

Versuch 1a.3: Biegung elastischer Stäbe

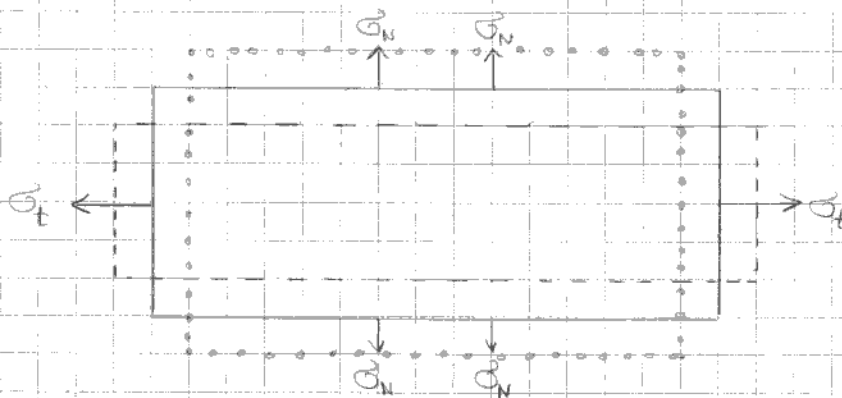
Das Ziel des Versuches ist die Bestimmung des Elastizitätsmoduls E als Proportionalitätsfaktor des Hooke'schen Gesetzes.

1. Theorie

Das Hooke'sche Gesetz $\sigma(y) = E \frac{\Delta L}{L}$ beschreibt für hinreichend kleine Kräfte an der Oberfläche einen linearen Zusammenhang zwischen der Spannung σ und den durch diese hervorgerufenen relativen Gestaltänderungen in Form und Volumen. Die Spannung teilt sich dabei in zwei Komponenten auf: die Normalkomponente bewirkt eine Längenänderung senkrecht, die Tangentialkomponente eine Längenänderung parallel zur Kraftrichtung auf die Probe.

(1)

Da die Längenänderungen für die meisten Proben allerdings zu gering sind, eignet sich eine direkte Messung nicht; anstelle derer wird die Deformation Δx eines Stabes gemessen, welcher durch eine äußere Kraft verbogen wird. Die Deformation ist bei gleichem Probenquerschnitt, gleicher Kraft und gleichbleibender Stablänge einfacher zu messen.

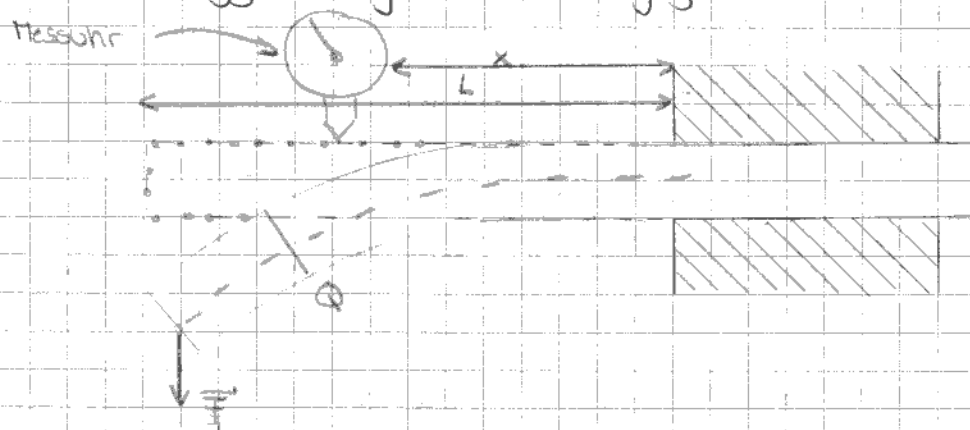


Skizze (1)

Auswirkung von Normal- und Tangentialspannung
auf einen Probekörper [?]

1.1. Einseitige Einspannung

Die angreifende Kraft F übt ein äußeres Drehmoment M_F auf den Stab aus. Oberhalb einer nicht-gestauchten oder -gestreckten Fläche, des sogenannten neutralen Faser, wird der Stab gestreckt, unterhalb dieser zusammengestaucht. Die neutrale Faser ist in der Skizze (2) gestrichelt eingezeichnet.



Quelle?

Im Stabinnern baut sich als Reaktion auf das äußere Drehmoment und die daraus resultierende Verformung eine entgegengesetzte Spannung auf, welche ein inneres Drehmoment M_σ bewirkt. Beim Gleichgewicht der Momente wird der Stab nicht weiter verformt und nimmt eine stabile, durchgebogene Form an. Bei Erreichen des Gleichgewichts gilt:

$$M_F = F(L-x) = \int_Q \sigma(y) dQ = M_\sigma \quad (2)$$

Das äußere Drehmoment ist gerade das Produkt des äußeren, einwirkenden Gewichtes und der dadurch hervorgerufenen Kraft F und des Hebelarms $L-x$. Das innere Drehmoment ist darstellbar durch das Integral über den Probenquerschnitt Q , dessen Integrand durch die innere Geometrie des gebogenen Stabes und dem Hookeschen Gesetz weiter umgeformt werden kann.

Die differentialgeometrische Annäherung $\frac{1}{R} = \frac{d^2 D}{dx^2}$ mit dem Krümmungsradius R der Faser erbringt die Gleichung

$$M_0 = E \frac{d^2 D}{dx^2} \int y^2 dq = F(L-x) = M_F \quad (2a)$$

Daraus ergibt sich nach zweifachem Integrieren eine Gleichung, die Deformation D und Ort x verknüpft und mit deren Hilfe der Elastizitätsmodul bestimmt werden kann. Die Integrationskonstanten fallen aufgrund der Annahme weg, dass der horizontal eingespannte Stab an der Einspannung keine Deformation aufweist und dabei $D(0) = D'(0) = 0$ gilt.

Mit $I = \int_Q y^2 dq$, dem Flächenträgheitsmoment ($I = \text{konstant}$) (3) ^{nicht} nötig wird die Gleichung auf folgende Form gebracht:

$$D(x) = \frac{F}{2EI} (Lx^2 - \frac{1}{3}x^3) \quad \text{für } 0 \leq x \leq L \quad (4)$$

1.2 Zweiseitige Auflage

Die Durchbiegung kann ebenfalls bei beidseitiger Auflage bestimmt werden. Die Kraft F übt nun von der Stabmitte ~~aus~~ ein Drehmoment M_F auf die Probe aus.

$$M_F = -\frac{F}{2}x \quad \text{für } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad M_F = -\frac{F}{2}(L-x) \quad \text{für } \frac{L}{2} \leq x \leq L \quad (5)$$

Mit der Bedingung, dass die Steigung der Biegekurve am Angriffspunkt der Kraft Null beträgt $\frac{dD}{dx}(\frac{L}{2}) = 0$ kann nun nach selbigem Prinzip wie in Kapitel 1.1 die Deformation $D(x)$ für den links- und rechtsseitigen Teil des Stabes hergeleitet werden.

$$D(x) = \frac{F}{48EI} (3L^2x - 4x^3) \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (6)$$

$$D(x) = \frac{F}{48EI} (4x^3 - 12Lx^2 + 9L^2x - L^3) \quad \frac{L}{2} \leq x \leq L$$

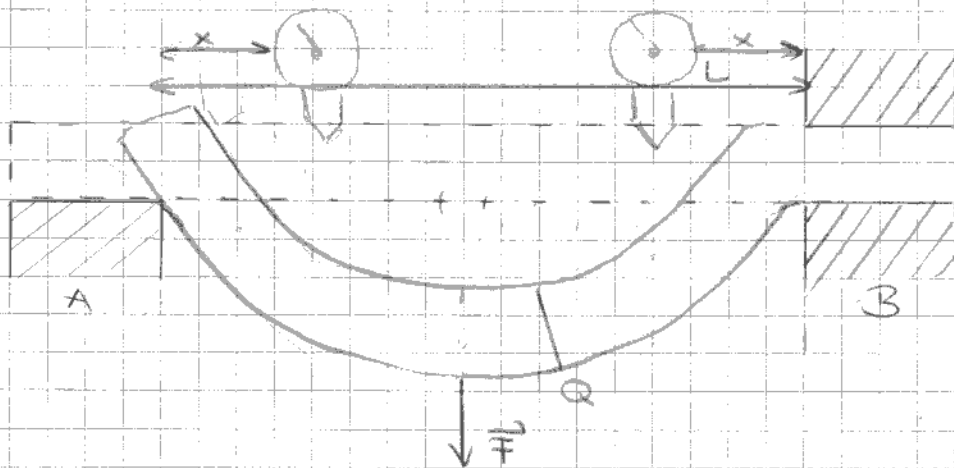
2. Durchführung und Aufbau

Es werden zwei verschiedene Stäbe ausgewählt, deren Seilenlängen bzw. Durchmesser mehrfach ausgemessen werden.

Für die Messung bei einseitiger Einspannung wird der Stab, wie in Skizze 1 gezeigt, in der Messvorrichtung an einer Seite fest eingespannt und die Gesamtlänge L des freihängenden Stabes ermittelt. Zur Messung der Auslenkung D am Messpunkt x wurde eine sich auf dem Messschieber befindliche Messuhr benutzt.

Zunächst wird das Gewicht vom Stab getrennt und die Messuhr an dieser Stelle auf Null gesetzt, um anschließend das Gewicht an dem freien Ende des Stabes zu befestigen und den Wert für die Auslenkung abzulesen. Die Messuhr wird auf dem Messschieber zum nächsten Messpunkt x verschoben und das Verfahren wiederholt, so dass 20 Messwerte aufgenommen werden.

Für die Messung bei beidseitiger Auflage wird der Stab in der Messvorrichtung an dem Einspannpunkt B fest eingespannt und auf den Auflagepunkt A gelegt. Die Distanz L vom Einspannpunkt B zum Auflagepunkt A wird bestimmt und auf der Mitte des



Skizze 2

Quelle?

Stabes ein Gewicht platziert. Wie aus der Zeichnung zu entnehmen ist, werden zwei Messuhren benutzt, die beginnend an A und B die Deformation D in Abhängigkeit des Ortes x aufnehmen, nachdem das Gewicht vom Stab getrennt und die

Messungen an diesen Stellen auf Null gesetzt wurden. Die weitere Vorgehensweise stimmt mit dem Vorgehen bei einseitiger Einspannung überein. Die Massen der Gewichte werden bestimmt.

Wie?

Messung 0: Abmessungen der Proben

0.2 Abmessungen des rechteckigen Stabes

Seite x /mm	Seite y /mm
10,05	10,05
10,10	10,05
10,05	10,05
10,00	10,05
10,00	10,10
10,05	10,15
10,10	10,00
10,00	10,05
10,15	10,10
10,15	10,15

Tabelle 0.2

Länge der Seite x : $(10,07 \pm 0,06)$ mm

Länge der Seite y : $(10,07 \pm 0,05)$ mm

0.1 Abmessungen des runden Stabes

Durchmesser d /mm

10,00
10,00
10,00
10,20
10,20
10,10
10,10
10,15
10,10
10,00

Tabelle 0.1

Durchmesser $d = (10,08 \pm 0,08)$ mm, Radius $r = (05,04 \pm 0,04)$ mm

Messung 1: Bänder Stab in einseitiger Einspannung

Ort x /mm	Auslenkung Δx /mm	Linearisierung x_{lin} /mm	Einheiten? mm ³
40	0,10	765866,67	
60	0,19	1699200,00	
80	0,32	2978133,33	
100	0,47	4586666,67	
120	0,70	6508800,00	
140	0,87	8728533,33	
160	1,11	11229866,00	
180	1,36	13996800,00	
200	1,64	17013333,33	
220	1,94	20263466,67	
240	2,25	23731200,00	
260	2,61	27400533,33	
280	2,94	31258466,67	
300	3,31	35280000,00	
320	3,66	39458133,33	
340	4,06	43773866,67	
360	4,45	48600000,00	
380	4,83	53187333,33	
400	5,25	57866666,67	
420	5,69	62622000,00	

Länge des freihängenden Stabes: $L = 492 \text{ mm}$

$$x_{\text{lin}} = Lx^2 - \frac{1}{3}x^3$$

Messung 2: Rechteckiger Stab in einseitiger Einspannung

Ort x / mm	Auslenkung Δx / mm	Linearisierung x_{lin} / mm	s.c.
40	0,05	81706,67	
60	0,11	1814400,00	
80	0,19	3182933,33	
100	0,29	4906666,67	
120	0,40	6969600,00	
140	0,52	9355733,33	
160	0,68	12049066,67	
180	0,81	15033600,00	
200	0,99	18293333,33	
220	1,17	21812266,67	
240	1,35	25574400,00	
260	1,54	29563733,33	
280	1,86	33764266,67	
300	1,97	38160000,00	
320	2,20	42734933,33	
340	2,42	47473066,67	
360	2,67	52358400,00	
380	2,89	57374933,33	
400	3,15	62506666,67	
420	3,42	67737600,00	

Länge des freihängenden Stabes $L = 524 \text{ mm}$

$$x_{lin} = Lx^2 - \frac{1}{3}x^3$$

Tabelle 2

Messung 3: Runder Stab in zweiseitiger Auflage

Ort x /mm	Auslenkung Δx_r /mm	Δx_l /mm	Linearisierung x_{lin} /mm	s.O.
40	0,16	0,08	36094000	
60	0,35	0,14	53586000	
80	0,45	0,20	70552000	
100	0,55	0,28	86750000	
120	0,64	0,37	101988000	
140	0,70	0,46	116074000	
160	0,79	0,55	128816000	
180	0,84	0,63	140022000	
200	0,88	0,72	149500000	
220	0,92	0,79	157058000	
240	0,93	0,85	162504000	

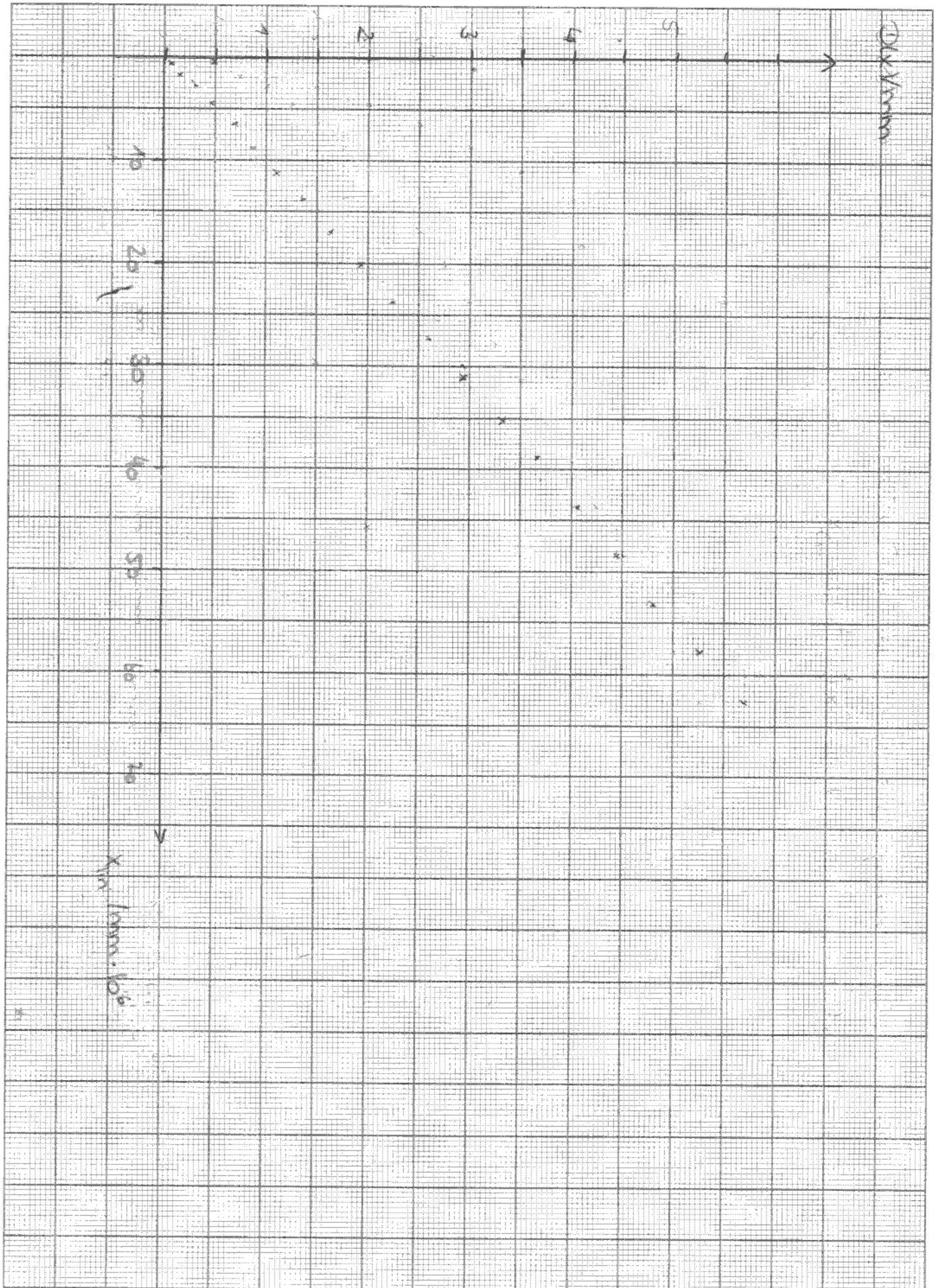
Länge des freihängenden Stabes $L = 550$ mm

Δx_r : Auslenkung, gemessen rechts vom Gewicht

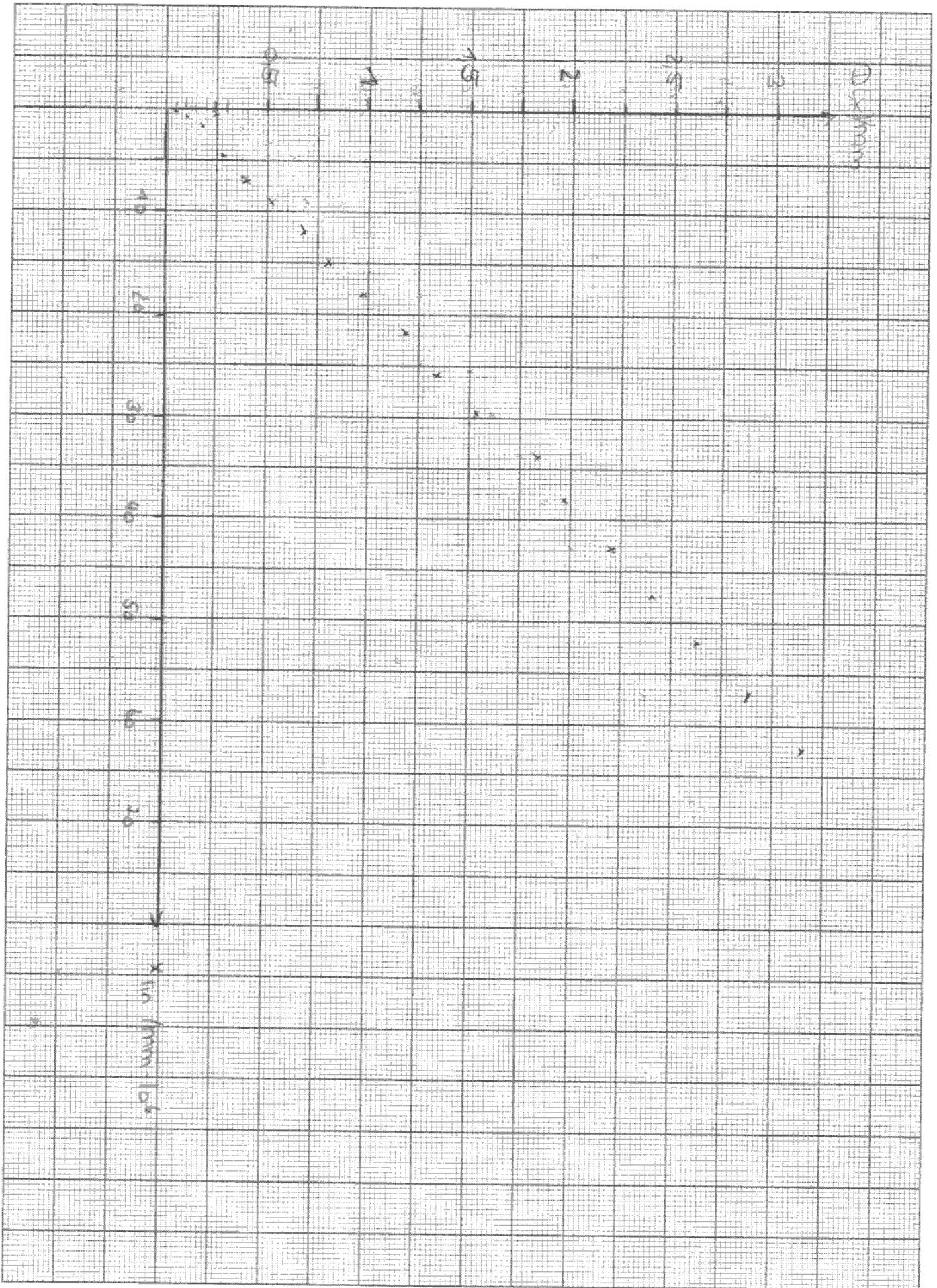
Δx_l : Auslenkung, gemessen links vom Gewicht

$$x_{lin} = 3L^2x - 4x^3 \quad \leftarrow \text{gilt nur für } 0 \leq x \leq \frac{L}{2}$$

Auslenkung des runden Stabes bei einseitiger Einspannung, aufgetragen gegen x_{lin}
 Werte entnommen aus Tabelle 1

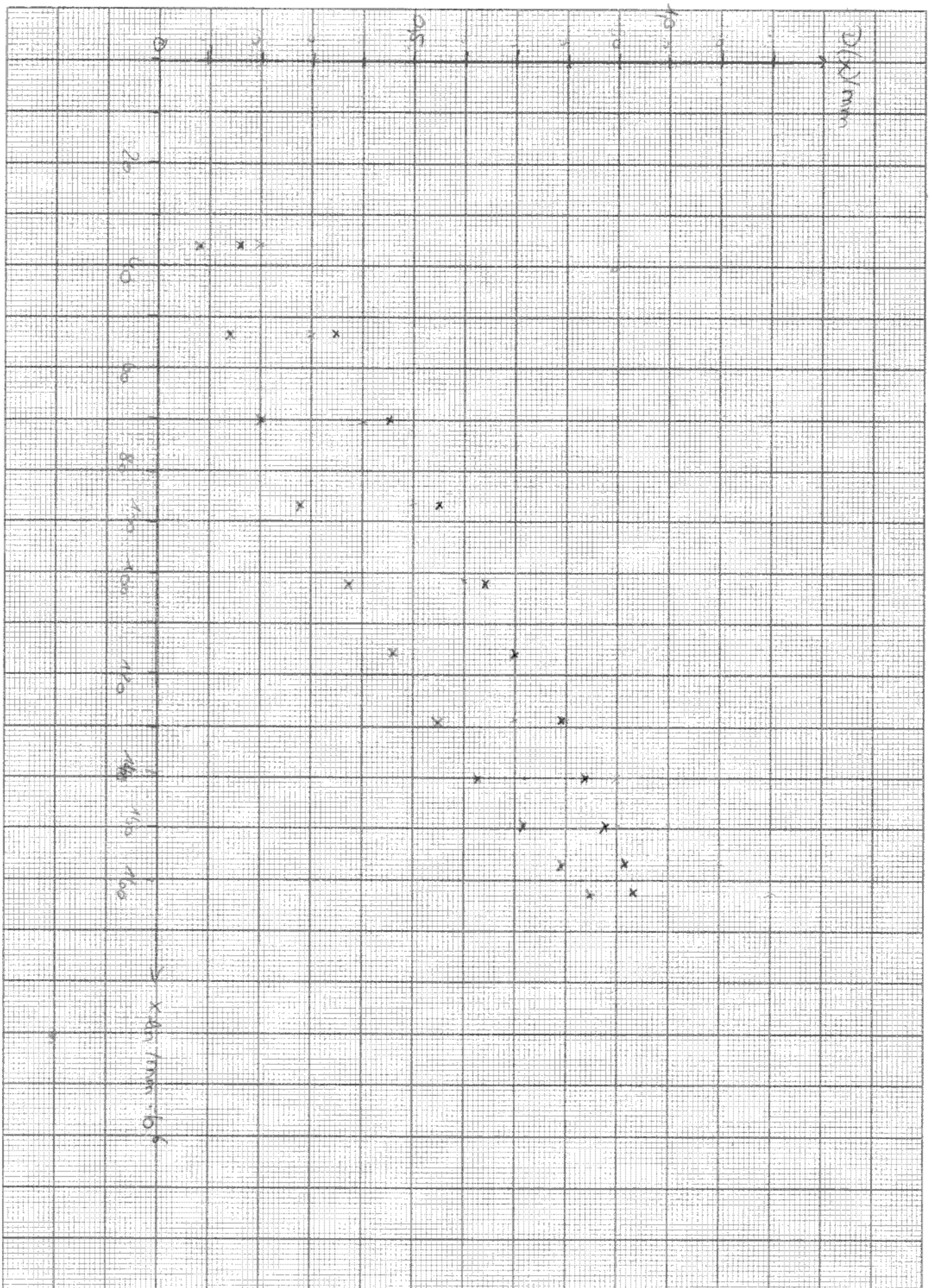


Auswertung des rechteckigen Stabes bei einseitiger Einspannung; aufgetragen gegen x_{in}
 Werte entnommen aus Tabelle 2



Δx und Δx aufgetragen gegen x im linken Koordinatensystem aus Tabelle 3

Abbildung des rechten Seiten bei beidseitiger Auflage;



3. Auswertung

3.1 Runder Stab in einseitiger Einspannung

Zur Berechnung des Elastizitätsmoduls E werden das Gewicht F , die Regressionssteigung m und das Flächenträgheitsmoment I benötigt.

Die Abmessungen des Stabes sind in Tabelle 0.1 aufgetragen, Mittelwert und Fehler werden mit den Formeln

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

berechnet. Das Flächenträgheitsmoment I wird über den kreisförmigen Stabquerschnitt Q integriert, wofür die Polarkoordinaten ausgewählt werden ~~Wahl~~.

$$I = \int_Q y^2 dq(y) = \int_0^R \int_0^{2\pi} r^3 \sin^2 \varphi d\varphi dr = \int_0^R \int_0^{2\pi} r^3 \sin^2 \varphi d\varphi dr \quad (3)$$

$$\Rightarrow \int_0^R \left[\frac{1}{4} r^4 \right]_0^{2\pi} dr = \frac{1}{4} R^4 \pi \quad \text{mit } R = 5,04 \pm 0,04 \text{ mm}$$

Der absolute Fehler wird via Gauß'scher Fehlerfortpflanzung

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial R} \Delta R \right)^2} = \sqrt{(\pi R^3 \Delta R)^2} \quad (3.1)$$

berechnet. Damit ist das Flächenträgheitsmoment I für den runden Stab $I = (506,77 \pm 16,09) \text{ mm}^4$.

Besonderend aus der aufgehängten Masse M ergibt sich mit

$M = 0,76905 \text{ kg}$ und der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ der Wert $F = 0,76905 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 7,54 \text{ N}$.

Mit Hilfe der Formel (4) kann die Auslenkung $D(x)$ gegen die lineareisierte Variable $x_{lin} = Lx^2 - \frac{1}{3}x^3$ aufgetragen und eine lineare Regression ausgeführt werden. Die Regression erfolgt unter Zuhilfenahme von Rechnern und unter Verwendung der Formeln für die Steigung m , den y -Achsenabschnitt b und deren Fehler.

$$\Delta = N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2$$

$$m = \left(N \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i \right) \cdot \frac{1}{\Delta}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i}{\Delta}$$

(8)

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{Fehler}} &= \sigma_y = \sqrt{N \cdot \frac{1}{\Delta}} \\ b_{\text{Fehler}} &= \sigma_y \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot \frac{1}{\Delta}} \end{aligned} \right\} \text{ mit } \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2}{N-2}}$$

Einheiten, $m = (9,07 \pm 0,0304) \cdot 10^{-8}$, $b = 0,078 \pm 0,011$

Der gesuchte Elastizitätsmodul berechnet sich dadurch, dass die ermittelte Steigung m mit der linearen Funktion $D(x_{\text{lin}})$ mit $\frac{F}{2EI}$ nach Gleichung (4) übereinstimmt. Für E folgt daraus $E = \frac{F}{2mI}$.

(9)

Mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung und den fehlerbehafteten Größen m und I wird der relative Fehler vom E mit

absolute Fehler $3,2\%$ abgeschätzt. Daher ist $E = (82,003 \pm 3,2\%) \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

SI-Einheiten Dabei ist die allgemeine Formel für die Berechnung relativer

Fehler $\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \dots}$ (10)

Welches Material?

$$E = (8,202 \pm \Delta E) \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

3.2 Rechteckiger Stab in einseitiger Einspannung

Die Auswertung der Messwerte für den eichigen Stab geschieht konzeptionell ähnlich zu Kapitel 3.1. Die Abmessungen des Stabes sind in Tabelle 2 aufgetragen. Mittelwert und Fehler sind nach Formeln (7) ~~oder Formeln~~

$$x = (10,07 \pm 0,06) \text{ mm}$$

$$y = (10,07 \pm 0,05) \text{ mm}$$

Zur Berechnung des Flächenträgheitsmomentes nach (3)

werden kartesische Koordinaten verwendet.

$$I = \int y^2 d\eta(y) = \int_{-y_0/2}^{y_0/2} \int_{-x_0/2}^{x_0/2} y^2 dx dy = \left[\frac{1}{3} y^3 x_0 \right]_{-y_0/2}^{y_0/2} = \frac{1}{3} \left(\frac{y_0^3}{3} + \frac{y_0^3}{3} \right) x_0$$
$$= \frac{1}{12} y_0^3 x_0 \quad \text{mit } y_0 = (10,07 \pm 0,05) \text{ mm und } x_0 = (10,07 \pm 0,06) \text{ mm.}$$

Der absolute Fehler ~~ist~~ mit Formel (3.1) $\Delta I = 13,75 \text{ mm}^4$, woraus sich $I = (856,91 \pm 13,75) \text{ mm}^4$ ergibt. Die Kraft beträgt mit gleichbleibender ~~Gravitation~~ ^{Masse} ebenfall $F = 7,54 \text{ N}$.

Die Regression der Gleichung (4) ergibt analog zu Kapitel 3.1

$$m = \left(\frac{5,0 \pm 0,03735}{\dots} \right) \cdot 10^{-8}, \quad b = 0,05 \pm 0,013$$

Damit ergibt sich aus $m = \frac{I}{2EI}$ und der Fehlerfortpflanzung

$$\epsilon = 87,97 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \pm 1,77\% \quad \text{mit einem relativen Fehler s. O. von } 1,77\%$$

3.3 Bunker Stab in zweiseitiger Auflage

Da der selbe ~~Bunde~~ Stab wie bei einseitiger Einspannung benutzt wurde, sind Flächenträgheitsmoment I und Durchmesser D den oben Ausführungen zu entnehmen. Die Gesamtlänge des Stabes beträgt $L = 550 \text{ mm}$. Die Masse $M = 2,3605 \text{ kg}$ erzeugt eine Kraft von $F = 23,16 \text{ N}$.

Gemäß der Formel (6) $D(x) = \frac{F}{48EI} (3x^2 - 4x^3)$ kann die Auslenkung gegen x in aufgetragen werden, erneut mit Ausführung einer linearen Regression.

unnötig,
hat doch
Formel (6)
gesagt

Die Regression ermittelt gemäß Formeln (8) die Regressionskoeffizienten und deren Fehler

$$m_L = 15,830 \cdot 10^{-9} \pm 0,23 \cdot 10^{-9} \quad m_r = (6,140 \pm 0,32) \cdot 10^{-9}$$

$$b_L = 0,019 \pm 0,027$$

$$b_r = -0,211 \pm 0,038$$

linke Stabseite: $\frac{1}{2} \leq x \leq l$, rechts: $0 \leq x \leq \frac{1}{2}$

Der gesuchte Modul lässt sich dadurch bestimmen, dass die Steigung m von $D(x_{\text{cm}})$ mit $\frac{F}{48EI}$ nach Gleichung

(6) übereinstimmt. Es folgt mittels Gauß'scher Fehlerfort-

pflanzung $E_r = (155,04 \pm 9,649) \text{ kN/mm}^2$ mit einem rel. Fehler

s.O. von $6,22\%$ und $E_L = 163,31 \text{ kN/mm}^2 \pm 8,285 \text{ kN/mm}^2$

mit einer relativen Abweichung von $5,08\%$.

4. Diskussion

4.1. Vergleich mit Literaturwerten

4.1.1. Runder Stab bei einseitiger Einspannung

Durch den Versuch wurde der Wert $E = (82,003 \pm 2,620) \text{ kN/mm}^2$ als E -Modul des runden Stabes ermittelt. Vergleiche mit Literaturwerten² ergeben, dass dieser Wert im Spektrum der Werte von Messing mit $E(\text{Messing}) = [78.000; 123.000] \text{ N/mm}^2$ liegt. Mit einer relativen Unsicherheit von 3,195% liegen alle wahrscheinlichen Werte um den errechneten Wert von $82,003 \text{ kN/mm}^2$ im Rahmen der Literaturwerte. Daraus wird die Behauptung unterstützt, dass der ~~Messing-~~^m runde Stab massiv aus Messing-Legierung besteht. Trägt man die Werte für $D(x)$ gegen x_{ein} aus Tabelle 1 auf, zeigt sich in Diagramm 1 ein linearer Zusammenhang mit geringer Abweichung zwischen beiden Messgrößen (Fehlerwerte von m, b). Der geringe Wert von b ist zusätzliches Maß für die Plausibilität der Messwerte, da $D(x=0) = 0$ gilt.

4.1.2. E-förmiger Stab bei einseitiger Einspannung

Mit $E = (87,97 \pm 1,412) \text{ kN/mm}^2$ und einer relativen Unsicherheit von 1,605% und einer Abweichung von 12,782% des errechneten Wertes vom kleinste Literaturwert² erhärtet sich die Vermutung über das Material des verwendeten Stabes. Betrachtet man die Regression in Diagramm 2, so wird erneut der lineare Zusammenhang zwischen $D(x)$ und der Linearisierung erkennbar.

4.1.3. Runder Stab bei zweiseitiger Auflage

Für die Seite rechts des Gewichtes ergibt sich $E_r = (155,04 \pm 9,649) \text{ kN/mm}^2$.

Dieser Wert mit einer Unsicherheit von 6,224% weicht stark ab und liegt nicht im Spektrum der Literaturwerte. Der Wert unterscheidet sich um 112,383% vom kleinsten und 26,057% vom größten Literaturwert ab.

Für die linke Seite wurde $E_l = (163,31 \pm 8,285) \text{ kN/mm}^2$ mit einer Unsicherheit von 5,073% bestimmt und weicht ebenfalls signifikant - 223,71% vom höchsten und 32,72% vom geringsten Literaturwert - ab. Diese Fehler sind nicht durch kleine Messungenauigkeiten erklärbar.

Die großen Abweichungen werden eventuell durch die Versuchsdurchführung hervorgerufen. Um die Messhaken vor dem Messen der Auslenkung auf Null zu stellen, wurde das Gewicht nach jedem Verschieben der Messhaken zum Ort x abgehängt. Aufgrund der gegebenen Längenskala, welche für das genaue Ablesen der Stab-

mitte nicht geeignet war, besteht die Möglichkeit, dass das Gewicht anschließend nicht genau in die Mitte zurückgehängt, sondern leicht verschoben wurde. Die daraus resultierende ungleichmäßige Kraftverteilung ist in internen starken Schwankungen der Messwerte bemerkbar (siehe Diagramm 3 und Tabelle 3). Trotz angepaßter Linearisierung für die zweiseitige Auflage ergeben die Messwerte für die linke und rechte Seite keine eindeutige Gerade. Außerdem ist eine Abweichung der Werte zwischen linker und rechter Seite vorzufinden. Dies fußt auf der Tatsache, dass - entgegen der Annahme für die Linearisierung - nur ein Stabende wie in der Theorie gefordert auflag, während das Andere fest eingespannt wurde. Dadurch lassen sich die Differenzen der Messwerte am Ort x für Δx_r und Δx_l erklären.

Auszuschließende Fehlerquellen sind Messungen und eingeklemmte Mechanik, diesen Fehler würden ^{für} die Messungen bei einseitiger Einspannung vergleichbare Abweichungen bewirken. Weder Messungen, noch der gesamte Versuchsaufbau, wurden zwischenzeitlich ausgewechselt oder geändert.

4.2 Vergleich von rundem und eckigem Stab

Als Formfaktoren zeigen die Trägheitsmomente des runden Stabes

$$I_r = (56,77 \pm 16,09) \text{ mm}^4 \text{ und des eckigen Stabes } I_e = (856,91 \pm 13,75) \text{ mm}^4,$$

dass die Form des Stabes ein wesentlicher Bestimmungsfaktor für die Deformation ist.

Runde Formen umschließen im Vergleich zu anderen Formen eine Fläche mit kleinstmöglichem Umfang. Die äußersten Stabstücke d.h. von nicht-runden Stäben werden aufgrund der größeren Entfernung von der neutralen Faser stärker gestreckt oder gestaucht als die äußersten Stücke runder Stäbe, wodurch ein größerer Hebelarm realisiert wird. Diese bewirkt ein stärkeres inneres Drehmoment, welches das Momentengleichgewicht beeinflusst und die Deformation bestimmt.

4.3 Vergleich von einseitiger und zweiseitiger Einspannung / Fazit

Für die Bestimmung des Moduls eignen sich nach theoretischen Überlegungen beide Messvorgänge. Dabei ist die einseitige Einspannung der zweiseitigen Auflage vorzuziehen, da ersteres weniger fehleranfällig und leichter in der Durchführung ist. Die Theorie bei zweiseitiger Einspannung ist nicht ausreichend an die Durchführbarkeit angepasst, wodurch signifikante Fehler entstehen. Als alternative Durchführung zur Vermeidung von Fehlern sollten Offset-Werte separat aufgenommen und anschließend ohne

Abhängen des Gewichts die Auslenkung gemessen werden.

Diese Versuchsreihe eignet sich zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls.

Literaturverzeichnis

- 1 Skript zum Versuch 103 des physikalischen Anfängerpraktikums an der TU Dortmund, zu finden unter:

<http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V103.pdf>

- 2 Horst Czichos, Manfred Hennecke (Hrsg.): Hölle:

"Das Ingenieurwissen". Springer, 2004, ISBN 3-540-20325-7,
S. E 66.