

UC-02

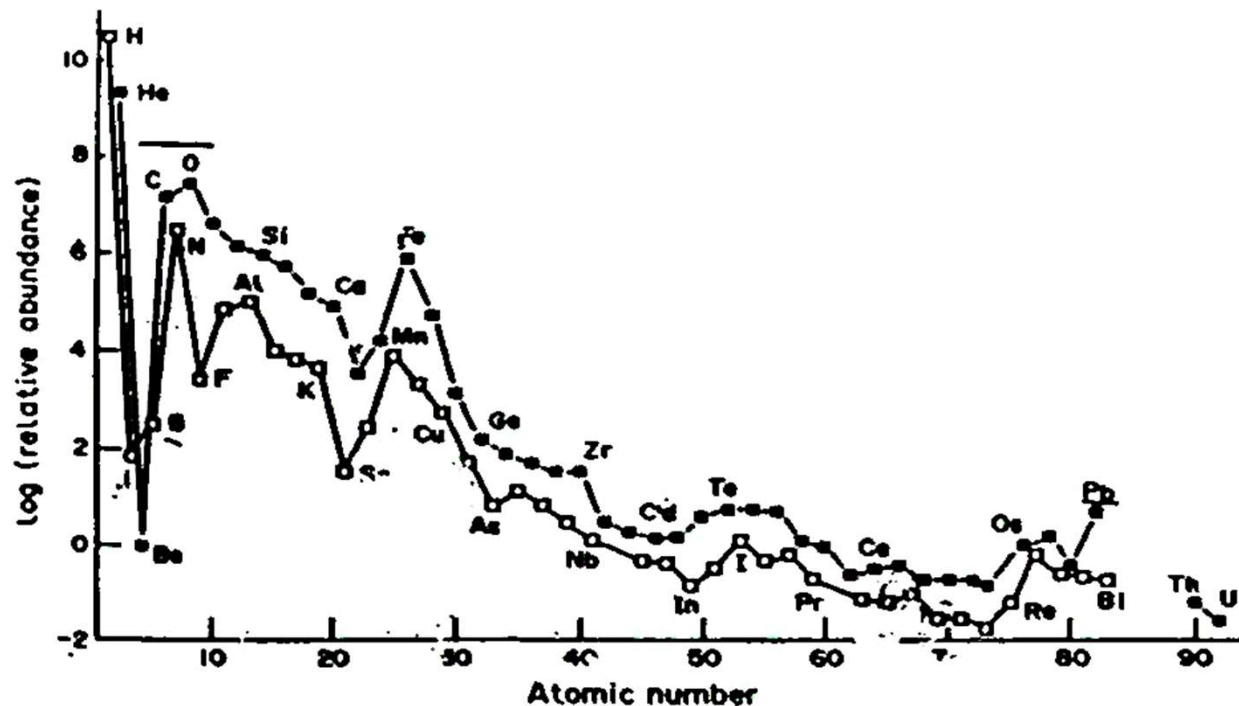
1.0 Entstehung der Umwelt

Um heutige Umweltprozesse zu verstehen, ist es notwendig, etwas zur Entstehung und Geschichte unseres Sonnensystems und insbesondere der Erde zu kennen. Hier thematisch fokussiert auf den chemisch-physikalischen Einfluss. Die gewaltigen Umweltveränderungen der Erde erklären zu können und daraus abzuleiten, welche Änderungen sind unter welchen Bedingungen prognostizierbar, ist eine Zielstellung. Was können wir von Sonne und den anderen Planeten für die Umweltbedingungen auf der Erde ableiten? Letztlich stellt sich die Frage „Ist die Erde noch zu retten?“; Wie lange bestehen menschenfreundliche Umweltbedingungen auf unserer Erde?

- Relative Elementmenge

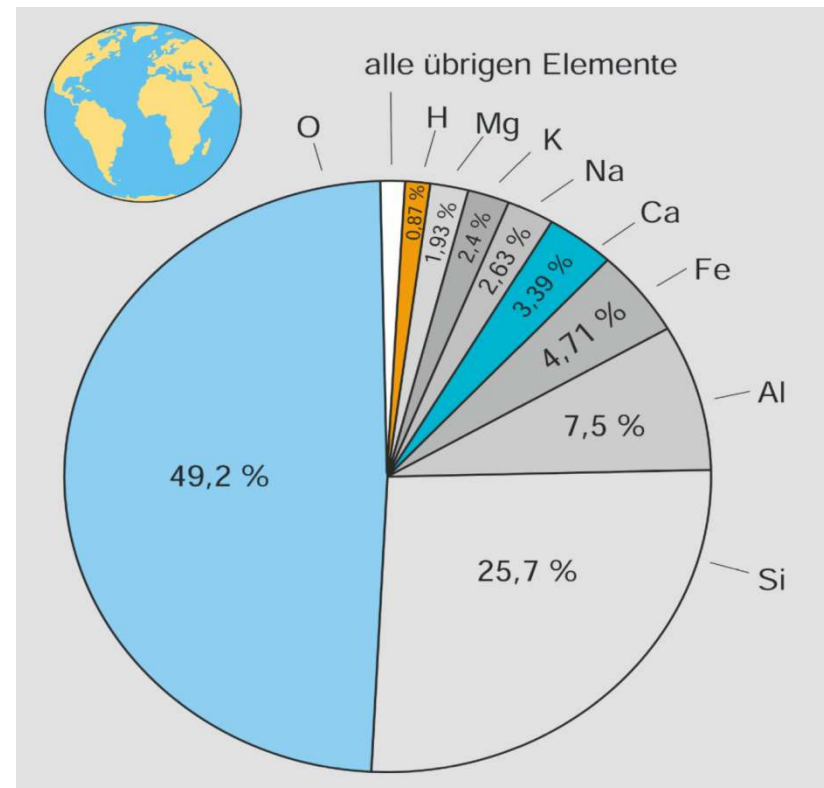
Relative Elementmenge geht über mehr als 10 Größenordnungen und stellt z.B. für den analytischen Nachweis unterschiedliche Probleme dar.

- *Welches System ist der Bezug?*



- *Weltall, siehe Wasserstoff- und Helium-Gehalt!*

Welche Gründe gibt es für die Elemententstehung und Verteilung auf unserer Erde?



Quelle: 
Informationskreis
KernEnergie

Elementverteilung in der Erdkruste

- *Isotopie*

| | |
|---|--|
| Essentielle Elemente | |
| Neue essentielle Elemente, Funktion z. T. unbekannt | Lanthanoide |
| Möglicherweise essentiell, Funktion unbekannt | Actinoide |
| keine biologische Funktion bekannt | |
| | Ordnungszahl Elementsymbol Elementname |

114: Flerovium
116: Livermorium

Beispiel:

Fe (Eisen)

- Relative Atommasse: 55,847

- Natürliche Häufigkeit:

^{52}Fe 5,82 %

^{56}Fe 91,18%

^{57}Fe 2,10%

^{58}Fe 0,28%

- Bekannt insgesamt: 24 Isotope

Kennzeichnung der Atomarten

- verschiedene Atomarten, die sich durch Massen- oder Ordnungszahl unterscheiden = Nuklide
- IUPAC - Regel:



E: Elementsymbol **A:** Massenzahl **Z:** Ordnungszahl

1.1 Bildung der Elemente/der Erde

- Bildung der Elemente

Kernreaktionen sind die Grundlage zur Entstehung der Elemente und damit auch unseres Sonnensystems.

Was sind Kernreaktionen?

Radioaktiver Zerfall/Umwandlung = spontane Kernumwandlung

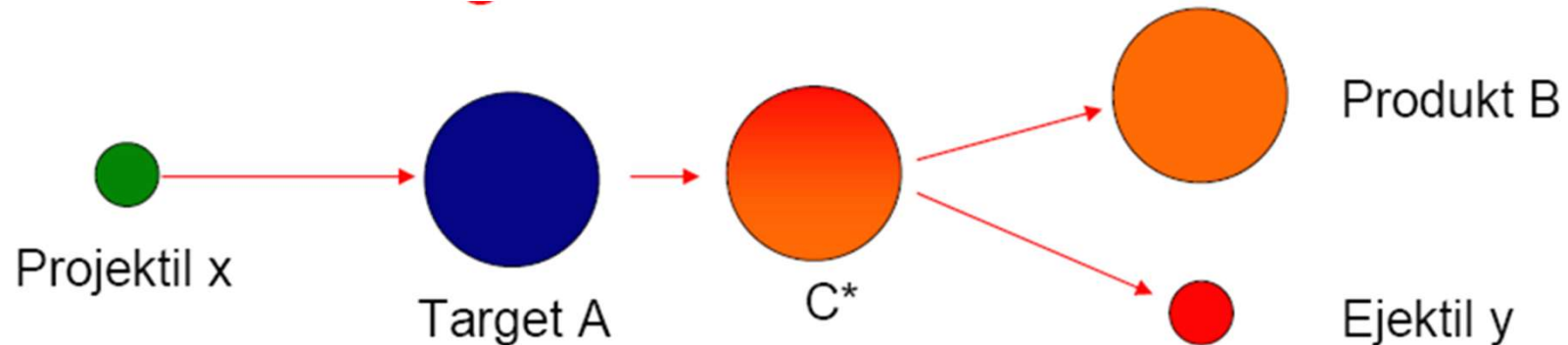


Kernreaktion = induzierte Kernumwandlung



Kernreaktionen

Ein ruhender Targetkern (X) wird durch das Eindringen eines Geschosspartikels (Projektil) x in einen anderen Kern (Y) umgewandelt, wobei ein Teilchen (Ejektil) y entsteht:



- Können durch geladene und ungeladene Geschosspartikel ausgelöst werden
Projektile bzw. Ejektile können u.a. sein:
Neutronen (n), Protonen (p), Deuteronen (d),
 α – Teilchen, Photonen (γ), schwere Ionen
- Kernreaktion ist analog zur chemischen Reaktion mit einem Umsatz von Energie (Reaktionsenergie Q) verbunden
- Reaktion geht über zwei zeitlich getrennte Schritte
 - * Verschmelzung des Geschossteilchens mit Kern zum „Zwischen- oder Compoundkern“
 - * angeregter Kern ($T < 10^{-15}$ s) wandelt sich spontan um



Prozesse bei der Synthese der Elemente

- Durch Fusionsreaktionen entstehen Kerne mit Massenzahlen bis etwa $A = 56$, (*maximale Bindungsenergie pro Nukleon*), die Bildung der Kerne aufgrund dieser Kernreaktionen ist relativ gut mit den heute beobachteten Häufigkeiten der Kerne in Übereinstimmung

Entstehung von Elementen schwerer als Eisen:

s- (slow) Prozess:

Neutroneneinfang langsamer als β^- - Umwandlung

r- (rapid) Prozess:

Neutroneneinfang schneller als β^- - Umwandlung

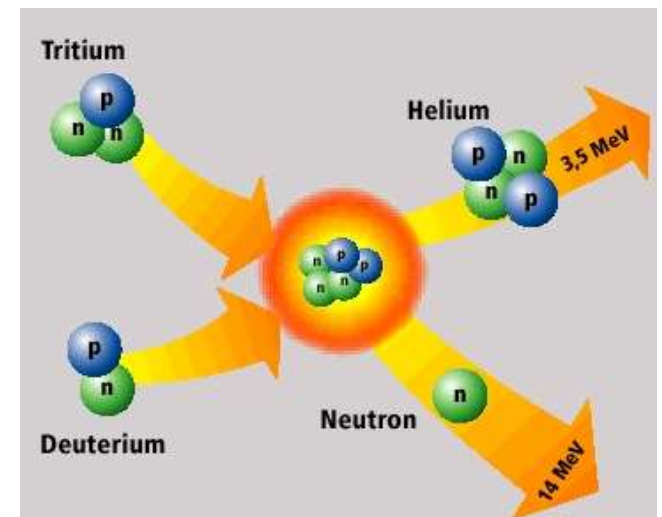
p- (Protonen) Prozess:

Die Entstehung protonenreicher Kerne z.B. ^{78}K , ^{112}Sn

Kann mit s- oder r-Prozess nicht erklärt werden, deshalb

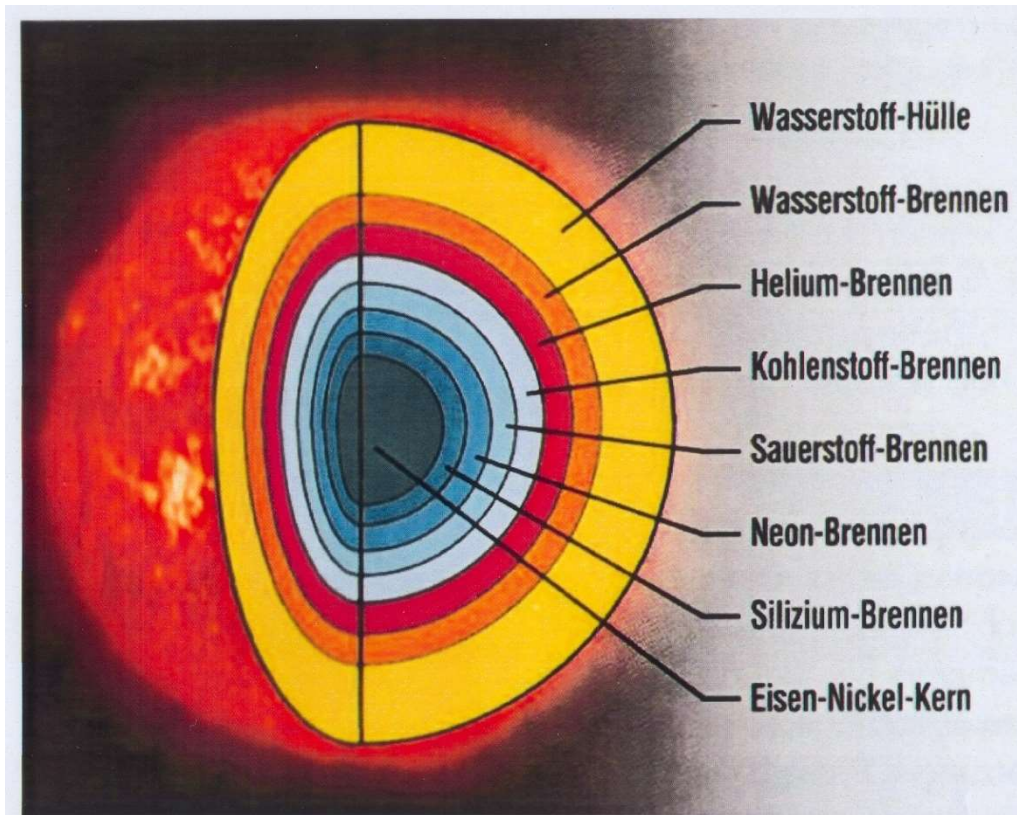
Annahme, dass diese Nuklide durch Protoneneinfang entstanden sind.

β^- - Umwandlung: Umwandlung Neutronen in Proton + Elektron



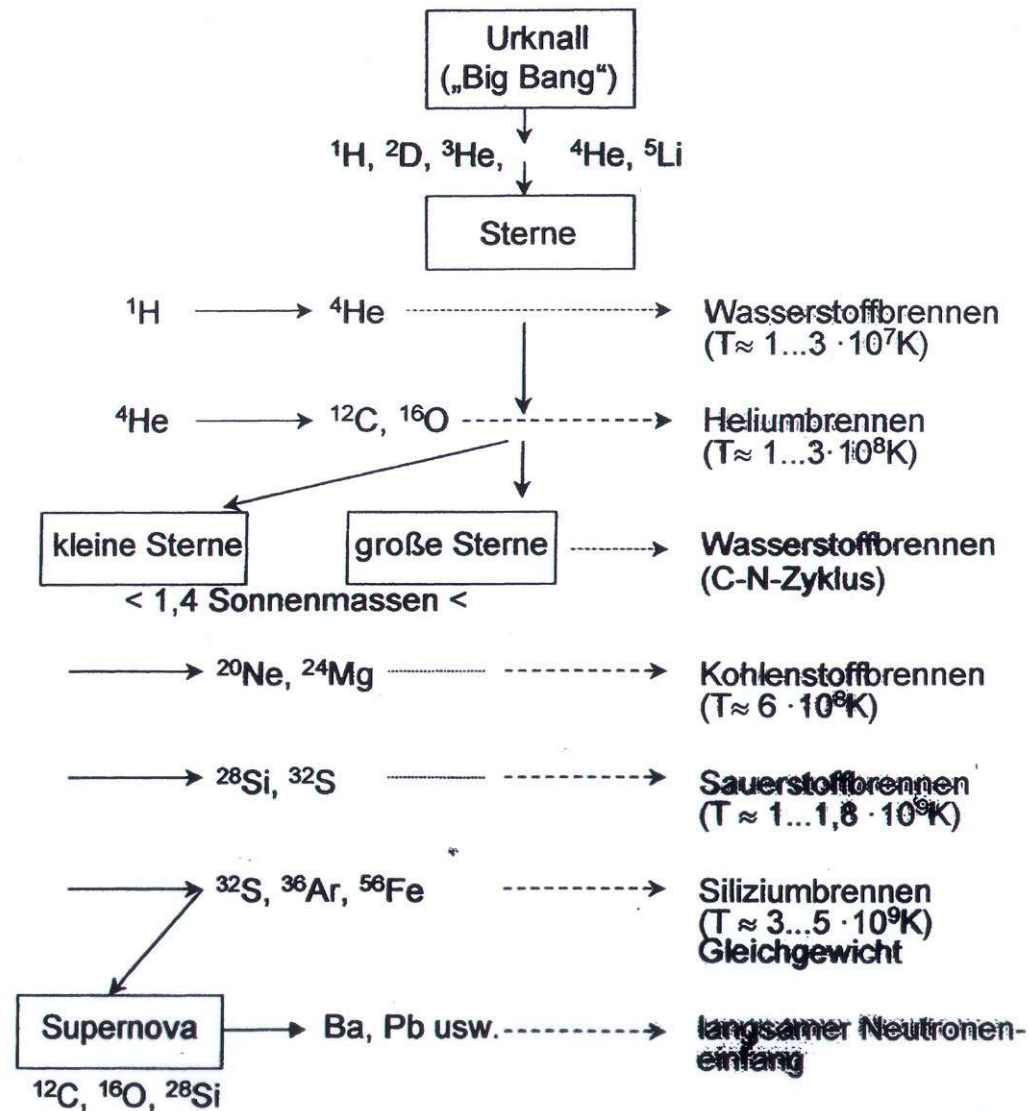
Fusionsreaktionen entscheidend für die Herausbildung der Elemente

Zwiebelschalenstruktur eines massereichen Sterns kurz vor der Supernova-Explosion



p-Prozess findet während der Explosion in den beiden Schalen des Sauerstoff – und Neon-Brennens statt.

Kernaufbau- und Kernzerfallsreaktionen in Sternen

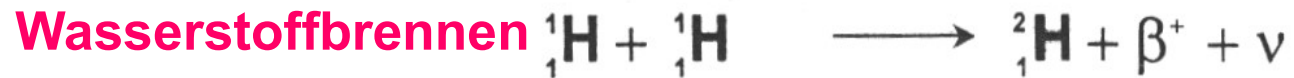


Entwicklungsphasen eines Sterns mit 25 Sonnenmassen

| Phase | Dauer | Temperatur (10^9 K) |
|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Wasserstoff-Brennen | 7×10^6 Jahre | 0,06 |
| Helium-Brennen | 5×10^5 Jahre | 0,23 |
| Kohlenstoff-Brennen | 600 Jahre | 0,93 |
| Neon-Brennen | 1 Jahr | 1,70 |
| Sauerstoff-Brennen | 6 Monate | 2,30 |
| Silizium-Brennen | 1 Tag | 4,10 |
| Kernkollaps | Sekunden | 8,10 |
| Schockwelle | Millisekunden | 34,80 |
| Explosives Brennen | 0,1 – 10 Sekunden | 1,20 – 7,00 |

Die letzten 3 Phasen finden während der Supernova-Typ II-Explosionen statt

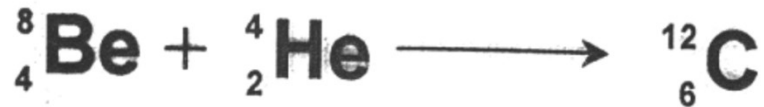
Entstehung von Elementen I



β^+ Positron, ν Neutrino, γ Gammastrahlung

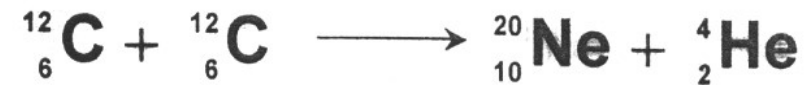
Entstehung von Elementen II

Heliumbrennen



Entstehung von Elementen III

Kohlenstoffbrennen



Sauerstoffbrennen



Entstehung von Elementen IV

Explosives Brennen

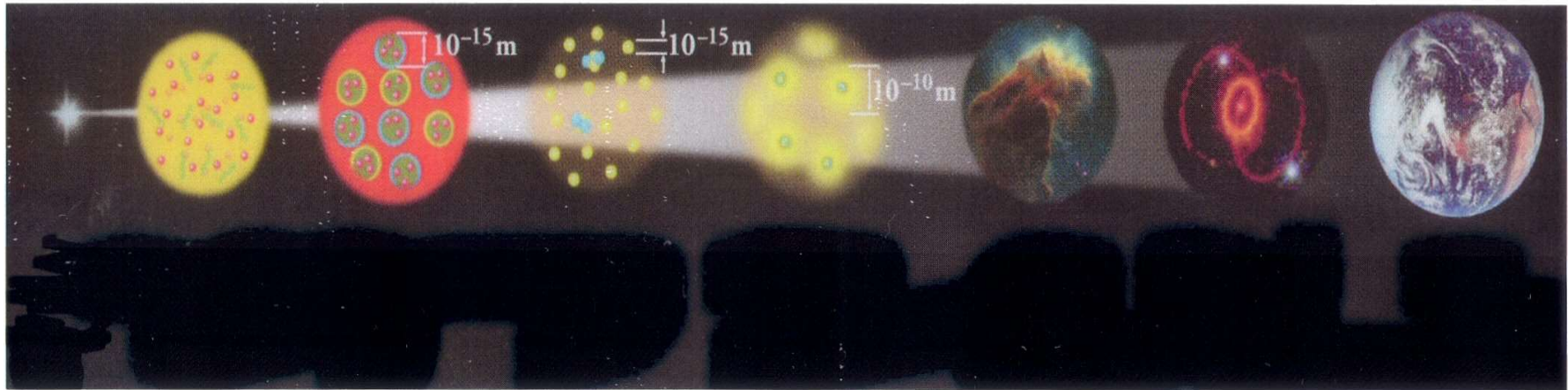
U, Cf, Te, I usw. \longrightarrow schneller Neutroneneinfang

^{19}F , ^{21}Ne , ^{115}Sn \longrightarrow schneller Protoneneinfang

^9Be , ^6Li , ^7Li , ^{10}B , ^{11}B \longrightarrow Spaltung durch kosmische Strahlung

- Bildung der Erde

Vom Big Bang zur heutigen Welt



| | Big Bang | Quark-Gluon Plasma | Protonen- & Neutronenbildung | Bildung von leichten Kernen | Bildung von neutralen Atomen | Bildung von Sternen | Ausbreitung von schweren Elementen | Heute |
|------------------------|----------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| $T_{\text{Universum}}$ | | $> 10^{12} \text{ K}$ | $> 10^{12} \text{ K}$ | $> 10^9 \text{ K}$ | 4.000 K | 20 K – 3 K | $< 20 \text{ K} - 3 \text{ K}$ | 3 K |
| Zeit | | 10^{-6} s | 10^{-4} s | 3 min | 400.000 Jahre | $1 \times 10^9 \text{ Jahre}$ | $> 1 \times 10^9 \text{ Jahre}$ | $15 \times 10^9 \text{ Jahre}$ |

Urknall vor ca. 10 Milliarden Jahren (Ansammlung von Neutronen)
 folgend Gasgemisch ...Urnebel, folgend Sternensysteme...Sonnen, Planeten

In Erde dominierend: Fe, Si, O in Urmaterie geringst
 In Urmaterie dominierend: H, He,

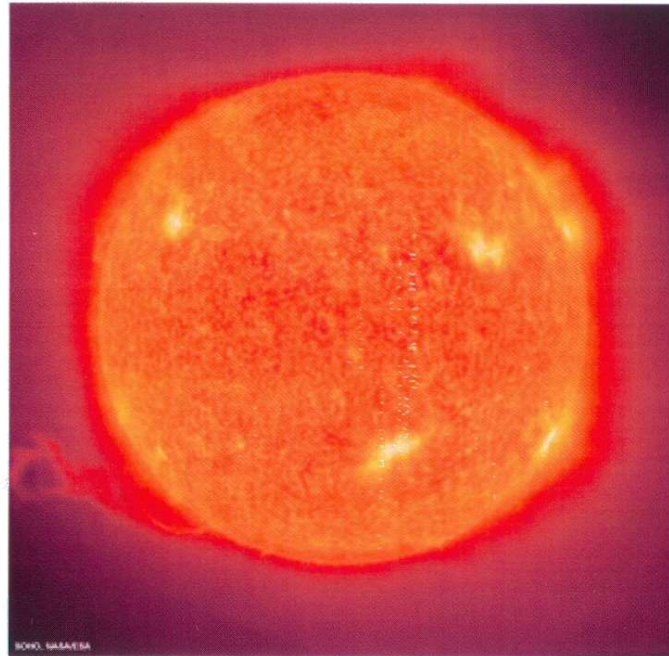
Die Sonne

Masseanteile

| | | |
|--------|-------------|------|
| Außen: | Wasserstoff | 71 % |
| | Helium | 27 % |
| Innen: | Wasserstoff | 35 % |
| | Helium | 63 % |

Temperatur

| | |
|----------------|--------------|
| Oberfläche: | 5.800 K |
| Sonnenflecken: | 4.000 K |
| Zentrum: | 15.600.000 K |



Entfernung von der Erde

ca. 150 Mio km

Größenvergleich zur Erde

ca. 330.000 Erdmassen

ca. 109 Erddurchmesser

Steckbrief der Sonne

| | | |
|---------------------------|--|------------------------------|
| Allgemeines: | Die Sonne ist eine Gaskugel, die ihre Energie aus der Kernfusion erhält. Im Vergleich zu anderen Sternen ist sie ein Stern von durchschnittlicher Größe, Leuchtkraft, Masse und chemischer Zusammensetzung. | |
| Durchmesser: | 1.400.000 Kilometer = 109 Erddurchmesser | |
| Masse: | 2.000 Billionen mal Billionen Tonnen = 330.000 Erdmassen | |
| Dichte im Zentrum: | 154 Gramm pro Kubikzentimeter | |
| Masseverlust: | durch Sonnenwind | 1.000.000 Tonnen je Sekunde, |
| | durch Strahlung | 4.200.000 Tonnen je Sekunde |
| Rotationsdauer: | am Äquator | 25,6 Tage |
| | in Polnähe | 36 Tage |
| Magnetfeld: | in den Sonnenflecken ist es 5.000 Mal so stark wie das der Erde | |

Wie lange scheint die Sonne noch?

Sonne als Basis für Lebensprozesse auf der Erde

- Energiebasis
- Licht/Strahlungseintrag

- *Existenz der Sonne!*

- Wasserstoffvorrat für ca. 5 Milliarden Jahre (in Summe Existenz dann ca. 10 Milliarden Jahre)
- Intensität der Strahlung wird zunehmen (in 2 bis 3 Milliarden Jahren Verdampfung der Ozeane, Leben auf der Erde nicht mehr möglich, Energieerzeugung verlagert sich zu den äußeren Schichten, Ausdehnung der Sonne= roter Riesenstern, verschlingt Venus, Merkur ... Weißer Zwerg... Schwarzer Zwerg = Sonne erloschen!



Existenz der Erde untrennbar mit Existenz der Sonne verbunden!

Mögliche Fusionsreaktionen zur Energiegewinnung

- Lernen von den Prozessen in der Sonne -

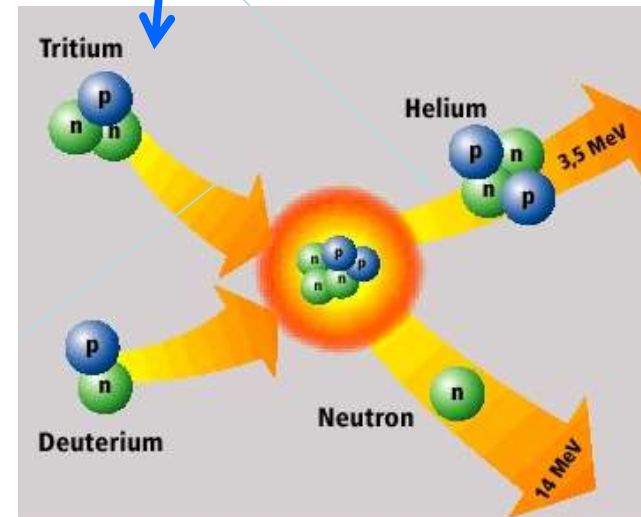
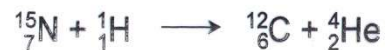
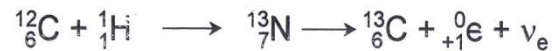
Aussichtsreichste Reaktion für die technische Energiegewinnung durch Fusion auf der Erde ist die Verschmelzung von **Tritium und Deuterium**,
Temperatur > 100 Mio Grad Celsius,
Elektrostatische Abstoßung der Kerne überwinden durch starke Beschleunigung

Kernfusion

Wasserstoff-Wasserstoff-Reaktion:



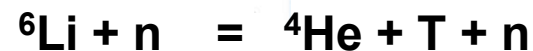
Kohlenstoff-Stickstoff-Reaktion:



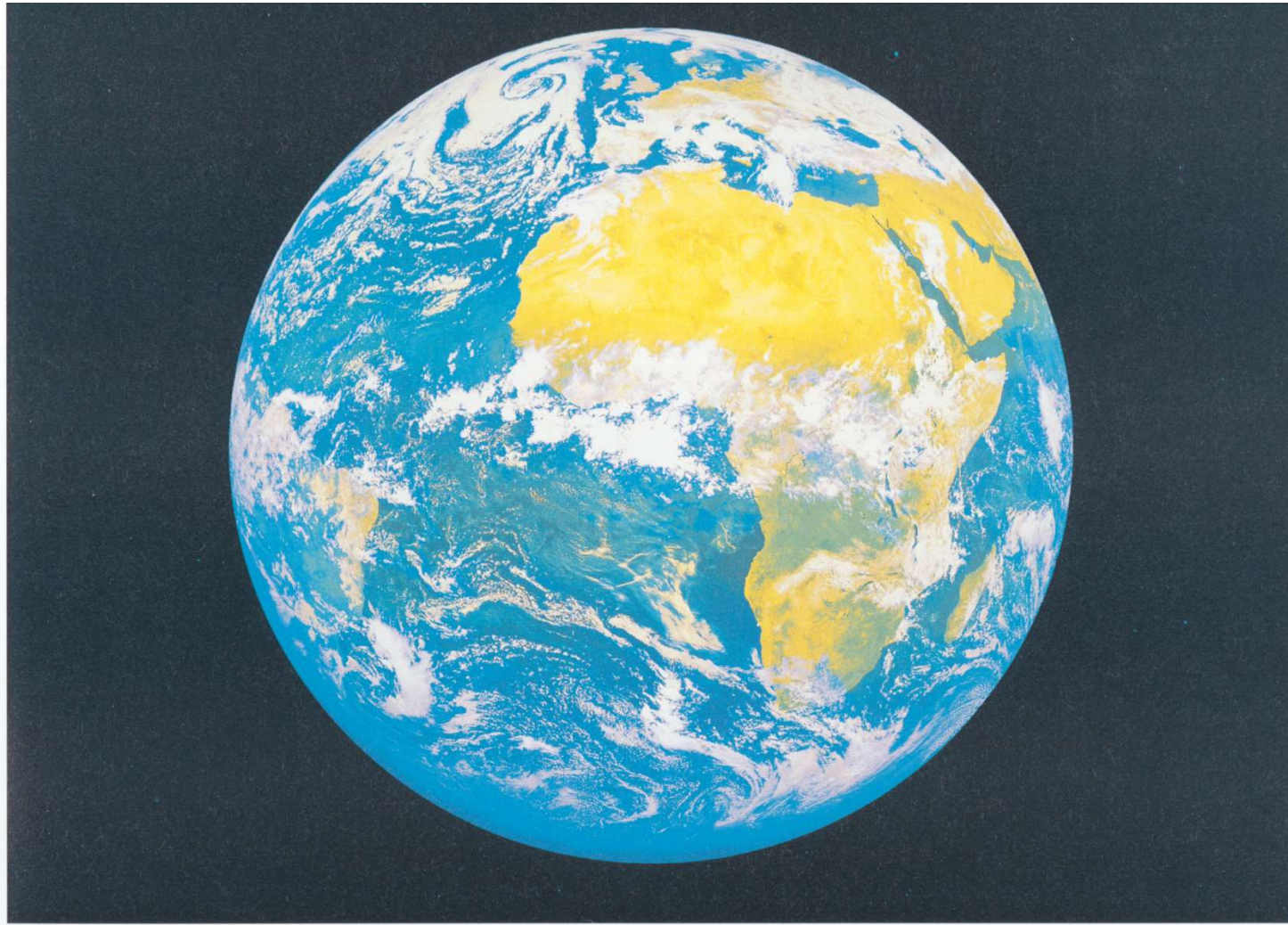
Verfügbarkeit:

Deuterium: jedes 8700 H-Atom ist ein D

Tritium: aus Lithium herstellbar



- Erde als globales System



Erde als unbelebter Planet

Herausbildung (Zusammenfassung der Prozessschritte) I

Entstehung der Erde als mehrstufiger Prozess...

- Beginn vor 4,6 Mrd. Jahren
- Gasnebel im interplanetaren Raum, wo sich heute unser Planetensystem befindet
He, H₂, andere Edelgase, schwerflüchtige Elemente in kleinen Konzentrationen, in deren Zentrum die Sonne stand
- beim Abkühlen - kleine, feste Materialteilchen, die aus schwerflüchtige Materialien wie z. B. Metalloxiden (FeO, MgO, Al₂O₃), Metallen (Fe, Ni) und Silikaten bestanden
- Gravitationswirkung - Vereinigung der kondensierten Partikel zu größeren Gebilden

Erde als unbelebter Planet

Herausbildung (Zusammenfassung der Prozessschritte) II

Entstehung der Erde als mehrstufiger Prozess...

- Bildung der Protoplaneten --> Merkur, Venus, Erde, Mars
- rasche Zunahme der Masse der Protoplaneten
- Aufheizen der Planeten durch:
 - Aufprall der Materie (kinetische Energie --> Wärmeenergie)
 - Wärmeerzeugung durch den Zerfall radioaktiver Elemente
- Aufschmelzen des homogenen Gemenges aus Metallen, Metalloxiden und Silikaten (Fp. Ni 1452°C, Fe 1539°C) und Absinken der Metalle ins Erdinnere
- Dauer der Trennung in Erdkern und Erdkruste: ca. 100 000 Jahre
- In der Folgezeit allmähliche Abkühlung der Oberfläche und Aufkondensieren weiteren kosmischen Materials
- **Die feste Erdkruste gibt leicht flüchtige Anteile ab**

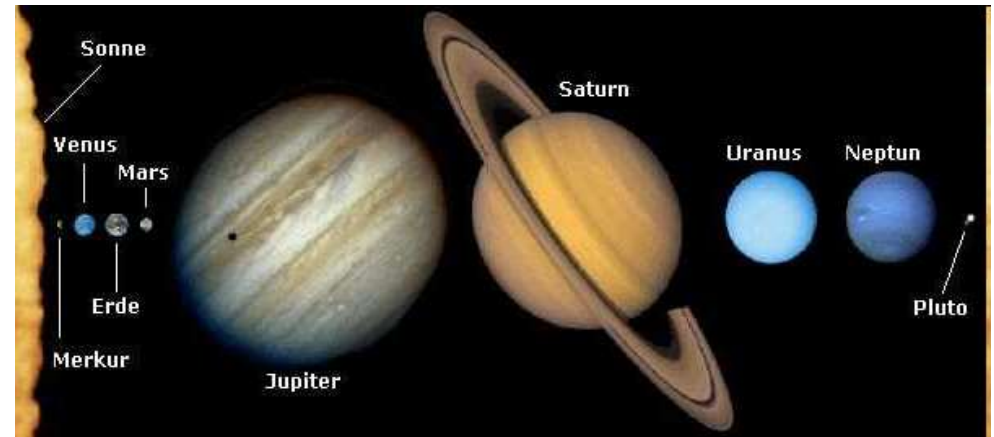
Erde als unbelebter Planet

Herausbildung (Zusammenfassung der Prozessschritte) III

Hohe Anteile an CO_2 und H_2O bedingen

- Absorption der Wärmestrahlung, die aus dem eingestrahnten Sonnenlicht am Boden gebildet wird
- ⇒ Natürlicher Treibhauseffekt

Planeten: Gründe für Unterschiede



- wesentlicher Unterschied zwischen Erde und Venus z.B.: Sonnenabstand, d.h. auf der Erde kondensiert Wasser
- Folgen der Kondensation des Wassers
 - geringerer Treibhauseffekt
 - Bildung der Urozeane
 - Bindung eines Großteils des atmosphärischen CO_2

80 % des CO_2 der Uratmosphäre sind im Kalksteinsediment gebunden

➔ **grundlegende Änderung der Atmosphäre der Erde**
heute: Hauptbestandteile N_2 , O_2

Atmosphäre der Planeten

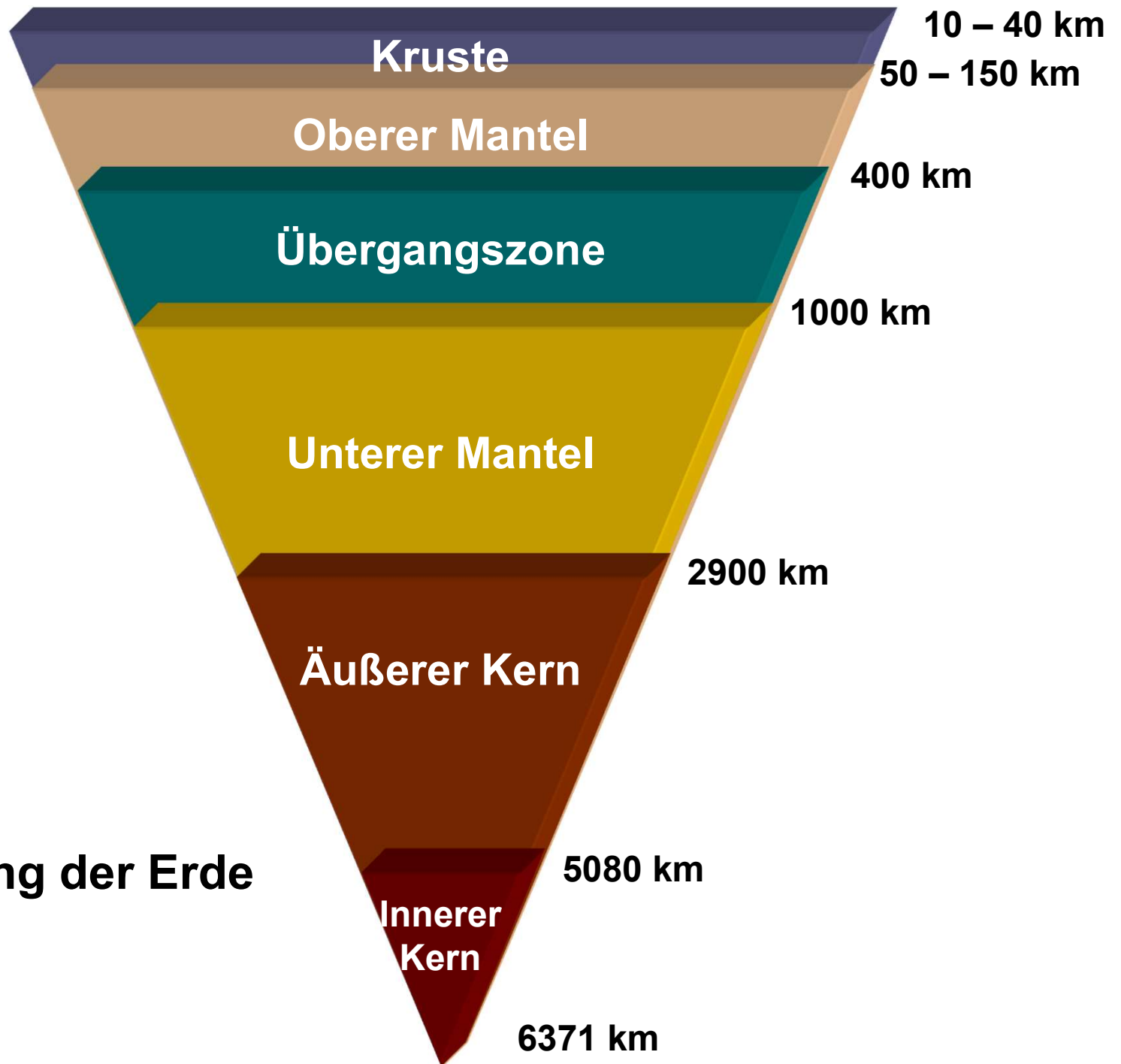
Bestandteile der Erduratmosfera: CO_2 , H_2O , (N_2 , NH_3 , H_2S , CH_4), kein O_2

Vergleich der Atmosphäre der Erde mit denen ihrer Nachbarplaneten (heute)

| | Venus | Erde | Mars |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Mittlere Oberflächentemperatur °C | 462 | 15 | - 50 |
| Druck an der Oberfläche (bar) | 95 | 1 | 0,007 |
| Masse der Atmosphäre (t) | $5,3 \cdot 10^{17}$ | $5,3 \cdot 10^{15}$ | $2,4 \cdot 10^{13}$ |
| Prozentuale Zusammensetzung (Vol %) | | | |
| CO_2 | 95 - 97 | 0,03 | 95,0 |
| N_2 | 3,5 - 4,5 | 78,09 | 3,0 |
| O_2 | 0,03 | 20,95 | 0,13 |
| Ar | 0,03 | 0,93 | 1,5 |

1.2 Aufbau der Erde

Schichtung der Erde



*Gesteinszusammensetzung der Erde verändert sich mit der Tiefe von ca. 2,9 zu 13,6 g cm⁻³ Dichte
Temperaturzunahme in Abhängigkeit der geologischen Tiefe; etwa 3°C pro 100 m.*

*Minerale als Grundbestandteile der Gesteine, Sauerstoff in 1300 Mineralklassen, Silicatminerale
Tiefste Bohrung bisher ca. 12 km Kola-Halbinsel, Russland*

Erdinneres - Erdrinde

Erdrinde:

Lithosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre

Erdmantel:

Oxide des Mg, Fe, Cr, Ca, Na, Ni

Äußerer Mantel

Silicate

Dichte: bis 6 g/cm³

Erdkern:

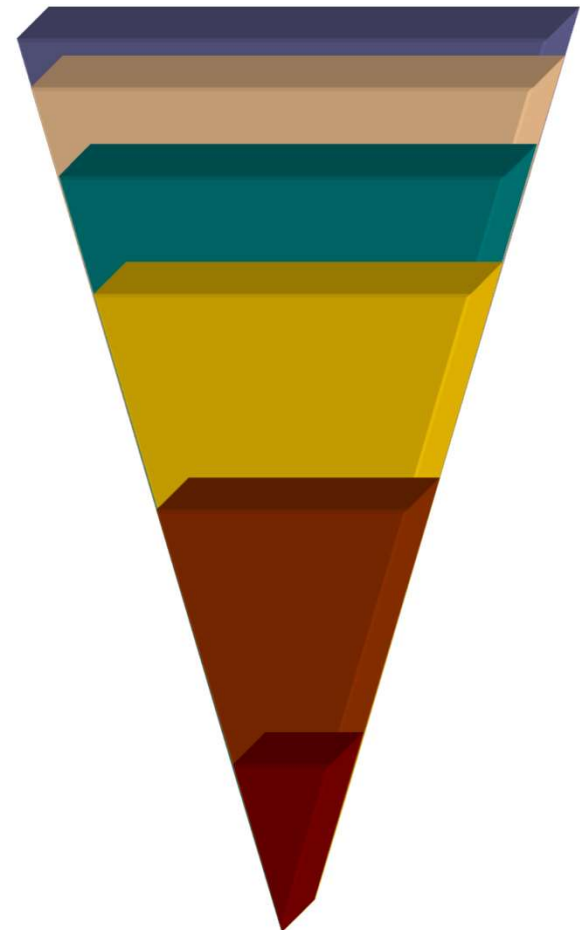
Bestandteile: Eisen, Nickel, Silizium

Dichte: bis 13 g/cm³

Temperatur: 2.000...10.000 °C

Innerer Kern, fest

Äußerer Kern, flüssig



Zunahme von Dichte und Temperatur

Gesteine:

Gemische von Mineralen mit annähernd gleicher mineralischer und chemischer Zusammensetzung
(Minerale sind chemisch einheitliche, in der Regel kristalline Stoffe)

Magmatite:

aus Magma heraus erstarrt (Granit z.B.)

Sedimentgestein:

Aus Verwitterung und Ablagerung von Magmatiten entstanden sind (Kalk z.B.)

Metamorphite:

Gesteine, in die Magmatite oder Sedimentgesteine umgewandelt wurden
(200 °C, > k bar, 7000 m Tiefe, Schiefer z.B.)

Gliederung Festland der Erde



Festland

Fläche

| | |
|--------------------|---------|
| Wald | 26,85 % |
| Wüsten, Halbwüsten | 22,15 % |
| Grünland | 17,45 % |
| Ackerland | 9,40 % |
| Antarktis | 8,73 % |
| Bebaute Gebiete | 8,05 % |
| Tundra | 3,36 % |
| Sonstige Gebiete | 4,03 % |

*von insgesamt **149 x 10¹² m²***

Verteilung der Elemente im Weltall und auf der Erde (Atom-%)

| Z | Element | Weltall | Erde | Erdkruste | Hydrosphäre | Atmosphäre | Mensch |
|----|---------|---------|--------|-----------|-------------|------------|--------|
| 1 | H | 92,714 | 0,12 | 2,882 | 66,200 | | 60,563 |
| 2 | He | 7,185 | | | | | |
| 3 | Li | | | 0,009 | | | |
| 4 | Be | | | | | | |
| 5 | B | | | | | | |
| 6 | C | 0,008 | 0,099 | 0,055 | 0,001 | 0,035 | 10,680 |
| 7 | N | 0,015 | 0,0003 | 0,007 | | 78,03 | 2,44 |
| 8 | O | 0,050 | 48,880 | 60,425 | 33,100 | 21,0 | 25,67 |
| 9 | F | | 0,0038 | 0,007 | | | |
| 10 | Ne | 0,020 | | | | 0,002 | |
| 11 | Na | 0,0001 | 0,640 | 2,554 | 0,290 | | 0,075 |
| 12 | Mg | 0,0021 | 12,500 | 1,784 | 0,034 | | 0,011 |
| 13 | Al | 0,0002 | 1,300 | 6,251 | | | |
| 14 | Si | 0,0023 | 14,000 | 20,475 | | | |
| 15 | P | | 0,14 | 0,079 | | | 0,13 |
| 16 | S | 0,0009 | 1,400 | 0,033 | 0,017 | | 0,13 |
| 17 | Cl | | 0,045 | 0,011 | 0,340 | | 0,033 |
| 18 | Ar | 0,0003 | | | | 0,933 | |
| 19 | K | | 0,056 | 1,374 | 0,006 | | 0,037 |
| 20 | Ca | 0,0001 | 0,46 | 1,878 | 0,006 | | 0,23 |
| 21 | Sc | | | | | | |
| 22 | Ti | | 0,028 | 0,191 | | | |
| 23 | V | | | 0,004 | | | |
| 24 | Cr | | | 0,008 | | | |
| 25 | Mn | | 0,056 | 0,037 | | | |
| 26 | Fe | 0,0014 | 18,870 | 1,858 | | | |
| 27 | Co | | | 0,001 | | | |
| 28 | Ni | 0,0001 | 1,400 | 0,003 | | | |
| 29 | Cu | | | 0,001 | | | |
| 30 | Zn | | | 0,002 | | | |
| | | 99,999 | 99,998 | 99,999 | 99,994 | 99,998 | 99,999 |

1.3 Entstehung und Aufbau der Atmosphäre

Erde als unbelebter Planet *Wdh.*

Entstehung der Erde als mehrstufiger Prozess (Wdh)

- Bildung der Protoplaneten --> Merkur, Venus, Erde, Mars
- rasche Zunahme der Masse der Protoplaneten
- Aufheizen der Planeten durch:
 - Aufprall der Materie (kinetische Energie --> Wärmeenergie)
 - Wärmeerzeugung durch den Zerfall radioaktiver Elemente
- Aufschmelzen des homogenen Gemenges aus Metallen, Metalloxiden und Silikaten (Fp. Ni 1452°C, Fe 1539°C) und Absinken der Metalle ins Erdinnere
- Dauer der Trennung in Erdkern und Erdkruste: ca. 100 000 Jahre
- In der Folgezeit allmähliche Abkühlung der Oberfläche und Aufkondensieren weiteren kosmischen Materials
- **Die feste Erdkruste gibt leicht flüchtige Anteile ab**

Entwicklung der Atmosphäre

- Abkühlen des Plasmas

(Siedepunkte, Si, Fe)

Urplanet hatte keine Atmosphäre

Flüchtige Bestandteile (N, C, Methan bleiben im Urnebel)

- Rückhaltung leichter Gase

Wenn nicht auch leichtere Gase zurückgehalten worden wären, bestünde die Atmosphäre aus Neon und weiteren schweren Edelgasen und Stickstoff

- Druck

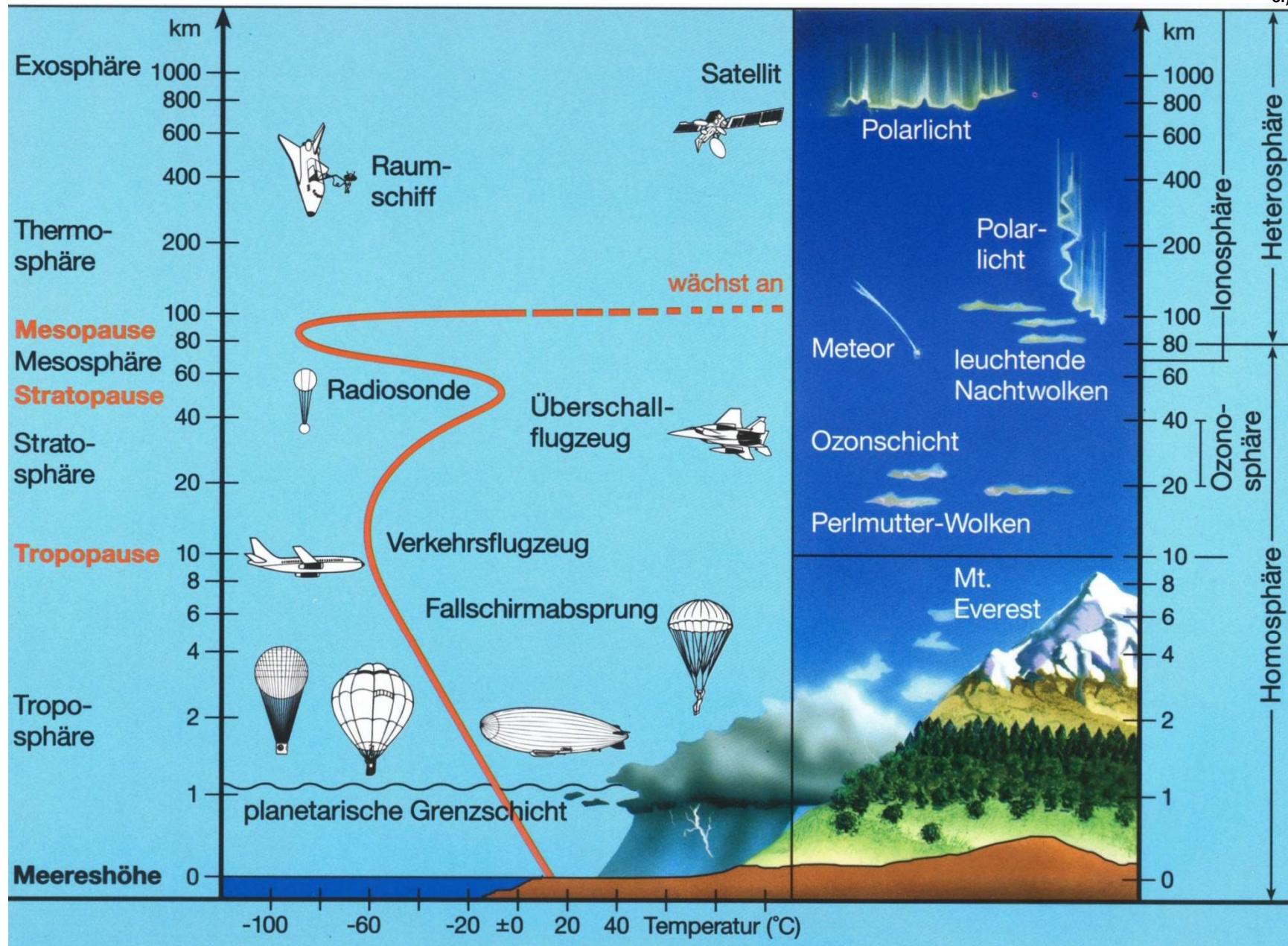
Druck der Atmosphäre erniedrigt sich in Abhängigkeit der Höhe

0 m = Meeresspiegel 1013 mbar...100 km Höhe = 3×10^{-4} mbar

... Bildung von Sauerstoff in Atmosphäre?

Schichtung der Atmosphäre mit Temperaturprofil

8.)



1.3.1 Bildung es atmosphärischen Sauerstoffs

Herausbildung von Sauerstoff

Bestandteile der Erdatmosphäre:

- CO_2 , H_2O , (N_2 , NH_3 , H_2S , CH_4), kein O_2

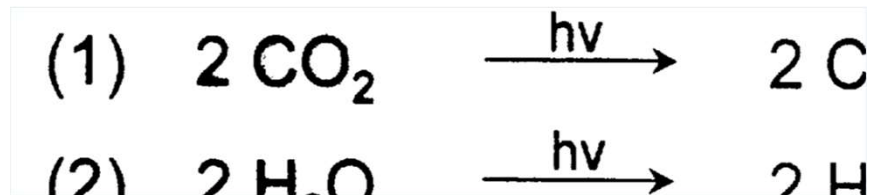
Welche Reaktionen sind für die Herausbildung von Sauerstoff denkbar?

Entstehung des atmosphärischen Sauerstoffs

- Möglichkeiten: **Anorganische Reaktionen**

**O₂-Bildung ist prinzipiell über anorganische Reaktionen denkbar,
Photolyse von CO₂ oder H₂O (in damaliger Atmosphäre vorhanden)
durch kurzwellige UV-Strahlung**

$\lambda < 200 \text{ nm}$

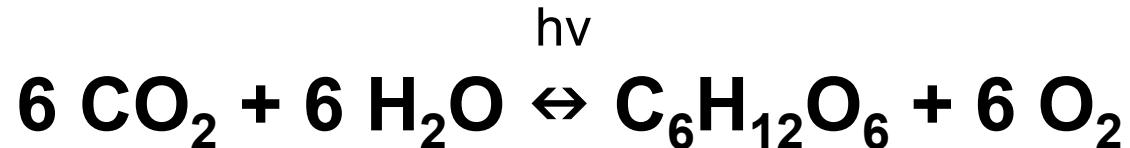


- (1) Ist durch das Fehlen bedeutender Mengen CO in der Atmosphäre auszuschließen**
- (2) a) Rechnungen zeigen, dass über anorganische photolytische Prozesse nur etwa 0,1 % des heutigen O₂-Gehaltes hätten gebildet werden können**
 - b) Mit steigendem O₂-Gehalt spaltet UV-Licht vorzugsweise O₂ statt H₂O (chemischer Rückkopplungsprozess \Rightarrow Urey-Effekt)**

➔ Bildung des atmosphärischen Sauerstoffs andere Gründe?

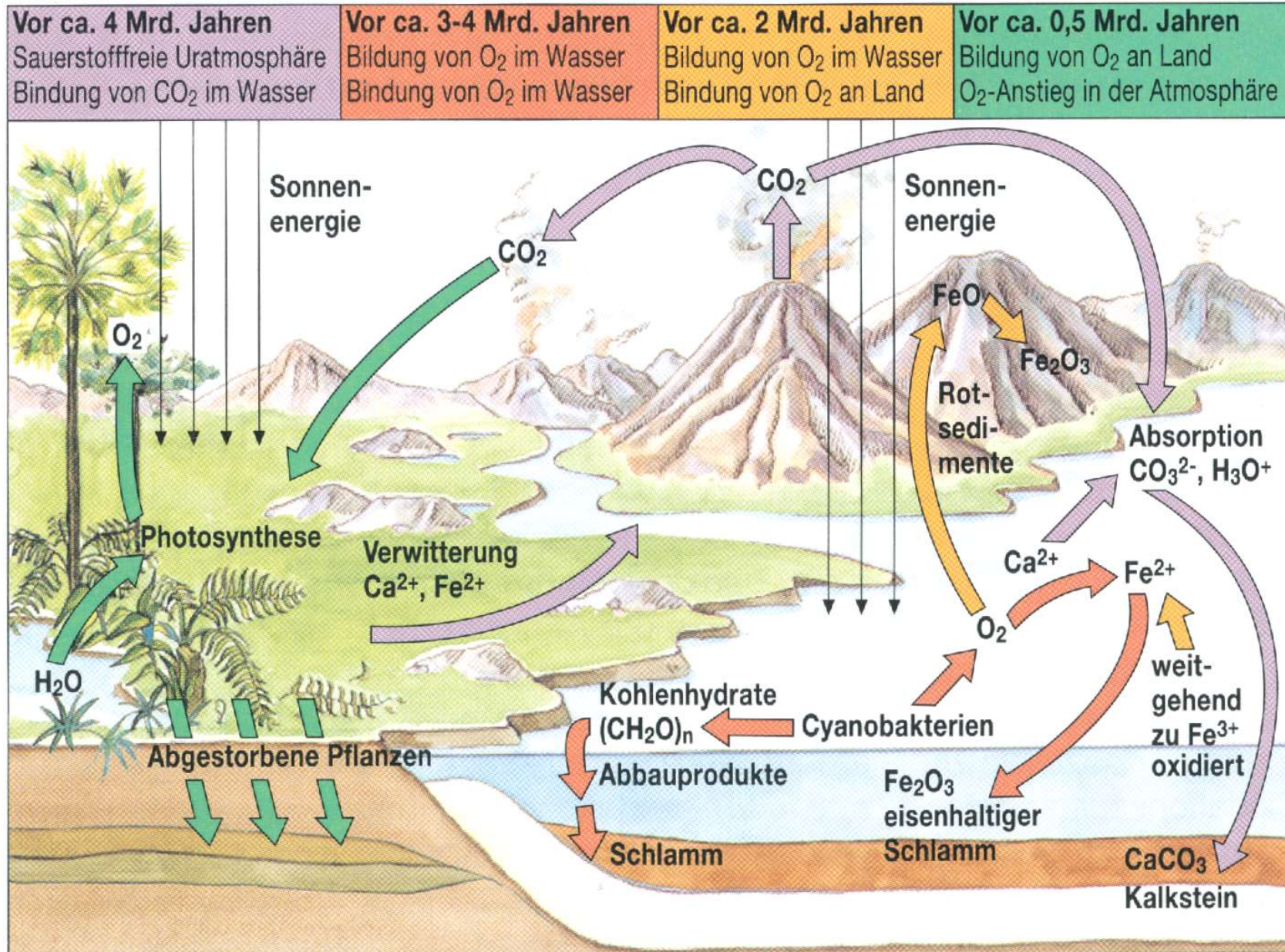
Entstehung des atmosphärischen Sauerstoffs

- **Möglichkeiten: Photosynthetische Sauerstoffproduktion**
- Anorganisch photolytischer Prozess der Spaltung spielt mengenmäßig, wie auch der geringe Sauerstoffgehalt in den Vulkangasen (10-100 ppb) **keine Rolle**
- Blaualgen (Cyanobakterien), grüne Pflanzen synthetisieren organisches Material und als Nebenprodukt Sauerstoff



- Für jedes entstandene und abgelagerte C-Atom, für das die Verwesung nicht entsprechend der Rückreaktion verläuft, bleibt entsprechend **Sauerstoff** übrig!

Bildung der sauerstoffhaltigen Atmosphäre



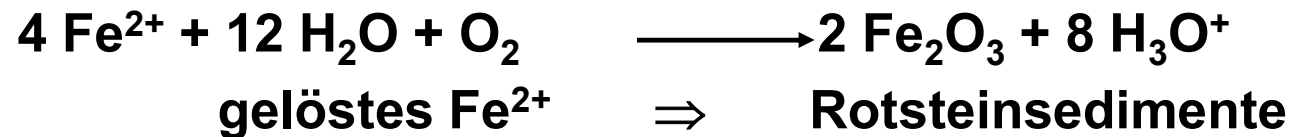
Herausbildung des Sauerstoff - I

- Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre stieg nur sehr langsam an **Cyanobakterien** (O_2 und Bildung red. C-Verbindungen)

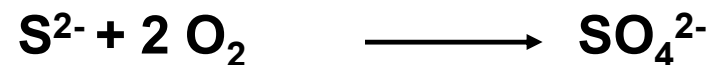
(über einen langen Zeitraum wurde er zur Oxidation reduzierter Stoffe verbraucht)

Verzögerung durch:

- im Meerwasser gelöste **Eisen(II)-Ionen**



- im Wasser gelöste **Sulfid-Ionen**



- durch **Oxidation von Fe^{2+} - Ionen** in verwittertem Gestein

Herausbildung des Sauerstoff - II

- mit zunehmender O₂-Konzentration in der Atmosphäre spielt die **Löslichkeit im Meerwasser** eine wachsende Rolle (proportionale Zunahme der Löslichkeit)

Henry ´sches Gesetz

$$c_{O_2} = H \cdot P_{O_2}$$

c_{O_2} = Konzentration des im Wasser gelösten Sauerstoffs

P_{O_2} = Partialdruck des Sauerstoffs in der Atmosphäre

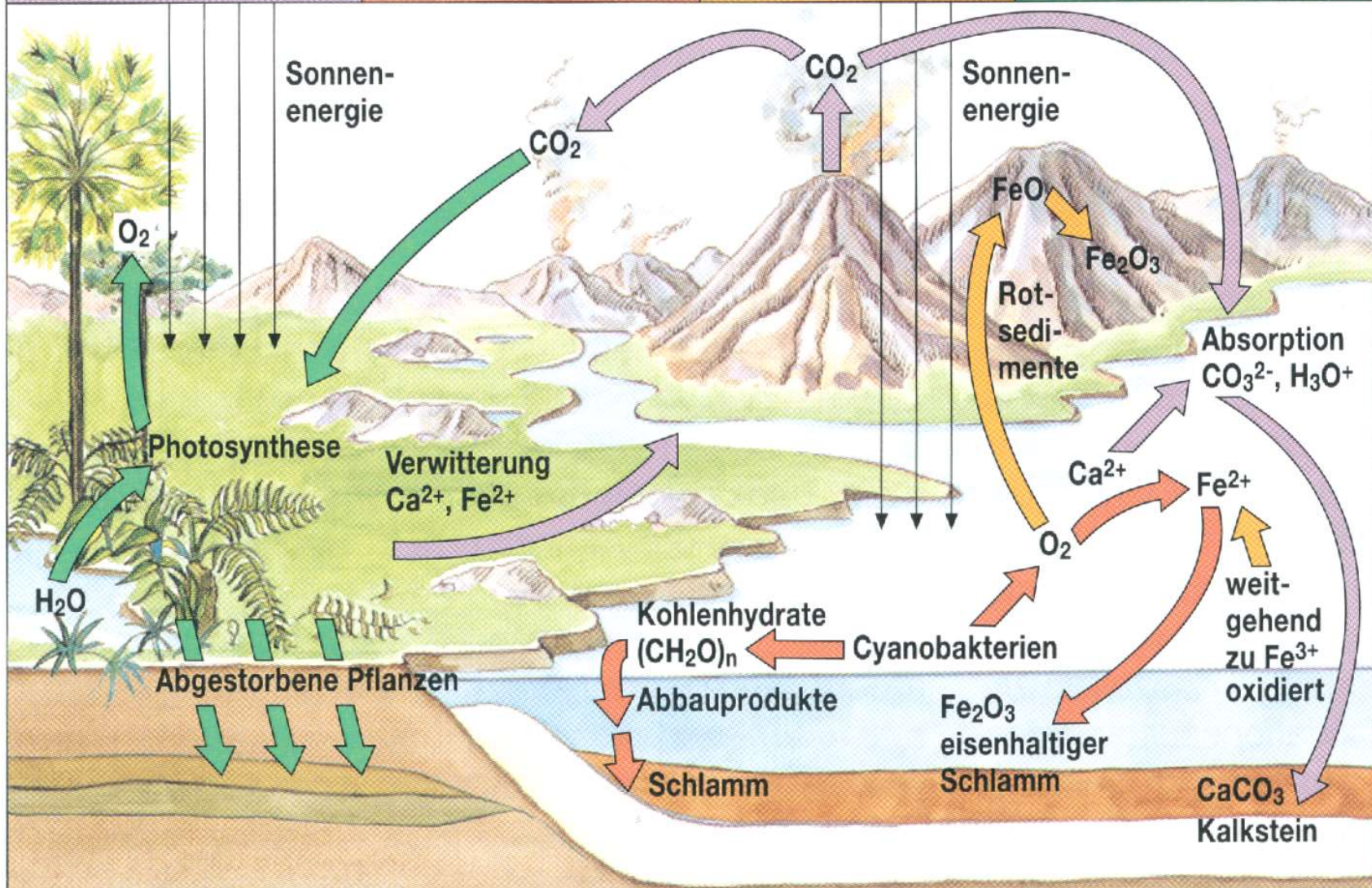
H = Henry´sche Konstante

Herausbildung des Sauerstoff - III

- weiterer Anstieg des O₂-Gehaltes erreicht bei etwa 10% des Gesamtgehalts eine neue Qualität (vor etwa 500-700 Mio. Jahren)
 - aus O₂-Gehalt kann sich genügend Ozon (O₃) bilden (Ozonschicht !!), um lebenszerstörende UV-Strahlung ($\lambda < 310$ nm) zu absorbieren
 - Entwicklung der ersten Landpflanzen (vor etwa 400 Mio. Jahren)
- seit etwa 350 Mio. Jahren entspricht der O₂-Gehalt der Atmosphäre ungefähr dem heutigen Wert (etwa 21%)
- wenn alles Leben auf der Erde (heute) verlöschen würde, würde aller Sauerstoff nach ca. 300 Mio. Jahren im Meeressediment eingelagert sein

Bildung der sauerstoffhaltigen Atmosphäre

| | | | |
|--|---|---|--|
| Vor ca. 4 Mrd. Jahren Sauerstofffreie Uratmosphäre Bindung von CO_2 im Wasser | Vor ca. 3-4 Mrd. Jahren Bildung von O_2 im Wasser Bindung von O_2 im Wasser | Vor ca. 2 Mrd. Jahren Bildung von O_2 im Wasser Bindung von O_2 an Land | Vor ca. 0,5 Mrd. Jahren Bildung von O_2 an Land O_2 -Anstieg in der Atmosphäre |
|--|---|---|--|



**Aller auf der Erde vorhandene
molekulare Sauerstoff ist das
Ergebnis von Organismen!!**