

1.2 Kinematik

Die Kinematik beschäftigt sich mit den Gesetzen der Bewegung eines Massenpunktes. Im realen Experiment ist ein Massenpunkt durch einen irgendwie gestalteten Körper realisiert. In diesem und den folgenden Abschnitten, bis zur Behandlung der Rotation des Körpers, bleibt die Gestalt unberücksichtigt. Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung beziehen sich auf die Ortskoordinaten des Massenpunktes. Die Abstraktion des realen Körpers auf einen Punkt, wobei zunächst nur dessen Lage interessiert, entspricht der Reduktion einer Verteilung auf ihren Mittelwert (http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V1_1Messen.DOC - Mittelwert). Der Masse des Körpers entspricht im Bild der Verteilung die Gesamtzahl der Ereignisse: Das ist die Anzahl der Kästchen, die das Histogramm ausfüllen (http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V1_1Messen.DOC - Histogramm)

1.2.1 Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung

Als Funktionen der Zeit sind Weg $s(t)$, Geschwindigkeit $v(t)$ und Beschleunigung $a(t)$ voneinander abhängige Größen. Aus dem Zeitverhalten einer von ihnen folgt das der beiden anderen durch Differentiation oder Integration. Muß integriert werden, dann kann noch über den Wert der Integrationskonstanten verfügt werden. Das heißt, ist z. B. $v(t)$ bekannt, dann kann der Wert des Weges zur Zeit 0, $s(0)$, frei gewählt werden.

Funktionale Abhängigkeit	$f(t)$	$\dot{f}(t)$	$\ddot{f}(t)$
	Weg	Geschwindigkeit	Beschleunigung
Gegeben sei der Weg $s(t)$	$s(t)$	$v(t) = \dot{s}(t)$	$a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{s}(t)$
Gegeben sei die Beschleunigung $a(t)$	$s(t) = \int v(t) dt$	$v(t) = \int a(t) dt$	$a(t)$

Tabelle 1 Funktionale Abhängigkeit zwischen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung für eine geradlinige Bewegung

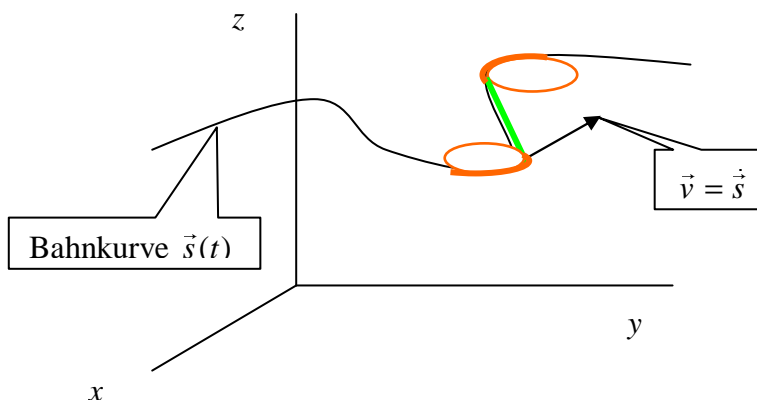


Abbildung 1 Bahnkurve und Geschwindigkeitsvektor in 3 Dimensionen. Eine beliebige Bahnkurve kann durch Teilstücke aus geraden (grün) und kreisförmigen Bahnen (rot) angenähert werden.

Im Allgemeinen ist die Geschwindigkeit eines Punktes ein Vektor (<http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/Mathe.DOC> - Vektoren), der durch Betrag und Richtung gegeben ist.

Wichtig und übersichtlich sind die Spezialfälle der *geradlinigen Bewegung* in einer Dimension mit *konstanter Geschwindigkeit* oder *konstanter Beschleunigung* und die *Bewegung auf einer Kreisbahn* mit *konstanter Winkelgeschwindigkeit*, weil Bahnkurven zu beliebiger Bewegung in Teilstücke zerlegt werden können, von denen jedes eine dieser Voraussetzungen erfüllt.

1.2.1.1 Bewegung auf einer geradlinigen Bahn

Bei Annahme einer geradlinigen Bahn zeigen die Bahn, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung in die gleiche Richtung. Die Richtung der Vektoren ist also durch die Lage der Bahn und der Fahrtrichtung vorgegeben, so daß sich die weitere Betrachtung auf die Beträge beschränken kann.

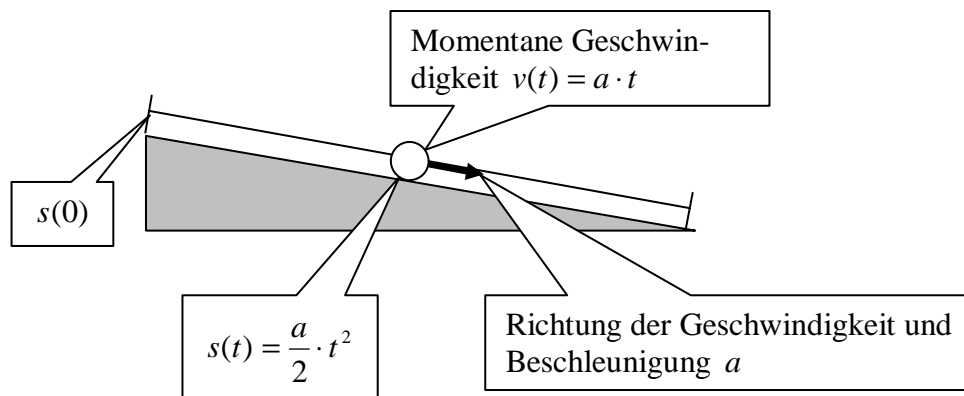


Abbildung 2 Weg und Geschwindigkeit bei der geradlinigen Bewegung bei konstanter Beschleunigung, die z. B. beim Abrollen einer kleinen Kugel von einer Rampe beobachtet wird.

Mit der in Tabelle 1 gezeigten funktionalen Abhängigkeit zwischen Weg, Geschwindigkeit und Bahn ergeben sich aus diesen Annahmen durch Integration bzw. Ableitung die folgenden Weg-Zeit Gesetze:

	Weg	Geschwindigkeit	Beschleunigung
Geradlinige Bahn, $a = const$	$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$	$v = a \cdot t + v_0$	$a = const$
Geradlinige Bahn, $v = const$	$s = v \cdot t + s_0$	$v = const$	0

Tabelle 2 Weg- Zeitgesetze für die Bewegung auf einer geradlinigen Bahn bei konstanter Beschleunigung bzw. konstanter Geschwindigkeit

1.2.1.2 Bewegung auf einer Kreisbahn

Für die mathematische Formulierung dieser Bewegung ist es sinnvoll, außer dem Geschwindigkeitsvektor des Punktes auf der Bahn, der Bahngeschwindigkeit, den Begriff der Winkelgeschwindigkeit einzuführen. Sie beschreibt den Winkel, den der Radiusvektor vom Mittelpunkt bis zum bewegten Punkt auf der Kreisbahn in einer Zeiteinheit überstreicht.

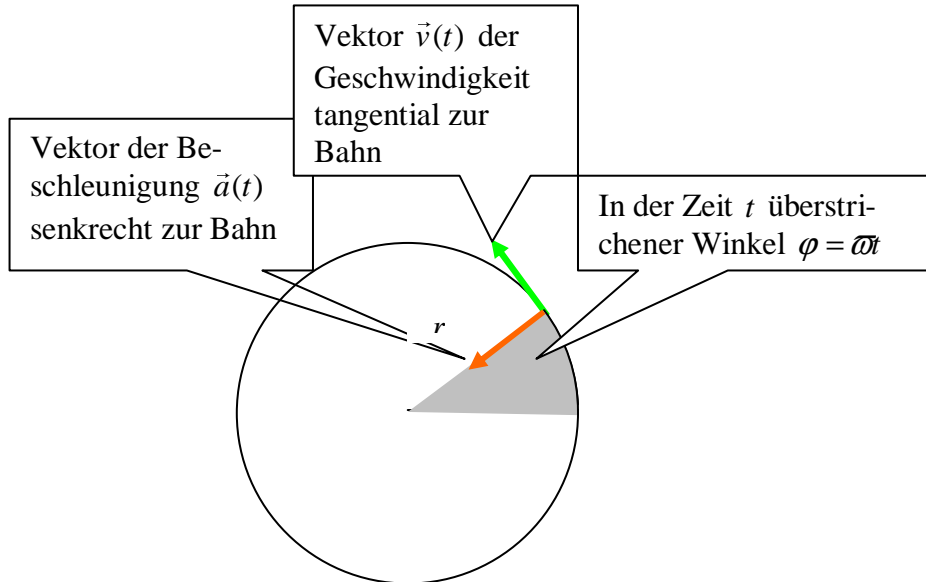


Abbildung 3 Geschwindigkeit, Beschleunigung und pro Zeit überstrichener Winkel bei der Bewegung auf einer Kreisbahn, ω ist die konstante Winkelgeschwindigkeit.

Formel	Anmerkung
$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T}$	Konstante Winkelgeschwindigkeit
$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}$	Zeitlich variable Winkelgeschwindigkeit
T	Umlaufzeit T, Periode
$\nu = \frac{1}{T}$	Frequenz des Umlaufs
φ	In der Zeit t überstrichener Winkel
$\frac{d\varphi}{dt}$	Ableitung der Funktion des Winkels nach der Zeit
$v = \omega \cdot r$	Verknüpfung zwischen Bahn- und Winkelgeschwindigkeit
R	Radius der Bahn

Tabelle 3 Betrag der Winkelgeschwindigkeit, konstant bzw. zeitlich variabel

Versuch 1 Der Zusammenhang von Winkelgeschwindigkeit und Frequenz wird mit dem Stroboskop gezeigt, indem man die Frequenz des Stroboskops auf die $n=1-2-3$ -fache Drehzahl einer rotierenden Scheibe erhöht. Immer, wenn die Markierung der Scheibe festzustehen scheint, gilt $2\pi\nu_{\text{Stroboskop}} = n \cdot \omega_{\text{Scheibe}}$

Im Gegensatz zur Bewegung auf geradliniger Bahn zeigen die Vektoren für Beschleunigung und Geschwindigkeit auf der Kreisbahn nicht in die gleiche Richtung. Im wichtigen Spezialfall konstanter Winkelgeschwindigkeit zeigt der Vektor der Beschleunigung vom Bahnpunkt in radialer Richtung zum Kreismittelpunkt, während die Tangente im Bahnpunkt die Richtung der Bahngeschwindigkeit zeigt.

Man erkennt diese Zusammenhänge analytisch, wenn man den Ortsvektor vom Mittelpunkt des Kreises zur Bahn als zweidimensionalen Vektor formuliert. Die Vektoren der Geschwindigkeit und Beschleunigung folgen, wie im 1-dimensionalen Problem, aus den Ableitungen des Ortsvektors. Am Beispiel des Ortsvektors sei gezeigt, daß die Beträge dieser Vektoren konstant sind:

$\vec{s} = \begin{pmatrix} r \cdot \cos \omega t \\ r \cdot \sin \omega t \end{pmatrix}$	Zeitabhängiger Ortsvektor auf der Kreisbahn
$s = r \cdot \sqrt{\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t} = r$	Der Betrag ist konstant, weil $\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t = 1$

Tabelle 4 Der Ortsvektor bei Bewegung auf der Kreisbahn ist zeitabhängig in der Richtung, aber von konstantem Betrag.

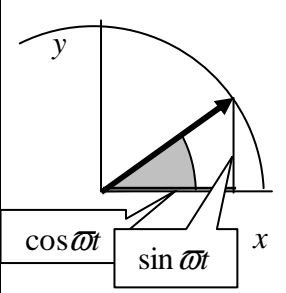
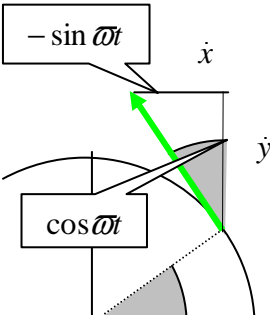
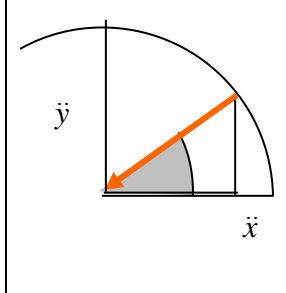
	Weg	Geschwindigkeit	Beschleunigung
Kreisbahn, $\omega = \text{const}$	$\vec{s} = r \cdot \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix}$	$\vec{v} = r \cdot \omega \cdot \begin{pmatrix} -\sin \omega t \\ \cos \omega t \end{pmatrix}$	$\vec{a} = -r \cdot \omega^2 \cdot \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix}$
Betrag	$s = r$	$v = r \cdot \omega$	$a = r \cdot \omega^2 = \frac{v^2}{r}$
Richtung			
	Der Ortsvektor zeigt vom Mittelpunkt zur Bahn	Der Vektor der Geschwindigkeit zeigt tangential zur Bahn	Der Vektor der Beschleunigung zeigt von der Bahn zum Mittelpunkt

Tabelle 5 Richtung der Vektoren für den Ort (schwarz), die Geschwindigkeit (grün) und die Beschleunigung (rot) zur Zeit t auf der Kreisbahn. Der grau gezeichnete Winkel ist ωt .

1.2.1.3 Anmerkung zum Zusammenhang zwischen Funktionen und deren Ableitungen am Beispiel Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung

Am Beispiel der Weg- Zeitgesetze erkennt man die qualitative Änderung der Funktionen durch Ableitung bzw. Integration: Aus der stufenförmigen, zeitlich unstetigen Beschleunigung wird nach Integration die stetige Geschwindigkeit, die allerdings noch „Knicke“ zeigt, also nicht überall differenzierbar ist. Die Geschwindigkeit führt schließlich nach weiterer Integration zum Weg, der überall „glatt“, d. h. stetig und differenzierbar ist.

Allgemein gilt: Integration glättet die Funktionen, während Differentiation Unterschiede verstärkt.

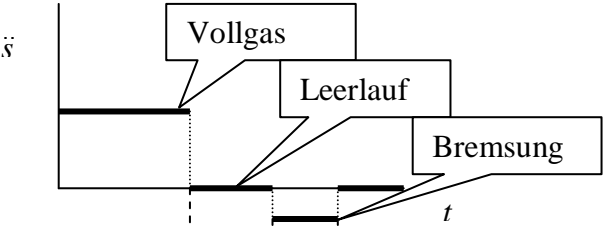
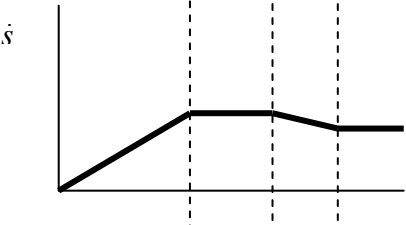
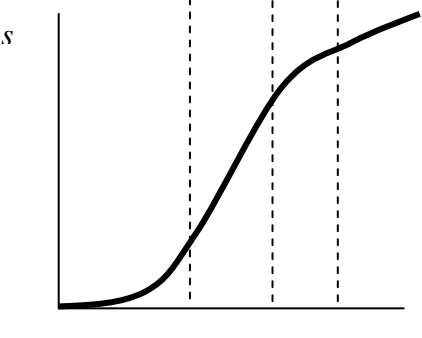
<p>Unstetige Beschleunigung, z. B. wenn im Auto auf Vollgas Leerlauf und Bremsung folgt</p>	
<p>Die Geschwindigkeit ist aus Geraden zusammengesetzt. An deren Anschlußstellen gibt es Knicke, d.h. die Geschwindigkeit ist an diesen Stellen nicht differenzierbar</p>	
<p>Stetiger Weg, der aus der Addition von Parabelstücken und Geraden zusammengesetzt und überall „glatt“, d.h. differenzierbar ist.</p>	

Tabelle 6 Qualitativer Verlauf von Weg und Geschwindigkeit bei unstetiger Beschleunigung: Zeigt den Übergang von unstetigem zu stetigem Verhalten bei Funktionen, die über Integration auseinander hervorgehen.

1.3 Kraft und Masse

Kraft und Masse sind mit dem in der Kinematik behandelten Begriff der Beschleunigung, also der Änderung des Bewegungszustandes in Betrag oder Richtung, ursächlich verknüpft. Dieser Zusammenhang wurde erstmals von Galilei erkannt und in den Newtonschen Axiomen der Mechanik formuliert.

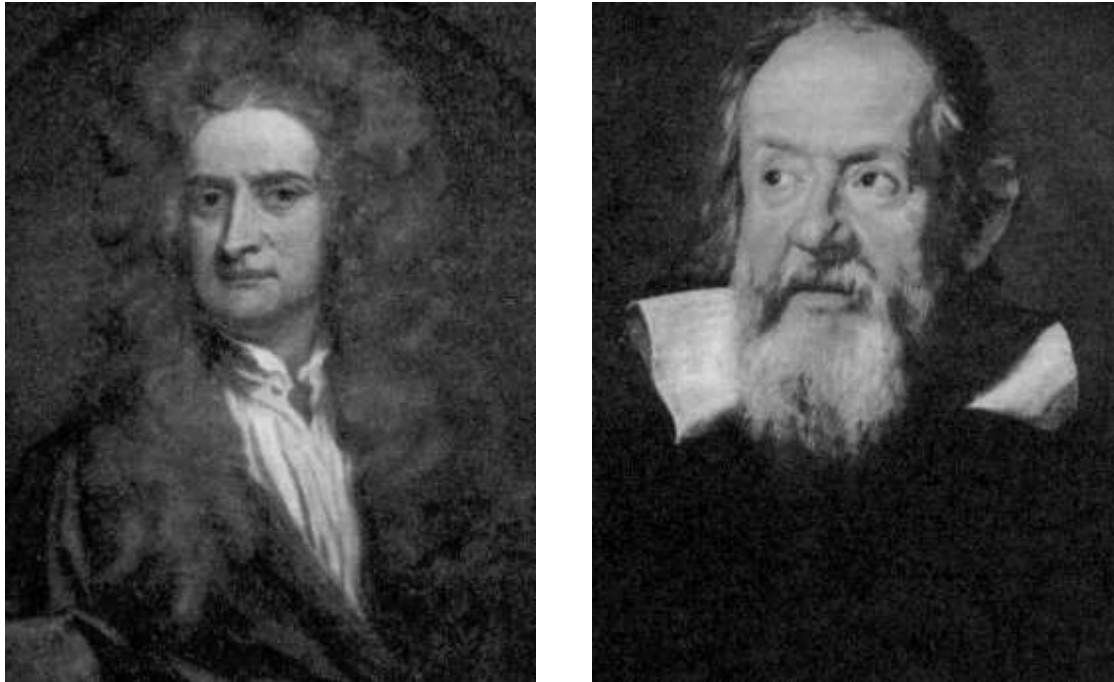


Abbildung 4 Links: Sir Isaac Newton, 4.1. 1643-31.3.1727. Mathematiker, Physiker und Astronom, rechts: Galileo Galilei, 15.2.1565-8.1.1642. Mathematiker, Philosoph und Physiker (Quelle: Meyers Enzyklopädisches Lexikon, Ausgabe 1979)

1.3.1 Das Trägheitsgesetz, erstes Newtonsches Axiom

„Alle Körper verharren im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung, wenn keine äußeren Einflüsse vorhanden sind.“

Der funktionale Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Geschwindigkeit beschreibt dieses Verhalten, denn aus $a = 0$ folgt durch Integration über die Zeit $v = const$. Zu Zeit seiner Entdeckung erforderte die Erkenntnis dieser Gesetzmäßigkeit ein hohes Maß an Abstraktion, weil die Ausschaltung aller äußeren Kräfte in Praxis nur annähernd zu erreichen ist.

Versuch 2 Die Konstanz des Bewegungszustandes wird an einer Dose gezeigt, die sich auf einem Luftkissen nahezu ohne Reibung bewegt.

1.3.2 Das Kraftgesetz, zweites Newtonsches Axiom

„Wirkt auf einen frei beweglichen Körper eine Kraft F , so bewegt sich der Körper mit der Beschleunigung a , die proportional zur wirkenden Kraft ist.“

Formel	SI Einheit		Anmerkung
	Zeichen	Name	
$\vec{F} = m_i \cdot \vec{a}$			Trägheitsgesetz
\vec{F}	N	Newton	Kraft
m	kg	Kilogramm	Träge Masse
\vec{a}	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Meter durch Sekunde hoch zwei	Beschleunigung

Tabelle 7 Kraft, träge Masse und Beschleunigung

Die im ersten Axiom erwähnten äußeren Einflüsse sind demnach Kräfte, denn nur diese können nach dem zweiten Axiom den Bewegungszustand ändern. Außer dieser qualitativen Definition der Kraft folgt aus dem zweiten Axiom auch eine quantitative: Kräfte sind gleich, wenn sie, angewandt auf die gleiche träge Masse, zur gleichen Beschleunigung führen oder, allgemeiner, zur gleichen Zustandsänderung. Mit letzterer ist z. B. die Verlängerung einer Feder erfaßt. Kräfte können also, außer durch Messung der von ihnen hervorgerufenen Beschleunigung, mit Federwaagen gemessen werden.

Versuch 3 Hookesches Gesetz: Die Verlängerung einer Feder durch unterschiedliche Kräfte ist zur Kraft proportional

Wie die Beschleunigung ist die Kraft eine gerichtete Größe, also ein Vektor. Kraft und Beschleunigung zeigen in die gleiche Richtung.

Versuch 4 Luftkissenfahrbahn. Es gibt zwei Massen: Die träge Masse M und die beschleunigende Masse m . m sei klein gegenüber M , so daß die Kraft zur Beschleunigung von m gegenüber der zur Beschleunigung von M benötigten vernachlässigt werden kann. Die Schwerkraft von m ist deshalb (annähernd) gleich der beschleunigenden Kraft auf M .

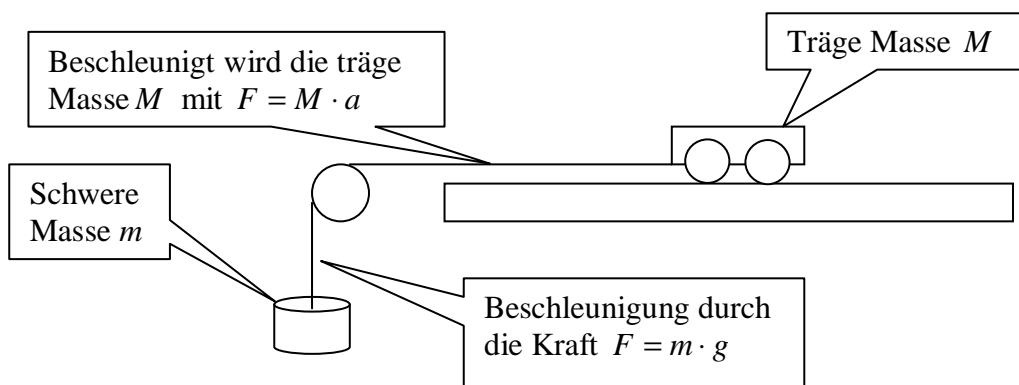


Abbildung 5 Luftkissenfahrbahn

s	t	M	m	$a = \frac{2s}{t^2}$
0,3	1,61	1	1	0,23
1,2	3,22	1	1	0,23
Es gilt offenbar $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$				
1,2	6,45	4	1	0,057
1,2	3,26	4	4	0,23
Aus $m \cdot g = M \cdot a$ folgt $a = \frac{m}{M} \cdot g$. Die Erhöhung von M und m auf das 4-fache ihrer trägen Massen wirken sich nicht auf die Beschleunigung aus: Offensichtlich ist eine 4-fach trägere Masse m auch 4 mal so schwer. Also: Die träge Masse ist proportional zur schweren, man wählt als Faktor 1.				

Tabelle 8 Die doppelte Fahrzeit führt bei gleichförmiger Beschleunigung zum 4-fachen Weg und man erkennt, daß die träge gleich der schweren Masse ist.

1.3.3 Kraft und Gegenkraft, das dritte Newtonsche Axiom

„Die reale Kraft, die auf einen Körper wirkt, hat ihren Ursprung im Vorhandensein eines anderen Körpers. Üben zwei Körper aufeinander Kräfte aus, so ist die Kraft \vec{F}_1 vom ersten auf den zweiten Körper im Betrag gleich groß der Kraft \vec{F}_2 vom zweiten Körper auf den ersten. Die Kräfte haben jedoch entgegengesetzte Richtung.“

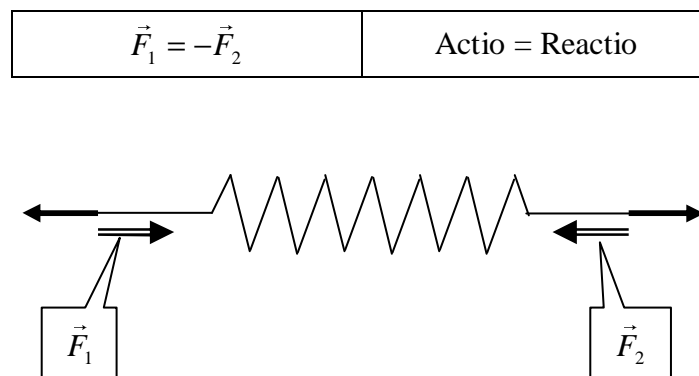
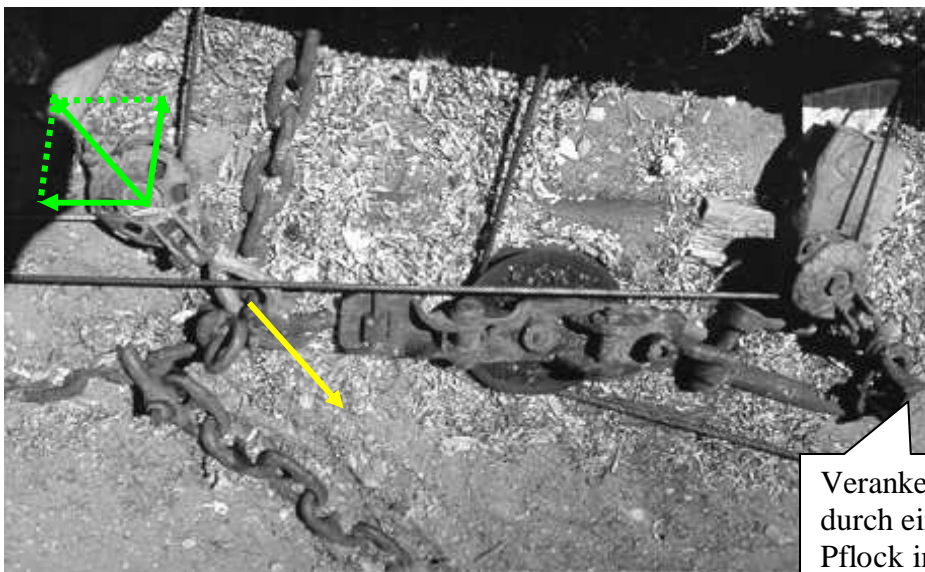


Abbildung 6 Angespannte Feder. Das System ist in Ruhe, an beiden Befestigungspunkten sind die Zugkräfte nach außen durch die nach innen wirkenden Kräfte der Feder kompensiert.

1.3.4 Zerlegung von Kräften und ihre Klassifizierung

1.3.4.1 Das Kräfteparallelogramm

Oft interessieren die Kraftwirkungen in Richtungen, die durch irgendeinen Aufbau vorgegeben sind. Am folgenden Beispiel der Schiffe auf einer Werft zeigt die Richtung der Lage der Ketten das Ergebnis der vektoriellen Addition der Kräfte.



Verankerung
durch einen
Pflock im Boden

Abbildung 7 Schiffe auf den Stapeln einer Werft (oben) und ihre Befestigung über ein am Boden verlegtes Netzwerk aus Ketten und Trossen (unten). Mit jeder Trosse wird ein Schiff auf dem Stapel gehalten. Wird die Kraft auf eine Trosse verringert, dann gleitet das Schiff ins Meer. Die zum oberen Bildrand verlaufenden Trossen enden an den Schiffen, über Umlenkrollen werden sie nach links und rechts zu Winden geführt, die im oberen Bild unter den bunten Abdeckungen stehen. Grün: Die gleichgrossen Kräfte auf die Trosse durch Schiff und Winde addieren sich vektoriell zur Zugkraft auf die Umlenkrolle. Gelb: Zu dieser gleich-grosse, aber entgegengesetzte Kraft an der Befestigung der Umlenkrolle im Ketten Netz.

Ist im Beispiel der Abbildung oben die Kraft auf die Umlenkrolle links und deren Befestigung von Interesse, so bietet sich die eingezeichnete Zerlegung an. Im abgebildeten Netzwerk der Ketten, das nur an wenigen Stellen in der Erde verankert ist, zeigen die Richtungen aller Ketten die resultierenden Krafrichtungen an.

1.3.4.1.1 Spannung im Seil

Wird ein zwischen zwei Wänden aufgespanntes Seil nachgespannt, z. B. um das unschöne Durchhängen einer Lampe zu beheben, dann wirken bei Annäherung an die Horizontale ungeahnte Kräfte auf das Seil und seine Befestigung in der Wand.

Versuch 5 Eine Masse von 100g ($F_g = 1\text{N}$) wird in die Mitte eines zwischen zwei Wänden verspannten Drahtseils von 27m Länge gehängt. Das Seil sinkt ca. 0,05 m ab und wird nachgespannt, bis die ursprüngliche Höhe erreicht ist. Eine im Seil eingebaute Federwaage zeigt die Zunahme der Zugkraft F_s um etwa 90 N.

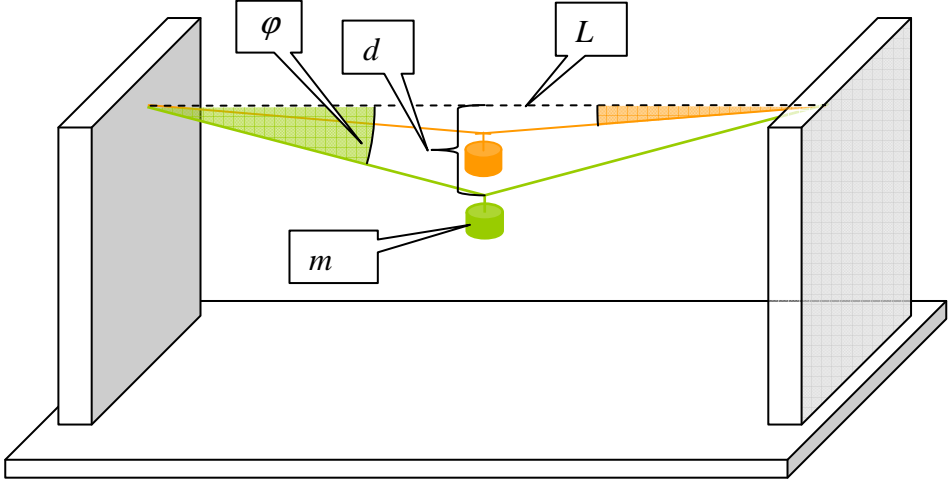
Ortsraum	
	
<p>Die Abbildung zeigt zwei unterschiedlichen Spannungen eines Seils: Grün eingezeichnet schwach gespannt mit Winkel $\varphi = 17^\circ$, rot straff mit $\varphi = 5^\circ$.</p>	
Formel	Anmerkung
$\tan \varphi = \frac{2 \cdot d}{L}$	<p>Winkel φ zwischen der Horizontalen und dem Seil, L Abstand der Verankerungen in der Wand, d Maß für den Durchhang: Vom tiefsten Punkt des Seils bis zur Horizontalen zwischen den Befestigungspunkten</p>

Tabelle 9 Verspannung einer Masse m zwischen zwei Wänden.

Die Zerlegung des Vektors der Schwerkraft der Masse \vec{F}_g in Komponenten in Richtung der Seile zeigt, dass bei $\varphi = 90^\circ$, wenn die Seile senkrecht nach unten hängen, jedes Seil die Hälfte der Schwerkraft trägt. Bei $\varphi = 17^\circ$ (grün im Bild) beträgt die Zugkraft in jedem Seil das 1,7-fache der Schwerkraft, bei $\varphi = 5^\circ$ steigt die Kraft im Seil auf das etwa 5-fache, spannt man weiter bis φ gegen Null, dann läuft die Zugkraft im Seil gegen ∞ .

Vektorraum der Kräfte																									
<p>Zerlegung der Gewichtskraft \vec{F}_g in Komponenten \vec{F}_S in Richtung der Seile, die Farben entsprechen der Darstellung im Ortsraum. Vom Ortsraum wurden nur die Winkel übernommen. Die Länge der Vektoren zeigt deren Beträge: Man erkennt, daß bei Übergang von großen Winkeln φ (grün) zu kleinen (rot) die Kraft im Seil ansteigt. Von den Kräfteparallelogrammen ist jeweils nur ein Dreieck gezeichnet.</p>																									
Formel	Anmerkung																								
$\sin \varphi = \frac{F_g}{2 \cdot F_S}$	Im rautenförmigen Kräfteparallelogramm mit Seite F_S und vertikaler Diagonalen F_g ist φ der halbe Winkel zwischen zwei Seiten.																								
$F_S = \frac{F_g}{2 \cdot \sin \varphi}$	F_S in Abhängigkeit vom Winkel und der vertikalen Kraft F_g																								
$F_S = k \cdot F_g$																									
$k = \frac{1}{2 \cdot \sin \varphi}$	<p>Verstärkungsfaktor k zwischen der vertikalen Kraft F_g und der Zugkraft F_S in Richtung des Seils in Abhängigkeit vom Winkel φ:</p> <table border="1"> <caption>Datenpunkte aus dem Graphen</caption> <thead> <tr> <th>Winkel φ in Grad</th> <th>Faktor k</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>28</td></tr> <tr><td>2</td><td>14</td></tr> <tr><td>4</td><td>10</td></tr> <tr><td>6</td><td>8</td></tr> <tr><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td>10</td><td>6.5</td></tr> <tr><td>12</td><td>6</td></tr> <tr><td>14</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>16</td><td>5.2</td></tr> <tr><td>18</td><td>5</td></tr> <tr><td>20</td><td>4.8</td></tr> </tbody> </table>	Winkel φ in Grad	Faktor k	0	28	2	14	4	10	6	8	8	7	10	6.5	12	6	14	5.5	16	5.2	18	5	20	4.8
Winkel φ in Grad	Faktor k																								
0	28																								
2	14																								
4	10																								
6	8																								
8	7																								
10	6.5																								
12	6																								
14	5.5																								
16	5.2																								
18	5																								
20	4.8																								

Tabelle 10 Zerlegung der Kräfte bei Verspannung einer Masse zwischen zwei Wänden und Verlauf des Verstärkungsfaktors zwischen der Gewichtskraft und der Zugkraft im Seil in Abhängigkeit vom Winkel φ zwischen der Horizontalen und dem Seil.

1.3.4.1.2 Kräfte auf der schiefen Ebene

Ein klassisches Beispiel zur Kräftezerlegung ist die Bewegung auf einer schiefen Ebene. Es wirkt einerseits die Schwerkraft senkrecht nach unten, andererseits ist die beschleunigende Kraft in Richtung der Bahn von Interesse. Die Schwerkraft soll also nach einer Komponente in Bahnrichtung, der „Tangentialkraft“, und einer senkrecht dazu, der „Normalkraft“, zerlegt werden. Die Letztere bewirkt den Andruck an die Bahn.

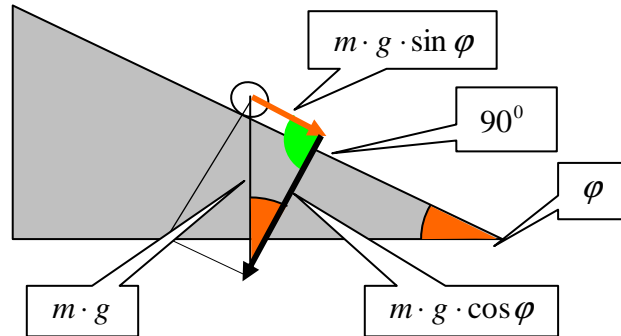


Abbildung 8 Kräfteparallelogramm auf der schiefen Ebene.

Formel	Anmerkung
$\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_t$	Zerlegung der Schwerkraft
$\vec{F}_n \perp \vec{F}_t$	Beide Komponenten stehen senkrecht zueinander
$F = m \cdot g$	Betrag der Schwerkraft
$F_n = F \cdot \cos \varphi$	Betrag der Normalkraft, senkrecht zur Bahn
$F_t = F \cdot \sin \varphi$	Betrag der Tangentialkraft, parallel zur Bahn
φ	Neigungswinkel der Bahn, zur Erdoberfläche gemessen

Tabelle 11 Zerlegung der Kräfte bei der schiefen Ebene.

Versuch 6 Messung der Tangentialkraft an der schiefen Ebene. Durch Beschleunigung=0 wird gezeigt, daß die Tangentialkraft auf M bei $\varphi = 30^\circ$ wegen $\sin 30^\circ = 0,5$ die Hälfte der Schwerkraft auf die Masse m beträgt.

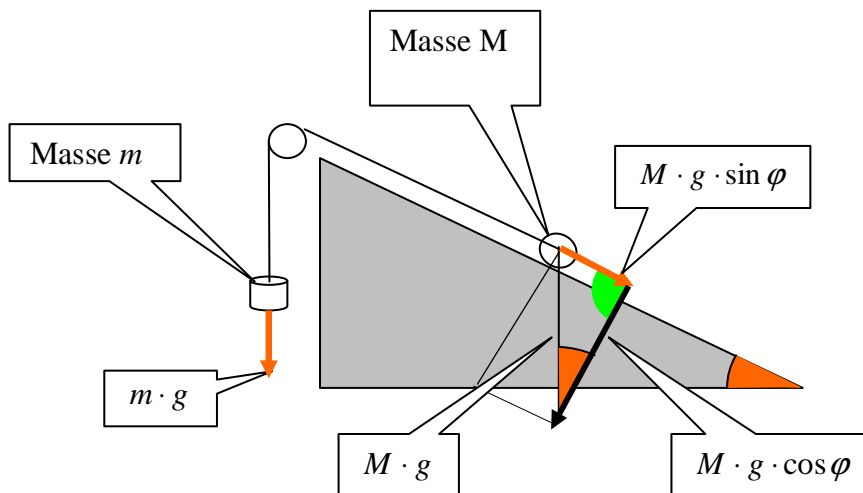


Abbildung 9 Im Gleichgewicht an der schiefen Ebene ist die Schwerkraft $m \cdot g$ auf die Masse m entgegengesetzt gleich der Hangabtriebskraft $M \cdot g \cdot \sin \varphi$ der Masse M.

1.3.4.2 Die vier Fundamentalkräfte

Reale Kräfte sind auf vier in der Natur realisierte Fundamentalkräfte zurückzuführen:

Fundamentalkraft		Kraft zwischen	Ursache für
Gravitationskraft		Schweren Massen	Anziehung zwischen Massen
Elektromagnetische Kraft	Coulombkraft	Ruhenden Ladungen	Vorgänge innerhalb der Atomhülle
	Magnetische Kraft	Bewegten Ladungen, Strömen	
Starke Wechselwirkung		Kernbausteinen	Kernkräfte zwischen Proton und Neutron
Schwache Wechselwirkung		Baryonen (Schwere Teilchen: Protonen, Neutronen) und Leptonen (Leichte Teilchen: Elektronen, Myonen, Neutrinos)	Zerfall des Neutrons in Proton, Elektron und Antineutrino

Tabelle 12 Klassifizierung der Kräfte

1.4 Gravitation und Schwerkraft

Allen ist die *Schwerkraft* bekannt, die jeden Körper, wirken keine unterstützenden Kräfte, „nach unten“ fallen lässt. Die Schwerkraft auf eine Masse ist aber die speziell an der Erdoberfläche beobachtete Auswirkung einer im ganzen Raum wirkenden, allen Massen eigentümlichen anziehenden Kraftwirkung, der *Gravitationskraft*. Sie erklärt die Bahnen der Himmelskörper, der Sonnen, Planeten und Monde ebenso wie die der Satelliten.



Abbildung 10 Links: Johannes Kepler (27.12.1571-15.11.1630). Astronom, studierte im Tübingen ev. Theologie. Rechts: Tycho Brahe (14.12.1546-24.10.1601). Astronom

1.4.1 Das Gravitationsgesetz

Die mit bloßem Auge gemachten Beobachtungen von Tycho Brahe über die Planetenorte, insbesondere seine Beobachtung des Mars, waren so exakt, daß Johannes Kepler bei der Aufarbeitung des von Brahe hinterlassenen Materials zu der Erkenntnis kam, daß die Marsbahn kein Kreis, sondern eine Ellipse ist. Neben diesem „ersten Keplerschen Gesetz“ formulierte er aus der Analyse der Beobachtungen zwei weitere Gesetzmäßigkeiten zur Kinetik des Umlaufs.

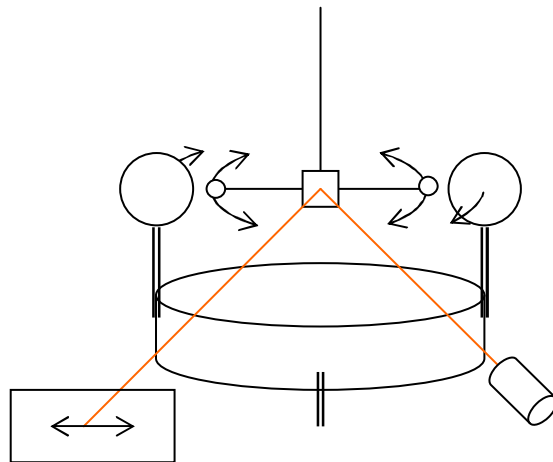
Isaac Newton erkannte, daß die Keplerschen Gesetze mit einem zwischen den Himmelskörpern als auch zwischen den Gegenständen auf der Erde wirkenden Kraftgesetz in Einklang stehen: dem Gravitationsgesetz. Es beschreibt die Anziehung zwischen zwei als punktförmig angenommene Massen. Für große Abstände ist die Annahme der in Punkten konzentrierten Massen immer gerechtfertigt. Für kugelförmige Massen zeigt die Rechnung als einzige Bedingung, daß sie sich nicht durchdringen dürfen.

Formel	Wert	Einheit	Anmerkung
$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$		N	Die Gravitationskraft ist eine Anziehungskraft zwischen zwei Massen, die in Richtung ihrer Verbindungslinie wirkt
G	$6,67259(85) \cdot 10^{-11}$	$\frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$	Gravitationskonstante
m_1		kg	Masse des ersten Körpers
m_2		kg	Masse des zweiten Körpers
R		m	Abstand zwischen den Körpern

Tabelle 13 Das Gravitationsgesetz

Die Gravitationskonstante kann sogar im Labormaßstab experimentell bestimmt werden. Eine Methode nach Cavendish (1798) nutzt eine Drehwaage: Zwei kleine Massen hängen an einem dünnen Torsionsfaden im evakuierten Gefäß, um die Dämpfung durch die Luft zu vermeiden. Ihnen gegenüber stehen zwei auf einem Drehschemel gelagerte große Kugeln. Am Pendel ist ein kleiner Spiegel befestigt, der durch Reflexion eines Laserstrahls die Richtung der Ebene anzeigt, in der sich die kleinen Kugeln gerade befinden.

Zunächst stehen die großen Kugeln den kleinen mit kleinstem Abstand gegenüber, das ganze System ist in Ruhe. Werden nun die beiden großen Kugeln ein Stück weit ausgelenkt und danach festgehalten, dann werden die kleinen Kugeln am Torsionsfaden durch die sich ändernde Gravitationskraft zwischen den Kugeln beschleunigt. Zusammen mit der rücktreibenden Kraft der Aufhängung führt die Beschleunigung zum Schwingen des „Torsionspendels“, aus dessen Frequenz die Gravitationskonstante bestimmt werden kann.



Versuch 7 Bestimmung der Gravitationskonstanten nach Cavendish. Qualitativ wird gezeigt, daß bei Verdrehen der großen Kugeln das Pendel in Schwingungen von 7,5 min Schwingungsdauer versetzt wird.