

M6 – MTM-Tensor

17. Dezember 2015

Versuchsleiter: Raphael Frey
Assistent: Jeffrey Gantner

Inhaltsverzeichnis

1. Arbeitsgrundlagen	1
2. Durchführung	4
3. Auswertung	10
3.1 Beschleunigungsversuche	10
3.2 Dynamische Unwucht	22
4. Fehlerrechnung	30
5. Resultate und Diskussion	36
Anhang A: Berechnungen	40
Anhang B: Messprotokolle	43

1. Arbeitsgrundlagen

1.1 Das Massenträgheitsmoment

- Für einen starren Körper berechnet sich das MTM bezüglich einer Achse z gemäß $I_z = \int g^2 dm$, g : Abstand eines Massenelements von der Rotationsachse
- Ausgedehnter Körper hat i.A. 3 Haupt-MTM, deren Achsen senkrecht aufeinander stehen.
- Rotationen um Hauptachsen sind drehmomentfrei, Rotationen um andere Achsen erfordern zeitlich veränderliches Drehmoment.

1.2 MTM-Tensor

Das MTM eines Körpers kann durch einen Tensor 2. Stufe (3×3 Matrix) dargestellt werden:

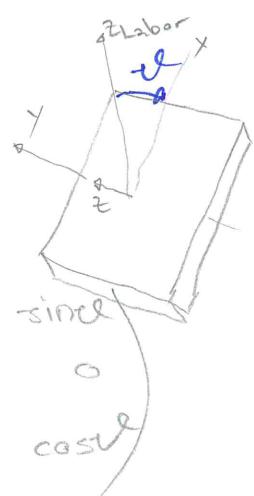
$$\vec{I} = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \quad | \text{Hauptachsen-} \\ \text{system}$$

zgl.

1.3 MTM-Tensor eines verdrehten Körpers

In diesem Versuch wird das Objekt um die y -Achse rotiert, folglich:

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} \cos\vartheta & 0 & \sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{pmatrix} \quad \vec{R}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\vartheta & 0 & -\sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{pmatrix}$$



Der MTM-Tensor $\vec{\mathbb{I}}^*$ des rotierten Körpers berechnet sich dann gemäß:

$$\vec{\mathbb{I}}^* = \vec{\mathbb{R}} \cdot \vec{\mathbb{I}} \cdot \vec{\mathbb{R}}^{-1} =$$

$$\begin{aligned} &= \begin{pmatrix} \cos\vartheta & 0 & \sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\vartheta & 0 & -\sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} I_{xx} \cdot \cos^2\vartheta + I_{zz} \cdot \sin^2\vartheta & 0 & \frac{1}{2}(I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\vartheta) \\ 0 & I_{yy} & \frac{1}{2}(I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\vartheta) \\ \frac{1}{2}(I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\vartheta) & 0 & I_{xx} \cdot \sin^2\vartheta + I_{zz} \cdot \cos^2\vartheta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

1.4 Konstant rotierender Körper

Rotiert ein gekippter Körper mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, muss $\vec{\mathbb{I}}^*$ zeitabhängig rotiert werden. Es wurde um die x-Achse rotiert:

$$\vec{\mathbb{R}}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{pmatrix}, \quad \vec{\mathbb{R}}_x^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ 0 & -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{pmatrix}$$

Der Drehimpuls ist dann: $\vec{L}(t) = \vec{\mathbb{R}}_x \cdot \vec{\mathbb{I}}^* \cdot \vec{\mathbb{R}}_x^{-1} \cdot \begin{pmatrix} w \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

Es gilt weiter: $\vec{M}(t) = d/dt \vec{L}(t)$

und $\vec{F}(t) = \frac{1}{2r_{\text{Hebel}}} \cdot \vec{M}(t)$

multipliziert man das alles aus, erhält man für die Lagerkraftamplitude:

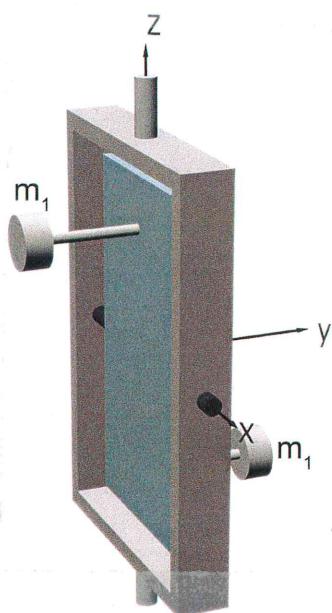
$$|\vec{F}| = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot |\sin(2\vartheta) \cdot (I_{zz} - I_{xx})| \cdot \frac{1}{2r_{\text{H}}}$$

1.5 Zusatzgewichte

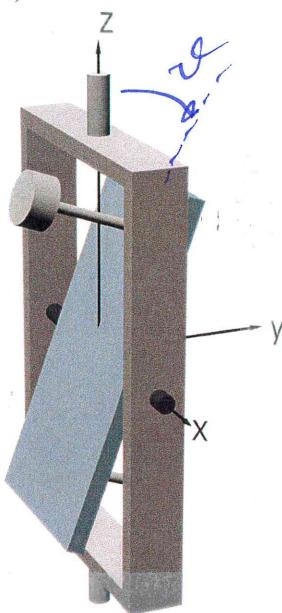
Bringt man an der Platte Zusatzgewichte

an:

I)



II)



Quelle:
Versuchsanleitung

Erzeugt man damit eine dynamische Unwucht, die durch Schrägstellen der Konfiguration kompensiert werden kann.

Der zugehörige Winkel erfüllt die Gleichung:

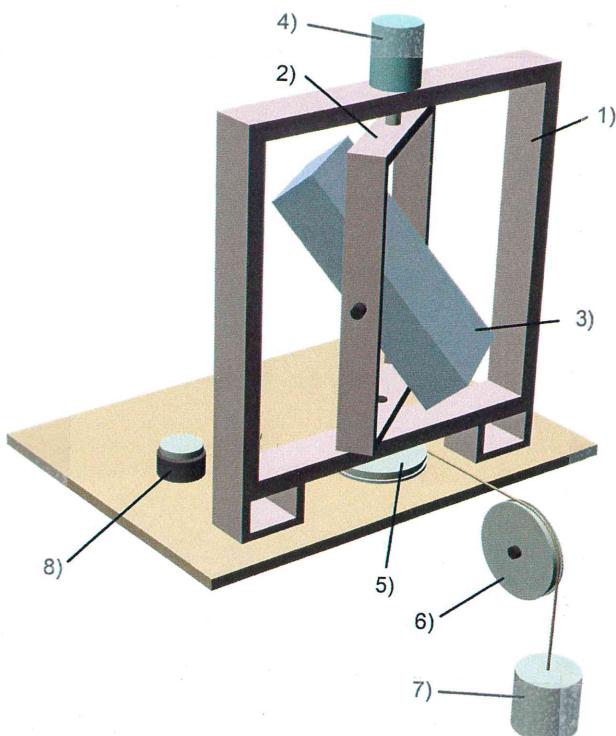
$$\frac{2 \cdot I_{xz,1}}{I_{zz,1} - I_{xx,1}} = \tan(2 \cdot \vartheta)$$

Die detaillierte Rechnung ist im Anhang A auf Seite 40 zu finden.

2. Durchführung

2.1 Versuchsaufbau

- 1) Aluminium-Rahmen
- 2) Rotations-Rahmen
- 3) Testobjekt (Stahlplatte in unserem Fall)
- 4) xy-Kraftsensor zur Messung der Lagerkraft
- 5) Fadenspule
- 6) Umlenkrolle
- 7) Gewicht
- 8) Gleichstrommotor



Quelle: Versuchsanleitung

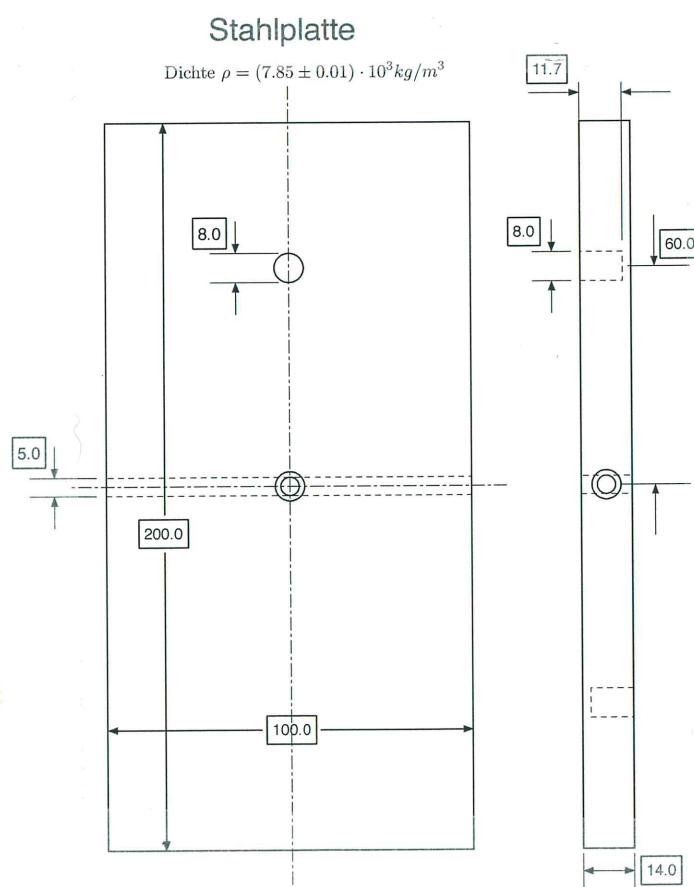
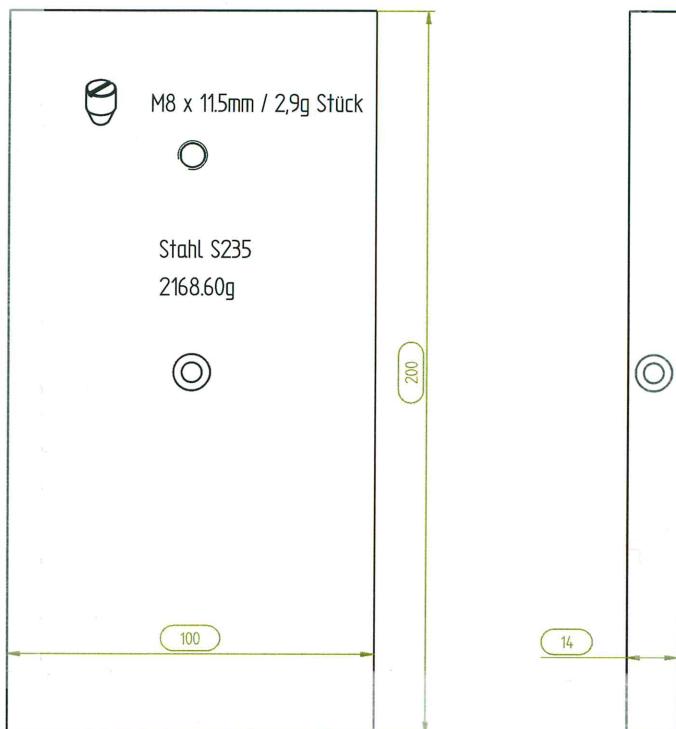
Grundsätzlich können zwei Versucharten durchgeführt werden: Beschleunigungsversuche, wobei das Gewicht 7) ein konstantes Beschleunigungsmoment auf das Testobjekt ausübt, und Versuche bei konstanter Drehzahl, angetrieben durch den DC-Motor.

Erste dienen der Bestimmung der Massenträgheitsmomente, mit letzteren werden dynamische Unwuchten untersucht.

2.2 Versuchsprobe

Es wurde folgende Stahlplatte
verwendet:

Quelle:
Versuchs-
unterlagen



2.3 Geräte:

- ↪ Oszilloskop: LeCroy WaveRunner
64 MXi-A
- ↪ Winkelgeschwindigkeitsmessgerät

2.4 Software

- ↪ Qti Plot
- ↪ Angular Acc
(Speziellesoftware des Dozenten)

2.5 Versuchsanordnung



2.6 Messvergang

Um das MTM der Platte korrekt bestimmen zu können, muss das MTM der Apparatur inkl. Befestigungsmaterialien bekannt sein. Dazu wurde zuerst die Halterung mit dem entsprechenden Befestigungsmaterial ausgemessen.

Via Software AngularAcc wurde dabei der zeitliche Verlauf des überstrichenen Winkels gemessen, und anschließend von AngularAcc ein Fit an diese Daten erstellt gemäß der Funktion:

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \ddot{\varphi} \cdot (t - t_0)^2 + \text{offset}$$

(t_0 : Anfangszeit)

Die daraus erlangten Daten wurden anschließend ins Messprotokoll eingetragen, wobei u.a. $\ddot{\varphi}$ interessierte, da dies dann für das weitere Verarbeiten der Daten verwendet wurde.

Für die dynamische Unwucht wurde über den x-y-Kraftsensor und Oszilloskop die entsprechende Spannung ausgewählt, welche via Dokumentation dann auf eine Kraft abgebildet werden konnte.

Als fixe Winkelgeschwindigkeit wurden 25.133 Hz gewählt, bzw 4 Hz. Dies ist hoch genug, um die gewünschten Effekte messen zu können, ohne dabei die Apparatur zu überlasten.

ant komGL ter bufor glaL3 pro3 dnet1 mc1 other:

SUBJ Versuch M6: MTM-Tensor

Sheet 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

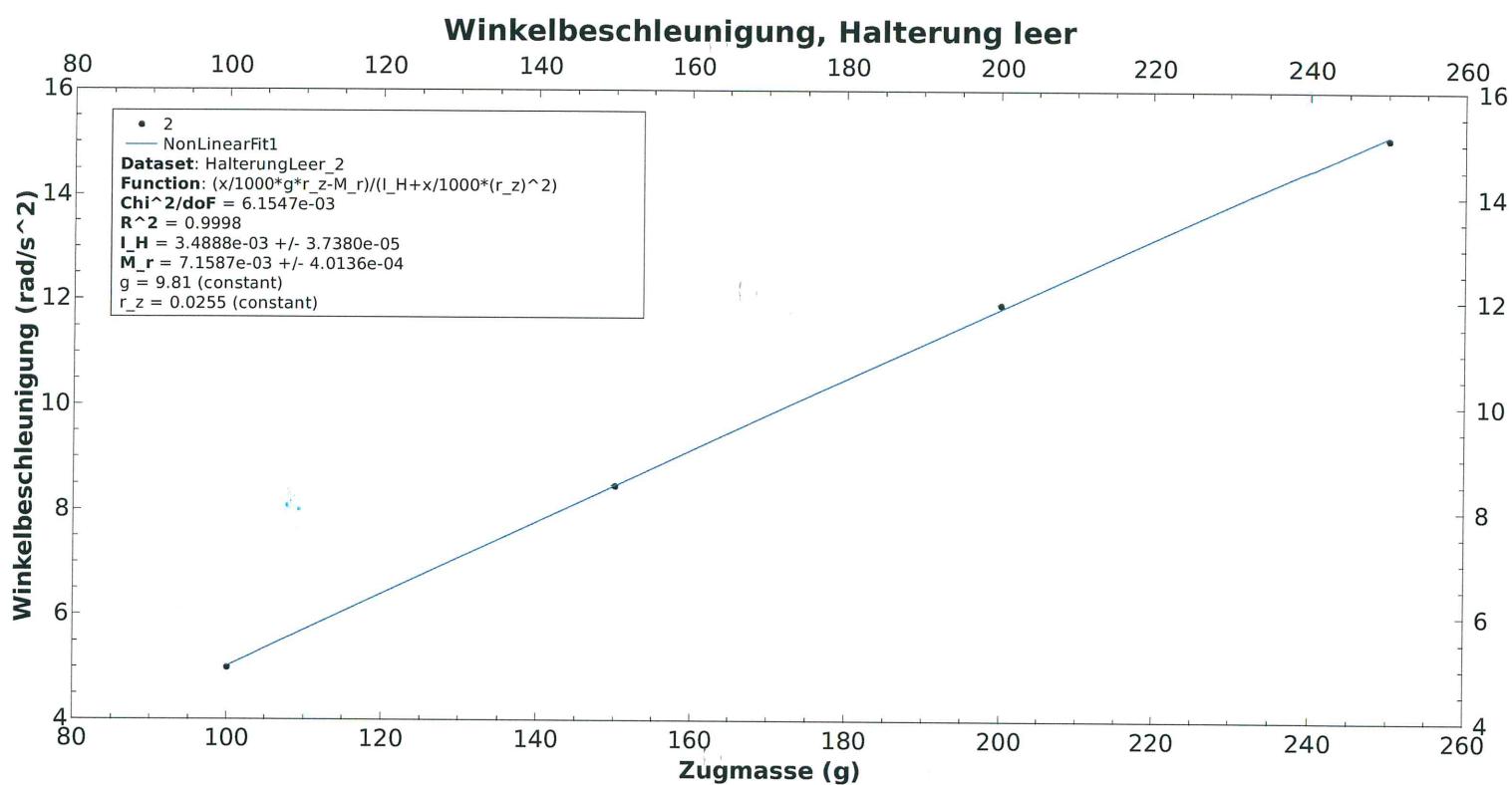
Date 0 1 2 3^d 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^d 0 1^m 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^m 2015 Of 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

3. Auswertung

3.1 Beschleunigungsversuche

Leere Halterung

Für den Versuch nicht wirklich wichtig, aber aus Neugier wurde die leere Halterung ausgemessen.



Resultat: $I_{H, \text{leer}} = (3.4888 \cdot 10^{-3} \pm 3.7380 \cdot 10^{-5}) \text{ kg m}^2$
 $M_r = (7.1587 \cdot 10^{-3} \pm 4.0136 \cdot 10^{-4}) \text{ Nm}$

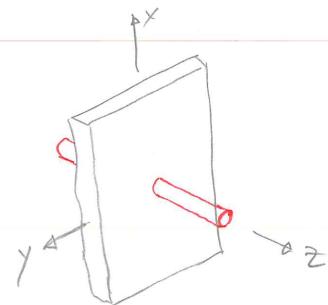
Verwendete Formel für Tit: $\ddot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I_H + m_z \cdot r_z^2}$

mit $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$, m_z gemäss horizontaler Achse, $\ddot{\varphi}$ vertikale Achse, I_H & M_r als Titparameter.

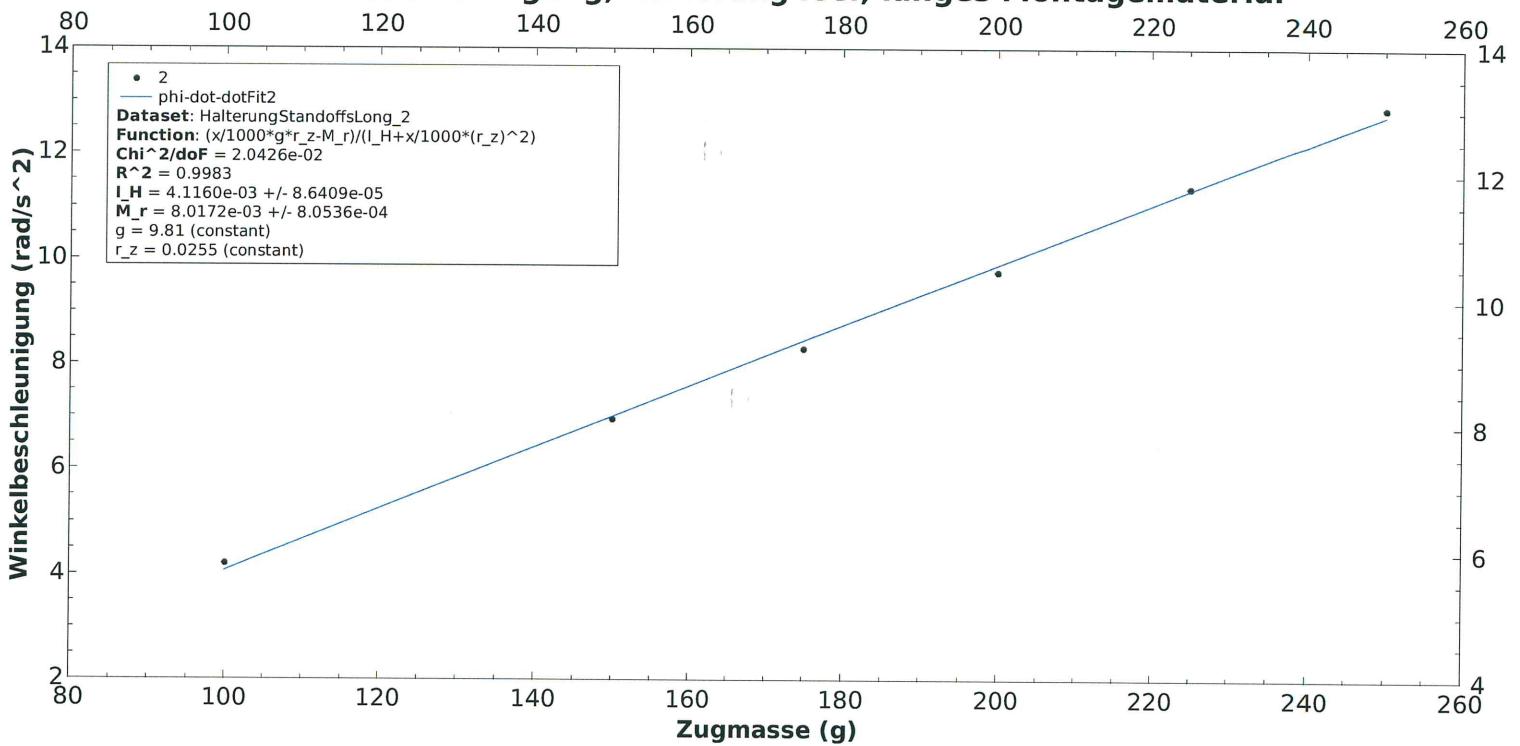
Halterung mit langem Montagematerial

Benutzt für Montage in z-Rtg.:

$$\text{Formel: } \ddot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I_H + m_z \cdot r_z^2}$$



Winkelbeschleunigung, Halterung leer, langes Montagematerial



Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$

Resultate:

$$I_{H,ML} = (4.1160 \text{ e-}3 \pm 8.6409 \text{ e-}5) \text{ kg m}^2$$

$$M_{e,mc} = (8.0172 \text{ e-}3 \pm 8.0536 \text{ e-}4) \text{ Nm}$$

ant komGL ter bufor glaL3 pro3 dnet1 mc1 other:

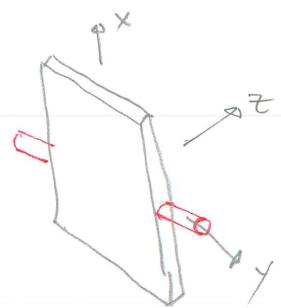
SUBJ Versuch M6: MTM-Tensor

Sheet 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8

Date 0 1 2 3^d 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^d 0 1^m 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^m 2015 Of 0 1 2 3 4 5 6 7 8

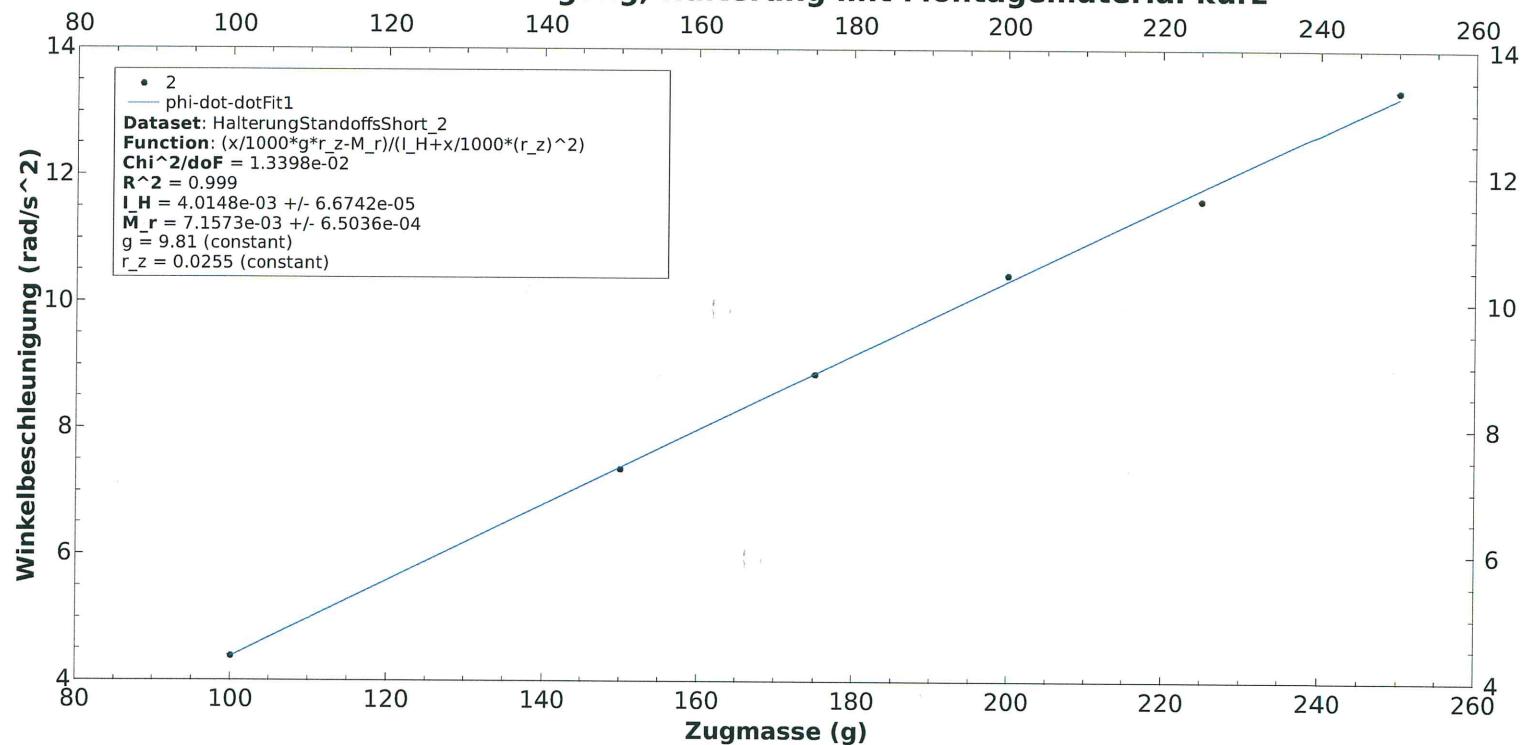
Halterung mit kurzem Montagematerial

Benutzt für Montage in y-Rtg.:



Formel: $\ddot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I_H + m_z \cdot r_z^2}$

Winkelbeschleunigung, Halterung mit Montagematerial kurz

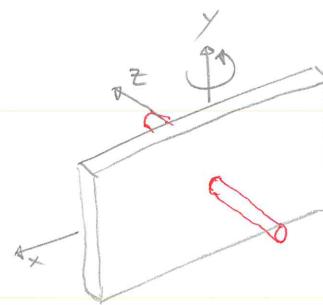


Konstanten: $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$,

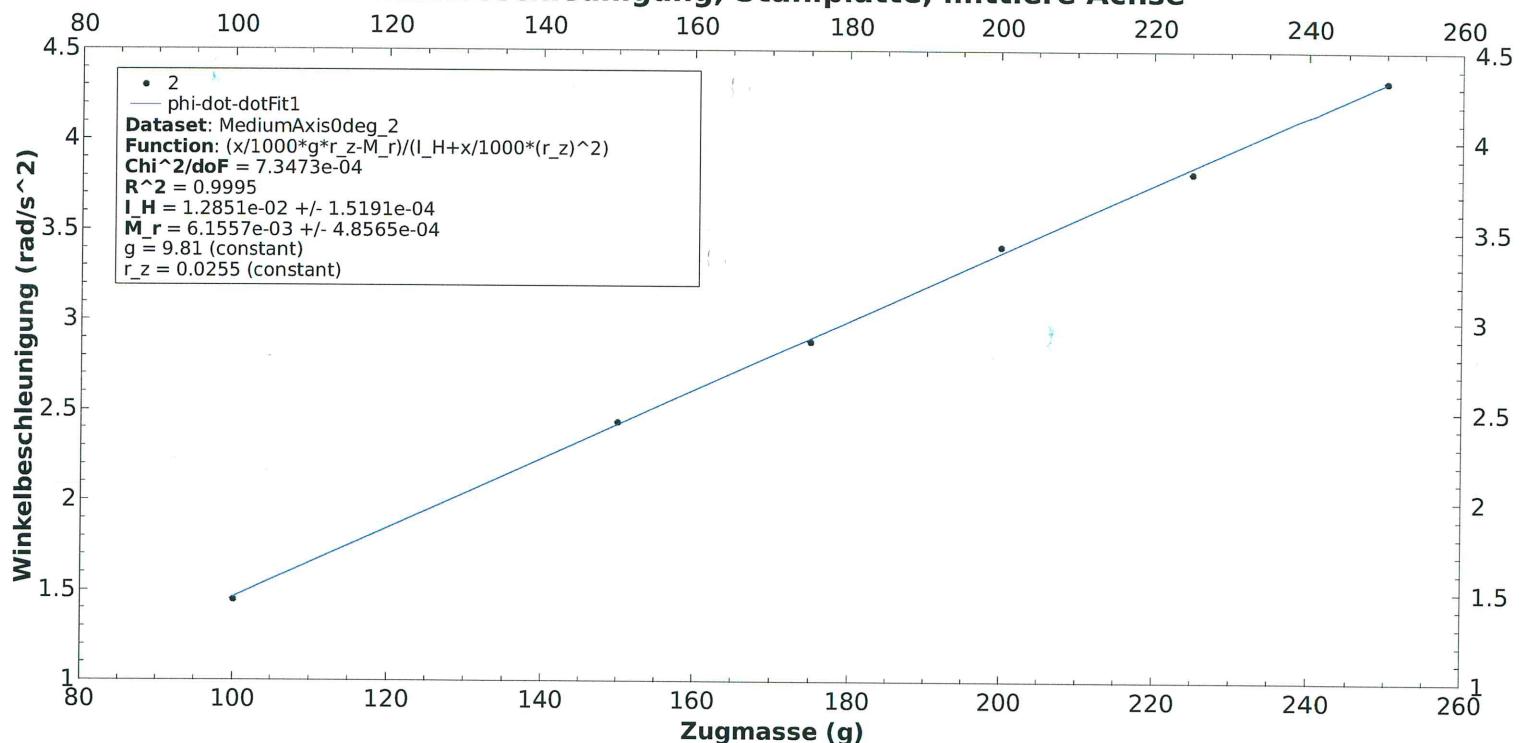
Resultate: $I_{H, \text{RK}} = (4.0148 \text{ e-}3 \pm 6.6742 \text{ e-}5) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 $M_{r, \text{RK}} = (7.1573 \text{ e-}3 \pm 6.5036 \text{ e-}4) \text{ Nm}$

Haupt-MTM in y-Richtung

Befestigt mit langen
Montagematerial.



$$\text{Formel: } \ddot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - \Pi_e}{I_z + m_z \cdot r_z^2}$$

Winkelbeschleunigung, Stahlplatte, mittlere Achse

Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$

Resultate: $I_{yy}' = (1.2851 \text{e-}2 \pm 1.5191 \text{e-}4) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (Platte + Halterung + Montagematerial)
 $\Pi_e' = (6.1557 \text{e-}3 \pm 4.8565 \text{e-}4) \text{ Nm}$

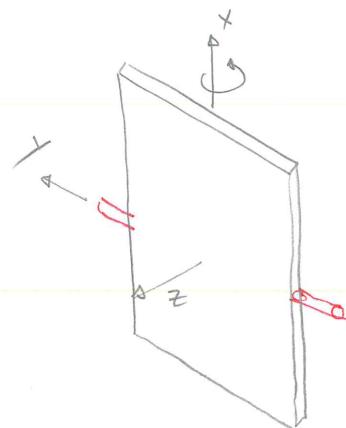
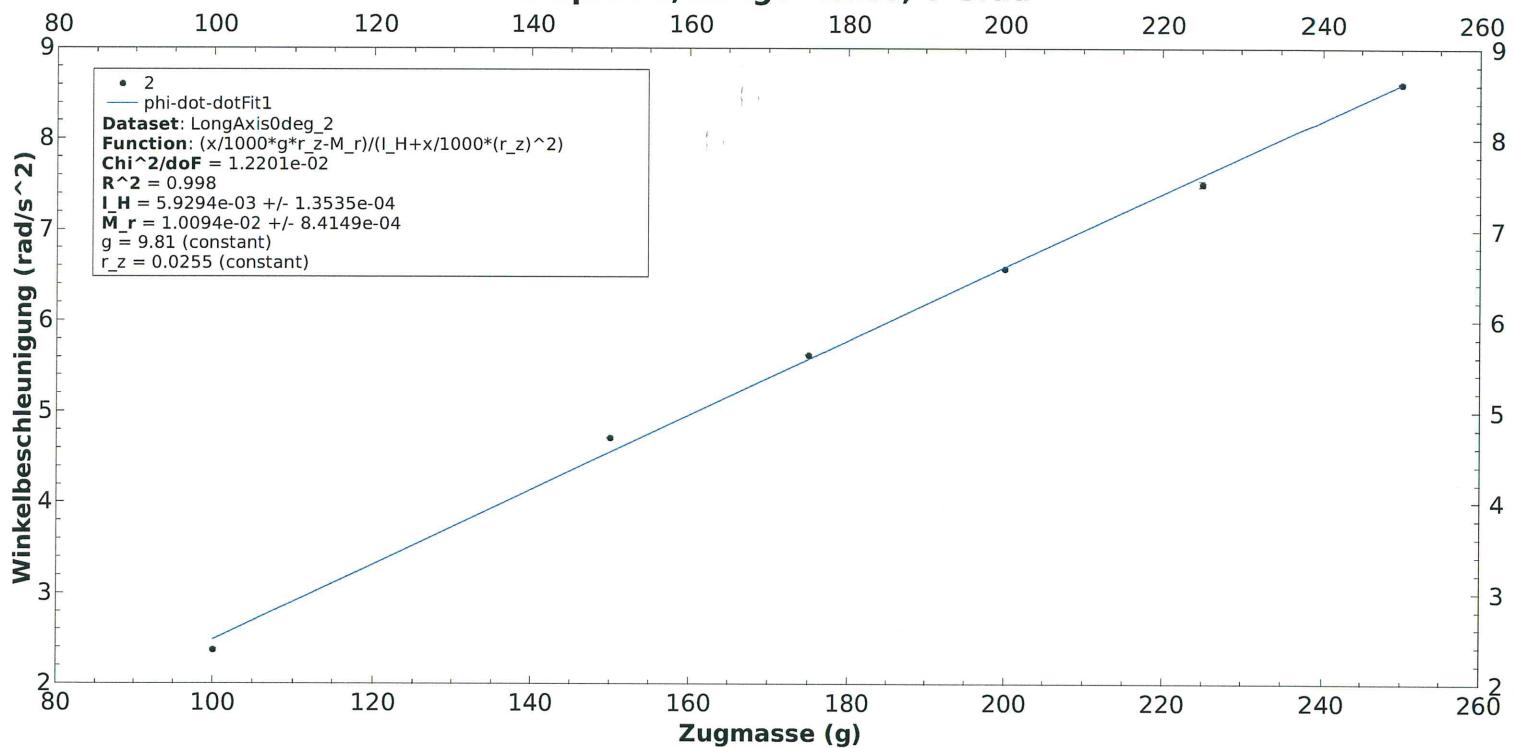
Subtraktion Halterung & Montagematerial:

$$I_{yy} = I_{yy}' - I_{H,mz} = (8.735 \text{e-}3 \pm 174.8 \text{e-}6) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

(Π_e interessiert ja eglt. nicht wirklich an dieser Stelle)

Haupt-MTM in x-RichtungBefestigt mit kurzem
Montagematerial.

Formel: $\ddot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I_x + m_z \cdot r_z^2}$

**Stahlplatte, Lange Achse, 0 Grad**Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$ Resultate: $I_{xx}' = (5.9294e-3 \pm 1.3535e-4) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (Platte + Halterung + Montagematerial)
 $M_r' = (1.0094e-2 \pm 8.4149e-4) \text{ Nm}$

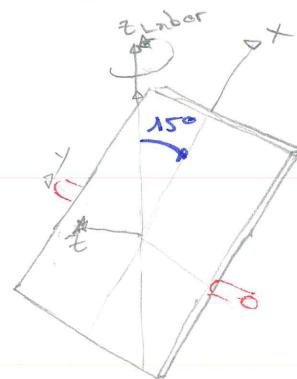
Subtraktion Halterung & Montagematerial:

$$I_{xx} = I_{xx}' - I_{H, \text{Mater}} = (1.9146e-3 \pm 135.35e-6) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

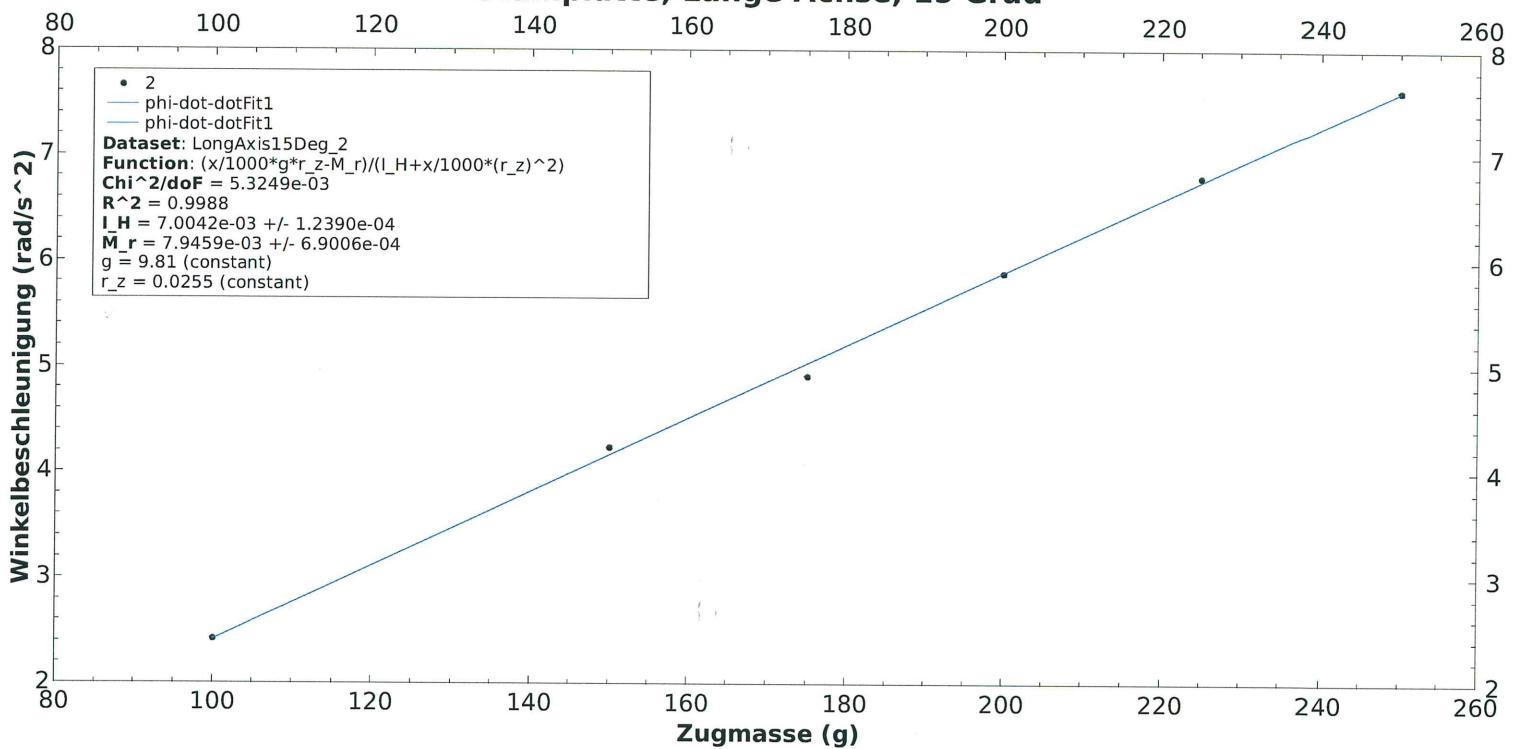
MTM, x-Achse 15° gekippt

kurzes Montagematerial

$$\text{Formel: } \dot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I + m_z \cdot r_z^2}$$



Stahlplatte, Lange Achse, 15 Grad



Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$

$$\text{Resultate: } I_{xx,15}^{*'} = (7.0042e-3 \pm 1.2390e-4) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M_r^{*'} = (7.9459e-3 \pm 6.9006e-4) \text{ Nm}$$

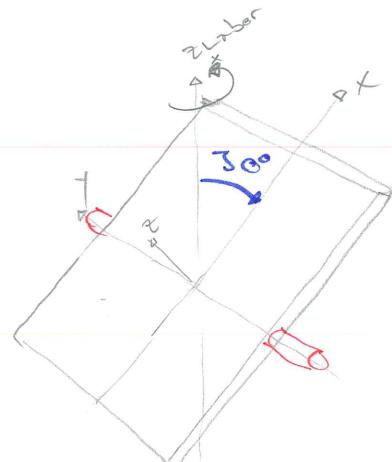
Subtraktion Befestigung:

$$I_{xx,15}^{*'} = I_{xx,15}^{*'} - I_{H,\text{Plk}} = (2.9894e-3 \pm 140.7e-6) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

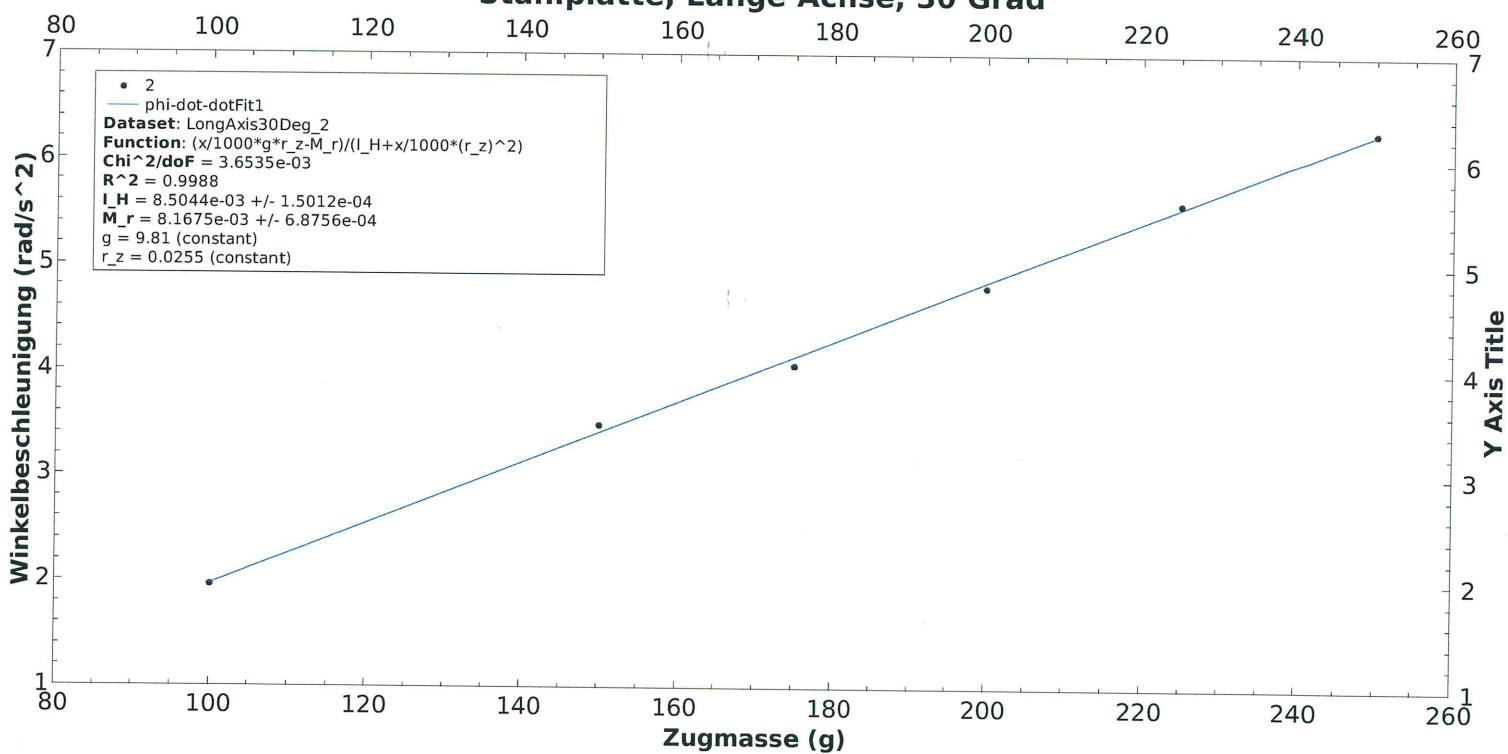
MTM, x-Achse 30° gekippt

kurzes Flanszgmaterial

Formel: $\ddot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I + m_z \cdot r_z^2}$



Stahlplatte, Lange Achse, 30 Grad



Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$

Resultate: $I_{xx,30}^{*1} = (8.5044e-3 \pm 1.5012e-4) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$M_{r,30}^{*1} = (8.1675e-3 \pm 6.8756e-4) \text{ Nm}$

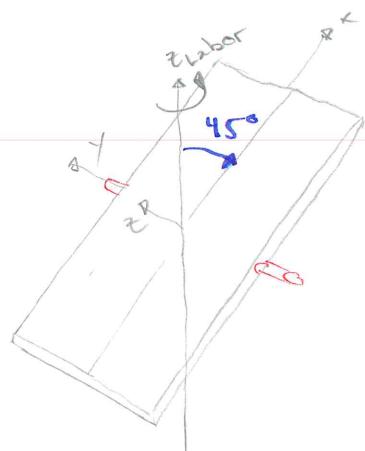
Subtraktion Befestigung:

$I_{xx,30}^{*1} = I_{xx,30}^{*1} - I_{H,\text{Mk}} = (4.4896e-3 \pm 164.3e-6) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

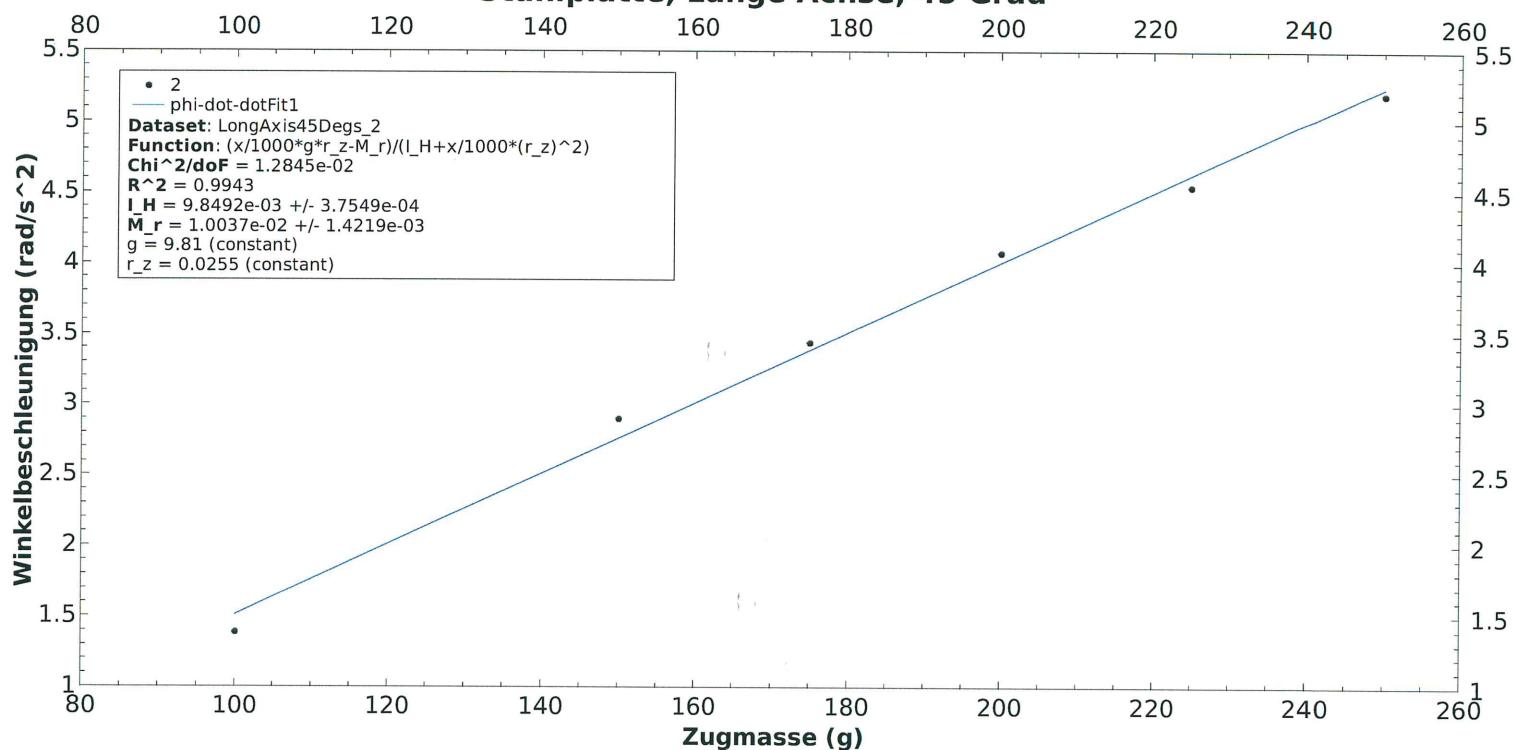
MTM, x-Achse 45° gekippt

Kurzes Montagematerial

Formel: $\ddot{\phi} = \frac{m_z \cdot g - M_R}{I + m_z \cdot r_z^2}$



Stahlplatte, Lange Achse, 45 Grad



Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Resultate: $I_{xx,45}^* = (9.8492 \cdot 10^{-3} \pm 3.7549 \cdot 10^{-4}) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$M_{r,45}^* = (1.0037 \cdot 10^{-2} \pm 1.4219 \cdot 10^{-3}) \text{ Nm}$

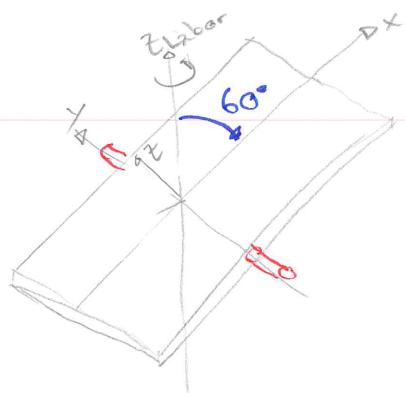
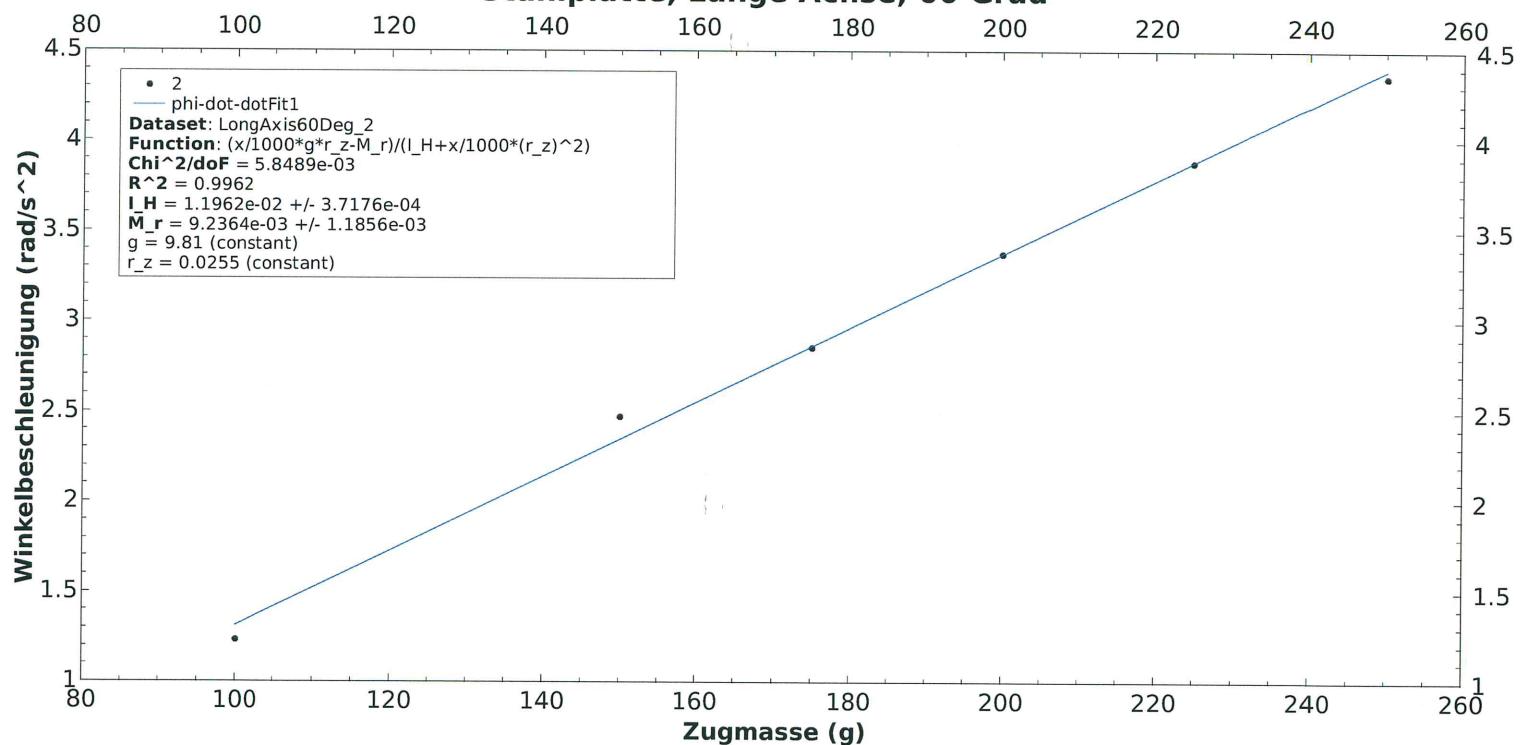
Subtraktion Befestigung:

$$I_{xx,45}^* = I_{xx,45}^* - I_{H,mk} = (5.8344 \cdot 10^{-3} \pm 381.4 \cdot 10^{-6}) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

MTM, x-Achse 60° gekippt

Kurzes Montagematerial

$$\text{Formel: } \ddot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g - \bar{M}_r}{I + m_z \cdot r_z^2}$$

**Stahlplatte, Lange Achse, 60 Grad**Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$

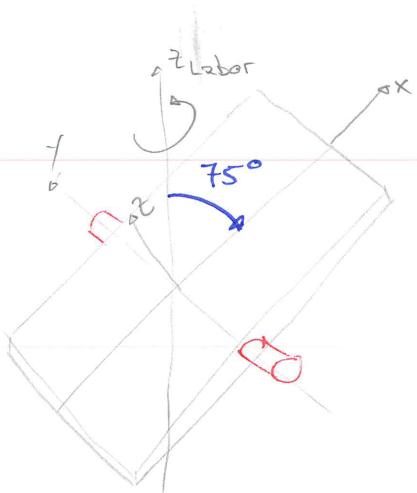
Resultate: $I_{xx,60}^{*1} = (1.1962e-2 \pm 3.7176e-4) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 $\bar{M}_{e,60}^{*1} = (9.2364e-3 \pm 1.1856e-3) \text{ Nm}$

Subtraktion Befestigung

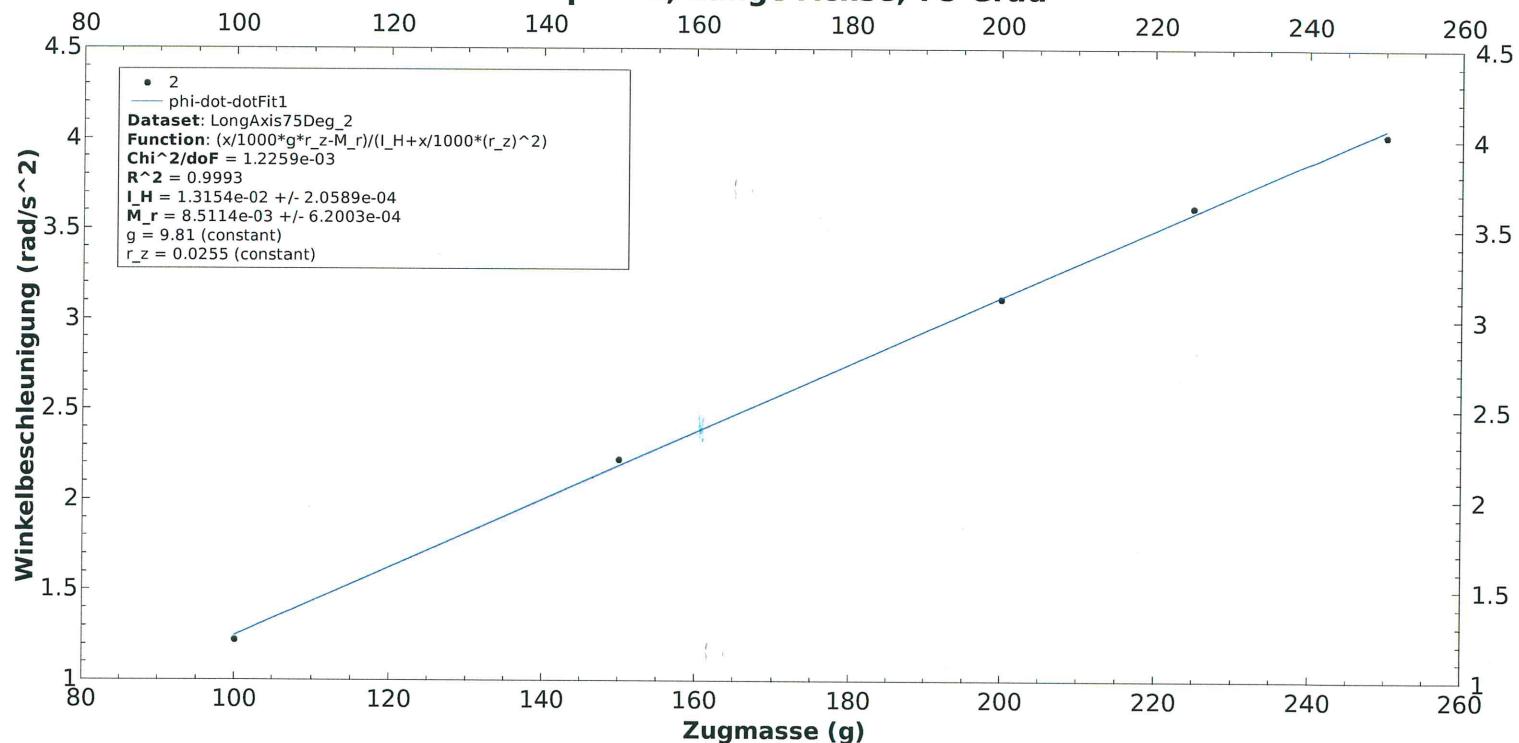
$$I_{xx,60}^{*1} = I_{xx,60}^{*1} - I_{H,MK} = (7.9472e-3 \pm 377.7e-6) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

MTM, α -Achse 75° gekippt
kurzes Montagematerial

Formel: $\dot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I_z + m_z \cdot r_z^2}$



Stahlplatte, Lange Achse, 75 Grad



Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ $r_z = 25.5 \text{ mm}$

Resultate: $I_{xx,75}^{*'} = (1.3154e-2 \pm 2.0589e-4) \text{ kgm}^2$

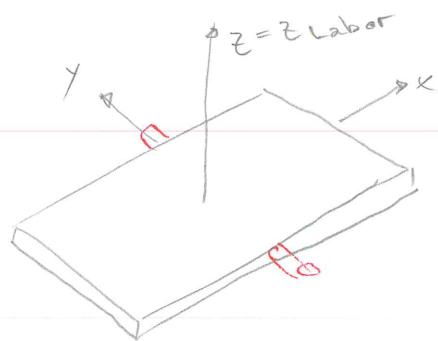
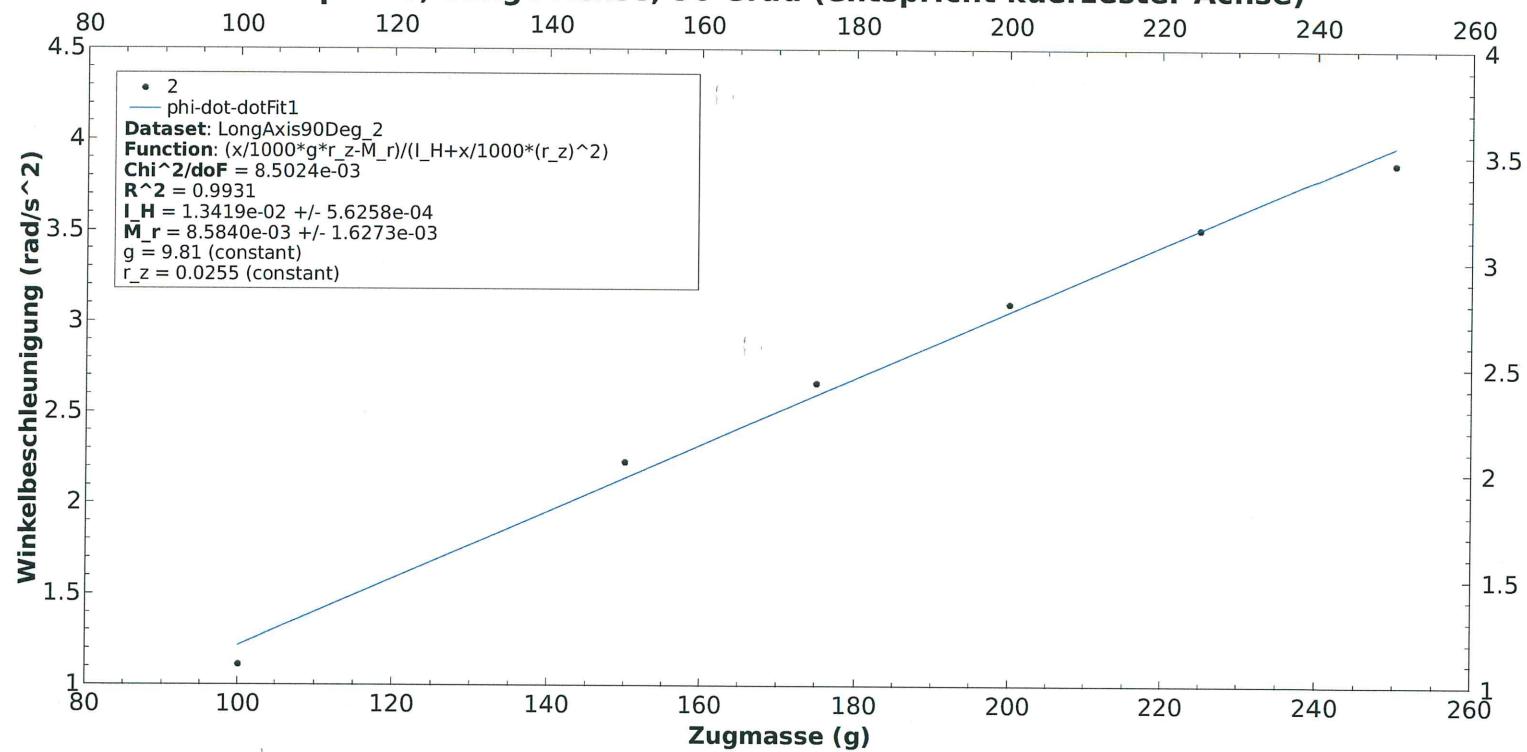
$M_e^{*'}_{75} = (8.5114e-3 \pm 6.2003e-4) \text{ Nm}$

Subtraktion Befestigung

$I_{xx,75}^{*'} = I_{xx,75}^{*'} - I_{H,mk} = (9.1392e-3 \pm 216.4e-6) \text{ kgm}^2$

Haupt-MTT um z-Achsekurzes Montagematerial

$$\text{Formel: } \dot{\varphi} = \frac{m_z \cdot g \cdot r_z - M_r}{I + m_z \cdot r_z^2}$$

**Stahlplatte, Lange Achse, 90 Grad (entspricht kuerzester Achse)**

Konstanten: $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $r_z = 25.5 \text{ mm}$

$$\text{Resultate: } I_{zz}' = (1.3419e-2 \pm 5.6258e-4) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M_{R,z} = (8.5840e-3 \pm 1.6273e-3) \text{ Nm}$$

Subtraktion der Befestigung:

$$I_{zz} = I_{zz}' - I_{h, \text{MK}} = (9.4042e-3 \pm 566.5e-6) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

3.2 Dynamische Unwucht

Grundüberlegungen

Der Rotations-Sensor generiert 2000 Impulse pro Umdrehung. Folglich lässt sich die Winkelgeschwindigkeit berechnen wie:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{N}{2000} = 2\pi f$$

Für die Versuche mit konstanter Rotationsgeschwindigkeit wurde eine Frequenz von 4 Hz benutzt, was ergibt:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{8000}{2000} \cdot s^{-1} = 25,13 \text{ rad} \cdot s^{-1}$$

Die Empfindlichkeit des Kraftsensors wurde aus der technischen Dokumentation zu

$$e = \frac{10V \cdot s^{-1}}{5kg \cdot 9,81m} = 0,204 \frac{V}{N}$$

bestimmt.

$$\left(\text{reziproker Wert: } 4,905 \frac{N}{V} \right)$$

Da die Apparatur nicht absolut symmetrisch aufgebaut ist, wird r_H aus dem Mittelwert der beiden Abstände vom Schwerpunkt zum Lager gebildet:

$$r_H = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{157 + 128}{2} \text{ mm} = 142.5 \text{ mm} *$$

(Der Schwerpunkt fällt mit der Lagerungszchse zusammen, um welche gekippt wird.)

Die für diesen Versuch benötigten Haupt-MTM sind mittels Beschleunigungsversuch bestimmt worden.

* siehe technische Zeichnungen Versuchsaapparatur

Zur Bestimmung der eigentlichen Lagerkräfte gilt es noch zu beachten, dass die Messapparatur den doppelten Wert der anliegenden Spannungsamplitude ausgibt (untere Spalte - obere Spalte).

Es ergibt sich also:

$$\hat{F} = e \cdot \frac{V_{\text{peak-peak}}}{2}$$

Somit können aus den erhaltenen Messwerten die Lagerkräfte bestimmt werden.

Für den Tit wird natürlich noch eine Funktion benötigt. Dafür greifen wir zu Formel (9) aus der Versuchsanleitung, jedoch angepasst auf unser Koordinatensystem (und aufgelöst nach $|\vec{F}(t)|$):

$$|\vec{F}(t)| = \frac{1}{2} \cdot w^2 \cdot |\sin(2\vartheta) \cdot (I_{zz} - I_{xx})| \cdot \frac{1}{2r_H}$$

wobei: ϑ : Winkel, mit dem um die y-Achse rotiert wurde

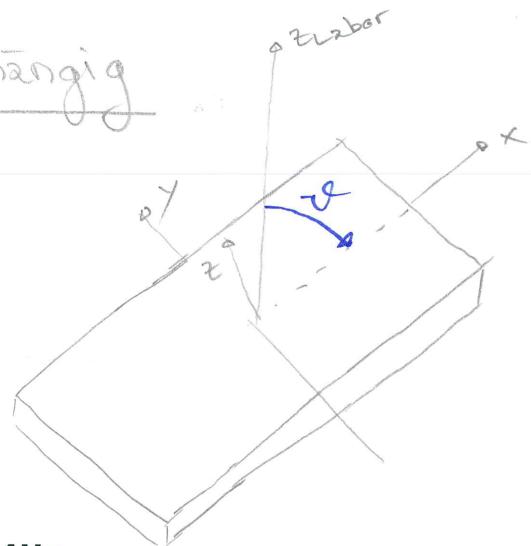
w : Winkelgeschw. (konst.)

r_H : Hebel Schwerpunkt \rightarrow Lager.

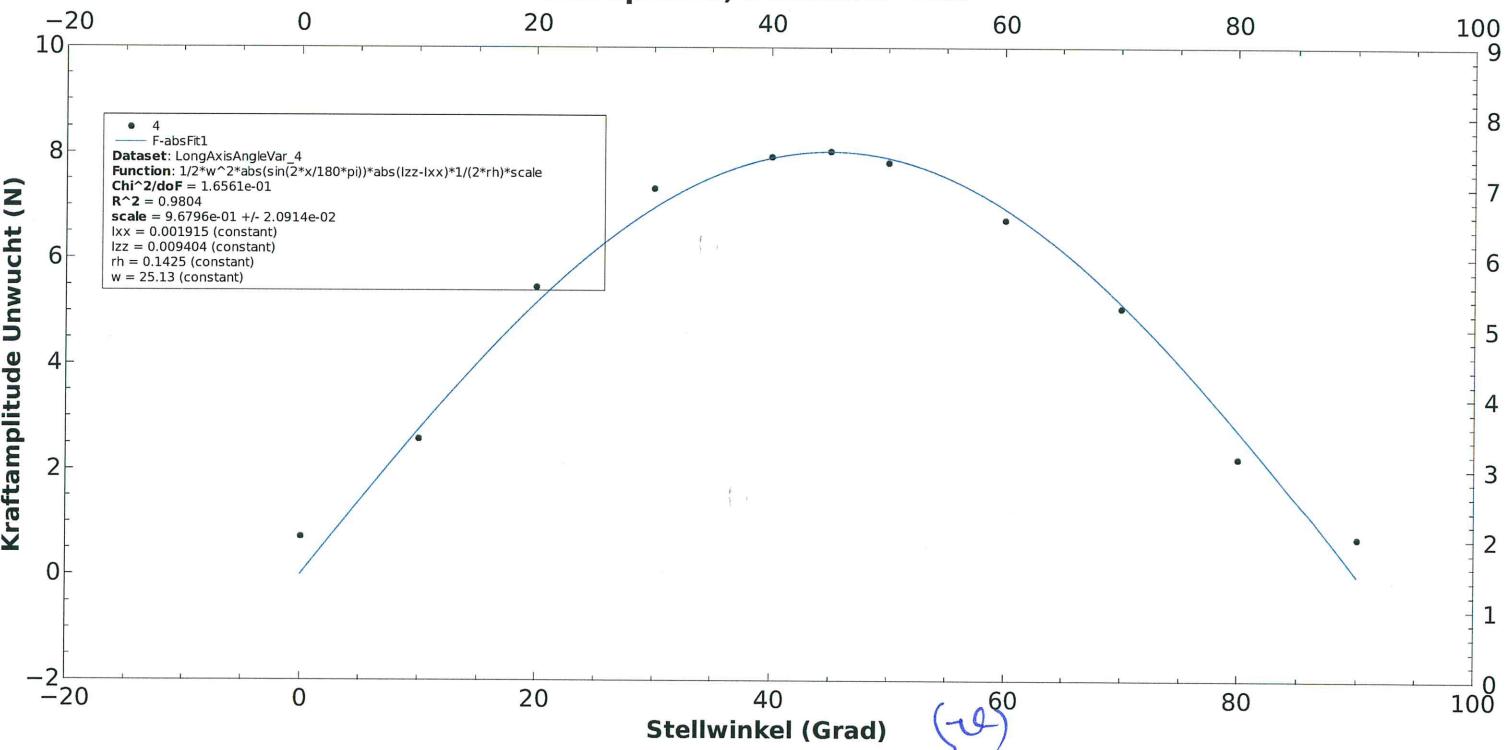
Dynamische Unwucht, winkelabhängig
kurzes Montagematerial,

Formel:

$$|F| = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot |\sin(\varphi)| \cdot (I_{zz} - I_{xx}) \cdot \frac{1}{2r_H}$$



Stahlplatte, Drehzahl 4Hz



Konstanten: $\omega = 25.13 \text{ rad/s}$, $r_H = 142.5 \text{ mm}$

$$I_{xx} = 1.915 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$$

$$I_{zz} = 9.464 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$$

Zusätzlich wurde als Fit-Parameter ein Parameter "scale" in die Funktion programmiert, um Fitten zu können. Je näher dieser, bei 1, umso besser das Ergebnis:

$$\text{scale} = 0.968 \pm 0.02$$

ant komGL ter bufor glaL3 pro3 dnet1 mc1 other:

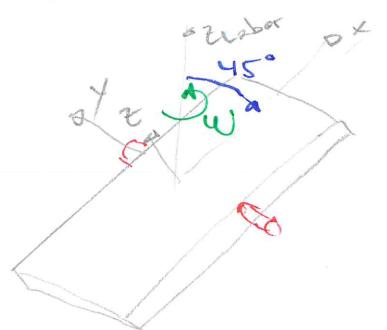
SUBJ Versuch M6: MTM-Tensor

Sheet 2 0 1 2 3 4 5 6 7 8

Date 0 1 2 3^d 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^d 0 1^m 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^m 2015 Of 0 1 2 3 4 5 6 7 8

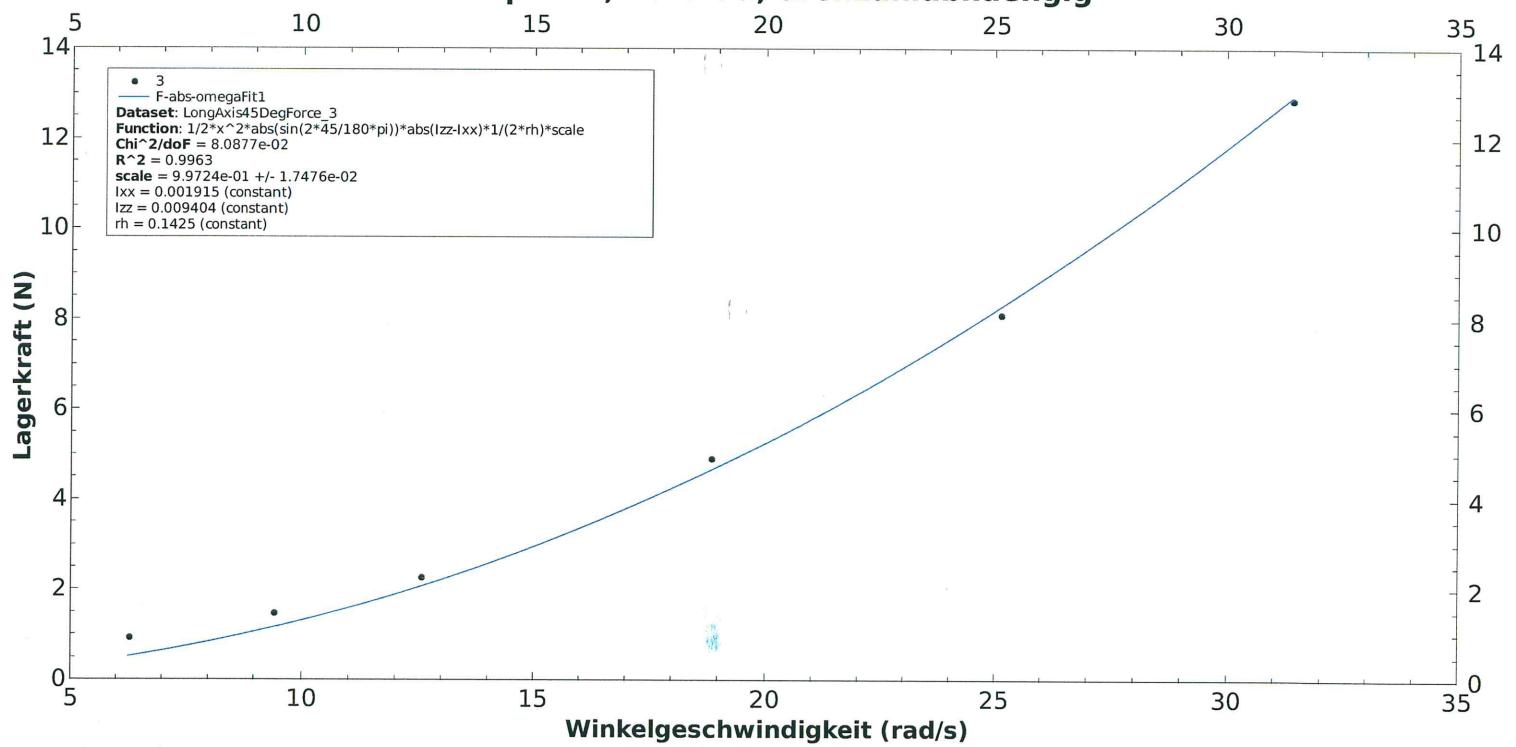
Dynamische Unwucht, Drehzahlabhängig

kurzes Montagematerial,
 $\vartheta = 45^\circ = \text{konst}$ (da dort maximale
dyn. Unwucht gemäß vorherigem
Versuch).



$$\text{Formel: } F = \frac{1}{2} \omega^2 |\sin(2\vartheta) \cdot (I_{zz} - I_{xx})| \cdot \frac{1}{2r_H}$$

Stahlplatte, 45 Grad, drehzahlabhängig



$$\text{Konstanten: } r_H = 142.5 \text{ mm},$$

$$I_{xx} = 1.915 \text{ e-}3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{yy} = 9.404 \text{ e-}3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Auch hier wurde wieder ein Skalierungsparameter zum Fitten benutzt, der möglichst nahe bei 1 landen sollte. Ergebnis:

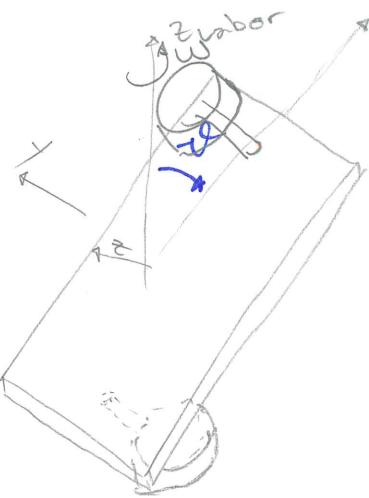
$$\text{Scale} = 0.99724 \pm 0.02$$

Dynamische Unwucht, Zusatzgewichte

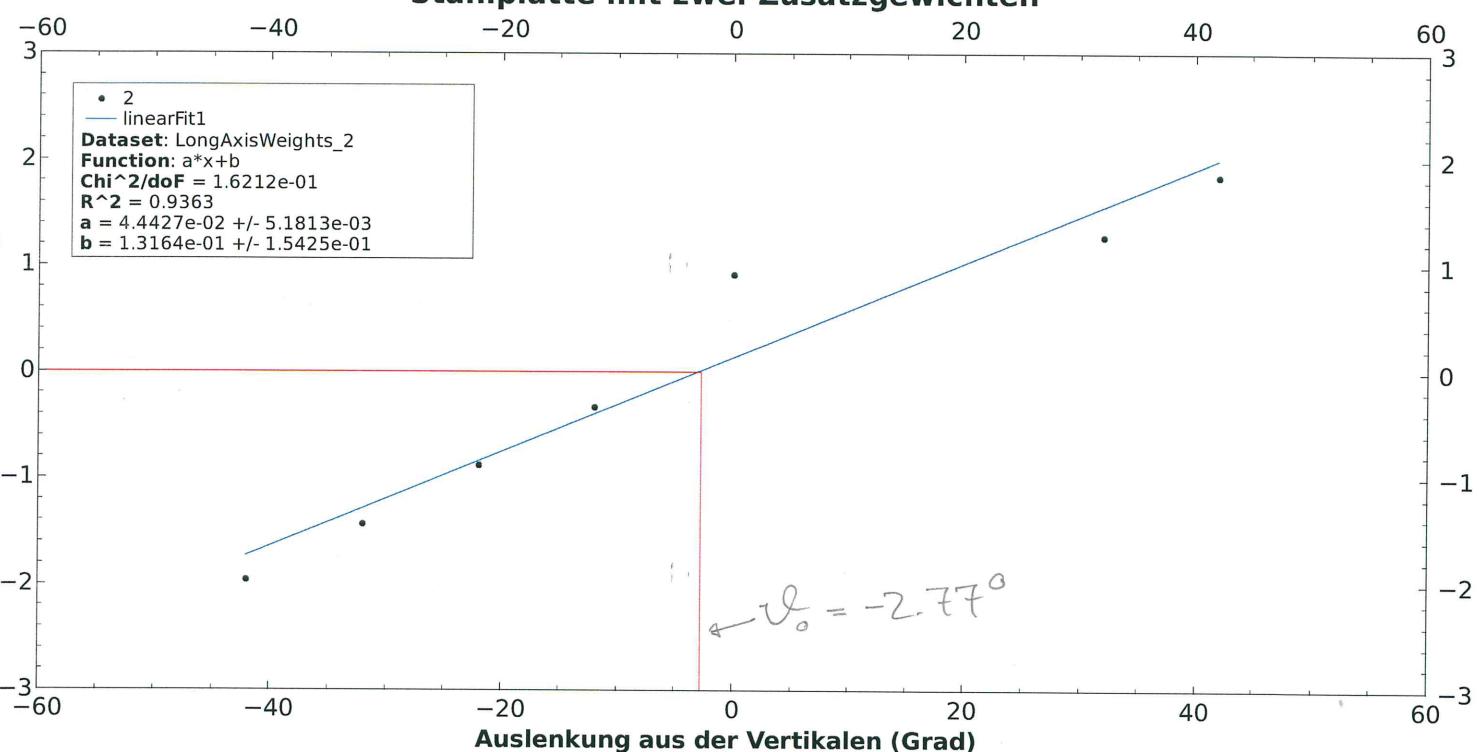
Zusatzgewichte, kurzes Montagematerial,

Fit-Formel: $y = ax + b$

Es werden keine Kraft amplituden gesucht, und die Lagerkraft ist proportional zur Mess-Spannung, was im Nulldurchgang nichts ändert. Sanft muss man nicht noch umrechnen.



Stahlplatte mit zwei Zusatzgewichten



Der Nulldurchgang, bei dem die dyn. Unwucht durch den Kippwinkel die dynamische Unwucht durch die Zusatzgewichte kompensiert, liegt bei $\vartheta = -2.77^\circ$

$$\Rightarrow \tan(2 \cdot \vartheta) = -0.09699$$

Die zugehörige Berechnung ist analog zur Versuchsanleitung, angepasst auf das hier verwendete Achsenystem;

Der Zusatz-Tensor er Gewichte:

$$\vec{\vec{I}}_{01} = 2 \cdot m_1 = \begin{pmatrix} y^2 + z^2 & -xy & -xz \\ -xy & x^2 + z^2 & -yz \\ -xz & -yz & x^2 + y^2 \end{pmatrix}$$

Gesamttensor:

$$\vec{\vec{I}}_1 = \vec{\vec{I}}_{00} + \vec{\vec{I}}_{01} = \begin{pmatrix} I_{xx,1} & 0 & I_{xz,1} \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ I_{zx,1} & 0 & I_{zz,1} \end{pmatrix}$$

mit $\vec{\vec{I}}^* = \begin{pmatrix} I_{xx} \cdot \cos(\vartheta) + I_{zz} \cdot \sin^2 \vartheta & 0 & \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\vartheta) \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\vartheta) & 0 & I_{xx} \cdot \sin^2 \alpha + I_{zz} \cdot \cos^2 \alpha \end{pmatrix}$

kann man gleichsetzen und auflösen, was:

$$\tan(2\vartheta) = \frac{2 \cdot I_{xz,1}}{I_{zz,1} - I_{xx,1}}$$

ergibt.

Setzt man den erhaltenen Winkel von -2.77° in die rechte Seite ein, erhält man:

$$\frac{2 \cdot I_{xz,1}(\vartheta)}{I_{zz,1}(\vartheta) - I_{xx,1}(\vartheta)} = -0.09699 \quad |*$$

Dies ist in der Tat gleich dem Tangens von $(2 \cdot -2.77^\circ)$:

$$\tan(2 \cdot (-2.77^\circ)) = -0.0966 \quad |$$

Theorie und Experiment stimmen also gut überein.

* wobei

$$I_{xz,1} = \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2 \cdot \vartheta)$$

$$I_{zz,1} = I_{xx} \cdot \sin^2(\vartheta) + I_{zz} \cdot \cos^2(\vartheta)$$

$$I_{xx,1} = I_{xx} \cdot \cos^2(\vartheta) + I_{zz} \cdot \sin^2(\vartheta)$$

und I_{xx}, I_{zz} die MTM der Platte sind, die mit den Beschleunigungsversuchen gemessen wurden.

4. Fehlerrechnung

Aufgrund der enormen Komplexität der Fehlerrechnung für diesen Versuch wird auf eine detaillierte Fehlerrechnung verzichtet.

Es sei in diesem Kapitel jedoch kurz gezeigt, inwiefern die Bohrungen für die Halterung einen Einfluss auf das Ergebnis haben könnten (verglichen mit der vereinfachten Annahme eines massiven Quaders), und ob sie allenfalls vernachlässigt werden können.

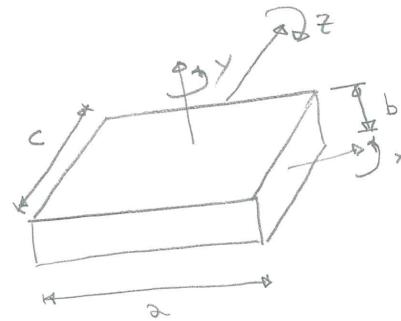
Ebenfalls sind in diesem Abschnitt noch die winkelabhängigen Berechnungen zu finden, um sie in der Diskussion mit den Resultaten aus den Beschleunigungsversuchen vergleichen zu können.

Trägheitsmoment eines Quaders:

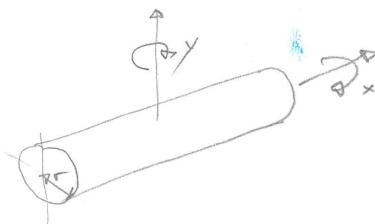
$$I_{xx} = \frac{m}{12} (b^2 + c^2)$$

$$I_{yy} = \frac{m}{12} (a^2 + c^2)$$

$$I_{zz} = \frac{m}{12} (a^2 + b^2)$$

Trägheitsmoment eines Vollzylinders

$$I_{xx} = \frac{m}{2} \cdot r^2 \quad I_{yy} = \frac{m}{12} (3r^2 + h^2)$$

Stahlplatte aus diesem Versuch:

(ohne Berücksichtigung der Bohrungen)

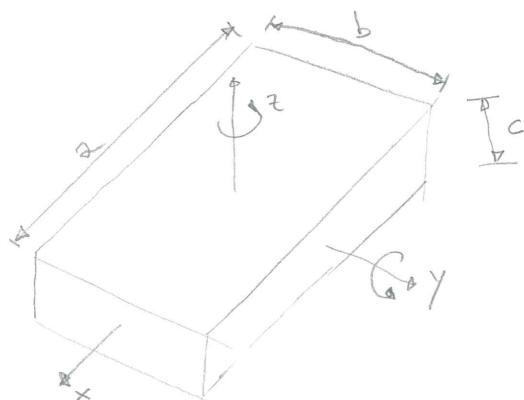
$$\rho = (7,85 \pm 0,01) \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{aus Datenblatt}) \quad \text{rel. Fehler: } 1,27 \cdot 10^{-3} = \gamma$$

$$a = 200 \text{ mm} \quad c = 14 \text{ mm} \quad b = 100 \text{ mm}$$

$$\gamma \cdot 2'198 \text{ g}$$

$$\Rightarrow V = a \cdot b \cdot c = 280 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \Rightarrow m = \rho \cdot V = (2'198 \pm 3) \text{ g}$$

$$\gamma \cdot 1.868 \cdot 10^{-3}$$



$$I_{xx} = \frac{m}{12} (b^2 + c^2) = (1.868 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-6}) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

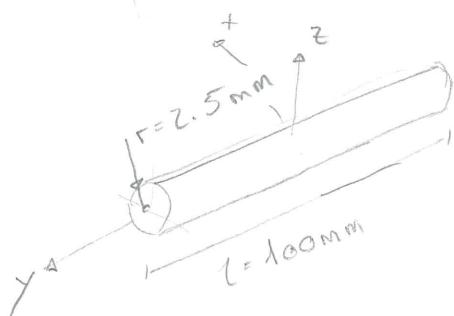
$$I_{yy} = \frac{m}{12} (a^2 + c^2) = (7,363 \cdot 10^{-3} \pm 9 \cdot 10^{-6}) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{zz} = \frac{m}{12} (a^2 + b^2) = (9,158 \cdot 10^{-3} \pm 12 \cdot 10^{-6}) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Lage des Koordinatensystems
in der Stahlplatte

Trägheitsmoment Bohrung

Es wird das Trägheitsmoment eines Zylinders bestimmt, der die Längse der beiden Montagebohrungen ausfüllt und aus dem gleichen Material wie die Platte besteht.



$$V = r^2 \pi l = 1.963 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m = S \cdot V = (15.413 \pm 20e^{-3}) \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$I_{yy}' = \frac{m}{2} \cdot r^2 = (48.170 \pm 60e^{-3}) \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{yy}' = I_{zz}' = \frac{m}{12} (3r^2 + l^2) = (12.869 \pm 20e^{-3}) \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Verhältnis zum Trägheitsmoment der vollen Platte

$$\frac{I_{yy}'}{I_{yy}} = \frac{12.869e-6}{1.868e-3} = 7\%$$

$$\frac{I_{yy}'}{I_{yy}} = \frac{48.170e-9}{7.363e-3} \approx 7 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{I_{zz}'}{I_{zz}} = \frac{12.869e-6}{9.158e-3} \approx 1.4\%$$

Sehr kleine Abweichungen im Verhältnis zur Genauigkeit des Messverfahrens in meinen Augen.

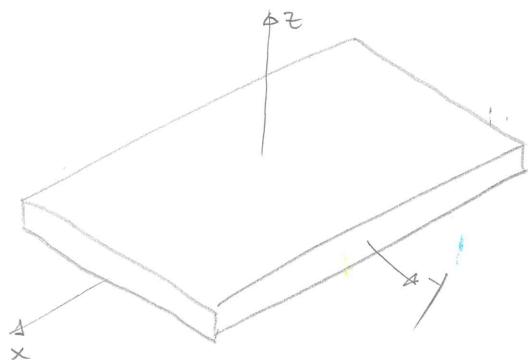
Auf des Mitschleppen der Fehler wurde im letzten Abschnitt verzichtet, da die dadurch hinzukommende Unsicherheit zu klein ist, um noch von Relevanz zu sein.

Ebenfalls wird auf die analoge Rechnung für die kurze Montagebohrung in z-Richtung sowie die beiden Sacklöcher verzichtet. Der Einfluss der kurzen Bohrung wäre nachmals bedeutend kleiner, und die beiden Sacklöcher waren während des Versuchs mit Mardenschrauben gefüllt (und sind zu dem ebenfalls klein).

4.1 Theoretische Werte für MTM,

Winkelabhängig

Als Referenzwerte für die Beschleunigungsversuche.



Lage des Koordinatensystems in der Stahlplatte.

Die Haupt-MTM wurden bereits berechnet zu:

$$I_{xx} = 1.868 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

$$I_{yy} = 7.363 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

$$I_{zz} = 9.158 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

Ann.: Es interessiert hier primär der Vergleich Theorie-Experiment. Die sehr kleinen Unsicherheiten aufgrund der Materialdichte werden daher hier vernachlässigt.

Richtet man die Platte, müssen Anpassungen gemacht werden. In diesem Versuch wurde um die y-Achse gekippt:

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} \cos\vartheta & 0 & \sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{pmatrix} \quad \vec{R}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\vartheta & 0 & -\sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{pmatrix}$$

Das MTM $\vec{\vec{I}}^*$ der gekippten Platte errechnet sich gemäß:

$$\vec{\vec{I}}^* = \vec{\vec{R}} \cdot \vec{\vec{I}} \cdot \vec{\vec{R}}^{-1}$$

Dies multiplizieren ergibt:

$$\vec{\vec{I}}^* = \begin{pmatrix} I_{xx} \cdot \cos^2(\vartheta) + I_{zz} \cdot \sin^2(\vartheta) & 0 & \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\vartheta) \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\vartheta) & 0 & I_{xx} \cdot \sin^2(\vartheta) + I_{zz} \cdot \cos^2(\vartheta) \end{pmatrix}$$

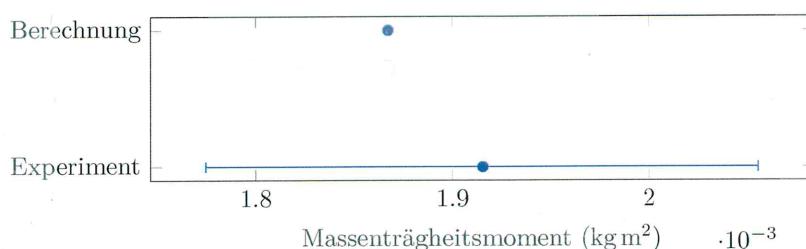
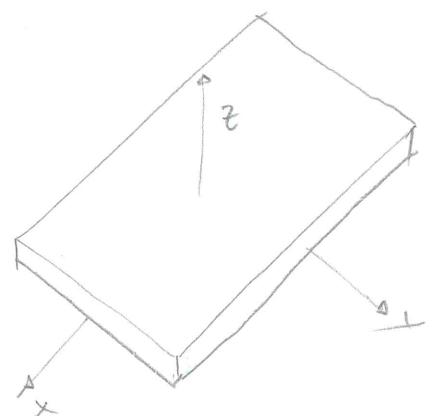
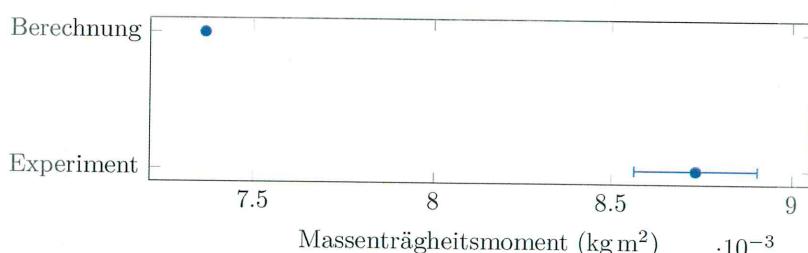
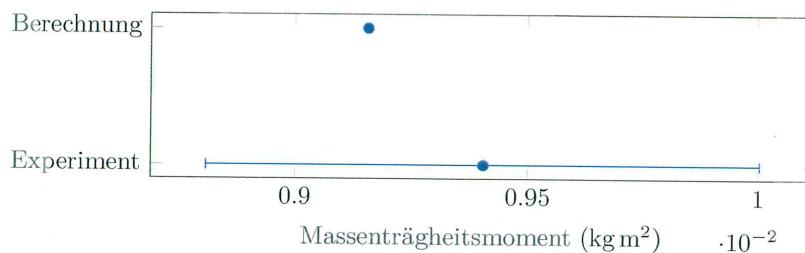
Urs interessiert $I_{xx}^* = I_{xx} \cdot \cos^2(\vartheta) + I_{zz} \cdot \sin^2(\vartheta)$

Für die gemessenen Winkel ergibt dies:

ϑ	15°	30°	45°	60°	75°	
I_{xx}^*	$2.356 \cdot 10^{-3}$	$3.69 \cdot 10^{-3}$	$5.513 \cdot 10^{-3}$	$7.34 \cdot 10^{-3}$	$8.67 \cdot 10^{-3}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

5. Resultate und Diskussion

5.1 Beschleunigungsversuche

 I_{xx}  I_{yy}  I_{zz} 

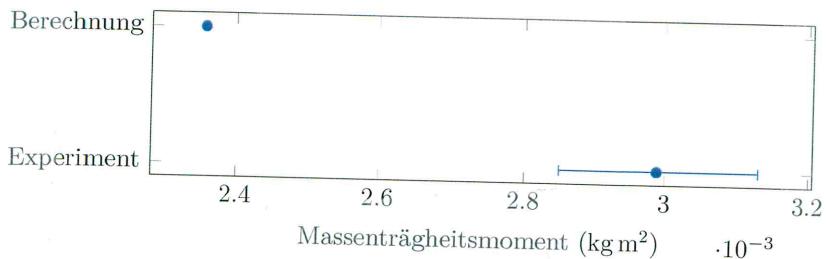
ant komGL ter bufor glaL3 pro3 dnet1 mc1 other:

SUBJ Versuch M6: MTM-Tensor

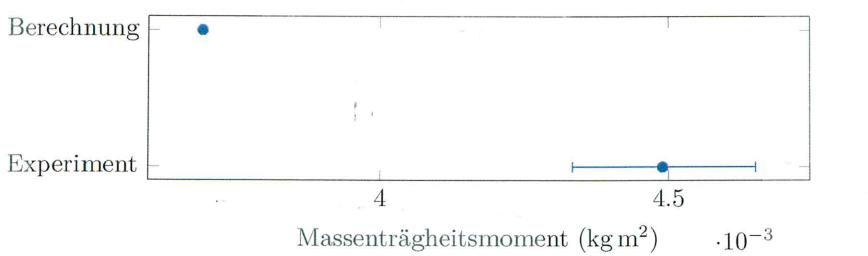
Sheet 3 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Date 0 1 2 3^d 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^d 0 1^m 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^m 2015 Of 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

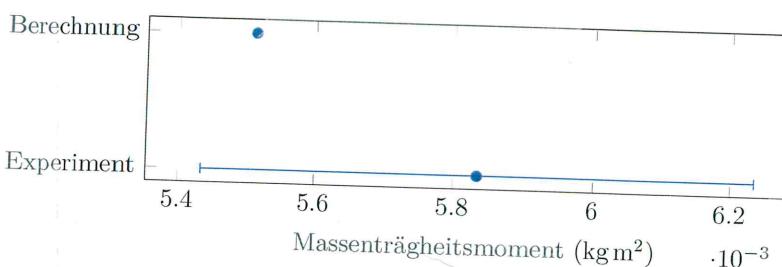
x-Achse 15° gekippt



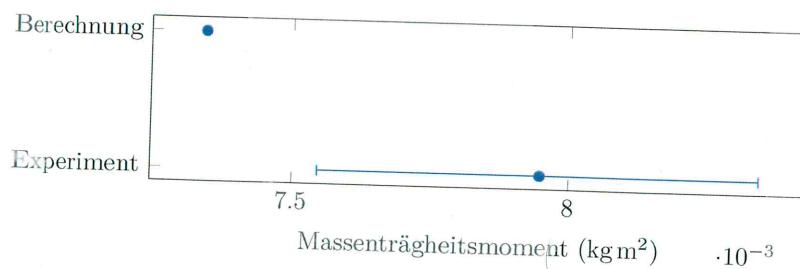
x-Achse 30° gekippt



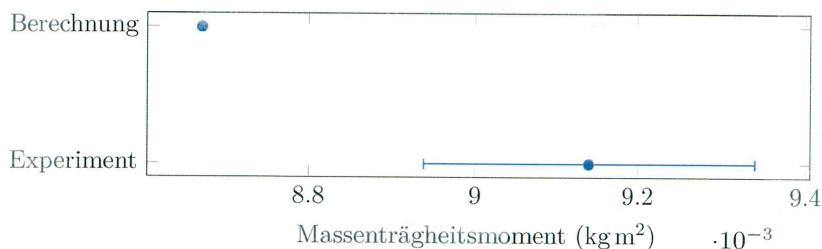
x-Achse 45° gekippt



x-Achse 60° gekippt



x-Achse 75° gekippt



Dynamische Unwucht

Die zugehörigen Plots und Berechnungen sind im Kapitel "Auswertung" zu finden und seien hier nicht wiederholt. Zusammenfassend fasst sich meines Erachtens sagen, dass die Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnungen zufriedenstellend ist.

Ich bestätige, dass ich diese
Arbeit selbstständig gemäß den
Vorschriften des Dozenten aus-
geführt habe.

Raphael Frey

Oberentfelden, 16.12.2015

Raphael Frey

ant komGL ter bufor glaL3 pro3 dnet1 mc1 other:

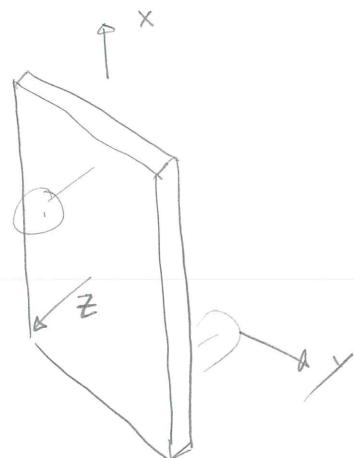
SUBJ Versuch M6: MTM-Tensor

Sheet 4 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Date 0 1 2 3^d 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^d 0 1^m 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^m 2015 Of 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Anhänger A

Berechnungen



$$\overrightarrow{I}_{\alpha} = 2m_1 \begin{pmatrix} y^2 + z^2 & -x \cdot y & -x \cdot z \\ -x \cdot y & x^2 + z^2 & -y \cdot z \\ -x \cdot z & -y \cdot z & x^2 + y^2 \end{pmatrix}$$

$$y=0 \Rightarrow \overrightarrow{I}_{\alpha} = 2m_1 \begin{pmatrix} z^2 & 0 & -x \cdot z \\ 0 & x^2 + z^2 & 0 \\ -x \cdot z & 0 & x^2 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{I}^* = \begin{pmatrix} I_{xx} \cdot c^2 \alpha + I_{zz} \cdot s^2 \alpha & 0 & \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot s(2\alpha) \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot s(2\alpha) & 0 & I_{xx} \cdot s^2 \alpha + I_{zz} \cdot c^2 \alpha \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{I}_1 = \begin{pmatrix} I_{xx,1} & 0 & I_{xz,1} \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ I_{zx,1} & 0 & I_{zz,1} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow I_{xx} \cdot c^2 \alpha + I_{zz} \cdot s^2 \alpha = I_{xx,1}, \quad (\text{I})$$

$$I_{xx} \cdot s^2 \alpha + I_{zz} \cdot c^2 \alpha = I_{zz,1} \quad (\text{II})$$

$$\frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot s(2\alpha) = I_{xz,1} \quad (\text{III})$$

$$I_{xx,1} - I_{zz,1} = I_{xx} \cdot c^2 \alpha + I_{zz} \cdot s^2 \alpha - I_{xx} \cdot s^2 \alpha - I_{zz} \cdot c^2 \alpha =$$

$$= c^2 \alpha (I_{xx} - I_{zz}) + \sin^2 \alpha (I_{zz} - I_{xx}) =$$

$$= c^2 \alpha (I_{xx} - I_{zz}) - s^2 \alpha (I_{xx} - I_{zz}) = (I_{xx} - I_{zz}) \cdot (c^2 \alpha - s^2 \alpha) =$$

$$= (I_{xx} - I_{zz}) \cdot \cos^2 (2\alpha)$$

$$\frac{2 \cdot I_{xz,1}}{(I_{xx,1} - I_{zz,1})} = \frac{(I_{zz} - I_{xx}) \cdot \sin(2\alpha)}{(I_{xx} - I_{zz}) \cdot \cos(2\alpha)} =$$

$$\left| \frac{2 I_{xz,1}}{I_{zz,1} - I_{xx,1}} = \tan(2\alpha) \right|$$

mit $I_{xz,1} = \frac{1}{2} (I_{zz} - I_{xx}) \cdot s(2\alpha)$

$$I_{zz,1} = I_{xx} \cdot s^2 \alpha + I_{zz} \cdot c^2 \alpha$$

$$I_{xx,1} = I_{xx} \cdot c^2 \alpha + I_{zz} \cdot s^2 \alpha$$

ant komGL ter bufor glaL3 pro3 dnet1 mc1 other:

SUBJ Versuch M6: MTM-Tensor

Sheet 4 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Date 0 1 2 3^d 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^d 0 1^m 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9^m 2015 Of 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Anhang B

Messprotokolle

Versuch / Probe: **II16 : Beschl.**Datum: **08.12.2015**

Parameter / Einstellungen:

 \varnothing Hebelrad für Set Tafel: 51mm

Halterung, leer

Haltestandoffs Halterung Leer

Samplingrate
 $= 1000$
→

SR = 100X

SR = 1000

"

"

"

m	acc	γ	t₀	alt5
100g	3.2866		-1.226	0 ± 0
	$\pm 4.5 \cdot 10^{-2}$		$\pm 3.1 \cdot 10^{-2}$	
100g	4.7394		$3.007 \cdot 10^{-1}$	0
	$\pm 6.5 \cdot 10^{-3}$		$\pm 2.4 \cdot 10^{-3}$	
100g	4.9953		$2.624 \cdot 10^{-1}$	0
	$\pm 4.3 \cdot 10^{-5}$		$\pm 1.5 \cdot 10^{-3}$	
150g	8.4682		$7.355 \cdot 10^{-1}$	0
	$\pm 5.1 \cdot 10^{-3}$		$\pm 7.8 \cdot 10^{-4}$	
200g	$1.19352 \cdot 10^1$		$6.6164 \cdot 10^{-1}$	0
	$\pm 9.1 \cdot 10^{-3}$		$\pm 8.3 \cdot 10^{-4}$	
250g	$1.51065 \cdot 10^1$		$3.77115 \cdot 10^{-1}$	$-4.307 \cdot 10^{-1}$
	$\pm 6.6 \cdot 10^{-3}$		$\pm 5.6 \cdot 10^{-4}$	$\pm 4.78211 \cdot 10^{-3}$

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: M6: Beschleunigungsversuch

Datum: 08.12.2015

Parameter / Einstellungen:

Haltung mit Montagematerial kurz
 Halterung Standoffs Short

m	acc	t0	off		
100g	4.3954	5.683e-1	-4.697e1		
	± 2.8e-3	1.7e-3	9.45628e-5		
150g	7.3568	4.955e-1	-4.666e1		
	± 3.9e-3	± 1.1e-3	± 7.01253e-3		
175g	8.8630	7.52000e-1	-4.644e1		
	4.0e-3	7.9e-4	± 5.41855e-3		
200g	1.04438e1	1.02218	-4.660e1		
	± 4.4e-3	± 6.4e-4	± 4.56518e-3		
225g	1.16250e1	6.9794e-1	-4.663e1		
	± 5.4e-3	± 7.5e-4	± 6.00010e-3		
250g	1.35554e1	8.5347e-1	-4.63e1		
	± 4.9e-3	± 5.2e-4	± 4.25600e-3		

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: 116 - Beschleunigungsversuch

Datum: 10.12.2015

Parameter / Einstellungen:

Halterung mit Standoffs lang HalterungStandoffLang

400

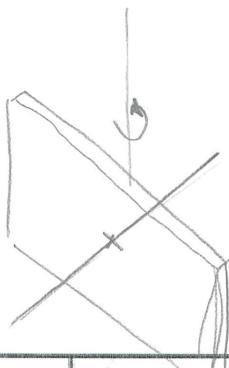
m	acc	t ₀	offs		
100g	4.2005	3.175e-1	-4.732e1		
	±2.7e-3	±1.8e-3	±9.74577e-3		
150g	6.9637	6.824e-1	-4.686e1		
	±5.1e-3	±1.6e-3	±1.0526e-2		
175g	8.3023	7.588e-1	4.678e1		
	±7.0e-3	±1.6e-3	±1.1908e-2		
200g	9.767	3.382e-1	-4.692e1		
	±1.0e-2	±2.0e-3	±1.6295e-2		
225g	1.13632e1	3.267e-1	-8.459e1		
	±9.0e-3	±1.4e-3	±1.2034e-2		
250g	1.2888e1	3.0965e-1	-8.429e1		
	±6.3e-3	±7.5e-4	±6.62563e-3		

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: **M6 - Beschleunigungsversuch**

Datum: 08.12.2015

Parameter / Einstellungen:



Medium Axis 0 deg

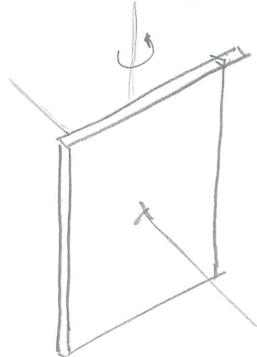
m	ρ_{ZCC}	b_0	offs		
100g	<u>8.6493e0</u>				
	1.45060	1.788e-1	-5.348e1		
	$\pm 7.7e-4$	$\pm 2.6e-3$	$\pm 8.7688e-3$		
150g	2.4567	4.214e-1	-5.304e1		
	$\pm 1.2e-3$	$\pm 1.8e-3$	$\pm 7.27465e-3$		
175g	2.8852	1.433e-1	-5.318e1		
	$\pm 1.8e-3$	$\pm 2.2e-3$	$\pm 9.74229e-5$		
200g	3.4164	2.808e-1	-5.315e1		
	$\pm 1.3e-3$	$\pm 1.2e-3$	$\pm 5.94459e-5$		
225g	3.8255	5.586e-1	-5.325e1		
	$\pm 2.5e-3$	$\pm 2.0e-3$	$\pm 1.0788e-7$		
250g	4.3376	2.795e-1	-5.28e1		
	$\pm 2.3e-3$	$\pm 1.4e-3$	$\pm 7.12703e-3$		

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: M6 - Beschleunigungsversuch

Datum: 08.12.2015

Parameter / Einstellungen:



Long Axis 0 deg

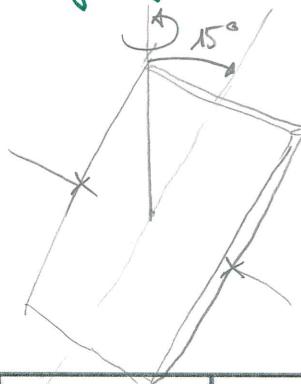
m	acc	t ₀	off
100g	2.3804	-6.17e-2	-533e1
	±2.1e-3	±3.4e-3	±1.4193e-2
150g	4.7089	7.214e-1	-5.309e1
	2.3e-3	1.2e-3	±6.69619e-3
175g	5.6266	6.6556e-1	-5.299e1
	±2.4e-3	9.9e-4	±5.90559e-3
200g	6.5727	4.794e-1	-5.301e1
	±3.2e-3	±1.0e-3	±6.5347e-3
225g	7.5086	3.3591e-1	-5.297e1
	±3.5e-3	±9.6e-4	±6.72797e-3
250g	8.6195	4.3094e-1	-5.271e1
	±3.7e-3	±8.0e-4	±5.65896e-3

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: M6 - Beschleunigungsversuch

Datum: 08.12.2015

Parameter / Einstellungen:



LangAxis 15 Deg

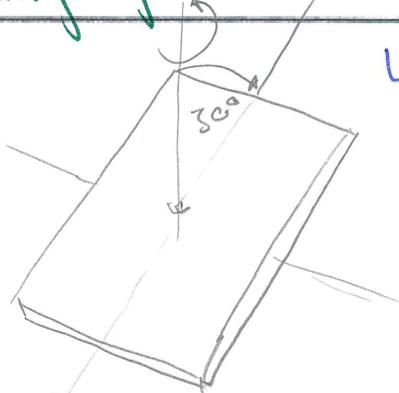
m	acc	b0	offs		
100g	2.4244	1.612e-1	-1.279		
	$\pm 1.4e-3$	$\pm 2.2e-3$	$\pm 8.7308e-3$		
150g	4.2344	4.765e-1	-1.007		
	$\pm 2.1e-3$	$\pm 1.4e-3$	$\pm 7.6442e-3$		
175g	4.9152	3.488e-1	-9.418e-1		
	$\pm 2.6e-3$	$\pm 1.4e-3$	$\pm 8.223e-3$		
200g	5.8905	3.100e-1	-8.620e-1		
	$\pm 4.4e-3$	$\pm 1.8e-3$	$\pm 1.16e-2$		
225g	6.8006	4.234.36e-1	5.729		
	$\pm 2.9e-3$	$\pm 9.1e-4$	$\pm 5.9287e-3$		
250g	7.6275	2.044e-1	5.535		
	$\pm 4.6e-3$	$\pm 1.3e-3$	$\pm 9.2990e-3$		

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: M6 - Beschleunigungsversuch

Datum: 08.12.2015

Parameter / Einstellungen:



LongAxis 30 Deg

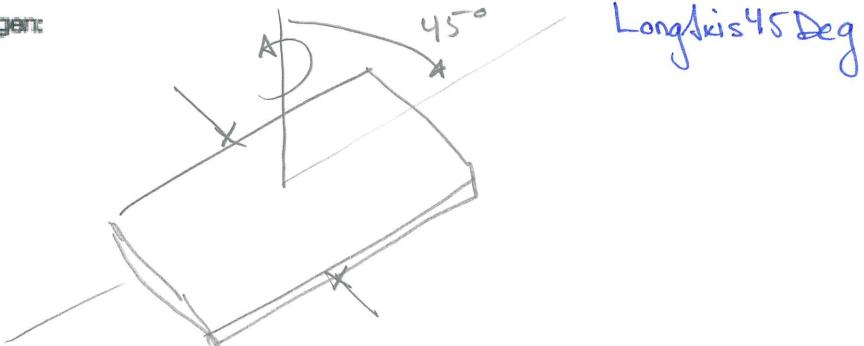
m	acc	b ₀	offs
100g	1.96144	1.484e-1	-6.788e-1
	±5.0e-4	±1.0e-3	±3.706e-3
150g	3.4873	2207e-1	-7.485e-1
	±1.6e-3	±1.4e-3	±6.352e-3
175g	4.0579	6.342e-1	-7.82e-1
	±1.5e-3	±1.1e-3	±5.918e-3
200g	4.8028	2.051e-1	-9.708e-1
	±5.8e-3	±2.2e-3	±1.4e-2
225g	5.6022	4.358e-1	-6.785e-1
	±2.7e-3	±1.2e-3	±7.221e-3
250g	6.2832	4.758e-1	-6.775e-1
	±3.1e-3	±1.1e-3	±7.345e-3

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: **F96 - Beschleunigungsversuch**

Datum: 09.12.2015

Parameter / Einstellungen:



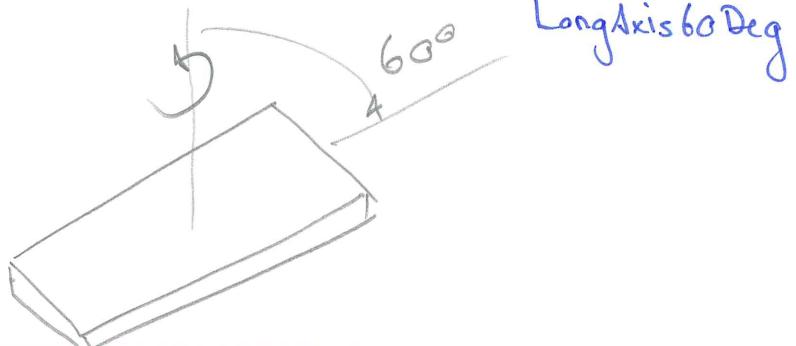
<i>m</i>	<i>a</i> cc	<i>b</i> ₀	<i>offS</i>
100g	1.38569	-3.959e-1	-1.593
	± 6.3e-4	2.2e-3	± 7.5543e-3
150g	2.90073	6.312e-1	-6.816e-1
	± 9.8e-4	± 1.1e-3	± 4.706e-3
175g	3.43895	3.1515e-1	-3.208e-1
	± 9.3e-4	± 8.2e-4	± 5.85086e-5
200g	4.0755	4.8865e-1	-3.192e-1
	± 1.2e-3	± 8.3e-4	± 4.55805e-3
225g	4.5412	4.148e-1	-3.211e-1
	± 2.0e-3	± 1.2e-3	± 7.05197e-3
250g	5.1974	2.3936e-1	-3.193e-1
	± 1.1e-3	± 5.2e-4	± 3.11474e-3

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe:

Datum:

Parameter / Einstellungen:



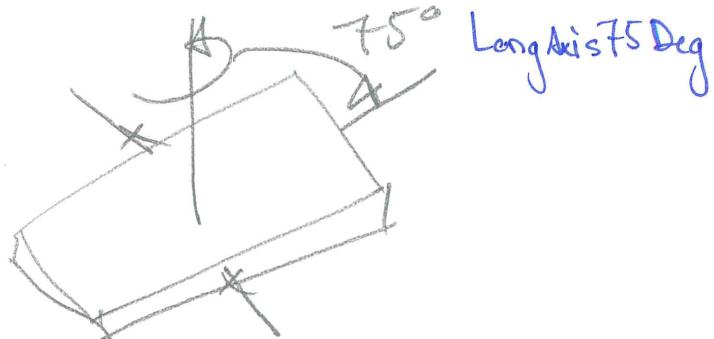
M	2cc	t ₀	offs		
100g	1.23233	-5.293e-1	-3.303e1		
	±5.1e-4	±22e-3	±6.80373e-5		
150g	2.47027	1.9695e-1	-3.192e1		
	±6.7e-4	±9.0e-4	±5.35953e-5		
175g	2.8541	1.266e-1	-3.219e1		
	±1.1e-3	±1.4e-3	±6.35572e-5		
200g	3.3746	7.8le-2	-3.247e1		
	±2.0e-3	±2.0e-3	±1.0757e-2		
225g	3.88429	2.0910e-1	-3.186e1		
	±8.4e-4	±6.0e-4	±2.98689e-5		
250g	4.3579	4.7268e-1	-3.182e1		
	±1.1e-3	±7.2e-4	±4.02762e-5		

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe:

Datum:

Parameter / Einstellungen:



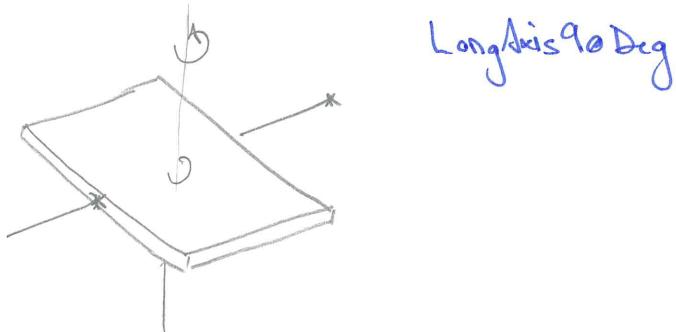
m	2cc	b_0	α_{HS}
250g	4.02648	$4.0130e-1$	$-3.161e1$
	$\pm 7.2e-4$	$\pm 4.8e-4$	$\pm 2.42692e-3$
200g	3.4638	$1.9855e-1$	$-3.186e1$
	$\pm 7.5e-4$	$\pm 7.5e-4$	$\pm 5.5283e-3$
150g	2.22293	$-8.89e-2$	$-3.219e1$
	$\pm 6.4e-4$	$\pm 1.1e-3$	$\pm 4.50023e-3$
100g	1.22422	$-1.053e-1$	$-3.229e1$
	$\pm 5.2e-4$	$\pm 2.1e-3$	$\pm 6.04174e-3$
225g	3.62246	$3.1256e-1$	$-3.174e1$
	$\pm 8.0e-4$	$\pm 6.1e-4$	$\pm 2.8278e-3$

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Probe: M6 - Beschleunigungsversuch

Datum: 08.12.2015

Parameter / Einstellungen:



Langaxis 90 Deg

m	acc	t0	0ffs		
100g	1.11226	-1.077e-1	-7.205e1		
	$\pm 5.1 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2.5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5.86044 \cdot 10^{-5}$		
150g	2.2296	$8.1854 \cdot 10^{-1}$	-7.153e1		
	$\pm 5.7 \cdot 10^{-4}$	$\pm 9.1 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3.2314 \cdot 10^{-5}$		
175g	2.66716	$4.8482 \cdot 10^{-1}$	-7.153e1		
	$\pm 7.3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 9.1 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3.6273 \cdot 10^{-5}$		
200g	3.10379	$6.0881 \cdot 10^{-1}$	-7.17e1		
	$\pm 7.1 \cdot 10^{-4}$	$\pm 7.4 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3.34388 \cdot 10^{-5}$		
225g	3.51425	$3.8150 \cdot 10^{-1}$	-7.159e1		
	$\pm 8.3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 6.8 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3.12855 \cdot 10^{-5}$		
250g	3.8809	$9.063 \cdot 10^{-1}$	-6.543e1		
	$\pm 1.6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 1.2 \cdot 10^{-3}$	$\pm 6.15148 \cdot 10^{-5}$		

Beobachtungen/Bemerkungen:

Physikzentrum

LongAxis Anglekar

Versuch / Probe: M6 - 3. 4.1 Dynam. Unwucht Datum: 18.11.15

Parameter / Einstellungen:

Rechteckige Stahlplatte 2168,6 g

~~100x200 mm * 115 mm~~

100x200x14mm

$$4 \text{ Hz} = 8000 \frac{\text{Impulse}}{\text{Sekunde}}$$

△ Spauenzspitze



[°]	[mV]	[mV]			
Plattenwinkel	Channel 1	Channel 2			
0	300	300			
10	1038	1074			
20	2,225 V	2,225 V			
30	2,99 V	2,99 V			
40	3,235 V	3,235 V			
45	3,28 V	3,28 V			
50	3,195 V	3,195 V			
60	2,75 V	2,75 V			
70	2,065 V	2,065 V			
80	904 mV	904 mV			
90	294	294			

Beobachtungen/Bemerkungen:



Versuch / Probe: M6 - 3.4.2 Dyn. Unwucht

Datum: 18.11.15

Parameter / Einstellungen:

Winkel konst 45°

LongAxis 45 Deg Force

Unwucht in Abhängigkeit der Drehzahl

[Hz]	[V]	[V]	[Hz]	[V]	[V]
Drehzahl	Ch. 1	Ch. 2	Drehzahl	Ch. 1	Ch. 2
1	0,377	0,377			
2	0,926	0,926	2,5	1,354	1,354
3	2,0	2,0	3,5	2,575	2,575
4	3,305	3,305	4,5	4,25	4,25
5	5,25	5,25	5,5	6,27	6,27
6					
7					
8					
9					
10					
1,5	0,606	0,606			

Beobachtungen/Bemerkungen:

Versuch / Prober: M6 - 3.5 Statische Unwucht

Datum: 18.11.15

Parameter / Einstellungen: Stahlplatte (s. 3.4 Messprotokoll)

+2 Zusatzgewichte

(auf Winkel)
messgerät
↓Frequenz konst 3Hz \approx 6000

LongAxisWeights

Umgefähre Nullstellung bei 12°

[°]	[V]	[V]		[°]	bzgl. Nulllage
Winkel	Ch. 1	Ch. 2		0	
12	0,341	0,341	0,333	10	0
22	0,862	0,896		20	10
32	1,446	1,418		30	20
(132 $\hat{=}$)	42	1,985	1,940	40	30
(122 $\hat{=}$)	0	0,920	0,920		-10
32	1,28	1,28			-20
42	1,845	1,845			-30

Beobachtungen/Bemerkungen:

