

Spielzeugphysik

Christian Helm

ETH Zürich und Kantonsschule Limmattal

Tag für Physik und Unterricht, 14.1.2011



Spielzeugphysik

- Spielzeugdidaktik
 - grosse **Faszination** und **Motivation**
 - **aber** oft (verborgene) **physikalische Schwierigkeiten**
 - → **Forschungsbedarf!** → *Einsatz im Unterricht?*
- Vollständiges Skript (ca. 100 Seiten)
 - www.physik.ethz.ch/~helm/TagPhysikUnterricht2011
- Aus „*Neue und elementare Physik für die Lehre*“
 - **Vorlesung im Herbstsemester** an der ETH (C. Helm)
 - 60 CHF für externe Hörer
 - www.fachdidaktik.physik.ethz.ch/vorlesungen/VorlesungElementareNeuePhysik
 - Skript und weitere Materialien auf **Moodle**
 - nethz-Login auch für Externe möglich (Passwort: eduphys)
 - <https://moodle-app1.let.ethz.ch/lms/>



Vorlesung „Elementarphysik“

- Behandelte Spielzeuge
 - Trinkvogel
 - Keltisches Wackelholz
 - Stehaufkreisel
 - Happy and Sad Balls
 - Praktikum Squashbälle
 - Silly Putty - eine Flüssigkeit zum Ballspielen
 - Ringmotor als Perpetuum mobile?!
 - ...



Niels Bohr
und
Wolfgang Pauli

Was wollt Ihr
denn, schließlich
funktioniert
es doch!



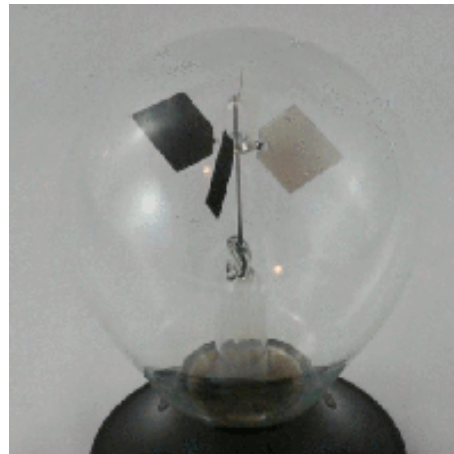
Erklärung von Spielzeugen?

Newtonpendel



- Energie- und Impulserhaltung?

Lichtmühle



- Lichtdruck??
- Druckdifferenz und Rückstoss?

Knatterboot



- Ansaugen = Rückstoss?

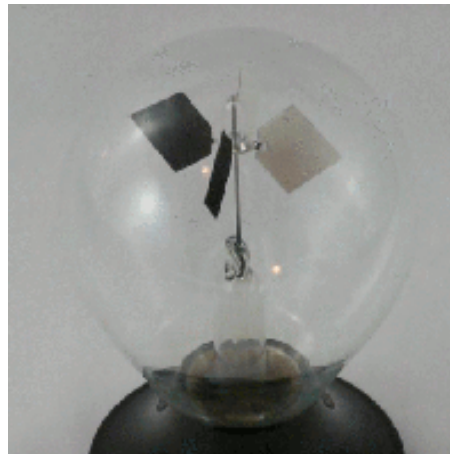
Korrekte Erklärung von Spielzeugen!

Newtonpendel



- Energie- und Impulserhaltung?
- → **lineare Dispersion!**
- → **Wellenpaket stabil!**

Lichtmühle



- Lichtdruck??
- Druckdifferenz und Rückstoss?
- → **Randeffekte!**

Knatterboot



- Ansaugen = Rückstoss?
- → **Geometrie der Wirbel!**

Newton-Pendel in der Schule

■ Schulbuch

- „Verständnis“ durch **Energie-** und **Impulserhaltung**

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 + \dots = m_1 u_1 + m_2 u_2 + \dots$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \dots = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + \dots$$



- 1 Kugel mit Höhe $h \rightarrow$ 1 Kugel mit Höhe $h \rightarrow$ **Stimmt!**
- 1 Kugel mit Höhe $h \rightarrow$ 2 Kugeln mit Höhe $h/2 \rightarrow$ **Impuls stimmt nicht!**
- 1 Kugel mit Geschwindigkeit $v \rightarrow$ 2 Kugeln mit Geschwindigkeit $v/2 \rightarrow$ **Energie stimmt nicht!**

- **aber** auch **unphysikalische** Lösungen, z.B.:

$$v_1 = v, v_2 = v_3 = 0 \Rightarrow u_1 = -\frac{1}{3}v, u_2 = u_3 = \frac{2}{3}v$$



■ Schülerfrage

- *Wie kann man aus **zwei** Gleichungen n Geschwindigkeiten bestimmen?*

- **Energie und Impuls notwendig, aber nicht hinreichend**

Gleiter auf der Luftkissenbahn

- Gleiter gleicher Masse als effektives Modell
 - Kugeln nur an Oberfläche deformiert →
 - → räumliche Trennung von elastischer und Translationsenergie
 - = Eindimensionale Kette (Phononen)

- **Gleiche Federn** $C_i=C$

- **Nichtlineare Dispersion** $\omega(k) = 2\sqrt{\frac{C}{m}} \left| \sin\left(\frac{ka}{2}\right) \right|$

- a Abstand der Massen, $k \in [-\pi, \pi]$ Wellenvektor

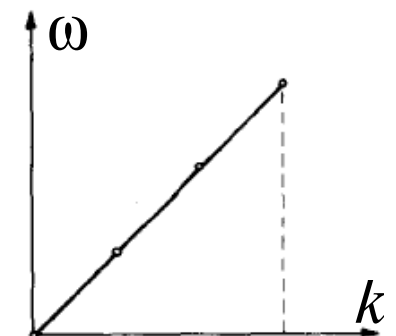
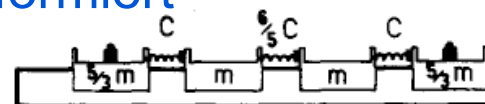
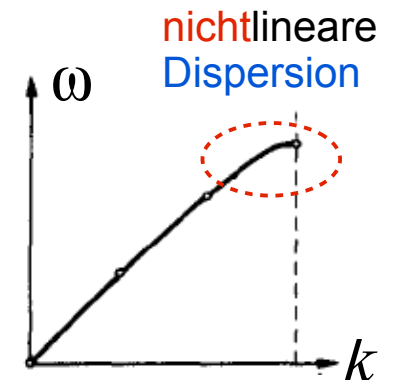
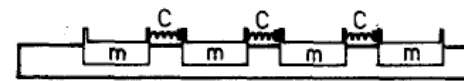
- Bewegung **nicht** äquivalent zu Newtonpendel

- **Wellenpaket** der Anregung wird **deformiert**

- **Spezialfall**

- **lineare Dispersion** für $C_1=C_3=\frac{5}{6}C_2=C$

- Bewegung **ähnlich** zu Newtonpendel



Newton-Pendel ohne Abstand

- **Lineare Dispersion** für Newton-Pendel **entscheidend**
 - **Wellenpakete** als Störungen **deformieren** sich **nicht**
 - *nicht*lineare Dispersion \leftrightarrow Verbreiterung der Schockwelle auch *ohne* Dämpfung
 - **Superpositionsprinzip** bei Störungen links+rechts

- elastisches **Kraftgesetz** $F = C x^r \leftrightarrow$ **Dispersion**
 - $r=1$: Hooke'sche **Federn** \leftrightarrow **nicht**lineare Dispersion
 - $r=1.5$: elastische **Kugeln** \leftrightarrow (näherungsweise) **lineare** Dispersion
 - funktioniert z.B. **mit Zylindern** ($r \neq 1.5$) **nicht**

Didaktik des Newton-Pendel

- faszinierend, motivierend, allgemein bekannt
- Erhält Energie und Impuls (wie *alles*), aber nicht hinreichend
- spezieller Fall
 - identische Kugeln (*nicht* Zylinder...) \leftrightarrow lineare Dispersion
 - Erklärung schwieriger als gedacht....
- Schulbücher irreführend \rightarrow mindestens Korrektur
- Kugeln mit kleinem Abstand als didaktischer Kompromiss?

Newton-Pendel aus 2 Kugeln

- Zwei Kugeln
 - Betrachte $m_1 = m_2, v_1 = v, v_2 = 0$
 - **physikalische** Lösung $\rightarrow u_1 = 0, u_2 = v$
 - **unphysikalische** Lösung $\rightarrow u_1 = v, u_2 = 0$
 - **beide** Lösungen erhalten **Energie** und **Impuls**
- **Härte** der Kugeln \rightarrow **Ungleichungen** $u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_n$
- Kette von Kugeln mit **kleinem Abstand** analog
 - verallgemeinerbar zu asymmetrischen Fällen
 - vermeidet didaktische Probleme
- **Aber:** reales Pendel
 - **elastische Kompression** der Kugeln viel **schneller** als **Pendelbewegung**
 - \rightarrow Stöße **nicht** zeitlich getrennt

Literatur Newton-Pendel

- F. Herrmann, P. Schmäzle, *Simple explanation of a well-known collision experiment*, Am. J. Phys **49**, 8 (1981) 762.
 - *beste Erklärung, empfohlen*
- F. Herrmann, M. Seitz, *How does the ball-chain work?*, Am. J. Phys. **50**, 11 (1982) 977.
 - *Erklärung der Dispersion, empfohlen*
- J.G. Gavenda, J.R. Edgington, *Newton's Cradle and Scientific Explanation*, The Physics Teacher **35** (1997) 411.
 - *Erklärung, Didaktik, Geschichte*
- K. Sekimoto, *Newton's Cradle versus Nonbinary Collisions*, Phys. Rev. Lett. **104**, 124302 (2010)
 - *aktuelle Analyse für verschiedene Kontaktkräfte, interessant*
- www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/cradle.htm

...und alles Weitere im Gespräch oder auf

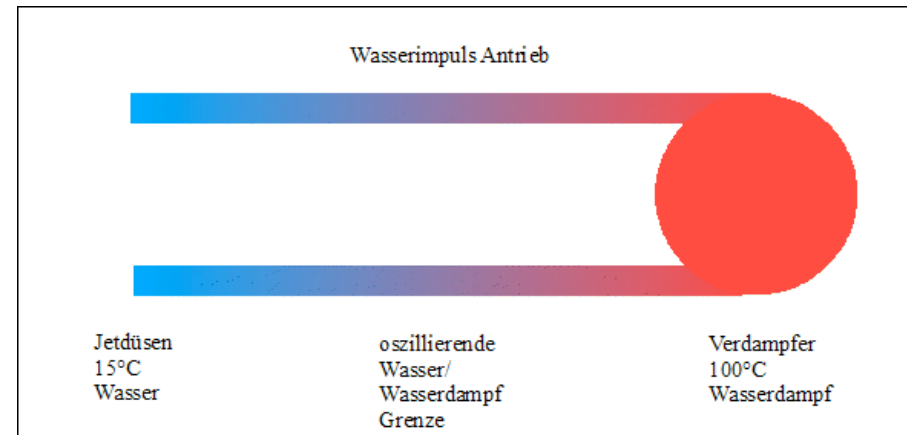
www.physik.ethz.ch/~helm/TagPhysikUnterricht2011



Kurze Erklärungen für Knatterboot und Lichtmühle



Kurzfassung Knatterboot



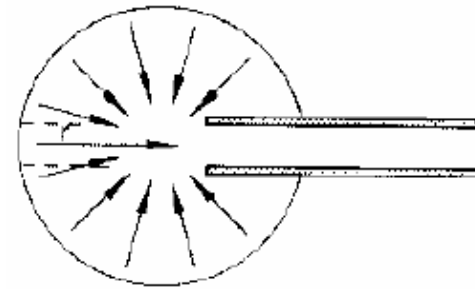
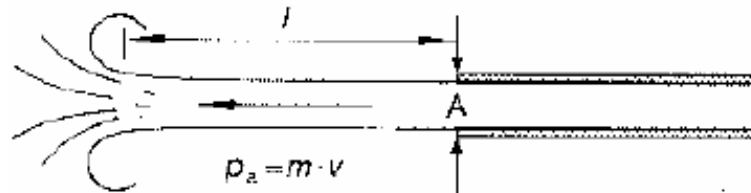
- Wasserimpuls-Antrieb
 - Wasser in Rohr verdampft → Rückstoss → Wasserdampf kondensiert → → Ansaugen weniger effizient als Rückstoss → ...

Loïc's Glass pop-pop V2
for V1 (glass coil) see
www.electicspace.net

On an Idea of Jean-Yves R. and
made after we have seen the
same design made by Jorge
Hugo Cordero (Argentina)

Test performed on March 29, 2006

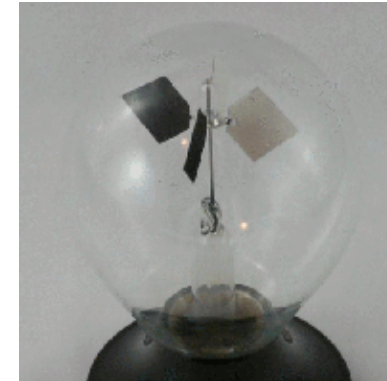
Der Clou beim Knatterboot



- Ansaugkraft **wegen Wirbelgeometrie kleiner** als Rückstoss
- Details und Referenzen hinten im Skript
 - www.physik.ethz.ch/~helm/TagPhysikUnterricht2011

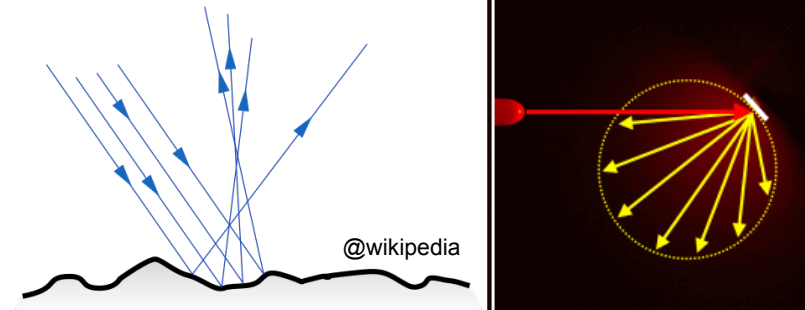
Lichtmühle in Kürze

- Aufbau
 - helle und dunkle Seiten, thermisch isoliert
 - geringer Druck von 0.05 mbar
- Strahlungsabsorption auf schwarzer Seite
 - höhere Temperatur → Drehung mit schwarzer Seite nach hinten
- Abkühlen
 - schwarze Seite strahlt mehr und kühlt schneller
 - → umgekehrter Drehsinn



Strahlungsdruck?

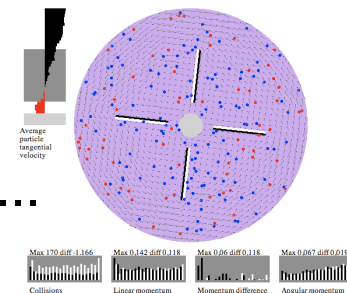
- **falsche** Richtung
- zu **schwach** bei realem Druck
- funktioniert im **Ultrahochvakuum**
 - **spiegelnde** Oberfläche (z.B. Ag) → Impulsübertrag $\Delta p_{\perp} = 2p_{Gas,\perp}$
 - matte Oberfläche = „**schwarzer**“ Strahler
 - absorbiert Licht, aber **gleiche** Energie/Impulsdichte wird bei **anderer** Frequenz **abgestrahlt** (zumindest im *stationären Zustand*)
 - **diffuse** Abstrahlung in **alle Richtungen** (Lambert-Strahler)
 - **Winkelabhängigkeit**
 - spiegelnde Seite dominiert *meistens* (nicht immer), tote Punkte, ...
 - **gleiche** Abstrahlung für **diffus reflektierende weisse/schwarze** Oberfläche
→ **keine** Drehung
- **Abstrahlcharakteristik, nicht** Farbe **entscheidend**



@wikipedia

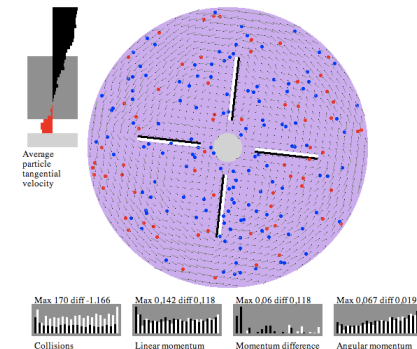
Rückstoss!?!

- Mechanismus
 - heisse Seite verliert durch Stösse mit Gasteilchen Energie
 - Gasteilchen werden im Mittel durch **Reflexion** schneller → Rückstoss
 - **Druckdifferenz**
 - Umkehrung bei Kühlung erklärbar
 - schwarze Seite strahlt mehr → schnellere Abkühlung
- implizite **Annahme**
 - ↔ **Druck** der Gasteilchen auf beiden Seiten **verschieden**
 - ↔ Gas **nicht im Gleichgewicht**
 - ↔ **keine Wechselwirkung** der Teilchen
 - ↔ mittlere freie Weglänge \gg geometrische Abmessungen
 - ↔ **hochevakuiertes Gas**
- Simulation im Applet
 - variable Teilchendichte, -grösse, Temperatur, Geometrie, ...
 - gregegan.customer.netspace.net.au/SCIENCE/LightMill/LightMill.html

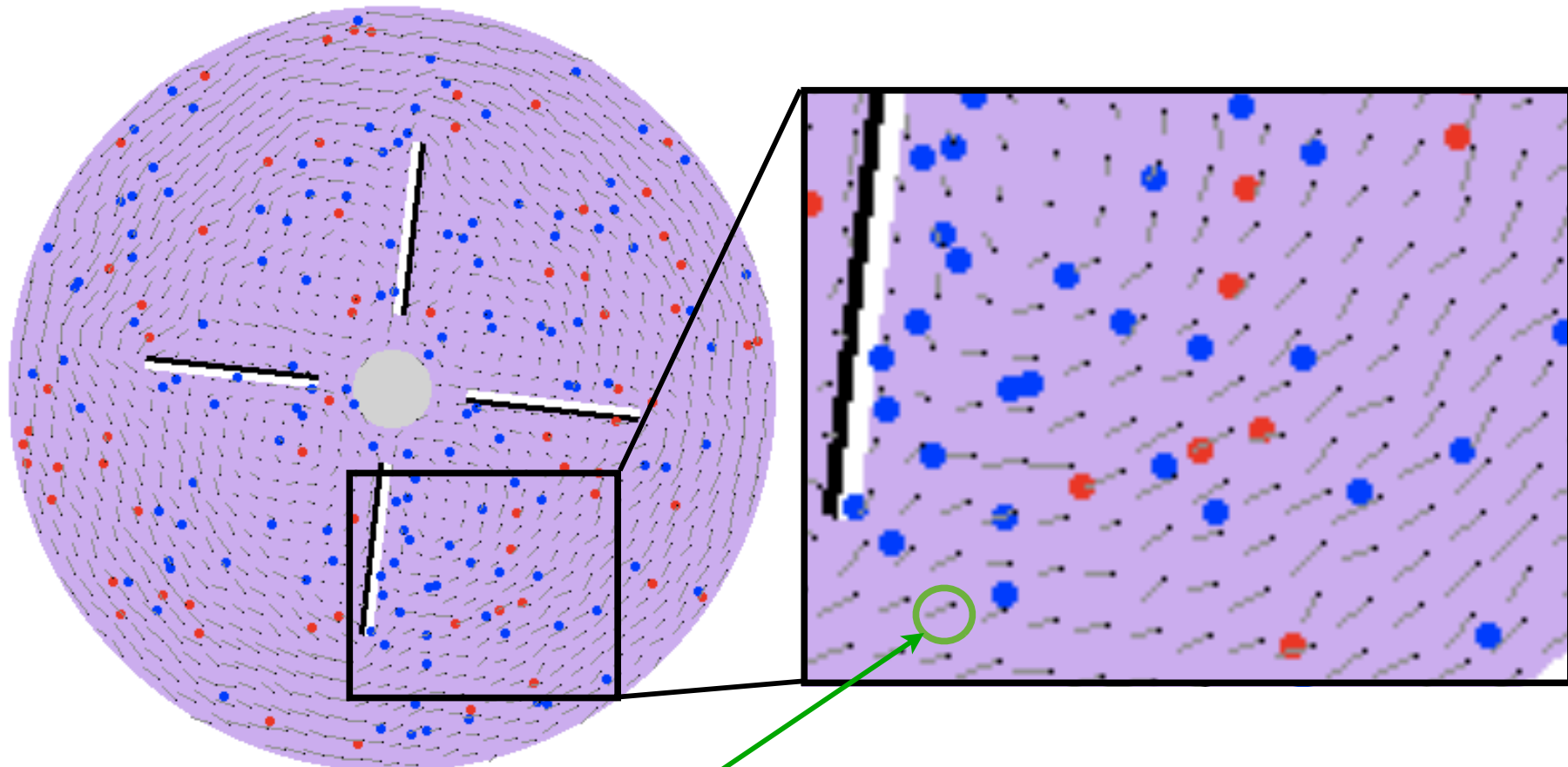


Rückstoss???

- **Druckdifferenz** als Erklärung für Schule
- **Aber**
 - **nur** bei **mittlerer freier Weglänge grösser** als geometrische Längen
 - **nur** für Druck $< 0.01 \text{ mbar}$
 - **keine** Erklärung des realen Spielzeugs
 - → schneller **Druckausgleich** im Gas → **Gleichgewicht**
 - mit Schallgeschwindigkeit
 - **Analogie**: Behälter mit Heizung/Kühlung links/rechts bleibt in Ruhe (*perpetuum mobile*)
 - → **Temperaturgradient** und Wärmefluss, aber **gleicher** Druck
 - → **Dichtegradient**
 - → **Teilchenströmung** (sichtbar im Applet)
- *Warum dreht sich Rotor dann?*



Lichtmühle - Simulation



- **Mittlere Teilchengeschwindigkeit** relativ zu Rotor
 - Vektor ausgehend von Punkt • („Windfahne“)

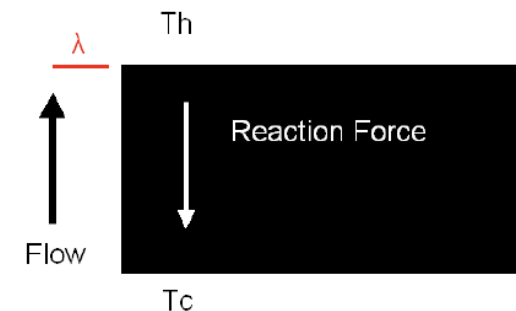
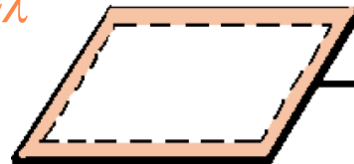
Lichtmühle - Randeffekte!!

■ Stationärer Zustand

- Mittlere freie Weglänge $\lambda \ll$ Ausdehnung L des Gefässes
- → Gleichgewicht und Druckausgleich trotz Temperaturgradient
- → $pV=nRT \rightarrow n_1T_1=n_2T_2=const.$
- → Dichte auf kalter Seite höher → mehr Stösse
- → Rand erreichen mehr Teilchen von der kalten Seite
- → Gasfluss von kalter zu heisser Seite entgegen dem Wärmefluss

■ → Gegenkraft auf Rotor nötig

- an den Rändern parallel zur Strömung
 - Maxwell/Reynolds 1876
- auf Randfläche der Breite $\sim \lambda$
 - Einstein 1924



■ Experiment

- Abhängigkeit der Kraft von Randlänge und Löchern bestätigt

Zusammenfassung Lichtmühle

- **Ultrahochvakuum** → **Strahlungsdruck**
 - abhängig von Abstrahlcharakteristik
- **Druck $< 0.01 \text{ mbar}$**
 - freie Weglänge $\lambda \gg$ Ausdehnung L
 - **Rückstoss einzelner Teilchen** im Nichtgleichgewicht
 - Druckdifferenz
- **geringer Druck $> 0.01 \text{ mbar}$**
 - realistischer Fall
 - freie Weglänge $\lambda \ll$ Ausdehnung L
 - **Druckausgleich** im **bulk** im **Gleichgewicht** → **keine Kraft** auf **Inneres**
 - **Rand entscheidend**
 - **Gegenkraft** für Strömung kalt → heiss
 - **Rückstoss** von Teilchen aus Randbereich im Nichtgleichgewicht

Didaktik der Lichtmühle

- klassisches Beispiel zur kinetischen Gastheorie
- schwieriger als gedacht
- Kompromiss?
 - Strahlungsdruck für spiegelnde Oberfläche in Hochvakuum
 - Abstrahlcharakteristik entscheidend
 - Rückstoss bei „geringem“ Druck
 - „*Good Teaching is good cheating...*“
- Applet als Hilfe zur vollen Erklärung
- Details und Referenzen hinten im Skript
 - www.physik.ethz.ch/~helm/TagPhysikUnterricht2011

Ausführliche Erklärungen zu allen Spielzeugen



Newton-Pendel



- Newton-Pendel
 - 1 Kugel links → 1 Kugel rechts
 - n Kugeln links → n Kugeln rechts
 - n Kugeln links + m Kugeln rechts → m Kugeln links + n Kugeln rechts
 - 2 Kugeln unterschiedlicher Höhe
- Fast ein Symbol der Physik
 - W.J. 'sGravesande, *Mathematical elements of natural philosophy confirm'd by experiments of, An introduction to Sir Isaac Newton's philosophy*, transl. from Latin to English, London, 1721. ([Originalreferenz](#))
- Applets (mit Reibung, verschiedene Anfangszustände)
 - www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava

Newton-Pendel in der Schule

■ Schulbuch

- „Verständnis“ durch **Energie-** und **Impulserhaltung**

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 + \dots = m_1 u_1 + m_2 u_2 + \dots$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \dots = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + \dots$$



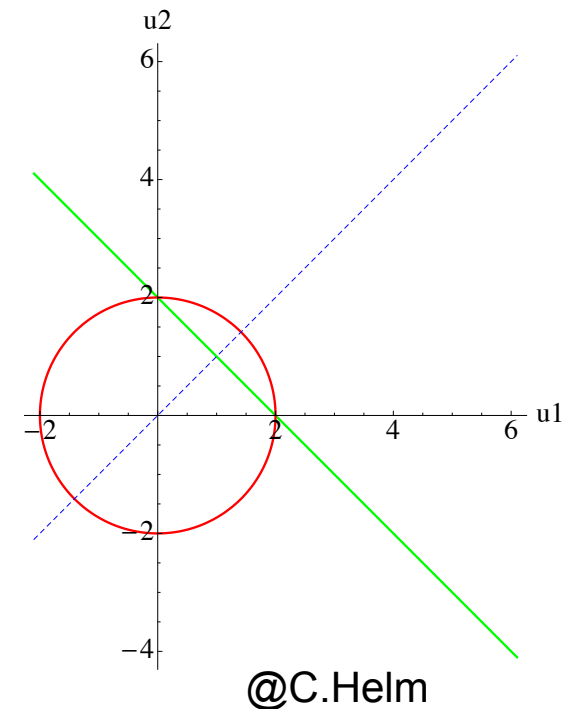
- 1 Kugel mit Höhe $h \rightarrow$ 1 Kugel mit Höhe $h \rightarrow$ **Stimmt!**
- 1 Kugel mit Höhe $h \rightarrow$ 2 Kugeln mit Höhe $h/2 \rightarrow$ **Impuls stimmt nicht!**
- 1 Kugel mit Geschwindigkeit $v \rightarrow$ 2 Kugeln mit Geschwindigkeit $v/2$
 \rightarrow **Energie stimmt nicht!**

- zum **Einstieg**: Erhaltungssätze probieren **gut**
- **aber**: keine Herleitung und kein echtes Verständnis
 - *Wie kann man aus **zwei** Gleichungen n Geschwindigkeiten bestimmen?*



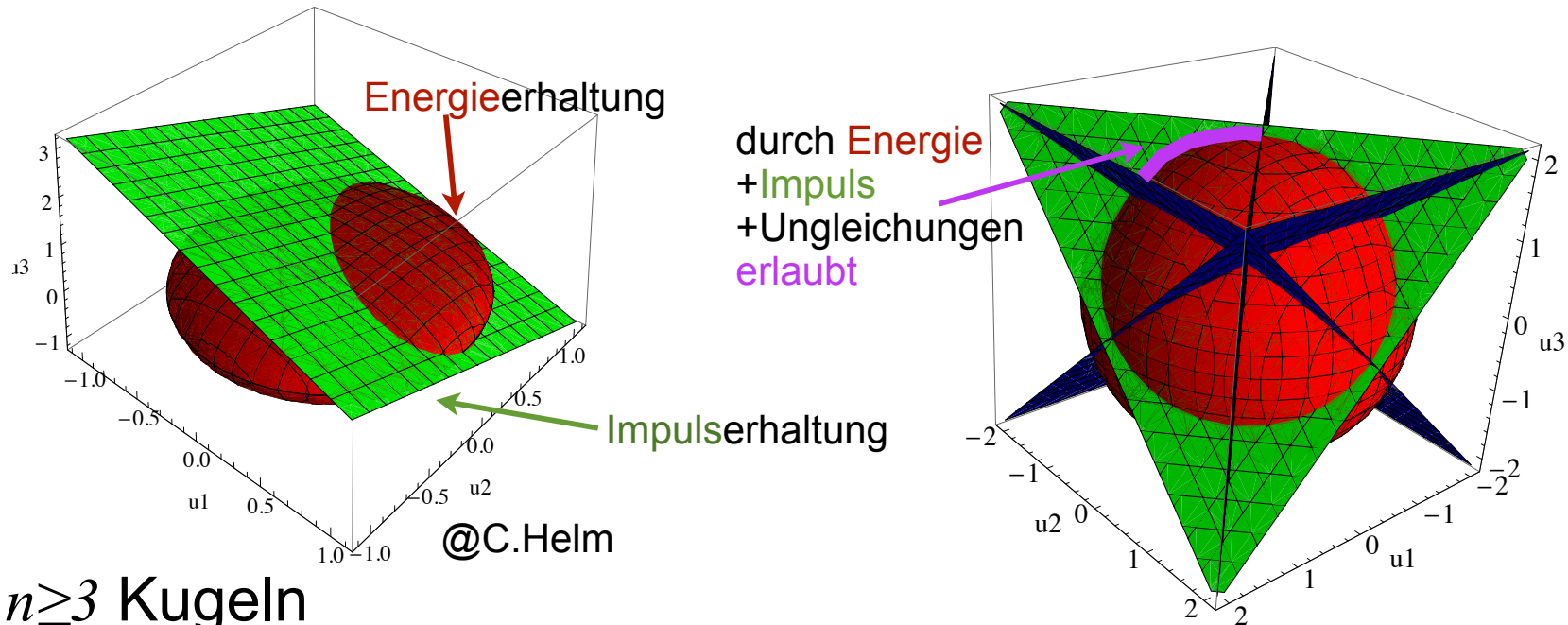
Newton-Pendel aus 2 Kugeln

- Zwei Kugeln
 - Betrachte $m_1 = m_2, v_1 = v, v_2 = 0$
 - **physikalische** Lösung $\rightarrow u_1 = 0, u_2 = v$
 - **unphysikalische** Lösung $\rightarrow u_1 = v, u_2 = 0$
 - **beide** Lösungen erhalten **Energie** und **Impuls**
- **geometrisch**
 - **Impuls** = **Gerade**, **Energie** = **Kreis** in $u_1 u_2$ -Ebene
- **Dynamik**
 - Wechselwirkungsgesetz (Actio=Reactio)



- **Härte** der Kugeln \rightarrow **Ungleichungen** $u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_n$

Newton-Pendel aus 3 Kugeln



■ $n \geq 3$ Kugeln

- verallgemeinerte geometrische Lösung
 - Energie = Kugel (Ellipsoid) im $u_1 u_2 \dots u_n$ -Raum
 - Impuls = (Hyper-)Ebene im $u_1 u_2 \dots u_n$ -Raum
 - Ungleichungen z.B. $u_1 \leq u_2 \rightarrow$ Halbräume mit Randebene $u_1 = u_2$ etc..
- Schnittkreis + Ungleichungen \rightarrow kein eindeutiger Punkt
- Energie und Impuls notwendig, aber nicht hinreichend
 - unphysikalisches Beispiel: $v_1 = v, v_2 = v_3 = 0 \Rightarrow u_1 = -\frac{1}{3}v, u_2 = u_3 = \frac{2}{3}v$

Newton-Pendel mit Abstand

- **Energie- und Impulserhaltung** für $n \geq 3$ Kugeln nicht hinreichend
- Kugeln mit **kleinem Abstand**
 - intuitiv verständlicher Spezialfall
 - völlig analog zu 2 Kugeln
 - verallgemeinerbar zu asymmetrischen Fällen
 - vermeidet didaktische Probleme
- **Aber**
 - Pendel funktioniert auch **ohne Abstand**
 - realistische Situation
 - **Phasengeschwindigkeit** des **Schalls** » (Gruppen-)geschwindigkeit der **Pendel**
 - **elastische Kompression** der Kugeln viel **schneller** als **Pendelbewegung**
 - → Stöße **nicht** zeitlich getrennt

Newton-Pendel ohne Abstand

- Gleiter gleicher Masse als effektives Modell
 - Kugeln nur an Oberfläche deformiert →
 - → räumliche Trennung von elastischer und Translationsenergie
 - = Eindimensionale Kette (Phononen)

- **Gleiche Federn** $C_i=C$

- **Nichtlineare Dispersion** $\omega(k) = 2\sqrt{\frac{C}{m}} \left| \sin\left(\frac{ka}{2}\right) \right|$

- a Abstand der Massen, $k \in [-\pi, \pi]$ Wellenvektor

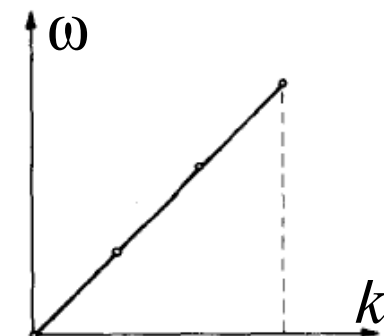
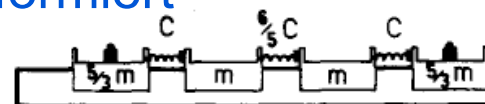
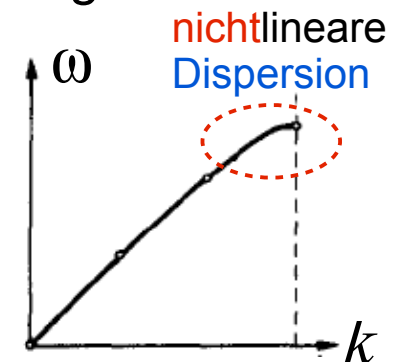
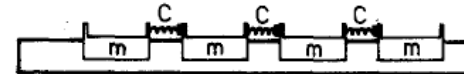
- Bewegung **nicht** äquivalent zu Newtonpendel

- **Wellenpaket** der Anregung wird **deformiert**

- **Spezialfall**

- **lineare Dispersion** für $C_1=C_3=\frac{5}{6}C_2=C$

- Bewegung **ähnlich** zu Newtonpendel

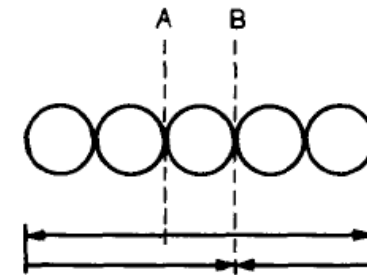


Newton-Pendel ohne Abstand

- **Lineare Dispersion** für Newton-Pendel **entscheidend**
 - **Wellenpakete** als Störungen **deformieren** sich **nicht**
 - bei nichtlinearer Dispersion Verbreiterung der Schockwelle auch *ohne* Dämpfung
 - **Superpositionsprinzip** bei Störungen links+rechts

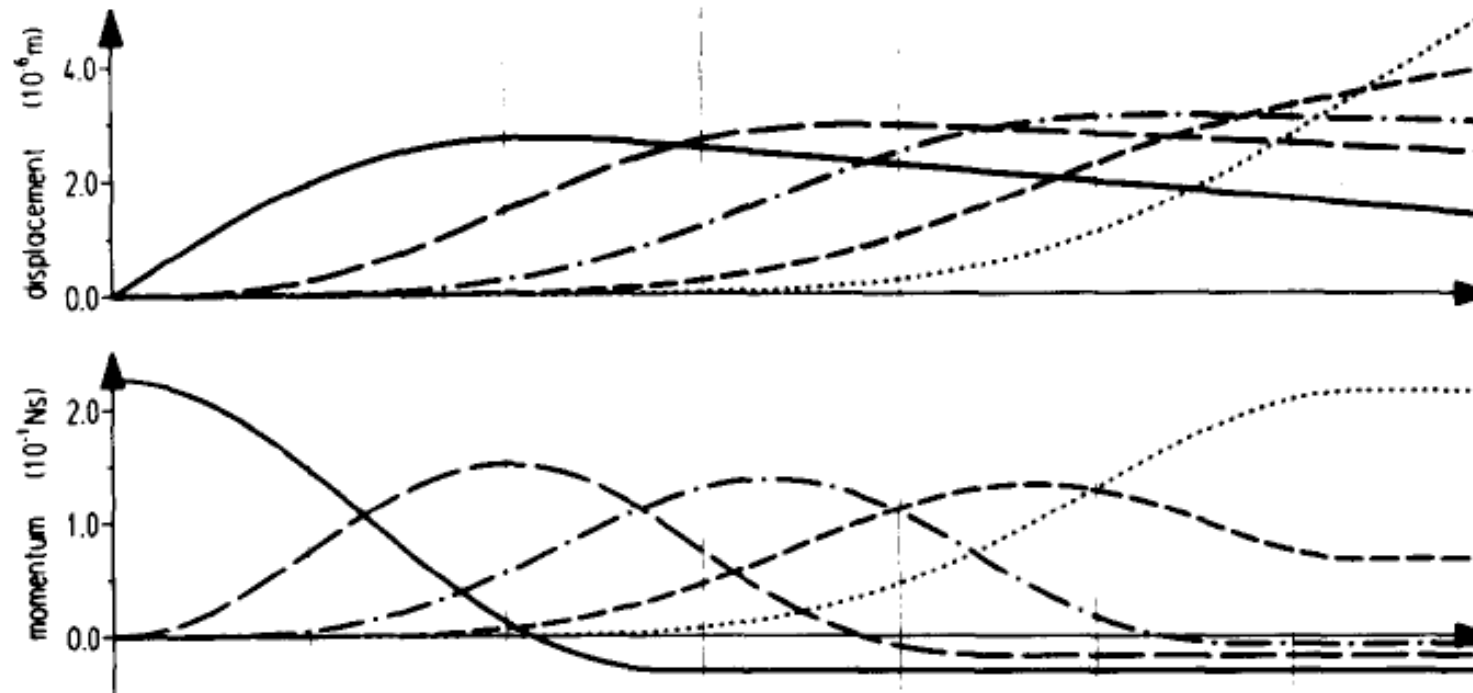
- **Zeitumkehrinvarianz**

- Störung wandert vom **Auftreffpunkt A** in beide Richtungen →
 - → **Reflexion** an Enden → Treffen im **Ablösepunkt B** →
 - → Auftreffen und Ablösen **symmetrisch**



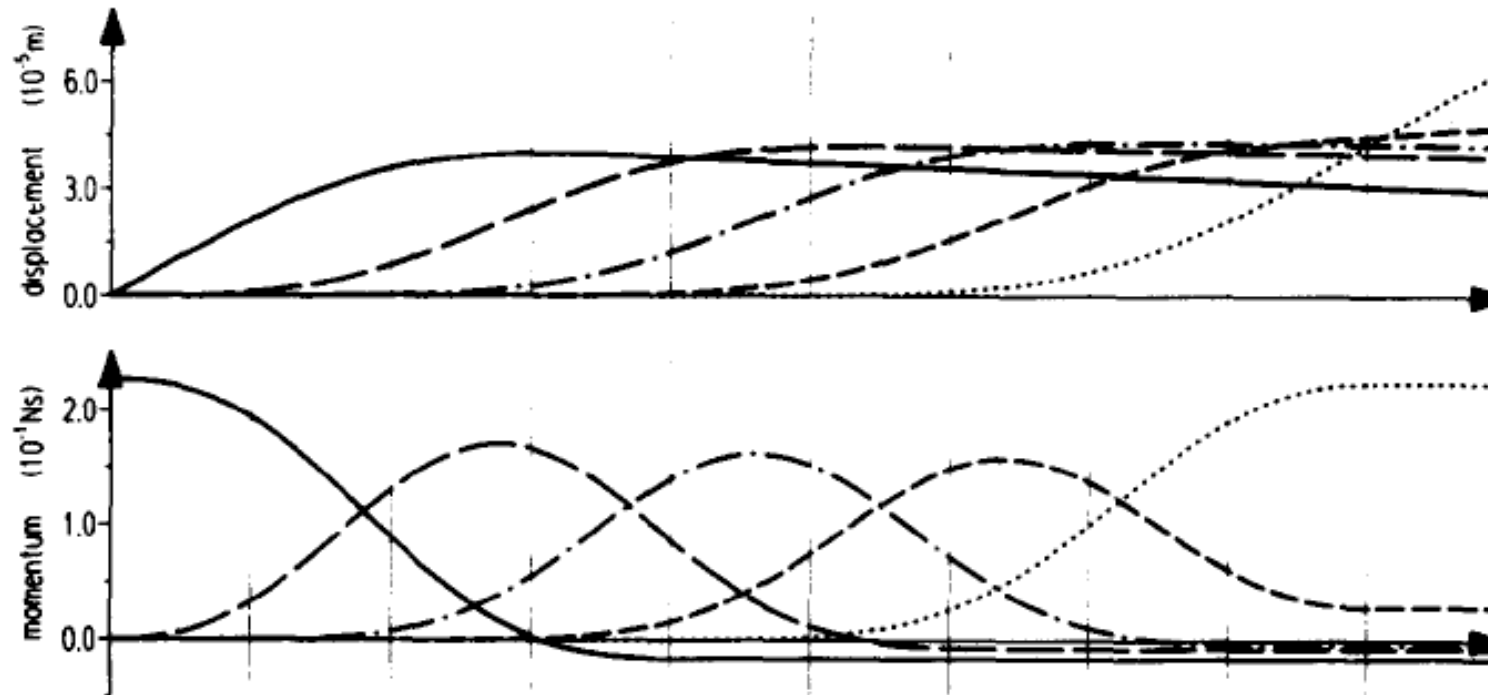
- elastisches **Kraftgesetz** $F = C x^r \leftrightarrow$ **Dispersion**
 - $r=1$: Hooke'sche **Federn** \leftrightarrow **nichtlineare** Dispersion
 - $r=1.5$: elastische **Kugeln** \leftrightarrow (näherungsweise) **lineare** Dispersion
 - Kugel wird „härter“ bei Deformation
 - funktioniert z.B. **mit Zylindern** ($r \neq 1.5$) **nicht**

Newton-Pendel



- Simulation für Hooke'sche Federn: $F=Cx$
 - Am Ende **alle** Gleiter **ausgelenkt** und in **Bewegung** nach vorne+hinten
 - **kein** Newton-Pendel

Newton-Pendel



- Simulation für elastische Kugeln: $F=Cx^{1.5}$
 - am Ende **praktisch nur letzter Gleiter** bewegt (\leftrightarrow Newton-Pendel)
 - \rightarrow kleine Auslenkung der Kugeln erhöht Linearität bei nächsten Zyklen
 - \rightarrow geringe Bewegung der Kugeln zu erwarten
 - nicht nur Reibung oder Imperfektion des Experimentes

Didaktik des Newton-Pendel

- faszinierend, motivierend, allgemein bekannt
- Erhält Energie und Impuls (wie *alles*), aber nicht hinreichend
- spezieller Fall
 - identische Kugeln (*nicht* Zylinder...)
 - volle Erklärung aufwendig/schwierig
- Nutzen ↔ Verwirrung
 - Schüler: „Energie“ ↔ „Impuls“ ↔ „Höhe“ ↔ „Symmetrie“?
- Beispiel physikalischer Modellbildung
 - entdeckendes Lernen, Forschungsprojekt, sokratische Gespräche
 - zeitaufwendig
- Schulbücher irreführend → mindestens Korrektur
- Erklärung durch Impulsstrom wie in Karlsruher Physikkurs?
- Kugeln mit kleinem Abstand als Kompromiss?

Literatur Newton-Pendel

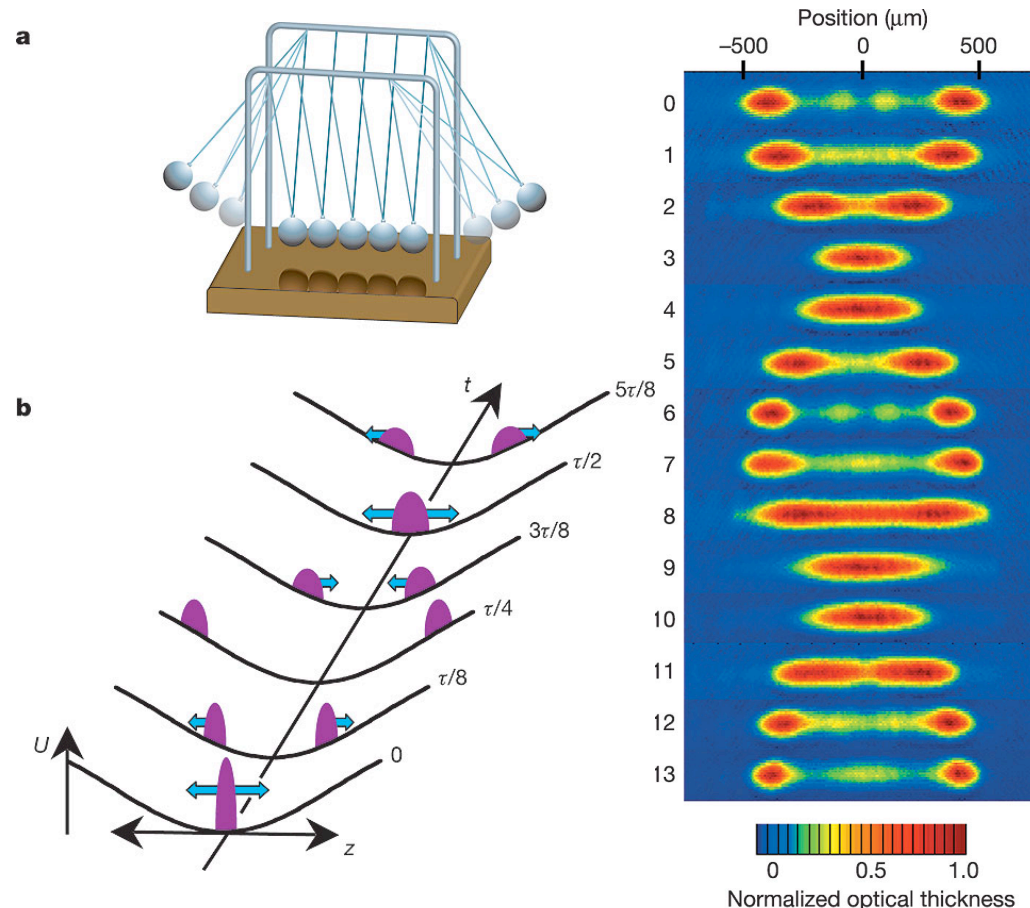
- F. Herrmann, P. Schmäzle, *Simple explanation of a well-known collision experiment*, Am. J. Phys **49**, 8 (1981) 762.
 - *beste Erklärung, empfohlen*
- F. Herrmann, M. Seitz, *How does the ball-chain work?*, Am. J. Phys. **50**, 11 (1982) 977.
 - *Erklärung der Dispersion, empfohlen*
- J.G. Gavenda, J.R. Edgington, *Newton's Cradle and Scientific Explanation*, The Physics Teacher **35** (1997) 411.
 - *Erklärung, Didaktik, Geschichte*
- K. Sekimoto, *Newton's Cradle versus Nonbinary Collisions*, Phys. Rev. Lett. **104**, 124302 (2010)
 - *aktuelle Analyse für verschiedene Kontaktkräfte, interessant*
- www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/cradle.htm

Exkurs: Quanten-Newton-Pendel

- 1-Dimensionales Bose-Einstein-Kondensat aus kalten Rb-Atomen

- „Kollisionen“ elastisch
 - Dekohärenz gering
 - System im Nichtgleichgewicht

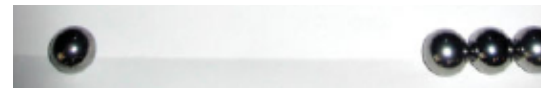
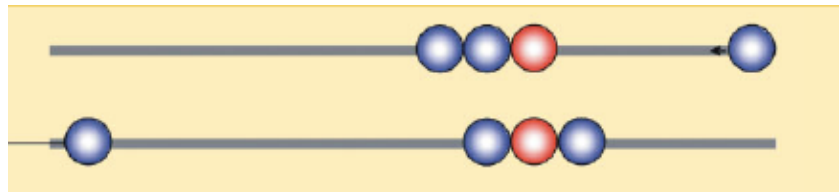
- T. Kinoshita et al., *A Quantum Newton's Cradle*, Nature **440**, 13 (2006) 900.



Noch ein Kugelrätzel....



normales Newtonpendel



anormale Kugelkette

Kugelkette vor (oben) und im Moment der Kollision, in dem die äußere Kugel mit hoher Geschwindigkeit davonfliegt.

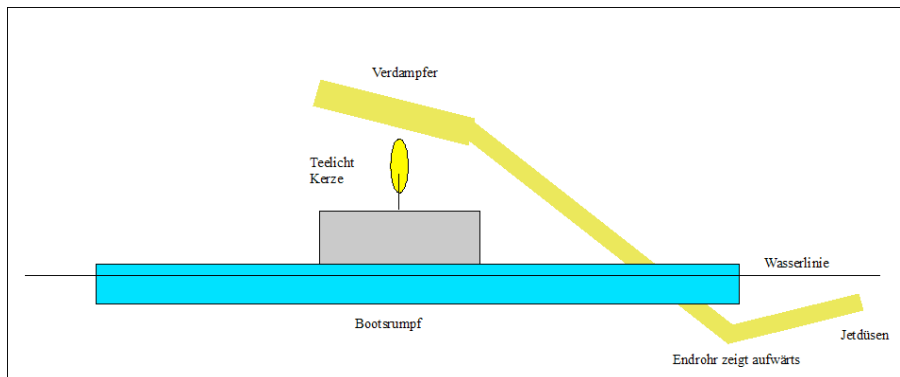
@Schlichting

- **langsame** Kugel von **rechts** → **schnelle** Kugel nach **links**
- **Energieerhaltung verletzt?**
- **erste** Kugel **magnetisch**
 - rechte Kugel vor Stoss **beschleunigt**
 - linke Kugel bekommt magnetische Energie extra
- H.J.Schlichting, *Attraktive Kugeln*, Phys. Unserer Zeit **5** (2005) 243.



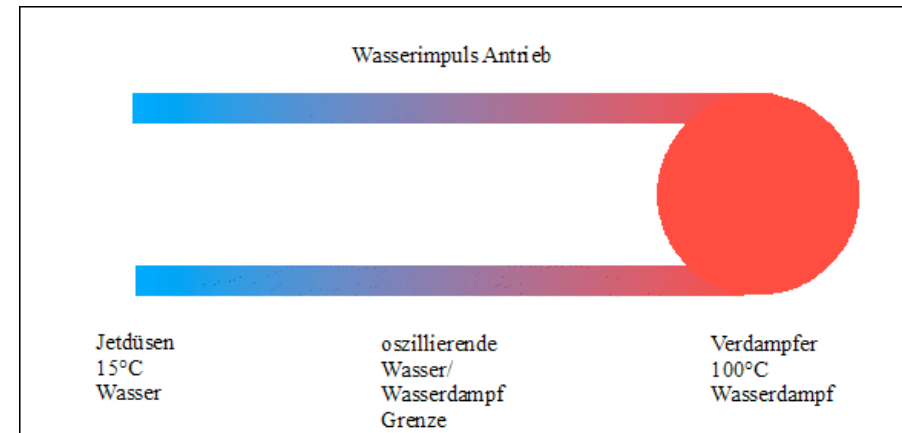
▪ www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/attraktive_kugeln.pdf

Knatterboot



- Knatterboot=tuk-tuk-boot=put-put-boat
 - Wasser im Rohr durch Kerze erhitzt → Bewegung
 - erstes Patent 1891, Wirkungsgrad $<0.5\%$

Knatterboot



■ Wasserimpuls-Antrieb

- Wasser in Rohr verdampft → Rückstoss → Wasserdampf kondensiert → → Ansaugen weniger effizient als Rückstoss → ...
- = „Dampfmaschine“
 - Trägheit des Wasser = Kolben → Über/Unterdruck
 - Abwärme in Wasser (Wärmekraftmaschine)
 - funktioniert nicht im heissen Wasser

Loïc's Glass pop-pop V2
for V1 (glass coil) see
www.electicspace.net

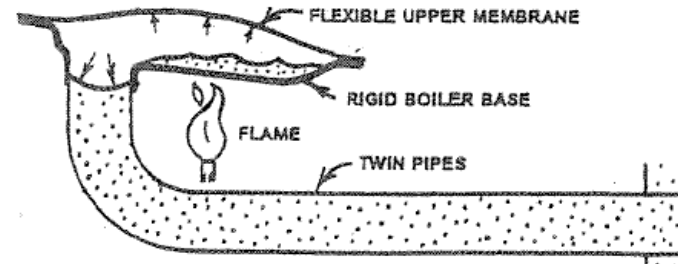
On an Idea of Jean-Yves R. and
made after we have seen the
same design made by Jorge
Hugo Cordero (Argentina)

Test performed on March 29, 2006

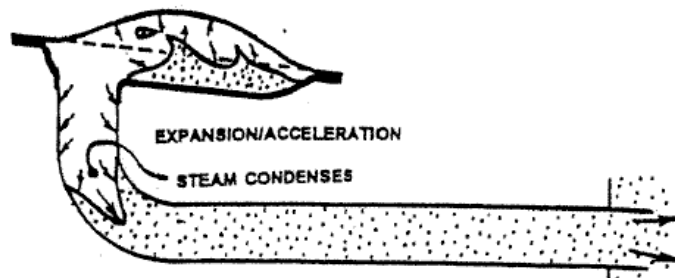
Knatterboot als Dampfmaschine



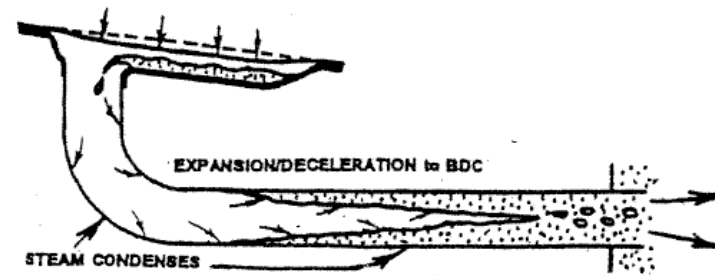
Schema Dampfmaschine



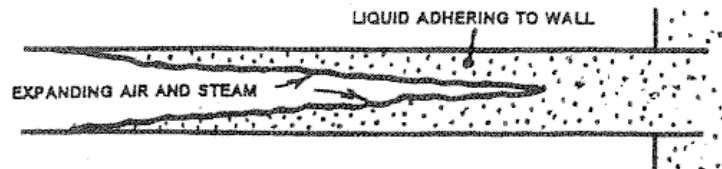
Erhitzen



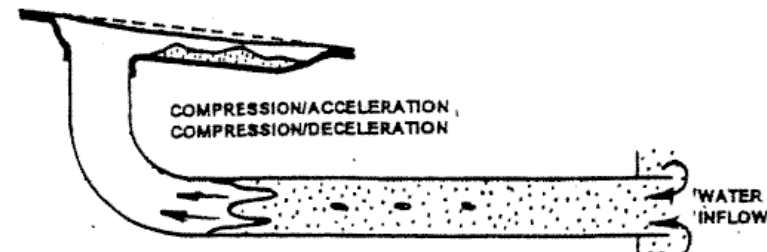
Expansion



Kondensation



www.sciencetoy maker.org/boat/images/bindon9_04.PDF



Kompression

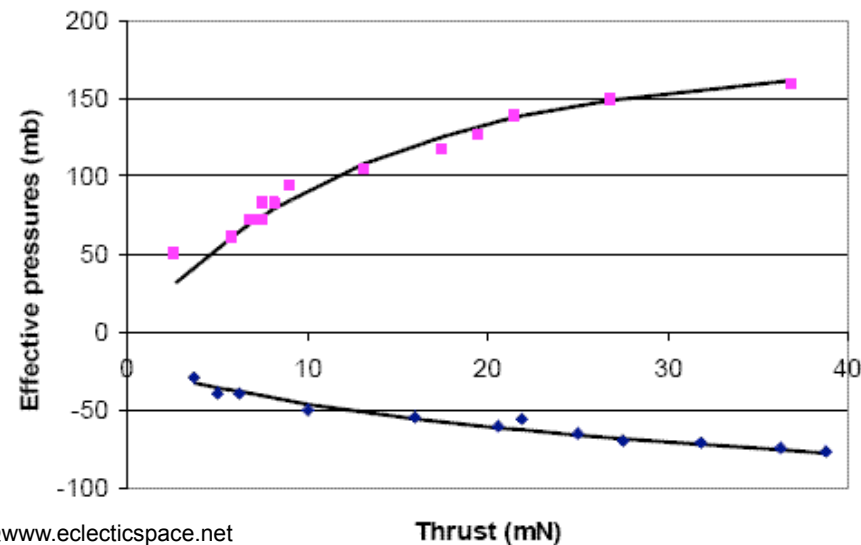
Knatterboot

Loïc's Glass pop-pop V2
for V1 (glass coil) see
www.eclecticspace.net

On an Idea of Jean-Yves R. and
made after we have seen the
same design made by Jorge
Hugo Cordero (Argentina)

Test performed on March 29, 2006

Max and min pressures vs thrust



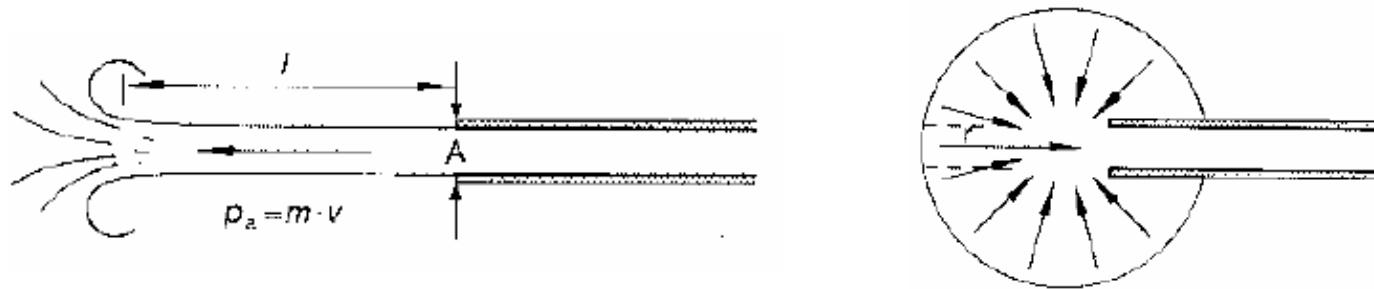
@www.eclecticspace.net

There, we see that the absolute value of the max pressure (positive) is bigger than the one of the min pressure (negative).

- Ansaugkraft **kleiner** als Rückstoss → *Warum?*



Knatterboot



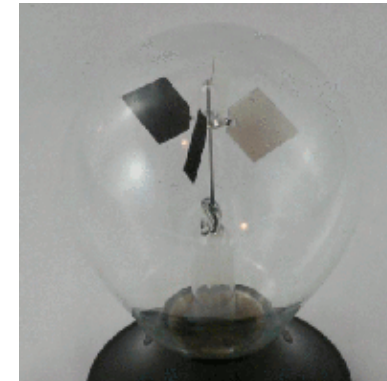
- Ansaugkraft **wegen Wirbelgeometrie kleiner** als Rückstoss

Referenzen

- H. J. Schlichting, B. Rodewald, *Physikalische Phänomene am Dampf-Jet-Boot*, Praxis der Naturwissenschaften - Physik 39/8, 19 (1990).
 - Didaktik des Knatterboots und **beste Erklärung, empfehlenswert**
 - www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/dampfjetboot_neu.pdf
- J. Bindon, *The Secret Workings of a transparent Pop-Pop Engine*,
 - www.sciencetoy maker.org/boat/images/bindon9_04.PDF
- www.eclecticspace.net/
 - Experimentelle Untersuchung
- www.andreadrian.de/knatterboot

Lichtmühle

- **Aufbau und Ursprung**
 - helle und dunkle Seiten, thermisch isoliert
 - geringer Druck
 - 0.05 mbar = Luftdruck im 70 km Höhe
 - erfunden 1873 von W. Crookes
 - Theorien Maxwell/Reynolds (1879), Einstein (1924)
 - zu dieser Zeit aktuelle Forschung
- **Strahlungsabsorption auf schwarzer Seite**
 - höhere Temperatur →
 - → Drehung mit schwarzer Seite nach hinten
 - = Radiometer
- **Abkühlen**
 - schwarze Seite strahlt mehr und kühlt schneller
 - → umgekehrter Drehsinn



Lichtmühle

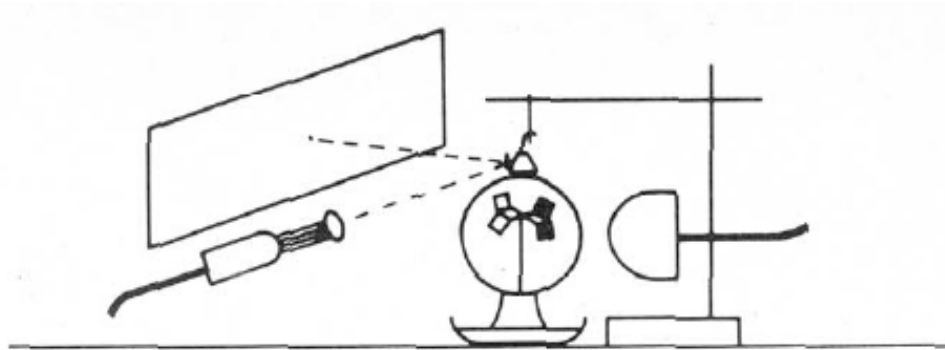


Figure 3. Schematic of "Schuster's Experiment."

C.W. Draper, *The Crookes Radiometer revisited, A centennial celebration*,
Journal of Chemical Education, **53**, 6 (1976) 356

- Experimentelle Resultate
 - Temperaturdifferenz $0.1-0.5 K$
 - Frei beweglicher Glaskolben bewegt sich in Gegenrichtung
 - → Kraft auf Rotor $2 \cdot 10^{-6} N$ (Reynolds 1876)
 - Kraft nimmt mit Luftdruck ab (→ Reibung in Lager irrelevant)
 - Dicke Plättchen $0.1 mm \approx$ mittlere freie Weglänge



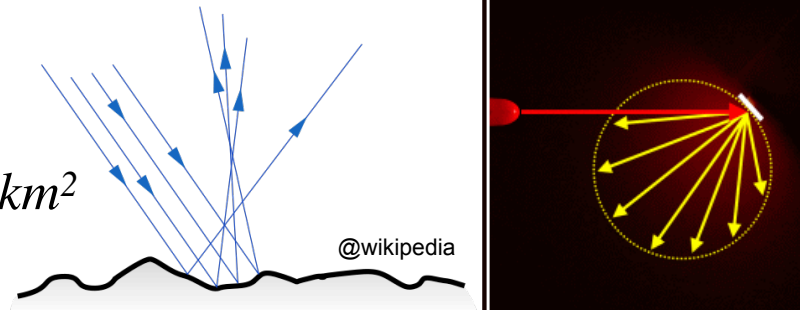
Interpretationsversuche

- **Falsche** Erklärungsversuche
 - **Ausgasen** auf schwarzer Seite
 - Umkehrung des Drehsinns beim Kühlen **nicht** erklärt, materialabhängig
 - **photoelektrischer Effekt**
 - Umkehrung des Drehsinns beim Kühlen **nicht** erklärt, materialabhängig

- **Populäre** Schulerklärungen
 - **Strahlungsdruck**
 - **Druckdifferenz** durch Heizen der schwarzen Seite

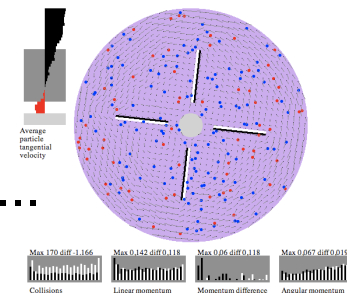
Strahlungsdruck?

- **falsche** Richtung
- zu **schwach** bei realem Druck
 - Sonne $\approx 10^3 \text{ W/m}^2 \rightarrow$ Druck $3 \text{ mPa} \approx 10 \text{ N/km}^2$
- funktioniert im **Ultrahochvakuum**
 - **spiegelnde** Oberfläche (z.B. Ag) \rightarrow Impulsübertrag $\Delta p_{\perp} = 2p_{\text{Gas},\perp}$
 - matte Oberfläche = „**schwarzer**“ **Strahler**
 - absorbiert Licht, aber **gleiche** Energie/Impulsdichte wird bei **anderer** Frequenz **abgestrahlt** (zumindest im *stationären Zustand*)
 - **diffuse** Abstrahlung in **alle Richtungen** (Lambert-Strahler)
- **Winkelabhängigkeit**
 - spiegelnde Seite dominiert *meistens* (nicht immer), tote Punkte, Abhängigkeit vom Sonnenstand
 - **gleiche** Abstrahlung für **diffus reflektierende weisse/schwarze** Oberfläche \rightarrow **keine** Drehung
- **Abstrahlcharakteristik, nicht** Farbe **entscheidend**



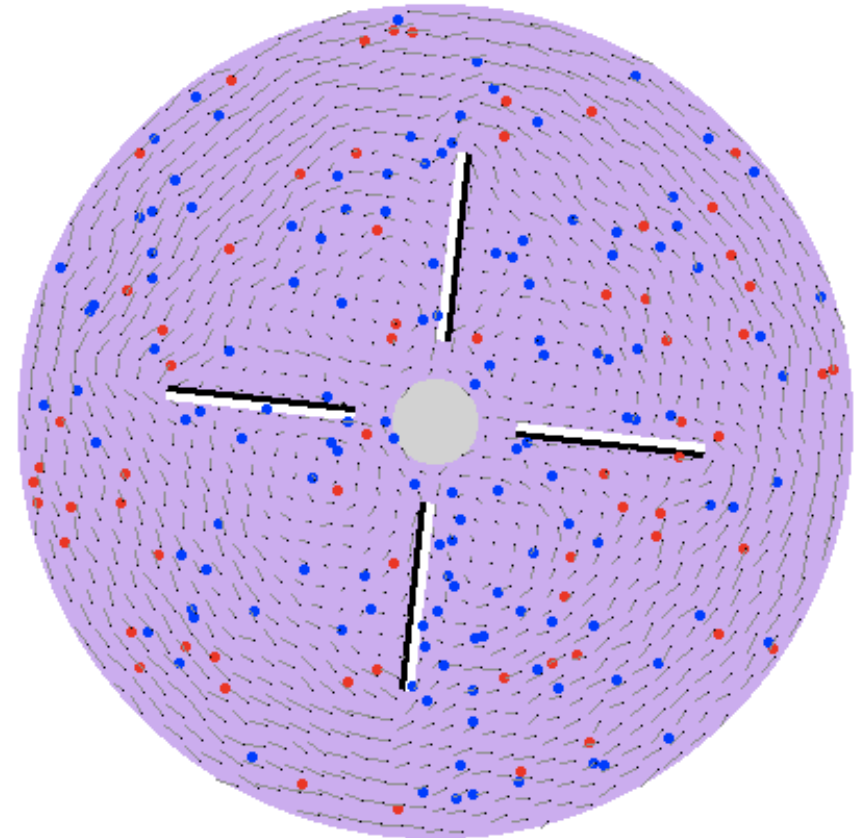
Rückstoss!?!

- Mechanismus
 - heisse Seite verliert durch Stösse mit Gasteilchen Energie
 - Gasteilchen werden im Mittel durch **Reflexion** schneller → Rückstoss
 - **Druckdifferenz** ($p \sim v^2$)
 - Umkehrung bei Kühlung erklärbar
 - schwarze Seite strahlt mehr → schnellere Abkühlung
- implizite **Annahme**
 - ↔ **Druck** der Gasteilchen auf beiden Seiten **verschieden**
 - ↔ Gas **nicht im Gleichgewicht**
 - ↔ **keine Wechselwirkung** der Teilchen
 - ↔ mittlere freie Weglänge \gg geometrische Abmessungen
 - ↔ **hochevakuiertes Gas**
- Simulation im Applet
 - variable Teilchendichte, -grösse, Temperatur, Geometrie, ...
 - gregegan.customer.netspace.net.au/SCIENCE/LightMill/LightMill.html

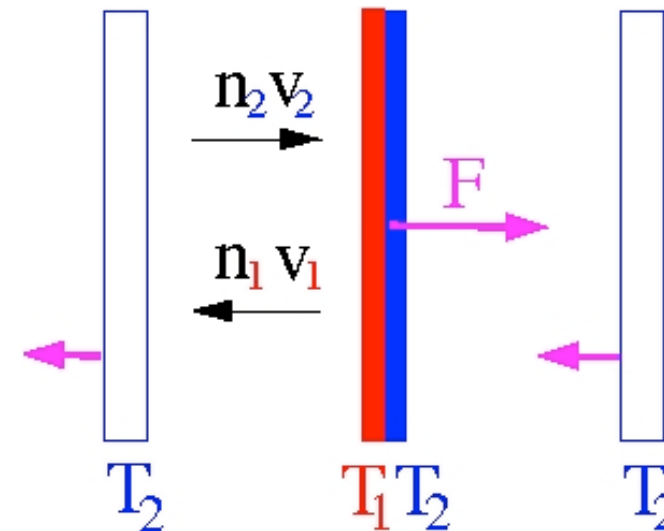
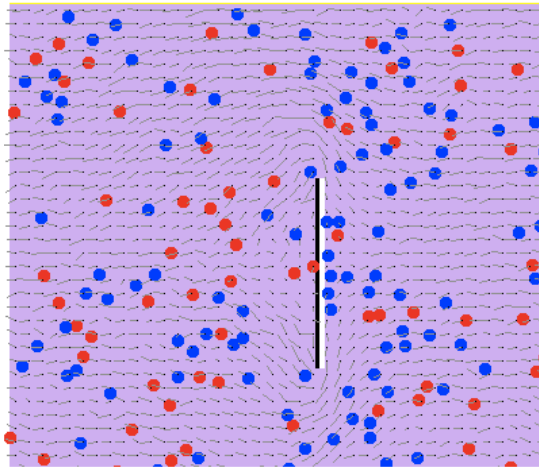


Lichtmühle - Simulation

- **Externer Energiestrom** **heizt** schwarze Seiten
- **Kollision** an Rotor = **Elastische Kollision** freier Teilchen an Rotor-Teilchen **thermischer** Geschwindigkeit
- **rote/blau**e Teilchen **über/unter** Durchschnittsgeschwindigkeit
- Applet (G. Egan, 2008)
 - gregegan.customer.netspace.net.au/SCIENCE/LightMill/LightMill.html



Herleitung Rückstosskraft



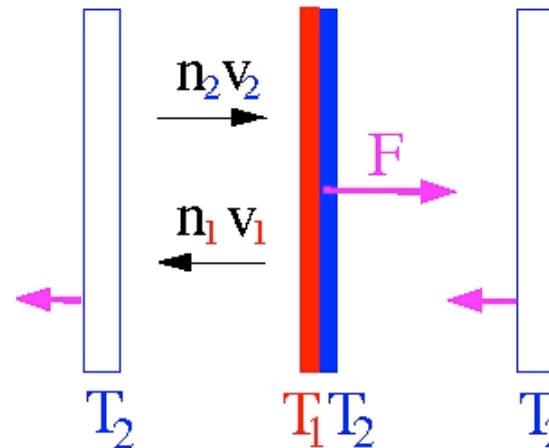
■ Vereinfachtes Schulmodell

- miteinander verbundene Platten der Temperatur T_2 und T_2
- bewegliche Platte mit Temperaturen T_1 und T_2 ($T_1 > T_2$)
- keine Geschwindigkeitsverteilung (zur Vereinfachung nur links/rechts)
- **Wechsel** der Geschwindigkeiten v_1 und v_2 an Platten
- Teilchen mit Geschwindigkeit v_i einer Richtung haben
 - kinetische Energie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v_i^2 = \frac{3}{2} kT$, Druck $p_i = \frac{1}{3} n_i m v_i^2$

■ Einfachste Referenz

- W. Bürger, *Die Lichtmühle*, Spektrum des Wissenschaft 2/2001, S.104.

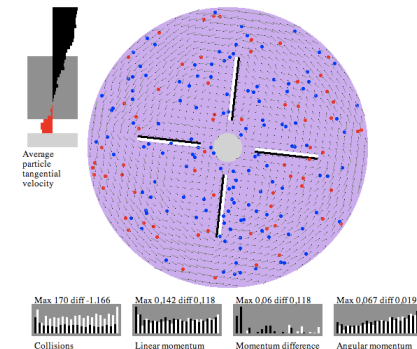
Herleitung Rückstosskraft



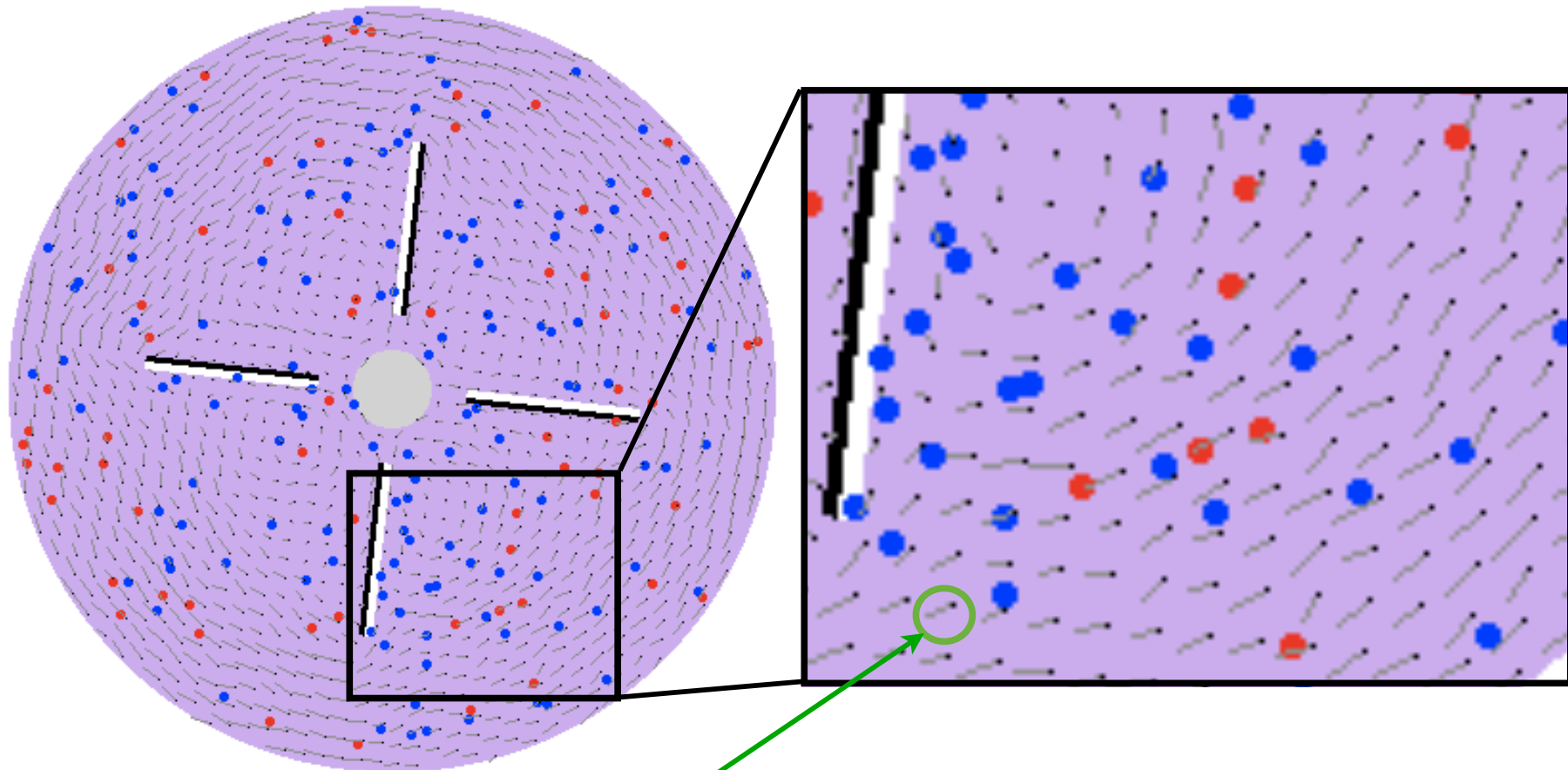
- Zwischen T_2 und T_2
 - Dichte der Teilchen nach links/rechts $n_1 = n_2 = \frac{1}{2}n$
 - Gesamtdruck auf T_2T_2 -Seite $p_{T_2T_2} = p = p_1 + p_2 = 2p_2 = \frac{mnv_2^2}{3}$
- Zwischen T_1 und T_2
 - Wechsel der Geschwindigkeiten v_1 und v_2 an Platten
 - Dichte konstant \rightarrow Stromfreiheit
 - $$\dot{j}_{T_1 \rightarrow T_2} = \dot{j}_{T_2 \rightarrow T_1} \Leftrightarrow n_1 v_1 = n_2 v_2 \Leftrightarrow n_1 \sqrt{T_1} = n_2 \sqrt{T_2}$$
 - Gesamtdruck auf T_1T_2 -Seite $p_{T_1T_2} = p_1 + p_2 = \frac{m}{3} (n_1 v_1^2 + n_2 v_2^2)$
- Druckdifferenz $\Delta p = p_{T_2T_2} - p_{T_1T_2} = \frac{p}{2} \left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1 \right)$

Rückstoss???

- **Druckdifferenz** als Erklärung für Schule
- **Aber**
 - **nur** bei **mittlerer freier Weglänge grösser** als geometrische Längen
 - **nur** für Druck $< 0.01 \text{ mbar}$
 - **keine** Erklärung des realen Spielzeugs
 - → schneller **Druckausgleich** im Gas → **Gleichgewicht**
 - mit Schallgeschwindigkeit
 - **Analogie**: Behälter mit Heizung/Kühlung links/rechts bleibt in Ruhe (*perpetuum mobile*)
 - → **Temperaturgradient** und Wärmefluss, aber **gleicher** Druck
 - → **Dichtegradient**
 - → **Teilchenströmung** (sichtbar im Applet)
- *Warum dreht sich Rotor dann?*



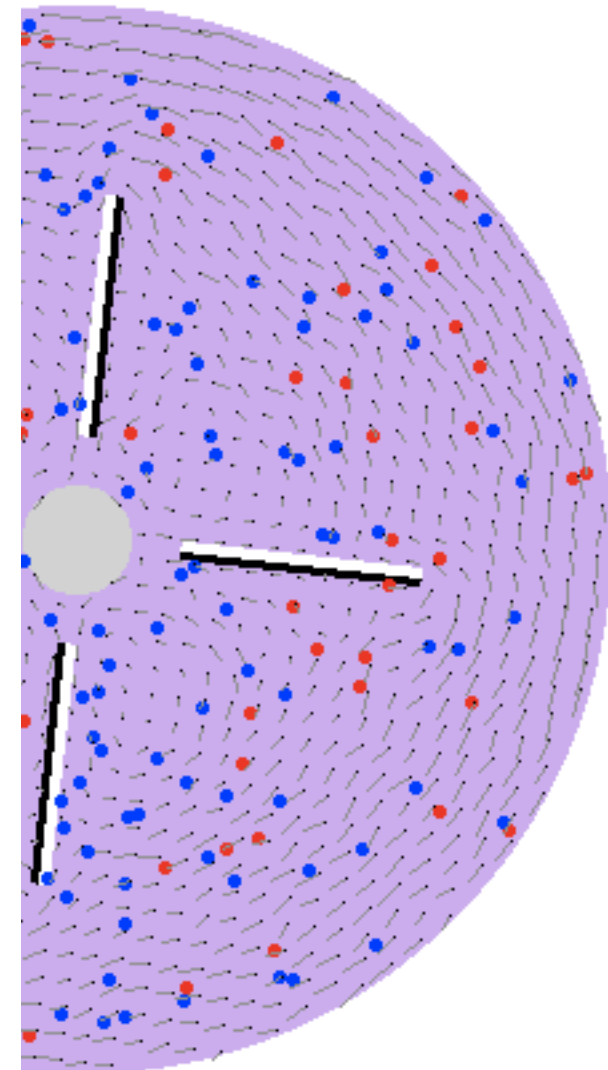
Lichtmühle - Simulation



- **Mittlere Teilchengeschwindigkeit** relativ zu Rotor
 - Vektor ausgehend von Punkt • („Windfahne“)

Lichtmühle - Simulation

- Beobachtungen
 - Teilchen streben ins **Gleichgewicht**
 - **Druckausgleich** \leftrightarrow **kein Rückstosseffekt**
 - **Zirkulation** der Teilchen im Gleichgewicht
- Parameter
 - Teilchendichte und Teilchenradius
 - Energiestromdichte auf Rotor
 - Reibung an Wand
 - \leftrightarrow Transfer von Drehimpuls
 - Geometrie des Rotors (Grösse, Löcher)
 -
- Didaktik
 - entdeckendes Lernen?



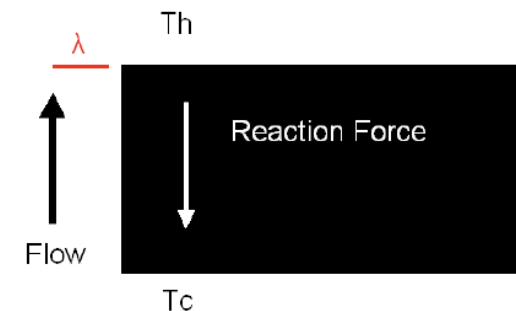
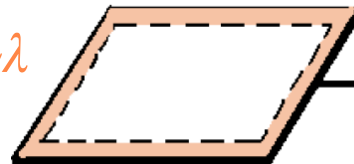
Lichtmühle - Randeffekte!!

■ Stationärer Zustand

- Mittlere freie Weglänge $\lambda \ll$ Ausdehnung L des Gefässes
 - kein Hochvakuum (Preis!)
- → **Gleichgewicht** und **Druckausgleich** trotz Temperaturgradient
- → $pV=nRT \rightarrow n_1T_1=n_2T_2=const.$
- → **Dichte** auf kalter Seite höher → mehr Stösse
- → **Rand** erreichen mehr Teilchen von der kalten Seite
- → **Gasfluss von kalter zu heisser Seite entgegen** dem Wärmefluss

■ → **Gegenkraft** auf Rotor **nötig**

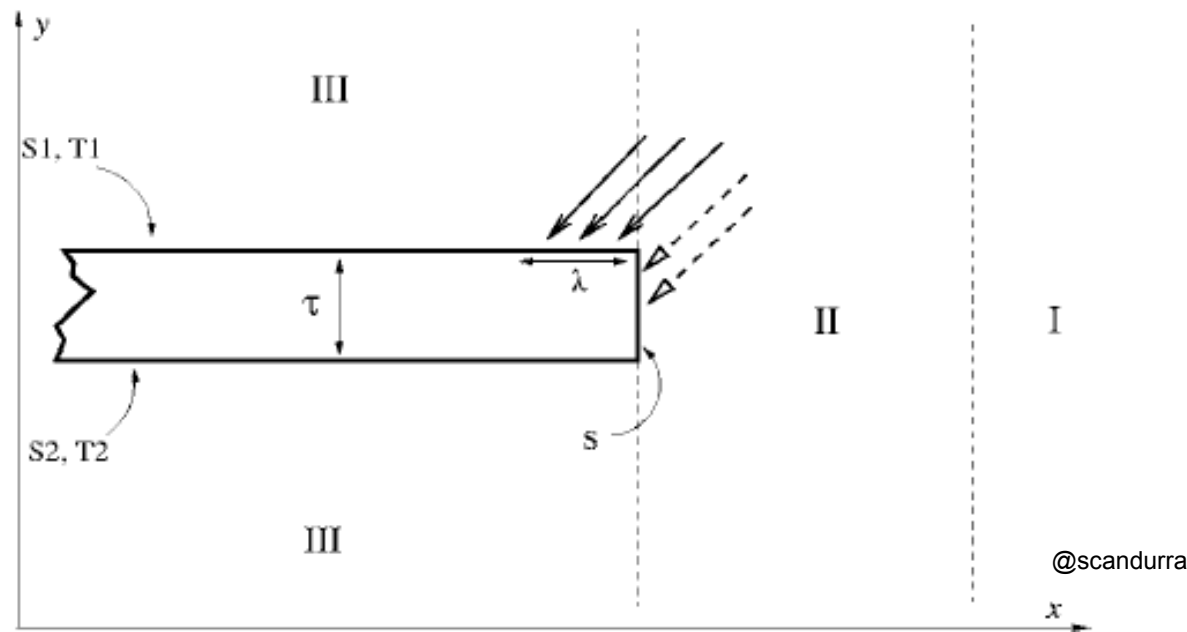
- an den **Rändern parallel zur Strömung**
 - Maxwell/Reynolds 1876
- auf **Randfläche** der **Breite $\sim \lambda$**
 - Einstein 1924



■ Experiment

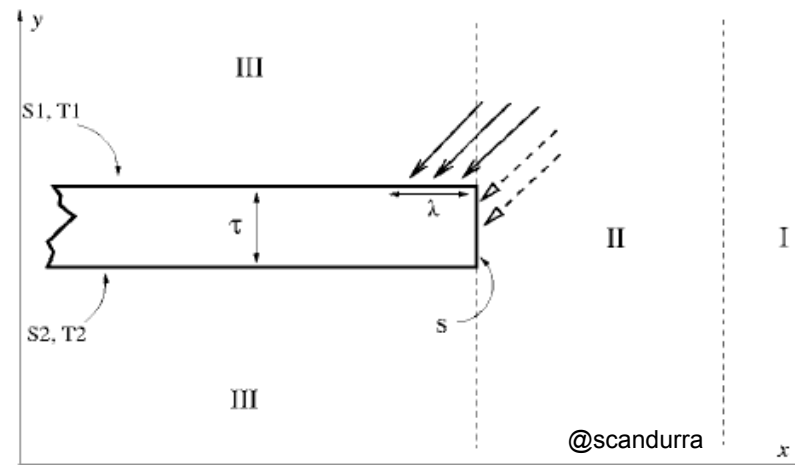
- Abhängigkeit der Kraft von Randlänge und Löchern bestätigt

Randeffekte



- Oberflächen S_1 und S_2 mit Temperaturen $T_1 > T_2$
- **Region I**: Gas im Gleichgewicht mit Temperatur T_0
- **Region II**: starker Temperaturgradient im Gas auf Skala λ
- **Region III**: Temperaturgradient im Gas vernachlässigbar, praktisch im Gleichgewicht: Druck $p_1 = p_2$ und $n_1 T_1 = n_2 T_2$

Randeffekte bei mittlerem Druck



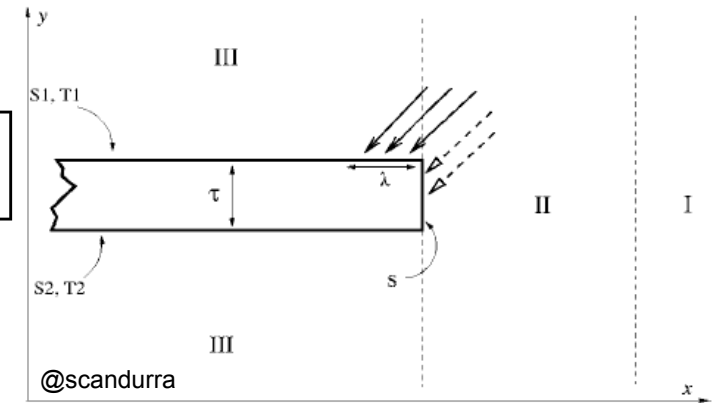
- **Region III** im Innern → **keine Kraft**
 - Druck $p_1 = p_2$ und $n_1 T_1 = n_2 T_2$ ↔ **Gleichgewicht**
 - schnelle Teilchen stossen seltener
- **Region III** am **Rand** → **Gegenkraft** zu **thermal creep**
 - Stosszahl von kalter Seite grösser, da Teilchendichte dort grösser
- **Region II** → **Randkräfte** durch **Rückstoss**
 - **Rückstoss** senkrecht zum Temperaturgradient auf Teilchen aus II auf heisser Oberfläche T_1 grösser (schwarze Pfeile)
 - **Scherkräfte** auf Seitenfläche (gestrichelte Pfeile)

Randeffekte in Formeln

- Totale Kraft durch Teilchen aus II

$$F = \frac{15}{32\sqrt{2}} \frac{1}{\sigma^2} \cdot l \cdot k_B \Delta T \left[2 + \alpha \left(\frac{\tau}{2\lambda} - 1 \right) \right]$$

- $\Delta T = T_1 - T_2$ Temperaturgradient
- l Länge des Randes
- λ mittlere freie Weglänge
- τ Dicke des Flügels
- α Energieakkommodationskoeffizient an Oberfläche ($0 < \alpha < 1$)
- $\pi\sigma^2$ Wirkungsquerschnitt der Teilchen

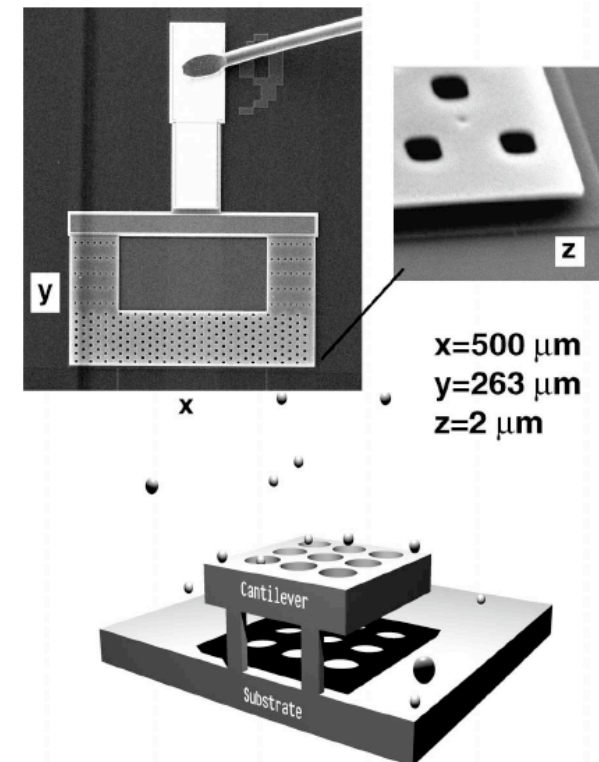


- Referenz

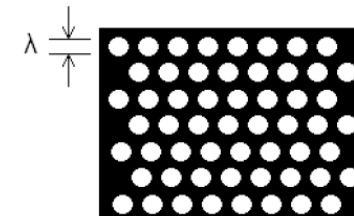
- M. Scandurra, F. Iacopetti, P. Colona, *Gas kinetic forces on thin plates in the presence of thermal gradients*, PRE **75**,026308 (2007)

Anwendungen

- **Microelectromechanical Systems (MEMS)**
- **Löcher** mit Durchmesser+Dicke 70 nm
 - ~ mittlere freie Weglänge bei Normaldruck
- → thermische **Randeffekte erhöht**
- Fehlerquelle in Nanomesstechnik
- **Nanomotoren...?**
 - „*Science Fiction*“: Auftrieb in 70 km Höhe?
 - D.Jones, Nature **392** (1998) 332.



A. Passian, *Thermal Transpiration at the Microscale: A Crookes Cantilever*, PRL **90**,12 (2003) 124503



Zusammenfassung Lichtmühle

- **Ultrahochvakuum** → **Strahlungsdruck**
 - abhängig von Abstrahlcharakteristik
- **Druck** $< 0.01 \text{ mbar}$
 - freie Weglänge $\lambda \gg$ Ausdehnung L
 - **Rückstoss einzelner Teilchen** im Nichtgleichgewicht
 - Stromfreiheit im stationären Zustand

$$\dot{j}_{T_1 \rightarrow T_2} = \dot{j}_{T_2 \rightarrow T_1} \Leftrightarrow n_1 \sqrt{T_1} = n_2 \sqrt{T_2}$$

- Druckdifferenz $\Delta p = p_{T_2 T_2} - p_{T_1 T_2} = \frac{p}{2} \left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1 \right)$
- **geringer Druck** $> 0.01 \text{ mbar}$
 - realistischer Fall, freie Weglänge $\lambda \ll$ Ausdehnung L
 - **Druckausgleich** im **bulk** im **Gleichgewicht** → **keine Kraft** auf **Inneres**

$$p_1 = p_2 \Leftrightarrow n_1 T_1 = n_2 T_2$$

- **Rand entscheidend**
 - **Gegenkraft** für Strömung kalt → heiss
 - **Rückstoss** von Teilchen aus Randbereich im Nichtgleichgewicht

Didaktik der Lichtmühle

- klassisches Beispiel zur kinetischen Gastheorie
- schwieriger als gedacht
- Kompromiss?
 - Strahlungsdruck für spiegelnde Oberfläche in Hochvakuum
 - Abstrahlcharakteristik entscheidend
 - Rückstoss bei „geringem“ Druck
 - „*Good Teaching is good cheating...*“
- Applet als Hilfe zur vollen Erklärung
 - entdeckendes Lernen? Modellbildung?
 - zeitintensiv?

Lichtmühle - Literatur

■ Aktueller Stand

- M. Scandurra, *Enhanced radiometric forces*, physics/0402011v1.
 - *theoretische Erklärung von Randeffekten, aktuell, empfehlenswert*
- M. Scandurra, F. Iacopetti, P. Colona, *Gas kinetic forces on thin plates in the presence of thermal gradients*, PRE **75**,026308 (2007)
 - *theoretische Erklärung von Randeffekten, aktuell, empfehlenswert*
- A. Einstein, *Zur Theorie der Radiometerkräfte*, Z. für Phys. **27** (1924) 1.
 - klare Gegenüberstellung Bulk vs. Randeffekte, lesenswert
- L.B. Loeb, *The kinetic theory of gases*, Dover, 1961.
 - Übersetzung und Diskussion des papers von Einstein
- W. Bürger, *Die Lichtmühle*, Spektrum des Wissenschaft 2/2001, S.104.
 - Erklärung durch Druckunterschied für Gas sehr geringen Drucks im Nichtgleichgewicht
 - gut lesbar, *empfehlenswert*

■ Umfassender Review fehlt noch (?)

Weitere Literatur chronologisch

- M.Knudsen, *Radiometerdruck und Akkommodationskoeffizient*, Annalen der Physik, 5. Folge, 1930, Band 6, Heft 2, Seite 9.
 - sehr geringer Druck, Mittlere freie Weglänge $\lambda \gg$ Ausdehnung L
- A.E. Woodruff, *The radiometer and how it does not work*, The Physics Teacher **6**, 358 (1968).
- C.W. Draper, *The Crookes Radiometer Revisited*, A centennial celebration, J. of Chem. Educ. **53**, 6 (1976) 356.
- M. Goldman, *The radiometer revisited.*, Phys. Educ. **3** (1978) 427
 - *Abstrahlcharakteristik*
- P. Gibbs, *How does a light mill work?*, Usenet Physics FAQ
 - math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html
- Blog zum Thema (*Wissenschaft als Prozess...*)
 - golem.ph.utexas.edu/category/2008/07/light_mills.html

Lichtmühle - Einsteins Publikation

Zur Theorie der Radiometerkräfte.

Von A. Einstein in Berlin.

(Eingegangen am 21. Juli 1924.)

Auf Grund schematischer Annahmen über den Mechanismus der Molekülbewegung in Gasen werden die Kräfte annähernd berechnet, welche auf gegen die freie Weglänge λ kleine Körper sowie auf die Randzone gegen λ großer Körper im Wärmestrome wirken.

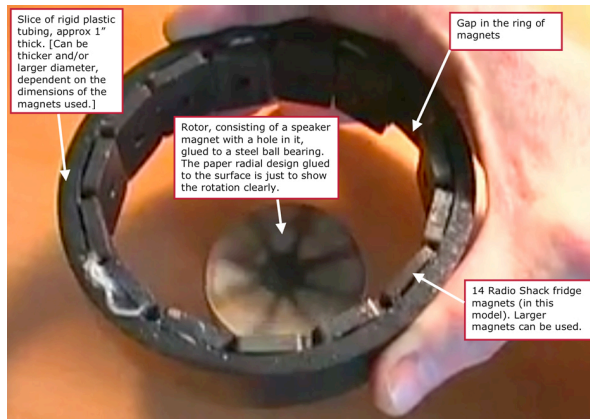
Die Theorie der durch Temperaturdifferenzen bewirkten Kraftwirkungen und Druckdifferenzen in Gasen ist von Knudsen für den Fall befriedigend geklärt worden, daß die freie Weglänge groß ist gegenüber den maßgebenden Gefäßdimensionen. Dagegen herrscht noch ziemliche Unklarheit über die Ursachen der Thermokräfte in den Fällen, wo die freie Weglänge von derselben Größenordnung oder kleiner als die maßgebenden Gefäßdimensionen sind. Ich will im folgenden eine mehr qualitative Betrachtung der hier obwaltenden Verhältnisse geben, das Quantitative nur der Größenordnung nach berücksichtigen. Wenn die hier gegebenen Betrachtungen auch recht elementarer Natur sind, so haben sie mir doch über Unklarheiten weggeholfen, und ich darf wohl hoffen, daß manchem Leser mit dieser kurzen Darlegung gedient ist.

Zeitschrift für Physik. Bd. XXVII.

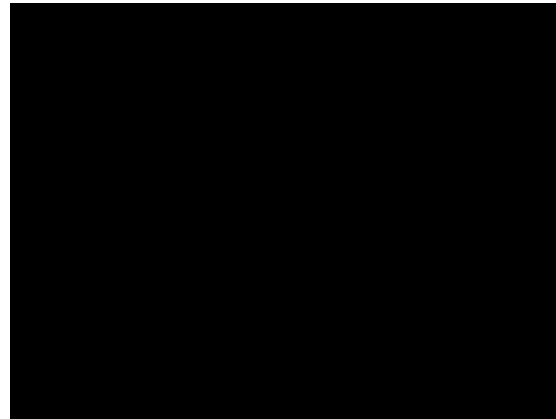
1

- Didaktik
 - Stil und Sprache der Publikation im Vergleich zu heute
 - Lichtmühle an der Spitze der Forschung
 - A. Einstein, Zeitschrift für Physik, 1 (1924)

Ring-Motor als Perpetuum mobile



@projectcamelot.org



@jnaudin.free.fr

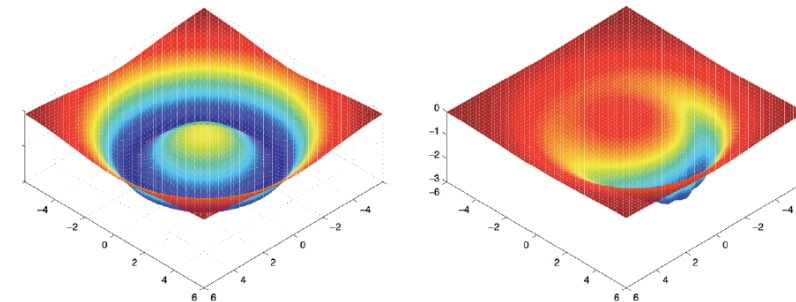
- Ring mit Permanentmagneten + magnetischer Kreisel
→ „Rotation ohne Energiezufuhr“
 - *gefunden auf projectcamelot.org von einem Schüler*
 - mögliche Anwendung in UFOs?
- **Perpetuum Mobile?** Antigravitation?....
- **Was sagt der Physiklehrer?**



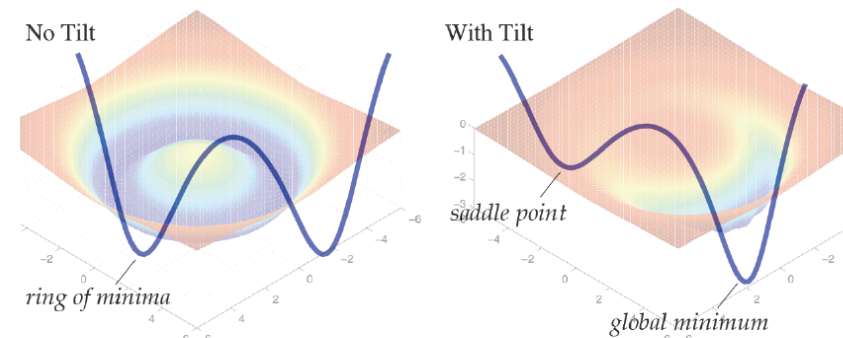
Ring-Motor

- Potential der Ringmagnete

- Ring horizontal → Minima entartet

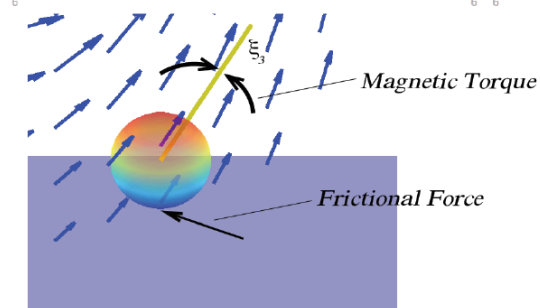


- Ring gekippt
→ Symmetriebrechung
→ globales Minimum



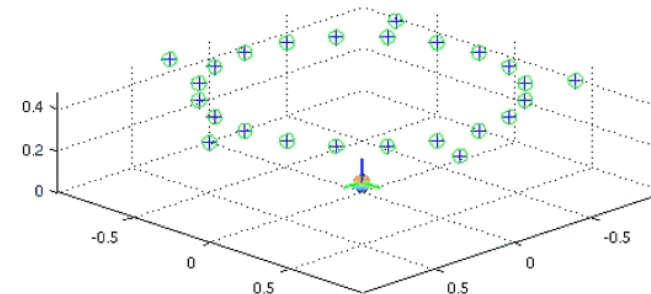
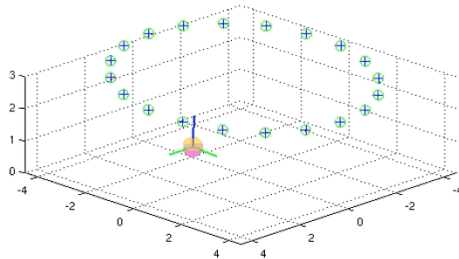
- Ausrichtung von Kreisel in Magnetfeld

- www.acm.caltech.edu/~owhadi/BallisticTransport



[@www.acm.caltech.edu/~owhadi/BallisticTransport/](http://www.acm.caltech.edu/~owhadi/BallisticTransport/)

Perpetuum mobile?



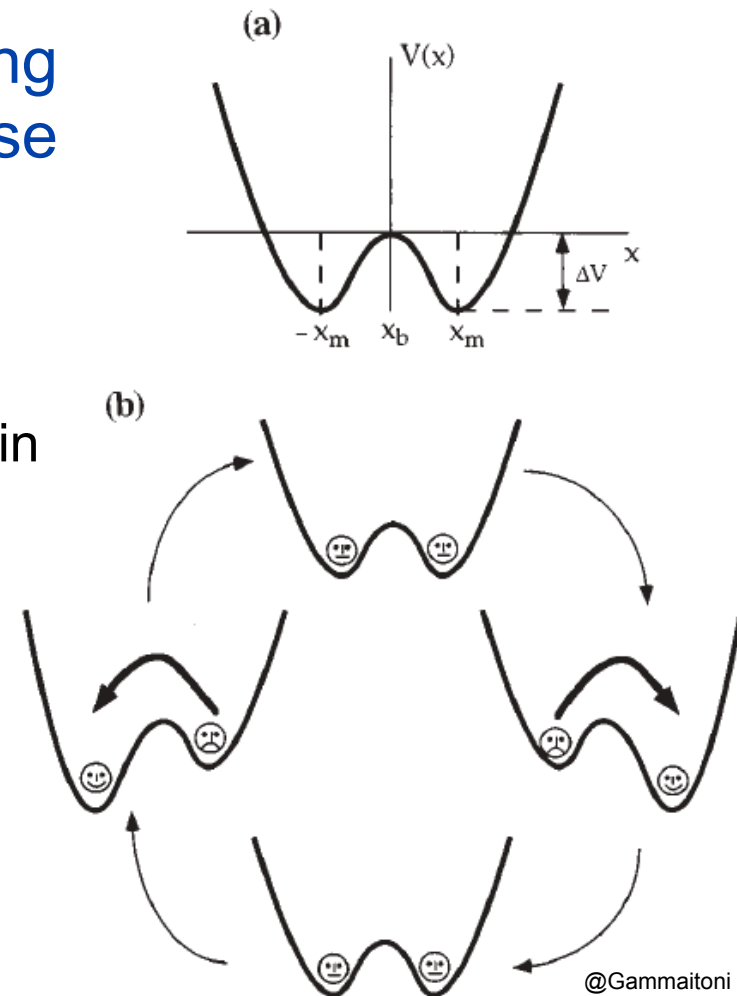
@www.acm.caltech.edu/~owhadi/BallisticTransport/

- Kreisel kann durch Kippen der Hand geführt werden
 - Erster Hauptsatz erfüllt
- Funktioniert auch für zufällige Fluktuationen
 - „Stochastische Resonanz“: Noise → Arbeit
- Ist der zweite Hauptsatz verletzt?
 - Nein! → „Brownian Ratchet“
- geeignet für Mentorierte Arbeit

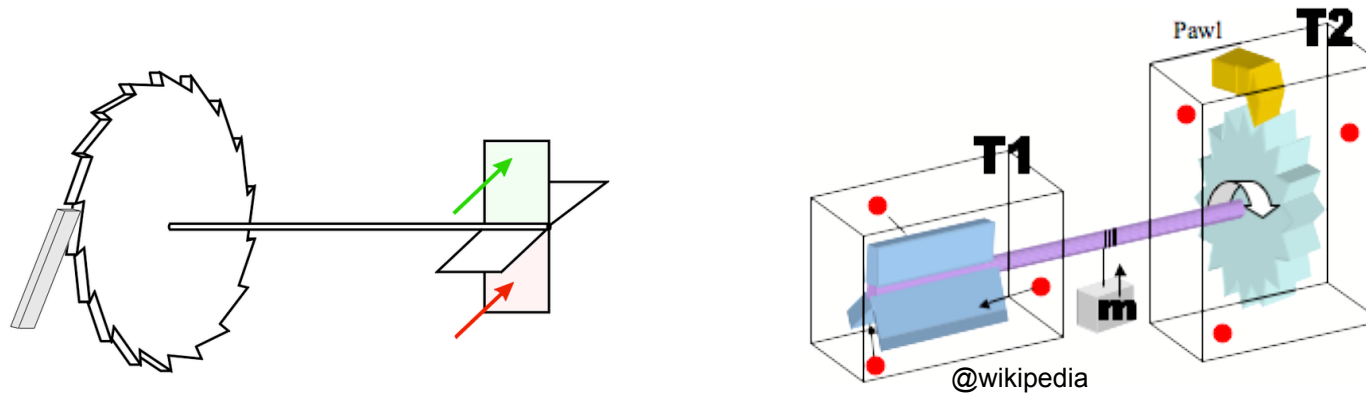


Stochastische Resonanzen

- Periodische asymmetrische Störung in **Resonanz** mit thermischem Noise → **gerichtete Bewegung**
- = „Brownsche Motoren“
 - Teilchen im Double-well-Potential
 - Biologische Prozesse (Proteintransport in Zelle)
 - Anwendungen in Nanotechnologie?
- Zweiter Hauptsatz nicht verletzt
 - **getriebene** Systeme im **Nichtgleichgewicht**
 - keine vollständige Umwandlung von Wärme in Arbeit
 - L.Gammaitoni et al., *Stochastic Resonance*, Rev. of Modern Physics **70**,1 (1998) 223.

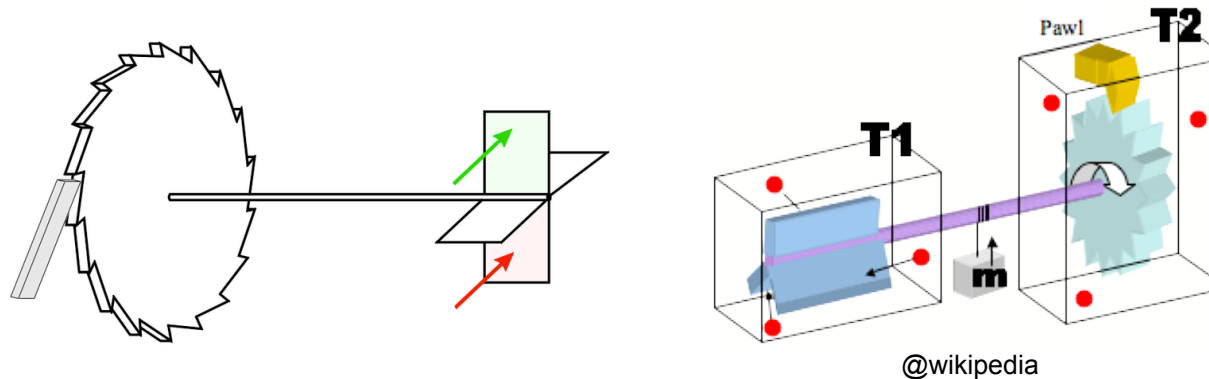


Exkurs: Brownian Ratchet



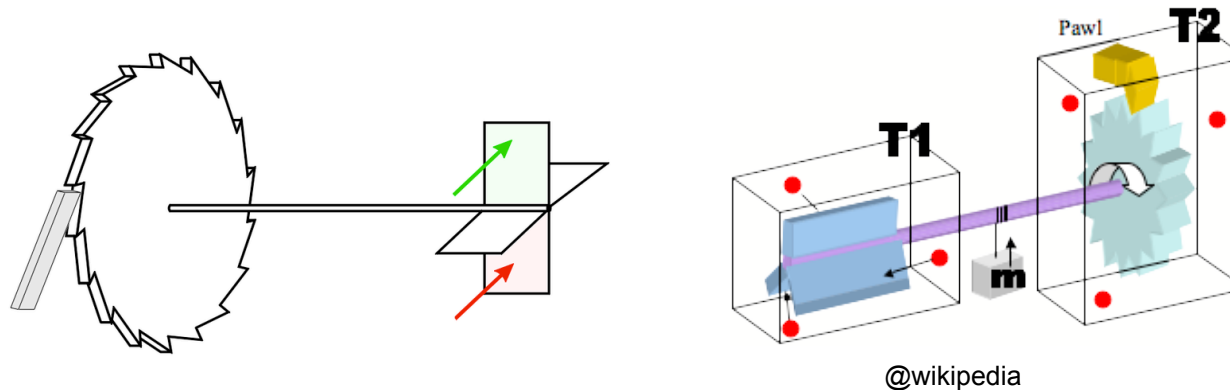
- Ratsche mit Sperre und Flügelrad
 - Teilchen oben/unten → Drehung/keine Drehung
 - Gas im Gleichgewicht bei T_1 : Wärme → Arbeit
 - → Zweiter Hauptsatz verletzt?
 - generisches Modell für Irreversibilität
- qualitativ an Schule erklärbar? → mentorierte Arbeit
- R.P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1*, Addison-Wesley, 1963, Chap.

Exkurs: Brownian Ratchet



- Ratsche mit Sperre und Flügelrad
 - Teilchen oben/unten → Drehung/keine Drehung
- Gleiche Temperatur $T_1 = T_2$
 - E Energie zur Anregung von Feder an Sperre
 - Wahrscheinlichkeit $\sim e^{-\beta E}$, dass Teilchen oben Feder überwindet
 - Wahrscheinlichkeit $\sim e^{-\beta E}$, dass Feder spannt und Ratsche beschleunigt
 - Wahrscheinlichkeiten gleich → Sperre fluktuiert → im Mittel in Ruhe

Exkurs: Brownian Ratchet

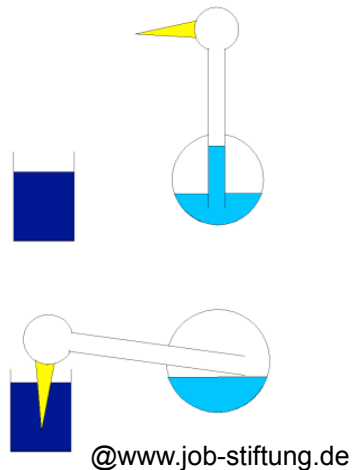


- Temperatur $T_2 \neq T_1$
 - E Energie zur Anregung von Feder an Sperre
 - $L\theta$ Arbeit zum Heben des Gewichts
 - Wahrscheinlichkeit $\sim e^{-\beta_1(E+L\theta)}$, dass Teilchen oben Feder überwindet
 - Wahrscheinlichkeit $\sim e^{-\beta_2 E}$, dass Feder spannt
→ Ratsche beschleunigt → Arbeit $L\theta$ wird frei
 - $e^{-\beta_1(E+L\theta)} \neq e^{-\beta_2(E)}$ → Wahrscheinlichkeiten verschieden →
Wärmekraftmaschine (Temperaturausgleich)

Pseudowissenschaft

- Spontan im Unterricht
 - Astrologie, Anti-Tachyonen-Karten fürs Handy, Kupferarmbänder,....
- Probleme
 - wir wissen zuwenig über esoterische Phänomene
 - wir haben keine Erklärung
 - unsere Erklärung ist zu lang/unverständlich
 - Physik als Ideologie unter vielen anderen
- Vorschläge
 - selbst Beispiele analysieren und thematisieren
 - wissenschaftliche Methode und ihre Grenzen erklären (\leftrightarrow Philosophie)
 - Gesellschaft zur wissenschaftlichen Untersuchung von Parawissenschaften e.V.
 - www.gwup.org (wenig Physik, viel Medizin und Psychologie)

Trinkvogel

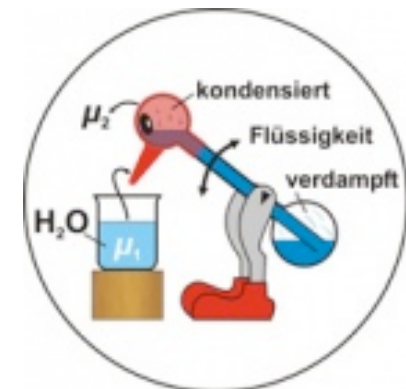


- Warmes Wasser im Glas, Ether im Vogel
- Verdunstung am Schnabel → Abkühlen →
→ Ether kondensiert → Verlagerung des Schwerpunkts →
→ Kippen → Erwärmen → Sieden von Ether →
→ Verlagerung des Schwerpunkts →
- Schüler: Ist das ein Perpetuum mobile 2.Art?



Trinkvogel

- *Ist das ein Perpetuum mobile 2. Art?*
- **kein** Perpetuum mobile 2. Art
 - Wärme → Arbeit
 - **Entropiezuwachs** beim Verdunsten von Wasser
 - → Wärmekraftmaschine
 - → Nachweis durch Glaskuppel
 - Luftfeuchtigkeit **gesättigt** → **keine** Bewegung
- Video
 - Eduard-Job-Stiftung zur Förderung der Lehre in Thermodynamik, www.job-stiftung.de

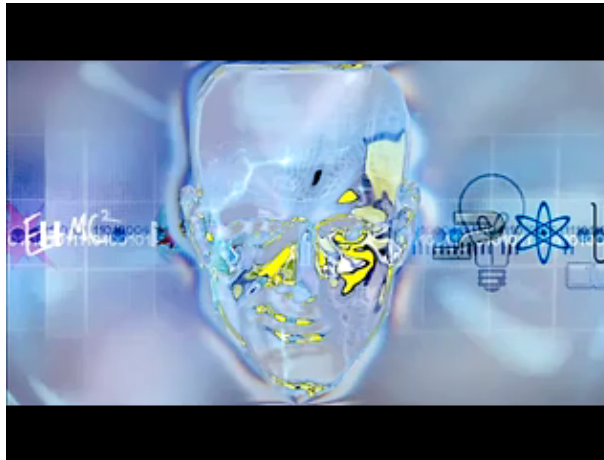


@www.job-stiftung.de



@wikipedia

Silly Putty

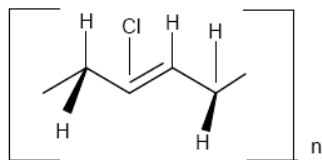


- **viskoelastische Flüssigkeit** „silly putty“
 - **fließt** wie eine Flüssigkeit (langsam)
 - **elastisch** wie ein Ball (schnell)
 - **hart und spröde** wie ein Glas beim Hämmern (grosse Kraft)
- **Nicht-Newtonsche Flüssigkeit**
 - Viskosität hängt von der äusseren Kraft ab
 - viele, aber schwache Bindungen?
- **zahlreiche Varianten** (magnetisch, fluoreszierend)
 - www.puttyworld.com, www.sillyputty.com

Happy and Sad Balls

- fast **gleiche** Dichte und **Härte**

- „**happy**“



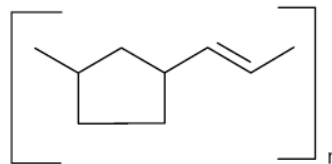
- **Neoprene**

- **hohe**

- **geringe**

- **Glasphase** $T < T_{g1}$ ↔ **Gummiphase** $T > T_{g2}$

- ↔ „**sad**“ Ball



- ↔ **Polynorboren**

- ↔ **niedrige** Elastizität

- ↔ **hohe** innere Reibung

- **Aufprall** → **Hohe** Kräfte auf Polymere

- **elastische Verformung** ↔ **Bindungen brechen**

- **Experimente**

- **elastischer** ↔ **inelastischer** Stoss

- **Beschleunigung** schiefe Ebene **hoch/niedrig**

- **Erwärmen / Abkühlen**

→ **beide gummiartig/glasartig, spröde**

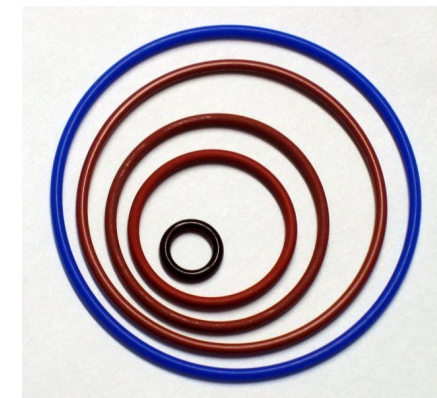


www.mswshop.ch (11.90 CHF)

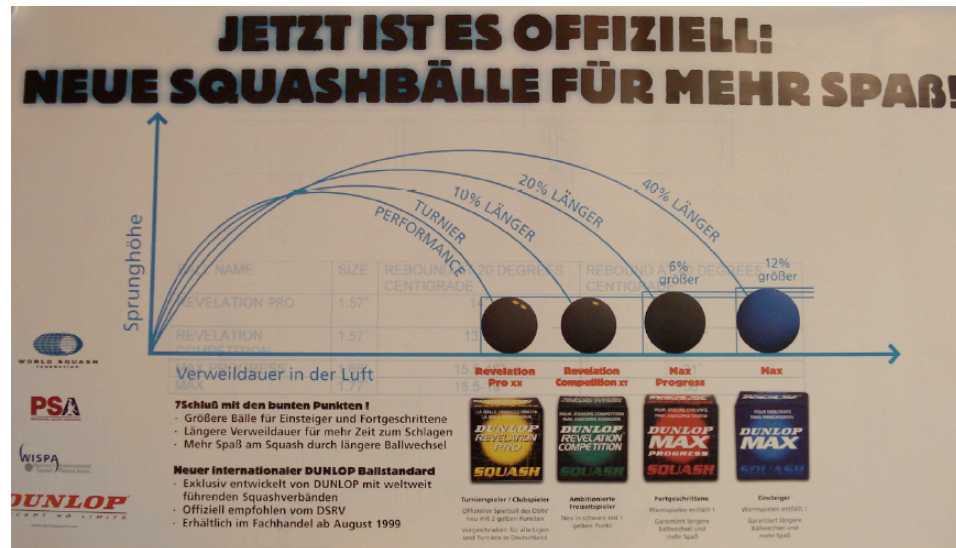
Polymere

- Challenger-Unglück 1986
 - Dichtungsringe der Booster-Raketen bei $T < 11^\circ\text{C}$ glasartig und spröde
 - R. Feynman, *Kümmert Sie, was andere Leute denken?*, Piper, 1996.
 - einfaches Experiment im Eiswasser zeigt Glasübergang
 - Managementfehler
 - *Reality must take precedence over PR, for Nature cannot be fooled. (R.Feynman)*

- www.polymerambassadors.org
 - Unterrichtsideen für Polymere im Alltag
 - Auto (Reifen, Stossfänger)
 - Sport (Helme, Bodenbelag)
 - S.Natta, L. Higgins, POLYMER AMBASSADORS: A Novel Program to Promote Pre-college Learning about Polymeric Materials, *Polymer Reviews*, 48, 4 (2008) 596.

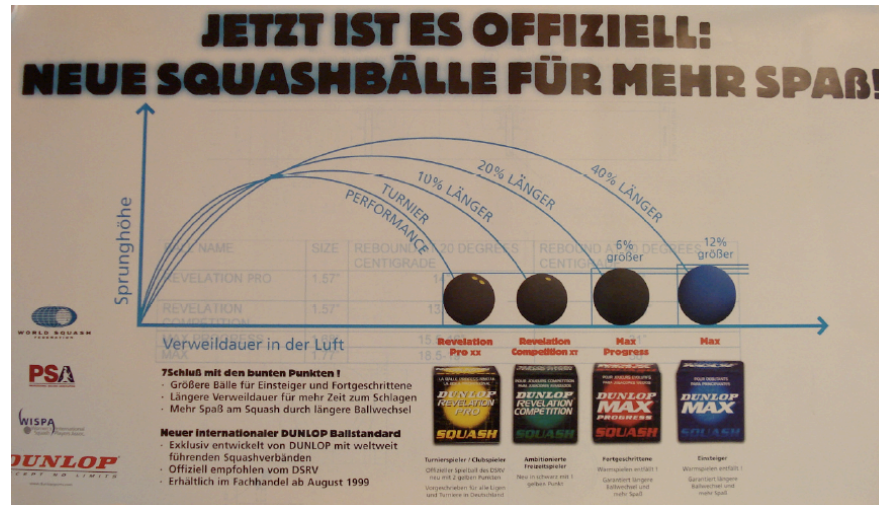


Squashbälle



- Profi- und Amateurbälle
 - Bälle **wenig elastisch** → Wärmeverluste durch Reibung
 - höhere Schlagfrequenz der Profis → höhere **Balltemperatur**
 - **unterschiedliche „Elastizität“** für gleiche Sprungeigenschaften bei niedrigerer Temperatur
 - Plakat: *bis 40% grössere „Wurfzeit“* (richtig: „Sprunghöhe“)

Praktikum Squashbälle



■ Praktikum

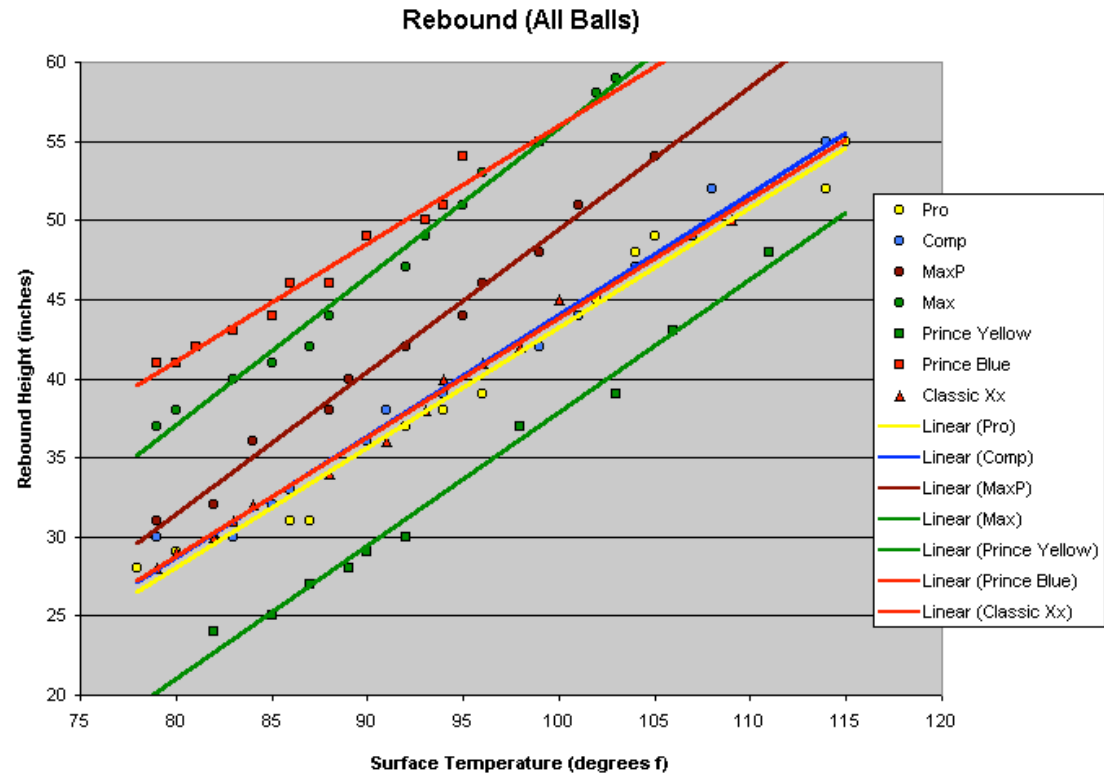
- 2 Lektionen
- Vorkenntnisse: freier Fall, Energie, (in)elastischer Stoss (nur qualitativ)
- **Messung** der **Sprunghöhe** im Video bei **Zimmer-** und **Körpertemperatur**
- **Korrektur** des Plakats: richtig 40% mehr „Sprunghöhe“ statt „Wurfzeit“
- Mentorierte Arbeit E. Kohlprath (Praktikumslehrer: W. Pils)
 - www.fachdidaktik.physik.ethz.ch/education/AbgeschlosseneArbeiten

■ Didaktische Vorteile

- Klassisches Thema mit modernen Materialien
- Alltagsbezug
- vielseitig und nicht trivial

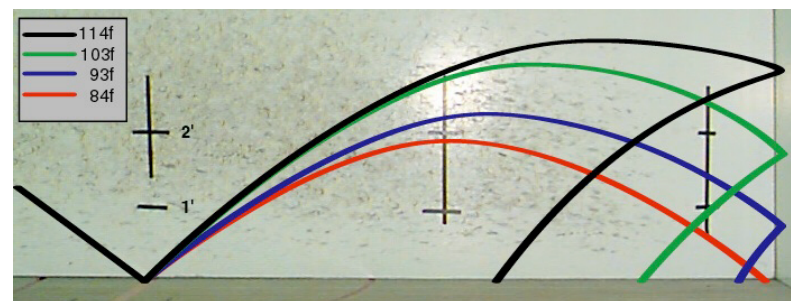
Praktikum Squashbälle

- Sprunghöhe proportional zur Temperatur



- Bälle bei gleicher Temperatur

■ www.ithacasquash.com



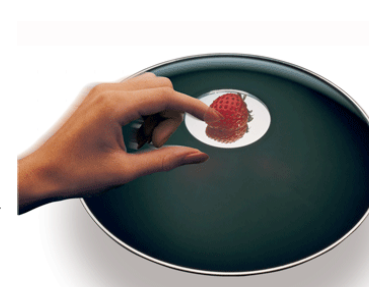
Elastizität und Sprunghöhe

- Young'sches **Elastizitätsmodul** $E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$
 - Zugspannung $\sigma = \frac{F}{A}$, Dehnung $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$
- **Gesamtenergie** $E_{\text{tot}} = \frac{1}{2} D (\Delta l)^2 = \frac{1}{2} \frac{AE}{l} (\Delta l)^2 = \text{const.}$
- → **Verformung** $x \sim 1/\sqrt{E}$
- E gross → Verformung x klein → elastischer Bereich
- „hart“ $\hat{=} E \gg l \hat{=} \text{„elastischer Stoss“} \hat{=} \text{„grosse Höhe“}$
- „weich“ $\hat{=} E \ll l \hat{=} \text{„inelastischer Stoss“} \hat{=} \text{„geringe Höhe“}$
- $E_{\text{stahl}} \gg E_{\text{Gummi}} \gg E_{\text{Knetmasse}}$
 - Stahlkugel bleibt nur liegen, wenn Untergrund inelastisch
 - Stahlkugeln im Newtonpendel → elastischer Stoss
- Elastizitätsmodul E von Squashbällen steigt mit der Temperatur
 - E von **Gummi-Elastomer** nimmt zu (**Ausnahme!**)
 - **Gasdruck** p im Innern nimmt zu

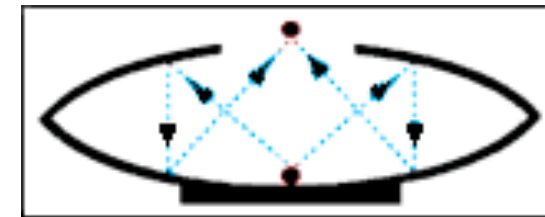


Spielzeugphysik

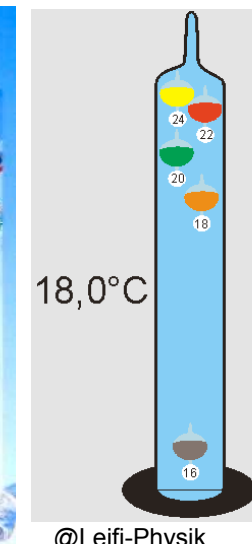
- **Mirage-Zauberspiegel**
 - mehrfache Reflexion und virtuelle Bilder



- **Galilei-Thermometer**
 - Glaskugeln verschiedener Masse in Flüssigkeit
 - Temperaturänderung
 - → Dichte von **Flüssigkeit/Glas fällt/unverändert**
 - unterschiedliche Volumenausdehnung **Flüssigkeit/Glas**
 - → Steigen und Sinken durch **Auftrieb**



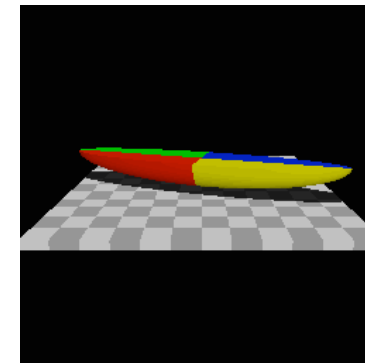
- **Lava-Lampe**
 - Flüssigkeiten mit unterschiedlichem Ausdehnungskoeffizient
 - Erwärmen/Abkühlen verändert Verhältnis der Dichten → wechselnder Auftrieb



@Leifi-Physik



Keltisches Wackelholz



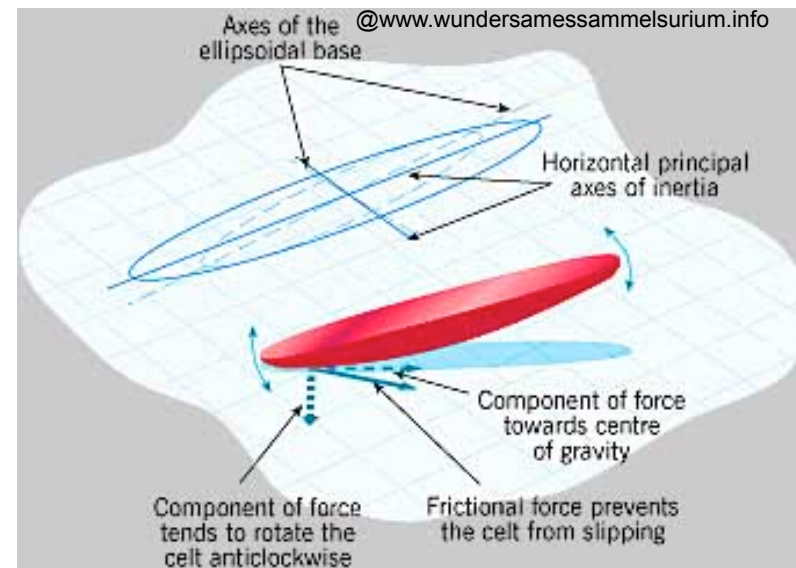
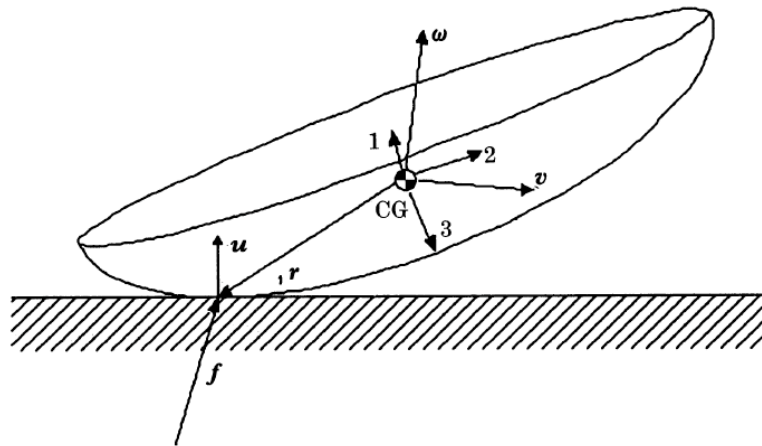
- angeblich zum Weissagen verwendet
- kleine **Asymmetrie** im Querschnitt → Drehmoment
 - durch Verzerrung in Transmission sichtbar
 - versteckte Gewichte als Alternative?
 - selbst gemacht aus verbogenem Kochlöffel
- **Drehung** nach **rechts** → **Verstärkung**
- **Drehung** nach **links** → Bremsen → „**Wackeln**“ → **Umkehrung**
- = **Chiralität** (Brechung der Rotationssymmetrie)
 - Bestellung und Video: www.perpetuum-mobile.ch
 - www.wundersamessammelsurium.info/mechanisches/keltischer_wackelstein



Schnitt durch die
Querseite



Keltisches Wackelholz



- theoretisch verstanden, aber keine elementare Erklärung
- Hauptträgheitsachsen \neq Symmetrieachsen des Ellipsoids
 - Auflagepunkt nicht unter Schwerpunkt \rightarrow konstantes Drehmoment \rightarrow Drehimpulsänderung
 - \rightarrow „Unwucht“ (Präzession) bei Rotation um die z -Achse
 - Umwandlung Rotationsenergie \leftrightarrow Translationsenergie
 - Bewegung und Reibung (Rollen/Gleiten) am Auflagepunkt entscheidend

Keltisches Wackelholz - Referenzen

■ Populärwissenschaftlich

- *Grundidee für ein allgemeines Publikum, empfehlenswert*
- J. Walker, *The amateur scientist*, Scientific American **241** (1979) 172
- R. Walgate, *Tops that like to spin one way*, Nature 323, **18** (1986)

■ Theorie

- A. Garcia, M. Hubbard, *Spin Reversal of the Rattleback: Theory and Experiment*, Proc. R. Soc. Lond. A 1988 **418**, 165.
 - umfassende Diskussion der Literatur, empfehlenswert, aber mathematisch
- H.K. Moffatt, *Celt reversals: a prototype of chiral dynamics*, Proc. of the Royal Society of Edinburgh, **138A**, 261 (2008)
- A.C. Or, *Spin Reversal Simulations on a Rolling Marble*, Int. J. Non-Linear Mechanics, **29**, 4 (1994) 477.
- H. Bondi, *The Rigid Body Dynamics of Unidirectional Spin*, Proc. R. Soc. Lond. A 1986 **405**, 265.

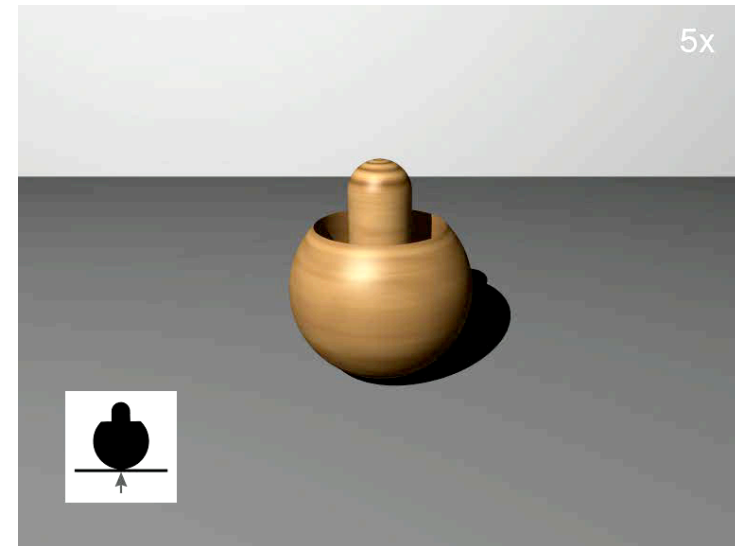
Stehaufkreisel



Niels Bohr
und
Wolfgang Pauli

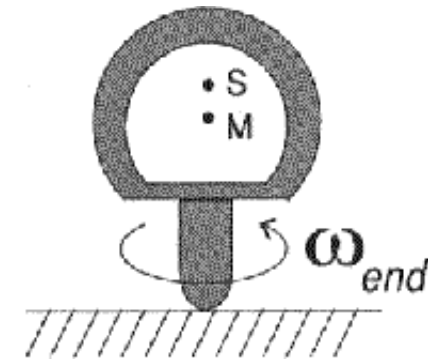
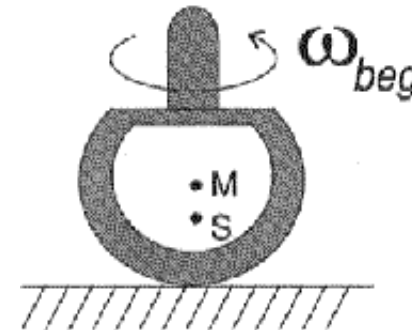
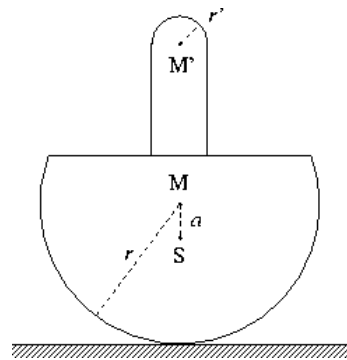
Was wollt Ihr
denn, schließlich
funktioniert
es doch!

Niels Bohr und
Wolfgang Pauli



- Rotationsfrequenz $\omega < \omega_c \rightarrow$ Schwerpunkt **unten**
- Rotationsfrequenz $\omega > \omega_c \rightarrow$ **Aufstehen** \rightarrow Schwerpunkt **oben**
- **Verlangsamung** durch Reibung \rightarrow **Umfallen**

Stehaufkreisel



- **Reibung** entscheidend für Aufstehen
 - potentielle Energie grösser →
 - → Rotationsenergie und Drehimpuls in z -Richtung weniger →
 - → Drehmoment parallel zur Unterlage durch Reibung notwendig
- theoretisch voll verstanden, **keine elementare Erklärung**
- **Quasi-Erhaltungsgrösse** $G=rL_z-aL_3$
 - L_z Drehimpuls in z -Richtung, L_3 Drehimpuls entlang Figurenachse
 - exakt für Gleitreibung
 - Elastizität → Bohrreibung auf Kontaktfläche → Bremsen
 - Stabilitätsanalyse des effektiven Potentials $E(G,\theta)$

Stehaufkreisel

■ Referenzen

- C. Friedl, *Der Stehaufkreisel, Zulassungsarbeit zum 1. Staatsexamen*, Universität Augsburg, Institut für Physik, 1997.
 - Umfassende und **empfehlenswerte** theoretische Darstellung
- C. Friedl, A. Wobst, www.physik.uni-augsburg.de/~wobsta/tippetop
 - Kurzfassung der Zulassungsarbeit von C. Friedl mit Simulationen, **empfehlenswert**
- C. Ucke, H.J. Schlichting, *Die kreiselnde Büroklammer*, Phys. Unserer Zeit **1** (2005) 33.
 - (Stehauf-)kreisel und Kettenlinien aus Büroklammern
- F. Kuypers, *Klassische Mechanik*, VCH, 1990.
 - Stehaufkreisel als (schwierigere) Übungsaufgabe

■ Didaktik

- Showeffekt? Maturarbeit?



Abb. 2 Ein Stehaufkreisel aus einer größeren Büroklammer. @Schlichting

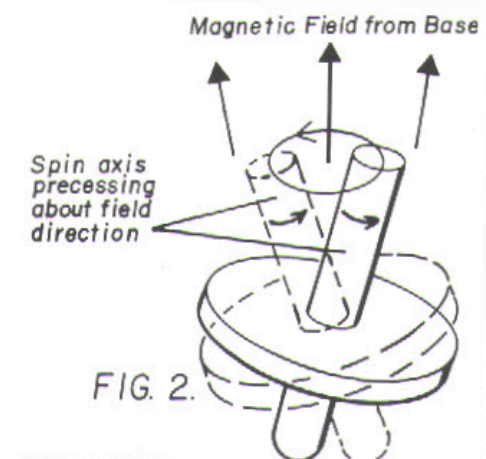
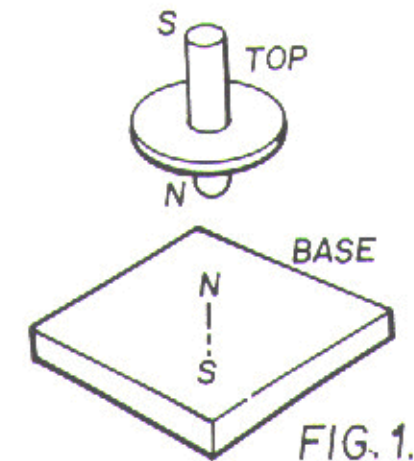
Levitron



- Magnete im Kreisel und im Fuss
- Rotierender Kreisel → kleiner Stabilitätsbereich über Fuss
 - minimale und maximale Rotationsfrequenz
 - bis zu 30 min im Vakuum
- Referenzen
 - www.levitron.com (Kurze, einleuchtende Erklärung, *empfehlenswert*)
 - M. V. Berry, *The LEVITRON® and adiabatic trap for spins*, Proc. Roy Soc. Lond., A (1996) **452**, 1207. (volle Theorie)

Levitron - Theorie

- instabile Gleichgewichtslage
 - Magnetische Abstossung = Gewichtskraft
 - Kippstabilität durch Rotation
 - Drehimpulserhaltung
 - Präzession
 - Stabilität gegen horizontale Translation
 - Inhomogenität des Magnetfeldes
 - kleiner Bereich, subtile Justierung
 - Qualitativ auf Schulniveau
-
- Randbemerkung
 - Earnshaw-Theorem:
 - Statische Anordnung von Magneten (+ Gravitation) instabil
 - hier wegen Bewegung nicht anwendbar



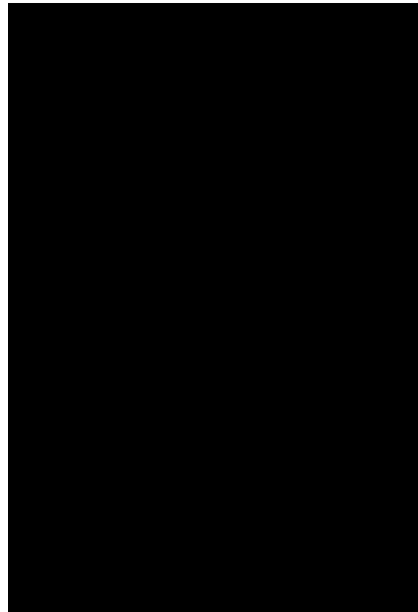
Schwebender Globus



- schwebender Globus
 - Permanentmagnet im Globus
 - elektronisch gesteuerter Elektromagnet im Fuss (Details?)

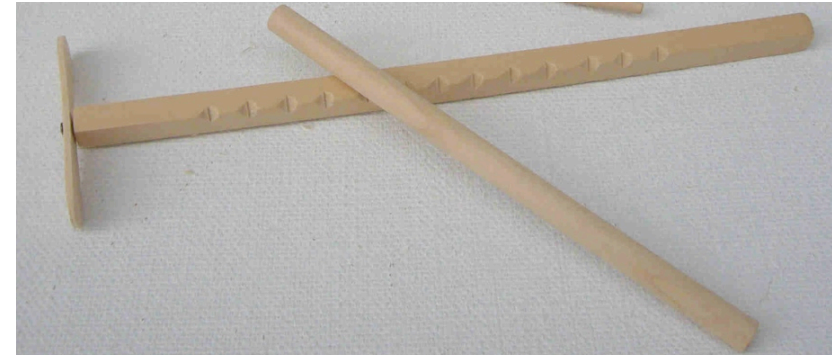
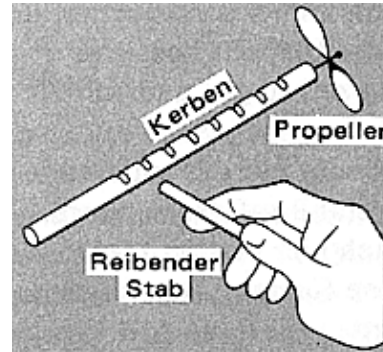
Exkurs: Diamagnetische Frösche

Warum schwebt
der Frosch?

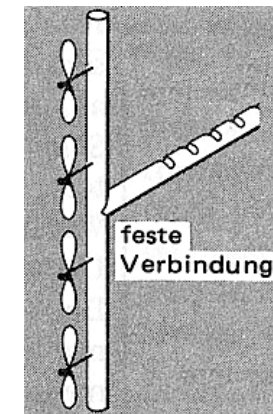
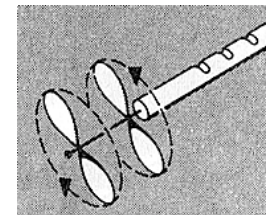


- Wasser ist schwach **diamagnetisch**: $\chi \approx -10^{-5}$
- Levitation in starken Magnetfeldern (16 T)
 - M.V. Berry, A. Geim, Eur. J. Phys. **18** (1997) 307
 - <http://www.hfml.ru.nl/levitate.html>
- Ig-Nobelprize des Nobelpreisträgers (improbable.com)

Hui-Maschine



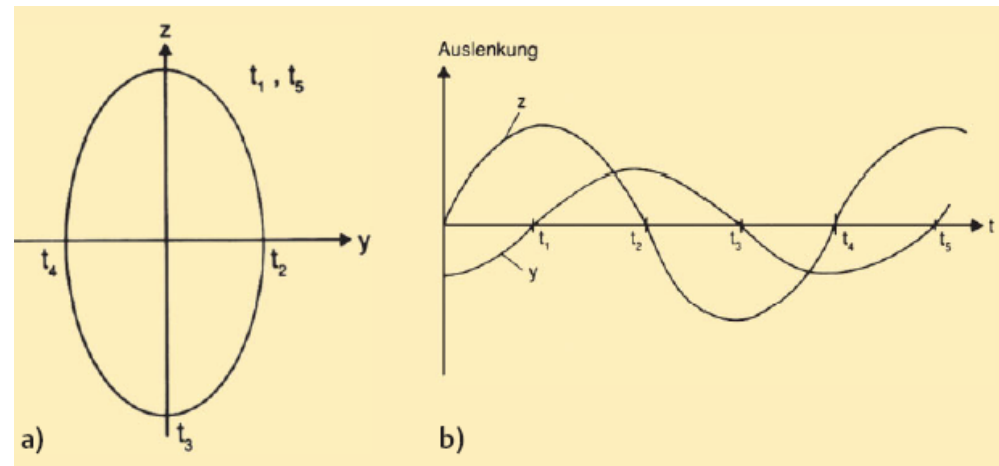
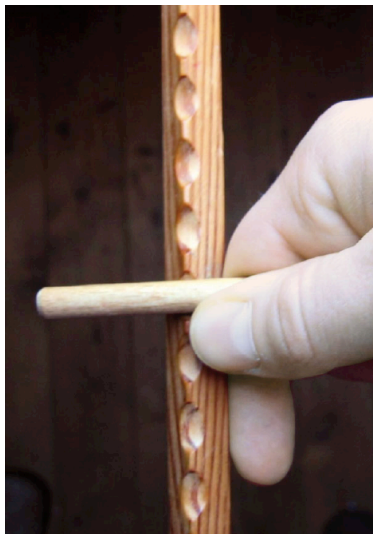
- Reiben mit Stab über Kerben →
→ Drehbewegung von Propeller
 - auch mit mehreren Propellern
- Warum *Umkehrung* der Drehrichtung?



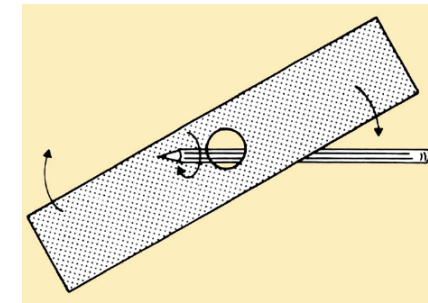
- Referenzen

- H.J. Schlichting, Vom Zauber der Hui-Maschine, Physik in unserer Zeit 1/2006 (37) 31 und H.J. Schlichting, U. Backhaus, Zur Physik der Hui-Maschine, Physik und Didaktik 16/3, 238 (1988).
 - kurze und klare Erklärungen, didaktische Hinweise, [empfehlenswert](#)
- Videos auf youtube

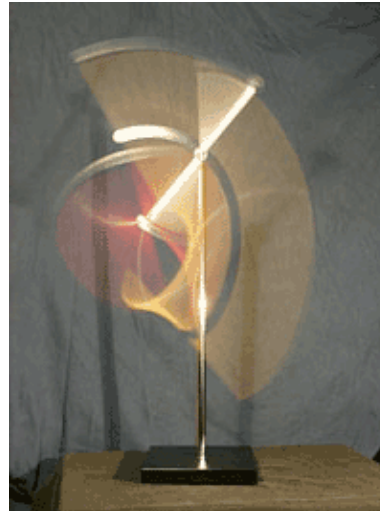
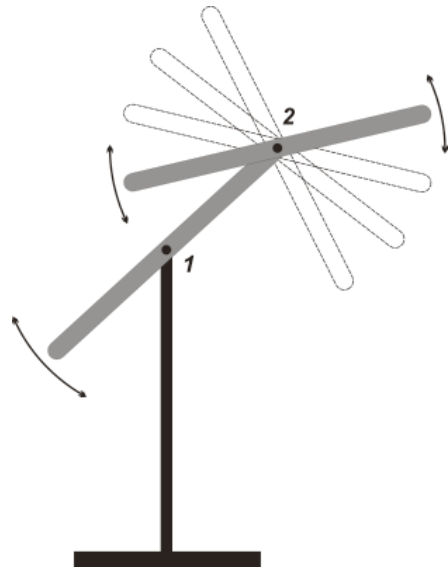
Hui-Maschine



- **Daumen** bzw. Zeigefinger
 - → horizontales **Drehmoment**
 - **Abstand** reibender Stab und Daumen →
 - **Phasenverschiebung** in x - und z -Richtung →
 - **elliptische** Schwingung
 - Spezialfall: Daumendruck nach unten → vertikale Schwingung
 - Daumen **links/rechts** → Propeller nach **links/rechts**
- **Analogie**
 - rotierender Bleistift setzt Papierstreifen in Bewegung



Chaotische Pendel



- Chaotische Systeme
 - Bewegung nicht vorhersehbar
 - exponentielle Abhängigkeit von Anfangsbedingungen
- Analogien für
 - Wetter und Klima („Schmetterlingseffekt“),...



Links zur Spielzeugphysik

■ Links

- Physik hinter Spielzeugen (H. Schlichting)
 - www.uni-muenster.de/Physik.DP/lit/spielzeug.html
- www.ucke.de/christian/physik/toylink.htm
 - Linkliste zur Erklärung von Spielzeugen
- www.jgiesen.de/Divers/Experimente/Spielzeug.html
 - Buchliste, viele weitere Materialien zum Physikunterricht
- A.Becker, *Schulphysik mit Spielzeug*, Aulis Verlag, 1974.
 - etwas altmodisch

Quellen für Spielzeuge

- Quellen
 - Aha-Laden, Niederdorf, Zürich
 - Fundgrube für einen Physiklehrer, www.aha-zurich.ch
 - Technorama Shop
 - Spektrum der Wissenschaft Shop
 - www.science-shop.de
 - www.perpetuum-mobile.ch
 - www.hund-hersbruck.de
 - grosse Auswahl, exklusive Unikate
 - Science Toys
 - Physikalische Spielzeuge zum Selberbauen, scitoys.com/

Bildnachweis

- Publikation und Internet-Quellen sind angegeben, soweit bekannt
- Bilder ohne Quellen sind public domain bzw. werden von uns dafür gehalten
- Wer glaubt, sein Copyright an einem Bild ist verletzt, soll uns dies mitteilen und wir entfernen es sofort