

Kraft, Impuls und Kraftstoß

Stichworte:

Kraft, Federkraft, HOOKEsches Gesetz, NEWTONsche Axiome, Impuls, Kraftstoß, harmonische Schwingung, Abstandsgesetz für Kräfte

Messprogramm:

Kalibrierung eines Kraftsensors, Kraft und Auslenkung bei einer harmonischen Schwingung, Anziehungskraft zwischen zwei Magneten, Kraftstoß und Impulsänderung bei einem elastischen Stoß auf einer Luftkissenbahn.

Literatur:

- /1/ DEMTRÖDER, W.: „Experimentalphysik 1 – Mechanik“, Springer-Verlag, Berlin u.a.
/2/ MESCHÉDE, D. [Hrsg.]: "Gerthsen Physik", Springer, Berlin

1 Einleitung

Dieser Versuch ist vor allem der quantitativen Messung von Kräften gewidmet. Im ersten Teil wird der Zusammenhang zwischen Kraft und Auslenkung bei einer mechanischen, harmonischen Schwingung untersucht. Der zweite Teil widmet sich dem Abstandsgesetz bei der Kraftwirkung zwischen zwei Magneten. Im dritten und letzten Teil geht es um den Zusammenhang zwischen Kraft und Impuls bzw. Kraftstoß.

2 Theorie

2.1 Harmonische Schwingung: Kraft und Auslenkung

Wir betrachten eine Anordnung gem. Abb. 1, wie wir sie in ähnlicher Form bereits im Versuch „Sensoren für Kraft...“ kennen gelernt haben. An einem Kraftsensor S hängt eine Feder FE. Am unteren Ende der Feder ist über eine Stange ST eine Kugel K befestigt. Zusätzlich ist an der Stange eine Reflektorscheibe R montiert.

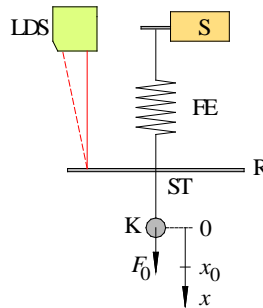


Abb. 1: Anordnung zur Messung der Kraft und der Auslenkung bei einer harmonischen Schwingung. Bezeichnungen siehe Text.

In der Ruhelage der Kugel sind die nach unten gerichtete Gewichtskraft von ST, K und R und die nach oben gerichtete Federkraft im Gleichgewicht. Der Mittelpunkt der Kugel befindet sich dann in der Ruhelage bei $x = 0$. Durch eine zusätzliche senkrecht nach unten gerichtete Kraft F_0 wird die Kugel um die Strecke x_0 nach unten ausgelenkt¹. Zur Zeit $t = 0$ wird die Kugel losgelassen und durch die Zugkraft F der Feder nach oben beschleunigt. Für F gilt nach dem HOOKEschen Gesetz mit der Federkonstanten D :

$$(1) \quad F = -D x_0$$

Anschließend führt die Kugel eine harmonische Schwingung in x -Richtung aus. Die Auslenkung aus der Ruhelage, $x(t)$, die mit einem Laser-Distanzsensor LDS gemessen werden kann, wird unter Vernachlässigung von Reibungseffekten durch folgende Gleichung beschrieben:

¹ Da F_0 und alle weiteren betrachteten Kräfte nur in x -Richtung wirken, reicht eine Beschreibung mit skalaren Größen.

$$(2) \quad x(t) = x_0 \cos(\omega t)$$

Darin ist ω die Kreisfrequenz der Schwingung, die gegeben ist durch:

$$(3) \quad \omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$$

m ist die für die Schwingung maßgebliche Masse, für die gilt:

$$(4) \quad m = m_K + m_{ST} + m_R + \frac{1}{3} m_{FE}$$

m_K , m_{ST} , m_R und m_{FE} sind die Massen der Kugel, der Stange, der Reflektorscheibe und der Feder².

Die Geschwindigkeit $v(t)$ der Kugel erhält man durch Differentiation von $x(t)$ nach der Zeit:

$$(5) \quad v(t) = -x_0 \omega \sin(\omega t)$$

Die Beschleunigung $a(t)$ erhält man durch Differentiation der Geschwindigkeit nach der Zeit:

$$(6) \quad a(t) = -x_0 \omega^2 \cos(\omega t)$$

Damit folgt für die Kraft $F(t)$, die die Feder auf m ausübt:

$$(7) \quad F(t) = m a(t) = -m x_0 \omega^2 \cos(\omega t) = -F_0 \cos(\omega t)$$

mit

$$(8) \quad F_0 = m x_0 \omega^2$$

Frage 1:

- Die Kraft $F(t)$ hat je nach Lage $x(t)$ der Kugel ein positives oder negatives Vorzeichen. In welchem Bereich wirkt die Feder als Zugfeder bzw. als Druckfeder?

In der Ruhelage der Kugel misst der Kraftsensor S die Gewichtskraft G von FE, ST, R und K. Wird die Kugel aus der Ruhelage mit der Kraft F_0 nach unten gezogen, misst S nach dem 3. NEWTONschen Axiom³ *actio = reactio* die Kraft

$$(9) \quad F_S = G + F_0 = G - F(t=0)$$

mit $F(t)$ nach Gl. (7). Nach dem Loslassen der Kugel misst S die Kraft

$$(10) \quad F_S(t) = G - F(t)$$

Nach Abzug von G liefert S also $F(t)$ nach Gl. (7) mit umgekehrtem Vorzeichen.

2.2 Abstandsgesetz für magnetische Kraft

Die Gravitationskraft \mathbf{F}_G zwischen zwei Massen m_1 und m_2 im Abstand r ist bekanntlich durch das NEWTONsche Gravitationsgesetz gegeben:

$$(11) \quad \mathbf{F}_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

² Der Zusammenhang nach Gl. (4), sowie eine detaillierte mathematische Beschreibung der Schwingung wird im Versuch „Erzwungene mechanische Schwingungen“ des physikalischen Grundpraktikums (Teil I) für Physiker erläutert.

³ ISAAC NEWTON (1643 – 1727)

Dabei ist G die Gravitationskonstante und $\hat{\mathbf{r}}$ der Einheitsvektor in Richtung der Verbindungslinie der Mittelpunkte beider Massen⁴. Da die Kraft mit dem Quadrat des Abstandes r abnimmt, spricht man von einem $1/r^2$ -Gesetz.

Auch das COULOMB-Gesetz, das die Kraft \mathbf{F}_E zwischen zwei elektrischen Ladungen q_1 und q_2 im Vakuum beschreibt, ist ein $1/r^2$ -Gesetz. Es lautet:

$$(12) \quad \mathbf{F}_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

wobei ϵ_0 die elektrische Feldkonstante ist und r und $\hat{\mathbf{r}}$ analog zum Gravitationsgesetz definiert sind. Für Ladungen mit ungleichen Vorzeichen ergibt sich eine anziehende Kraft, für Ladungen mit gleichen Vorzeichen eine abstoßende Kraft.

Auch für die Kraft zwischen zwei Magneten gilt unter bestimmten Bedingungen ein $1/r^2$ Gesetz. Wir betrachten dazu gem. Abb. 2 zwei Stabmagneten, deren Längen groß gegenüber ihren Durchmessern sind. Die „Stärke“ solcher Magnete kann man unter dieser Voraussetzung durch *Polstärken* P beschreiben, die mit unterschiedlichen Vorzeichen am Nord- und Südpol des jeweiligen Magneten herrschen und als punktförmig angenommen werden können⁵. Die Kraft zwischen zwei Magneten wird dann durch folgendes Gesetz beschrieben, das auch als COULOMBgesetz für Magnete bezeichnet wird:

$$(13) \quad \mathbf{F}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{P_1 P_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

μ_0 ist die magnetische Feldkonstante und r und $\hat{\mathbf{r}}$ sind wiederum analog zum Gravitationsgesetz definiert. Bei ungleichnamigen Polen ist die Kraft anziehend, bei gleichnamigen abstoßend.

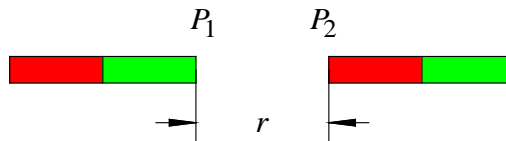


Abb. 2: Zum Abstandsgesetz für magnetische Kräfte. P_1 und P_2 sind die Polstärken der Magnete, deren Längen groß gegenüber ihren Durchmessern sind. r ist der Abstand beider Magnete, der zwischen den Polen gemessen wird.

2.3 Impuls und Kraftstoß

Der Bewegungszustand eines Körpers der Masse m , der sich geradlinig mit gleichförmiger Geschwindigkeit \mathbf{v} bewegt, wird mit dem Impuls

$$(14) \quad \mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

beschrieben. Nach dem 1. NEWTONschen Axiom ist eine Änderung des Impulses nur möglich, wenn eine Kraft \mathbf{F} auf den Körper einwirkt. Die durch \mathbf{F} bewirkte zeitliche Änderung des Impulses ist nach dem 2. NEWTONschen Axiom gegeben durch

$$(15) \quad \mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$$

Gl. (15) kann man auch in der Form

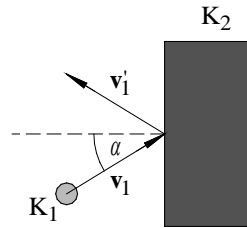
$$(16) \quad d\mathbf{p} = \mathbf{F} dt$$

schreiben. Sie besagt, dass eine Kraft \mathbf{F} , die während der Zeit dt auf einen Körper einwirkt, eine Impulsänderung $d\mathbf{p}$ verursacht. Das Produkt $\mathbf{F} dt$ wird auch als *Kraftstoß* bezeichnet. Es gilt also:

$$\text{Kraftstoß} = \text{Impulsänderung}$$

⁴ Streng genommen gilt Gl. (11) nur für punktförmige Massen im Abstand r . Bei annähernd kugelförmigen Massen mit symmetrischer Massenverteilung um den Mittelpunkt (z.B. beim System Erde und Mond) ergibt sich jedoch der gleiche Zusammenhang. r beschreibt dann den Abstand beider Mittelpunkte.

⁵ Die magnetische Polstärke P wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Hier ist die Größe mit der Einheit $[P] = \text{A m}$ gemeint.

Abb. 3: Zum elastischen Stoß zweier Körper K_1 und K_2 .

Wir betrachten nun gem. Abb. 3 den elastischen Stoß eines Körpers K_1 der Masse m_1 mit einem ruhenden Körper K_2 , dessen Masse m_2 sehr viel größer als m_1 ist. K_1 möge sich anfänglich geradlinig mit der Geschwindigkeit \mathbf{v}_1 auf K_2 zu bewegen ($\mathbf{v}_2 = 0$) und unter dem Winkel α auf K_2 auftreffen. Nach dem Stoß bewegt sich K_1 mit der Geschwindigkeit \mathbf{v}_1' von K_2 fort, wobei der Strich (') hier und i. F. Größen nach dem Stoß kennzeichnet. Im Fall $m_2 \rightarrow \infty$, der hier betrachtet werden soll, gilt $\mathbf{v}_2' \rightarrow 0$. Der Impuls von K_1 vor und nach dem Stoß ist demnach:

$$(17) \quad \begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= m_1 \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{p}_1' &= m_1 \mathbf{v}_1' \end{aligned}$$

mit $|\mathbf{v}_1| \approx |\mathbf{v}_1'|$. Die kinetische Energie von K_1 ist also vor und nach dem Stoß nahezu gleich:

$$(18) \quad \frac{1}{2} m_1 |\mathbf{v}_1|^2 \approx \frac{1}{2} m_1 |\mathbf{v}_1'|^2$$

Auf K_2 wird unter den genannten Voraussetzungen praktisch keine kinetische Energie übertragen. Die Impulsänderung, die K_1 durch den Stoß erfährt, ist

$$(19) \quad \Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_1' - \mathbf{p}_1 = m_1 (\mathbf{v}_1' - \mathbf{v}_1)$$

Sie muss gleich dem Impuls sein, den K_2 aufnimmt:

$$(20) \quad \Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_2' = m_2 \mathbf{v}_2'$$

Gl. (19) ist nicht im Widerspruch zur Tatsache, dass K_2 bei dem Stoß wegen $\mathbf{v}_2' \rightarrow 0$ praktisch keine kinetische Energie aufnimmt. Dies erkennt man gut aus dem Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Impuls:

$$(21) \quad E_{\text{kin},2} = \frac{1}{2} m_2 \mathbf{v}_2'^2 = \frac{\mathbf{p}_2'^2}{2 m_2}$$

Für $m_2 \rightarrow \infty$ geht die kinetische Energie demnach auch bei endlichem Impuls gegen Null.

Die Impulsänderung $\Delta \mathbf{p}$ von K_1 muss dem gesamten (integralen) Kraftstoß entsprechen, den K_2 beim Stoßprozess auf K_1 ausübt. Dieser Kraftstoß ist nach Gl. (16) gegeben durch:

$$(22) \quad \Delta \mathbf{p} = \int_0^\tau \mathbf{F}(t) dt$$

Hierbei ist $\mathbf{F}(t)$ die während der Dauer τ des Stoßes wirkende Kraft. Sie sorgt zunächst für die Abbremsung von K_1 von der Geschwindigkeit \mathbf{v}_1 auf die Geschwindigkeit 0 und anschließend zu seiner Beschleunigung auf die Geschwindigkeit \mathbf{v}_1' . Zum anschaulichen Verständnis des Stoßvorgangs kann man sich K_2 als Feder

vorstellen, die zunächst von K_1 zusammengedrückt wird, bis seine Geschwindigkeit 0 ist, und die sich anschließend wieder entspannt und dabei K_1 auf die Geschwindigkeit v_1 beschleunigt.

3 Versuchsdurchführung

Zubehör:

Kraftsensor auf DMS-Prinzip (Messbereich (0 – 5) N), Messverstärker für Kraftsensor, Gewichtssatz zur Kalibrierung des Kraftsensors, 2 Netzgeräte (PHYWE (0 - 15 / 0 - 30) V), Digital-Oszilloskop (TEKTRONIX TDS 1012 / 1012B / 2012C), Feder mit Kugel, Stange und Reflektorscheibe, Laserdistanzsensor (BAUMER OADM 12U6460/S35), Stabmagnete in Al-Halterungen mit Haltestangen, PVC-Abstandstück, Führung für Stabmagnet, Verschiebetisch, Luftkissenbahn, Schlitten für Luftkissenbahn mit Blende und Al-Würfeln, Gabellichtschranke (BETA-SENSORIK GLS-30BP/R), Haken für Kraftsensor, Stativ auf Grundplatte, Stativstangen, Stativsäule, Kreuzverbinder, Messschieber.

3.1 Kalibrierung des Kraftsensors

Der in den folgenden Versuchen eingesetzte Kraftsensor arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie der Sensor, der im Versuch „Sensoren für Kraft...“ eingesetzt wurde. Beide Sensoren unterscheiden sich lediglich in ihrem Messbereich (hier: 5 N, vormals 100 mN)⁶. Aus diesem Grunde wird hier die Dämpfung am Messverstärker ausgeschaltet. Die Kalibrierung des Sensors erfolgt mit mindestens fünf Massestücken im Bereich $m \approx (50 - 500)$ g.

Die Ausgangsspannung U des Kraftsensors⁷ wird mit dem Oszilloskop⁸ gemessen. U wird über $G = mg$ aufgetragen, wobei für die Erdbeschleunigung g der Wert von $g = 9,8133$ m/s² verwendet wird, der als fehlerfrei angenommen werden kann. Durch die Daten wird eine Ausgleichsgerade gelegt, deren Parameter für die spätere Umrechnung von Spannung in Kraft verwendet werden.

3.2 Kraft und Auslenkung bei einer harmonischen Schwingung

Mit einer Anordnung gem. Abb. 1 sollen die Kraft $F(t)$ und die Auslenkung $x(t)$ bei einer harmonischen Schwingung gemessen werden. Zunächst werden die Massen der Feder und des Systems Stange/Reflektorscheibe/Kugel durch Wiegen bestimmt. Anschließend werden alle Komponenten wie in Abb. 1 an den Kraftsensor S gehängt, der an ein Stativ montiert wird. Am selben Stativ ist auch der Laser-Distanzsensor LDS befestigt. Seine Höhe wird so justiert, dass die Reflektorscheibe bei der zu messenden Schwingung innerhalb seines Messbereiches bleibt. Anschließend wird die Kugel mit der Hand etwa 20 mm möglichst senkrecht nach unten ausgelenkt und losgelassen.

Die Ausgangsspannung des LDS, $U_{LDS}(t)$, und die Ausgangsspannung des Kraftsensors, $U_S(t)$, werden mit einem Speicheroszilloskop aufgezeichnet, das auf U_{LDS} getriggert wird. Die Zeitablenkung des Oszilloskops wird so eingestellt, dass 5 – 10 Perioden der Schwingung auf dem Bildschirm sichtbar sind. Nach dem Einschwingen wird im *single-sequence*-Modus ein typischer Schwingungsvorgang gespeichert und als Bildschirmfoto dem Protokoll beigelegt.

Mit Hilfe der Zeiteursor wird die Periodendauer der Schwingung bestimmt und daraus die Kreisfrequenz ω berechnet. Die Amplituden von $U_{LDS}(t)$ und $U_S(t)$ einer ausgewählten Teilschwingung werden mit Hilfe der Spannungscursor gemessen:

$$(18) \quad U_{LDS,0} = (U_{LDS,max} - U_{LDS,min}) / 2 \qquad U_{S,0} = (U_{S,max} - U_{S,min}) / 2$$

Mit dem als fehlerfrei angenommenen Kalibrierfaktor k des LDS für Spannungsdifferenzen,

$$k = 0,0962 \text{ V/mm}$$

kann die Schwingungsamplitude x_0 , und mit Hilfe von Gl. (8) daraus die Kraft F_0 , bestimmt werden. Dabei ist die Masse m mit Hilfe von Gl. (4) zu berechnen und ω wird mit Hilfe des Oszilloskops bestimmt. Analog dazu kann aus $U_{S,0}$ und den Daten der Kalibrierfunktion des Kraftsensors ebenfalls die Kraft F_0 bestimmt werden. Beide Ergebnisse sollen miteinander verglichen werden

⁶ Aus diesem Grund muss hier die Dämpfung ausgeschaltet sein.

⁷ Der Einfachheit halber wird hier und i. F. der Begriff „Ausgangsspannung des Kraftsensors“ verwendet, wenn die Ausgangsspannung des mit dem eigentlichen Kraftsensor verbundenen Messverstärkers gemeint ist.

⁸ Da bei den folgenden Messungen die Spannung U jeweils mit dem Oszilloskop gemessen wird, erfolgt auch hier die Messung von U mit dem Oszilloskop statt mit einem Multimeter, um Differenzen in den Messwerten durch unterschiedliche Kalibrierungen von Oszilloskop und Multimeter zu vermeiden.

Frage 2:

- Was können Gründe für eine mögliche Abweichung beider Größen sein?

3.3 Anziehungskraft zwischen zwei Magneten

Mit einer Anordnung gem. Abb. 4 soll die Gültigkeit des Abstandsgesetzes für die Anziehungskraft zwischen zwei Magneten nach Gl. (13) überprüft werden. Beide Magnete sind in Al-Hülsen gefasst, die auf Stangen geschraubt werden. Zunächst wird nur der obere Magnet mit der Polstärke P_1 zusammen mit der Stange an einen Kraftsensor S gehängt. Eine reibungsarme Führung A beschränkt seine Bewegung auf die senkrechte Richtung. Die Ausgangsspannung $U_{S,0}$ des Kraftsensors wird gemessen. Sie entspricht der Spannung für den Fall $r \rightarrow \infty$, wird also ausschließlich durch die Gewichtskraft G von Stange und Magnet verursacht. Aus $U_{S,0}$ wird mit den Daten der Kalibrierfunktion die Gewichtskraft G von Magnet und Stange berechnet, die später von allen anderen gemessenen Kräften subtrahiert werden muss.

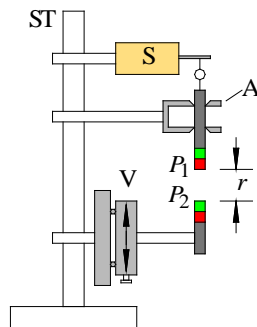


Abb. 4: Anordnung zur Messung der Anziehungskraft zwischen zwei Magneten mit den Polstärken P_1 und P_2 . Alle Komponenten sind an einem gemeinsamen Stativ ST befestigt, das eine exakt senkrechte Montage erlaubt. Übrige Bezeichnungen siehe Text.

Anschließend wird der untere Magnet mit der Polstärke P_2 mit einer Stange auf einem Verschiebetisch V montiert, mit dem er in senkrechter Richtung bewegt werden kann. Zunächst wird er so justiert, dass die Längsachsen beider Magnete exakt übereinander liegen. Danach wird mit einem PVC-Abstandsstück (Länge $l \approx 20$ mm, messen) ein definierter Abstand l zwischen beiden Magneten eingestellt, die zugehörige Skalenposition des Verschiebetisches notiert und als $s = l$ definiert. Anschließend wird der Verschiebetisch in die Skalenposition $s = 10$ mm gebracht und $U_S(s)$ bestimmt⁹. Danach wird s in Schritten von ca. 0,5 mm Länge bis auf etwa $s = 2$ mm verringert und dabei jeweils $U_S(s)$ gemessen.

Die Werte von $U_S(s)$ werden mit den Daten der Kalibrierfunktion in Kräfte $F(s)$ umgerechnet. Nach Subtraktion von G erhält man daraus die Kräfte $F_M(s)$, die durch die magnetische Anziehung verursacht werden:

$$(24) \quad F_M(s) = F(s) - G$$

Jede Kraft \mathbf{F} , die auf den Biegebalken im Kraftsensor wirkt, führt gem. Abb. 5 am Angriffspunkt Q von \mathbf{F} zu einer kleinen Auslenkung d des Balkens in Richtung von \mathbf{F} . $d(F)$ lässt sich in guter Näherung durch ein Polynom 2. Ordnung beschreiben:

$$(25) \quad d(F) = a_1 F + a_2 F^2$$

Die Parameter a_1 und a_2 sind den Unterlagen am Arbeitsplatz zu entnehmen. Unter Berücksichtigung der Auslenkung d gilt für den tatsächlichen Abstand r zwischen den beiden Magneten bei einer Skalenposition s am Verschiebetisch:

$$(26) \quad r = s - d$$

⁹ Beispiel: Es sei $l = 20,1$ mm. Bei diesem Abstand zwischen P_1 und P_2 werde am Verschiebetisch V die Skalenposition 74,5 mm abgelesen. Dieser Wert wird als $s = l = 20,1$ mm definiert. Anschließend soll V in die Position $s = 10$ mm gebracht werden. An seiner Skala muss demnach ein Wert von $(74,5 - 10,1)$ mm = 64,4 mm eingestellt werden.

$F(r) = F(s)$ wird doppelt-logarithmisch über r aufgetragen (Origin). In das Diagramm wird eine Ausgleichsgerade durch die Messdaten mit der festen Steigung -2 eingezeichnet. Bei Gültigkeit des nach Gl. (13) erwarteten $1/r^2$ -Gesetzes müssten alle Messwerte auf dieser Geraden liegen. Für kleine Abstände r wird sich jedoch eine deutliche Abweichung der Messwerte von der Ausgleichsgeraden ergeben. Der Grund dafür ist, dass bei kleinen r die Annahme *punktförmiger* Polstärken P nicht mehr gerechtfertigt ist.

Frage 3:

- Ab welchem Abstand r ist in guter Näherung eine $1/r^2$ -Abhängigkeit gegeben?

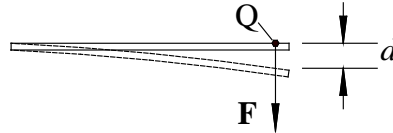


Abb. 5: Verformung des Biegebalkens im Kraftsensor bei Einwirkung einer Kraft F , die am Punkt Q angreift. Q wird durch F um die Strecke d ausgelenkt.

3.4 Elastischer Stoß auf einer Luftkissenbahn

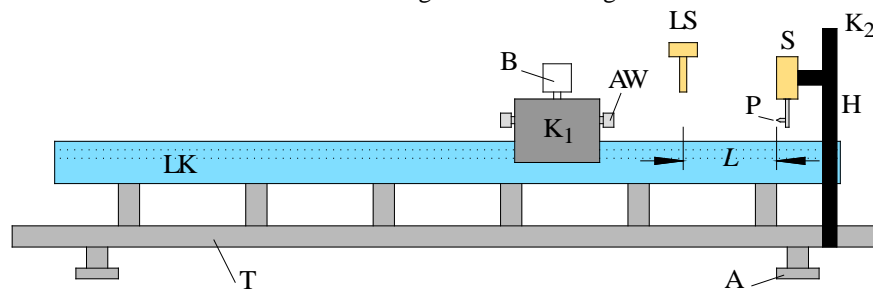
Auf einer Luftkissenbahn LK (Abb. 6), auf der sich ein aufgesetzter Schlitten nahezu reibungsfrei bewegen kann, soll der Zusammenhang *Kraftstoß = Impulsänderung* bei einem elastischen Stoß quantitativ untersucht werden. Da alle Bewegungen längs der Achse der Luftkissenbahn ablaufen, ist gem. Abb. 3 $\alpha = 0^\circ$ und es reicht eine Betrachtung der skalaren Größen Geschwindigkeit (v) und Impuls (p).

Der Schlitten K_1 mit der Masse m_1 wird mit der Hand auf die Geschwindigkeit v_1 beschleunigt. Er bewegt sich anschließend auf den Kraftsensor S zu, der über eine starre Halterung H mit dem massiven Stahlträger-Unterbau T von LK verbunden ist. Durch diesen Aufbau sind die in Kap. 2.3 definierten Bedingungen für den Stoßpartner K_2 (bestehend aus S , H und T), nämlich $m_2 \rightarrow \infty$ und damit $v_2' \rightarrow 0$, gewährleistet. Die während des Stoßes zwischen K_1 und K_2 wirkende Kraft $F(t)$ wird mit dem Kraftsensor S gemessen und mit Hilfe eines Speicheroszilloskops aufgezeichnet.

Auf dem Schlitten ist mittig eine Blende B der Breite d angebracht, die beim Durchlaufen einer Gabellichtschranke LS diese für die Dauer t_{LS} unterbricht. Durch Messung von d (Messschieber), t_{LS} (Speicheroszilloskop) und m_1 (Laborwaage) lassen sich somit die Geschwindigkeiten und Impulse von K_1 vor und nach dem Stoß bestimmen.

Hinweise zur Durchführung:

- Um eine präzise Messung von $F(t)$ zu ermöglichen, ist der Kraftsensor mit einer Spitze P versehen, die einen annähernd punktförmigen Kontakt mit einem am Schlitten montierten Aluminiumwürfel AW ermöglicht¹⁰. Vor Beginn der Messung muss der Sensor so ausgerichtet werden, dass der Würfel von der Spitze mittig getroffen wird.
- Um zu verhindern, dass der Schlitten nach dem Anstoßen auf der Bahn weiter beschleunigt oder gebremst wird, ist eine exakt waagerechte Ausrichtung der Bahn erforderlich. Diese lässt sich nicht über ihre gesamte Länge erreichen, wohl aber über eine Strecke von $L \approx (10 - 15)$ cm Länge zwischen LS und S , die für die Durchführung der Messung ausreichend ist. Die Ausrichtung der Bahn erfolgt *ausschließlich* über das Verstellen des drehbaren Fußes A am Stahlträger. Bei eingeschalteter Luftzufuhr muss A so justiert werden, dass der aufgesetzte Schlitten im Bereich L nicht beschleunigt wird.
- Der Schlitten K_1 darf nur so stark beschleunigt werden, dass $F(t)$ immer kleiner als 5 N bleibt, da andernfalls der Messbereich des Kraftsensors verlassen wird. Die Geschwindigkeit v_1 des Schlittens darf also nicht zu groß und damit t_{LS} nicht zu klein werden. $t_{LS} > 120$ ms ist ein guter Orientierungswert.



¹⁰ Der Schlitten muss beidseitig mit gleichen Al-Würfeln versehen werden, um eine symmetrische Massenverteilung zu gewährleisten.

Abb. 6: Anordnung zur Messung von Impuls und Kraftstoß beim elastischen Stoß auf einer Luftkissenbahn LK. K₁: Schlitten mit Blende B und zwei Al-Würfeln AW. S: Kraftsensor mit Spitze P an Halterung H. T: Stahlträger-Unterbau für LK mit Stellfuß A. L: Länge des Messbereiches. LS: Gabellichtschranke.

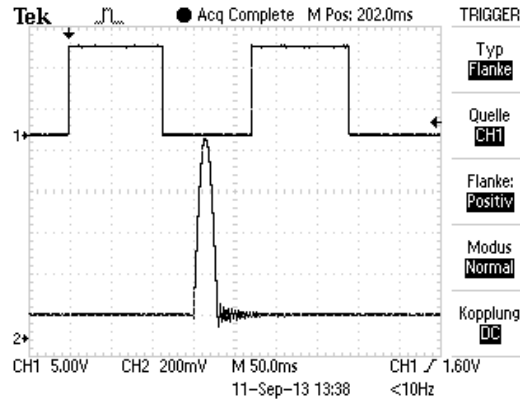


Abb. 7: Oszilloskopbild der Signale der Gabellichtschranke LS (CH1, oben) und des Kraftsensors S (CH2, unten).

Abb. 7 zeigt ein typisches Oszilloskopbild nach einem Stoßvorgang. An CH1, auf den getriggert wird, wurden die Signale U_{LS} der Gabellichtschranke beim Hin- und Rücklauf des Schlittens erfasst, an CH2 das Signal U_S des Kraftsensors. Ein Bildschirmfoto des Oszilloskopbildes wird dem Protokoll beigelegt. Zur Auswertung der Signale werden sie zunächst auf einer Compact-Flash-Karte oder einem USB-Stick (je nach Gerätetyp) gespeichert und anschließend in das ASCII-Format konvertiert. Einzelheiten dazu siehe Anhang (Kap. 4). Anschließend können diese Dateien in `Origin` importiert und dort weiter ausgewertet werden.

Die Impulsbreiten t_{LS} der Signale der Gabellichtschranke für den hin- und rücklaufenden Schlitten werden entweder mit Hilfe der Zeiteursor am Oszilloskops bestimmt oder in `Origin` mit Hilfe des Tools Datenkoordinaten (`Data Reader`) ermittelt. Die gesamte Impulsänderung des Schlittens während des Experimentes kann dann gem. Gl. (18) wie folgt berechnet werden:

$$(27) \quad |\Delta p| = |p_1| + |p_2| = m_1 d \left(\frac{1}{t_{LS}} + \frac{1}{t_{LS}} \right)$$

Für die Berechnung des Größtfehlers der Impulsänderung können m_1 und d als fehlerfrei angenommen werden.

Zur Messung des Kraftstoßes wird das Integral in Gl. (21) durch eine Summe ersetzt:

$$(28) \quad \Delta p = \sum_i F(t_i) \Delta t$$

Dabei sind $F(t_i)$ die diskreten Messwerte des Kraftsensors zu den Zeitpunkten t_i (*Abtastpunkte* des Oszilloskops), die sich mit Hilfe der Kalibrierfunktion aus den aufgezeichneten Spannungswerten $U_S(t_i)$ berechnen lassen. Die Summe über die $F(t_i)$ lässt sich mit dem `Origin`-Tool `Spaltenstatistik` einfach ermitteln¹¹. Δt ist der konstante Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Messwerten zu den Zeiten t_i und t_{i+1} , der sich aus der eingestellten Zeitablenkung am Oszilloskop (x SEC/DIV) und der Zahl der aufgezeichneten Messwerte (2.500) ergibt:

$$(29) \quad \Delta t = 10 \text{ DIV} \times (x \text{ SEC/DIV}) / 2500$$

Es ist schwierig, Beginn und Ende des Kraftstoßes und damit seine Dauer τ exakt zu bestimmen. Deshalb wird die Summe nach Gl. (28) nicht über τ , sondern über das gesamte aufgezeichnete Zeitintervall gebildet, d. h. über alle mit dem Oszilloskop aufgezeichneten 2.500 Messwerte. Dabei ist folgendes beachten:

¹¹ Rechter Mausklick bei entsprechend markierter Spalte ausführen, dann Menü `Spaltenstatistik` wählen und dort unter `Eigenschaften` Haken bei `Summe` setzen.

Außerhalb des Zeitintervalls τ sollte $F(t_i) = 0$ sein. Tatsächlich kann dort jedoch durch einen kleinen Offset im Kraftsignal und durch elektronisches Rauschen $F(t_i) \neq 0$ sein und somit bei Summation über viele t_i einen erheblichen Fehler verursachen. Deshalb wird zunächst der Mittelwert F_0 des Kraftsignals über das Zeitintervall gebildet werden, das *sicher* vor Beginn des Stoßes liegt¹². Anschließend wird dieser Wert F_0 von allen Messwerten $F(t_i)$ subtrahiert und erst danach die Summe nach Gl. (28) gebildet.

Um die Berechnung des Größtfehlers des Kraftstoßes nicht zu aufwändig zu machen, kann für jeden einzelnen Kraftwert $F(t_i)$ ein Größtfehler von 5 mN angenommen und der Größtfehler von Δt vernachlässigt werden.

Abschließend wird überprüft, ob die Impulsänderung nach Gl. (27) dem Kraftstoß nach Gl. (28) entspricht. Die Ursachen möglicher Abweichungen beider Größen werden diskutiert.

4 Anhang

Zur Speicherung von Daten des Oszilloskops auf USB-Stick oder Compact-Flash-Karte und anschließende Konvertierung in ASCII-Daten sind folgende Schritte erforderlich:

Am Oszilloskop werden zu Beginn einmalig folgende Tasten gedrückt:

Grundeinstellungen:

| | | |
|--------------------|-------------------|---------------------------------|
| SAVE/RECALL | → Aktion | → Alle speichern |
| Taste DRUCKEN | → Speichert alles | |
| Verzeichnis wählen | → GPRnn auswählen | → Verzeichnis wechseln → Zurück |

Speichern:

SAVE / PRINT

Nach Betätigung der SAVE / PRINT-Taste werden vier Dateien im Unterverzeichnis ALLnnnn gespeichert, wobei nnnn eine fortlaufende Nummer ist (beginnend bei 0000), die bei jeder Betätigung der Taste SAVE / PRINT um 1 erhöht wird. Die vier Dateien sind:

| | |
|--------------|--|
| FnnnnTEK.SET | ASCII-Datei mit Betriebsparametern des Oszilloskops |
| FnnnnTEK.TIF | Bilddatei mit Bildschirmfoto |
| FnnnnCH1.CSV | Daten von CH1 (u.a. Spannung U_1 als Funktion der Zeit t) |
| FnnnnCH2.CSV | Daten von CH2 (u.a. Spannung U_2 als Funktion der Zeit t) |

Für die quantitative Auswertung sind nur die beiden letzten Dateien von Bedeutung, die im CSV-Format vorliegen.¹³ Mithilfe des zur Verfügung gestellten Matlab-Skriptes¹⁴ `GPRTools.m` (auf Laufwerk Q:), dort Option `Tektronix CSV to ASCII`, werden aus diesen Dateien die Signalverläufe $U_1(t)$ für CH1 und $U_2(t)$ für CH2 extrahiert, in das ASCII-Format umgewandelt¹⁵ und anschließend im Verzeichnis ALLnnnn unter folgenden Namen gespeichert:

| | |
|------------------|--|
| FnnnnCH1_all.txt | Spalte 1: t , Spalte 2: $U_1(t)$ für CH1 |
| FnnnnCH2_all.txt | Spalte 1: t , Spalte 2: $U_2(t)$ für CH2 |

Diese Daten können über `Datei → Import → ...` in Origin importiert werden.

¹² Zellen in der Spalte mit den Werten für $F(t_i)$ markieren, für die t_i vor dem Beginn des Stoßes liegt. Dann → `Spaltenstatistik wählen`, und dort unter `Eigenschaften` Haken bei `Mittelwert` setzen.

¹³ CSV ist die Abkürzung für *character separated values*. Dies bedeutet, dass einzelne Einträge in der Datei (Zahlenwerte, Zeichenketten,...) durch ein definiertes Zeichen (englisch: *character*) voneinander getrennt sind. Hier ist das Komma das Trennzeichen.

¹⁴ Die entsprechenden Matlab-Skripte stehen nach dem Anmelden an einem PC im Grundpraktikum im Arbeitsverzeichnis (Q:) zur Verfügung unter Q: `MatlabSkripte$ (\gpr00.gpr.physik.uni-oldenburg.de)`.

¹⁵ Neuere Origin Versionen können CSV-Formate auch direkt einlesen.