

Vorlesung: Die Erde
2. Teil: Endogene Geologie

Aufbau der Erde

Eigenschaften von Wellen

Verschiedene Wellen (Licht-, Schall-, seismische Wellen) haben gemeinsam:

- ihre Geschwindigkeit ist abhängig vom Material, das sie durchqueren

Lichtwellen:

Vakuum → Luft → Wasser

hohe Geschwindigkeit → geringe Geschwindigkeit

Schallwellen:

- Schallwellen sind wandernde Variationen des Drucks
- Schallwellen benötigen Medium zum Komprimieren
→ keine Ausbreitung im Vakuum

in Luft: $v = 0.3 \text{ km/s}$ (= 1080 km/h); in Wasser: $v \sim 1.5 \text{ km/s}$

- je mehr Kraft zum Komprimieren benötigt wird, umso schneller sind Schallwellen

Seismische Wellen:

- Kompressionswellen, Scherwellen, Oberflächenwellen
- Es ist leichter, Gesteine zu scheren als zu komprimieren
→ P-Wellen sind schneller als S-Wellen (v_P Granit: 6 km/s)
- Flüssigkeiten stellen einer Scherung keinen Widerstand entgegen
→ S-Wellen können sich in Flüssigkeiten nicht ausbreiten

Geschwindigkeit von seismischen Wellen

Seismogramme von Erdbeben

—> Berechnung der Geschwindigkeit von Erdbebenwellen

—> Geschwindigkeit $v = \text{Distanz} / \text{Zeit}$

Seismische Wellen:

Merke: Geschwindigkeit steigt mit der Dichte des Gesteins an

$v_{\text{Peridotit}} > v_{\text{Gabbro}} > v_{\text{Granit}}$

Peridotit: ultramafisches Gestein (Olivin + Pyroxen)

Wenn Erde aus einem Material mit konstanten Eigenschaften bestehen würde

—> Fortpflanzung von Erdbebenwellen entlang von Geraden; $v = \text{konstant}$

Erde besitzt Schalenbau / konzentrischen Aufbau

—> "Schichten" mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Dichte

Moho ist Grenze zwischen Kruste und Mantel:

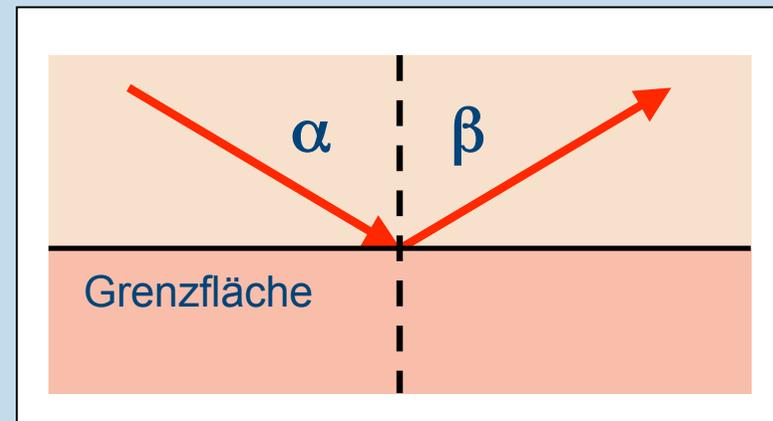
—> unterschiedliche chemische / mineralogische Zusammensetzung

Reflexion und Refraktion seismischer Wellen

2 Prozesse sind für Ausbreitung seismischer Wellen von Bedeutung:
Reflexion und Refraktion

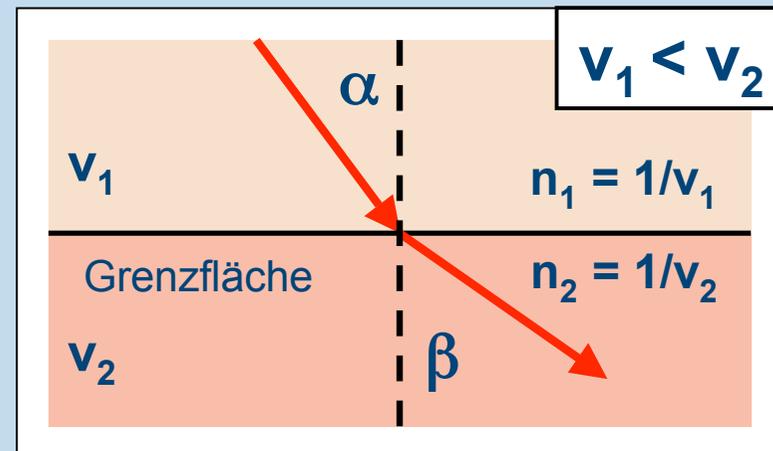
Reflexion = Spiegelung (*reflection*):

- an Grenzfläche zwischen 2 Materialien
- Einfallswinkel α = Ausfallswinkel β



Refraktion = Brechung (*refraction*):

- an Grenzfläche zwischen 2 Materialien
- Brechungsgesetz: $\sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1$

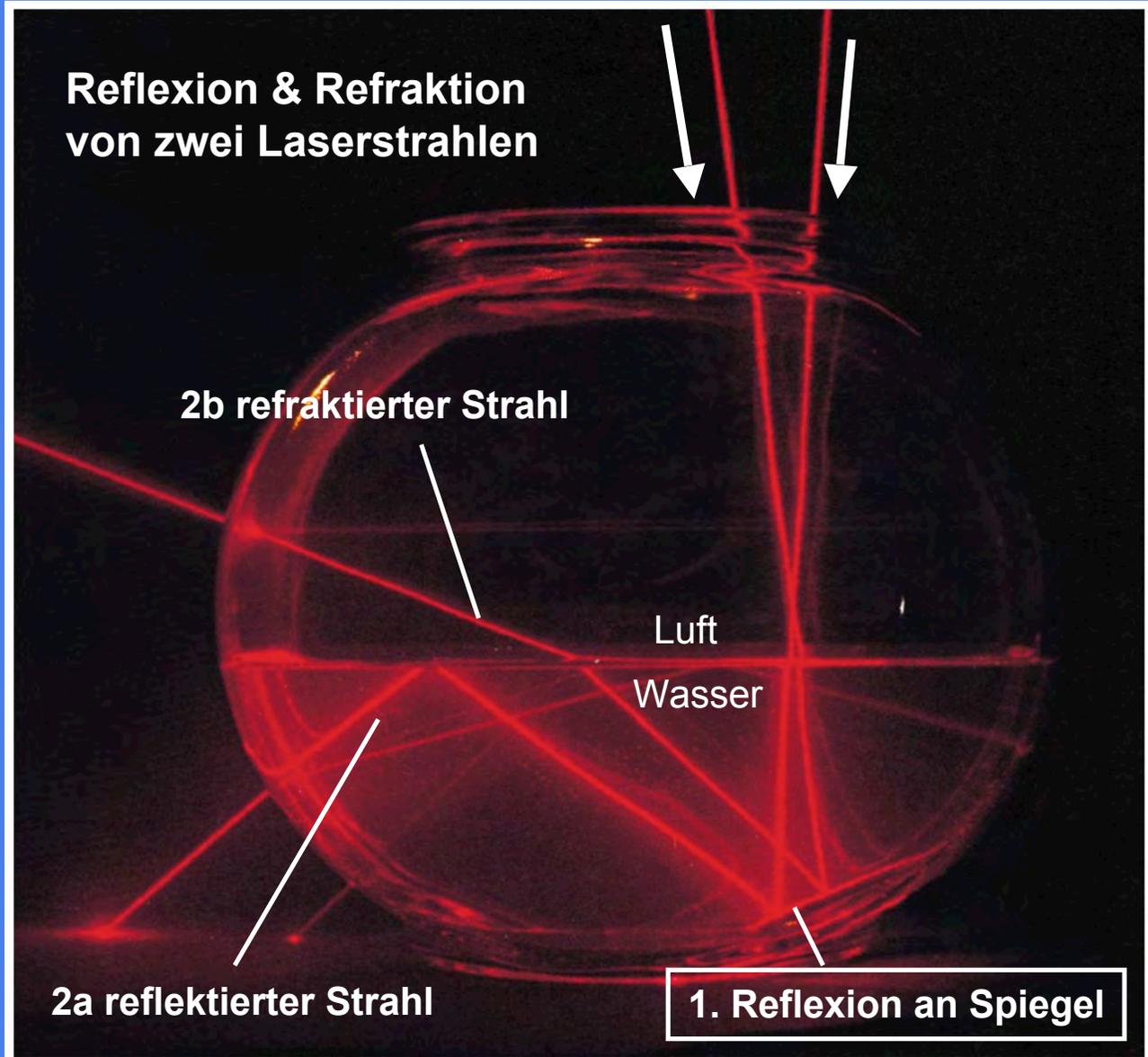


Reflexion und Refraktion von Wellen

1. Reflexion der beiden Strahlen am Spiegel

2a. Strahl wird reflektiert

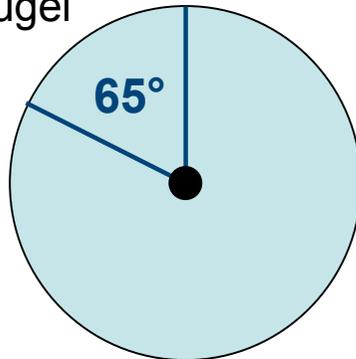
2b. Strahl wird refraktiert
(kleiner Teil reflektiert)



Ausbreitung von P-Wellen in der Erde

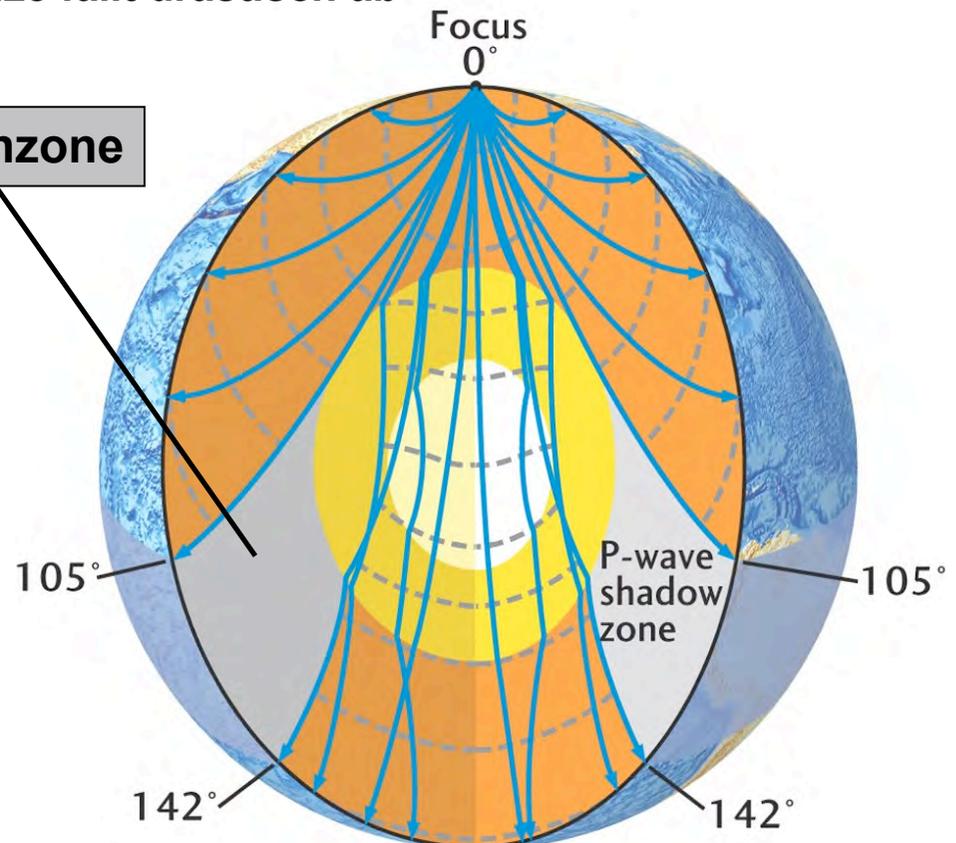
- **Geschwindigkeit im Erdmantel steigt mit Tiefe an**
Grund: ansteigende Dichte im Erdinneren
- —> **Pfade der P-Wellen sind gekrümmt**
- **Schattenzone: 105° – 142° (11600 km – 15800 km)**
- **P-Wellen mit Distanzen > 142° haben verzögerte Ankunftszeiten**
—> **Geschwindigkeit an Kern-Mantel-Grenze fällt drastisch ab**
- **Brechung der P-Wellen > 142°**

Messung von Distanzen
auf einer Kugel



Erdumfang: ~40000 km
40000 km / 360° = 111 km = 1°

Schattenzone



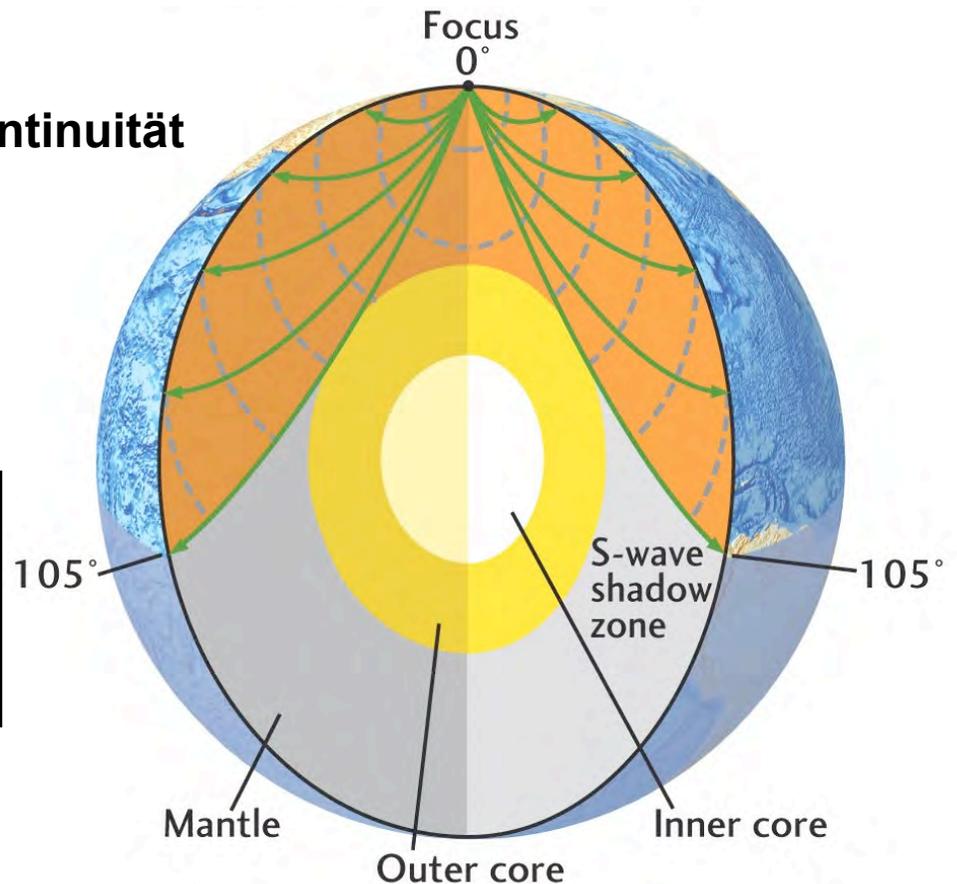
Ausbreitung von S-Wellen in der Erde

- Pfade der S-Wellen sind ebenfalls gekrümmt
- Geschwindigkeit im Erdmantel steigt mit Tiefe an
- Bei Distanzen $> 105^\circ$ erscheinen keine S-Wellen
 - > Schattenzone: $105^\circ - 180^\circ$
 - > Erde hat flüssigen äußeren Kern

Kern-Mantel-Grenze ist scharfe Diskontinuität

- > Reflektion von P- und S-Wellen
- > **PcP** und **ScS**
- > **c** steht für Reflektion am Kern (core)

1914: der deutsche Seismologe
B. Gutenberg bestimmt mit PcP und ScS-
Wellen die Tiefe der Kern-Mantel-Grenze:
2900 km



Nomenklatur seismischer Wellen

PcP und ScS: am Kern reflektierte P- und S-Wellen

PP und SS: an Erdoberfläche reflektierte P- und S-Wellen

PKP: P-Welle durch Mantel und äußeren Erdkern (**K** steht für **Kern**)

Entdeckung des inneren Erdkerns
durch die dänische Seismologin
Inge Lehmann (1936)

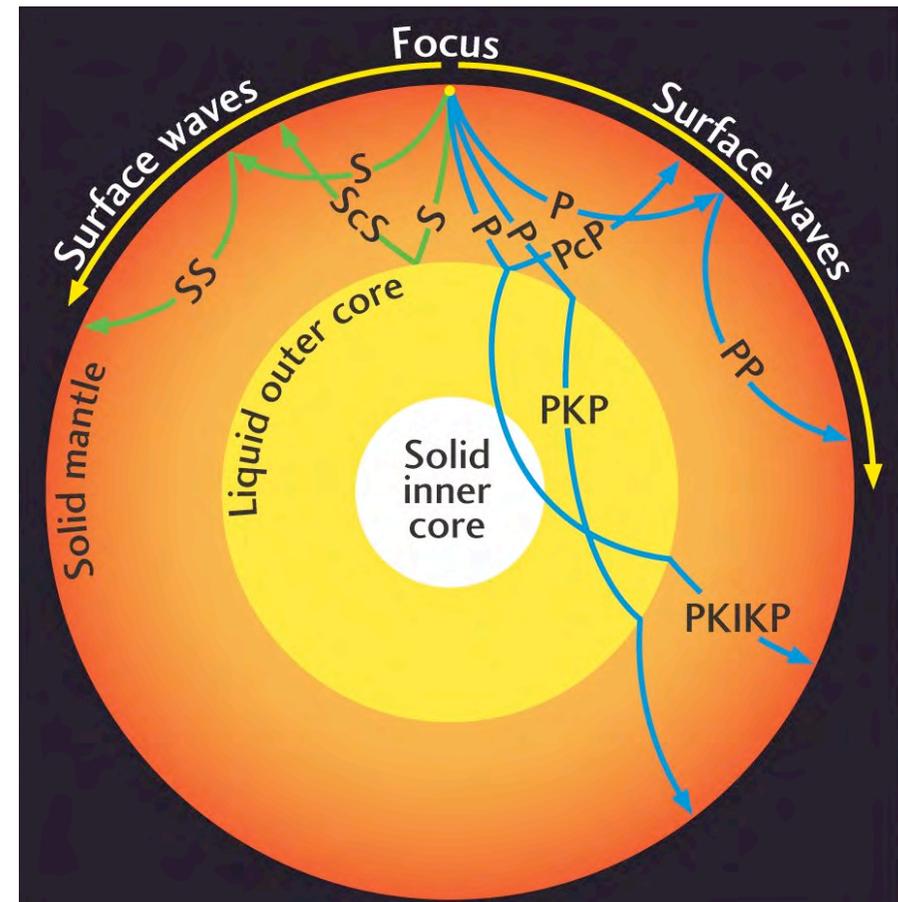
Nutzung von PKIKP-Wellen:

P-Wellen durch den Mantel sowie
den äußeren und inneren Kern

Generell:

Großbuchstaben = refraktierte Wellen

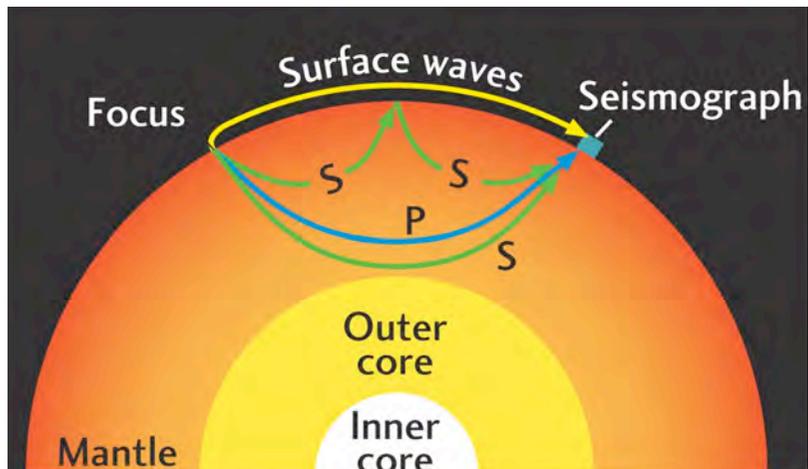
Kleinbuchstaben = reflektierte Wellen



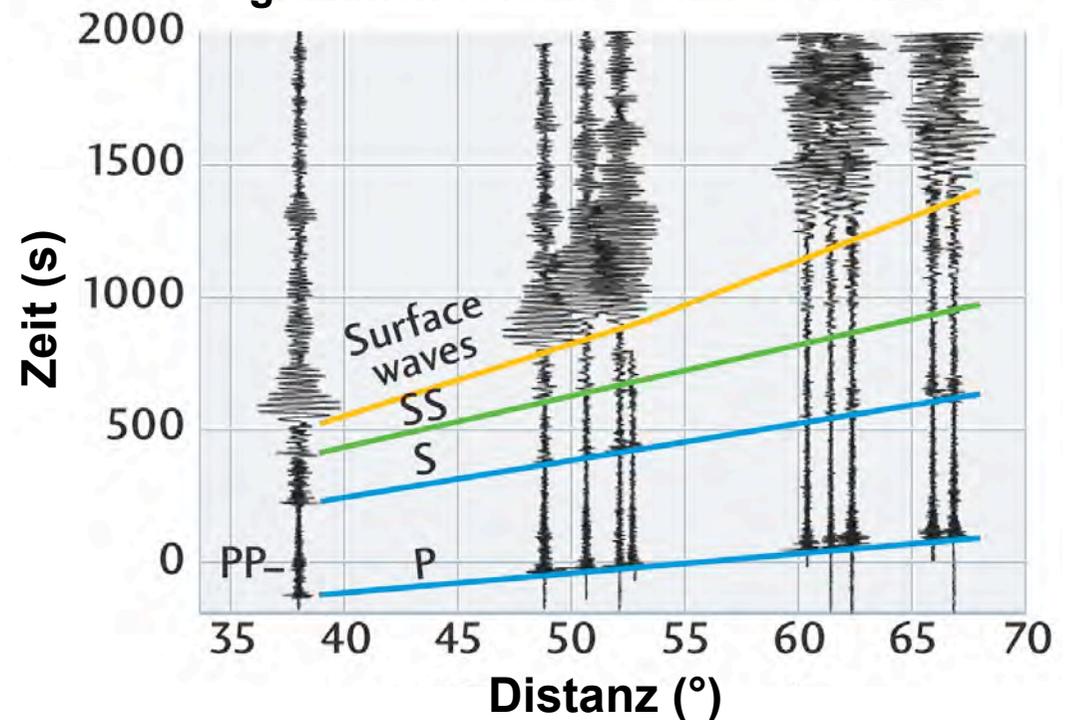
Erkundung des Erdinneren

Seismische Wellen werden von tausenden von Seismographen aufgezeichnet

Beispiel

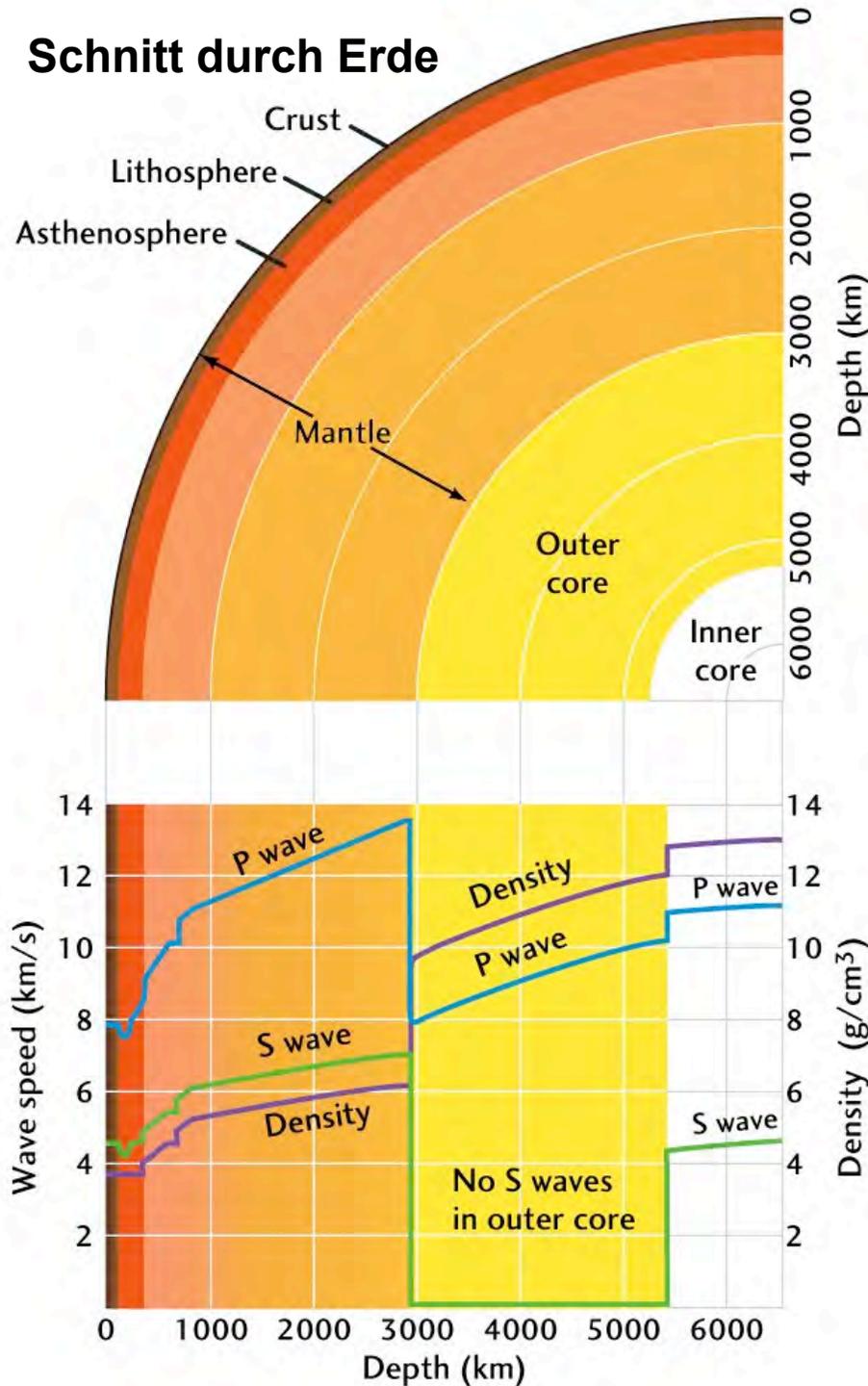


Travel-time-diagram mit Seismogrammen verschiedener Stationen



- > Laufzeiten der Wellen sind eine Funktion der Geschwindigkeit
- > Geschwindigkeit variiert mit der Tiefe als Folge der Dichte und Zusammensetzung
- > Modell für den konzentrischen Aufbau der Erde

Schnitt durch Erde



Schalenbau der Erde

- **Erdmantel:** kontinuierliche Zunahme der P- und S-Wellengeschwindigkeit und der Dichte
- **Kern-Mantel-Grenze:** Sprung zu höherer Dichte und Abfall der P-Wellengeschwindigkeit
- **Äußeren Kern:** keine S-Wellen
- **Grenze äußerer/innerer Kern:** sprunghafte Zunahme der Dichte und P-Wellengeschwindigkeit

S-Wellen im inneren Kern?

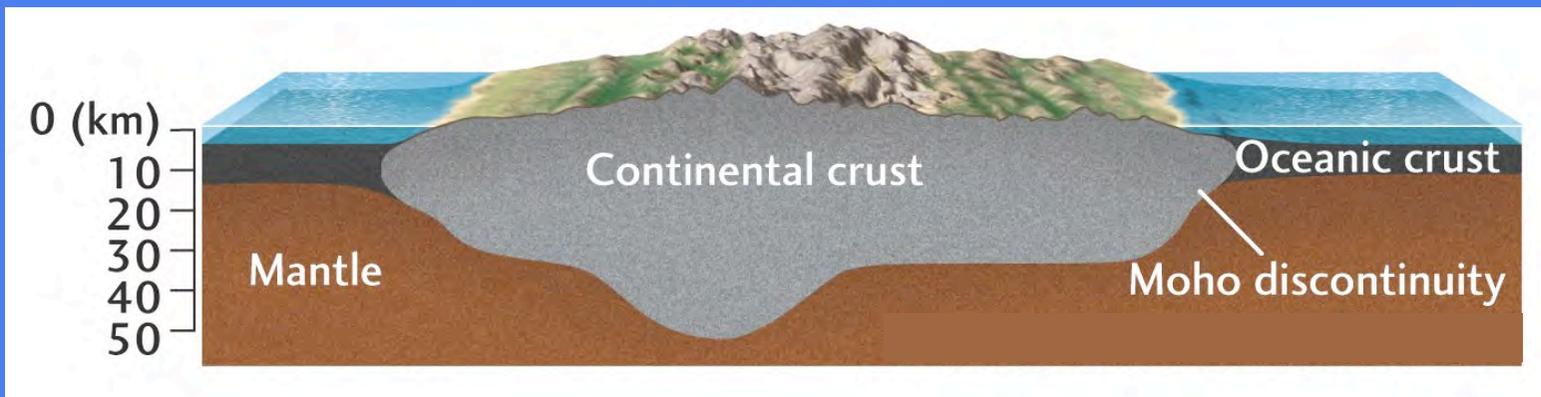
—> Entstehung als konvertierte P-Wellen an Grenze äußerer/innerer Kern

Struktur der Erde

- | | <i>Tiefe</i> |
|---|--------------|
| • <i>Erdkruste</i> : ~5–70 km mächtig | ~ 5-70 km |
| • <i>Erdmantel</i> : ultramafisch ($\text{SiO}_2 < 45\%$) | ~ 2900 km |
| • <i>Äußerer Kern</i> : flüssiges Eisen | ~ 5150 km |
| • <i>Innerer Kern</i> : festes Eisen | ~ 6370 km |

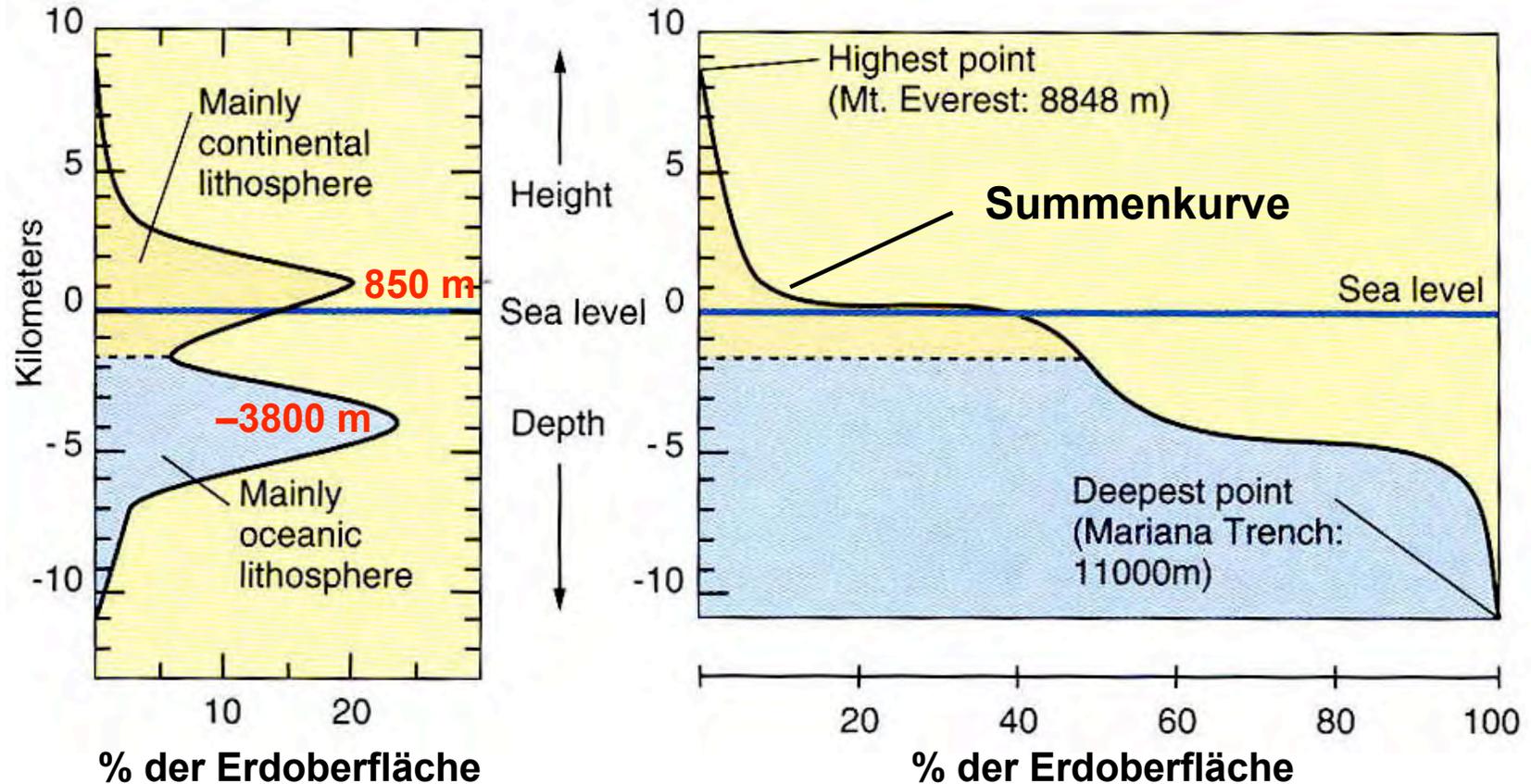
Dichte der Lithosphäre

- *kontinentale Kruste*: ~2.7 g/cm³
- *ozeanische Kruste*: ~2.9 g/cm³
- *Mantellithosphäre*: ~3.2 g/cm³



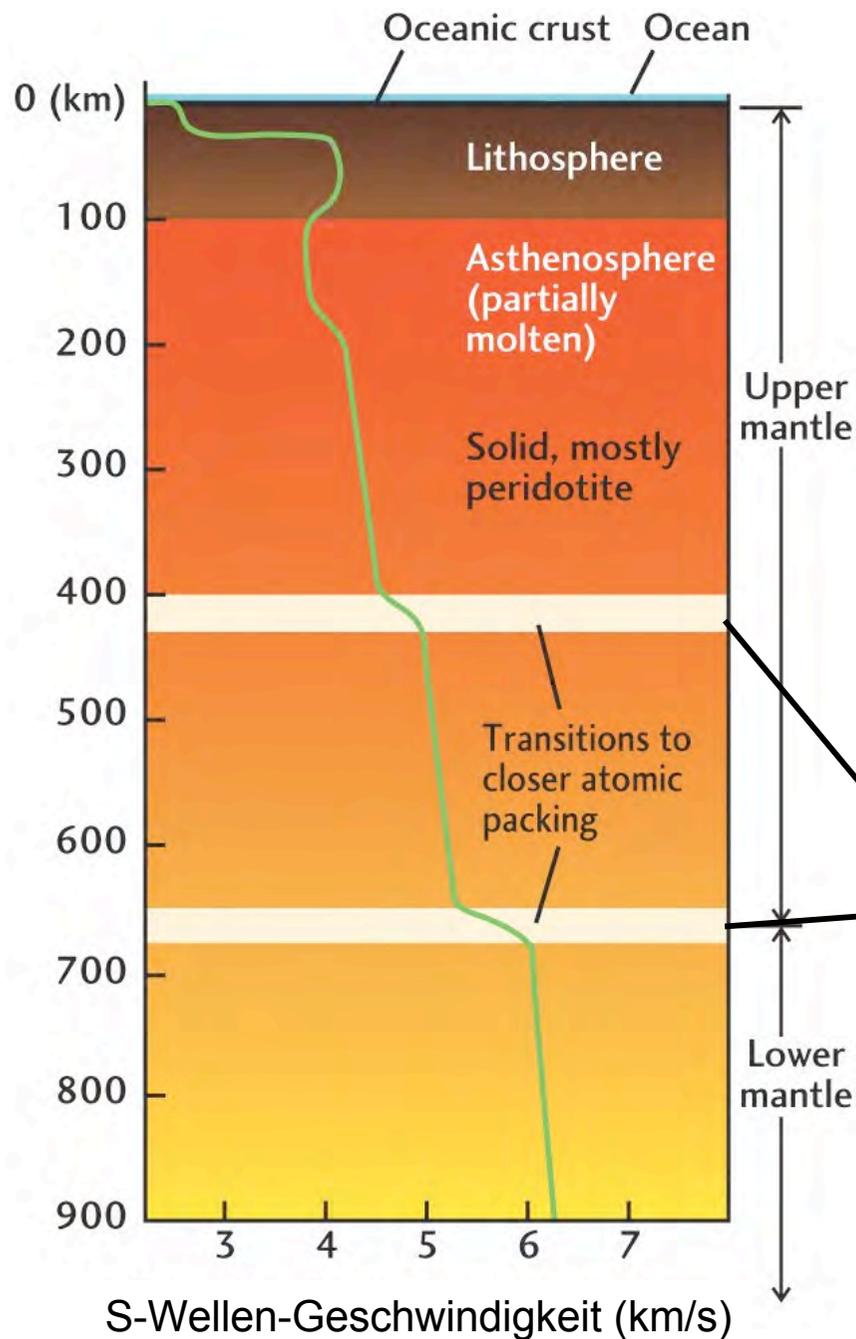
Hypsometrie und Isostasie

bimodale Verteilung: zwei Maxima bei + 800 m und - 3800 m



Bimodale Verteilung der hypsometrischen Kurve spiegelt die Isostasie der kontinentalen und ozeanischen Kruste wider

Aufbau des Erdmantels



Asthenosphäre:

Abnahme der Geschwindigkeit von S-Wellen
(*low-velocity zone*)

—> geringe Mengen an Schmelze (~ 1%)

—> Abnahme der Festigkeit

Lithosphärenplatten bewegen sich auf Asthenosphäre

Mächtigkeit und Ausbildung der Asthenosphäre

- unter Ozeanen:
von Basis der Lithosphäre bis ~200 km Tiefe
- Kontinente: tiefere Lage; schwächer ausgeprägt

**Änderung in der Struktur der Minerale
in ~ 410 und 670 km Tiefe**

—> Mineralogie ändert sich

—> chem. Zusammensetzung ist konstant

Grenze oberer/unterer Mantel: 670 km

Zusammensetzung Erdkern

Erdkern besteht überwiegend aus Eisen und Nickel:

Anteil an Eisen (Fe): ~80%,

Anteil an Nickel (Ni): ~5 %

abgeleitet aus Kombination verschiedener Datensätze:

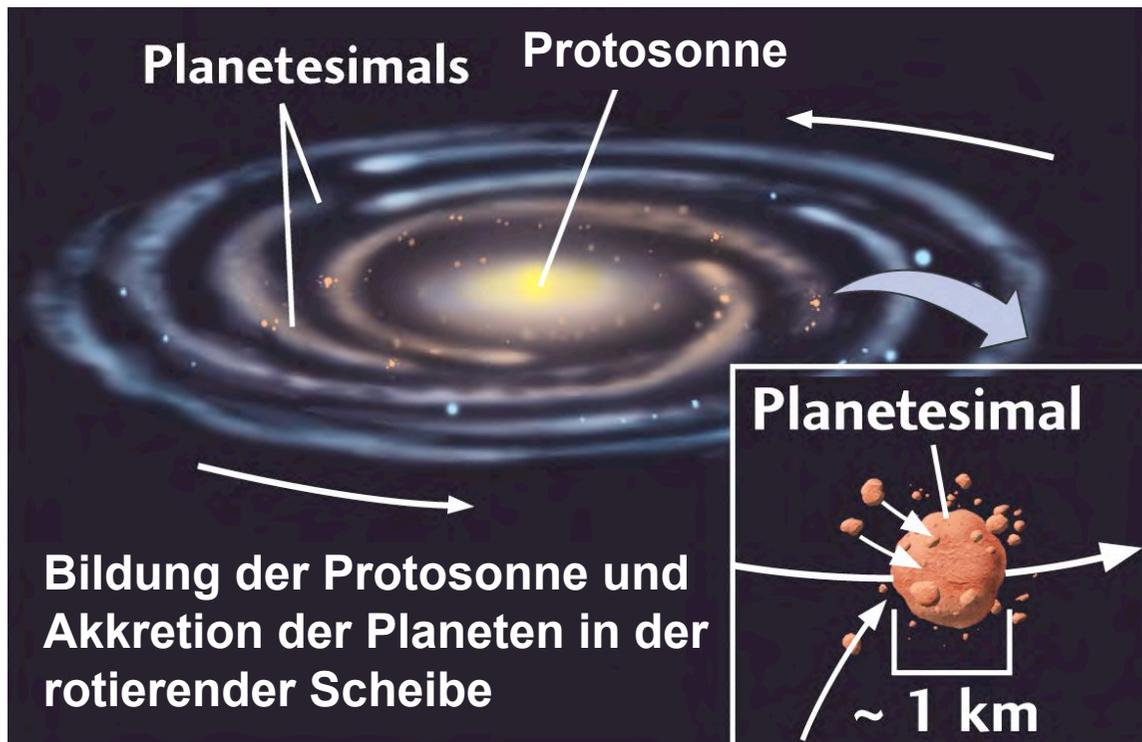
- **seismologische Daten zur seismischen Geschwindigkeit und Dichte des Kerns**
- **Gesamtmasse und Trägheitsmoment der Erde**
(bekannt aus Rotation und Umlaufbahn der Erde um die Sonne)
- **Zusammensetzung von Meteoriten und der Sonne**
- **Laborexperimente (durchgeführt unter hohem Druck und Temperatur)**

Entstehung des Erdkerns in der frühen Erdentwicklung

• **großräumige Aufschmelzung bei der Akkretion der Erde**

—> **Absinken der dichten, metallischen Elemente (Eisen, Nickel)**

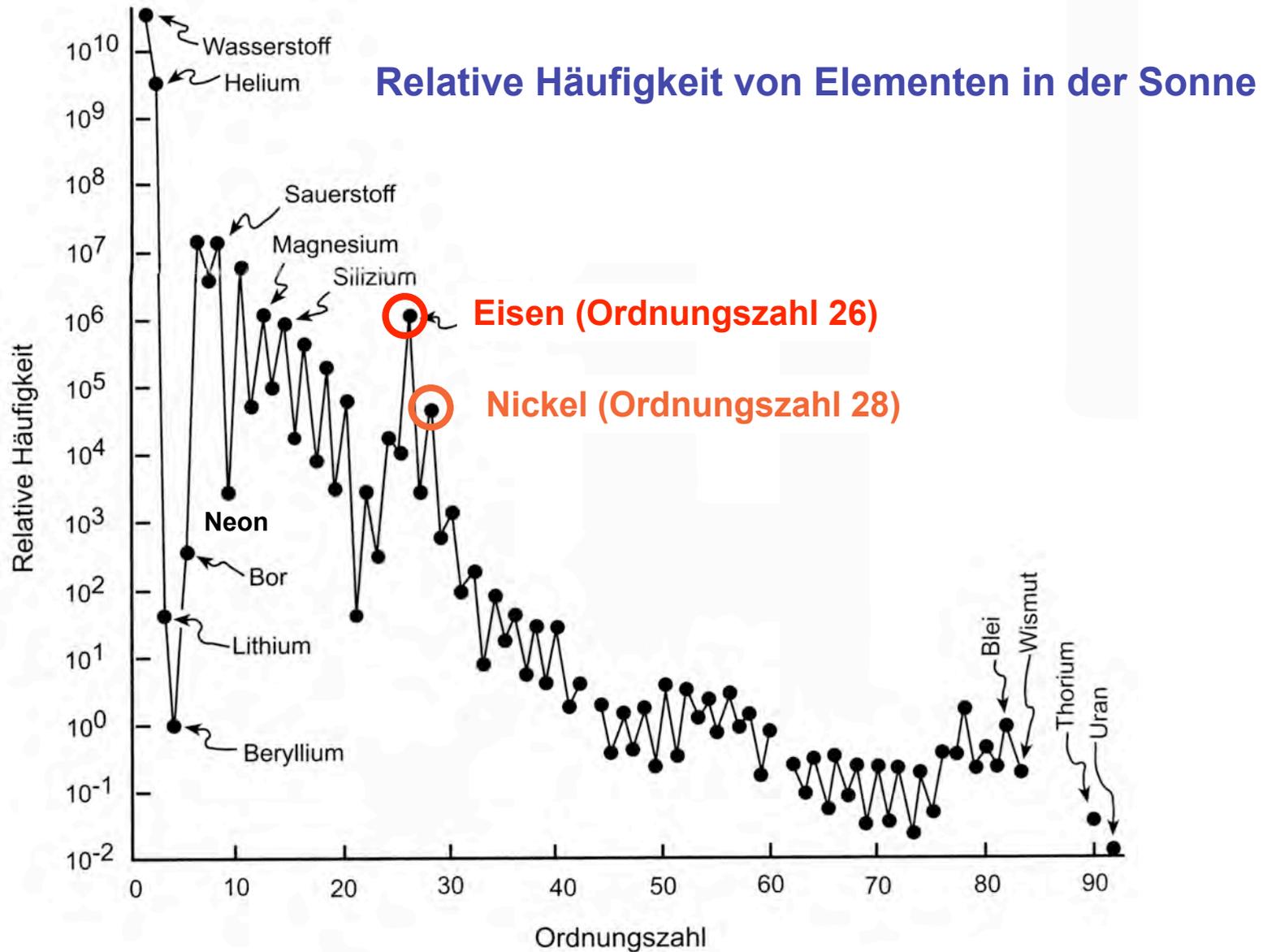
Entwicklung der Erde



starke Aufheizung der Erde während der Akkretionsphase
—> Aufschmelzung

Zusammensetzung der Sonne

Logarithmische Skala

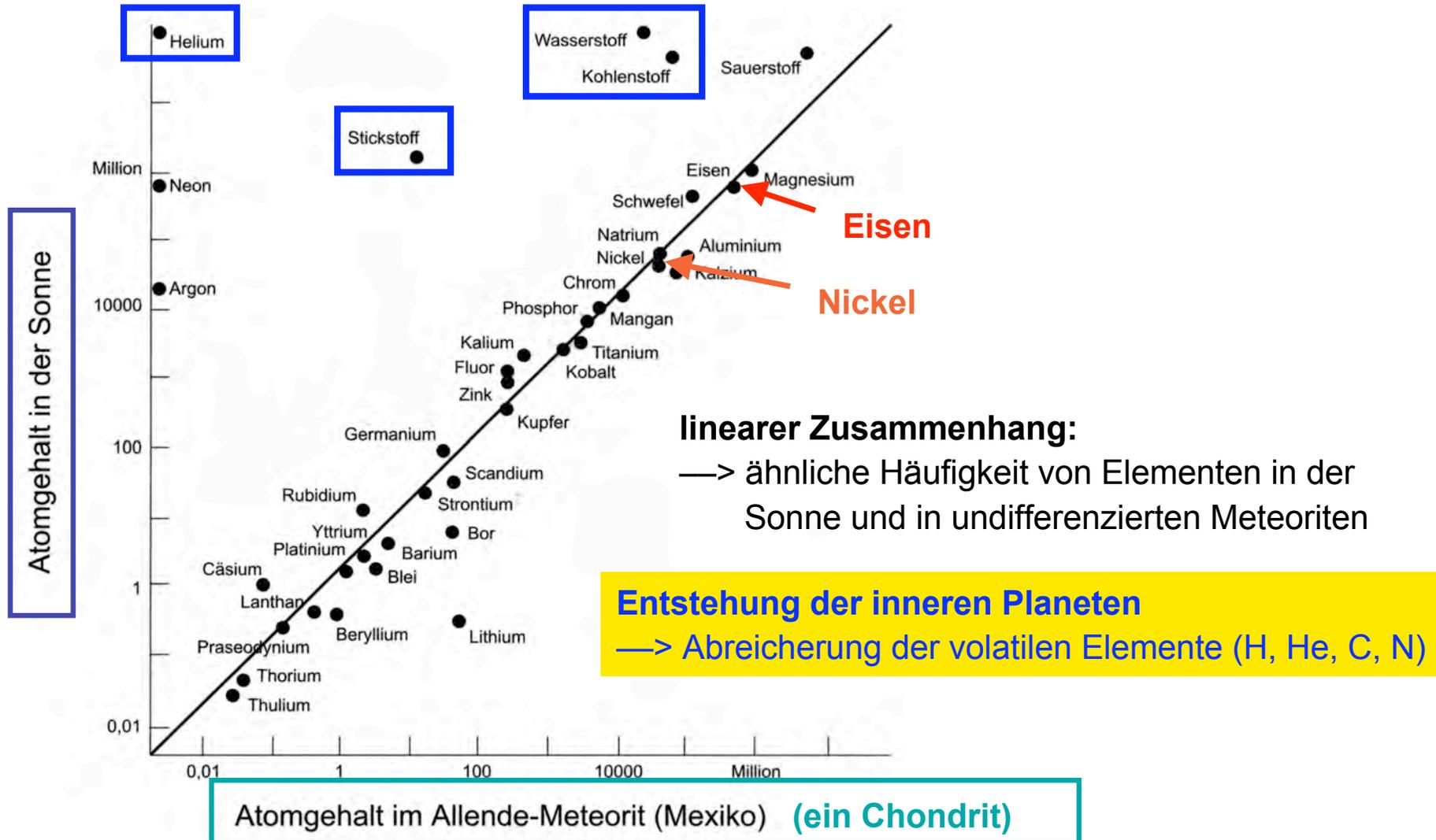


Zusammensetzung von Meteoriten und Sonne

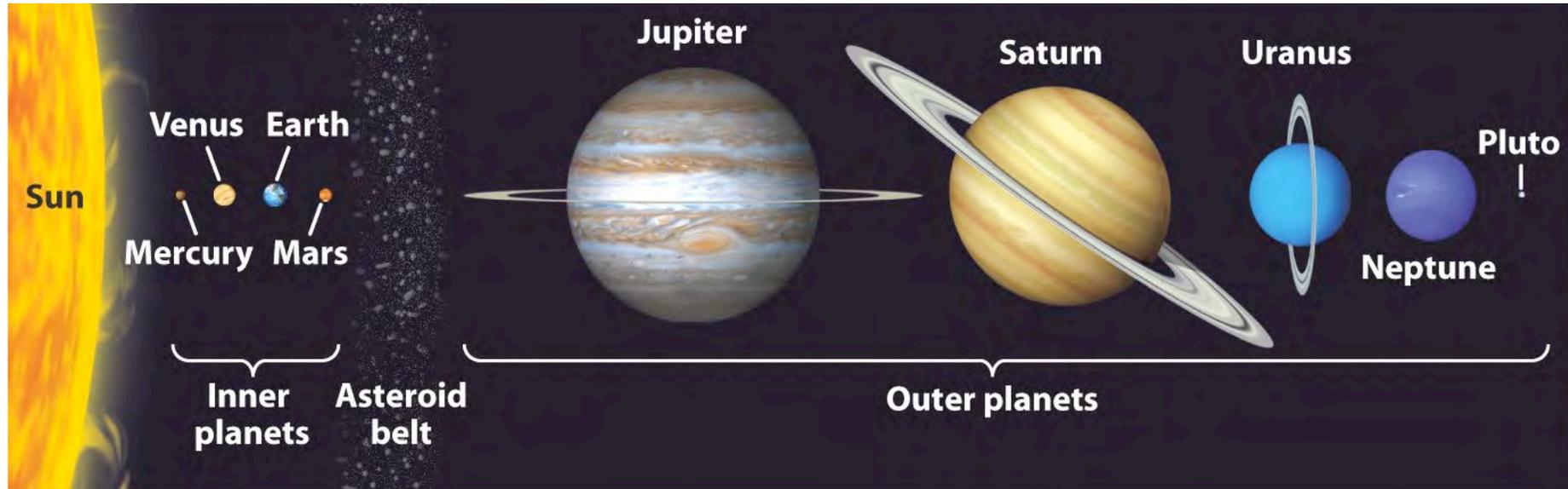
Vergleich der Zusammensetzung von:

undifferenzierten Meteoriten (Chondriten) und der Sonne

- Herkunft der Meteorite: Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter



Zusammensetzung der Erde



Sonne

Asteroiden-
gürtel

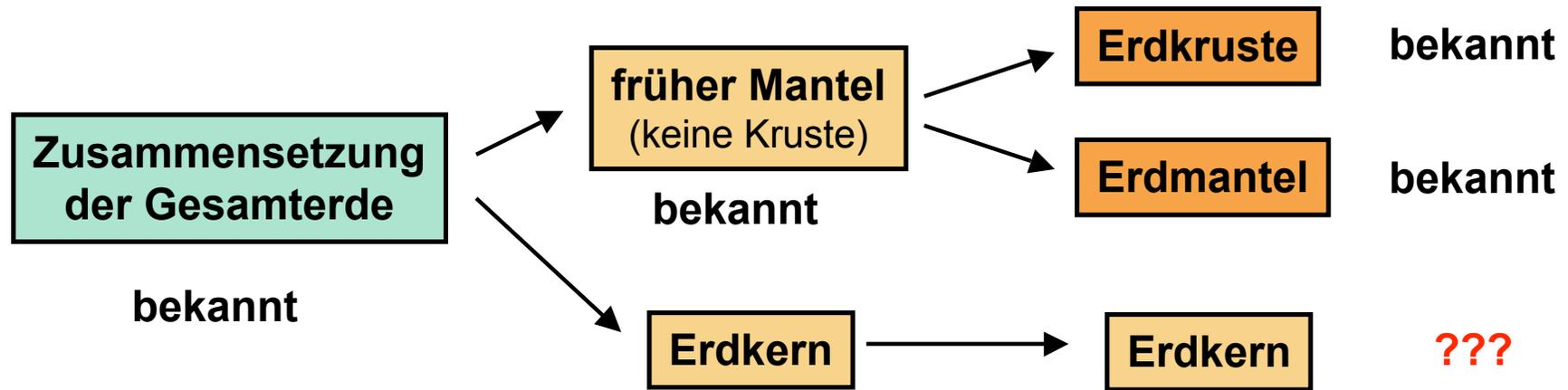


nicht maßstäblich

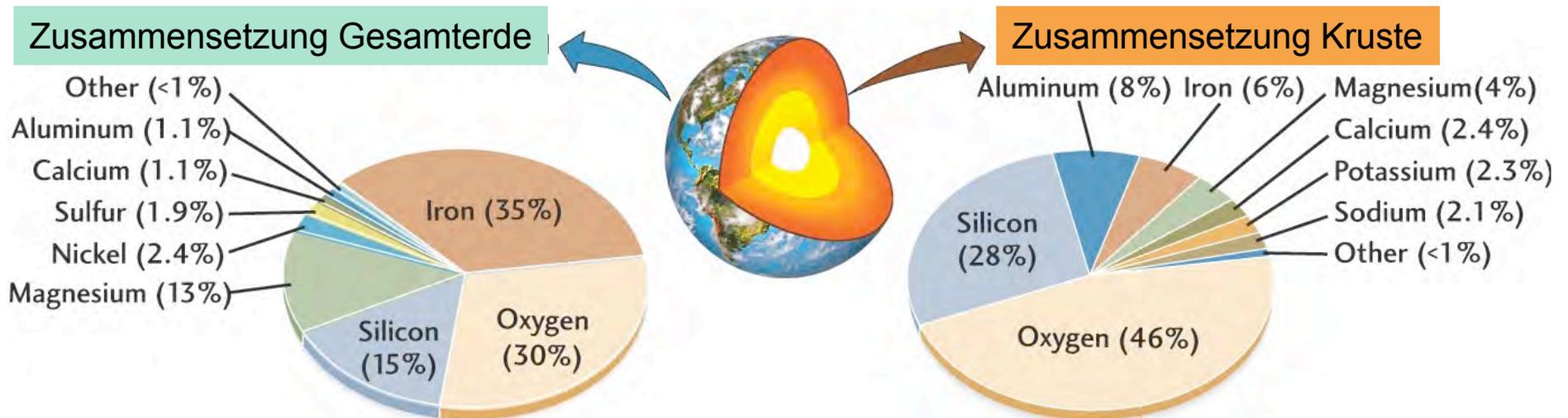
undifferenzierter Meteorite (Chondriten) und Sonne haben gleiche Zusammensetzung
—> Erde hat ebenfalls diese Zusammensetzung !!

Zusammensetzung des Erdkerns

Chemische Differentiation der Erde



Zusammensetzung des Erdkerns ist ableitbar



Transport von Wärme

Wärmetransport in der Erde erfolgt durch zwei Prozesse:

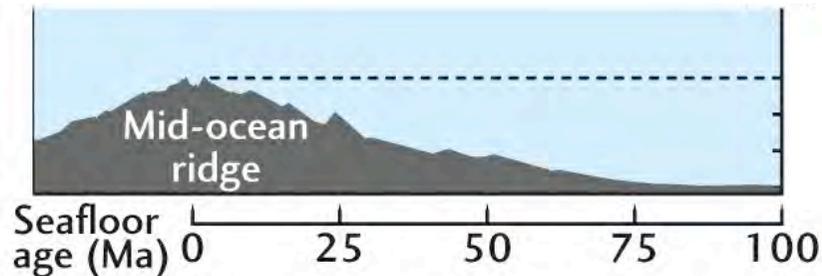
1. Wärmeleitung = Konduktion (*conduction*)

- Wärme ist die Folge von Schwingungen von Atomen
- hohe Temperatur = starke Schwingung der Atome
- niedrige " = geringe " " "
- Schwingungen übertragen sich auf Nachbaratome
- Wärmeleitung von Bereichen hoher Temperatur zu kälteren Bereichen
- Wärmeleitung erfolgt OHNE den Transport von Material
- Gesteine sind schlechte Wärmeleiter
- Konduktion vor allem in der Lithosphäre
- Absinken des Meeresbodens durch Abkühlung ozeanischer Lithosphäre

Alter und Tiefe des Ozeanbodens

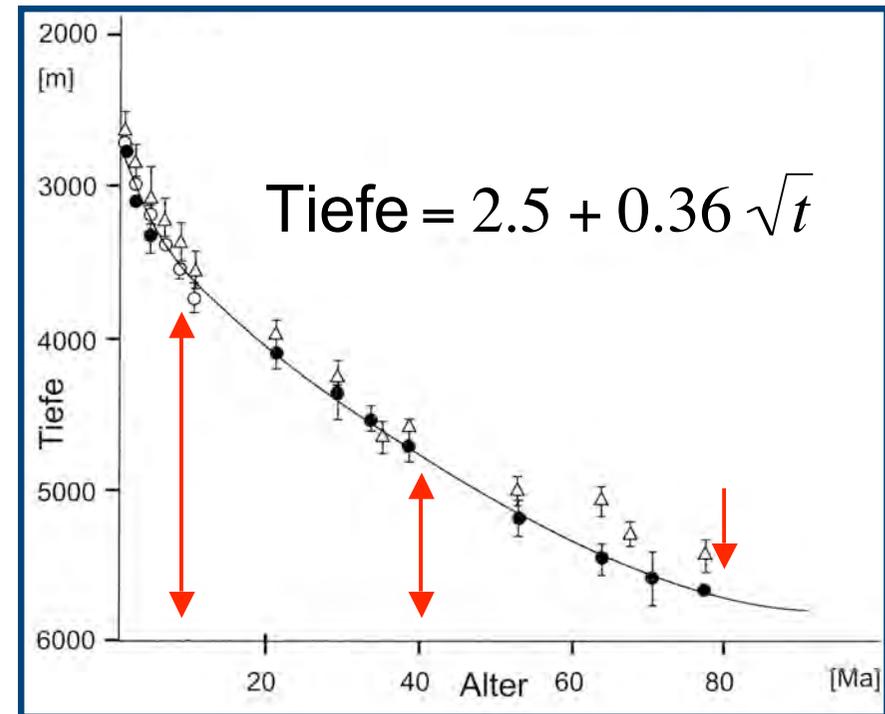
Beziehung: Alter ozeanischer Lithosphäre und Tiefe des Meeresbodens

—> Steuerung durch Temperatur bzw. durch Wärmeleitung



$$\text{Tiefe} = 2.5 + 0.36 \sqrt{t}$$

Tiefe (km); Zeit t (Ma)



Alter t = 10, 40, 80 Ma —> Tiefe??

t = 10 Ma —> Tiefe = 3.6 km

t = 40 Ma —> Tiefe = 4.8 km

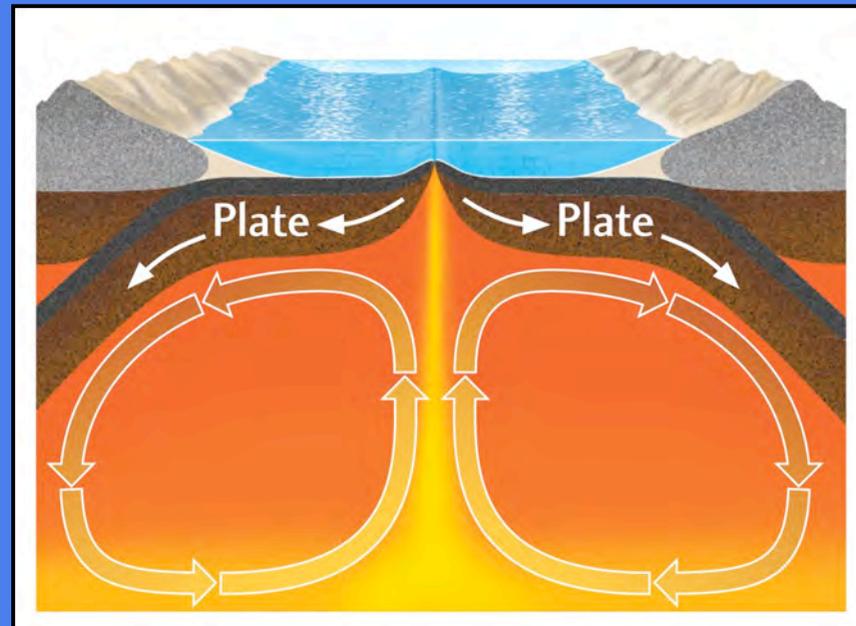
t = 80 Ma —> Tiefe = 5.7 km

Neben Wärmeleitung: Zirkulation von Fluiden (Advektion): —> Abkühlung

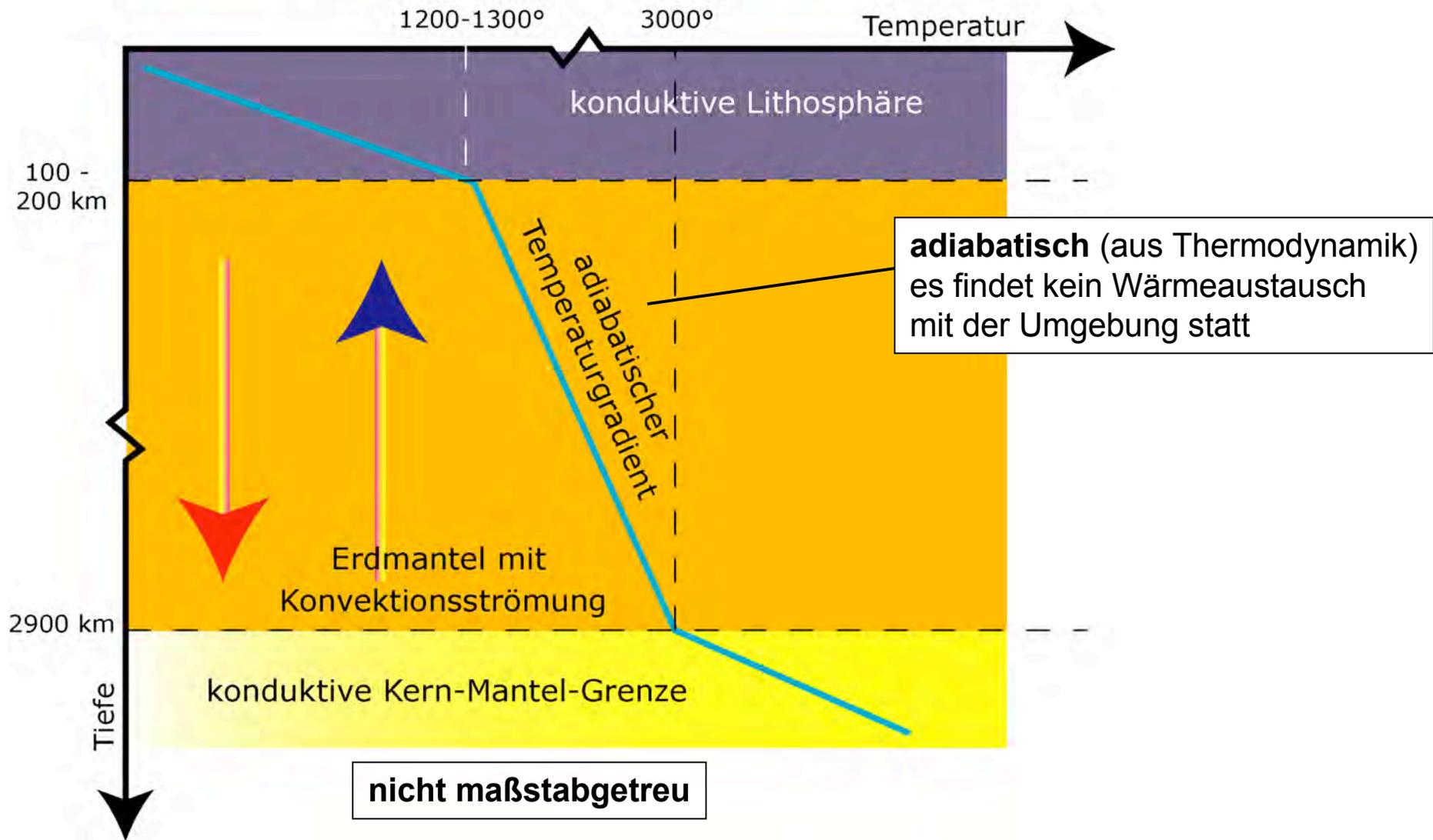
Transport von Wärme

2. Konvektion (*convection*)

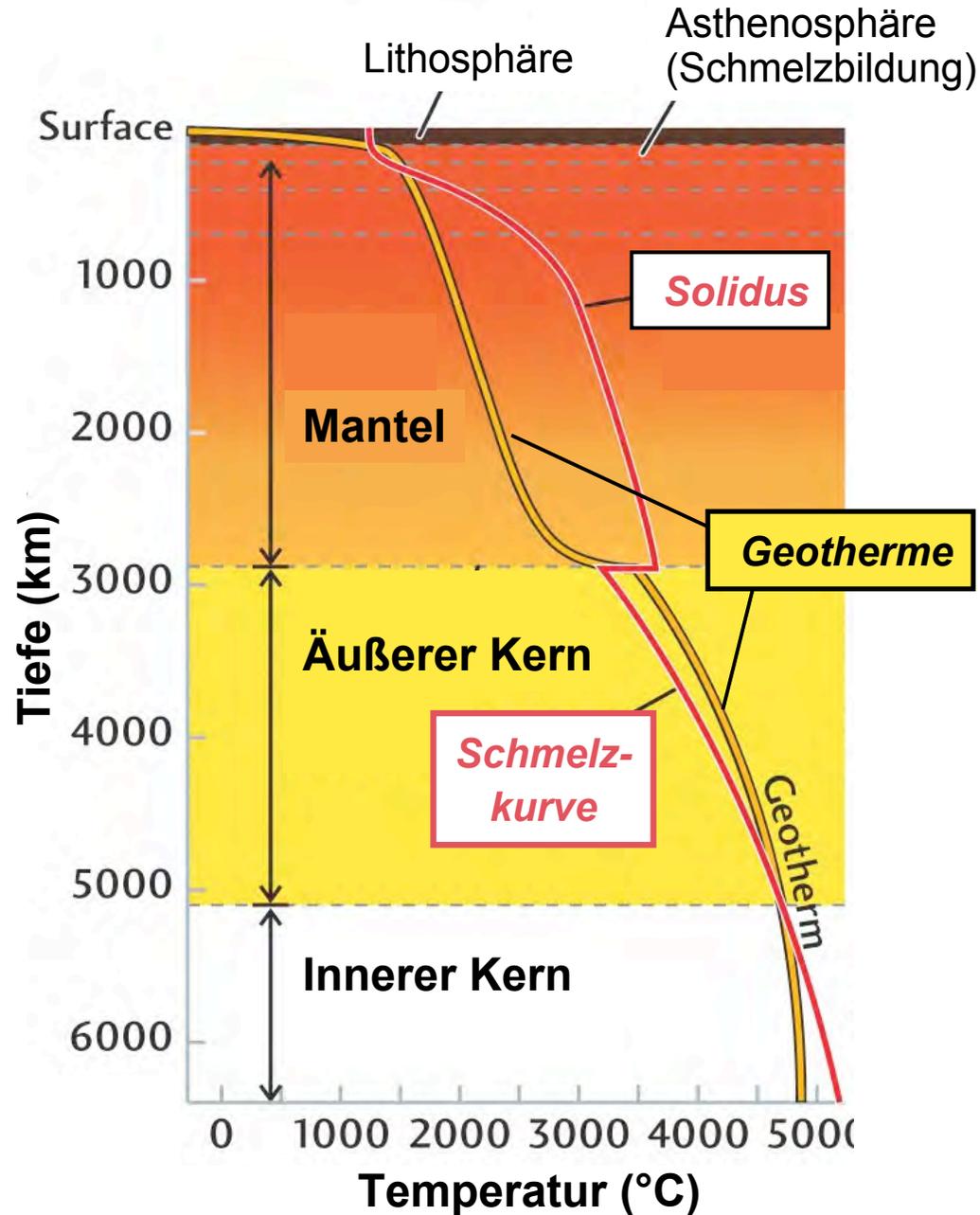
- Aufheizung, Expansion und Aufstieg aufgrund geringerer Dichte
- Wärmetransport erfolgt DURCH den Transport von Material
- Konvektion ist viel effektiver als Konduktion
- Konvektion der Gesteine im festen Erdmantel
(Gesteine fließen im **festen!!!** Zustand)
- Konvektion im flüssigen äußeren Erdkern



Theoretisches Temperatur-Modell für Konvektion im Mantel



Geotherme



Geotherme: Temperaturverlauf

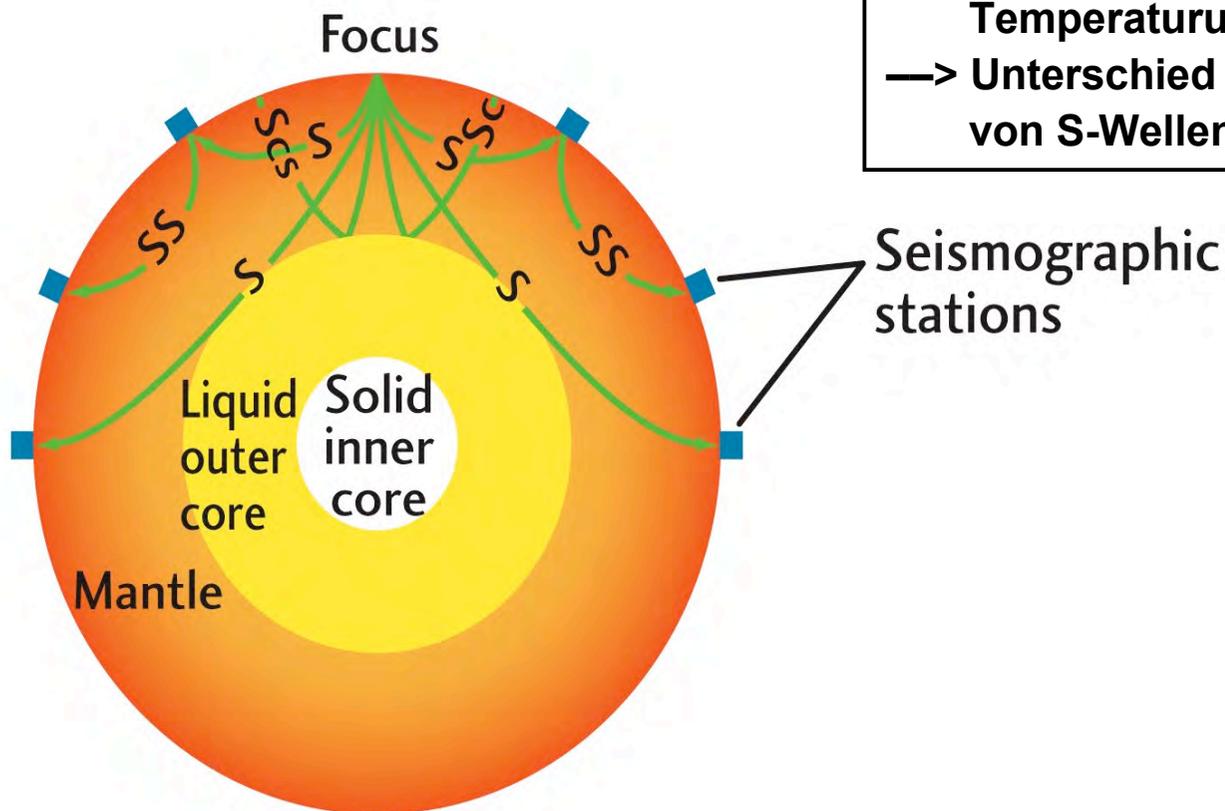
Solidus: Übergang von fest → teilgeschmolzen

Wärmequellen:

- kinetische Energie einfallender Körper bei Akkretion der Erde wird in Wärme umgewandelt (in der Frühphase der Erde)
- Energie aus dem Zerfall radioaktiver Elemente

Seismische Tomographie

- > Blick ins Erdinnere durch Analyse der Geschwindigkeit seismischer Wellen
- > laterale Unterschiede in Geschwindigkeiten sind eine Funktion der Temperatur
- > 3-dimensionale Bilder des Erdmantels



Temperaturunterschied von 100°C
—> Unterschied in der Geschwindigkeit
von S-Wellen von ~ 1 %

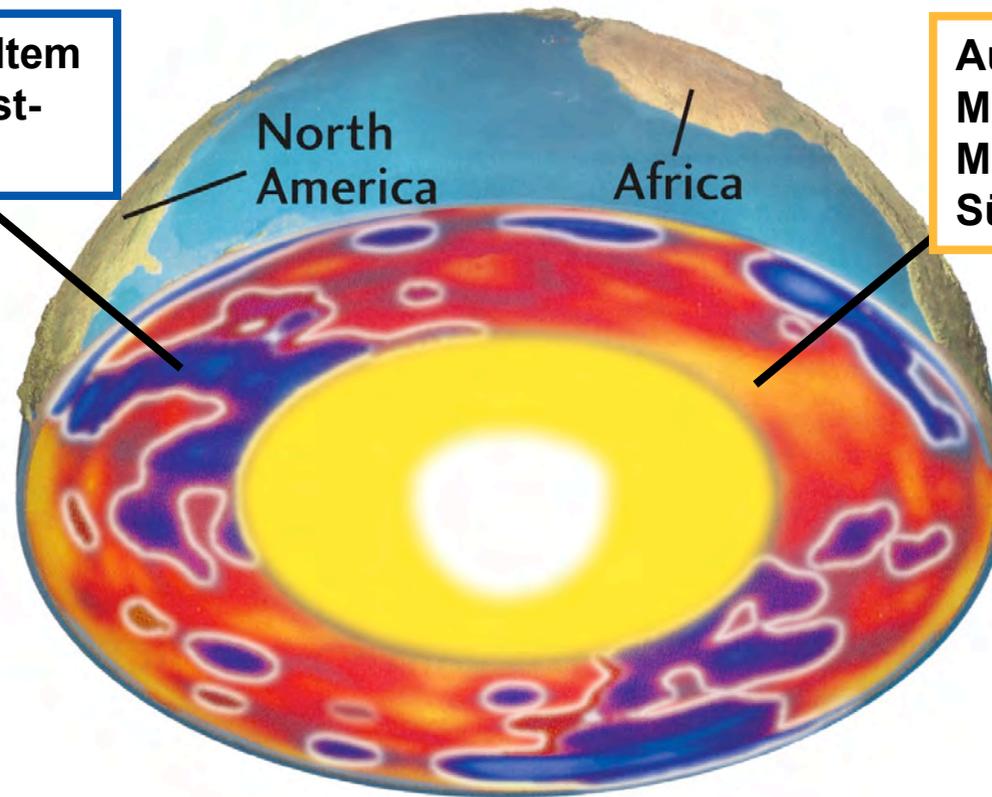
Seismische Tomographie

blau: kaltes Material

gelb: heißes Material

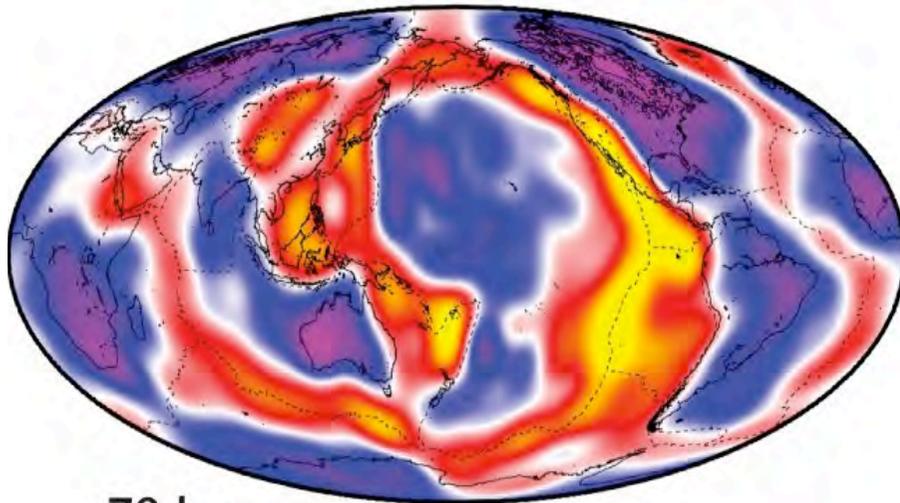
Subduktion von kaltem
Material an der West-
küste der USA

Aufstieg von heißem
Material an der Kern-
Mantel-Grenze unter
Südafrika



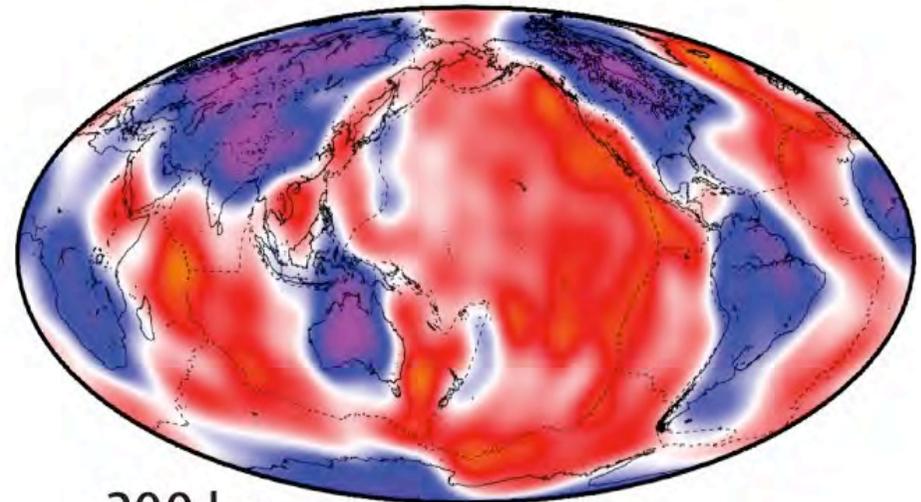
Seismische Tomographie

Schnitte durch den Erdmantel in unterschiedlichen Tiefen



70 km

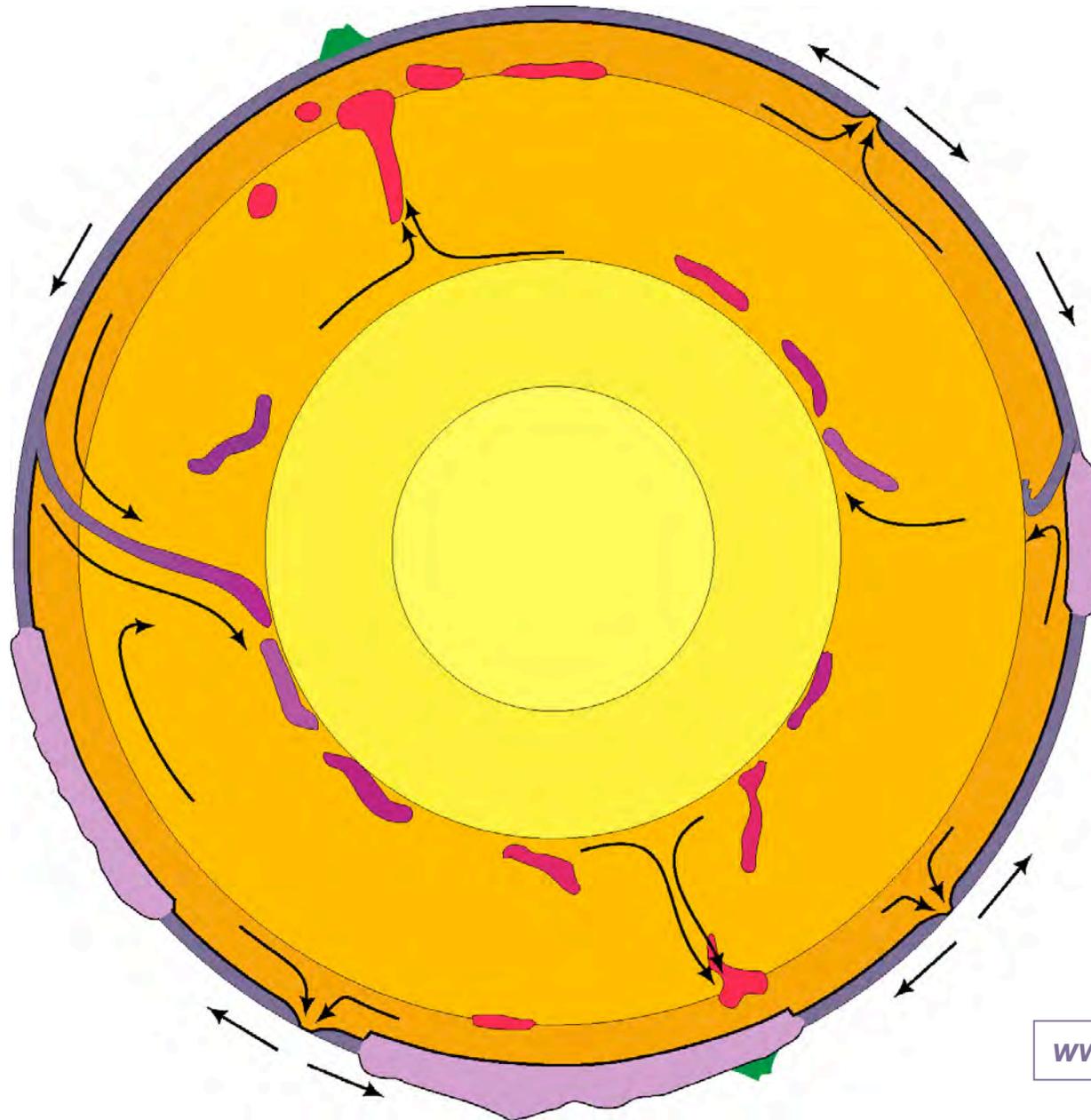
Aufstieg von heißem Asthenosphärenmaterial an mittelozeanischen Rücken



200 km

**Kalte Lithosphäre unter alten Kratonen
Warme Lithosphäre unter Ozeanen**

Schema der Vorgänge im Mantel

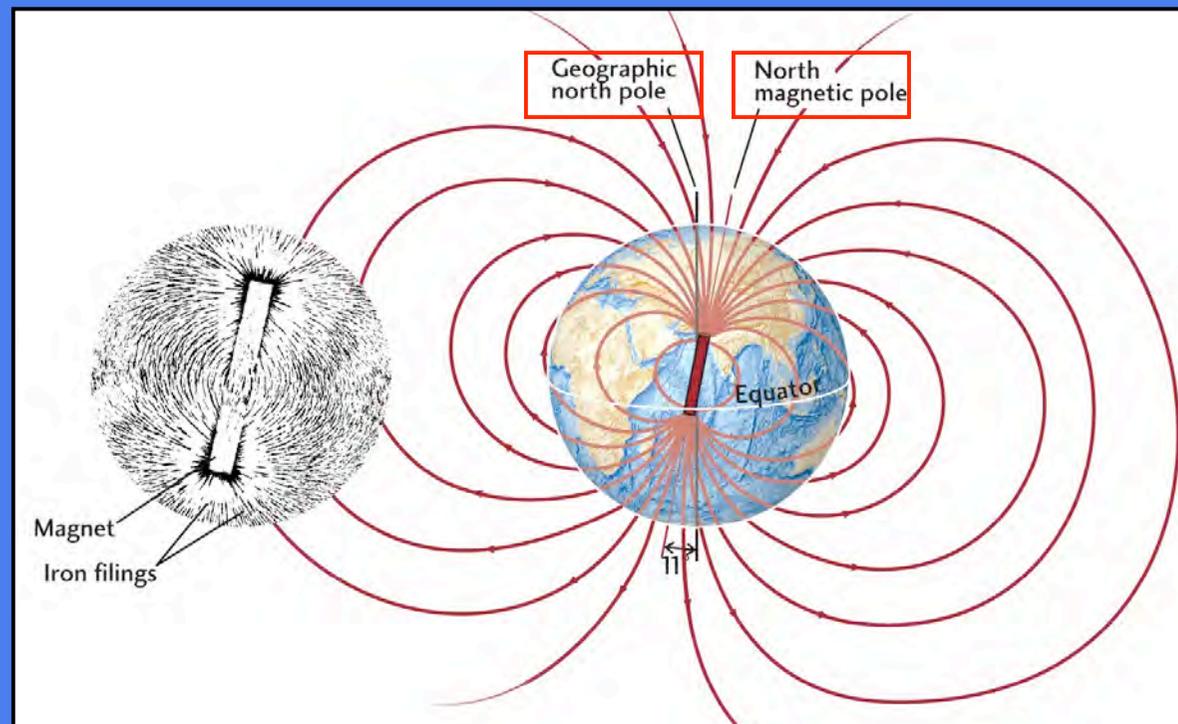


Kennzeichen des Erdmagnetfelds

Deklination: Winkel zwischen magnetisch N und geographisch N
Deklination variiert mit der Position auf der Erdoberfläche!!

Inklination: Winkel zwischen magnetischen Feldlinien und der Horizontalen
Inklination variiert mit der geographischen Breite!!

—> Kompaßnadel orientiert sich parallel zu den magnetischen Feldlinien
Ansicht um 1600: Erde verhält sich wie ein Stabmagnet



Erdmagnetfeld

Modell des Stabmagneten ist falsch:

- bei Temperaturen von 500 - 700 °C wird das Feld von permanenten Magneten zerstört (Curie-Temperatur: nach franz. Physiker Pierre Curie)
—> Temperatur im Erdinneren ist höher als 700°C !
- Erdmagnetfeld verändert sich mit der Zeit
—> Intensität
—> Lage der magnetischen Pole
—> Umpolungen des Erdmagnetfelds

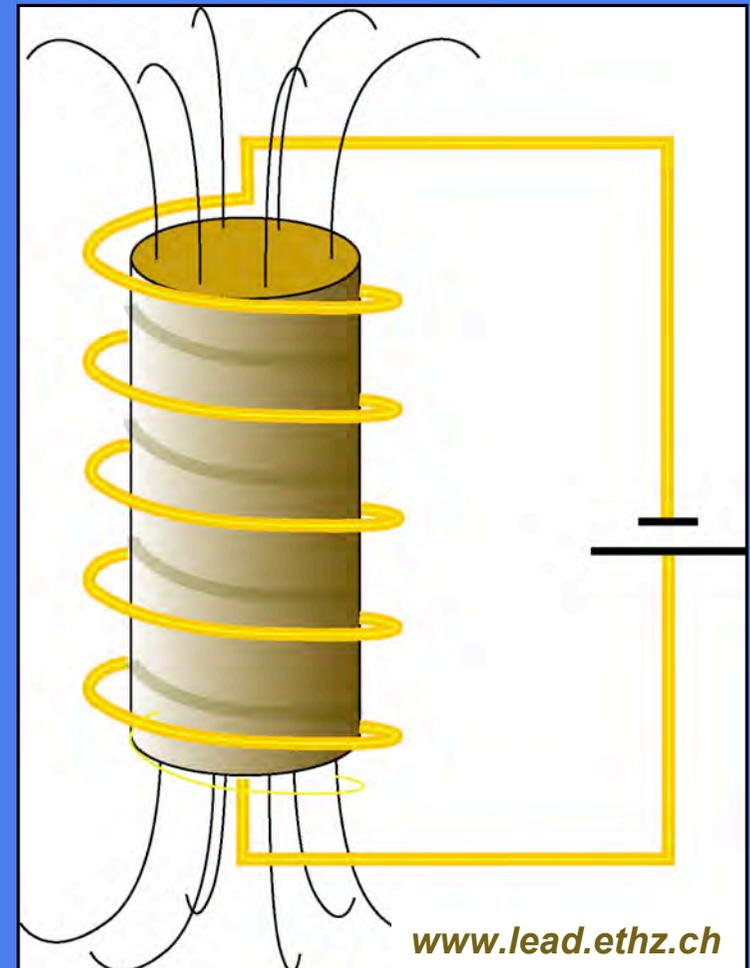
“Dynamo-Modell”

Erklärung für das Erdmagnetfeld:

- Innerer Erdkern ist fest
- Äußerer Kern ist flüssig und konvektiert
- Erzeugung elektrischer Ströme

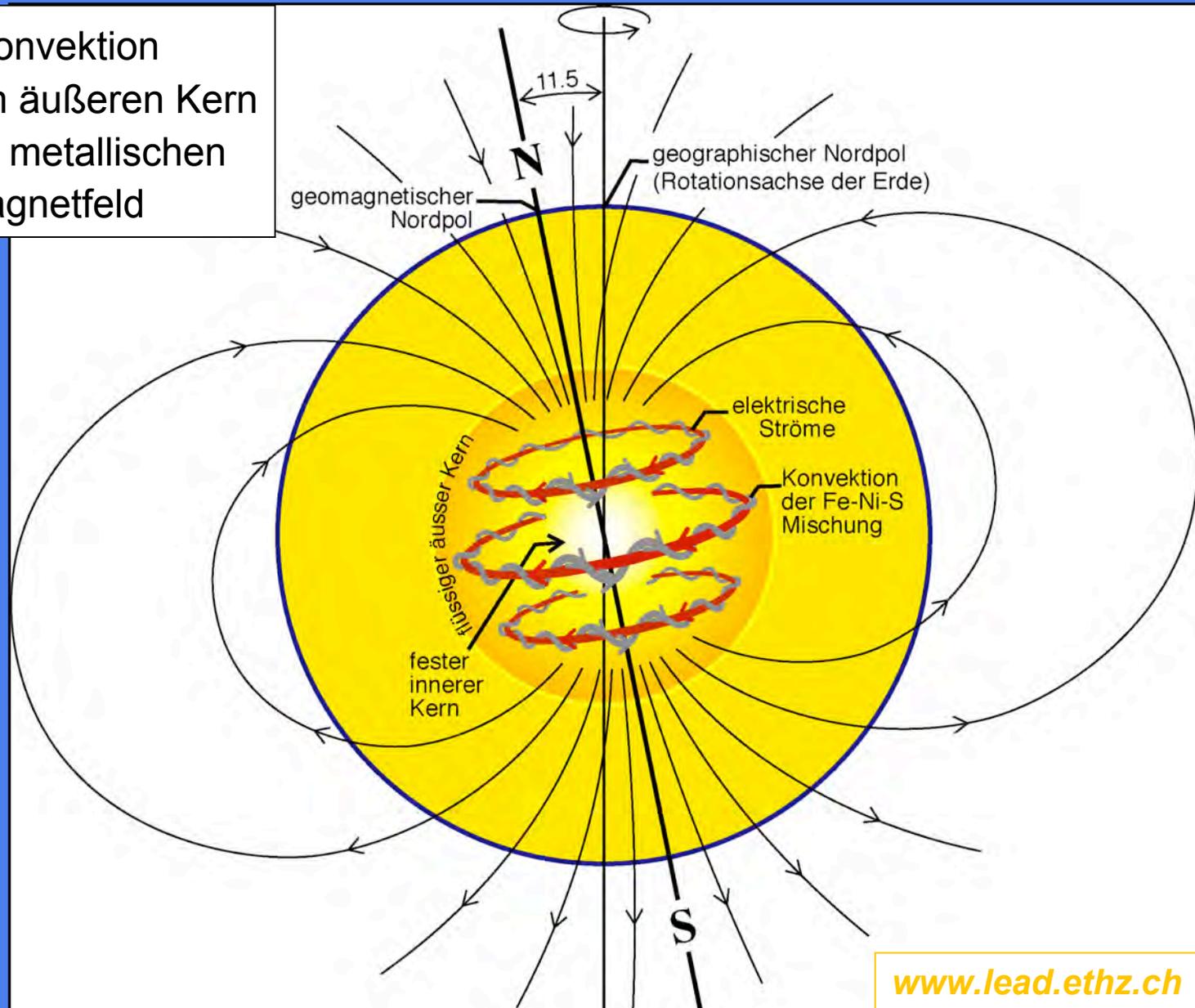
In Spule um Eisenkern fließt Strom

—> Strom erzeugt ein Magnetfeld



Dynamomodell für das Erdmagnetfeld

Geodynamo: Konvektion erzeugt Ströme im äußeren Kern
—> Aufgrund des metallischen Kerns entsteht Magnetfeld



Magnetfeldumkehr und Datierungen

Thermoremanente Magnetisierung:

- > Magnetisierung wird bei Abkühlung "eingefroren"
- > Magnetisierung bleibt über lange Zeiträume erhalten

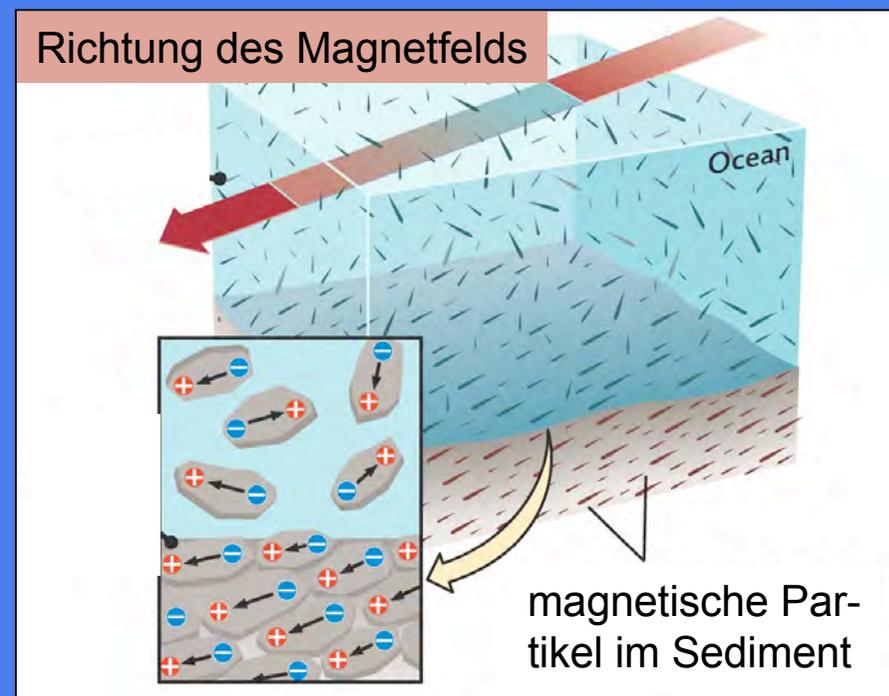
Remanente Magnetisierung in Sedimenten:

- > Magnetische Minerale wie Magnetit (Fe_3O_4) regeln sich bei der Sedimentation im Ozean parallel zu den Magnetfeldlinien ein.

Umkehrungen des Erdmagnetfelds sind "abrupt"

Erstellung von magnetischer Zeitskala

Umpolungen des Magnetfelds sind ein Glücksfall!

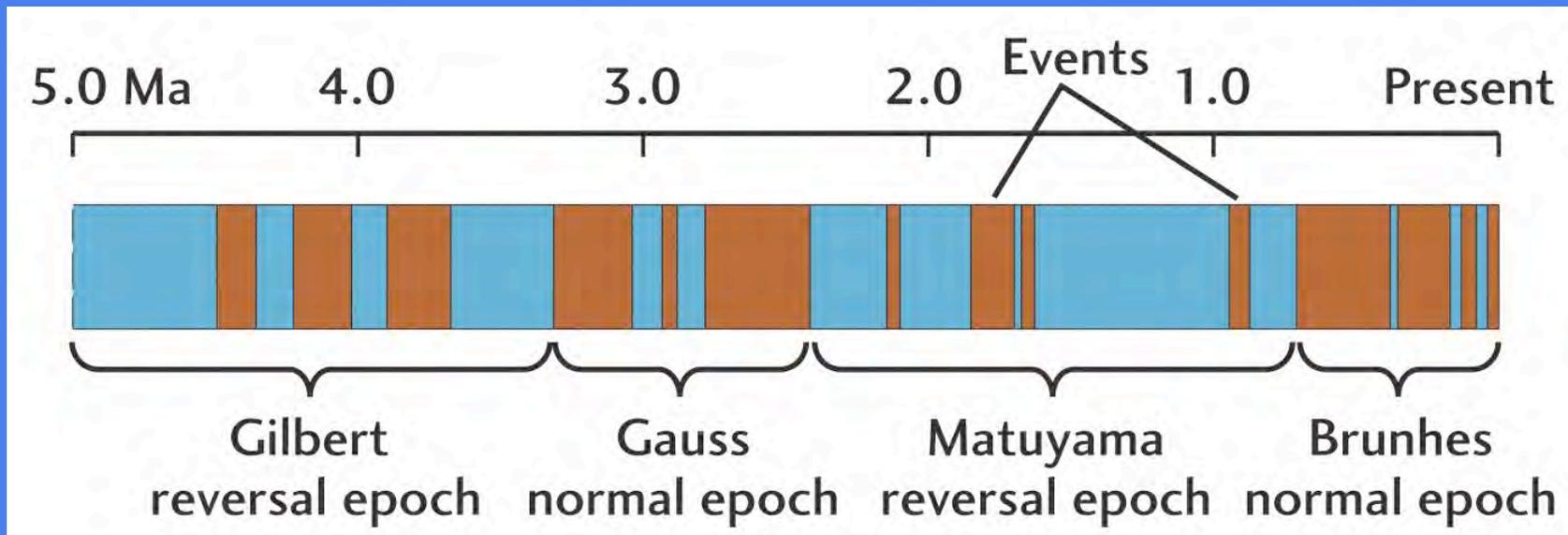


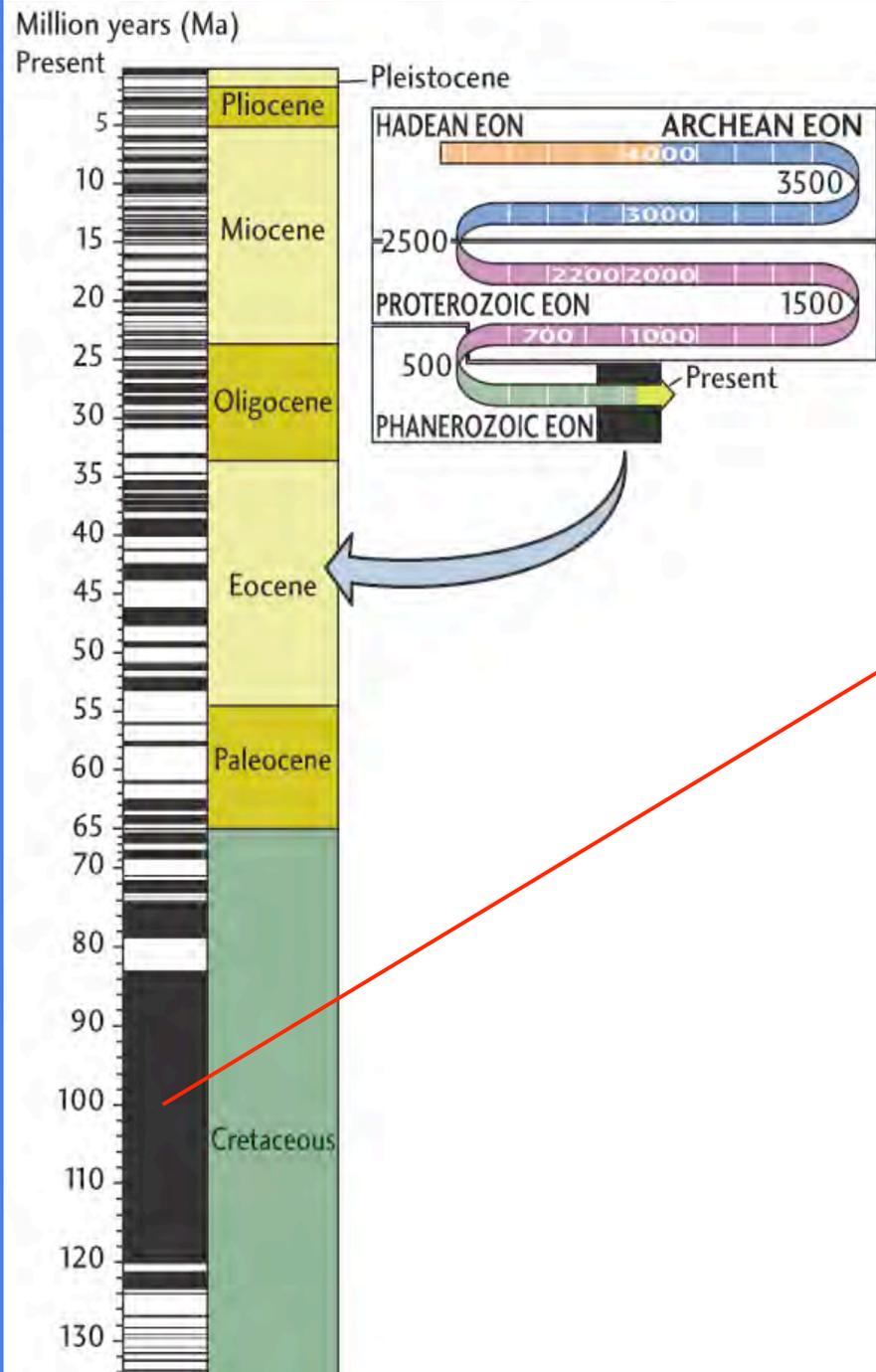
Paläomagnetik

- Wiederholte Umkehrungen des Erdmagnetfelds in der Vergangenheit
- Richtung des Paläo-Magnetfelds ist in der ozeanischen Kruste konserviert
- entscheidender Beitrag zur Entwicklung der Plattentektonik

Magnetische Epochen:

- Zeiträume mit heutiger Polarität = normal
- Zeiträume mit umgekehrter Polarität = invers (*reverse*)





Geomagnetische Zeitskala

**Zeitraum mit guter Auflösung
 —> seit 65 Ma (Tertiär und Quartär)**

**In der Kreide:
 Zeitraum von 40 Ma ohne
 Umkehrungen des Magnetfelds**

Die Form der Erde

Erste Näherung: Kugel (Radius ~6370 km, Umfang ~40000 km)

Genauer: Rotationsellipsoid

Erde ist durch Fliehkräfte, die bei der Rotation entstehen an den Polen abgeplattet

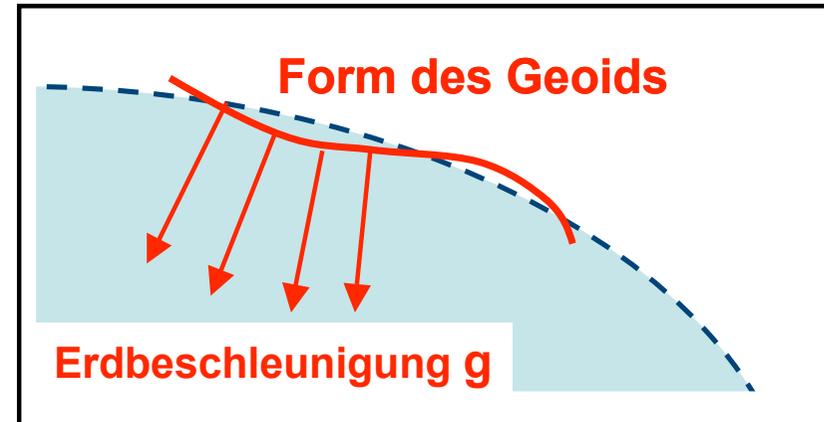
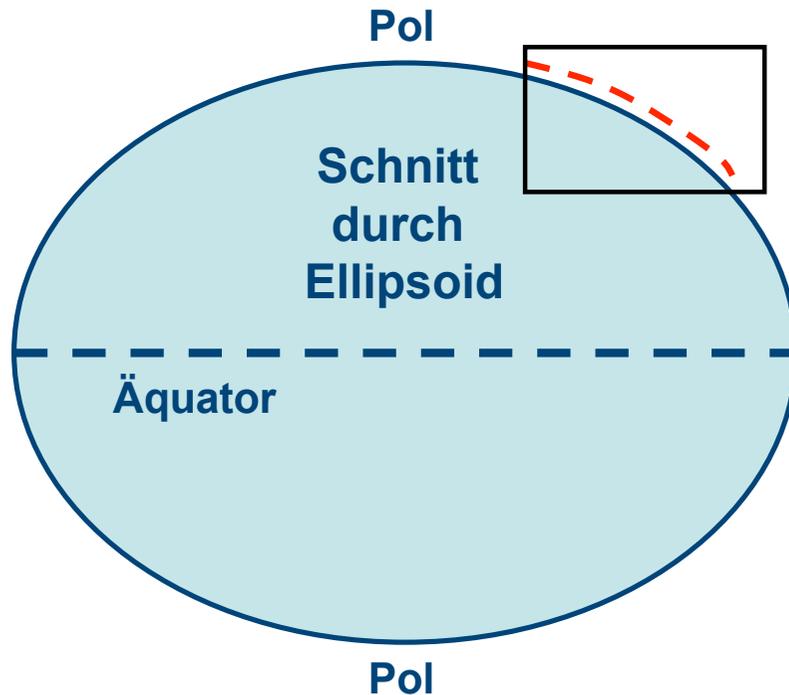
Umfang am Äquator: 40076,6 km
Umfang über die Pole: 40009.2 km } ~67 km oder 0.17 %

Dichteunterschiede in der Kruste verursachen Schwankungen im Gravitationsfeld

—> Unterschiede in der Höhe des Meeresspiegels von etwa ± 100 m

(Nutzung bei Satellitenaltimetrie)

Die Form der Erde

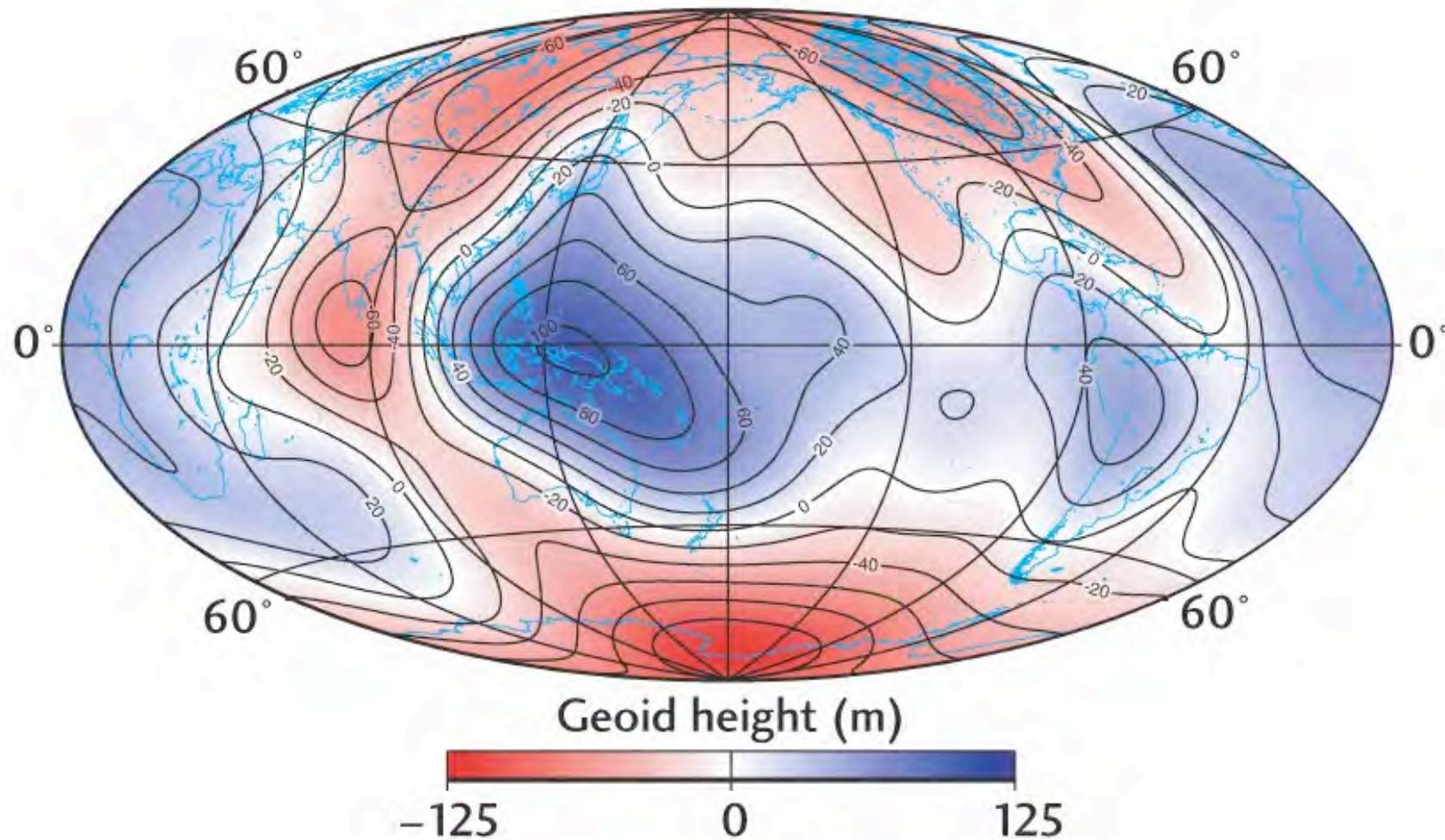


- g steht überall senkrecht zur Oberfläche
- > Wasser fließt nicht in "Täler"
- > Geoid ist Äquipotentialfläche der Schwere

Das Geoid:

Ein perfekt "flacher" Ozean hat eine Oberfläche, die als Geoid bezeichnet wird
—> die Schwerebeschleunigung g steht überall senkrecht auf dieser Oberfläche

Das Geoid



Höchster Bereich: Westpazifik; Tiefster Bereich: Küste der Antarktis

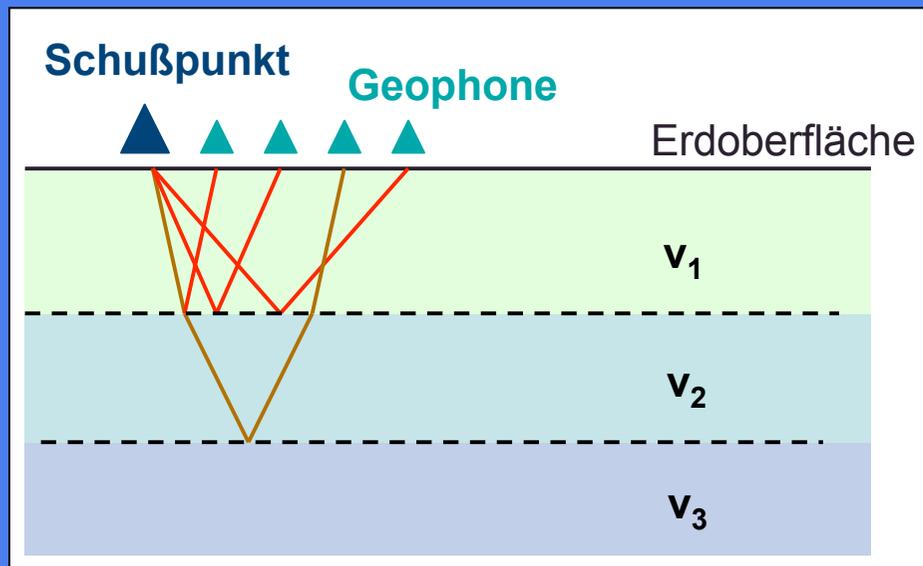
Reflexionseismik

Bisher: Verwendung natürlicher seismischer Wellen zur Erkundung der Erde
—> SEISMOLOGIE

Aktive Erzeugung seismischer Wellen und Aufzeichnung mit Geophonen
—> SEISMIK (Refraktions- und Reflexionsseismik)

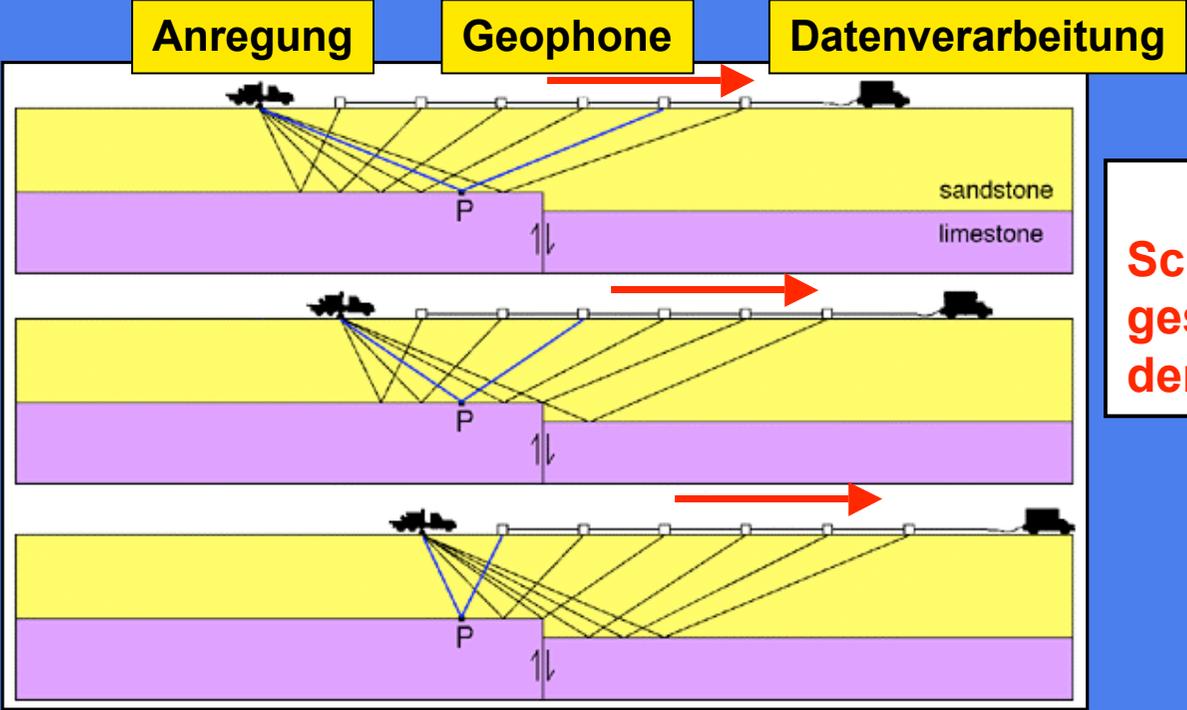
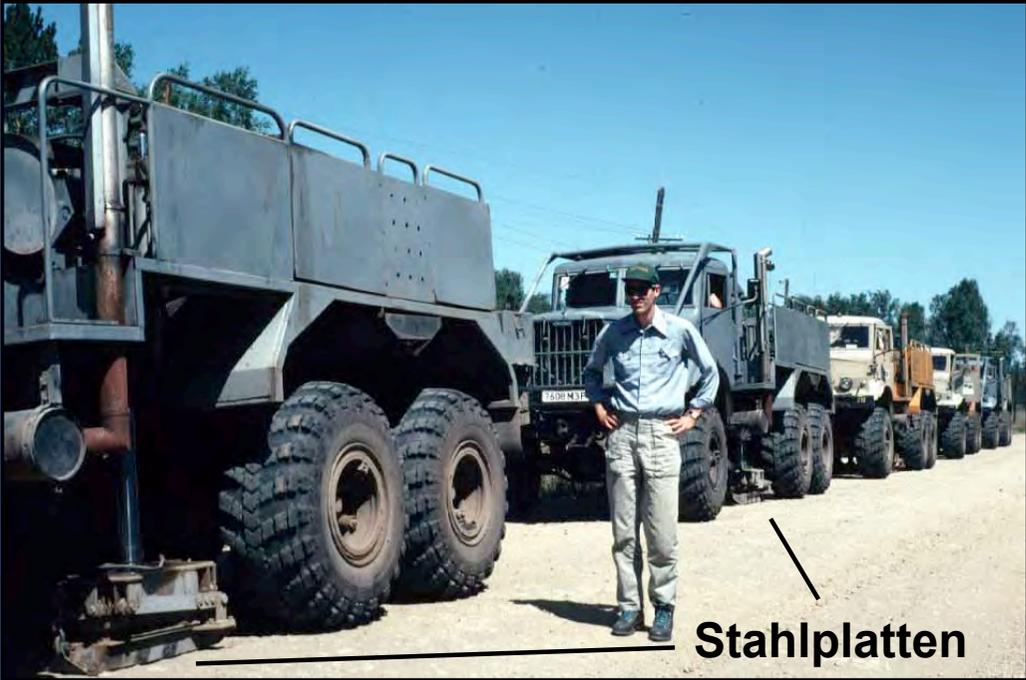
Erzeugung seismischer Wellen durch:

- Sprengungen mit Dynamit
- Vibrationen



Reflexionseismik

Anregung von seismischen Wellen mit vibrierenden Stahlplatten



→
Schrittweise Verschiebung der gesamten Geometrie entlang der seismischen Profillinie

Reflexionseismik

Reflexionen der seismischen Wellen an den Grenzflächen der drei Schichten

Analyse der Laufzeiten der seismischen Wellen
—> Seismische Sektion
(Grenzflächen sind *Reflektoren*)

ERDÖLINDUSTRIE:
Reflexionsseismik
—> Auffinden von Erdöl-
und Erdgaslagerstätten

