

Bau und Betrieb eines Schulseismometers

ULRICH ARNDT | SEBASTIAN SCHORK | ERHARD WIELANDT

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Signale aus der Erde“ in **Physik in unserer Zeit**, 37. Jahrgang 2006, Nr. 6, S. 281. Es enthält eine genauere Beschreibung des Aufbaus und Betriebs eines Seismometers, das sich für den Schuleinsatz eignet.

Inhaltsübersicht

Der Lehrseismograph.....	1
Die Seismographenstation.....	4
Info-Kasten 1: Auswertung eines Seismogramms	7
Info-Kasten 2: Klassischer Seismograph und erzwungene Schwingung mit dem Lehrseismographen.....	8
Info-Kasten 3: Kann man Erdbeben vorhersagen?	9
Info-Kasten 4: Generatorkonstante und Bodenamplitude.....	11
Literatur.....	12
Internet.....	12
Bestellung der Bauanleitung und Bezugsquellen.....	13

Der Lehrseismograph

Der Lehrseismograph ist ein reibungsarmes, beachtlich gedämpftes, langperiodisches Horizontalpendel mit elektrodynamischem Sensor, nachgeschaltetem Verstärker-Filter-Modul und einer Aufzeichnungseinheit. Die mechanische Ankopplung des Pendels an die Erde ist gut: das Seismometer steht mit seinem Rahmen, unter einer Styropor-Haube von Luftzirkulation abgeschirmt, in einem abgetrennten Raum des Schulkellers auf dessen Fundament, das auf anstehendem Gestein (Rheinisches Schiefergebirge) gegründet ist, weswegen auch Nahbeben erfasst werden können.

Der Rahmen (Abbildung siehe Artikel im Heft) besteht aus spannungsfrei verschraubten Rechteck-Alu-Profilen (Fensterbau). Der würfelförmige Pendelkörper ist aus Beton gegossen, mit einer zylindrischen Aussparung zur Aufnahme der Pendelstange (Alu-Rohr) und zwei seitlich eingelassenen Ms-Dübeln. Das nach dem Gartentor-Prinzip montierte Pendel ist an fünf Stahldrähten so aufgehängt, dass nur noch ein Freiheitsgrad für die Bewegung übrig bleibt und ein extrem kleiner Teil der Gewichtskraft des Pendelkörpers als rücktreibende Kraft wirkt (Astasierung). Der schräg nach oben verlaufende Teil der Aufhängung hat die Form eines Zügels: die beiden Enden einer U-förmigen Schlaufe sind seitlich am Pendelkörper an durchbohrten Gewindeschrauben mit Lüsterklemmen befestigt und der Schlaufenbogen ist in ein Metallteil (Fahrradbremse) eingehängt, das seinerseits über ein kurzes Drahtstück mittig oben am Rahmen an einer durchbohrten Stange ohne Spiel fixiert ist. Der Eintrittspunkt des Drahtes in diese Stange definiert den oberen Fixpunkt der Pendel-Drehachse. Die untere Aufhängung realisiert mit drei Drähten einen Tetraeder, gegen dessen

Spitze das vordere Ende der Pendelstange drückt, wodurch der zweite Fixpunkt der Pendel-Drehachse festgelegt ist.

Der Neigungswinkel α der Pendelachse gegenüber der Lotrechten kann mit Hilfe dreier zentrisch durchbohrter Schrauben an der Tetraeder-Basis vorjustiert werden. Die Feineinstellung wird durch Neigen des Rahmens (Schrauben an der rechteckigen Rahmen-Basis) erreicht. Für $\alpha = 0,5^\circ$ und eine Entfernung von der Pendelstangen-Spitze zum Pendelkörper-Schwerpunkt von $b = 1\text{ m}$ wird eine Fadenpendellänge $L = b / \tan \alpha$ von gut 110 m realisiert, entsprechend einer Schwingungsdauer von etwa 21 s, die zur Erfassung der langperiodischen Oberflächenwellen von Fernbeben nötig ist.

Als Sensor wird ein Permanentmagnet-Spule-System verwendet, das als Dynamo wirkt. Da ein Seismographenpendel unmagnetisch sein sollte, ist die Spule mit ihren Zuleitungen (dünnes Koaxialkabel wie bei Plattenspielern) an der Pendelstange befestigt und das Joch des Magnetsystems am Rahmen. Die Spule ist flach ($r = 55\text{ mm} \approx 5\text{-fache Länge}$) und hat etwa 36000 Wicklungen aus Cu-Lackdraht ($\varnothing = 0,16\text{ mm}$). Der kreisrunde Spulenkörper aus Kunststoff und Plexiglas wurde mit Stichsäge, Bohrmaschine und Kreissäge angefertigt, eine Drehbank ist hilfreicher. (Eine Bauanleitung wird auf Anfrage zugeschickt.) Fürs Wickeln braucht man bei 10 Umdrehungen/s eine Stunde. Die beiden quaderförmigen, sehr leistungsstarken Permanentmagnet-Blöcke (Nd-Fe-B) sitzen innen auf den längeren Schenkeln eines O-förmigen Jochs und erzeugen ein starkes Magnetfeld, in das eine Seite der Spule eintaucht. Damit das Pendel nach einer Anregung rasch in seine Ruhelage zurückkehrt und nicht in mechanische Resonanz geraten kann, ist es mithilfe des Wirbelstromeffekts nahe dem aperiodischen Grenzfall schwach gedämpft ($23:1 = e^\pi$). Die Dämpfung kann bequem durch einen parallel zur Induktionsspule geschalteten Widerstand eingestellt werden; der Signalverlust wird durch einen Verstärker wettgemacht.

Um aus der Amplitude U_0 der elektrodynamisch induzierten Spannung die Geschwindigkeits-Amplitude v_0 und daraus bei bekannter Kreisfrequenz $\omega = 2\pi / T$ der Schwingung die Wegamplitude $a_0 = v_0 / \omega$ berechnen zu können, muss die Generator-Konstante S des elektromechanischen Seismometer-Pendels bestimmt worden sein. Dabei nutzt man aus, dass dieses Pendel elektromotorisch als Stromwaage betrieben werden kann: man schickt einen Gleichstrom bekannter Größe I durch die Spule und misst die Lorentzkraft durch eine entgegengesetzt gleich große mechanische Kraft F , welche die Spule in der Ruhelage ($I = 0$) hält. Wie wir später im Abschnitt „Generatorkonstante und Bodenamplitude“ zeigen, gilt:

$$\frac{F}{I} = S = \frac{U_{0\text{ind}}}{v_0},$$

wobei apparativ gilt:

$$S \equiv n \cdot \ell \cdot B .$$

Für ein leistungsstarkes Signal braucht man also eine Spule mit vielen Wicklungen n , einen großflächigen Magneten, damit die von seinem Feld erfasste Leiterlänge ℓ groß ist; zudem muss der Magnet stark sein, also eine hohe magnetische Induktion B besitzen.

Wäre die Seismometerspule an einem „archimedischen Punkt“ befestigt, dann ließe sich die Bodenamplitude direkt so bestimmen:

$$a_0 = \frac{U_{0\text{ind}}}{S \cdot \omega}$$

Wie das Bodensignal tatsächlich über das Pendel und die Verstärker-Filter-Einheit in den Rechner gelangt, zeigt Abbildung 1.

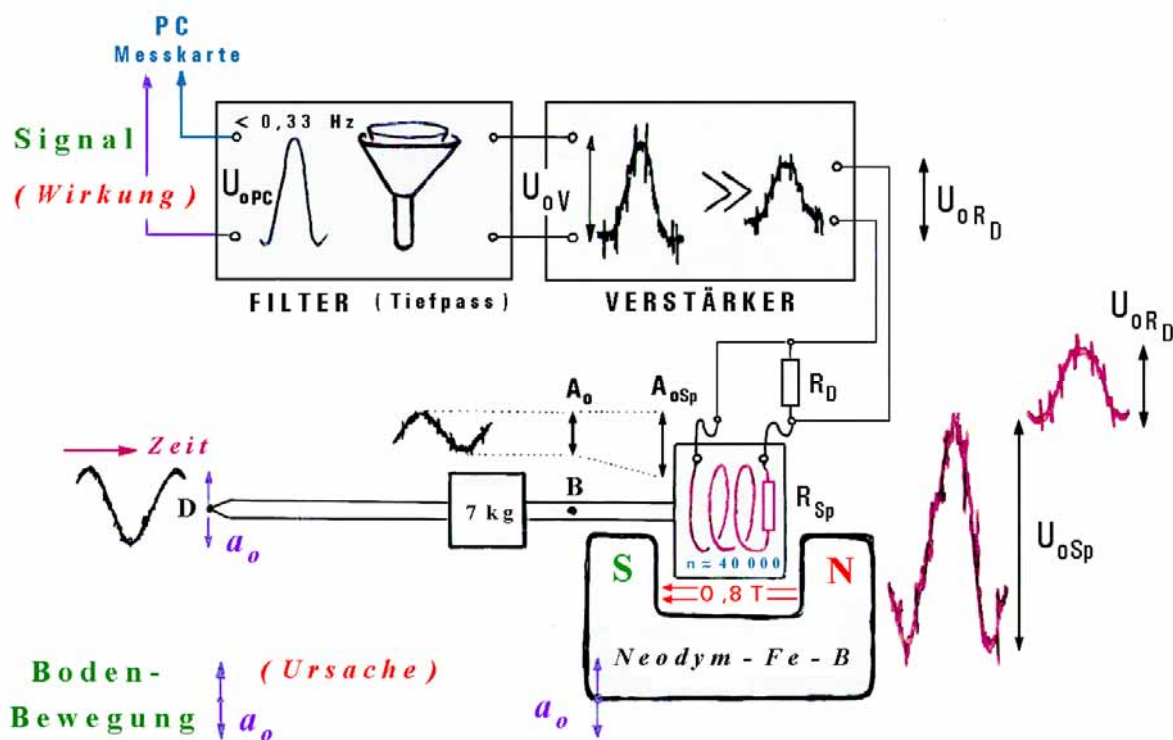


Abb. 1 Der Weg der Signale vom Boden in den PC. Die Strecke \overline{DB} ist die reduzierte Pendellänge λ des Pendels und B sein Bewegungsmittelpunkt. Wie man umgekehrt aus dem PC-Signal die Bodenamplitude berechnen kann, ist ausführlich in der Jugend-forscht-Arbeit beschrieben, die auf der Homepage der Seismik-AG zu finden ist (siehe Abschnitt „Internet“).

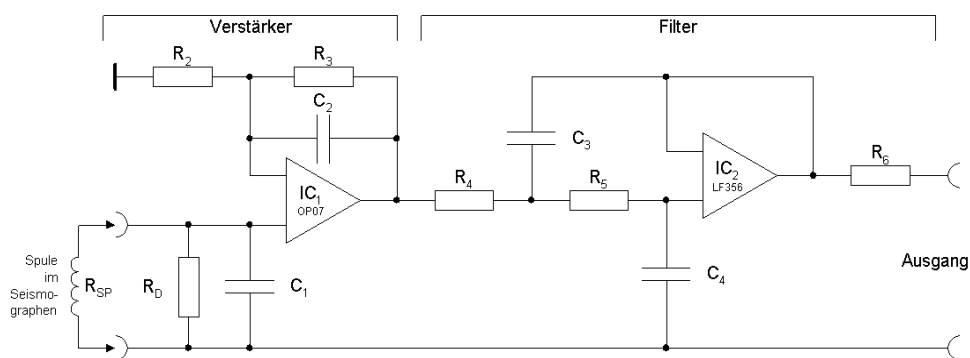
Man hat also zu beachten, wie diese Einheit, der Dämpfungswiderstand, die Geometrie des Pendels und die Frequenzabhängigkeit der Signalübertragung (siehe Abschnitt „Klassischer Seismograph...“ im Folgenden) die Signal-Amplitude ändern.

Die Seismographenstation

Nach der Konstruktion des stationären Nord-Süd- und Ost-West-Seismometers der Schulseismographenstation war es das Ziel der Jugend-forscht-Gruppe, die registrierten Daten sowie die zugehörigen Signale eines DCF-Zeitzeichen-Empfängers lückenlos aufzuzeichnen und zu archivieren. Dabei boten sich zwei Möglichkeiten: die Aufzeichnung auf einem Endlospapierschrieb und die digitale Erfassung und Speicherung auf einem Massenspeichermedium.

Die Papiermethode hat den Vorteil der Anschaulichkeit; man erkennt sofort, ob ein seismisches Signal registriert wurde. In dem von uns verwendeten Sichtschieb bewegt sich der Schreibstift eines Flachbettschreibers in Abhängigkeit vom eingespeisten Analogsignal, das von der Verstärker-Filter-Einheit kommt; der Papiervorschub ist 1 cm/min, die 27 cm breite Papierschleife ist 4,8 m lang. Addiert man jedes zehnte DCF-Minutensignal und ein Rampensignal mit etwa 8 mm Steigung pro Papierumlauf zum Seismographensignal, erhält man das typische Bild einer seismographischen Aufzeichnung. Arbeitet man mit zwei Farben und versetzten Spuren, dann kann man auf einem Papierband 14 Tage lang registrieren. Der Unterhalt eines jahrelang dauerbetriebenen Laborschreibers (Wartung, Papier, Stifte) ist allerdings nicht billig. Längere Seismogramme müssen zur Auswertung stückweise photokopiert und zusammengeklebt werden. Angenehmer ist der Umgang mit einer digitalen Aufzeichnung, die beliebig kopiert und papierlos übertragen werden kann. Insgesamt ist dieses Verfahren aufwändiger und das entstehende Archiv muss immer wieder auf aktuell verfügbare Medien übertragen werden.

Das Mess-Signal ist die am Dämpfungswiderstand abfallende Spulenspannung. Die Signalleistung hängt von der Induktivität der Spule, der Stärke des Magnetfelds und der Geometrie des Pendels ab. Die Messleitungen vom jeweiligen Seismometer zu dessen Verstärker-Filter-Einheit (Abbildung 2) sollten gut abgeschirmt sein.



$$\text{Verstärkung: } k_v = \frac{R_2 + R_3}{R_2}$$

$$\text{Filter: } f_{\text{trans}} \leq f_{\text{Grenz}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{R_4 \cdot C_3 \cdot R_5 \cdot C_4}}$$

Abb. 2 Die Verstärker-Filter-Einheit, (Design E. Wielandt). Die Widerstände für Verstärkung und Filter waren bei der Messung des Iran-Bebens so eingestellt: $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 43 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 99 \text{ k}\Omega$. Verwendete Kondensatoren: $C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$, $C_3 = 6,8 \text{ }\mu\text{F}$, $C_4 = 3,3 \text{ }\mu\text{F}$, $R_6 = 100 \text{ }\Omega$. (Die Widerstände von Induktionsspule und Dämpfungswiderstand beim Ost-West Seismographen sind: $R_{SP} = 7,85 \text{ k}\Omega$, $R_D = 9,86 \text{ k}\Omega$.) Die Filterdämpfung ist $k_F = [1 + (\omega/\omega_0)^4]^{0,5}$.

Die Notwendigkeit einer Verstärkung ergibt sich aus der Empfindlichkeit der Messkarte. Die Tiefpass-Filterung ist nötig, um Störsignale zu beseitigen, die mechanisch (Verkehr, Baustellen, Schülergetrappel) oder elektrisch einwirken: Glücklicherweise liegen die typischen Frequenzen dieser Störungen weit über dem Spektrum eines Fernbebens. Der Verstärkungsfaktor liegt etwa bei 60; die Filter-Grenzfrequenz lag zu Beginn der Aufzeichnungen bei 0,33 Hz. Heute verfügbare Software zur Datenauswertung bietet die Möglichkeit einer digitalen Filterung (FFT), sodass mit einer Filterfrequenz von 3 Hz auch die kurzperiodischen Nahbebensignale besser erfasst werden. Unsere Verstärker-Filter-Einheit ist im Vergleich zu den im Internet vorfindlichen Lösungen robust; für ein genaueres Verständnis ist allerdings Wissen über komplexe Wechselstromrechnung und Operationsverstärker nötig.

Da unsere Seismometer Geschwindigkeitsmesser sind, kann die Nullposition der Pendel nicht dem Mess-Signal entnommen werden. Jahreszeitlich bedingte Temperaturschwankungen ändern diese Position schleichend. Ein an der Pendelstange angebrachter Hall-Sensor misst den Abstand zum Magneten. Dieser Wert wird am Stationsmonitor angezeigt, aber nicht archiviert. Eine geänderte Ruhe-Position der Pendel wird mechanisch auf Normallage korrigiert.

Das vom DCF-Empfänger eingespeiste Zeitsignal wird von einer PC-Steckkarte mit batteriegepufferter Digitaluhr erfasst und automatisch mit der im Signal kodierten Uhrzeit abgeglichen: Bei schlechtem Empfang werden eigene Sekunden- und Minuten-Impulse erzeugt, (Abbildung 3).

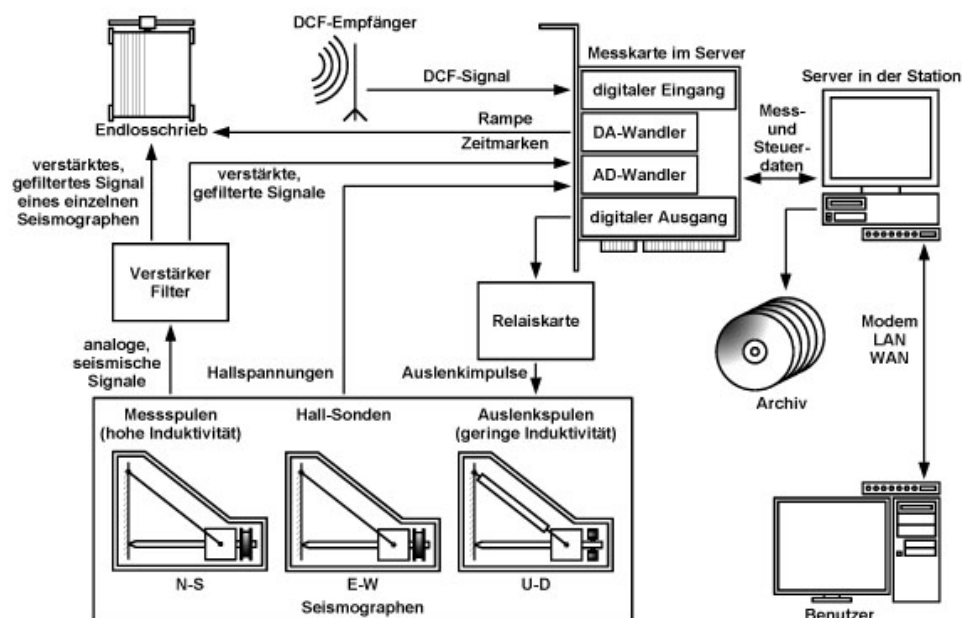
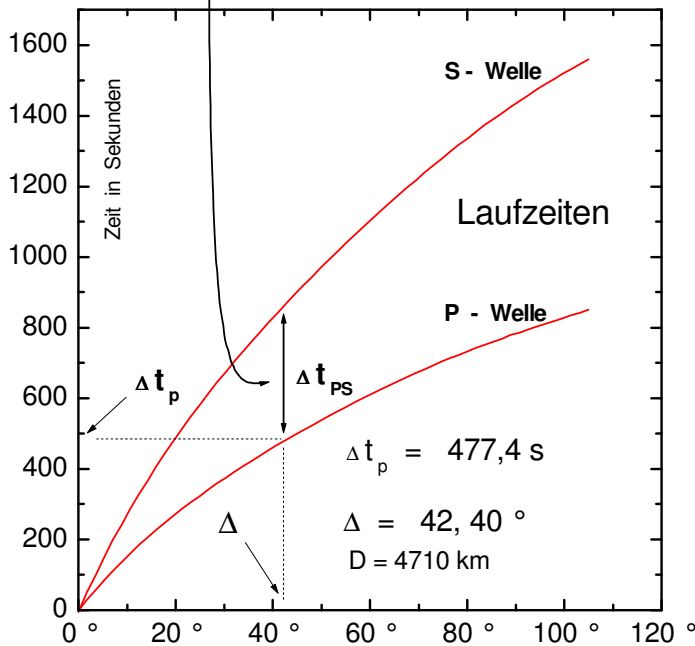
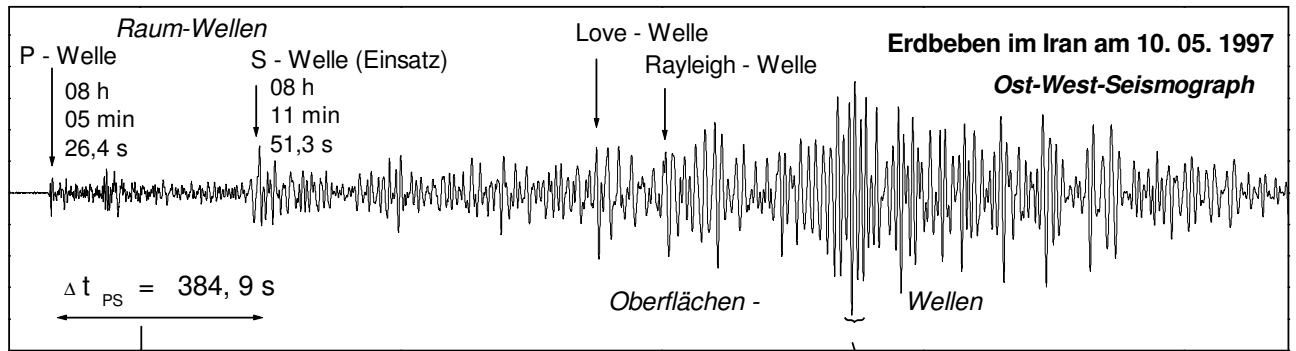


Abb. 3 Organisation der Datenerfassung an der Schul-Erdbebenwarte.

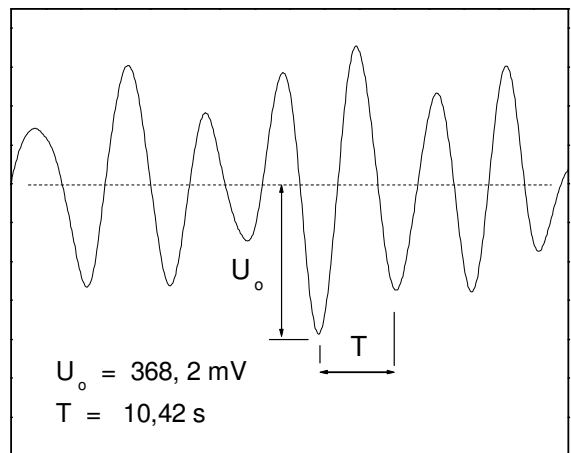
Außerdem kann die dekodierte Uhrzeit direkt über den ISA-Bus abgefragt werden. Eine zweite PC-Steckkarte enthält mehrere 12-Bit-Analog/-Digitalwandler (Aufzeichnung der Spulen- und Hall-Spannungen), einen Digitaleingang (DCF-Impulse) und einen Digital/Analogwandler (Rampensignal und Zehnminutenmarken für Papierschrieb). Es wurde eine Software entwickelt, welche die Abtastfrequenz auf 9,1 Hz konstant hält und gleichzeitig die gemessenen Daten auf die Festplatte speichert. Um das dazu nötige quasi-Echtzeitverhalten in einem nicht-echtzeitfähigen Betriebssystem in möglichst guter Annäherung zu emulieren, werden die Messungen in einer Interruptprozedur durchgeführt, in einem Ringpuffer zwischen- und auf der Festplatte endgespeichert.

Dieses Konzept konnte von der Jugend-forscht-Version (2 AT's / MS-DOS / Pascal / Magnetbandspeicherung) auf die jetzige Version (ein Rechner / Linux / C / CD) übertragen werden, indem zusätzlich zu den Hardwaretreibern für DCF- und Messkarte ein ebenfalls im Kernel-Space laufender „Messwerterfassungstreiber“ programmiert wurde. Die Messdaten können über eine Linux-Geräte-datei von Anwendungen ausgelesen und während der Messung auf CD gespeichert werden. Der Rechner wurde an das lokale Netzwerk der Schul-informatik (Internet-Zugang) angeschlossen: die Daten können auf der Homepage der Seismik-AG abgerufen und mit der dort vorfindlichen Software zu Seismogrammen entpackt werden. Die Mitglieder der Seismik-AG können über Modem per Fernabfrage die Pendel-Signale live verfolgen, Hall-Spannungswerte ablesen und die Pendel mittels eines Relais auslenken.

Info-Kasten 1 : Auswertung eines Seismogramms



t_p = Einsatz der P - Welle : 08 h 05 min 26,4 s
 Δt_p = Laufzeit der P - Welle : 7 min 57,4 s
 t_H = Herdzeit : $t_p - \Delta t_p = 07 \text{ h } 57 \text{ min } 29 \text{ s}$



Mit den Apparatekonstanten (vgl. Jufo-Bericht Homepage) berechnet man aus U_o eine Bodenverschiebung von $a_o = 101 \mu\text{m}$.
 Für die Bestimmung der Magnitude M_s aus den Oberflächenwellen gilt:

$$M_s = \lg \frac{a_o / \mu\text{m}}{T / \text{s}} + 1,66 \cdot \lg (\Delta / \text{deg}) + 3,3$$

Also : $M_s = 7,0$

Die Laufzeit-Kurven fassen jahrzehntelange Messungen zusammen. Die Entfernung Δ des Bebenherds von der Station muss man sich längs eines Großkreises mit einem krummlinigen Winkelmesser gemessen denken, wie man ihn zu Hause am Globus findet.

Arbeitsschritte: Zunächst liest man im Seismogramm die Zeitspanne Δt_{PS} zwischen den Einsätzen von P- und S-Welle ab. ($\Delta t_{PS} = t_s - t_p$) Diese Zeitspanne paßt nur an einer Stelle genau zwischen die beiden Laufzeitkurven : von dort aus findet man die Laufzeit Δt_p der P - Welle vom Herd zur Station und ebenso die Herdentfernung Δ . - Subtrahieren $t_p - \Delta t_p = t_H$ liefert den Ausbruchzeitpunkt (die "Herdzeit") des Bebens. Anschließend wird die Magnitude wie angegeben berechnet. Die in km gemessene Entfernung D bestimmt man als Bogenlänge, (mitll. Erdradius $R_E = 6368 \text{ km}$).

Zum Nachrechnen: die Laufzeit-Tabellen kann man anpassen mit

$$x = \Delta t_{PS} / 1000\text{s} ; y = \Delta / 100^\circ$$

$$\Delta = (\{ \{ (1757,5 x - 3030) x + 1837,4 \} x - 352,5 \} x + 108,61) x - 0,301$$

$$\Delta t_p = (\{ \{ (663,57 y - 2278,5) y + 3054,8 \} y - 2334,4 \} y + 1723,4) y - 1,92$$

Die Daten des internationalen Seismographen-Netzes nach NEIS :
(National Earthquake Information Survey, Golden, Colorado)

$\Delta = 42,06^\circ$ entspr. $D = 4675 \text{ km}$
 $t_H = 07 \text{ h } 57 \text{ min } 30 \text{ s}$ und $M_s = 7,3$

Info-Kasten 2: Zur Erdbebenvorhersage

Bei der immer wiederkehrenden Frage, ob mit unserer Schul-Erdbebenwarte auch eine Erdbebenvorhersage möglich sei, weisen wir auf folgendes hin. Die Gesellschaft erwartet von der Wissenschaft eine zuverlässige Erdbebenvorhersage (Zeit, Ort und Stärke). Jeder weiß, dass eine Wetterprognose fehlschlagen kann, obwohl in die auf langjährigen Erfahrungen beruhenden Modellrechnungen Daten von tausenden Beobachtungsstationen eingegangen sind, welche die sich ändernde Wettersituation direkt visuell (Wettersatelliten) oder messend (Wetterstationen) beobachten.

Im Falle einer Erdbebenvorhersage ist die Situation völlig anders: Viele Erdbeben ereignen sich typisch in einer Tiefe von 10 bis 30 Kilometern. Die tiefste Bohrung, die man ins Erdinnere (Halbinsel Kola) eingebracht hat, erreichte die Tiefe von 12 km. Diese Fakten sind nicht sehr ermutigend. Dennoch: im Winter 1975 ordnete die chinesische Regierung die Evakuierung der Millionenstadt Haicheng an; chinesische Seismologen hatten bei dem sehr seltenen Fall einer deutlichen „seismischen Lücke“ (abnehmende und wieder anwachsende Mikrobenen in einer Region) vor einem möglichen starken Hauptbeben gewarnt, das dann am 4.2.1975 mit der Magnitude 7,3 eintrat. Leider war der in den Medien daraufhin propagierte Optimismus verfrüht: am 28. Juli 1976 traf die Millionenstadt Tangshan ein Beben der Stärke 7,6 – ohne jeden Vorläufer, und ein Viertel der Bevölkerung von Tangshan kam ums Leben.

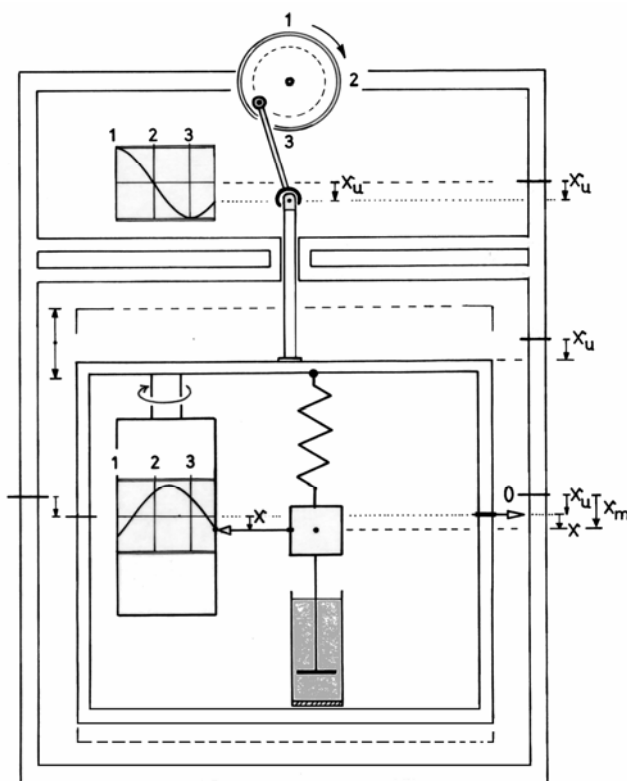
Viele Seismologen sind heute der Ansicht, dass eine Vorhersage von Erdbeben prinzipiell nicht möglich ist, andere sind für die fernere Zukunft optimistischer. Charles Richter bemerkte 1977 hierzu: „Since my first attachment to seismology, I have had a horror of predictions and predictors. Journalists and the general public rush to any suggestion of earthquake prediction like hogs toward a full trough. ... [Prediction] provides a happy hunting ground for amateurs, cranks, and outright publicity-seeking fakers. The vaporings of such people are from time to time seized upon by the news media, who then encroach on the time of men who are occupied in serious research.“ [1].

Der Seismologe Robert Geller (Universität Tokio) schreibt 1997: “Seismologists at the RAS-JAG Meeting on Earthquake Prediction in November 1996 came to the broad consensus that earthquakes are inherently unpredictable, in any precise quantitative fashion (...) because of the chaotic, highly nonlinear nature of the source process. The earth appears to be in a state of ‘self-organized criticality’ – always teetering on the edge of instability. Exactly when and where earthquakes occur, and how large they will grow after they start, depend on a myriad of fine and unmeasurable details of the physical state of the Earth over a large volume, not just in the immediate vicinity of the fault.” [2]. 1999 gab es im Internet bei der Zeitschrift Nature eine engagierte Debatte, (siehe Abschnitt „Internet“).

Info-Kasten 3:

Klassischer Seismograph und erzwungene Schwingung mit dem Lehrseismographen

Im Fall der Seismographenschwingung wird das ganze Labor durch die Erdbewegung in Schwingungen versetzt. Wir bezeichnen mit x_u die Bodenbewegung relativ zu einem Teil der Erde, der nicht von der Bodenbewegung betroffen ist (sog. „Inertialsystem“), mit x die Auslenkung des Pendels, die wir im Labor registrieren und mit x_m die absolute Bewegung des Pendels im Inertialsystem. Bei einer Federkonstanten D , der Schwingermasse m und der Reibungskonstanten R gilt



dann: $x_m = x_u + x$, sowie

$$m\ddot{x}_m = F_D + F_R. \text{ Daher ist:}$$

$$m(\ddot{x}_u + \ddot{x}) = -Dx - R\dot{x}, \text{ bzw.}$$

$$m\ddot{x} + R\dot{x} + Dx = -m\ddot{x}_u.$$

Schwingt der Boden harmonisch mit

$$x_u = a_{0x} \cos(\omega t), \text{ dann haben wir}$$

$$m\ddot{x} + R\dot{x} + Dx = m a_{0x} \omega^2 \cos(\omega t)$$

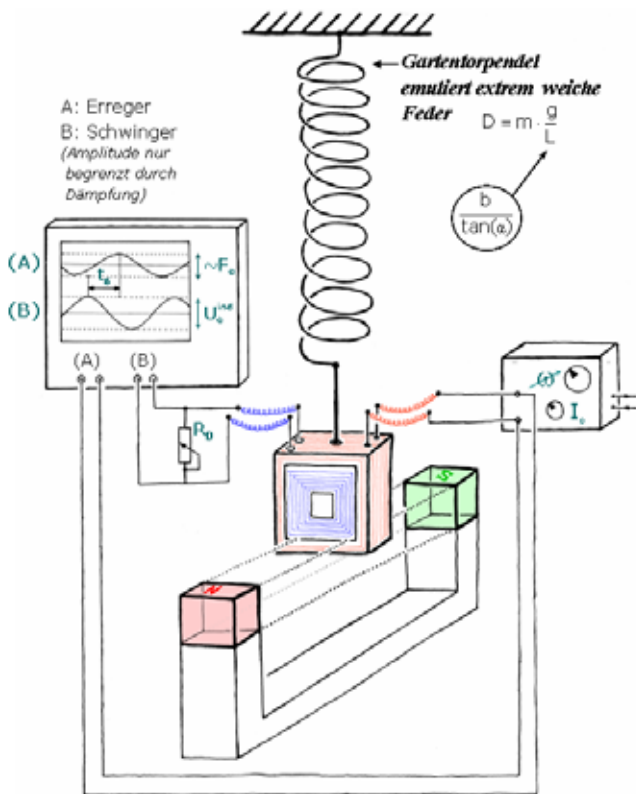
Seismographen-DGL für x

Mit $\gamma = R/2m$ und $\omega_0^2 = D/m$ gilt bei schwacher Dämpfung ($\gamma < \omega_0$):

$$x(t) = A_{0x}(\omega) \cdot \cos(\omega t - \varphi), \text{ wobei}$$

$$A_{0x}(\omega) = \frac{a_{0x} \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} \text{ und}$$

$$\tan \varphi = \frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$



Zum besseren Vergleich ist der Lehrseismograph hier als Federpendel dargestellt. Das rheologische Element ist die Lenzsche Wechselwirkung der Magnetfelder von Permanentmagnet und Induktionsspule (blau).

Für die elektromotorische Erregung m.H. eines Frequenzgenerators, der einen Wechselstrom durch eine kleine äußere Hilfsspule (rot) schickt, gilt:

$$F_{\sim} = F_0 \cdot \cos(\omega t) \text{ mit } F_0 = J_0 \cdot S_H$$

Für die generatorische Registrierung der Pendel-Geschwindigkeit v mit der Induktionsspule als Sensor gilt:

$$v = U^{\text{ind}} / S \text{ mit } v = A_{\text{ov}}(\omega) \cdot \cos(\omega t + \delta).$$

Es ist: $F = F_D + F_R + F_{\sim}$, also

$$m\ddot{x} = -Dx - R\dot{x} + F_0 \cos(\omega t) \text{ und daher}$$

$$\ddot{v} + 2\gamma\dot{v} + \omega_0^2 v = -(F_0/m) \cdot \omega \cdot \sin(\omega t).$$

Mit $a_{\text{ov}} = F_0/m \omega_0$ gilt:

$$A_{\text{ov}}(\omega) = \frac{a_{\text{ov}} \omega_0 \omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma \omega)^2}} \text{ und}$$

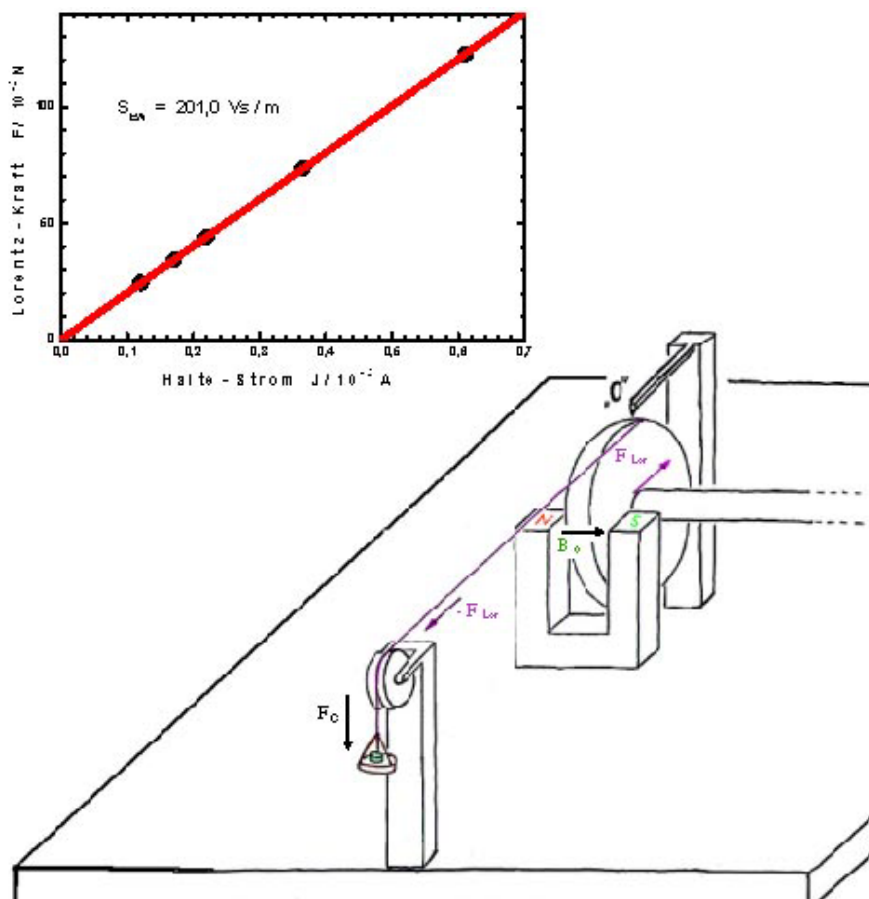
$$\tan \delta = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\gamma \omega}.$$

Info-Kasten 4: Generator-Konstante und Bodenamplitude

Der Einfachheit halber führen wir die Überlegung durch für eine rechteckige Spule mit n Windungen, die mit der Fläche $A = \ell \cdot x$ vom konstanten Magnetfeld B_0 erfasst wird, wobei sich die Spule mit der Geschwindigkeit v in x -Richtung bewegt. Es gilt dann:

$$|U_{\text{ind}}| = n \dot{\Phi} = n B_0 \dot{A} = n B_0 \ell \dot{x} = n \ell B_0 \cdot v.$$

Für die Stromwaage gilt $F_{\text{Lor}} = n \ell B_0 \cdot I$; dabei wird F_{Lor} statisch bestimmt. Mit der Generator-Konstanten $S = n \ell B_0$ gilt also: $|U_{\text{ind}}| = S \cdot v$ und $F_{\text{Lor}} = S \cdot I$. In einem Stromwaagen-Experiment (Abbildung) bestimmt man S und kann dann beim dynamischen Einsatz aus der Induktionsspannung die Spulengeschwindigkeit $v = U_{\text{ind}} / S$ und mit der registrierten Schwingungsdauer $T = 2\pi / \omega$ auch die Bodenamplitude $a_0 = v / \omega$ messen.



Literatur

- [1] C. Richter, Bull. Seism. Soc. Amer. **1977**, 36, 1.
[2] R. J. Geller, Seism. Res. Lett. **1997**, 68, 477

Internet

U.S. Geologischer Dienst (USGS)
Aktuelle Erdbebenmeldungen Erdbebenzentrums in Golden, Colorado
earthquake.usgs.gov/recenteqsww/Quakes/quakes_all.html
Hinweise für Lehrer
earthquake.usgs.gov/4teachers/

Experten-Diskussion zum Thema Erdbebenvorhersage
www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake_26.html

Geoforschungszentrum Potsdam
www.gfz-potsdam.de

Geologischer Dienst NRW, Krefeld
allgemeinverständlich kommentierte Lokalbeben
www.gla.nrw.de/l_y.htm

Erdbebenwarte Universität Köln, Bensberg
gut aufbereitete Seite für Nicht-Seismologen, Lokalbeben
www.uni-koeln.de/math-nat-fak/geologie/seismo

Seite von Alan L. Jones (Seismologe, Universität Binghamton, USA)
Didaktisch sehr gut aufbereitete Animationen („Seismic Eruptions“ u. „Seismic Waves“)
www.geol.binghamton.edu/faculty/jones/

Redwood City Public Seismic Network
viele gute Links für Lehrer
www.seismicnet.com

Institut für Geophysik der Universität Stuttgart
Zugriff auf archivierte und aktuelle Tages-Seismogramme
www.geophys.uni-stuttgart.de

Schulseismographen-Station St.-Michael-Gymnasium Monschau
Hier kann man die Jugend-forscht-Arbeit finden und aktuelle Registrierungen der Schul-Erdbebenwarte einschließlich des zugehörigen Viewers finden.
www.mgm.monschau.de/seismic

Bestellung der Bauanleitung und Bezugsquellen

Interessierte Leser können eine ausführliche Bauanleitung bei uns bestellen. Bitte schicken Sie Ihre schriftliche Anfrage mit einem ausreichend frankierten DIN A5 Rück-Umschlag und einer CD-Hülle an unsere Adresse:

StD Ulrich Arndt
Städt. St.-Michael-Gymnasium
Walter-Scheibler-Str. 51
D-52156 Monschau

Bezugsquellen

Starke Magnetblöcke aus Ne-Fe-B:

www.supermagnete.de

www.neotexx.de