

Dehnungsmeßstreifen

- Physikalische Grundlagen und Anwendungen im Physikunterricht -

1. Einleitung

Im Bereich der Materialprüfung finden Dehnungsmeßstreifen (DMS) heute vielfache Anwendung. Es handelt sich dabei um empfindliche elektrische Sensoren zur Untersuchung lokaler Längenänderungen. Bei bekanntem Elastizitätsmodul lassen sich so auf einfache Weise dynamische Kraftmessungen an gefährdeten mechanischen Baugruppen durchführen (z.B. Belastungen bei Tankwagen oder Materialermüdung bei Achsen). DMS werden inzwischen auch im Lehrmittelbereich verwendet, bisher allerdings meist in Form von "black box"-Datenaufnahmesystemen [1,2 bzw. 3]. Damit sind die Anwendungsmöglichkeiten für den Physikunterricht noch nicht ausgeschöpft. Die Funktionsweise eines DMS ist ein attraktives Anwendungsbeispiel zum spezifischen Widerstand; darüber hinaus lassen sich preisgünstig einfache Experimente zu mechanischen Materialeigenschaften realisieren: Längenänderung unter Zug oder Druck (Hookesches Gesetz), Zug und Druck bzw. neutrale Faser bei der Biegung von Balken, Impulserhaltung beim Kraftstoß u.a. Für die Meßwertaufnahme und die Auswertung wird ein Computer verwendet, die Software COMPUTER-OSZILLOGRAPH ermöglicht eine schnelle Darstellung der Ergebnisse z.B. im Rahmen einer Lehrveranstaltung. Aufbauend auf diesen Grundlagen lassen sich Anwendungen in vielen Bereichen wie z.B. Technik und Sport bearbeiten. Deshalb eignet sich die Thematik "Anwendungen von Dehnungsstreifen" auch für ein experimentelles Projektseminar.

2. Physikalische Grundlagen

DMS werden aus Draht oder Metallfolien hergestellt (siehe Abb.1). Bei Folien-DMS wird die mäanderförmige Meßschleife analog zu gedruckten Schaltungen durch das Ätzen dünner Metallfolien (z.B. Konstantan) auf Phenolharz- oder Poliamidträgern produziert. Die hier verwendeten einfachen DMS [4] haben folgende Werte: Drahtdicke $10\ \mu\text{m}$, Meßfläche $5\text{-}6\ \text{mm}^2$, Widerstand $120\ \Omega$, maximaler Strom $50\ \text{mA}$.

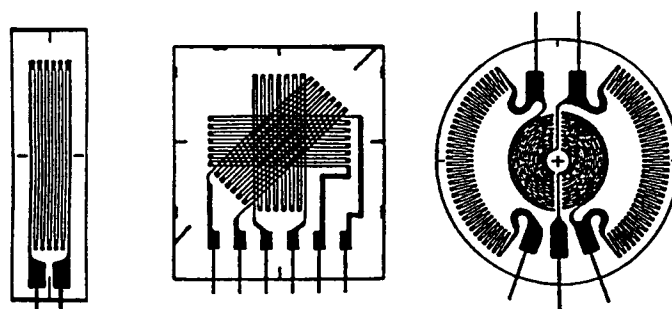


Abb.1: Verschiedene Bauformen für Dehnungsmeßstreifen (DMS).

Die Funktionsweise eines DMS läßt sich mit folgendem einfachen Versuch klären: Ein dünner Konstantendraht (z.B. 1 m lang, Durchmesser 0,2 mm, damit ein Widerstand von 16Ω) wird an einer stabilen Befestigung aufgehängt und an eine Gleichspannung angeschlossen. Der resultierende Stromfluß wird mit einem Digitalamperemeter auf mindestens drei Stellen genau angezeigt (bei 5V ist $I = 314 \text{ mA}$). Dehnt man diesen Draht durch kräftiges Ziehen mit der Hand oder durch Anhängen eines großen Gewichts, so vermindert sich der Stromfluß geringfügig. Dehnungen bis 3% sind elastisch, und sie bewirken eine dazu proportionale Stromänderung. Ebenso funktioniert ein DMS: Bei einer Dehnung ($\epsilon = \Delta l / l$) wird der Meßdraht etwas länger (Δl) und gleichzeitig etwas dünner ($-\Delta A$). Nach der allgemein bekannten Formel für den Ohmschen Widerstand

$$R = \rho \cdot l / A \quad (1)$$

führen beide Effekte zu einer Widerstandserhöhung ΔR des DMS. Die Argumentation gilt analog auch für Stauchungen. Es ist naheliegend folgenden linearen Zusammenhang zu vermuten:

$$\Delta R/R = k \cdot \Delta l / l \quad (2)$$

Diese Proportionalität läßt sich experimentell bestätigen (siehe 4.1); der so definierte k-Faktor wird dabei direkt gemessen. Er wird aber auch vom Hersteller in hoher Genauigkeit angegeben.

Für ein tieferes Verständnis der Proportionalität soll hier für den Lehrer eine formale Herleitung skizziert werden:

Das totale Differential dR ($\rho = \text{konst.}$) liefert

$$dR = (\delta R / \delta l)_A \cdot dl + (\delta R / \delta A)_l \cdot dA \quad (3)$$

$$dR/R = dl/l - dA/A \quad (4)$$

Der Zusammenhang von relativer Längenänderung dl/l und Querschnittsverminderung $-dA/A$ berechnet sich aus der Annahme, daß das Volumen bei der Dehnung konstant bleibt. Für einen quadratischen Querschnitt mit der Seitenlänge b aber auch für einen kreisförmigen Querschnitt (Durchmesser b) ergibt sich

$$db/b = -0,5 \cdot dl/l \quad (5)$$

Der Proportionalitätsfaktor 0,5 wird als Poissonsche Querdehnungszahl μ bezeichnet. Im Allgemeinen ist μ kleiner als 0,5, da die Volumenkonstanz nicht ideal erfüllt ist.

Für die Querschnittsänderung erhält man

$$dA/A = d(b^2) / b^2 = 2 \cdot b \cdot db / b^2 = 2 \cdot db/b = -2 \cdot \mu \cdot dl/l \quad (6)$$

Eingesetzt in (4) kommt man zu

$$dR/R = dl/l + 2 \cdot \mu \cdot dl/l = (1+2 \cdot \mu) \cdot dl/l \quad (7)$$

Mit $\mu \approx 0,5$ und $dl/l = \epsilon$ ergibt sich also $dR/R \approx 2 \cdot \epsilon$.

3. Meßtechnik

Für die üblichen experimentellen Anwendungen mit DMS erwartet man Dehnungen von $\epsilon = 10^{-3}$ bis 10^{-5} , dementsprechend klein sind die Widerstandsänderungen. Um ein zu $\Delta R/R$ proportionales elektrisches Spannungssignal zu gewinnen, wird eine Wheatstone-Brücke verwendet (Abb.2). Als Vergleichswiderstände nimmt man Metallschichtwiderstände, da das Rauschen bei Kohlewiderständen in der Größenordnung des Meßsignals liegt. Für das Signal gilt dann bei $\Delta R/R \ll 1$ der Zusammenhang

$$\Delta U = 1/4 \cdot U_0 \cdot (\Delta R/R) = 1/4 \cdot U_0 \cdot k \cdot \epsilon \quad (8)$$

Durch geschickte Kombination mehrerer DMS läßt sich ΔU noch erhöhen. Parallel zu den Widerständen, die den Ast der Wheatstone-Schaltung ohne DMS bilden, sind hochohmige Stellwiderstände vorzusehen. Damit läßt sich vor jeder Messung der Nullpunkt des Spannungssignals justieren.

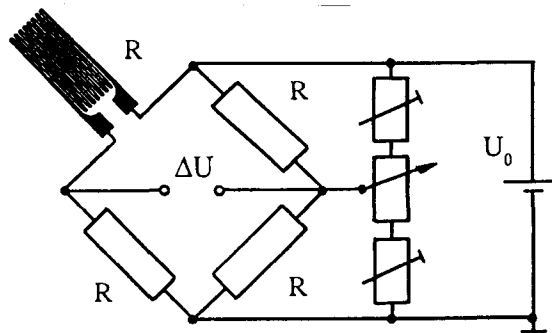


Abb.2: Wheatstone-Brücke mit DMS. Die vier Widerstände sollen möglichst gleich groß sein.

Das kleine Spannungssignal der Wheatstone-Brücke wird um einen Faktor 100 bis 1000 verstärkt (Selbstbauanleitung in [5]) und kann dann direkt mit einem Schreiber dargestellt werden. Es bietet sich auch an, das verstärkte Signal über ein Interface (AD-Wandler) an einen Computer zur Speicherung und Auswertung weiterzugeben. Das hierzu verwendete Programm COMPUTER-OSZILLOGRAPH [5] erfüllt folgende Aufgaben:

- Gleichzeitige Datenaufnahme von zwei DMS-Meßsystemen.
- Eichprozedur und Darstellung der Meßwerte in der gewünschten Einheit (Meter bzw. Newton).
- Statische oder dynamische Datenaufnahme (Die maximale Zeitauflösung bei einem Rechner mit 12 MHz ist ca. 0,2ms).
- Speichern und Bearbeiten von Meßkurven.

Wegen des sehr kleinen Effektes sind DMS empfindlich auf elektromagnetische und thermische Störungen:

- Die Schaltung und die Verbindung zu den DMS muß so ausgeführt sein, daß die "Antennenwirkung" der Drähte möglichst gering ist (verdrillte Kabel, kleine Fläche, eventuell Metallkapselung).
- Zur Temperaturkompensation gibt es ein einfaches Verfahren: Man bringt einen zweiten DMS

so am Meßkörper an, daß er mechanisch weder gestaucht noch gedehnt wird; dieser wird in einem Teillast gegen den aktiven DMS geschaltet.

- Besonders kritisch ist die Verklebung des DMS mit der Meßfläche. Nach Möglichkeit sollten vom Hersteller empfohlene Klebstoffe verwendet werden. In Bezug auf Kriechfestigkeit und Haftvermögen sind vor allem Klebstoffe auf Cyanidbasis geeignet (‘‘Sekundenkleber’’).

4. Experimentelle Anwendungen

4.1 Längenänderung von Festkörpern

Es ist naheliegend, mit einer experimentellen Anordnung zu beginnen, die in den Rahmen der Schulphysik paßt. Vom Zusammenhang kleiner Dehnungen und großer resultierende Kräfte hört der Schüler beim Themenkreis ‘‘thermische Längenänderung’’, insbesondere aber in der Mechanik beim Hookeschen Gesetz. Meist wird der Zusammenhang $F \sim \Delta l$ alleine an Schraubenfedern demonstriert. Die unmittelbare Behandlung der Dehnung und Stauchung eines massiven Körpers war bisher meßtechnisch schwierig. Deshalb wird sie meist nur informativ dargeboten, obwohl sie die elementarste Beschreibung des Hookeschen Gesetzes darstellt.

In Abb.3 wird ein passendes Experiment mit dem DMS beschrieben: Ein vertikal hängender Plexiglasstab wird zunehmend mit Gewichten F gedehnt und dabei mit einer Mikrometer-Meßuhr jeweils die Gesamtdehnung ΔL der Länge L des Stabes gemessen. Es ergibt sich eine Hookesche Proportionalität (Abb.4a). Außerdem wird jeweils das verstärkte Spannungssignal ΔU des DMS-Meßsystems registriert.

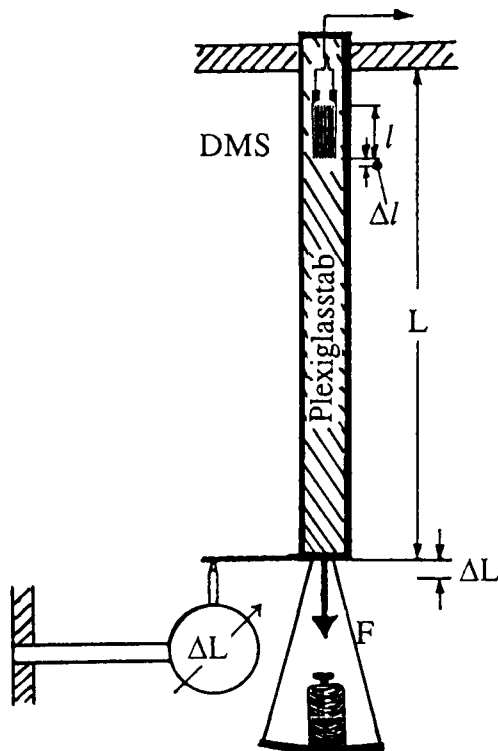


Abb.3: Versuchsaufbau für das ‘‘makroskopische’’ und das ‘‘quasimikroskopische’’ Hookesche Gesetz: Die effektive Länge L des Plexiglasstabes beträgt 750mm, sein Querschnitt $20 \cdot 20 \text{mm}^2$.

Es ist trivial, daß bei einem Stab mit konstantem Querschnitt und homogenem Material $\Delta l \sim \Delta L$ gilt. Die Messung liefert aber auch $\Delta L \sim \Delta U$ (Abb.4b).

Zusammenfassend erhält man folgende Ergebnisse:

- $\Delta l \sim F$: Es ist möglich, einen lokalen Elastizitätsfaktor E (E-Modul) zu definieren mit

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (9)$$
 ($\sigma = F/A$: mechanische Spannung; $\epsilon = \Delta l / l$: Dehnung)
- $\Delta l \sim \Delta U$: Bei bekanntem Verstärkungsfaktor kann man mit den Gleichungen (8) und (2) den k-Faktor des verwendeten DMS bestimmen.

Für den Unterricht ist bemerkenswert, daß die Proportionalitäten ohne rechnerische Ableitung für den Schüler nachvollziehbar werden. Damit wird dem DMS in elementarer Weise sein "black box"-Charakter genommen.

Inhaltlich kann Gleichung (9) als Verfeinerung der schulüblichen Formel $F = D \cdot \Delta l$ (D: Federhärte) verstehen, nämlich als "quasimikroskopische" Form des Hookeschen Gesetzes. Mit Hilfe des DMS läßt sich zudem zeigen, daß (9) gleichermaßen für Dehnungen wie für Stauchungen zutrifft (sichtbar durch das umgekehrte Vorzeichen des Spannungssignals).

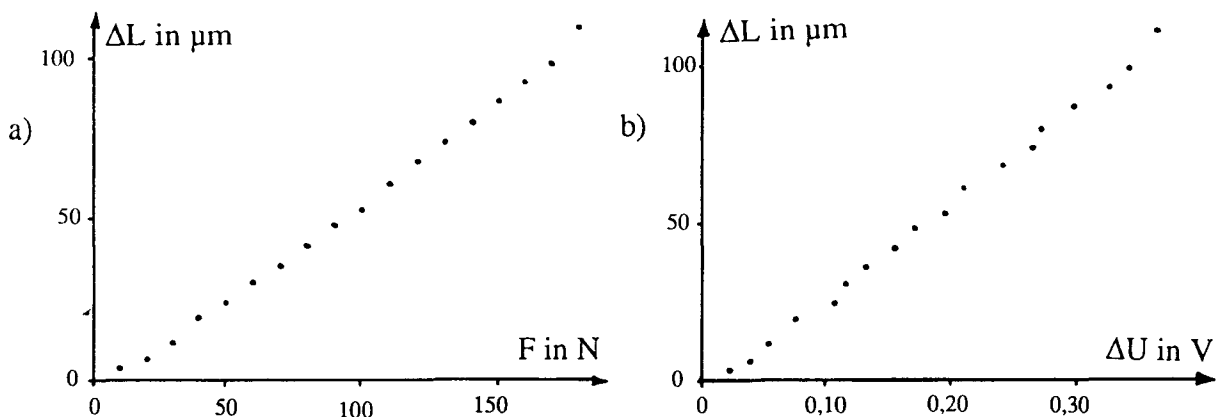


Abb.4: Auswertung des Zugversuchs nach Abb.3.

4.2 Biegen eines Stabes

Nach dem einfachen Fall einer konstanten Dehnung in einem Stab folgt nun der logisch nächste Schritt einer örtlichen Abhängigkeit von ϵ . Wenn der gelangweilte Schüler "Biegeversuche" mit seinem Plastiklineal anstellt, mag er sich vielleicht fragen, wie Kraft, Hebelarm und Biegung zusammenhängen. Ist er nach einem Bruch um die Erfahrung reicher, daß die größte Biegung an der Befestigungsstelle auftritt, so interessiert ihn vielleicht, wie man die Belastbarkeit des Lineals erhöhen kann.

Verwendet wird wieder der Plexiglasstab von 4.1. Sein Querschnitt von $20 \cdot 20 \text{ mm}^2$ wurde hergestellt, indem zwei gleiche Stäbe mit einem Querschnitt von je $10 \cdot 20 \text{ mm}^2$ mit einem speziellen

Acrylkleber zusammenklebt wurden. So war es möglich einen zweiten DMS in der Mitte des Stabes anzubringen (Abb.5).

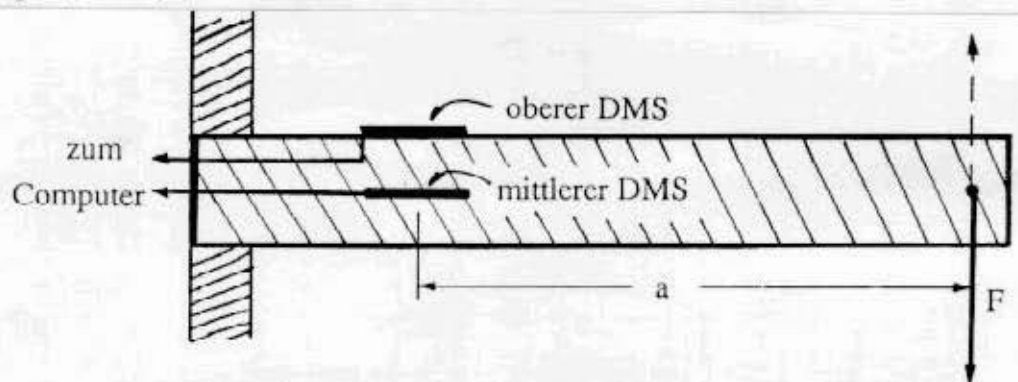


Abb.5: Schema des Plexiglasstabes mit einem DMS an der Oberseite und einem in der Mitte.

Bevor mit elektrischen Messungen begonnen wird, soll der Schüler zunächst von der Anschaulichkeit eines visuellen Eindrucks profitieren: Auf einem Tageslichtprojektor liegen zwei gekreuzte Polaroids und dazwischen wird der Plexiglasstab gebogen. Es ist ein bekanntes Phänomen bei Plexiglas, daß hier innere Spannungen zu optischer Doppelbrechung und damit bei passender Beobachtung zu verschiedenen Hell- und Dunkelwerten führen (Spannungsoptik). Auf diese Weise erkennt man deutlich, daß bei beliebigen Biegungen des Stabes genau in der Mitte weder eine Stauchung noch eine Dehnung erfolgt (Abb.6). Aus der Spannungsoptik ist bekannt, daß jeder neue Streifen genau die doppelte Spannung des vorhergehenden anzeigt. Aus den äquidistanten Streifen kann damit geschlossen werden, daß von der neutralen Faser in der Mitte ausgehend die Biegespannung linear nach außen hin zunimmt.

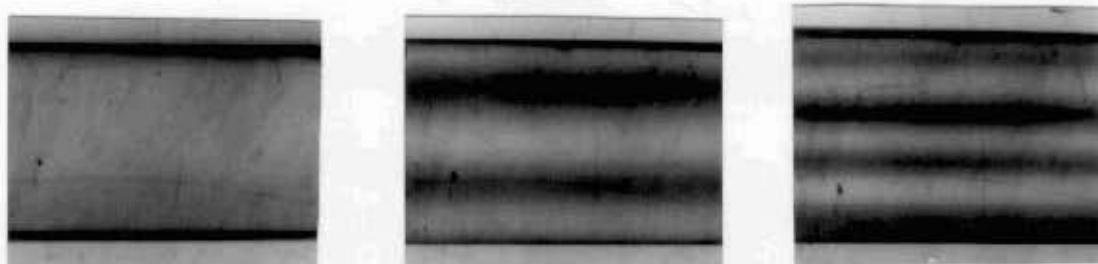


Abb.6: Spannungsoptische Aufnahmen eines gebogenen Plexiglasstabes: Mit zunehmender Biegung wandern immer mehr Farbstreifen von außen nach innen; der mittlere Bereich hat aber stets die gleiche Farbe ("neutrale Faser").

Damit ist das Konzept der "neutralen Faser" in einer experimentellen Weise eingeführt. Nun kann man zu Messungen mit den beiden DMS übergehen: Der mittlere DMS liefert bei beliebigen Biegungen kein Spannungssignal (Gegenprobe durch Dehnung in Längsrichtung), während der DMS an der Oberfläche die Stärke und das Vorzeichen der Längenänderung anzeigt (Abb.7).

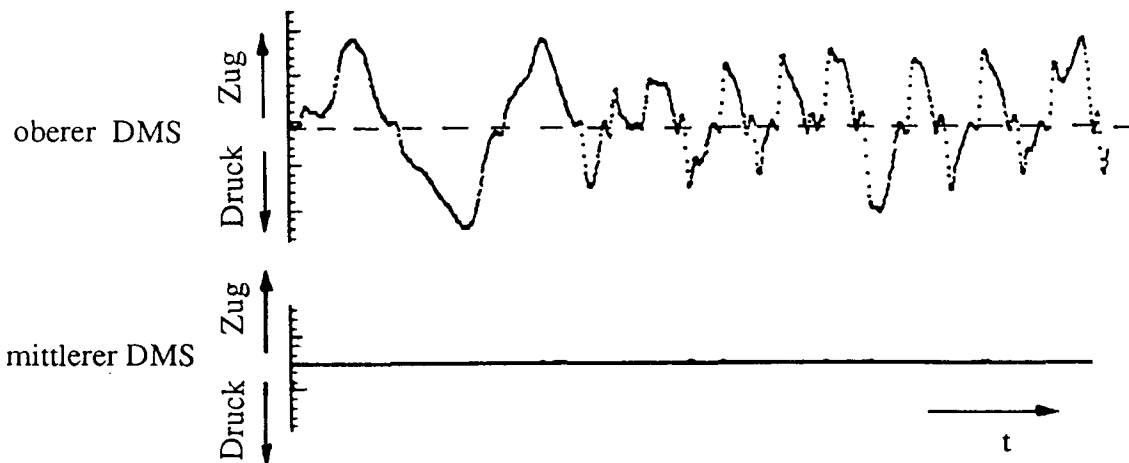


Abb.7: Dynamische Aufzeichnung der Spannungssignale der beiden DMS am Plexiglasstab bei beliebigen Biegungen: Während der obere DMS heftig anspricht, zeigt sich der mittlere DMS völlig unberührt (neutrale Faser).

Für eine quantitative Betrachtung des Biegeverhaltens eines Balkens sind die Einflüsse der Biegekraft F , des Hebelarmes a , der Balkenhöhe h und der Balkenbreite b von Belang. Außerdem spielt das Material des Balkens, ausgedrückt in seinem Elastizitätsmodul E , eine Rolle. Aus diesen Größen lässt sich mit nicht unbeträchtlichem rechnerischen Aufwand die übliche Formel der Balkenbiegung theoretisch herleiten. Als Ergebnis erhält man für die Materialdehnung ϵ an der Balkenoberseite an der Stelle a (siehe Abb.8):

$$\epsilon = \frac{6 \cdot F \cdot a}{E \cdot b \cdot h^2} \quad (10)$$

Auch die Zug- (oder Druck-) beanspruchung des Materials (σ in N/mm^2) lässt sich mit $\sigma = E \cdot \epsilon$ hieraus angeben.

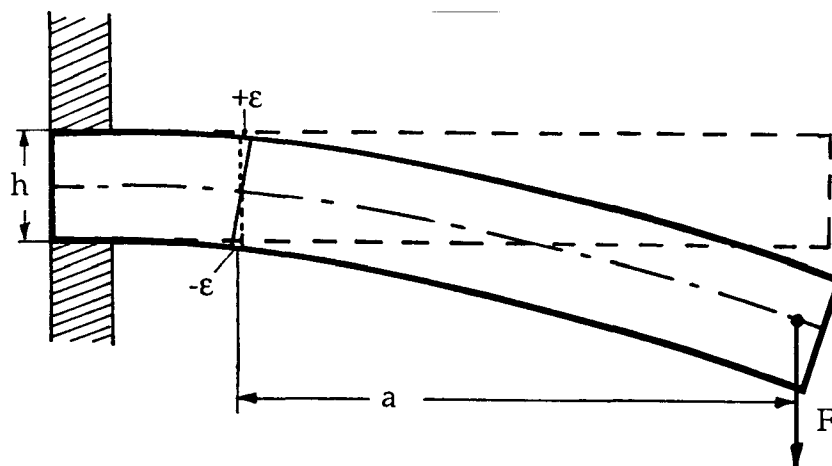


Abb.8: Schema einer belasteten Querschnittsfläche (Die Breite des Balkens, senkrecht zur Zeichenfläche, sei b).

Mit Hilfe des Balkens, wie er in Abb.8 dargestellt ist, lassen sich die Abhängigkeit von (10) aber direkt aus dem Experiment gewinnen. Dabei wird natürlich nur der DMS an der Oberfläche betrachtet.

- $\epsilon \sim F$: Bei fest eingespanntem Plexiglasstab ist die lokale Dehnung proportional zur Biege­kraft F (Abb.9a).
- $\epsilon \sim a$: Die Biegung ist propotional zum Hebelarm (Abb.9b). Die größte Biegung ist an der Befestigungsstelle; längs der Wirkungslinie der Biege­kraft F ist keine Dehnung gegeben. Hieraus folgt, daß die Materialbeanspruchunh an der Einspannstelle an der Balkenoberseite am größten ist.
- $\epsilon \sim 1/h^2$: Ein doppelt so dicker Stab ist viermal so stark belastbar. (Der eingangs zu 4.2 erwähnte Schüler sollte sein Lineal hochkant benützen.)
- $\epsilon \sim 1/b$: Ein doppelt so breiter Stab ist nur doppelt so stark belastbar.

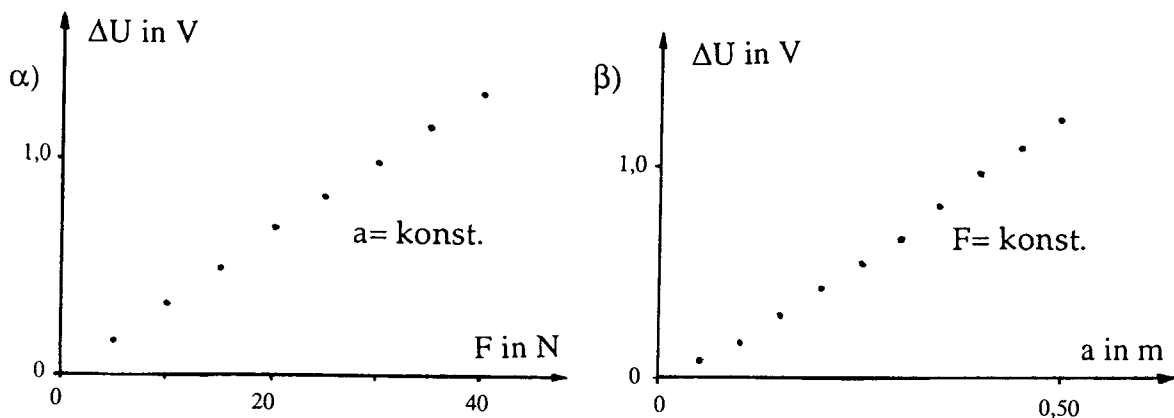


Abb.9: Meßkurven zur Abhängigkeit der Dehnung ϵ : α) von der Kraft F (Abstand $a = \text{konst.}$); β) vom Hebelarm a (Kraft $F = \text{konst.}$).

Diese Ergebnisse bilden die Grundlage um Alltagsbezüge zur Statik herzustellen:

- Für einen gegebenen Balken läßt sich die maximale Belastbarkeit abschätzen.
- Bei geschickter Wahl des Querschnittsprofils (T-Träger, Rohr ...) läßt sich Material sparen.
- Die Armierung eines Betonträgers oder einer Betondecke ist am sinnvollsten weit entfernt von der neutralen Faser und auf der Seite der stärksten Zugbelastung anzubringen.

4.3 Der Kraftstoß

Das dritte Anwendungsbeispiel macht Gebrauch von der Möglichkeit, dynamische Kraftmessungen vorzunehmen. Hier handelt es sich um eine wünschenswerte Erweiterung der bisherigen Möglichkeiten bei Schulexperimenten, z.B. auf der Luftkissenschiene zur Impulserhaltung beim Stoß:

$$p_{1 \text{ vorher}} + p_{2 \text{ vorher}} = p_{1 \text{ nachher}} + p_{2 \text{ nachher}}$$

Erfahrungsgemäß liegen aber die Verständnisschwierigkeiten mehr beim Begriff Kraftstoß $\int F dt$. Mit dem DMS läßt sich nun die Äquivalenz von Kraftstoß und Impulsänderung überprüfen (siehe

Abb.10): Ein Gleiter wird an einem Federstreifen reflektiert, an dem ein DMS aufgeklebt ist. So läßt sich für unterschiedliche Massen m und Geschwindigkeiten v des Gleiters folgender Zusammenhang zeigen:

$$\Delta p = p_{\text{vorher}} + p_{\text{nachher}} = \int F dt \quad (11)$$

Bei richtiger Wahl der Integrationsgrenzen gilt die Gleichung (11) für beliebige Stöße, für vollständig elastische ebenso wie für teilweise inelastische.

Die Analyse der aufgezeichneten Kraftkurven führt zu einem tieferen Verständnis des Stoßes: Man vergleiche z.B. zwei verschiedene Stoßwechselwirkungen, einen ‘Federstoß’, hier ist nur die Elastizität des Metallstreifen wirksam, und eine ‘magnetische Stoßkopplung’, hier sind am Gleiter und am Metallstreifen abstoßende Magnete angebracht (Abb.11).

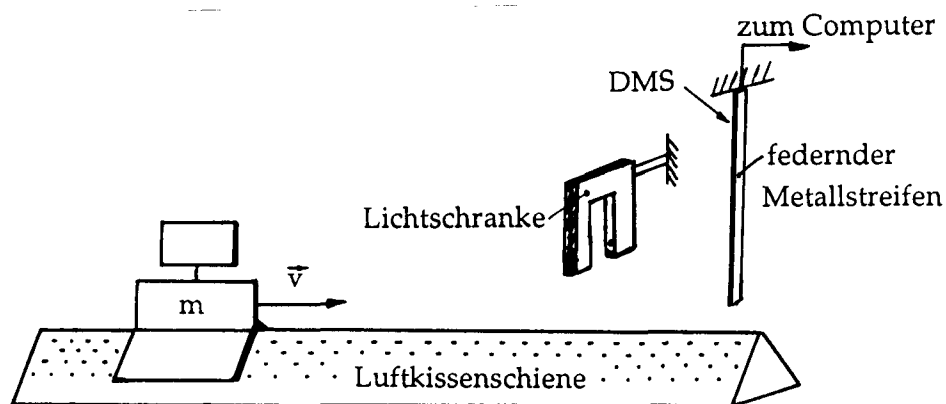


Abb.10: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Äquivalenz von Kraftstoß und Impulsänderung.

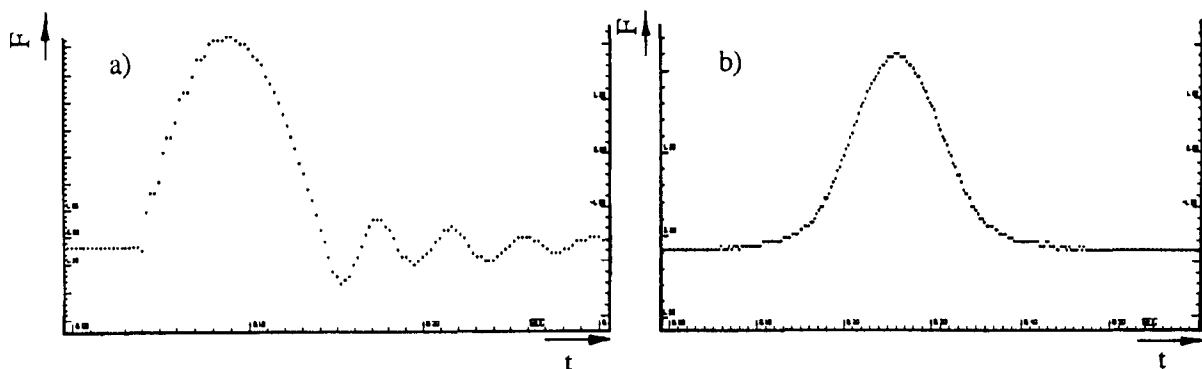


Abb.11: Kraftkurven bei der Reflektion eines Luftkissengleiters: a) ‘Federstoß’, b) ‘magnetische Stoßkopplung’.

Beim Federstoß erkennt man, daß nach dem Stoß die Feder nachschwingt. Sie gibt die zwischengespeicherte Energie nicht vollständig an den Gleiter zurück (Abb.11a). Dies beeinträchtigt die Impulsbilanz und erweist sich für den Schüler als verwirrend. Anders ist der Kraftverlauf bei magnetischer Kopplung; hier handelt es sich um einen nahezu elastischen Stoß (Symmetrie der

Kraftkurve, kein Nachschwingen der Feder). Dies liegt daran, daß die magnetische Kopplung anfangs sehr weich anspricht und dann schnell immer stärker wird (Abb.11b). Deshalb eignet sich diese Kopplung besser für die erste quantitative Diskussion der Impulserhaltung. Führt man Stöße mit unterschiedlicher Masse des Gleiters oder verschiedenen Geschwindigkeiten durch, so bestätigt sich immer wieder der Zusammenhang:

$$\text{"Fläche"} = \int F dt = 2 \cdot m \cdot v$$

Der allgemeine Zusammenhang aus (11) kann jetzt mit dem direkten Federstoß untersucht werden. Dabei kann eine Diskussion über die Form der Kurve angeschlossen werden; der erste sinusförmige Bogen läßt sich auch theoretisch begründen.

4.4 Beispiele mit Alltagsbezug

Für den Lehrer mag der DMS attraktiv sein, weil sich damit eine Reihe von üblichen Schulversuchen verbessern lassen. Schüler dagegen interessieren sich vor allem für Problemstellungen des Alltags: Bei vielen Sportarten (Hochsprung, Volleyball, Basketball etc.) kommt es sehr auf die "Sprungkraft" an. Die mühsamen Übungen beim Sprungtraining und ein Muskelvergleich bei guten und schlechteren Springern lassen vermuten, daß es vor allem auf die Kraft ankommt. Die Analyse mit Hilfe der Physik kann jedoch wertvolle Tips geben, wie sich ohne Krafttraining, alleine durch eine bessere Bewegungstechnik, deutliche Verbesserungen erzielen lassen.

Mit einer DMS-Anordnung kann man ein einfaches Meßgerät zur Analyse der Sprungtechnik herstellen (Abb.12). Im Prinzip handelt es sich dabei um eine Personenwaage, mit der sich auch dynamische Kraftabläufe registrieren lassen. Damit kann nun eine Versuchsperson Messungen zum Hochsprung aus dem Stand durchführen. Abb.13 zeigt das Ergebnis, das für einen physikalisch Unkundigen sehr überraschend sein mag: Für eine möglichst große Höhe kommt es nicht auf eine maximale Kraft, sondern auf einen möglichst großen Kraftstoß, also "Kraft mal Zeit" an. Der Kraftstoß entspricht der Impulsänderung $\Delta p = m \cdot v - 0$ (vgl. 4.3) und die Anfangsgeschwindigkeit v entscheidet über die Sprunghöhe (senkrechter Wurf). Der Alltagsbegriff "Sprungkraft" ist wie

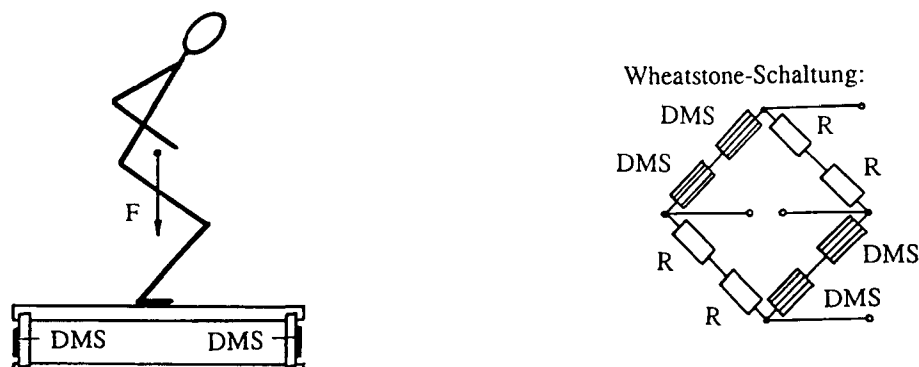


Abb.12: Meßanordnung zur Analyse von Hochsprungtechnik: Die Absprungplatte steht auf vier Röhrchen, an denen jeweils ein DMS angeklebt ist.

so viele andere irreführend und bedarf einer physikalischen Präzisierung. Die Meßanordnung hilft also dem Sportler bei der Optimierung seiner Sprungtechnik: Er muß versuchen, so zu springen (tiefe Kniebeuge etc.), daß die Fläche unter der Kraftkurve maximal wird. Der Wert des Integrals läßt sich dann in Abhängigkeit von der Masse des Sportlers direkt in eine Sprunghöhe umrechnen.

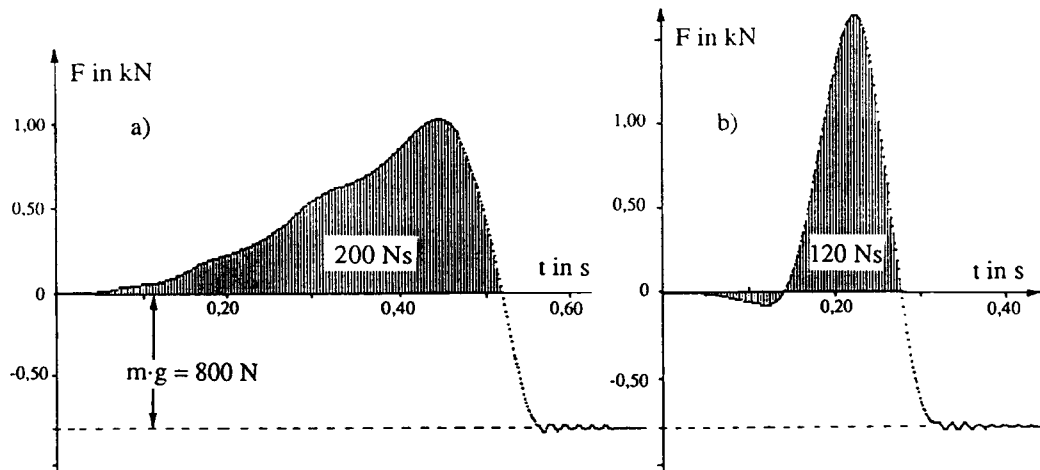


Abb.13: Verschieden Meßkurven beim Hochsprung aus dem Stand: a) Mit Kniebeuge - maximaler Kraftstoß ($h = 30 \text{ cm}$); b) ohne Kniebeuge - maximale Kraft ($h = 10 \text{ cm}$),

In ähnlicher Weise lassen sich noch andere Fragen aus dem Erfahrungsbereich des Schülers behandeln:

- In welcher Weise werden durch die Speichen eines Rades Kräfte übertragen? Steht das belastete Rad auf den Speichen oder hängt es daran?
- Welche Kräfte treten beim Aufprall fallender Körper auf?
- Wie wirkt die Knautschzone beim PKW?
- Wie hängt die Aufhängkraft eines Pendels von der Schwingung ab? Kann man daraus einen Aufnehmer für Fahrbahnunebenheiten konstruieren?

Die beschriebenen Arbeiten wurden am Lehrstuhl für Didaktik der Physik der Universität München durchgeführt. Für die vielen Anregungen möchten wir uns an dieser Stelle bei den Kollegen und besonders bei Prof. Luchner bedanken, der uns maßgeblich unterstützte.

5.Literatur

- [1] DMS Kraftaufnehmer der Firma Leybold Didactic GmbH, Hürth
- [2] Die Glasfahrbahn von G.Höhne, Hösbach
- [3] Meßverstärker für Sensoren zum Ms-Interface, Firma microsystems, Garching
- [4] Bezugsquelle für DMS: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt
- [5] Michael Fröhlich, Schriftl. Hausarbeit, Lehrstuhl für Didaktik der Physiuk, Sektion Physik, Universität München