Kinematik

==

1. Geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit

Ein Körper bewegt sich gleichförmig, wenn der zurückgelegte Weg Δx proportional zu der dazu benötigten Zeit Δt ist.

Der konstante Quotient

$$\boxed{v = \frac{\Delta x}{\Delta t}} \text{ mit } \left[v\right] = 1\ \frac{m}{s} = 3{,}6\ \frac{km}{h}$$

ist die ***Geschwindigkeit v*** des Körpers. Sie gibt also an, wie viele Meter der Körper pro Sekunde zurücklegt.

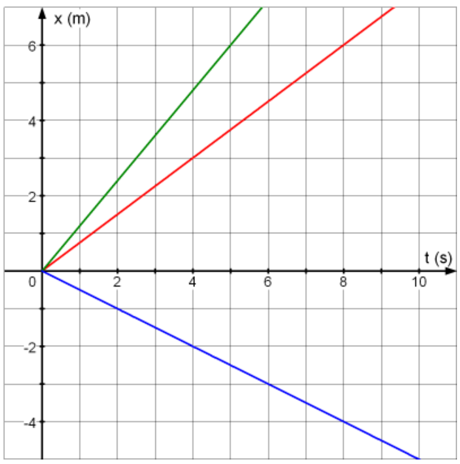
Die Geschwindigkeiten von Körpern, die sich in die entgegengesetzte Richtung bewegen, werden negativ gerechnet,

Entfernt sich ein Körper zur Zeit $t = 0$ mit konstanter Geschwindigkeit von einem Bezugspunkt weg, dann befindet er sich zur Zeit t am Ort

$$\boxed{x(t) = v \cdot t}$$

Das t-x-Diagramm einer solchen Bewegung ergibt eine Halbgerade durch den Nullpunkt des t-x-Koordinatensystems

Beispiel :



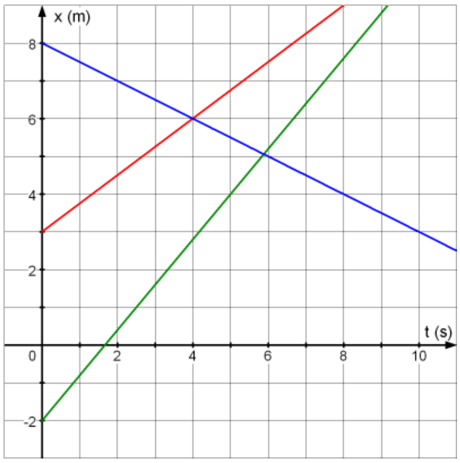
Zeit-Ort-Diagramme dreier Bewegungen mit den Geschwindigkeiten

$v_1 = 0{,}75\ \frac{m}{s}$, $v_2 = 1{,}2\ \frac{m}{s}$ und $v_3 = -0{,}5\ \frac{m}{s}$ und dem Startpunkt $x(0) = 0$.

Befindet sich der Körper zur Zeit $t = 0$ an der Position x_0, dann errechnet sich seine Position zur Zeit t mit

$$\boxed{x(t) = x_0 + v \cdot t}$$

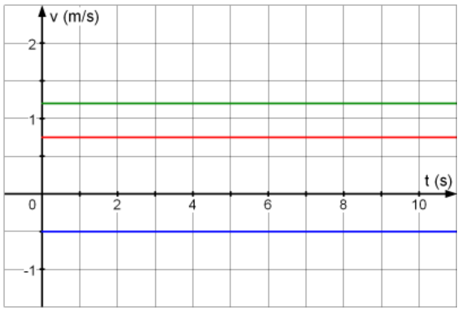
Beispiel :



Zeit-Ort-Diagramme dreier Bewegungen mit den Geschwindigkeiten

$v_1 = 0{,}75\ \frac{m}{s}$, $v_2 = 1{,}2\ \frac{m}{s}$ und $v_3 = -0{,}5\ \frac{m}{s}$, aber unterschiedlichen Startpunkten.

Die t-v-Diagramme zeigen die Konstanz der Geschwindigkeiten



Integrationsregel :

Der Inhalt der Fläche unter dem t-v-Diagramm gibt den zurücklegten Weg an.

2. Mittlere Geschwindigkeit und Momentangeschwindigkeit

Bewegt sich ein Körper nicht gleichförmig, dann nennt man den Quotienten aus zurückgelegtem Weg Δx und der dazu Δt benötigten Zeit die ***mittlere Geschwindigkeit*** $\bar{v}$ des Körpers im Zeitintervall Δt.

$$\boxed{\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}}$$

Ist das Zeitintervall Δt sehr klein, dann nennt man mittlere Geschwindigkeit auch die ***momentane Geschwindigkeit*** $v(t)$ ($t = t_1 \approx t_2$) des Körpers zur Zeit t der Messung.

---

3. Die gleichförmig beschleunigte Bewegung

Die Bewegung eines Körpers heißt ***beschleunigt***, wenn sich seine Geschwindigkeit mit der Zeit ändert.

Hat ein Körper zur Zeit t_1 die Momentangeschwindigkeit v_1 und zur Zeit t_2, die Momentangeschwindigkeit v_2, dann heißt

$$\boxed{\Delta v = v_2 - v_1}$$

die ***Geschwindigkeitänderung*** im Zeitintervall $\Delta t = t_2 - t_1$.

Die Bewegung eines Körpers heißt gleichmäßig beschleinigt, wenn die Geschwindigkkeitänderung Δv proportional zur Beschleunigungsdauer Δt ist.

Den konstanten Quotienten

$$\boxed{a = \frac{\Delta v}{\Delta t}} \text{ mit } \left[a\right] = \frac{1\,\frac{m}{s}}{s} = 1\,\frac{m}{s^2}$$

nennt man die ***Beschleunigung a*** des Körpers. Sie gibt an, um wie viel sich die Momentangeschwindigkeit v eines Körpers in einer Sekunde zu- bzw. abnimmt.

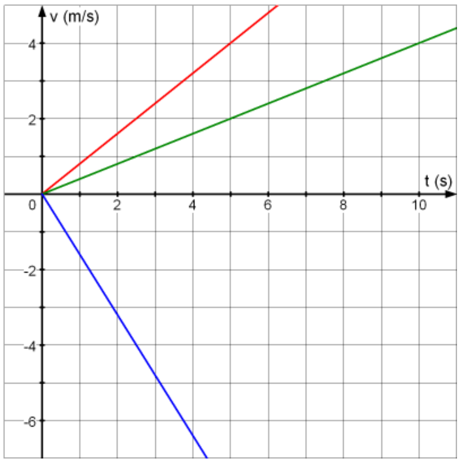
Ein Körper bewegt sich mit der Beschleunigung $1\,\frac{m}{s^2}$, wenn sich seine Geschwindigkeit pro Sekunde um $1\,\frac{m}{s}$ erhöht.

Ändert ein zur Zeit $t = 0$ sich in Ruhe befindlicher Körper seine Geschwindigkeit mit der Beschleunigung a, dann ist seine Geschwindigkeit zur Zeit t gegeben durch

$$\boxed{v(t) = a \cdot t}$$

Das t-v-Diagramm einer solchen Bewegung ergibt eine Halbgerade durch den Nullpunkt des t-v-Koordinatensystems.

Beispiel :



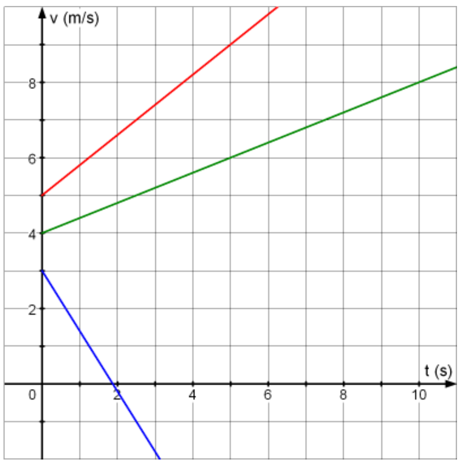
Zeit-Geschwindigkeits-Diagramme dreier Bewegungen mit den Beschleunigungen

$a_1 = 0{,}8\ \frac{m}{s^2}$, $a_2 = 0{,}4\ \frac{m}{s^2}$ und $a_3 = -1{,}6\ \frac{m}{s^2}$ und der Startgeschwindigkeit 0.

Hat der der Körper zur Zeit $t = 0$ die Geschwindigkeit v_0, dann errechnet sich seine Geschwindigkeit zur Zeit t

$$\boxed{v(t) = v_0 + a \cdot t}$$

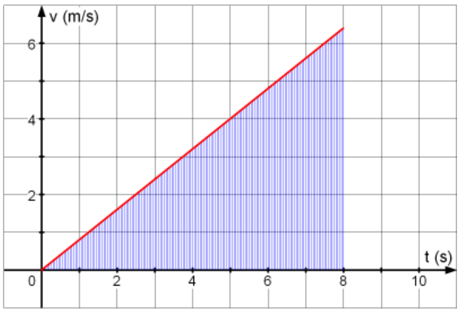
Beispiel :



Zeit-Geschwindigkeits-Diagramme dreier Bewegungen mit den Beschleunigungen

$a_1 = 0{,}8\ \frac{m}{s^2}$, $a_2 = 0{,}4\ \frac{m}{s^2}$ und $a_3 = -1{,}6\ \frac{m}{s^2}$ und verschiedenen Startgeschwindigkeiten v_0.

Wird ein Körper auf gerader Strecke von der Anfangsgeschwindigkeit 0 in der Zeit t auf die Geschwindigkeit v beschleunigt, dann ist die Fläche unter dem t-v-Diagramm ein rechtwinkliges Dreieck mit den Katheten t und v.



Daher gilt für den in der Beschleunigungphase zurückgelegten Weg bzw. seine Position zur Zeit t

$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2}\cdot v\cdot t = \frac{1}{2}\cdot(a\cdot t)\cdot t = \frac{1}{2}\cdot a\cdot t^2}$$

Allgemein erhält man folgende Bewegungsgleichungen

Startposition	**Startgeschwindigkeit**	**Beschleunigung**	**Geschwindigkeit zur Zeit t**	**Position zur Zeit**
0	v_0	0	$v(t) = v_0$	$x(t) = v_0\cdot t$
x_0	v_0	0	$v(t) = v_0$	$x(t) = v_0\cdot t + x_0$
0	0	a	$v(t) = a\cdot t$	$x(t) = \frac{1}{2}a\cdot t^2$
0	v_0	a	$v(t) = a\cdot t + v_0$	$x(t) = \frac{1}{2}a\cdot t^2 + v_0\cdot t$
x_0	v_0	a	$v(t) = a\cdot t + v_0$	$x(t) = \frac{1}{2}a\cdot t^2 + v_0\cdot t + x_0$

Dynamik

==

1. Die Newtonschen Gesetze

Newtonscher Trägheitssatz

Wirkt keine Kraft auf einen Körper oder ist die Summe aller auf einen Körper wirkenden Kräfte Null, dann ist der Körper in Ruhe oder er bewegt sich geradlinig mit gleichbleibender Geschwindigkeit.

Zweites Newtonsches Gesetz

Um einem Körper mit der Masse m die Beschleunigung a zu erteilen, muss die Summe aller angreifenden Kräfte den Wert

$$\boxed{F = m \cdot a} \text{ mit } [F] = 1\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = 1\ \mathrm{N}$$

haben. Man nennt F die beschleunigende Kraft.

Folgerung :

Ist F die Summe aller auf einen Körper der Masse m wirkenden Kräfte, dann bewegt er sich mit der Beschleunigung

$$a = \frac{F}{m}$$

Gesetz von Actio und Reactio

Die Kräfte, die zwei Körper aufeinander ausüben, sind immer entgegengesetzt gleich d.h. übt ein Körper 1 die Kraft $\vec{F}_{12}$ auf einen Körper 2 aus, und ist $\vec{F}_{21}$ die Kraft, die der Körper 2 auf den Körper 1 ausübt, dann gilt

$$\boxed{\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}}$$

---

2. Die Methode der kleinen Schritte

Ist die beschleunigende Kraft F, die auf einen Körper der Masse m wirkt, keine Konstante, dann gilt dies wegen $a = \frac{F}{m}$ auch für die Beschleunigung a.

Zur näherungsweisen Untersuchung des Bewegungsablaufs zerlegt man dann das Bewegungsintervall $\left[0; t\right]$ in kleine Teilintervalle der Breite Δt und nimmt an, dass sich die Kraft F und damit die Beschleunigung a sowie die Geschwindigkeit v in einem solchen Teilintervall nur unwesentlich ändern.

Sind dann

x_i der Ort,

v_i die Geschwindigkeit

und

a_i die Beschleunigung

des Körpers zu Beginn des i-ten Teilintervalls, dann ändern sich diese Werte zu

$\boxed{x_{i+1} = x_i + v_i \cdot \Delta t}$ und $\boxed{v_{i+1} = v_i + a_i \cdot \Delta t}$

und stellen somit die Ausgangswerte für das $i + 1$-te Teilintervall dar.

So lässt sich iterativ die Bewegung analysieren.

Beispiel : ***Fallbewegung mit Luftwiderstand***

Bewegt sich ein Körper mit der Geschwindigkeit v, dann wirkt auf ihn die Luftwiderstandskraft

$$\boxed{F_W = \frac{1}{2} c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot v^2}$$

Dabei ist

c_W Luftwiderstandzahl

A Querschnittsfläche des Körpers

ρ_L Dichte der Luft

Beschleunigte Masse : m

Beispiel : Freier Fall mit Luftreibung

Beschleunigende Kraft : $F = G + F_W = m \cdot g - \frac{1}{2} c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot v^2$

2. Newtonsches Gesetz

$$m \cdot a = m \cdot g - \frac{1}{2} c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot v^2 \quad \Rightarrow \quad a = g - \frac{1}{2} \frac{c_W \cdot \rho_L \cdot A}{m} \cdot v^2$$

Die Beschleunigung nimmt mit wachsender Geschwindigkeit ab.

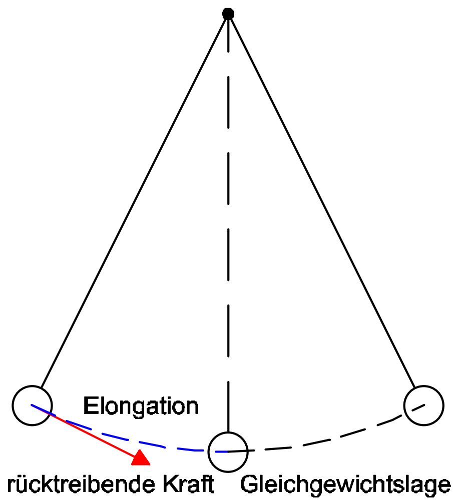
Ist $a = 0$, dann ist die Grenzgeschwindigkeit erreicht.

$$0 = g - \frac{1}{2} \frac{c_W \cdot \rho_L \cdot A}{m} \cdot v_{Grenz}^2 \quad \Rightarrow \quad v_{Grenz} = \sqrt{\frac{2g \cdot m}{c_W \cdot \rho_L \cdot A}}$$

Schwingungen

==

1. Allgemeines



Die ***periodische Bewegung*** eines Körpers der Masse m um eine ***Gleichgewichtslag***e nennt man ***mechanische Schwingung***.

Eine Schwingung tritt dann auf, wenn bei der Auslenkung des Körpers aus seiner Gleichgewichtslage eine ***rücktreibende Kraft*** in Richtung der Gleichgewichtslage auftritt.

Die Schwingung wird dann durch diese rücktreibende Kraft und die Trägheit der Masse m aufrechterhalten.

Der Weg um den der Körper aus seiner Gleichgewichtslage ausgelenkt ist, nennt man seine ***Elongation***, die maximale Elongation heißt ***Amplitude A*** der Schwingung.

Die Dauer einer Hin- und Herbewegung ***heißt Schwingungsdauer T*** und die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde ist die ***Frequenz f*** der Schwingung d.h. führt der Körper in der Zeit t genau n Schwingungen aus, dann ist

$$\boxed{f = \frac{n}{t} = \frac{1}{T}} \text{ mit} \left[f \right] = \frac{1}{s} = s^{-1} = 1 \text{ Hz } \left(\text{Hertz}\right)$$

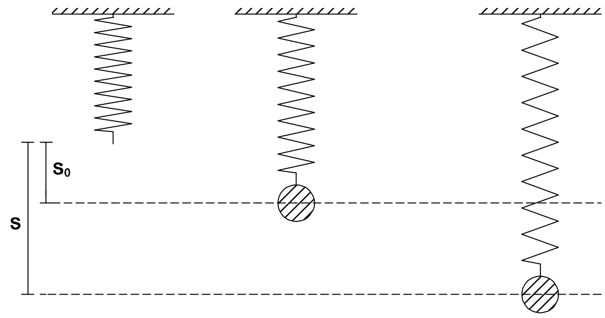
Bei Schwingungen werden ständig verschiedene Energieformen ineinander umgewandelt.

Bleibt die mechanische Energie erhalten, dannn heißt die Schwingung ungedämpft, andernfalls spricht man von einer gedämpften Schwingung.

---

2. Die harmonische Schwingung

Beispiel : Das Federpendel



Für die Gleichgewichtslage gilt : $m \cdot g = D \cdot s_0$

D ist die Härte der Feder mit $\left[D\right] = 1\ \frac{N}{m} = 0{,}01\ \frac{N}{cm}$.

Kraft auf die schwingende Masse m, wenn die Feder um s gedehnt ist :

$F = D \cdot s - m \cdot g = D \cdot s - D \cdot s_0 = -D \cdot (s_0 - s) = -D \cdot y$ mit der Elongation $y = s_0 - s$

d.h die Rückstellkraft ist proportional zur Elongation.

Beachte :

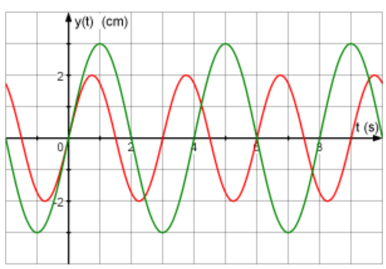
Die Elongation wird positiv gerechnet, wenn sich der Körper über der Gleichgewichtslage befindet.

Mit der Methode der kleinen Schritte lässt sich dann zeigen, dass für die Elongation y(t) zur Zeit t bei geeigneter Wahl von $t = 0$ gilt

$$\boxed{y(t) = A \sin(\frac{2\pi}{T} \cdot t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)}$$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ heißt ***Kreisfrequenz*** der Schwingung.

Beispiel :



Die Zeit-Elongations-Diagramme zweier Schwingungen mit $A_1 = 2$ cm und $T_1 = 3$ s bzw. $A_2 = 3$ cm und $T_2 = 4$ s

Für die Schwingungsdauer T gilt

$$\boxed{T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}}$$

Bei der Schwingung am Federpendel werden kinetische Energie, potentielle Energie der Lage und der Elastizität ineinander verwandelt.

Die maximale kinetische Energie hat der schwingende Körper beim Durchgang durch die Gleichgewichtslage. Es gilt

$$\boxed{E_{kin\ max} = \frac{1}{2} D \cdot A^2}$$

Ändert sich die Elongation eines schwingenden Körpers sinusförmig, dann nennt man die Schwingung ***harmonisch***.

Ein schwingungsfähiges System schwingt genau dann harmonisch, wenn die ***Rückstellkraft*** proportional zur Elongation ist, d.h es gilt

$$\boxed{F = -D \cdot y}$$

mit einer Konstanten D. D heißt im allgemeinen Fall ***Richtgröße*** der harmonischen Schwingung. Für alle harmonischen Schwingungen gilt

$$\boxed{T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}}$$

Beispiel :

Die Schwingung am Fadenpendel ist für kleine Auslenkwinkel annähernd harmonisch mit

$$\boxed{T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}}$$

Erhaltungssätze

==

1. Arbeit

Bewegt sich ein Körper unter dem Einfluss einer in Wegrichtung wirkenden Kraft F um die Strecke Δx, dann wird an dem Körper die Arbeit

$$\boxed{\Delta W = F \cdot \Delta x} \text{ mit } \left[\Delta W\right] = 1\ \text{Nm} = 1\ \text{J}$$

verrichtet

---

2. Energie und Energieerhaltung

Ist ein Körper in der Lage die Arbeit W oder etwas dazu Äquivalentes zu verrichten, dann besitzt er die Energie $E = W$.

Damit ist $\left[E\right] = 1\ \text{Nm} = 1\ \text{J}$.

Energieformen

Energie kann in verschiedenen Formen auftreten. Die Gesamtenergie eines physikalischen Systems ist die Sunme aller auftretenden Energieformen.

	Energieform	**Größe**
Masse m im Schwerefeld der Erde in der Höhe h über einem vereinbarten Bezugsniveau	***potentielle Energie*** der Lage	$E_{pot} = mgh$
Feder der Härte D um die Strecke x gedehnt bzw. gestaucht	***potentielle Energie*** der Elastizität	$E_{elasT} = \frac{1}{2} D \cdot x^2$
Masse m mit der Geschwindigkeit v	***kinetische Energie***	$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

Energieerhaltungsatz

Bezieht man alle Energieformen ein, dann können sich die Energieformen, nicht aber die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems ändern.

Ein physikalisches System heißt abgeschlossen, wenn es keine Wechselwirkung mit anderen physikalischen System gibt.

Impulserhaltung

==

Das Produkt aus der Masse m und der Geschwindigkeit v eines Körpers heißt sein Impuls p.

$$\boxed{p = m \cdot v} \text{ mit } \left[p\right] = 1\ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1\ \text{Ns}$$

Impulserhaltungssatz

Die Summe der Impulse der Körper eines abgeschlossenen Systems, der Gesamtimpuls, ändert sich nicht. Die Impulse der einzelnen Köper des Systems können sich dagegen ändern.

Anwendung :

Stoßen zwei Körper mit den Massen m_1 und m_2 sowie den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 zusammen,

dann gilt für die Geschwindigkeiten u_1 und u_2 dieser Körper nach dem Stoß

$$\boxed{m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2}$$

Ein Stoß heißt vollkommen elastisch, wenn neben dem Impuls auch die gesamte kinetische Energie erhalten bleibt.

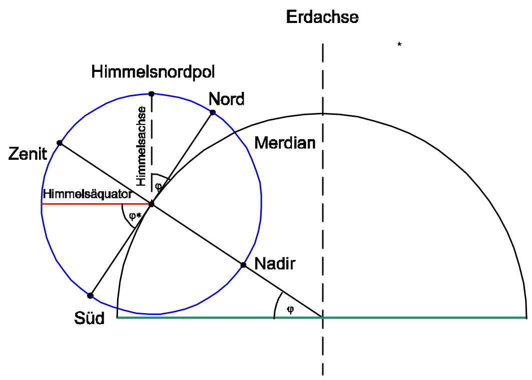
Ein Stoß heißt vollkommen unelastisch, wenn beide Körper nach dem Stoß aneinander haften bleiben und sich mit gemeinsamer Geschwindigkeit $u = u_1 = u_2$ bewegen.

Beim vollkommen unelastischen Stoß geht mechanische Energie verloren.

Astronomische Weltbilder

==

1 Beobachtungen am Himmel



- Alle Gestirne beschreiben Kreise parallel zum ***Himmelsäquator*** bzw. um die Himmelspole.

  Die meisten Gestirne gehen daher in der Osthälfte des Horizonts auf und in der Westhälfte des Horizonts unter.

- Es gibt auch Sterne, die ständig über dem Horizont bleiben. Solche Sterne heißen ***Zirkumpolarsterne***.

Die scheinbare tägliche Bewegung aller Gestirne an der Himmelskugel rührt von der ***Erdrotation*** her. Eine Umdrehung der Himmelskugel dauert einen ***Sterntag***.

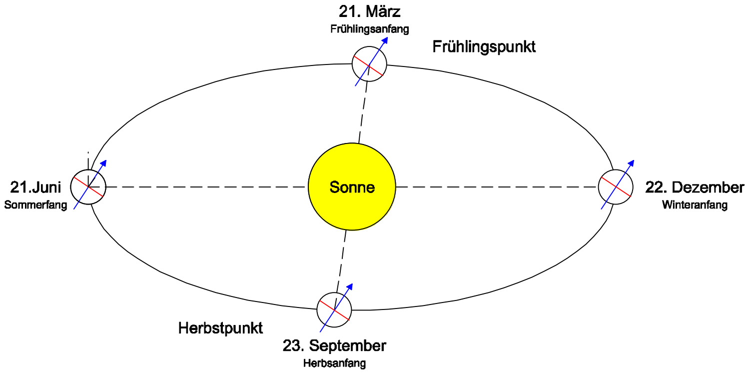
Ein ***Sterntag***, das heißt die Dauer einer Rotation der Erde um ihre Achse bezogen auf den Sternenhimmel dauert 23 Stunden 56 Minuten 4,1 Sekunden. Der ***mittlere Sonnentag***, mit einer Dauer von 24 Stunden, bezieht sich auf die Rotation der Erde in Bezug zur Sonne.

Infolge der Umlaufbewegung der Erde um die Sonne scheint sich für einen Beobachter auf der Erde die ***Sonne*** langsam relativ zu den Sternbildern an der Himmelskugel zu bewegen.

Dabei durchläuft sie die Sternbilder des Tierkreises.In Wirklichkeit ist es die Bewegung der Erde, die dadurch wahrnehmbar wird.

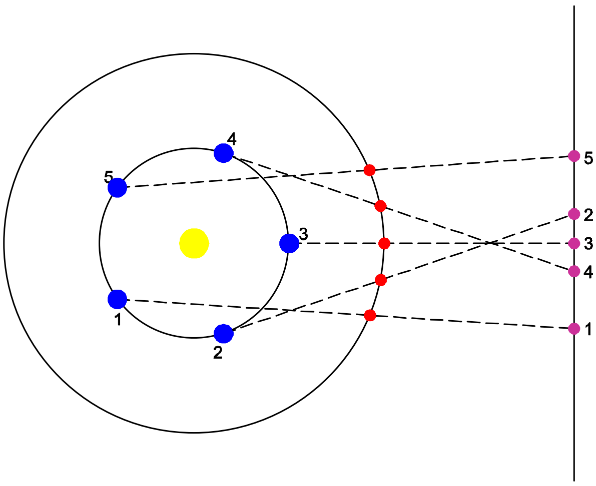
Die scheinbare jährliche Sonnenbahnlinie durch den Tierkreis wird als ***Ekliptik*** bezeichnet. ***Ekliptik*** und ***Himmelsäquator*** sind gegeneinander geneigt (Schiefe der Ekliptik 23°27'); sie schneiden sich in zwei Punkten.

Daneben gibt es ***Wandelsterne***, die ihre Lage relativ zu den anderen Sternen ändern.



2. Das geozentrische Weltbild

Im geozentrischen Weltbild steht die ***kugelförmige Erde*** (griechisch geos) im Zentrum des Universums. Alle weiteren Himmelskörper (Mond, Sonne, Planeten) umkreisen die Erde in verschiedenen von innen nach außen konzentrisch angeordneten ***Sphären*** - durchsichtigen Hohlkugeln). Die äußerste Sphäre wird von den Fixsternen besetzt.



Zur Erklärung rückläufiger Bewegungen der Planeten war die Einführung weiter Kreisbewegungen erforderlich.

---

3 Die kopernikanische Revolution - das heliozentrische Weltbild

---

Nikolaus Kopernikus *: De revolutionibus orbium coelestium*

- Der Mond kreist um die Erde.

- Die Planeten kreisen um die Sonne.

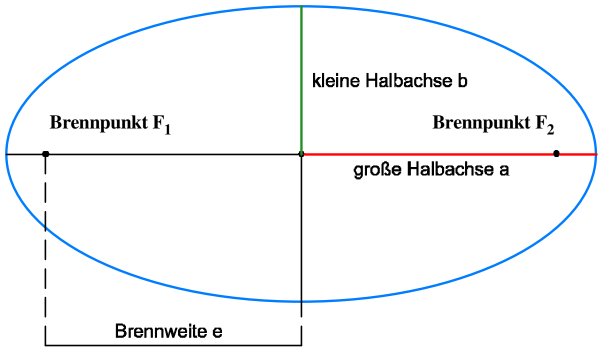
- Die Bewegung der Fixsterne ist eine Folge der Erdrotation.

- Die beobachtbaren Planetenbahnen sind einer Folge ihrer Bewegung um die Sonne und der Erdrotation.

---

4 Die Keplerschen Gesetze

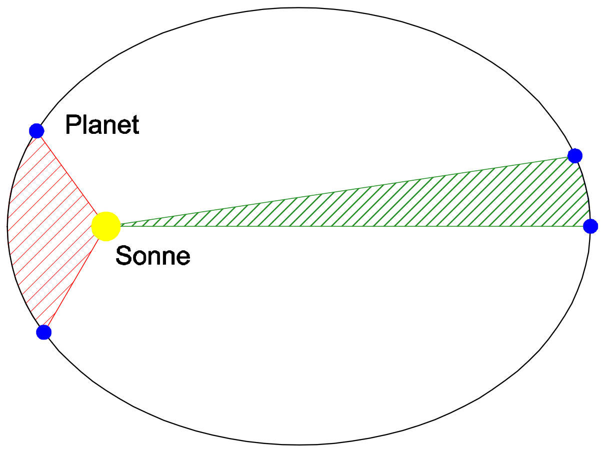
Die Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet!



Eine Ellipse ist der geometrische Ort aller Punkte, die von zwei gegebenen Punkten F_1 und F_2, jeweils die gleiche Abstandssumme haben.

F_1 und F_2 nennt man die Brennpunkte der Ellipse.

Das ***Zweite Keplersche Gesetz*** beschreibt die Bewegung der Planeten auf ihren Bahnen um die Sonne:



Die Verbindungslinie Sonne - Planet überstreicht in gleichen Zeiträumen gleiche große Flächen !

Bemerkung :

- Die Bahngeschwindigkeit eines jeden Planeten ändert sich infolge der elliptischen Umlaufbahn natürlich ständig. Je näher sich der Planet an der Sonne befindet, desto größer wird seine Geschwindigkeit.

Die höchste Geschwindigkeit erreicht ein Planet in Sonnennähe (***Perihel***), die niedrigste in Sonnenferne (***Aphel***).

Da dritte Keplersche Gesetz stellt eine Beziehung zwischen den Umlaufzeiten und der Bahngröße der Planeten her :

Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen der Bahnen dieser Planeten.

Mathematisch formuliert:

$$\boxed{\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}}$$

Bemerkung :

- $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}$ d.h. für alle Planeten des Sonnensystems ist der Quotient

  aus dem Quadrat der Umlaufdauer und dem Kubus der großen Halbachse gleich einer Konstanten C_S.

- Der Wert der Konstanten C_S hängt vom Stern bzw. dem Zentralgestirn, das umkreist wird, ab.

Die drei Keplerschen Gesetze in dieser Form gelten streng genommen nur, wenn die Masse des Zentralgestirns verglichen mit der Masse des Planeten sehr, sehr groß ist.

Ist dies nicht der Fall kreisen Zentralgestirn und Planet um ihren gemeinsamen Schwerpunkt.

Kreist mehr als ein Planet um das Zentralgestirn, üben auch die Planeten aufeinander aus.
Man erhält ein ***Vielteilchenproblem***.

Das moderne Weltbild

Kosmologisches Prinzip

- Das Weltall ist homogen d. h. es gibt keine ausgezeichneten Punkte im All.

- Das Weltall ist isotrop, d.h. es gibt keine ausgezeichnete Richtung im All.

Aufbau des Weltalls

• riesige Ansammlung von Sternen : ***Galaxien***

Beispiel :

Die Sonne liegt in der Milchstraße mit einem schwarzem Loch als galaktischem Zentrum.

• Die Sterne einer Galaxie befinden sich in größeren Ansammlungen, die Sternhaufen genannt werden.

- Im Innern der Galaxien findet man ***offene Sternhaufen***. Sie bestehen aus relativ jungen Sternen und driften auseinander.

- Im ***Halo*** (kugelförmige Umgebung) einer Galaxie findet man gravitativ stark zusammengehaltene ***Kugelsternhaufen***.

  Diese bestehen aus sehr alten Sternen, die sehr dicht angeordnet sind.

• Galaxien sind nicht gleichförmig im Raum verteilt, sondern bilden Galaxiengruppen und ***Galaxienhaufen***.

---

6. Entstehung des Weltalls

Der ***Urknall*** ist nach dem ***Standardmodell der Kosmologie*** der ***Beginn des Universums***. I

Der Urknall bezeichnet keine "Explosion" in einem bestehenden Raum, sondern die gemeinsame Entstehung von ***Materie***, ***Raum*** und ***Zeit*** aus einer ursprünglichen ***Singularität***.

Indizien für den Urknall

• ***Rotverschiebung*** und ***Gesetz von Hubble***

Beobachtung von ***V. Slipher*** (1915) :

Das Licht weit entfernter Galaxien kommt stark zu größeren Wellenlängen (rotverschoben) bei uns an

Folgerung von E. Hubble(1929) :

Diese Galaxien entfernen sich von uns mit einerGeschwindigkeit proportional zu ihrer Entfernung

$$\boxed{\mathbf{v = H \cdot r}} \text{ mit } H = 72 \pm 7 \ \frac{\frac{\text{km}}{\text{s}}}{\text{Mpc}}$$

→ Alter des Weltalls ca. 15 Milliarden Jahre

• ***Arno Penzias*** und ***Robert Wilson*** (1965) entdecken mit einem ***Mikrowellendetektor*** die 2,7 K Hintergrundstrahlung.
