

## VERSUCH 103

# Biegung von elastischen Stäben

Annika Bennemann  
annika.bennemann@tu-dortmund.de

Paulin Vehling  
paulin.vehling@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.11.2021

Abgabe: 26.11.2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
1.1	Allgemein . . . . .	3
1.2	einseitige Einspannung . . . . .	3
1.3	beidseitige Auflage . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
2.1	einseitige Einspannung . . . . .	6
2.2	beidseitige Auflage . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
3.1	runder Stab, einseitige Einspannung . . . . .	8
3.2	runder Stab, beidseitige Auflage . . . . .	9
3.3	eckiger Stab, einseitige Einspannung . . . . .	11
3.4	eckiger Stab, beidseitige Auflage . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>17</b>
	<b>Literatur</b>	<b>17</b>

# 1 Theorie

Ziel des Versuchs ist es, das Elastizitätsmodul eines Metalls zu bestimmen und die berechneten Daten mit Literaturwerten abzugleichen.

## 1.1 Allgemein

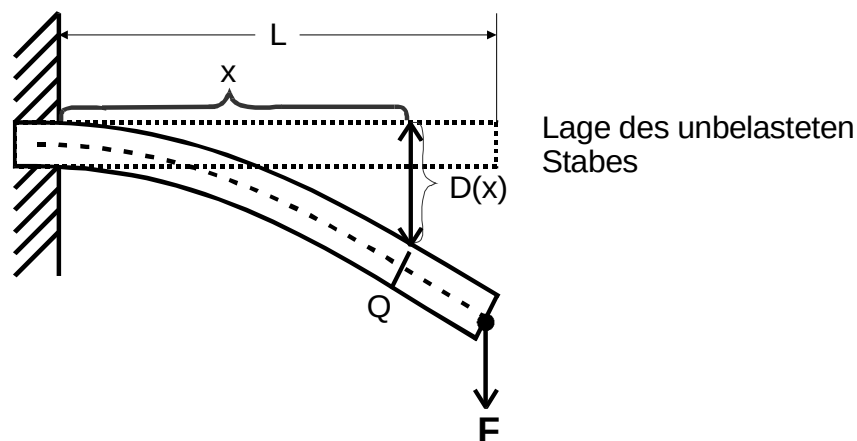
In der Physik können Körper Gestalts- und Volumenänderungen erfahren, wenn Kräfte an der Oberfläche angreifen. Diese Kräfte werden Spannungskräfte genannt, welche sich auf Flächeneinheiten beziehen. Die Spannung kann man komponentenweise aufteilen und die Komponente, die senkrecht zur Oberfläche steht, wird Normalspannung  $\sigma$  oder Druck bezeichnet. Tangential oder auch Schubspannung wird die oberflächenparallele Komponente genannt. Die Gestaltsänderung kann beschrieben werden durch  $\frac{\Delta L}{L}$ . Ist diese hinreichend klein, kann ein linearer Zusammenhang zwischen der Deformation  $\frac{\Delta L}{L}$  und der angreifenden Spannung  $\sigma$  gebildet werden [3, S. 106]. Das Hooksche Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

E ist das Elastizitätsmodul, was eine materialabhängiger Proportionalitätsfaktor ist. Dieses lässt sich bestimmen durch eine messbare Veränderung an einem Probestab bei nur geringer Krafteinwirkung. Diese Veränderung wird als Biegung bezeichnet, wobei die Durchbiegung  $D(x)$  größer als  $\frac{\Delta L}{L}$  ist bei gleichen Versuchsbedingungen.

## 1.2 einseitige Einspannung

Wird der Stab einseitig eingespannt und auf der anderen Seite wirkt eine Kraft, entsteht eine Durchbiegung  $D(x)$ . Entgegen der Kraft  $F$  wirkt zusätzlich eine Zugspannung in der



**Abbildung 1:** Durchbiegung eines elastischen Stabes bei einseitiger Einspannung [3, S. 107]

oberen Stabschicht und in der unteren eine Druckspannung (siehe Abbildung 1) . Daraus

lässt sich eine Drehmomentgleichung aufstellen:

$$M_F = M_Q \quad (2)$$

wobei das Drehmoment  $M_Q$  sich aus der Integration über den Querschnitt  $Q$  berechnet:

$$M_Q = \int_Q y \sigma(y) dq. \quad (3)$$

Das  $y$  ist der Abstand zur neutralen Faser. Dies ist der Zustand ohne Spannung, also wenn keine Kräfte auf den Stab wirken. Das Drehmoment  $M_F$  ist die äußere Kraft, die auf den Stabquerschnitt an der Biegung  $L - x$  angreift. Wobei  $L$  die Länge des eingespannten Stabes ist.

$$M_F = F(L - x) \quad (4)$$

Die beiden Drehmomente eingesetzt in die Gleichung Gleichung 2 ergeben:

$$\int_Q y \sigma(y) dq = F(L - x). \quad (5)$$

Durch Umformung der Gleichung und Beziehungen aus der Differentialgeometrie bei geringen Kurvenkrümmungen kann man des Hookschen Gesetzes für  $\sigma(y)$  einsetzen:

$$\sigma(y) = Ey \frac{d^2 D}{dx^2}. \quad (6)$$

Außerdem kann das Flächenträgheitsmoment  $I$  eingefügt werden, aufgrund der formalen Analogie zum Massenträgheitsmoment  $\Theta$  [3, S. 109].

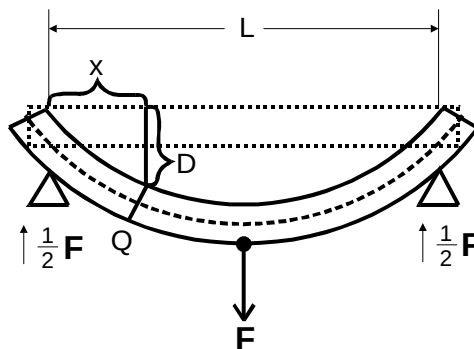
$$I = \int_Q y^2 dq(y) \quad (7)$$

Dies führt zur finalen Formel von  $D(x)$  für die einseitige Einspannung:

$$D(x) = \frac{F}{2EI} (Lx^2 - \frac{x^3}{3}) \quad (\text{für: } 0 \leq x \leq L) \quad (8)$$

### 1.3 beidseitige Auflage

Eine andere Methode zur Erzeugung einer Durchbiegung ist es den Stab auf beiden Seiten einzuspannen und ein Gewicht in die Mitte ein Gewicht zu hängen.



**Abbildung 2:** Durchbiegung eines elastischen Stabes bei beidseitiger Auflage [3, S. 110]

Dann greift die Kraft in der Mitte des Stabes an. Am Querschnitt  $Q$  mit dem Hebelarm  $x$  beträgt die Kraft dann  $\frac{F}{2}$  (siehe Abbildung 2). Deswegen muss der Stab in zwei Intervallen aufgeteilt werden, in denen sich das Drehmoment  $M_F$  unterscheidet.

Im Bereich  $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$  gilt:

$$M_F = -\frac{F}{2}x \quad (9)$$

und in dem Bereich  $\frac{L}{2} \leq x \leq L$  gilt:

$$M_F = -\frac{F}{2}(L - x). \quad (10)$$

Diese beiden Formeln werden beide in Gleichung 2 eingefügt und analog wie im vorherigen Kapitel umgeformt. Sodass sich für  $D(x)$  die folgenden Gleichungen ergeben:

$$D(x) = \frac{F}{48EI}(3L^2x - 4x^3) \quad (\text{für: } 0 \leq x \leq \frac{L}{2}) \quad (11)$$

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

## 2 Durchführung

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. An der Vorrichtung befinden sich auf einer Schiene mit Längenskalierung zwei verschiebbare Messuhren, die die Auslenkung messen. Zunächst werden die Massen und Maße der elastischen Stäbe mithilfe einer elektrischen Waage, eines Maßbandes und eines Messschiebers bestimmt. Bei den Probekörpern handelt es sich um einen rechteckigen und einen runden Stab des gleichen Materials.

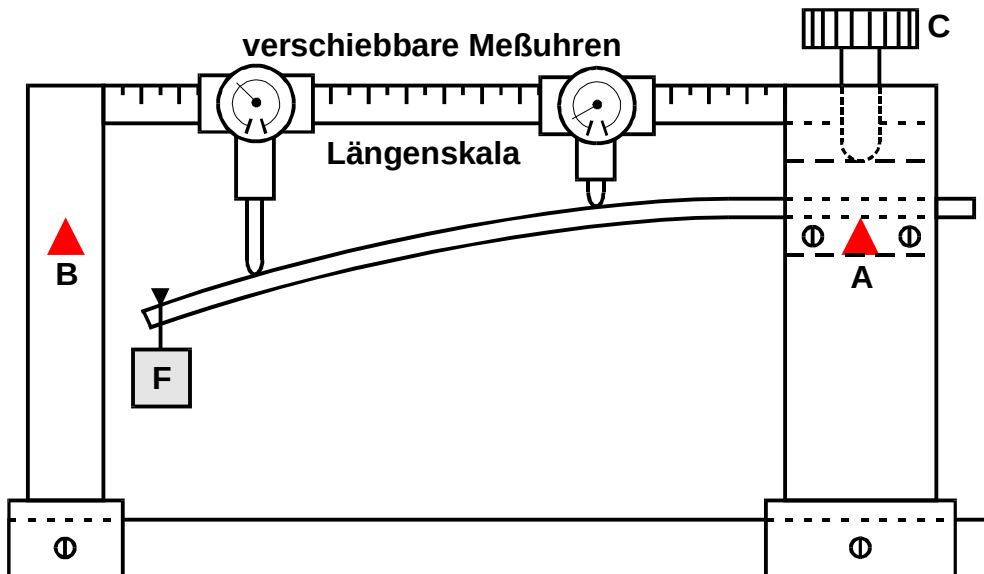


Abbildung 3: Aufbau der Apparatur zur Messung der Durchbiegung der elastischen Stäbe[3, S. 111]

## 2.1 einseitige Einspannung

Der Probekörper wird einseitig am Punkt C eingespannt. Am Ende des Stabes wird ein Gewicht angehängt, sodass sich der Stab durchbiegt. Hierbei soll eine maximale Auslenkung von 3 bis 7 mm erreicht werden. Es werden mehrere Messungen entlang des Stabes durchgeführt. Man kann nicht davon ausgehen, dass die Stäbe exakt gerade sind, daher werden die Messuhren vor jeder Messung der Auslenkung auf Null gesetzt, bevor das Gewicht angehängen wird. Nun wird die Auslenkung  $D(x)$  bestimmt und in Abhängigkeit vom Abstand  $x$  zur Einspannung in einer Tabelle notiert, bevor die Messuhr um einen Abstand von 2,5 cm verschoben werden.  $D(x)$  wird bestimmt durch die Formel:

$$D(x) = D_m(x) - D_0(x) \quad (13)$$

wobei  $D_0(x)$  hier Null ist, wenn die Messuhr vor jeder Messung auf Null gesetzt wird und  $D(x)$  somit direkt abgelesen werden kann.

## 2.2 beidseitige Auflage

Das Verfahren wird analog für die beidseitige Auflage wiederholt. Nun liegt der Probekörper jedoch auf den Punkten A und B auf und das Gewicht wird mittig angehängen anstatt am Ende des Stabes. Außerdem muss nun beachtet werden, dass an beiden Hälften des Stabes mit verschiedenen Messuhren gemessen wird.

## 3 Auswertung

**Tabelle 1:** Maße des runden und des eckigen Stabes

	Runder Stab	Eckiger Stab
$l$ / mm	592,0	602,0
$l_{\text{Lit}}$ / mm	551,82	591,18
$d$ bzw. $h$ / mm	10,0	10,0
$m$ / g	129,4	167,2
$m_{\text{Lit}}$ / g	120,9	164,0

Aus den bestimmten Daten der Stäbe wird die Dichte des Materials nach der Formel:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (14)$$

mit  $V$  = Volumen des Stabs, zu  $\rho_r = 2783,06 \text{ kg/m}^3$ , sowie  $\rho_e = 2777,41 \text{ kg/m}^3$  bestimmt. Aus dem Vergleich mit Literaturwerten [2] wird klar, dass es sich um Aluminium handelt.

Außerdem wird das Flächenträgheitsmoment  $I_r$  der Stäbe bestimmt. Bei einem runden Querschnitt wird dafür die Formel [1]

$$I_r = \frac{\pi(d/2)^4}{4}. \quad (15)$$

verwendet. Das Flächenträgheitsmoment für den runden Stab beträgt also:

$$I_r = 4,91 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4.$$

Das Flächenträgheitsmoment des eckigen Stabes mit quadratischem Querschnitt berechnet sich nach der Formel [1]:

$$I_e = \frac{b^4}{12}. \quad (16)$$

Das Flächenträgheitsmoment für den eckigen Stab beträgt also:

$$I_e = 8,33 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4.$$

.

### 3.1 runder Stab, einseitige Einspannung

**Tabelle 2:** Messung der Biegung des runden Stabs bei einseitiger Einspannung

$x / \text{mm}$	$D(x) / \text{mm}$
100	0,28
125	0,35
150	0,36
175	0,45
200	0,51
225	0,62
250	0,78
275	0,93
300	1,16
325	1,34
350	1,58
370	1,78
400	2,07
425	2,30
450	2,58
475	2,79
500	3,10
525	3,48

Das Elastizitätsmodul kann mit der Hilfsfunktion  $Lx^2 - \frac{x^3}{3}$  und der Formel Gleichung 8 berechnet werden. Hierzu wird mit dem Pythonmodul Matplotlib [**matplotlib**] der Y-Achsenabschnitt und die Steigung der linearen Regression  $y = a * x + b$  und ihre Fehler berechnet.

a = (0.0344 ± 0.0009)

b = (-0.0844 ± 0.0462)

Nach umstellen der Formel Gleichung 8 nach E

$$a = \frac{F}{2 \cdot E \cdot I} \iff E = \frac{m \cdot g}{2 \cdot a \cdot I} \quad (17)$$

erhält man folgende Werte für das Elastizitätsmodul:

Mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet man

a = 0.03440932788036839 ± 0.0008601488905380944 b = -0.08437719900299626 ± 0.04624542285827333



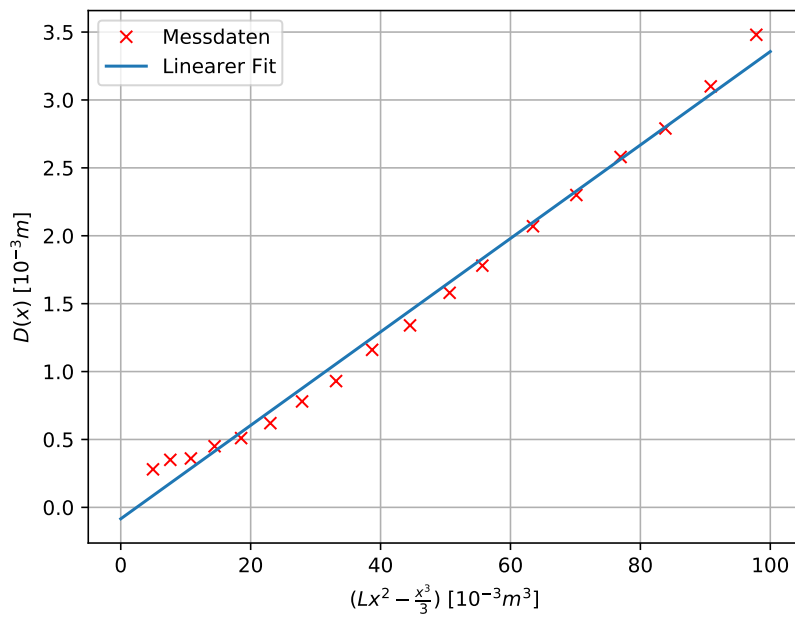
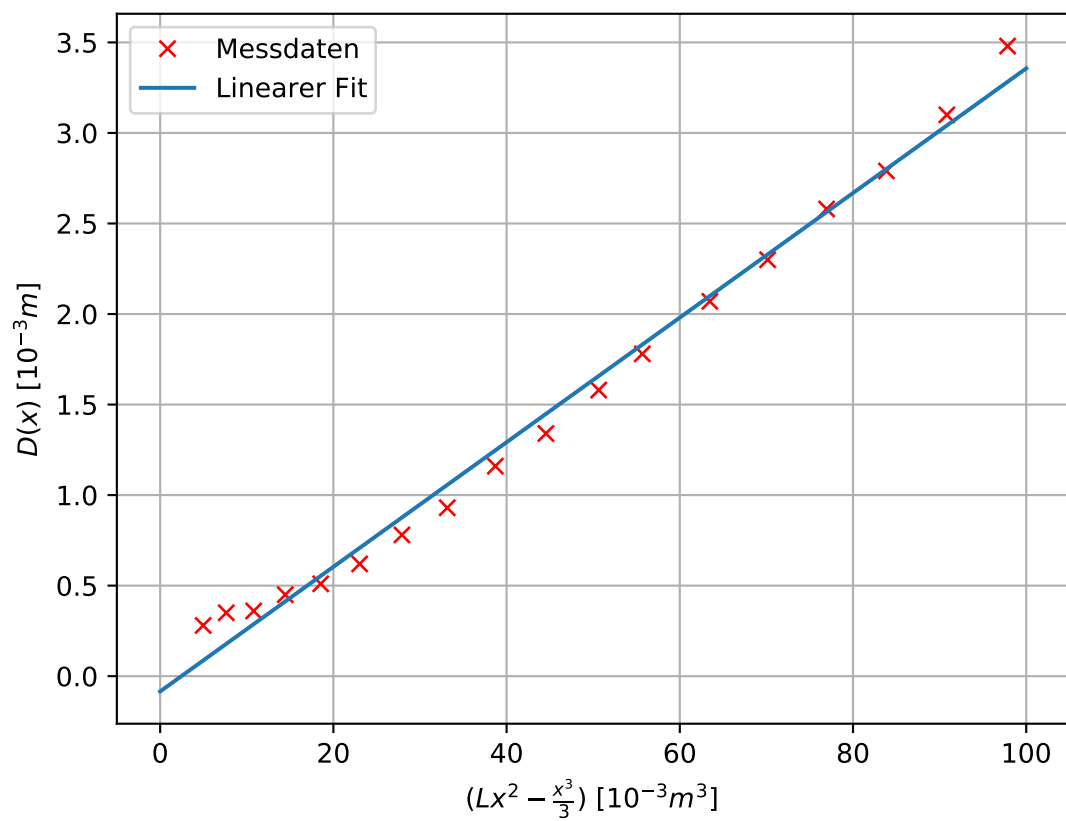


Abbildung 4: Lineare Regression: runder Stab, einseitige Einspannung

### 3.2 runder Stab, beidseitige Auflage

test

rundb1:  $a = 0.0024963660231759333 \pm 0.000427138613034415$   $b = -0.004118075387476106 \pm 0.05756132336959278$   
 rundb2:  $a = 0.002373265473474495 \pm 0.000196410962171616$   $b = 0.009000034335808427 \pm 0.02392505292907706$



**Abbildung 5:** Lineare Regression: runder Stab, einseitige Einspannung

**Tabelle 3:** Messung der Biegung des runden Stabs bei beidseitiger Auflage

$x$ / mm	$D(x)$ / mm
100	0,22
125	0,25
150	0,31
175	0,30
200	0,42
225	0,38
250	0,40
275	
300	0,40
325	0,37
350	0,41
375	0,30
400	0,31
425	0,25
450	0,21
475	0,17
500	0,12

### 3.3 eckiger Stab, einseitige Einspannung

ecke:  $a = 0.03964137312008689 \pm 0.0005449464253988792$   $b = 0.10978829510495063 \pm 0.029339311385139885$

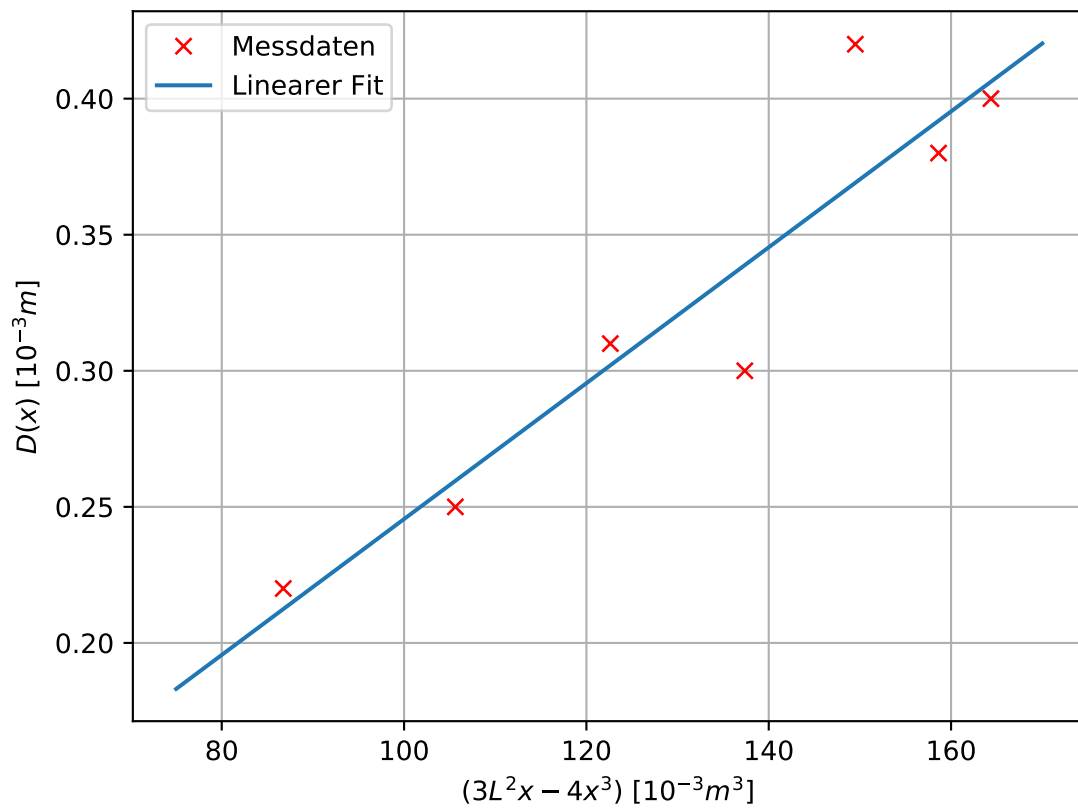
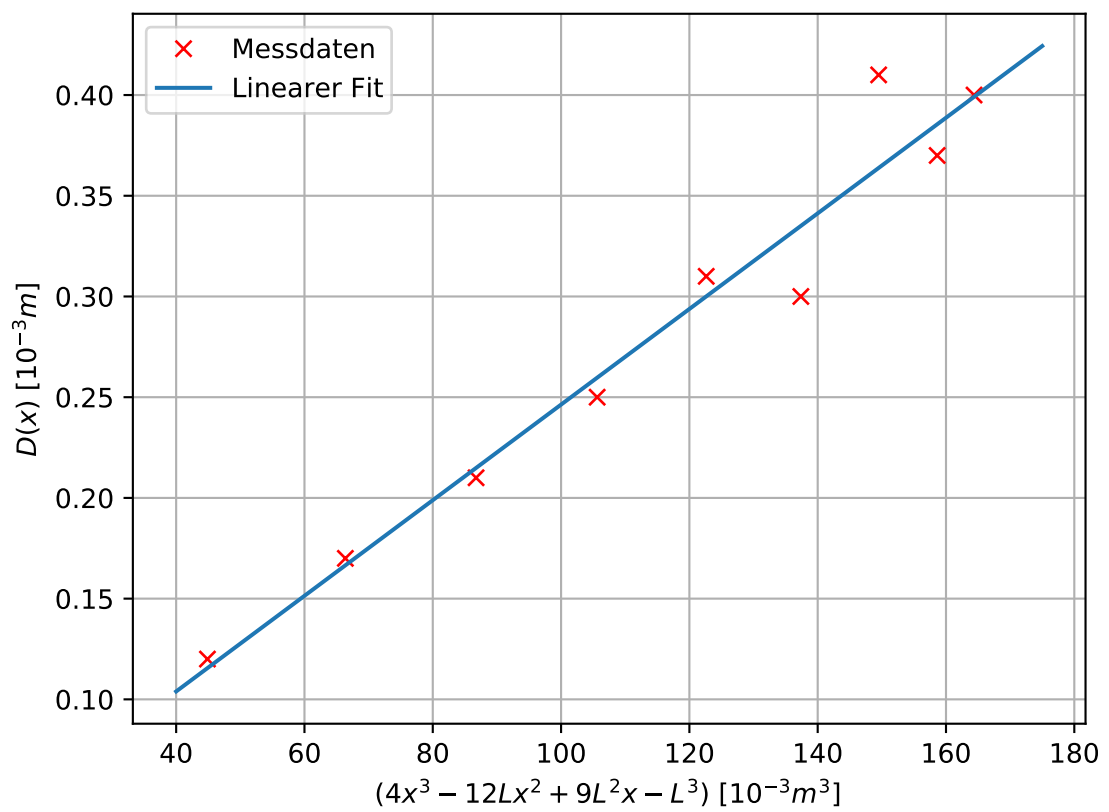


Abbildung 6: Lineare Regression: runder Stab, beidseitige Auflage,  $0 < x < L/2$

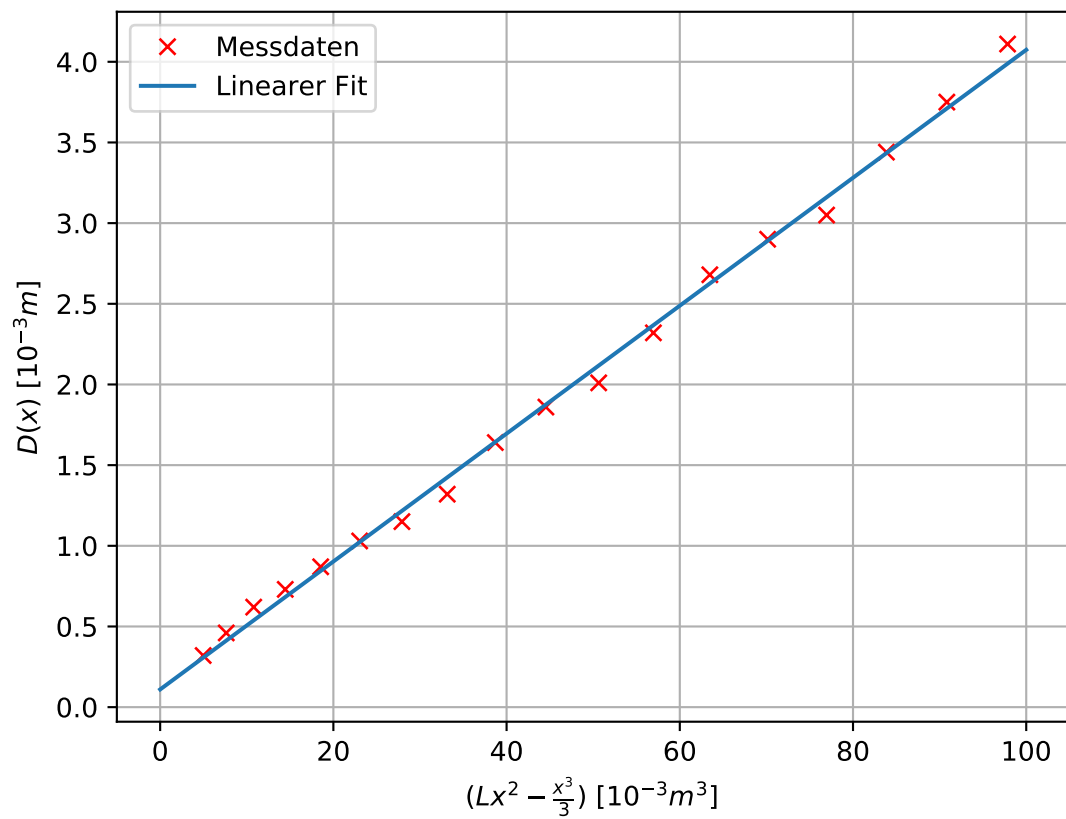
### 3.4 eckiger Stab, beidseitige Auflage



**Abbildung 7:** Lineare Regression: runder Stab, beidseitige Auflage,  $x > L/2$

**Tabelle 4:** Messung der Biegung des eckigen Stabs bei einseitiger Einspannung

$x$ / mm	$D(x)$ / mm
100	0,32
125	0,46
150	0,62
175	0,73
200	0,87
225	1,03
250	1,15
275	1,32
300	1,64
325	1,86
350	2,01
375	2,32
400	2,68
425	2,90
450	3,05
475	3,44
500	3,75
525	4,11



**Abbildung 8:** Lineare Regression: eckiger Stab, einseitige Einspannung

**Tabelle 5:** Messung der Biegung des eckigen Stabs bei beidseitiger Auflage

$x$ / mm	$D(x)$ / mm
50	0,01
75	0,03
100	0,06
125	0,07
150	0,08
175	0,11
200	0,14
225	0,15
250	0,16
275	
300	0,18
325	0,17
350	0,16
375	0,15
400	0,12
425	0,12
450	0,10
475	0,08
500	0,04



## 4 Diskussion

### Literatur

- [1] *Flächenträgheitsmomente einiger Querschnitte*. Universität Siegen. URL: [https://www.bau.uni-siegen.de/subdomains/bauinformatik/lehre/tm2/arbeitsblaetter/arbeitsblatt\\_08\\_flaechentraegheitsmomente\\_bsp.pdf](https://www.bau.uni-siegen.de/subdomains/bauinformatik/lehre/tm2/arbeitsblaetter/arbeitsblatt_08_flaechentraegheitsmomente_bsp.pdf) (besucht am 21.11.2021).
- [2] *Metallglossar*. ESG Edelmetall-Service GmbH und Co. KG. URL: <https://www.scheideanstalt.de/metallglossar/metallglossar/> (besucht am 21.11.2021).
- [3] *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 103 Biegung elastischer Stäbe*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2021.