

Ein kombiniertes Kraft- und Strahlungsmessgerät für den Einsatz bei Schulexperimenten

Volker Schmidt und Hans-Josef Patt

Fachbereich 10 - Physik, Universität des Saarlandes, D-66041 Saarbrücken

1. Charakteristische Größen und Eigenschaften des Sensors und des Messgerätes

Im Folgenden wird ein kombiniertes Kraft- und Strahlungsmessgerät vorgestellt, das den Piezo- und Pyroeffekt [1] von Polyvinylidenfluorid-Folien [2,3,4] (ferroelektrische Polymerfolien, gepolt senkrecht zur Oberfläche, charakteristische Parameter etwa 15 pC/N bzw. $19 \mu\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$) ausnutzt, um Kraft- und Druckänderungen bzw. Bestrahlungsstärken im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums zu messen. Die Messgrößen werden von einer kreisförmigen PVDF-Folie (Durchmesser 41 mm, Dicke 25 mm, beidseitig aluminisiert) erfaßt, wobei sich diese in einem geeignet konstruiertem Messinggehäuse mit Stiel befindet und durch Teflon hochohmig isoliert ist. Dabei übernimmt das Gehäuse die Aufgaben, die Reaktionskräfte aufzunehmen und den hinteren Teil der Folie auf möglichst konstanter Bezugstemperatur zu halten. Gleichzeitig liegen das Gehäuse und die Außenseite der Folie auf Erdpotential, so daß der Sensor gegen elektrische Störfelder abgeschirmt ist. An der Vorderseite des Gehäuses können für die verschiedenen Messverfahren unterschiedliche Aufsätze befestigt werden, die gleichzeitig die Aufgabe übernehmen, thermische Störeinflüsse bei Kraft- und Druckmessungen und den Einfluß von Luftströmungen bei der Messung von Bestrahlungsstärken zu minimieren.

Das Messsignal in Form einer elektrischen Ladung wird über ein teflonisoliertes Koaxialkabel einer elektronischen Schaltung zugeführt und dort so aufbereitet, daß an den Ausgängen analoge Spannungen zwischen maximal -10 V und +10 V anliegen, die die Messgrößen bis auf eine zweckmäßige Zehnerpotenz zahlenwertrichtig repräsentieren. Um den Einfluß von langsamen Änderungen der Folientemperatur auf die Messgrößen zu reduzieren, wurde die Eingangsstufe der Messelektronik mit einem Hochpaß versehen, der die untere Grenzfrequenz der Messanordnung auf 0.25 Hz festlegt. Insgesamt wurden unter Berücksichtigung der bei Schulexperimenten vorkommenden Messwerte folgende Empfindlichkeiten ausgewählt: 1. Kraftmessung: 1 V/N, 2. Druckmessung: 1 mV/Pa, 3. Messung der Bestrahlungsstärke: 10 mV/Wm⁻². Diese können durch einen eingebauten Verstärker jeweils noch um den Faktor 10 bzw. 100 erhöht werden. Bei

maximaler Empfindlichkeit wurden dabei folgende Auflösungsvermögen festgestellt: 1. Kraftmessung: 0,2 mN, 2. Druckmessung: 0,2 Pa, 3. Messung der Bestrahlungsstärke: 0,02 Wm⁻². Wenn eine Platte mit definierter Masse auf die Folie gelegt wird, kann auch die Änderung der Normalbeschleunigung des Sensors bestimmt werden. Durch einen Integrator mit einstellbarer Zeitkonstanten (0.1 - 1000 ms) kann das Ausgangssignal des Messgerätes zusätzlich integriert werden, so daß auf diese Weise auch Kraftstöße bzw. Impulsänderungen gemessen werden können. Zur Demonstration der Umkehrung des Piezoeffektes kann der Sensor zusätzlich über eine eingebaute Ansteuerschaltung auch als Piezoaktor (Piezolautsprecher im akustischen Bereich) verwendet werden.

2. Typische Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Mechanik

Da die zu messenden Kräfte bei punktförmiger Belastung die PVDF-Folie leicht beschädigen können, werden diese durch eine auf die Folie gelegte Messingplatte (Dicke 3 mm), deren Unterseite zur besseren thermischen Isolation gegenüber äußeren Temperaturänderungen aus PVC (Dicke 8 mm) besteht, möglichst gleichmäßig auf die Gesamtfläche verteilt. Da mit der geschilderten Anordnung primär nur Druckkräfte senkrecht zur Folie gemessen werden können, erfolgt die Messung von Zugkräften durch einen symmetrischen Umlenkbügel mit Befestigungshaken, der an der Platte mit zwei Schrauben befestigt werden kann. Dabei kann die Auflageplatte ohne Bügel (Masse 50 g) auch als Messobjekt für Beschleunigungsmessungen (Empfindlichkeit: 50 mV/ms⁻², maximale Auflösung: 0,004 ms⁻²) verwendet werden. Zur Messung von lokalen Drücken in Gasen und Flüssigkeiten wurde ein rohrförmiger Aufsatz entwickelt, der den Raum vor der Folie bis auf eine kleine Öffnung (Durchmesser 2 mm) luftdicht abschließt und der an die entsprechende Stelle gebracht werden kann, wo der Druck gemessen werden soll. Der Raum hinter der Folie ist dabei ebenfalls abgedichtet und dient als Druckbezugspunkt. An den Rohraufsatz kann wahlweise auch ein Messschlauch angeschlossen werden. Mit den genannten Anbauteilen läßt sich das Messgerät bei zahlreichen Schulexperimenten aus dem Bereich der Mechanik einsetzen, wofür im folgenden einige typische Beispiele angegeben werden sollen.

Mißt man mit dem Gerät unter Verwendung des Umlenkbügels die Kraft, die ein schwingendes Federpendel auf seine Aufhängung ausübt, so kann man daraus bei entsprechender Skalierung das Kraft-Zeit-Gesetz, das Beschleunigungs-Zeit-Gesetz, das Weg-Zeit-Gesetz und durch Integration des Ausgangssignals mit dem eingebauten Integrator das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz der harmonischen Schwingung aufnehmen.

Anhand dieser Kurven lassen sich dann die theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge zwischen den Größen Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft sowie deren funktionale Abhängigkeit von der Zeit und den anderen Parametern experimentell überprüfen. Läßt man das Pendel statt in Luft in einem zäheren Medium (z.B. Wasser) schwingen, so lassen sich mit dieser Anordnung auch Versuchsreihen zu gedämpften Pendelschwingungen durchführen. Ersetzt man das einfache Federpendel durch ein Wilberforce-Pendel, das sowohl zu Längs- als auch zu Torsionsschwingungen fähig ist, so können Schwebungskurven gekoppelter Schwingungen aufgezeichnet und ausgewertet werden.

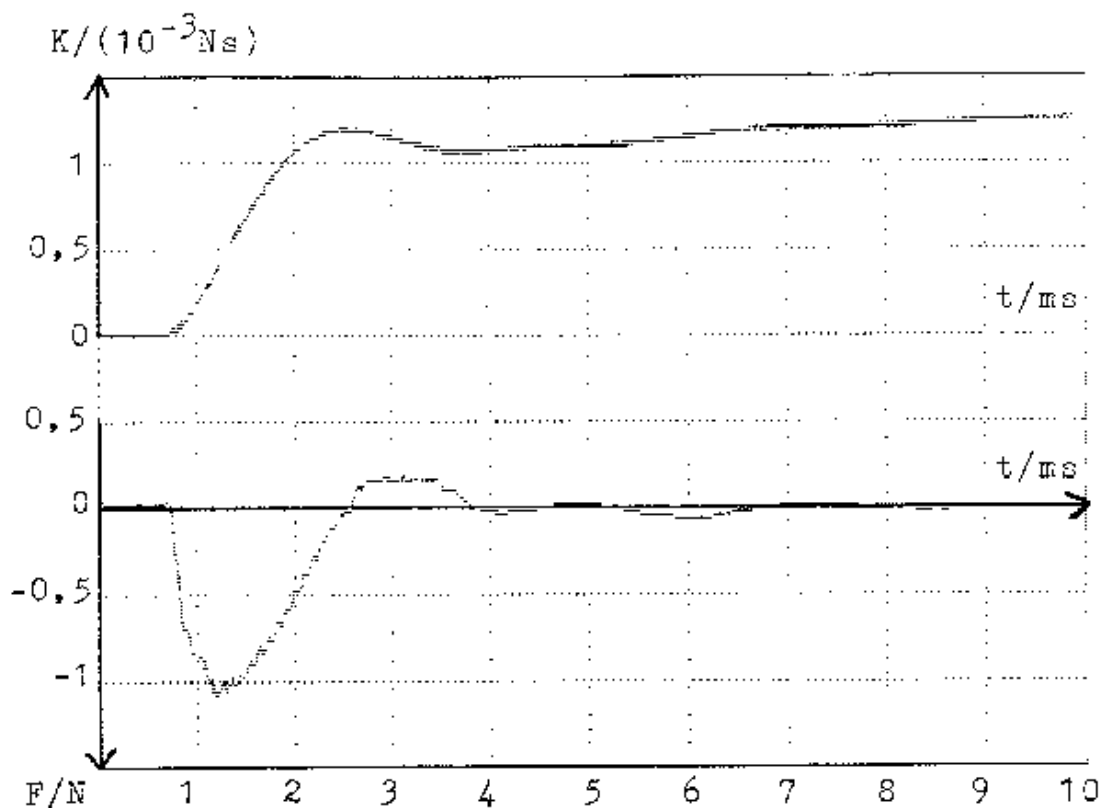


Abb. 1: Kraft F und Kraftstoß K als Funktion der Zeit t beim und nach dem Aufprall der Kugel (Fallhöhe 20 cm).

Zur Messung von Kraftstößen bzw. Impulsänderungen und ihrer zeitlichen Darstellung kann ein Experiment dienen, bei dem aus einer definierten Höhe eine Kugel (Plexiglas-kugel mit der Masse 0,33 g) frei auf die Auflageplatte des Sensors fällt. Dabei erhält man am Sensorausgang den zeitlichen Kraftverlauf des Stoßvorganges und parallel dazu am Integratorausgang das zeitliche Integral über die Kraft, also den Kraftstoß. Zusätz-

lich kann an den Messausgang des Sensors ein Digitalzähler angeschlossen werden, der bei geeigneter Beschaltung die Fallzeit mißt. Da bei bekannten Fallgesetzen die Auftreffgeschwindigkeit sowohl aus der Fallhöhe als auch unabhängig aus der Fallzeit berechnet werden kann, kann diese Größe mit der Summe von Auftreff- und Abprallgeschwindigkeit (Impulssatz) verglichen und daraus Aussagen über die Energiedissipation beim Stoß gewonnen werden. Exemplarisch ist für eine Fallhöhe von 20 cm in Abb.1 der zeitliche Verlauf von Kraft und Kraftstoß dargestellt, wie er mit einem Speicheroszilloskop gemessen wurde. Dabei zeigt eine entsprechende Auswertung, daß im Rahmen der Messgenauigkeit die Abprallgeschwindigkeit identisch mit der Auftreffgeschwindigkeit ist und somit im wesentlichen ein elastischer Stoß vorliegt. Wenn die Auflageplatte zusätzlich mit einer Plastilinschicht versehen wird, die die auftreffende Kugel festhält, können auch inelastische Stöße gemessen und die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten verifiziert werden.

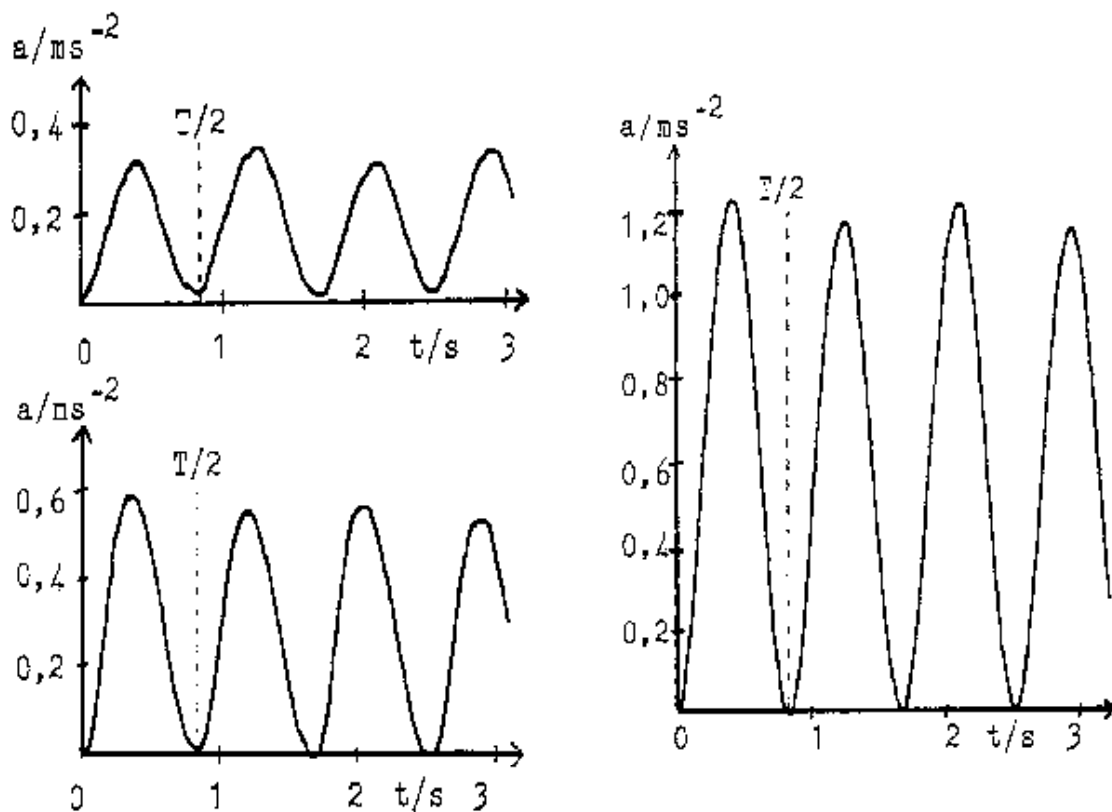


Abb. 2: Der zeitliche Verlauf der Größe $a(t) = F/m$ für drei verschiedene Werte des maximalen Auslenkungswinkels $\varphi_0 = 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$

Wird der Kraftsensor am Ende einer drehbar aufgehängten Stativstange befestigt und

zusätzlich mit der genannten Auflageplatte beschwert, so kann am Sensor die Summe aus der Normalkomponenten der Gewichtskraft der Auflageplatte (Plattenmasse m , Erdbeschleunigung g) und der auf sie einwirkenden Zentrifugalkraft (Abstand der Platte vom Drehpunkt l , Winkelgeschwindigkeit ω) gemessen werden. Wie sich durch eine einfache Rechnung zeigen läßt, ergibt sich für die zeitliche Änderung dieser Größe der folgende Ausdruck: $a = F/m = (g/2 + l \cdot \omega^2) \cdot \varphi_0^2 \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t))/2$. Damit besitzt diese Größe die doppelte Frequenz der Pendelschwingung und ihre Amplitude wächst proportional zum Quadrat des maximalen Auslenkungswinkels φ_0 . In Abb.2 sind für drei unterschiedliche Auslenkungswinkel ($\varphi_0 = 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$) die Größen $a(t)$ als Funktion der Zeit t dargestellt, wie sie mit einem X-T-Schreiber aufgenommen wurden. Sie zeigen das erwartete Parameterverhalten.

3. Typische Anwendungsbeispiele aus den Bereichen Kalorik und Optik

Bei der Verwendung des Sensors zur Strahlungsmessung sollte die Wärmekapazität der äußeren Aluminiumelektrode der Folie möglichst klein, ihre thermische Isolierung gegenüber der anderen Aluminiumelektrode und gegenüber dem Gehäuse möglichst gut, ihr Absorptionsvermögen möglichst groß und im entsprechenden Spektralbereich unabhängig von der Wellenlänge der zu messenden Strahlung sein. Dies wurde in unserem Falle für den nahen Ultraviolett-, den Infrarot- und den sichtbaren Bereich mit guter Näherung durch eine dünne Schicht aus Optik-Lack (im Handel erhältlicher Lack für Objektivfassungen) und durch die Form und Anordnung der Folie selbst erreicht. Um den Einfluß unerwünschter Luftbewegungen vor der Folie zu verringern, kann der Folienraum mit einer Spaltblende (Öffnung 3 mm x 33 mm) abgeschlossen werden. Die Rückseite der Folie wird über die metallische Halterung auf konstanter Bezugstemperatur gehalten. Da mit der Messanordnung keine stationären Größen gemessen werden können, erfolgen alle Strahlungsmessungen nach folgendem Messprinzip: Die Strahlung einer Quelle (Hohlraumstrahler, Halogenlampe, Leslie-Würfel usw.) wird durch einen Chopper, bestehend aus einer kreisförmigen schwarzen Metallscheibe, aus der ein Sektor mit einem Mittelpunktswinkel von 18° herausgeschnitten wurde und die von einem Experimentiermotor mit konstanter Frequenz (Umlaufzeit 3 s) angetrieben wird, periodisch zerhackt, so daß der Sensor von Strahlungspulsen mit rechteckförmigem Verlauf und einer Dauer von $3/20$ s getroffen wird. Deren Energie wird von der PVDF-Folie absorbiert und führt zu einer entsprechenden Temperaturänderung, so daß infolge des Pyroeffektes ein Ladungssignal entsteht, das der Bestrahlungsstärke proportional ist. Dieses Signal wird von der Elektronik aufbereitet und kann auf einem Oszilloskop oder

X-T-Schreiber dargestellt werden. Die in 1. angegebenen Empfindlichkeiten für die Bestrahlungsstärke beziehen sich auf die hier beschriebene Anordnung.

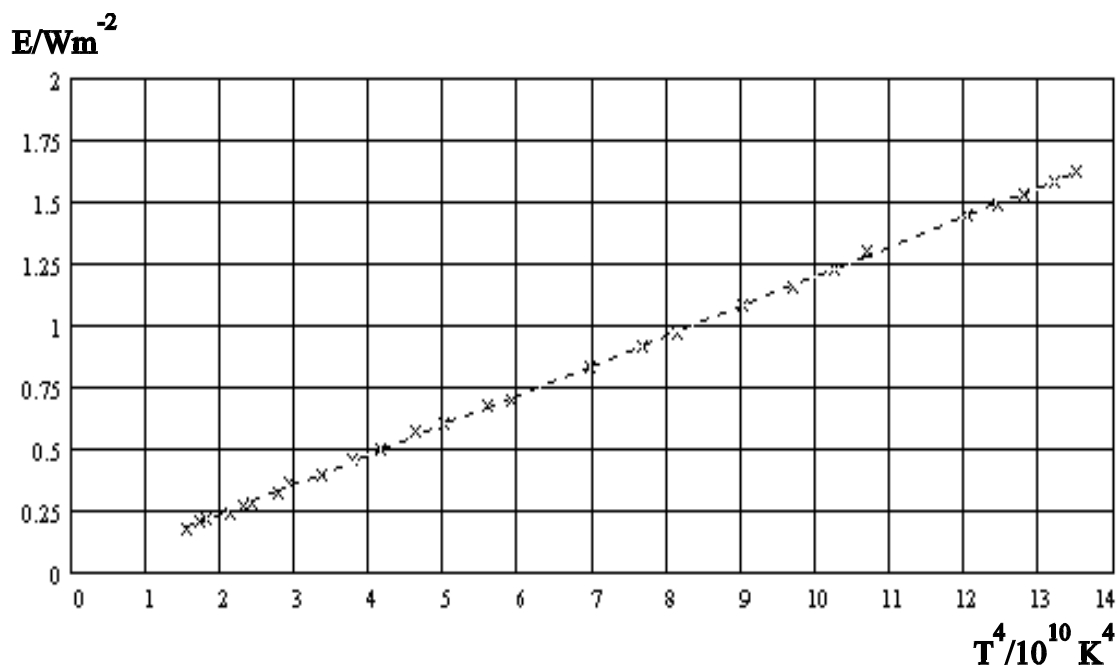


Abb. 3: Bestrahlungsstärke E in Abhängigkeit von der vierten Potenz der Temperatur T, 45 cm von einem Hohlraumstrahler entfernt.

Zur Eichung und zur Verifikation des Stefan-Boltzmann-Gesetzes wurde die Strahlung eines Hohlraumstrahlers (Leybold Didactic: Rohrofen mit Rohrofentisch und Schwarzkörperzusatz) als Funktion der Ofentemperatur T im Bereich zwischen 320 K und 600 K gemessen. Bei entsprechender Auftragung der Messwerte als Funktion der 4. Potenz der Temperatur ergab sich ein ausgeprägt linearer Zusammenhang. Daraus kann geschlossen werden, daß der Absorptionsgrad und damit die Empfindlichkeit des Sensors in dem betrachteten Wellenlängenbereich ($4,830 \mu m < \lambda_{max} < 9,056 \mu m$) konstant ist. Mit dem bekannten Wert der Stefan-Boltzmann-Konstanten kann dann eine Absoluteichung des Messgeräts durchgeführt werden.

Mit der entwickelten Anordnung können jetzt alle die Experimente durchgeführt werden, für die man sonst die Thermosäule nach Moll verwendet, wobei zu beachten ist, daß deren Empfindlichkeit (ohne Spalt $78 \mu V/Wm^{-2}$, mit Spalt $9,6 \mu V/Wm^{-2}$) etwa um den Faktor 100 bis 1000 geringer ist und damit Messungen in einem größeren Parameterbereich möglich werden: Untersuchung des Emissionsvermögens verschiedener Oberflächen mit dem Leslie-Würfel, Aufnahme der spektralen Emissionskurven unter-

schiedlicher Strahlungsquellen, quantitative Untersuchungen zum Stefan-Boltzmann-Gesetz und zum Wienschen Verschiebungsgesetz, photometrische Gesetze usw. Exemplarisch ist in Abb.3 die Bestrahlungsstärke E eines Hohlraumstrahlers in einer Entfernung von 45 cm gegen die vierte Potenz seiner absoluten Temperatur T aufgetragen. Wie die eingezeichnete Bestgerade zeigt, liegen alle Messwerte - entsprechend der Theorie - in guter Näherung auf einer Geraden.

3. Literatur

- [1] Paufler, P.: Physikalische Kristallographie. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1986.
- [2] Kepler, R. G. a. R. A. Anderson: Ferroelectric polymers. Advances in Physics, vol. 41, no. 1, p. 1-57, 1992.
- [3] Lovinger, A. J.: Poly(vinylidene fluoride). in: Basset, D. C. (edit.): Developments in Crystalline Polymers - 1. Applied Science Publishers, London, New Jersey, 1982.
- [4] Piezotech S.A. (edit.): Piezoelectric / Pyroelectric polyvinylidene fluoride films and sheets. Piezotech S.A., Saint-Louis, France, o. J.