

## Ursprung der Meteoritenforschung

Im Jahre 1794 veröffentlichte der Jurist und Physiker *Ernst Florenz Friedrich Chladni* eine Schrift mit dem Titel „Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, und über einige damit in Verbindung stehender Naturerscheinungen“.

Dies war die Geburtsstunde der Meteoritenforschung. Denn Chladni bewies, daß Meteorite ihren Ursprung außerhalb der Erde haben. Er zeigte dies, indem er alle bisherigen Erklärungsversuche - Bildung in der Atmosphäre, vulkanischer Ursprung, Blitzschlag etc. - widerlegte. Chladni stieß zunächst auf heftigen Widerstand, doch am Anfang des 19. Jahrhunderts wurde er von den meisten Wissenschaftlern akzeptiert.



Abbildung 2.1: Zeitgenössisches Portrait von E.F.F. Chladni

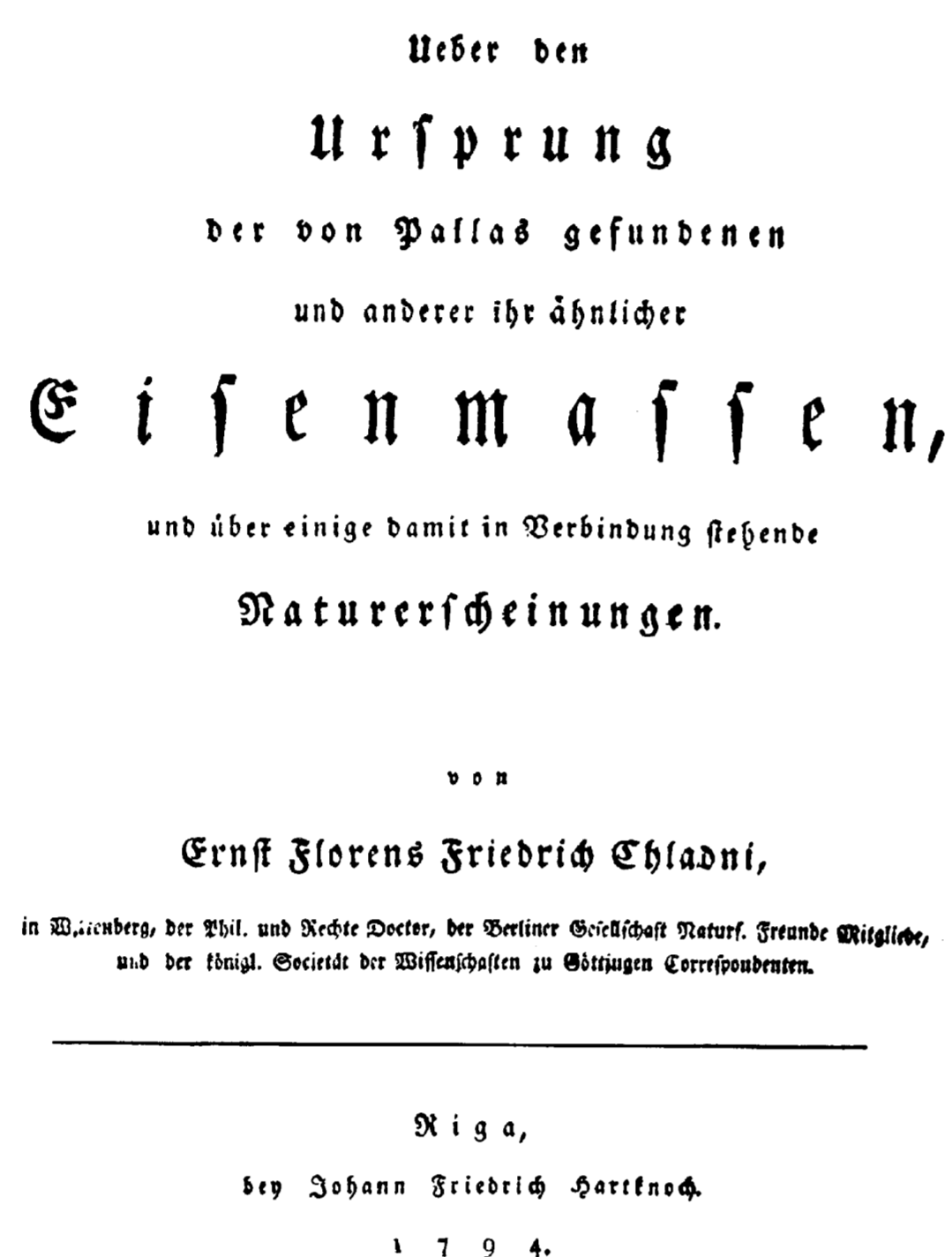


Abbildung 2.2: Titelseite von Chladnis Schrift

Die erste chemische Analyse eines Meteoriten wurde 1801 von *Edward Howard* publiziert, sehr zum Ärger seines Berliner Kollegen, des berühmten Chemikers *Klaproth*, der schrieb:

„Von den bei Siena im Jahre 1794 gefallenen Meteorsteinen erhielt ich einige Probestücke, womit ich zwar bald nachher eine chemische Zergliederung anstellte, deren Bekanntmachung ich jedoch aus Besorgnis darüber, in einen gelehrten Streit verflochten zu werden, weil man damals noch zu sehr geneigt war, das Faktum selbst für ein Märchen zu halten, unterließ. Jetzt ist mir Edw. Howard zuvor gekommen.“

## Zusammenhang zwischen Meteoriten und Erde

In der Mitte des 19. Jahrhunderts begann man sich Gedanken über einen möglichen Zusammenhang zwischen Meteoriten und der Erde zu machen.

So schrieb der Chemiker *C. Rammelsberg* 1872 ein Buch mit dem Titel: „Über die Meteoriten und ihre Beziehung zur Erde“:

„Die vorhistorischen Vulkane der Eifel haben rundliche Massen, sogenannte „Bomben“ ausgeworfen, welche aus Olivin, Augit, Bronzit und Chromeisenerz bestehen, also aus denselben Mineralien, welche in Meteorsteinen immer wiederkehren; und diese Mineralien treffen wir gesondert und als Olivinfels in Basalten und anderen krystalinischen Gesteinen.“

So entsteht die Frage: Sind dies vielleicht Proben von dem inneren unveränderten, petrographisch den Meteoriten ähnlichen Erdkern? Ist die ursprüngliche Erdmasse nur durch ihre Größe von den Fragmenten verschieden, welche ihrer Anziehung folgen?

Die mittlere Dichte der Erde ist größer als die der Mineralien, welche die Gesteine der oberen Kruste bilden. Die vulkanischen Gesteine und die Meteoriten, welche in chemischer Hinsicht basischer sind, sind zugleich schwerer als jene. Daher die Vermuthung, das Innere möge aus solchen Verbindungen bestehen.

2  
—  
1

Immer aber ist das metallische Eisen der Meteorite ihnen durchaus eigenthümlich; es beweist, daß bei ihrer Bildung Wasser und freier Sauerstoff nicht zugegen waren. In keinem irdischen Gestein findet es sich, und seine Stelle vertritt das oxydierte Eisen, Magneteisen. Enthalten die Gesteine des Erdinnern dieses wichtigste der Metalle in unverbundenem Zustand?

Das sind Fragen, zu welchen das Studium der Meteoriten anregt; sie lassen der Phantasie großen Spielraum, gleich allen Hypothesen über die Bildung und den Urzustand unseres Planeten.“

Im Jahre 1847 hatte der Franzose *Boisse* behauptet, Meteorite seien Bruchstücke eines schalenförmig aufgebauten Planeten. Er ordnete dabei die Meteorite nach ihrer Dichte. Im Zentrum des Planeten sollten Eisenmeteorite liegen, darüber Pallasite und dann mit abnehmender Tiefe immer Silizium-reichere (d. h. leichtere) Meteorite. Dieses Modell war für viele Geologen überzeugend.

*G. A. Daubrée* unternahm um 1860 erste Experimente mit meteoritischer Materie. Er produzierte Silikatschmelzen, indem er Silikatphasen von Meteoriten und von irdischen Proben in einem mit Kohlenstoff ausgekleideten Platintiegel erhitzte. Beim Abkühlen entstand in beiden Fällen Olivin und Enstatit. Daraus schloß er, daß Meteorite und Erde einen ähnlichen Ursprung hätten.

Ein weiterer wichtiger Schritt war die Erkenntnis von *Harkin* im Jahre 1917, daß Elemente mit einer ungeraden Ordnungszahl seltener als Elemente mit gerader Ordnungszahl sind. Dieser „odd-even“-Effekt wird durch die Kernsynthese der Elemente erzeugt und ist daher ein wichtiger Hinweis auf „primitive“ Materie. Harkin verwendete für seine Analysen die damals bekannten Stein- und Eisenmeteorite. Er hatte bereits erkannt, daß die Krustengesteine der Erde diesen Effekt nicht so deutlich zeigen würden, weil sie auf Grund der Differentiationsprozesse (siehe Kap. 1-4) nicht repräsentativ für die Gesamterde sind.

## Goldschmidts Erdmodell

Am Beginn des 20. Jahrhunderts wurden erstmals genauere chemische Analysen von Meteoriten und ihren Phasen durchgeführt. Im Jahre 1929 veröffentlichte *V.M. Goldschmidt* eine detaillierte Beschreibung seines 1922 vorgestellten Erdmodells. Goldschmidt teilte die Erde in Zonen ein: *Metallischer Kern*, *Sulfid-Oxid-Schicht*, *Eklogit-Schicht* und *Kruste*.

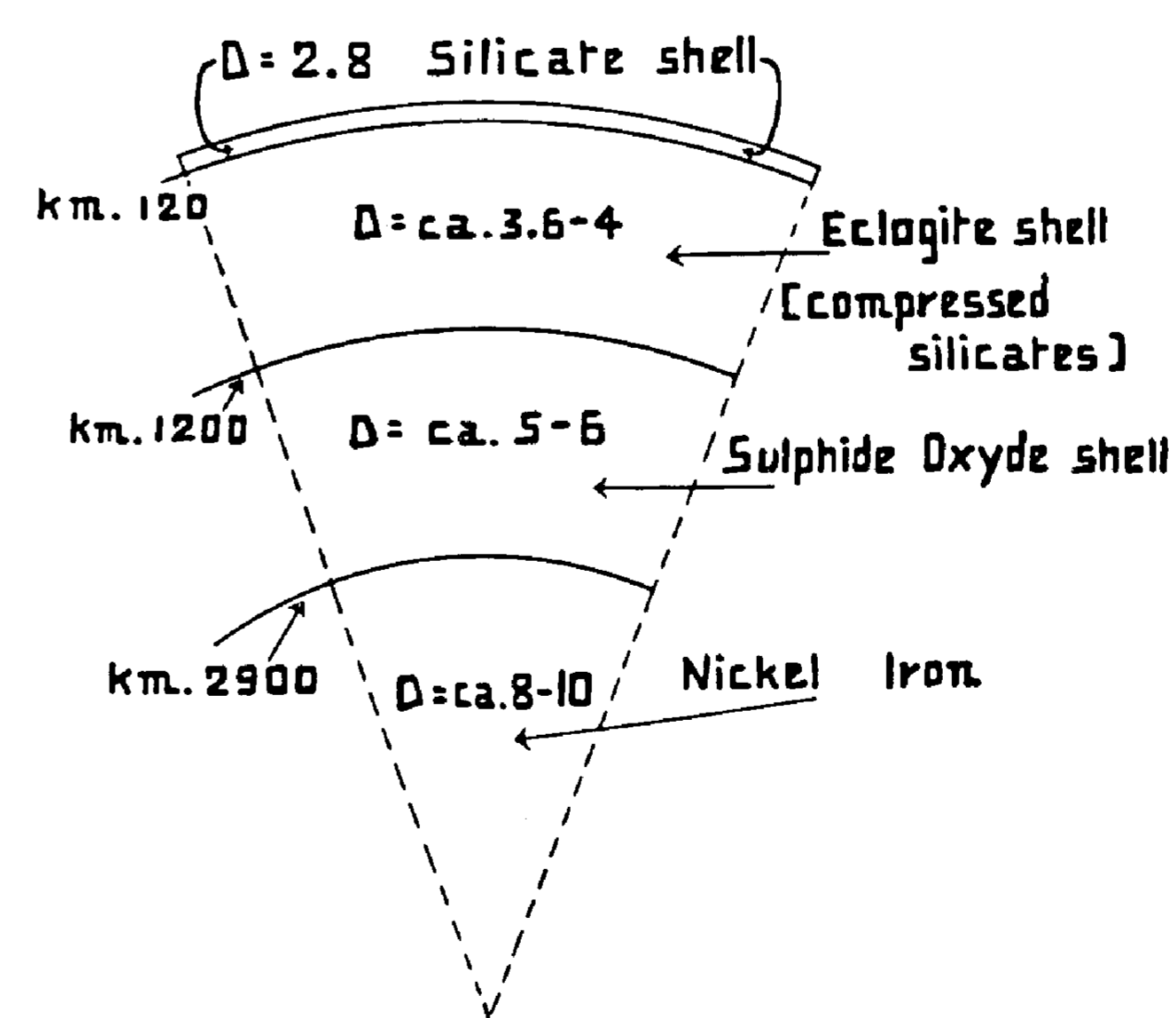


Abb. 2.3: Goldschmidts Erdmodell

In Goldschmidts Modell war die Erde ursprünglich flüssig, dabei trennten sich dann Metall-, Sulfid- und Silikatphasen entsprechend ihrer Dichte. Die chemischen Elemente sollten je nach Charakter des Elements in den einzelnen Phasen bevorzugt aufgenommen werden. Dazu unterteilte Goldschmidt die Elemente in *atmophile* (gasförmige), *siderophile* (Metallphase-), *chalkophile* (Sulfidphase-) und *lithophile* (Silikatphase bevorzugend).

Bei dieser Einteilung orientierte sich Goldschmidt an den Meteoriten und der Verteilung von Elementen in den verschiedenen Phasen der Meteorite. In Abb. 2.4 ist eine moderne Version der Goldschmidtschen Elementklassifizierung zu sehen.



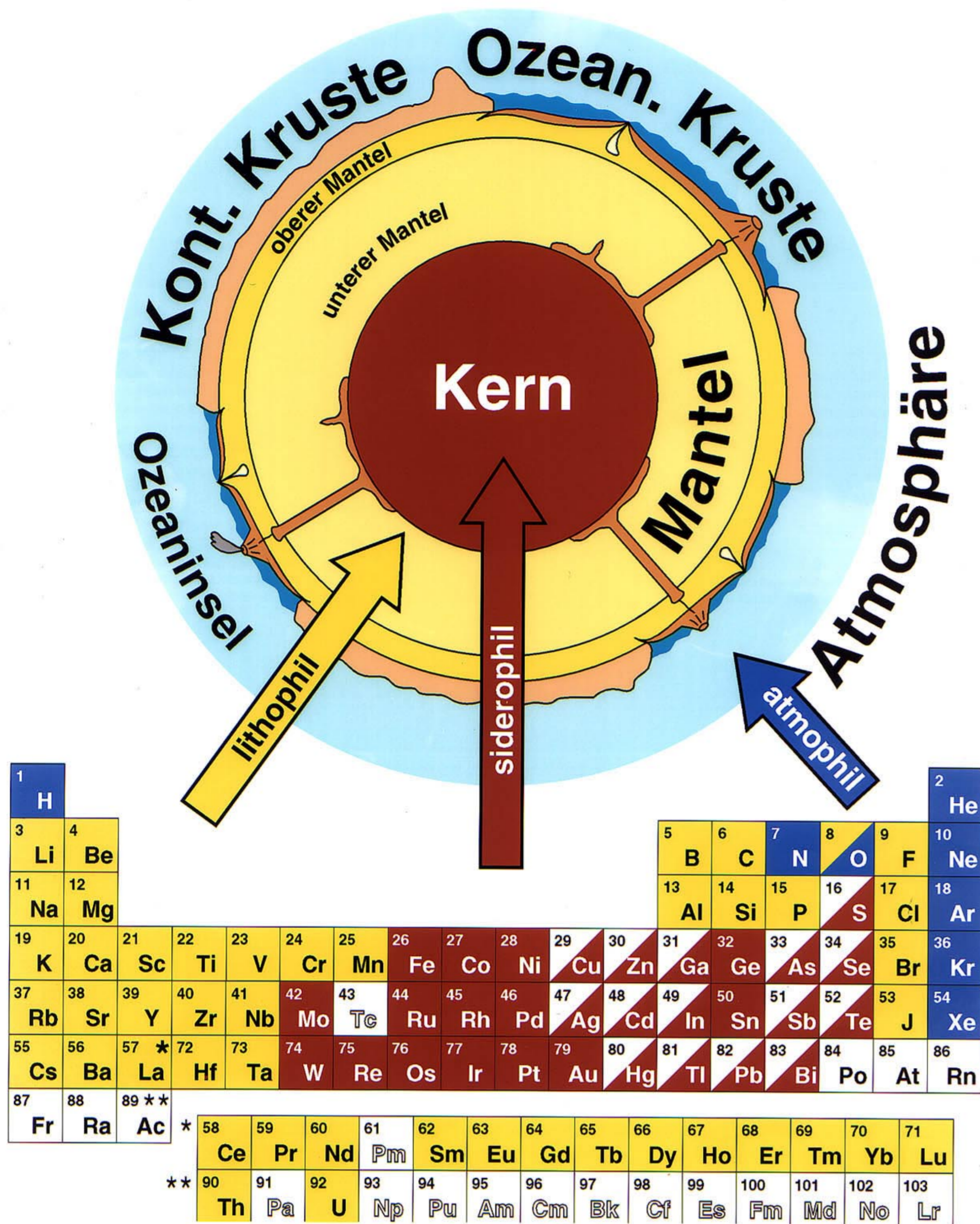


Abbildung 2.4:

Geochemische Klassifizierung der Elemente nach Goldschmidt  
(K.P. Jochum, MPI Mainz)

## Die Bedeutung der Sonne

Die Frage nach der mittleren Gesamtzusammensetzung der Erde wurde kaum gestellt, abgesehen davon, daß die große Dichte der Erde einen Eisenkern erfordert. Das hat sich erst nach der Bestimmung der Elementhäufigkeiten in der Sonne geändert.

Die Sonne enthält mehr als 99.8 % der Materie des Sonnensystems. Aus dem kleinen übriggebliebenen Rest sind die Planeten entstanden. Die Zusammensetzung der Sonne ist aus Untersuchungen des Sonnenlichts gut bekannt. Was wissen wir über die Zusammensetzung der Planeten?

Im Jahre 1929 hat der Astronom *Russell* die ersten Bestimmungen der Elementhäufigkeiten in der Sonne durchgeführt. Die Basis dieser Methode ist die Absorption des Sonnenlichts in kühleren, äußeren Zonen (Photosphäre) der Sonne. Aus der Tiefe der Absorptionslinien läßt sich auf die Elementhäufigkeiten in der Sonne schließen. Russell bemerkte, daß die Elementhäufigkeiten in der Sonne nicht mit den Elementhäufigkeiten in der Erdkruste übereinstimmen und schloß daraus:

**„There is therefore no present reason to conclude that meteorites differ in composition from the sun's atmosphere, as far as metals are concerned. The writer also suggests that the Earth's crust may not be representative for the bulk Earth composition. The bulk Earth should more resemble the composition of meteorites.“**

(Unter „metals“ verstehen die Astronomen alle Elemente schwerer als He.)

**„Es gibt keinen Grund anzunehmen, daß sich die Zusammensetzung der Meteorite in bezug auf schwere Elemente von der der Sonnenatmosphäre unterscheidet. Der Autor glaubt auch, daß die Erdkruste in ihrer Zusammensetzung nicht für die gesamte Erde repräsentativ ist. Die Gesamtzusammensetzung der Erde sollte der Zusammensetzung von Meteoriten ähnlicher sein (als der Zusammensetzung der Erdkruste).“**

H.N. Russell (1941)

Die meisten der in **Tab. 1** angegebenen Elemente sind flüchtig und werden bei der Kondensation fester Materie aus dem solaren Nebel nur zu einem geringen Teil in die feste Phase eingebaut. Beschränkt man sich auf die fünf häufigsten, nichtflüchtigen Elemente Mg, Si, Fe, Al und Ca, so sollte ein Planet mit der mittleren Elementhäufigkeit des Sonnensystems die in der **Tab. 2** angegebenen Gewichtsverhältnisse besitzen.

**Tabelle 1:** Die häufigsten Elemente in der Sonne, nach neueren Messungen (Angaben in Atomen pro eine Million Siliziumatome):

1	H	$2.79 \cdot 10^{10}$
2	He	$2.75 \cdot 10^9$
3	O	$2.40 \cdot 10^7$
4	C	$1.12 \cdot 10^7$
5	Ne	$3.47 \cdot 10^6$
6	N	$2.82 \cdot 10^6$
7	Mg	$1.07 \cdot 10^6$
8	Si	$1.00 \cdot 10^6$
9	Fe	$8.91 \cdot 10^5$
10	S	$4.57 \cdot 10^5$
11	Ar	$1.02 \cdot 10^5$
12	Al	$8.32 \cdot 10^4$
13	Ca	$6.46 \cdot 10^4$

**Tabelle 2:** Gewichtsverhältnisse einiger Elemente in der Sonne

Mg/Si	0.93
Al/Si	0.080
Ca/Al	1.15
Fe/Mg	1.91

Für die mittlere Zusammensetzung des Sonnensystems gilt also (in Gewichtsverhältnissen):

- etwa gleich viel Magnesium wie Silizium
- etwa 10 mal so viel Silizium wie Aluminium und Kalzium
- etwa doppelt soviel Eisen wie Magnesium

Man sollte sich bewußt machen, daß wir heute die Zusammensetzung der Sonne besser kennen als die der Erde. Auf Grund der Differentiation (Kernbildung und Krustenbildung) der Erde ist es schwierig, eine mittlere Erdzusammensetzung zu bestimmen.

## Die Zusammensetzung von Meteoriten und Erdmantel

Chondrite (undifferenzierte Meteorite) entstanden durch die Zertrümmerung von Kleinplaneten, die niemals geschmolzen waren. Diese Meteorite haben in erster Näherung die Zusammensetzung der Sonne bezüglich nichtflüchtiger Elemente, also die oben angegebenen Werte von Si, Mg, Fe, Al und Ca. Wenn diese Meteorite Bausteine der Erde sind, dann muß die Erde ebenfalls die mittlere Zusammensetzung des Sonnensystems besitzen.

Eine Probe des Erdmantels repräsentiert den primitiven, ursprünglichen Erdmantel um so besser, je mehr die Mg/Si- und Al/Si-Verhältnisse sich den Werten in der Sonne annähern. Diese Überlegungen sind deshalb so wichtig, weil die Summe der fünf Oxide MgO, SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und FeO etwa 98.5 % der Masse des Erdmantels ausmachen. Alle anderen Elemente sind dagegen in so geringen Konzentrationen vorhanden, daß sie für diese Überlegungen vernachlässigt werden können.

Für das Verhältnis Fe/Mg können wir keine solaren Verhältnisse erwarten, da der größte Teil des Eisens aus dem primitiven Erdmantel bei der Kernbildung in den Erdkern extrahiert wurde.



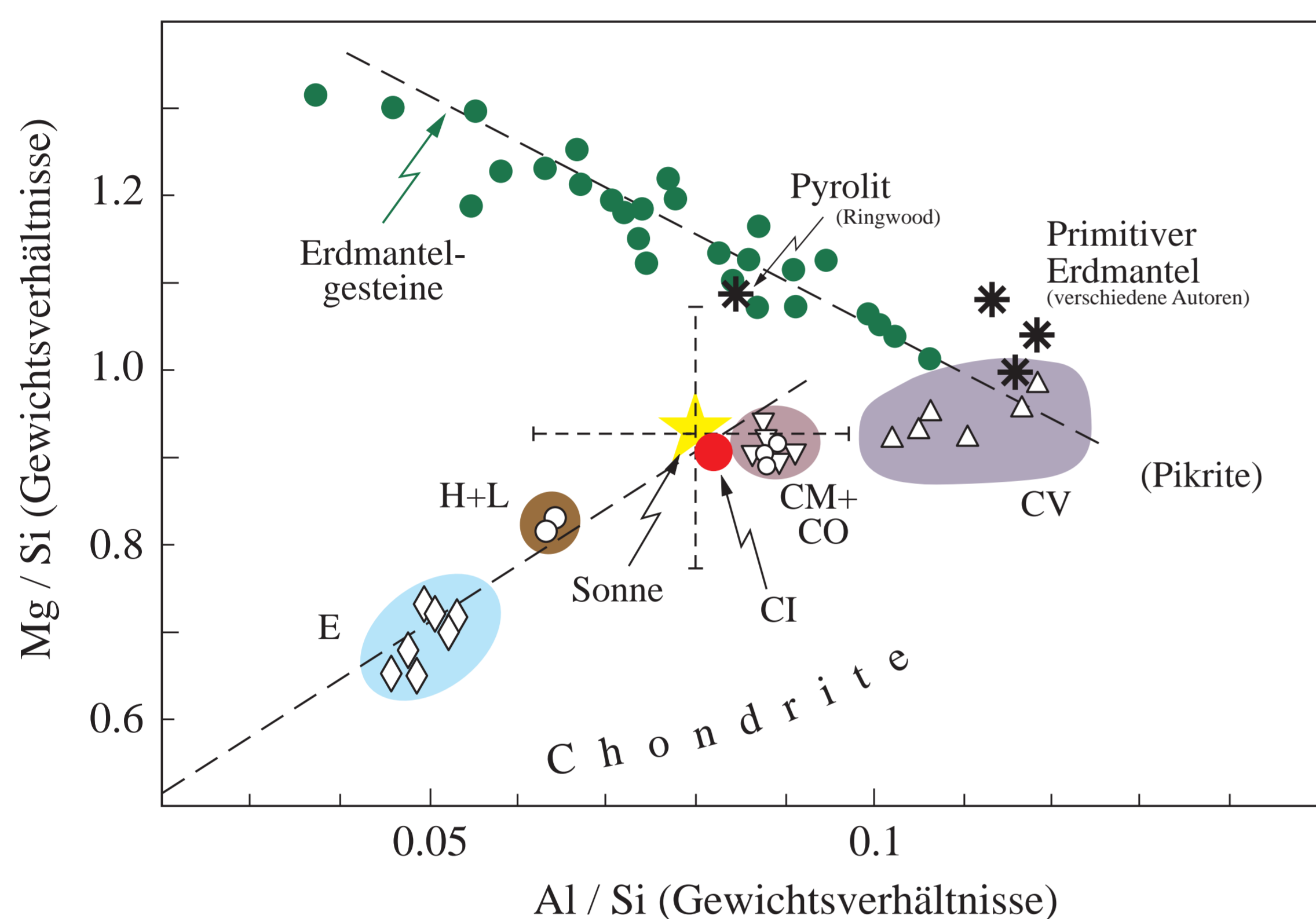
In **Abb. 2.5** sind Analysen von Gesteinen des Erdmantels und von chondritischen Meteoriten eingetragen. Die solaren Werte sind mit Fehlerabschätzungen angegeben.

### Gesteine des Erdmantels:

Analysen von Gesteinen des Erdmantels ergeben einen Trend von zunehmendem Mg/Si mit abnehmendem Al/Si. Dieser Trend ist als Folge eines Schmelzextraktionsprozesses - einer partiellen Aufschmelzung des primitiven Erdmantels - anzusehen. Aluminium wird als inkompatibles Element von den Mantelmineralen abgestoßen und bevorzugt in die Schmelze aufgenommen, Mg verbleibt als kompatibles Element im Residuum.

Die Zusammensetzung des primitiven Erdmantels muß am Ende dieser Korrelation bei hohen Al/Si-Verhältnissen liegen. Einige neuere Abschätzungen für den primitiven Mantel sind angegeben. Die unterschiedlichen Werte kommen durch Verwendung verschiedener Datensätze zustande. Angegeben ist auch die „Pyrolit“-Zusammensetzung von *Ringwood*, eine Mischung von residualem Mantelgestein und Basalt. Pyrolit hat heute nur mehr historische Bedeutung.

Setzt man den Trend der Erdmantelgesteine in **Abb. 2.5** nach rechts fort, erhält man die Zusammensetzung von Mantelschmelzen mit hohem Aufschmelzungsgrad (Pikrite). Der hier dargestellte Trend ist charakteristisch für hunderte von Erdmantelproben aus allen Teilen der Erde.



**Abbildung 2.5:** Chemische Zusammensetzung von oberem Erdmantel und chondritischen Meteoriten.

### Chondritische Meteorite:

Die verschiedenen Gruppen von chondritischen Meteoriten zeigen eine gewisse Variation in den Mg/Si- und Al/Si-Verhältnissen. So haben Enstatit-Chondrite (E in **Abb. 2.5**) besonders niedrige Mg/Si-Verhältnisse. Die Variationen in den Mg/Si- und Al/Si-Verhältnissen von chondritischen Meteoriten sind nicht durch Schmelzprozesse zu erklären. Sie beruhen vielmehr auf Prozessen im solaren Nebel, die noch nicht völlig verstanden sind.

Die beiden Trends - der terrestrische Schmelzextraktionstrend und der Meteoritentrend - scheinen sich bei den CV-Chondriten zu treffen. Hier könnte eine mögliche Zusammensetzung des primitiven Erdmantels liegen.

## Unterscheiden sich oberer und unterer Mantel in ihrer chemischen Zusammensetzung?

Aus dem Vergleich der Daten der Peridotit-Korrelation mit den solaren Mg/Si- und Al/Si-Werten in **Abb. 2.5** ergibt sich, daß die Zusammensetzung des primitiven oberen Erdmantels in den Gehalten von Mg, Si und Al von der Zusammensetzung der Photosphäre der Sonne abweicht.

Dieser wichtige Befund kann auf zwei verschiedene Weisen gedeutet werden:

(a) *Der untere Erdmantel hat eine andere chemische Zusammensetzung als der obere Erdmantel.*

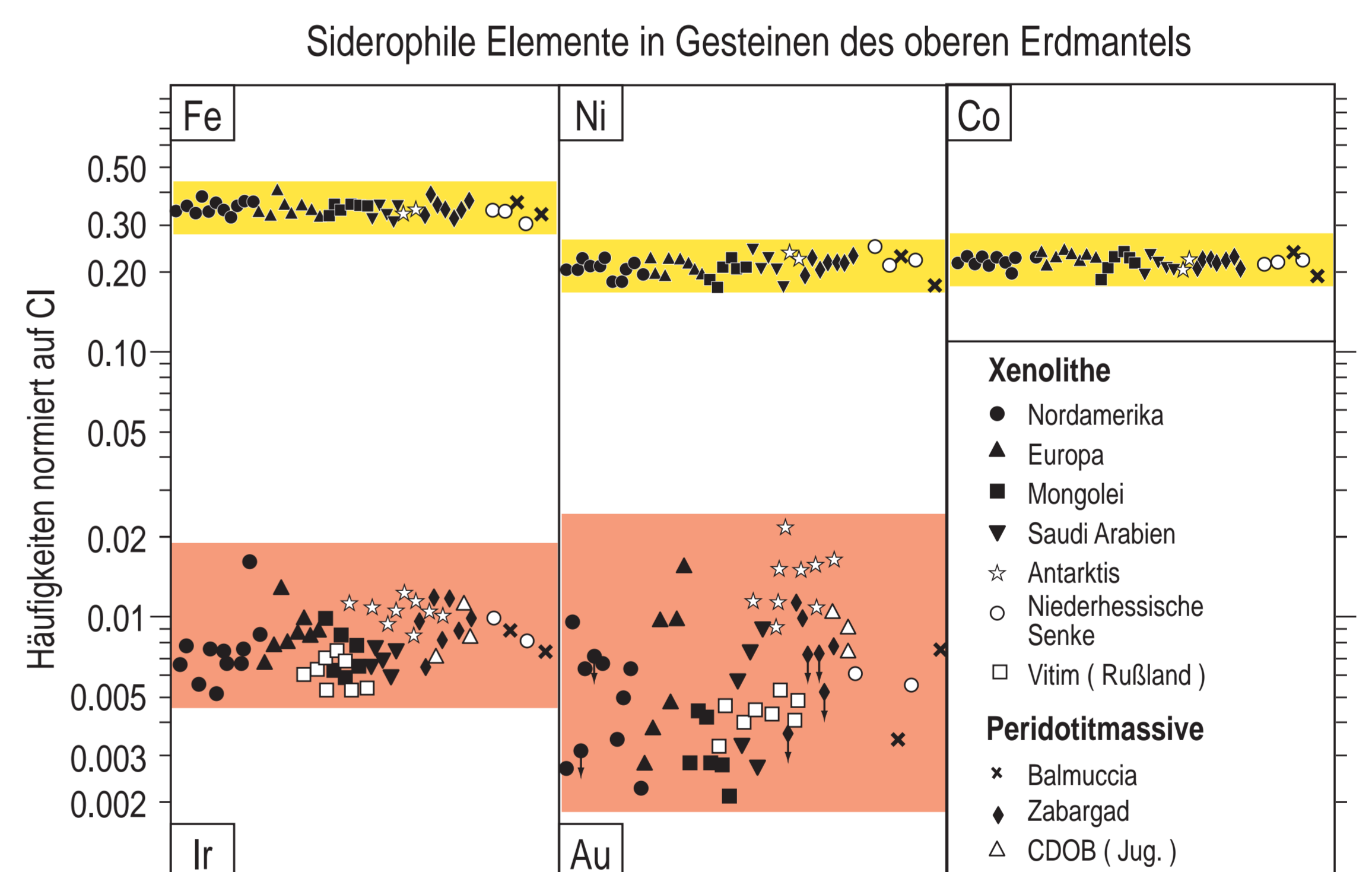
Er ist reicher an Si und Al. Eine Mittelung von unterem und oberem Erdmantel ergibt die Verhältnisse der Sonne. Unterer und oberer Mantel wären dann zwei getrennte Systeme. Es gibt jedoch geophysikalische Hinweise, daß zumindest zeitweise Reste abtauchender Lithosphären-Platten in den unteren Mantel gelangen und somit ein Materialaustausch zwischen unterem und oberem Mantel stattfindet.

(b) *Der untere Erdmantel hat dieselbe chemische Zusammensetzung wie der obere Erdmantel.*

Geochemische Argumente sprechen für diese Hypothese. Das würde bedeuten, daß die Gesamterde Mg/Si- und Al/Si-Verhältnisse besitzt, die nicht solar sind, aber im Bereich undifferenzierter chondritischer Meteorite liegen, wie das in **Abb. 2.5** angedeutet ist. Berücksichtigt man alle Elemente, so zeigt sich, daß es nicht möglich ist, dem Material aus dem die Erde besteht, einen bestimmten Meteoritentyp zuzuordnen.

## Metallische Elemente im Erdmantel

Bei der Bildung des Erdkerns wurden die metallischen Elemente des Erdmantels (z. B. Ni, Co, Pt, Au) zusammen mit metallischem Eisen in den Erdkern extrahiert. Ein ganz ähnlicher Prozeß, die Trennung von Metall- und Silikatphase, findet bei der Stahlerzeugung im Hochofen statt. Je stärker nun der metallische Charakter eines Elements, desto vollständiger wird es in den Erdkern extrahiert und desto niedriger wird seine Konzentration im heutigen Erdmantel sein. Die Gehalte von metallischen Elementen im Erdmantel liefern deshalb Informationen über den Kernbildungsprozeß.



**Abbildung 2.6:** Häufigkeiten ausgewählter metallischer Elemente in Erdmantelproben

In **Abb. 2.6** sind die Gehalte von Fe, Ni, Co, Ir und Au in Mantelgesteinen aus Vorkommen in Amerika, Europa und Asien dargestellt. Die Angaben sind auf meteoritische Häufigkeiten normiert. Die Gehalte der Gesamterde (Kern + Mantel) liegen bei 1. Die gute Übereinstimmung der Gehalte siderophiler Elemente von Proben unterschiedlichster Herkunft zeigt, daß diese Elemente zumindest im oberen Erdmantel gleichmäßig verteilt sind.

Die Gehalte von Ir, Au und anderen Edelmetallen liegen im Erdmantel höher (Ir = 3 Nanogramm/Gramm) als auf Grund des starken siderophilen (metallischen) Charakters dieser Elemente zu erwarten wäre. Dies führt zu der „late veneer“-Hypothese der Akkretion der Erde: Zunächst wurden alle Edelmetalle bei der Kernbildung quantitativ in den Kern extrahiert. Eine späte Akkretionskomponente, die „late veneer“, möglicherweise durch Einschlag eines einzigen Protoplaneten, lieferte dann nach der Kernbildung das gesamte Inventar des Erdmantels an Edelmetallen.