemals Widmannstättenische Figuren, das Anzeichen sehr langsamer Abkühlung, zeigt. Sauerstoffreichere Chondrite enthalten weniger Nickeleisen, dafür eisenreicheres Silikat und zwar außer Pyroxen auch den kieselensäureärmeren Olivin, da die zur Verfügung stehende Menge an Kieselsäure um so knapper ist, je mehr Eisen in der Silikatphase auftritt. Am sauerstoffreichsten Ende der normalen Chondritreihe stehen fast nickeleisenfreie Gesteine aus eisenreichem Olivin mit nur wenigen Prozent Pyroxen.

Auch die ihrer merkwürdigen mineralogischen Zusammensetzung nach scheinbar abseits stehende kleine Gruppe der kohligen Chondrite schließt sich in chemischer Hinsicht der Hauptreihe der Chondrite an. Diese kohligen Chondrite, von denen bisher nur 21 bekannt wurden, sehen schon äußerlich ganz anders als die übrigen Steine meteoriten aus. Sie sind schwarz, sehr leicht zerbrechlich und zerreiblich und können deshalb nur gefunden werden, wenn man ihren Fall beobachtet hat. Sie enthalten 1 bis 5 % Kohlenstoff in Form organischer Verbindungen und bestehen im wesentlichen aus z. T. amorphen, z. T. kristallisierten wasserhaltigen Eisenmagnesiumsilikaten, die zu der bekannten Gruppe des irdischen Minerals Serpentin gehören. In manchen kohligen Chondriten kommen auch Kügelchen von Pyroxen und Olivin vor. Der Schwefelgehalt findet sich statt als Sulfid in Gestalt von elementarem Schwefel und von wasserlöslichen Sulfaten.

Bezüglich der Hauptelemente außer Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel sind die kohligen Chondrite ebenso wie alle anderen Chondrite zusammengesetzt. Sie stellen die höchstoxydierten Glieder der Reihe dar ohne eine Spur von Metall, in denen sogar der Schwefel zum Element oder zu Sulfat oxydiert ist, und die als neue Komponente kohlenstoffhaltige Verbindungen enthalten.

Die enge chemische Verwandtschaft aller Chondrite ist nur durch einen gemeinsamen Ursprung zu erklären, wobei man die beschriebene Reihe entweder durch die gradweise Oxydation eines sauerstoffarmen oder durch die Reduktion, d. h. Sauerstoffverarmung, eines sauerstoffreichen Urstoffs deuten kann. Beide Wege sind von verschiedenen Forschern vertreten worden.

Ein einfacher Zusammenhang ergibt sich, wenn man die kohligen Chondrite als Ausgangsstoff ansieht. Durch Erhitzung dieses Materials könnten daraus je nach Temperatur und Druck, eventuell auch unter Mitwirkung des im Weltraum ja überaus häufigen Wasserstoffs die verschieden stark reduzierten Chondrittypen entstanden sein. Wie in einem Hochofenprozeß führt nämlich die Reaktion von kohlenstoffhaltigen Verbindungen mit der Eisensilikatschmelze zu gediegenem Eisen einerseits und gasförmigen Sauerstoffverbindungen von Kohlenstoff und Wasserstoff andererseits. Wie vollständig diese Reaktionen verlaufen, hängt außer von der Temperatur von der Möglichkeit ab, daß diese Gase das System verlassen können.

Die kohligen Chondrite, die Anfangsglieder einer solchen Entwicklung müssen bei ganz tiefen Temperaturen entstanden sein, da sie wasserhaltige Silikate und Kohlenstoffverbindungen enthalten, welche schon bei Temperaturen von wenig mehr als 100° zerstört werden. Da die Astronomen heute der Annahme zuneigen, daß die Planeten durch zunächst kalte Kondensation staubförmig verteilter Materie entstanden, hat man vermutet, daß die kohligen Chondrite die uns noch erhaltenen Proben dieser kalt kondensierten Urmaterie

sind. Damit gewinnt gerade diese seltene Meteoritengruppe ein hohes Interesse.

Von großer Bedeutung sind außerdem die in den kohligen Meteoriten vorkommenden Kohlenstoffverbindungen, von denen man eine große Anzahl recht komplizierter Arten festgestellt hat. So gibt es aliphatische Kohlenwasserstoffe mit Hydroxy-, Amino- und Carboxylgruppen und verschiedene aromatische Körper wie Phenantren, Chrysen, Pyren usw. Ähnliche Stoffe finden sich auf der Erde im Erdöl und anderen Materialien, die sich von einst lebenden Organismen ableiten. Manche Forscher haben daher geglaubt, in den kohligen Meteoriten Spuren organischen, extraterrestrischen Lebens zu erkennen. Ich glaube nicht, daß dieser Schluß zwingend ist. Es ist aber eigentlich ebenso interessant, zu wissen, daß unter Bedingungen des Weltraums auch ohne Organismen hoch komplexe organische Moleküle entstehen können. Sie könnten hinüberleiten zu den ersten, wirklich lebenden Gebilden.

Merkwürdig und bisher noch nicht geklärt ist die innere Struktur der Chondrite, die jedenfalls nicht durch einen einfachen Vorgang entstanden sein kann: In den Chondriten findet man zehntel bis mm-große, kugelförmige bis ellipsoidische Gebilde, die sogenannten Chondren, bestehend aus Olivin allein, aus Pyroxen allein, oder seltener aus einer Mineralmenge, welche eingebettet sind in einer wirren Grundmasse aus Chondrenbruchstücken, kleinen bis kleinsten Mineralfragmenten und Fetzen von Nickeleisen. Solche Chondren sind weder aus dem Laboratorium noch von irdischen Gesteinen bekannt. Ihre äußere Form und innere Struktur ist nicht durch die Abscheidung von Olivin- und Pyroxenkristallen aus einer einheitlichen Schmelze entstanden. Die glatte runde Gestalt bildet die Wirkung der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit ab. Die Chondren waren also zuerst flüssige Tropfen und machten dann, wie gewisse Deformationserscheinungen zeigen, ein viskos-verformbares Stadium durch. Dann erst bildeten sich in den erstarrten Tropfen die eigen-

artig strahligen und skelettartigen Kristallaggregate von Pyroxen und Olivin, die oft noch Reste von glasig erstarrter Schmelze umschließen, die nicht mehr kristallisieren konnte, da die Abkühlung zu schnell erfolgte. Das Merkwürdigste ist nun, daß die meisten Chondren nur aus Olivin oder nur aus Pyroxen bestehen. Die Bildung von Tropfen reiner Olivin- und Pyroxenschmelze ist aber, da diese Schmelzen vollständig miteinander mischbar sind, meines Erachtens nur möglich, wenn vorher schon Olivin- und Pyroxenkristalle vorhanden waren, die entfernt voneinander zum Schmelzen gebracht worden sind. Wie dies geschehen ist, und warum offenbar nur ein Teil der primären Kristalle geschmolzen, die übrigen aber zerbrochen wurden, so daß jetzt Chondren in einem Gemenge von Mineralfragmenten liegen, ist noch durchaus unklar. Ich möchte mir versagen, unsicheren Spekulationen über mögliche Prozesse nachzugehen.

VI

In neuester Zeit ist es möglich geworden, das Alter der Meteoriten zu messen, d. h. festzustellen, vor wieviel Jahren die Mineralien kristallisierten, aus denen die Meteoriten bestehen. Die Uhren, die solches leisten, sind radioaktiv zerfallende Atomarten. Die meisten und zuverlässigsten Werte wurden nach der K-Ar-Methode gewonnen: Das radioaktive K^{40} -Isotop zerfällt mit einer Halbwertszeit von $1,3 \cdot 10^9$ Jahren zum Edelgas Ar^{40} und der Atomart Ca^{40} . Bestimmt man in einem K-haltigen Kristallgemenge mit Hilfe eines Massenspektrometers die Konzentrationen an K^{40} und Ar^{40} , so läßt sich daraus der Zeitpunkt der Kristallisation aus der Schmelze bestimmen, da man annehmen kann, daß bei der hohen Temperatur des Schmelzpunktes kein Ar-Gas in den Kristallen gebunden wurde. Nach dieser und anderen radioaktiven Methoden wurden die Meteoriten vor etwa 4500 Millionen Jahren gebildet. Dasselbe Alter nimmt man für die Erde an, und die Übereinstimmung dieser Zahlen muß wohl

so gedeutet werden, daß die Meteoriten gleichzeitig mit der Erde und den anderen Planeten des Sonnensystems gebildet wurden.

Aus der mineralogischen Interpretation der Gesteine der Erdoberfläche können wir Prozesse rekonstruieren, die in den verschiedenen Epochen der geologischen Geschichte der Erde stattgefunden haben. Die Altersbestimmungen an Meteoriten zeigen, daß wir in ihnen noch viel ehrwürdigere Zeugen besitzen, Proben nämlich der ältesten festen Materie dieser Welt, welche von den allerersten Ereignissen zu zeugen vermögen, die zur Bildung dieses Planetensystems geführt haben.

Alle Theorien über die genetischen Beziehungen zwischen den einzelnen Meteoritentypen und die Bildung der Meteoriten überhaupt erhalten im Lichte dieser Altersbestimmungen eine große Bedeutung, weil eine jede solche Theorie nun auch etwas über die Entstehung des Planetensystems aussagen muß.

Versuchen wir in diesem Sinne aus der Mineralogie der Meteoriten ein Bild über ihre gemeinsame Entstehung im Rahmen der Planetenbildung zu gewinnen, so ist davon auszugehen, daß die Eisenmeteoriten und die achondritischen Steinmeteoriten Produkte spezieller Bedingungen und besonderer Stoffsonderungen sind, während für die Bildung der Chondrite keine ähnlich beschränkenden Bedingungen bestehen. Es liegt deshalb nahe, in den Chondriten die Muttersubstanz aller Meteoriten zu sehen. Da die Mengenverhältnisse der schwereren und nicht flüchtigen Hauptbestandteile der Chondrite Na, Mg, Al, Si, Ca, Fe sehr ähnlich denen sind, die man astrophysikalisch für die Sonnenatmosphäre bestimmt hat, mag in den Chondriten die an gasförmigen Bestandteilen inzwischen verarmte feste Materie vorliegen, aus denen sich die Planeten, und zwar besonders die schwereren, inneren Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars gebildet haben. In der Reihe der Chondrite und der anderen Meteoriten sollten sich Stadien dieser Planetenbildung manifestieren. Die kohligten Chondrite zeigen alle Anzeichen der Entstehung bei niede-

rer Temperatur und enthalten auch noch verschiedene flüchtige Bestandteile. Sie könnten die ersten Produkte der Kondensation in der vorplanetarischen Gas- und Staubwolke solarer Zusammensetzung sein. Haben sich größere Massen akkumuliert, so wird in ihnen durch den Zerfall radioaktiver Atomarten und instabiler chemischer Verbindungen, sowie aus freiwerdender Gravitationsenergie die Temperatur bis zum Schmelzen steigen. Dann müßten wie im Hochofen die besprochenen Reduktionsprozesse anlaufen und je nach Druck und Temperatur die im Sauerstoff- und Metallgehalt unterschiedenen Gemenge von Nickeleisen mit Silikaten der Chondrite entstehen. Ein Teil der gebildeten Metallschmelze könnte sich im Kern der Dichte nach sammeln und allmählich zu den Nickeleisenlegierungen der Eisenmeteoriten erstarren, während die gasförmigen Sauerstoffverbindungen Wasser, Kohlendioxid und Kohlenoxid die äußeren Zonen des Körpers durchströmen und in den freien Raum entweichen.

Eine besondere Schwierigkeit ist es, daß wir die Entstehung der Chondren noch nicht verstehen. Im übrigen spricht aber nichts dagegen, daß diese lockeren, vielfach hochporösen Gesteine aus wenig miteinander verbundenen Chondren, Mineralfragmenten, Nickeleisen und Eisensulfid, deren chaotisch-ungeordnete Natur an irdische vulkanische Tuffe erinnert, der äußeren, von Gasen durchströmten Zone der Mutterkörper angehörten. Die kohligten Chondrite müßten von der äußersten Oberfläche stammen, wo niemals höhere Temperaturen herrschten.

Die achondritischen Meteoritengesteine sind, wie wir sahen, aus Schmelzen hervorgegangen, deren Chemismus sich durch Kristallisationsdifferentiation entwickelt hat. Man muß wohl annehmen, daß diese Entwicklung von geschmolzenem chondritischem Material ausgegangen ist. Wir kennen analoge Differentiationsprozesse von der Erdrinde und wissen, daß auf unserem Planeten magmatische Gesteine, reich an Kieselsäure, Tonerde und Alkalien so entstanden

sind, daß sich aus kiesel säurearmen Schmelzen der Tiefe von etwa chondritischer Zusammensetzung durch die Ausscheidung kiesel säurearmer Mineralien die kiesel säurereichen Restschmelzen bildeten, aus denen Gesteine oberflächennäherer Zonen entstanden. In den Mutterkörpern der Meteoriten muß die Differentiation in mancher Hinsicht anders verlaufen sein, da die auf der Erde so charakteristischen alkalireichen Restgesteine durchaus fehlen. Vielleicht hat eine starke Durchgasung flüchtige Alkaliverbindungen fortgeführt.

Viele Unterschiede bei der Bildung irdischer und meteoritischer Gesteine werden so zu erklären sein, daß die Mutterkörper der Meteoriten sehr viel kleiner als die Erde waren. Auf kleineren Körpern mit ihrem geringeren Schwerefeld können flüchtige Bestandteile leichter entweichen. Daß das Schwerefeld vermutlich relativ klein war, zeigt das häufige Zusammenvorkommen von Mineralarten sehr verschiedener Dichte, wie Silikate und Nickeleisen in den Chondriten und Stein-Eisen-Meteoriten sowie die locker-poröse Ausbildung fast aller Steinmeteoriten.

Abgesehen von vielen noch ungeklärten Einzelfragen ist aber doch festzuhalten, daß die Mutterkörper der Meteoriten in großen Zügen stofflich ähnlich aufgebaut waren wie die Erde und die ihr ähnlichen Planeten. Auch für die Erde wird seit langem ein innerer Eisenkern angenommen, der von Mantel und Rinde aus Silikaten umgeben ist. Der tiefergelegene Mantel könnte seiner Zusammensetzung nach dem chondritischen Urmaterial entsprechen. Die durch Aufschmelzung dieses Stoffes und Sonderung nach der Dichte so mannigfach differenzierten Gesteine, mit denen sich die irdische Mineralogie und Petrographie befaßt, befinden sich bei unserem Planeten in der äußersten Rinde.

Damit aus den Mutterkörpern die noch viel kleineren Meteoriten entstehen können, muß eine Katastrophe angenommen werden, die diese Körper nachhaltig zerstört hat. Da die Explosion eines einzigen Körpers wenig wahrscheinlich ist, hat es sich vielleicht um die

Kollision von zwei Körpern gehandelt, der wiederholte Zusammenstöße von Trümmern folgten.

Man hat schon lange vermutet, daß der von einer sehr großen Anzahl kleiner und kleinster Körper erfüllte Gürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter von dieser Katastrophe zeugt und daß die Meteoriten aus diesem Raume stammen. Viele der kleinen Planeten haben eine unregelmäßige Gestalt; manche bilden Gruppen oder Familien mit sehr ähnlichen Bahnen, so als stammten sie von einem größeren, zertrümmerten Körper. Die Gesamtmasse der kleinen Planeten ist allerdings mit 3 % der Mondmasse sehr gering; wenn die Massenschätzung stimmt, sind die Mutterkörper der Meteoriten sehr klein gewesen.

Die energiereiche kosmische Strahlung, die den Weltraum außerhalb der Atmosphäre erfüllt, erzeugt in der äußersten Oberflächenzone der Meteoriten, weil sie nicht tief einzudringen vermag, bestimmte, im Massenspektrometer identifizierbare Atomarten, wie z. B. He^3 . Aus der Menge dieser sogenannten Spallationsprodukte in der Oberflächenschicht frisch gefallener Meteoriten läßt sich unter der überprüfbaren Voraussetzung einer konstanten Intensität der kosmischen Strahlung ableiten, wie lange die betreffende Oberfläche der Weltraumstrahlung ausgesetzt war, falls diese Oberfläche selbst sich sonst nicht veränderte. Aus vielen Messungen hat man derartige Strahlungsalter gewonnen, die zwischen wenigen Millionen und etwa 1000 Millionen Jahren liegen. Für Steinmeteoriten fand man Alter bis zu etwa 150 Millionen Jahren, für alle Eisenmeteoriten jedoch merkwürdigerweise um den Faktor 10 längere Zeiten. Falls Stein- und Eisenmeteoriten aus denselben Mutterkörpern stammen, wird man dennoch nicht annehmen, daß durch diese Zeiten das Datum des Auseinanderbrechens der primären Körper bezeichnet wird. Es wird durch das sogenannte Strahlungsalter wahrscheinlich überhaupt nicht ein bestimmtes Ereignis der Meteoritengeschichte festgelegt. Vielmehr wird anzunehmen sein, daß die Oberfläche der

Meteoriten im interplanetarischen Raum dauernd durch Strahlung, Gas, Staub und gröbere Teilchen abgenutzt wird, und daß die Steinkometeoriten einen stärkeren Materialverlust erleiden als die mechanisch festeren Eisenmeteoriten. So entsteht der Eindruck, als ob die Eisenmeteoriten länger im Weltraum gewelt hätten. Es ist bemerkenswert, daß es auch im Weltraum eine mechanische Korrosion gibt, durch die eine Selektion des Materials nach der Festigkeit erfolgt, so wie sich im Geschiebe eines Flusses die Gerölle aus den widerstandsfähigsten Gesteinen anreichern. Aus diesem Grunde ist es vorläufig kaum möglich, aus der Masse der auf die Erde niedergegangenen Stein- und Eisenmeteoriten auf das Mengenverhältnis von Silikat und Eisen in den primären Körpern zu schließen.

VII

Mit dieser letzten Übersicht habe ich versucht, einige Gedanken aus den verschiedenen neueren Hypothesen über den Ursprung der Meteoriten zusammenzufassen. Noch gibt es keine einheitliche, geschlossene und allgemein anerkannte Theorie. In der künftigen Arbeit an einer solchen wird im Verein mit anderen Disziplinen der mineralogischen Forschung eine wichtige Rolle zukommen. Sie hat die besondere, spezifisch mineralogische Aufgabe, auf Grund der im Laboratorium und an irdischen Vorkommen gewonnenen Erkenntnisse über die Bildung der Mineralien die Meteoriten als Produkte chemisch und physikalisch definierter Vorgänge zu deuten, deren Kenntnis deshalb so wichtig ist, da aus denselben Prozessen auch Erde und Planeten entstanden. In ganz entsprechender Weise interpretiert die irdische Mineralogie Gesteine und Mineralien der Erdkruste, woraus sich Daten für die Geschichte des Erdkörpers, insbesondere für die seiner äußeren Rinde ergeben.

So sehen Sie die mineralogische Wissenschaft wie bisher auf der Erde nun auch im weiteren Kosmos eine besondere Funktion der

Naturforschung ausüben, die man mit einem alten Wort als die naturhistorische Forschung bezeichnen kann.

Ich möchte die letzten Minuten benutzen, um, ausgehend von dem Beispiel der kosmischen Mineralogie, und nachdem von soviel Einzelheiten die Rede war, nun noch etwas Allgemeineres über die oft verschwiegene naturhistorische Richtung der Naturforschung zu sagen.

Wenn heute von Naturwissenschaft die Rede ist, von ihrer Bedeutung für die Philosophie, von ihrem Sinn für die Bildung, von ihrem Nutzen und Schaden, ihrem Gegensatz zu den Geisteswissenschaften und ähnlichem, so meint man fast immer nicht die Naturhistorie, sondern den anderen Bereich der Naturforschung, den man den naturtheoretischen nennen kann, weil er den theoretischen Unterbau der Naturwissenschaften bildet. Naturtheoretische Wissenschaft tritt am reinsten in der Physik und auch in der Chemie in Erscheinung. Ziel und Objekt ist zunächst die immer bleibende Substanz aller Natur, sind die Prinzipien ihres Seins und Wirkens, die in einem System von Sätzen dargestellt werden sollen. Der vom Sichtbaren in die Mikrowelt der Atome vordringenden Forschung zeigten sich jedoch die kleinsten Teilchen der Weltsubstanz von solcher Art, daß von ihnen nicht mehr wie von Dingen unserer Umwelt gesprochen werden kann. In diesem grundlegenden Bereich der Physik hat man aus diesem Grunde aufgehört, von der Substanz der Welt als von einem objektiv Seienden zu sprechen. Man sucht Sätze über meßbare Größen und formale Modelle so zu konstruieren, daß mit ihrer Hilfe der Ausgang von Experimenten möglichst gut vorausgesagt werden kann. Die Vorhersagbarkeit oder Prognostizierbarkeit natürlichen Geschehens wird zum Ziel der so verstandenen Naturtheorie. Wer die Zukunft voraussagen vermag, hat die Macht. So kann man sagen, daß hier Macht über die Natur erstrebt und gewonnen wird: einerseits die ideelle Macht von Theorie und Prognose, andererseits die praktische Macht der Technik, durch welche der Mensch Kräfte

und Stoffe im gewünschten Sinne wirken lassen kann. Die Tugend des Naturtheoretikers ist die Strenge und Reinheit der Abstraktion, durch die er die verwirrende Vielheit der Gestalten und Ereignisse der Natur überwindet und hindurchstößt zu den Untergründen des Allgemeinen.

Die vorwiegend naturtheoretischen Disziplinen haben für alle Arten wissenschaftlicher Naturbetrachtung einen fundamentalen Charakter. Ihre Erkenntnisse müssen in allen Zweigen der Naturhistorie, in allen Übergangsgebieten zu den Wissenschaften vom Menschen und in allen Anwendungen der Naturwissenschaft gewußt werden. Es ist deshalb wohl verständlich, daß Physik und Chemie einen Vorrang genießen, wenn immer von Naturwissenschaft die Rede ist. Nur umfassen die theoretisch-fundamentalen Fächer weder die ganze Natur noch die ganze Naturwissenschaft. Erst die naturhistorischen Disziplinen sind auf die ganze Natur gerichtet, wie sie uns wirklich umgibt. Es findet in ihnen eine andere Beziehung des Menschen zur Natur ihren wissenschaftlichen Ausdruck. Der Naturhistoriker blickt auf die umgebende Natur in ihrer so und nicht anders vorgefundenen Faktizität. Er achtet sorgsam auf das Besondere und Einzelne, beobachtet, sammelt, fügt zum System und versucht das Kontingente nach den Kategorien der Wissenschaft zu verstehen. Dies geschieht so, daß die Gestalten und Strukturen der Natur als Stationen oder Ergebnisse naturwissenschaftlich-verständlicher Prozesse von eigentlich-historischem Charakter erklärt werden. Naturwissenschaftlich-verständlich nenne ich diese Prozesse, insofern sie nach den Sätzen der theoretischen Physik und Chemie zu begreifen sind. Historisch im eigentlichen Sinne sind sie, da ihnen, anders als den Pendelschwingungen und Rotationen der Physik, eine Richtung innewohnt und weil einmalige, nicht wiederholbare Situationen und Formen in ihnen vorkommen. In den Fächern von überwiegend naturhistorischem Charakter werden verschiedene Prozesse dieser Art behandelt: so die Entwicklung kosmischer Systeme in der

Astronomie, die Geschichte der Erdrinde in der Geologie, die Geschichte der Lebensformen in der Palaeontologie, die Entwicklung lebendiger Einzelwesen in der Biologie, ja es kann auch die Chemie hier genannt werden, insofern Bildungsprozesse und Reaktionen der chemischen Stoffe der Schlüssel zum Verständnis ihres Wesens sind.

Die fundamentalen naturtheoretischen Wissenschaften, d. h. vor allem die Physik, werden immer den Anspruch erheben, soviel als möglich von den Formen und Strukturen der faktischen Welt so zu erklären, daß sie gemäß den allgemeinen Sätzen aus einem Uranfänglich-Formlosen mit Notwendigkeit so und nicht anders geworden sind. Wäre dies, auch nur für einen kleinen Teilbereich, einmal wirklich gelungen, so wäre hier in der Tat eine besondere Naturhistorie überflüssig, es wäre alles auf Physik reduziert. Wir brauchen heute nicht die Frage zu entscheiden, ob ein solches Ziel überhaupt erreichbar ist, ob wirklich jemals der faktische Prozeß der Weltwerdung, die Existenz der Welt vollständig und mit Notwendigkeit aus dem Wesen, der Essenz der primitiven und allgemeinen Weltsubstanz abgeleitet werden kann. Wir können uns mit der Feststellung begnügen, daß die Wissenschaft noch weit von der Erfüllung solcher Wünsche entfernt ist, und daß ernste Bedenken und Schwierigkeiten diesem Ziel entgegenstehen. So gehört es z. B., wie man heute sicher weiß, zur Essenz der Weltsubstanz, daß nicht-determinierte Ereignisse in ihr aufblitzten, so daß ein vergangener Weltzustand den künftigen niemals in aller Strenge bestimmt. Eine andere Schwierigkeit ist die unendliche Kompliziertheit aller Verknüpfungen in Raum und Zeit, die schon in relativ einfachen Fällen die Möglichkeiten unserer formal-mathematischen Methoden übertrifft.

So behauptet innerhalb der Naturwissenschaften trotz aller Ansprüche der theoretischen Wissenschaft die Naturhistorie ein weites Feld. Ich möchte glauben, daß Naturhistorie niemals ganz verschwinden wird, ebensowenig wie die Menschheitsgeschichte jemals vollständig auf Anthropologie reduziert werden kann.

Es wird sich auch weiterhin in den naturhistorischen Fächern eine besondere Beziehung des Menschen zur Natur bewahren und ausdrücken, die von der des naturtheoretischen Forschers wohl verschieden ist und die eine eigene Bedeutung hat für die Bildung des Menschen und sein Leben in der Welt. Hier geht es nicht um Prognostizieren, nicht um theoretische oder praktisch-technische Macht, sondern um die Orientierung in einer wirklichseienenden Welt. Die Tugend des Naturhistorikers ist die Achtung vor dem Wirklichen, so wie es nun einmal, ob verstanden oder nicht, geworden ist und entsteht, eine Ehrfurcht vor der Realität in ihrer unendlichen Vielfalt. Sein Dienst für den Menschen ist die Erhellung der Welt, in der der Mensch wohnt, in ihren vielen Schichten, in ihrer zeitlichen und räumlichen Tiefe.

B 9533, e - 16

