

EXPERIMENTELLE MECHANIK

Kapitel 3 **Dynamik: 力与运动** **Kraft und Bewegung**

3.1. Die Newtonschen Axiome

3.1.1 Die Newtonschen Axiome

Fragen:

Beschleunigung ↔ Kraft ??

Wodurch ändert sich Bewegung?

Welche Größen sind im Spiel?

是什么导致了运动的变化?

涉及的数量是多少?

Annahme:

Betrachte vorerst ausschließlich
punktförmige Massen 目前, 只考虑点状
质量

Grundlegende Antwort:

Die Axiome der Mechanik
(„Newton-Axiome“) 机械学的公理 ("牛顿
公理")



3.1.1 Die Newtonschen Axiome

Erstes Newtonsches Axiom: 牛顿的第一条公理。

Trägheitsprinzip: 惯性原理。

Ein kräftefreier Körper bewegt sich gleichförmig und geradlinig weiter. 假若施加于某物体的外力为零，则该物体的运动速度不变。

d.h.: Die Geschwindigkeit des Körpers ändert weder ihre Richtung („geradlinig“) noch ihren Betrag („gleichförmig“), solange keine Kraft wirkt („kräftefrei“).

Beispiele:

Raumschiff im Weltall



Puck beim Eishockey



Konstante Geschwindigkeit

3.1.1 Die Newtonschen Axiome 物体所受到的外力等于动量对时间的一阶导数(一次微分值)

Zweites Newtonsches Axiom:

Beispiele:

Aktionsprinzip:

Wenn eine Kraft F auf einen Körper der Masse m wirkt, beschleunigt sie ihn mit

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \leftrightarrow \quad \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$



Skiläufer

m ist die träge Masse des Körpers.

Das bedeutet:

m ist ein Maß dafür, wie sehr sich der Körper bei Krafteinwirkung einer Beschleunigung widersetzt.



Flugzeug / Fahrzeug



Kugelstoßen

3.1.1 Die Newtonschen Axiome

Drittes Newtonsches Axiom:

Beispiele:

Reaktionsprinzip:

Jede Kraft F , die auf einen Körper wirkt, bewirkt an irgendeinem anderen Körper eine Gegenkraft $-F$, die gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet ist.

(„**actio gleich reactio**“) 当两个物体相互作用时，彼此施加于对方的力，其大小相等、方向相反



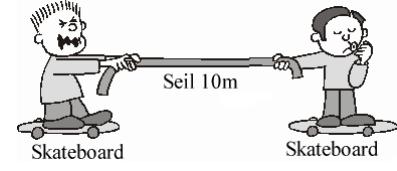
Sprung vom Boot ins Wasser



Rakete:
Rückstoßprinzip



Kugelstoßen



Skateboard

Skateboard

3.2.1. Die Größe „Kraft“

Definitionsgleichung:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Die Dimension der Kraft ist

Masse x Länge / Zeit²

Die SI-Einheit der Kraft ist

$$[F] = 1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (\text{Newton})$$

Ändert sich die Geschwindigkeit eines Körpers der Masse 1 kg innerhalb von 1 Sekunde um 1 m/s, dann wirkt eine Kraft von 1 N. 如果一个质量为1千克的物体的速度在1秒内变化1米/秒，那么1牛的力



Sir Isaac Newton
(1643 – 1727)

Physik:

- „Kraft“ kann nur Massen beschleunigen (oder dies verhindern).
- Wenn eine Masse beschleunigt wird, muss eine Kraft im Spiel sein. - 如果一个质量被加速，一定有一个力参与其中。

Sprachgebrauch:

Achtung! „Kraft“ hat breitere Bedeutung 请注意。“力”有更广泛的含义

3.2.2. Die Gravitationskraft 引力

Gravitationskraft zwischen zwei Massen m_1 und m_2 :

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2}$$

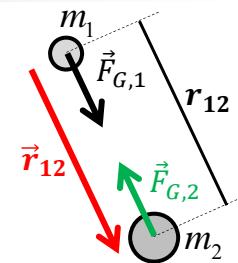
Gravitationskonstante $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$

Vektoriell: $\vec{F}_{G,1} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \cdot \vec{e}_r = -\vec{F}_{G,2}$

mit $\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ Abstandsvektor, gemessen von Masse m_1 zur Masse m_2 ,

$r_{12} = |\vec{r}_{12}|$ Abstand der zwei Massen,

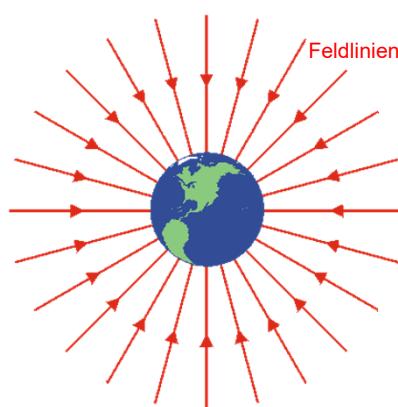
$\vec{e}_r = \vec{r}_{12}/|\vec{r}_{12}|$ Einheitsvektor in Richtung von \vec{r}_{12}



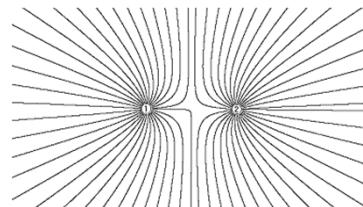
Zusammenhänge: F_G ist

- proportional zu jeder der beiden Massen
- invers proportional zum Quadrat des Abstands
- sehr klein 与距离的平方成反比
- 非常小

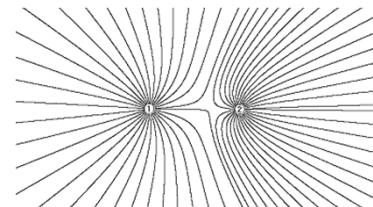
3.2.2. Die Gravitationskraft



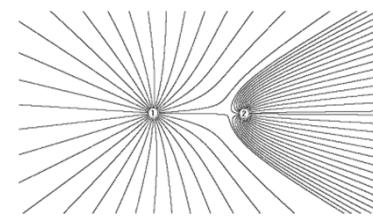
Gravitationsfeld mehrerer Massen



$M_1 = M_2$



$M_1 > M_2$



Gravitationsfeld einer schweren Masse: 重型质量的引力场。

$$\vec{g}(\vec{r}) = G \cdot \frac{M}{r^2} \cdot (-\vec{e}_r) \quad \vec{F}_g(\vec{r}, m) = m \cdot \vec{g}(\vec{r})$$

$M_1 \gg M_2$

3.2.2. Die Gravitationskraft

Die Gravitationskraft innerhalb großer Körper nimmt ab

Punktmasse: $F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$

Hohlkugel (Kugelschale): 空心球体 (球壳)

außen: $F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$

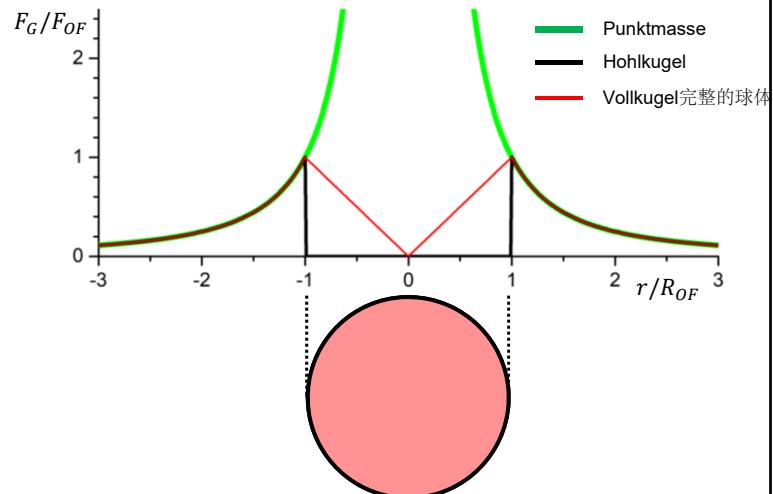
innen: $F_G = 0$

Vollkugel (homogen):

außen: $F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$

innen: $F_G = F_{OF} \cdot \frac{r}{R_{OF}}$

Oberfläche: $F_{OF} = G \cdot \frac{m \cdot M}{R_{OF}^2}$



3.2.2. Die Gravitationskraft

„Erdbeschleunigung“ 重力加速度
innerhalb und außerhalb der Erde

Hohlkugel:

außen: $F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$

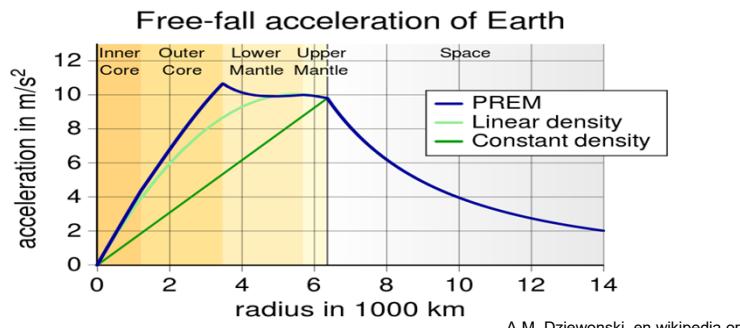
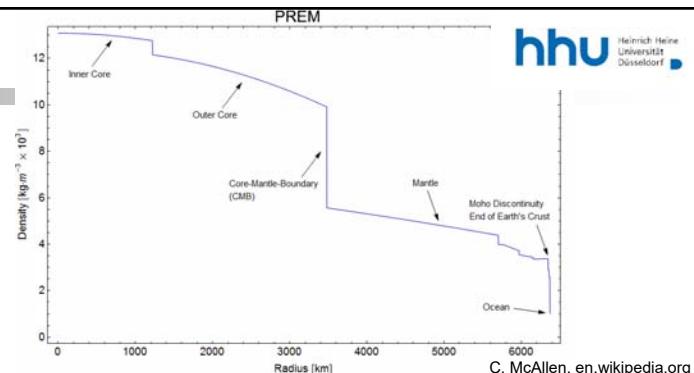
innen: $F_G = 0$

Vollkugel (homogen):

außen: $F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$

innen: $F_G = F_{OF} \cdot \frac{r}{R_{OF}}$

Oberfläche: $F_{OF} = G \cdot \frac{m \cdot M}{R_{OF}^2}$



3.2.2. Die Gravitationskraft

„Erdbeschleunigung“ auf der Erdoberfläche 地球表面的 “重力加速度”

$$F_{OF} = G \cdot \frac{m \cdot M_E}{R_E^2}$$

$g = 9,820 \text{ m/s}^2$

$$M_E = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \dots \text{ Erdmasse 地球质量}$$

$$R_E = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m} \dots \text{ Erdradius 地球半径}$$

„Gewichtskraft“: $F_g = m \cdot g$ 重力 $\vec{F}_g = m \cdot \vec{g} = m \cdot g \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$

Alle Alltagswaagen messen das Gewicht eines Körpers,
nicht seine Masse (wenn auch die Masse angezeigt wird).

Unterscheide stets
Gewicht und Masse !!

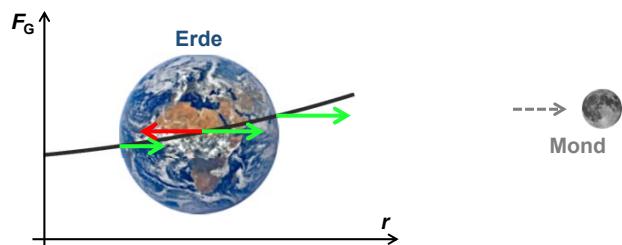
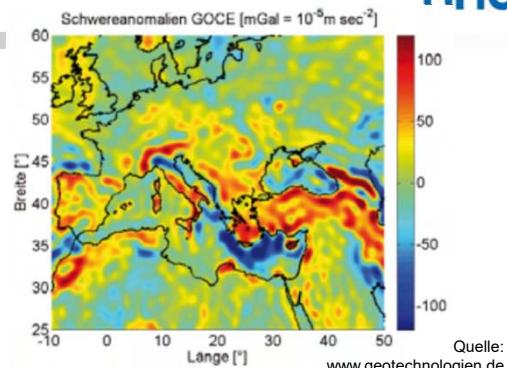
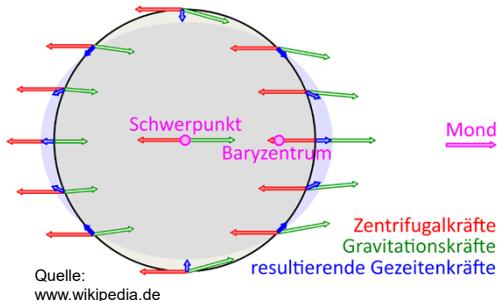
$$\text{Gewichtskraft } F_g = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ N} (\approx 10 \text{ N})$$



3.2.2. Die Gravitationskraft

Variation der „Erdbeschleunigung“

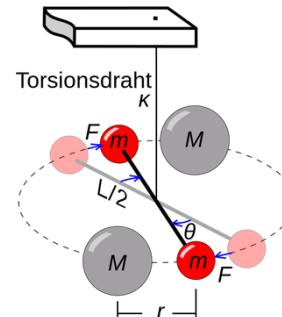
- (1) variabler Erdradius + Zentripetalkraft
地球半径+向心力
- inhomogene Zusammensetzung des Erdmantels 地球地幔的不均匀组成
- Gezeiten: Gravitation von Sonne + Mond
潮汐。太阳+月亮的引力潮汐。太阳+月亮的引力



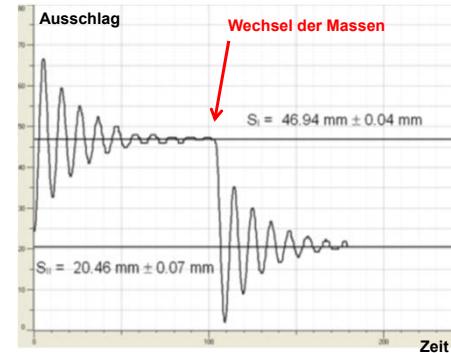
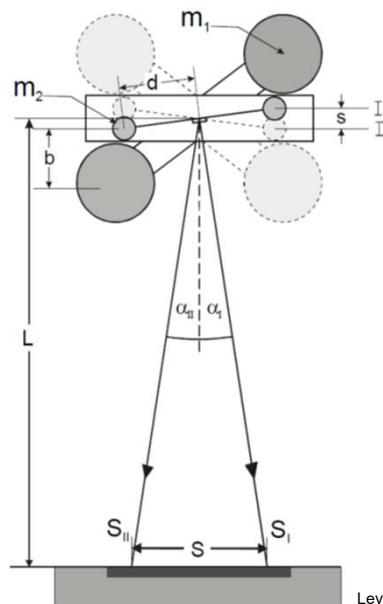
3.2.2. Die Gravitationskraft

Messung von G mit der „Cavendish-Waage“
用“卡文迪许天平”测量G

Prinzip



A.M. Dziewonski, en.wikipedia.org



Leybold Didactic GmbH

3.2.3. Die Federkraft

Die Kraft einer Feder ist proportional Zur Längenänderung: 弹簧的力与长度的变化成正比。

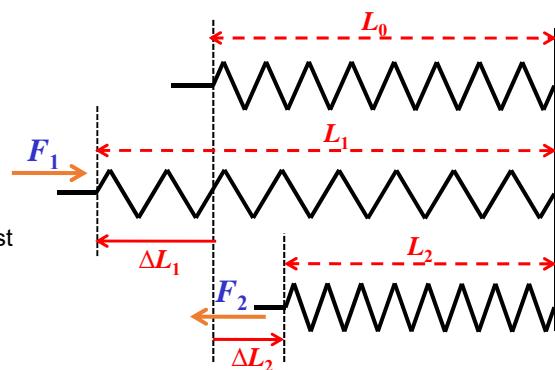
$$F_F = |\vec{F}| = -D \cdot \Delta L$$

„Federkonstante“:

- gibt an, wie stark die Feder ist
- ist für jede Feder anders
- Einheit: [N/m] = [kg/s²]

die Kraft wirkt der Auslenkung entgegen!
力量抵消了挠度!

Beispiele:



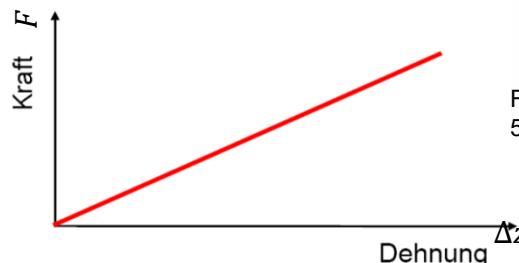
Elliptikfeder

3.2.3. Die Federkraft

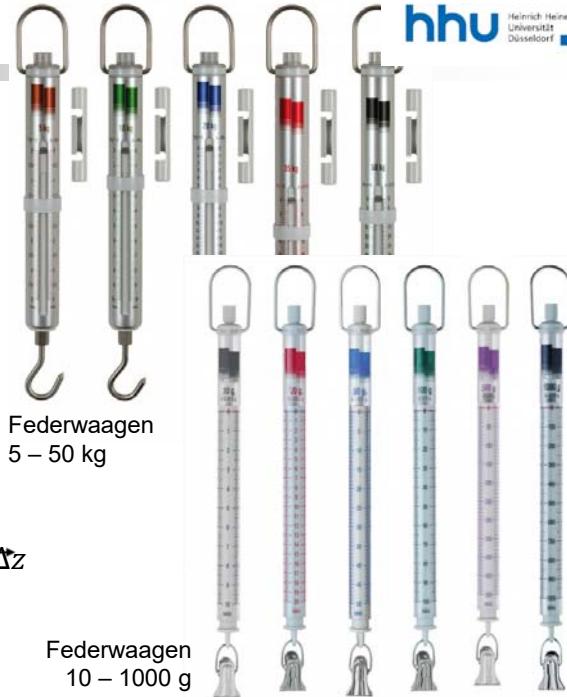
Kraftmessung mit „Federwaage“ 用 "弹簧天平" 测量

$$F = D \cdot \Delta z \quad (D \dots \text{„Federkonstante“})$$

Dehnung Δz der Feder ist proportional
zur wirkenden Kraft F . 弹簧的伸长率 Δ
与作用力成正比。



Nach Eichung kann eine Federwaage
zur Kraftmessung genutzt werden. 校
准后，可以用弹簧天平进行测力。



3.2.4. Reibungskräfte 摩擦力

Reibungskräfte haben zwei Besonderheiten: 摩擦力有两个特殊的特点。

- Sie können Geschwindigkeiten nur verkleinern, nicht vergrößern. - 他们只能降低速度，而不是提高速度。
- Sie sind der momentanen Geschwindigkeit immer genau entgegen gerichtet. - 它们的方向总是与当前速度正好相反。

$$\vec{F}_R = -F_R \cdot \vec{e}_v = -F_R \cdot \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}$$



Je nach Situation hängt die Reibungskraft (skalare Größe F_R)
in unterschiedlicher Weise von verschiedenen Größen ab. 根据情况，
摩擦力（标量）以不同的方式取决于不同的量。Man beschreibt
dies mit verschiedenen „Typen“ von Reibungskräften. 人们用不同“类
型”的摩擦力来描述这一点。Reibung ist erwünscht: oder
unerwünscht: 希望有摩擦：或不希望有摩擦。



- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bremsen • Fallschirm • - 刹车系统 • - 降落伞 | <ul style="list-style-type: none"> • Gleitreibung • Luftwiderstand • ... |
|--|---|

•

3.2.4. Reibungskräfte

Coulomb-Reibung (trockene Reibung): Reibung beim Gleiten zweier Festkörper

库伦摩擦 (干摩擦) : 两个固体滑动时的摩擦力

- abhängig von Material und Beschaffenheit der Oberflächen. 取决于表面的材料和性质
- nur proportional zur „Normalkraft“ F_N (Anpresskraft). 只与“法向力”(接触力)成正比 $F_R = \mu \cdot F_N$
- "Stärke" der Reibung: Reibungskoeffizient μ . 摩擦系数
- unabhängig von Geschwindigkeit und Größe der Auflagefläche. 与速度和接触面的大小无关。

Es gibt zwei Arten von Coulomb-Reibung: 有两种类型的库伦摩擦。

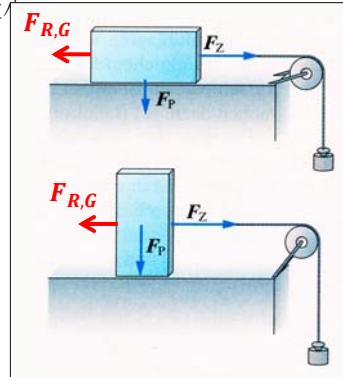
Gleitreibung: Die Gleitreibungskraft muss kompensiert werden, wenn ein Körper sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen soll: 如果一个物体要以恒定的速度运动，必须对滑动摩擦力进行补偿。 $F_{R,G} = \mu_G \cdot F_N$

Hftreibung: 静态摩擦。 Die Hftreibungskraft muss überwunden werden, um den Körper aus Ruhe in Bewegung zu versetzen: 必须克服静态摩擦力，才能使身体从静止到运动。

$$F_{R,H} = \mu_H \cdot F_N$$

Immer gilt:

$$\mu_G < \mu_H$$



3.2.4. Reibungskräfte 摩擦力

Rollreibung 滚动摩擦

- entsteht durch Deformation von Untergrund und Rollkörper- 产生于基体和滚动体的变形
- gleiche Form wie Gleitreibung: $F_{R,R} = \mu_R \cdot F_N$ 与滑动摩擦力的形式相同
- der Rollreibungskoeffizient μ_R ist viel kleiner 滚动摩擦系数要 小得多

Stahlkugel auf Stahl: $\mu_R = 0,0008$ 钢球上的钢球。

Stahlrad auf Schiene: $\mu_R = 0,0015$ 轨道上的钢轮

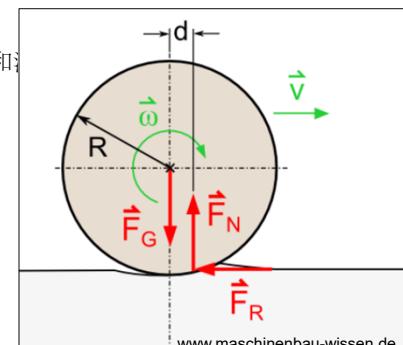
Autoreifen auf Asphalt: $\mu_R = 0,012$ 沥青上的汽车轮胎

vgl. Gleit- und Hftreibung: 比较滑动和静摩擦。

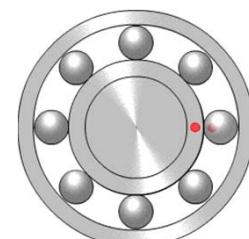
Stahl auf Stahl: $\mu_G = 0,12$ $\mu_H = 0,15$

Autoreifen auf Asphalt: $\mu_G = 0,50$ $\mu_H = 0,70$

Autoreifen auf Eis: $\mu_G = 0,05$ $\mu_H = 0,10$



Anwendungen:
Kugel- und Wälzlager



3.2.4. Reibungskräfte

Laminare Reibung (Stokes-Reibung) 层流摩擦 (斯托克斯摩擦)

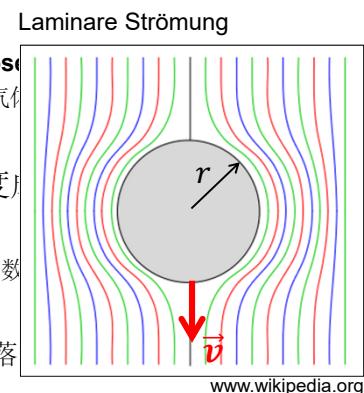
- findet statt, wenn sich kleine Körper langsam genug durch ein viskoses Fluid (= Flüssigkeit, Gas) bewegen. 当小物体在粘性流体 (=液体、气体) 中足够缓慢地移动时，就会发生。 $F_{R,S} = \kappa \cdot v$
- Reibungskraft ist proportional zur Geschwindigkeit v 摩擦力与速度成正比 v
- Proportionalitätsfaktor κ hängt von Geometrie und Material ab. 比例系数取决于几何形状和材料。

Beispiel: Fall einer Kugel in einer Flüssigkeit 例如：球在液体中的下落

$$F_{R,S} = 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot v$$

η ist die Zähigkeit (Viskosität) des Mediums 是 介质的韧性 (粘度)。

In einem zähen Medium (Öl, Honig etc.) wird eine Kugel durch diese Kraft sehr stark gebremst. 在粘性介质 (油、蜂蜜等) 中，球会被这种力非常强烈地减慢。



www.wikipedia.org

3.2.4. Reibungskräfte 摩擦力

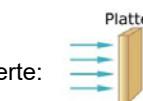
Turbulente Reibung (Newton-Reibung) 湍流摩擦 (牛顿摩擦)

- findet statt, wenn sich größere Körper schnell durch ein Fluid bewegen (vor allem durch Gas). 当较大的物体在流体 (特别是气体) 中快速移动时发生。

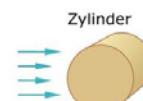
$$F_{R,T} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

- $F_{R,T}$ ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit v
- $F_{R,T}$ ist proportional zu Querschnitt A und Fluid-Dichte ρ 与横截面A和流体密度 ρ 成正比。
- c_w ist ein Maß für die „Windschlüpfrigkeit“ des Körpers- 是衡量身体的 "风度" 的一个标准

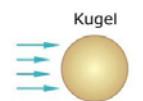
Beispiele
für c_w - Werte:



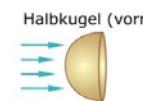
$c_w = 1,1 \dots 1,3$



$c_w = 0,6 \dots 1,0$



$c_w = 0,3 \dots 0,4$



$c_w = 0,4$
 $c_w = 0,34$
geschlossen
hinten offen



$c_w = 0,16 \dots 0,2$



$c_w = 0,07 \dots 0,09$

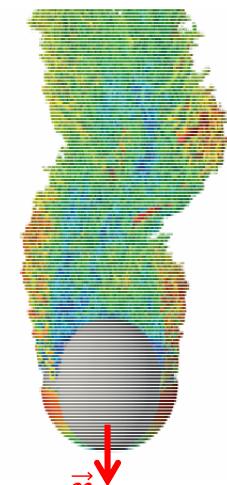


$c_w = 0,055$



$c_w = 1,2$
geschlossen
vorne offen

Turbulente Strömung



Prof. Feuchtnér,
www.hs-aalen.de

3.2.4. Reibungskräfte

Turbulente Reibung (Newton-Reibung) hängt ab von c_w , A und ρ 湍流摩擦
(牛顿摩擦) 取决于 c_w , A 和 ρ 。



3.2.5. Statische Kräfte 3.2.5 静态力

Statische Kräfte dienen ausschließlich zum Kompensieren von $Kräfte$
态力专门用于补偿力。

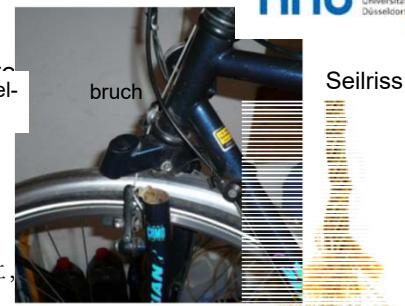
- Sie können keine Beschleunigung ausüben. - 他们不能施加任何加速度。
- - 它们针对的是任何攻击性力量
- Sie sind jeder angreifenden Kraft entgegengerichtet.
Angabe von Maximalwerten, oft in der Größe „Spannung“

(z.B. Zerreiß- oder Bruchspannung):最大值的规定，通常是在 "应力"这个量上，
力))

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{in N/m}^2 \text{ oder Pa (Pascal)}$$

Statische Kräfte sind in Bauwesen und Maschinenbau wichtig. - 静力在建筑和机械工程中很重要。

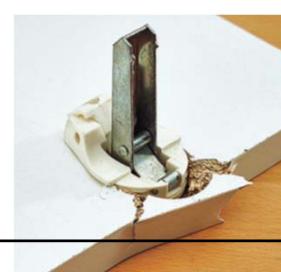
Man erkennt sie oft erst, wenn sie überschritten wurden. 它们往往只有在被超过时才会被承认。



Seilriss

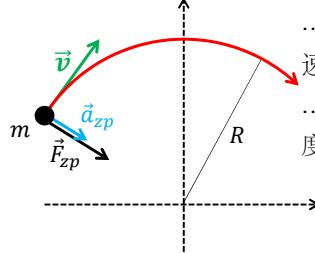


Brücken-einsturz



Holzbruch

3.2.6. Die Zentripetalkraft 向心力



Wenn eine Masse m auf einem Kreisbogen läuft (Radius R) ... 如果一个质量为的 物体在一个圆弧 (半径为) 上运行 ...

... ändert sich laufend die Richtung der **Geschwindigkeit** \vec{v}

速度的方向连续变化

... muss eine **Zentripetalschleunigung** \vec{a}_{zp} vorhanden sein. 必须有向心加速度 存在。

Die Beschleunigung einer Masse m benötigt eine Kraft, hier die

$$\text{Zentripetalkraft} \quad \vec{F}_{zp} = m \cdot \vec{a}_{zp} \quad |\vec{F}_{zp}| = m \cdot \frac{\vec{v}^2}{R}$$

Statische Kraft 静态力



Die Zentripetalkraft kann von verschiedenen Kräften bereitgestellt werden: 向心力可以由不同的力提供。

Gravitation



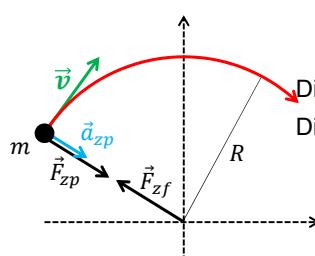
Air resistance force 空气摩擦力



Adhesive force 黏附力



3.2.6. Die Zentripetalkraft 向心力

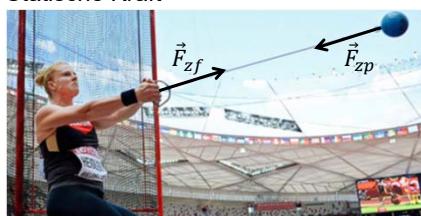


$$\text{Zentripetalkraft} \quad \vec{F}_{zp} = m \cdot \vec{a}_{zp} \quad |\vec{F}_{zp}| = m \cdot \frac{\vec{v}^2}{R}$$

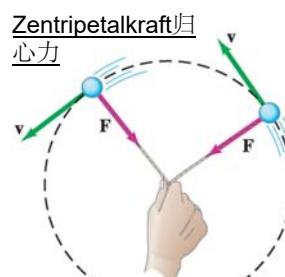
Die Zentripetalkraft braucht eine Gegenkraft (Reaktionsprinzip). 向心力需要一个反作用力 (反作用原理)。 Diese greift oft im Bericht des Drehmittelpunkts an und heißt dann 这通常在旋转中心的报告中起作用,

$$\text{Zentrifugalkraft} \quad \vec{F}_{zf} = -\vec{F}_{zp} = -m \cdot \vec{a}_{zp} \quad |\vec{F}_{zf}| = m \cdot \frac{\vec{v}^2}{R}$$

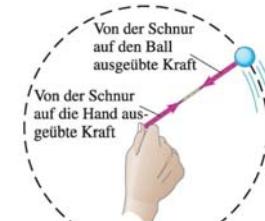
Statische Kraft



Zentripetalkraft 向心力



Reaktion: Zentrifugalkraft



3.2.6. Die Zentripetalkraft



Zentripetalkraft $\vec{F}_{zp} = m \cdot \vec{a}_{zp}$ $|\vec{F}_{zp}| = m \cdot \frac{\vec{v}^2}{R}$

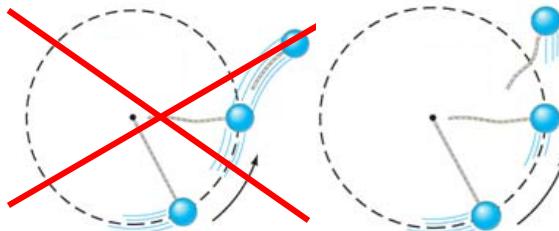
Die Zentripetalkraft braucht eine Gegenkraft (Reaktionsprinzip).

Diese greift oft im Bericht des Drehmittelpunkts an und heißt dann

Zentrifugalkraft $\vec{F}_{zf} = -\vec{F}_{zp} = -m \cdot \vec{a}_{zp}$ $|\vec{F}_{zf}| = m \cdot \frac{\vec{v}^2}{R}$



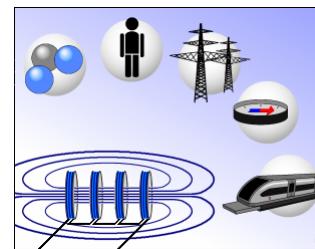
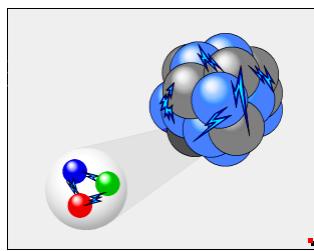
Die „Kraft“, die uns nach außen drückt, kommt von der Trägheit
我们向外推的“力”来自于惯性
Beim Loslassen:



3.2.7. Die vier Grundkräfte 四个基本力量

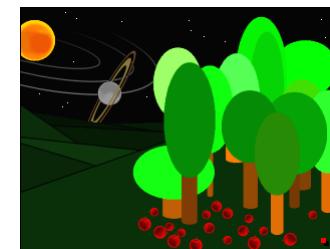
Die starke Wechselwirkung 强相互作用

- Anziehung von Quarks und Elementarteilchen
- 夸克和基本粒子的吸引力
- Zusammenhalt des Atomkerns 原子核的内聚力



Die elektromagnetische Wechselwirkung 电磁作用

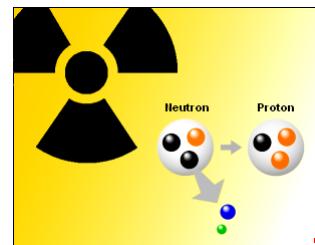
- Elektrizität- 电器
- - 磁性
- - 亮度
- Magnetismus
- Licht



Die schwache Wechselwirkung 弱相互作用

- Umwandlung von Teilchen
- Radioaktivität- 颗粒的转换
- - 放射性

www.drillingsraum.de



Die Gravitation 重力

- Anziehung von Massen

3.3.1. Addition von Kräften 力的叠加

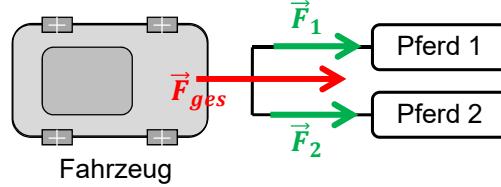
Greifen mehrere Kräfte an einem Körper an, dann werden die Kräfte **vektoriell addiert**. 如果有几个力作用在一个物体上，那么这些力就会以矢量方式相加。

Allgemeiner Fall (Kräfte in verschiedenen Richtungen):
Vektoren komponentenweise addieren! 一般情况（不同方向的力）：逐个分量添加矢量

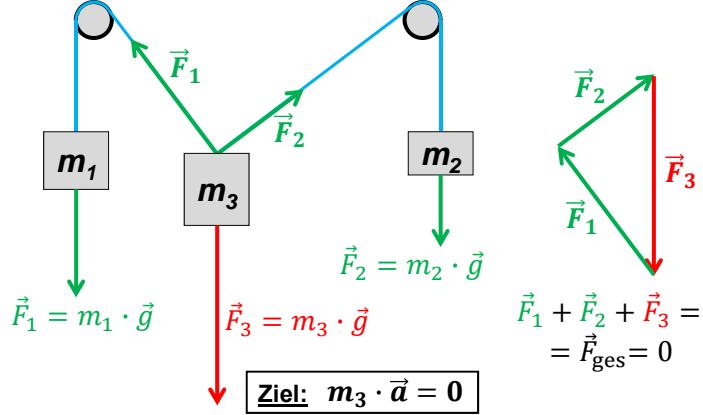
Linearer Fall (alle Kräfte auf einer Linie):

Beträge addieren sich
(minus, wenn entgegengesetzt). 线性案例
例（所有力量都在一条线上）

$$|\vec{F}_{ges}| = \pm |\vec{F}_1| \pm |\vec{F}_2| \pm \dots$$



statisches Beispiel (Kräftegleichgewicht):



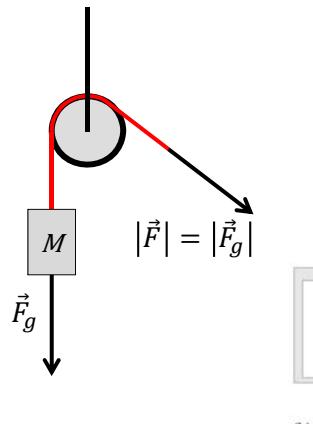
3.3.1. Umlenken und Aufteilen von Kräften 3.3.1 重新引导和划分力量

Umlenken:

Anwendung:

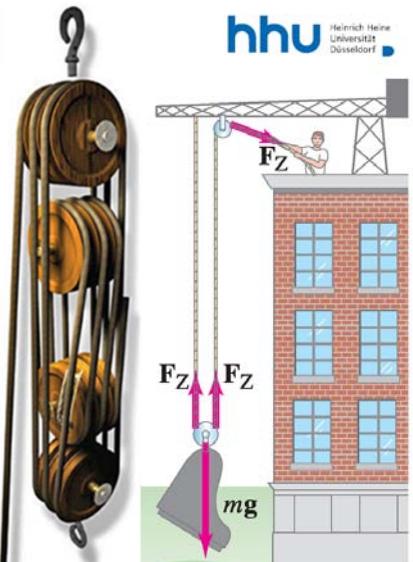
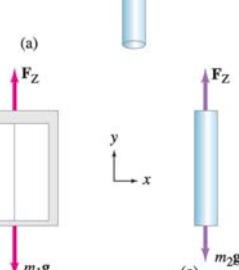
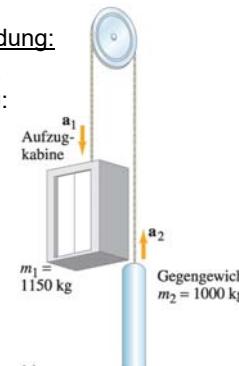
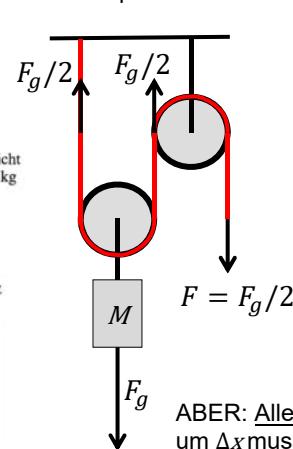
Gegengewicht
e Beim Aufzug:
配重 在电梯里

Prinzip:



Aufteilen:

Prinzip:

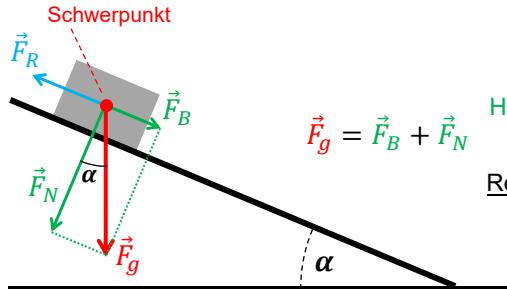


ABER: Alles hat seinen Preis: Zum Heben von M um Δx muss man $2 \cdot \Delta x$ weit ziehen. 但是：任何事情都是有代价的：要把M抬起来 Δx ，你必须要把2个绳子 Δx 拉得很远。

3.3.3. Gleiten auf der schiefen Ebene

Schiefe Ebene

Wichtig: Kluge Aufteilung der Kräfte! (Hier: nur **Schwerkraft**)
 重要的
 是：巧妙地分工合作！（这里：只有重力）



$$\vec{F}_g = \vec{F}_B + \vec{F}_N$$

Normalkraft 法向力 $\vec{F}_N = \vec{F}_g \cdot \cos \alpha$

Hangabtriebskraft 坡度下降力 $\vec{F}_B = \vec{F}_g \cdot \sin \alpha$

Reibungskraft: 摩擦力

$$\vec{F}_R = -\mu \cdot \vec{F}_N$$



Möglichkeiten: Körper in Ruhe: $\vec{F}_{R,H} > \vec{F}_B$

Körper startet: $\vec{F}_{R,H} = \vec{F}_B$

Körper gleitet: $\vec{F}_{R,G}$ bremst \Rightarrow Beschleunigung $\vec{a} = \frac{\vec{F}_B - \vec{F}_{R,G}}{m}$

3.3.4. Kreisbahn im Gravitationsfeld

Geschwindigkeit v



Radius r

Für Kreisbahn: 对于圆形路径的向心力。

um die Erde:

$$\text{Zentripetalkraft } F_{ZP} = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad \boxed{=} \quad \text{Gravitation } F_G = G \cdot \frac{M_E \cdot m}{r^2}$$

Bedingung:

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M_E}{r}}$$

(unabhängig von der Masse m !)
 (独立于质量！)

Beispiele: ISS $h = 400$ km

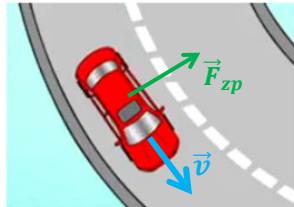
$$r = R_E + h = 6770 \text{ km} \quad v = 7660 \text{ m/s}$$

Geostationäre Satelliten: 1 Umkreisung pro Tag
 地球静止卫星：每天1个轨道

$$v = \frac{2r\pi}{t_d} \quad r_{gs} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_E \cdot t_d^2}{4\pi^2}} = 42240 \text{ km}$$

Anwendung: z.B. Fernseh-, Wettersatelliten
 应用：如电视、气象卫星

3.3.4. Kurvenfahrt 拐弯处

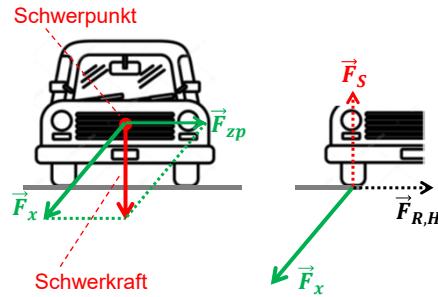


Wichtig: Kluge Aufteilung der Kräfte! (Hier: nur Schwerkraft)

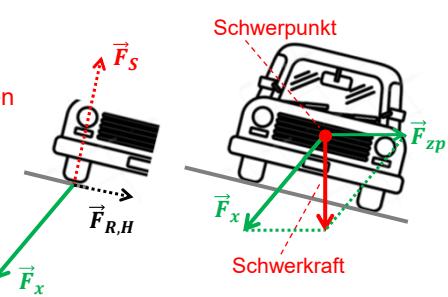
$$\vec{F}_g = \vec{F}_{zp} + \vec{F}_x$$

\vec{F}_{zp} Zentripetalkraft (sorgt für Kurve!)
 \vec{F}_x Restliche Kraft

Kurvenfahrt auf ebener Fläche



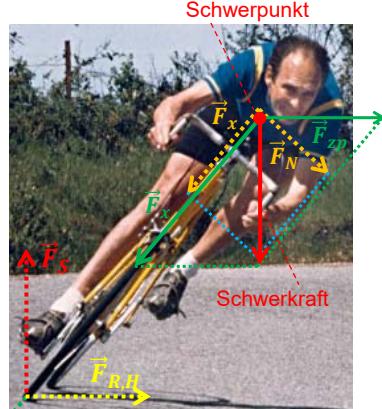
Am Boden:
Kompensation der Kraft \vec{F}_x
 \vec{F}_S Statische Kraft vom Boden
 $\vec{F}_{R,H}$ Haftreibung



Kurvenfahrt auf geneigter Fläche

3.3.4. Kurvenfahrt

Kurvenfahrt mit Zweirädern



Am Boden: Kompensation der Kraft \vec{F}_x
 \vec{F}_S Statische Kraft vom Boden
 $\vec{F}_{R,H}$ Haftreibung

Wichtig: Kluge Aufteilung der Kräfte! (Hier: nur Schwerkraft)

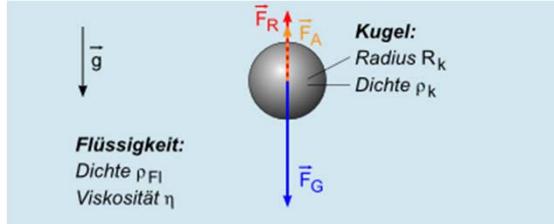
Im Stehen: \vec{F}_x Kraft entlang des Rennrads
 \vec{F}_N Normalkraft (sorgt für Umfallen)
Im Fahren: \vec{F}_x Kraft entlang des Rennrads
 \vec{F}_{zp} Zentripetalkraft (sorgt für Kurve!)

Zu wenig Haftreibung:
Wegrutschen → Sturz



3.3.5. Bewegung mit Strömungswiderstand 3.3.5 有流动阻力的运动

Bewegung mit viskoser Reibung 有粘性摩擦的运动



Beispiel: Kugel in Öl

Bewegungsgleichung:

$$m \cdot a(t) = F_g - F_A - F_R$$

$$\text{Schwerkraft: } F_g = m \cdot g = V_K \cdot \rho_K \cdot g$$

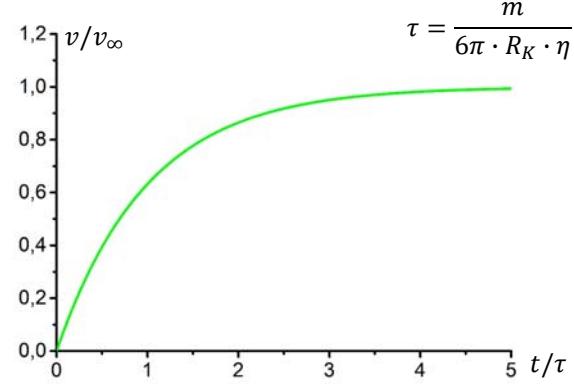
$$\text{Auftrieb: } F_A = V_K \cdot \rho_{FL} \cdot g$$

$$\text{Stokes-Reibung: } F_R = 6\pi \cdot R_K \cdot \eta \cdot v$$

$$m \cdot a(t) = V_K \cdot (\rho_K - \rho_{FL}) \cdot g - 6\pi \cdot R_K \cdot \eta \cdot v$$

$$\text{Endgeschwindigkeit: } v_\infty = \frac{m_{eff} \cdot g}{6\pi \cdot R_K \cdot \eta}$$

$$\text{Zeitlicher Verlauf: } v(t) = v_\infty \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$



3.3.5. Bewegung mit Strömungswiderstand

Bewegung mit turbulenter Reibung 有湍流摩擦的运动



Beispiel: Freier Fall in der Luft

Bewegungsgleichung:

$$m \cdot a(t) = F_g - F_R$$

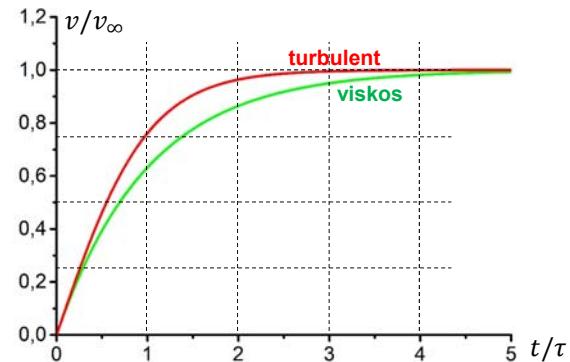
$$\text{Schwerkraft: } F_g = m \cdot g$$

$$\text{Newton-Reibung: } F_R = 0,5 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

$$m \cdot a(t) = m \cdot g - 0,5 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

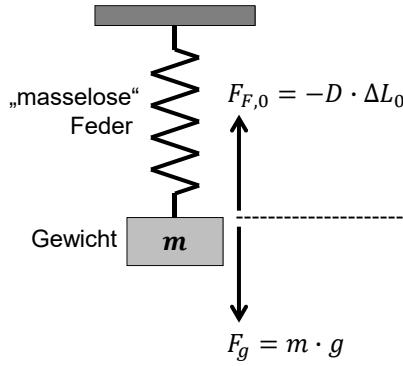
$$\text{Endgeschwindigkeit: } v_\infty = \sqrt{\frac{2m \cdot g}{c_w \cdot A \cdot \rho}}$$

$$\text{Zeitlicher Verlauf: } v(t) = v_\infty \cdot \tanh(t/\tau) \quad \tau = \frac{v_\infty}{g}$$

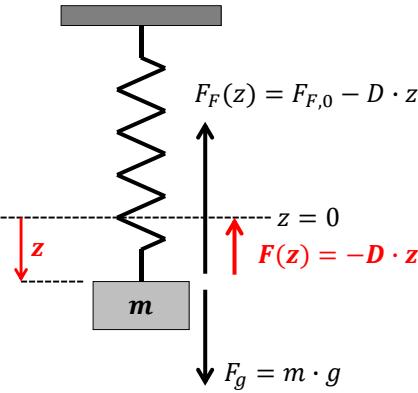


3.3.6. Bewegung mit Federkraft

Ruhelage:



Auslenkung:



Feder mit Gewicht in Ruhelage:
Kräftegleichgewicht

$$F_{F,0} + F_g = 0$$

Feder mit ausgelenktem Gewicht:
kein Kräftegleichgewicht

$$F_F(z) + F_g \neq 0$$

Resultierende Gesamtkraft:

$$F(z) = -D \cdot z$$

Bewegungsgleichung:

$$m \cdot a(t) = -D \cdot z(t)$$

$$m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = -D \cdot z(t)$$

3.3.6. Bewegung mit Federkraft

Differenzialgleichung:

$$m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = -D \cdot z(t)$$

Gesucht: Funktion $z(t)$

$$z(t) = z_0 \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{T_0}\right)$$

z_0 Amplitude z 振幅(开始时的偏转)
(Auslenkung zu Beginn)

T_0 Periodendauer

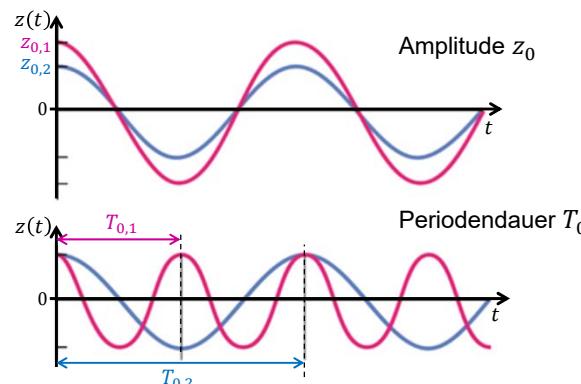
$$T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{m/D}$$

Probe: $z(t) = z_0 \cdot \cos(\sqrt{D/m} \cdot t)$

$\frac{dz}{dt} = z_0 \cdot \sqrt{D/m} \cdot (-\sin(\sqrt{D/m} \cdot t))$

$\frac{d^2z}{dt^2} = z_0 \cdot D/m \cdot (-\cos(\sqrt{D/m} \cdot t))$

Einsetzen: ✓

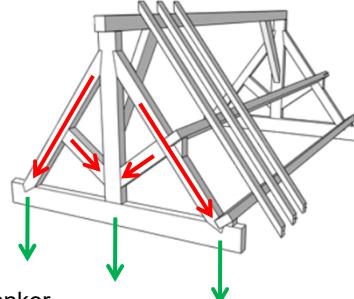


3.3.7. Statik 静力学

Bauwerke: Abführen von Kräften 结构: 力的耗散

Dachstuhl mit Querbalken 屋顶桁架与横梁

Nur senkrechte Kräfte aufs Mauerwerk 只有砌体上的垂直力

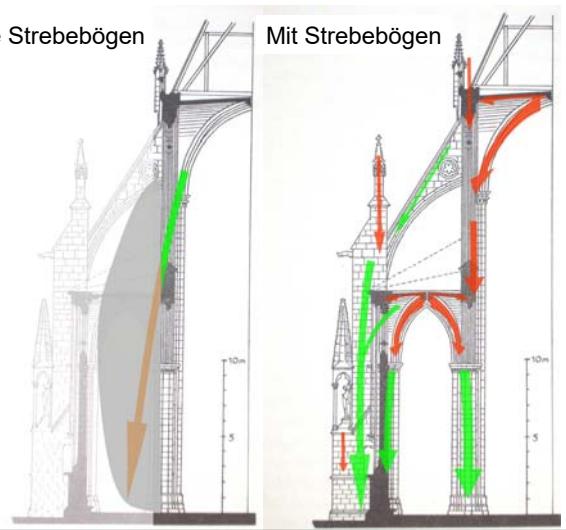


Gewölbe: Zuganker zum Abfangen von Querkräften



Gewölbe: Strebebögen zum Abfangen von Querkräften 拱门: 对接拱门以吸收横向力

Ohne Strebebögen



3.3.7. Statik

Kräfteverteilung an einer Wäscheleine 晾衣绳上的力的分布

Beispiel: Masse: $M = 15 \text{ kg}$

Gewicht: $F_g = 150 \text{ N}$

Winkel: $\alpha = 5^\circ$

Kompensation:

$$F_g = F_z + F_z$$

$$F_K = F_z / \sin \alpha \approx 850 \text{ N}$$

Beachte: $F_K \gg F_g$

F_K tritt mehrfach auf!
(Seil, Wand, ...)

