Praxis der Naturwissenschaften 15 (1966) 264-269

Versuche zur Kopplung durch Felder

Von *Horst Melcher* und *Ewald Gerth* in Potsdam

In schwingungsfähigen Gebilden sind auf Grund von Kopplungen Energieübertragungen bzw. Energieausbreitungen möglich. Bei Demonstrationsversuchen zur Mechanik und Wellenlehre verwendet man z. B. gekoppelte Pendel und Wellenmaschinen, wobei die Kopplung der Oszillatoren durch mechanische Hilfsmittel herbeigeführt wird: Gummifäden, Schnüre mit Gewichten, Schraubenfedern u. a.

Pohl [1] unterscheidet 3 Arten mechanischer Pendelkopplung: Beschleunigungs-, Kraft- und Reibungskopplung. Man kann jedoch eine Kopplung grundsätzlich auch durch (beliebige) Felder realisieren [2]. Für Demonstrationen zur Feldkopplung kommen in erster Linie magnetische und elektrische Felder in Frage. Man verwendet für magnetische Feldkopplung z. B. Ferromagnetika, Sintermagnete oder stromdurchflossene Spulen mit und ohne Eisenkern, die als schwingungsfähige Gebilde dienen, indem man sie als Pendelkörper an Fäden, Federn u. ä. benutzt. Die Kopplung durch elektrische Felder wird z. B. durch Elektrete oder elektrostatisch aufgeladene Schwingungssysteme realisiert. Die folgenden Ausführungen beschränken sich im wesentlichen auf die Verwendung von elektrostatisch aufgeladenen versilberten Hohlkugeln (Weihnachtsbaumkugeln).

1. Überraschungsversuch mit elektrisch gekoppelten Doppelpendeln

Der Versuchsaufbau ist aus Abb. l ersichtlich. Man verwendet 2 Doppelpendel in einfacher oder bifilarer Aufhängung an isolierenden Fäden (Perlonsehne). Das eine Pendelpaar wurde vor Beginn der Unterrichtsstunde oder Vorlesung elektrostatisch aufgeladen. Bei hinreichend großer Pendellänge ist die gegenseitige Abstoßung an den gespreizten Pendelfäden praktisch nicht zu erkennen. Die elektrische Ladung des einen Pendelpaares ist noch nach ca. 30 Minuten groß genug – vor allem in Wintermonaten –, um die Kopplung zu demonstrieren.

Man versetzt zunächst eine Kugel des nichtaufgeladenen Doppelpendels in Schwingung, z. B. mit Hilfe eines Isolationsstabes oder durch Anpusten. Die zweite Kugel dieses Pendelpaares bleibt bis zum Abklingen der Schwingungen unverändert in Ruhe. Nunmehr versetzt man in gleicher Weise eine Kugel des anderen gleichartigen – allerdings ohne Wissen der Zuschauer aufgeladenen – Doppelpendels in Schwingung. Man beobachtet gekoppelte Schwingungen, d. h. das eine Pendel veranlaßt das andere zum Mitschwingen. Die Pendel erreichen abwechselnd maximale Elongation und Ruhestellung, und zwar in der Weise,

daß jeweils das eine Pendel maximalen Ausschlag zeigt, wenn das andere in Ruhe ist.

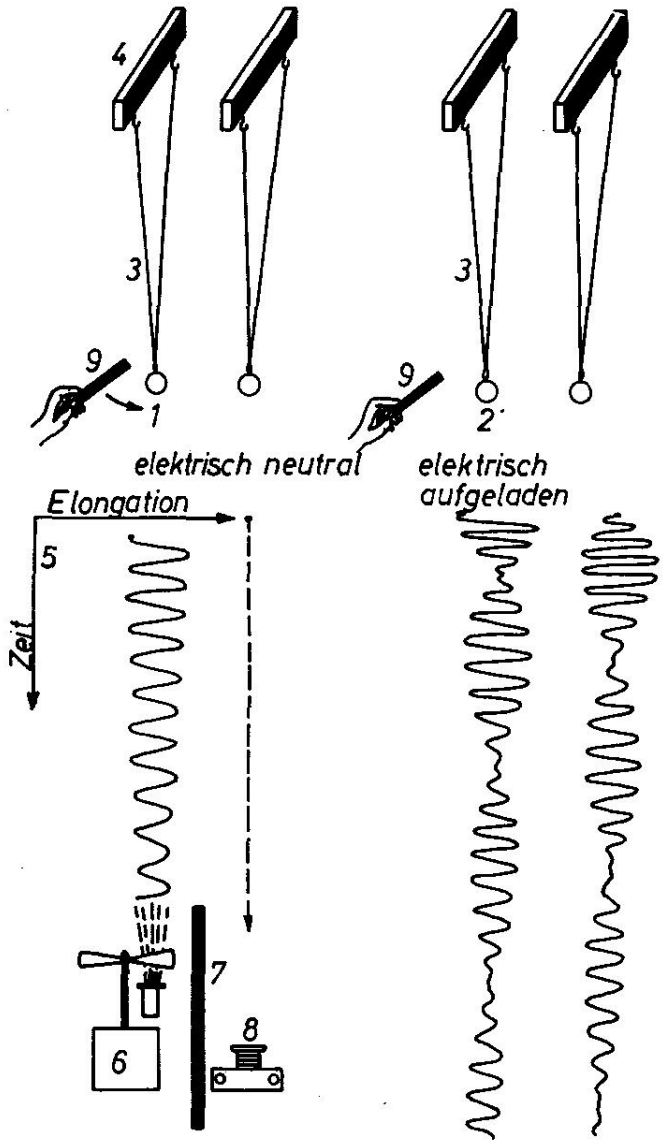

Abb. 1: Elektrostatisch gekoppelte Doppelpendel:

1. Ungeladene Weihnachtsbaumkugeln (Ø ca. 5cm);
2. Aufgeladene Weihnachtsbaumkugeln (Ø ca. 5cm);
3. Isolierende dünne Fäden (Angelsehne, trockene Haare);
4. Aufhängung (so gewählt, daß mechanische Kopplung zwischen den Pendeln vernachlässigbar ist);
5. Photographische Aufzeichnung der jeweiligen Schwingungen;
6. Stroboskopische Beleuchtungseinrichtung (falls stroboskopische Beleuchtung gewünscht);
7. Lichtschutz für Photoapparat;
8. Photoapparat;
9. Anstoßrichtung (mit Isolierstab).

Man läßt nach Erklärungen für das unterschiedliche Verhalten der beiden Doppelpendel und schließlich nach Deutungen für die Art der Kopplung suchen.

Der Versuch wird schließlich wiederholt, indem man die Aufladung der Kugel z. B. mit einem Bandgenerator vorführt.

Ergebnis: *Pendel bzw. Oszillatoren können durch elektrische Felder gekoppelt werden.*

2. Versuch zur photographischen Aufnahme der Orts-Zeit-Funktion zweier elektrisch gekoppelter Pendel

Jedes Einzelpendel des aufgeladenen Pendelpaares beschreibt nach Versuch l eine Schwebungskurve. Beleuchtet man dieses Doppelpendel mit einer geeigneten stroboskopischen Anordnung und bewegt unter dem Doppelpendel eine Kamera mit konstanter Geschwindigkeit, so ergibt sich der photographisch registrierte Schwingungsverlauf gemäß Abb. l (Mitte, rechts). Man erkennt die beiden auf Grund der Reibung gedämpften Schwebungskurven und ihre Phasendifferenz. Die stroboskopische Aufnahme des Orts-Zeit-Verlaufes läßt deutlich auch die unterschiedlichen Pendelgeschwindigkeiten erkennen: In den Umkehrpunkten ist die Lichtblitzdichte (Zahl der Lichtblitze je Längeneinheit) größer als in anderen Kurvenpunkten, d. h. dort ist die Pendelgeschwindigkeit sehr klein. Am geringsten ist die Pendelgeschwindigkeit bei den kleinsten Elongationen, dort ist die photographische Schwärzung am intensivsten.

Bei dieser photographischen Registrierung bewährt sich vor allem die Konvexspiegelwirkung der versilberten Kugeln.

Ergebnis: *Die Orts-Zeit-Funktion zweier schwingender elektrisch gekoppelter Pendel kann mit einer Kamera bei stroboskopischer Beleuchtung zur genaueren Analyse leicht aufgenommen werden.*

3. Versuche zur Entkopplung durch Ionisation

Das Schwingungssystem des Doppelpendels oder der als „Wellenmaschinen“ dienenden Anordnungen von elektrisch aufgeladenen Körpern (siehe Versuch 4 und 5) kann man ohne mechanische Eingriffe leicht durch Ionisation entkoppeln. Den Rhythmus der gekoppelten Schwingungen eines geladenen Doppelpendels verändert bzw. stört man durch Änderung des Kopplungsgrades, indem in die Nähe des Pendels ionisierende Quellen gebracht werden (Flamme, UV-Strahlung (HBO), Röntgenstrahlung oder ionisierende Kernstrahlung).

Ergebnis: *Die elektrische Feldkopplung kann durch Ionisation (Entladung) teilweise oder gänzlich aufgehoben werden.*

4. *Versuche mit einer elektrostatisch gekoppelten „Longitudinal-Wellen-maschine“*

Ordnet man mehrere Pendel gemäß Abb. 2 an, so erhält man eine einfache Wellenmaschine zur Demonstration der Ausbreitung longitudinaler Wellen. Die Pendelkörper (Weihnachtsbaumkugeln) sind bifilar an flexiblen dünnen Kupferdrähten aufgehängt.

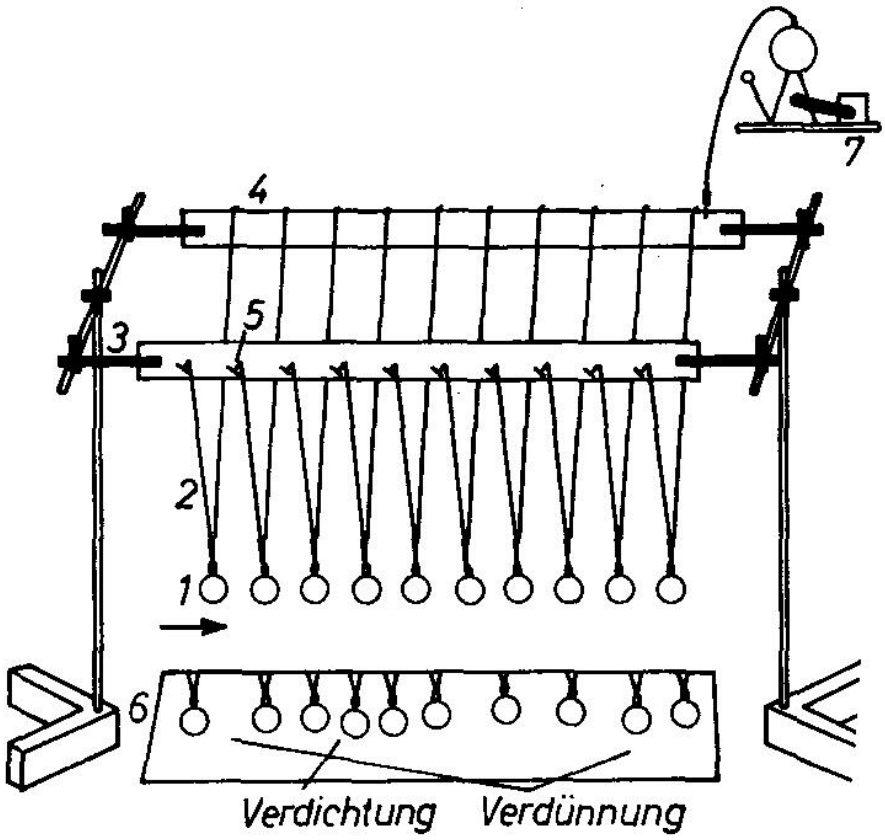

Abb. 2: Elektrostatisch gekoppelte Wellenmaschine für Longitudinalwellen: 1.
1. Weihnachtsbaumkugeln (Ø ca. 3 bis 4 cm);
2. Dünne Metalldrähte (Ø ca. 0,1mm);
3. Isolierstäbe;
4. Metallschiene mit Saitenspannern oder Kreuzmuffen;
5. Saitenspanner (oder Kreuzmuffen);
6. Momentaufnahme der feldgekoppelten Pendel;
7. Bandgenerator.

Die Drähte werden mit Hilfe von Saitenspannern (Wirbeln, Drehgriffen) Krokodil- oder Wäscheklammern bzw. mit Kreuzmuffen des Stativmaterials an den Leisten oder Stäben (aus Metall) befestigt. Die Länge der einzelnen Pendel läßt sich leicht abgleichen. Die Drähte, die den Kugeln die Ladung zuführen, werden nicht mit den Ösen der Kugeln verknotet; die Kugeln sind somit auf den Drähten leicht verschiebbar, so daß sie einfach ausgerichtet werden können. Die Metallstäbe sind mit isolierenden Kunststoff-Verlängerungen versehen.

Die Ladung wird dem Pendelsystem von einem motorgetriebenen Bandgenerator während des gesamten Schwingungsvorganges zugeführt. Stößt man entweder nach erfolgter Aufladung oder kurz vor der Aufladung eine Kugel in Richtung auf die anderen an, so kann man die Ausbreitung dieser Störung bzw. dieses Impulses gut beobachten. Das gesamte System gerät in longitudinale Schwingungen, wobei man „Verdichtungen“ und „Verdünnungen", also Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche beobachten kann.

Es empfiehlt sich u. U., die Kugeln z. T. mit Sand zu füllen; auf diese Weise ist gegebenenfalls die Wellenbewegung besser zu beobachten. Das Auswechseln zerbrochener Kugeln oder das Abnehmen der Kugeln zur Füllung mit Sand oder Schrot erfolgt sehr rasch, indem man lediglich die Klemmöse aus der Kugel herauszieht und nachher wieder einführt. Man kann auf die bifilare Aufhängung verzichten, indem man die Aufhängefäden der Kugel z. B. durch Kunststoff-Röhrchen (Trinkhalme) führt und auf diese Weise die – nötigenfalls mit Sand beschwerten – Kugeln wieder zu Schwingungen (nahezu) in einer Richtung zwingen kann.

Ergebnis: *Mit Hilfe von elektrisch aufgeladenen Kugeln läßt sich in einfacher Weise eine Longitudinal-Wellenmaschine verwirklichen.*

5. Versuche mit einer elektrostatisch gekoppelten „Transversal-Wellenmaschine“

Ordnet man die Pendelkörper gemäß Abb. 3 an, so erhält man eine einfache Wellenmaschine zur Demonstration der Ausbreitung transversaler Wellen.

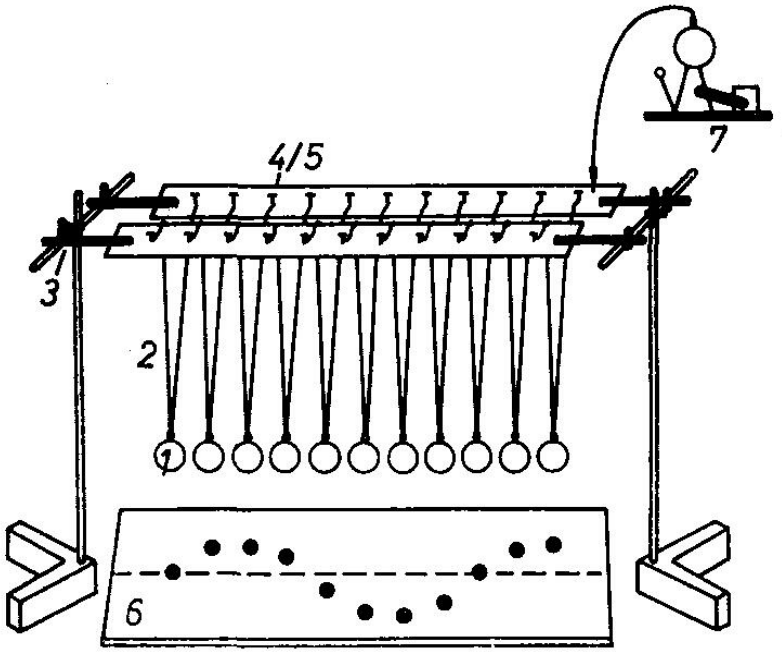

Abb. 3: Elektrostatisch gekoppelte Wellenmaschine für Transversalwellen (s. Abb. 2).

Die Versuchsdurchführung gestaltet sich wie bei 4. beschrieben. Im Unterschied zu Versuchen bei 4. lenkt man hier eine Kugel quer zur Verbindungslinie der anderen aus. Die sich ausbreitende Störung, d. h. der Anfangsimpuls, führt zu einer sinusförmigen Welle.

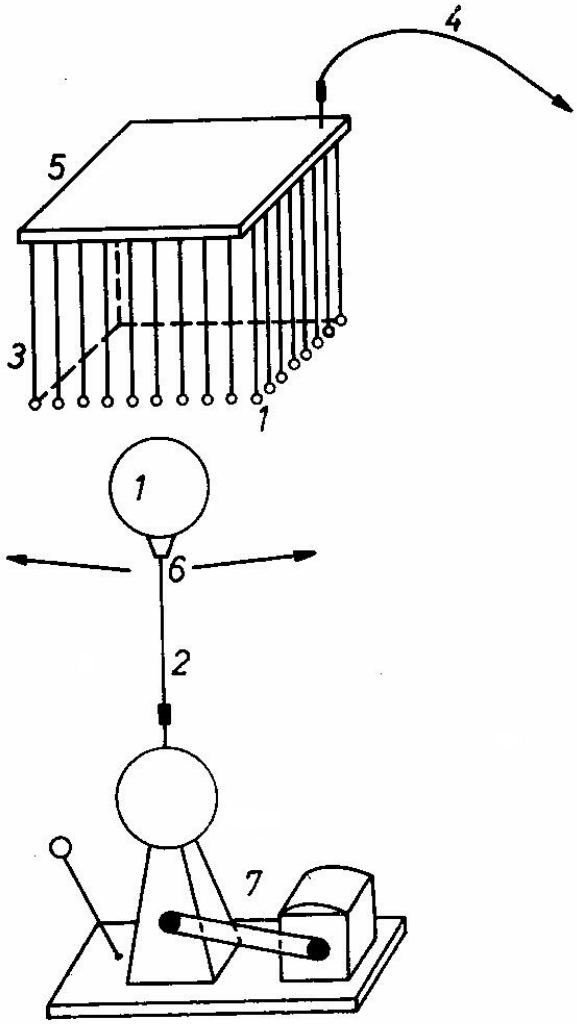

Abb. 4: Modellkristall:

1. Weihnachtsbaumkugel (Ø am Modell 1 cm, auf dem Generator ca. 7 cm);
2. Elastischer Metalldraht;
3. Dünne Metalldrähte (Ø ca. 0,1cm);
4. Zum Bandgenerator;
5. Metallplatte;
6. Klebwachs o. ä.;
7. Bandgenerator.

Auch in diesem Fall braucht man nicht unbedingt bifilar aufgehängte Pendel. Beide Arten von Wellenmaschinen sind mit einem Paar Metallstäbe realisierbar. – Die Reflexion einer Welle am dichten Medium ist einfach zu zeigen, indem man am Ende der Pendelreihe einen Pendelkörper fixiert oder besonders schwer macht.

Ergebnis: *Mit elektrostatisch feldgekoppelten Pendeln läßt sich in einfacher Weise eine Transversal-Wellenmaschine verwirklichen.*

6. Versuche mit einem aus feldgekoppelten Pendeln bestehenden Modellkristall

In [2] wurde u. a. die Demonstration der Temperaturbewegung in einem Kristall durch magnetische gekoppelte Pendel beschrieben. Dieses Modell eines homöopolaren Kristalles, bei dem die Plätze der Bausteine durch Potentialmulden bestimmt werden, die durch Überlagerung der Potentiale der rücktreibenden Pendelkraft und der (abstoßenden) Feldkraft entstehen, kann gemäß Abb. 4 auch durch elektrisch gekoppelte Pendel realisiert werden, die am einfachsten mit Magneten an einer Eisenplatte befestigt werden.

Dem Kristall kann Energie mit Hilfe einer darunter kreisenden (oszillierenden) aufgeladenen Pendelkugel oder einfach durch Bewegung mit der Hand (Influenz) zugeführt werden. Die Temperaturbewegung (statistische Schwingungen der einzelnen Oszillatoren) ist leicht zu demonstrieren. Des weiteren kann dieser Modell-Kristall auch zu erzwungenen regelmäßigen Schwingungen erregt werden, indem man rhythmisch die aufgeladenen Kugeln entlädt. Diese regelmäßigen Schwingungen können sich durch entsprechende Entladungen (Funkenstrecke) auch selbst einstellen und sich selbst steuern.

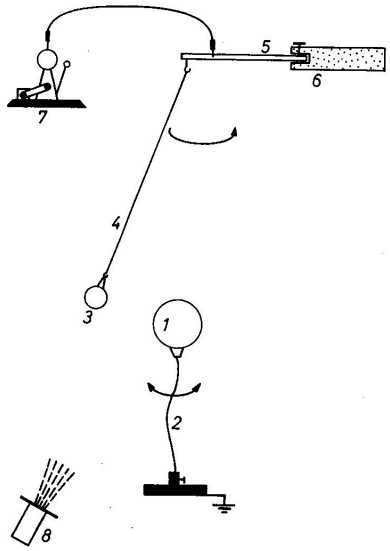

Abb. 5: Versuchsaufbau zum Mitbewegungseffekt:

1. Weihnachtsbaumkugeln (Ø ca. 7 ccm);
2. Elastischer Metalldraht;
3. Kreisende Weihnachtsbaumkugel (Ø ca. 3 bis 4 cm);
4. Dünner Metalldraht (Ø ca. 0,1mm);
5. Metallstab;
6. Isolierstativ;
7. Bandgenerator;
8. Leuchte zur Schattenprojektion

Ergebnis: *Es läßt sich mit feldgekoppelten Pendeln ein Modell-Kristall realisieren.*

8. Versuche zum Mitbewegungseffekt

Man läßt einen Pendelkörper um eine schwingungsfähig montierte Kugel kreisen. Beide Kugeln (Abb. 5) sind entweder gleichnamig oder ungleichnamig elektrisch aufgeladen. Die auf einem biegsamen (elastischen) Draht befestigte Kugel stellt ebenfalls ein Pendel dar, das etwa dieselbe Schwingungsdauer besitzen sollte wie das Fadenpendel. Auf Grund der Feldwirkung zwischen beiden Körpern (Kopplung) bewegt das Fadenpendel den anderen Oszillator mit. Dieser Versuch legt eine gewisse Analogie zur Mitbewegung des Wasserstoff-Atomkernes durch ein Hüllenelektron nahe; das Zustandekommen der Mitbewegung infolge der Feldkopplung wird damit plausibel gemacht. Die Grenzen dieser Analogie sind nicht zuletzt dadurch gegeben, daß auf das Kegelpendel – wie überhaupt auf Pendel – das 3. Keplersche Gesetz nicht angewendet werden kann.

Ergebnis: *Mit Hilfe einer elektrostatischen Feldkopplung zwischen einem kreisenden Pendel und einem zweiten Oszillator kann ein Analogon des Mitbewegungseffektes demonstriert werden.*

8. Überraschungsversuch mit magnetisch gekoppelten Doppelpendeln

Der unter 1. beschriebene Überraschungsversuch kann auch mit 2 Doppelpendeln durchgeführt werden, von dem die Pendelkörper des einen Paares Magnete enthalten. In der äußeren Form sind die 4 Pendelkörper nicht zu unterscheiden.

9. Magnetisch gekoppelte Wellenmaschinen

Für die unter 4. und 5. beschriebenen Wellenmaschinen kann man auch Magnetkörper verwenden. Der Kopplungsgrad läßt sich ohne mechanische Eingriffe am besten variieren, wenn Spulen (mit oder ohne Eisenkern) an Stelle der Magnete benutzt werden, indem man die Stromstärke ändert. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6 dargestellt. Die Kopplung kann durch Ausschalten des Gleichstromes aufgehoben werden.

10. Mitbewegung durch magnetische Kopplung

Der unter 8. dargestellte Mitbewegungseffekt läßt sich ebenfalls unter Verwendung magnetisch gekoppelter Körper durchführen. Bei gekoppelten Schwingungssystemen treten u. U. Resonanzen auf, beispielsweise bei der Mitbewegung eines anderen schwingungsfähigen Gebildes. Resonanzkurven, je man mit schwingenden Magneten aufnimmt, wobei die Anregung durch einen rotierenden Magneten bewirkt wird, sind in [3] dargestellt.

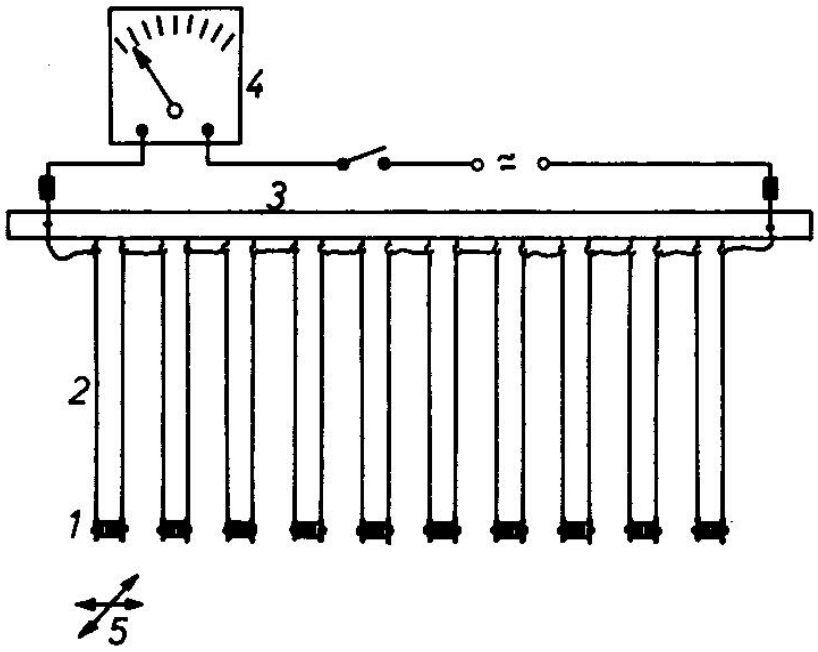

Abb. 6: Magnetisch gekoppelte Wellenmaschine:

1. Kleine Spulen mit Kern;
2. Stromzuführung und Aufhängung (isolierte Litze);
3. Holzstab mit Haken;
4. Stromanzeiger;
5. In Frage kommende Anstoßrichtungen.

Für die vorstehend beschriebenen Versuche zur Feldkopplung wurden im wesentlichen Weihnachtsbaumkugeln verwendet. Es sei darauf hingewiesen, daß diese Kugeln für vielseitige Versuchszwecke auf den Gebieten Mechanik, Elektrostatik und Atomphysik verwendet werden können [4], wobei z. T. quantitative Versuchsdurchführungen (beispielsweise zum 2. Keplerschen Gesetz) möglich sind. Über den Einsatz dieser Kugeln als meßtechnische Hilfsmittel für Schulzwecke wird demnächst berichtet.

Herrn *M. Gläser* sei für das Anfertigen der Zeichnungen und für Mithilfe bei den Experimenten gedankt.

Literatur:

[1] *Pohl, R. W.:* Einführung in die Mechanik, Akustik und Wärmelehre. 10. u. 11. Aufl., Springer-Verlag, Berlin 1947, S. 204

[2] *Gerth, E.* und *H. Melcher:* Pendelkopplung durch Felder, EXPERIMENTELLE TECHNIK DER PHYSIK 1964/2, S. 135 bis 138

[3] *Christlein, G.:* Physikalische Experimente im Bild – Bayerischer Schulbuch-Verlag, München 1965, S. 33

[4] *Melcher, H., Gläser, M., Gerth, E.:* Experimente mit versilberten Hohlkugeln – PHYSIK IN DER SCHULE 1964/9, S. 404-409; 10, S. 447-457; 11, S. 500-504