

43. Internationale PhysikOlympiade

Tallinn & Tartu, Estland 2012



Wettbewerbsleitung

Dr. Stefan Petersen
Tel.: 0431 / 880-5120
email: petersen@ipho.info

Sekretariat

Lulu Hoffmeister
Tel.: 0431 / 880-5387
email: sekretariat@ipho.info

Anschrift: IPN an der Universität Kiel
Olshausenstraße 62
24098 Kiel

Fax: 0431 / 880-3148

Webseite: www.ipho.info

Aufgaben der 2. Runde

- Teilnahmeberechtigt sind alle Schülerinnen und Schüler, die die 1. Runde erfolgreich abgeschlossen oder sich über einen anderen Wettbewerb für die 2. Runde qualifiziert haben und **nach dem 30. Juni 1992 geboren** sind.
- Die Aufgaben sind **ohne fremde Hilfe und in Einzelarbeit** zu lösen. Gemeinschaftslösungen sind nicht zulässig. **Beachten Sie hierzu auch die erste Seite des beigefügten Adressbogens und schicken Sie diese ausgefüllt und unterschrieben mit!**
- Bitte bearbeiten Sie jede Aufgabe auf gesonderten Blättern und schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Adresse.
- Die Lösungen können handschriftlich abgegeben werden. Die Darstellung sollte logisch vollständig und nicht unnötig breit sein. Wenn Sie Formeln oder Zwischenergebnisse, die nicht im Physiklehrbuch der Schule stehen, aus anderen Quellen entnehmen, geben Sie diese bitte an.
- **Das Lösen der Probleme mit dem Computer ist nicht zulässig.** Sie dürfen einen Computer unterstützend (zum Beispiel zum Tippen Ihrer Bearbeitung oder zum Zeichnen) verwenden. Die Lösung muss aber ohne Computer nachvollziehbar sein.
- Der **Abgabetermin ist der 31.10.2011** (Poststempel). Bis zu diesem Datum müssen Sie Ihre **Bearbeitung unkorrigiert zu Ihrem Landesbeauftragten schicken**. Die Mitteilung, ob Sie in die nächste Runde kommen, erhalten Sie kurz vor Weihnachten. Eingeladen werden die etwa 50 Bestplatzierten. Der **Termin der 3. Runde ist der 28.01. bis 03.02.2012**.
- Die eingereichten Arbeiten werden nicht zurückgeschickt. Es wird deshalb empfohlen, für eigene Zwecke eine Kopie anzufertigen. Eine Musterlösung geht ihnen mit der Benachrichtigung über Ihr Abschneiden in der 2. Runde zu.
- In der Regel haben selbst die Bestplatzierten nicht alle Aufgaben richtig gelöst. **Verlieren Sie also nicht den Mut** und schicken Sie Ihre Aufgaben auch dann ein, wenn Sie nicht alle Aufgabenteile bearbeiten konnten. Wir wünschen viel Erfolg!
- Weitere Informationen und Aktuelles finden Sie unter www.ipho.info.



Aufgabe 1 Wirbelstrombremsung

(19 Punkte)

Durch Magnetfelder induzierte Wirbelströme können zum Abbremsen mechanischer Systeme verwendet werden und finden zum Beispiel in modernen Zügen als Bremsanlagen Anwendung. In dieser Aufgabe sollen Sie ein einfaches Modellsystem zur Abbremsung eines mechanischen Systems mittels Wirbelströmen untersuchen.

Die nebenstehend abgebildete Leiter der Gesamtlänge $l = 1,00\text{ m}$ besteht aus dünnen Kupferdrähten mit einem Durchmesser von $d = 0,10\text{ mm}$. Die einzelnen Sprossen besitzen eine Länge von $b = 2,0\text{ cm}$ und haben einen Abstand von $a = 5,0\text{ mm}$.

- a) Bestimmen Sie den elektrischen Widerstand der Leiter zwischen den Punkten A und B. (5 Punkte)

Die Leiter wird nun so zu einem Ring zusammengerollt, dass die Punkte A und C sowie die Punkte B und D miteinander verbunden sind. Der Ring wird auf dem Rand einer abgeschnittenen, dünnwandigen Plastikflasche befestigt (vgl. Abb. 1). Der kreisförmige Boden der Flasche besitzt eine Masse von 80 g, die Wand, auf der der Ring befestigt ist, eine Masse von 20 g. Dabei ist die Massenverteilung in Boden und Wand homogen.

Der Ring mit der Flasche kann frei um die eingezeichnete Symmetrieachse rotieren. An den Ring wird nun ein Hufeisenmagnet gebracht, der in einem kleinen Abschnitt des Ringes mit Breite $2a$ ein homogenes Magnetfeld der magnetischen Flussdichte $B = 0,60\text{ T}$ erzeugt. Außerhalb dieses kleinen Bereiches soll das Magnetfeld vernachlässigt werden.

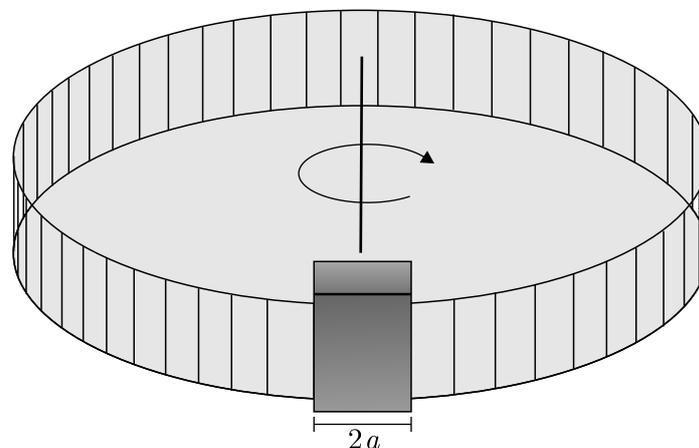
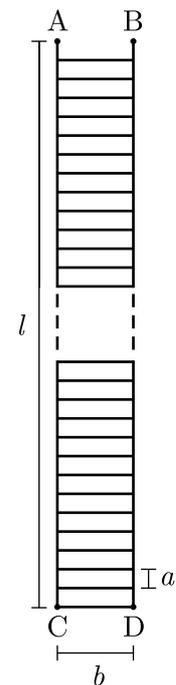


Abbildung 1: Skizze der rotierenden aufgerollten Leiter mit Hufeisenmagnet (in dunkelgrau).

- b) Bestimmen Sie das auf den rotierenden Ring wirkende Drehmoment in Abhängigkeit von den auftretenden Parametern, wenn der Ring anfänglich mit einer Kreisfrequenz ω_0 um die Achse rotiert. (8 Punkte)
- c) Berechnen Sie, wie lange es dauert, bis die Kreisfrequenz des Ringes auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes abgefallen ist. (6 Punkte)

Sie können die folgenden Werte verwenden:

Spezifische Leitfähigkeit von Kupfer $\sigma_{\text{Cu}} = 58,0 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$

Dichte von Kupfer $\rho_{\text{Cu}} = 8920 \text{ kg m}^{-3}$

Aufgabe 2 Das Prinzip von Fermat**(19 Punkte)***(Idee: Manuel Bärenz)*

Das nach Pierre de Fermat benannte *Fermatsche Prinzip* stellt die Grundlage des Reflexions- und Brechungsgesetzes in der Strahlenoptik dar und besagt in vereinfachter Form, dass Lichtstrahlen sich zwischen zwei Punkten immer entlang der Pfade ausbreiten, auf denen sie den Weg zwischen den Punkten in der kürzesten Zeit zurücklegen¹.

In dieser Aufgabe sollen Sie einige Konsequenzen dieses Prinzips untersuchen.

- a) Leiten Sie mit Hilfe des Fermatschen Prinzips das bekannte Reflexionsgesetz

$$\text{Einfallswinkel} = \text{Ausfallswinkel}$$

für die Reflexion eines Lichtstrahls an einer ebenen Fläche her. *(2 Punkte)*

- b) Leiten Sie ebenfalls mit Hilfe des Fermatschen Prinzips das Snelliussche Brechungsgesetz für den Übergang von einem Medium n_1 zu einem Medium mit Brechungsindex n_2 her. *(3 Punkte)*

Für die Untersuchung der Fokussierung von Lichtstrahlen durch Spiegel oder Linsen ist das Fermatsche Prinzip ebenfalls sehr hilfreich. Lichtstrahlen, die von einer punktförmigen Lichtquelle ausgehen und in einem Punkt fokussiert werden, besitzen demnach auf allen Wegen zwischen diesen beiden Punkten die gleiche Laufzeit. Nehmen Sie für die folgenden Aufgaben, wenn nicht anders angegeben, an, dass sich das Licht in Luft ausbreitet.

- c) Geben Sie an, welche Form ein Spiegel haben muss, um das Licht einer punktförmigen Quelle komplett in einem Punkt zu fokussieren. Sie müssen in diesem Aufgabenteil keine mathematische Funktion für die Spiegeloberfläche angeben. *(3 Punkte)*
- d) Bestimmen Sie, wie ein Spiegel geformt sein muss, um das Licht einer sehr weit entfernten, kleinen Lichtquelle in einem Punkt zu fokussieren. Nehmen Sie dazu an, dass sich der Brennpunkt im Koordinatenursprung und die Lichtquelle entlang einer der Koordinatenachsen befindet. Geben Sie die Form der Spiegeloberfläche als Funktion an. *(4 Punkte)*
- e) Eine Linse mit Brechzahl n sei auf der einen Seite plan und besitze auf der anderen Seite ein Profil $y(x)$ mit $y(0) =: y_0$, wobei die Betrachtung hier auf die x - y -Ebene eingeschränkt wird. Die plane Seite der Linse sei parallel zur x -Achse.

Bestimmen Sie, wie die Linse geformt sein muss, d.h. wie die Funktion $y(x)$ aussehen muss, um Licht, das parallel zur y -Achse aus dem negativ Unendlichen auf die plane Seite einfällt, in dem Punkt $(0, d)$ mit $d \geq y_0$ hinter der Linse zu fokussieren.

Betrachten Sie schließlich den Fall $d = y_0$ und geben Sie an, welche physikalische Bedeutung die Steigung der Funktion $y(x)$ in diesem Fall besitzt. *(7 Punkte)*

¹Die genaue Formulierung besagt, dass der Lichtweg ein stationärer Punkt des Zeitfunktionals ist.

Aufgabe 3 Pioneer-Anomalie**(31 Punkte)***(Idee: Bastian Hacker)*

Die Raumsonde Pioneer 10 wurde 1972 zur Erkundung des äußeren Sonnensystems gestartet und sollte als erstes Raumfahrzeug das Sonnensystem endgültig verlassen. Nachdem sich die Sonde im Jahr 1980 mit 20 AE weit genug von der Sonne entfernt hatte, um den Einfluss verschiedener Kräfte genau genug vorhersagen zu können, wurde eine unerklärliche, winzige Komponente in dessen Beschleunigung entdeckt. Diese sogenannte Pioneer-Anomalie ist seitdem viel untersucht worden und hat Anlass zu zahlreichen Spekulationen über mögliche Modifikationen der Naturgesetze gegeben.

In dieser Aufgabe sollen Sie einige mögliche Erklärungen dieser Pioneer-Anomalie mit Hilfe einfacher Modelle untersuchen.

Sie können dazu von einem vereinfachten Aufbau der Pioneer 10 Sonde ausgehen, der hauptsächlich aus einem sechseckigen Kasten, an dem die wissenschaftlichen Instrumente angebracht sind, sowie einer flachen Parabolantenne mit Durchmesser $d = 2,77$ m, die stets in Richtung Erde gerichtet ist (vgl. Abb. 2), besteht. Zur Stabilisierung wurde die Sonde in Rotation um die Antennenachse mit einer Rate von etwa 4,8 Umdrehungen pro Minute versetzt. Nach den letzten Bahnkorrekturen beträgt die Gesamtmasse der Sonde $m = 241$ kg.

- a) Pioneer 10 hat das Schwerfeld der Erde mit einer Geschwindigkeit von $v_0 = 9,4 \text{ km s}^{-1}$ relativ zur Erde und tangential zu ihrer Umlaufbahn verlassen. Angekommen beim Jupiter mit Bahnradius 5,2 AE führte sie ein Swing-by Manöver durch, um schließlich das Sonnensystem zu verlassen. Nehmen Sie an, dass das Manöver so durchgeführt wurde, dass die Sonde das Sonnensystem mit möglichst hoher Geschwindigkeit verlassen kann. Außerdem kann die Zeit, in der Pioneer 10 mit Jupiter gravitativ wechselwirkt, als kurz verglichen mit der sonstigen Flugzeit angenommen werden.

Geben Sie die Radialgeschwindigkeit $v_r(r)$ und insbesondere die Grenzgeschwindigkeit $v_r(\infty)$ der Sonde nach diesem Manöver als Funktion des Abstandes r zur Sonne an. Behandeln Sie dabei alle Prozesse innerhalb der Ekliptik und nehmen Sie die Planetenbahnen als kreisförmig an. (8 Punkte)

- b) Die stärkste Kraft auf die Sonde wird nach der Gravitation von dem Strahlungsdruck durch die Sonnenstrahlung verursacht. Die Parabolantenne, die bei größeren Entfernungen etwa in Richtung Sonne zeigt, absorbiert 20% des Sonnenlichts und reflektiert den Rest zurück in Richtung Sonne.

Ermitteln Sie näherungsweise, welche Beschleunigung sich damit für die Sonde im Abstand $r \gg 1$ AE zur Sonne ergibt. Geben Sie an, wie groß der Beitrag im Jahr 1990 für $r = 50$ AE gewesen ist. (4 Punkte)

- c) Außerdem sendet die Sonne den Sonnenwind aus, einen Strom aus Wasserstoffplasma, der bis in eine Entfernung von mindestens 80 AE von der Sonne reicht. In Erdnähe beträgt die Protonendichte des Sonnenwindes $n_0 \approx 5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$. Die Teilchengeschwindigkeit des Sonnenwindes beträgt $v \approx 400 \text{ km s}^{-1}$ in radialer Richtung.

Schätzen Sie den Einfluss des Sonnenwindes auf die Beschleunigung der Sonde in einem Abstand von 50 AE zur Sonne sowie bei größeren Entfernungen r ab. (3 Punkte)

- d) Die große Parabolantenne sendet ununterbrochen einen gebündelten Funkstrahl mit einer Ausgangsleistung von 8 W Richtung Erde.

Bestimmen Sie auch dessen Einfluss auf die Beschleunigung der Sonde. (2 Punkte)

- e) Die Pioneer-Trajektorie konnte unter Berücksichtigung der Gravitationskraft von Sonne, Planeten und anderen Himmelskörpern nach Formeln der allgemeinen Relativitätstheorie hochgenau berechnet werden. Auch der Strahlungsdruck lässt sich auf die Größenordnung des Sonnenwindes genau modellieren.

Zur Messung der tatsächlichen Sondenposition wurde die Laufzeit eines Radiosignales zwischen Erde und Sonde verwendet. Die hochgenaue Geschwindigkeitsbestimmung erfolgte über die Dopplerverschiebung der phasengenaue zurückgesendeten Radiosignale. Die Trägerfrequenz des Signales² betrug dabei 2,292 GHz.

Bestimmen Sie die zu erwartende Frequenzverschiebung Δf der Trägerfrequenz bei einem Sondenabstand von $r = 50$ AE unter Vernachlässigung der in Teil b)-d) ermittelten Beschleunigungen und mit der vereinfachenden Betrachtung einer gegenüber der Sonne ruhenden Erde. Falls Sie Aufgabenteil a) nicht gelöst haben, können Sie den Ersatzwert $v_r \approx 11 \text{ km s}^{-1}$ für die Radialgeschwindigkeit der Sonde verwenden.

Auch nach Einbeziehung aller bekannten Effekte, die zu einer Beschleunigung der Sonde führen, blieb eine konstante zusätzliche Drift der Frequenzverschiebung um $d|\Delta f|/dt = -1,34 \cdot 10^{-8} \text{ Hz s}^{-1}$ übrig.

Bestimmen Sie, wie groß die zusätzliche Beschleunigung der Sonde sein muss, um diesen Effekt zu verursachen. (4 Punkte)

- f) Als mögliche Ursache dieser Beschleunigung wurde die Wärmeabstrahlung der Energieversorgung an Bord in Betracht gezogen. Der Effekt einer anisotropen Abstrahlung wurde nämlich in früheren Analysen unterschätzt. Abbildung 2 stellt die Sonde schematisch dar.

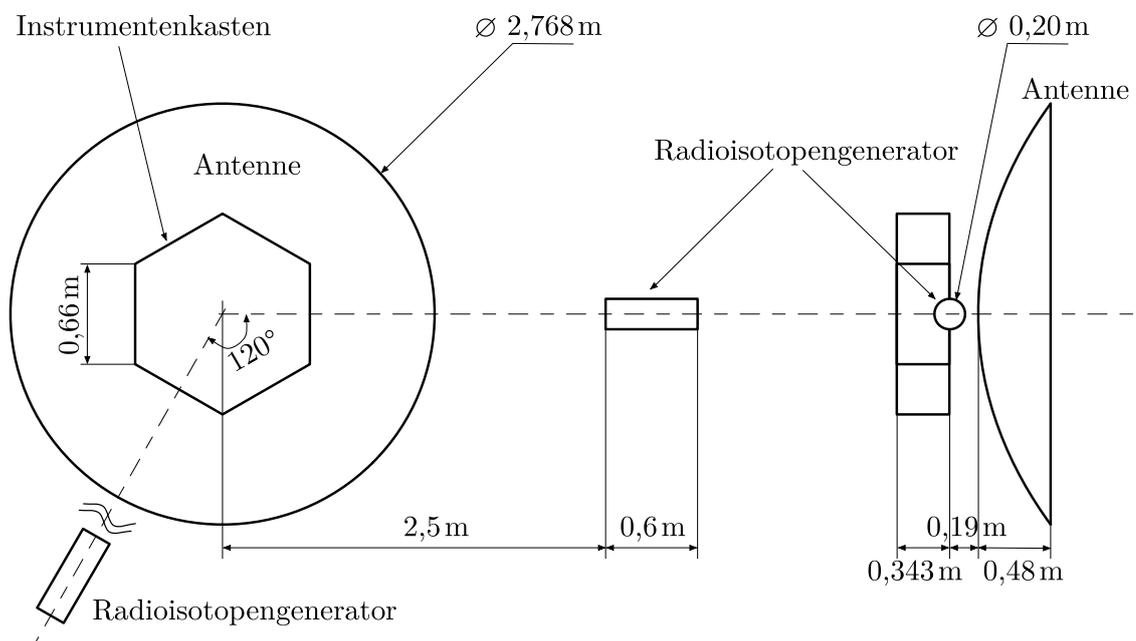


Abbildung 2: Pioneer 10 (von oben und von der Seite) mit Instrumentenkasten, Parabolantenne (Richtung Erde) und Radioisotopengeneratoren (kleine Zylinder).

Die Energieversorgung der Sonde erfolgt über Radioisotopengeneratoren, die mit Plutonium (Halbwertszeit: 88 a) betrieben werden und beim Start eine Wärmeleistung $P_0 = 2580 \text{ W}$ bereitstellten. Thermoelemente generieren daraus Strom mit einer Effizienz von 3,9%. Die als

²Tatsächlich wurde diese Trägerfrequenz von der Sonde ausgesendet, während die Frequenz des von der Erde gesendeten Signals noch mit einem festen Faktor multipliziert war. Dies spielt für die Betrachtung aber keine Rolle und soll daher nicht berücksichtigt werden.

kleine Zylinder dargestellten Radioisotopengeneratoren sind räumlich von dem Hauptkörper der Sonde getrennt und strahlen ihre ungenutzte Wärme über kleine Flügel symmetrisch zur Flugrichtung so in den Raum ab, dass die Sonde kaum davon getroffen wird.

In dem sechseckigen Kasten wird die gesamte elektrische Leistung mit Ausnahme der von der Antenne abgestrahlten Leistung verbraucht. Die in der linken Skizze zu sehende Oberseite des Kastens leitet Wärme etwa vier mal so gut wie der Rest des Kastens.

Schätzen Sie die zusätzliche Beschleunigung der Sonde im Jahr 1990 aufgrund der Wärmestrahlung ab. Es geht dabei nicht um eine genaue Rechnung sondern darum, das Ergebnis sinnvoll anzunähern. Hierzu dürfen stark vereinfachende Annahmen gemacht werden, die jedoch plausibel sein müssen und so gut wie möglich begründet werden sollten.

Sie können annehmen, dass die warmen Flächen mit einer Lambertschen Charakteristik in Abhängigkeit des Winkels θ zur Flächennormalen abstrahlen, d.h. dass die von einem Flächenelement pro Raumwinkelanteil abgestrahlte Strahlungsleistung proportional zu $\cos(\theta)$ ist. Nehmen Sie außerdem an, dass von der auf die Sonde treffenden Wärmestrahlung 80% reflektiert und der Rest absorbiert werden.

Beurteilen Sie, ob sich die Pioneer-Anomalie Mit Hilfe der Wärmeabstrahlung erklären lässt. Nennen Sie sowohl Argumente dafür als auch dagegen. (10 Punkte)

Folgende Werte können für die Bearbeitung der Aufgabe hilfreich sein:

Radius der Erdbahn (Astronomische Einheit)	$1 \text{ AE} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$
Sonnenmasse	$M_s = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Solarkonstante (Sonnenstrahlungsstärke in Erdnähe)	$E_0 = 1367 \text{ W m}^{-2}$
Protonenmasse	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Aufgabe 4 Experimentelle Aufgabe - Rinnsalphysik (8 + 18 + 5 Punkte)

(Idee: Georg Schröter)

In dieser experimentellen Aufgabe sollen Sie die Oberflächenspannung und die Viskosität von Wasser untersuchen.

Für die Versuche dürfen Sie alle haushaltsüblichen Gegenstände verwenden und können sich, falls benötigt, zusätzlich genaue Messbecher, Pipetten oder eine genaue Waage evtl. aus der Schule entleihen. In beiden Aufgabenteilen benötigen Sie eine glatte Ebene. Hierzu eignet sich z.B. ein ebenes Brett, das mit dem Wachs eines Teelichtes überzogen ist.

Beschreiben Sie Ihre theoretischen Überlegungen, die Versuchsaufbauten, die experimentelle Durchführung und die Auswertung so, dass sie gut nachvollziehbar sind. Die erzielten Ergebnisse werden vergleichsweise ungenau sein und sollten jeweils eine Fehlerabschätzung enthalten.

4.1 Oberflächenspannung von Wasser

Die Oberflächenspannung σ einer Flüssigkeit ist definiert als das Verhältnis der Energie ΔE , die zur Vergrößerung der Oberfläche um ΔA benötigt wird, zu der Oberflächenvergrößerung, d.h.

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta A}.$$

Ebenso existiert für jede Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit und einem anderen Material (Feststoff, Flüssigkeit oder Gas) eine Grenzflächenspannung σ_G , die auf die gleiche Weise definiert ist und von den aneinandergrenzenden Materialien abhängig ist, sie kann sowohl positiv als auch negativ sein. Die Oberflächenspannung ist dann die Grenzflächenspannung zu Vakuum (oder zu einem dünnen Gas).

In der Schwerelosigkeit bilden Flüssigkeiten aufgrund der Oberflächenspannung kugelförmige Tropfen. Befindet sich eine Flüssigkeit unter Einfluss der Schwerkraft auf einer Oberfläche, sorgen Oberflächenspannung und Grenzflächenspannung dafür, dass die Flüssigkeit etwas „nach oben“ gedrückt wird und somit nur eine begrenzte Fläche einnimmt, sie bildet eine Lache. Zudem bestimmt das Verhältnis der beiden Spannungen³ die Größe des Winkels θ , den Flüssigkeit und Unterlage miteinander einschließen:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_G}{\sigma}.$$

Die gesamte mechanische Energie der Lache setzt sich nun aus der potentiellen Energie und der Energie der Ober- und Grenzfläche zusammen. Die Lache nimmt dabei im statischen Fall eine Form an, die die Gesamtenergie minimiert. Im Folgenden sollen Sie Tropfen bzw. kleine Lachen mit festem Volumen auf einer glatten Ebene im Rahmen einfacher Modellannahmen untersuchen:

- a) Nehmen Sie an, dass die Form der Lache einem flachen Zylinder mit Höhe h und Radius r entspricht. Der Einfluss des Grenzwinkels auf die geometrische Form soll also vernachlässigt werden.

Verwenden Sie die Tatsache, dass die Form der Lache die mechanische Energie bei festem Flüssigkeitsvolumen V minimiert und leiten Sie einen Ausdruck für die Oberflächenspannung σ in Abhängigkeit von experimentell messbaren Größen her. (3 Punkte)

- b) Bestimmen sie experimentell möglichst genau die Oberflächenspannung von Leitungswasser. (5 Punkte)

4.2 Bestimmung der Viskosität von Wasser

Fließt eine Newtonsche Flüssigkeit ohne Turbulenzen (laminar) eine geneigte Ebene bergab, gleiten die einzelnen Flüssigkeitsschichten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aufeinander. Direkt an der Grenzfläche zur Unterlage ist die Geschwindigkeit der Flüssigkeit relativ zur schiefen Ebene gleich 0. Mit größer werdendem Abstand x zur Ebene nimmt die Geschwindigkeit zu, so dass sich ein Geschwindigkeitsprofil $v(x)$ ausbildet. Übereinanderliegende Flüssigkeitsschichten üben dabei aufeinander eine zum Geschwindigkeitsgradienten proportionale Reibungskraft aus:

$$F_R = A \eta \frac{dv}{dx},$$

wobei η die (dynamische) Viskosität der Flüssigkeit bezeichnet und A die Kontaktfläche der Schichten ist. Die auftretenden Kräfte sind wesentlich kleiner als die direkten Reibungskräfte zwischen zwei Feststoffen, so dass Objekte auf einem Flüssigkeitsfilm regelrecht gleiten können.

Wenn die Ebene nicht zu stark geneigt ist, stellt sich nach kurzer Zeit ein stationäres Strömungsverhalten ein und die Flüssigkeit wird nicht weiter nach unten beschleunigt. Dabei ziehen Ober- und Grenzflächenspannung die Flüssigkeit zu einem schmalen Rinnsal zusammen.

³Genau genommen ist die Grenzflächenspannung hier die Differenz der Grenzflächenspannung zwischen der Oberfläche und Luft sowie der Grenzflächenspannung zwischen der Oberfläche und der Flüssigkeit.

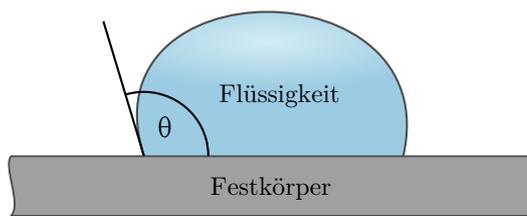


Abbildung 3: Skizze zum Kontaktwinkel (nach http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kontaktwinkel_-_Typen.svg).



Abbildung 4: Wasser-rinnsal.

- c) Ähnlich wie in dem vorangegangenen Aufgabenteil, nimmt dabei auch das Rinnsal eine Form an, die bei fester Querschnittsfläche A die Energie (hier allerdings pro Länge) minimiert. Nehmen Sie als vereinfachtes Modell an, dass die Form des Rinnsals einem Quader der Breite b und der Dicke h entspricht.

Zeigen Sie, dass für die Dicke des Rinnsals (bzw. des Quaders) in Abhängigkeit von der Breite b und dem kleinen Neigungswinkel α der Ebene gilt:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho_{\text{Wasser}} g b \cos \alpha} \left(\sqrt{\frac{(1 - \cos \theta) \cos \alpha b^2 \rho_{\text{Wasser}} g}{2\sigma} + 1} - 1 \right).$$

Vernachlässigen Sie dabei auftretende Randeffekte. (2 Punkte)

- d) Bestimmen Sie nun das sich bei kleinen Neigungswinkeln α einstellende Geschwindigkeitsprofil $v(x)$ des Rinnsals. Beachten Sie dabei, dass die Geschwindigkeit an der Unterlage gleich Null sein muss ($v(0) = 0$) und verwenden Sie, dass das Geschwindigkeitsprofil an der Oberseite der Flüssigkeit die Bedingung $dv/dx(h) = 0$ erfüllt. (3 Punkte)

- e) Zeigen Sie damit, dass für das durch einen festen Querschnitt pro Zeit Δt fließende Flüssigkeitsvolumen ΔV gilt

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\sin \alpha \rho_{\text{Wasser}} g b h^3}{3\eta}.$$

(2 Punkte)

- f) Bestimmen Sie durch die Untersuchung eines Wasserrinnsals experimentell die Viskosität von Wasser. (8 Punkte)
- g) Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der tatsächlichen Viskosität von Wasser und diskutieren Sie Ursachen für mögliche Abweichungen. (3 Punkte)

4.3 Vergleichsexperiment zur Viskositätsbestimmung

Die dynamische Viskosität von Wasser kann auch auf andere Arten bestimmt werden. Eine experimentell einfach durchzuführende Methode ist die Bestimmung über den Strömungswiderstand durch ein dünnes Rohr mit Hilfe des Gesetzes von Hagen-Poiseuille.

- h) Bestimmen Sie die Viskosität von Wasser, indem Sie den Strömungswiderstand durch ein dünnes Rohr ermitteln, und vergleichen Sie das Resultat mit dem Ergebnis aus dem vorherigen Teil. (5 Punkte)

Verwenden Sie für die experimentelle Aufgabe die folgenden Werte:

Fallbeschleunigung auf der Erde $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$

Dichte von Wasser $\rho_{\text{Wasser}} = 1000 \text{ kg m}^{-3}$

Viel Erfolg!