

Von : **Andreas Wenzel**

**15. Aug. 2006**

An : Teilnehmer/innen Grundkurs „Feuer, Erde, Wasser, Luft – Das System Erde“  
im WS 2006

Betr. : Skript zum Kurs

Das Skript begleitet die Schwerpunkte unseres Kurses.

<b>Schwerpunkt</b>	<b>Seite</b>
1. Das Prinzip des Aktualismus	2
2. Die Frühphase unseres Planetensystems – der „ <i>Big Bang</i> “.	3
3. Die Bildung der Planeten 1	5
4. Das Gravitationsgesetz	6
5. Die Bildung der Planeten 2	8
6. Modelle zur Entwicklung des inneren Aufbaus der Erde	10
7. Atom und Atombau, Ionen	12
Periodensystem	15
Chemische Bindung	16
	19
8. Silikate	20
Inselsilikat	21
Kettensilikate	22
Schichtsilikate	24
Gerüstsilikate	
Das Magma, eine silikatische Gesteinsschmelze	27
9. Die Erde eine kurze Einführung.	28
Chemische Zusammensetzung der Erde	
10. Der Aufbau der Erde im Überblick	29
11. Die Atmosphäre	30
12. Die Schalen/Sphären der Erde im Detail	31
Hydrosphäre im Überblick	32
13. Seismik	33
14. Diskontinuitäten	35
15. Geodynamisches Modell	37
16. Bildung der Erdkruste und der Ozeane	38
17. Kreisläufe im System Erde	40
18. Der Kreislauf der Gesteine	41
19. Einführung in die Plattentektonik	49
20. Der Motor der Plattentektonik	50
21. MOR, Subduktionszonen, Plattengrenzen	63
22. Das Plattenmuster	67
23. Der Wilson-Zyklus	68
24. Literatur	70

## **Das Prinzip des Aktualismus: Methodische Vorbemerkung :**

Die Diskussion zur Entstehung der Erde wird unter Naturwissenschaftlern, und hier besonders Geowissenschaftlern sehr breit geführt. Die Hintergründe werden aus Erkenntnissen der jeweiligen Fachdisziplinen bezogen. Nun sind diese Erkenntnisse nicht aktuell aus Forschungen während der Entstehungsphase der Erde gewonnen, dies wäre auch verwunderlich, sondern sie resultieren aus der Kombination der verschiedensten Überlegungen zu Vorgängen, wie sie heute ablaufen und beobachtet werden können.

Bei den Geologen, die bei ihren Forschungen häufiger das Problem haben, nicht dabei gewesen zu sein, wird das Prinzip für ein derartiges Vorgehen auch als „PRINZIP DES AKTUALISMUS“ bezeichnet. Man versucht mit diesem Prinzip, aus der Kenntnis der Gegenwart zum Verständnis der Vergangenheit zu gelangen.

Dazu werden aus den Ergebnissen naturwissenschaftlicher Analysen und Experimente Hypothesen und Gesetzmäßigkeiten zu aktuell ablaufenden Prozessen formuliert. Bei Übereinstimmungen der Ergebnisse werden die entwickelten Hypothesen/Gesetzmäßigkeiten entsprechend auf die vorgefundenen Produkte früher abgelaufener Prozesse angewendet.

Das „Aktualismus-Prinzip“ wird aber genauso auf die Entwicklung von Vorstellungen für den Ablauf von uns nicht zugänglichen oder von zukünftigen Prozessen angewendet.

Die aus diesem Vorgehen hergeleiteten Ideen sind häufig spekulativ und gehen weit auseinander, da die Vorstellungen über die, bei den einzelnen Prozessen herrschenden, Zustandsbedingungen sehr unterschiedlich sein können.

Besonders die Bildung und Entwicklung unseres Planeten Erde ist eines der, unter diesen Voraussetzungen, sehr engagiert diskutierten Probleme. Schon Überlieferungen aus frühen Kulturen zeigen, dass die Menschen sich intensiv mit der Herkunft ihres Lebensraumes beschäftigt haben.

### **1. Die Frühphase unseres Planetensystems – Der „Big Bang“.**

In unserer Zeit haben sich hierzu einige von Naturwissenschaftlern entwickelte Grundpositionen herausgebildet. Ausgangspunkt der Entwicklung ist der :

#### ***URKNALL / BIG BANG***

Der Beginn der Existenz unseres Universums lässt sich zurückverfolgen zu einem Ereignis, das von Physikern als "Urknall"; "Big Bang" oder auch "Feuerknall" bezeichnet wird.

Beschrieben wird der „Urknall“ als die Explosion eines unvorstellbar kleinen kugelförmigen Masseteilchens. Der Durchmesser dieses Teilchens wird mit  $3 \cdot 10^{-13}$  cm angegeben. Ebenso unvorstellbar ist die Dichte, die mit  $10^{94}$  g/cm<sup>3</sup> angegeben wird. Auch die Physiker stoßen hier an die Grenze ihrer Vorstellungskraft.

Ermitteln lässt sich dieses Geburtsmoment des Kosmos, wenn man die Zeit zu diesem Ereignis zurück laufen lässt. Dies wird möglich durch die Forschungsergebnisse von Physikern. Hier gibt es schon länger die Vorstellung, dass sich unser Universum ausdehnt. Belegt werden konnte dies erst einmal nicht.

Erst im Jahre 1965 entdeckten zwei Physiker, die Amerikaner Arno A. Penzias und Robert W. Wilson ein gleichmäßiges Rauschsignal der Temperatur 3 K, das gleichmäßig aus allen Richtungen des Weltalls zu empfangen ist. Sie entdeckten damit die von Physikern prognostizierte Strahlung, die vom Urknall übrig geblieben ist.

#### Die Idee konkretisierte sich.

Vor etwa 17 Mrd. Jahren explodierte das unvorstellbar winzige Masseteilchen. Die Temperatur betrug etwa  $10^{13}$  K. Es folgte die kosmische Expansion, angetrieben von Strahlungsenergie, die sich aus der Umwandlung der hochkomprimierten Materie entwickelte. Über verschiedene Entwicklungsschritte, kommt es zur Entwicklung unseres „Materiekosmos“.

„Das frühe Universum war sehr heiß und, sehr dicht, und vielleicht auch sehr irregulär. Die Unregelmäßigkeit und die Anisotropie nahmen allmählich ab. Innerhalb weniger Minuten nach dem Urknall liefen einige Kernreaktionen ab; praktisch das gesamte Helium im Universum entstand zu dieser Zeit. Während das Universum expandierte, kühlte es ab, ganz so, wie heiße Luft expandiert und sich abkühlt. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist ein Überrest aus dieser frühen Epoche; sie wird treffend als fossile Strahlung dieser *ursprünglichen Feuerkugel* bezeichnet.

Während sich die Materie im Universum abkühlte, kondensierte sie schließlich zu Galaxien - einem möglichen Szenario für die Entwicklung des Universums entsprechend. Die Galaxien zerfielen in Sterne und sie bildeten Haufen, Ansammlungen, die sich über große Gebiete des Raumes erstreckten. Während die ersten Generationen von Sternen entstanden und vergingen, wurden nach und nach die schweren Elemente wie Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium und Eisen gebildet.“

„Neue Sterne bildeten sich aus Wolken und Staub. In einem dieser Nebel bildete der Staub eine dünne Scheibe um den Stern aus. Staubkörner klebten aneinander fest und sammelten sich zu größeren Körpern an, die durch Gravitationsanziehung an Größe zunahmten und zu der Vielfalt von Körpern wurden, aus der das Sonnensystem besteht, von winzigen Asteroiden bis zu Riesenplaneten.“

(Silk, J 1990 ; S. 21)

#### **Dieser Vorstellung folgend ist die Herkunft unseres Planetensystems aus einer Ur-Sonne, bzw. einem Ur-Nebel herzuleiten.**

„Nach heutiger Vorstellung ist unser Sonnensystem etwa 4.6. Mrd. Jahre alt. Es entstand, als der solare Nebel, eine riesige Wolke aus kosmischem Gas, Staub und Eis unter Einfluss seines eigenen Schwerfeldes zusammenbrach (s. dazu die späteren Ausführungen zum Gravitationsgesetz; A.W.). Durch die Kompression stieg die Temperatur der Wolke, die vor diesem Kollaps nur wenig über dem absoluten Nullpunkt (er liegt bei  $-273$  °C) gelegen haben dürfte, auf mehrere tausend Grad an, was zur Verdampfung der meisten Bestandteile führte. Feste Fragmente, die der Erwärmung widerstanden, sammelten sich in einer Ebene um den Schwerpunkt der Wolke, der heutigen Ekliptik (Erdbahnneigung, A.W.), wo sie allmählich zu größeren Körpern, den Protoplaneten zusammenwuchsen.“ (Fabian, P. 1989 ; S. 8f.)

Über die Zusammensetzung der Materie, die sich zu den Planeten formte, gibt es kaum unterschiedliche Meinungen. Die Zusammensetzung des Urnebels, aus dem sich unser gesamtes Sonnensystem gebildet hat, war vermutlich die der gegenwärtigen Sonne und einiger anderer Sterne im Kosmos. 99 % dieser Urmaterie bestand aus Wasserstoff (H) und Helium (He). Alle übrigen Elemente verteilen sich auf das restliche 1 Prozent. Gemeinsam ist auch die Vorstellung einer, in etwa linsenförmigen, Hülle für den Urnebel aus der sich die Planeten bildeten (Abbildung 3).

Das Material in unserem Sonnensystem wird im Durchschnitt als weitgehend homogen angenommen. Heterogen ist dagegen die Verteilung des Materials auf die verschiedenen Himmelskörper und auch der Aufbau dieser Körper. So nimmt die Größe der Planeten mit der Entfernung von der Sonne zu. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Temperatur durch Abstrahlung und mit zunehmender Entfernung vom Zentrum der Hülle quadratisch abnahm. (s. Tabelle 1).

Im Inneren kondensierten eher schwerflüchtige Materialien mit niedriger Flüchtigkeit (Volatilität). Hier, näher zur Sonne konzentrierten sich die schweren Elemente, wie Fe, Ni, Mg, Si, während die leichten flüchtigen Elemente (H, He, N,...) mit höherer Flüchtigkeit und mit niedrigeren Siedetemperaturen (kritischen Temperaturen) aus dem planetarischen Nebel nach außen geschleudert wurden.

So bildeten sich 4 innere Gesteinsplaneten (z.B. die Erde) und 5 äußere Gasplaneten. Der Asteroiden-Gürtel, aus dem die meisten Meteoriten stammen, trennt innere und äußere Planeten.

Dies erklärt auch das schnellere Wachstum der äußeren Planeten. Die inneren Planeten wurden kleiner und setzten sich aus spezifisch dichteren Materialien zusammen, die äußeren wurden größer und sammelten spezifisch leichteres Material. Eine auffällige Ausnahme ist der Pluto, der aber vielfach für einen „entkommenen“ Mond des Neptun gehalten wird.

Den Vergleich der Größen der Planeten zeigt die folgende Tabelle 1.

<b>Planet</b>	<b>Äquator-Durchmesser in km</b>
Merkur	4.878
Venus	12.104
Erde	12.756
Mars	6.794
Jupiter	142.796
Saturn	120.000
Uranus	51.200
Neptun	48.600
Pluto	2.200

Tabelle 1: Die Größen der Planeten in unserem Sonnensystem. (LexiRom)

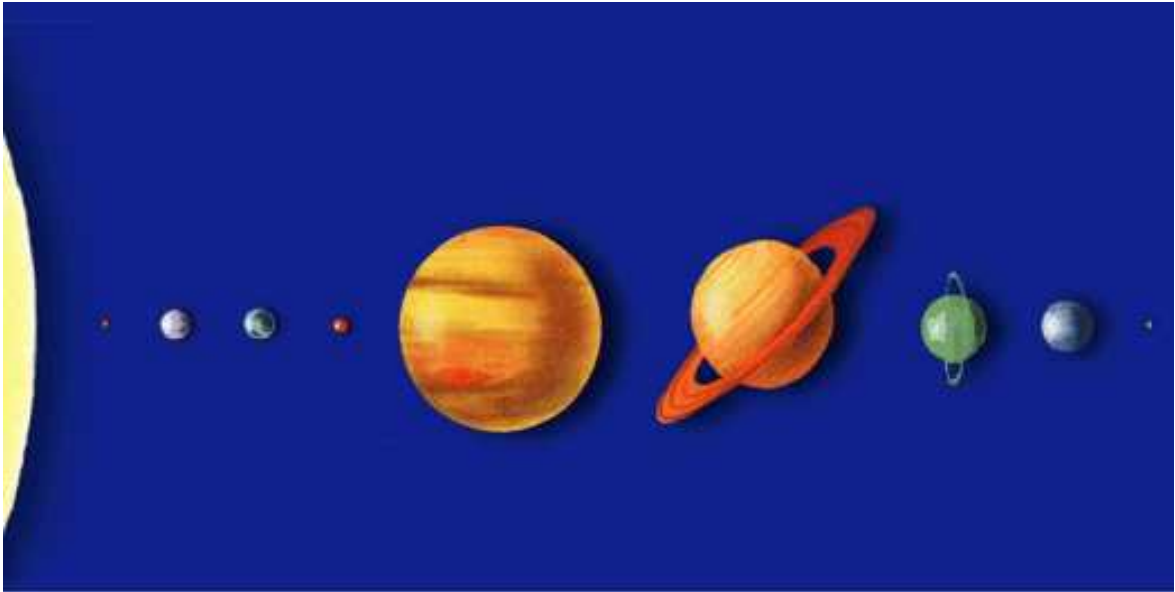


Abb. 1: Planetenkonstellation unseres Sonnensystems. Links ist die Sonne angedeutet. (Lexikon der Geowissenschaften 2001)

Einen Überblick über die Größenverhältnisse und die wichtigsten Angaben zu Aufbau und Zusammensetzung zeigt Abb. 2.

## 1. Die Bildung der Planeten 1

Die Bildung der Planeten ist durch **Akkretion** von Planetesimalen zu erklären. Unter Akkretion versteht man das Anwachsen der Himmelskörper durch „Einfangen“ von Materie, hier von anderen Planetesimalen oder sonstiger Materie.

Als Voraussetzung für das „Einfangen“ der Materie und des damit verbundenen Anwachsens der Himmelskörper gibt es verschiedene Vorstellungen zur Herkunft der Materie, die eingefangen werden soll. Weiter oben ist diese Materie als Urnebel benannt worden.

## 2. Grundlage der Akkretion ist das Gravitationsgesetz.

Isaac Newton (1643-1727) formulierte das Gesetz der universellen Gravitation :

Zwei Körper ziehen einander mit Kräften an, die direkt proportional zu den Massen der beiden Körper und umgekehrt proportional zum Quadrat des gegenseitigen Abstandes sind.

Die mathematische Formel für das Gravitationsgesetz lautet.

$$F = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

In der Formel sind  $m_1$  und  $m_2$  die Massen der beiden Körper  
 $r$  ist die Entfernung zwischen den Körpern,  
 $\gamma$  oder Gamma ist eine unabhängige Konstante mit dem Wert.

$$\gamma = 0,667 \cdot 10^{-10} \frac{m^3}{kgs^2}$$

Die Gravitationskraft  $F$  eines Körpers ( $m_1$ ) auf einen anderen ist gleich groß und entgegengerichtet der Kraft  $F$  des zweiten Körpers ( $m_2$ ) auf den ersten.

Die Körper ziehen sich also entgegengerichtet, aber mit dem gleichen Betrag an. Die Anziehungskraft nimmt mit der Entfernung, konkret proportional zum Quadrat der Entfernung, der Körper voneinander ab. Das heißt, je weiter die Körper voneinander entfernt sind, desto geringer wird die Anziehungskraft zwischen ihnen.

Die Gravitationskraft ist aber nicht als punktuelle Kraft zwischen den Körpern vorzustellen, sondern eher als Kraftfeld, das vom Zentrum des Körpers ( der Masse ) nach außen schwächer wird. Das Gravitationsfeld ist danach um so größer, je größer die Masse des Körpers ist. Kommt ein anderer Körper mit seinem Feld in den Bereich des Feldes, so wird die Gravitationskraft wirksam.

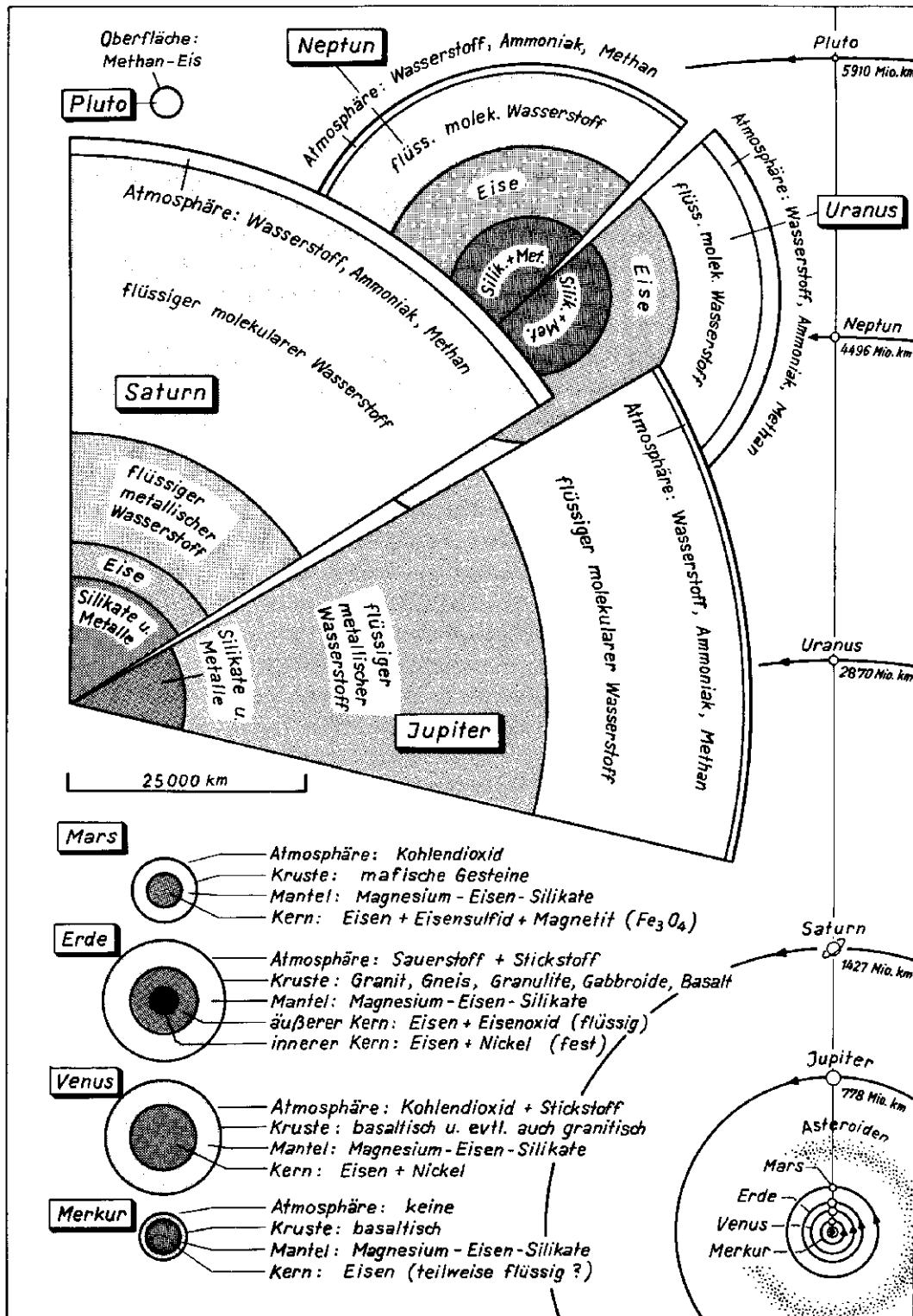


Abb. 2 : Aufbau der Planeten in den wirklichen Größenverhältnissen (s. Maßstab links in der Mitte). Zum Wasserstoff der großen Planeten muss man noch 10-20% Helium hinzudenken. An der rechten Seite sind die mittleren Entfernungen der Planeten von der Sonne, z.T. auch ihre Bahnen eingezeichnet. Die Entfernungen der erdähnlichen Planeten sind angegeben in Astronomischen Einheiten im Vergleich (relativ) zur Erde. D.h. Erde = 1: Merkur = 0,387; Venus = 0,723; Mars = 1,524. (Strobach, K. ; 1991; S. 39)

4.

## 1. Die Bildung der Planeten 2

Welche Rolle spielt die Gravitationskraft bei der Bildung unseres Planetensystems ?

Für die Akkretion waren danach bereits größere Massenansammlungen notwendig, die eine entsprechende gravitative Anziehungskraft auf kleinere Massen in ihrer Umgebung ausüben konnten. Die Entwicklung derartiger Massenansammlungen wird durch Resublimation oder Fraktionierung, also den direkten Übergang von gasförmigen Substanzen in den festen Zustand erklärt. Als Vorstellung kann hier die Kristallisation von Eisblumen aus der Luft auf den Fensterscheiben im Winter helfen.

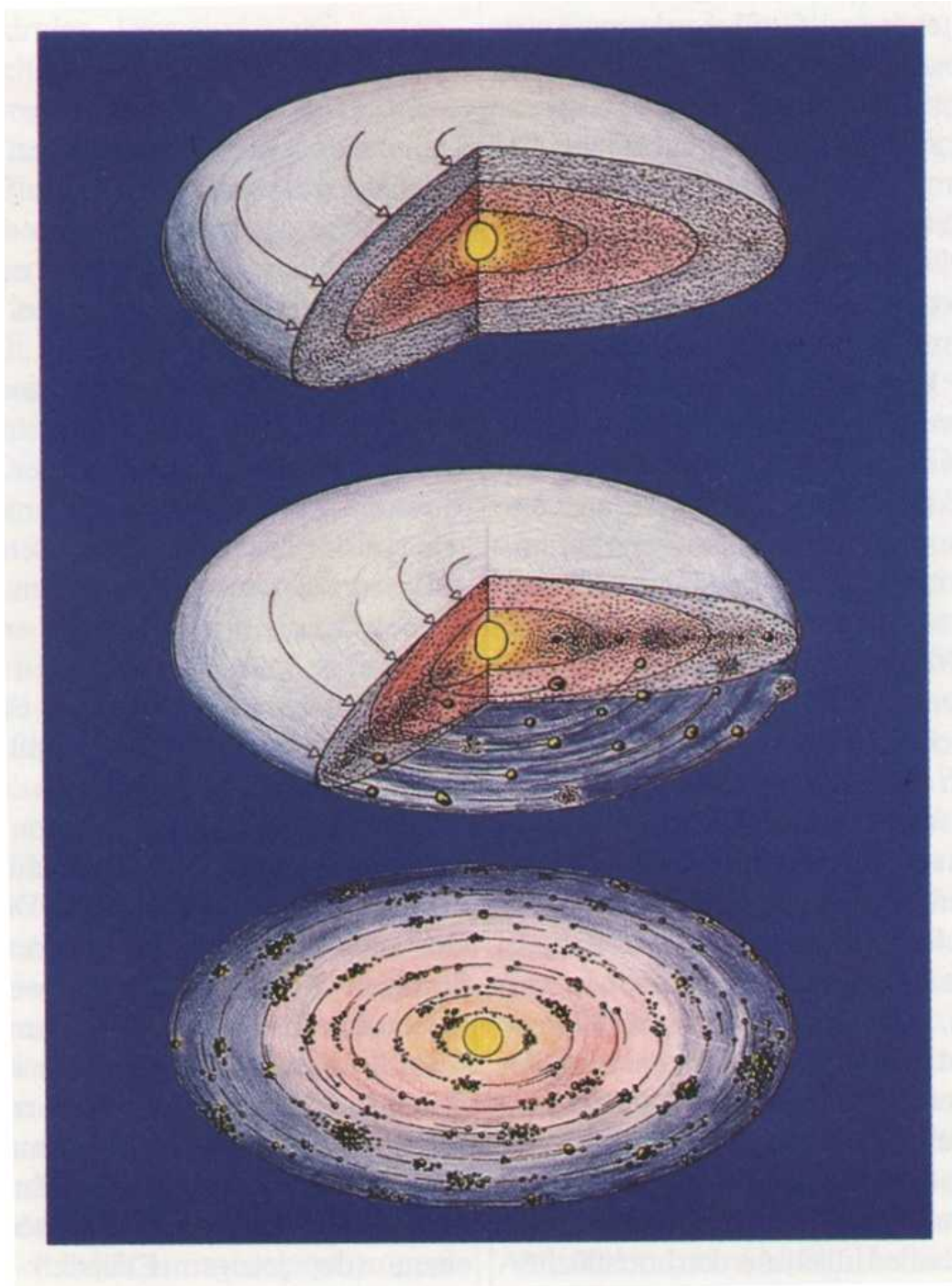
Als Kristallisationskeime dienten feste kleinere Partikel, die sich zu **PLANETESIMALEN DER ERSTEN GENERATION** zusammenfanden. Sie erreichten Größen von ca. 1 - 10 mm. Sie zogen sich in einer, durch das Gravitationsfeld bestimmten Ebene des Sonnensystems scheibenartig zusammen und bildeten eine flache Scheibe aus rotierenden Wolken kleiner Planetesimale (ein vergleichbares Bild bietet heute das Ringsystem des Saturn) die sich, in etwa einem schauerartigen Abregnen vergleichbar, in ihre Position begeben haben.

Die hier versammelten, von ihrer Zusammensetzung, chemisch weitgehend gleichen Festkörper unterliegen untereinander wieder den Gesetzmäßigkeiten des Gravitationsgesetzes und organisieren sich zu größeren Körpern, den **PLANETESIMALEN DER ZWEITEN GENERATION**.

Aus den Planetesimalen der zweiten Ordnung bildeten sich schließlich, durch Akkretion, die **PLANETEN** ( Abb. 3)

Die Vorstellungen wie lange dieser Prozess der Bildung der Planeten gedauert haben mag sind unterschiedlich. Sie reichen von 100.000 bis zu einer Million und mehrere 10 Mio. Jahren.





*Abb. 3 : Drei Phasen aus dem Werden des Planetensystems.*

*Oben: In dem diskusförmigen Nebelgebilde haben sich durch Kondensations-Prozesse die kleineren Planetesimalen der ersten Generation mit Durchmessern von 1 bis 10 mm gebildet.*

*Mitte: Die Planetesimalen regnen infolge der von der Ekliptikebene ausgehenden gravitativen Kräfte auf diese hin ab. Der ursprüngliche Nebel hat sich bereits stark abgeflacht.*

*Unten: Die Bildung der größeren Planetesimalen der zweiten Generation ist abgeschlossen. Gase und feste Körper bilden jetzt eine flache Scheibe. Die Akkretion der Planeten durch Vereinigung der großen Planetesimalen ist im Gange. (Strobach, Klaus; Vom Urknall zur Erde, Stuttgart 1983; S. 212)*

## **1. Modelle zur Entwicklung des inneren Aufbaus der Erde**

Zur Erklärung des inneren Aufbaus der Erde, der sich nach der abgeschlossenen Akkretion herausbildete, werden im wesentlichen zwei Positionen vertreten die von zwei verschiedenen, Modellen für den Akkretionsprozess ausgehen:

### **Die homogene Akkretion**

In den sich verdichtenden Planetesimalen oder Planetoiden wird die freigesetzte gravitative Energie und auch die Reibungs- und Aufprallenergie in Wärmeenergie umgesetzt. Dies führt zu Schmelzprozessen in den Planetesimalen. Durch konvektive Prozesse (= Ausgleichströmung durch temperaturbedingte Dichteunterschiede) findet ein Materialausgleich statt, der zu einer "Sortierung" nach der Dichte und zur Herausbildung schaliger Strukturen führt. Die schwereren Materialien in der Erde konzentrierten sich demnach im Zentrum, die leichteren zunehmend schalig nach außen.

**Bei diesem Modell erfolgt die Entwicklung der Schalenstruktur erst nach der vollständigen Akkretion der Erde.**

### **Die heterogene oder inhomogene Akkretion**

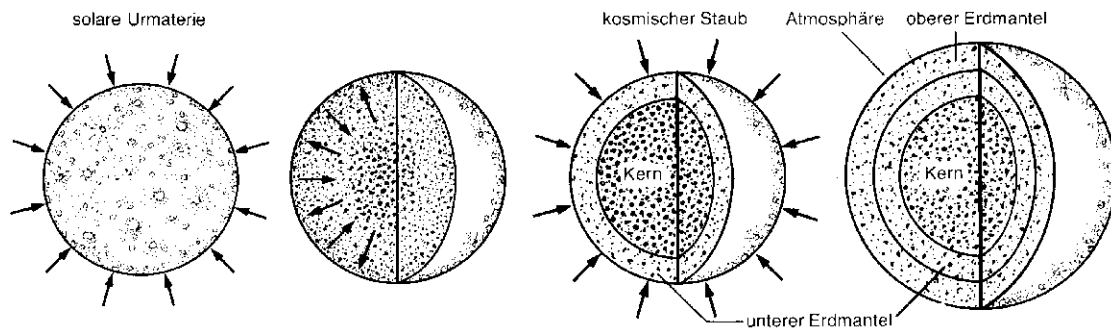
Schon bei der Akkretion in der Ur-Nebel-Materie bilden sich von der Zusammensetzung her in bestimmten Bereichen der Urnebel relativ homogene Körper aus schwerer Materie, die durch ständige Akkretion eine zunehmende Massenanziehung ausüben und entsprechend auch spezifisch leichtere Materie aus größerer Entfernung anziehen. So bildete sich eine „Urerde“ die schon metallisches Eisen enthielt. Das Eisen konzentrierte sich wegen seiner hohen Dichte im Planeteninnern. Möglich wurde dies nach dem „Durchschmelzen“ der Urerde. Unter dem Begriff „Durchschmelzen“ ist der Vorgang der zunehmenden Aufheizung der Erde bis zur Bildung von Schmelzen zu verstehen. Die notwendige Wärmezufuhr für diesen Vorgang kam aus verschiedenen Quellen.

Die Hauptquelle stellte die Umwandlung von Gravitationsenergie in Wärmeenergie dar. Umgewandelt wurde die, durch die Akkretion freigewordene, Gravitationsenergie der Planetesimalen, d.h. die durch die Verschmelzung kleinerer mit größeren Körpern freiwerdende Massenanziehungskraft zwischen den Körpern. Hinzu kam Wärme, die aus dem radioaktiven Zerfall instabiler Elemente stammte. Um den schweren Kern lagerten sich die leichteren Elemente im Erdmantel. Auf den Erdmantel lagerte sich kosmischer Staub und bildete den heutigen oberen Mantel. Der kosmische Staub enthielt bereits abgekühltes Material des Sonnensystems. Die Erdkruste sonderte sich nach diesem Konzept erst später vom Erdmantel ab.

Zusammengefaßt hätte sich aus den schweren Elementen zunächst der Erdkern gebildet und anschließend der untere Erdmantel, der sich aus den leichteren Elementen der Urerde zusammensetzte, erst danach ist der obere Erdmantel angelagert worden, aus dem sich die Erdkruste entwickeln konnte.

**Bei diesem Modell wird die Entwicklung der Schalenstruktur bereits mit der Akkretion angelegt.**

Der grobe Ablauf für das inhomogene Akkretionsmodell ist in Abb. 4 dargestellt.



**Bild 2:** Das inhomogene Akkretionsmodell beschreibt die frühe Entwicklung der Erde als mehrstufigen Prozeß. Bei der Kondensation des Sonnennebels bildete sich die Erde als Kugel, die durch Anlagerung solarer Urmaterie stetig wuchs (ganz links). Unter anderem enthielt sie auch metallische Elemente wie Eisen und Nickel. Da sie sich aus schweren, nichtflüchtigen Komponenten des Urnebels zusammenballte, besaß sie zunächst vermutlich keine nennenswerte Atmosphäre. Während der folgenden hundert Millionen Jahre heizte sich diese Ureerde durch Umwandlung von Gravitations- in Wärmeenergie, durch den wärmeerzeugenden radioaktiven Zerfall und die beim

Aufprall einschlagender Meteoriten freierwerdende Energie so weit auf, daß sie schließlich zu schmelzen begann. Schwere Elemente wie Eisen und Nickel konzentrierten sich bei der nun einsetzenden Entmischung und Auftrennung der Erdbestandteile (zweites Bild von links) im Erdkern, während sich die leichteren Elemente in der Hülle anreicherten und den heutigen unteren Erdmantel bildeten. Auf dem so entstandenen Protoplaneten lagerte sich in der Folgezeit kosmischer Staub ab, der sich zu dem heutigen oberen Erdmantel verdichtete (drittes und viertes Bild von links). Dieser Staub stammte aus bereits abgekühlter Materie des Sonnensystems und enthielt daher Eisen, das mit anderen

Elementen reagiert hatte und dabei vom metallischen in den zweiwertigen Zustand übergegangen war. Durch Ausgasung des oberen Erdmantels entstand schließlich die Uratmosphäre der Erde (ganz rechts). Entgegen früheren Annahmen dürfte sie Kohlenstoff und Stickstoff nicht in Form der Wasserstoff-Verbindungen Methan ( $\text{CH}_4$ , C = Kohlenstoff, H = Wasserstoff), und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ , N = Stickstoff) enthalten haben, da diese Gase in Gegenwart von zweiwertigem Eisen chemisch nicht stabil sind. Man kann daher davon ausgehen, daß die Uratmosphäre der Erde im wesentlichen aus Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) bestand.

Abb. 4 : Schidlowski, Manfred; Die Geschichte der Erdatmosphäre; Spektrum der Wissenschaft 4/1981; S. 19

Diese Überlegungen werden auch durch die Vorstellungen zur Bildung des Mondes gestützt. Der Mond ist in etwa aus Material aufgebaut, das der Zusammensetzung des oberen Erdmantels entspricht. Er hat eine silikatische Zusammensetzung, bis auf die flüchtigen Bestandteile, die stark angereichert sind. Der Mond hat sich aus der Umgebung der Erdmasse gelöst (möglicherweise nach einer Kollision mit einem größeren Planetesimalen), als der Kern der Erde sich bereits gebildet hatte.

### Zusammenfassung :

Die Erde hat sich, beginnend vor etwa 4.6 Mrd Jahren, in einen schrittweisen Prozess mit den folgenden Stationen gebildet :

1. Aggregation durch Akkretion
2. Aufheizen durch Zufuhr von Energie aus Aufschlag/Reibung, Gravitationsenergie
3. Teilweises Aufschmelzen der Masse der Erde
4. Differentiation/Trennung einzelner Teile der Erde nach ihrer Dichte und Herausbildung der Schalen
5. Kristallisation von Festkörpern in der äußeren Erde
6. Entgasung leichtflüchtiger Bestandteile aus der äußeren Erde
7. Bildung der Atmosphäre

## Atombau, Ionenbindung, Kristallgitter, Silikate

### **Atom**

*Atom [griech.], kleinste, mit chemischen Mitteln nicht weiter zerlegbare Einheit eines chemischen Elements. Alle Atome eines chemischen Elements haben dieselben chemischen Eigenschaften, wobei ursprünglich diese Eigenschaften zusammen mit der relativen Atommasse die Einordnung in das Periodensystem der chemischen Elemente festlegten. Es gibt also ebenso viele verschiedene Atomarten, wie es chemische Elemente gibt.*

*Die Zugehörigkeit eines Atoms zu einem bestimmten chemischen Element wird durch die Anzahl seiner Elektronen in der Atomhülle bzw. durch die gleich große Zahl der Protonen im Kern, die Protonen- oder Kernladungszahl, bestimmt. Diese Zahl ist zugleich die Ordnungszahl des Elements. Durch Zusammenschluss von Atomen entstehen die Moleküle, die kleinsten Einheiten einer chemischen Verbindung. Fast zu jeder Atomart gehören mehrere Sorten von Atomen unterschiedlicher Masse. Diese Atomsorten bilden die **Isotope** des betreffenden Elements; die Atomkerne dieser Isotope haben übereinstimmende Protonenzahl, aber unterschiedlich viele Neutronen (Neutronenzahl). Die Summe aus Protonen- und Neutronenzahl ergibt die Massenzahl, wobei mit steigender Ordnungszahl die Neutronenzahl mehr und mehr überwiegt (bei Uran U 238 sind es 146 Neutronen gegenüber 92 Protonen).*

### **Die Atommasse (absolute Atommasse):**

*Die Masse eines Atoms (absolute Atommasse) beträgt beim leichtesten Isotop ( $^1\text{H}$ ) des Wasserstoffs  $1,67343 \cdot 10^{-24}\text{g}$ , alle übrigen Atommassen erhält man durch Multiplikation der jeweiligen relativen Atommasse bzw. der Isotopenmasse mit der vereinheitlichten atomaren Masseneinheit  $u = 1,6605655 \cdot 10^{-24}\text{g}$ .*

*Die Masse eines einzelnen Atoms wird durch eine internationale Einheit der Masse für die Angabe von Teilchenmassen angegeben. Sie ist als atomare Masseneinheit, der 12. Teil der Masse des Kohlenstoffnuklids  $^{12}\text{C}$ ,  $= 1,6605655 \cdot 10^{-24}\text{g}$ . Das Einheitenzeichen ist  $u$ .*

*Sie ist eine relative Angabe (Verhältniszahl) und gibt das Verhältnis des betrachteten Atoms, bezogen auf 1/12 der Masse des Kohlenstoffatoms an.*

*Die Verhältniszahl berücksichtigt sowohl die mögliche unterschiedliche Masse von Protonen und Neutronen, als auch die Elektronenmasse. Die Elektronenmasse beträgt nur 1/1837 der Protonenmasse.*

### **Die Größe der Atome :**

*Der Kerndurchmesser liegt in der Größenordnung von  $10^{-14}\text{ m}$  ( $=0,00001\text{ nm}$ ), derjenige des gesamten Atoms zwischen  $0,08$  und  $0,3\text{nm}$  (Wellenlänge des sichtbaren Lichts zw.  $400$  und  $800\text{nm}$ ).*

Das Atom hat einen Durchmesser in der Dimension von  $10^{-8}\text{ cm}$

Der Atomkern hat einen Durchmesser von  $10^{-12}\text{ cm}$

Das Verhältnis der Größe des Atomkerns zum Gesamtatom ist im Durchschnitt :

$$\frac{1}{10.000}$$

Der Atomkern enthält Nukleonen, hierzu zählen Protonen und Neutronen. Sie haben etwa eine vergleichbar große Masse. Die Anzahl der Protonen, also die Protonenzahl ist gleich der Kernladungszahl. Sie gibt auch die Ordnungszahl eines Elements im Periodensystem an.

Protonenzahl = Kernladungszahl = Ordnungszahl
---

Über die Massenzahl des Atomkerns lässt sich die Anzahl der Nukleonen ermitteln.

(Anzahl der Protonen + Anzahl der Neutronen) x Avogadrozahl = Atommasse

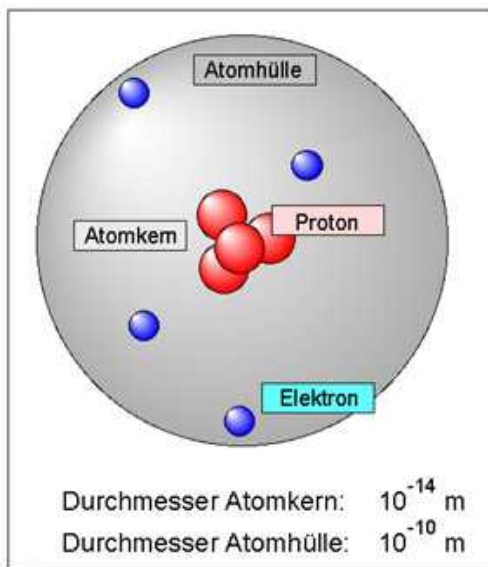


Abb. 5: Atombau. (Alle Abbildungen zur Chemie aus: <http://www.u-helmich.de/che/11/atom/atom02.html#Anchor-Das-59793>)

**Die Atomhülle oder die Elektronenschale enthält die Elektronen.**

**Elektron** [e'lektrcn; griech.], physikal. Symbol e, e- oder -; ein leichtes, negativ geladenes, stabiles (d.h. nicht zerfallendes) Elementarteilchen; neben Proton und Neutron einer der Bausteine der Atome. Das Elektron hat die Ruhemasse  $m_e = 0,9103897 \cdot 10^{-28} \text{g}$  (rd. 1/1837 der Protonenmasse) und eine elektrische Ladung  $e = -1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{Coulomb}$  (Elementarladung).

Elektronen mit annähernd gleicher Entfernung zum Kern werden in einer Elektronenschale zusammengefasst. Die Elektronenschalen werden nach steigender Entfernung zum Kern nummeriert oder mit Buchstaben versehen (K, L, M, N). Jeder Elektronenschale kann eine maximale Anzahl von Elektronen zugeordnet werden.

Elektronenschale	1	2	3	4	5	
	K	L	M	N	O	
Maximale Anzahl von Elektronen	2	8	18	32	50	

Einige Beispiele:

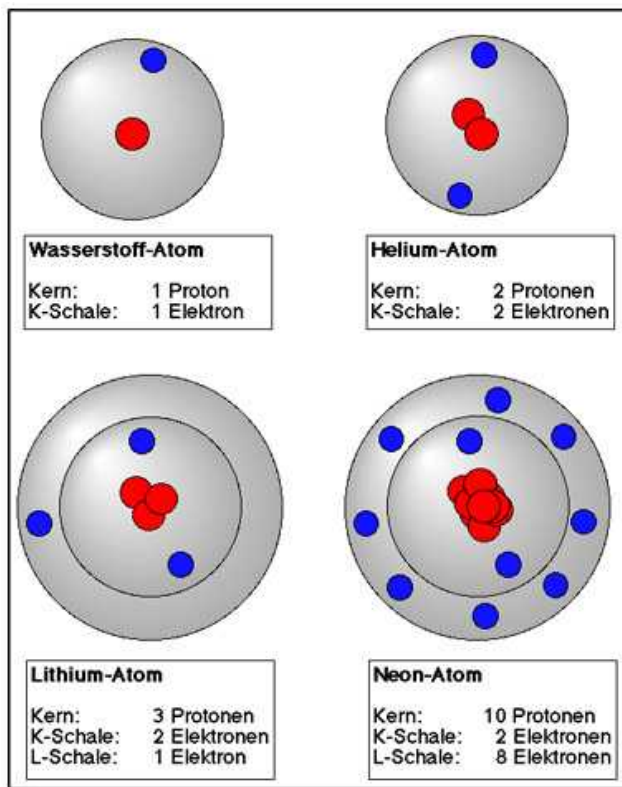


Abb. 6: Atombau, Beispiele. (<http://www.u-helmich.de/che/11/atom/atom02.html#Anchor-Das-59793>)

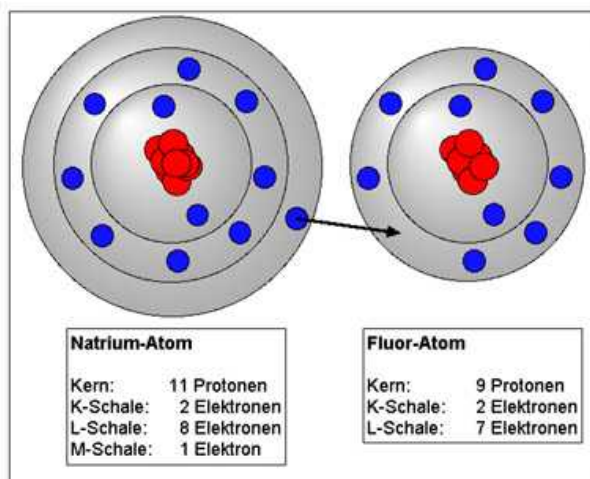


Abb. 7: Atombau, Beispiele. (<http://www.u-helmich.de/che/11/atom/atom02.html#Anchor-Das-59793>)

	I	II	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb		IB	IIB	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	1 <input type="checkbox"/> <b>H</b> 1,007																2 <input type="checkbox"/> <b>He</b> 4,002	
2	3 <input type="checkbox"/> <b>Li</b> 6,941	4 <input type="checkbox"/> <b>Be</b> 9,012										5 <input type="checkbox"/> <b>B</b> 10,81	6 <input type="checkbox"/> <b>C</b> 12,01	7 <input type="checkbox"/> <b>N</b> 14,00	8 <input type="checkbox"/> <b>O</b> 15,99	9 <input type="checkbox"/> <b>F</b> 18,99	10 <input type="checkbox"/> <b>Ne</b> 20,17	
3	11 <input type="checkbox"/> <b>Na</b> 22,98	12 <input type="checkbox"/> <b>Mg</b> 24,30										13 <input type="checkbox"/> <b>Al</b> 26,98	14 <input type="checkbox"/> <b>Si</b> 28,08	15 <input type="checkbox"/> <b>P</b> 30,97	16 <input type="checkbox"/> <b>S</b> 32,06	17 <input type="checkbox"/> <b>Cl</b> 35,45	18 <input type="checkbox"/> <b>Ar</b> 39,94	
4	19 <input type="checkbox"/> <b>K</b> 39,09	20 <input type="checkbox"/> <b>Ca</b> 40,07	21 <input type="checkbox"/> <b>Sc</b> 44,95	22 <input type="checkbox"/> <b>Ti</b> 47,88	23 <input type="checkbox"/> <b>V</b> 50,94	24 <input type="checkbox"/> <b>Cr</b> 51,99	25 <input type="checkbox"/> <b>Mn</b> 54,93	26 <input type="checkbox"/> <b>Fe</b> 55,84	27 <input type="checkbox"/> <b>Co</b> 58,93	28 <input type="checkbox"/> <b>Ni</b> 58,69	29 <input type="checkbox"/> <b>Cu</b> 63,54	30 <input type="checkbox"/> <b>Zn</b> 65,39	31 <input type="checkbox"/> <b>Ga</b> 69,72	32 <input type="checkbox"/> <b>Ge</b> 72,61	33 <input type="checkbox"/> <b>As</b> 74,92	34 <input type="checkbox"/> <b>Se</b> 78,96	35 <input type="checkbox"/> <b>Br</b> 79,90	36 <input type="checkbox"/> <b>Kr</b> 83,8
5	37 <input type="checkbox"/> <b>Rb</b> 85,46	38 <input type="checkbox"/> <b>Sr</b> 87,62	39 <input type="checkbox"/> <b>Y</b> 88,90	40 <input type="checkbox"/> <b>Zr</b> 91,22	41 <input type="checkbox"/> <b>Nb</b> 92,90	42 <input type="checkbox"/> <b>Mo</b> 95,94	43 <input type="checkbox"/> <b>Tc</b> 98,90	44 <input type="checkbox"/> <b>Ru</b> 101,0	45 <input type="checkbox"/> <b>Rh</b> 102,9	46 <input type="checkbox"/> <b>Pd</b> 106,4	47 <input type="checkbox"/> <b>Ag</b> 107,8	48 <input type="checkbox"/> <b>Cd</b> 112,4	49 <input type="checkbox"/> <b>In</b> 114,8	50 <input type="checkbox"/> <b>Sn</b> 118,7	51 <input type="checkbox"/> <b>Sb</b> 121,7	52 <input type="checkbox"/> <b>Te</b> 127,6	53 <input type="checkbox"/> <b>I</b> 126,9	54 <input type="checkbox"/> <b>Xe</b> 131,2
6	55 <input type="checkbox"/> <b>Cs</b> 132,9	56 <input type="checkbox"/> <b>Ba</b> 137,3		72 <input type="checkbox"/> <b>Hf</b> 178,4	73 <input type="checkbox"/> <b>Ta</b> 180,9	74 <input type="checkbox"/> <b>W</b> 183,8	75 <input type="checkbox"/> <b>Re</b> 186,2	76 <input type="checkbox"/> <b>Os</b> 190,2	77 <input type="checkbox"/> <b>Ir</b> 192,2	78 <input type="checkbox"/> <b>Pt</b> 195,0	79 <input type="checkbox"/> <b>Au</b> 196,9	80 <input type="checkbox"/> <b>Hg</b> 200,5	81 <input type="checkbox"/> <b>Tl</b> 204,3	82 <input type="checkbox"/> <b>Pb</b> 207,2	83 <input type="checkbox"/> <b>Bi</b> 208,9	84 <input type="checkbox"/> <b>Po</b> 208,9	85 <input type="checkbox"/> <b>At</b> 209,9	86 <input type="checkbox"/> <b>Rn</b> 222,0
7	87 <input type="checkbox"/> <b>Fr</b> 223,0	88 <input type="checkbox"/> <b>Ra</b> 226,0		104 <input type="checkbox"/> <b>Rf</b> 261,1	105 <input type="checkbox"/> <b>Db</b> 262,1	106 <input type="checkbox"/> <b>Sg</b> 263,1	107 <input type="checkbox"/> <b>Bh</b> 262,1	108 <input type="checkbox"/> <b>Hs</b> 265	109 <input type="checkbox"/> <b>Mt</b> 266	110 <input type="checkbox"/> <b>Ds</b> 269	111 <input type="checkbox"/> <b>Uuu</b> 272	112 <input type="checkbox"/> <b>Uub</b> 277	© www.periodensystem.info					
				57 <input type="checkbox"/> <b>La</b> 138,9	58 <input type="checkbox"/> <b>Ce</b> 140,1	59 <input type="checkbox"/> <b>Pr</b> 140,9	60 <input type="checkbox"/> <b>Nd</b> 144,2	61 <input type="checkbox"/> <b>Pm</b> 146,9	62 <input type="checkbox"/> <b>Sm</b> 150,3	63 <input type="checkbox"/> <b>Eu</b> 151,9	64 <input type="checkbox"/> <b>Gd</b> 157,2	65 <input type="checkbox"/> <b>Tb</b> 158,9	66 <input type="checkbox"/> <b>Dy</b> 162,5	67 <input type="checkbox"/> <b>Ho</b> 164,9	68 <input type="checkbox"/> <b>Er</b> 167,2	69 <input type="checkbox"/> <b>Tm</b> 168,9	70 <input type="checkbox"/> <b>Yb</b> 173,0	71 <input type="checkbox"/> <b>Lu</b> 174,9
				89 <input type="checkbox"/> <b>Ac</b> 227,0	90 <input type="checkbox"/> <b>Th</b> 232,0	91 <input type="checkbox"/> <b>Pa</b> 231,0	92 <input type="checkbox"/> <b>U</b> 238,0	93 <input type="checkbox"/> <b>Np</b> 237,0	94 <input type="checkbox"/> <b>Pu</b> 244,0	95 <input type="checkbox"/> <b>Am</b> 243,0	96 <input type="checkbox"/> <b>Cm</b> 247,0	97 <input type="checkbox"/> <b>Bk</b> 247,0	98 <input type="checkbox"/> <b>Cf</b> 251,0	99 <input type="checkbox"/> <b>Es</b> 252,0	100 <input type="checkbox"/> <b>Fm</b> 257,0	101 <input type="checkbox"/> <b>Md</b> 258,0	102 <input type="checkbox"/> <b>No</b> 259,1	103 <input type="checkbox"/> <b>Lr</b> 260,1



Die häufigsten Elemente in der äußeren Erde.

Element	Ordnungszahl	Ladung/ Wertigkeit	Ionen-Charakter
Sauerstoff	${}_8\text{O}$	$2^-$	Anion
Silizium	${}_{14}\text{Si}$	$4^+$	Kation
Aluminium	${}_{13}\text{Al}$	$3^+$	Kation
Natrium	${}_{11}\text{Na}$	$1^+$	Kation
Kalium	${}_{19}\text{K}$	$1^+$	Kation
Calcium	${}_{20}\text{Ca}$	$2^+$	Kation
Magnesium	${}_{12}\text{Mg}$	$2^+$	Kation
Eisen	${}_{26}\text{Fe}$	$2^+$	Kation

Tabelle 2 : Einige wichtige Eigenschaften der häufigsten Elemente in Erdkruste und Erdmantel

### Chemische Bindung

Isolierte Atome existieren in der Natur nur unter Extrembedingungen, z.B. in hoch erhitzten Dämpfen von Elementen und Edelgasen. Die Stoffe, die uns umgeben, sind Verbindungen von Atomen verschiedener Elemente zu Molekülen. In Aggregaten von Molekülen finden wir dann die uns bekannten Eigenschaften der Stoffe. Die Bindung zu Stoffen/Molekülen ergibt sich aus der Wechselwirkung von Atomen oder von Atomen mit Molekülen. Für die Bindung gibt es je nach den physikochemischen Eigenschaften der beteiligten Atome und Moleküle verschiedene Möglichkeiten, die zur Bildung von Stoffen führen können.

Die Betrachtung des Bindungstyps und der beteiligten Bindungspartner ist für die Kenntnis der entstehenden Stoffe, z.B. der Minerale in der Erde, äußerst wichtig. Die Bildung der Minerale erfolgt durch Kristallisation aus Lösungen und durch Veränderung bereits bestehender Minerale. Die Bildung oder Umbildung ist durch chemische und/oder physikalische Faktoren bestimmt.

Die wichtigsten sind:

- Zusammensetzung und Konzentration      X
- Druck      P
- Temperatur      T

Umbildungen sind die Folge von Veränderungen in der Umgebungssituation von Mineralen. Wenn z.B. P oder T erhöht wird, ändert sich die Gleichgewichtssituation und das wirkt sich direkt auf die Kristallgitter aus. Immer aber kommt es darauf an, welche Atome/Bausteine am Aufbau beteiligt sind und welche Eigenschaften sie in die Bindung einbringen.



Konstant am Aufbau der wichtigsten Minerale in Erdkruste und Erdmantel beteiligt sind hauptsächlich die in Tabelle 2 genannten 8 Elemente. Variabel sind die thermodynamischen Bedingungen, wie Druck und Temperatur und/oder die chemischen Eigenschaften der Lösungen, in denen Reaktionen ablaufen. Die Kenntnis über die Eigenschaften der wichtigsten Elemente und der chemischen Bindungen ist somit ein Schlüssel für die meisten mineralogischen und geologischen Prozesse in der Erde.

**Ionenbindung und Oktettregel:**

Jedes Atom strebt eine voll besetzte Außenhülle an. Dann würde es nämlich einem Edelgas gleichen.

Beispiel:

Dem Chloratom mit der Ordnungszahl 17 fehlt genau ein Elektron, um die äußere M-Schale komplett zu haben. Das Natriumatom hat nur ein Elektron auf der M-Schale. Wenn das Chloratom ein Elektron aufnimmt und das Natriumatom eines abgibt, haben beide Atome die Edelgaskonfiguration. Und diese Edelgaskonfiguration wird von jedem Atom angestrebt. Dieses Streben ist der Grund für (fast) jede chemische Reaktion, die auf unserem Planeten abläuft.

*Was passiert, wenn ein Natriumatom sein Außenelektron in die Außenschale eines Chloratoms transferiert hat? Das Natriumatom hat eine Außenschale mit 0 Elektronen. Die Außenschale fällt weg und die bisherige zweite L-Schale (von außen) wird jetzt zur Außenschale. Dort befinden sich 8 Elektronen - das Natrium hat die Edelgaskonfiguration. Allerdings hat es in seiner Elektronenhülle ein Elektron weniger als Protonen im Kern. Das Natrium ist jetzt ein einwertig positiv geladenes Natriumion, ein Kation. Das Gleiche, allerdings mit umgekehrten Vorzeichen, gilt für das Chloratom, welches nach der Elektronenaufnahme ein einwertig negatives Chloridion, ein Anion ist.*

*Wenn positiv geladene Natriumionen und negativ geladene Chloridionen nebeneinander im gleichen Reagenzglas vorkommen, ziehen sich die entgegengesetzt geladenen Ionen an - und es bildet sich ein fester Natriumchlorid-Kristall. In diesem Kristall zieht jedes Natriumion eine ganze Reihe von Chloridionen an, und umgekehrt zieht jedes Chloridion eine ganze Reihe von Natriumionen an. Der Zusammenhalt oder die sogenannte Gitterenergie in diesem Kristall ist recht hoch. Das kann man an den hohen Schmelz- und Siedepunkten solcher Ionenverbindungen merken.*

Im Kristallgitter sieht das so aus.

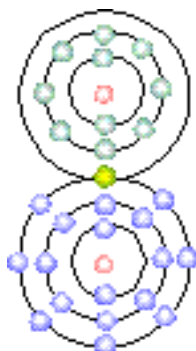


Abb. 8: Beispiel Kochsalz, NaCl:  
( <http://www.chemieplanet.de/stoffe/stoffe.htm> )

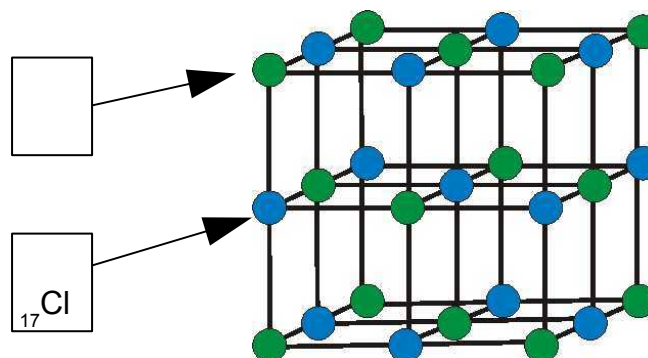


Abb. 9: Kristallgitter von Kochsalz.

Jedes Ion ist von einer bestimmten Anzahl von entgegengesetzt geladenen Ionen umgeben. Die elektrische Ladung wirkt gleichermaßen auf diese Ionen.

#### Definition der Ionenbindung:

*Heteropolare Bindung, elektrovalente Bindung, ionische Bindung, Ionenbindung, polare Bindung, Bindung zwischen Ionen, typischerweise in Ionenkristallen, die auf der elektrostatischen Anziehung von Kationen und Anionen beruht. Wenn sich Atome miteinander verbinden, die sich in ihrer Elektronegativität stark unterscheiden (ein Indiz dafür ist die Elektronenkonstellation auf der äußersten Schale; A.W.), tritt eine vollständige Übertragung von Elektronen der Valenzschale auf den elektronegativeren Partner (Ionisierung) unter Bildung eines Ionenpaars, das sich mit weiteren Ionenpaaren zu einem Ionenkristall zusammenlagert, ein. Die elektrostatischen Kräfte zwischen Ionen wirken radialsymmetrisch und sind ungerichtet. Die Stöchiometrie von Ionenkristallen ist durch die Bedingung der Elektroneutralität gegeben (das bedeutet, dass die Verbindung von Ionen zu einer elektrisch neutralen Situation führen muss. Es müssen gleich viel positive wie negative Ladungen verbunden werden. A.W..) Ihre Kristallstruktur beruht auf einer dichten Packung kugelförmiger Ionen (Kugelpackung), wobei sich jedes Ion mit einer möglichst großen Anzahl von Gegenionen so umgibt, daß eine hohe Packungsdichte resultiert. Ionenkristalle besitzen typisch salzartige Eigenschaften. (Lexikon der Geowissenschaften; Band 2; Heidelberg 2000; S. 417)*

#### Zusammenfassung und Regeln:

- Metallatome haben nur wenige Elektronen in der Außenhülle und geben diese daher recht leicht ab.
- Nichtmetallatomen fehlen nur wenige Elektronen, sie nehmen daher sehr gern Elektronen auf.
- Nach erfolgtem Elektronenübergang sind die Metallatome positiv geladen (Kationen), die Nichtmetallatome negativ (Anionen).
- Die Kationen und Anionen ziehen sich gegenseitig sehr stark an, es entsteht ein Ionenkristall.
- Die hohen Schmelztemperaturen von Salzen zeigen, wie stark die Anziehungskräfte innerhalb eines solchen Kristalls sind.

#### Einige Beispiele:

Wir verbinden  ${}_1\text{H}$  mit  ${}_8\text{O}$  =  $\text{H}_2\text{O}$

Wir verbinden  ${}_{12}\text{Mg}$  mit  ${}_8\text{O}$  =  $\text{MgO}$

Wir verbinden  ${}_{13}\text{Al}$  mit  ${}_8\text{O}$  =  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Wir verbinden  ${}_{11}\text{Na}$  mit  ${}_{17}\text{Cl}$  =  $\text{NaCl}$

Neben der elektrostatischen Anziehung der Ionen ist natürlich auch die Größe der Ionen wichtig für die Verbindung.

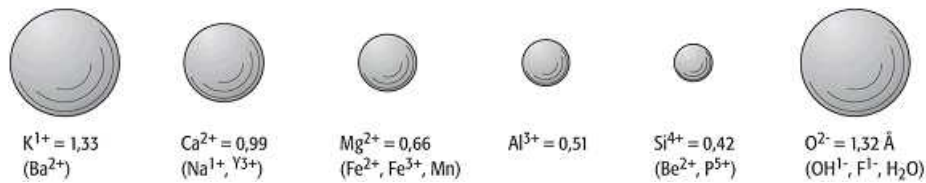


Abb. 10: Ionenradien der wichtigsten Elemente in der äußeren Erde. (Lexikon der Geowissenschaften 2001)

Beides muss zusammenpassen, damit eine Verbindung erfolgt.

### Übertragen wir die Erkenntnisse nun auf die Silikate:

**Silicate** sind die dominierenden Minerale in Erdmantel und Erdkruste. In der Erdkruste bilden sie über 90% der Gesteine.

Zum Verständnis der Silicate ist es notwendig, einige Grundlagen zu Bau und Struktur von Mineralen und Gesteinen zu erläutern.

#### Grundsätzlich:

- Gesteine sind Mineralaggregate, d.h. sie sind aus Mineralen zusammengesetzt. Dabei können verschiedene Minerale am Aufbau des Gesteins beteiligt sein, wie beim Granit oder auch nur ein Mineral, wie bei Marmor oder Quarzit.
- Minerale sind stofflich homogene Grundbestandteile der Erde, des Mondes, der Meteoriten und aller übrigen Himmelskörper. Die meisten Minerale sind Festkörper und anorganischer Natur. Sie können wie Gold, Kupfer, Schwefel oder Diamant aus den Elementen selbst, überwiegend aber aus Verbindungen bestehen.

Grundbaustein der meisten gesteinsbildenden Minerale ist der Silikattetraeder. Er ist aufgebaut aus den Elementen Si und O. Der anorganische Grundbaustein „Silikattetraeder“ ist in der Geologie/Mineralogie etwa vergleichbar mit den CH-Molekülen als Grundbaustein für organische Verbindungen. Die Häufigkeit des Auftretens der Silikate in den Gesteinen führt zu der Bezeichnung „silikatisch“ bei der Zusammensetzung von Erdmantel und Erdkruste.

Die Verbindung zwischen den beiden Elementen führt zur Konstruktion eines Tetraeders mit einem Si-Atom im Zentrum und 4 Sauerstoffatomen darum herum. Die Sauerstoffatome sind jeweils mit der Hälfte ihrer Ladung an das Si-Atom gebunden, die andere Hälfte steht für weitere Bindungen mit umgebenden Kationen zur Verfügung.

Das Konstruktionsprinzip der Silikattetraeder:

Si ist vierwertig und als Kation 4-fach positiv geladen =  $\text{Si}^{4+}$   
 O ist zweiwertig und als Anion 2-fach negativ geladen =  $\text{O}^{2-}$

Rein rechnerisch ergibt sich:



Der Tetraederkomplex ist also -fach negativ geladen.

Beim Silikattetraeder wird die sehr unterschiedliche Größe von Si und O optimal für eine dichte Kugelpackung genutzt (Abb. 11). Die Konstruktion kann räumlich unendlich fortgesetzt werden und ist eine äußerst stabile Bindung. Sie ist uns in der Natur als Quarz bekannt. Da Quarz aber nicht das einzige Silikatmineral ist, muss es hier noch andere Verknüpfungsmöglichkeiten geben.

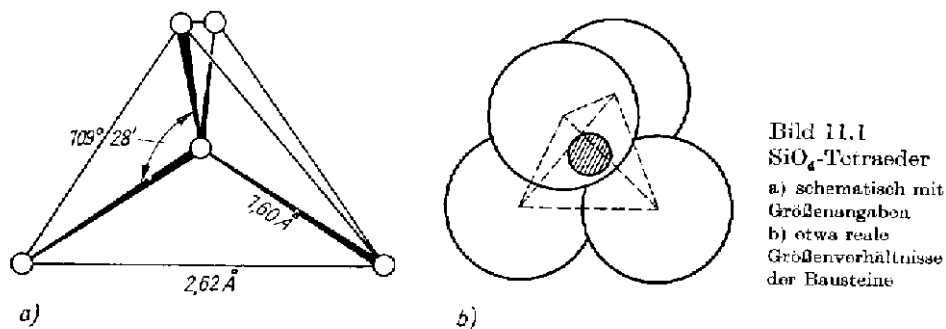


Abb. 11 : Bau und Größe der Silikattetraeder (Rösler, H. J. 1981 ; S. 429)

Das Prinzip der Bindung ist, dass die Sauerstoffionen jeweils mit der Hälfte ihrer Ladung an das Si-Ion gebunden sind, während die andere Hälfte für weitere Bindungen mit Si-Ionen, aber auch für andere umgebende Kationen zur Verfügung steht. Betrachten wir den Tetraeder aber isoliert, so ist er ein 4-fach negativ geladenes Anion =  $\text{SiO}_4^{4-}$ . Er wird auch als Sauerstoffkomplexion bezeichnet.

## Beispiel Inselsilikate:

Die Verknüpfung der Tetraeder mit Kationen erfolgt in der Natur auf vielfältige Weise und führt zu unterschiedlichen Strukturen..

Inselsilikate werden durch die Verbindung von isolierten Tetraedern mit den Kationen von  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  gebildet.

Dabei gibt es drei Möglichkeiten der Verbindung:

1. Mit Fe
2. Mit Mg
3. Mit Fe und Mg

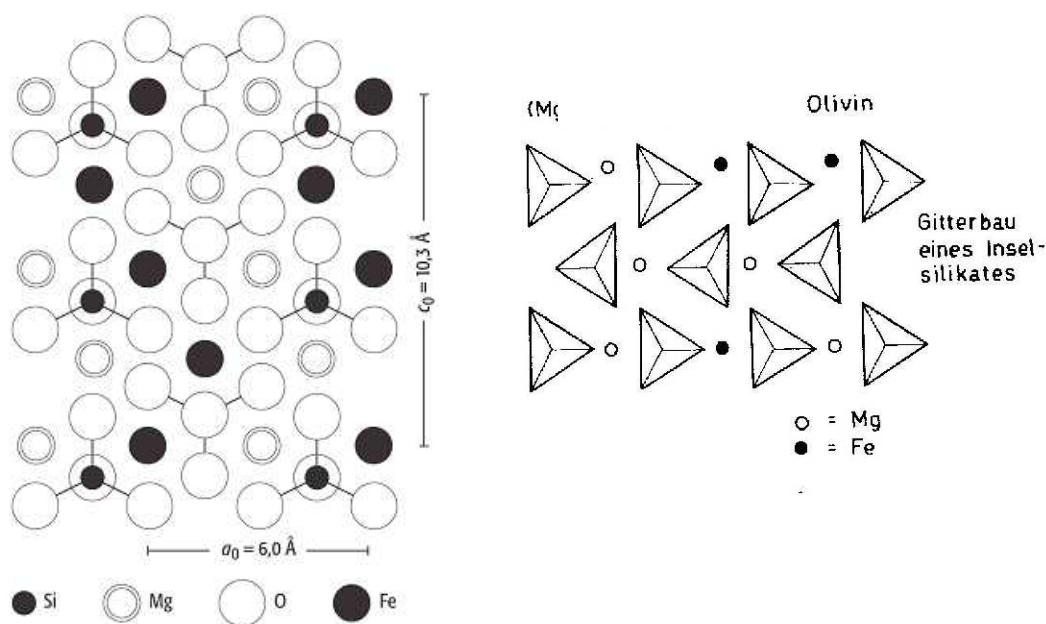


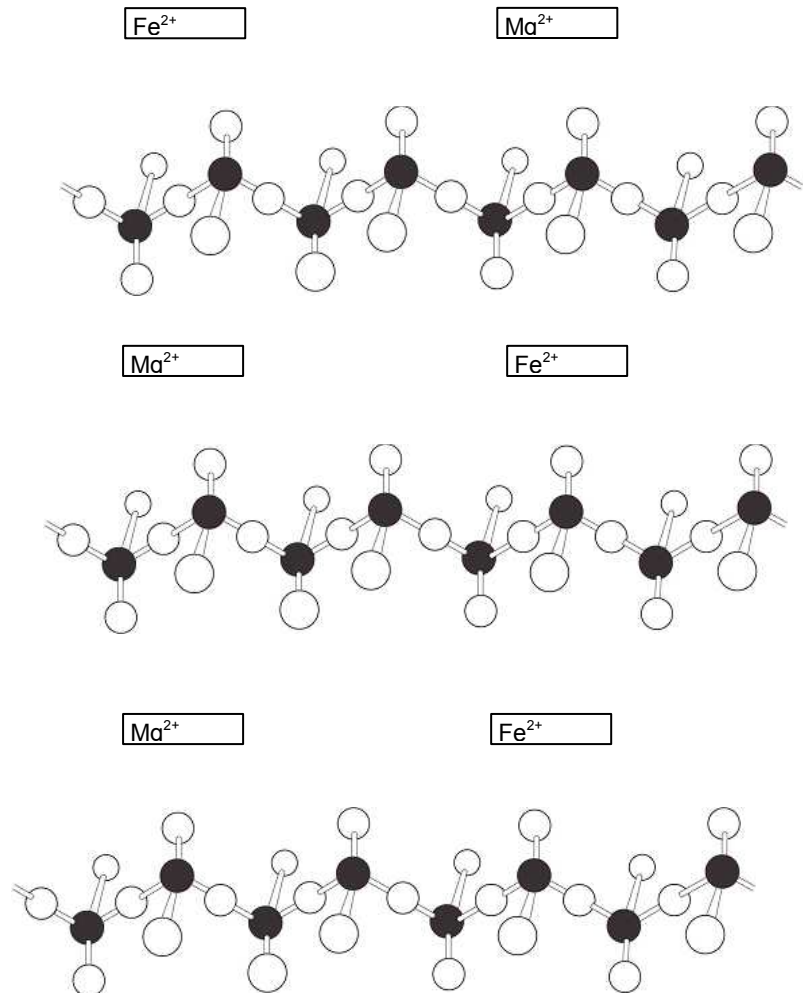
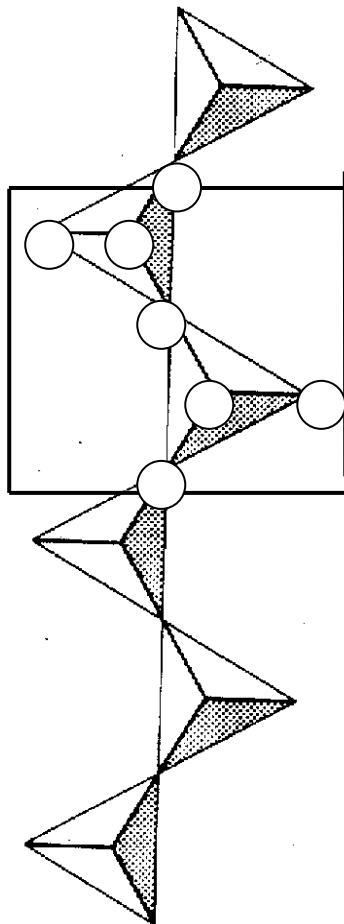
Abb 12: Schematische Darstellung des Inselsilikats Olivin. (Lexikon der Geowissenschaften 2001)

Wir berechnen die Summenformel für die Inselsilikate:

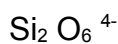


## Kettensilikate

Eine andere Gruppe sind die Kettensilikate. Sie entstehen durch die Verbindung von Tetraedern in eindimensional unendlichen Ketten, die jeweils über ein Sauerstoffatom verbunden sind. Die Kationen  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  verbinden die Ketten.



Wir berechnen die Summenformel für den Anionenkomplex aus der kleinstmöglichen Einheit von Tetraedern. Der Bereich ist durch das Rechteck markiert:



Als Kettensilikate aufgebaut ist die Mineralgruppe der Pyroxene. Sie kommen in vielen Vulkangesteinen, aber auch in Tiefengesteinen vor.

Wir berechnen die Summenformeln für einige Pyroxene:



**Eine weitere Gruppe sind die Schichtsilikate:**

Die SiO<sub>4</sub>-Tetraeder sind jeweils in einer Ebene über die Basisflächen miteinander verbunden. Die Spitzen der Tetraeder ragen allein eine Richtung.

Die Schichtpakete bilden ein „Sandwich“, das jeweils durch Kalium-Kationen mit einem anderen Sandwich verbunden ist.

Die Schichtsilikate zeigen 2 Besonderheiten.

1. In den Tetraedern ist jedes vierte Silizium-Kation durch ein Aluminium ersetzt. Das geht, da Al etwa gleich groß ist wie Si und gut in die Lücke zwischen den Sauerstoffionen passt. Ein Problem ist, dass Al<sup>3+</sup> eine positive Ladung weniger aufweist als Si<sup>4+</sup>.
2. Zwischen den Tetraederspitzen sitzt jeweils ein OH<sup>-</sup> Anion. Die Existenz dieser zusätzlichen Anionen ergibt sich aus den Bedingungen, bei denen die Glimmer als Schichtsilikate entstehen.

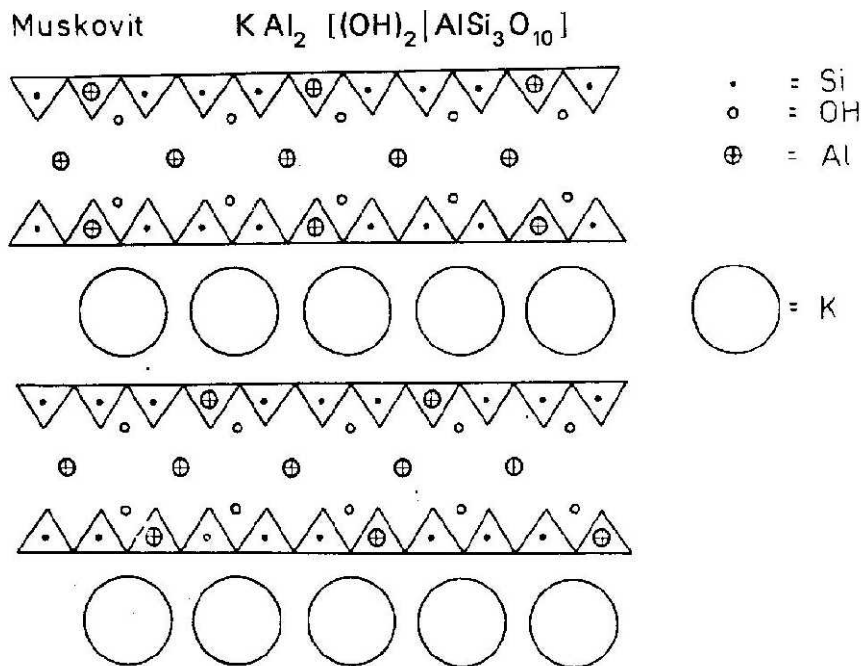


Abb 11: Schematische Darstellung des Schichtsilikats Muskovit. (HG Pape, Leitfa-  
 den der Gesteinsbestimmung; Stuttgart 1975; S. 18)

Konstruieren wir die Summenformel für den Anionenkomplex der Schichtsilikate.

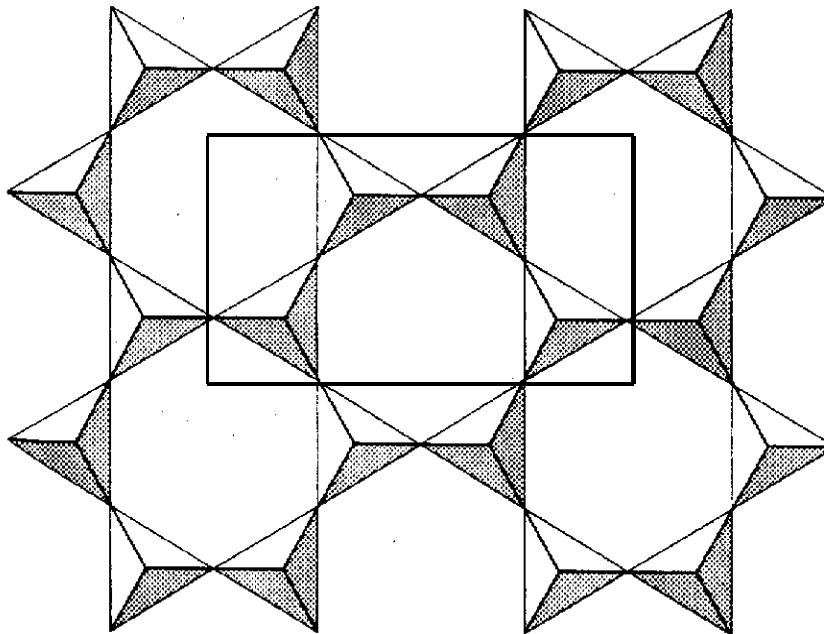
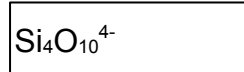
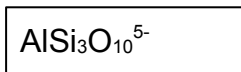


Abb. 12: Schematische Darstellung der Schichtsilikate

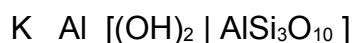
Dazu betrachten wir die kleinstmögliche Einheit von 4 Tetraedern:



In den Glimmermineralen werden die Tetraeder durch verschiedene Kationen gebunden.

- Für den **Muskowit**, ein silbrig-weißes Glimmermineral ist dies das Kalium.
- Für den **Biotit** ein dunkelbraun-schwarzes Glimmermineral sind es Kalium, Eisen und Magnesium.

Konstruieren wir die Summenformel für Muskowit, wie er in Abbildung dargestellt ist.



Das schwarze Glimmermineral Biotit unterscheidet sich nur durch den Einbau von Fe und Mg an Stelle des Al.

Konstruieren wir die Summenformel für den Biotit.





## Gerüstsilikate

Die häufigste Mineralgruppe in der äußeren Erde sind die Feldspäte. Sie bilden sich als Gerüstsilikate. Das Bauprinzip der Gerüstsilikate wird am Quarz deutlich. Im Kristallgitter von Quarz sind ausschließlich Tetraeder miteinander verbunden. Es ist eine räumlich unendliche Verknüpfung von Tetraedern. Die Summenformel von Quarz ist ganz einfach zu berechnen.

Die kleinste Einheit, die immer wiederkehrt ist der Tetraeder mit einem Silizium im Zentrum. Er ist an vier Sauerstoffionen gebunden, die je zur Hälfte an ein weiteres Siliziumion gebunden sind. So ist jeder Sauerstoff mit einer negativen Ladung an ein Silizium gebunden. Auf jedes Silizium kommen vier „halbe Sauerstoff...“



= Quarz

Die Verbindung ist elektroneutral.

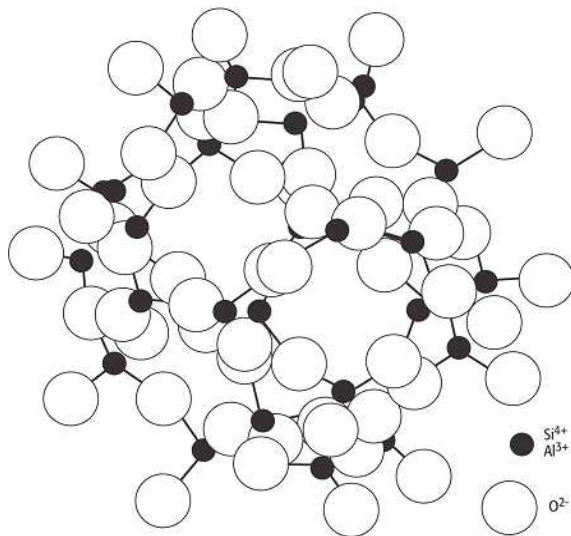


Abb. 13: Einfaches Gitter der Gerüstsilikate (Quarz). (Lexikon der Geowissenschaften 2001)

Die Feldspäte sind zwar auch Gerüstsilikate. Aber bei ihnen ist Silizium zum Teil durch Aluminium ersetzt. Tiefer in der Erde sind es 2 Al pro 4 Tetraeder, näher zur Erdoberfläche nur noch 1 Al pro 4 Tetraeder.

Als Kationen stehen für die Bildung der Feldspäte vor allem Elemente aus der ersten und zweiten Hauptgruppe des Periodensystems zur Verfügung, weil sie die entsprechende Größe haben.

Die wichtigsten sind:

- K,
- Na,
- Ca

Konstruieren wir den Anionenkomplex der Feldspäte. Die kleinste repräsentative Einheit sind vier Tetraeder. Grundlage ist die Summenformel des Urtyps der Gerüstsilikate, also des Quarz  $\text{SiO}_2$ .

1. Tetraederkomplex von 4 mit 1 Al =  $(\text{Al Si}_3 \text{O})^{-1}$
2. Tetraederkomplex von 4 mit 2 Al =  $(\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O})^{-2}$

Konstruieren wir daraus die wichtigsten Feldspäte mit den drei genannten Elementen.

1.  $\text{KAl Si}_3\text{O}_8$  = Kalifeldspat (der Bekannteste ist der Orthoklas)
2.  $\text{NaAl Si}_3\text{O}_8$  = Natriumfeldspat – Albit Plagioklasgruppe
3.  $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2\text{O}_8$  = Calciumfeldspat – Anorthit Plagioklasgruppe

Die folgende Abbildung zeigt den Kalifeldspat mit dem systematischen linearen Einbau von K. Die Folge ist die typischen Struktur des Kalifeldspat, die sich auch in der äußeren Erscheinung des Minerals deutlich zeigt.

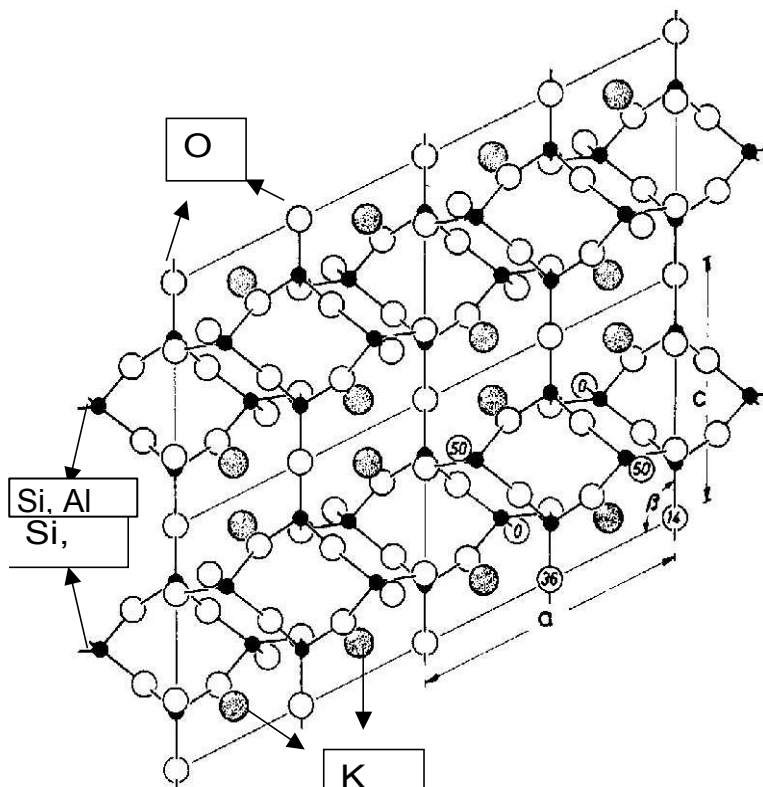


Abb. 14: Gerüstsilikatstruktur von Orthoklas. ((bearbeitet nach Ramdohr&Strunz; Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie. Stuttgart 1978) S. 772).

## Das Magma ist eine silikatische Gesteinsschmelze

Wie können wir uns die verschiedenen Bausteine im Magma, der Gesteinsschmelze vorstellen? Die folgende Abbildung 15 stellt dies schematisch dar.

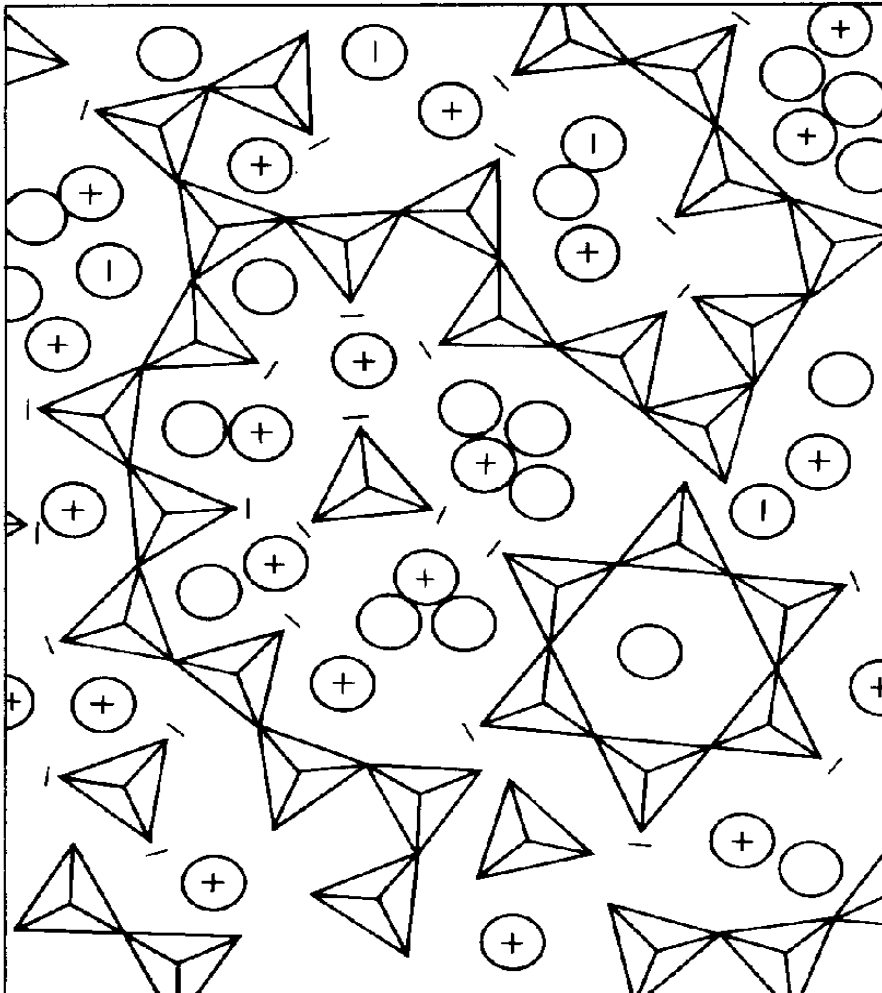


Abb. 15: Strukturschema einer silikatischen Schmelze, wie wir das Magma auch bezeichnen können. Kationen  $\oplus$ , Anionen  $\ominus$ , neutrale Teilchen  $\circ$ . Dazu die verschiedenen Kombinationen der  $\text{SiO}_4$ -Anionenkomplexe, wie Inseln, Ketten, Zweiergruppen oder Ringe von Tetraedern.

Gesteinsschmelzen finden wir in vielen Bereichen des Erdmantels und der Erdkruste. Ihre Existenz hängt von den jeweils herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen ab.