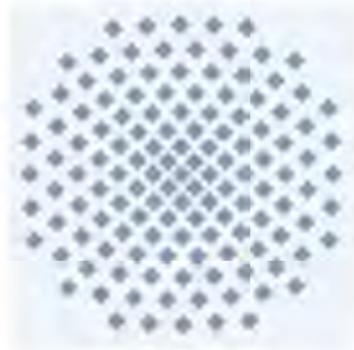


KONZEPTION EINER SCHÜLEREXPERIMENTIERREIHE ZUR ANALOGIE VON IMPULS UND DREHIMPULS

*Wissenschaftliche Arbeit im Rahmen des ersten Staatsexamens
für das Lehramt am Gymnasium nach der WPO vom 13. März 2001*

vorgelegt von

Tesmar Hendrich
Februar/März 2010



Universität Stuttgart
Lehrstuhl Prof. Dr. Tilman Pfau
5. Physikalisches Institut

*„Man soll denken lehren,
nicht Gedachtes.“*

Cornelius Gurlitt (1850-1938)

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Ausdruck belegt.

INHALTSVERZEICHNIS

A. Einleitung.....	1
B. Theorie.....	2
I. Beschleunigte Bezugssysteme.....	2
II. Starre Körper.....	3
1. Bewegung starrer Körper.....	3
2. Kräftegleichgewicht.....	4
3. Drehmoment und Drehimpuls.....	4
4. Die kinetische Energie.....	4
5. Der Trägheitstensor.....	5
6. Trägheitstensor und Drehimpuls.....	6
7. Steinersche Satz.....	7
8. Präzession und Nutation.....	7
C. Versuchshintergrund.....	8
I. Planung der Schülerexperimentierreihe.....	8
1. Versuchstags-Vorbereitung.....	8
a. Vorbereitung an der Schule.....	8
b. Vorbereitung des Laborbuchs.....	9
2. Eingangsvortrag.....	9
3. Versuchsdurchführung.....	9
a. Der Puzzle-Plan.....	9
b. Der Winkel.....	10
c. Die Winkelgeschwindigkeit.....	10
d. Das Trägheitsmoment.....	11
e. Trägheitsmoment und Rotationsenergie.....	11
f. Der Drehimpuls.....	11
g. Die Drehimpulserhaltung.....	11
h. Das Drehmoment.....	12
i. Anwendungen und Spielereien.....	12
4. Evaluation und Nachbereitung.....	12
II. Die Bildungsstandards der Physik.....	13
1. Bezug zum Bildungsplan.....	13
a. Leitgedanken zum Kompetenzerwerb.....	13

b. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik (Punkt 4).....	14
c. Grundlegende physikalische Größen (Punkt 8).....	14
d. Strukturen und Analogien (Punkt 9).....	14
2. Die Experimentierreihe als Gratwanderung.....	14
III. Lernziele des Versuchstages.....	15
IV. Didaktische Reduktion.....	16
D. Die Experimentierreihe in der Praxis.....	17
I. Versuchstagsvorbereitung.....	17
II. Eingangsvortrag.....	18
III. Die Durchführung der Experimentierreihe.....	20
1. Gruppe 1.....	20
2. Gruppe 2.....	22
IV. Evaluation.....	25
E. Resümee.....	29
F. Anhänge.....	31
Bildverzeichnis.....	134
Literaturverzeichnis.....	134
Danksagungen.....	135

A. EINLEITUNG

Laut dem Bildungsplan 2004 sollen die Schülerinnen und Schüler (*fortan SuS*) „in die Lage versetzt werden, erworbenes physikalisches Wissen anwenden zu können“. Der Physikunterricht soll daher nicht nur das „Denk- und Vorstellungsvermögen der SuS“ fördern, sondern auch „[...] Grundlagen im Experimentieren vermitteln“. Dies auch aus dem Grund, weil „handlungsorientiertes und entdeckendes Lernen und Arbeiten in Teams – auch im Physikpraktikum – tragende Säulen des Physikunterrichts“ sind.

Das 5. Physikalische Institut der Universität Stuttgart möchte in diesem Punkt die Schulen und Physiklehrer/-innen in Form eines Schülerlabors unterstützen, in dem regelmäßige Praktika für verschiedene Bereiche der Physik angeboten werden sollen. Ein wichtiges Ziel ist hierbei in den SuS nicht nur die Freude am Experimentieren, sondern auch eine gewisse physikalische Neugier selbst an alltäglichen Phänomenen zu wecken.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einer Experimentierreihe, die „Die Analogie von Impuls und Drehimpuls“ (*fortan DAVID*) bzw. die Analogie der Themengebiete des Impulses und des Drehimpulses behandelt. Letzteres, das Themengebiet des Drehimpulses, stellt in der Schulphysik einen Sonderfall dar. Obwohl die Analogie an sich – sprich das Übertragen von Theorien und Modellen von einem Themengebiet auf ein anderes – ein wichtiges Werkzeug der Physik darstellt und der Drehimpuls ein nicht unwichtiger Bestandteil des alltäglichen Lebens ist, wurde er erst seit der Bildungsreform 2004 in den Bildungsplan aufgenommen – wenn auch nur als qualitative Erhaltungsgröße. Die Impuls-Drehimpuls-Analogie stellt somit im gewissen Sinne eher ein Neuland in der Schulphysik dar. Das hatte zur Folge, dass für die DAVID-Versuchsreihe ein didaktisches Konzept ausgearbeitet werden musste, das keine andere Konzepte als Grundlage oder als Vergleichsmöglichkeit nehmen konnte und sich daher erst beweisen muss. Dies ist aus dem Grund so deutlich hervorzuheben, weil sich diese Arbeit nur mit der Auswertung zweier SuS-Vierergruppen der zehnten Klasse beschäftigt, die nacheinander und mit unterschiedlich aufgebauten Laborbüchern den Prototyp der Experimentierreihe durchliefen. Näheres hierzu in Kapitel D. SuS der Kursstufe haben an dem DAVID-Versuchstag bisher noch nicht teilgenommen. Die Ausarbeitung der DAVID-Versuchsreihe ist mit dieser Arbeit daher noch lange nicht abgeschlossen.

Diese Arbeit gliedert sich in die Kapitel A bis F.

Nach dieser Einleitung folgt in Kapitel B der der DAVID-Experimentierreihe zugrunde liegende physikalische Hintergrund. Zu betonen ist hierbei zum einen, dass damit der Theorieteil des Lehrerbegleitheftes im Anhang ergänzt wird, und zum anderen, dass die Einsteinsche Summenkonvention ohne nähere Benennung verwendet wurde.

In Kapitel C wird näher auf den Versuchshintergrund eingegangen, d.h. auf die Planung der Experimentierreihe, die Bildungsstandards der Physik, die Lernziele und vorgenommene didaktische Reduktionen.

Kapitel D ist eine Auswertung der beiden Versuchstage und in Kapitel E wird schließlich ein Resümee gezogen.

Auf die Konstruktion der einzelnen Versuchsaufbauten, sprich Konstruktionszeichnungen, Fertigung durch universitäts-interne oder -externe Werkstätten etc., wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Im Anhang (Kapitel F) befinden sich Laborbücher, das Lehrerbegleitheft, Evaluationsbögen und Nachbereitungsbögen. Näheres hierzu auf Seite 31.

B. THEORIE

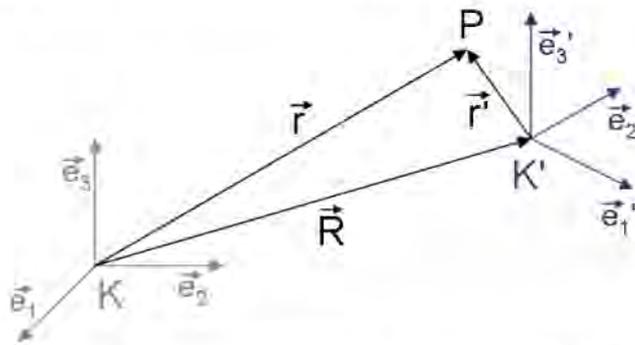
Dieses Kapitel dient der Ergänzung bzw. Erweiterung des Theorieteils im Lehrerbegleitheft (siehe Anhang) um Betrachtungen der Theoretischen Physik. Im Folgenden werden die Themengebiete des beschleunigten Bezugssystems und des starren Körpers näher betrachtet.

Die Einsteinsche Summenkonvention wird hierbei ohne nähere Benennung verwendet.

I. Beschleunigte Bezugssysteme

Betrachtet wird das Inertialsystem K (raumfestes Koordinatensystem) und das dazu beschleunigte Bezugssystem K' (Körperfestes Koordinatensystem) mit dem Koordinatenursprüngen 0 und 0' und den entsprechenden Basisvektoren \vec{e}_i bzw. \vec{e}'_i .

Anmerkung: Alle nachfolgenden Größen, die auf K' bezogen sind, werden mit „'“ gekennzeichnet.



Die Bewegung des beschleunigten Bezugssystems K' setzt sich dabei aus einer reinen Translation – beschrieben durch Bewegungen des Koordinatenursprungs 0' – und einer Rotation – beschrieben durch die Rotation des Systems K' mit der Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ um 0' – zusammen. Folglich rotieren die fest mit dem beschleunigten Bezugssystem verbundenen Basisvektoren \mathbf{e}'_i ebenfalls mit der Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ um den Koordinatenursprung 0'.

Die Bewegungsgleichung im beschleunigten Bezugssystem wird wie folgt hergeleitet:

1. Die Geschwindigkeit der Basisvektoren \mathbf{e}'_i ist gegeben durch: $\frac{d}{dt}\mathbf{e}'_i(t) = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{e}'_i(t)$

2. Für den Ortsvektor des Massenpunktes P gilt:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{R} + \mathbf{r}'(t)$$

$$\text{bzw.:} \quad \sum_{i=1}^3 x_i(t) \cdot \mathbf{e}_i = \mathbf{R}(t) + \sum_{i=1}^3 x'_i(t) \cdot \mathbf{e}'_i(t)$$

3. Ableiten und die Verwendung von Nr. 1 ergibt:

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i(t) \cdot \mathbf{e}_i = \dot{\mathbf{R}}(t) + \sum_{i=1}^3 \dot{x}'_i(t) \cdot \mathbf{e}'_i(t) + \boldsymbol{\omega} \times \sum_{i=1}^3 x'_i \cdot \mathbf{e}'_i(t)$$

$$\text{bzw. in vektorieller Form:} \quad \mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{v}'(t) + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'(t)$$

Hierbei ist:

- $\mathbf{v}(t)$ die im Inertialsystem K gemessene Geschwindigkeit
- $\dot{\mathbf{R}}(t)$ die Relativgeschwindigkeit der beiden Koordinatenursprünge
- $\mathbf{v}'(t)$ die im beschleunigten Bezugssystem K' gemessene Geschwindigkeit
- $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'(t)$ die im Inertialsystem K gemessene Geschwindigkeit eines starr mit dem beschleunigten System K' verbundenen Punktes

4. Die zweite Ableitung ergibt die im Inertialsystem K Beschleunigung \mathbf{a} mit:

$$\mathbf{a} = \ddot{\mathbf{R}} + \mathbf{a}' + \boldsymbol{\omega} \times [\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'] + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}' + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}'$$

5. Eingesetzt in die Bewegungsgleichung $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ des Inertialsystems K ergibt sich letztlich die Bewegungsgleichung im beschleunigten Bezugssystem K' mit:

$$m \cdot \mathbf{a}' = \mathbf{F} - m \cdot \ddot{\mathbf{R}} - m \cdot \boldsymbol{\omega} \times [\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'] - 2 \cdot m \cdot \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}' - m \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}' \quad (\text{I.1.})$$

Diese Kräftegleichung ist auf das beschleunigte Bezugssystem K' bezogen. Durch Transformation auf das Inertialsystem würden die in der Gleichung auftauchenden Kräfte beseitigt werden, sprich sie erscheinen nur im Bezugssystem K' existent zu sein. Diese Kräfte werden **Trägheitskräfte** genannt, die nicht von anderen Körpern verursacht werden und somit nicht das dritte Newtonsche Axiom erfüllen. In der Bewegungsgleichung tauchen gleich vier Trägheitskräfte auf.

- $-m \cdot \ddot{\mathbf{R}}$ betrifft die Beschleunigung hinsichtlich des Koordinatenursprungs, d.h. das ist die Trägheitskraft die ein Fahrzeuginsasse beim Abbremsen (negativen Beschleunigen) bzw. Beschleunigen eines Fahrzeugs wahrnimmt.
- $-m \cdot \boldsymbol{\omega} \times [\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}']$ ist die Kraft die ein Insasse bei Karussellfahrten, Kurvenfahrten etc. wahrnimmt, d.h. es handelt sich hier um die **Zentrifugalkraft** bzw. **Fliehkraft**.
- $-2 \cdot m \cdot \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}'$ ist die Kraft, die senkrecht auf der Winkelgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit \mathbf{v}' steht. Dies ist die sogenannte **Corioliskraft**, die man beispielsweise spürt, wenn man auf einer rotierenden Scheibe nach außen läuft.
- $-m \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}'$ ist eine Trägheitskraft, die nur bei ungleichförmigen Rotationen auftritt

Anmerkung: Die Trägheitskräfte werden auch gerne als Scheinkräfte bezeichnet, da sie bezugssystemabhängig sind und nicht das dritte Newtonsche Axiom erfüllen. Diese Betrachtungsweise steht fachdidaktisch in heftiger Kritik. Eine der Schule nähere Betrachtungsweise ist im Theorieteil des Lehrerbegleitheftes zu finden.

II. Starre Körper

1. Bewegung starrer Körper

Ein starrer Körper ist ein Modellsystem von Massenpunkten m_i mit konstant bleibenden Abständen $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ – d.h. es ist ein idealisiertes Gebilde, dessen Gestalt und Ausdehnung sich nicht ändert – und besitzt sechs Freiheitsgrade der Bewegung: die drei Koordinaten seines Schwerpunktes und die drei Winkel, die die Orientierung relativ zu den Achsen eines Inertialsystems angeben.

Die Bewegung eines starren Körpers – sprich die Lageänderung des Körpers relativ zu anderen Körpern oder zu einem Bezugssystem, das als ruhend angesehen wird – kann auf drei verschiedene Arten geschehen:

1. Durch die **Translation** werden alle Massenpunkte des Körpers um denselben Vektor \mathbf{R} verschoben, wobei der Ortsvektor \mathbf{r}_i in den Vektor $\mathbf{r}_i' = \mathbf{r}_i + \mathbf{s}$ übergeht.
2. Durch die **Rotation um eine Gerade g** bewegen sich alle nicht auf der Geraden g liegenden Massenpunkte auf Kreisbögen, deren Mittelpunkt auf g liegen. Die Gerade g wird Rotationsachse genannt.
3. Durch die **Rotation um einen Punkt P** bewegen sich alle anderen Punkte des Körpers auf konzentrischen Kugelflächen um das Rotationszentrum P. Es kann gezeigt werden, dass eine Rotation um einen Punkt stets auf eine Rotation um eine durch diesen Punkt verlaufende Achse zurückgeführt werden kann.

Somit lässt sich die Bewegung eines starren Körpers aus **einer** Translation und **einer** Drehung um den beliebig wählbaren Koordinatenursprung O' darstellen (**Theorem von Chasles**).

2. Kräftegleichgewicht

Ein Körper befindet sich im Kräftegleichgewicht, wenn sich sein Bewegungszustand nicht ändert, d.h. wenn er seine Geschwindigkeit (Translation) und Winkelgeschwindigkeit (Rotation) in Betrag und Richtung beibehält.

Bei der Translation ist dies schon gegeben, wenn für die Resultierende aller am i-ten Massenpunkt angreifenden Kräfte \mathbf{F}_i gilt:

$$\sum_i \mathbf{F}_i = 0 \quad (\text{II.2.1})$$

Bei der Rotation ist das Kräftegleichgewicht hingegen nur dann gegeben, wenn für die Resultierende aller am i-ten Massenpunkt angreifenden Kräfte \mathbf{F}_i mit den zugehörigen Hebelarmen \mathbf{r}_i gilt:

$$\sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i = 0 \quad (\text{II.2.2})$$

3. Drehmoment und Drehimpuls

Das Drehmoment ist definiert als $\mathbf{M} = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i$. (II.3.1)

Ist $\mathbf{M} \neq 0$ so ändert sich der Bewegungszustand des starren Körpers in seinem Rotationsverhalten in Form einer Winkelgeschwindigkeitsänderung.

In Analogie zur Impulsänderung durch eine Kraft, verursacht ein Drehmoment \mathbf{M} somit eine Drehimpulsänderung und es gilt:

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{M} \quad (\text{II.3.2})$$

Mit $\mathbf{F}_i = \dot{\mathbf{p}}$ folgt für den Drehimpuls:

$$\dot{\mathbf{L}} = \sum_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{p}} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{\mathbf{L} = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i = \sum_i m_i (\mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{r}}_i) = \sum_i m_i (\mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i)} \quad (\text{II.3.3})$$

4. Die kinetische Energie

Wie oben festgestellt kann nach dem Theorem von Chasles jede Bewegung aus einer Translation und einer Drehung dargestellt werden.

Für die im Inertialsystem K gemessene Geschwindigkeit \mathbf{v}_i des i-ten Massenteilchens ergibt sich mit der ebenfalls im Inertialsystem K gemessenen Geschwindigkeit des Koordinatenursprungs \mathbf{v}_0 und der im Inertialsystem K gemessenen Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ somit:

$$\boxed{\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i'} \quad (\text{II.4.1})$$

Für die Berechnung der kinetischen Energie E_{kin} folgt:

$$\begin{aligned} E_{\text{kin}} &= \sum_i \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot \mathbf{v}_i^2 = \sum_i \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (\mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i')^2 \\ &= \sum_i \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot \mathbf{v}_0^2 + \sum_i m_i \cdot \mathbf{v}_0 \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i') + \sum_i \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i')^2 \\ &= \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \sum_i m_i \cdot \mathbf{v}_0^2}_{E_{\text{trans}}} + \underbrace{(\mathbf{v}_0 \cdot \boldsymbol{\omega}) \sum_i m_i \cdot \mathbf{r}_i'}_{E_M} + \underbrace{\sum_i \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i')^2}_{E_{\text{rot}}} \end{aligned} \quad (\text{II.4.2})$$

Während der erste bzw. letzte Summand als Translationsenergie bzw. Rotationsenergie identifiziert werden können, stellt der mittlere Summand E_M einen Art Mischterm aus Translations- und Rotationsenergie dar. Dessen Existenz ist jedoch je nach Fall von der Wahl des körperfesten Koordinatenursprungs O' abhängig. Als Fälle kommen nur zwei in Betracht:

1. Fall: Der starre Körper ist frei, d.h. in keinem Punkt fixiert. Legt man nun den körperfesten Koordinatenursprung O' in den Schwerpunkt, so gilt

$$\sum_i m_i \cdot \mathbf{r}'_i = 0$$

Der Mischenergieterm E_M wird somit Null, d.h. die kinetische Energie besteht zum einen aus der Translationsenergie der Schwerpunktes und der Drehung um den Schwerpunkt.

2. Fall: Der starre Körper ist in mindestens einem Massenpunkt fixiert, d.h. es ist keine Translation möglich und es ist $\mathbf{v}_{O'} = 0$. Legt man nun den körperfesten Koordinatenursprung O' in einen dieser Fixpunkte, so ist die kinetische Energie die Rotationsenergie der Drehung um den festen Punkt.

5. Der Trägheitstensor

Wir betrachten nun den Fall, in dem die Bewegung eines Körper lediglich aus einer Drehung besteht, d.h. die kinetische Energie besteht nur aus der Rotationsenergie:

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{rot}} = \sum_i \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i)^2$$

Nach der Lagrange-Identität ist

$$(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i)^2 = \omega_k \cdot \omega_k \cdot r'_{i1} \cdot r'_{i1} - \omega_k \cdot r'_{ik} \cdot \omega_l \cdot r'_{il}$$

und mit dem Kroneckerdelta δ_{kl} ergibt sich für die kinetische Energie:

$$E_{\text{rot}} = \sum_i \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot \omega_k \cdot \omega_l [r'_{im} \cdot r'_{im} \cdot \delta_{kl} - r'_{ik} \cdot r'_{il}]$$

Der **Trägheitstensor** I'_{kl} wird so definiert, dass sich die Rotationsenergie vereinfacht zu

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot I'_{kl} \cdot \omega_k \cdot \omega_l \quad (\text{II.5.1.})$$

Somit ergibt sich für den Trägheitstensor

$$I'_{kl} = \sum_i m_i \cdot [r'_{im} \cdot r'_{im} \cdot \delta_{kl} - r'_{ik} \cdot r'_{il}] = \sum_i m_i \cdot \begin{pmatrix} x_{i2}^2 + x_{i3}^2 & -x_{i1} \cdot x_{i2} & -x_{i1} \cdot x_{i3} \\ -x_{i2} \cdot x_{i1} & x_{i1}^2 + x_{i3}^2 & -x_{i2} \cdot x_{i3} \\ -x_{i3} \cdot x_{i1} & -x_{i3} \cdot x_{i2} & x_{i1}^2 + x_{i2}^2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.5.2.})$$

Bei Betrachtung des starren Körpers nicht aufgebaut aus Massenpunkten, sondern bestehend aus einer Massendichte ρ ist der Trägheitstensor gegeben mit

$$I'_{kl} = \int \rho \cdot [r'_{m} \cdot r'_{m} \cdot \delta_{kl} - r'_{k} \cdot r'_{l}] dV \quad (\text{II.5.3.})$$

Da der Trägheitstensor symmetrisch ist, kann er stets diagonalisiert werden, was anschaulich der Einführung eines neuen, gedrehten Koordinatensystems entspricht. Die Diagonalelemente $I_{ii} := I_i$ werden **Hauptträgheitsmomente** genannt, da die neuen Achsen des gedrehten Koordinatensystems den Hauptträgheitsachsen entsprechen.

Für die Hauptträgheitsachsen ergibt sich somit die Rotationsenergie mit:

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot (I'_1 \cdot \omega_1^2 + I'_2 \cdot \omega_2^2 + I'_3 \cdot \omega_3^2) \quad (\text{II.5.4.})$$

Ein starrer Körper wird je nachdem, ob er drei verschiedene oder zwei identische oder aber identische Hauptträgheitsmomente hat, unsymmetrisch, symmetrisch oder Kugelkreisel genannt.

6. Trägheitstensor und Drehimpuls

Der Gesamtdrehimpuls eines starren Körpers ist nach (II.3.3.) gegeben durch

$$\mathbf{L}_{\text{ges}} = \sum_i m_i (\mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i)$$

mit der Geschwindigkeit \mathbf{v}_i und Ortsvektor \mathbf{r}_i im Intertialsystem.

Einsetzen der Gleichungen:

$$1. \quad \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{0'} + \mathbf{r}'_i$$

$$2. \quad \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{0'} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i \quad (\text{II.4.1.})$$

ergibt:

$$\mathbf{L}_{\text{ges}} = m \cdot \mathbf{r}_{0'} \times \mathbf{v}_{0'} + \mathbf{r}_{0'} \times \left(\boldsymbol{\omega} \times \sum_i m_i \cdot \mathbf{r}'_i \right) + \left(\sum_i m_i \cdot \mathbf{r}'_i \right) \times \mathbf{v}_{0'} + \sum_i m_i \cdot \mathbf{r}'_i \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i) \quad (\text{II.6.1.})$$

Zur Interpretation werden wieder dieselben schon unter II.4. untersuchten Fälle angewendet:

1. Fall: Der starre Körper ist frei, d.h. in keinem Punkt fixiert. Legt man nun den körperfesten Koordinatenursprung $0'$ in den Schwerpunkt, so gilt

- $\mathbf{r}_{0'} = \mathbf{r}_s$
- $\mathbf{v}_{0'} = \mathbf{v}_s$
- $\sum_i m_i \cdot \mathbf{r}'_i = 0$

und für den Gesamtdrehimpuls folgt:

$$\mathbf{L}_{\text{ges}} = \underbrace{m \cdot \mathbf{r}_s \times \mathbf{v}_s}_{\text{Bahndrehimpuls}} + \underbrace{\sum_i m_i \cdot \mathbf{r}'_i \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i)}_{\text{Eigendrehimpuls}} =: m \cdot \mathbf{r}_s \times \mathbf{v}_s + \mathbf{L} \quad (\text{II.6.2.})$$

Der Gesamtdrehimpuls setzt sich als zusammen aus dem Bahndrehimpuls und dem Eigendrehimpuls.

2. Fall: Der starre Körper ist in mindestens einem Massenpunkt fixiert, d.h. es ist keine Translation möglich. Legt man nun den inertialen Koordinatenursprung 0 **und** den körperfesten Koordinatenursprung $0'$ in einen dieser Fixpunkte, erhält man wegen $\mathbf{v}_{0'} = \mathbf{r}_{0'} = 0$:

$$\mathbf{L}_{\text{ges}} = \sum_i m_i \cdot \mathbf{r}'_i \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_i) =: \mathbf{L} \quad (\text{II.6.3.})$$

Der Gesamtdrehimpuls entspricht dem Eigendrehimpuls, wenn der starre Körper in mindestens einem Punkt fixiert und die Koordinatenursprünge der 0 und $0'$ in diesem Punkt liegen.

Mit Hilfe der Graßmann-Identität, der Formel (II.5.2) ergibt sich für den Eigendrehimpuls:

$$\mathbf{L}_k = \sum_{k=1}^3 I'_{k1} \cdot \omega_k \quad \text{mit } k=1,2,3 \quad (\text{II.6.4.})$$

Bei Verwendung der Hauptträgheitsachsen als körperfeste Koordinatenachsen lauten die körperfesten Komponenten des Eigendrehimpulses:

$$L_1 = I'_1 \cdot \omega_1 \quad L_2 = I'_2 \cdot \omega_2 \quad L_3 = I'_3 \cdot \omega_3 \quad (\text{II.6.5.})$$

Folglich sind Eigendrehimpuls und Winkelgeschwindigkeit eines starren Körpers nur dann parallel, wenn eine Hauptträgheitsachse Drehachse ist oder bei Kugelkreiseln.

7. Steinersche Satz

Der Tensor $I^{(S)}$ sei der Trägheitstensor eines starren Körpers und beziehe sich dabei auf das körperfeste Koordinatensystem mit dem Ursprung gleich dem Schwerpunkt.

Nimmt man nun eine Koordinatentransformation dergestalt vor, dass das ortsfeste Koordinatensystem K' um einen Vektor \mathbf{a} verschoben wird, d.h. dass das neue Koordinatensystem K'' zu K' parallel Achsen besitzt, so ändert sich auch der Trägheitstensor.

Für die Ortsvektoren der Massenpunkte gilt ferner:

$$\mathbf{r}'' = \mathbf{r}' + \mathbf{a} \quad (\text{II.7.1.})$$

Für den Trägheitstensor des Koordinatensystems K'' gilt dann nach (II.5.3.):

$$\begin{aligned} I''_{kl} &= \int \rho \cdot [r''_m \cdot r''_m \cdot \delta_{kl} - r''_k \cdot r''_l] dV \\ &= \int \rho [(r'_m + a_m) \cdot (r'_m + a_m) \cdot \delta_{kl} - (r'_k + a_k) \cdot (r'_l + a_l)] dV \\ &= \underbrace{\int \rho [r'_m \cdot r'_m \cdot \delta_{kl} - r'_k \cdot r'_l] dV}_{= I^{(S)}} + \int \rho [a_m \cdot a_m \cdot \delta_{kl} - a_k \cdot a_l] dV \\ &\quad + \int \rho [2 r'_m \cdot a_m \cdot \delta_{kl} - a_k \cdot r'_l - r'_k \cdot a_l] dV \end{aligned}$$

Wegen $\int \rho r'_m dV = 0$ ist das letzte Integral gleich Null, d.h. es gilt:

$$I''_{kl} = I^{(S)} + \int \rho [a_m \cdot a_m \cdot \delta_{kl} - a_k \cdot a_l] dV \quad (\text{II.7.2.})$$

Bei Verwendung der Modellvorstellung von Massenpunkten lässt sich aus (II.5.2.) ergibt sich analog zu obigen Weg:

$$I''_{kl} = I^{(S)} + m (a_m \cdot a_m \cdot \delta_{kl} - a_k \cdot a_l) \quad (\text{II.7.3.})$$

Diese beiden Formeln stellen die allgemeinste Form des *Steinerschen Satzes* dar.

In Lehrbüchern für Trägheitsmomente wird der Steinersche Satz häufig angegeben mit

$$I = I_S + m \cdot a^2 \quad (\text{II.7.4.})$$

Dies ist der Spezialfall, dass die Drehachse parallel zu einer der Hauptträgheitsachsen durch den Schwerpunkt liegt. Beispielsweise folgt nach (II.7.3.) für die erste Hauptträgheitsachse und mit $a_1^2 = 0$:

$$\begin{aligned} I''_{11} &= I^{(S)} + m (a_m \cdot a_m \cdot \delta_{11} - a_1 \cdot a_1) = I^{(S)} + m (a_2^2 + a_3^2) \\ &= I^{(S)} + m (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) = I^{(S)} + m \cdot \vec{a}^2 = I^{(S)} + m \cdot a^2 \end{aligned}$$

8. Präzession und Nutation

In dieser Versuchsreihe ist die Drehachse immer eine „festgehaltene“ Achse. Da Präzession und Nutation daher nicht möglich sind, verzichte ich hier auf eine nähere Ausführung dieser beiden Drehbewegungsformen.

C. VERSUCHSHINTERGRUND

I. Planung der Schülerexperimentierreihe

Die Planung der Schülerexperimentierreihe zur Analogie der Themengebiete des Impulses und des Drehimpulses beinhaltet zum einen die experimentelle und die fachliche Seite. Zum anderen wurde aber auch auf eine didaktisch sinnvolle Reihenfolge der Experimente Wert gelegt. Dies beinhaltet ebenfalls die Absicht die wesentlichen Ziele des Bildungsplans zu berücksichtigen und die Experimentierreihe in einen didaktisch modernen Kontext einzubetten. In anderen Worten ist das Hauptziel dieser Versuchsreihe Schulen – d.h. sowohl SuS als auch Lehrkräften – eine Möglichkeit zu bieten, den schulischen Unterricht sinnvoll und nachhaltig zu erweitern.

Der Ablauf der Experimentierreihe gliedert sich in 4 Phasen:

1. Versuchstags-Vorbereitung
2. Eingangsvortrag
3. Versuchsdurchführung
4. Evaluation und Nachbereitung

1. Versuchstags-Vorbereitung

Ein wichtiges Ziel des Bildungsplanes ist, dass die SuS durch weite Arbeitsanweisungen, Selbständigkeit, Selbstverantwortung und Freiraum für Kreativität in ihrem Lernprozess unterstützt werden. Im Rahmen dieser Versuchsreihe besteht jedoch zum einen aufgrund des (für die Vielzahl der Versuche) engen Zeitrahmens, zum anderen aufgrund der meist neuen Fachbegriffe und des neuen Stoffgebiets die Gefahr, dass bei den SuS Frustration aufkommen könnte. Um dem gegenzusteuern ist eine gute Vorbereitung unumgänglich. Dies auch aus dem Grund, um für die SuS die Versuche im Vordergrund stehen zu lassen.

a. Vorbereitung an der Schule

Insbesondere für das Erkennen und Verstehen der Analogie ist ein fundiertes Verständnis und Wissen über das Themengebiet des Impulses notwendig. Dies beinhaltet:

- ✓ Die anschauliche Bedeutung des Impulses: „Schwung“ bzw. „Wucht“
- ✓ Die qualitative Abhängigkeit des Impulses von Masse und Geschwindigkeit.
- ✓ Die Definition des Impulses: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- ✓ Die Bedeutung der Verwendung von Vektoren (*nur Kursstufe*).
- ✓ Der Impuls in den Newtonsche Axiome.

Ferner spielen Energieerhaltung und Impulserhaltung für den Versuch und deren Anwendung eine wichtige Rolle. Im Unterricht sollte daher wiederholt werden:

- ✓ Impulserhaltung: $\vec{p}_{\text{vorher}} = \vec{p}_{\text{nachher}}$
- ✓ Impulsübertragung
(Dies beinhaltet auch das Wissen, weshalb es beim elastischen Stoß vorteilhaft ist, wenn die Stoßmassen gleich sind)
- ✓ Energieerhaltung
- ✓ Energiespeicher Pendel: Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie
(Dies beinhaltet auch die Berechnung der Geschwindigkeit der Pendelmasse im Nulldurchgang mit Hilfe des Auslenkwinkels)

Ebenfalls behandelt werden sollten:

- ✓ Winkel im Bogenmaß (Hilfsmaßeinheit Radiant)
- ✓ Bahngeschwindigkeit
- ✓ Trägheit, träge Masse (Begriffserklärung)
- ✓ Kraftbegriff im Allgemeinen
- ✓ Hebelgesetz und eventuell Kraftwandler
- ✓ Analoge Formeln
- ✓ Erkennen der Auswirkung der Änderung einer physikalischen Größe auf eine andere anhand der Formel
- ✓ Kreisbewegung

b. Vorbereitung des Laborbuchs

Das Laborbuch sollte im Vorfeld von den SuS vorbereitet worden sein. Dies beinhaltet sowohl das Durcharbeiten der Kapitel B und C des Laborbuchs als auch das Durchlesen und Vorbereiten der einzelnen Versuche. Von Vorteil könnte hier sein, dass die SuS schon Tabellen zum Eintragen und Auswerten der Versuchsergebnisse anlegen und auch schon versuchen soweit wie möglich Lösungen zu theoretischen Aufgaben zu finden.

Insbesondere für Klassen, für die das experimentelle Arbeiten eher Neuland ist, wäre es ferner sinnvoll, dies im Zuge einer Hausaufgabe geschehen zu lassen und zu dieser eine Ergebnissicherung vorzunehmen.

2. Eingangsvortrag

Am Versuchstag wird vor Versuchsbeginn ein etwa halbstündiger Eingangsvortrag von dem Versuchsbetreuer gehalten. Der Vortrag beinhaltet dabei folgende Punkte:

- ✓ Ziele des Versuchstages
- ✓ Abriss des Vorwissens
- ✓ Einführung der Winkelgeschwindigkeit
- ✓ Einführung der ebenen Polarkoordinaten (Radius-Winkel-Koordinaten)
- ✓ Begriffserklärung der trägen Masse und des Trägheitsmoments
- ✓ Vorstellung der Versuchsaufbauten
- ✓ Hilfshinweise für Messungen
- ✓ Geschichtliches zu Belagerungsgeräten

Der Vortrag soll primär dazu dienen für die Versuchsreihe wichtige Begriffe, Sachverhalte und Vorgehensweisen einzuführen, bisher erlerntes Wissen für die Durchführung der Versuche zu reaktivieren und den Schülern die Möglichkeit zu bieten nicht Verstandenes schon im Vorfeld erfragen zu können. Zu betonen ist, dass der Vortrag nicht der neuen Wissensvermittlung dient, sondern lediglich die Lernziele der Experimentierreihe unterstützen soll.

3. Versuchsdurchführung

Die Experimentierreihe ist in acht didaktisch auf sich aufbauende Themenbereiche gegliedert. Zu betonen ist, dass nachfolgende Ausführungen das *aktuelle* Laborbuch als Grundlage haben. Für jeden Themenbereich ist aus zwei Gründen eine Zeitvorgabe angegeben: erstens soll den SuS ein Zeitrahmen zur Orientierung vorgegeben werden und zweitens sollen sie an diesem selbständig abschätzen können, ob sie etwaige Zusatzaufgaben noch zeitlich angehen können.

a. Der Puzzle-Plan

Zur Unterstützung der Lernziele und als Ergebnissicherung dient der Puzzle-Plan. Verwendet

werden hierfür drei umfunktionierte *Heinevetter-Trainer*, die ansonsten als Mathematik-Lernhilfen für Grundschüler dienen.

Der Puzzle-Plan beinhaltet drei Spalten. Die Puzzleteile einer Spalte sind farblich codiert. Die SuS können anhand der Puzzleteile feststellen, ob ihre Lösung stimmt und haben somit eine Kontrollmöglichkeit.

Die erste Spalte (grün) dient der Impuls-Drehimpuls-Analogie, d.h. die SuS sollen hier die entsprechenden Analogien zuordnen.

Die zweite Spalte (gelb) ist eher allgemeiner Art. Hier werden Dinge wie Einheiten, Begriffe etc. abgefragt.

Die dritte Spalte (rot) ist eine reine Anwendungsaufgabe, bei der das Trägheitsmoment verschiedener Körper in Zusammenhang mit der Rotationsenergie gebracht wird (siehe unten e.)

b. Der Winkel

Für die Impuls-Drehimpuls-Analogie und für Drehbewegungen im Allgemeinen ist die Winkeländerung eine wichtige Grundgröße. Insbesondere betrifft dies auch die Angabe von Winkeln im Bogenmaß.

Ein Ziel dieses Themenbereichs ist, dass die SuS die Strecken-Winkel-Analogie erkennen. Die SuS haben hierbei die Möglichkeit zur Not den Hilfszettel 1 zu Rate zu ziehen, der Hinweise gibt.

Für diesen Versuchsteil sind lediglich 10 Minuten angesetzt.

Aufgrund dessen, dass im Eingangsvortrag auf die physikalische Größe eingegangen wird, sind die Lernvoraussetzungen im Grunde nur das Winkel-Vorwissen aus der Schule und die Präkonzepte der SuS.

c. Die Winkelgeschwindigkeit

Die Winkelgeschwindigkeit stellt ebenfalls eine wichtige Grundgröße dar. Im Eingangsvortrag wird der Unterschied zwischen Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit eingeführt bzw. reaktiviert. Dieser Themenbereich dient nicht nur dazu diesen Unterschied den SuS zu veranschaulichen und somit greifbar zu machen, sondern auch dazu die SuS dazu zu bringen sich mit diesem Unterschied auseinanderzusetzen und den wichtigen Zusammenhang der beiden Geschwindigkeiten über den Radius qualitativ und quantitativ zu erfassen.

Für die Impuls-Drehimpuls-Analogie existiert der Hilfszettel 2. Auf den Hilfszettel 3 können die SuS bei der Suche nach der Formel $\vec{v} = \vec{\omega} \cdot r$ zurückgreifen.

Diese Formel soll im Anschluss von den SuS bei der Herleitung der Rotationsenergie für eine punktförmige Masse aus der kinetischen Energie angewendet werden. Ferner soll durch diese Aufgabenstellung den SuS gleichzeitig vermittelt werden, dass die Rotationsenergie als kinetische Energie angesehen werden kann, in der lediglich die Bahngeschwindigkeit durch das Impuls-Drehimpuls- Analogon der Winkelgeschwindigkeit ersetzt wird. Dieser Punkt ist aus dem Grund wichtig, um im nächsten Themenbereich sowohl das Trägheitsmoment einführen als auch die „Masse-Trägheitsmoment-Analogie“ herausarbeiten zu können.

Ein eher nebensächlicher Aspekt ist die Einführung des ebenen Polarkoordinatensystems, d.h. die Vermittlung des Wissens um die Existenz dieses Koordinatensystems und dessen Vorteils bei Rotationsbewegungen.

Für diesen Versuchsteil sind 40 Minuten angesetzt. Dies nicht nur aus dem Grund, weil die SuS eine Vielzahl von Aufgabenstellungen zu bewältigen haben, sondern auch deshalb weil die Winkelgeschwindigkeit eine Grundgröße ist, auf die vieles – nicht zuletzt die didaktische Reihenfolge der Versuchsreihe – aufbaut. In anderen Worten ist hier ein tieferes Verständnis erforderlich, das durch die diversen Aufgabenstellungen vermittelt werden soll.

In einer zusätzlichen Aufgabenstellung können sich die SuS mit der Äquivalenz der Bahngeschwindigkeit in einer geradlinigen Bahn und einer Kreisbahn auseinandersetzen. Ferner

veranschaulicht dieser Versuchsteil die wesentlich höheren Reibungsverluste einer Kugel auf einer Kreisbahn im Vergleich zu einer geradlinigen Bahn.

Neben einem fundamentalen Wissen sowohl über das Umformen von Formeln als auch über die kinetische Energie und der Energieerhaltung, ist für diesen Versuchsteil der Zusammenhang von Bahngeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit und Radius aus dem vorigen Themenbereich eine wichtige Lernvoraussetzung. Der Eingangsvortrag soll den SuS das hierfür notwendige Wissen vermitteln bzw. reaktivieren.

d. Das Trägheitsmoment

Wie schon oben erwähnt, dient die Rotationsenergie der punktförmigen Masse als Zugpferd für die Einführung des Trägheitsmoments.

Aufbauend auf den Erkenntnissen des vorigen Versuchsabschnitts wird das Trägheitsmoment als Impuls-Drehimpuls-Analogon zur Masse eingeführt. Ein besonderes Anliegen dieses Versuchsteils ist den SuS nicht nur die Analogie zu verdeutlichen, sondern vor allem die für SuS alles andere als triviale Abhängigkeit des Trägheitsmoments von der Massenverteilung, d.h. die Abhängigkeit von Masse, Kreisbahnradius, Körperform und Lage der Drehachse. Dies beinhaltet ebenfalls die für SuS eher irritierend wirkende Einheit des Trägheitsmoments.

Aus diesem Grund ist für diesen Themenbereich eine Zeit von 40 Minuten angesetzt und es existiert der Hilfszettel 4.

Lernvoraussetzung sind die Erkenntnisse der vorigen Themenbereiche sowie die Anwendung des Energieerhaltungssatzes (zwecks Umrechnung potentieller Energie in kinetische Energie beim Stoßpendel) und die Anwendung fremder Formeln.

Eine große Hilfe für das Erkennen und Annehmen der Masse-Trägheitsmoment-Analogie ist das Wissen der Bedeutung um die träge Masse. Dieses wird daher im Eingangsvortrag nochmals reaktiviert.

e. Trägheitsmoment und Rotationsenergie

Dieser Themenbereich ist rein theoretisch und soll das erworbene Wissen über das Trägheitsmoment vertiefen bzw. festigen.

Die SuS haben die Aufgabe mit Hilfe der Trägheitsmoment-Tabelle (Anhang des Laborbuchs) im Puzzle-Plan die Rotationsenergien verschiedener Körper zu identifizieren und zuzuordnen.

Der Sinn der Aufgabenstellung ist zum einen durch Übung des Wissens über das Trägheitsmoment zu festigen, zum anderen soll den SuS klar gemacht werden, dass die Rotationsenergie aufgrund der Komplexität des Trägheitsmoments ebenfalls schwierig zu berechnen sein kann.

Um den SuS hierbei genug Zeit zu lassen, ist die Dauer mit 15 Minuten vorgegeben.

f. Der Drehimpuls

Auch dieser Themenbereich bzw. diese Aufgabenstellung ist nur rein theoretisch. Die SuS sollen hier lediglich ihr bisher erworbenes Analogie-Wissen anwenden, um die Formel für den Drehimpuls herzuleiten. Die Dauer ist auf 5 Minuten begrenzt, da hier aufgrund der vorangegangenen Aufgaben mit keinen großen Schwierigkeiten zu rechnen ist.

g. Die Drehimpulserhaltung

In diesem Versuchsteil sollen die SuS erst theoretisch anhand den bisher gesammelten Analogien und der gegebenen Formel der Impulserhaltung die Formel der Drehimpulserhaltung herleiten. Danach ist es die Aufgabe der SuS Drehstoß-Versuche zu finden, die dem elastischen bzw. inelastischen Stoß der Impulserhaltung entsprechen. Das Ziel ist den SuS die Analogie von Impulserhaltung und Drehimpulserhaltung näher zu bringen.

Mangels vorzunehmenden Messungen ist die Dauer dieses Themenbereichs auf 20 Minuten beschränkt.

Lernvoraussetzung sind das Wissen über die Impulserhaltung und die Erkenntnisse der vorigen Themenbereiche.

h. Das Drehmoment

Die SuS sollen erst in einem theoretischen Teil mit Hilfe ihres bisher neu gewonnenen Wissens über die Impuls-Drehimpuls-Analogie begründen, warum die Winkelrichtgröße der Schneckenfeder der Federkonstante der Spiralfeder entspricht. Anschließend soll die Bewegungsgleichung hergeleitet und Gedanken über das Hebelarmgesetz angestellt werden. Für letzteres existiert der Hilfszettel 5.

In anderen Worten soll das Analogie-Wissen eingesetzt werden.

In diesem Versuchsteil ist das Hebelgesetz eine wichtige Lernvoraussetzung. Ohne das Verständnis desselben läuft der Lerneffekt dieses Versuches aller Voraussicht nach ins Leere. Weitere Lernvoraussetzungen sind die Erkenntnisse der vorigen Themenbereiche.

i. Anwendungen und Spielereien

Dieser aus vier Versuchen bestehende Themenbereich soll nicht nur einen interessanten Abschluss der Experimentierreihe sein, sondern dient vor allem dazu die SuS ihr erworbenes Wissen über das Drehimpuls-Themengebiet anwenden zu lassen. Aus diesem Grund sollte ihnen auch Zeit zum Experimentieren und „Spielen“ gelassen werden.

4. Evaluation und Nachbereitung

Eine Evaluation am Ende des Versuchstags und eine erneute Evaluation einige Wochen später, soll den SuS und den Lehrkräften die Möglichkeit bieten die Experimentierreihe in verschiedener Hinsicht zu bewerten. Dies beinhaltet zum einen den gesamten Hintergrund des Versuchstags – d.h. das Vorbereitungsmaterial (Laborbuch, Lehrerbegleitheft), den Eingangsvortrag, den Betreuer, und die Experimentierreihe an sich – zum anderen soll gerade die Evaluation einige Wochen später Aufschluss darüber geben, inwieweit diese Versuchsreihe einen Lernfortschritt der SuS unterstützt hat.

Für den Zeitraum kurz nach dem Versuchstag erhält der Lehrer ferner Aufgaben-Vorschläge, die er in sein Unterricht z.B. in Form von Hausaufgaben einbinden kann.

II. Die Bildungsstandards der Physik

Der Drehimpuls inklusive Drehimpulserhaltung ist Stoff der Klasse 9/10 und der Kursstufe.

Da die Zielgruppe der Experimentierreihe die SuS sind und die DAVID-Versuchsreihe eine sinnvolle und nachhaltige Erweiterung des Schulphysikunterrichts sein soll, stellen die Bildungsstandards der Physik einen wichtigen Bezugspunkt dar.

1. Bezug zum Bildungsplan

a. Leitgedanken zum Kompetenzerwerb

Im Zuge der Experimentierreihe sollen die SuS nicht nur bisheriges physikalisches Wissen reaktivieren, sondern dieses auch gewinnbringend direkt oder analog einsetzen können. Dies hört sich leichter an als getan, denn dies beinhaltet sowohl physikalisches, praktisches Arbeiten bzw. Experimentieren als auch theoretische, auf Fachwissen basierende Überlegungen und Entscheidungen und stellt somit für die SuS eine anspruchsvolle Aufgabe dar.

Die SuS sollen somit für ein erfolgreiches Bearbeiten der Aufgabenstellungen:

- ✓ erworbenes physikalisches Wissen anwenden.
- ✓ physikalische Fragen erkennen und sachgerechte Entscheidungen treffen.
- ✓ grundlegende physikalische Konzepte und Modelle verstehen und deren Tragfähigkeit hinterfragen, um die Grenzen physikalischen Denkens erkennen zu können.
- ✓ Sachverhalte klar erkennen und mitteilen und quantitativ erfassbare Größen beobachten.
- ✓ aufgrund der Beurteilung, Auswahl und Anwendung physikalischer Gesetze, Schlussfolgerungen aus den gesammelten Informationen und Daten ziehen.

Da die SuS in maximal Vierergruppen aufgeteilt werden, ist ein wichtiger Stützpfeiler des Versuchstages die Teamfähigkeit der Teilnehmer. Die DAVID-Versuchsreihe fördert somit:

- ✓ personale und soziale Kompetenz
- ✓ kooperative Fähigkeiten
- ✓ eine aktive und verantwortungsvolle Mitarbeit

Mit diesem Hintergrund soll diese Experimentierreihe:

- ✓ das Denk- und Vorstellungsvermögen der SuS fördern.
- ✓ ein tragfähiges Grundwissen, Fertigkeiten bei der Beobachtung und Beschreibung physikalischer Phänomene vermitteln.
- ✓ Grundlagen im Experimentieren legen.

Durch die Art und Weise der Aufgabenstellungen soll es den SuS ermöglicht werden den kompletten Drehimpuls-Themenbereich selber entdecken und erforschen zu können. In anderen Worten spielen somit auch folgende didaktische Grundsätze mit hinein:

- ✓ Handlungsorientiertes und entdeckendes Lernen und Arbeiten in Teams
- ✓ Umgang mit Fehlern
- ✓ Fehler gehören zum Lernprozess
- ✓ Anregung zur Suche nach eigenen Lösungswegen durch offene Problemstellungen und entdeckendes Lernen

Ferner müssen die SuS bei der Bearbeitung der Aufgaben der DAVID-Versuchsreihe nachfolgende Kompetenzen aufweisen:

b. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik (Punkt 4)

Die SuS können:

- ✓ Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen untersuchen
- ✓ Experimente unter Anleitung selbständig planen, ausführen und auswerten
- ✓ Strukturen erkennen und Analogien hilfreich einsetzen

c. Grundlegende physikalische Größen (Punkt 8)

Neben dynamischen Betrachtungsweisen kennen die SuS

- ✓ vor allem die Erhaltungssätze
- ✓ und können sie vorteilhaft zur Lösung physikalischer Fragestellungen einsetzen

[...]

Die SuS können mit weiteren grundlegenden physikalischen Größen umgehen:

- ✓ Zeit, Masse
- ✓ Energie (Energieerhaltung)
- ✓ Kraft, Geschwindigkeit, Impuls (Impulserhaltung), Beschleunigung
- ✓ qualitativ: Drehimpuls (Drehimpulserhaltung)

d. Strukturen und Analogien (Punkt 9)

Die SuS erkennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexeren Fragestellungen bearbeiten:

- ✓ Energiespeicher
- ✓ Beschreibung von mechanischen Energietransporten

2. Die Experimentierreihe als Herausforderung

Diese Experimentierreihe versucht mehreren Punkten gerecht zu werden:

- ✓ Einstieg und Vermittlung des Drehimpuls-Themengebietes
- ✓ Experimentelles Erkennen und Bestätigen der Impuls-Drehimpuls-Analogie
- ✓ Auslegung auf nur einen Versuchstag
- ✓ ansprechende Versuche
- ✓ didaktisch sinnvolle Versuchsreihenfolge
- ✓ Bildungsstandards der Physik

All diesen Anforderungen gerecht zu werden, stellt eine Herausforderung dar, die es notwendig machte Kompromisse zu schließen.

Nicht zuletzt betrifft das auch die Bildungsstandards der Physik. Ein wesentlicher didaktischer Grundsatz ist, dass SuS „zur Suche nach eigenen Lösungswegen durch offene Problemstellungen und entdeckendes Lernen“ angeregt werden. Hinsichtlich des engen Zeitrahmens und der Intention die komplette Impuls-Drehimpuls-Analogie zu vermitteln bzw. entdecken zu lassen, ist es allerdings relativ schwierig den Versuch nur aus rein offenen Problemstellungen aufzubauen. Nichtsdestotrotz stellt dieser Punkt einen essentiellen Bestandteil des Bildungsplanes dar und ist daher im Grunde nur schwerlich in den Bereich der Kompromiss-Fähigkeit einzuordnen. Dies gilt jedoch leider auch für den Zeitrahmen und das Thema dieser Versuchsreihe.

Mit diesem Hintergrund wurde versucht die Experimentierreihe so anzupassen, dass den SuS – soweit es möglich erschien – offene Problemstellungen präsentiert werden bzw. sie nicht zu sehr durch die Aufgabenstellungen in ihrer Selbständigkeit, Selbstverantwortung und Kreativität eingeschränkt werden. Dies ist zwar leider nicht überall im gewünschten Umfang möglich gewesen. Dennoch hoffe ich, dass diese Experimentierreihe diese Herausforderung auf eine für alle wesentlichen Aspekte nicht nur annehmbare, sondern mehr als zufriedenstellende Art bewältigt.

III. Lernziele des Versuchstages

Das große Lernziel des DAVID-Versuchstages ist den SuS Grundlagen im Experimentieren zu vermitteln und die Nützlichkeit von Analogien aufzuzeigen. Dies beinhaltet automatisch auch einen Lernzuwachs hinsichtlich des Drehimpuls-Themengebietes

Zusammenfassend sind die fachlichen Lernziele:

- ✓ Analogie zwischen Translation („geradliniger Impuls“) und Rotation („Drehimpuls“)
- ✓ Analogien:
 - a. Strecke s \Leftrightarrow Winkel α
 - b. Geschwindigkeit v \Leftrightarrow Winkelgeschwindigkeit ω
 - c. kinetische Energie: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ \Leftrightarrow Rotationsenergie: $\frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$
 - d. (träge) Masse m \Leftrightarrow Trägheitsmoment I
 - e. Impuls \vec{p} \Leftrightarrow Drehimpuls \vec{L}
 - f. Impulserhaltung \Leftrightarrow Drehimpulserhaltung
 - g. Kraft \Leftrightarrow Drehmoment

Weitere allgemeine Lernziele sind, dass die SuS:

- ✓ das Nutzen von Analogien erkennen und dieses Wissen nutzbringend einbringen.
- ✓ die Impuls-Drehimpuls-Analogie verstehen, an Beispielen erläutern können und mit diesem Wissen physikalische Probleme lösen.
- ✓ qualitative, fachliche Aussagen über die physikalischen Größen eines Drehkörper treffen.
- ✓ qualitative, fachliche Aussagen über die Änderung von physikalischen Größen eines Drehkörpers treffen
- ✓ experimentell überprüfbare Vorhersagen tätigen.

IV. Didaktische Reduktion

Das Ziel der didaktischen Reduktion ist, einen fachlichen Tatbestand in der Weise zu vereinfachen, dass er sowohl wissenschaftlich gesehen gültig bzw. wahr bleibt, als auch für die Lernenden besser begreifbar zu machen. In der Regel werden hierbei komplexe Sachverhalte auf ihre wesentlichen Elemente zurückgeführt.

In dieser Experimentierreihe finden zwei wichtige didaktische Reduktionen Anwendung:

1. Die analoge Anwendung des Impulswissens auf das Themengebiet des Drehimpulses.
2. Die Reduzierung der Drehbewegung auf Fälle, in denen die Drehachse stationär ist und starre Körper verwendet werden, die zumindest symmetrische sind.

Die ersterwähnte didaktische Reduktion – die Impuls-Drehimpuls-Analogie – dient dazu die SuS ein komplett neues Themengebiet im Grunde nur aufgrund ihrer Präkonzepte und ihres physikalischen Vorwissens entdecken und physikalisch beschreiben zu lassen. Eine Einschränkung ist hier natürlich dahingehend zu machen, dass die SuS dabei einem roten Faden in Form des Laborbuchs folgen, sprich den Weg der Analogie-Anwendung vorgezeichnet bekommen. Nichtsdestotrotz erleichtert die Anwendung der Analogie das Durchlaufen der Versuchsreihe bzw. macht dies erst möglich.

Die zweite angeführte didaktische Reduktion – die Reduzierung auf Drehbewegung mit stationärer Achse und mit zumindest symmetrischen, starren Körpern – bedeutet gleichzeitig eine Reduzierung der Betrachtung des Trägheitstensors auf ein skalares Trägheitsmoment. Dadurch wird zum einen diese schon an sich für SuS komplizierte physikalische Größe erst fassbar gemacht, zum anderen werden dabei die Phänomene wie die Präzession und die Nutation umgangen, die für die SuS mit Analogie-Betrachtungen zum reinen, linearen Impuls nicht erklärbar sind.

D. DIE EXPERIMENTIERREIHE IN DER PRAXIS

Am ersten Versuchstag (Freitag, der 11.12.2009) nahmen vier Schülerinnen der zehnten Klasse des Salier-Gymnasiums in Waiblingen teil. Diese Gruppe wird im Folgenden Gruppe 1 genannt. Eine Woche später (Freitag, der 18.12.2009) folgten vier ihrer Klassenkameraden als Gruppe 2.

Beide Gruppen verfügten über sehr gute bis gute Physik-Kenntnisse, waren sehr interessiert und von der Physik als Schulfach offenbar auch angetan.

Der Fachlehrer war Professor Franz Kranzinger, der als Fachleiter am Staatlichen Seminar für Didaktik und Lehrerbildung in Stuttgart beim Erstellen diese Experimentierreihe mit Rat zur Seite stand.

I. Versuchstagsvorbereitung

Aufgrund einer stattfindenden Physik-Klausur über das Themengebiet des Impulses hatten die acht SuS ein gutes Grundlagenwissen über das Impuls-Themengebiet. Das Themengebiet des Drehimpulses war ihnen noch gänzlich unbekannt.

Folgende Gebiete waren so gut wie unbekannt:

- Winkel im Bogenmaß
- Winkelgeschwindigkeit
- ebene Polarkoordinaten
- Reibungsformen
- Newtonsche Axiome

Das Laborbuch war von beiden Gruppen offenbar durchgelesen worden. Weitere Vorbereitungen schienen nicht stattgefunden zu haben.

Die SuS hatten somit – für die Versuchsreihe – ein zwar ausreichendes, aber dennoch relativ geringes Vorwissen. Im Grunde stellte dies in der Hinsicht eine ideale Startvoraussetzung dar, weil es so leichter zu erkennen war, wo sich Probleme ergaben und welche Themen im Vorfeld im Unterricht behandelt werden sollten.

Diese Erkenntnisse sind oben in C.I.1. eingeflossen.

II. Eingangsvortrag

Der Eingangsvortrag dauerte 20 bis 30 Minuten. Er war bei beiden Gruppen nahezu identisch. Für Gruppe 2 wurden lediglich zwei Folien ergänzt und einige Formulierungen abgeändert. Im Anhang ist der Vortrag der Gruppe 2 zu finden.

Die Ziele des Eingangsvortrags waren bisheriges Wissen der SuS zu reaktivieren und Hilfen für den Versuchsablauf zu geben. Der Vortrag gliederte sich in sechs Abschnitte:

1. Einleitung (Titelfolien)

Hier fanden Begrüßung, Vorstellung des Betreuers und des Schülerlabors statt. Ferner wurde den SuS nahe gelegt sich während des Versuches nicht zu scheuen Fragen zu stellen und darauf verwiesen, dass Fragen und fachliche Diskussionen neben dem Experimentieren eine wichtige Grundlage der Physik darstellen, da selbst versierte Physiker nicht auf jede Frage sofort eine Antwort wissen. Anschließend wurde der Versuch in dem Sinne vorgestellt, dass auf die Namensgebung „DAVID“ als Akronym eingegangen wurde.

2. Zielsetzung der Versuchsreihe (Folien „Was ist unser Ziel?“)

Unter dem Motto „Wer das Ziel nicht kennt kann den Weg nicht finden.“ wurde auf den folgenden Folien auf die Zielsetzung des Versuchs eingegangen. Als Ziele wurden das Erkenntnissammeln über Drehbewegungen, das Einführen und Bestätigen von Größen und Formeln, das hierfür notwendige Herausarbeiten der Analogie zwischen Impuls und Drehimpuls und der Alltagsbezug genannt und näher erläutert.

3. Vorwissen (Folien I.1. bis I.7.)

Ziel dieses Abschnitts war nicht nur bisheriges Wissen zu reaktivieren, sondern auch für den Versuch Wichtiges vorzubereiten und Begriffe näher zu erläutern, um die SuS den Einstieg und das Durchlaufen der Versuchsreihe zu erleichtern.

Auf der **Folie I.1.** wurde auf die Winkelgeschwindigkeit eingegangen, indem anhand einer Langzeitaufnahme des (Stern-)Nachthimmels der Unterschied bzw. die Vor- und Nachteile der Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit erklärt wurden. Ferner wurde auf das Bogenmaß eingegangen, das den SuS der zehnten Klasse aus der Trigonometrie-Einheit der Klasse 9 im Fach Mathematik schon bekannt war.

Folie I.2. diente dazu die ebenen Polarkoordinaten einzuführen, die am zweiten Versuchstag auch als „Radius-Winkel-Koordinaten“ bezeichnet wurden. Die SuS hatte die Aufgabenstellung einen bestimmten Punkt auf der Skala anstatt mit x- und y-Koordinaten mit Radius- und Winkelkoordinaten anzugeben. Dies gelang beiden Gruppen problemlos. Gleichzeitig wurde das Bogenmaß nochmals veranschaulicht. Die dahinter stehende Absicht war den SuS den Einstieg in den ersten Themenbereich der Versuchsreihe zu erleichtern.

Folie I.3. stellte lediglich eine kurze Wiederholung der Impuls-Thematik dar.

Mit **Folie I.4.** wurden Erhaltungssätze und Energieformen wiederholt. Besonders betont wurden hierbei Reibungsverluste in der Energieerhaltung. Bei Gruppe 2 wurde zusätzlich auf die verschiedenen Reibungsformen eingegangen. Dies erscheint nun im Nachhinein für unnötig, da die verschiedenen Reibungsformen nicht wirklich eine Hilfe für die Experimentierreihe darstellen.

Mit **Folie I.5.** wurde der Impuls im Zusammenhang mit den Newtonschen Axiomen vorgestellt. Die Newtonschen Axiome waren den SuS zwar unbekannt, aber sie schienen aufgrund ihres Impuls-Vorwissens die Axiome problemlos nachvollziehen zu können. Die offen gebliebene Frage war, ob und wie diese Axiome für den Drehimpuls analog formuliert werden könnten.

Anmerkung: Die nachfolgenden zwei Folien wurden nur im Eingangsvortrag der Gruppe 2 verwendet. Sie wurden eingefügt, um Problemen entgegenzuwirken, die es am ersten Versuchstag gegeben hatte.

Anhand der **Folie I.6.** wurde auf die Begriffe Trägheit, träge Masse und Trägheitsmoment eingegangen. Aufgrund der erheblichen Verständnisprobleme, die SuS der Klassenstufe 10 mit dem Trägheitsmoment haben, erschien es unumgänglich diese Hilfestellung einzubauen. Erklärt wurde anhand dieser Folie, dass sich ein Körper nicht nur auf einer geradlinigen Bahn gegen eine Geschwindigkeitsänderung „wehrt“ (Beispiel: Busfahren), sondern dass er sich selbst bei gleich bleibender Geschwindigkeit dagegen „wehrt“ auf eine Kreisbahn gezwungen zu werden. Aufgrund dessen, dass die beiden Effekte mit der Trägheit des Körpers zusammenhängen, nennt man daher die beiden physikalischen Größen, die dieses „Wehren“ des Körpers repräsentieren, bei der geradlinigen Bahn „träge Masse“ und bei der Kreisbahn „Trägheitsmoment“.

Diese Begriffs-Erklärung schien den Schülern der Gruppe 2 einleuchtend zu sein.

Auf der **Folie I.7.** wird lediglich eine Differenzierung der Begriffe Rotation und Kreisbewegung im Sinne der Schulphysik gezogen und betont, dass diese unter den Überbegriff Drehbewegung fallen.

4. Versuchsaufbauten (Folien II.1. bis II.4.)

Diese Folien dienen dazu unnötig zeitraubende Schwierigkeiten bei den Versuchsaufbauten im Vorfeld einzudämmen.

5. Hilfe für die Messungen (Folien III.1. bis III.3.)

Wie schon die Überschrift sagt, sollen hier Hilfestellungen für Messungen gegeben werden. Die wichtigste wird auf **Folie III.1.** gegeben. Anhand eines kurzen Videos sollten die SuS überlegen wie die Dauer einer Schwingung gemessen werden sollte. Dabei durfte ruhig das (Vor-)Wissen aus dem Laborbuch einfließen. Beide Gruppen gaben hier relativ schnell richtige Antworten.

Die nachfolgenden Folien dienten der Erklärung der Anwendungsmöglichkeiten von Lichtschranken und dem horizontalen Ausrichten der Versuchsaufbauten mit einer Wasserwaage.

6. Belagerungsgeräte (Folie IV)

Hier wurde geschichtliches über „militärische Impuls- und Drehimpulsanwendung“ in Form des Skorpions (Antike), Onagers (Antike) und Triboks (Mittelalter) erzählt.

III. Die Durchführung der Experimentierreihe

Da die beiden Gruppen zwei unterschiedlich aufgebaute Laborbücher verwendeten, soll im Folgenden auch separat auf die beiden Gruppen eingegangen werden.

1. Gruppe 1

Bei Gruppe 1 bestand das Laborbuch aus nachfolgenden sieben Themenbereichen:

1. Themenbereich I: Zentrifugalkraft

Dieser Themenbereich war als Einleitung aus zwei Gründen gewählt worden:

Einmal ist die Zentrifugalkraft eine alltägliche Kraft, die einen nicht unerheblichen Anteil an den Präkonzepten der SuS hat. Allerdings stellt sie als Trägheitskraft kein Impuls-Drehimpuls-Analogon dar. Eine Intention war dies den SuS klar zu machen.

Ferner wurde dieser Einstieg gewählt, weil die Zentrifugalkraft Schulstoff ist, den selbst SuS der zehnten Klasse bis dahin im Unterricht hatten. Dies sollte den SuS den Einstieg in die Versuchsreihe vereinfachen.

Die Schülerinnen der Gruppe 1 kamen mit den Versuchen zwar gut zurecht, allerdings waren sie extrem zeitraubend.

Ein Grund hierfür war, dass die *Aufgabenstellung I.1.* einen Fehler beinhaltete, der erst während des Versuches auffiel. Die Massen der Münzen sollten über die Fliehkraft qualitativ bestimmt werden. Obwohl die Ergebnisse tatsächlich korrekt waren, liegt hier dennoch ein Denkfehler vor: Da die Zentripetalkraft bei diesem Versuch der Reibungskraft entspricht, die linear von der Masse abhängt, müssten alle Münzen unabhängig von der Masse gleichzeitig von der rotierenden Scheibe fliegen.

Ausschlaggebend sind folglich nur die Faktoren, die für die Reibung zuständig sind, d.h. Material der Münze, Auflagefläche der Münze (Kopf oder Zahl) etc.

Aufgabenstellung I.2. stellte sich als unnötig zeitraubend dar.

Fazit: Dieser Themenbereich stellte sich eher als Klotz am Bein denn als Einstiegshilfe heraus.

2. Themenbereich II: Winkeländerung, Winkel- und Bahngeschwindigkeit

Dieser Themenbereich diente der Einführung bzw. Vertiefung wichtiger Grundgrößen und dem Erkennen der ersten Analogien.

Durch die zu offene Aufgabenstellung waren die Schülerinnen insbesondere bei der Suche nach der Formel $v = \omega \cdot r$ zum Teil erheblich überfordert und es war ein starkes Eingreifen und Führen durch den Betreuer bzw. Fachlehrer erforderlich.

Letztlich wurde auch hier zu viel Zeit benötigt.

Wie einige abschließende Fragen zeigten, schienen die Schülerinnen am Ende diesen Themenbereich dennoch sehr gut verstanden zu haben.

Fazit: Insbesondere in der Klassenstufe 10 ist dieser wichtige Themenbereich anders zu gestalten. Eine zu offene Aufgabenstellung ist hier aus Zeitgründen unangebracht.

3. Themenbereich III: Die Rotationsenergie

Dieser Themenbereich stellte sich als ebenfalls sehr zeitraubend dar. Das Sammeln von Messdaten dauerte zu lang. Dasselbe galt für die Auswertung. Das größte Problem stellte jedoch der Aufgabenteil dar, in dem die Schülerinnen auf die Idee kommen sollten die gegebene Formel für die Rotationsenergie einer punktförmigen Masse über die kinetische Energie und die Formel aus dem vorigen Versuchsteil zu finden. Auch hier musste der

Betreuer/Fachlehrer mit Erklärungen und gezielten Fragen eingreifen. Obwohl die Schülerinnen im Nachhinein die Herleitung dieser Formel nachvollzogen hatten, war offensichtlich, dass die Aufgabenstellung mit dem Vorwissen der Klassenstufe 10 in dieser Form nicht zu bewältigen ist.

Fazit: Dieser Themenbereich verursachte die Versuche betreffend offenbar eher Blockaden. Das Analogon Rotationsenergie ist zwar auch für die nachfolgende Versuche sehr wichtig und wie das Ergebnis zeigte vom Verständnis her auch für die vier Schülerinnen gut nachvollziehbar gewesen, allerdings ist der hier gewählte Weg für SuS der Klassenstufe 10 alleine kaum beschreibbar.

4. Die Themenbereiche IV. bis VI.

Da zu diesem Zeitpunkt die Zeit schon extrem vorangeschritten war (etwa 12.30 Uhr, Beginn gegen 9.30 Uhr) einigten sich die Schülerinnen, der Fachlehrer und der Betreuer darauf die Versuchsreihe in dem Sinne abzubrechen, dass ein Vorführen der weiteren Versuche mit Erklärungen und Fragen, sprich einer Art Frontalunterricht mit Versuchen, von dem Betreuer vorgenommen wurde. Hierbei wurde gleichzeitig sowohl von dem Betreuer als auch dem Fachlehrer die Meinungen der vier Schülerinnen über die didaktische Reihenfolge, Schwierigkeitsgrad der Aufgabenstellungen etc. eingeholt. Diese Meinungen bildeten eine wichtige Grundlage für das überarbeitete Laborbuch der Gruppe 2.

Der **Themenbereich „Das Trägheitsmoment“** stellte die größte Hürde dar und es wurde sehr schnell deutlich, dass die Aufgabenstellungen zu diesem Themenbereich für SuS der Klassenstufe 10 ebenfalls nicht zu offen sein sollten.

Der **Themenbereich „Die Drehimpulserhaltung“** schien selbst in der offenen Aufgabenstellungsform sehr gut machbar zu sein. Verständnisprobleme oder Blockaden waren zumindest nicht ersichtlich.

Der **Themenbereich „Das Drehmoment“** schien hingegen etwas zu kurz geraten zu sein. Zu einem wirklichen Verinnerlichen und Verstehen dieser physikalischen Größe waren entweder weitere Versuche oder aber theoretische Aufgabenstellungen notwendig.

5. Themenbereich VII: Anwendungen und Spielereien

Dieser Themenbereich bestand sowohl aus Vorführen, als auch selber Probieren. Betreuer und Fachlehrer begleiteten die vier Schülerinnen hierbei mit Fragen und Hinweisen.

Besonders wichtig war gerade bei diesen letzten vier Versuchen das zuvor erworbene/vermittelte Wissen der vier Schülerinnen zu prüfen, um festzustellen inwieweit die Drehimpuls-Thematik von ihnen aufgenommen worden war.

Das Ergebnis war sehr zufriedenstellend.

Fazit:

Dieser erste Versuchstag hatte seine Höhen und Tiefen. Eine sehr wichtige Erkenntnis war, dass das Laborbuch – sprich das bis dato verwendete didaktische Konzept – in dieser Form zwar nicht weiter angewendet, jedoch die eingeschlagene Richtung beibehalten werden sollte. Eine weitere nicht weniger wichtige Erkenntnis war, dass es möglich ist selbst SuS der Klassenstufe 10 an einem Versuchstag ohne Drehimpuls-Vorwissen die gesamte Impuls-Drehimpuls-Analogie zu vermitteln – etwas, das an sich nicht von Anfang an sicher gewesen ist, denn im Grunde lernen die SuS innerhalb weniger Stunden etwas, das in einen normalen Physikunterricht integriert in 12 Unterrichtsstunden vermittelt wird. Einschränkungen bestehen jedoch dahingehend, dass zu offene Aufgabenstellungen nicht für alle Themenbereiche möglich sind, und dass zur Vermeidung von Lernhindernissen und Verwirrungen auf die Grenzen der Impuls-Drehimpuls-Analogie verzichtet werden sollte.

Einen positiven Eindruck hinterließ der Puzzle-Plan. Insbesondere für einen Versuchstag mit mehreren Gruppen, sprich mit einer ganzen Klasse, scheint er ein gutes Mittel der Selbstkontrolle und Ergebnissicherung zu sein. Ferner stellt er eine zusätzliche Möglichkeit für Betreuer und Fachlehrer dar im Stillen den Fortschritt der Gruppe zu beobachten und etwaige Probleme zu erkennen.

Die vier Schülerinnen waren erfreulicherweise von diesem Versuchstag nicht frustriert, sondern beurteilten ihn trotz der „Pannen“ dahingehend positiv, dass der eingeschlagene Weg der richtige sei und die DAVID-Versuchsreihe selbst in dieser Form neues Wissen vermittelt hätte. Sie waren auch dahingehend zuversichtlich, dass die Versuchsreihe in überarbeiteter Form eine wertvolle Unterrichtsergänzung darstellen würde.

Ein Ausfüllen der Evaluationsbögen wurde aufgrund des „Abbrechens“ nach dem dritten Themenbereich und hinsichtlich dessen, dass eine Neukonzeption des Laborbuchs notwendig war, nicht vorgenommen.

2. Gruppe 2

Bei der zweiten Gruppe wurden im Laborbuch einige wichtige Änderungen vorgenommen:

1. Themenbereiche

- Der Themenbereich „Zentrifugalkraft“ wurde komplett gestrichen.
- Der Themenbereich „Winkeländerung, Winkel- und Bahngeschwindigkeit“ wurde zweigeteilt.
- Ein neuer Themenbereich „Trägheitsmoment und Rotationsenergie“ wurde aufgenommen. Dieser beinhaltet jedoch nur eine rein theoretische Aufgabenstellung.
- Der „Drehimpuls“ hat einen eigenen Themenbereich mit einer ebenfalls reinen theoretischen Aufgabenstellung erhalten.

2. Reduzierung offener Aufgabenstellungen

Der einzige Themenbereich mit einer reinen offenen Aufgabenstellung ist der Themenbereich „Drehimpulserhaltung“. Alle anderen Aufgabenstellungen sind so weit es sinnvoll und möglich erschien so offen wie möglich gehalten worden.

3. Einführung mehrerer theoretischer Aufgabenteile

Gerade die Anwendung der Analogie stellt anfänglich für SuS insbesondere der Klassenstufe 10 eine große Hürde dar. Die Herleitung bzw. Bestätigung analoger Formeln stellt nun einen wichtigen Bestandteil des Laborbuchs dar.

Die SuS werden durch die theoretischen Aufgaben zum einen dazu angehalten zu lernen wie bei der Suche oder dem Bestätigen von analogen Formeln vorzugehen ist, zum anderen werden durch Anwendungsaufgaben Erkenntnisse gesammelt, es werden Fehler in der eigenen Denkstruktur erkannt und letzten Endes wird das eigene Wissen getestet und gefestigt.

Aufgrund dessen, dass es um die Vermittlung neuen Stoffes geht, erscheint dieser Schritt als unumgänglich.

4. Vorgabe von Tabellen

Weitgehend wird im Hinblick auf die Selbständigkeit der SuS auf Tabellen verzichtet.

An zwei Stellen wurden Tabellen vorgegeben, da hier eine engere Führung hinsichtlich des Aufgabenziels unumgänglich erscheint.

5. *Hilfszettel*

An fünf Stellen existieren Hilfszettel. Dies soll nicht zu eng geführte Aufgabenstellungen ermöglichen bzw. an kritischen Stellen eine wichtige (Selbst-)Hilfe insbesondere für schwächere SuS darstellen.

6. *Zeitvorgaben*

Um den SuS einen Zeitrahmen bzw. eine bessere Planung zu ermöglichen, wurde für jeden Themenbereich eine Zeitvorgabe gegeben. Dies auch aus dem Grund, damit die SuS abschätzen können, ob die Zeit für Zusatzaufgaben reichen.

7. *„Falls die Zeit noch reicht...“-Aufgaben*

Manche Versuche wurden als Zusatzaufgaben ausgelagert. Dies nicht nur aus Gründen der Zeitersparnis, sondern auch um schnellere Gruppen zu fordern.

8. *Puzzle-Planer*

Der Puzzle-Planer wurde stärker in das Laborbuch eingebunden.

Bei Gruppe 2 bestand das Laborbuch aus nachfolgenden acht Themenbereichen:

1. *Themenbereich I: Der Winkel*

Die Schüler der Gruppe 2 hatten mit diesem Themenbereich weder zeitlich noch inhaltlich große Probleme. Der Hilfszettel wurde nicht benötigt. Der Eingangsvortrag schien hier richtige Akzente gesetzt zu haben.

2. *Themenbereich II: Die Winkelgeschwindigkeit*

Aufgabe II.1. wurde von den Schülern weitgehend problemlos bearbeitet.

Lediglich Aufgabenteil c) stellte ein Problem dar. Hier ist der Hilfszettel definitiv wichtig und sollte noch um ein paar Hilfestellungen ergänzt werden.

Aufgabe II.2. wurde hingegen zufriedenstellend erarbeitet.

Die Zusatzaufgabe wurde aus Zeitgründen nicht mehr angegangen. Am Ende der Versuchsreihe wurde aber auf Wunsch der Schüler noch kurz darauf eingegangen und Zeit für „Spielereien“ gelassen.

3. *Themenbereich III: Das Trägheitsmoment*

Dieser Themenbereich stellte an diesem Versuchstag die größte Hürde dar. Zwar waren durch den Eingangsvortrag manche Probleme behoben oder nicht mehr so schwerwiegend vorhanden wie bei Gruppe 1. Dennoch waren insbesondere bei der ersten Aufgabenstellung Hilfestellungen von Betreuer und Lehrkraft notwendig. Der Vergleich der Formeln führte entweder auf falsche Ergebnisse oder das Ergebnis war richtig, jedoch die Verwirrung darüber relativ groß. Hier gehört der Hilfszettel dringend nachgebessert und die Aufgabenstellung modifiziert.

Die nachfolgenden Aufgabenstellungen wurden von den Schülern zufriedenstellend bearbeitet. Der Umgang mit Formeln wie in Aufgabenstellung III.1. stellt allerdings eine wichtige Grundlage dar und ist bei SuS der Klassenstufe 10 nicht stillschweigend voraussetzbar. Aus diesem Grund sollte für alle künftigen Versuchstage die Lehrkraft darum gebeten werden im Unterricht zuvor ähnliche Aufgaben zu bearbeiten.

Die vorgegebene Zeit war relativ gut bemessen. Die Zusatzaufgabe wurde mündlich erfolgreich bearbeitet.

4. Themenbereich IV: Trägheitsmoment und Rotationsenergie

Dank der Puzzle-Freude eines Gruppenmitglieds wurde die Aufgabe schon nahezu bei Versuchsbeginn gelöst. Die Lösungen wurden diskutiert und konnten rekonstruiert werden. Die Zeitvorgabe war für diese Gruppe zu großzügig berechnet.

5. Themenbereich V: Der Drehimpuls

Die theoretische Herleitung der Formel des Drehimpulses aufgrund der bisher gesammelten Analogie-Erkenntnisse wurde problemlos und zügig gelöst. Zu betonen ist, dass die vier Schüler nach dem Trägheitsmoment mit derartigen Aufgaben keine Probleme mehr hatten, sondern sie in angemessener Zeit bewältigen konnten.

6. Themenbereich VI.: Die Drehimpulserhaltung

Auch dieser Themenbereich wurde relativ zügig bearbeitet. Besonders erfreulich war, dass Aufgabe VI.2. mit einer sowohl an sich korrekten sowie auch physikalisch korrekt begründeten Voraussage angegangen wurde.

Die Zusatzaufgabe wurde nicht durchgeführt. Theoretische Fragen zu dieser von Seiten des Betreuers wurden alle korrekt beantwortet.

7. Themenbereich VII.: Das Drehmoment

Die theoretischen Aufgabenstellungen wurden alle zügig und korrekt bearbeitet. Lediglich Aufgabenteil VII.0.c. führte zu kleineren Diskussionen in der Gruppe. Es wurde jedoch ohne Verwendung des Hilfszettels oder Hinweise des Betreuers/Fachlehrers die korrekte Lösung gefunden. Für schwächere SuS ist es jedoch ratsam den Hilfszettel an dieser Stelle beizubehalten.

Der Versuchsteil wurde allerdings nur noch halbherzig angegangen und fand mehr oder weniger nur noch theoretisch statt. Hinsichtlich der Flut der Informationen bzw. des neuen Wissens und der bisherigen Experimentierdauer ist dies allerdings nicht besonders verwunderlich. Zu überlegen und testen wäre daher, ob an bestimmten Stellen kleine Pausen eingeführt werden sollten. Zumindest eine längere Pause, in der die SuS etwas Essen und auch das Schülerlabor erforschen dürfen, hat sich bei Gruppe 2 als sehr wertvoll herausgestellt und sollte daher auch beibehalten werden.

8. Themenbereich VIII.: Anwendungen und Spielereien

Aufgabe VIII.1. wurde ebenfalls nur halbherzig aber dafür korrekt und mit korrekten Voraussagen bearbeitet.

Aufgabe VIII.2. weckte dafür eher das Rätselfieber der Gruppe. Wie schon zuvor gelang es der Gruppe aber sehr schnell auf die richtige Lösungsidee zu kommen. Ihre Wahl konnten sie physikalisch richtig begründen.

Aufgabe VIII.3. wurde von den vier Schülern gut aufgenommen und gut bearbeitet. Insbesondere der Alltagsbezug zum Tandemhubschrauber wurde schnell hergestellt und theoretische Fragen korrekt und zügig beantwortet.

Aufgabe VIII.4. war schon in der Mittagspause von den Schülern mit Begeisterung „bearbeitet“ worden. Theoretische Fragen wurden korrekt beantwortet. Die im Laborbuch befindlichen Aufgaben wurden allerdings nur halbherzig bearbeitet.

Fazit:

Der zweite Versuchstag verlief im Vergleich zum ersten erfreulich gut. Die Anordnung der Themengebiete war richtig gewählt. Lediglich die Aufgabenstellungen und insbesondere die Hilfszettel gehören zum Teil noch modifiziert.

Der Puzzle-Plan wurde dieses Mal anfänglich von der ganzen Gruppe und schließlich nur noch von einem Gruppenmitglied wirklich als Puzzle-Spiel verwendet und die Lösungen zum Teil auch ohne physikalisches Wissen ermittelt. Diese Vorgehensweise ist zwar nicht unbedingt diejenige, die erwünscht gewesen ist. Dennoch sollte sie nicht verboten werden. Der Puzzle-Plan hat auch auf diese Weise eine unterstützende und richtungsweisende Funktion. Sowohl beim gemeinsamen Puzzeln, als auch an den entsprechenden Stellen im Laborbuch, an denen auf die schon „vorgegebenen“ richtigen Lösungen zurückgegriffen wurde, entstanden Gespräche unter den Schülern, die nicht einen minder großen Lerneffekt hatten. Im Gegenteil waren die Lösungen für Gruppe 2 ab und zu in einer Weise überraschend und Grundlage für Diskussionen, dass auch dieser Weg einen wertvollen Lerneffekt im Sinne des Bildungsplanes darstellt.

Erfreulich war auch, dass die vier Schüler zum Ende des Versuchstages hin mit den neuen physikalischen Einheiten keine Probleme mehr zu haben schienen. Insbesondere die Einheit des Trägheitsmoments stellte für sie letztlich kein Problem mehr dar. Im Gegenteil konnte die Gruppe sogar anhand von einem in die Kurve fahrenden Auto die Einheit des Trägheitsmoments erklären.

In die Versuchsreihe sollten soweit dies möglich erscheint mehr „gesellige“ Pausen eingeplant und dafür lieber ein etwas „längerer“ Versuchstag in Kauf genommen werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Flut von Aufgaben und Informationen die Motivationsgrenze sprengt und, wie an diesem Versuchstag geschehen, manche Aufgabenstellungen einfach übergangen oder halbherzig bearbeitet werden.

Die vier Schüler beurteilten den Versuchstag durchgehend positiv. Näheres hierzu im Evaluationsteil.

IV. Evaluation

Bei Gruppe 1 fand keine schriftliche Evaluation statt. Hintergrund war, dass die Versuchsreihe nicht komplett selbständig von den vier Schülerinnen durchgeführt worden war. Wichtiger erschien es daher direkt die Meinungen der Schülerinnen einzuholen, um eine Neukonzeption des Laborbuchs vornehmen zu können. Die Eindrücke und Aussagen der Schülerinnen sind in das zweite Laborbuch eingeflossen.

Die nachfolgende Evaluation betrifft zwar nur die der Gruppe 2, aber sie kann auch als eine Art Bestätigung angesehen werden, inwieweit die Meinung der Gruppe 1 berücksichtigt wurde.

Zu betonen ist, dass sich diese Evaluation auf nur vier Schüler bezieht, die ein zumindest gutes Physik-Verständnis und auch offensichtliche Freude am Fach hatten und im Grunde persönlich betreut wurden. Sowohl von der Zahl als auch von den Interessen ist diese Evaluation lediglich als ein Fingerzeig, aber nicht als allgemeingültig anzusehen.

Die Schüler nahmen Bewertungen durch Ankreuzen vor. In nachfolgenden Tabellen werden aus diesen Kreuzen einfachhalber Durchschnittsnoten bei einer **Notenskala von 1 bis 7** errechnet.

Zitate werden in Anführungszeichen und kursiv dargestellt.

Der Evaluationsbogen stellte Fragen zu folgenden Punkten:

1. Das Vorbereitungsmaterial (Laborbuch)

Umfang	1,50
Verständlichkeit	1,50
Übersichtlichkeit	1,50
Hilfreich für die Versuchsvorbereitung	1,75
Hilfreich für die Versuchsdurchführung	1,50
Sollte es in dieser Form beibehalten werden?	2,25

Als Bemerkung zur Verbesserung des Vorbereitungsmaterials regte einer der Schüler an, dass „*Theorie auf einem Blatt oder auf mehreren aber auf jedenfall alles zusammen*“ eine sinnvolle Ergänzung des Vorbereitungsmaterials sei.

2. Der Eingangsvortrag

Umfang	1,00
Struktur	1,25
Verständlichkeit	1,25
Hilfreich für die Versuchsdurchführung	2,00
Sollte es in dieser Form beibehalten werden?	1,50

Ein Schüler merkte an, dass „*Am Anfang nicht zu viele unbekannte Formeln*“ verwendet werden sollten.

3. Der Betreuer

Hier ist anzumerken, dass es neben dem Fachlehrer und den Betreuer noch eine Hiwi gab, die den Versuch mitbetreute. Nachfolgende Beurteilung bezieht sich daher auf dieses „Team“.

Qualifizierter Eindruck	1,00
Verständliche Beantwortung von Fragen	1,25
Hilfsbereitschaft	1,00
Engagement	1,00
Verdeutlichung von Inhalten und Vorgehensweisen bei den Versuchen	1,00
Betreuung insgesamt	1,00

Keine Bemerkungen seitens der Schüler.

4. Zur Versuchsreihe

War die Zeit ausreichend?	3,00
War die Gruppengröße in Ordnung?	1,00
Wurde die Arbeitsatmosphäre als angenehm empfunden?	1,00
Wie gut kamen Sie mit dem Versuchsaufbau zurecht?	1,50
Wurden zu viele Kenntnisse vorausgesetzt?	1,75
Trägt die Versuchsreihe zu einem besseren Verständnis des Stoffgebietes bei?	1,50
Trägt die Versuchsreihe zu einer Veranschaulichung des Stoffgebietes bei?	1,25
War zu jedem Zeitpunkt klar wofür ein Versuch dient?	2,00
Konnten die gemessenen Resultate nachvollzogen werden?	1,50
Bauten die Versuche sinnvoll aufeinander auf?	1,75
Wie hat Ihnen die Versuchsreihe insgesamt gefallen?	1,50

Keine Bemerkungen seitens der Schüler.

5. Die einzelnen Themenbereiche

1. Themenbereich: Der Winkel	1,75
2. Themenbereich: Die Winkelgeschwindigkeit	1,50
3. Themenbereich: Das Trägheitsmoment	1,25
4. Themenbereich: Trägheitsmoment und Rotationsenergie	1,50
5. Themenbereich: Der Drehimpuls	1,50
6. Themenbereich: Die Drehimpulserhaltung	1,25
7. Themenbereich: Das Drehmoment	1,50
8. Themenbereich: Anwendungen und Spielereien	1,25

Insbesondere der Tribok-Versuch wurde als „sehr gut“ hervorgehoben.

6. Die einzelnen Versuche

a) Welche Versuche haben Ihnen besonders gefallen?

Hier wurde einstimmig der Tribok erwähnt. Ferner wurde von einem Schüler die Versuche zur Winkelgeschwindigkeit und von einem Schüler die Versuche zum Trägheitsmoment gelobt.

b) Welche Versuche haben Ihnen gar nicht gefallen?

Keine.

c) Verbesserungsvorschläge

- „Mehr Platz für Experimente, so dass sie sich nicht gegenseitig in die Quere kommen. Aber nicht zu ordentlich, sonst hat man Angst etwas anzufassen.“
- „Theorie zusammenfassen und Praktik zusammenfassen“

7. Ideen für weitere Versuche

- Onager als Vergleich zum Tribok
- mehr mit XPlorer

8. Kurz und bündig

Hatte der Versuch Bezug zum Alltag?	2,50
Wurde Schulwissen vertieft und veranschaulicht?	1,25
Ich habe viel bei dem Versuch gelernt.	1,25
War Ihr Eindruck vom Schülerlabor positiv?	1,25
Würden Sie gerne an weiteren Versuchsreihen teilnehmen?	1,00
Würden Sie uns weiterempfehlen?	1,25

Anzumerken ist, dass die Schüler in der Mittagspause das Schülerlabor unter der Aufsicht des Betreuers erforschen konnten. Ferner wurde am Ende des Versuchstags von Frau Winger Teile der Optik-Versuchsreihe erklärt und von Herrn Hölldampf der Windkanal vorgestellt.

9. Weitere Kommentare

- „Sehr schön! Macht Spaß und man lernt etwas. Gute Betreuung.“
- „Die persönliche Atmosphäre. Alles wird erklärt, selbst wenn man selbst nicht darauf kommt. Das ist gut. Viele Spielereien +++ sehr gut.“
- „Mehr Zeit für physikalische Spielereien lassen.“
- „Mehr Preise bei Spielereien (Gummibärchen)“

Als Hinweis: die Schüler konnten eine Tüte Gummibärchen gewinnen, wenn es ihnen gelang mit dem Tribok eine DinA3-Zielscheibe zu treffen. Es gelang ihnen...

Fazit:

Im Großen und Ganzen ist die Versuchsreihe von den Schülern positiv aufgenommen worden und es scheint, dass die Hinweise und Meinung der ersten Gruppe richtig umgesetzt wurde.

Eine umfassende Nachbesserung der DAVID-Versuchsreihe ist demnach nicht erforderlich, sondern es sind lediglich einige Modifizierungen vorzunehmen.

Folgende Punkte sollten der Auswertung der Evaluation zufolge versucht werden zu verbessern:

- **Zeit:** Obwohl die Schüler inklusive Pause etwa 3,5 Stunden für das Durchlaufen der Versuchsreihe benötigten, war am Ende zu merken, dass die Motivation nachließ. Dies findet sich auch in der Evaluation deutlich wieder.
- **Vorbereitung:** Die Vorbereitung sollte besser gestaltet werden. Entweder durch mehr Vorbereitungsmaterial oder im Zuge einer Vorbereitungsstunde durch die Lehrkraft.
- **Alltagsbezug:** Der Alltagsbezug der Versuche sollte besser hervorgehoben werden.

Nach wie vor ist allerdings zu betonen, dass diese Evaluation von ihrer Aussagekraft eingeschränkt und bei weitem nicht verallgemeinerbar ist.

E. RESÜMEE

Wie in der Einleitung erwähnt ist das Themengebiet des Drehimpulses erst seit der Bildungsreform 2004 in den Lehrplan der zehnten Klasse und der Kursstufe aufgenommen worden. Eine Konsequenz ist, dass bisher nur wenige didaktische Konzepte existieren.

Das Ziel der DAVID-Experimentierreihe ist die Entwicklung eines didaktischen Konzepts, das nicht nur für Klassen geeignet ist, die im Unterricht dieses Themengebiet bereits angegangen sind, sondern speziell auch für diejenigen, die mit diesem Versuchstag den Einstieg in das Drehimpuls-Themengebiet vornehmen wollen. Speziell in der Klassenstufe zehn stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da die SuS nur auf das Vorwissen des Impuls-Themengebietes und auf Drehbewegungs-Präkonzepte zurückgreifen können und am Versuchstag dieses Wissen nicht nur in einer Analogie verpackt anwenden müssen, sondern gleichzeitig mit neuen Fachbegriffen und Formeln konfrontiert werden. Dies stellt eine sehr große Hürde dar, zumal die SuS nur wenige Stunden für etwas Zeit haben, das ihnen ansonsten in drei bis vier Schul-Wochen vermittelt werden soll.

Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit primär mit dieser Hürde. Das Ergebnis ist allerdings nur ein Vorschlag für die Konzeption einer Versuchsreihe für die Klassenstufe zehn, die mit dieser Versuchsreihe in das Drehimpuls-Themengebiet einzusteigen versuchen. Es kann nicht deutlich genug hervorgehoben werden, dass die Ausarbeitung bzw. Modifizierung der Versuchsreihe noch lange nicht abgeschlossen ist. Nicht nur, da die Versuchsreihe bisher nicht von kompletten Klassen getestet wurde – dies ist erst nach einer Vervielfältigung der Versuchsaufbauten möglich – sondern speziell auch in Hinblick auf die Kursstufe. Es ist zwar gut vorstellbar, dass die gegenwärtige Konzeption auch für die Kursstufe geeignet ist – zumal bei den SuS der Kursstufe das Vorwissen zum Drehimpuls aus der Klassenstufe zehn wieder mehr oder weniger verschüttet sein dürfte – dennoch sollte überlegt werden, ob hier nicht eine stärkere Anpassung vorgenommen werden kann. Ein guter Einstieg für Überlegungen in diese Richtung wäre eine 13te Klasse oder sogar nur eine Schülergruppe der 13ten Klasse den Versuchstag mit dem aktuellen Laborbuch durchlaufen zu lassen, um sich so ein Bild davon machen zu können was mögliche oder sogar notwendige Änderungen bzw. Modifizierungen wären.

Die wichtigste Erkenntnis der beiden Versuchstage war, dass diese Versuchsreihe tatsächlich oben genannte Hürde nehmen kann, und dass die gegenwärtige Konzeption zwar sicherlich noch verbessert werden kann, sich aber, wie schon zuvor näher ausgeführt, nichtsdestotrotz als gut funktionierend herausgestellt hat.

Besonders hervorzuheben sind die Hilfszettel und der Puzzle-Plan. Diese Hilfsmittel stellen meines Erachtens einen wichtige Bestandteil dar, eine Klasse selbständig den Versuchstag bewältigen zu lassen, ohne dass zu starkes Eingreifen der Betreuer und des Fachlehrers notwendig sind. Gleichzeitig erleichtern sie ein stilles Beobachten und Bewerten der Fortschritte der Gruppe aus der Ferne. Aus diesem Grund sollte bei Modifizierungen und Änderungen gerade diese Hilfsmittel speziell im Auge behalten und eingeplant werden. An dieser Stelle möchte ich noch einmal unterstreichen, dass das Verwenden des Puzzle-Plans als wirkliches Puzzle ohne fachliches Wissen erlaubt bzw. nicht verboten werden sollte. Es hat wie im obigen Fazit auf S.24f schon dargestellt ebenfalls einen nicht zu verachtenden Lerneffekt.

Einen großen Problempunkt stellt nach wie vor der Zeitfaktor dar. Die SuS werden in nur drei bis vier Stunden einer Informationsfülle ausgesetzt, die jede Motivation und Freude an Versuchen auf eine harte Probe stellen kann. Die beiden Gruppen waren physikalisch versiertere und von der Physik sichtbar angetane Schülerinnen und Schüler. Doch selbst bei diesen war am Ende des

Versuchstags ein Nachlassen der Motivation aufgrund der Fülle der Informationen zu erkennen. Natürlich kann dies auch daher rühren, dass die SuS freitags kamen und, das Wochenende vor Augen, weniger bereit waren zu viel Zeit zu opfern. Nichtsdestotrotz sollte überlegt werden, wie man beispielsweise durch Pausen etc. gegensteuern könnte. Eine lange Pause, in der die sonstigen Exponate des Schülerlabors erforscht werden können, halte ich darüber hinaus für sehr sinnvoll.

Ein sehr wichtiger Punkt stellt auch die Vorbereitung dar. Es kann nicht genug betont werden, dass vieles auch mit dem/der Fachlehrer/-in steht und fällt. Aus diesem Grund ist ein zumindest rechtzeitiges Einbeziehen notwendig.

Generell halte ich es für unumgänglich, dass die Lehrkraft vor dem Versuchstag in das Schülerlabor kommt, um sich die Versuchsaufbauten anzusehen und notfalls erklären zu lassen, mit dem Betreuer über die notwendige Vorbereitung zu sprechen und auch organisatorische Fragen abzuklären. Im Vorfeld sollte der Lehrkraft Laborbuch und Lehrerbegleitheft zugesandt worden sein, um diese Vorbesprechung für beide Seiten zu erleichtern.

Auch eine Nachbereitung des Versuchstages ist – wenn auch nicht mehr in den Aufgabenbereich des Schülerlabors gehörend – sehr wichtig. Aus diesem Grund befindet sich im Anhang ein Vorschlag für die Lehrkräfte, wie der Versuchstag nachbereitet werden kann.

Die einzelnen, nicht gekauften Versuchsaufbauten sind von mir so konstruiert worden, dass eine Erweiterung und Modifizierung der Versuche ermöglicht werden soll. Es gibt allerdings Stellen, an denen Nachbesserungen auf jeden Fall angebracht wären:

1. Die verwendeten Kugellager der Achsenhalterungen weisen eine zu hohe Reibung auf. Natürlich kann dem entgegengesteuert werden, indem Drehachsenansätze mit hohen Trägheitsmomenten verwendet werden. Allerdings sollte dabei bedacht werden, dass die Lager dann umso höhere axiale als auch radiale Kräfte zu kompensieren haben. Aus diesem Grund sollte besser auf reibungsarme Kugellager oder gleich auf andere Lager wie Kugelrollenlager oder Wälzlager zurückgegriffen werden.
2. Die halbkreisförmigen Holzkugelbahnen weisen (erwartungsgemäß) im Vergleich zur geradlinigen Kugelbahn hohe Reibungsverluste auf. Zu Überlegen wäre, ob es weitere Möglichkeiten zur Reduzierung der Reibung gibt, wie z.B. die Verwendung von speziellen Lacken.

Unterm Strich liefert vorliegende Konzeption auch aufgrund der vorgenommenen didaktischen Reduktionen erfreuliche Ergebnisse, die sicherlich noch verbessert werden können. Ich bin sehr zuversichtlich, dass dies mit einer modifizierten DAVID-Experimentierreihe sehr gut möglich ist.

Für die Kursstufe wäre ferner eine Art Ausblick am Ende des Versuchstages zu überlegen, in der die didaktische Reduktion der festen Achse aufgehoben und als ein für die SuS noch nicht unbedingt klärbares Phänomen dargestellt wird. Beispielsweise der „widerspenstige Koffer“ würde sich hier zu Demonstrationszwecken anbieten.

F. ANHÄNGE

Im Anhang befinden sich das Laborbuch von Gruppe 1, ein Vorschlag für ein aktuelles Laborbuch, das nahezu identisch ist mit dem der Gruppe 2 (weshalb dieses nicht noch zusätzlich enthalten ist), das Lehrerbegleitheft, Evaluationsbögen und Nachbereitungsbögen.

Das Laborbuch der ersten Gruppe wurde deswegen mit in den Anhang aufgenommen, da es die erste didaktische Konzeption für diese Versuchsreihe war. Es soll zum einen einen Einblick in die früheren Überlegungen geben und zum anderen ein Beispiel darstellen, wie es nicht gemacht werden sollte, obwohl dieser Weg anfangs möglich erschien. Auch diese Erkenntnis ist hinsichtlich der Weiterentwicklung der DAVID-Versuchsreihe wichtig.

Das Laborbuch der Gruppe 2 und der im Anhang aufgenommene Vorschlag für ein Laborbuch sind sich im Grunde identisch. Lediglich einige Formulierungen sind abgeändert worden. Unterm Strich ist aber die didaktische Konzeption gleich geblieben. Aus diesem Grund wurde auf die Aufnahme des Laborbuchs der Gruppe 2 verzichtet.

Das Lehrerbegleitheft ist zwar eine überarbeitete Version, allerdings sind hierzu noch Meinungen verschiedener Lehrkräfte einzuholen. Es stellt also im wahrsten Sinne des Wortes nur einen Vorschlag dar.

Die Hilfsblätter stellen die überarbeitete Version der Gruppe 2 dar.

Die Folien sind die bei Gruppe 2 verwendeten. Eine Modifizierung von diesen ist jedoch möglich. Beispielsweise könnte noch eine Folie eingefügt werden, in der das Bogenmaß mit den SuS geübt wird.

Die Evaluationsbögen sind diejenigen, die bisher verwendet wurden. Der Evaluationsbogen für Lehrer kam bisher allerdings noch nicht zum Einsatz, da Herr Professor Kranzinger die Versuchsreihe direkt mitbetreute.

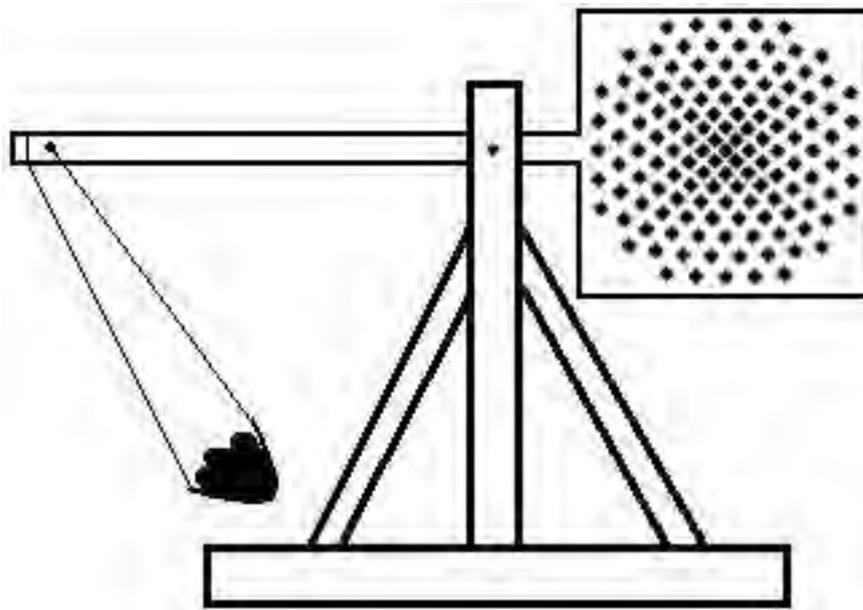
Evaluationsbögen für eine zweite, spätere Evaluation wurden nicht entwickelt.

Der Nachbereitungsbogen stellt lediglich einen ungetesteten Vorschlag für die Lehrkräfte dar.

Inhaltsverzeichnis Anhang

Laborbuch Gruppe 1.....	32
Laborbuch (Vorschlag).....	52
Lehrerbegleitheft.....	72
Hilfsblätter.....	94
Folien Eingangsvortrag.....	97
Evaluationsbögen für Schüler.....	113
Evaluationsbögen für Lehrer.....	118
Nachbereitungsbögen.....	124
Puzzleplaner.....	131

Laborbuch (Gruppe 1)



Versuchsreihe:

Die Analogie von Impuls und Drehimpuls (DAVID)

Versuchsdatum:

Name:

A. EINLEITUNG

Die Größen Impuls und Drehimpuls sind so alltägliche Größen, dass wir uns oft nur unbewusst der Physik bedienen, die dahinter steckt. Denn wer überlegt sich schon beim normalen Gehen, Treppensteigen, Aufzugfahren, Radfahren etc. inwieweit nun Impulse, Drehimpulse, beides oder keines von beiden an diesen Vorgängen beteiligt ist? Um so wichtiger ist es sich die Größen nicht nur anschaulich klar zu machen, sondern vor allem auch zu erkennen, dass diese beiden physikalischen Größen als eine Analogie verstanden werden können.

Sinn dieser Versuchsreihe ist Ihnen eine Möglichkeit zu geben durch Versuche sich diese Analogie besser vor Augen führen zu können. Sie soll Ihnen dabei helfen mit dem Basiswissen über den Impuls, Formeln und Gesetze für den Drehimpuls finden oder bestätigen zu können. Gleichzeitig stellt diese Versuchsreihe eine Gelegenheit dar, etwas in den praktischen Arbeitsalltag des Physikers schauen zu können. Dies beinhaltet ebenfalls die Probleme, mit denen Physiker bei Versuchen konfrontiert werden können.

Vorbereitung des Versuchstages

Für den Versuchstag sind folgende Dinge mitzubringen:

- ✓ Taschenrechner
- ✓ Schreibsachen
- ✓ Block für Auswertungen
- ✓ USB-Speicherstick
- ✓ Digitalkamera
- ✓ Laborbuch
- ✓ Gute Laune und Freude am Experimentieren :-)

Das Laborbuch sollte vorbereitet sein. Das bedeutet Sie sollten vor dem Versuchstag folgendes tun:

- ✓ die Hinweise in Kapitel B und C durcharbeiten
- ✓ die Versuchsbeschreibungen durchlesen
- ✓ sich Gedanken über den jeweiligen Versuchsaufbau machen
- ✓ eventuell schon Tabellen für die Versuchsauswertung erstellen
- ✓ eventuell schon theoretische Aufgabenstellungen lösen

B. HINWEISE ZU MESSUNGEN

I. Messungenauigkeiten und äußere Einflüsse

Bei allen Messversuchen kann es Messungenauigkeiten und äußere Einflüsse geben, die das Ergebnis verfälschen. Für Versuche jeglicher Art ist daher erforderlich, mit möglichst geringem Fehler Messungen vorzunehmen, äußere Einflüsse einzudämmen und von der Theorie abweichende Messergebnisse richtig zu deuten.

Auch in diesem Versuch gibt es einige Faktoren, die die Messergebnisse verfälschen können.

Äußere Einflüsse:

1. Einer der wichtigsten Einflüsse auf alle Messversuche ist die Reibung. Selbst Körper, die rollen können, haben eine bestimmte Rollreibung, d.h. Reibungsverluste. Dies ist auch bei Kugellagern der Fall, wobei der Reibungsverlust hierbei von der Qualität des Kugellagers abhängt.
2. Ein weiterer Einfluss stellt die Gewichtskraft dar. Unsere Versuche finden alle in einer annähernd horizontalen Ebene statt. Rein theoretisch hat die Gewichtskraft somit keinen Einfluss auf beispielsweise in dieser Ebene rollende Kugeln oder rotierende Körper (von der Reibung abgesehen). Zwar ist es selbst mit einer Wasserwaage praktisch unmöglich Versuchsanordnungen derart perfekt auszurichten, dass die Gewichtskraft keinen Einfluss hat. Dennoch ist bei einer ordentlichen Ausrichtung mit Hilfe einer Wasserwaage dieser Einfluss vernachlässigbar.

Messungenauigkeiten:

1. Sämtliche Messungen, bei denen der Mensch selbst durch seine Reaktionszeit, Augenmaß usw. involviert ist, sind zu einem bestimmten Grad ungenau. Je kleiner die Größen sind, die gemessen werden, umso größer ist dabei die prozentuale Ungenauigkeit.
Im Versuch betrifft das folgende Messungen:
 - a) Die mit einer Stoppuhr gemessene Zeit ist mehr oder weniger ungenau, da diese von der Reaktionszeit abhängt.
 - b) Die Auslenkung des Pendels um eine bestimmte Gradzahl ist ebenfalls nur ungenau bestimmbar. Dies zum einen da die Skala nur in 10° -Schritte aufgeteilt ist, zum anderen weil das Augenmaß ebenfalls geringe Fehler aufweisen kann.
2. Auch Messgeräte messen niemals genau. Allerdings ist in unseren vorliegenden Versuchen mit einer meist vernachlässigbaren Abweichung zu rechnen.

II. Eindämmen von Messungenauigkeiten

Eine wichtige Frage ist, wie Messungenauigkeiten so klein wie möglich gehalten werden können. Für die Versuchsreihe sind folgende Strategien empfehlenswert:

1. Zeitmessungen:
Wird die Zeit mit der Stoppuhr gemessen, ist diese meist ungenau. Der Grund ist, dass aufgrund der menschlichen Reaktionszeit entweder zu früh oder zu spät gestartet/gestoppt wird. Je nachdem wie groß die Zeitspanne ist, umso gravierender macht sich dieser Messfehler bemerkbar. Beispielsweise ist ein Messfehler von einer halben Sekunde weniger gravierend bei einer Messung im Minutenzeitraum. Dauert die Messung jedoch nur einige Sekunden, so ist die Abweichung deutlich höher. In der vorliegenden Versuchsreihe werden wir es meist mit Messungen im Sekundenzeitraum zu tun haben. Wir benötigen daher Strategien diese Messfehler einzudämmen:
 - a) Eine Messung wird mehrmals vorgenommen und der arithmetische Mittelwert berechnet.

- b) Bei periodischen Vorgängen (z.B. Drillachsen-Versuche) misst man die Zeit für mehrere Schwingungen (z.B. fünf) und errechnet daraus die Zeit für eine Schwingung. Ferner sollte die Messung nicht sofort mit dem Schwingbeginn vorgenommen werden, sondern besser erst, wenn der erste Umkehrpunkt erreicht wird.
2. Falls möglich sollten Versuche, die in der horizontalen Ebene stattfinden sollen, so gut wie möglich mit Hilfe einer Wasserwaage ausgerichtet werden. Näheres dazu im Eingangsvortrag vor Versuchsbeginn.
 3. Auch bei Messungen mit Messgeräten bietet es sich an mehrere Messungen durchzuführen und dann den Mittelwert zu bestimmen.

C. ARBEITSWEISE

Experimentieren in der Physik:

In der Physik verläuft eigentlich jeder Versuch in derselben Grundstruktur ab:

- ✓ Vorüberlegung zu dem Experiment:
 - ✗ Was will man zeigen/überprüfen/herausfinden?
 - ✗ Wie kann man das in einem Versuch realisieren?
 - ✗ Wo können Messfehler auftreten und wie kann man sie möglichst gering halten?
- ✓ *Vor* Versuchsbeginn die eigenen Erwartungen in Vorhersagen formulieren.
- ✓ Durchführung des Experiments
- ✓ Überprüfung der eigenen Vorhersage:
 - ✗ Sind die Messfehler/Abweichungen vom erwartete Wert so gering, dass die Vorhersage bestätigt wird?
 - ✗ Sind die Messfehler/Abweichungen zu groß, so muss überlegt werden:
 - Wurde eine mögliche Quelle für Messfehler übersehen?
 - Ist der Einfluss einer anderen physikalischen Größe übersehen worden (z.B. Energieverluste durch Reibung wurden im Energieerhaltungssatz nicht beachtet)?

Die Anwendung dieser Grundstruktur wird in diesem Versuch von Ihnen *auch ohne Hinweise* erwartet!

Auswertung von Versuchen

Für wichtige Ergebnisse wie Formeln gibt es im Laborbuch extra Kästchen bzw. Tabellen zum Eintragen!

Die Auswertung von Versuchen erfolgt ansonsten über das selbständige Anlegen von Tabellen etc.

Beispieltabelle für Aufgabe II.1.2.:

	Bahngeschwindigkeit	Winkelgeschwindigkeit	Radius
Markierung 1			
Markierung 2			
Markierung 3			
Markierung 4			

D. DIE VERSUCHE

Die Versuche zielen darauf ab, Grundlagen zu legen, bzw. wichtige Größen einzuführen und Zusammenhänge herzuleiten. Um dies zu erreichen ist es unabdingbar auch theoretische Überlegungen miteinzubeziehen, d.h. es existieren auch Aufgabenstellungen, die nicht praktischer Natur sind. Dennoch stellt die Versuchsreihe ein Praktikum dar, d.h. der Löwenteil besteht aus dem Aufbau von Versuchen und Messungen.

Für den Aufbau und die Versuchsdurchführung ist folgendes zu beachten:

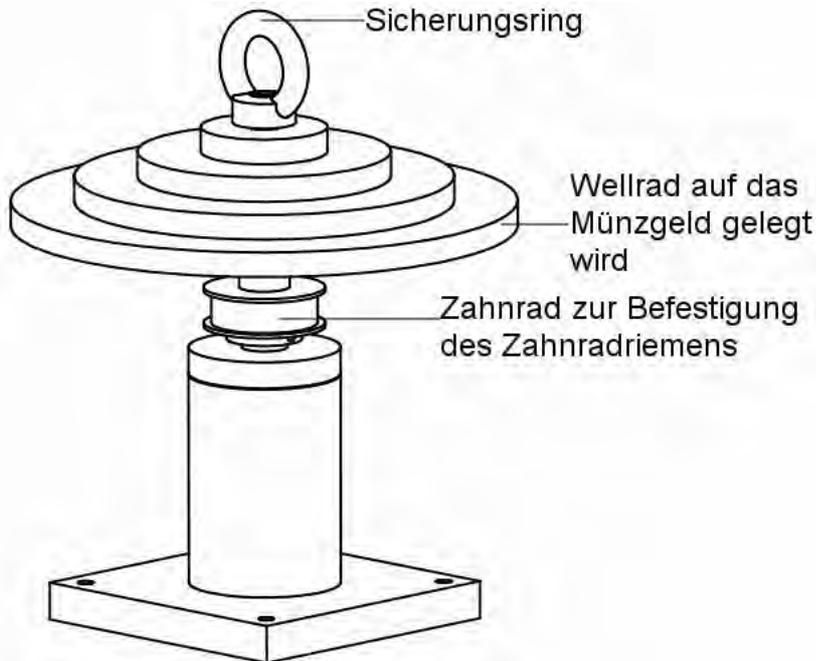
1. Wir haben es hier meist mit schweren Massen oder hohen Geschwindigkeiten von kleinen Massen zu tun. Das bedeutet, dass folgende Dinge beachtet werden sollten.
 - a) Schrauben müssen immer fest gezogen sein.
 - b) Angeschraubte Gewichte müssen fest sitzen.
 - c) Geschosse jeglicher Art dürfen nicht in die Richtung anderer Personen gehen. Hierbei ist auch zu beachten, dass der Verlauf von Geschossen durch kreisförmige Kugelbahnen abgeändert wird.
2. Mit der Kugelabschussvorrichtung werden Stahlkugeln verschossen, d.h. es ist Vorsicht und Umsicht geboten. Die Abschussvorrichtung darf aus diesem Grund auch nur für Messungen benutzt werden. Unsachgemäße Spielereien jeglicher Art sind hierbei untersagt!
3. Lichtschranken müssen so platziert werden, dass sie nicht von Gewichten getroffen werden, bzw. dass sich das Kabel nicht in der Bahn von rotierenden Teilen befindet.
4. Die Software des XPlorer bleibt ab und zu „hängen“, d.h. auf Eingaben wird nicht mehr reagiert. In diesem Fall muss der Versuchsleiter geholt werden.
5. Bei den Stoßversuchen werden nicht Kugeln, sondern Zylinder verwendet. Um einen optimalen Stoß zu erhalten müssen die stoßenden Zylinder um 90° gedreht zueinander stehen.
6. Vor dem Einschalten von technischen Geräten immer erst den Versuchsleiter rufen.
7. Die Kraftmesser werden direkt an den XPlorer angeschlossen. Für die Lichtschranken benötigt man die Digitaladapter als Zwischenstück. An einen Digitaladapter können nur zwei Lichtschranken angeschlossen werden.

I. Zentrifugalkraft

Die Zentrifugalkraft ist eine Trägheitskraft der Rotationsbewegung. Befindet man sich in einem rotierenden System (z.B. Auto in der Kurve) fühlt man die Auswirkung dieser Kraft, während sie von einem äußeren Beobachter (z.B. Passant am Straßenrand) nicht erkennbar ist.

Hinweis: Holen Sie *vor* dem Einschalten den Versuchsbetreuer zum Überprüfen der Anordnung!

Versuchsaufbau I.1.:



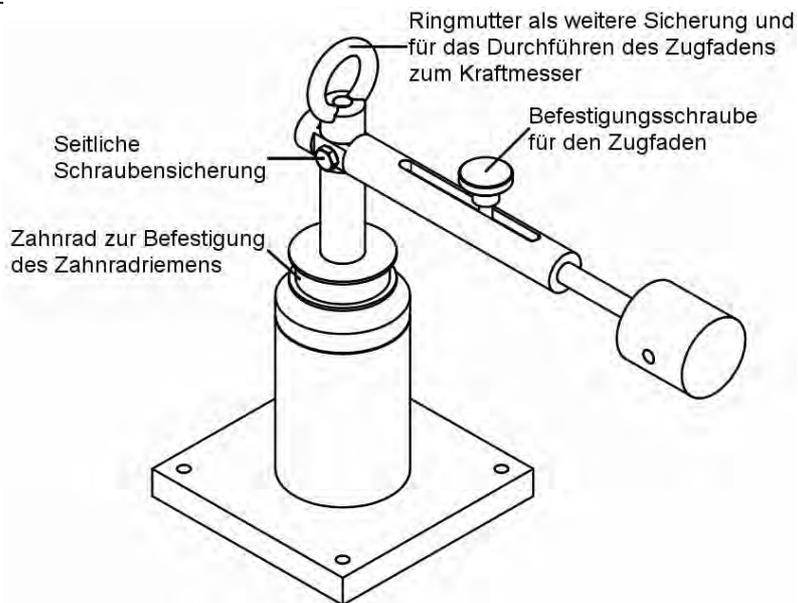
Aufgabenstellung I.1:

Befestigen Sie den Zahnradriemen an dem Elektromotor und der Drehachse. Setzen Sie anschließend das Wellrad auf. Verbinden Sie den Elektromotor mit dem Labornetzgerät (Farbcodierung der Stecker beachten!).

Aufgabe I.1.:

- Legen Sie gleich schwere Euromünzen auf verschiedene Scheiben. Überlegen Sie in welcher Reihenfolge die Münzen bei stetig ansteigender Drehgeschwindigkeit von dem Wellrad herunterrutschen. Überprüfen Sie Ihre Vermutung. Zu welchem Ergebnis kommen Sie?
- Wie müssten ein 1-Cent-Stück und ein 1-Euro-Stück gelegt werden, damit diese gleichzeitig von dem Wellrad rutschen?
- Versuchen Sie einen Weg zu finden, mit dem Sie unterscheiden können, ob eine 10-Cent-Münze oder eine 5-Cent-Münze schwerer ist. Überprüfen können Sie Ihr Ergebnis mit der Feinwaage.

Versuchsaufbau I.2.:



Aufgabenstellung I.2:

Setzen Sie statt dem Wellrad den Teleskopstab auf die Achse und sichern Sie sie mit der seitlichen Schraube und der Ringmutter. Befestigen Sie den Zugfaden an der Laufstange, führen Sie sie durch die Ringmutter an der Drehachse und befestigen Sie sie an dem Kraftmesser.

Aufgabe I.2.:

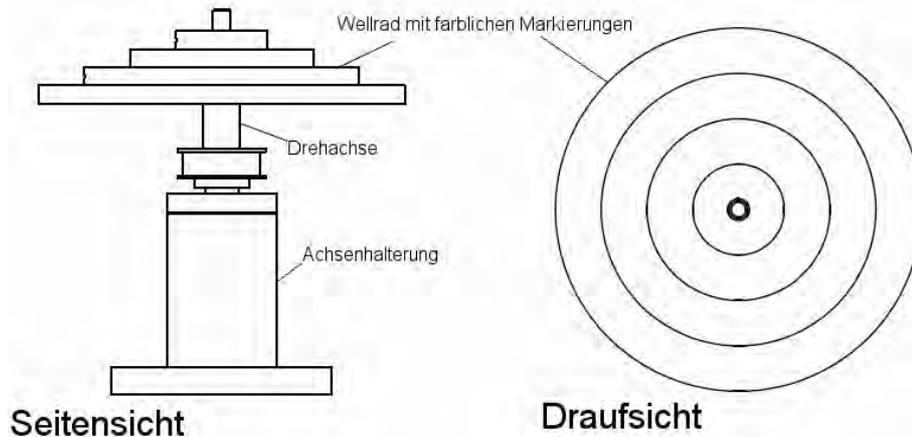
- Bestimmen Sie die Zugkraft zum Einziehen des Stabes für verschiedene Spannungen $0V \leq U_i \leq 15V$, die am Elektromotor anliegen und tragen Sie sie in einem Diagramm auf.
- Im Schaubild gibt es einen Punkt, in dem sich das Verhalten der Spannung ändert. Was für eine besondere Stelle markiert diese Spannung U_G ? Erläutern Sie die Kräfte, die man für diesen Fall erfindet und diskutieren Sie mit Hilfe Ihrer Erkenntnisse den Kurvenverlauf.

**Überprüfen Sie, ob Analogien vorliegen
und tragen Sie diese gegebenenfalls in Ihre Übersicht ein!**

II. Winkeländerung, Winkel- und Bahngeschwindigkeit

Der nachfolgende Versuch dient dazu, die Größen Winkeländerung, Winkelgeschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit und deren Zusammenhang zu veranschaulichen.

Versuchsaufbau II.1.:



Eines der Drehstative wird auf der Laborplatte befestigt. Die 360°-Winkelskala wird an die Grundplatte gelegt. Auf die Drehachse wird nun das Wellrad mit den farblichen Markierungen gesetzt und mit der Ringmutter festgezogen. Für Messungen stehen Stoppuhr und Lichtschranke zur Verfügung.

Aufgabenstellung II.1.:

Im ersten Aufgabenteil sollen die Positionen der Markierungen vor und nach Drehung des Wellrads angegeben werden. Hierzu wird erstens (relativ zu der angelegten Skala) der Auslenkwinkel bestimmt und zweitens der Abstand der Markierung zur Achse gemessen (Radius). Wir bedienen uns hier also einem Koordinatensystem, das nicht mit x- und y-Werten, sondern mit dem Winkel und dem Radius arbeitet. Dieses Koordinatensystem wird auch *ebenes Polarkoordinatensystem* genannt.

Aufgabe II.1.1.:

- Bestimmen Sie die Positionen der Markierungen vor und nach der Drehung.
- Was könnte bei Rotationen der Vorteil der Verwendung der ebenen Polarkoordinaten gegenüber eines anderen Koordinatensystems sein?
- Begründen Sie, ob Radius oder Winkel das Drehimpuls-Analogon zur Strecke des Impulses darstellt.

Aufgabe II.1.2.:

- Überlegen Sie, wie Sie die Kreisbahngeschwindigkeit und die Winkelgeschwindigkeit der einzelnen Markierungen für eine erneute (beliebige) Rotation berechnen könnten und führen Sie entsprechende Messungen und Berechnungen durch.
- Wie hängen Bahngeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit und Bahnradius zusammen? Stellen Sie eine Formel auf und überprüfen Sie diese anhand der errechneten Werte.

(Formel II.1.2.)

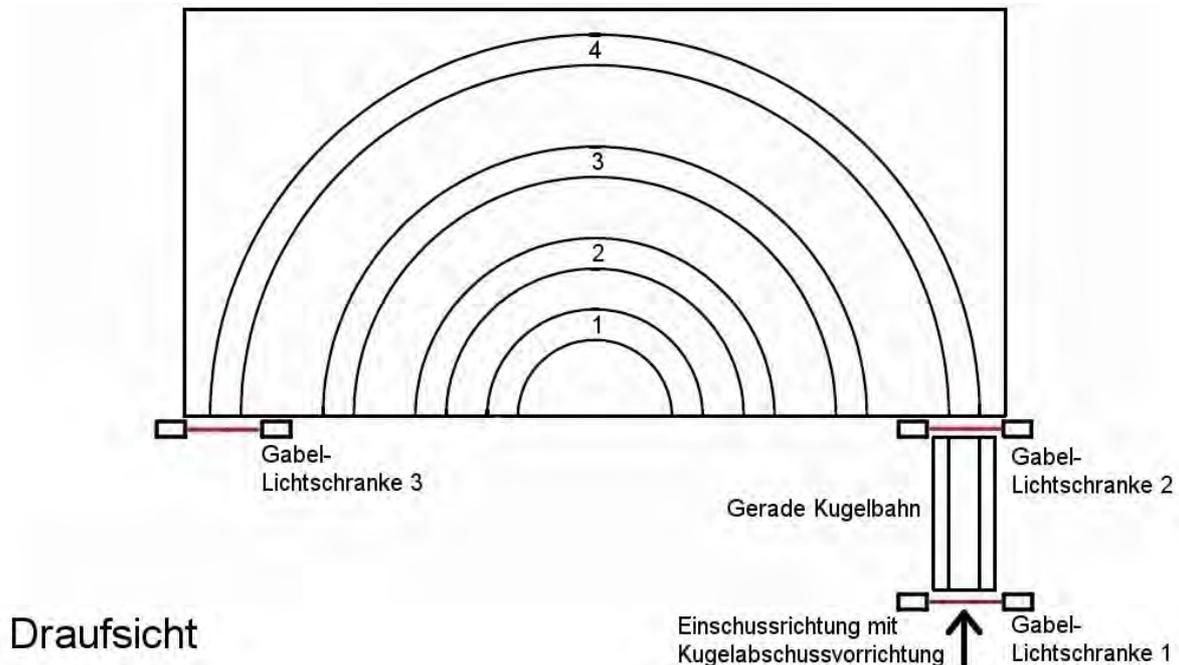
- Ist die Winkelgeschwindigkeit oder die Bahngeschwindigkeit das Drehimpuls-Analogon zur Strecke des Impuls bzw. existiert überhaupt ein solches Analogon?

**Überprüfen Sie, ob Analogien vorliegen
und tragen Sie diese gegebenenfalls in Ihre Übersicht ein!**

III. Die Rotationsenergie

Fraglich ist nun, ob es so etwas wie eine Rotationsenergie gibt, und wie man diese im gegebenen Fall verstehen darf. Dieser Frage widmet sich der nächste Versuchsteil.

Versuchsaufbau III.1.:



Aufgabenstellung III.1.:

Die Kugelbahn wird mit der Plexiglasscheibe abgedeckt.

Es sollen nun verschiedene Massenkügelchen mit Hilfe der Abschussvorrichtung über eine gerade Bahn auf vier verschiedene Kreisbahnen geschossen werden. Für Messungen stehen drei Lichtschranken zur Verfügung.

Die Radien der vier halbkreisförmigen Kugelbahnen betragen 9cm, 16cm, 25cm und 36cm.

Aufgabe III.1.:

a) Die Rotationsenergie ist gegeben durch

$$E_{\text{ROT}} = \frac{1}{2} \cdot m r^2 \cdot \omega^2$$

Bestimmen Sie die Rotationsenergien der einzelnen Kugeln in den Bahnen 1 bis 4.

- b) Welche Energieart besitzt die Kugel auf der geraden Kugelbahn? Liegt eine Energieerhaltung beim Übergang in die Kreisbahn vor?
- c) Haben Sie eine Idee wie die Formel für die Rotationsenergie gefunden wurde? Erklären Sie Ihre Idee genauer!
- d) Ist die Rotationsenergie ein Drehimpuls-Analogon zum Impuls? Wenn ja, zu welcher Größe?

**Überprüfen Sie, ob Analogien vorliegen
und tragen Sie diese gegebenenfalls in Ihre Übersicht ein!**

IV. Das Trägheitsmoment

Das Drehimpuls-Analogon zur (trägen) Masse stellt bei der Rotation das sogenannte *Trägheitsmoment* dar und kann somit als die Drehträgeit einer rotierenden Massen angesehen werden.

Aufgabe IV.0.:

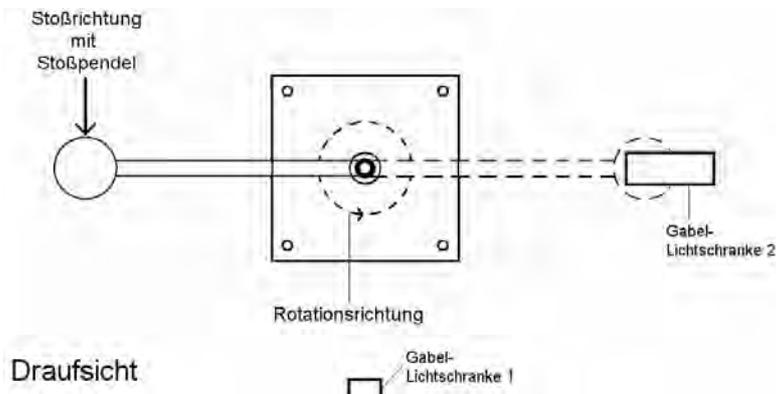
a) Vergleichen Sie die Formeln der kinetischen Energie mit der der Rotationsenergie. Das Trägheitsmoment soll mit dem Formelzeichen „I“ abgekürzt werden. Wie ist das Trägheitsmoment dem Vergleich nach definiert?

$$I = \quad \text{(Formel IV.0.a.)}$$

b) Stellen Sie die Formel der Rotationsenergie in Abhängigkeit des Trägheitsmoments I und der Winkelgeschwindigkeit ω auf.

$$E_{\text{ROT}} = \quad \text{(Formel IV.0.b.)}$$

Versuchsaufbau IV.1.:



Aufgabenstellung IV.1.:

An das Drehstativ wird eine waagrechte Haltestange mit einer Drehmasse geschraubt. Mit dem Stoßpendel wird die Drehmasse angestoßen. Gemessen werden soll die Umdrehungsdauer. Der Versuch wird für verschieden lange Haltestangen wiederholt.

Aufgabe IV.1.:

- Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeiten der Rotationen.
- Berechnen Sie für eine der oberen Massen das Trägheitsmoment mit Hilfe Ihrer gefundene Formeln in IV.0.a. und IV.0.b..

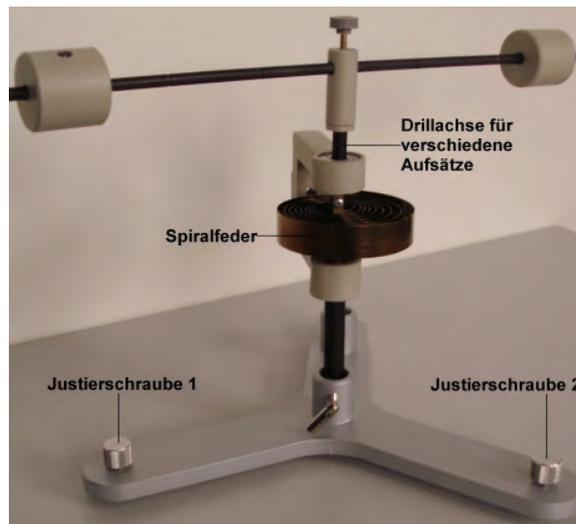
	Formel IV.0.a.	Formel IV.0.b.
Trägheitsmoment		

c* Beim Vergleichen der errechneten Werte aus b) werden Sie feststellen, dass die Ergebnisse nicht übereinstimmen. Was könnten die Gründe hierfür sein?

Die Formel IV.0.a. ist nur für punktförmige Massen, die um eine Achse außerhalb der Masse rotieren. Das Trägheitsmoment von Körpern wird jedoch bei jedem Körper je nach seiner Form, seiner Schwerpunktsachse und nach seiner Drehachse durch unterschiedliche Formeln berechnet. Schauen Sie sich die in der Anlage befindlichen Tabelle zu den Trägheitsmomenten an.

d* Berechnen Sie für eine der rotierenden Massen das Trägheitsmoment mit Hilfe der Formeltabelle. Welcher gemessene Wert in b) sollte diesem am nächsten kommen und welcher ist tatsächlich der naehste? Was könnte der Grund hierfür sein?

Versuchsaufbau IV.2.:



Versuchsteil IV.2.:

In den nächsten drei Versuchsteilen wird die Drillachse verwendet.

Hinweis: die Drillachse darf nur *maximal eine* Drehung ausgelenkt werden.

Aufgabenstellung IV.2.1.:

Die Schneckenfeder ist für das Schwingen der ausgelenkten Masse verantwortlich. Die Winkelrichtgröße D ist eine charakteristische Größe der Schneckenfeder und entspricht der Federkonstanten einer Spiralfeder.

Sie ist gegeben durch die Formel

$$D = 4\pi^2 \cdot \frac{I}{T^2}$$

Aufgabe IV.2.1.1.:

- Wie könnte man diese Formel überprüfen, wenn D wirklich die charakteristische Größe für eine Schneckenfeder ist, d.h. für diese konstant bleibt?
- Wie hat sich das Trägheitsmoment verändert, wenn sich die Schwingungsdauer verdoppelt bzw. halbiert?
- Wie muss sich die Schwingungsdauer geändert haben, damit sich das Trägheitsmoment um 25% vergrößert hat?

Aufgabe IV.2.1.2.:

Finden Sie mit den gegebenen Versuchsteilen einen Weg die Winkelrichtgröße der Schneckenfeder zu bestimmen.

Aufgabenstellung IV.2.2.:

Messen Sie die Schwingungsdauer der drei Hauptachsen des Quaders, der beiden Hauptachsen des Zylinders und der Hauptachse des Hohlzylinders.

Aufgabe IV.2.2.:

- Berechnen Sie die Trägheitsmomente der einzelnen Körper.
- Berechnen Sie die Trägheitsmomente mit Hilfe der Anlage zu den Trägheitsmomenten und vergleichen Sie mit Ihren errechneten Werten aus a).

Lesen Sie sich den Steiner'schen Satz in der Anlage durch.

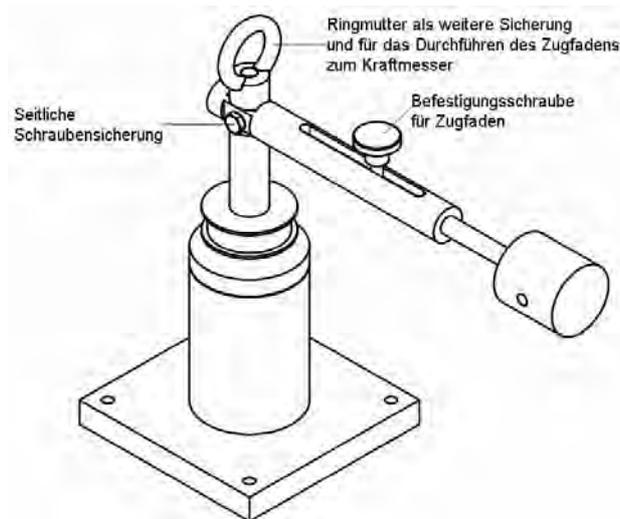
Aufgabenstellung IV.2.3.:

Setzen Sie die Drehscheibe mit dem vorgegebenen Trägheitsmoment nacheinander mit den nicht mittigen Bohrungen auf die Drillachse und messen Sie die Schwingungsdauer.

Aufgabe IV.2.3.:

- Berechnen Sie mit Hilfe der gemessenen Schwingungsdauer T und der in IV.2.1. errechneten Winkelrichtgröße D die verschiedenen Trägheitsmomente des Drehkörpers.
- Berechnen Sie die Trägheitsmomente des Drehkörpers mit Hilfe des Steinerschen Satzes und vergleichen Sie mit Ihren errechneten Werten aus a).

Versuchsaufbau IV.3.:



Aufgabenstellung IV.3.:

Es wird wieder eine der drei normalen Drehachsen verwendet. Setzen Sie den Teleskopstab auf die Achse und schrauben Sie sie zuerst von der Seite fest. Schrauben Sie dann die Ringmutter auf die Achse. Befestigen Sie dann den Zugfaden an der Laufstange, führen Sie sie durch die Ringmutter an der Drehachse.

Aufgabe IV.3.:

- Versetzen Sie die ausgefahrene Masse per Hand in Drehung (am besten in Uhrzeigersinn). Ziehen Sie dann den Stab ein.
Welche Beobachtung machen Sie beim Einziehen des Stabs die Winkelgeschwindigkeit betreffend?
- Warum ist dieser Effekt nicht auch bei dem Elektromotor-Versuchsteil I.2. nicht aufgetreten?
- Das Trägheitsmoment der Rotationsbewegung ist das Analogon zur (trägen) Masse der Translationsbewegung. In welcher Eigenschaft unterscheiden sie sich diesem Versuch zur Folge aber dennoch?

**Überprüfen Sie, ob Analogien vorliegen
und tragen Sie diese gegebenenfalls in Ihre Übersicht ein!**

V. Die Drehimpulserhaltung

Die Drehimpulserhaltung ist das Drehimpuls-Analogon zur Impulserhaltung des Impulses.

Aufgabe V.0.:

Der Drehimpuls ist definiert mit $\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$. Begründen Sie anhand der Formel und aufgrund Ihrer bisherig gewonnen Analogie-Erkenntnisse warum der Drehimpuls somit auch wirklich eine Analogie zum Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ ist.

Versuchsaufbau V.1.:



Gegeben Sind Ihnen oben gezeigte Versuchsbestandteile:

1. Zwei Drehstative, zwei Stoßzylinder und zwei Sets mit vier verschieden langen Haltestangen.
2. Zwei übereinander gelagerte Drehscheiben, zwei Stoßkörper, zwei Stoßfeder und Knete.

Aufgabenstellung V.1.:

Inelastische und elastische Stöße sind in der Impuls-Thematik beliebte Impulserhaltungsaufgaben. In diesem Aufgabenteil soll nun die Drehimpulserhaltung näher betrachtet werden.

Aufgabe V.1.:

- a. Finden Sie mindestens je einen Versuch, bei dem die Drehimpulserhaltung analog einmal der Impulserhaltung eines elastische Stoßes und das andere Mal der Impulserhaltung eines inelastischen Stoßes entspricht.
- b. Wählen Sie einen Ihrer Versuche aus und diskutieren Sie welche Erhaltungssätze in diesem gefunden werden können.
- c. Die Drehimpulserhaltung existiert in zwei Formen: betragsmäßige und vektorielle/wirkliche Drehimpulserhaltung. Teilen Sie Ihre gefundenen Versuche in diese beiden Erhaltungsformen ein.
- d. Handelt es sich bei dem Versuch IV.3. um eine Drehimpulserhaltung? Stellen Sie gegebenenfalls eine Drehimpulserhaltungsgleichung auf und entscheiden Sie ob die Drehimpulserhaltung betragsmäßig oder vektoriell ist.

**Überprüfen Sie, ob Analogien vorliegen
und tragen Sie diese gegebenenfalls in Ihre Übersicht ein!**

VI. Das Drehmoment

Beim Impuls ist die Kraft für eine Impulsänderung zuständig. Solange eine Kraft auf einen Körper wirkt, ändert sich die Geschwindigkeit und somit der Impuls.

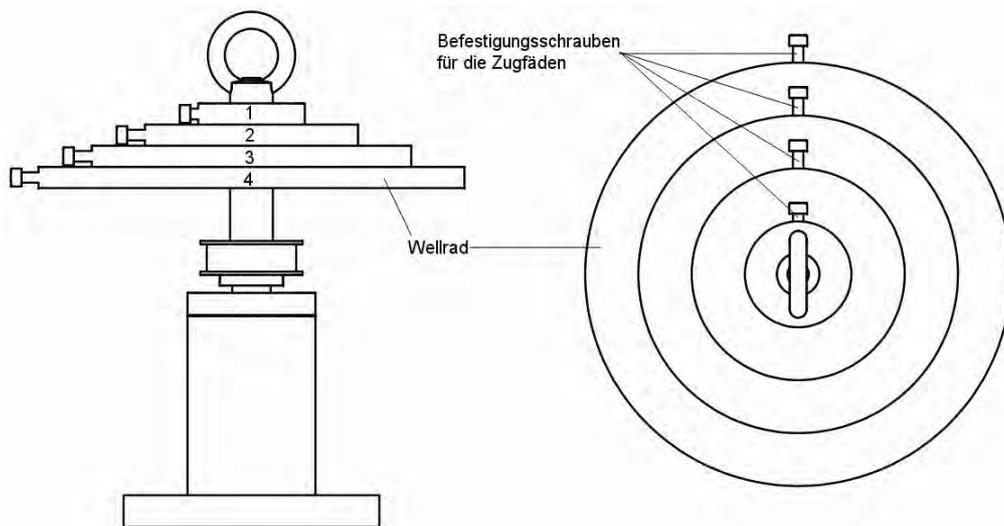
Das Drehimpuls-Analogon zur Kraft ist das **Drehmoment** \vec{M} .

Solange ein Drehmoment auf einen rotierenden Körper wirkt, ändert sich die Winkelgeschwindigkeit und somit der Drehimpuls.

Aufgabe VI.0.:

In Versuchsteil IV.2. wurde die Winkelrichtgröße D eingeführt. Angeblich sollte es dieselbe Bedeutung für Schneckenfedern haben, wie die Federkonstanten k für Spiralfedern. Für die Federkonstanten k gilt die Gleichung $\vec{F} = -k \cdot \vec{s}$. Begründen Sie anhand dieser Formel und Ihren bisherigen gesammelten Analogie-Erkenntnissen, warum für das Drehmoment neben der in IV.2. genannten Formel auch die Formel $\vec{M} = D \cdot \vec{\theta}$ gilt.

Versuchsaufbau VI.1.:



Aufgabenbeschreibung VI.1.:

Setzen Sie das Wellrad auf eines der Drehstative. An jeweils zwei unterschiedlichen Schrauben werden über Schnüre zwei Kraftmesser befestigt. Die Schnüre werden dabei so angebracht, dass der Zug an einem Kraftmesser einen Gegenzug am anderen Kraftmesser verursacht und sollten deswegen einmal um den jeweiligen Wellradabschnitt gelegt werden.

Gemessen wird mit Hilfe der beiden Kraftmesser. Versuchen Sie hierbei gleichmäßig die Zugkraft zu steigern. Tragen Sie die beiden Kräfte im Data-Studio übereinander auf.

Wiederholen Sie die Messung für jede Kombinationsmöglichkeit (insgesamt 6 Möglichkeiten).

Aufgabe VI.1.:

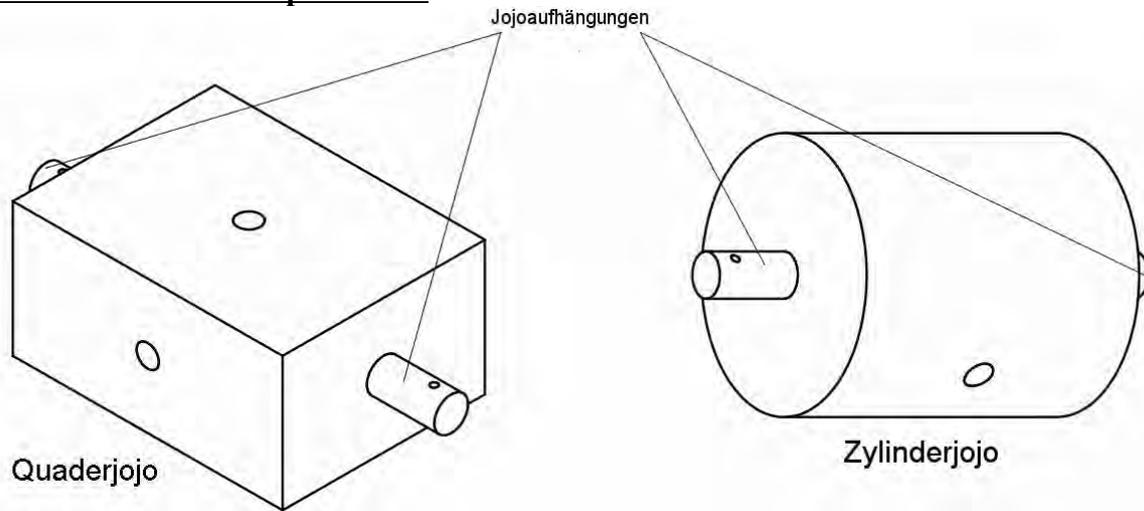
- Bestimmen Sie die Steigung der im Schaubild entstehenden (groben) Geraden. Welche Bedeutung hat diese Steigung?
- Wie verhält sich die Steigung zum Verhältnis der Radien?
- Welcher Zusammenhang existiert hier mit dem Hebelgesetz? Beim Hebelgesetz wird die geleistete Arbeit über das Produkt Kraft mal Weg errechnet ($W = F \cdot s$). Stellen Sie für das Wellrad eine analoge Gleichung auf!

**Überprüfen Sie, ob Analogien vorliegen
und tragen Sie diese gegebenenfalls in Ihre Übersicht ein!**

VII. Anwendungen und Spielereien

In den nachfolgenden Versuchen sollen weniger Messungen vorgenommen, sondern obige Erkenntnisse noch einmal qualitativ angewendet werden.

Versuchsaufbau VII.1.: Körperrennen



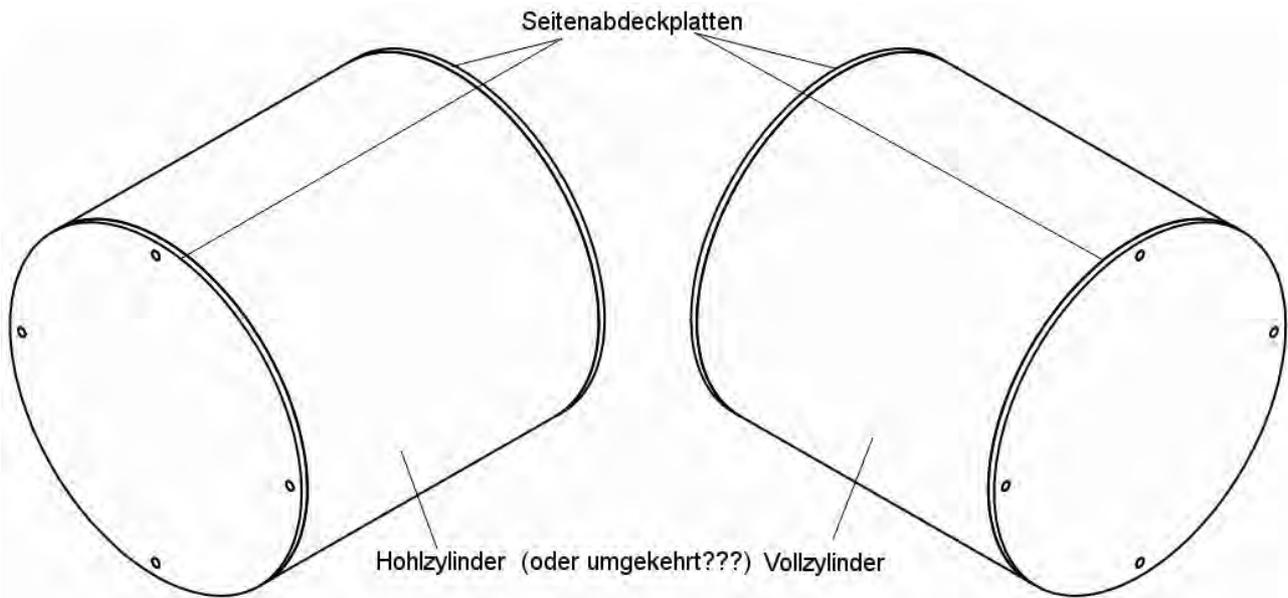
Aufgabenstellung VII.1.:

Ein Quader- bzw. ein Zylinder-Jojo (Maxwellsches Rad) können um drei bzw. zwei Achsen rotieren. Hierzu werden die beiden Achsenstücke eingeschraubt und an diesen der befestigte Faden aufgewickelt.

Aufgabe VI.1.:

- Überlegen Sie welcher Körper mit welcher Drehachse sich am schnellsten und am langsamsten abrollt.
- Nachdem die Räder abgerollt sind, steigen sie bei **richtiger Handhabung** wieder in die Höhe und die Haltefäden wickeln sich wieder auf. In welche Richtung muss sich dabei der Körper im Vergleich zum Abrollen drehen?
- Handelt es sich hierbei um Drehimpulserhaltung oder Energieerhaltung?

Versuchsaufbau VII.2.: Das Heureka-Prinzip



Aufgabenstellung VII.2.:

Als Archimedes von Syrakus von König Hieron II beauftragt wurde herauszufinden, ob dessen Krone aus reinem Gold wäre, stand der sizilianische Gelehrte vor dem Problem, dass er die Krone nicht beschädigen durfte. Über die Entdeckung des Archimedischen Prinzips gelang es ihm das Problem zu lösen. Der Überlieferung nach entdeckte er dies beim Baden und lief daraufhin unbekleidet und laut *Heureka!* rufend durch die Straßen.

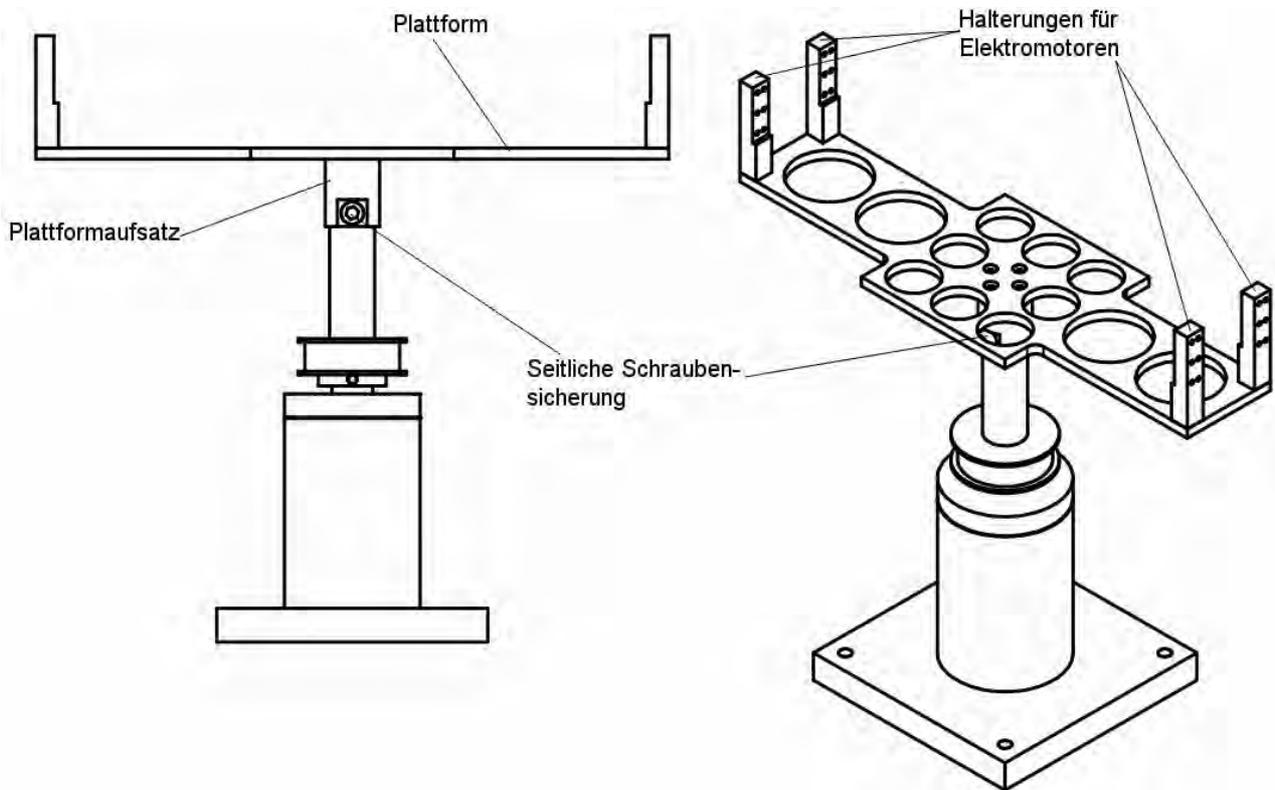
Im nachfolgenden Versuch soll ebenfalls ein Weg gefunden werden zwei nahezu identisch aussehende Körper als Zylinder und Hohlzylinder zu identifizieren.

Aufgabe VII.2.:

Versuchen Sie ohne Abschrauben der Seitenplatten herauszufinden, welcher der Hohlzylinder ist. (an die Seite klopfen zählt nicht als Lösung). Begründen Sie Ihre Wahl!

Versuchsaufbau VII.3.: Tandemdrehimpuls

Wichtig: Beachten Sie die Farbcodierung der Kabel! Rot an rot, schwarz an schwarz.
Holen Sie *vor* dem Einschalten den Versuchsbetreuer zum Überprüfen der Verkabelung!
Schalten Sie dann *zuerst* die Fernsteuerung an und stellen Sie *danach* die Schalter der Drehplattform auf on. (Abschalten erfolgt in umgekehrter Reihenfolge!)



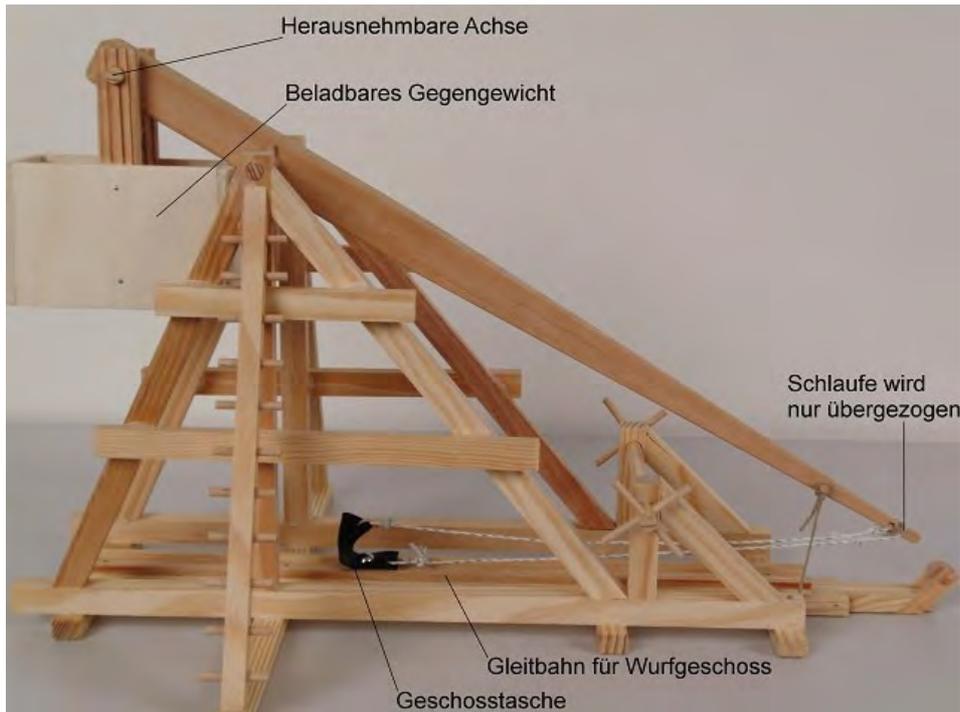
Aufgabenstellung VII.3.:

Setzen Sie die Plattform mit den beiden Elektromotoren auf eine der Drehachsen und befestigen Sie sie seitlich mit der dafür vorgesehenen Schraube. Verbinden Sie die Regler mit den Akkus.

Aufgabe VII.3.:

- Bedienen Sie zuerst nur einen Motor. Je stärker dieser erste Motor die kleine Drehscheibe antreibt um so stärker dreht sich die gesamte Plattform. Dasselbe Prinzip findet sich auch bei einem Hubschrauber, bei dem der Heckrotor ausfällt.
Drehen sich Rotor und Plattform in gleiche Richtung oder gegenläufig? Der drehende Rotor darf *sanft* mit den Fingern berührt werden.
- Halten Sie im Ruhezustand die Drehplattform fest und beschleunigen Sie den Motor auf eine feste Geschwindigkeit. Was beobachten Sie, wenn die Plattform losgelassen wird? Welche Größe muss demnach für das Drehen der Plattform verantwortlich sein?
- Versuchen Sie bei diesem Experiment Aussagen über die Größen Winkelgeschwindigkeit, Drehimpuls, Drehmoment und die Erhaltungssätze zu machen.
- Schalten Sie nun den zweiten Motor hinzu und versuchen Sie die drehende Plattform bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten abzufangen. In welche Richtung muss sich dieser zweite Motor drehen?
- Handelt es sich bei den beiden Rotoren um Drehimpulserhaltung oder heben sich lediglich die Drehmomente auf?

Versuchsaufbau VII.4.: Tribok



Aufgabenstellung VII.4.:

Der Tribok (Tribock, Trebuchet, Blide) ist eine mittelalterliche Wurfmaschine, die eine vergleichsweise hohe Genauigkeit hatte. Durch das Beladen des Gegengewichts kann die Wurfweite variiert werden. Ein Wurfgeschoss kann folgenderweise geschleudert werden:

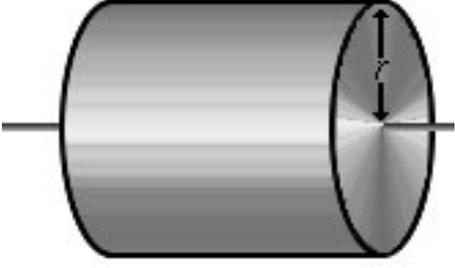
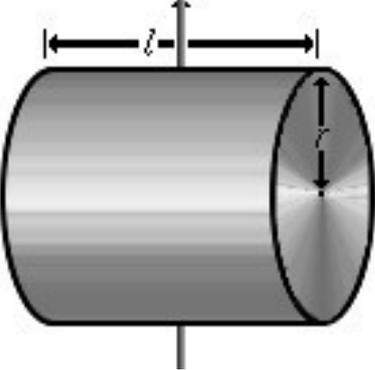
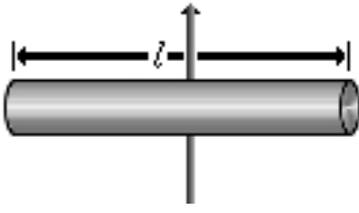
- Das Gegengewicht wird mit den Metallstücken beladen (maximal: 1kg).
- Die freie Schlaufe wird lose über die Spitze des Hebelarms gelegt.
- Der Hebelarm wird heruntergezogen und die Geschosstasche weit nach hinten auf die Schiene gelegt.
- Die Geschosstasche wird beladen.
- Vor dem Schuss darf sowohl *vor* als auch *hinter* dem Tribok niemand stehen (freie Schussbahn!)
- Vor dem Schuss einen Warnhinweis geben.

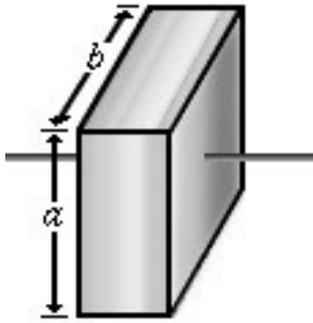
Aufgabe VII.4.:

- Die Bedienung des Triboks ist nicht einfach! Versuchen Sie den Wurf zu optimieren. Dafür stehen Ihnen verschiedene Gewichte für das Gegengewicht und verschieden Geschosse zur Verfügung.
- Grob kann der Wurf in die drei Phasen *Zugphase*, *Schwungphase* und *Auslösphase* unterteilt werden. Versuchen Sie diese Phasen näher zu erklären.
- Katapulte wie der Onager waren Wurfgeräte, bei denen die Geschosse direkt auf den Hebelarm platziert wurden. Wozu dient bei dem Tribok die Seilverlängerung?

E. ANHANG

Die Trägheitsmomente I_s für spezielle Rotationskörper wie Zylinder, Hohlzylinder, Kugel, Quader etc. mit spezieller Drehachse sind in Tabellenwerken vermerkt.

Rotationsmasse	Beschreibung	Trägheitsmoment
	Ein Vollzylinder, der um seine Symmetrieachse als Schwerpunktsachse rotiert.	$I_s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$
	Ein Hohlzylinder, der um seine Symmetrieachse als Schwerpunktsachse rotiert.	$I_s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_2^2 - r_1^2)$
	Ein Vollzylinder, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert, auf der auch der Zylinderschwerpunkt liegt.	$I_s = \frac{1}{4} \cdot m \cdot r^2 + \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$
	Ein dünner Stab, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert auf der auch der Schwerpunkt liegt.	$I_s = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$
	Eine massive Kugel, die um eine Achse durch ihren Mittelpunkt rotiert.	$I_s = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$



Ein massiver Quaderblock, der um seine Symmetrie-achse als Schwerpunktsachse rotiert.

$$I_s = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (a^2 + b^2)$$

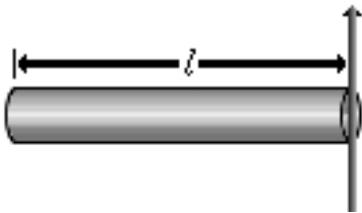
Der Steinersche Satz

Rotiert ein Körper mit der Masse m um eine Drehachse, die im Abstand h parallel zu der Drehachse der obigen Trägheitsmoment-Tabelle liegt, so gilt für das Trägheitsmoment:

$$I = I_s + m \cdot h^2$$

wobei I_s das tabellarisierte Trägheitsmoment ist.

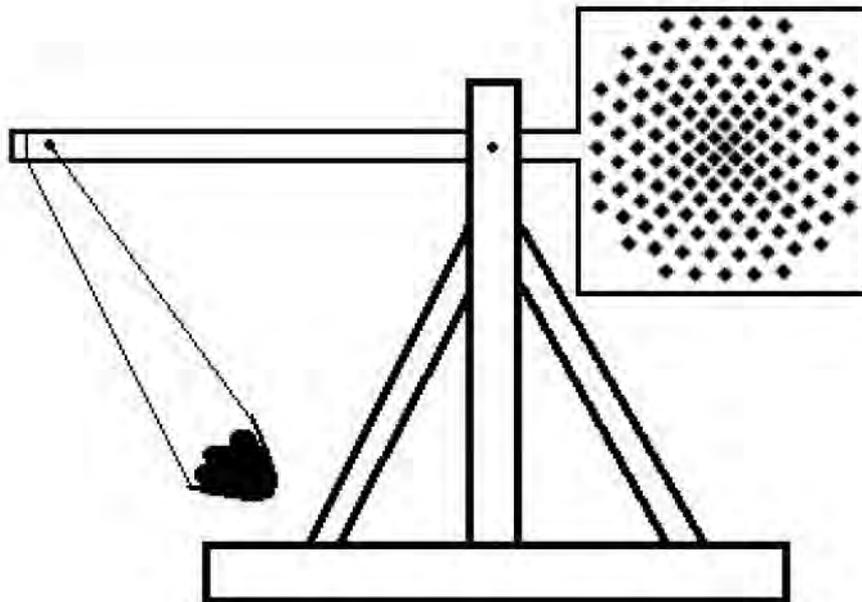
Beispiel:



Ein dünner Stab, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert, die am Ende des Stabes liegt.

$$\begin{aligned} I &= I_s + m \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2 \\ &= \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2 + \frac{1}{4} \cdot m \cdot l^2 \\ &= \frac{1}{3} \cdot m \cdot l^2 \end{aligned}$$

Laborbuch (Vorschlag)



Versuchsreihe:

Die Analogie von Impuls und Drehimpuls (DAVID)

Versuchsdatum:

Name:

A. EINLEITUNG

Die Größen Impuls und Drehimpuls sind so alltägliche Größen, dass wir uns oft nur unbewusst der Physik bedienen, die dahinter steckt. Denn wer überlegt sich schon beim normalen Gehen, Treppensteigen, Aufzugfahren, Radfahren etc. inwieweit nun Impulse, Drehimpulse, beides oder keines von beiden an diesen Vorgängen beteiligt ist? Um so wichtiger ist es sich die Größen nicht nur anschaulich klar zu machen, sondern vor allem auch zu erkennen, dass diese beiden physikalischen Größen als eine Analogie verstanden werden können.

Sinn dieser Versuchsreihe ist Ihnen eine Möglichkeit zu geben durch Versuche sich diese Analogie besser vor Augen führen zu können. Sie soll Ihnen dabei helfen mit dem Basiswissen über den Impuls, Formeln und Gesetze für den Drehimpuls finden oder bestätigen zu können. Gleichzeitig stellt diese Versuchsreihe eine Gelegenheit dar, etwas in den praktischen Arbeitsalltag des Physikers schauen zu können. Dies beinhaltet ebenfalls die Probleme, mit denen Physiker bei Versuchen konfrontiert werden können.

Vorbereitung des Versuchstages

Für den Versuchstag sind folgende Dinge mitzubringen:

- ✓ Taschenrechner
- ✓ Schreibsachen
- ✓ Block für Auswertungen
- ✓ USB-Speicherstick
- ✓ Digitalkamera
- ✓ Laborbuch
- ✓ Gute Laune und Freude am Experimentieren :-)

Das Laborbuch sollte vorbereitet sein. Das bedeutet Sie sollten vor dem Versuchstag folgendes tun:

- ✓ die Hinweise in Kapitel B und C durcharbeiten
- ✓ die Versuchsbeschreibungen durchlesen
- ✓ sich Gedanken über den jeweiligen Versuchsaufbau machen
- ✓ eventuell schon Tabellen für die Versuchsauswertung erstellen
- ✓ eventuell schon theoretische Aufgabenstellungen lösen

B. HINWEISE ZU MESSUNGEN

I. Messungenauigkeiten und äußere Einflüsse

Bei allen Messversuchen kann es Messungenauigkeiten und äußere Einflüsse geben, die das Ergebnis verfälschen. Für Versuche jeglicher Art ist daher erforderlich, mit möglichst geringem Fehler Messungen vorzunehmen, äußere Einflüsse einzudämmen und von der Theorie abweichende Messergebnisse richtig zu deuten.

Auch in diesem Versuch gibt es einige Faktoren, die die Messergebnisse verfälschen können.

Äußere Einflüsse:

1. Einer der wichtigsten Einflüsse auf alle Messversuche ist die Reibung. Selbst Körper, die rollen können, haben eine bestimmte Rollreibung, d.h. Reibungsverluste. Dies ist auch bei Kugellagern der Fall, wobei der Reibungsverlust hierbei von der Qualität des Kugellagers abhängt.
2. Ein weiterer Einfluss stellt die Gewichtskraft dar. Unsere Versuche finden alle in einer annähernd horizontalen Ebene statt. Rein theoretisch hat die Gewichtskraft somit keinen Einfluss auf beispielsweise in dieser Ebene rollende Kugeln oder rotierende Körper (von der Reibung abgesehen). Zwar ist es selbst mit einer Wasserwaage praktisch unmöglich Versuchsanordnungen derart perfekt auszurichten, dass die Gewichtskraft keinen Einfluss hat. Dennoch ist bei einer ordentlichen Ausrichtung mit Hilfe einer Wasserwaage dieser Einfluss vernachlässigbar.

Messungenauigkeiten:

1. Sämtliche Messungen, bei denen der Mensch selbst durch seine Reaktionszeit, Augenmaß usw. involviert ist, sind zu einem bestimmten Grad ungenau. Je kleiner die Größen sind, die gemessen werden, umso größer ist dabei die prozentuale Ungenauigkeit.
Im Versuch betrifft das folgende Messungen:
 - a) Die mit einer Stoppuhr gemessene Zeit ist mehr oder weniger ungenau, da diese von der Reaktionszeit abhängt.
 - b) Die Auslenkung des Pendels um eine bestimmte Gradzahl ist ebenfalls nur ungenau bestimmbar. Dies zum einen da die Skala nur in 10° -Schritte aufgeteilt ist, zum anderen weil das Augenmaß ebenfalls geringe Fehler aufweisen kann.
2. Auch Messgeräte messen niemals genau. Allerdings ist in unseren vorliegenden Versuchen mit einer meist vernachlässigbaren Abweichung zu rechnen.

II. Eindämmen von Messungenauigkeiten

Eine wichtige Frage ist, wie Messungenauigkeiten so klein wie möglich gehalten werden können. Für die Versuchsreihe sind folgende Strategien empfehlenswert:

1. Zeitmessungen:
Wird die Zeit mit der Stoppuhr gemessen, ist diese meist ungenau. Der Grund ist, dass aufgrund der menschlichen Reaktionszeit entweder zu früh oder zu spät gestartet/gestoppt wird. Je nachdem wie groß die Zeitspanne ist, umso gravierender macht sich dieser Messfehler bemerkbar. Beispielsweise ist ein Messfehler von einer halben Sekunde weniger gravierend bei einer Messung im Minutenzeitraum. Dauert die Messung jedoch nur einige Sekunden, so ist die Abweichung deutlich höher. In der vorliegenden Versuchsreihe werden wir es meist mit Messungen im Sekundenzeitraum zu tun haben. Wir benötigen daher Strategien diese Messfehler einzudämmen:
 - a) Eine Messung wird mehrmals vorgenommen und der arithmetische Mittelwert berechnet.

- b) Bei periodischen Vorgängen (z.B. Drillachsen-Versuche) misst man die Zeit für mehrere Schwingungen (z.B. fünf) und errechnet daraus die Zeit für eine Schwingung. Ferner sollte die Messung nicht sofort mit dem Schwingbeginn vorgenommen werden, sondern besser erst, wenn der erste Umkehrpunkt erreicht wird.
2. Falls möglich sollten Versuche, die in der horizontalen Ebene stattfinden sollen, so gut wie möglich mit Hilfe einer Wasserwaage ausgerichtet werden. Näheres dazu im Eingangsvortrag vor Versuchsbeginn.
 3. Auch bei Messungen mit Messgeräten bietet es sich an mehrere Messungen durchzuführen und dann den Mittelwert zu bestimmen.

C. ARBEITSWEISE

Experimentieren in der Physik:

In der Physik verläuft eigentlich jeder Versuch in derselben Grundstruktur ab:

- ✓ Vorüberlegung zu dem Experiment:
 - ✗ Was will man zeigen/überprüfen/herausfinden?
 - ✗ Wie kann man das in einem Versuch realisieren?
 - ✗ Wo können Messfehler auftreten und wie kann man sie möglichst gering halten?
- ✓ *Vor* Versuchsbeginn die eigenen Erwartungen in Vorhersagen formulieren.
- ✓ Durchführung des Experiments
- ✓ Überprüfung der eigenen Vorhersage:
 - ✗ Sind die Messfehler/Abweichungen vom erwartete Wert so gering, dass die Vorhersage bestätigt wird?
 - ✗ Sind die Messfehler/Abweichungen zu groß, so muss überlegt werden:
 - Wurde eine mögliche Quelle für Messfehler übersehen?
 - Ist der Einfluss einer anderen physikalischen Größe übersehen worden (z.B. Energieverluste durch Reibung wurden im Energieerhaltungssatz nicht beachtet)?

Die Anwendung dieser Grundstruktur wird in diesem Versuch von Ihnen *auch ohne Hinweise* erwartet!

Auswertung von Versuchen

Für wichtige Ergebnisse wie Formeln gibt es im Laborbuch extra Kästchen bzw. Tabellen zum Eintragen!

Die Auswertung von Versuchen erfolgt ansonsten über das selbständige Anlegen von Tabellen etc.

Die im Laborbuch schon aufgestellten Tabellen können als Hinweis dienen, wie Tabellen angelegt werden sollten.

D. DIE VERSUCHE

Die Versuche zielen darauf ab, Grundlagen zu legen, bzw. wichtige Größen einzuführen und Zusammenhänge herzuleiten. Um dies zu erreichen ist es unabdingbar auch theoretische Überlegungen miteinzubeziehen, d.h. es existieren auch Aufgabenstellungen, die nicht praktischer Natur sind. Dennoch stellt die Versuchsreihe ein Praktikum dar, d.h. der Löwenanteil besteht aus dem Aufbau von Versuchen und Messungen.

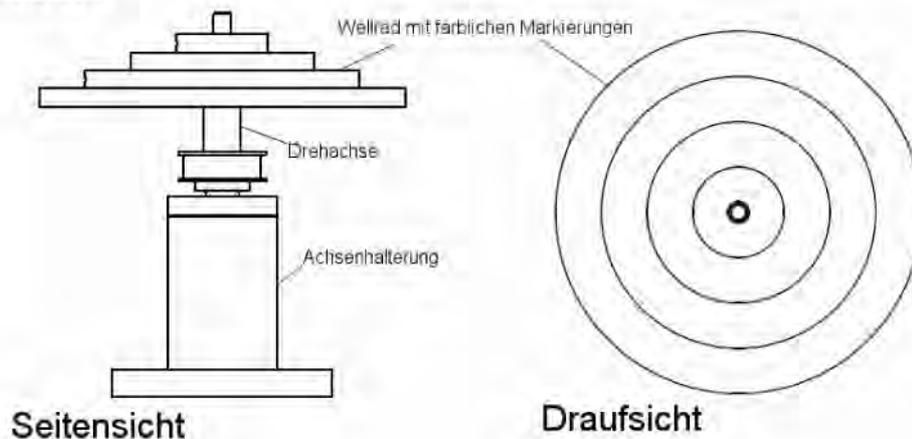
Für den Aufbau und die Versuchsdurchführung ist folgendes zu beachten:

1. Wir haben es hier meist mit schweren Massen oder hohen Geschwindigkeiten von kleinen Massen zu tun. Das bedeutet, dass folgende Dinge beachtet werden sollten.
 - a) Schrauben müssen immer fest gezogen sein.
 - b) Angeschraubte Gewichte müssen fest sitzen.
 - c) Geschosse jeglicher Art dürfen nicht in die Richtung anderer Personen gehen. Hierbei ist auch zu beachten, dass der Verlauf von Geschossen durch kreisförmige Kugelbahnen abgeändert wird.
2. Mit der Kugelabschussvorrichtung werden Stahlkugeln verschossen, d.h. es ist Vorsicht und Umsicht geboten. Die Abschussvorrichtung darf aus diesem Grund auch nur für Messungen benutzt werden. Unsachgemäße Spielereien jeglicher Art sind hierbei untersagt!
3. Lichtschranken müssen so platziert werden, dass sie nicht von Gewichten getroffen werden, bzw. dass sich das Kabel nicht in der Bahn von rotierenden Teilen befindet.
4. Die Software des XPlorer bleibt ab und zu „hängen“, d.h. auf Eingaben wird nicht mehr reagiert. In diesem Fall muss der Versuchsleiter geholt werden.
5. Bei den Stoßversuchen werden nicht Kugeln, sondern Zylinder verwendet. Um einen optimalen Stoß zu erhalten, müssen die stoßenden Zylinder um 90° gedreht zueinander stehen.
6. Vor dem Einschalten von technischen Geräten immer erst den Versuchsleiter rufen.
7. Die Kraftmesser werden direkt an den XPlorer angeschlossen. Für die Lichtschranken benötigt man die Digitaladapter als Zwischenstück. An einen Digitaladapter können nur zwei Lichtschranken angeschlossen werden.

I. Der Winkel (Dauer: max. 10 min)

Der Winkel spielt für Kreisbewegungen und Rotationen eine wichtige Rolle. Wie wichtig er ist, können Sie sich durch die Aufgaben in diesem Kapitel verdeutlichen.

Versuchsaufbau I.1.:



Eines der Drehstative wird auf der Laborplatte befestigt. Die 360°-Winkelskala wird an die Grundplatte gelegt. Auf die Drehachse wird nun das Wellrad mit den farblichen Markierungen gesetzt und mit der Ringmutter festgezogen. Richten Sie die Schrauben nach der 0°-Grad-Markierung der Winkelskala aus. Dies stellt die Anfangsposition aller farblichen Markierungen dar.

Aufgabenstellung I.1.:

In diesem Aufgabenteil sollen die im Eingangsvortrag erwähnten Radius-Winkel-Koordinaten (ebenes Polarkoordinatensystem) näher betrachtet werden.

Aufgabe I.1.1.:

- Bestimmen Sie die Radius-Winkel-Koordinaten (ebenes Polarkoordinatensystem) der farblichen Markierungen in der Anfangsposition und tragen Sie sie in die Tabelle am Ende der Seite ein.
- Drehen Sie die Drehscheibe um 45°. Bestimmen Sie erneut die Radius-Winkel-Koordinaten (ebenes Polarkoordinatensystem) und tragen Sie sie in die Tabelle am Ende der Seite ein.
- Begründen Sie, ob Radius oder Winkel das Drehimpuls-Analogon zur Strecke des Impulses darstellt. (*Anmerkung: Hilfszettel 1*)

MARKIERUNG		Gelb	Rot	Blau	Grün
Anfangsposition	Radius				
	Winkel in Grad				
	Winkel im Bogenmaß				
45°-Drehung	Radius				
	Winkel in Grad				
	Winkel im Bogenmaß				

Überprüfen Sie, ob Sie neue Puzzle-Teile legen können!

II. Die Winkelgeschwindigkeit (Dauer. max. 40 min)

Neben der Geschwindigkeit, die im Grunde auch als „Streckengeschwindigkeit“ bezeichnet werden könnte, existiert auch die Winkelgeschwindigkeit. In diesem Kapitel soll die Winkelgeschwindigkeit näher betrachtet werden.

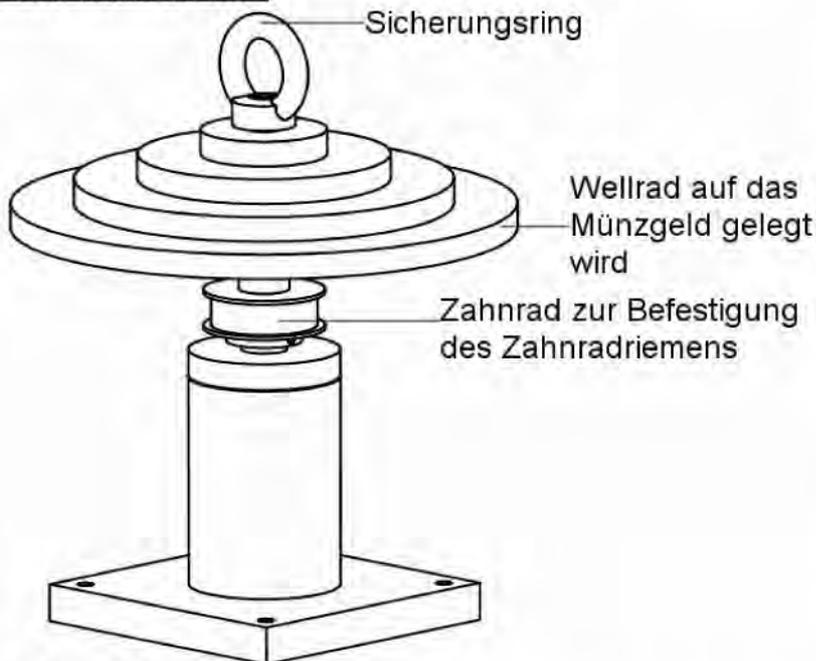
Aufgabe II.0.:

Begründen Sie (aufgrund Ihrer Analogie-Ergebnisse in Kapitel I und der Formeln), ob die Winkelgeschwindigkeit ein Impuls-Drehimpuls-Analogon der Geschwindigkeit ist.

(Anmerkung: Hilfszettel 2)

Hinweis: Holen Sie *vor* dem Einschalten den Versuchsbetreuer zum Überprüfen der Anordnung!

Versuchsaufbau II.1.:



Aufgabenstellung II.1.:

Befestigen Sie den Zahnradriemen an dem Elektromotor und der Drehachse. Setzen Sie anschließend das Wellrad auf. Verbinden Sie den Elektromotor mit dem Labornetzgerät.

Aufgabe II.1.:

- Bestimmen Sie mit Hilfe einer Lichtschranke diejenige Winkelgeschwindigkeit des Wellrads, für die eine Münze Ihrer Wahl von der untersten Ebenen fliegt. Wie groß sind für diese Wellrad-Winkelgeschwindigkeit die Winkelgeschwindigkeiten der farblichen Markierungen? (*Mit Winkel im Bogenmaß rechnen!*)
- Bestimmen Sie für Aufgabenteil a) die Bahngeschwindigkeiten der farblichen Markierungen und tragen Sie sie in nachfolgende Tabelle ein.

Markierungen	Gelb	Rot	Blau	Grün
Radius				
Winkelgeschwindigkeit				
Bahngeschwindigkeit				

c) Radius, Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit sind durch eine Formel miteinander verknüpft. Finden Sie diese Formel mit Hilfe Ihrer oben ausgefüllten Tabelle.

(Anmerkung: Hilfszettel 3)

(Formel II.1.1.)

Aufgabe II.2.:

Die Rotationsenergie für eine punktförmige Masse auf einer Kreisbahn ist gegeben durch

$$E_{\text{ROT}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2$$

wobei „m“ die Masse des Körpers auf der Kreisbahn und „r“ der Radius der Kreisbahn ist.

Begründen Sie mit Hilfe von Formel II.1.1. und der Formel für die kinetische Energie

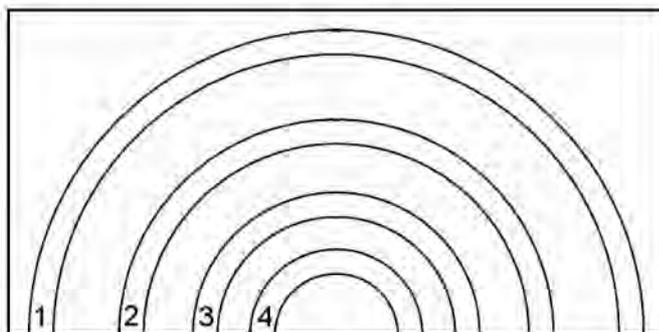
$$E_{\text{KIN}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

wie die Rotationsenergieformel hergeleitet wurde.

Überprüfen Sie, ob Sie neue Puzzle-Teile legen können!

Falls die Zeit noch reicht...:

Versuchsbeschreibung II.3.:



Halbkreisförmige Kugelbahn

Draufsicht



Geradlinige Kugelbahn (5 teilig)

Aufgabe II.3.:

Bestimmen Sie für eine Kugel die Bahngeschwindigkeit in der kreisförmigen Kugelbahn Nr.2 (oben links) und die Bahngeschwindigkeit in der geradlinigen Bahn (oben rechts: zusammengesetzt aus 5 Bahnstücken)

Sind die kinetische Energie und die Rotationsenergie gleich groß?

Anmerkung: Die Energieverluste durch Reibung sind in der kreisförmigen Kugelbahn wesentlich höher.

III. Das Trägheitsmoment (Dauer: max. 40min)

Das Impuls-Drehimpuls-Analogon zur (*trägen*) Masse stellt das *Trägheitsmoment* dar und kann somit als die Drehträgeit einer rotierenden Masse angesehen werden.

Aufgabe III.0.:

- a) Vergleichen Sie die Formeln der kinetischen Energie mit der der Rotationsenergie. Das Trägheitsmoment soll mit dem Formelzeichen „I“ abgekürzt werden. Wie ist das Trägheitsmoment einer punktförmigen Masse dem Vergleich nach definiert?

Hinweis: Eine große Hilfe ist die Formeln von Rotationsenergie und kinetischer Energie untereinander zu schreiben und farblich Kennzeichnungen vorzunehmen. Das heißt den Faktor 1/2 mit einer Farbe und alle bekannten Analogon mit jeweils einer anderen Farbe markieren. Das Trägheitsmoment I ist dann alles das nicht durch diese farblichen Markierungen erfasst wurde.

$$I = \quad \quad \quad \text{(Formel III.0.a.)}$$

- b) Welche Einheit hat der Formel *III.0.a.* zur Folge das Trägheitsmoment I?

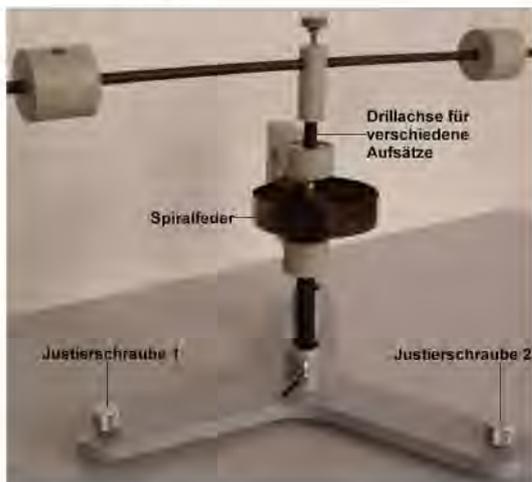
$$[I] = \quad \quad \quad \text{(Einheit III.0.b.)}$$

- c) Stellen Sie die Formel der Rotationsenergie in Abhängigkeit des Trägheitsmoments I und der Winkelgeschwindigkeit ω auf.

$$E_{\text{ROT}} = \quad \quad \quad \text{(Formel III.0.c.)}$$

(Anmerkung: Hilfszettel 4)

Versuchsaufbau III.1.:



Hinweis: die Drillachse darf nur maximal eine Drehung ausgelenkt werden.

Aufgabenstellung III.1.0.:

Die Schneckenfeder ist für das Schwingen der ausgelenkten Masse verantwortlich. Die für Schneckenfedern charakteristische Winkelrichtgröße D entspricht der Federkonstanten einer Spiralfeder. Sie ist gegeben durch die Formel

$$D = 4\pi^2 \cdot \frac{I}{T^2}$$

Aufgabe III.1.0.:

- a. Wie hat sich das Trägheitsmoment verändert, wenn sich die Schwingungsdauer verdoppelt bzw. halbiert?
- b. Wie muss sich die Schwingungsdauer geändert haben, damit sich das Trägheitsmoment halbiert?

Aufgabenstellung III.1.1.:

Die Zylindergewichte an dem Stab im ersten Bild sind verschiebbar. Dieser Drillachsenaufsatz hat folglich immer eine **konstante Masse**. Im Stab sind mehrere Rillen als Markierungen/Einraststellen für die Zylinder angebracht.

Aufgabe III.1.1.:

Messen Sie die Schwingungsdauer der Drehung der beiden Zylinder.

Bleibt das Trägheitsmoment bei diesem Versuch gleich oder ist es davon abhängig wie weit die Zylinder von der Drehachse entfernt sind?

Aufgabenstellung III.1.2.:

Verwendet werden nun die Drillachsenaufsätze Quader, Zylinder und (Teil-)Hohlzylinder. Diese drei Körper besitzen die **gleiche Masse** und drehen sich um eine ihrer Symmetrieachsen.

Aufgabe III.1.2.:

Messen Sie die Schwingungsdauer der drei Hauptachsen des Quaders, der beiden Hauptachsen des Zylinders und der Hauptachse des Hohlzylinders.

Bleibt das Trägheitsmoment bei diesem Versuch gleich oder ist es von der Körperform abhängig?

Aufgabenstellung III.1.3.:

Verwendet wird nun die Drehscheibe mit den verschiedenen Bohrungen.

Setzt man die Drehscheibe nicht auf die mittige Bohrung, so dreht sie nicht mehr um ihre Schwerpunktsachse. Fraglich ist, ob sich hierbei etwas an dem Drehverhalten ändert.

Aufgabe III.1.3.:

Messen Sie die Schwingungsdauer für die verschiedenen Drehachsen.

Bleibt das Trägheitsmoment bei der Rotation gleich oder ist es von der Lage der Drehachse abhängig?

Das Trägheitsmoment ist die am schwersten zu bestimmende Größe bei Drehbewegungen. Schauen Sie sich in den Anlagen die Formeln für die verschiedenen Körper an!

Überprüfen Sie, ob Sie neue Puzzle-Teile legen können!

Falls die Zeit noch reicht...:

***Aufgabe III.2.:**

Sortieren Sie in **III.1.2.** anhand der gemessenen Schwingungsdauer das Trägheitsmoment der Körper (**mit** Beachtung der Lage der Drehachse).

Stimmt diese Sortierung mit den in der Tabelle gemachten Werten überein?

IV. Trägheitsmoment und Rotationsenergie (Dauer: max. 15 min)

In Kapitel III müssten Sie auf die Formel der Rotationsenergie gekommen sein (*Formel III.0.b*).
Bearbeiten Sie mit dieser die nachfolgende Aufgabe.

Aufgabe IV.1.1.:

- a. Wie ändert sich die Rotationsenergie, wenn sich das Trägheitsmoment verdoppelt?
- b. Wie muss sich das Trägheitsmoment ändern, wenn sich die Winkelgeschwindigkeit bei gleich bleibender Rotationsenergie verdoppelt?

**Auf dem Puzzle-Plan gibt es eine Spalte, in der mehrere Rotationsenergie-Formeln stehen bzw. in denen die Rotationsenergieformeln gesucht sind.
Legen Sie mit Hilfe der Tabelle im Anhang die entsprechenden Puzzle-Teile.**

V. Der Drehimpuls (Dauer: max. 5 min)

Dass Impuls und Drehimpuls eine Impuls-Drehimpuls-Analogie darstellen, ist fast schon eine Notwendigkeit. Fraglich bleibt dennoch wie der Drehimpuls (Abgekürzt L) definiert ist.

Der Impuls ist gegeben mit

$$p = m \cdot v$$

Bestimmen Sie die Formel des Drehimpulses. Verwenden Sie hierzu Ihre bisherigen Erkenntnisse über die Impuls-Drehimpuls-Analogie:

$$L =$$

Überprüfen Sie, ob Sie neue Puzzle-Teile legen können!

VI. Die Drehimpulserhaltung (Dauer: max. 20 min)

Aufgabe V.1.0.:

Für die Impulserhaltung gilt:

$$p_1 = p_2 \quad \text{bzw.} \quad m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$$

Stellen Sie die Gleichung der Drehimpulserhaltung auf.

Versuchsaufbau VI.1.:

Gegeben sind folgende Versuchsbestandteile:

- Drillachse
- zwei übereinander gelagerte Drehscheiben
- zwei Stoßkörper
- zwei Stoßfedern
- Knete



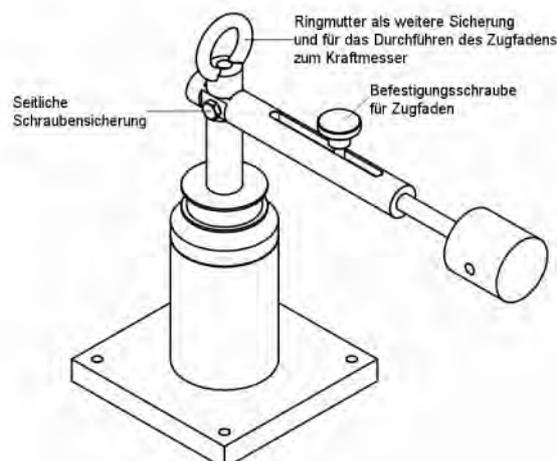
Aufgabenstellung VI.1.:

Inelastische und elastische Stöße sind in der Impuls-Thematik beliebte Impulserhaltungsaufgaben. In diesem Aufgabenteil soll nun über Stöße die Drehimpulserhaltung näher betrachtet werden.

Aufgabe VI.1.:

- a. Bauen Sie mit den Federn einen elastischen Drehstoßversuch auf. Wie wird der Stoß verlaufen?
- b. Bauen Sie mit der Knete einen inelastischen Drehstoßversuch auf. Wie wird der Stoß verlaufen?
- c. Stellen Sie für beide Versuche eine Drehimpulserhaltungsgleichung auf.

Versuchsaufbau VI.2.:



Aufgabenstellung VI.2.:

Setzen Sie den Teleskopstab auf eine der Drehachsen und schrauben Sie die Ringmutter auf die Achse. Befestigen Sie dann den Zugfaden an der Laufstange und führen Sie sie durch die Ringmutter an der Drehachse.

Aufgabe VI.2.:

- a) Der ausgefahrene Stab soll per Hand in Drehung versetzt und anschließend der Stab eingezogen werden. Der Zugfaden sollte dabei nach oben gezogen werden.
Was erwarten Sie was passiert? Worauf stützen Sie Ihre Vermutung?
- b) Handelt es sich um eine Drehimpulserhaltung? Falls ja stellen Sie eine Erhaltungsgleichung auf.

Überprüfen Sie, ob Sie neue Puzzle-Teile legen können!

Falls die Zeit noch reicht...:

Versuchsaufbau VI.3.:

Gegeben Sind folgende

Versuchsbestandteile:

- zwei Drehstative
- zwei Stoßzylinder
- zwei Sets mit vier verschiedenen langen Haltestangen
- Stoßpendel



Aufgabe VI.3.:

Führen Sie mehrere Stoßversuche mit verschiedenen langen Haltestangen durch.

VII. Das Drehmoment (Dauer: max. 20 min)

Die Kraft ist für eine Impulsänderung zuständig. Solange eine Kraft auf einen Körper wirkt, ändert sich die Geschwindigkeit und somit der Impuls.

Das Drehimpuls-Analogon zur Kraft ist das **Drehmoment** M (Im Grund hätte man es auch *Andrehmoment* nennen können).

Solange ein Drehmoment (Andrehmoment) auf einen rotierenden Körper wirkt, ändert sich die Winkelgeschwindigkeit und somit der Drehimpuls.

Aufgabe VII.0.:

- a) In Versuchsteil IV.2. wurde die Winkelrichtgröße D eingeführt. Angeblich sollte es dieselbe Bedeutung für Schneckenfedern haben, wie die Federkonstante D für Spiralfedern. Für die Federkonstante D gilt die Gleichung

$$F = -D \cdot s.$$

Begründen Sie anhand dieser Formel und Ihren bisherigen gesammelten Analogie-Erkenntnissen, warum für das Drehmoment die Formel

$$M = -D \cdot \alpha$$

gilt.

- b) Die Kraft erzielt eine um so größere Impulsänderung, je länger sie wirkt bzw. je größer sie ist, d.h. es gilt:

$$\Delta p = F \cdot \Delta t$$

Formulieren Sie diesen Satz für das Drehmoment und stellen Sie die entsprechende Gleichung auf:

$$\square$$

- c) Hebel sind sogenannte Kraftwandler. Bei einem zweiarmligen Hebel kann mit einer Kraft F_K am Kraftarm der Länge l_K eine größerer Kraft F_L am kürzeren Lastarm der Länge l_L bewirkt werden.



Aus der Energieerhaltung für die mechanische Energie ergibt sich somit die Gleichung:

$$F_K \cdot l_K = F_L \cdot l_L$$

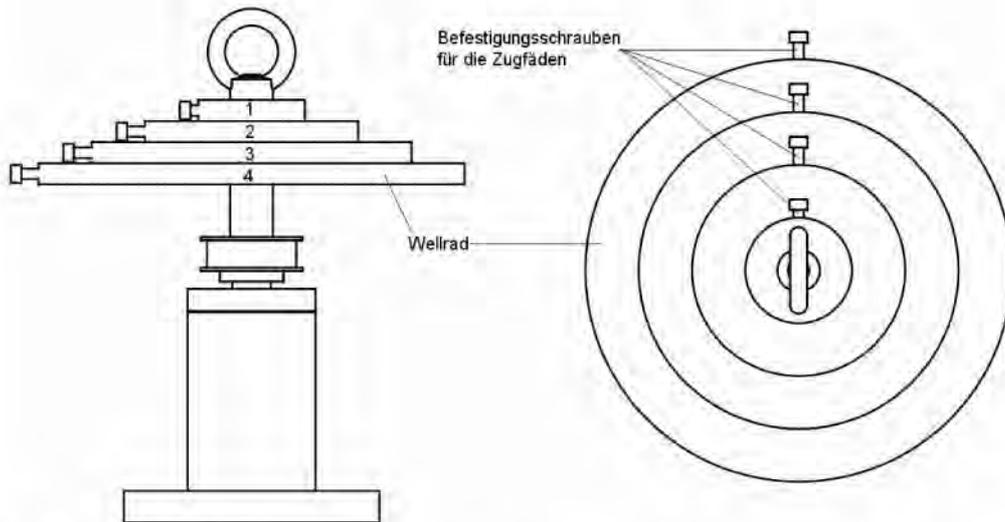
Kann hier auch die analoge Formel

$$M_K \cdot \alpha = M_L \cdot \alpha$$

verwendet werden?

(Anmerkung: Hilfszettel 5)

Versuchsaufbau VII.1.:



Aufgabenbeschreibung VII.1.:

Setzen Sie das Wellrad auf eines der Drehstative. An jeweils zwei unterschiedlichen Schrauben werden über Schnüre zwei Kraftmesser befestigt. Die Schnüre werden dabei so angebracht, dass der Zug an einem Kraftmesser einen Gegenzug am anderen Kraftmesser verursacht und sollten deswegen einmal um den jeweiligen Wellradabschnitt gelegt werden. Es sollte so gezogen bzw. dem Zug entgegengehalten werden, dass der Zug *senkrecht* erfolgt.

Aufgabe VII.1.:

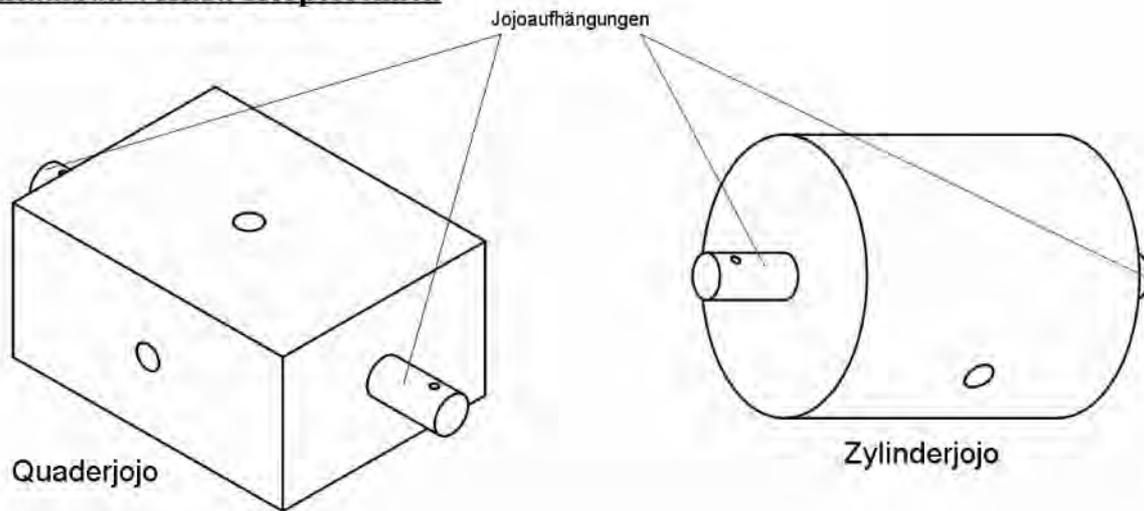
- Bestimmen Sie die Steigung der im Schaubild entstehenden (groben) Geraden. Welche Bedeutung hat diese Steigung?
- Wie verhält sich die Steigung zum Verhältnis der Radien?
- Welcher Zusammenhang existiert hier mit dem Hebelgesetz? Kann man das Wellrad als eine Art Analogie zu dem zweiarmigen Hebel aus Aufgabenteil *VII.0.c)* ansehen?

Überprüfen Sie, ob Sie neue Puzzle-Teile legen können!

VIII. Anwendungen und Spielereien (max. 45min)

In den nachfolgenden Versuchen sollen weniger Messungen vorgenommen, sondern obige Erkenntnisse noch einmal qualitativ angewendet werden.

Versuchsaufbau VIII.1.: Körperrennen



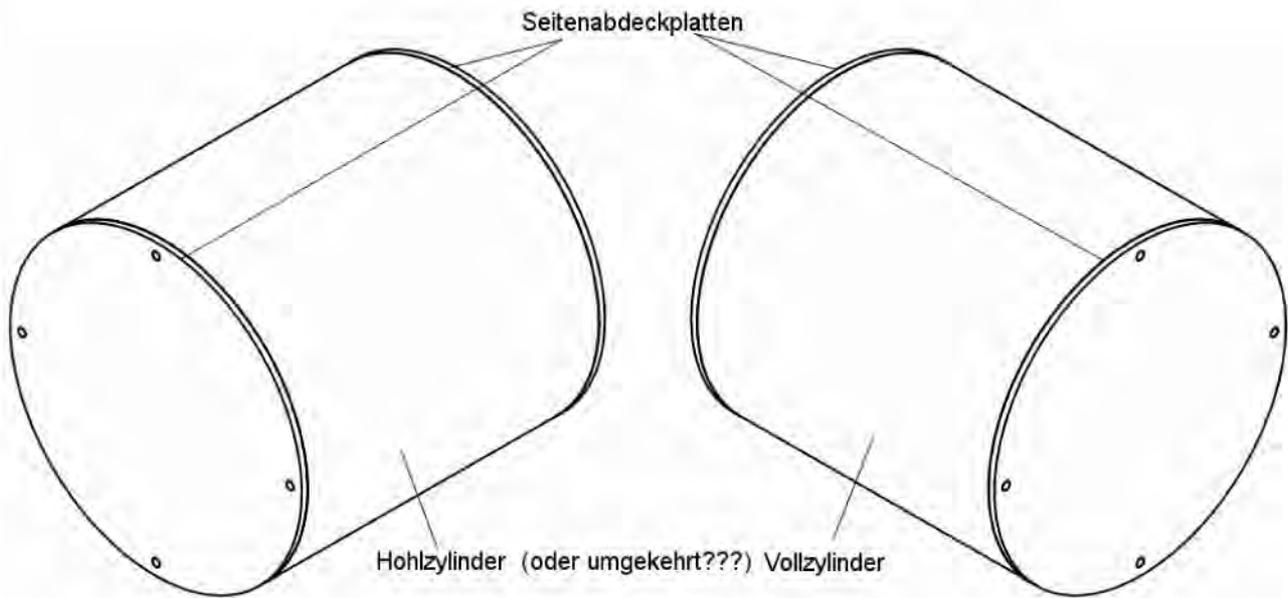
Aufgabenstellung VIII.1.:

Ein Quader- bzw. ein Zylinder-Jojo (Maxwellsches Rad) können um drei bzw. zwei Achsen rotieren. Hierzu werden die beiden Achsenstücke eingeschraubt und an diesen der befestigte Faden aufgewickelt.

Aufgabe VIII.1.:

- Überlegen Sie welcher Körper mit welcher Drehachse sich am schnellsten und am langsamsten abrollt.
- Nachdem die Räder abgerollt sind, steigen sie bei **richtiger Handhabung** wieder in die Höhe und die Haltefäden wickeln sich wieder auf. In welche Richtung muss sich dabei der Körper im Vergleich zum Abrollen drehen?
- Handelt es sich hierbei um Drehimpulserhaltung oder Energieerhaltung?

Versuchsaufbau VIII.2.: Das Heureka-Prinzip



Aufgabenstellung VIII.2.:

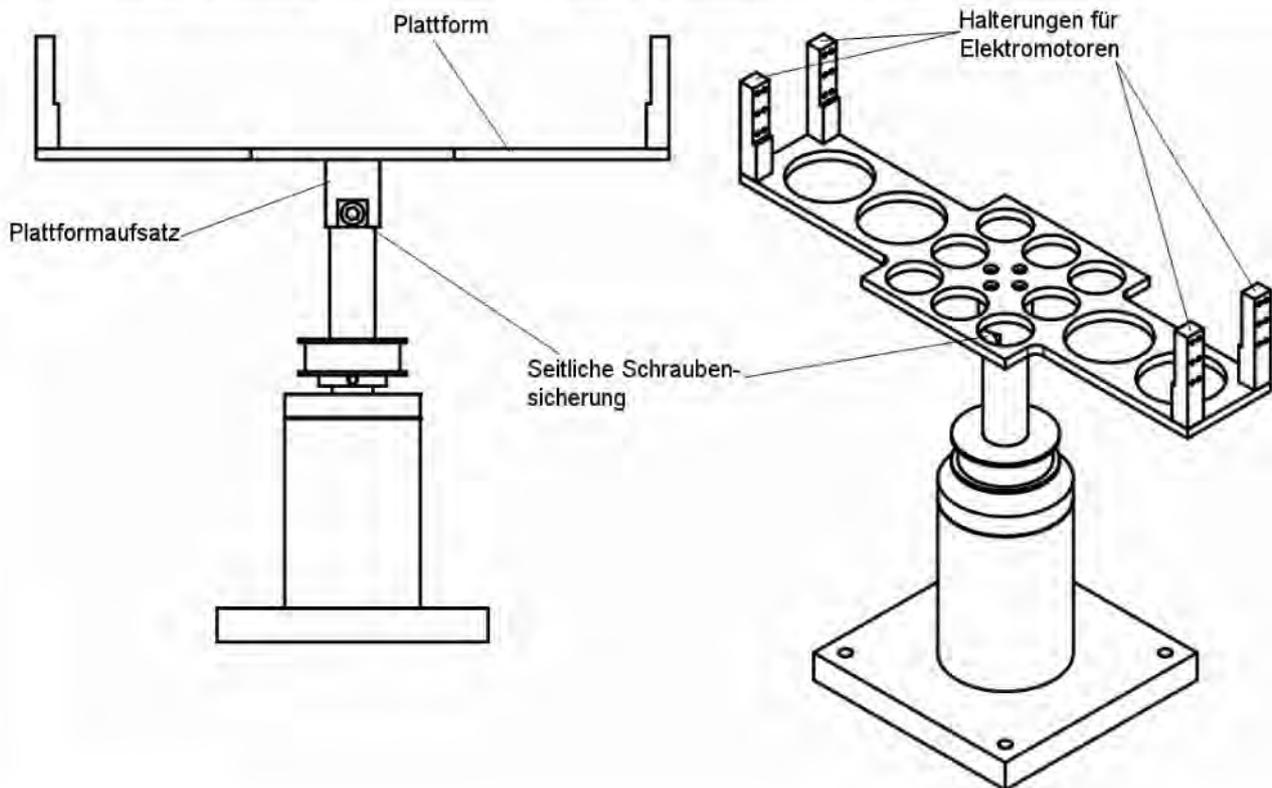
Im nachfolgenden Versuch soll ein Weg gefunden werden zwei nahezu identisch aussehende Körper als Zylinder und Hohlzylinder zu identifizieren.

Aufgabe VIII.2.:

Versuchen Sie ohne Abschrauben der Seitenplatten herauszufinden, welcher der Hohlzylinder ist. (an die Seite klopfen zählt nicht als Lösung). Begründen Sie Ihre Wahl!

Versuchsaufbau VIII.3.: Tandemdrehimpuls

Wichtig: Beachten Sie die Farbcodierung der Kabel! Rot an rot, schwarz an schwarz. Holen Sie *vor* dem Einschalten den Versuchsbetreuer zum Überprüfen der Verkabelung! Schalten Sie dann *zuerst* die Fernsteuerung an und stellen Sie *danach* die Schalter der Drehplattform auf on. (Abschalten erfolgt in umgekehrter Reihenfolge!)



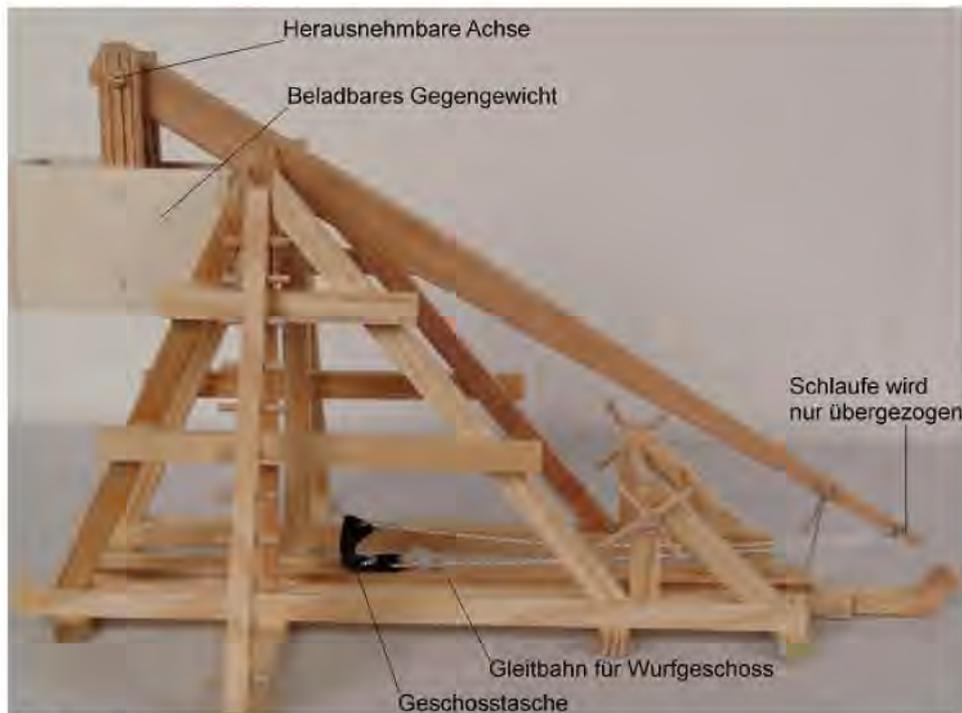
Aufgabenstellung VIII.3.:

Setzen Sie die Plattform mit den beiden Elektromotoren auf eine der Drehachsen und befestigen Sie sie seitlich mit der dafür vorgesehenen Schraube. Verbinden Sie die Regler mit den Akkus.

Aufgabe VIII.3.:

- Bedienen Sie zuerst nur einen Motor. Je stärker dieser erste Motor die kleine Drehscheibe antreibt um so stärker dreht sich die gesamte Plattform. Dasselbe Prinzip findet sich auch bei einem Hubschrauber, bei dem der Heckrotor ausfällt.
Drehen sich Rotor und Plattform in gleiche Richtung oder gegenläufig? Der drehende Rotor darf *sanft* mit den Fingern berührt werden.
- Halten Sie im Ruhezustand die Drehplattform fest und beschleunigen Sie den Motor auf eine feste Geschwindigkeit. Was beobachten Sie, wenn die Plattform losgelassen wird? Welche Größe muss demnach für das Drehen der Plattform verantwortlich sein?
- Versuchen Sie bei diesem Experiment Aussagen über die Größen Winkelgeschwindigkeit, Drehimpuls, Drehmoment und die Erhaltungssätze zu machen.
- Schalten Sie nun den zweiten Motor hinzu und versuchen Sie die drehende Plattform bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten abzufangen. In welche Richtung muss sich dieser zweite Motor drehen?
- Handelt es sich bei den beiden Rotoren um Drehimpulserhaltung oder heben sich lediglich die Drehmomente auf?

Versuchsaufbau VIII.4.: Tribok



Aufgabenstellung VIII.4.:

Der Tribok (Tribock, Trebuchet, Blide) ist eine mittelalterliche Wurfmaschine, die eine vergleichsweise hohe Genauigkeit hatte. Durch das Beladen des Gegengewichts kann die Wurfweite variiert werden. Ein Wurfgeschoss kann folgenderweise geschleudert werden:

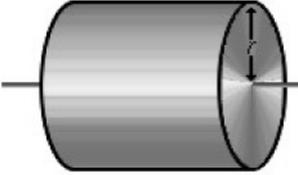
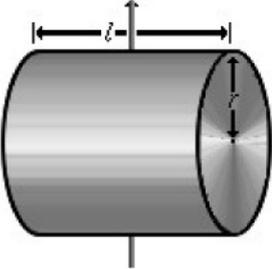
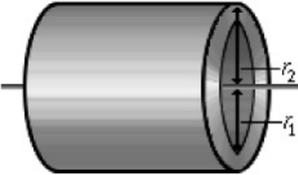
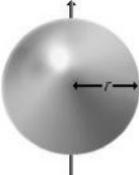
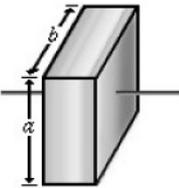
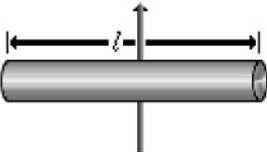
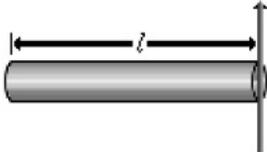
- Das Gegengewicht wird mit den Metallstücken beladen (maximal: 1kg).
- Die freie Schlaufe wird lose über die Spitze des Hebelarms gelegt.
- Der Hebelarm wird heruntergezogen und die Geschosstasche weit nach hinten auf die Schiene gelegt.
- Die Geschosstasche wird beladen.
- Vor dem Schuss darf sowohl *vor* als auch *hinter* dem Tribok niemand stehen (freie Schussbahn!)
- Vor dem Schuss einen Warnhinweis geben.

Aufgabe VIII.4.:

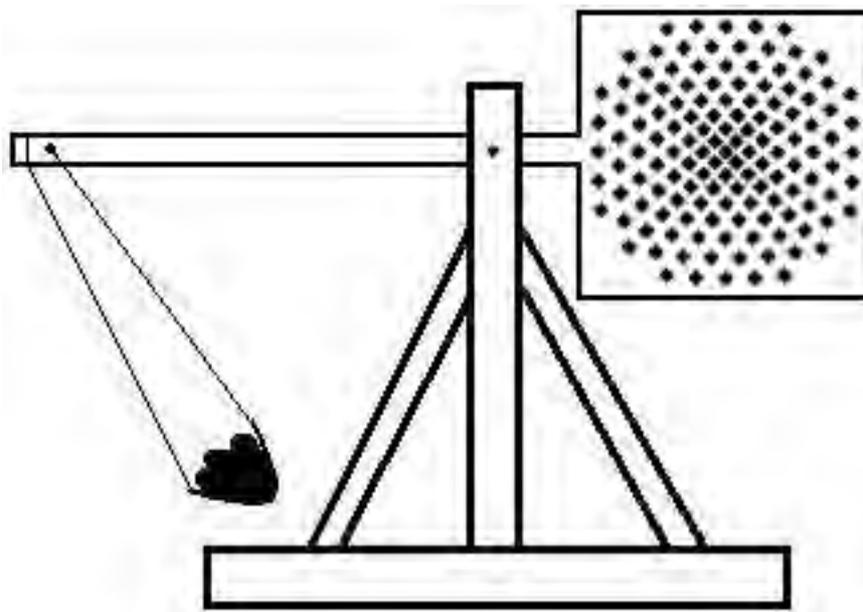
- Die Bedienung des Triboks ist nicht einfach! Versuchen Sie den Wurf zu optimieren. Dafür stehen Ihnen verschiedene Gewichte für das Gegengewicht und verschieden Geschosse zur Verfügung.
- Grob kann der Wurf in die drei Phasen *Zugphase*, *Schwungphase* und *Auslösphase* unterteilt werden. Versuchen Sie diese Phasen näher zu erklären.
- Katapulte wie der Onager waren Wurfgeräte, bei denen die Geschosse direkt auf den Hebelarm platziert wurden. Wozu dient bei dem Tribok die Seilverlängerung?

E. ANHANG

Die Trägheitsmomente I_S für spezielle Rotationskörper wie Zylinder, Hohlzylinder, Kugel, Quader etc. mit der Drehachse als Schwerpunktsachse sind in Tabellenwerken vermerkt.

Rotationsmasse	Beschreibung	Trägheitsmoment
	Ein Vollzylinder, der um seine Symmetrieachse als Schwerpunktschwerachse rotiert.	$I_S = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$
	Ein Vollzylinder, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert, auf der auch der Zylinderschwerpunkt liegt.	$I_S = \frac{1}{4} \cdot m \cdot r^2 + \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$
	Ein Hohlzylinder, der um seine Symmetrieachse als Schwerpunktschwerachse rotiert.	$I_S = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_2^2 - r_1^2)$
	Eine massive Kugel, die um eine Achse durch ihren Mittelpunkt rotiert.	$I_S = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$
	Ein massiver Quaderblock, der um seine Symmetrieachse als Schwerpunktschwerachse rotiert.	$I_S = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (a^2 + b^2)$
	Ein dünner Stab, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert auf der auch der Schwerpunkt liegt.	$I_S = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$
	Ein dünner Stab, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert, die am Ende des Stabes liegt.	$I = \frac{1}{3} \cdot m \cdot l^2$

Begleitheft für Lehrer



Versuchsreihe:
*Die Analogie von
Impuls und Drehimpuls
(DAVID)*

Inhaltsverzeichnis

A. Einleitung.....	75
B. Versuchshintergrund.....	76
I. Bildungsplan.....	76
1. Leitgedanken zum Kompetenzerwerb.....	76
2. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik (Punkt 4).....	76
3. Grundlegende physikalische Größen (Punkt 8).....	76
4. Strukturen und Analogien (Punkt 9).....	77
II. Vorwissen.....	77
1. Vorbereitung in der Schule.....	77
2. Vorbereitung des Laborbuchs.....	77
III. Ziele des Versuchtages.....	78
IV. Der Ablauf des Versuchstages.....	78
V. Evaluation.....	78
C. Die Versuche.....	79
1. Themenbereich: Der Winkel.....	79
2. Themenbereich: Die Winkelgeschwindigkeit.....	79
3. Themenbereich: Das Trägheitsmoment.....	80
4. Themenbereich: Trägheitsmoment und Rotationsenergie.....	80
5. Themenbereich: Der Drehimpuls.....	81
6. Themenbereich: Die Drehimpulserhaltung.....	81
7. Themenbereich: Das Drehmoment.....	81
8. Themenbereich: Anwendungen und Spielereien.....	82
D. Theorie.....	83
I. Einige Grundlagen.....	83
1. Die Einheit, die eigentlich keine ist.....	83
2. Grundlagen zum Impuls.....	83
a. Impuls.....	83
b. Impulserhaltung.....	83
c. Stöße.....	84
3. Grundlagen zur Kraft.....	84
a. Definition des Begriffs der Kraft.....	84
b. Trägheitskräfte.....	84
i. Geradlinig beschleunigte Bewegung.....	85
ii. Rotierendes Bezugssystem.....	85
II. Rotation eines Massepunktes.....	86
1. Grundgrößen der Kreisbewegung.....	86
a. Winkel- und Bahngeschwindigkeit.....	86
b. Winkel-, Bahn- und Zentripetalbeschleunigung.....	86
2. Die Rotationsenergie.....	87
3. Das Trägheitsmoment.....	87
4. Der Drehimpuls.....	87
5. Bewegungsgleichung und Drehmoment.....	88
6. Drehimpulserhaltung.....	88
III. Rotation eines starren, ausgedehnten Körpers.....	89
1. Das Trägheitsmoment.....	89
a. Rotation um eine Schwerpunktsachse.....	89
b. Rotation um eine parallelen Drehachse – Der steinersche Satz.....	90
c. Rotationsenergie.....	90

2. Der Drehimpuls.....	91
3. Das Drehmoment und die Drehimpulserhaltung.....	91
IV. Weitere Besonderheiten von Rotationsbewegungen.....	91
1. Die Präzession.....	91
2. Die Nutation.....	91
3. Bedeutung für die Experimentierreihe.....	91
V. Die Analogie – Zusammenfassung.....	92
1. Gegenüberstellung.....	92
2. Grenzen der Analogie.....	92
3. Die Newtonschen Gesetze für Drehimpuls.....	93
a. Das erste Newtonsche Gesetz – Trägheit.....	93
b. Das zweite Newtonsche Gesetz – Aktionsprinzip.....	93
c. Das dritte Newtonsche Gesetz – Reaktionsprinzip.....	93
E. Bildverzeichnis.....	93

A. EINLEITUNG

Durch die Versuchsreihe „Die Analogie von Impuls und Drehimpuls“ soll das Themengebiet „Drehimpuls“ eingeführt werden. Insbesondere sollen die Schüler und Schülerinnen (fortan SuS) hierbei die Analogie erkennen, die Impuls und Drehimpuls miteinander verbindet. Elementares Grundwissen über den Themenbereich des Impulses ist daher unabdingbar.

Die Versuchsreihe teilt sich in acht verschiedene Themenbereiche auf:

1. Der Winkel
2. Die Winkelgeschwindigkeit
3. Das Trägheitsmoment
4. Trägheitsmoment und Rotationsenergie
5. Der Drehimpuls
6. Die Drehimpulserhaltung
7. Das Drehmoment
8. Anwendungen und Spielereien

Die Grundidee hinter dieser Aufteilung ist unter Beachtung der Impuls-Analogie nacheinander die wichtigen Größen des Drehimpuls-Themengebietes einzuführen.

Im letzten der acht Themenbereiche wird den SuS in vier Versuchen die Möglichkeit gegeben ihr bis dahin gesammeltes, neues Wissen auf die Probe zu stellen. Ziel ist hierbei nicht, dass aufgrund des bisher Erlernten sofort die Lösung oder generell die richtige Lösung erkannt wird. Vielmehr soll den SuS die Möglichkeit geboten werden sich Gedanken über das Gelernte zu machen und auch aus eventuellen Fehlern Rückschlüsse ziehen zu können.

Ein weiteres wichtiges Anliegen dieser Versuchsreihe ist das generelle Anliegen des Schülerlabors in den SuS nicht nur die Freude am Experimentieren, sondern auch eine gewisse physikalische Neugier selbst an alltäglichen Phänomenen zu wecken. Insbesondere im letzten Themenbereich sollte den SuS daher auch die Zeit für experimentieren und „spielen“ gelassen werden.

B. VERSUCHSHINTERGRUND

I. Bildungsplan

Der Drehimpuls inklusive Drehimpulserhaltung ist Stoff der Klasse 9/10 und der Kursstufe. Folgende Punkte des Bildungsplanes sollen durch die Versuchsreihen angeschnitten werden:

1. Leitgedanken zum Kompetenzerwerb

Die SuS sollen:

- ✓ erworbenes physikalisches Wissen anwenden
- ✓ physikalische Fragen erkennen und sachgerechte Entscheidungen treffen
- ✓ grundlegende physikalische Konzepte und Modelle verstehen und deren Tragfähigkeit hinterfragen, um die Grenzen physikalischen Denkens erkennen zu können
- ✓ Sachverhalte klar erkennen und mitteilen und quantitativ erfassbare Größen beobachten
- ✓ Aufgrund der Beurteilung, Auswahl und Anwendung physikalischer Gesetze, Schlussfolgerungen aus den gesammelten Informationen und Daten ziehen

Die Teamarbeit soll:

- ✓ personale und soziale Kompetenz
- ✓ kooperative Fähigkeiten
- ✓ eine aktive und verantwortungsvolle Mitarbeit

fördern.

Mit diesem Hintergrund soll diese Experimentierreihe:

- ✓ das Denk- und Vorstellungsvermögen der SuS fördern
- ✓ ein tragfähiges Grundwissen, Fertigkeiten bei der Beobachtung und Beschreibung physikalischer Phänomene vermitteln
- ✓ Grundlagen im Experimentieren legen

Auf diese Weise sollen auch folgende didaktische Grundsätze beachtet werden:

- ✓ Handlungsorientiertes und entdeckendes Lernen und Arbeiten in Teams
- ✓ Umgang mit Fehlern
- ✓ Fehler gehören zum Lernprozess
- ✓ Anregung zur Suche nach eigenen Lösungswegen durch offene Problemstellungen und entdeckendes Lernen

2. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik (Punkt 4)

Die Schülerinnen und Schüler können:

- ✓ Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen untersuchen
- ✓ Experimente unter Anleitung selbständig planen, ausführen und auswerten
- ✓ Strukturen erkennen und Analogien hilfreich einsetzen

3. Grundlegende physikalische Größen (Punkt 8)

Neben dynamischen Betrachtungsweisen kennen die Schülerinnen und Schüler

- ✓ vor allem die Erhaltungssätze
- ✓ und können sie vorteilhaft zur Lösung physikalischer Fragestellungen einsetzen

[...] Die Schülerinnen und Schüler können mit weiteren grundlegenden physikalischen Größen umgehen:

- ✓ Zeit, Masse

- ✓ Energie (Energieerhaltung)
- ✓ Kraft, Geschwindigkeit, Impuls (Impulserhaltung), Beschleunigung
- ✓ qualitativ: Drehimpuls (Drehimpulserhaltung)

4. Strukturen und Analogien (Punkt 9)

Die Schülerinnen und Schüler erkennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexeren Fragestellungen bearbeiten:

- ✓ Energiespeicher
- ✓ Beschreibung von mechanischen Energietransporten

II. Vorwissen

1. Vorbereitung in der Schule

Insbesondere für das Erkennen und Verstehen der Analogie ist ein fundiertes Verständnis und Wissen über das Themengebiet des Impulses notwendig. Dies beinhaltet:

- ✓ Die anschauliche Bedeutung des Impulses: „Schwung“ bzw. „Wucht“
- ✓ Die qualitative Abhängigkeit des Impulses von Masse und Geschwindigkeit.
- ✓ Die Definition des Impulses: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- ✓ Die Bedeutung der Verwendung von Vektoren.
- ✓ Der Impuls in den Newtonsche Axiome.

Ferner spielen Energieerhaltung und Impulserhaltung für den Versuch und deren Anwendung eine wichtige Rolle. Im Unterricht sollte daher wiederholt werden:

- ✓ Impulserhaltung: $\vec{p}_{\text{vorher}} = \vec{p}_{\text{nachher}}$
- ✓ Impulsübertragung
(Dies beinhaltet auch das Wissen, weshalb es beim elastischen Stoß vorteilhaft ist, wenn die Stoßmassen gleich sind)
- ✓ Energieerhaltung
- ✓ Energiespeicher Pendel: Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie
(Dies beinhaltet auch die Berechnung der Geschwindigkeit der Pendelmasse im Nulldurchgang mit Hilfe des Auslenkwinkels)

Ferner wäre es hilfreich auch folgende Themen im Unterricht zu behandeln:

- ✓ Winkel im Bogenmaß (Hilfsmaßeinheit Radiant)
- ✓ Bahngeschwindigkeit
- ✓ Trägheit, träge Masse (Begriffserklärung)
- ✓ Kraftbegriff im Allgemeinen
- ✓ Hebelgesetz und eventuell Kraftwandler
- ✓ Analoge Formeln
- ✓ Erkennen der Auswirkung der Änderung einer physikalischen Größe auf eine andere anhand der Formel
- ✓ Kreisbewegung

Hinweis:

Da der Formelgebrauch und insbesondere das Finden analoger Formeln ein sehr wichtiger und zentraler Bestandteil des Versuchstages ist, sollten ähnliche Aufgaben **dringend** im Unterricht geübt werden.

2. Vorbereitung des Laborbuchs

Im Laborbuch sollte von den SuS die Kapitel B und C und die einzelnen Versuche durchgelesen bzw.

durchgearbeitet worden sein. Von Vorteil wäre, wenn dabei schon Tabellen zum Eintragen der Messergebnisse angelegt und die theoretischen Aufgaben so weit als möglich bearbeiten werden. Insbesondere für Klassen, für die das experimentelle Arbeiten eher Neuland ist, wäre es sinnvoll, dies im Zuge einer Hausaufgabe geschehen zu lassen und zu dieser eine Ergebnissicherung vorzunehmen.

III. Ziele des Versuchstages

Zusammenfassend sind die fachlichen Lernziele:

- ✓ Analogie zwischen Impuls und Drehimpuls
- ✓ Analogien:
 - a. Strecke s \Leftrightarrow Winkel α
 - b. Geschwindigkeit v \Leftrightarrow Winkelgeschwindigkeit ω
 - c. kinetische Energie: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ \Leftrightarrow Rotationsenergie: $\frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$
 - d. (träge) Masse m \Leftrightarrow Trägheitsmoment I
 - e. Impuls \vec{p} \Leftrightarrow Drehimpuls \vec{L}
 - f. Impulserhaltung \Leftrightarrow Drehimpulserhaltung
 - g. Kraft \Leftrightarrow Drehmoment

Weitere allgemeine Lernziele sind, dass die SuS:

- ✓ das Nutzen von Analogien erkennen und dieses Wissen nutzbringend einbringen.
- ✓ die Impuls-Drehimpuls-Analogie verstehen, an Beispielen erläutern können und mit diesem Wissen physikalische Probleme lösen.
- ✓ qualitative, fachliche Aussagen über die physikalischen Größen eines Drehkörper treffen.
- ✓ qualitative, fachliche Aussagen über die Änderung von physikalischen Größen treffen
- ✓ experimentell überprüfbare Vorhersagen tätigen.

IV. Der Ablauf des Versuchstages

Der Versuchstag beginnt mit einem Vortrag des Versuchsbetreuers, in dem unter anderem auch Hinweise zur Versuchsdurchführung gegeben werden.

Anschließend wird je eine Schülergruppe (max. 4 Personen) einem der Übungstische zugeteilt. Da alle Versuche vervielfältigt worden sind, ist ein Tischwechsel nicht nötig. Alle Versuche sind an dem zugewiesenen Tisch aufzubauen und durchzuführen. Der Versuchsbetreuer ist während der gesamten Versuchsreihe anwesend und kann bei Problemen etc. von den SuS gerufen werden.

Der Versuchstag endet mit dem Ausfüllen der Evaluationsbögen.

Die benötigte Zeit für diesen Versuchstag wird (inklusive Pausen) bis zu fünf Stunden betragen.

V. Evaluation

Diese Versuchsreihe ist genauso wie das Schülerlabor ausbaufähig und das 5. Physikalische Institut der Universität Stuttgart ist stets darum bemüht Lob, Kritiken und Anregungen zu sammeln. Dazu benötigen wir jedoch die Hilfe aller Lehrkräfte und SuS, die die Angebote des Schülerlabors wahrnehmen.

Wir bitten Sie darum mit Ihrer Klasse an einer Evaluation direkt nach dem Versuchstag und an einer Evaluation nach einigen Wochen teilzunehmen. Die erste findet direkt im Anschluss an den Versuchstag statt. Für die einige Wochen später folgende, erhalten Sie von uns weiteren Evaluationsbögen.

Schon im Voraus ein herzliches Danke für Ihre Hilfe und Unterstützung!

C. DIE VERSUCHE

1. Themenbereich: Der Winkel

Zielsetzung:

Die SuS sollen durch den Versuch folgendes lernen:

- ✓ Existenz und Vorteil des Polarkoordinatensystems
- ✓ Rotation bedeutet eine Winkeländerung, die somit das Impuls-Drehimpuls-Analogon zur Streckenänderung ist

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Präkonzepte
- ✓ Schulstoff (u.a. Kreisbewegung)

Bemerkungen:

Dieser Versuch dient dazu die SuS sich mit der grundlegenden Größe des Winkels näher zu beschäftigen und somit wichtige Grundlagen dafür zu legen/zu reaktivieren, die für die Versuchsreihe von grundlegender Bedeutung sind.

Großartige Probleme beim Aufbau und der Durchführung des Versuches sind nicht zu erwarten.

Probleme kann hier der Aufbau des Versuches machen, insbesondere das Verbinden des Elektromotors mit der Drehachse über den Zahnradriemen. Zu beachten ist, dass die Halterung des Elektromotors bei nicht ganz festgezogenen Justierschrauben verschiebbar ist und somit die Spannung des Zahnradriemens geändert werden kann.

2. Themenbereich: Die Winkelgeschwindigkeit

Zielsetzung:

Die SuS sollen durch den Versuch folgendes lernen:

- ✓ Unterschied zwischen Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit
- ✓ Zusammenhang von Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit über den Kreisbahnradius
- ✓ Winkelgeschwindigkeit ist das Impuls-Drehimpuls-Analogon zur Geschwindigkeit
- ✓ Die Rotationsenergie kann man als eine Art kinetische Energie mit der Winkelgeschwindigkeit als Geschwindigkeit auffassen.
- ✓ Die Formel der Rotationsenergie für einen Massenpunkt (Formel noch mit Masse und Bahnradius und noch nicht mit Trägheitsmoment dargestellt).

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Koordinatensysteme
- ✓ Bahngeschwindigkeit
- ✓ Winkel
- ✓ Kreisbewegung
- ✓ Formelgebrauch

Bemerkungen:

Auf die Winkelgeschwindigkeit bauen die nachfolgenden Themenbereiche auf. Aus diesem Grund zielt dieser Versuchsteil darauf ab den SuS die Winkelgeschwindigkeit näher zu bringen und verständlicher zu machen.

Probleme könnten sich bei der Verwendung der Messsoftware „DataStudio“ ergeben. Die Aufgabenteile II.1.c. und II.2. können speziell bei schwächeren SuS erhebliche Probleme verursachen.

3. Themenbereich: Das Trägheitsmoment

Zielsetzung:

Die SuS sollen durch den Versuch folgendes lernen:

- ✓ Das Trägheitsmoment kann man als das Impuls-Drehimpuls-Analogon zur trägen Masse auffassen.
- ✓ Die Rotationsenergie mit dem Trägheitsmoment kann man als das Impuls-Drehimpuls-Analogon zur kinetischen Energie auffassen.
- ✓ Das Trägheitsmoment ist nicht nur von der Masse abhängig, sondern von der Form des Körpers (Massenverteilung) und der Lage der Drehachse.

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Erkenntnisse aus den vorigen Themenbereichen
- ✓ träge Masse
- ✓ Begriff: Trägheit
- ✓ Berechnung der Energie des Stoßpendels

Bemerkungen:

Das Trägheitsmoment ist vom Verständnis her gesehen das größte Problem, das die SuS an diesem Versuchstag zu bewältigen haben. Es ist daher vor allem bei schwächeren SuS mit teilweise erheblichen Problemen zu rechnen.

4. Themenbereich: Trägheitsmoment und Rotationsenergie

Zielsetzung:

Die SuS sollen durch den Versuch folgendes lernen:

- ✓ Die Rotationsenergie ist aufgrund des Trägheitsmoments des Körpers nicht immer leicht zu berechnen.
- ✓ Anwendung der Formeltabelle zum Trägheitsmoment

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Formelgebrauch
- ✓ Erkenntnisse aus dem vorigen Themenbereich

Bemerkungen:

Dieser rein theoretische Themenbereich soll den SuS die komplizierte Größe des Trägheitsmoments näher bringen. Hierbei sind aufgrund der eindeutigen Lösungen des Puzzle-Planers mit nicht zu großen Problemen zu rechnen.

5. Themenbereich: Der Drehimpuls

Zielsetzung:

Die SuS sollen durch den Versuch folgendes lernen:

- ✓ Der Drehimpuls kann als Impuls-Drehimpuls-Analogon des Impulses angesehen werden.
- ✓ Das Analogie-Wissen soll angewendet werden.

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Erkenntnisse aus den vorigen Themenbereichen
- ✓ Formelgebrauch
- ✓ Analogie

Bemerkungen:

Bei diesem ebenfalls theoretischen Themenbereich ist aufgrund der bisherigen Aufgabenstellungen mit keinen großen Problemen zu rechnen.

6. Themenbereich: Die Drehimpulserhaltung

Die SuS sollen durch den Versuch folgendes lernen:

- ✓ Die Drehimpulserhaltung kann als Impuls-Drehimpuls-Analogon der Impulserhaltung angesehen werden.

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Erkenntnisse aus den vorigen Themenbereichen
- ✓ Impulserhaltung

Bemerkungen:

Den SuS soll veranschaulicht werden, dass man den Drehimpulserhaltungssatz nicht nur als Analogie zum Impulserhaltungssatz darstellen kann, sondern dass damit eine fundamentale Erweiterung der Erhaltungssätze verbunden ist.

Obwohl die Aufgabenstellung sehr offen ist, dürfte es zu keinen unüberwindbaren Problemen kommen.

7. Themenbereich: Das Drehmoment

Zielsetzung:

Die SuS sollen durch den Versuch folgendes lernen:

- ✓ Das Drehmoment kann als Impuls-Drehimpuls-Analogon der Kraft angesehen werden.
- ✓ Das Drehmoment ist vom Radius der Rotation abhängig.
- ✓ Bei verschiedene miteinander verbundenen Rädern findet ein vom Radius abhängiger Drehmomentübertrag statt (analog zum Hebelprinzip).

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Erkenntnisse aus den vorigen Themenbereichen.
- ✓ Bedeutung der Kraft bei der Translation.
- ✓ Hebelprinzip

Bemerkungen:

So wie der Impuls durch die Kraft geändert werden kann, kann der Drehimpuls durch das Drehmoment geändert werden. Immer dann, wenn sich der Drehimpuls ändert, ist folglich ein Drehmoment (als Analogon zur Kraft) beteiligt. Diese Erkenntnis ist diejenige, die den SuS vermittelt werden soll.

Außer den vorher schon genannten, eventuellen Problemen bei der Messung durch das Programm „Data Studio“ sind mit keinen großartige Probleme beim Aufbau und der Durchführung des Versuches zu erwarten.

8. Themenbereich: Anwendungen und Spielereien

Zielsetzung:

Die SuS sollen durch die vier Teilversuche:

- ✓ versuchen das bisher gewonnene Wissen anzuwenden.
- ✓ darauf gestoßen werden, dass der Drehimpuls eine alltägliche Größe ist.

Schülervorwissen:

Die SuS benötigen folgendes Vorwissen:

- ✓ Erkenntnisse aus den vorigen Themenbereichen.

Bemerkungen:

Dieser Versuchsteil soll als Abschluss nicht nur eine Abwechslung zu den vorigen Messversuchen bringen, sondern vor allem für SuS eine Möglichkeit darstellen ihr gewonnenes Wissen auf die Probe zu stellen. Gleichzeitig stellt dies für die Betreuer und die Lehrkraft gleichzeitig eine Möglichkeit dar den Lernfortschritt der SuS besser einstufen zu können.

Aus diesem Grund sollte den SuS auch die Zeit für experimentieren und „spielen“ gelassen werden. Die Versuchsaufbauten sind entweder nicht schwierig oder soweit schon vorbereitet.

D. THEORIE

In der klassischen Mechanik lässt sich jede Bewegungsform aus Translations- und Rotationsbewegungen aufbauen. Dabei lassen sich einige Bewegungen durch die Modellvorstellung des Massenschwerpunktes auf einen einzigen Massenpunkt vereinfachen. Diese Vereinfachung ist bei Rotationsbewegungen allerdings nicht allgemeingültig anwendbar, d.h. hierbei ist zu differenzieren zwischen der Rotation eines einzelnen Massenpunktes um eine Drehachse außerhalb des Massenpunktes und der Rotation eines Körpers.

Im folgenden sollen zuerst einige Grundlagen gelegt werden. Anschließend werden die grundlegenden Rotationsgrößen eines Massenpunktes betrachtet, diese auf die Rotation eines starren, ausgedehnten Körpers erweitert und abschließend noch auf einige Besonderheiten der Rotationsbewegung eingegangen.

I. Einige Grundlagen

1. Die Einheit, die eigentlich keine ist

Der Radiant (rad) ist eine kohärent abgeleitete Einheit mit eigenem Namen und Einheitszeichen für ebene Winkel, die dimensionslos ist, mit den SI-Präfixen (milli, centi etc.) und mit jeder anderen Basis- bzw. abgeleiteten Einheit kombiniert werden kann.

1 rad ist per Definition der ebene Winkel, der eine Bogenlänge von einem Meter bei einem Kreis mit ein Meter Radius umschließt und kann daher auch als das Verhältnismaß aus der Bogenlänge zum Kreisradius gesehen werden. 2π rad entspricht somit einem Vollwinkel.

2. Grundlagen zum Impuls

a. Impuls

Ein Teilchen der Masse m , das sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt, besitzt einen Impuls

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}; \quad [p] = \text{kg m/s} \quad (\text{I.2a.1})$$

und ist zeitlich konstant, solange keine Kraft auf die Masse wirkt. Dies stellt auch die Kernaussage des *ersten Newtonschen Axioms* dar.

Wirkt eine Kraft auf die Masse, so ist die Impulsänderung nach dem *zweiten Newtonschen Axiom* gegeben durch

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (\text{I.2a.2})$$

Bei konstanter Masse folgt:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} \quad (\text{I.2a.3})$$

b. Impulserhaltung

Treten Teilchen eines abgeschlossenen Systems in gegenseitige Wechselwirkung, so treten innere Kräfte auf. Mangels äußerer Kräfte gilt für dieses abgeschlossene System

$$0 = \vec{F} = \frac{d\vec{p}_{\text{ges}}}{dt} \quad (\text{I.2b.1})$$

Im Grunde stellt dies eine Art Sonderform des *zweiten Newtonschen Axioms* dar.

Für die Impulse der einzelnen Massenteilchen folgt somit:

$$\vec{p}_{\text{ges}} = \sum_i \vec{p}_i = \text{konstant} \quad (\text{I.2b.2})$$

c. Stöße

Stoßen bzw. wechselwirken zwei Massen mit den Impulsen $\vec{p}_1 = m_1 \cdot \vec{v}_1$ und $\vec{p}_2 = m_2 \cdot \vec{v}_2$ in einem abgeschlossenen System, so bleiben Gesamtimpuls und -energie erhalten, d.h. es gilt:

➤ der Impulserhaltungssatz: $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$ (I.2c.1)

➤ der Energieerhaltungssatz: $E_{\text{kin1}} + E_{\text{kin2}} = E'_{\text{kin1}} + E'_{\text{kin2}} + Q$ (I.2c.2)

wobei ' den Impuls bzw. die kinetische Energie der Massen nach dem Stoß/der Wechselwirkung kennzeichnet und die Größe Q „Verluste“ der kinetischen Energie berücksichtigt.

Im Spezialfall eines zentralen, ideal elastischen Stoßes ist $Q = 0$ und man kann aus den Erhaltungssätzen für die Nach-Stoß-Geschwindigkeiten folgende Gleichung herleiten:

➤ $\vec{v}'_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot \vec{v}_1 + 2 m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}$ (I.2c.3)

➤ $\vec{v}'_2 = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \vec{v}_2 + 2 m_1 \vec{v}_1}{m_1 + m_2}$ (I.2c.4)

Für den weiteren Spezialfall gleicher Massen, d.h. $m_1 = m_2$, folgt:

➤ $\vec{v}'_1 = \vec{v}_2$ (I.2c.5)

➤ $\vec{v}'_2 = \vec{v}_1$ (I.2c.6)

In anderen Worten „tauschen“ sich hier die Geschwindigkeiten aus.

Im zusätzlichen Spezialfall einer ruhenden Masse vor dem Stoß folgt dann, dass die stoßende Masse zur Ruhe kommt und die gestoßene Masse die Geschwindigkeit der stoßenden „übernimmt“.

3. Grundlagen zur Kraft

a. Definition des Begriffs der Kraft

Der Kraftbegriff - eine Erfindung der modernen Physik - beschreibt die Wechselwirkung zwischen Körpern, durch die das Bewegungsverhalten oder die Form der Körper verändert wird. wobei man zwischen dem dynamischen Kraftbegriff, der eine Bewegungszustandsänderung verursacht, und den statischen Kraftbegriff, der die Verformung eines Körpers verursacht, unterscheidet. Eine Folge ist, dass zum Ausüben bzw. Erfahren einer Kraft immer zumindest zwei Körper notwendig sind. Nachteil dieses Kraftbegriffs ist, dass er sich nur im Rahmen der Quantenfeldtheorie erklären lässt.

In der Systemphysik wird die Kraft als **Impulsstromstärke** bezüglich eines ausgewählten Systems bezeichnet. In anderen Worten wird hierbei auf den Impulsgehalt eines Körpers abgestellt. Ändert sich der Impulsgehalt, so ändert sich der Bewegungszustand des Körpers. Dies stellt eine für Schülerinnen und Schüler gut nachvollziehbare Analogie zu den anderen Stromstärken der Physik dar.

b. Trägheitskräfte

Trägheitskräfte sind Kräfte, die abhängig vom Bezugssystem auftreten, d.h. sie wirken für einen Beobachter nur dann auf einen Körper, wenn dieser sich relativ zu einem beschleunigten Bezugssystem bewegt. In anderen Worten benötigt ein Beobachter in einem beschleunigten System die Trägheitskraft, um Phänomene in diesem beschreiben und Voraussagen tätigen zu können. Für einen Beobachter in einem ruhenden System, sind weder die entsprechenden Phänomene vorhanden, noch benötigt er die Trägheitskraft um Voraussagen tätigen zu können.

i. Geradlinig beschleunigte Bewegung

Das einfachste Beispiel für Trägheitskräfte bei einer geradlinig beschleunigte Bewegung ist das abbremsende (negativ beschleunigende) oder (positiv) beschleunigende Auto. Für den Fahrzeuginsassen und einen Beobachter an der Straße stellt sich die jeweilige Situation wie folgt dar:

	ruhender Beobachter	Fahrzeuginsasse
Bremsendes Fahrzeug	Bremskraft	Trägheitskraft und Bremskraft Entgegengesetzt
Beschleunigendes Fahrzeug	Vortriebskraft	Trägheitskraft und Vortriebskraft Entgegengesetzt
Allgemein	Beschleunigende Kraft	Trägheitskraft und beschl. Kraft Entgegengesetzt

ii. Rotierendes Bezugssystem

Aus einem ruhenden Inertialsystem betrachtet erscheint ein rotierendes System als beschleunigtes (Zentripetalbeschleunigung). Für einen mitrotierenden Beobachter wirken Trägheitskräfte, die zur Beschreibung von Bewegungen im rotierenden System notwendig sind. Bewegt sich ein Massepunkt m , der sich in einem mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierenden System befindet, mit der in diesem System gemessenen Geschwindigkeit \vec{v}° am System-Ort \vec{r}° , so wirken für den mitrotierenden Beobachter im Unterschied zu einem ruhenden Beobachter zwei Trägheitskräfte:

$$\text{Zentrifugalkraft: } \vec{F}_{ZF} = m \cdot \vec{\omega} \times (\vec{r}^\circ \times \vec{\omega})$$

$$\text{Corioliskraft: } \vec{F}_C = 2 \cdot m \cdot (\vec{v}^\circ \times \vec{\omega})$$

Für den Beobachter im rotierenden Bezugssystem und einen ruhenden Beobachter stellt sich die Situation analog zur geradlinig beschleunigten Bewegung wie folgt dar:

	ruhender Beobachter	mitrotierender Beobachter
Rotation	Zentripetalkraft bzw. Radialkraft	Zentrifugalkraft und Zentripetalkraft Entgegengesetzt

Die Corioliskraft, ist beispielsweise bei der Erdrotation die Ursache dafür, dass sich Luftmassen auf der Nordhalbkugel um ein großräumiges Hochdruckgebiet im Uhrzeigersinn und um Tiefdruckgebiete im Gegenuhrzeigersinn bewegen. Diese unterschiedliche Drehbewegung ist darauf zurückzuführen, dass bei Tiefdruckgebieten die Luft von außen nach innen strömt, während sich es bei Hochdruckgebieten umgekehrt verhält.

II. Rotation eines Massepunktes

1. Grundgrößen der Kreisbewegung

a. Winkel- und Bahngeschwindigkeit

Bewegt sich ein Massepunkt in der Zeit dt auf einer Kreisbahn mit dem Radius r vom Ort \vec{r}_1 zum Ort \vec{r}_2 , so legt er die Strecke $d\vec{r}$ zurück. Dabei überstreicht er den Winkel $d\theta$, wobei $d\vec{\theta}$ der Vektor ist, der in Richtung der Drehachse zeigt. Für kleine Winkel kann $d\vec{r}$ mit dem Bogensegment gleichgesetzt werden, womit für kleine Ortsänderungen des Massepunktes entlang der Kreisbahn der Verschiebungsvektor $d\vec{r}$ gegeben ist mit

$$d\vec{r} = d\vec{\theta} \times \vec{r}. \quad (\text{II.1.1})$$

Wie am Kreuzprodukt erkennbar, steht $d\vec{r}$ somit senkrecht auf $d\vec{\theta}$ und \vec{r} (in einem Rechtssystem) und somit senkrecht auf der Drehachse.

Die Geschwindigkeit des Masseilchens wird mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\theta}}{dt}, \quad [\omega] = \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{1}{\text{s}} \quad (\text{II.1.2})$$

angegeben, die als Vektor in Richtung der Drehachse zeigt.

Für kleine Winkel $d\vec{\theta}$ ergibt sich die Bahngeschwindigkeit des Massepunktes mit:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d(\vec{\theta} \times \vec{r})}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad [v] = \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{II.1.3})$$

Die Bahngeschwindigkeit ist folglich immer tangential zum Kreisbogen orientiert und wechselt ständig die Richtung, während ihr Betrag jedoch konstant bleibt. Bei konstantem $\vec{\omega}$ nimmt sie mit wachsendem Kreisbahnradius zu.

b. Winkel-, Bahn- und Zentripetalbeschleunigung

Die Winkelbeschleunigung verursacht eine zeitliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit:

$$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\theta}}{dt^2}, \quad [\alpha] = \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = \frac{1}{\text{s}^2} \quad (\text{II.1.4})$$

Ihr Vektor verläuft parallel zum Winkelgeschwindigkeit-Vektor und somit parallel zur Drehachse.

Die Bahnbeschleunigung auf der Kreisbahn ergibt sich mit Hilfe der Produktregel mit

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(\vec{\omega} \times \vec{r})}{dt} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\alpha} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (\text{II.1.5})$$

Mit Hilfe der Grassmann-Identität erhält man:

$$\vec{a} = \vec{\alpha} \times \vec{r} + \vec{\omega} \cdot \underbrace{(\vec{\omega} \cdot \vec{r})}_{=0} - \vec{r} \cdot \underbrace{(\vec{\omega} \cdot \vec{\omega})}_{=\omega^2} = \vec{\alpha} \cdot \vec{r} \cdot \vec{e}_T - \omega^2 \cdot \vec{r}$$

$$\vec{a} = \alpha \cdot \vec{r} \cdot \vec{e}_T + \omega^2 \cdot \vec{r} \cdot \vec{e}_Z, \quad [\alpha] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (\text{II.1.6})$$

wobei \vec{e}_T bzw. \vec{e}_Z der Einheitsvektoren ist, der tangential an der Kreisbahn anliegt bzw. der immer entgegen des Radius-Vektors auf die Drehachse hin zeigt. Folglich setzt sich die Bahnbeschleunigung aus einer tangentialen und einer radialen Komponente zusammen.

Bemerkenswert ist hierbei, dass selbst bei konstanter Winkelgeschwindigkeit, sprich für $\alpha = 0$ eine

radiale Beschleunigungskomponente aufgrund der Richtungsänderung der Geschwindigkeit auftritt – die sogenannte **Zentripetalbeschleunigung**, die auch wie folgt dargestellt werden kann:

$$a_z = \frac{v^2}{r} \quad (\text{II.1.7})$$

2. Die Rotationsenergie

Die Rotationsenergie ist im Grunde diejenige kinetische Energie, die ein Massepunkt besitzt, wenn er um eine feste Achse im Abstand r mit der Bahngeschwindigkeit v kreist.

Aus Formel (II.1.3) folgt unter zu Hilfenahme der Lagrange-Identität für die Rotationsenergie:

$$\begin{aligned} E_{\text{rot}} &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \vec{v}^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\vec{\omega} \times \vec{r})^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\vec{\omega}^2 \cdot \vec{r}^2) \\ &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot [\vec{r}^2 \cdot \vec{\omega}^2 - \underbrace{(\vec{r} \cdot \vec{\omega})}_{=0} \cdot \underbrace{(\vec{\omega} \cdot \vec{r})}_{=0}] = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 \end{aligned} \quad (\text{II.2.1})$$

3. Das Trägheitsmoment

Die Formel der Rotationsenergie (II.2.1) ähnelt der der kinetischen Energie.

Die Winkelgeschwindigkeit entspricht der Geschwindigkeit und die Masse entspricht dem Produkt aus der Masse und dem quadrierten Radius. Dieses Rotations-Produkt stellt somit das Analogon zur Translations-Masse dar und wird Massenträgheitsmoment oder Trägheitsmoment genannt.

Somit ergeben sich für die Rotationsenergie und das Trägheitsmoment die Formeln

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2, \quad [E_{\text{rot}}] = \text{J} \quad (\text{II.3.1})$$

$$I = m \cdot r^2, \quad [I] = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (\text{II.3.2})$$

Das Trägheitsmoment beschreibt folglich die Drehträgeit des rotierenden Massenpunktes. Oder genauer gesagt: um eine Punktmasse auf einer Kreisbahn zu halten, muss sie einer Zentripetalbeschleunigung ausgesetzt werden, wozu Energie in Form von Rotationsenergie aufgebracht werden muss. Doch analog wie sich die träge Masse gegen eine lineare Beschleunigung stellt, stellt sich hierbei das Trägheitsmoment der Punktmasse gegen die Zentripetalbeschleunigung.

4. Der Drehimpuls

Bewegt sich ein Massepunkt geradlinig mit einer konstanten Geschwindigkeit \vec{v} so besitzt er einen Impuls \vec{p} . Wird dieser Massepunkt nun auf eine Kreisbahn mit dem Radius r gelenkt, so besitzt er den Drehimpuls

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = m \cdot (\vec{r} \times \vec{v}), \quad [L] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \quad (\text{II.4.1})$$

Der Drehimpulsvektor steht dem Kreuzprodukt zur Folge parallel zur Winkelgeschwindigkeit und somit parallel zur Drehachse.

Mit Hilfe von (II.1.3) und unter zu Hilfenahme der Grassmann-Identität ergibt sich:

$$\vec{L} = m \cdot (\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})) = m \cdot [\underbrace{\vec{\omega} \cdot \vec{r}^2}_{=r^2} - \underbrace{\vec{r} \cdot (\vec{r} \cdot \vec{\omega})}_{=0}] = m \cdot r^2 \cdot \vec{\omega} = I \cdot \vec{\omega} \quad (\text{II.4.2})$$

5. Bewegungsgleichung und Drehmoment

Das Drehmoment verursacht eine zeitliche Änderung des Drehimpulses, d.h. es gilt die **Bewegungsgleichung**

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (\text{II.5.1})$$

Für den Fall einer gleichförmigen Kreisbewegung ist $|\vec{r}| = \text{konstant}$. Mit (II.1.8) folgt somit

$$\vec{M} = \frac{d(\vec{r} \times \vec{p})}{dt} = \underbrace{\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{p}}_{=0} + \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (\text{II.5.2})$$

bzw. mit (II.4.2):

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(I \cdot \vec{\omega})}{dt} = I \cdot \vec{\alpha} \quad (\text{II.5.3})$$

Diese beiden Ergebnisse lassen sich wie folgt veranschaulichen:

Festsitzende Schrauben kann man lösen, indem man einen Schraubenschlüssel mit längeren oder verlängerten Hebelarm und somit ein größeres Drehmoment einsetzt.

Will man eine Rotation mit konstanter Winkelgeschwindigkeit gleichmäßig beschleunigen, so ist hierfür ein Drehmoment notwendig. Hieraus folgt, dass das Drehmoment der Rotationsbewegung das Analogon zur Kraft der Translationsbewegung ist.

6. Drehimpulserhaltung

Da das Drehmoment (Rotation) das Analogon zur Kraft (Translation) ist kann analog zu (I.2b.) die Drehimpulserhaltung gefolgert werden, d.h. in einem geschlossenen System gilt:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}_{\text{ges}}}{dt} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \vec{L}_{\text{ges}} = \text{konstant} \quad (\text{II.6.1})$$

III. Rotation eines starren, ausgedehnten Körpers

Ein starrer, ausgedehnter Körper kann als eine Ansammlung von Massepunkten angesehen werden. Demnach sollten obige Betrachtungen zu einem Massepunkt sozusagen „aufsummierbar“ sein.

1. Das Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment eines aus vielen Punktmassen m_i aufgebauten Körpers ist gegeben mit

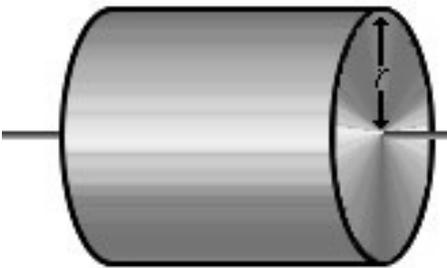
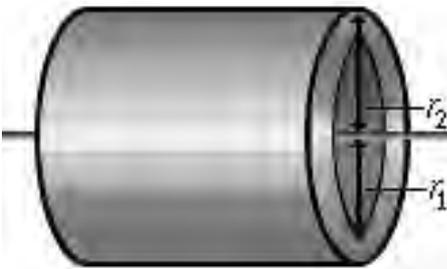
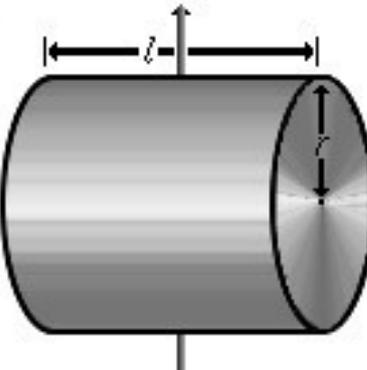
$$I = \sum_i m_i \cdot r_i^2 \quad \text{(III.1.1)}$$

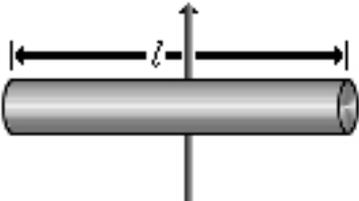
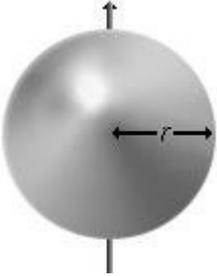
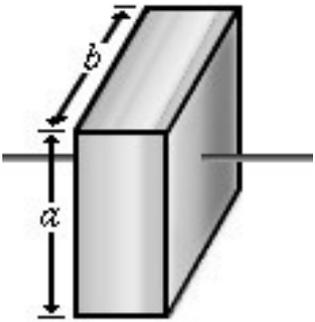
Für den Fall einer inhomogenen Massendichte ρ muss über das Körpervolumen V integriert werden

$$I = \int r^2 \cdot \rho dV = \rho \cdot \int r^2 dV \quad \text{(III.1.2)}$$

a. Rotation um eine Schwerpunktsachse

Das Trägheitsmoment I_S für spezielle Rotationskörper wie Zylinder, Hohlzylinder, Kugel, Quader etc. mit spezieller Drehachse sind in Tabellenwerken vermerkt.

Rotationsmasse	Beschreibung	Trägheitsmoment
	Ein Vollzylinder, der um seine Symmetrieachse als Schwerpunktsachse rotiert.	$I_S = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$
	Ein Hohlzylinder, der um seine Symmetrieachse als Schwerpunktsachse rotiert.	$I_S = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_2^2 - r_1^2)$
	Ein Vollzylinder, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert, auf der auch der Zylinderschwerpunkt liegt.	$I_S = \frac{1}{4} \cdot m \cdot r^2 + \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$

	<p>Ein dünner Stab, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert auf der auch der Schwerpunkt liegt.</p>	$I_s = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$
	<p>Eine massive Kugel, die um eine Achse durch ihren Mittelpunkt rotiert.</p>	$I_s = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$
	<p>Ein massiver Quaderblock, der um seine Symmetrie-achse als Schwerpunktsachse rotiert.</p>	$I_s = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (a^2 + b^2)$

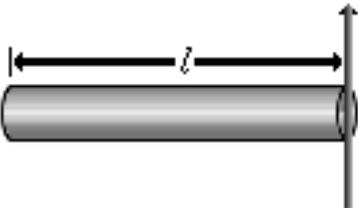
b. Rotation um eine parallelen Drehachse – Der steinersche Satz

Rotiert ein Körper mit der Masse m um eine Drehachse, die im Abstand h parallel zu der Drehachse der obigen Trägheitsmoment-Tabelle (III.1.a.) liegt, so gilt für das Trägheitsmoment:

$$I = I_s + m \cdot h^2 \qquad \text{(III.1.3)}$$

wobei I_s das unter III.1.a. tabellarisierte Trägheitsmoment ist.

Beispiel:

	<p>Ein dünner Stab, der um eine senkrechte Achse zu seiner Symmetrieachse rotiert, die am Ende des Stabes liegt.</p>	$\begin{aligned} I &= I_s + m \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2 \\ &= \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2 + \frac{1}{4} \cdot m \cdot l^2 \\ &= \frac{1}{3} \cdot m \cdot l^2 \end{aligned}$
---	--	--

c. Rotationsenergie

Die Formel (II.2.1.) ist mit dem Trägheitsmoment des starren, ausgedehnten Körpers weiterhin anwendbar.

2. Der Drehimpuls

Der durch Formel (II.4.1.) definierte Drehimpuls muss nur in der Hinsicht angepasst werden, dass für einen starren Körper die Summe der Drehimpulse aller Massepunkte einberechnet werden muss.

Die Drehimpulsformel ergibt sich somit mit

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \sum_i m_i \cdot \vec{r}_i \times \vec{v}_i \quad (\text{III.3.1})$$

Mit

$$\vec{v}_i = \vec{\omega} \times \vec{r}_i$$

ergibt sich somit analog zu der Herleitung in II.4. wieder die Formel (II.4.2.).

3. Das Drehmoment und die Drehimpulserhaltung

Die Betrachtungen aus II.5. sind auf einen starren, ausgedehnten Körper uneingeschränkt anwendbar, solange man das Trägheitsmoment aus III.1. anwendet.

Folglich sind auch die Betrachtungen zur Drehimpulserhaltung unter II.6. analog anwendbar.

IV. Weitere Besonderheiten von Rotationsbewegungen

1. Die Präzession

Wirkt eine äußere Kraft auf die Achse eines rotierenden Körpers, so wirkt sich diese Kraft im Sinne der Formel (II.5.2.) als Drehmoment aus, das senkrecht zur Drehachse und der angreifenden Kraft steht (Rechtssystem). Greift die Kraft entlang der Drehachse an, ist somit das Drehmoment Null.

Praktisch bedeutet dies, dass eine Drehachse in Drehachsenrichtung beliebig „verschoben“ werden kann, ohne dass sich dies auf die Rotation auswirkt. Wird die Drehachse lotrecht zu sich selbst bewegt und behält dabei ihre (vektorielle) Richtung bei, ist dies gleichbedeutend damit, dass keine Kraft auf sie wirkt, womit auch keine Drehmoment auftritt.

Erst wenn sie gekippt wird, entsteht ein entsprechendes Drehmoment, das nach der Bewegungsgleichung (II.5.1.) eine Drehimpulsänderung in Richtung des Drehmoments und somit senkrecht zur Drehachse und zur angreifenden Kraft erzeugt (Rechtssystem). Das Ergebnis ist, dass der rotierende Körper dieser Kraft versucht „auszuweichen“ bzw. er präzediert (lat.: vorangehen).

2. Die Nutation

Fallen bei einer Rotation Drehachse und somit der zur Drehachse parallele Drehimpuls \vec{L} nicht mit der Figurenachse, d.h. mit der Achse des größten oder kleinsten Trägheitsmoments des Körpers, zusammen, so findet eine sogenannte Nutationsbewegung statt, bei der die Figurenachse mit einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_N$ um die Drehachse nutiert (lat. nutatio = das Schwanken).

3. Bedeutung für die Experimentierreihe

Aufgrund dessen, dass in der Experimentierreihe im Zuge einer didaktischen Reduktion alle Drehachsen „festgehalten“ werden und ausschließlich mit den Figurenachsen zusammenfallen, treten die Effekte der Präzession und Nutation nicht auf.

V. Die Analogie – Zusammenfassung

Translations- und Rotationsbewegungen stellen eine Analogie dar, wobei diese nicht sofort anhand der Begriffe erkennbar sein muss. Im Folgenden soll in zusammenfassender Art die Impuls-Drehimpuls-Analogie und vor allem auch ihre Grenzen dargestellt werden.

1. Gegenüberstellung

Die Gegenüberstellung von Translation und Rotation ist am besten tabellarisch darzustellen:

Translation		Rotation	
Strecke	\vec{s}	Winkel	$\vec{\theta}$
Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt}$ ➤ intensive Größe 	Winkelgeschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\theta}}{dt}$ ➤ intensive Größe
Beschleunigung	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2}$	Winkelbeschleunigung	$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\theta}}{dt^2}$
Masse	<ul style="list-style-type: none"> ➤ m ➤ extensive Größe 	Trägheitsmoment	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $I = \sum_i m_i \cdot \vec{r}_i \times \vec{v}_i$ ➤ extensive Größe
Kinetische Energie	$E_{\text{KIN}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	Rotationsenergie	$E_{\text{ROT}} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$
Impuls	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ ➤ Erhaltungsgröße ➤ Vektorgröße 	Drehimpuls	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$ ➤ Erhaltungsgröße ➤ Vektorgröße
Kraft (konstante Masse)	$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$	Drehmoment (konstante Masse)	$\vec{M} = I \cdot \vec{\alpha}$ $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$
Bewegungsgleichung	$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \dot{\vec{p}}$	Bewegungsgleichung	$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \dot{\vec{L}}$

2. Grenzen der Analogie

Diese Analogie hat allerdings Grenzen wie in nachfolgender Tabelle dargestellt

Translation		Rotation	
Strecke	nicht endlich	Winkel	endlich (periodisch)
Masse	Masse eines festen Körpers ist konstant	Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit	durch Radius variierbar (Eisläufer-Pirouette)
Impulserhaltung	nur eine Form	Drehimpulserhaltung	zwei Arten: vektoriell und betragsmäßig

3. Die Newtonschen Gesetze für Drehimpuls

Die Impuls-Drehimpuls-Analogie ist auch auf die Newtonschen Gesetze anwendbar. Im folgenden Formulierungsbeispiele:

a. Das erste Newtonsche Gesetz – Trägheit

Impuls: Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, verändert seinen Impuls nicht.

Drehimpuls: Ein Körper, auf den kein Drehmoment wirkt, verändert seinen Drehimpuls nicht.

b. Das zweite Newtonsche Gesetz – Aktionsprinzip

Impuls: Wirkt eine Kraft auf einen Körper, so ist die dadurch erfolgende Impulsänderung zur wirkenden Kraft proportional und geschieht in Richtung der Kraft.

Drehimpuls: Wirkt ein Drehmoment auf einen Körper, so ist die dadurch erfolgende Drehimpulsänderung zum wirkenden Drehmoment proportional und geschieht in Richtung des Drehmoments.

c. Das dritte Newtonsche Gesetz – Reaktionsprinzip

Impuls: Überträgt ein Körper A auf einen Körper B einen Impuls, so entspricht dieser dem Impuls, den der Körper B aufnimmt.

Drehimpuls: Überträgt ein Körper A auf einen Körper B einen Drehimpuls, so entspricht dieser dem Drehimpuls, den der Körper B aufnimmt.

E. BILDVERZEICHNIS

➤ Bilder von „*III.1. Das Trägheitsmoment*“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Trägheitsmoment>

Hilfszettel für die Experimentierreihe

Hilfszettel 1: Aufgabe I.1.1.c)

- Überlegen Sie sich Sätze, die eine Impuls-Drehimpuls-Analogie für folgende Aussagen darstellen:
 - ✗ „Ein Läufer läuft am Start (Nullpunkt) los und legt eine gerade Strecke von 100m zurück.“
 - ✗ „Die Erde legt in einem Jahr eine Wegstrecke von etwa 940 Millionen km zurück.“

Hilfszettel 2: Aufgabe II.0.

- Markieren Sie in den Formeln $v = \frac{s}{t}$ und $\omega = \frac{\alpha}{t}$ alle bekannten Analogen bzw. gleichen Größen mit unterschiedlichen Farben.
- Überlegen Sie sich Sätze, die eine Impuls-Drehimpuls-Analogie für folgende Aussagen darstellen:
 - ✗ „Ein Läufer legt in einem Station eine komplette Runde in 50 Sekunden mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 8m/s zurück.
 - ✗ „Ein geostationärer Satellit folgt der Erddrehung mit einer Bahn-Geschwindigkeit von 3,07 km/s.“

Hilfszettel 3: Aufgabe II.1.2.

- Die Bahngeschwindigkeit eines Satelliten auf einer Umlaufbahn berechnet sich bei Kenntnis von Radius R und Umlaufdauer T durch:

$$v = \frac{\text{Strecke } s}{T} = \frac{\text{Umfang } u}{T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

Versuchen Sie im letzten Term die Winkelgeschwindigkeit zu finden.

- Betrachten Sie Ihre Werte in der Tabelle und testen Sie wie man mit den beiden ersten Werten durch Rechnung auf den dritten kommen könnte. Testen Sie zur Not verschiedene Rechenarten wie Addition, Multiplikation etc. Überlegen Sie sich dabei, welche Rechenart Sinn macht!

Hilfszettel 4: Aufgabe IV.1.0.

- für punktförmige Massen gelten zwei Formeln

x Trägheitsmoment $I = m \cdot r^2$

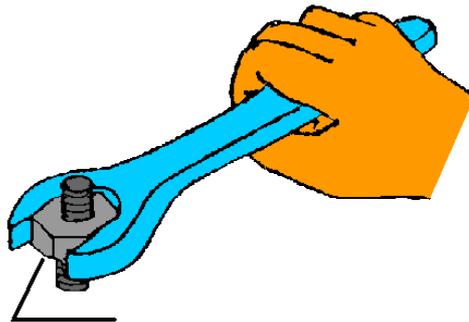
x Rotationsenergie $E_{\text{ROT}} = \frac{1}{2} \cdot m r^2 \cdot \omega^2$

Dies stellt im Grunde ein lineares Gleichungssystem dar, in dem die Masse „m“ und der Radius „r“ in der zweiten Gleichung mit Hilfe der ersten Gleichung eliminiert werden muss.

- Markieren Sie farblich die Formelbestandteile in beiden Formeln, die identisch oder analog sind.

Hilfszettel 5: Aufgabe VII.0.c)

- Sitzt eine Schraubenmutter fest, so kann man diese lösen, indem man einen Schraubenschlüssel mit langem Hebel ansetzt, da man so eine größere Kraft wirken kann.



Überlegen Sie, ob auch eine Drehung zu finden ist, wenn eine Schraube auf diese Art gelöst wird und somit auch ein Drehmoment bewirkt wird.

Folien des Eingangsvortrags

Datum : 11.12.2009
Referent: Tesmar Hendrich



Die Analogie von Impuls und Drehimpuls



Datum : 11.12.2009
Referent: Tesmar Hendrich



Die Analogie von Impuls und Drehimpuls



DAVID

Was ist unser Ziel?



Was ist unser Ziel?

- Erkenntnisse über Drehbewegungen sammeln



Was ist unser Ziel?

- Erkenntnisse über Rotationsbewegungen sammeln
- Physikalische Größen und Formeln einführen und bestätigen



Was ist unser Ziel?

- Erkenntnisse über Rotationsbewegungen sammeln
- Physikalische Größen und Formeln einführen und bestätigen
- Herausarbeiten der Analogie zwischen Impuls und Drehimpuls
- Alltagsbezug

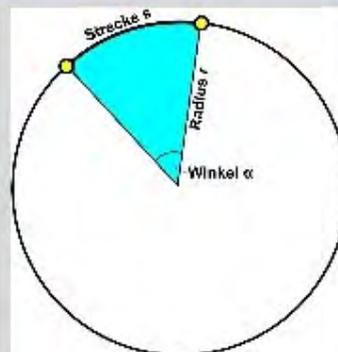


Translation	Rotation
Zeit	t
Wegänderung	s
Wegänderungsrate	v
Weg	s
Wegänderungsrate	v

I. Vorwissen

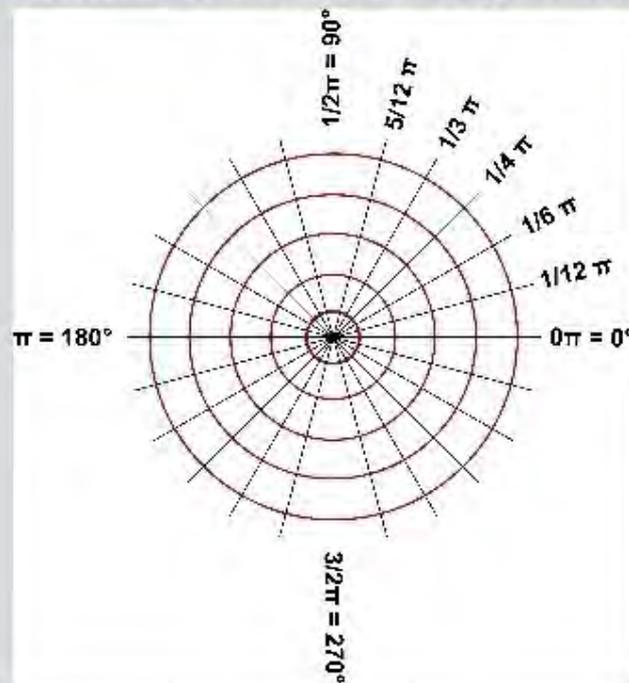


I.1. Winkelgeschwindigkeit



- ◇ Bahngeschwindigkeit $v = \frac{s}{t}$
- ◇ Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{\alpha}{t}$
- ◇ Bogenmaß $180^\circ = \pi$

I.2. Radius-Winkel-Koordinaten (Polarkoordinaten)



I.3. Translation

Translation	
Strecke	s
Geschwindigkeit	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$
Beschleunigung	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$
Masse	m
Kinetische Energie	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
Impuls	$p = m \cdot v$
Kraft (konstante Masse)	$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$

I.4. Erhaltungssätze

- Ladungserhaltung
- Energieerhaltung
 - ◊ Energieverluste durch Reibung
 - ◊ potentielle Energie
 - ◊ kinetische Energie
 - ◊ Rotationsenergie ???
- Impulserhaltung
- Drehimpulserhaltung ???

I.5. Der Impuls und die Newtonschen Axiome

➤ **Erste Newtonsche Axiom: Trägheit**

Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, verändert seinen Impuls nicht.

➤ **Zweite Newtonsche Axiom: Aktionsprinzip**

Wirkt eine Kraft auf einen Körper, so ist die dadurch erfolgende Impulsänderung zur wirkenden Kraft proportional und geschieht in Richtung der Kraft.

➤ **Dritte Newtonsche Axiom: Reaktionsprinzip**

Überträgt ein Körper A auf einen Körper B einen Impuls, so entspricht dieser dem Impuls, den der Körper B aufnimmt.

I.6. Trägheit der Masse

➤ geradlinige Bewegung

Träge Masse

➤ kreisförmige Bewegung

Trägheitsmoment

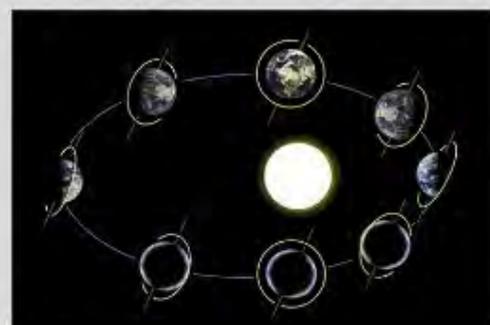


I.7. Drehbewegungen

➤ Rotation



➤ Kreisbewegung



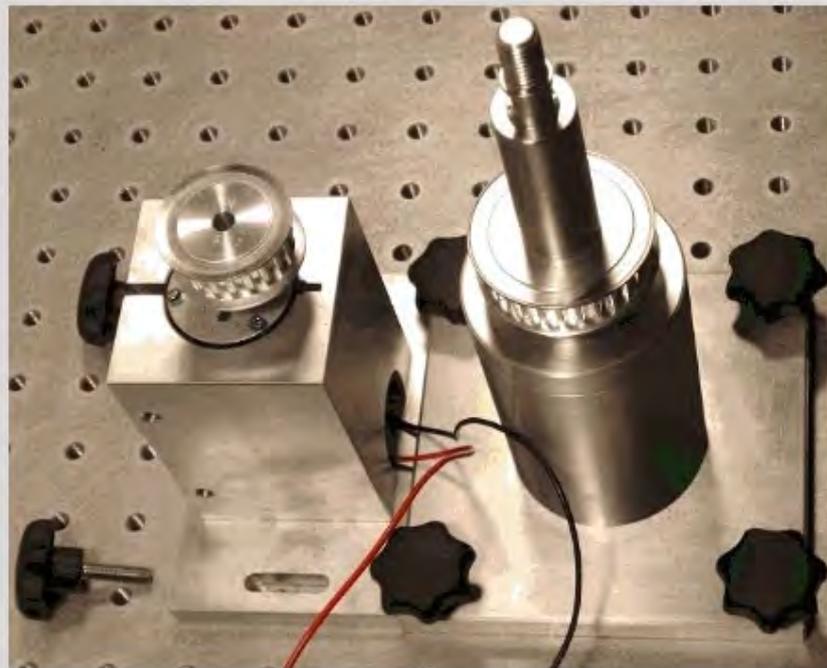
II.1. Die Drehachsen-Einzelteile



II.1. Die Drehachsen-Einzelteile



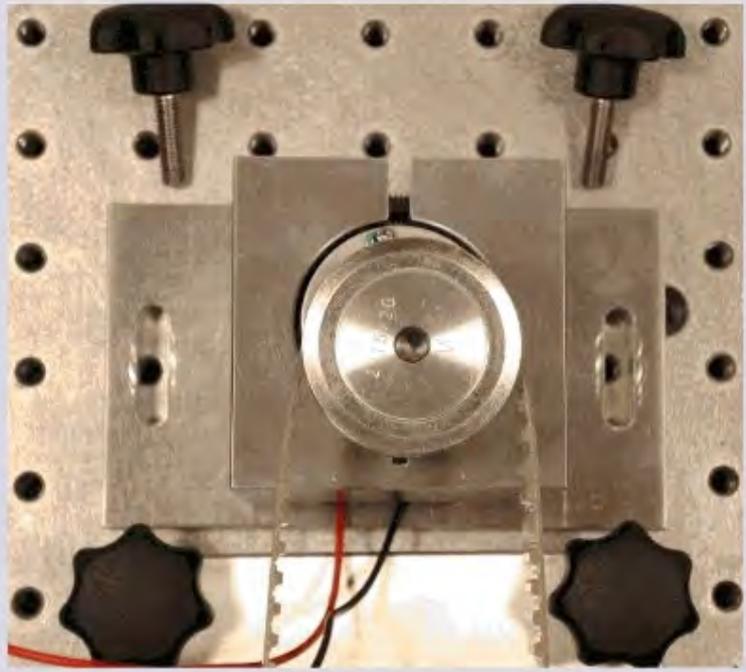
II.2. Elektromotor



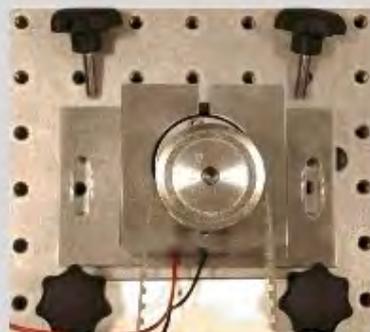
II.2. Elektromotor



II.2. Elektromotor



II.2. Elektromotor



II.3. Versuche mit dem Dreifuß



II.4. Messgeräte



III. Hilfe für die Messungen



III.1. Messen mit der Stoppuhr

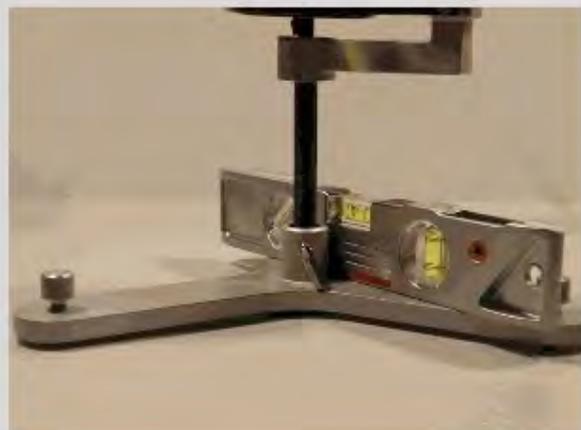
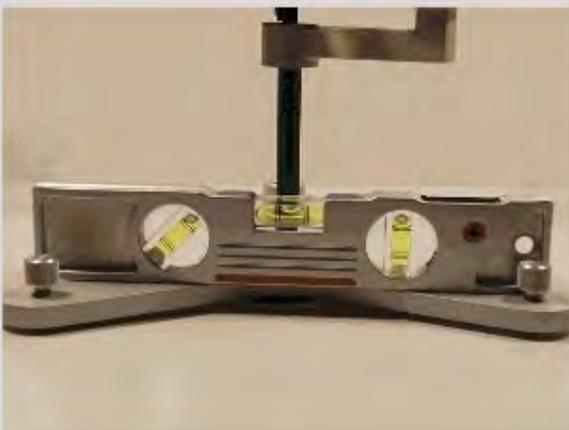


III.2. Messungen mit Lichtschranke



- Verschiedene Messarten
 - ◇ Lichtschrankenunterbrechung
 - Zeitmessungen
 - Geschwindigkeitsmessung
 - ◇ Dunkelzeitmessung
 - Geschwindigkeitsmessung
- Halterung der Lichtschranke
 - ◇ Horizontal
 - vorgesehene Aufhängung
 - ◇ Vertikal
 - Interimslösung

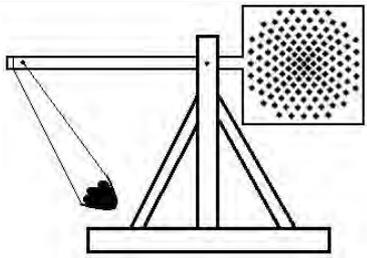
III.3. Wasserwaage



IV. Belagerungsgeräte



Viel Erfolg und Spaß
bei den Versuchen!



Evaluationsbogen

DAvID

Schülerlabor
5. Physikalisches Institut
Universität Stuttgart

Liebe Schülerinnen, liebe Schüler,

unser Anliegen ist nicht nur Ihnen die Schulphysik ein Stück näher zu bringen, sondern auch Ihr Interesse am Fach zu wecken bzw. zu erweitern.

Bevor wir uns von Ihnen verabschieden, würden wir daher gerne erfahren wie Ihnen der Versuchstag gefallen hat und welche Erfahrungen und Kenntnisse Sie mitnehmen. Sie helfen uns damit unser Angebot zu verbessern bzw. zu modifizieren.

Wir wären Ihnen daher dankbar, wenn Sie die nachfolgenden Fragen und Aussagen zum DAVID-Versuchstag sorgfältig durchlesen und den Fragebogen vollständig ausfüllen würden.

Alle Angaben werden von uns streng vertraulich und nur in anonymisierter Form weiterverarbeitet.

Da wir Sie in einigen Wochen noch einmal über Ihr erworbenes Wissen befragen möchten, um so eine weitere wichtige Rückmeldung über die Nachhaltigkeit der DAVID-Versuchsreihe erfahren zu können, bitten wir Sie am Ende dieser Seite Ihren persönlichen Code einzutragen. Dieser ermöglicht es uns, trotz der Anonymisierung Ihrer Angaben, Vergleiche zwischen den beiden Evaluationen ziehen zu können.

Vielen Dank im Voraus für Ihre Unterstützung!

Ihren Code generieren Sie wie folgt:

- Jeweils der erste und der letzte Buchstabe Ihres Vor- und Nachnamens
(Beispiel: Max Mustermann → MXMN)
- Die letzten vier Ziffern Ihrer Telefonnummer
(Beispiel: 5550123456 → 3456)
- Die Quersumme Ihres Geburtstages (nur Tag und Monat)
(Beispiel: 29.02. → 13)
- Ihr Geschlecht (m oder w)

Teilnehmercode:

--	--	--	--

1. Zum Versuchstag

Datum	Arbeitsgruppen-Größe	Betreuer

2. Zu Ihnen

Schule	Klasse	Physikstunden pro Woche

Ab jetzt gilt: ☺ heißt, die Aussage trifft zu, ☹ heißt, die Aussage trifft überhaupt nicht zu!

3. Das Vorbereitungsmaterial

ist vom Umfang her genau richtig.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
ist verständlich verfasst worden.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
ist übersichtlich aufgebaut.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
ist hilfreich zur Versuchsvorbereitung.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
ist hilfreich bei der Versuchsdurchführung.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
sollte so bleiben wie es ist.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						

Verbesserungsvorschläge zum Vorbereitungsmaterial:

4. Der Eingangsvortrag

war gut strukturiert.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
war vom Umfang her genau richtig.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
war verständlich.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
war für die Versuchsdurchführung hilfreich.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
sollte so bleiben wie er ist.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						

Verbesserungsvorschläge zum Eingangsvortrag:

5. Der Betreuer

machte einen qualifizierten Eindruck.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
konnte Fragen zum Versuch verständlich beantworten.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
war hilfsbereit.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
war engagiert.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
konnte verdeutlichen, was die Inhalte und die Vorgehensweise beim Versuch sind.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
hat insgesamt den Versuch gut betreut.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						

Verbesserungsvorschläge für den Betreuer:

6. Zur Versuchsreihe

War die Zeit ausreichend?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
War die Gruppengröße in Ordnung?	zu klein	<input type="checkbox"/>	zu groß							
Wurde die Arbeitsatmosphäre als angenehm empfunden?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Wie gut kamen Sie mit dem Versuchsaufbau zurecht?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
War der Umfang der vorausgesetzten Kenntnisse in Ordnung?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Trägt die Versuchsreihe zu einem besseren Verständnis des Stoffgebietes bei?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Trägt die Versuchsreihe zu einer Veranschaulichung des Stoffgebietes bei?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
War zu jedem Zeitpunkt klar wofür ein Versuch dient?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Konnten die gemessenen Resultate nachvollzogen werden?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Bauten die Versuche sinnvoll aufeinander auf?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Wie hat Ihnen die Versuchsreihe insgesamt gefallen?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							

Verbesserungsvorschläge zur Versuchsreihe:

7. Die einzelnen Themenbereiche

Wie beurteilen Sie insgesamt die einzelnen Themenbereiche?

1. Themenbereich: Der Winkel	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
2. Themenbereich: Die Winkelgeschwindigkeit	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
3. Themenbereich: Das Trägheitsmoment	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
4. Themenbereich: Trägheitsmoment und Rotationsenergie	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
5. Themenbereich: Der Drehimpuls	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
6. Themenbereich: Die Drehimpulserhaltung	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
7. Themenbereich: Das Drehmoment	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
8. Themenbereich: Anwendungen und Spielereien	☺	<input type="checkbox"/>	☹							

8. Die einzelnen Versuche

Welche Versuche haben Ihnen besonders gefallen?

Welche Versuche haben Ihnen gar nicht gefallen?

Verbesserungsvorschläge:

9. Ideen für weitere Versuche

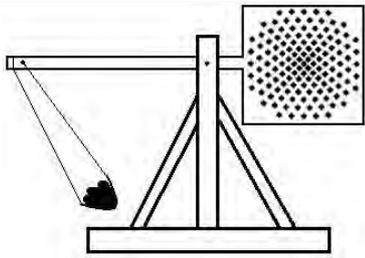
Haben Sie vielleicht Ideen mit was für neuen oder erweiterten Versuchen wir diese Versuchsreihe verbessern könnten?

10. Kurz und bündig

Hatte der Versuch Bezug zum Alltag?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Wurde Schulwissen vertieft und veranschaulicht?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Ich habe viel bei dem Versuch gelernt.	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
War Ihr Eindruck vom Schülerlabor positiv?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Würden Sie gerne an weiteren Versuchsreihen teilnehmen?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Würden Sie uns weiterempfehlen?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					

11. Weitere Kommentare

Gibt es ansonsten noch Lob, Kritik oder Anregungen? Insbesondere würde uns interessieren, was wir Ihrer Meinung nach beibehalten sollten und was geändert werden sollte.



Evaluationsbogen Lehrer

DAvID

Schülerlabor
5. Physikalisches Institut
Universität Stuttgart

Unser Anliegen ist nicht nur Ihren Schülerinnen und Schülern die Schulphysik ein Stück näher zu bringen, sondern auch das Interesse der Jugendlichen am Fach zu wecken bzw. zu erweitern.

Bevor wir uns von Ihnen verabschieden, würden wir daher gerne erfahren wie Ihnen der Versuchstag gefallen hat und inwieweit Sie der Ansicht sind, dass er Ihren Schülerinnen und Schülern Erfahrungen und Kenntnisse vermittelt hat. Sie helfen uns damit unsere Angebote zu verbessern bzw. zu modifizieren.

Wir wären Ihnen daher dankbar, wenn Sie die nachfolgenden Fragen und Aussagen zum DAVID-Versuchstag sorgfältig durchlesen und den Fragebogen vollständig ausfüllen würden.

Vielen Dank im Voraus für Ihre Unterstützung!

1. Zum Versuchstag

Datum	Klassengröße	Betreuer

2. Zu Ihnen

Name	Fächerkombination	Schule	Lehrer der Klasse

3. Zum Organisatorischen

Gab es organisatorische Probleme? (Anfahrt, Wegbeschreibung, Kontakt zum Schülerlabor, Zusendung des Vorbereitungsmaterials etc.)

4. Der Eingangsvortrag

war gut strukturiert.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
war verständlich.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
war für die Versuchsdurchführung hilfreich.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
sollte so bleiben wie er ist.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						

Verbesserungsvorschläge zum Eingangsvortrag:

5. Zum Vorbereitungsmaterial

Wie beurteilen Sie das erhaltene Vorbereitungsmaterial?

Laborbuch:

Es ist vom Umfang her genau richtig.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Es ist verständlich verfasst worden.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Es ist übersichtlich aufgebaut.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Die Anzahl der Bilder und Versuchsskizzen sind genau richtig.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Die Versuchsbeschreibungen sind klar und verständlich.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Die Aufgabenstellungen sind klar gestellt.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der rote Faden in der Versuchsanreihung ist klar erkennbar.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Es sollte so bleiben wie es ist.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						

Verbesserungsvorschläge zum Laborbuch:

Lehrerbegleitheft:

Die Beschreibung zum Versuchshintergrund gibt einen guten Überblick.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Die Beschreibung zum Versuchshintergrund ist vom Umfang her genau richtig.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Die Beschreibung zum Versuchshintergrund ist verständlich verfasst worden.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Die Beschreibung zum Versuchshintergrund ist übersichtlich aufgebaut.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Versuchsteil gibt einen guten Überblick.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Versuchsteil ist vom Umfang her genau richtig.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Versuchsteil ist verständlich verfasst worden.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Versuchsteil ist übersichtlich aufgebaut.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Theorieteil gibt einen guten Überblick.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Theorieteil ist vom Umfang her genau richtig.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Theorieteil ist verständlich verfasst worden.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
Der Theorieteil ist übersichtlich aufgebaut.	☺	<input type="checkbox"/>	☹						

Verbesserungsvorschläge zum Lehrerbegleitheft:

6. Der Betreuer

machte einen qualifizierten Eindruck.	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
konnte Fragen zum Versuch verständlich beantworten.	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
war hilfsbereit.	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
war engagiert.	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
konnte verdeutlichen, was die Inhalte und die Vorgehensweise beim Versuch sind.	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
hat insgesamt den Versuch gut betreut.	☺	<input type="checkbox"/>	☹							

Verbesserungsvorschläge für den Betreuer:

7. Zur Versuchsreihe

War die Zeit ausreichend?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
War die Gruppengröße in Ordnung?	zu klein	<input type="checkbox"/>	zu groß							
Wurde die Arbeitsatmosphäre als angenehm empfunden?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Wie gut kamen die SuS mit dem Versuchsaufbau zurecht?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
War der Umfang der vorausgesetzten Kenntnisse in Ordnung?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Trägt die Versuchsreihe zu einem besseren Verständnis des Stoffgebietes bei?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Trägt die Versuchsreihe einer Veranschaulichung des Stoffgebietes bei?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Bauten die Versuche sinnvoll aufeinander auf?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							
Wie hat Ihnen die Versuchsreihe insgesamt gefallen?	☺	<input type="checkbox"/>	☹							

Verbesserungsvorschläge zur Versuchsreihe:

8. Die einzelnen Themenbereiche

Wie beurteilen Sie insgesamt die einzelnen Themenbereiche?

1. Themenbereich: Der Winkel	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
2. Themenbereich: Die Winkelgeschwindigkeit	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
3. Themenbereich: Das Trägheitsmoment	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
4. Themenbereich: Trägheitsmoment und Rotationsenergie	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
5. Themenbereich: Der Drehimpuls	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
6. Themenbereich: Die Drehimpulserhaltung	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
7. Themenbereich: Das Drehmoment	☺	<input type="checkbox"/>	☹						
8. Themenbereich: Anwendungen und Spielereien	☺	<input type="checkbox"/>	☹						

Verbesserungsvorschläge zu den Themenbereichen:

9. Die einzelnen Versuche

Welche Versuche haben Ihnen besonders zugesagt?

Welche Versuche haben Ihnen gar nicht zugesagt?

Verbesserungsvorschläge:

10. Ideen für weitere Versuche

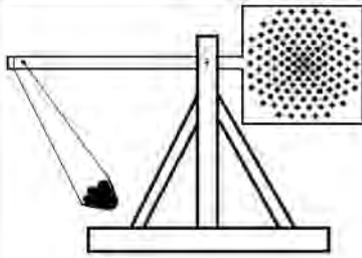
Haben Sie vielleicht Ideen mit was für neuen oder erweiterten Versuchen wir diese Versuchsreihe verbessern könnten?

11. Kurz und bündig

Hatte der Versuch Bezug zum Alltag?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Wurde Schulwissen vertieft und veranschaulicht?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Haben Sie den Eindruck, dass Ihre SuS bei dem Versuch viel gelernt haben?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
War Ihr Eindruck vom Schülerlabor positiv?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Würden Sie an diesen Versuch mit einer weiteren Klasse noch einmal teilnehmen?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Würden Sie mit einer Schulklasse gerne an weiteren Versuchsreihen teilnehmen?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					
Würden Sie uns weiterempfehlen?	☺	<input type="checkbox"/>	☹					

12. Weitere Kommentare

Gibt es ansonsten noch Lob, Kritik oder Anregungen? Insbesondere würde uns interessieren, was wir Ihrer Meinung nach beibehalten sollten und was geändert werden sollte.



Nachbereitung

DAVID

Schülerlabor
5. Physikalisches Institut
Universität Stuttgart

1. Winkel und Winkelgeschwindigkeit

1.1. Welche der Aussagen sind *korrekt*?

AUSSAGE	RICHTIG	FALSCH
Die Bahn- und die Winkelgeschwindigkeit sind immer gleich groß.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Bahngeschwindigkeit ist für alle Punkte eines rotierenden, starren Körpers gleich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Für alle Punkte eines rotierenden, starren Körpers ist die Winkelgeschwindigkeit nicht von dem Rotationsradius abhängig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Den Radius eines um eine Achse rotierenden Punktes kann man mit dem Quotienten der Bahngeschwindigkeit und der Winkelgeschwindigkeit ($r = v/\omega$) errechnen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Besitzen um eine Achse rotierende Objekte die gleiche Winkelgeschwindigkeit, so ist die Bahngeschwindigkeit des Objekts mit kleinstem Kreisbahnradius am größten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das ebene Polarkoordinatensystem benutzt als Koordinaten den Radius r und den Winkel α	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1.2. Verständnisaufgaben

- Ein stationärer Satellit befindet sich immer von der Erde aus gesehen an der selben Position. Können Sie Aussagen über die Winkel- und die Bahngeschwindigkeit machen und falls ja, welche?
- Mit welcher Winkelgeschwindigkeit rotiert das Sternbild Orion von der Erdoberfläche aus gesehen um die Erdachse? Ist diese Winkelgeschwindigkeit von allen Stellen der Erde aus gesehen gleich?
- Im Vergleich zum Sternbild Orion ist der Kleine Wagen von einem Betrachter auf der Nordhalbkugel viel näher an der Erdachse. Wie unterscheiden sich die Winkelgeschwindigkeiten?
- Eine Kurve soll den doppelten Kurvenradius wie eine andere Kurve haben. Wie unterscheidet sich die Winkelgeschwindigkeit, wenn ein Motorrad mit gleicher Geschwindigkeit durch diese beiden Kurven fährt?
- In Radius-Winkel-Koordinaten (Polarkoordinaten) befindet sich ein Punkt an der Stelle $(\sqrt{2}|\pi/4)$. Geben Sie die Koordinaten im kartesischen Koordinatensystem an.
- Warum sehen wir immer nur eine Seite des Mondes, wenn sich dieser doch auf einer Umlaufbahn um die Erde befindet?

1.3. Rechenaufgaben

- a. Der Erdradius beträgt etwa 6370km. Bestimmen Sie Winkelgeschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit am Äquator.
- b. Die geographische Breite von Stuttgart beträgt $48,77^\circ$. Bestimmen Sie Winkelgeschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit von Stuttgart.
- c. Ein Motorrad hat in einer Kurve mit einem Kurvenradius von 200m eine Geschwindigkeit von 72 km/h. Wie groß ist die Winkelgeschwindigkeit?
- d. Eine Uhr hat drei gleich lange Sekunden-, Minuten- und Stundenzeiger. Wie groß sind die durchschnittlichen Winkelgeschwindigkeiten? Wie lang sind die Zeiger, wenn die Spitze des Minutenzeigers eine Bahngeschwindigkeit von 12,6cm/min hat?
- e. Wie lange wurde die nachfolgende Aufnahme des südlichen Sternenhimmels belichtet?



2. Trägheitsmoment und Rotationsenergie

2.1. Welche der Aussagen sind *korrekt*?

AUSSAGE	RICHTIG	FALSCH
Die Rotationsenergie kann als eine Form der kinetischen Energie angesehen werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Für die Rotationsenergie eines Körpers ist nur noch das Trägheitsmoment ausschlaggebend, nicht mehr die Masse.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jeder Körper besitzt das Trägheitsmoment $I = m \cdot r^2$.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Trägheitsmoment eines Zylinders und eines Hohlzylinders sind verschieden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Trägheitsmoment eines Körpers ist von der Lage der Rotationsachse abhängig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.2. Verständnisaufgaben

- Betrachtet wird die Rotation zweier Zylinder 1 und 2 mit gleicher Rotationsenergie. Der erste Zylinder rotiert schneller als der zweite. Welche Gründe könnte das haben?
- Eine Eiskunstläuferin beginnt eine Pirouette mit ausgestreckten Armen. Wie verändert sich die Pirouette, wenn die Kunstläuferin die Arme anzieht? Was ist der Grund für diese Änderung?
- Eine Kugel, ein Zylinder und ein Hohlzylinder rollen eine schiefe Ebene hinab. Die Masse der drei Körper und die Außenradien seien identisch. Welcher Körper erreicht als erster das Ende der schiefen Ebene?

2.3. Rechenaufgaben

- Das Trägheitsmoment eines Körpers ist doppelt so groß, wie das eines anderen. Wie unterscheiden sich die Winkelgeschwindigkeiten bei gleicher Rotationsenergie?
- Ein Körper hat das vierfache Trägheitsmoment eines zweiten Körpers, rotiert dafür aber nur mit der halben Winkelgeschwindigkeit. Wie groß sind die Rotationsenergien der beiden Körper im Vergleich?
- Ein Zylinder hat eine Masse von 500g und einen Radius von 4cm. Von einer Kugel mit dem Radius 5cm ist die Masse unbekannt. Bei einer Rotation mit gleicher Rotationsenergie hat die Kugel eine Winkelgeschwindigkeit, die dem 0,8-fachen der Winkelgeschwindigkeit des Zylinders entspricht. Berechne die Masse der Kugel.

3. Drehimpuls, Drehimpulserhaltung und Drehmoment

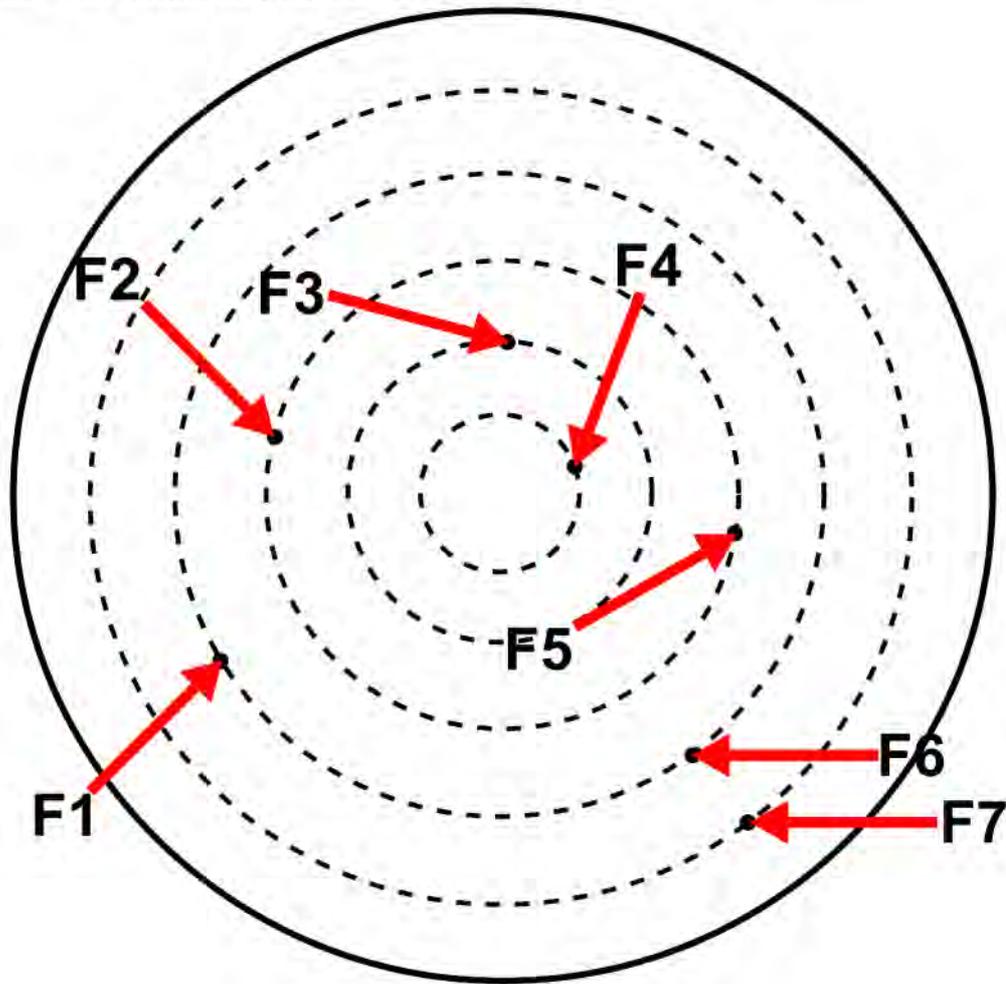
2.1. Welche der Aussagen sind *korrekt*?

AUSSAGE	RICHTIG	FALSCH
Die Drehimpulserhaltung ist lediglich eine Impulserhaltung der Drehbewegung und daher eigentlich kein eigener Erhaltungssatz.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Drehimpulserhaltung ist eine Erweiterung der fundamentalen Erhaltungssätze.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rotiert eine Masse mit konstantem Drehimpuls, so wirkt auch ein Drehmoment.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rotiert eine Masse mit sich gleichmäßig ändernden Drehimpuls, so wirkt ein Drehmoment mit konstanten Betrag.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ein Wellrad ist wie ein Hebel ein Kraftwandler, der der Veränderung einer Kraft in Bezug auf Angriffspunkt, Richtung oder Betrag dient.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Treten bei einer Rotation Reibungsverluste auf, so benötigt man ein Drehmoment, um die Winkelgeschwindigkeit konstant zu halten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.2. Aufgaben

- Eine Eiskunstläuferin beginnt eine Pirouette mit ausgestreckten Armen. Sie benötigt dabei für eine Umdrehung 0,4s. Durch Heranziehen der Arme verringert sie ihr Trägheitsmoment um 22%. Welche Drehzahl hat sie nun?
- Eine Sechskantschraube sitzt fest. Ein Handwerker löst sie, indem er eine Zange mit langem Griff, sprich einen langen Hebel ansetzt, mit dem er eine möglichst große Kraft wirken kann. Erzeugt er damit auch gleichzeitig ein Drehmoment? Könnte er statt dem Hebel auch eine Drehscheibe mit dem Radius so groß wie die Hebellänge auf die Schraube aufsetzen und sie durch Drehen lösen?
- Bei einem fliegenden Hubschrauber fällt der Heckrotor aus, worauf er sich um seine eigene Achse zu drehen beginnt. Dreht sich der Hubschrauber mit oder entgegen der Drehrichtung des Rotors? Warum rotiert der Hubschrauber überhaupt? Geben Sie an wie sich die Größen Drehimpuls, Trägheitsmoment, Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit verhalten.
- Ein Astronaut soll Außenreparaturen an der ISS vornehmen. Dazu muss er eine Schraube lösen. Warum benutzt er dazu nicht einen normalen elektrischen Bohrer mit einem entsprechenden Aufsatz? Beziehungsweise was würde geschehen, wenn er ohne sich festzuhalten versuchen würde auf diese Art die Schraube zu lösen?

- e. Auf eine im Schwerpunkt drehbar gelagerte Drehscheibe greift an sieben verschiedene Punkten eine Kraft mit gleichem Betrag aber aus unterschiedlichen Richtungen an. Sortieren Sie die Kräfte danach, welche das größte Drehmoment erzeugen. Geben Sie außerdem an, welche der Kräfte eine Links- und welche eine Rechtsrotation erzeugen.



4. Die Analogie von Impuls und Drehimpuls

a. Ergänze nachfolgende Tabelle

ANALOGIE			
Translation		Rotation	
Strecke	\vec{s}		
Geschwindigkeit	$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt}$		
Beschleunigung	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2}$		
Masse	m		
Kinetische Energie	$E_{\text{KIN}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$		
Impuls	$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$		
Kraft (konstante Masse)	$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$		

b. Wie müssen nachfolgende Newtonsche Axiome umgeschrieben werden, damit sie für den Drehimpuls gelten?

Impuls: Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, verändert seinen Impuls nicht.

Drehimpuls:

Impuls: Wirkt eine Kraft auf einen Körper, so ist die dadurch erfolgende Impulsänderung zur wirkenden Kraft proportional und geschieht in Richtung der Kraft.

Drehimpuls:

Impuls: Überträgt ein Körper A auf einen Körper B einen Impuls, so entspricht dieser dem Impuls, den der Körper B aufnimmt.

Drehimpuls:

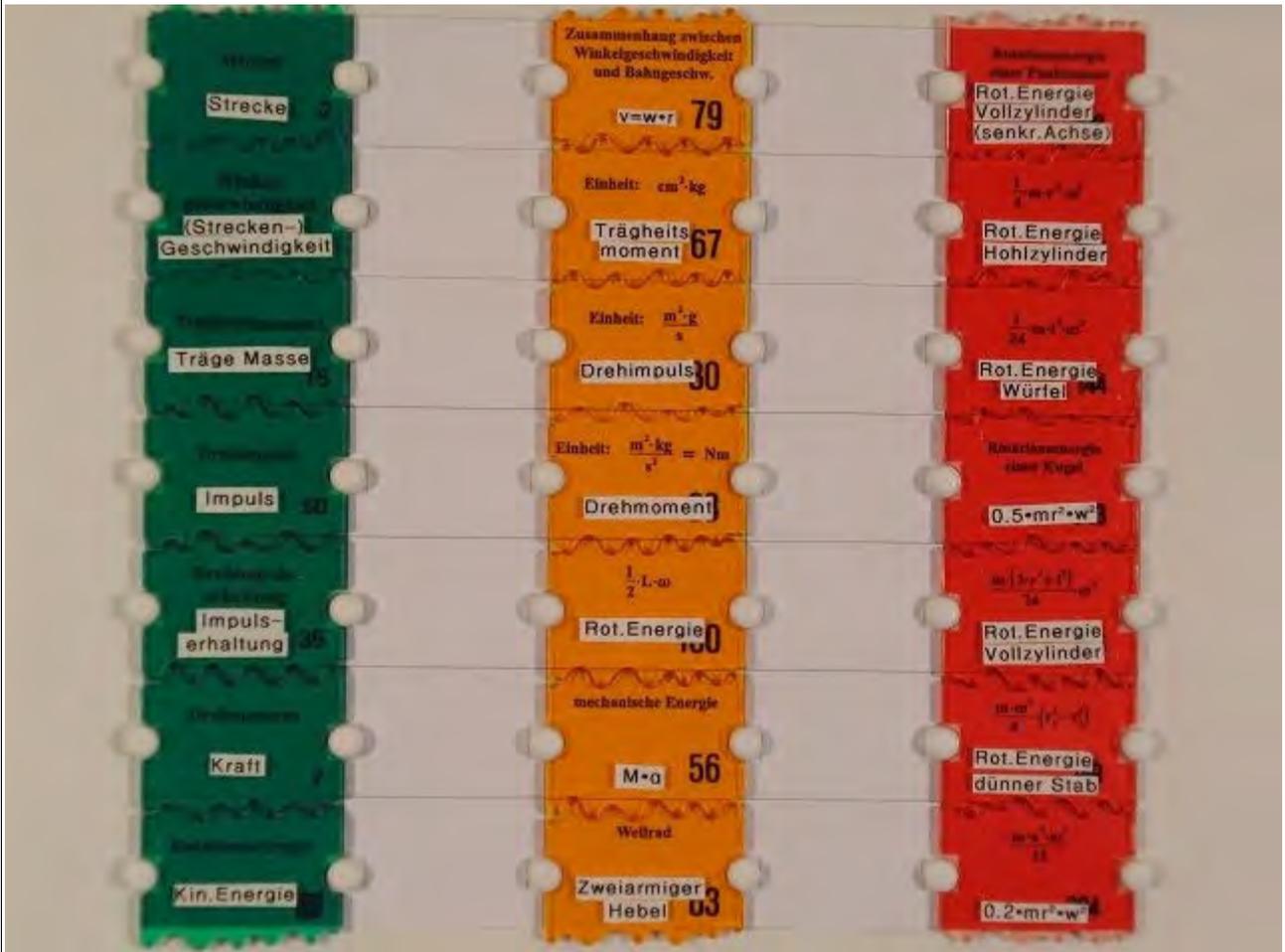
5. Alltagsbezug

In den nachfolgenden Bildern sind Drehbewegungen im Alltag dargestellt/zu finden. Machen Sie – soweit dies möglich ist – Aussagen über die physikalischen Größen Impuls, Drehimpuls, Impulserhaltung, Drehimpulserhaltung, Kraft, Drehmoment und Trägheitsmoment.

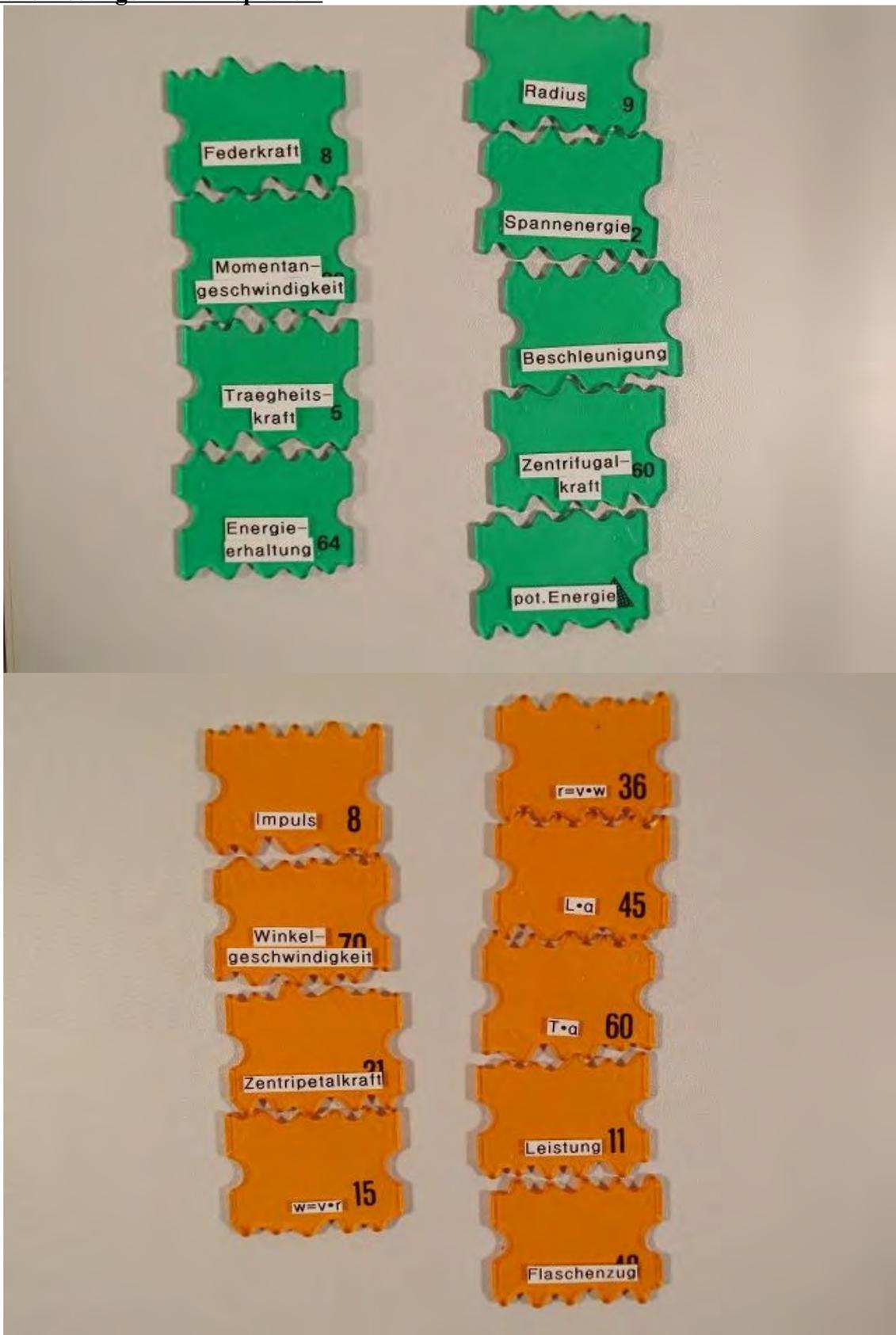


Hilfsmittel Puzzleplaner

Lösungen Puzzleplaner:



„Falsche Lösungen“ Puzzleplaner:



BILDVERZEICHNIS (STAND: 03.03.2010)

- Bilder von Körpern für die Trägheitsmomenttabelle im Laborbuch und Lehrerbegleitheft:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Trägheitsmoment> (Stand: 03.03.2010)
- Bilder von Seite 130 (Nachbereitungsbögen):
 - Elektromotor: *<http://www.directindustry.de/prod/bodine-electric/ac-elektromotor-9033-281499.html>*
 - Bell Boing-V22-Osprey: *http://www.aliensexarea.com/wp-content/uploads/2008/08/osprey_v-22.jpg*
 - Drehmoment-Schlüssel: *http://www.sax-online.de/shop/Hazet_Drehmomentschluessel12_181.htm*
 - Karussell: *<http://www.sehenswerter-bayerischer-wald.de/assets/images/straubing-volksfest-gaebodenvolksfest-karussell.jpg>*
 - Kompass: *http://abo.spiegel.de/do/abos_detail!ABOSabos-mini-Kompass*
 - Golf: *http://www.birkenhof.or.at/cms/images/golfen_large.jpg*
 - Rad: *<http://www.luxist.de/luxist/wp-content/uploads/2007/05/bmw-fahrrad.jpg>*
 - Mühle: *<http://www.familie-post-altfunnixsiel.de/muehle%201.jpg>*
 - Galaxie: *<http://www.planeten.ch/images/milkyway.gif>*
 - Spitfire: *http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Spitfire_PR_XIX_PS890.jpg*
 - Tornado:
http://www.welt.de/multimedia/archive/1220713945000/00660/Hurrikan_1_DW_Vermi_660077g.jpg
 - Billiard: *<http://de.academic.ru/pictures/dewiki/49/180px-Billard.JPG>*

LITERATURVERZEICHNIS

- *Wolfgang Demtröder, „Experimentalphysik 1“, Springer Verlag 4.Auflage*
- *Hans-Christoph Mertins, Gilbert Markus, „Prüfungstrainer Experimentalphysik“, Spektrum Akademischer Verlag, 1. Auflage*
- *Herbert Goldstein, Charles P. Poole Jr., John L. Safko Sr., „Klassische Mechanik“, Wiley-VHC Verlag, 3. Auflage*
- *Friedhelm Kuypers, „Klassische Mechanik“, Wiley-VHC Verlag, 7. Auflage*
- *Armin Wachter, Henning Hoerber, „Repetitorium Theoretische Physik“, Springer Verlag, 1. Auflage*
- *Torsten Fliessbach, Hans Walliser, „Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik“, Spektrum Akademischer Verlag, 1. Auflage*

DANKSAGUNGEN

Diese Arbeit möchte ich meinen Eltern widmen, die es mir ermöglicht haben dieses Studium überhaupt in Angriff nehmen zu können. Danke für Eure Unterstützung!

Außerdem möchte ich allen Personen danken, die mich in den vergangenen Monaten tatkräftig unterstützt haben:

Professor Dr. Tilman Pfau für sein stetiges Interesse und insbesondere für die Vergabe einer Arbeit, die mit ihrem sowohl physikalischen als auch fachdidaktischen Hintergrund eine wertvolle Bereicherung meines Lehramt-Studiums dargestellt hat.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Professor Franz Kranzinger, der ebenfalls Initiator dieser Arbeit gewesen ist und ohne dessen tatkräftige Unterstützung diese Arbeit in dieser Form niemals möglich gewesen wäre. Vielen Dank für Ihre hilfreichen Ratschläge, fachdidaktischen Hinweise und das offene Ohr, das Sie ständig hatten.

Vielen Dank auch an Dr. Robert Löw, der mich trotz permanenten Zeitmangels während dieser Zeit betreute und umfangreich unterstützte.

Ein dickes Danke geht auch an die Mechanische Werkstatt der Universität Stuttgart für die Fertigung der vielen Versuchskomponenten und die ständige Hilfsbereitschaft. Ihr seid ein tolles Team! Ein ganz spezieller Dank geht hierbei an den Leiter Ralf Kamella, der mir eine großartige Einleitung in das Programm „Autodesk Inventor“ gegeben hat und der mich bei vielen Konstruktionen beraten und unterstützt hat. Ebenso danke ich Felix Remppel, der nicht nur den Großteil meiner Versuchskomponenten gefertigt hat, sondern der auch ansonsten viel Interesse und Engagement gezeigt hat.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an alle Mitarbeiter des 5. Physikalischen Instituts. Insbesondere seien hierbei Karin Otter für ihr Engagement für das Schülerlabor und Harald Kübler für alles computertechnische genannt.

Und last but not least ein ebenfalls ganz besonderer Dank an Christoph Hölldampf, Jochen Kunath, Sandra Gaiser und Vera Winger, die mit mir im Schülerlabor arbeiteten und für eine Atmosphäre sorgten, die die vergangenen Monate zu etwas ganz besonderes gemacht haben. Ohne Euch wäre diese Zeit nicht halb so schön gewesen!