



# **Physik für Infotronik (4)**

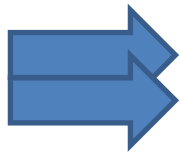
**Gerald Kupris**

**15.10.2012**

# Bewegung in zwei und drei Dimensionen

1 Messung und Maßeinheiten

Teil 1: Mechanik



2 Eindimensionale Bewegung

3 Bewegung in zwei und drei Dimensionen

4 Die Newtonschen Axiome

5 Anwendungen der Newtonschen Axiome

6 Arbeit und kinetische Energie

7 Energieerhaltung

8 Der Impuls

9 Drehbewegungen

10 Der Drehimpuls

11 Gravitation

12 Statisches Gleichgewicht und Elastizität

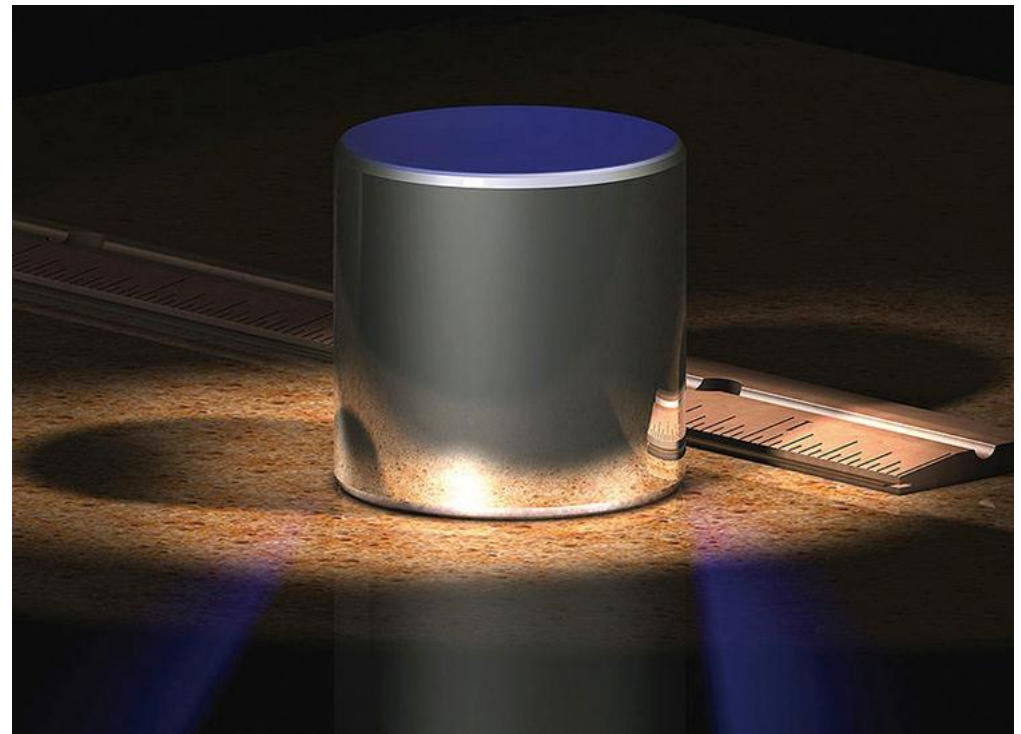
13 Fluide

# Das Urkilo

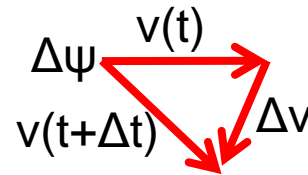
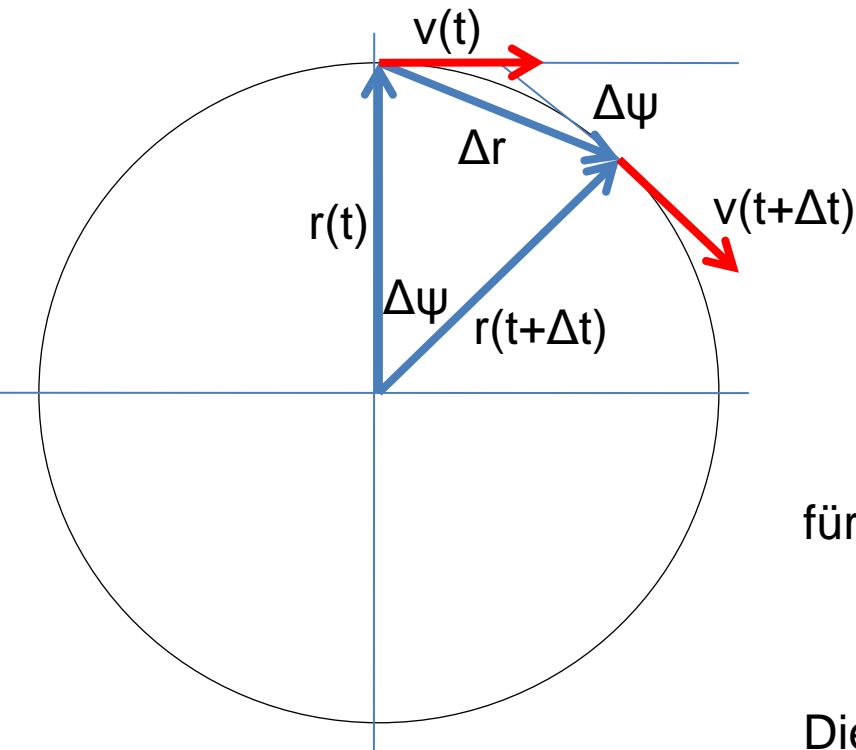
Im Pariser Vorort Sèvres hält das Internationale Büro für Maße und Gewichte das 1889 geschaffene Urkilo sicher unter Verschluss. Es besteht aus einer Platin/Iridium-Legierung (90%/10%) und misst jeweils 39,17 mm in der Höhe und im Durchmesser.

Regelmäßige Nachprüfungen und Vergleiche mit anerkannten Kopien brachten die Erkenntnis: Das Urkilo wird leichter. Und zwar um 50 Millionstel Gramm in den vergangenen 100 Jahren.

Bisher ist die Ursache unbekannt und unverständlich, sind die Kopien doch aus gleichem Material.



# Spezialfall: die gleichförmige Kreisbewegung



$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta r}{r}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v \Delta r}{r \Delta t}$$

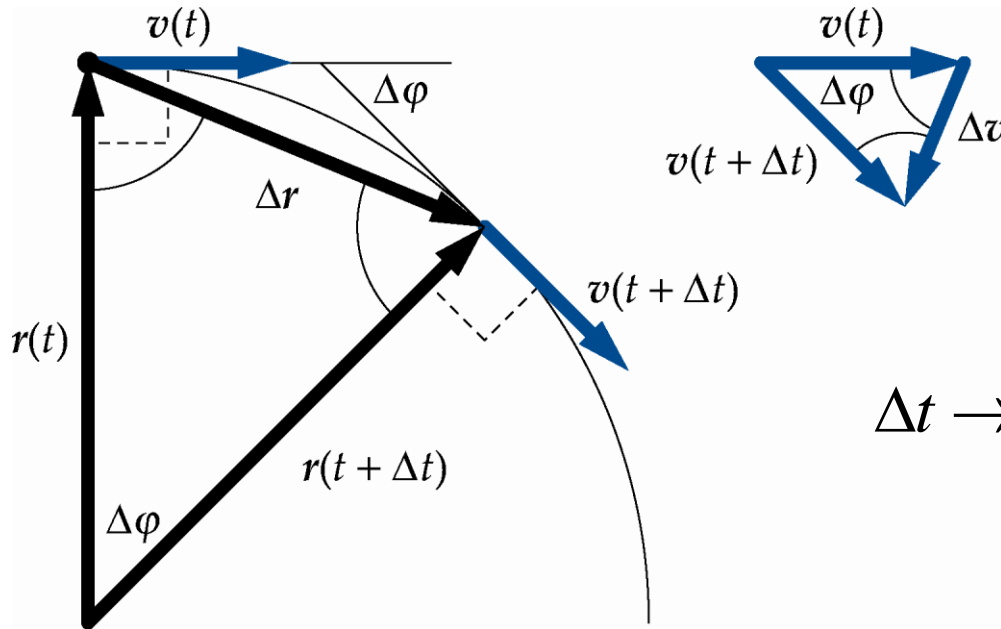
für  $\Delta t \rightarrow 0$  ergibt sich die Zentripetalbeschleunigung:

$$|a_{zp}| = \frac{v^2}{r}$$

Die Richtung ist dem Einheitsvektor entgegengesetzt:

$$a_{zp} = - \frac{v^2}{r} \hat{r}$$

# Spezialfall: die gleichförmige Kreisbewegung



Zentripetalbeschleunigung:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta r}{r}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v \cdot \Delta r}{r \cdot \Delta t}$$

$$\Delta t \rightarrow 0: \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow a \quad \frac{\Delta r}{\Delta t} \rightarrow v$$

$$|a_{zp}| = \frac{v^2}{r} \quad \vec{a}_{zp} = -\frac{v^2}{r} \cdot \hat{r}$$

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{t}$$

## Beispiel: erdnahe Umlaufbahn

Ein Satellit befindet sich auf einer erdnahen Umlaufbahn in der Höhe von 200 km über der Erde.

- Berechnen Sie die Umlaufzeit des künstlichen Erdtrabanten.  
(Erdradius: 6371 km, Erdbeschleunigung: 9,81 m/s<sup>2</sup>)
- Ist das Ergebnis plausibel?
- Berechnen Sie die Bahngeschwindigkeit in km/h.

$$|a_{zp}| = \frac{v^2}{r} = g$$

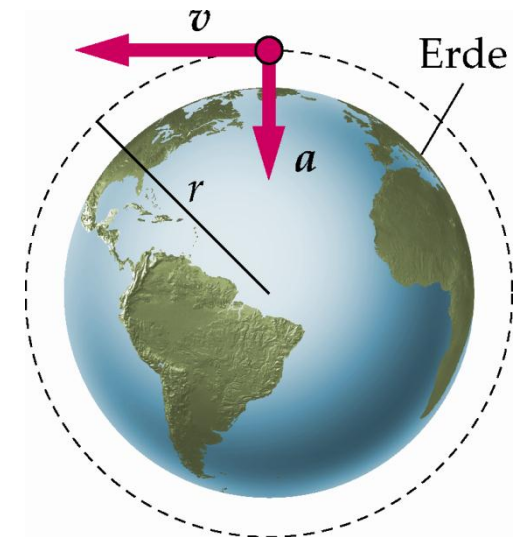
$$v = \sqrt{g \cdot r} = \sqrt{9,81 \cdot 6571000}$$

$$v = 8029 \frac{m}{s} = 28904 \frac{km}{h}$$

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{t}$$

$$t = \frac{2\pi \cdot r}{v}$$

$$t = \frac{2\pi \cdot 6571}{28904} = 1,44h$$



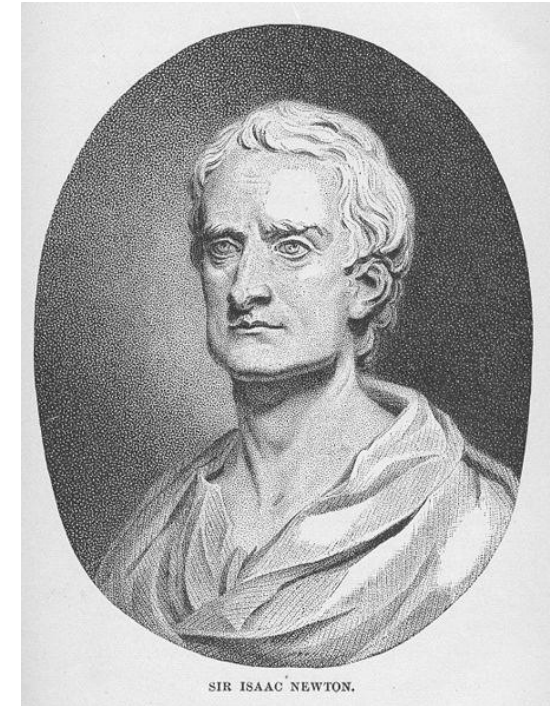
# Dynamik der Punktmassen

Die Dynamik beschäftigt sich mit der Bewegung von Körpern unter Einwirkung von Kräften.

Ihr Gegenstück ist die Kinematik (gr.: kinema, Bewegung) - die Lehre der Bewegung von Punkten und Körpern im Raum, beschrieben durch die Größen Weg  $s$  (Änderung der Ortskoordinate), Geschwindigkeit  $v$  und Beschleunigung  $a$ , ohne die Ursachen einer Bewegung (Kräfte) zu betrachten.

# Die Newtonschen Gesetze

Im Jahre 1687 erschien Isaac Newtons berühmtes Werk „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ (Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie), in dem Newton drei Grundsätze (Gesetze) der Bewegung formuliert, die als die Newtonschen Axiome, Grundgesetze der Bewegung, Newtonsche Prinzipien oder auch Newtonsche Gesetze bekannt sind. Sie werden in Newtons Werk mit „Lex prima“, „Lex secunda“ und „Lex tertia“, insgesamt mit „Axiomata, sive leges motus“ (Axiome, oder Gesetze der Bewegung), bezeichnet.



Diese Gesetze bilden das Fundament der klassischen Mechanik. Sie werden heute aber nicht mehr unbedingt als Axiome angesehen, weil sie sich als Folgerungen aus moderneren Grundsätzen, die über die klassische ‚Newtonsche‘ Physik hinausgehen, ableiten lassen.



# Das erste Newtonsche Axiom

Das Trägheitsprinzip („lex prima“):

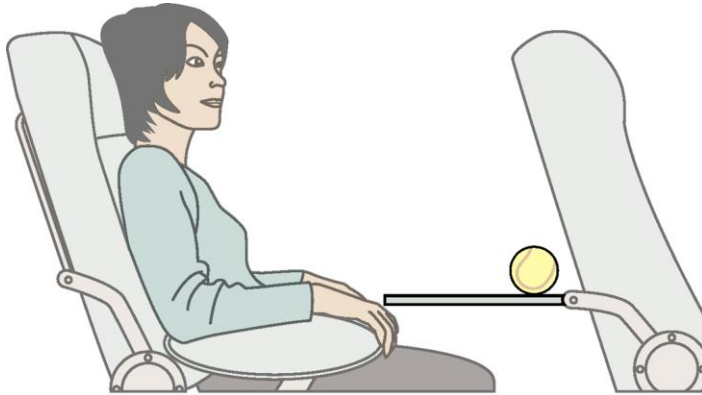
Das erste Gesetz ist das Trägheitsprinzip. Es gilt nur in Inertialsystemen und wurde als erstes von Galileo Galilei im Jahre 1638 aufgestellt.

„Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Translation, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“

Die Geschwindigkeit ist also unter der genannten Voraussetzung in Betrag und Richtung konstant. Eine Änderung des Bewegungszustandes kann nur durch Ausübung einer Kraft von außen erreicht werden, beispielsweise durch die Gravitationskraft. In der klassischen Mechanik entspricht das erste Newtonsche Gesetz den Gleichgewichtsbedingungen.

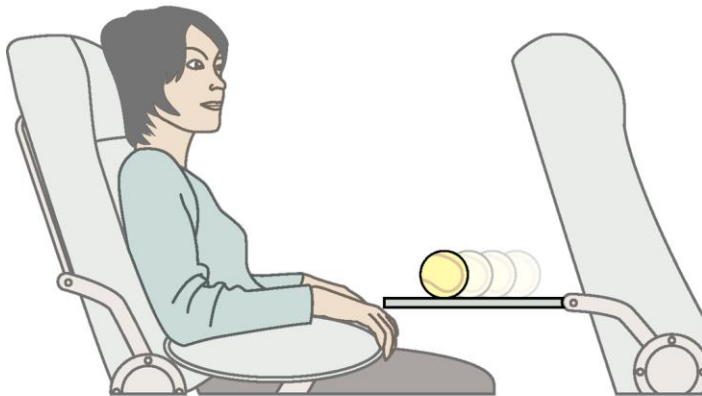
$$\vec{F} = \sum \vec{F}_i = 0 \longleftrightarrow \vec{v} = \text{const.}$$

## Ein Beispiel für das Trägheitsprinzip



(a)

Ein Flugzeug fliegt horizontal mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Strecke. Die Passagierin legt einen Tennisball auf den Klapptisch. Der Ball bleibt ruhig liegen.



(b)

Wenn der Pilot den Schub verstärkt, beschleunigt das Flugzeug relativ zum Boden. Der Ball kann nicht so schnell folgen und beginnt relativ zum Flugzeug nach hinten zu rollen.

## Das zweite Newtonsche Axiom

Das Aktionsprinzip („lex secunda“)

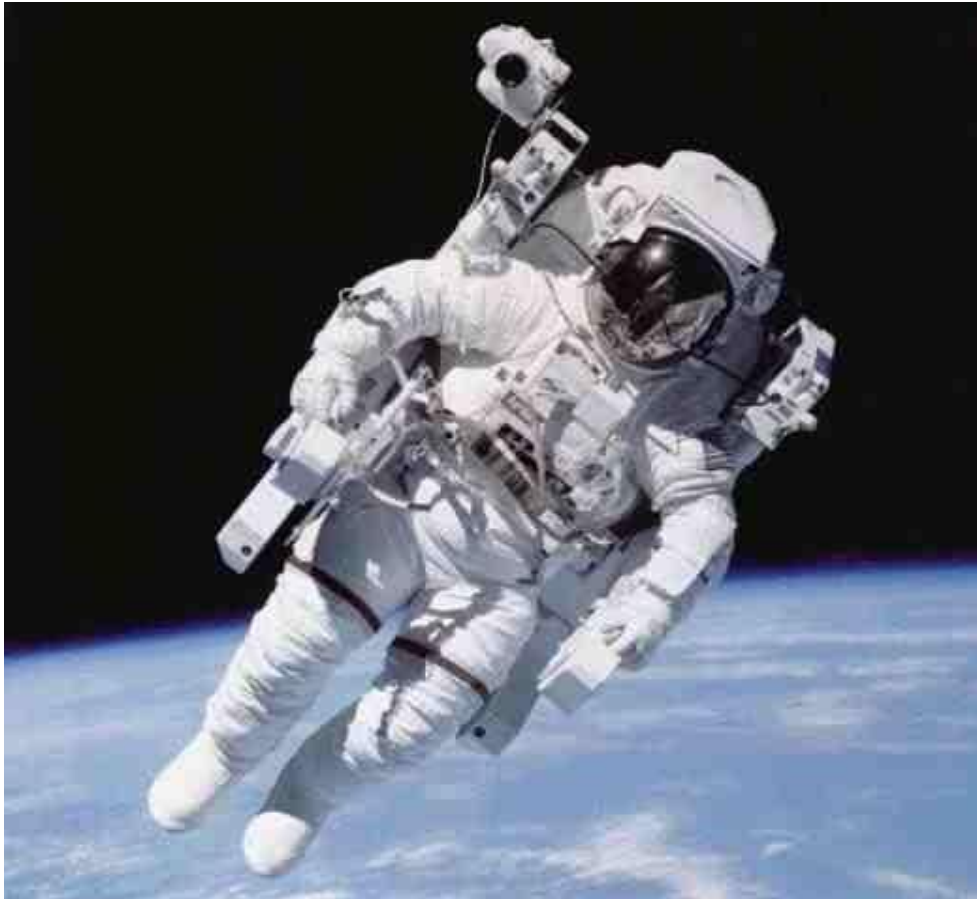
Das zweite Newtonsche Gesetz ist das Grundgesetz der Dynamik:

„Die Änderung der Bewegung einer Masse ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.“

Für die meisten technischen Systeme ist die Masse  $m$  während der Bewegungsänderung konstant. Das zweite Newtonsche Gesetz vereinfacht sich damit zu:

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

## Ein Beispiel für das Aktionsprinzip



Durch Beschleunigungsdüsen kann der Astronaut eine Kraft ausüben, die ihn in Richtung der Kraft (entgegengesetzt des Treibstoffausstoßes) beschleunigt.

Je größer die Masse des Astronauten (mit Anzug), desto geringer die Beschleunigung.

# Das dritte Newtonsche Axiom

Das Reaktionsprinzip („lex tertia“)

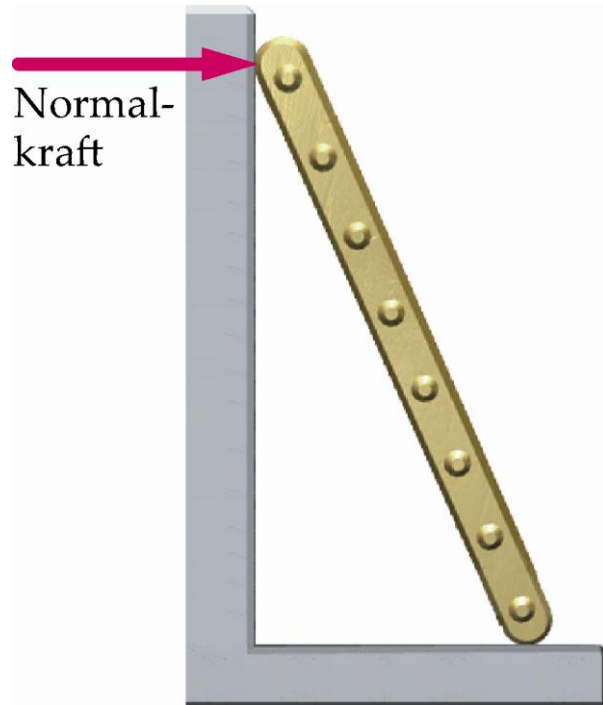
Das dritte Prinzip ist das Wechselwirkungsprinzip:

„Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleich große, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio).“

Das Wechselwirkungsprinzip wird auch als Prinzip von actio und reactio oder kurz „actio gleich reactio“ (lat. actio est reactio) bezeichnet. Das Prinzip lässt sich auch so formulieren, dass in einem abgeschlossenen System die Summe der Kräfte gleich Null ist.

$$\vec{F}_{AB} = - \vec{F}_{BA}$$

## Ein Beispiel für das Reaktionsprinzip



Eine Leiter lehnt senkrecht an einer Wand. An der Kontaktstelle drückt die Leiter mit einer horizontalen Kraft an die Wand.

Die Moleküle in der Oberfläche der Wand verschieben sich. Wie die Federn einer Matratze drücken dadurch die verschobenen Moleküle der Wand horizontal zurück auf die Leiter.

Die Wand hält die Leiter, indem sie auf diese eine senkrecht zur Wand gerichtete **Normalkraft** ausübt.

# Die Kraft

Kraft ist eine gerichtete physikalische Größe, die eine wichtige Rolle in der klassischen Mechanik spielt. Sie kann Körper beschleunigen oder verformen, durch Kraftwirkung kann man Arbeit verrichten und die Energie eines Körpers verändern.

Die heutige Physik unterscheidet vier Grundkräfte, die allen diesen Ausformungen von Kraft zugrunde liegen.

- die starke Wechselwirkung,
- die elektromagnetische Wechselwirkung,
- die schwache Wechselwirkung,
- die Gravitation.

Versuche, das Wirken einer fünften Kraft nachzuweisen, sind bisher misslungen.

Einige Kräfte haben eigenständige Bezeichnungen aufgrund ihrer Ursachen oder Wirkungen erhalten. Dazu gehören die Reibungskraft, die Schwerkraft und die Fliehkraft.

Die Maßeinheit für die Kraft ist das Newton:  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$

# Die Kraft als vektorielle Größe

Für die Beschreibung einer Kraft ist – neben ihrem Angriffspunkt – nicht nur ihre Stärke, sondern auch die Angabe der Richtung notwendig, in der die Kraft wirkt. Solche Größen, festgelegt durch die Angabe von Zahlenwert, Einheit und Richtung, nennt man eine vektorielle Größe, sie ist darstellbar durch Pfeile in einem Koordinatensystem. In einem kartesischen Koordinatensystem hat ein Kraftvektor drei Komponenten:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix}$$

Um beispielsweise die Gewichtskraft zu beschreiben, mit der ein Körper der Masse  $m$  von der Erde angezogen wird, kann ein Koordinatensystem mit vertikaler  $z$ -Achse gewählt werden:

$$\vec{F}_G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix}$$

Der Körper wird (mit der Erdbeschleunigung  $g$ ) nach unten beschleunigt, deshalb ist die  $z$ -Komponente negativ.



# Die Masse

Die Masse ist eine Eigenschaft der Materie und eine physikalische Grundgröße. Ihre internationale Einheit ist das Kilogramm. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die Masse häufig als Gewicht bezeichnet.

Die Masse ist eine Ursache von Gravitation („schwere Masse“) und ein Maß für die Trägheit eines Körpers („träge Masse“).

**Schwere Masse:** zwei Körper ziehen sich aufgrund ihrer Masse gegenseitig an. Diese gravitative Anziehungskraft nennt man bei extremem Unterschied der Körpermassen die Gewichtskraft des leichteren Körpers.

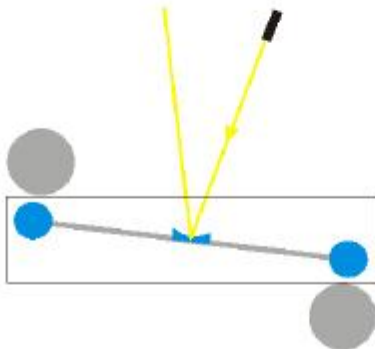
**Träge Masse:** der Körper setzt jeder Bewegungsänderung einen Widerstand entgegen – er ist träge.

In Newtons Mechanik und in der Chemie gilt der Massenerhaltungssatz. Dort ist die Masse eines Teilchens eine für das Teilchen charakteristische, unveränderliche Größe, die nicht mit Größen zusammenhängt, die sich wie sein Ort und seine Geschwindigkeit mit der Zeit ändern können.

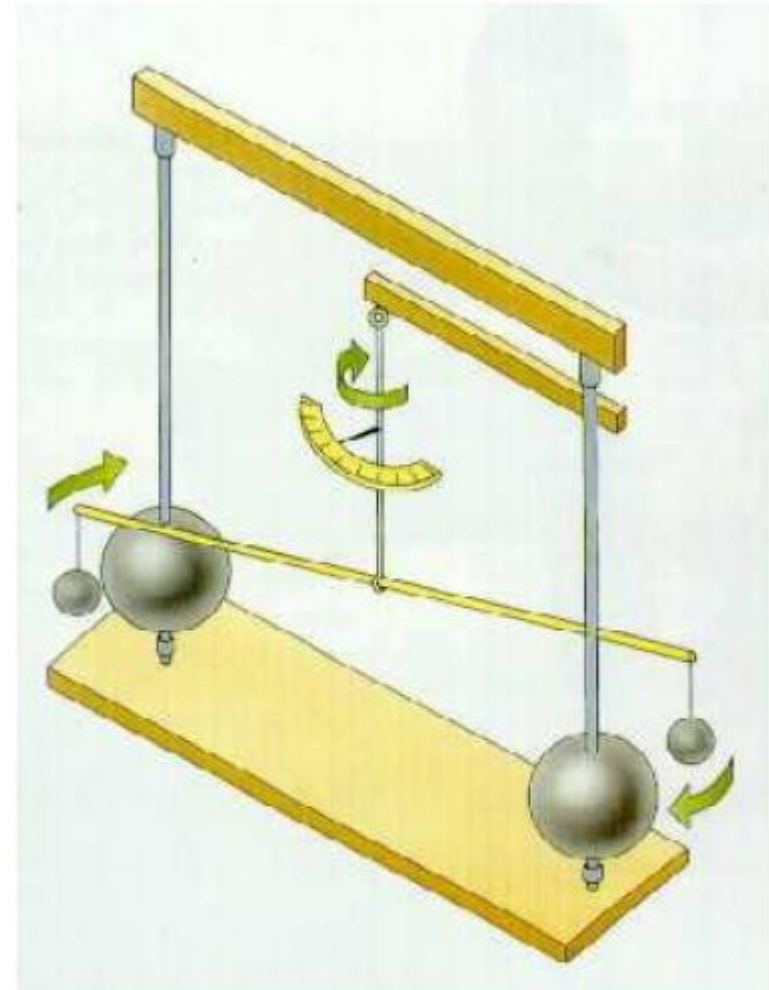
# Gravitationskräfte

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

$$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

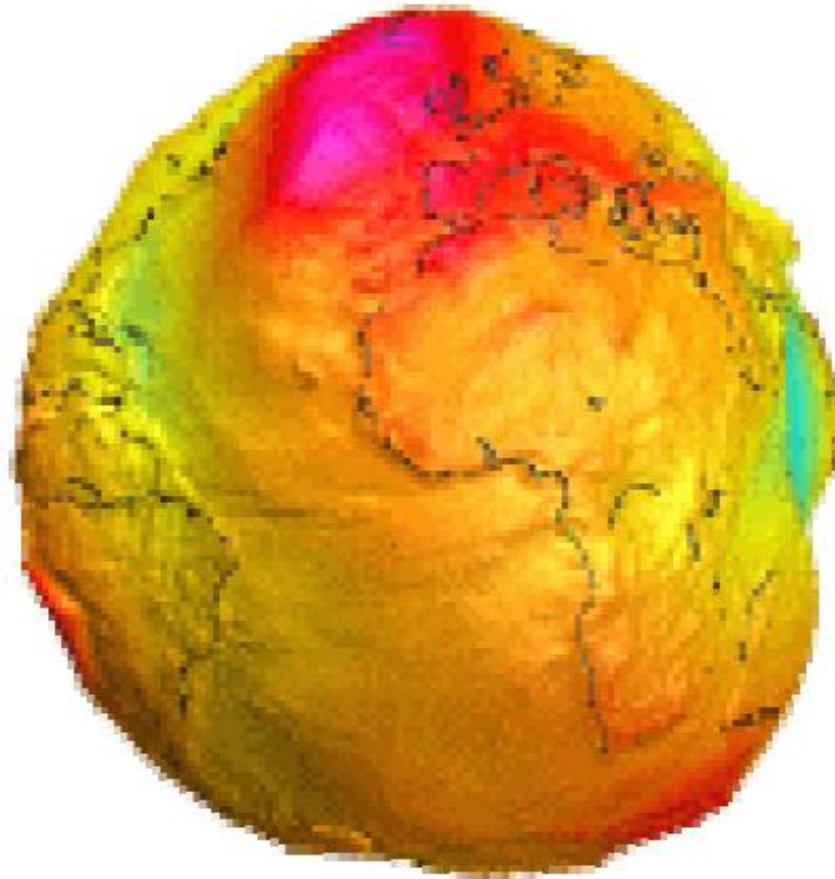


LEIFI / Uni München



Drehwaage von Cavendish (1798)

# Abweichung des Erdschwerefeldes



Abweichungen vom Mittelwert: zwischen ca.  $+5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$  und  $-5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$

GeoForschungsZentrum Potsdam

# Kräftegleichgewicht

Die Betrachtung des Kräftegleichgewichts ist Inhalt der Statik. Um hier oder allgemeiner in der technischen Mechanik Systeme (z. B. Tragwerke) einer Berechnung zugänglich zu machen, werden Bindungen zwischen den Körpern des Systems und zwischen dem System und seiner Umwelt, die nur geringe Formänderungen zulassen, als »starre Bindungen« idealisiert. Solche starren Bindungen sind in der Regel Gelenke zwischen den Körpern oder Lager. Damit geht der physikalische Charakter dieser Bindungen verloren, und die durch diese Bindungen bedingte mechanische Wechselwirkung der Körper wird durch den neuen Begriff der Zwangskräfte repräsentiert.

**Zwangskräfte** verrichten am System keine Arbeit, da keine resultierende Bewegung stattfindet. Im Gegensatz dazu stehen die »**eingepprägten Kräfte**«, die ihre Ursache in physikalischen Gesetzen haben. Eingepprägte Kräfte und Zwangskräfte erfüllen zusammen die Gleichgewichtsbedingungen.

Beispiele für Zwangskräfte: **Normalkraft, Auflagerkraft, Haftkräfte.**

Beispiele für eingepprägte Kräfte: **Gewichtskraft, Reibungskraft, Zugkraft, Federkraft.**

Das Prinzip der virtuellen Arbeit besagt, dass in der Statik die Summe aller Kräfte (Zwangskräften und äußere Kräfte) Null ergeben muss.

# Kräftediagramm

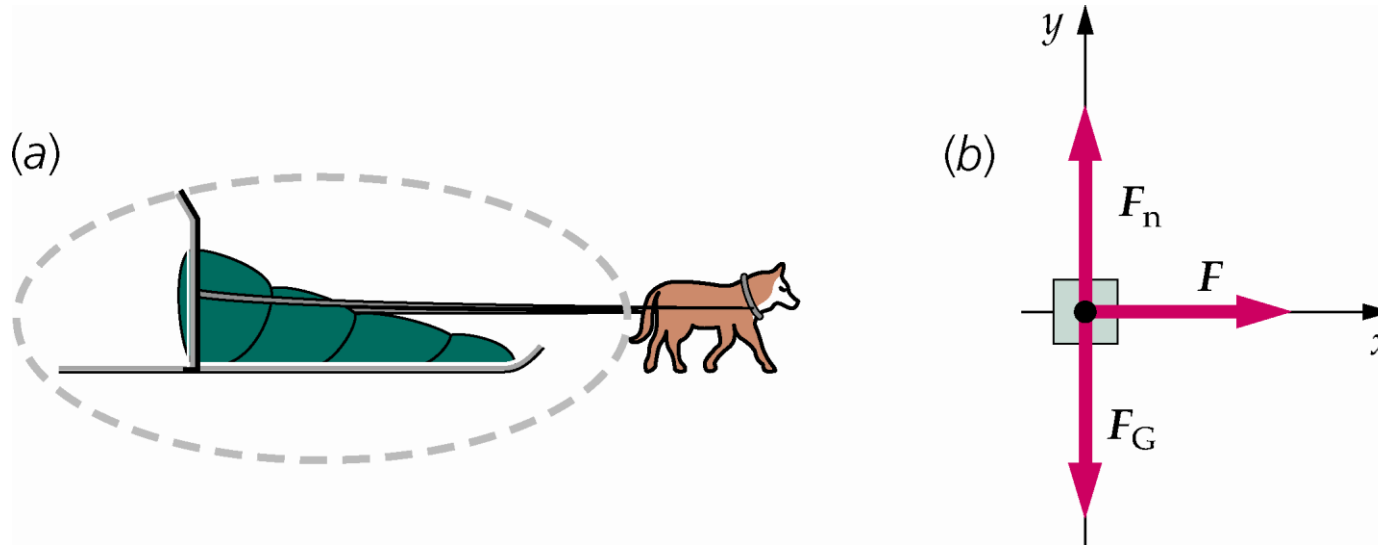


Abbildung a) Ein Hund zieht einen Schlitten.

In einem ersten Schritt wird der zu analysierende Körper isoliert. Die gestichelte Ellipse zeigt die Grenze zwischen dem als Teilchen betrachteten Körper und der Umgebung.

Abbildung b) zeigt das Kräfte diagramm der auf den Schlitten wirkenden Kräfte:

- $F_G$  Gravitationskraft des Schlittens
- $F_n$  Normalkraft, die das Eis auf die Kufen ausübt
- $F$  Kontaktkraft, die der Hund auf die Leine ausübt.

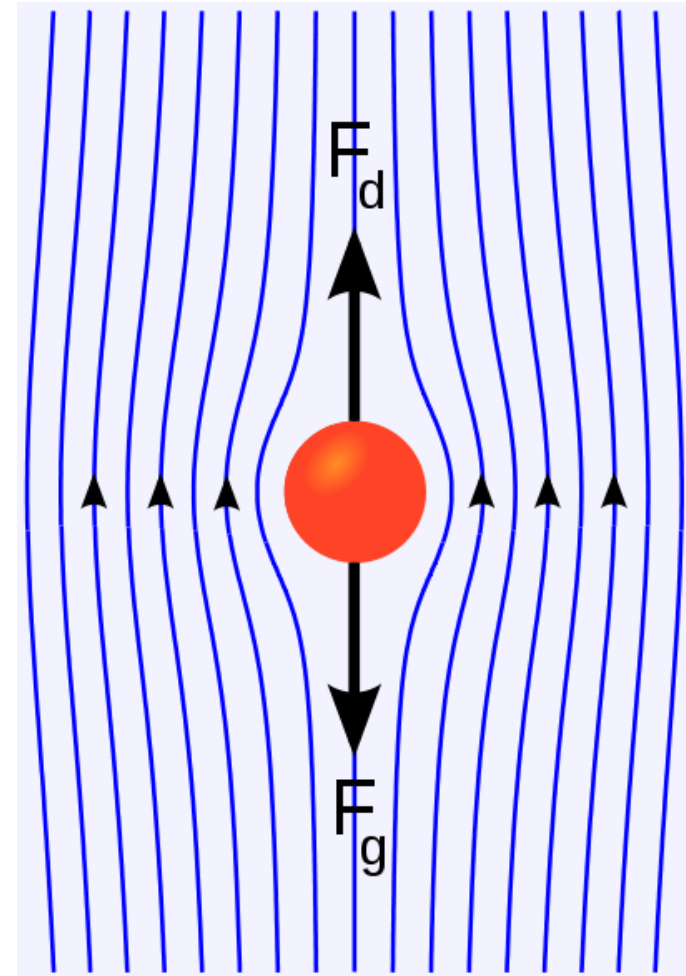
# Fallender Körper

Wenn sich bei einem fallenden Körper in einem Medium die Gewichtskraft  $F_g$  und die Reibungskraft  $F_d$  kompensieren, ändert sich die Geschwindigkeit  $v$  nicht mehr.

$$F_g = \text{const.}$$

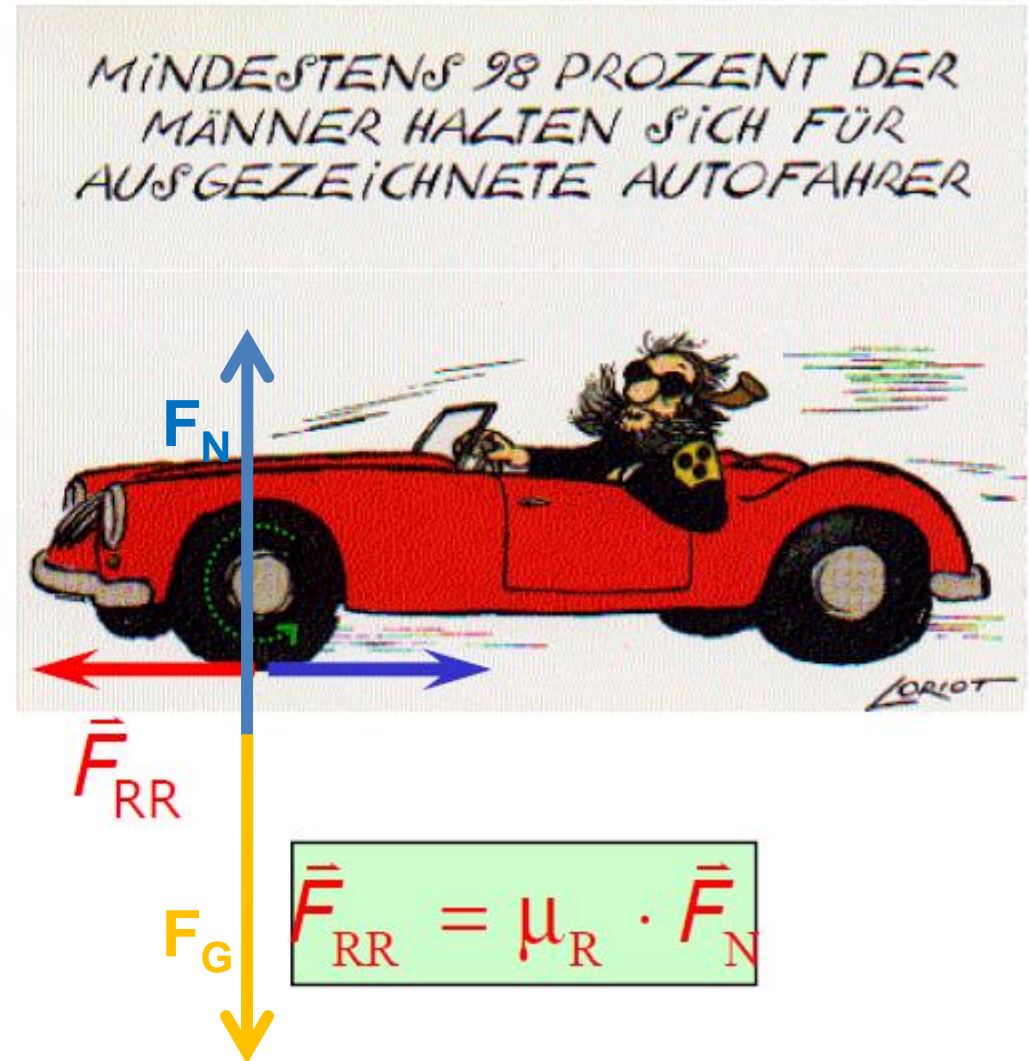
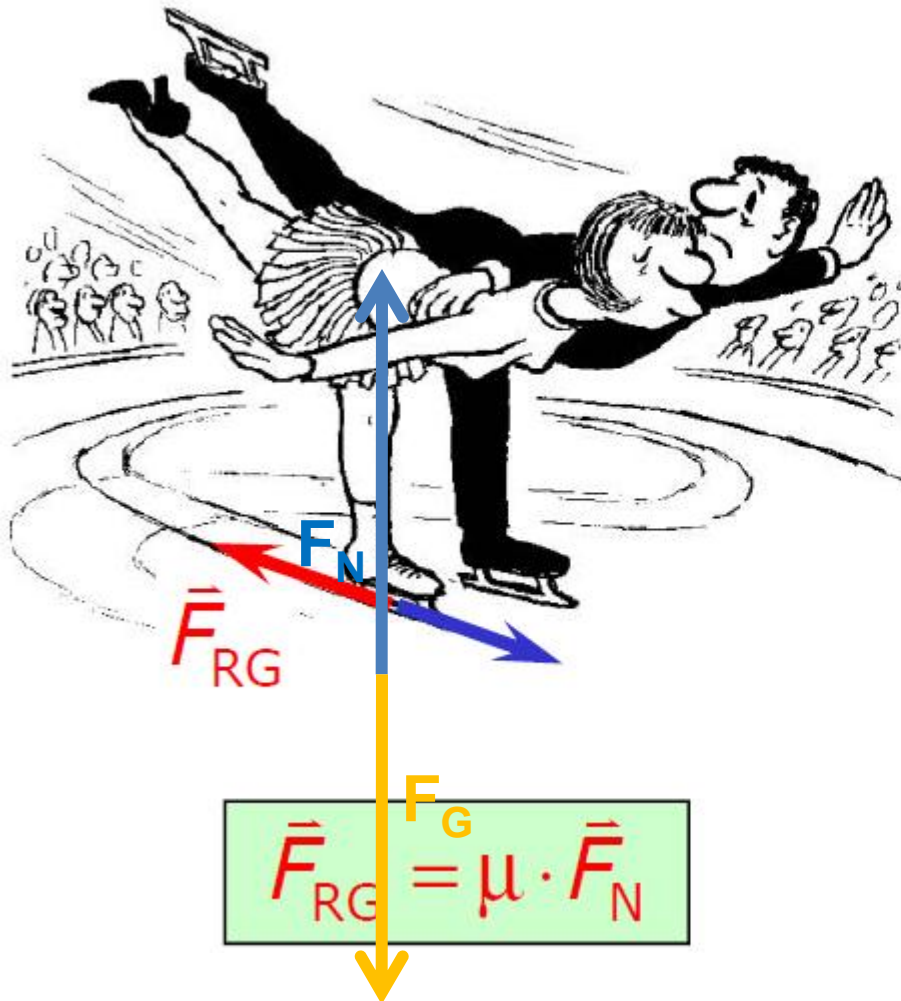
$$F_d \sim v^2$$

Ein Regentropfen fällt mit einer Geschwindigkeit von ca. 26 km/h zu Boden.





# Gleit- und Rollreibung



# Reibungszahlen der Haft-, Gleit- und Rollreibung

	$\mu_0$		$\mu$		$\mu_R$
	trocken	geschmiert	trocken	geschmiert	trocken
Stahl auf Stahl (z.B. Eisenbahn)	0,15	0,11 .. 0,12	0,03 .. 0,09	0,009	0,003
Stahl auf Holz	0,5 .. 0,6	0,1	0,2 .. 0,5	0,02 .. 0,08	
Stahl auf Eis	0,027		0,014		
Holz auf Holz	0,4 .. 0,6	0,16	0,2 .. 0,4	0,08	
Holz auf Metall	0,6 .. 0,7	0,11	0,4 .. 0,5	0,10	
Gummi auf Asphalt (z.B. Reifen)	0,9		0,85	0,45	0,025
Gummi auf Eis			0,15		



# Superpositionsprinzip

Das Superpositionsprinzip der Mechanik, welches in Newtons Werk auch als „lex quarta“ bezeichnet wird, besagt: Wirken auf einen Punkt (oder einen starren Körper) mehrere Kräfte, so addieren sich diese vektoriell zu einer resultierenden Kraft auf.

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$$

Wenn zwei am selben Angriffspunkt angreifende Kräfte und gleich große, aber entgegengesetzt gerichtet sind, so ist die resultierende Kraft gleich Null, man spricht dann auch von einem Kräftegleichgewicht (die Kräfte »kompensieren sich« bzw. »sie gleichen sich aus«).

Wirken zwei Kräfte in unterschiedlicher Richtung, so ergeben sich Richtung und Betrag der Resultierenden zeichnerisch durch ein Kräfteparallelogramm. Die Kräfte werden zu einem Parallelogramm ergänzt, die Parallelogramm–Diagonale entspricht der resultierenden Kraft. Die resultierende Kraft mehrerer Kräfte unterschiedlicher Richtung kann zeichnerisch oder rechnerisch (mit Hilfe der Vektorrechnung) bestimmt werden.

# Literatur und Quellen

Paul A. Tipler, Gene Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, August 2009

<http://de.wikipedia.org/>



Hochschule Deggendorf – Edlmairstr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf