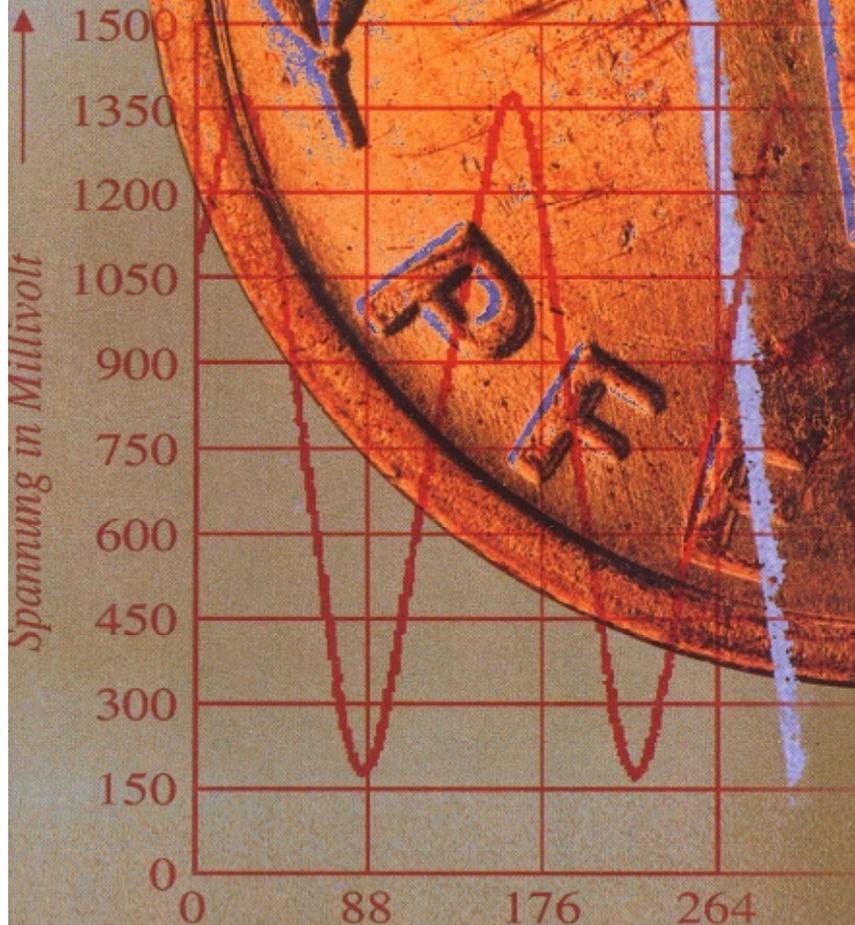


# junge wissenschaft

## young researcher

Jugend forscht in Natur und Technik/ The European Journal of Science and Technology

Heft 56



## Schwingungs- effekt eines Pfennigs

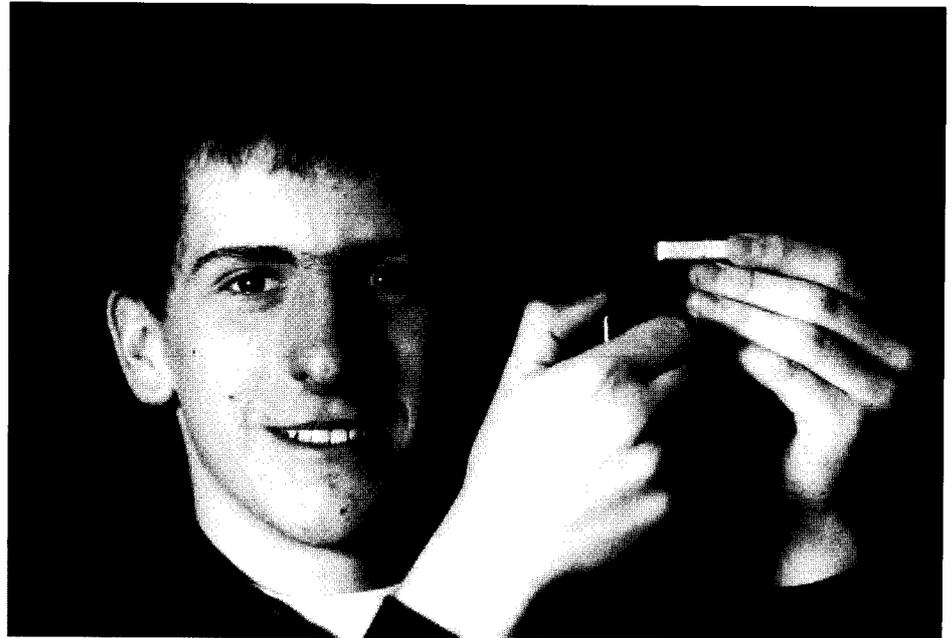
Unsichtbare Regenbögen  
 Untersuchungen an simulierten  
 Solar-Luftkollektoren  
 Blaualgen und Umwelteinflüsse  
 Leitbündelevolution bei Farnen  
 Vom stumpfen Zahn  
 zum Nierenstein  
 Warum werden Milchprodukte  
 bei Zusatz von Ananassaft  
 bitter?  
 Kombi 2 – An approach to  
 soilpreparation and sowing

# Schwingungseffekt eines Pfennigs

JOHANNES HUBER (\* 1980)  
Öhmdwiesenweg 10  
78476 Allensbach

Schule: Humboldt-Gymnasium,  
Konstanz

Eingangsdatum der Arbeit:  
April 1999



Beim Erhitzen eines Pfennigs, welcher mit der Stirnseite an einen lackierten Magneten geheftet ist, gerät dieser in dauerhafte, stabile Schwingungen. Für den Antrieb dieser Schwingungen sind offensichtlich dynamisch ablaufende Vorgänge in der Lackschicht verantwortlich. Mit einer speziellen Versuchsanordnung ließen sich diese Schwingungen systematisch untersuchen.

## 1. Einleitung

Den in dieser Arbeit beschriebenen, sehr ungewöhnlichen und überraschenden Schwingungseffekt entdeckte ich nicht bei systematischen Untersuchungen zu einem vorher festgelegten Ziel, sondern zufällig bei der Beschäftigung mit einem Pfennig, welchen ich, einem Spieltrieb folgend, mit einem Gasfeuerzeug erhitze. Da mir der Pfennig in der Hand schnell zu heiß wurde, heftete ich diesen mit dem schmalen Rand an einen kräftigen, aus einer alten Computer-Festplatte stammenden Permanentmagneten, der gerade zur Hand war. Beim weiteren Erhitzen des Pfennigs mit der Flamme 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 die Idee, diesen unerwarteten Vorgang näher zu untersuchen.

## 2. Erste systematische Untersuchungen

Bei weiteren Versuchen erwies sich der Effekt als reproduzierbar. Da der schwingende Pfennig sogar die Glockenschale einer kleinen Klingel betreiben konnte, die in ge-

eignetem Abstand über dem Pfennig montiert war, war dieser offensichtlich in der Lage, mechanische Energie abzugeben. Woher aber kam diese Energie und wie war wohl der Wirkungsgrad dieses Maschinchens?

### 2.1. Einflussfaktoren und Schwierigkeiten

Im Verlauf weiterer Versuche mit dem Festplattenmagneten gab es zunehmend Probleme mit dem Schwingungseffekt, der sich immer schwerer auslösen ließ. Zudem machte der Pfennig selbst Schwierigkeiten, da er aufgrund seines schmalen Rands beim Schwingen immer öfter umkippte. Der heiße, schwingende Pfennig hinterließ auf der Oberfläche des weiß lackierten Magneten allmählich eine tiefer werdende Spur von verkohltem Lack, was das vermehrte Umkippen auslöste. Da sich noch drei andere, typgleiche Magneten aus der Festplatte in meinem Besitz befanden, konnte ich diese zunächst weiter verwenden. Da allerdings dieselbe nachteilige Veränderung des Lacks zu befürchten war, wollte ich 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 Magneten aus Lautsprechern, Motoren oder anderen Geräten auszulösen. Auch diese Anstren-

gungen zeigten keinerlei Erfolg. Offenbar trat der Schwingungseffekt nur mit neuen Magneten dieser Festplatte auf, welche eine weiß lackierte, einwandfreie Oberfläche besaßen. Was war an diesen Magneten so Besonderes? Ich vermutete, dass eine wesentliche Voraussetzung für das Schwingen eine sehr glatte Oberfläche des Magneten sei und nahm daher an, eine dünne, vor dem Magneten angebrachte Glasscheibe, z. B. in Form eines Objektträgers, würde das Problem lösen. Jedoch auch dieser Versuch misslang. Zudem war das Glas gar nicht so glatt, wie zunächst erhofft, da beim Auslenken des (kalten!) Pfennigs Geräusche auftraten und der Pfennig viel kürzer nachschwang als auf den lackierten Festplattenmagneten. Auf Letzterem bewegte sich der Pfennig völlig geräuschlos. Wahrscheinlich dämpfte der Lack die Unebenheiten des Pfennigrands. Auch die Verwendung eines Aluminiumblechs mit ausgesucht glatter Oberfläche anstelle des Objektträgers war 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 längerem Überlegen wurde mir jedoch immer klarer, dass zur weiteren Untersuchung des Effekts wohl aus irgendeinem Grund ein hitzebeständiger und elastischer Lack vonnöten war. Nach einer Diskussion mit meinem Physiklehrer schlug dieser mir vor, es mit Heizkörperlack zu versuchen. Ich überzog daher einen Objektträger aus Glas mit „Heizkörper Alkydharz-Lackfarbe“ von Glasurit<sup>®</sup>, hinter welchen ich den Magneten positionierte. Plötzlich 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 die zuvor abgeschliffene Magnetoberfläche konnte nun durch Lackieren wieder regeneriert werden! Weitere Untersuchungen mit dem Objektträgersystem ergaben, dass die Schwingung nicht nur vertikal möglich war, sondern nach Drehen des Magneten um 90° auch in horizontaler Richtung. Genauere Beobachtungen ergaben, dass die Amplitude bei einer frisch lackierten und getrockneten Oberfläche zunächst relativ klein war. Mit zunehmender Ausdehnung der braun-schwarzen Spur auf dem Lack, welche der heiße, abrollende Pfennig hinterließ, vergrößerte sich die Amplitude jedoch erheblich. Offensichtlich war für ein effektives Schwingen nicht eine frische Lackoberfläche, sondern eine durch Hitzeentwicklung „gereifte“ Lackstelle notwendig. Gab es eine Obergrenze für die Temperatur

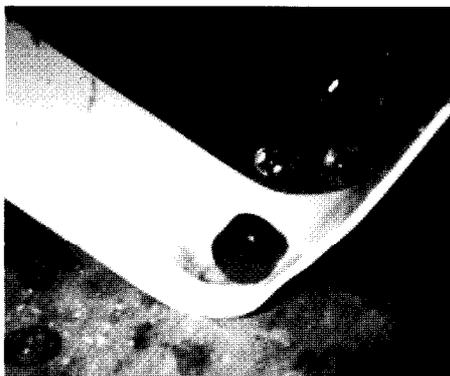


Abb. 1: Rollende Metallscheibe in gebogener Blechrinne

des Pfennigs beim Schwingen? Starkes Aufheizen zeigte eine ständige Zunahme der Amplitude, bis der Pfennig zuletzt herunterfiel. Die Ursache hierfür konnte der Verlust des Ferromagnetismus bei hohen Temperaturen sein, oder die zu große Amplitude, durch welche der Pfennig außerhalb des Anziehungsbereichs des Magneten geriet. Letzteres erwies sich als zutreffend, da ein sehr stark erhitzter Pfennig vom Magneten in Ruhestellung immer noch gut festgehalten wurde.

## 2.3. 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, die Lebensdauer dieser scheinbar idealen Schicht infolge weiter fortschreitender Verkohlung jedoch nur sehr begrenzt war. Dadurch kippte der Pfennig während des Schwingens immer öfter um und zerstörte damit zusätzlich die Oberfläche. Um hier Abhilfe zu schaffen, verwendete ich statt des Objektträgers ein mit Heizkörperlack überzogenes 2 mm starkes Aluminiumblech, welches die Lackschicht aufgrund seiner guten Wärmeleitfähigkeit 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. Weiterhin testete ich Teflon (Teflonband auf einem Objektträger, bzw. als ca. 2 mm dicke Teflonplatte) als lackfreies Trägermaterial in der Erwartung, dass dessen gute Hitzebeständigkeit sowie Elastizität vorteilhaft sein könnten. Das Ergebnis war überraschenderweise negativ. Auf Teflon wurden fast keine Schwingungen beobachtet! Als Ergebnis umfangreicher Versuche ergab sich schließlich folgendes Vorgehen zur Herstellung optimaler Lackflächen: das frisch und absolut gleichmäßige (tauch-)lackierte, vollkommen ebene Blech muss beim Trocknen ganz staubfrei

gehalten werden. Beim Lackieren dürfen sich auf der Oberfläche keine Blasen bilden. Nach einigen Tagen Trocknen bei Raumtemperatur müssen die Bleche zunächst für 3 h bei 50 °C und danach bei 120 °C solange ausgeheizt werden, bis der zunächst weiße Lack eine beige-braune Färbung annimmt.

Nachdem nun mit lackiertem Aluminiumblech ein gut funktionierendes System zur Verfügung stand, ersetzte ich den schmalen und instabil schwingenden Pfennig durch Eisenscheiben mit unterschiedlichen Breiten und Durchmessern. Der Erfolg war durchschlagend, das endgültige System war erreicht! Die Eisenscheiben ließen sich nach entsprechender Aufheizung sämtlich problemlos in kräftige, stabile Schwingungen versetzen. Weiter ersetzte ich das schlecht kontrollierbare Handfeuerzeug durch einen kleinen Gasbrenner mit einer gut regulierbaren, spitzen Flamme. Die im Vergleich zum Pfennig erheblich schwereren Eisenscheiben bedingten einen kräftigeren Magneten, der jetzt jedoch auch ohne lackierte Oberfläche verwendbar war, denn der Lack befand sich ja auf dem vorgelagerten Aluminiumblech.

## 2.4. Weitere Beobachtungen

Im Verlauf weiterer Tests machte ich folgende wichtige Beobachtung: Bei Verwendung eines relativ kleinen Aluminiumblechs erhitzte sich dieses während des Experiments sehr stark, was offensichtlich an der geringen Masse und Wärmeableitung lag. Die anfänglich große Amplitude der schwingenden Metallscheibe wurde dabei immer kleiner, bis diese schließlich ganz aufhörte zu schwingen. Nach dem Abkühlen des Blechs konnte der Schwingungsvorgang jedoch ohne Probleme neu gestartet werden, und das Nachlassen der Schwingungen bis hin zum Stillstand ließ sich während der Aufheizung des Blechs erneut beobachten. Hieraus war zu schließen, dass für einen erfolgreichen Schwingungsvorgang eine heiße, runde Scheibe sowie eine lackierte Oberfläche auf einem relativ kalten Träger notwendig ist, damit eine Wärmeübertragung stattfinden kann. Der Einfluss der vom Magneten auf die Scheibe ausgeübten Kraft, sowie die Magnetisierbarkeit der Scheibe und deren Temperaturabhängigkeit auf den Schwingungseffekt war aber noch unklar. Bei Schwingungsversuchen mit der breitesten Metallscheibe (Breite 2 cm, Ø 2 cm) war der Effekt schlecht auslösbar, wenn die Unterlage nicht vollkommen eben war. Der ungenügende Kontakt war daran erkennbar, dass die angekohlte Schwingungsspur auf der Lackoberfläche schmaler war als die Metallscheibe und nicht rechteckig aussah, sondern unregelmäßig. Offensichtlich war ein guter Kontakt der abrollenden Fläche mit der Lackoberfläche notwendig. Wahrscheinlich stand die treibende Kraft für den

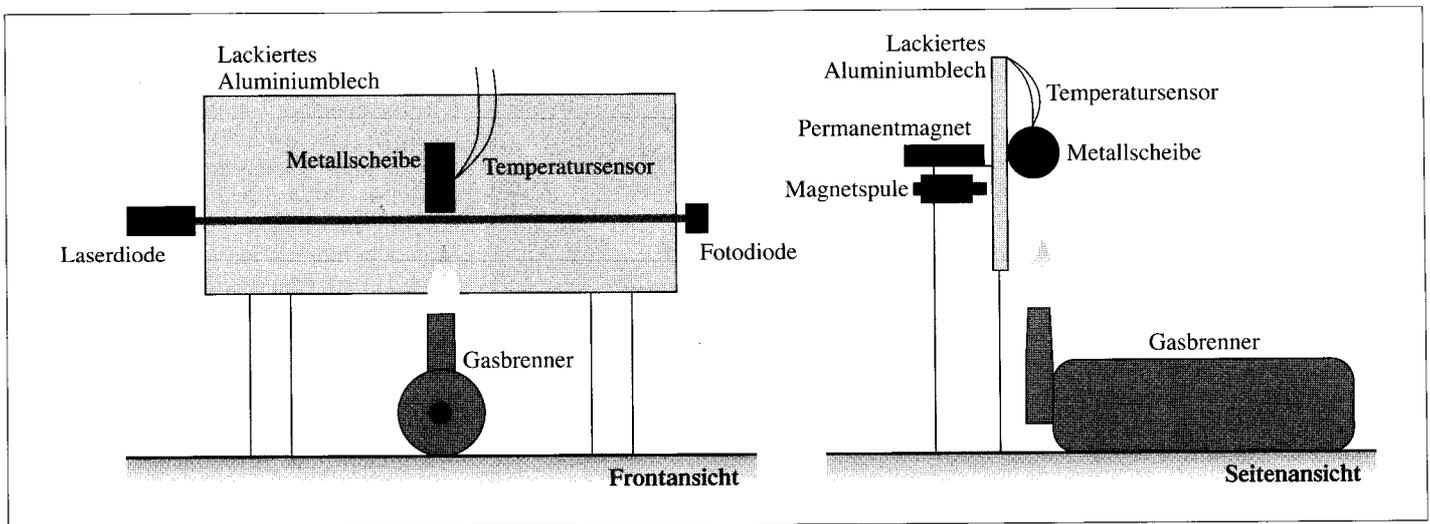


Abb. 2: Versuchsaufbau (Schemazeichnung Frontansicht/Seitenansicht)

Schwingungseffekt in einem direkten Zusammenhang mit der Grenzfläche zwischen Metall und Lackschicht! Einer der erstaunlichsten Effekte im Zusammenhang mit den schwingenden Scheiben war im Übrigen folgender: Wurde die mit voller Amplitude schwingende, heiße Metallscheibe nach Entfernen der Flamme auf eine sehr kleine Amplitude abgebremst, beschleunigte die Metallscheibe anschließend sehr rasch wieder von selbst 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 eine unbekannte Weise thermische Energie in mechanische Energie überführte. Obwohl offensichtlich die Grenzschicht zwischen Metallscheibe und der Lackoberfläche ursächlich war für den Antrieb der Metallscheibe, war die Bedeutung der Magnetkräfte für den Antrieb der Metallscheiben noch unklar. Immerhin hatte sich gezeigt, dass die Stärke des Magnetfelds innerhalb weiter Grenzen keinen wesentlichen Einfluss auf das eigentliche Funktionieren des Effekts hatte. Möglicherweise lieferte das Magnetfeld lediglich die Rückstellkraft für die Metallscheibe. Konnte die Magnetkraft z. B. auch durch die Schwerkraft ersetzt werden? Um dies zu untersuchen, befestigte ich ein zu einem flachen Kreisbogen geformtes, lackiertes Stück Aluminiumblech in horizontaler Lage, und stellte eine Metallscheibe aufrecht in die tiefste Stelle. Nach mechanischer Auslenkung rollte die (kalte) Metallscheibe einige Male hin und her und kehrte dann wieder in die Ruhestellung an der tiefsten Stelle zurück (Abb. 1). Nun erhitze ich die ruhende Scheibe mit dem Gasbrenner und gab ihr einen minimalen Schubs. Zu meiner großen Überraschung fing die Metallscheibe nach kurzer Zeit an, mit wachsender Amplitude hin und her zu rollen. Dies war der Beweis, dass das Schwingen am Magneten offensichtlich durch einen reinen Grenzflächeneffekt bewirkt wurde,

und der Magnet lediglich die Funktion einer Rückhaltekraft hatte! Für einen zusammenfassenden Erklärungsversuch des rätselhaften Schwingungseffekts sowie einige quantitative Abschätzungen möchte ich an dieser Stelle zunächst auf Abschnitt 5 verweisen und zuvor eine Beschreibung meiner Messanordnung geben, mit der ich den nunmehr stabil und reproduzierbar funktionierenden Schwingungseffekt mit exakten Messungen der verschiedenen Parameter wie Temperatur der Eisenscheibe, deren Frequenz sowie Schwingungsamplitude untersuchen wollte.

### 3. Beschreibung des Versuchsaufbaus

Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abb. 2 wiedergegeben, die eigentliche Anordnung ist den beiden Fotos in Abb. 3 und 4 zu entnehmen. An zwei Aluminium-Vierkantprofilen, die

zur besseren Wärmeableitung an zwei Aluminiumwinkel angeschraubt sind, ist das als Unterlage für die schwingende Metallscheibe dienende, lackierte Aluminiumblech (250 x 70 x 2 mm) mit zwei kräftigen Klammern in vertikaler Lage angepresst. Der die Metallscheibe aufheizende Gasbrenner befindet sich unterhalb dieser auf einem verschiebbaren Schlitten.

#### 3.1. Schwingungsfrequenz

Die Schwingungsfrequenz wird mit Hilfe einer knapp unterhalb der ruhenden Scheibe verlaufenden Lichtschranke gemessen, welche aus einer Laser- sowie einer Fotodiode besteht. Der während des Schwingens beim wechselweisen Beleuchten und Verdunkeln der Fotodiode sich periodisch ändernde Widerstand der Fotodiode wird durch einen Transistor verstärkt. Die Empfindlichkeit der Lichtschranke ist mit Hilfe eines 100-Ω-Drehpotentiometers stufenlos einstellbar und wird mit einem Drehspulinstrument kontrolliert. Das verstärkte Signal

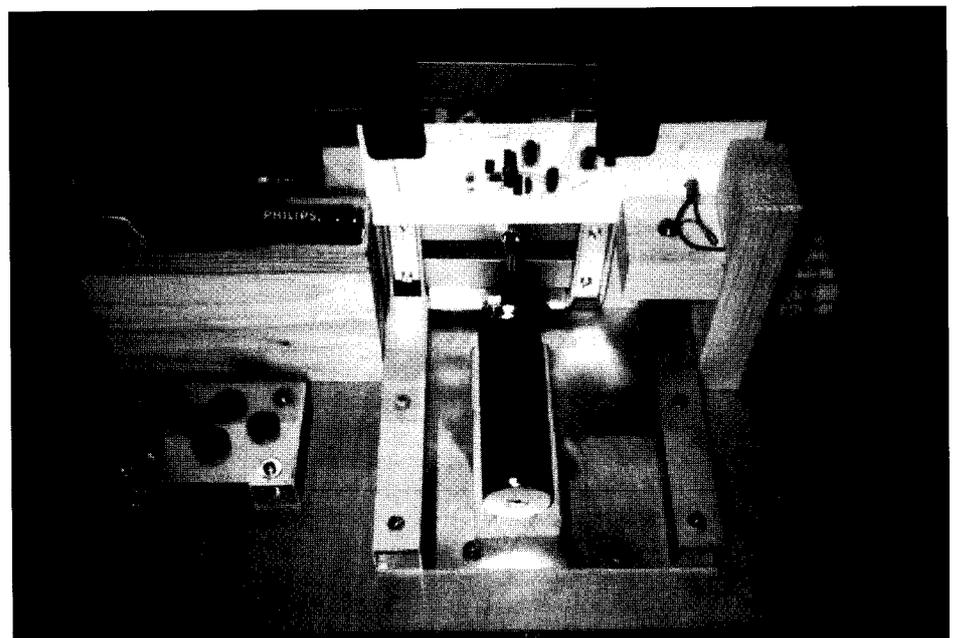


Abb. 3: Versuchsaufbau von vorn

schaltet ein Relais mit doppeltem Schalter. Das hierdurch geteilte Signal wird zu Kanal 1 eines 12 Bit-Datenerfassungsgeräts (8-Kanal Analog-Digital-Wandler) geleitet, während das andere, identische Signal zu einem elektronischen Fahrrad-Tachometer geführt wird. Dieser ist auf 1/3,6 m (= 27,8 cm) Radumfang eingestellt, auf letzterem kann daher die Schwingungsfrequenz digital abgelesen werden. Ein Vorteil des zwischengeschalteten Relais ist das sauberere und leichter auswertbare Signal, welches vom Datenerfassungsgerät über die serielle Schnittstelle zum auswertenden Computer übertragen wird (vgl. Abb. 5f).

### 3.2. Schwingungsamplitude

In einer sich in etwa 2 cm Abstand auf der Rückseite der Anlage befindlichen Magnetspule mit Eisenkern wird durch die schwingende Metallscheibe eine Wechselspannung induziert, deren Größe von der Amplitude der schwingenden Scheibe abhängt. Mit wachsender Amplitude nimmt die induzierte Spannung aufgrund der zunehmenden Geschwindigkeit der Scheibe zu. Die in der Spule induzierte Spannung wird durch einen Operationsverstärker vom Typ CA3140E um den Faktor 75 verstärkt und auf Kanal 2 des Datenerfassungsgeräts geleitet. Typische Messergebnisse sind in Abb. 5a und b zu sehen. Für die korrekte 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 der sich gerade mit maximaler Geschwindigkeit durch den Mittelpunkt bewegenden Scheibe. Wichtig 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.

### 3.3. Temperatur

Zur Temperaturmessung verwendete ich ein selbstgefertigtes Thermoelement aus zwei verdrehten und mit Hartlot überzogenen Konstantan- und Kupferdrähten, welches bei Rotglut eine Spannung von ca. 40–50 mV liefert. Da diese Spannung für die direkte Einspeisung in das Datenerfassungsgerät zu klein ist, verstärkte ich das Signal mit einem weiteren Operationsverstärker (s. 3.2) um den Faktor 75. Das Thermoelement steckte ich in ein in die jeweilige Metallscheibe zentrisch gebohrtes Loch, zur Ableitung der erzeugten Spannung wurden die sehr dünnen und ausreichend langen Drähte des Thermoelements verwendet. Der Schwingungseffekt der Metallscheiben wird durch die angeschlossenen Drähte nur geringfügig beeinträchtigt.

### 3.4. PC-Auswerteprogramm

Die auf den PC transferierten Signale für Frequenz, Amplitude und Temperatur wertete ich online mit einem selbst geschriebenen Pascal-Programm aus. Das Programm vermag die Eingangssignale für Frequenz, Temperatur und Amplitude sowie die aufgearbeiteten 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 wird während der Messdatenerfassung laufend vom Programm ermittelt und aus dieser die Frequenz berechnet. Das Signal der Amplitudenmessung ist eine periodische Welle, deren größte Auslenkung ein Maß für die Amplitude ist. Das Programm berechnet aus dem Kurvenverlauf on-line (d. h. während der Schwingungen) die Maxima und Minima und gibt diese als relatives Maß für die Amplitude aus. Hierzu wird innerhalb eines festgelegten

Zeitintervalls von 0,2 Sekunden der jeweils größte und kleinste Wert des Messsignals ermittelt und anschließend die Differenz aus diesen Werten berechnet. Zur Glättung des ausgewerteten Signals wird jeweils der Mittelwert aus vier hintereinander erfolgenden Schwingungsamplituden gebildet. Das Signal der Temperaturmessung musste lediglich richtig skaliert werden. Hierzu eichte ich das Thermoelement mit Hilfe eines Quecksilberthermometers bei einer Reihe verschiedener Temperaturen. Der Plot des verstärkten Signals gegen die Temperatur erwies sich als linear.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Primärmesssignale

Einige typische, mit der schwingenden Scheibe Nr. 5 (Tab. 1) erhaltene Ergebnisse sind in Abb. 5a–f zu sehen. Abb. 5a und 5b zeigen das Primärsignal der Amplitudenmessung einer ungedämpft schwingenden Eisenscheibe in zwei unterschiedlichen zeitlichen Spreizungen. Im starken Gegensatz hierzu steht die in Abb. 5c gezeigte Kurve, welche durch einmaliges mechanisches Auslenken der kalten Eisenscheibe erhalten wurde. Die Amplitude der kalten schwingenden Scheibe nimmt rasch ab, die Schwingung kommt nach ca. drei Sekunden zum Stillstand. Bei der ungedämpften Schwingung in Abb. 5a hingegen ist bei fortwährender Beheizung praktisch keine Veränderung der Amplitude sichtbar.

Bei sehr starker Aufheizung der Scheibe ergab sich ein interessanter Einfluss auf die Form der Amplitudenkurve (siehe Abb. 5d), 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 oben erwähnt – entweder der maximalen oberen oder unteren Auslenkung der schwingenden Eisenscheibe und ist damit auf eine Störung der Schwingung in einer der 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 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, kurzzeitige Stillstand nicht in Erscheinung, da hier die Magnetkraft und die Schwerkraft in derselben Richtung wirken. Der abfall-

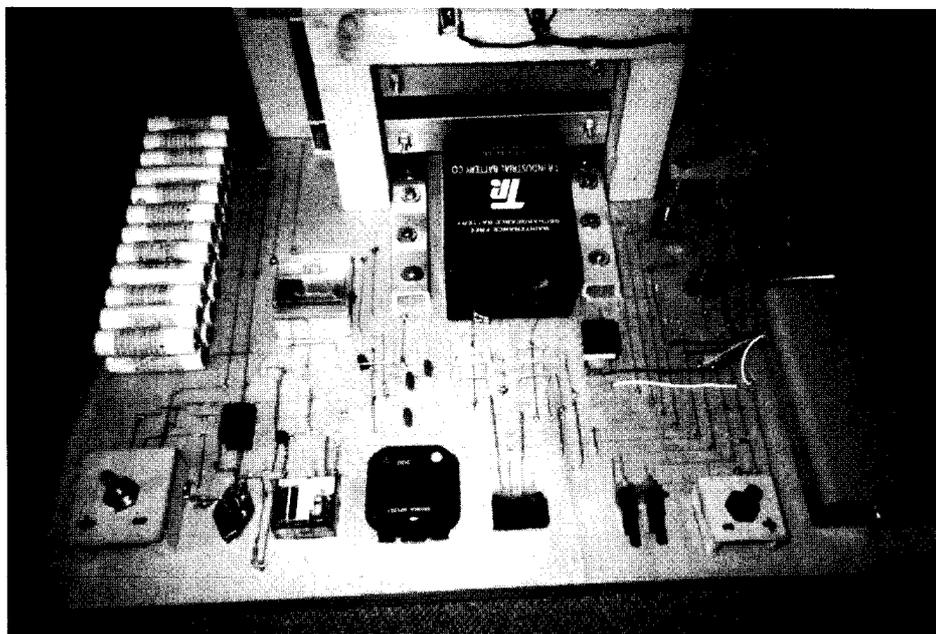


Abb. 4: Versuchsaufbau von hinten

lende Kurventeil ist daher über den größten Bereich jeweils praktisch geradlinig. Die Amplitudenkurve in Abb. 5e zeigt im Gegensatz zu Abb. 5a und 5b eine stark gestörte Gesamtkurve, welche interessanterweise immer dann beobachtet wird, wenn eine besonders dünne Eisenscheibe auf einer schon stark beschädigten Lackstelle schwingt. Offensichtlich werden die vertikalen Schwingungen durch die unregelmäßige Oberfläche gestört, was in dem Schaubild mit hoher zeitlicher Auflösung (10 msec) sichtbar wird. Bei dickeren Scheiben tritt dieser Effekt kaum in Erscheinung, da diese sich bezüglich horizontal wirkender Störungen aufgrund ihrer breiteren Rollflächen stabiler verhalten und infolge ihrer größeren Trägheit nicht so stark beeinflusst werden. In Abb. 5f ist das Primärsignal der Frequenzmessung als Rechtecksignal zu sehen, welches zwischen den beiden Spannungswerten 0 und 3000 mV pendelt. Die Schwingungsfrequenz entspricht direkt einer Periode des Messsignals.

#### 4.2. Ausgewertete Messsignale

Die ausgewerteten Signale der Amplituden- und Frequenzmessung sowie die Temperatur im Verlauf eines typischen Aufheiz- und Abkühlungszyklus für die Eisenscheibe Nr. 5 (Tabelle 1) sind in Abb. 6 zu sehen. Die Amplitude ist in willkürlichen Einheiten aufgetragen, Temperatur und Frequenz sind in °C bzw. Hz angegeben. Die Primärsignale zu Amplitude und Frequenz werden während der Messung abwechselnd über einen Zeitraum von jeweils ca. 0,3 Sekunden erfasst und gleichzeitig mit der Temperatur am PC dargestellt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  Sekunden wurde mit der Beheizung der Scheibe begonnen, entsprechend beginnt die Temperatur zu steigen. Bei ca. 350 °C wurde die noch ruhende Scheibe durch einen leichten Stoß in Bewegung gesetzt, 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 (3.5). Wird die Wärmezufuhr unterbrochen, nimmt die Temperatur exponentiell und die Amplitude ebenfalls nicht-linear ab, während die Frequenz vorübergehend nochmals leicht zunimmt. Wenn die Temperatur auf einen bestimmten Grenzwert gefallen ist, hört die Scheibe ganz auf zu schwingen, Amplituden- und Frequenzsignal fallen dann beide auf 0 zurück. Im Ver-

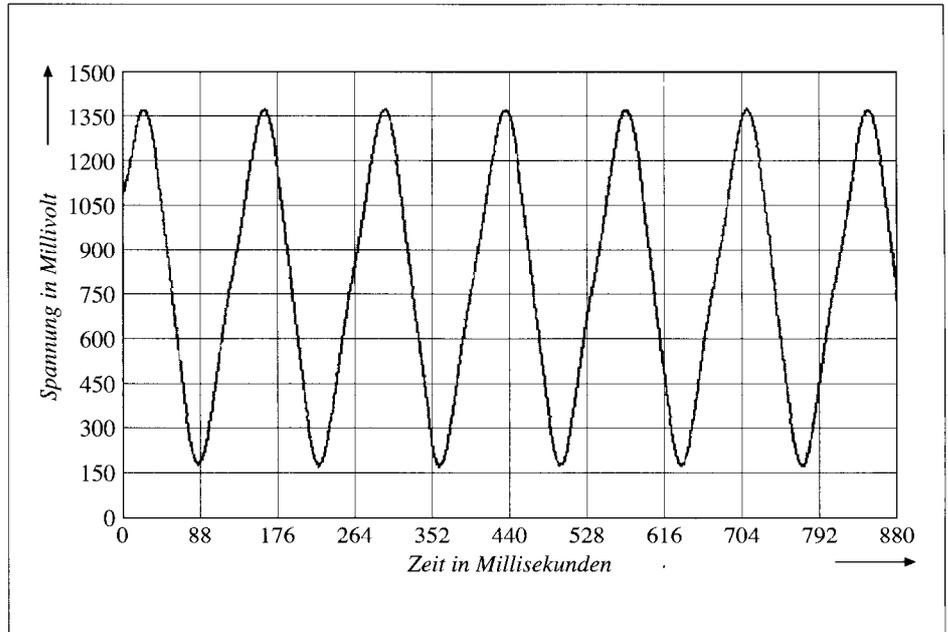


Abb. 5a: Amplitudenmessung, gestaucht

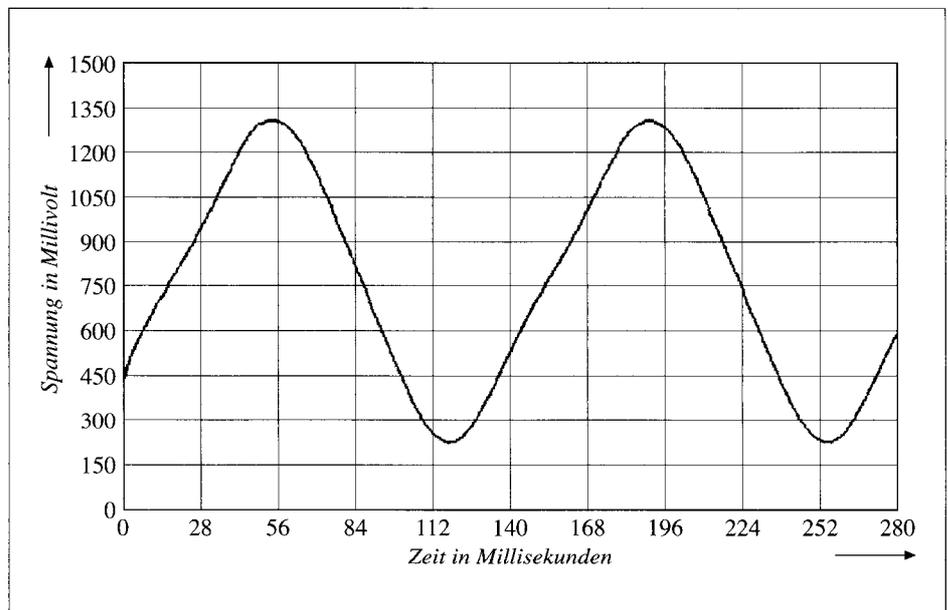


Abb. 5b: Amplitudenmessung, gestreckt

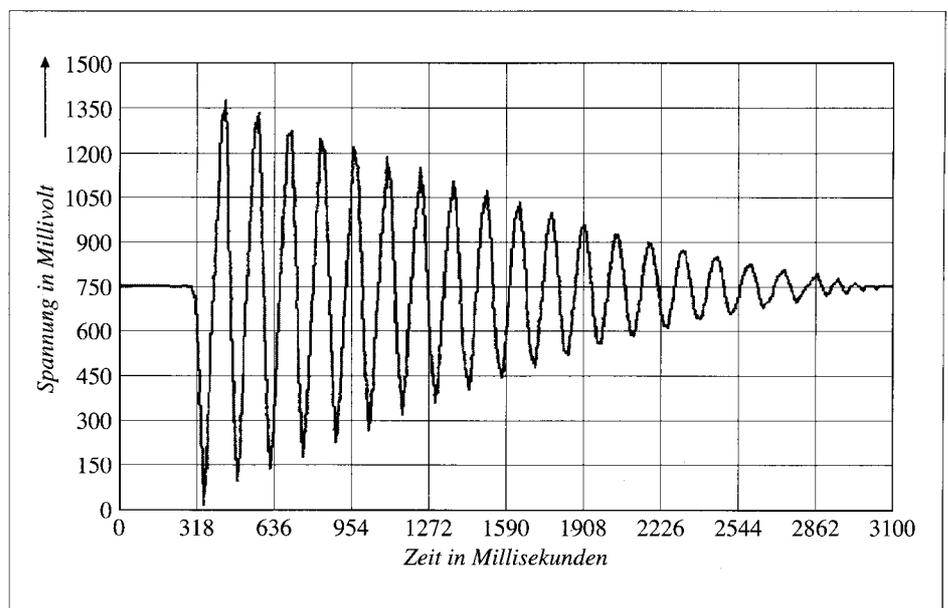


Abb. 5c: Amplitudenmessung bei kalter Scheibe

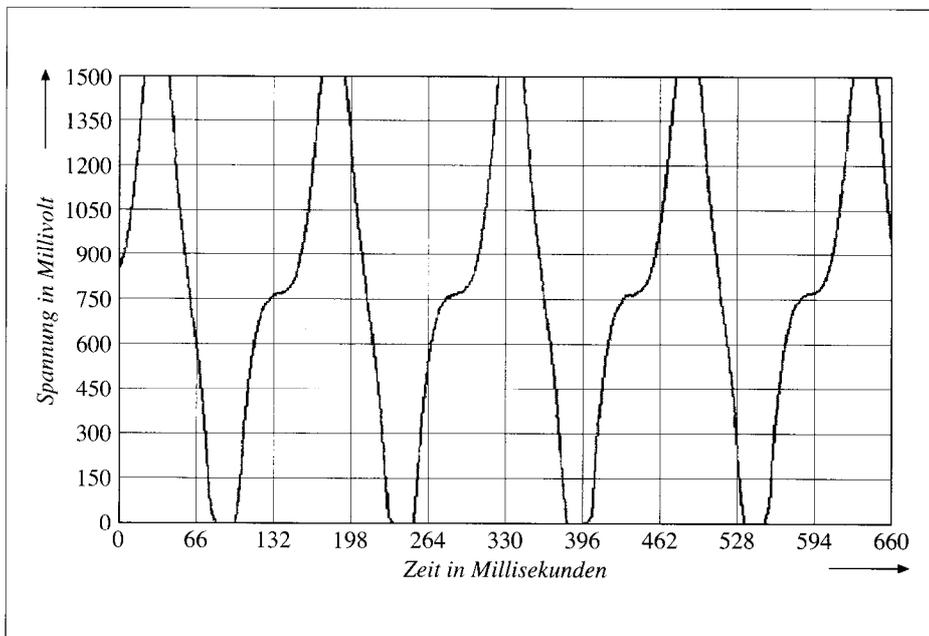


Abb. 5d: Amplitudenmessung bei überhitzter Scheibe

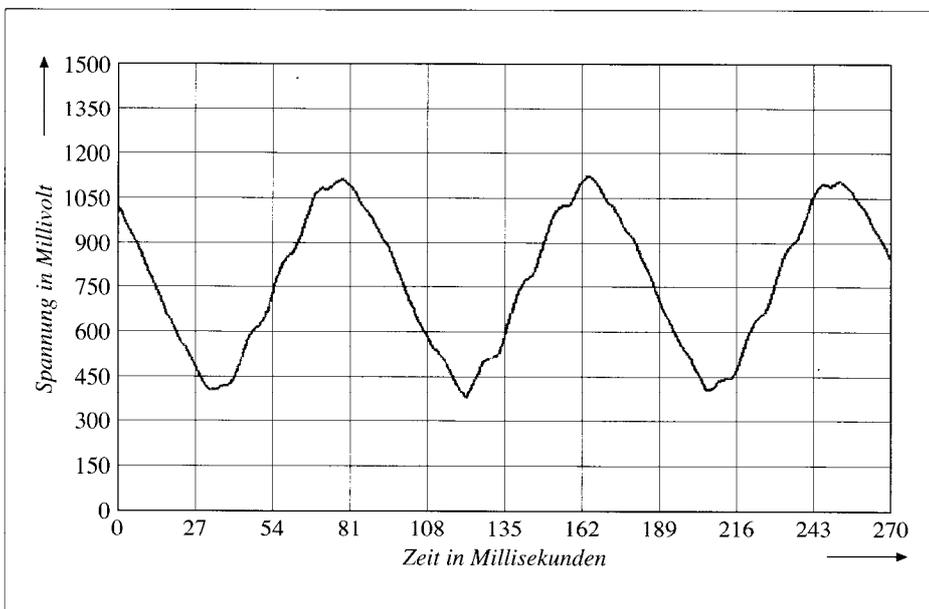


Abb. 5e: Amplitudenmessung auf gealtertem Lack

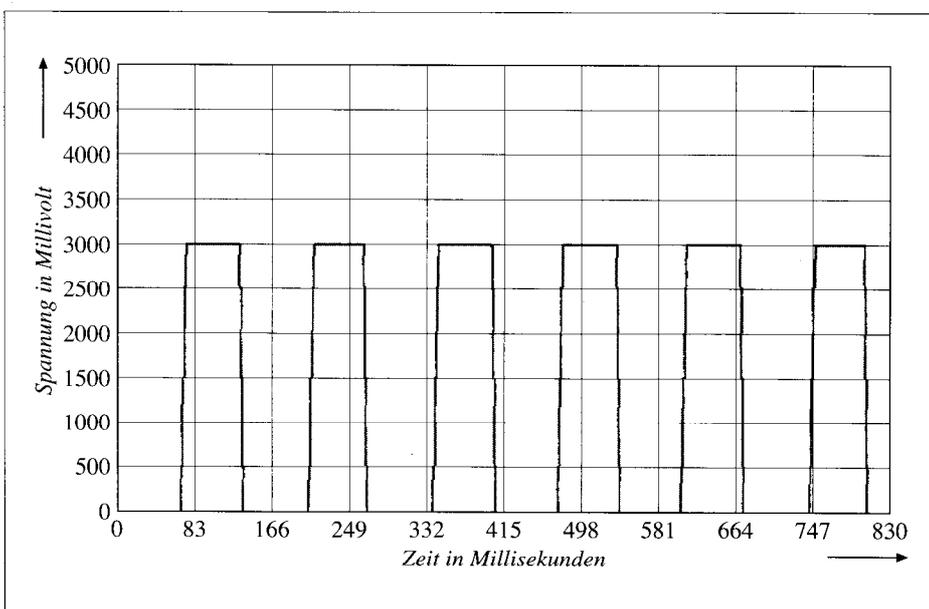


Abb. 5f: Frequenzmessung

gleich zur Nachschwingzeit der nicht beheizten, kalten Scheibe ist die Nachschwingzeit der aufgeheizten Scheibe ca. 30 Mal länger.

Tab. 1 zeigt die Resultate von Experimenten mit unterschiedlichen Eisenscheiben sowie verschiedenen Münzen. Die Tabelle enthält auch die Grenztemperatur, bei welcher die Scheibe im Verlauf der Abkühlungsperiode zu schwingen aufhört. Die Frequenzangabe bezieht sich auf diese Grenztemperatur. Eine Temperaturmessung war wegen des relativ langen Temperaturfühlers nur bei Scheiben mit einer Breite ab 10 mm möglich. Die in Klammern gesetzten Temperaturwerte für die 5 mm breite Scheibe Nr. 2 sind wahrscheinlich zu niedrig, da das Thermoelement hier teilweise aus dem Bohrloch der Scheibe herausragte. Die Tabellenwerte zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Grenztemperatur. Außerdem scheint die Grenztemperatur unabhängig von der Breite der Scheiben zu sein (ca. 320 °C für Nr. 5 und 6). 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 drei Münzen war eine Temperaturmessung wegen ihrer geringen Breite nicht möglich. Die Frequenzen lagen jedoch über denen der anderen Eisenscheiben, alle drei Münzen waren auch leichter als die leichteste Eisenscheibe Nr. 1. Unterhalb von ca. 5 g wird mit fallendem Gewicht eine nahezu lineare Zunahme der Frequenz beobachtet (Abb. 7), während sich die Frequenz bei großen Gewichtswerten einem unteren Grenzwert nähert.

### 4.3. Schwingungseffekt ohne Magnet, Lackschichtdickenvariation

Nachdem offensichtlich der Schwingungseffekt auch ohne Magneten und in horizontaler Lage möglich ist (vgl. 2.4), wollte ich dies auch mittels einer geeignet aufgebauten Anlage demonstrieren. Um die Anpresskraft der Metallscheibe gegen das horizontal liegende Blech gegenüber der Schwerkraft stark zu vergrößern, verwendete ich zwei Expandergummizüge, welche über je ein Kugellager links und rechts an einer zentrisch durch die Scheibe verlaufenden Stahlachse angebracht waren. Durch die unterschiedliche Vorspannung der Gummis konnte der Anpressdruck variiert werden. Auch mit dieser Anordnung konnten die Metallscheiben nach Aufheizen mit dem Gasbrenner in stabile, kräftige Schwingungen versetzt werden. Auch war es nun möglich, Scheiben bzw. Walzen aus Aluminium, einem nichtmagnetischen Metall, in Schwingungen zu versetzen, ein entgültiger Beweis dafür, dass der Effekt nicht von irgendwelchen Magnetkräften abhängt. Die größte schwingende Walze

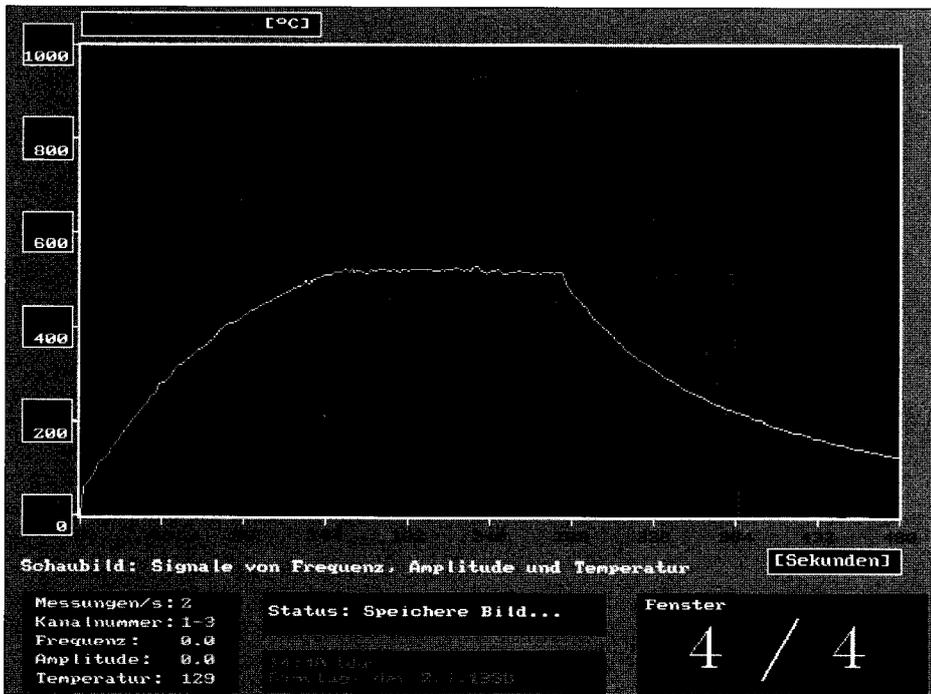


Abb. 6: Ausgewertete Messsignale (Aufheiz-/Abkühlzyklus)

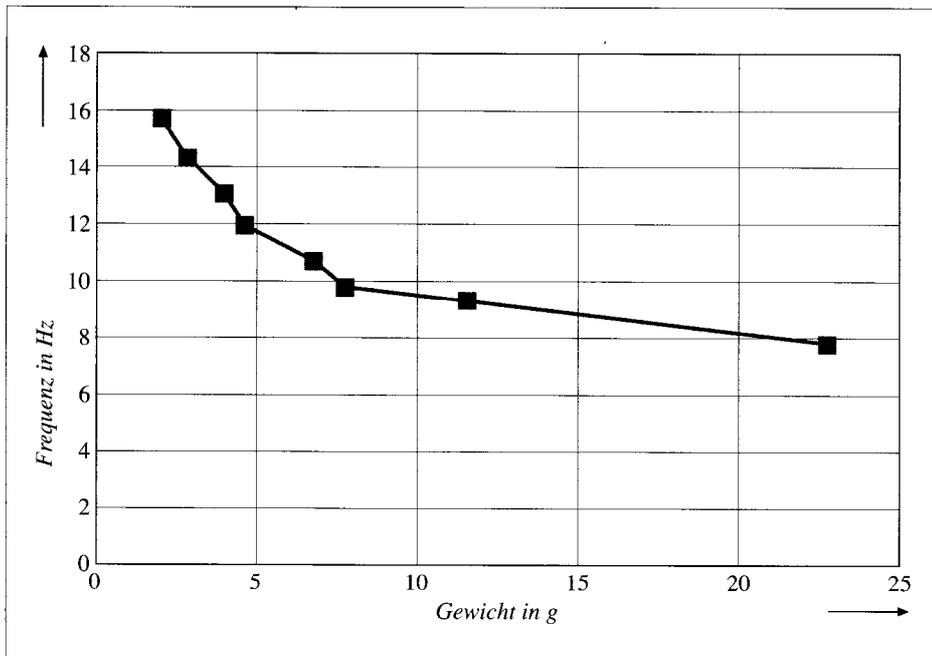


Abb. 7: Schaubild von Frequenz gegen Gewicht der Scheibe

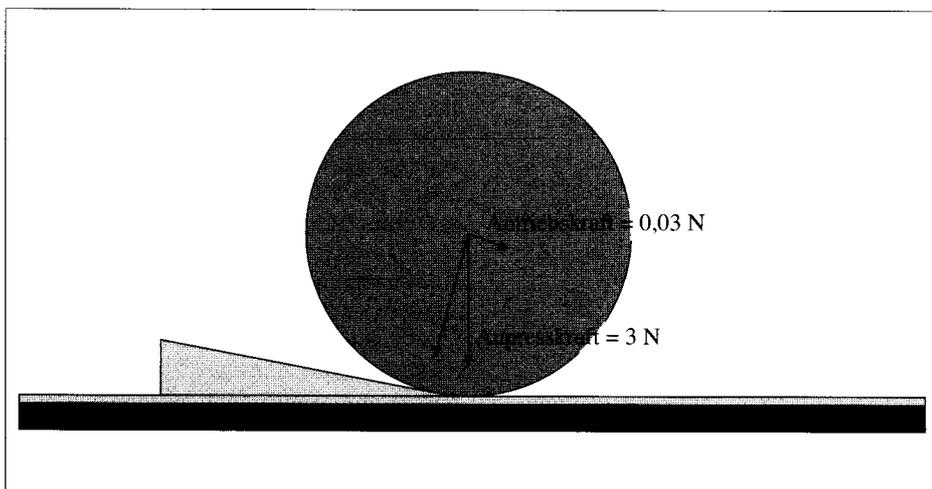


Abb. 9: Kräfteschema

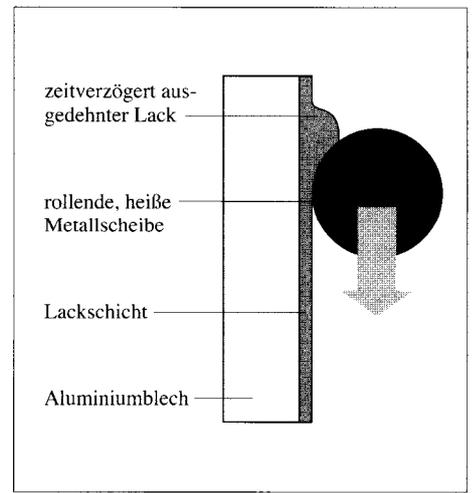


Abb. 8: Funktionsschema

hatte einen Durchmesser von 6 cm sowie eine Breite von 4 cm! Die Variation der Gummizugspannung von 25 bis 90 N zeigte eine Zunahme der Schwingungsfrequenz von 3,5 auf 7,5 Hz, während sich die Amplitude dabei nicht wesentlich änderte. Da offensichtlich der Lack die treibende Kraft für den Schwingungseffekt war, untersuchte ich mit der Anlage in Abb. 2, 3 den Einfluss unterschiedlicher Lackschichten, die ich durch mehrfaches Lackieren der Bleche erhielt. Die Schichtdicke ließ sich hinreichend gut mit einer Mikrometerschraube bestimmen. Erstaunlicherweise zeigte die dünnste Lackschicht mit ca.  $30 \mu\text{m}$  Schichtdicke die größte Amplitude, während diese mit zunehmender Lackschichtdicke ( $90\text{--}160 \mu\text{m}$ ) abnahm. Eine Erklärung für dieses unerwartete Ergebnis könnte sein, dass die für den Antrieb notwendige Wärmeabfuhr sich mit zunehmender Schichtdicke verschlechtert und so die Rückbildung der antreibenden Wölbung nicht mehr so gut funktioniert.

## 5. Diskussion und Erklärungsversuch für den Schwingungseffekt

Worin bestand der rätselhafte Grenzflächeneffekt zwischen schwingender Scheibe und Lackoberfläche 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 diese eine Hebekraft ausüben. Dass hierdurch die Scheibe aber 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 Kontaktstelle (aus Bewegungsrichtung gesehen)

Scheibe Nr.	Durchmesser (in mm)	Breite (in mm)	Gewicht (in g)	Grenztemperatur (in °C)				Frequenz bei Grenztemperatur (in Hz)
				1.	2.	3.	Mittelwert	
1	15	3	4,7	–	–	–	–	11,9
2	15	5	7,8	(250)	(255)	(253)	(253,7) <sup>1</sup>	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	– <sup>2</sup>
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

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

der rollenden bzw. schwingenden Scheibe auftritt und somit die Scheibe nach Art einer hinter der Scheibe her wandernder Oberflächenwelle vor sich her treibt. Die Scheibe würde daher sozusagen von einem permanenten Hangabtrieb vorwärtsgetrieben (Abb. 8). Eine gut wärmeleitende Unterlage ist offensichtlich notwendig, damit der ausgedehnte Lack in sehr kurzer Zeit, nämlich vor dem Zurückkehren der Scheibe, seine Wärme wieder an die Unterlage abgeben und sich dadurch rechtzeitig wieder zusammenziehen kann. Aufgrund der beobachteten Schwingungsfrequenz (geschätzter Wert > 5 Hz) müssen die Ausdehnungs- und Schrumpfungszyklen im Millisekunden-Bereich liegen.

Einige halbquantitative Abschätzungen, basierend auf verschiedenen Beobachtungen, belegen diese Annahmen: Die vorerhitzte Scheibe beschleunigt aus dem Ruhezustand innerhalb von ca. drei Sekunden auf ihre volle Amplitude, was bei einer Schwingungsfrequenz von ca. 8 Hz und einer Amplitude von ca. 1,25 cm einer maximalen Geschwindigkeit von ca. 0,4 m/s beim Durchgang durch die Nullstellung entspricht. Um die Scheibe der Masse 0,0228 kg auf diese Geschwindigkeit zu beschleunigen, ist eine konstante Kraft von ca. 0,003 N notwendig ( $v = a \cdot t$ ,  $F = a \cdot m$ ). Aus der gemessenen Anpresskraft von ca. 3 N (Federwaage) und der zur Unterlage praktisch parallelen Beschleunigungskraft (Hangabtrieb auf einer idealisierten, extrem flachen Rampe als Modell für die gebildete Ausdehnungsstelle, vgl. Abb. 9) von 0,003 N lässt sich nach  $\sin \beta = 0,003/3$  ein Rampenwinkel  $\beta$  von ca.  $0,06^\circ$  berechnen. Für eine angenommene Kontaktlänge der bewegten Scheibe mit der Unterlage von ca. 0,2 mm in Rollrichtung ergibt sich damit eine Rampenhöhe von  $\sin \beta \times 0,2 = 0,0002$  mm. Die Lackschichtdicke beträgt ca. 0,02 mm, eine Zunahme der Lackschichtdicke um ca. 0,0002 mm entspricht damit einer linearen Ausdehnung um 1 %. Zum Beispiel besitzt der Kunststoff Polyamid (statt des Lacks) einen Längenausde-

hungskoeffizienten von 0,00008/K [1]. Bei einer Temperaturdifferenz von ca. 400 °C (vgl. Abb. 6) ergäbe sich eine prozentuale Ausdehnung für diesen Kunststoff von ca. 3 %. Damit liegt die für die abgeschätzte Antriebskraft notwendige Ausdehnung des Lacks durchaus in der richtigen Größenordnung.

Ein unterschiedlicher Erklärungsansatz für den Schwingungseffekt wurde von Prof. Dr. A. JUNG, der sich mittlerweile ebenfalls experimentell mit dem Phänomen auseinandergesetzt hat, vorgeschlagen [1]. Demnach könnten Unterschiede in den Oberflächenspannungen der Lackschicht vor und hinter dem Rollkörper wirken. Weiterhin wäre vorstellbar, dass in der durch Zug- und Druckspannungen vorbeanspruchten Lackschicht beim Erwärmen intermediär abgebaute Zugspannungen zu kleinen Bewegungen in der Lackschicht führen könnten, die im Drehsinne auf die Scheibe wirken. Welche der beiden Erklärungsansätze eher zutreffen, kann wohl am besten durch weitere sinnreiche experimentelle Ansätze entschieden werden.

## 6. Schlussfolgerung

Die in dieser Arbeit beschriebene Versuchsanordnung erlaubte die messtechnische Erfassung der wichtigsten Größen des Schwingungseffekts. Der vorgeschlagene Mechanismus (pulsierende Lackschicht) könnte evtl. 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.

## 7. Literatur

- [1] D. Mende, G. Simon: Physik. Gleichungen und Tabellen. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1971.  
 [2] Prof. Dr. A. Jung, Königsbrunn/Brenz: Spielerisches Lernen führte zur Entdeckung des „Lackantriebs“-Effektes. 44<sup>th</sup> International Scientific Colloquium Ilmenau, Sept 20–23, 1999.

## 8. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Physiklehrer Herrn Horst SCHEU, der mir den wertvollen Tipp mit dem Heizkörperlack gab, sowie Herrn Herbert MÜLLER (beide vom Humboldt-Gymnasium Konstanz) und Herrn Werner MÜLLER, die mich bei der Einbindung der Operationsverstärker in die Messanlage unterstützten. Herrn Gerhard BAUTZ danke ich für die Herstellung der Metallscheiben.