

Schwingungseffekt eines Pfennigs

1. Entdeckung und Vorphase

Der in dieser Arbeit beschriebene, sehr ungewöhnliche und überraschende Schwingungseffekt wurde von mir nicht bei systematischen Untersuchungen zu einem vorher festgelegten Ziel entdeckt, sondern während einer schöpferischen Pause wie folgt: Unter meinen in großer Zahl verfügbaren Objekten aus alten, von mir zerlegten technischen Geräten befand sich u.a. ein sehr kräftiger Permanentmagnet aus einer alten Festplatte, der inmitten des kreativen Chaos zufällig auf meinem Schreibtisch lag. Da ich gerade nichts Besseres zu tun hatte, spielte ich mit einem ebenfalls zufällig herumliegenden Feuerzeug herum. Mit diesem erhitze ich einen Pfennig, den ich aus Langeweile in den Fingern drehte. Wie zu erwarten, wurde mir der Pfennig rasch zu heiß. Da keine geeignete Halterung oder Unterlage zur Hand war, heftete ich den Pfennig kurzerhand an die Stirnseite des Magneten, jedoch nicht mit der Fläche, sondern dem schmalen Rand, wodurch der Pfennig senkrecht vom Magneten abstand. Weiter meinem Spieltrieb folgend, erhitze ich den am Magneten befindlichen Pfennig erneut, diesmal jedoch ohne Gefährdung meiner Finger (Abb. 1). Ohne dass ich recht mitbekam weshalb, fing der Pfennig plötzlich an, mit einer beträchtlichen Amplitude vertikal auf und ab zu schwingen. Das Schwingen ließ sich durch weiteres Heizen beliebig lang aufrechterhalten, der Pfennig kam nach Entfernen der Flamme erst geraume Zeit später, offensichtlich beim Erkalten, zur Ruhe. Meine Überraschung war groß, und ich hatte sofort die Idee, diesen unerwarteten Vorgang näher zu untersuchen.



Abb. 1

2. Erste systematische Untersuchungen

Bei weiteren Versuchen erwies sich der Effekt als reproduzierbar. Ich wollte den schwingenden Pfennig mit etwas Nützlichem verbinden, also montierte ich die Glockenschale einer kleinen Klingel in geeignetem Abstand über den Pfennig, sodaß dieser während des Schwingens die Klingel betrieb (Abb. 2). Für mich war dies der Beweis, dass der schwingende Pfennig in der Lage war, mechanische Energie abzugeben. Woher aber kam diese Energie? Wie war wohl der Wirkungsgrad dieses Maschinchens? War hier womöglich eine vollständige Umsetzung der zugeführten Wärme in mechanische Energie gelungen?



Abb. 2

2.1 Einflußfaktoren und Schwierigkeiten

Im Verlaufe weiterer Versuche mit dem Festplattenmagneten vermerkte ich zunehmend Probleme mit dem Schwingungseffekt, der sich immer schwerer auslösen lies. Zudem machte der

Pfennig selbst Probleme, da dieser aufgrund seines schmalen Rands beim Schwingen immer öfter umkippte. Offensichtlich war das vermehrte Umkippen darauf zurückzuführen, dass der heisse, schwingende Pfennig auf der Oberfläche des mit einem weissen Lack überzogenen Magneten eine allmählich tiefer werdende Spur von verkohltem Lack hinterlies. Da aus der Festplatte noch drei andere, typgleiche Magneten vorhanden waren, konnte ich diese zunächst weiter verwenden. Da allerdings dieselbe nachteilige Veränderung der Oberfläche zu befürchten war, wollte ich aus Sparsamkeitsgründen die Oberfläche des ersten Magneten regenerieren und glätten. Das vorsichtige Abschleifen des verkohlten Lacks war jedoch leider erfolglos: der Pfennig wollte auf der nunmehr geglätteten Oberfläche auch nicht mehr schwingen. Ich versuchte nun, den Effekt mit anderen Magneten auszulösen, z.B. mit solchen aus Lautsprechern, Motoren oder anderen Geräten. Auch diese Anstrengungen zeigten keinerlei Erfolg. Offenbar trat der Schwingungseffekt nur mit neuen, unversehrten Magneten aus dieser Festplatte auf, welche eine weiß lackierte, einwandfreie Oberfläche aufwiesen. Was war an diesen Magneten so besonderes? Ich vermutete, dass eine wesentliche Voraussetzung für das Schwingen eine sehr glatte Oberfläche des Magneten sei und dachte daher, eine dünne, vor dem Magneten angebrachte Glasscheibe (Objektträger) würde das Problem lösen. Jedoch auch dieser Versuch mißlang. Zudem war das Glas gar nicht so glatt, wie ich zunächst erhofft hatte. Dies zeigte sich unter anderem daran, dass beim Anschubsen des (kalten!) Pfennigs Geräusche auftraten und der Pfennig nur sehr kurz nachschwang, viel kürzer als auf dem lackierten Festplattenmagneten. Auf letzteren bewegte sich der Pfennig auch völlig geräuschlos. Wahrscheinlich dämpfte der Lack die Unebenheiten des Pfennigrands. Im übrigen war auch die Verwendung eines Aluminiumblechs mit ausgesucht glatter Oberfläche anstelle des Objektträgers nicht erfolgreich.

Eine systematische Untersuchung des Schwingungseffekts schien mittlerweile außer Reichweite, da der Effekt mangels Verfügbarkeit weiterer Magneten vom gleichen Typ nicht mehr wiederholbar war.

2.2 Durchbruch

Nach einigem Grübeln wurde mir jedoch immer klarer, dass zur weiteren Untersuchung des Effekts wohl ein hitzebeständiger und elastischer Lack vonnöten war. Nachdem ich diesbezüglich meinen Physiklehrer um Rat bat, empfahl er mir, es doch mal mit Heizkörperlack zu versuchen. Also besorgte ich Heizkörperlack (Glasurit Heizkörper Alkydharz-Lackfarbe) und überzog damit einen Objektträger aus Glas, hinter welchen ich den Magneten positionierte (Abb. 3). Nun konnte der Pfennig problemlos und mit ziemlich großer Amplitude zum Schwingen gebracht werden! Die Amplitude war sogar größer als beim Schwingen direkt auf dem Magneten, da die Unterlage, auf der der Pfennig nun abrollen konnte, breiter war als der relativ schmale Rand des Magneten. Auch der zuvor erfolglose Versuch, die Magnetoberfläche durch Abschleifen zu regenerieren, war nach dem zusätzlichen Anbringen einer frischen Lackschicht nun von Erfolg gekrönt. Weitere Untersuchungen mit dem Objektträgersystem ergaben, dass die Schwingung nicht nur vertikal, sondern nach Drehen des Magneten um 90° auch horizontal möglich war. Genauere Beobachtungen ergaben, dass bei einer frisch lackierten und getrockneten Oberfläche die Amplitude zunächst relativ klein war, sich aber mit zunehmender Ausdehnung der beim Kontakt mit dem abrollenden heissen Pfennig sich bildenden, braun-schwarzen Spur auf dem Lack vergrößerte. Offensicht-



Abb. 3

lich war für ein effektives Schwingen nicht eine frische Lackoberfläche, sondern eine durch Hitzeeinwirkung pyrolysierte Lackstelle notwendig.

Gab es eine Obergrenze für die Temperatur des Pfennigs beim Schwingen? Diesbezügliche Experimente mit starkem Aufheizen zeigten eine ständige Zunahme der Amplitude, bis der Pfennig zuletzt herunterfiel. Die Ursache hierfür konnte der temperaturbedingte Verlust des Ferromagnetismus sein, oder eben die zu starke Amplitude, durch welche der Pfennig außerhalb des Anziehungsbereichs des Magneten geriet und dann herabfiel. Letzteres erwies sich als zutreffend, da ein sehr stark erhitzter Pfennig vom Magneten in Ruhestellung immer noch gut festgehalten wurde.

2.3 Weitere Optimierungen

Ein Nachteil des Objektträgersystems war, dass der Lack durch den heißen Pfennig zwar vorübergehend in den richtigen Zustand überführt wurde, d.h. braun-schwarz angekohlt wurde, jedoch die Lebensdauer dieser offenbar idealen Schicht infolge weiter fortschreitender Verkohlungs nur sehr begrenzt war. Dadurch kippte der Pfennig während des Schwingens immer öfter um und zerstörte damit zusätzlich die Oberfläche im Umkreis. Um hier Abhilfe zu schaffen, verwendete ich statt des Objektträgers ein mit Heizkörperlack überzogenes 2 mm starkes Aluminiumblech, welches aufgrund seiner guten Wärmeleitfähigkeit die Lackschicht in ausreichendem Masse kühlte und damit schonte. Der Fortschritt war enorm: die Lackschicht hielt nun selbst einen dunkelrot glühenden Pfennig aus, ohne dass dieser durch die Oberflächenveränderungen umkippte. Anstelle von Aluminium testete ich auch lackiertes, gut wärmeleitendes Kupferblech, welches ebenfalls gute Resultate zeigte. Trotzdem blieb ich für die weiteren Versuchen bei Aluminiumblech, welches mir in größeren Mengen und ausreichender Dicke zur Verfügung stand. Parallel zur Verwendung von lackiertem Aluminiumblech testete ich auch Teflon (als Teflonband mit einem unterlegten Objektträger als Stütze, sowie in Form einer ca. 2 mm dicken Teflonplatte) als ganz lackfreies Trägermaterial. Die Idee dahinter war, die gute Hitzebeständigkeit von Teflon sowie dessen Elastizität auszunützen. Das Ergebnis war überraschenderweise praktisch völlig negativ. Auf Teflon wurden so gut wie keine Schwingungen beobachtet!

Wiederholte Lackierungen neuer Bleche und damit durchgeführte Versuche zeigten, dass nach dem Lackieren gut und lange (ca. 1 Woche) getrocknet werden muss, da sonst der Lack durch den Kontakt mit dem heißen Pfennig Blasen wirft und sich dann teilweise ablöst und auch am Pfennig kleben bleibt. Festigkeit beim Kratzen mit dem Fingernagel zeigte gute Trocknung an. Später fand ich heraus, dass nach dem Lackieren die beschleunigte Trocknung auch über einige Stunden bei 120°C (Backofen) durchgeführt werden kann.

Nachdem nun mit lackiertem Aluminiumblech ein gut funktionierendes System zur Verfügung stand, konzentrierte ich mich auf die Behebung eines noch anhängigen Problems. Der Pfennig kippte nämlich nach wie vor relativ häufig um und zerstörte dadurch die lackierte Oberfläche immer wieder irreparabel, was mich immer wieder zur Verwendung eines neuen Blechs zwang. Das System war einfach noch nicht stabil genug für systematische Untersuchungen. Ich versuchte daher, von dem zu schmalen Pfennig wegzukommen, indem ich mir Eisenscheiben mit verschiedener Breite und unterschiedlichen Durchmessern anfertigen ließ. Der Erfolg war durchschlagend, das entgeltige System war erreicht! Die Eisenscheiben liessen sich nach entsprechender Aufheizung sämtlich problemlos in kräftige Schwingungen versetzen. Neben der Verwendung der breiteren Eisenscheiben anstelle des Pfennigs ersetzte ich auch das bisher benutzte, schlecht kontrollierbare Handfeuerzeug durch einen kleinen Gasbrenner mit gut regulierbarer, schmaler Flamme. Der Austausch des Pfennigs gegen die nun erheblich schwereren Eisenscheiben bedingte auch den Wechsel zu einem kräftigeren Magneten, der nun natürlich

auch ohne lackierte Oberfläche verwendbar war, denn der Lack befand sich ja auf dem vorgelegten Aluminiumblech.

3. Suche nach der Ursache für den Schwingungseffekt

Im Verlaufe weiterer Tests machte ich eine Beobachtung, die unter Umständen zu einer Aufklärung der Ursache des Schwingungseffekts beitragen konnte, denn weshalb dieser überhaupt in dieser Form unter den geschilderten Voraussetzungen auftrat, lag noch ziemlich im Dunkeln. Bei der Verwendung eines relativ kleinen Stücks lackierten Aluminiumblechs zeigte sich, dass sich während des Experiments das Blech stark erhitze, was offensichtlich an dessen geringer Größe und der zu geringen Wärmeableitung lag. Die anfänglich große Amplitude der schwingenden Metallscheibe wurde dabei immer kleiner, bis dieselbe schließlich ganz aufhörte zu schwingen. Nach dem Abkühlen des Blechs konnte der Schwingungsvorgang aber ohne Probleme neu gestartet werden, und das Nachlassen der Schwingungen bis hin zum Stillstand ließ sich während der Aufheizung des Blechs reproduzierbar beobachten. Hieraus war zu schließen, dass für einen erfolgreichen Schwingungsvorgang ein heisses, rundes Objekt, eine lackierte Oberfläche sowie ein relativ kalter Träger notwendig war, damit dabei eine Wärmeübertragung stattfinden konnte. Der Einfluß bzw. die Bedeutung einer weiteren, augenfälligen Komponente des Systems, nämlich die vom Magneten auf die Scheibe ausgeübte Kraft, sowie die Magnetisierbarkeit der Scheibe (und deren Temperaturabhängigkeit) auf den Schwingungseffekt, war bislang aber noch unklar.

Eine weitere, wichtige Beobachtung machte ich bei der Variation der Dicke der Metallscheiben: bei Schwingungsversuchen mit der breitesten Metallscheibe (Breite: 2 cm, Durchmesser: 2 cm) war der Effekt schlecht auslösbar, wenn die Unterlage nicht vollkommen eben war. Der ungenügende Kontakt war daran erkennbar, dass die angekohte Schwingungsspur auf der Lackoberfläche kleiner war als die Breite der Metallscheibe und nicht rechteckig verlief, sondern unregelmäßig. Offensichtlich war ein guter Kontakt der abrollenden Fläche mit der Lackoberfläche notwendig. Wahrscheinlich stand die treibende Kraft für den Schwingungseffekt in einem direkten Zusammenhang mit der Grenzfläche zwischen Metall und Lackschicht!

Einer der erstaunlichsten Effekte im Zusammenhang mit den schwingenden Scheiben war folgender: wurde die mit voller Amplitude schwingende, heisse Metallscheibe nach Entfernen der Flamme auf eine sehr kleine Amplitude abgebremst (entweder mechanisch oder mittels einer Art Wirbelstrombremse), beschleunigte die Metallscheibe nach Entfernen der Bremse wieder von selbst sehr rasch und erreichte nach kurzer Zeit erneut ihre volle Amplitude. Auch dieser Versuch ließ sich problemlos reproduzieren. Wieder zeigte sich hier eine treibende Kraft, welche auf irgendeine Weise thermische Energie in mechanische Energie überführte.

Wie bereits erwähnt, ergaben die verschiedenen Experimente eine Reihe von Hinweisen darauf, dass die Grenzschicht zwischen Metallscheibe und der Lackoberfläche vermutlich ursächlich war für den Antrieb der Metallscheibe. Trotzdem waren bis zu diesem Zeitpunkt die Bedeutung der Magnetkräfte (sei es hilfsweise oder auch ursächlich) für den Antrieb der Metallscheiben noch unklar. Immerhin war aus



Abb. 4

Variationen der vorhergehenden Versuche schon klar geworden, dass die Stärke des Magnetfelds offensichtlich innerhalb weiter Grenzen keinen wesentlichen Einfluß auf das Funktionieren des Effekts hatte. Möglicherweise war die Funktion des Magnetfelds lediglich die einer Rückstellkraft, die die Metallscheibe immer wieder in die Mitte zog. Wie konnte demonstriert werden, ob für diese Rückstellkraft ein Magnetfeld notwendig war, oder ob auch andere Kräfte verwendbar waren? Eine allgegenwärtige, leicht ausnützbare Kraft war natürlich die Schwerkraft. Nach einigem Überlegen dachte ich mir folgenden Versuch aus: ich befestigte ein zu einem flachen Kreisbogen geformtes, lackiertes Stück Aluminiumblech in horizontaler (!) Lage, und stellte die Metallscheibe aufrecht in deren tiefste Stelle. Durch die Schwerkraft wurde die Metallscheibe sanft auf den Lack gedrückt, und kehrte nach mechanischer Auslenkung und einigem Hin- und Herrollen wieder in die Ruhestellung an der tiefsten Stelle zurück (Abb. 4). Nun erhitze ich die ruhende Scheibe wie gewohnt mit dem Gasbrenner und gab ihr einen minimalen Schubs. Die Spannung war groß: würde die Scheibe nun ebenfalls anfangen zu schwingen, d.h. auf dem gekrümmten Blech hin und her rollen? Zu meiner großen Freude und Überraschung konnte ich nach kurzer Zeit eine mit immer größer werdender Amplitude hin- und herrollende Metallscheibe beobachten. Dies konnte ich nun als Beweis dafür sehen, dass das Schwingen auch in der vertikalen Anordnung am Magnetsystem offensichtlich durch einen reinen Grenzflächeneffekt bewirkt wurde, für den der Magnet lediglich die Hilfsfunktion einer Rückhaltekraft hatte!

4. Erklärungsversuch

Worin bestand dieser rätselhafte, sehr wirksame Grenzflächeneffekt nun aber genau? Was bewirkte der für das Schwingen offenbar notwendige, starke Temperaturunterschied zwischen Scheibe und lackierter Unterlage? Stoffe dehnen sich beim Erhitzen aus. Folglich würde sich die Lackschicht durch den Kontakt mit der heißen Metallscheibe ausdehnen und könnte so auf dieselbe eine Kraft ausüben (Abb. 5). Dass durch die Ausdehnung der Lackschicht aber die Scheibe nicht einfach nur ein wenig emporgehoben wird, sondern diese Kraft gerichtet, nämlich in Rollrichtung wirkt und damit die Scheibe antreibt, könnte dadurch erklärt werden, dass die Ausdehnung des Lacks an der Kontaktstelle infolge einer minimalen Zeitverzögerung immer etwas hinter der (aus Bewegungsrichtung gesehen) Kontaktstelle der rollenden oder schwingenden Scheibe auftritt und somit die Scheibe gewissermaßen wie eine Art sich fortbewegender Oberflächenwelle vor sich her treibt. Eine gut wärmeleitende Unterlage war offensichtlich deshalb notwendig, damit der ausgedehnte Lack in sehr kurzer Zeit, d.h. vor dem Wiederrückkehren der Scheibe, seine Wärme wieder an die Unterlage abgeben konnte und sich dadurch rechtzeitig wieder zusammenziehen konnte. Aufgrund der beobachteten Schwingungsfrequenz (geschätzter Wert > 5 Hz) mußten die Ausdehnungs- und Schrumpfungszyklen von extrem kurzer Dauer sein (msec-Bereich).

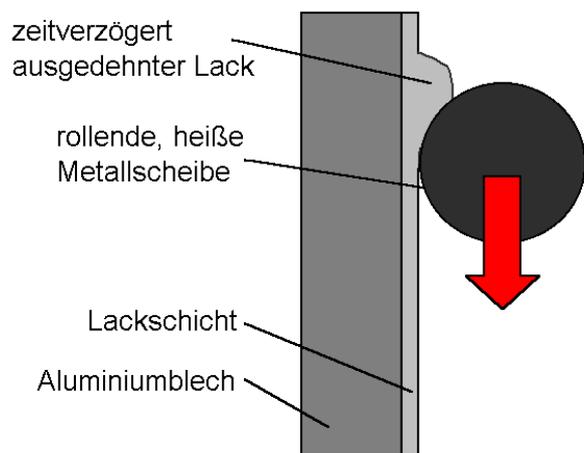


Abb. 5

Nachdem nunmehr das Know-How für eine stabil und reproduzierbar arbeitende Versuchsanordnung erarbeitet war, und auch eine plausible Erklärung des Schwingungseffekts gefunden war, wollte ich diesen vollends systematisch mit exakten Messungen der verschiedenen Parameter wie Temperatur der Eisenscheibe, Frequenz sowie Amplitude der Schwingung untersu-

chen. Hierzu entwickelte ich eine dafür geeignete Versuchsanordnung, die im folgenden beschrieben ist.

5. Beschreibung des Versuchsaufbaus

Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abb. 6 wiedergegeben, der reale Versuchsaufbau ist den beiden Fotos in Abb. 7 und 8 zu entnehmen. Das Kernstück der Anlage besteht aus aus einem Holzbrett mit einem stabilen Rahmen aus Holzleisten, an welchen zwei Aluminiumwinkel montiert sind. An letztere sind zur besseren Ableitung der zugeführten Wärme

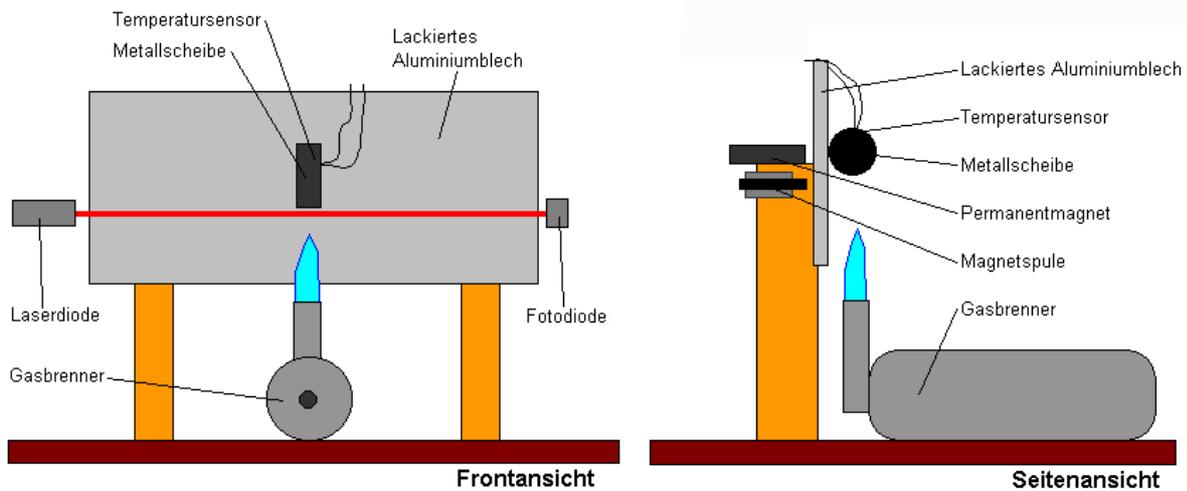


Abb. 6

zwei aus Aluminium bestehende Vierkantprofile angeschraubt. Das als Unterlage für die schwingende Metallscheibe dienende, lackierte Aluminiumblech (250x70x2 mm) wird in vertikaler Position mit zwei kräftigen Klammern fest an die Aluminiumschienen gepresst. Zum Schutz der Holzplatte bei evtl. herabfallenden, schwingenden, heißen Metallscheiben ist diese teilweise durch ein Aluminiumblech abgedeckt. Der die Metallscheibe aufheizende Gasbrenner befindet sich in horizontaler Lage unterhalb dieser auf einem verschiebbaren hölzernen Schlitten.

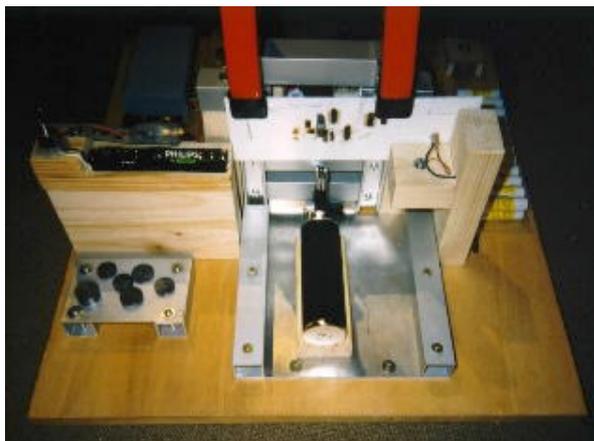


Abb. 7



Abb. 8

Zur Messung der drei wichtigsten Parameter Schwingungsfrequenz, Amplitude und Temperatur wurden in einer Serie von Vorversuchen folgende Vorgehensweisen herausgearbeitet:

5.1 Schwingungsfrequenz

Die Schwingungsfrequenz ließ sich sehr gut mit Hilfe einer knapp unterhalb der ruhenden Scheibe montierten Lichtschranke messen, welche aus einer Laser- sowie einer Fotodiode besteht. Der beim wechselweisen Beleuchten und Verdunkeln der Fotodiode während des Schwingens sich periodisch ändernde Widerstand der Fotodiode wird durch einen Transistor verstärkt (siehe elektronisches Schaltschema im Anhang). Die Empfindlichkeit der Lichtschranke läßt sich dabei durch ein $100\ \Omega$ Drehpotentiometer stufenlos einstellen und mit einem Drehspulinstrument kontrollieren. Dieses verstärkte Signal schaltet ein Relais mit einem doppelten Schalter. Das hierdurch geteilte Signal wird einerseits zu Kanal 1 eines 12 Bit-Datenerfassungsgerät (8-Kanal Analog-Digital-Wandler) geleitet, das andere, identische Signal wird zu einem elektronischen Fahrrad-Tachometer geführt. Dieser ist auf $1/3.6\ \text{m}$ (= 27.8 cm) Radumfang eingestellt, sodass die aktuelle Schwingungsfrequenz auf letzterem direkt digital abgelesen werden kann. Für die Umwandlung des sich periodisch ändernden Signals auf eine direkt am Fahrradtacho ablesbare Frequenz ist das Relais notwendig, da die Funktionsweise des Fahrradtachos im Prinzip auf der Einspeisung von Rechteckimpulsen beruht. Als weiteres Vorteil des zwischengeschalteten Relais ist das sauberere und leichter auswertbare Signal zu sehen, welches vom Datenerfassungsgerät über eine serielle Schnittstelle zum auswertenden Computer übertragen wird.

5.2 Schwingungsamplitude

In einer sich in etwa 2 cm Abstand auf der Rückseite der Anlage befindlichen Magnetspule (Quelle: alter Videorecorder) mit Eisenkern wird durch die schwingende Metallscheibe eine Wechselfeldspannung induziert, deren Größe indirekt von der Amplitude der schwingenden Scheibe abhängt. Je größer nämlich die Amplitude, umso schneller bewegt sich die Scheibe jeweils durch den Mittel- bzw. Nullpunkt der Schwingungsbahn, und umso größer ist damit die induzierte Spannung. Die in der Spule induzierte Spannung wird durch einen Operationsverstärker vom Typ CA3140E oder CA3160E um den Faktor 75 verstärkt und auf Kanal 2 des oben erwähnten Datenerfassungsgeräts geleitet. Ein typisches Ergebnis einer Messung ist in Abb. 9 und 10 zu sehen. Für die Interpretation der Kurven ist zu beachten, dass die Schwingungsmaxima bzw. -minima des Meßsignals nicht den maximalen Auslenkungen der Scheibe nach oben bzw. nach unten entsprechen, sondern vielmehr dem Rollen der Scheibe durch den Mittelpunkt bei maximaler Geschwindigkeit. Wichtig für die Interpretation der Amplitudenkurven ist ferner, dass der Durchgang des aufsteigenden Kurventeils durch die Schaubildmitte dem unteren Umkehrpunkt der schwingenden Scheibe entspricht, und der absteigende Kurventeil dem oberen Umkehrpunkt. Diese Zuordnung ermittelte ich, indem ich die Scheibe langsam mit dem Finger bewegte und dabei den Kurvenverlauf genau beobachtete. Obwohl die beobachteten, auf den ersten Blick sinusförmigen Wellen eine harmonische Schwingung nahelegten, handelt es sich im vorliegenden Fall mit Sicherheit nicht um eine solche. Die auf die Scheibe ausgeübte Kraft wächst nämlich nicht proportional zur Auslenkung wie bei einer harmonisch schwingenden Feder, sondern wird im Gegenteil kleiner, da die Magnetkraft mit zunehmender Entfernung schwächer wird. Außerdem ist wegen der in einiger Entfernung von der Spule auf und ab rollenden Scheibe noch die Geometrie der Meßanordnung zu berücksichtigen, weshalb in die Kraftberechnung auch der Cosinus des Winkels zwischen Scheibe, Magnet und der Rollrichtung eingeht. Obwohl eine Proportionalität zwischen Amplituden der Meßkurve und der Scheibe daher wohl nicht ge-

geben ist, erlaubt die Meßanordnung dennoch nützliche und aufschlußreiche qualitative und relative Aussagen im Zusammenhang mit den Schwingungsvorgängen.

5.3 Temperatur

Zur Temperaturmessung verwendete ich ein selbstgebautes Thermoelement aus zwei verdrehten und mit Hartlot überzogenen Konstantan- und Kupferdrähten. Dieses liefert bei Rotglut eine Spannung von ca. 40 – 50 mV. Da diese Spannung für die direkte Einspeisung in das Datenerfassungsgerät, welches einen Meßbereich bis 5 V umfaßt, relativ klein ist, verstärkte ich das Signal mit einem weiteren Operationsverstärker vom selben Typ wie für die Amplitudenmessung um den Faktor 75. Das Thermoelement steckte ich in ein in die jeweilige Metallscheibe zentrisch gebohrtes Loch, zur Ableitung der erzeugten Spannung wurden direkt die sehr dünnen und ausreichend langen Drähte des Thermoelements verwendet. Der Schwingungseffekt der Metallscheiben wird durch die angeschlossenen Drähte nur geringfügig beeinträchtigt.

Die von den Sensoren für Amplitude und Temperatur via Datenerfassungsgerät auf den PC geleiteteten und dort dargestellten Spannungen zeigten anfänglich verschiedene sehr starke, dem Meßsignal aufgeprägte Störimpulse, deren Ursache vermutlich in den allgegenwärtigen Magnetfeldern aus der Umgebung stammten. Abhilfe schafften hier zwei Kondensatoren zwischen den Polen der jeweiligen Eingänge der Operationsverstärker. Ein weiterer Kondensator befindet sich zwischen den beiden Polen der Magnetspule des Relais, um die beim Abfallen der Kontakte des Relais induzierte Störspannung zu unterdrücken.

5.4 PC-Programm

Die vom Datenerfassungsgerät auf den PC transferierten Signale für Frequenz, Amplitude und Temperatur wertete ich mit einem selbst geschriebenen Pascal-Programm aus. Da das Programm zur exakten Datenerfassung und –auswertung die komplette Prozessorzeit benötigt, läuft dieses Programm nicht einwandfrei unter Multitasking-Umgebungen wie Windows 95, sondern nur unter DOS. Das Programm vermag die Eingangssignale für Frequenz, Temperatur und Amplitude, sowie die jeweils ausgewerteten Signale auf dem Bildschirm als Schaubild darzustellen. Die Signale werden über die Statusleitungen der RS232-Schnittstelle empfangen und vom Programm abgefragt. Das Eingangssignal der Frequenz besteht aus Rechteckimpulsen. Deren Breite ermittelt das Programm während der Messdatenerfassung laufend und berechnet daraus die Frequenz. Das Signal der Amplitudenmessung ist eine periodische Welle, deren größte Auslenkung ein Maß für die Amplitude ist. Das Programm berechnet wiederum aus dem Kurvenverlauf die Maxima und gibt diese als relatives Maß für die Amplitude aus. Die Amplitude wird erhalten, indem das Programm innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls von 0.2 sec den jeweils größten und kleinsten Wert des Meßsignals ermittelt und anschließend die Differenz aus diesen Werten berechnet. Zur Glättung des ausgewerteten Signals wird jeweils der Mittelwert aus 4 hintereinander erfolgenden Schwingungsamplituden gebildet. Das Signal der Temperaturmessung bedarf keiner Aufbereitung, sondern mußte lediglich richtig skaliert werden. Hierzu eichte ich das Thermoelement mit Hilfe eines Quecksilberthermometers bei einer Reihe verschiedener Temperaturen (0°C für schmelzendes Eis, 21.5°C für Raumtemperatur, 100°C für kochendes Wasser, sowie 125°C, 179°C und 245°C in erhitztem Glycerin). Der Plot des verstärkten Signals gegen die Temperatur erwies sich als praktisch linear.

Zur externen Steuerung des Programms befinden sich auf der Arbeitsplatte der Versuchsanordnung ein Drucktaster sowie ein 10 k Ω Potentiometer. Mit letzterem kann die Zeitachse am Bildschirm stufenlos eingestellt werden. Einer der Drucktaster erlaubt das Speichern des aktuellen Bildschirms im .BMP-Format. Die Umschaltung des am Bildschirm dargestellten Signals

(Primärmeßsignale für Frequenz, Amplitude und Temperatur, die entsprechenden ausgewerteten Signale sowie gleichzeitige Darstellung aller Signale) erfolgt über die PgDn- bzw. die PgUp-Taste am PC.

6. Ergebnisse

6.1 Primärmeßsignale

Einige mit der beschriebenen Meßanordnung erhaltene, typische Ergebnisse unter Verwendung der schwingenden Scheibe Nr. 5 (Durchmesser 2 cm, Breite 1 cm, siehe Tabelle 1 unten) sind in den folgenden Abbildungen zu sehen. Die Abb. 9 und 10 zeigen das Primärsignal der Ampli-

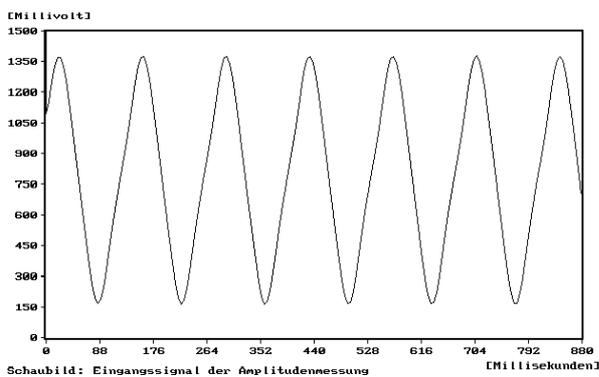


Abb. 9

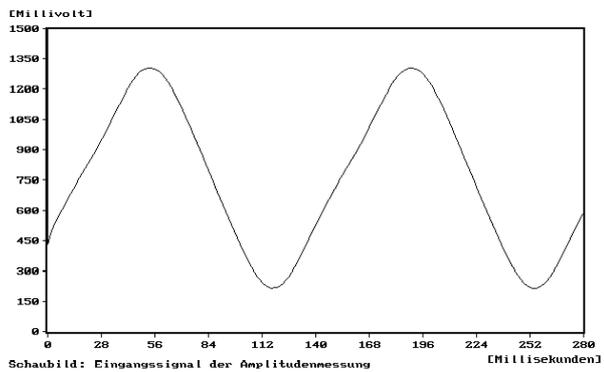


Abb. 10

tudenmessung einer ungedämpft schwingenden Eisenscheibe in zwei unterschiedlichen zeitlichen Spreizungen (zur Interpretation der Kurven siehe Beschreibung der Meßanordnung weiter oben). Im starken Gegensatz hierzu steht die in Abb. 11 gezeigte Kurve, welche durch einmaliges mechanisches Auslenken der kalten Eisenscheibe erhalten wurden. Die Amplitude der kalten schwingenden Scheibe in Abb. 11 nimmt rasch ab, die Schwingung kommt nach ca. 3 sec zum Stillstand. Bei der ungedämpften Schwingung in Abb. 9 hingegen ist bei fortwährender Beheizung praktisch keine Veränderung der Amplitude sichtbar.

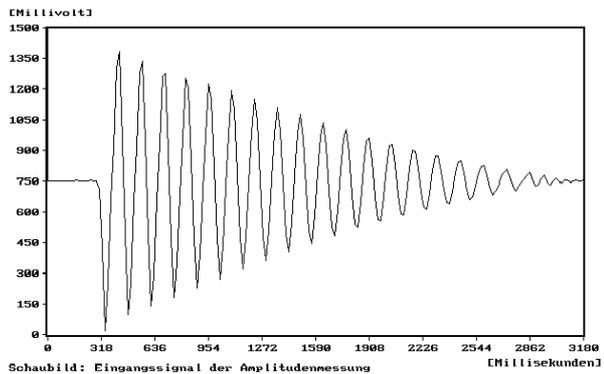


Abb. 11

Bei sehr starker Aufheizung der Scheibe ergab sich ein interessanter Einfluß auf die Form der Amplitudenkurve (siehe Abb. 12), welche nun jeweils beim Durchgang durch die Mitte des Schaubilds eine auffällige Unregelmäßigkeit aufwies. Die Lage dieser Unregelmäßigkeit in der Mittelstellung der Amplitudenkurve entspricht – wie weiter

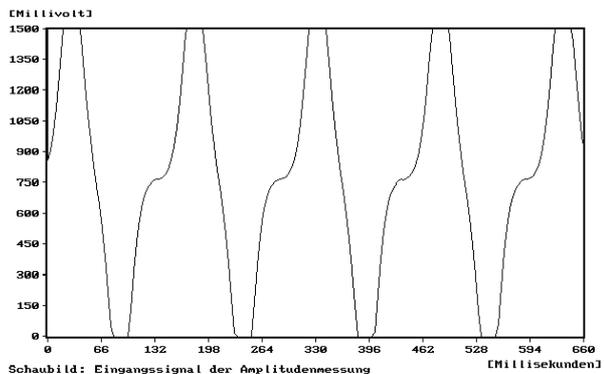


Abb. 12

oben erwähnt - entweder der maximalen oberen oder unteren Auslenkung der schwingenden Eisenscheibe und ist damit auf ein Störung der Schwingung in einer beiden Positionen zurückzuführen. Da sich die Unregelmäßigkeit im aufsteigenden Kurventeil befindet, handelt es sich um den unteren Umkehrpunkt der Scheibe. Eine Erklärung für das auffällige Verhalten an dieser Position könnte sein, dass die bei sehr starker Erhitzung mit besonders großer Amplitude schwingende Scheibe im unteren Umkehrpunkt nur noch sehr schwach vom Magneten angezogen wird. Da diese schwache Anziehungskraft sich beinahe im Gleichgewicht mit der Schwerkraft befindet, kommt die Scheibe für einen mehr oder weniger langen Moment praktisch zum Stillstand. Im oberen Umkehrpunkt hingegen (abfallender Kurventeil) tritt dieser schwerkraftbedingte, momente Stillstand nicht in Erscheinung, da hier die Magnetkraft und die Schwerkraft in derselben Richtung wirken. Der abfallende Kurventeil ist daher über den größten Bereich jeweils praktisch geradlinig.

Die Amplitudenkurve in Abb. 13 zeigt im Gegensatz zu Abb. 9 und 10 eine stark verwackelte Gesamtkurve, welche interessanterweise immer dann beobachtet wird, wenn eine sehr dünne Eisenscheibe auf einer schon stark beschädigten Lackstelle schwingt. Offensichtlich werden die vertikalen Schwingungen durch die unregelmäßige Oberfläche einer solchen Lackstelle gestört (Störungsauslenkungen in horizontaler Richtung sowie Störungen in vertikaler Richtung), was in dem Schaubild mit hoher zeitlicher Auflösung (10 msec-Bereich) sichtbar wird. Dass dieser Effekt bei dickeren Scheiben kaum in Erscheinung tritt, liegt daran, dass diese sich bezüglich solcher horizontal wirkender Störungen stabiler verhalten (breitere Rollfläche) und durch ihre größere Trägheit nicht so stark beeinflusst werden.

Als weiteres Meßsignal neben der Amplitude ist in Abb. 14 das Primärsignal der Frequenzmessung (Lichtschranke mit nachgeschaltetem Relais) zu sehen. Es handelt sich hierbei um ein Rechtecksignal, welches zwischen den beiden Spannungswerten 0 und 3000 mV pendelt. Die Schwingungsfrequenz entspricht direkt einer Periode des Meßsignals. Zur Temperaturmessung siehe den folgenden Abschnitt „Ausgewertete Meßsignale“.

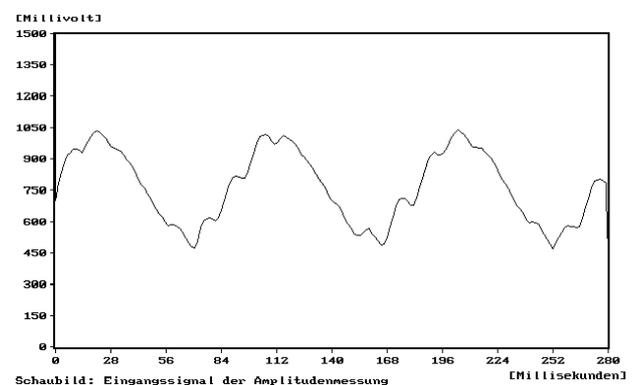


Abb. 13

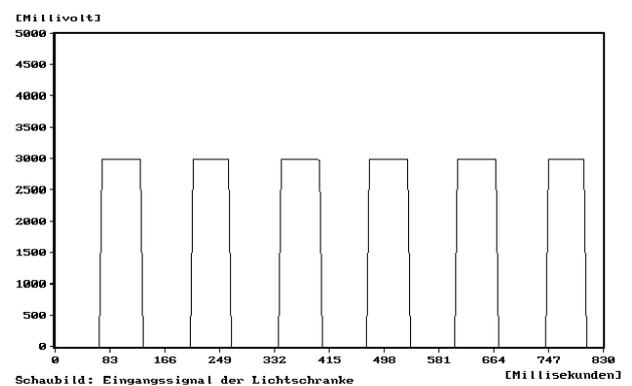


Abb. 14

6.2 Ausgewertete Meßsignale

Eine integrierte Darstellung der ausgewerteten Amplituden- und Frequenzmessung sowie der Temperatur der schwingenden Eisenscheibe Nr. 5 (Tabelle 1) im Verlauf eines typischen Aufheiz- und Abkühlungszyklus ist in Abb. 15 zu sehen.

Abb. 15 ist eine Bildschirmkopie des Auswerteprogramms, welches in diesem Modus die online-Verfolgung aller drei Meßgrößen erlaubt. Auf der Skalierung am linken Rand sind jeweils übereinander die Einheiten der drei Meßgrößen in den entsprechenden Farben der Meßkurven aufgetragen. Für die Amplitude wurden dabei willkürliche Einheiten gewählt, während Tempera-

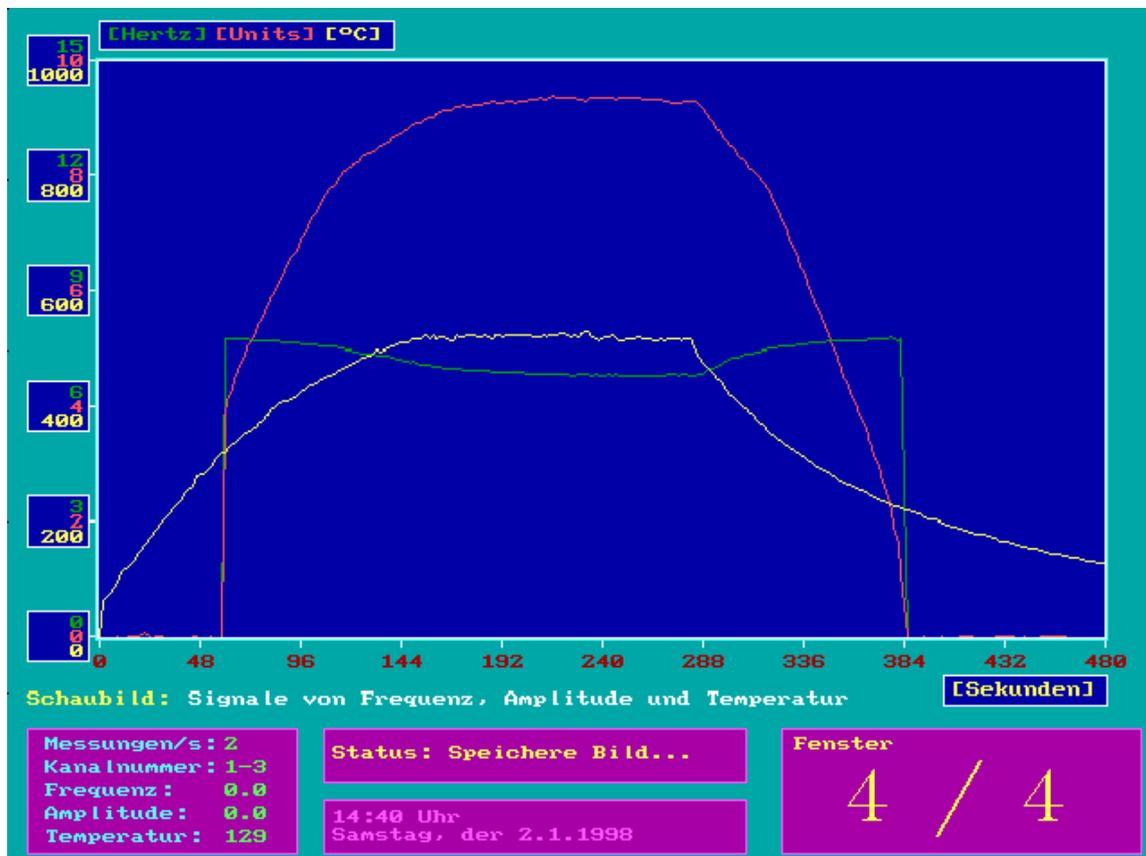


Abb. 15

tur und Frequenz in °C bzw. Hz ausgedrückt sind. Die Primärsignale zu Amplitude und Frequenz werden während der Messung abwechselnd über einen Zeitraum von jeweils ca. 0.3 sec erfasst, vom Programm ausgewertet und gleichzeitig mit der Temperaturmessung dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ sec wurde mit der Beheizung der Scheibe begonnen, entsprechend beginnt die Temperatur zu steigen. Bei ca. 350°C wurde die noch ruhende Scheibe durch leichtes Anschubsen in Bewegung versetzt, was an dem unmittelbar von 0 Hz auf einen Maximalwert springenden ausgewerteten Frequenzsignal zu erkennen ist. Auch das Amplitudensignal springt zunächst von 0 auf einen Anfangswert, der aber bei weiterer Aufheizung noch um mehr als das Doppelte anwächst und wie die Temperatur asymptotisch einem Grenzwert entgegenstrebt. Die Zunahme der Amplitude bei steigender Temperatur ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Ausdehnung der Lackschicht bei steigender Temperatur größer wird und damit die auf die Scheibe ausgeübte Kraft sich ebenfalls erhöht. Interessanterweise sinkt die Frequenz während des weiteren Aufheizens um ca. 10%. Diese Abnahme ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Scheibe nicht harmonisch schwingt, sondern die magnetische Rückstellkraft mit zunehmender Auslenkung kleiner wird. Wird der Gasbrenner abgeschaltet, nimmt die Temperatur wieder exponentiell ab. Gleichzeitig nimmt die Amplitude mit fortschreitender Zeit nicht-linear (d.h. das ausgewertete Amplitudensignal ist im Schaubild nach unten gekrümmt) ab, während die Frequenz wieder infolge einer Abnahme des eben erwähnten Effekts leicht zunimmt. Nachdem die Temperatur auf einen bestimmten Grenzwert gefallen ist, hört die Scheibe ganz auf zu

schwingen, Amplituden und Frequenzsignal fallen beide auf 0 zurück. Im Vergleich zur Nachschwingzeit der nicht beheizten, kalten Scheibe (ca. 3 sec) beträgt die Nachschwingzeit der aufgeheizten Scheibe im vorliegenden Experiment ca. 100 sec und ist damit ca. 30 mal länger als im kalten Zustand.

Analog durchgeführte Experimente mit Scheiben von verschiedenen Durchmessern und Breiten zeigten bei dünnen und kleinen Scheiben (z.B. 15x3 mm) ein etwas abweichendes Verhalten in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Frequenz. Hier konnte man im Gegensatz zu den dickeren Scheiben mit zunehmender Temperatur (bis hin zur Rotglut) nicht eine Abnahme, sondern vielmehr eine Zunahme von ca. 10% beobachten. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Kraftwirkung durch die antreibenden Pulsationen der Lackdicke mit zunehmender Temperatur bei kleineren Durchmessern stärker wird, sich andererseits die Scheibe aber wegen des kleineren Durchmessers nicht so stark vom Magneten entfernt.

Die Ergebnisse einer Reihe von systematischen Untersuchungen mit einer Reihe von Eisenscheiben (inclusive verschiedener Münzen) sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Tabelle enthält neben Größenangaben und Gewicht die Grenztemperatur, bei welcher die Scheibe im Verlauf der Abkühlungsperiode aufhört, zu schwingen. Die Frequenzangabe bezieht sich auf diese Grenztemperatur. Eine Besonderheit ergab sich bei der breitesten Scheibe (Nr. 6), welche aufgrund der Größenrelation von Scheiben- und Magnetbreite nicht vertikal, sondern horizontal schwingt. Wegen der fest angebrachten Lichtschranke war bei der horizontal schwingenden Scheibe eine Frequenzmessung nicht möglich.

Tabelle 1: Ergebnisse von Schwingungsexperimenten mit verschiedenen Eisenscheiben bzw. Münzen

Scheibe Nr.	Durchmesser (mm)	Breite (mm)	Gewicht (g)	Grenztemperatur (°C)				Frequenz Bei Grenztemp. [Hz]
				1.	2.	3.	Mittelwert	
1	15	3	4.7	-	-	-	-	11.9
2	15	5	7.8	(250)	(255)	(253)	(253.7) ¹⁾	9.8
3	20	3	6.8	-	-	-	-	10.7
4	20	5	11.6	-	-	-	-	9.3
5	20	10	22.8	328	332	329	324.3	7.8
6	20	20	45.1	318	321	313	317.3	- ²⁾
1 Pf.	16	1	2.0	-	-	-	-	15.7
2 Pf.	19	1	2.9	-	-	-	-	14.4
10 Pf.	21	2	4.0	-	-	-	-	13.0

¹⁾ Temperaturfühler steckt nicht vollständig in der Scheibe wegen zu geringer Breite

²⁾ Schwingungsrichtung horizontal, keine Frequenzmessung möglich

Eine Temperaturmessung war wegen des relativ langen Temperaturfühlers nur bei Scheiben mit einer Breite ab 10 mm möglich, die in der Tabelle in Klammern eingetragenen Temperaturwerte für die 5 mm breite Scheibe (Nr. 2) sind wahrscheinlich zu niedrig, da das Thermoelement hier teilweise aus dem Bohrloch der Scheibe herausragte. Wie aus den Zahlenwerten der Tabelle zu ersehen, sind die Messungen der Grenztemperatur recht gut reproduzierbar. Außerdem scheint die Grenztemperatur trotz der unterschiedlichen Schwingungsrichtung unabhängig von der Breite der Scheiben (Nr. 5 und 6) zu sein. Ein Vergleich der beiden Scheiben Nr. 1 und 2 zeigt bei gleichem Durchmesser für die schmalere Scheibe die höhere Frequenz, die gleiche Abhängigkeit zeigt sich bei den Scheiben Nr. 3-5, bei welchen die Frequenz mit zunehmender Breite gleichförmig abnimmt. Bei den mituntersuchten drei Münzarten war eine Temperatur-

messung wegen ihrer geringen Breite nicht möglich. Alle drei Münzen zeigten Schwingungsfrequenzen, die über denen aller anderen Eisenscheiben lagen, alle drei Münzen waren auch leichter als die leichteste Eisenscheibe (Nr. 1).

Ein grafische Auftragung der Frequenz aller untersuchten Scheiben gegen deren Gewicht ist in Abb. 16 dargestellt. Dabei zeigt sich mit abnehmendem Gewicht bei Werten < ca. 5 g eine nahezu lineare Zunahme der Frequenz, während sich die Frequenz umgekehrt bei großen Gewichtswerten offensichtlich einem unteren Grenzwert nähert.

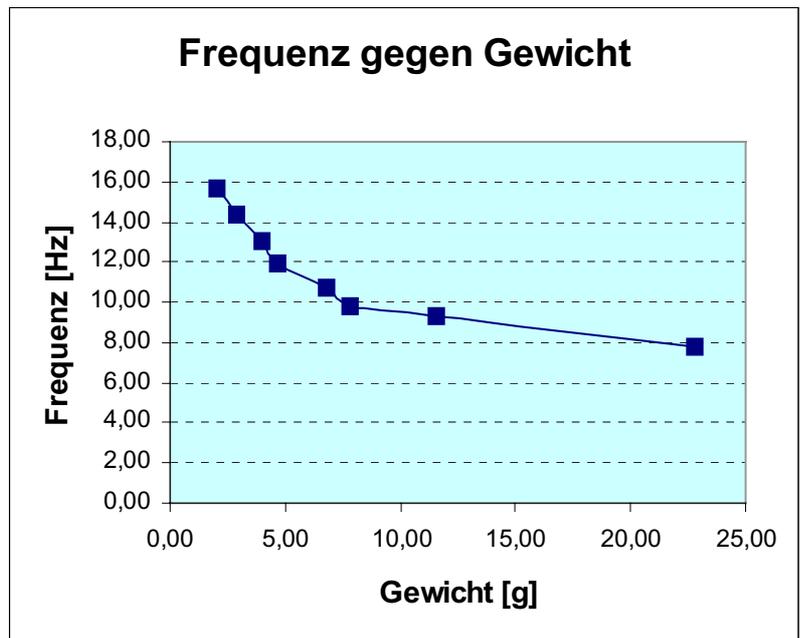


Abb. 16

7. Ausblick

Die in dieser Arbeit beschriebene Versuchsanordnung erlaubte die messtechnische Erfassung der wichtigen Größen des Schwingungseffekts. Im Rahmen einer Fortführung der Arbeit könnte der Einfluß verschiedener Lackarten auf den Effekt untersucht werden. Der vorgeschlagene Mechanismus (pulsierende Lackschicht) könnte durch eine genauere Untersuchung der Vorgänge in der Grenzfläche, z.B. mit Hilfe eines Mikroskops und einer zeitlich hochauflösenden Kamera, bestätigt werden. Um den Wirkungsgrad des Systems, d.h. die direkte Umsetzung von thermischer in mechanische Energie, zu verbessern, könnte der Lack durch Materialien ersetzt werden, die sich bei Erhitzung noch stärker ausdehnen, weniger Wärme aufnehmen, temperaturbeständiger sind und eine bessere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Eine interessante Perspektive wäre die Frage, ob sich der Schwingungseffekt mit einer geeigneten Konstruktion in eine Drehbewegung überführen ließe, um damit einen thermisch angetriebenen Motor zu bauen.