

Pendelkopplung durch Felder

Von E. GERTH und H. MELCHER, Potsdam

(Eingegangen am 17. 6. 1963)

Als gekoppelte Pendel sind nach Wissen der Verfasser bisher nur solche mit mechanischer Kopplung beschrieben worden. POHL [1] unterscheidet 3 Arten der Pendelkopplung: Beschleunigungs-, Kraft- und Reibungskopplung; hierbei wird die Kraftkopplung durch eine elastische Feder realisiert. Von HECHT und LINDBERG [2] wird ein System feder-gekoppelter Pendel beschrieben und darauf hingewiesen, daß nur weitere 3 Beispiele „gekoppelter mechanischer Schwingkreise“ bekannt seien: das von OVERBECK 1888 angegebene Doppelpendel, die Feder für Koppelschwingungen nach WILBERFORCE aus dem Jahre 1894 und die Torsionswellenmaschine.

Im folgenden wird die Pendelkopplung durch Felder an Hand einiger Beispiele beschrieben.

Grundsätzlich läßt sich die Kopplung durch Felder auf eine Kraftkopplung zurückführen, bei der stets die Kraftwirkung zwischen Feldquellen, die reell oder auch virtuell sein können, zur Energieübertragung benutzt wird.

Für die Demonstration dieser Kopplungsart kommen in erster Linie elektrische und magnetische Felder in Betracht. Prinzipiell ist aber auch eine Kopplung von Oszillatoren durch Strömungs-, Schall- sowie Temperaturfelder und durch elektromagnetische Felder möglich.

Als Feldquellen für elektrische Felder können elektrostatisch aufgeladene Kugeln, Elektrete (reelle Quellen) und auf Kugeln influenzierte Ladungen (virtuelle Quellen) dienen. Als Feldquellen für magnetische Felder können Ferromagnetika, Sintermagnete, stromdurchflossene Spulen mit und ohne Eisenkern sowie als virtuelle Quellen Eisenkörper verwendet werden, die ihren Magnetismus erst durch Influenz aus einem äußeren Feld erhalten.

1. Erzeugung von Schwebungen

1.1. Elektrisch gekoppelte Pendel

An einer gemeinsamen Spannungszuführung hängen an gleichlangen Fäden leichte kugelförmige Pendelkörper (Holzkugeln, graphitierte Tischtennisbälle oder Weihnachtsbaumkugeln), die durch die elektrostatische Abstoßung miteinander gekoppelt sind. Wird nur eine der beiden Kugeln aufgeladen und bleibt die andere auf Erdpotential, so wird die Kopplung durch die Anziehungskraft bewirkt. Als Spannungsquelle dient z. B. eine Influenzmaschine, ein VAN-DE-GRAAFF-Generator oder im einfachsten Falle ein durch Reibung aufgeladener Kamm. Der Kopplungsgrad ist u. a. von der Höhe der Spannung abhängig, die mit einem Elektrometer gemessen werden kann.

Der Kopplungsgrad hängt weiter ab von dem Abstand der Pendelkörper und von ihrer Masse, die beispielsweise bei der Verwendung von Weihnachtsbaumkugeln sehr leicht durch Füllen mit Wasser variiert werden kann. Bei der Verwendung von Elektreten als Pendelkörper kann der Kopplungsgrad nur durch Abstandsvariation geändert werden.

Die Abhängigkeit der Dauer der Energieübertragung von einem Pendel auf das andere vom Kopplungsgrad ist durch eine graphische Darstellung leicht zu veranschaulichen.

Die Erregung eines der beiden Pendelkörper kann durch Nähern eines beliebigen Gegenstandes erfolgen, der wegen des Potentialunterschiedes von dem elektrisch geladenen Pendelkörper angezogen wird. Bei der Aufhängung der Pendelkörper an isolierenden Fäden (Haare, Perlonschne) ist aber die Beruhigung und Erregung der Pendel auch leicht von Hand zu erreichen.

Je nach der Richtung des Anstoßes werden Schwebungen von Longitudinalschwingungen oder von Transversalschwingungen erzeugt. Sehr instruktiv ist ein Versuch mit virtuellen Feldquellen als Pendelkörper. Versetzt man von zwei ungeladenen Pendeln eines in Schwingungen, so erfolgt zunächst keine Übertragung der Schwingung auf das andere Pendel. Erst durch Einschalten eines äußeren Feldes, indem man z. B. eine Elektrode eines geladenen VAN-DE-GRAAFF-Generators vorsichtig in die Nähe der Kugeln bringt, wird die Kopplung zwischen beiden Pendeln ermöglicht.

1.2. Magnetisch gekoppelte Pendel

Mit magnetisch gekoppelten Pendeln können im wesentlichen die gleichen Versuche durchgeführt werden wie mit elektrisch gekoppelten Pendeln. Allerdings ist wegen des Dipolcharakters der Magnete keine Kugelsymmetrie der Felder zu erreichen. Für ein stabiles Schwingen ist daher die Verwendung von rotations-symmetrischen Magneten als Pendelkörper und die Aufhängung mit vertikalen Symmetrieachsen zu empfehlen.

Die Versuche mit Elektromagneten entsprechen den Versuchen mit definiert elektrisch aufgeladenen Pendelkörpern. Die Variation des Kopplungsgrades kann sowohl durch Änderung der Stärke des Stromes, der durch die Spulen fließt, als auch durch Abstands- und Massenänderung vorgenommen werden.

Die Kopplung durch influenzierte Felder geschieht mit Hilfe von Weicheisenkugeln bzw. Ferritkugeln als Pendelkörper, die in ein Magnetfeld gebracht werden.

Ein magnetisches Analogon zu den Elektreten stellen die Sintermagnete dar. Die Schwebungsversuche mit magnetischen Pendelkörpern sind in feuchten Räumen den elektrostatischen vorzuziehen.

Die magnetischen Pendelkörper eignen sich auch zur Aufzeichnung der Schwebungskurven nach der Sandstreu- oder Tintenausflußmethode. Die Schwebungskurven können auch photographisch gewonnen werden, indem man die Spuren von Glühlämpchen, Leuchtfarbe oder von beleuchteten Konvexspiegeln, die auf den Pendelkörpern angebracht werden, auf Photomaterial aufzeichnet.

2. Die Darstellung von Wellenbewegungen mit Hilfe der Feldkopplung

Ordnet man eine Anzahl von elektrisch oder magnetisch gekoppelten Pendeln in einer Reihe an, so kann man nach dem Anstoßen eines Pendels die Ausbreitung der Schwingung als Welle beobachten (Abb. 1). Es läßt sich deutlich zeigen, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit vom Kopplungsgrad abhängt. Von der Richtung des Anstoßes hängt es ab, ob eine Longitudinal- oder Transversalwelle entsteht. Durch bifilare Aufhängung der Pendelkörper läßt sich die Wellenart eindeutig festlegen.

Der Versuch ist auch geeignet, den Einschwingungsvorgang bei der Wellenausbreitung zu verfolgen und die Reflexion der Wellen am dichteren und am dünneren Medium zu demonstrieren. Als Übergang zum dünneren Medium ist das Ende

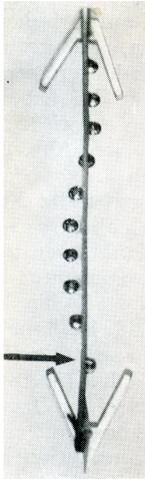


Abb. 1. Wellenbewegung mit feldgekoppelten Pendeln. Anstoß in Richtung des Pfeiles

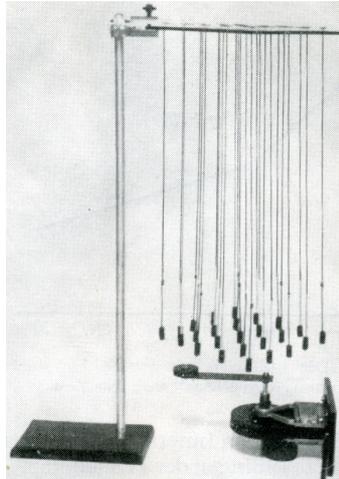


Abb. 2. Modell eines homöopolaren Kristalls mit feldgekoppelten Pendeln. Unter den Fadenpendeln rotiert als Erreger ein Magnet

der Pendelreihe anzusehen; als Übergang zum dichteren Medium kann ein sehr schwerer oder ein fixierter Pendelkörper am Ende der Reihe dienen. Durch geeignetes Einstellen des Kopplungsgrades lassen sich leicht stehende Wellen erzeugen.

3. Demonstration der Temperaturbewegung und der FRENKEL-Fehlordnung in einem Kristall durch feldgekoppelte Pendel

Ordnet man gleichartige feldgekoppelte Pendel (keramische Magnete) zu einem quadratischen Gitter an, so erhält man das Modell eines homöopolaren Kristalls (Abb. 2), bei dem die Plätze der Bausteine durch die Potentialmulden bestimmt werden, die durch die Überlagerung der Potentiale der rücktreibenden Pendelkraft und der magnetischen Abstoßungskraft entstehen. Als Variante dieses Versuches können Federpendel verwendet werden. Hierbei tragen elastische Federn (Stahldrähte) die feldgekoppelten Pendelkörper.

Führt ein Pendel Schwingungen um die Ruhelage aus, so wird die Energie auf Grund der Kopplung bald auf die umgebenden Pendel übertragen. Es erfolgt ein ungeordnetes Hin- und Herfluten der Energie, wobei sich in statistischer Verteilung die Energie auf bestimmte Pendel konzentrieren kann. Wenn die Schwingungsenergie eines Pendels die Tiefe der Potentialmulde übertrifft, kann der Pendelkörper seinen ursprünglichen, durch die Potentialmulde bestimmten Platz verlassen und einen „Zwischengitterplatz“ einnehmen (FRENKEL-Fehlordnung), der im vorliegenden Modell durch einen Platzwechsel zweier „Ionen“ und gegenseitiges Umschlingen der Pendelfäden dargestellt wird. Der Zwischengitterzustand ist metastabil; nach einer durch die Statistik bestimmten wahrscheinlichen Zeit, wobei die Zahl der Ionen auf Zwischengitterplätzen nach einer Exponentialfunktion zeitlich abklingt, kehren diese wieder auf die ursprünglichen Plätze zurück.

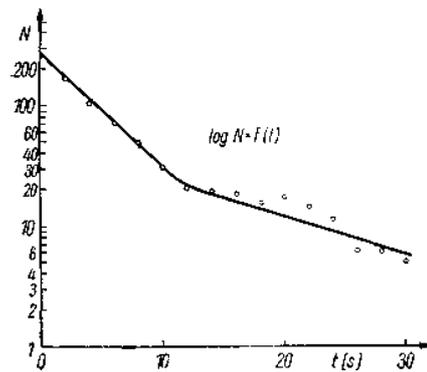


Abb. 3. Die Abhängigkeit der Zahl N der „Zwischengitterplätze“ von der Zeit t

Da es schwer möglich ist, gleichzeitig eine größere Zahl von Ionen auf Zwischengitterplätzen zu beobachten, summiert man die Ergebnisse einer Anzahl von Versuchen, bei denen jeweils nur die Lebensdauer eines Teilchens gemessen wird. Mit der Versuchsanordnung nach Abb. 2 ergab sich die Kurve in Abb. 3.

Die in Abb. 3 dargestellte Funktion ist offensichtlich durch eine Überlagerung zweier Exponentialfunktionen entstanden. Die beiden Komponenten werden dadurch erklärt, dass die Fehlordnungen am Rande des Modellkristalls nur einer einseitigen Beeinflussung durch Stöße ausgesetzt sind und daher (nachweislich) eine kleinere Halbwertszeit besitzen als die Fehlordnungen im Innern. Außerdem tritt bei langen Fehlordnungszeiten ein mehrmaliges Umschlingen der Pendelfäden ein, das eine zusätzliche Verzögerung bedingt. Taucht man die schwingenden Pendel in eine Schale mit Wasser, so werden die Schwingungen in kurzer Zeit gedämpft, und zufällig vorhandene Fehlordnungen werden „eingefroren“. Sie verschwinden erst, wenn wieder eine Temperaturbewegung einsetzt.

Beim Entstehen einer Fehlordnung wird Energie gespeichert, die bei ihrem Verschwinden wieder frei wird. Dies zeigt man, indem man in dem Modellkristall eine große Zahl eingefrorener Fehlordnungen erzeugt, die nach einem einmaligen Anstoß unter selbsttätiger Verstärkung der Temperaturbewegung alle nacheinander verschwinden.

Die Abhängigkeit der Zahl der Fehlordnungen von der Temperatur läßt sich qualitativ leicht zeigen. Bei erhöhter Temperatur beansprucht der Modellkristall einen größeren Raum (Ausdehnung durch Wärme). Verwendet man ein hinreichend großes Gitter, so kann man die Temperaturverteilung von einer beliebigen Stelle des Gitters aus als einen irreversiblen Vorgang beobachten.

Wenn man die Energie mit Hilfe eines unter dem Modellkristall kreisenden Magneten zuführt, kann man auch die Abhängigkeit der Absorption (Temperaturbewegung, Zahl der Fehlordnungen) von der Frequenz (Umlaufgeschwindigkeit des Magneten) feststellen (Abb. 2). Es ergeben sich mehrere Resonanzstellen, die man mit einem Absorptionsspektrum in Analogie setzen kann.

Die vorstehend beschriebene Art der Pendelkopplung läßt sich bei den verschiedensten Typen gekoppelter oszillatorischer Bewegungen leicht realisieren. Die feldgekoppelten Oszillatoren können in vielerlei Versuchsvarianten vorteilhafter als z. B. federgekoppelte verwendet werden. Es sei z. B. darauf hingewiesen, daß in einer Modifikation des Modellgerätes nach KOSSEL [3] zur Veranschaulichung der homöopolaren Bindung die elastischen mechanischen Teile durch feldgekoppelte Pendel ersetzt werden könnten.

Literatur

- [1] POFL, R. W., Einführung in die Mechanik, Akustik und Wärmelehre. 10. und 11. Aufl. Springer-Verlag, Berlin 1947, S. 204. — [2] HECHT, K., und LINDBERG, A., Die Leybold-Welle. 3, 21 (1962). — [3] FINKELNBTRG. \V., Einführung in die Atomphysik. 4. Aufl. Springer-Verlag, Berlin 1956, S. 212.

EWALD GERTH
Dr. rer. nat. HORST MELCHER
Pädagogische Hochschule Potsdam
Institut für Physik
Abt. Isotopentechnik, Potsdam-Sanssouci