

# Zusammenfassung

## **Geophysik-Praktikum**

nach den Praktikumsanleitungen und -versuchen  
der Sektion Geophysik  
des Departments für Geo- und Umweltwissenschaften an der LMU München

Datum: 22.06.2005

von Christoph Moder  
(© 2005)  
<http://www.skriptweb.de>

*Hinweise (z.B. auf Fehler) bitte per eMail an mich: [cm@skriptweb.de](mailto:cm@skriptweb.de) – Vielen Dank.*

## Inhaltsverzeichnis

Geoelektrik.....	3
Eigenpotenzial-Methode.....	4
Vierpunktverfahren nach Wenner und Schlumberger.....	5
Radiometrie.....	6
Gravimetrie.....	7
Torsionswellenkette.....	9
Rheologie.....	10
Paläomagnetismus.....	12
Gesteinsmagnetismus.....	13
Horizontalpendel.....	15
Magnetische Messungen am Observatorium.....	16

## Geoelektrik

- Mit auf Wellen basierenden Verfahren wie Seismik oder Radar kann man gut Grenzschichten erkennen, an denen der jeweilige Wellentyp reflektiert oder gebrochen wird. Die andere Gruppe der Messverfahren untersucht Potentiale, z.B. das Gravitationspotenzial (Gravimetrie), das Magnetfeld, die Erdwärme oder das elektrische Potenzial.
- Ursachen für elektrische Ströme im Erdinneren:
  - elektromotorische Kräfte (EMK; durch chemische oder physikalische Prozesse), gemessen mit der Eigenpotenzial-Methode
  - tellurische Ströme (elektromagnetisch im Untergrund induziert)
  - Störströme aus technischen Anwendungen
- Die Frequenzen der Wechselströme decken einen sehr weiten Bereich ab; die EMK sind dagegen zeitlich praktisch konstant.
- Verallgemeinertes Ohmsches Gesetz:  
$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

## Eigenpotenzial-Methode

- Vor allem in der Umgebung von Erzlagerstätten finden sich Potenzialdifferenzen bis zu 1000 mV.
- Die Potentiale werden dargestellt durch Karten mit Äquipotenziallinien.
- Daraus können Informationen über die Existenz, Verteilung und Streichrichtung von Erzkörpern gewonnen werden.
- Ursachen von Potenzialdifferenzen:
  - Grenzpotenzialdifferenz: An der Grenzfläche zwischen zwei Medien findet Ladungstrennung aufgrund eines Konzentrationsgefälles statt. Die Medien müssen dazu lediglich unterschiedliche Konzentrationen von Ladungsträgern haben – beispielsweise zwei verschiedene Arten von Gesteinen, zwei ungleich konzentrierte Lösungen etc. Bei chemisch unterschiedlichen Medien beobachtet man größere Potenzialdifferenzen, speziell wenn das eine Medium ein Elektronenleiter (Metall) und das andere ein Ionenleiter ist. An der Grenzfläche kommt es zu Elektronen- und Ionendiffusion und damit zu einer Ladungstrennung, wobei sich eine elektrische Doppelschicht ausbildet.
  - Elektrokinetische Potenzialdifferenzen: Hier gibt es eine Grenzfläche zwischen einer festen und einer flüssigen Phase; die Oberfläche der festen Phase kann Ladungsträger der Flüssigkeit festhalten, durch die Bewegung der Flüssigkeit kommt es dann zu einer Ladungstrennung. Wenn Wasser durch Gestein sickert, spricht man von Elektrofiltration.
- Besonders günstige Voraussetzungen existieren in Bohrlöchern; hier wird der Stromkreis der eingepprägten Spannungen durch die Spülung geschlossen, außerdem kommt es zu elektrokinetischen Spannungen, wenn die Spülung in das Gestein oder umgekehrt Gesteinsfeuchtigkeit in die Spülung dringt.
- In der Explorationsgeophysik spricht man bei den Grenzpotenzialen bestimmter Lagerstätten von Mineralisationspotenzialen, bei allen anderen Grenzpotenzialen von Störpotenzialen. Letztere können sowohl Konzentrationspotenziale von Bodenwässern unterschiedlicher Konzentration als auch Strömungspotenziale beim Bewegen von Bodenwässern sein. Mineralisationspotenziale sind fast immer negativ; die ausgeprägtesten Potentiale findet man bei Pyrit und Pyrrhotit, außerdem bei Kupferkies, Kupferglanz, Kupferindig und Graphit (alles Elektronenleiter).
- Zu besonders starken Mineralisationspotenzialen kommt es, wenn der Erzkörper im Bereich des Grundwasserspiegels liegt, so dass es im Bereich darüber (Verwitterungszone) zu Oxidation kommt (Oxidationszone: eiserner Hut, Oxide, Hydroxide, Karbonate, Sulfate, Phosphate), im Bereich darunter zu Reduktion; dort ist das Wasser basisch, während es in der Oxidationszone sauer ist.
- Weil die Grenzpotenziale zwischen Metall und Elektrolyt größer sind als zwischen zwei unterschiedlichen Elektrolyten, darf man zur Messung nicht einfach Metallelektroden verwenden, sondern muss „unpolarisierbare Elektroden“ verwenden, welche aus einem Metallstab in einer gesättigten Lösung (damit die Konzentration konstant bleibt) eines seiner Salze innerhalb eines semipermeablen Gefäßes besteht.

## Vierpunktverfahren nach Wenner und Schlumberger

- Es gibt folgende Leitungsmechanismen im Gestein: Elektronenleitung, Ionenleitung und Halbleitung.
- In der oberen Kruste wird die Stromleitung durch Ionenleitung in den Porenwässern bestimmt; die Gesteinsmatrix selbst trägt praktisch nichts zur Leitfähigkeit bei.
- Mit zunehmender Tiefe nimmt die Klüftigkeit und damit die Ionenleitung ab; aber auch in (partiell) aufgeschmolzenen Gesteinen funktioniert die Stromleitung durch Ionen.
- Erst in großer Tiefe und damit großer Hitze dominiert die Halbleitung. Besonders stark nimmt der Widerstand zwischen 400 km und 1000 km Tiefe ab, vermutlich wegen des Phasenübergangs von Olivin.
- Bei Erzlagerstätten (besonders Schwermetallsulfide und Graphit) dominiert die Elektronenleitung.
- Um die Leitfähigkeit von Gestein zu messen, gibt es die Verfahren nach der Vierpunktmethode, d.h. über zwei Elektroden wird Strom durch das Gestein geschickt und durch zwei weitere Elektroden (Sonden) wird die Spannung gemessen, woraus nach dem Ohmschen Gesetz der Widerstand bzw. die Leitfähigkeit berechnet werden kann. Es gibt u.a. die Verfahren nach Wenner und nach Schlumberger; bei beiden sind die Elektroden in einer Linie angeordnet.
- Wenner: Alle vier Elektroden haben den gleichen Abstand voneinander – das macht die Berechnungsformel einfacher und liefert höhere Spannungen als das Schlumberger-Verfahren, ist aber nicht so einfach in der Handhabung, weil der Abstand des inneren Elektrodenpaars (Sensoren) auch immer verändert werden muss.
- Schlumberger: Der Abstand der Sonden voneinander ist klein gegenüber ihrem Abstand von den Elektroden. Damit ergeben sich geringere Spannungen, aber die Handhabung ist einfacher, da der Abstand der Sonden konstant bleibt.
- Für den Strom durch ein kugelförmiges Volumen gilt:

$$I = 4 \pi r^2 j(r)$$

$$\text{mit } \vec{j} = -\sigma \cdot \vec{\nabla} U; \quad \nabla U = -\sigma \cdot \partial U / \partial r$$

$$\frac{\partial U(r)}{\partial r} = -\frac{1}{4 \pi \sigma} \frac{1}{r^2} \quad \text{bzw.} \quad U(r) = \frac{I}{4 \pi \sigma} \frac{1}{r} + C.$$

- Gemessen wird eine Potenzialdifferenz zwischen zwei Punkten, d.h. man hat zwei verschiedene Entfernungen zur Feldquelle. Des Weiteren wird das Feld von zwei Elektroden verursacht, wodurch man bereits mit vier Entfernungen rechnen muss. Außerdem wirkt die Erdoberfläche als elektrische Grenzfläche, die man mit der Methode der Spiegelladungen berechnen kann – diese virtuellen Ladungen verdoppeln die Anzahl der Feldquellen nochmals (wobei man den Abstand der Spiegelladungspaare normalerweise vernachlässigen kann, weil sich die Elektroden sehr dicht an der Erdoberfläche befinden):

$$\Delta U_{12} = U(S_2) - U(S_1) = \frac{I}{4 \pi \sigma} \left[ \left( \frac{1}{r_{2+}} + \frac{1}{r'_{2+}} - \frac{1}{r_{2-}} - \frac{1}{r'_{2-}} \right) - \left( \frac{1}{r_{1+}} + \frac{1}{r'_{1+}} - \frac{1}{r_{1-}} - \frac{1}{r'_{1-}} \right) \right]$$

## **Radiometrie**

- Die häufigsten radioaktiven Elemente in natürlichem Gestein sind U-238, U-235, Th-232, K-40 sowie deren Zerfallsprodukte.
- Durch Messung der Gammastrahlung kann man auf die verursachenden Elemente schließen, weil die Kernanregungsenergie (die die Wellenlänge der Gammaquanten bestimmt) kernspezifisch ist.
- Kalium-Argon-Methode zur Altersbestimmung: K-40 zerfällt zu gasförmigem Argon; da sich dieses bei der Gesteinsentstehung bei den dort herrschenden Temperaturen verflüchtigt, ist sämtliches Argon in einem Gestein durch radioaktiven Zerfall seit seiner Entstehung gebildet worden.
- Szintillationszähler: Ein Gammaquant erzeugt durch Fotoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung schnelle Elektronen, die stark ionisieren und damit weitere Elektronen aus dem Kristallverbund reißen. Bei jeder Rekombination entstehen Photonen, welche in einem Photomultiplier Sekundärelektronen durch Fotoeffekt freisetzen. Die dortige Hochspannung beschleunigt diese Elektronen, so dass diese weiter ionisieren können und somit eine Elektronenlawine erzeugen. Nicht die kinetische Energie, sondern die Anzahl der Sekundärelektronen ist ein Maß für die Gamma-Energie; ein Fensterdiskriminator ordnet alle Elektronen innerhalb eines Zeitfensters einem gemeinsamen Zerfall zu. Die durchschnittliche Zeit, die sich der Detektor innerhalb eines solchen Zeitfensters befindet, heißt Totzeit, da er während dessen keinen weiteren Zerfall erkennen kann.

## Gravimetrie

- Erdbeschleunigung:

$$g = G \frac{M_E}{R_E^2} \approx 9,81 \text{ m s}^{-2}$$

$$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

- cgs-Einheiten:

$$1 \text{ mgal} = 10^{-5} \text{ m s}^{-2} \text{ (benannt nach Galilei)}$$

$$1 \text{ GU} = 0,1 \text{ mgal} \text{ (GU = gravity unit)}$$

- internationale Schwereformel:

$$g = g_{\ddot{A}q} (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2 \varphi)$$

$$g_{\ddot{A}q} = 9,780327 \text{ m s}^{-2}$$

- Die Gezeiten führen zu Schwereänderungen im Bereich von einigen Zehntel mgal.

- Schweregradient:

$$\frac{dg}{dx} = 0,8123 \sin 2 \varphi$$

- Da die Schwere-Anomalien viel kleiner als das Gesamtschwerefeld sind, ändert sich die Richtung des Schwerevektors näherungsweise nicht, und man kann mit seiner Vertikalkomponente rechnen.

- Gravitationspotenzial: Weg-Integral über die Erdbeschleunigung

Komponenten des Störvektors: Weg-Ableitungen des Gravitationspotenzials in die verschiedenen Richtungen.

- Gravimeter verwenden eine Nulllängenfeder. Während bei einer normalen Hookschen Feder die Längenänderung proportional zur Kraft ist, ist bei der Nulllängenfeder sogar die Gesamtlänge (in einem gewissen Bereich) proportional zur Kraft, d.h. bei keiner Zugkraft hätte die Feder die extrapolierte Länge Null. Technisch wird das erreicht durch eine Vorspannung des Federdrahtes beim Wickeln.

Eine Quasi-Nulllängenfeder hat bei keiner angreifenden Kraft eine extrapolierte Länge, welche sehr gering, aber nicht Null ist (jedoch klein gegenüber der Länge der angespannten Feder).

- Ein Gravimeter besteht aus einer Masse an einem Hebel, welche durch eine Quasi-Nulllängenfeder gehalten wird. Die Drehmomente der Schwerkraft und der Federkraft sind entgegengesetzt gleich, d.h. bei einer idealen Nulllängenfeder bliebe der Hebel in allen Stellungen stehen (indifferent) bzw. ließe sich durch eine beliebig kleine Kraft beliebig weit auslenken; bei einer Quasi-Nulllängenfeder ist die Federkraft bei Auslenkung des Hebels sehr gering.

- Zudem ist ein Gravimeter astasiert, d.h. die Feder wird schräg (ca. 45°) am Hebel befestigt, wodurch das Verhältnis zwischen Kraft am Hebel und Kraft an der Feder nichtlinear wird – die Feder wird empfindlicher, auf Kosten der Stabilität der Nulllage.

- Wenn sich die Erdbeschleunigung ändert, führt das zu einem Drehmoment auf den Hebel, welches umso größer ist, je kleiner die Nullkraft-Länge der Quasi-Nulllängenfeder ist (d.h. je näher sie an einer idealen Nulllängenfeder ist). Durch Veränderung des oberen Aufhängungspunktes der Feder bringt man den Hebel wieder in seine ursprüngliche Lage zurück; innerhalb des Messbereichs ist dabei die Positionsänderung proportional zur Schwereänderung. Diese wird gemessen mit einem kapazitiven Wegmesser; dort wird der Plattenabstand eines Kondensators verändert, welcher sich in einem Schwingkreis befindet. Induktiv angekoppelt wird der Schwingkreis mit Strom versorgt und der Stromfluss gemessen,

wodurch ermittelt werden kann, wann der Schwingkreis in Resonanz ist.

- Die Messgenauigkeit eines Gravimeters beträgt ca. 0,01 mgal, womit man Höhenänderungen ab 3 cm messen kann.
- Man modelliert Störkörper und vergleicht sie mit den gemessenen Störfeldern. Zweidimensionale Störkörper (d.h. in eine Richtung haben sie unendliche Ausdehnung) dienen zur Simulation von Anomalien mit ausgeprägter Streichrichtung. Eine horizontale Stange mit unendlicher Länge hat das gleiche Störfeld wie ein horizontaler Zylinder mit radialer Ausdehnung und ebenfalls unendlicher Länge. Allgemein kann man zweidimensionale Störungen (z.B. Verwerfungen, Horst- und Grabenstrukturen oder Gang-Intrusionen) durch polygonale Querschnitte annähern, d.h. durch Addition und Subtraktion der Störfelder horizontaler Platten berechnen. Zweieinhalbdimensionale Störkörper haben in Streichrichtung eine endliche Ausdehnung.



## **Torsionswellenkette**

- Obwohl die Masse praktisch in den Atomkernen konzentriert ist und die Verformung von Körpern durch den Raum zwischen den Atomen aufgebracht wird, nimmt man in der Elastomechanik an, dass Massenträgheit und elastische Verformbarkeit gleichmäßig verteilt sind.
- An Grenzflächen zwischen verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten muss die Welle stetig durchlaufen können, d.h. Geschwindigkeit und elastische Spannungen müssen stetig sein. Wären die Geschwindigkeiten parallel zur Grenzfläche ungleich, müssten die Medien aneinander gleiten; wären die Geschwindigkeiten senkrecht zur Grenzfläche ungleich, müssten die beiden Medien ineinander eindringen und sich dann wieder voneinander lösen.
- Wellenwiderstand (Impedanz):  $Z = \rho \cdot v$
- Reflexions- und Transmissionskoeffizienten werden aus dem Amplitudenverhältnis der Welle vor und nach der Grenzfläche berechnet; diese Koeffizienten können auch größer als 1 sein, d.h. die Amplitude kann nach der Grenzfläche größer als vorher sein. Möglich ist das, weil nur die Leistung erhalten bleiben muss (welche auch vom Wellenwiderstand abhängt), nicht aber die Amplitude.

## Rheologie

- Die Verformung von Körpern wird nicht nur von der Größe der einwirkenden Kraft, sondern auch von der Geschwindigkeit der Belastung und der Dauer bestimmt. Beispiel Teer: bei kurzzeitigen Belastungen bricht er, aber in längeren Zeiträumen fließt er.
- Eine Spannung ist Kraft pro Fläche. Wirkt sie senkrecht zur Fläche (Normalspannung), führt sie zu Längenänderung; wirkt sie in Richtung der Fläche (Tangential- oder Schubspannung), führt das zu Winkeländerung. Jede Spannung kann man in diese Komponenten zerlegen.
- Es gibt folgende einfache rheologische Modellkörper:
  - Hookescher Körper: elastische Verformung, die Längenänderung ist proportional zur Spannung, sie erfolgt instantan und ist reversibel. Beispiel: Schraubenfeder
  - Newtonscher Körper: viskose Verformung, die Längenänderung ist abhängig von der Spannung und von der Dauer der Belastung, sie erfolgt also nicht sofort, und sie ist nicht reversibel. Beispiel: Kolben in einem flüssigkeitsgefüllten Zylinder.
  - Saint-Venant-Körper: Reibung; die Längenänderung beginnt, wenn die Haftreibungsgrenze überschritten ist, und ist abhängig von der Spannung und der Geschwindigkeit (je höher die Geschwindigkeit, desto größer die Gleitreibung), d.h. sie erfolgt instantan und ist nicht reversibel. Beispiel: Klotz, der über einen rauen Untergrund gezogen wird.
- Aus diesen Modellen kann man weitere Körper kombinieren; wenn man sie parallel anordnet, ist die Gesamtspannung die Summe der Einzelspannungen; wenn man sie in Reihe anordnet, ist die Gesamtverformung die Summe der Einzelverformungen.
  - Maxwell-Körper: Hooke- und Newton-Körper in Reihe angeordnet; bei schnellen Belastungsänderungen reagiert er wie ein Hooke-Körper (zuerst sofortige elastische Dehnung, dann Übergangskriechen = transient creep = elastische Nachwirkung), bei langsamen wie ein Newton-Körper (steady state creep). Dieser Körper beschreibt die Eigenschaften von Gestein im Erdinneren am besten.
  - Kelvin-Körper: Hooke- und Newton-Körper parallel angeordnet; er reagiert bei langsamen Belastungsänderungen wie ein Hookescher Körper, bei schnellen Belastungsänderungen werden die Bewegungen unter Energieabsorption gedämpft, und die Verformung ist reversibel (allerdings nur langsam).
  - Bingham-Körper: Newton- und Saint-Venant-Körper parallel angeordnet; oberhalb der Haftreibungsgrenze verhält er sich wie ein Newtonscher Körper.
  - Burgers-Körper: Maxwell- und Kelvin-Körper in Reihe angeordnet
- Hookesche Körper kann man mit folgenden Eigenschaften charakterisieren:
  - Kompressionsmodul: Proportionalitätsfaktor zwischen allseitig wirkendem (hydrostatischem) Druck und Volumenänderung.
 
$$p = -K \cdot \frac{\Delta V}{V}$$
  - Elastizitätsmodul: Proportionalitätsfaktor zwischen einseitig wirkender Normalspannung und Längenänderung.
 
$$\tau = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$
  - Schubmodul/Schermodul: Proportionalitätsfaktor zwischen einseitig wirkender Tangentialspannung und Winkeländerung.
 
$$\tau = G \cdot \gamma$$

- Poissonzahl: Verhältnis zwischen Quer- und Längenänderung; bei Flüssigkeiten immer 0,5, bei Festkörpern meist kleiner.

$$\sigma = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l}$$

- Zwischen den Elastizitätskonstanten gibt es folgende Zusammenhänge:

$$K = \frac{EG}{3(3G-E)} = \frac{E}{3(1-2\sigma)} = G \frac{2(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)}$$

$$G = \frac{E}{1(1+\sigma)}$$

- Bernoullische Hypothese: Bei Scherung ändert sich der Querschnitt nicht.
- Dehnungsmessstreifen bestehen aus dünnen Metallstreifen, die parallel zur Dehnungsrichtung angeordnet sind und die elektrisch in Reihe geschaltet sind. Bei Dehnung werden sie in der Länge gedehnt, wodurch sich ihre Breiten verringern, dies erhöht den elektrischen Widerstand. Dieser ist proportional zur Dehnung. Zur Temperaturkompensation verwendet man zwei Dehnungsmessstreifen an gegenüber liegenden Stellen (d.h. wenn der eine gedehnt wird, wird der andere gestaucht) und verschaltet sie in einer Wheatstone-Brücke, wodurch sich ihre Messwerte addieren, Temperaturänderungen aber herausfallen (da sie auf beide Streifen gleich wirken).

## Paläomagnetismus

- Die Richtung der Magnetisierung wird mit zwei Winkeln beschrieben: Die Deklination zählt ausgehend von geographisch Nord im Uhrzeigersinn zur Richtung der Horizontalkomponente der Magnetisierung, die Inklination zählt von der Horizontalkomponente der Magnetisierung nach unten (positiv) bzw. nach oben (negativ).
- Gemessen wird die Magnetisierung z.B. mit Förstersonden (Fluxgate-Magnetometer), bei schwacher Magnetisierung (z.B. Sedimente) auch mit Kryogen-Magnetometern.
- Bei den Magnetometern unterscheidet man vektoriell messende Magnetometer, die nur die Feldstärke in eine Richtung messen, und skalare Magnetometer, die den Gesamtbetrag des Feldes messen (unabhängig von dessen Richtung).
- Störfelder lassen sich bei vektoriellen Magnetometern eliminieren, indem man Probe und Magnetometer um  $180^\circ$  dreht und die Messung wiederholt.
- Entmagnetisierung kann durch Hitze oder durch ein magnetisches Wechselfeld (bei dem die Hystereseschleife immer wieder durchlaufen wird, mit abnehmender Feldstärke) erfolgen.
- In einem Gestein gibt es verschiedene magnetische Minerale, welche nicht gleichzeitig entstanden sein müssen und die unterschiedliche Curie-Temperaturen haben. Da die Prozesse zur Entstehung der Minerale bekannt sind, weiß man, in welcher Reihenfolge sie entstanden sind; durch Entmagnetisierung des Gesteins kann man die unterschiedlichen Magnetisierungen nacheinander löschen und somit messen, welches Mineral welche Magnetisierungsrichtung trägt. Daraus ergibt sich, welchen Magnetfeldern das Gestein im Laufe der Zeit ausgesetzt war. Die Magnetisierungsrichtungen werden in einem Vektordiagramm oder in einem Schmidtschen Netz eingezeichnet.
- Aus der Inklination der Magnetisierung eines Gesteins ergibt sich dessen Paläo-Breite, aus der Deklination die ursprüngliche Rotation:  $\tan I = 2 \cdot \tan \varphi$
- Königsbergerfaktor  $Q = M_r / M_i$  : Verhältnis der remanenten und der induzierten Magnetisierung.

## Gesteinsmagnetismus

- Zusammenhang zwischen induzierter Magnetisierung und externem Magnetfeld:

$$\vec{M}_I = \frac{1}{\mu_0} \chi \vec{B}$$

- Die gesamte Magnetisierung ist die Summe aus remanenter und induzierter Magnetisierung.
- Arten von Magnetismus:
  - Minerale ohne permanentes magnetisches Moment sind diamagnetisch. Die Suszeptibilität ist negativ (d.h. durch das äußere Feld wird eine entgegengesetzte Magnetisierung induziert) und von der Temperatur unabhängig. Weil es in an sich diamagnetischen Mineralen immer eine gewisse Menge von Eisen- und Mangan-Ionen gibt, erscheinen viele theoretisch diamagnetische Minerale in der Praxis paramagnetisch.  
Beispiele für diamagnetische Minerale: Quarz, Calcit
  - Minerale mit permanentem magnetischen Moment sind paramagnetisch; die Ausrichtung der magnetischen Bestandteile wird dabei von der Molekülbewegung bei hoher Temperatur behindert, d.h. die Suszeptibilität sinkt nach dem Curie-Gesetz mit der Temperatur:
 
$$\chi = \frac{C}{T}$$
 Beispiele für paramagnetische Minerale: Olivin, Orthopyroxen, Klinopyroxen, Fe-Granat, Amphibol, Biotit
  - Minerale mit einer remanenten Magnetisierung sind ferrimagnetisch, ferromagnetisch oder antiferromagnetisch; oberhalb der Curie-Temperatur verschwindet die remanente Magnetisierung, und die Minerale werden paramagnetisch. In ferrimagnetischen Stoffen gibt es zwei unterschiedliche Komponenten remanenter Magnetisierung, die von der Richtung entgegengesetzt sind, aber vom Betrag ungleich sind. In antiferromagnetischen Stoffen ist es ebenso, aber die remanenten Magnetisierungen kompensieren sich zu Null.  
Beispiele für ferrimagnetische Minerale: Fe-Ti-Oxide wie Titanomagnetite (zwischen Magnetit und Ulvöspinell), Ilmenit-Hämatit-Mischreihe (zwischen Ilmenit und Hämatit), Titanomaghemite (entstehen durch Tieftemperatur-Oxidation der Titanomagnetite); Eisen-Sulfide wie Pyrrhotin, Greigit und Smythit; Eisenhydroxide wie Goethit;
- Magnetische Bereichsstruktur:
  - Einbereichsteilchen (SD = single domain) sind so klein, dass sich dort nur ein Bereich mit einheitlicher Magnetisierung ausbilden kann.
  - In Mehrbereichsteilchen (MD = multi domain) gibt es mehrere Bereiche unterschiedlicher Magnetisierung (Weißsche Bezirke), getrennt durch die Bloch-Wände. Zwischen den Bereichen ändert sich die Magnetisierungsrichtung nicht schlagartig, sondern es gibt einen kleinen Übergangsbereich.
  - Teilchen im Übergangsbereich zwischen SD und MD heißen Pseudo-Einbereichsteilchen (PSD, pseudo single domain).
  - Teilchen, die kleiner als SD-Teilchen sind, heißen superparamagnetische Teilchen (SP); sie können aufgrund thermischer Instabilität keine Remanenz tragen.
- Hystereseschleife:
  - Koerzitivkraft: Feldstärke des äußeren Felds, bei der die (remanente) Magnetisierung Null erreicht.

- (Sättigungs-)Remanenz: Magnetisierung, die nach dem Abschalten des äußeren Feldes übrig bleibt.
- Sättigungsmagnetisierung: Aus dem Sättigungsbereich extrapolierte Magnetisierung, die bei der Feldstärke Null herrschen würde. Die Steigung der Sättigungsmagnetisierungsgerade ergibt die paramagnetische Suszeptibilität des Materials.
- Remanenz-Koerzitivkraft: Das Magnetfeld, welches nötig ist, um eine vorhandene Remanenz vollständig zu zerstören; sie ist größer als die in der Hystereseschleife gemessene Koerzitivkraft.
- Die magnetische Bereichsstruktur kann durch die Verhältnisse von Remanenz-Koerzitivkraft zu Koerzitivkraft und von Sättigungsremanenz zu Sättigungsmagnetisierung ermittelt werden.

## **Horizontalpendel**

- Bei einem Horizontalpendel bewirken kleine Änderungen in der Neigung der Drehachse große Änderungen der Ruhelage (wenn die Neigung senkrecht zur vorhandenen Achsenneigung erfolgt) und der Schwingungsdauer (wenn die vorhandene Achsenneigung vergrößert/verkleinert wird). Damit ist man in der Lage, sehr kleine Winkel zu messen (d.h. entweder statisch durch Messung der Ruhelage oder schwingend durch Messung der Periodendauer). Dies wird beispielsweise bei der Messung der Verformung der Erdoberfläche durch Gezeiteneinflüsse benutzt.
- Auch wenn ein Pendel mit sehr niedriger Resonanzfrequenz benötigt wird (z.B. für Horizontalseismometer), bietet sich ein Horizontalpendel an, weil ein Vertikalpendel für die gleiche Frequenz extrem lang sein müsste.

## **Magnetische Messungen am Observatorium**

- Bei der Bestimmung der Nordrichtung wird die Ost-West-Richtung gemessen, weil dort das Magnetometer auf Null statt auf einen unbekanntem Maximalwert abgeglichen werden kann.
- Durch Vier-Lagen-Messung (d.h. es wird sowohl horizontal als auch vertikal um jeweils  $180^\circ$  gedreht gemessen) werden Orientierungsfehler des Sensors gegenüber dem Theodoliten und ein evtl. vorhandenes Sensor-Offset eliminiert.
- Fluxgate-Magnetometer: Die Suszeptibilität des Spulenkernmaterials ist nicht konstant, sondern bei einem großen äußeren Feld nimmt die Magnetisierung eine Sättigung an. Daher ergibt sich bei einem sinusförmigen Erregerfeld eine ebenfalls sinusförmige Magnetisierungskurve, wenn das Erregerfeld klein ist; wird dagegen Sättigung erreicht, zeigen sich in der Magnetisierungskurve Oberschwingungen. Die erste Oberschwingung ist proportional zum äußeren Feld, daraus lässt sich dieses bestimmen. Konstruktiv erhält man diese erste Oberschwingung, indem man zwei gleiche Spulen mit entgegengesetzter Wicklung in Reihe schaltet und parallel nebeneinander anordnet; durch diese Spulen schickt man den Erregerstrom, während man das Messsignal an einer dritten Spule misst, die um die beiden anderen Spulen herumgewickelt ist. In ihr wird diese Oberschwingung induziert.
- Protonenmagnetometer: An einer protonenhaltigen Flüssigkeit wird ein starkes Magnetfeld angelegt, welches die Protonen magnetisch ausrichtet. Anschließend schaltet man dieses Feld aus, so dass das zu messende Feld auf die Protonen wirkt; da diese einen Kernspin besitzen, richten sie sich nicht sofort nach dem äußeren Feld aus, sondern es kommt zu einer Präzession um die Richtung des äußeren Feldes, wobei die Präzessionsfrequenz proportional zur Feldstärke ist.
- Kryogen-Magnetometer