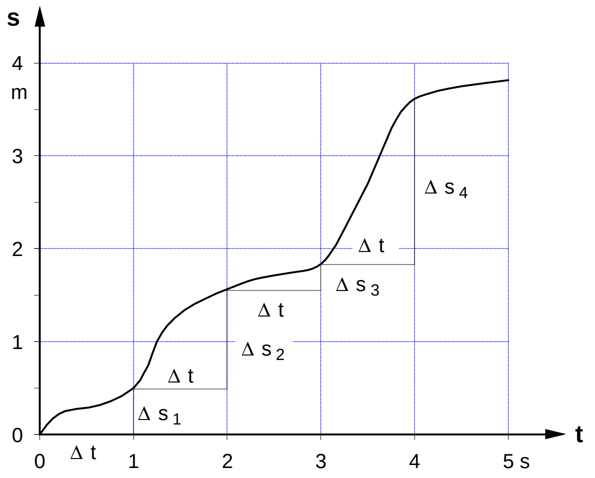
Kurs: **PRINZIPIEN der MECHANIK** | Name: | PHY-6-F.DOC - 30.08.01

Arbeitsblatt Nr. **6** : **Gleichförmige Bewegung** und **Geschwindigkeit**

1. Die ungleichförmige Bewegung

Legt ein Körper während einer Ortsveränderung in der Zeit **t** in gleichen Zeitabschnitten **Δt** stets __u n gleiche Wegabschnitte__ **Δs** zurück, so führt der Körper eine **ungleichförmige Bewegung** aus.

● **Weg-Zeit**-Diagramm einer ***ungleichförmigen*** Bewegung



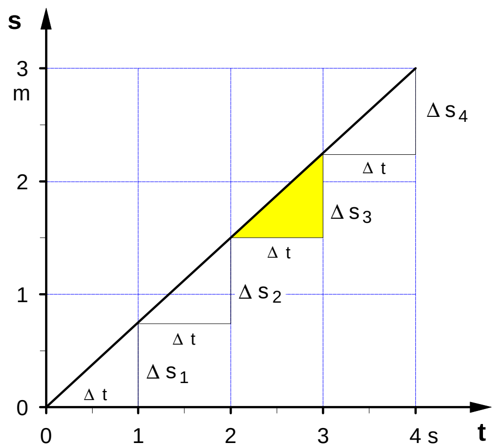
Das Weg-Zeit-Diagramm läßt unschwer erkennen, daß es sich bei der ungleichförmigen Bewegung um eine komplizierte Bewegungsform handelt, die jedoch den in der Natur und im Experiment wahrnehmbaren wirklichen Bewegungen entspricht. Dessen war sich Galileo **GALILEI** (1564-1642), der sich als erster um eine systematische Beschreibung von Bewegungsabläufen bemühte, bewußt. Gleichwohl ging er in seinen kinematischen Betrachtungen davon aus, daß "es durchaus gestattet" sei, "irgend eine Art der Bewegung beliebig zu ersinnen und die damit zusammenhängenden Ereignisse zu betrachten". Angesichts der Kompliziertheit der wirklichen Bewegungen definierte Galilei zunächst einen einfachen Sonderfall, nämlich den der "gleichförmigen" Bewegung. "Die gleichförmige Bewegung", heißt es bei Galilei, "müssen wir allem zuvor beschreiben."

Vgl.: G.Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, Leiden 1638, Nachdruck: Darmstadt 1973, S.146 f. und S. 141

2. Sonderfall : Die **gleichförmige Bewegung**

Als ***gleichförmige*** **Bewegung** definierte GALILEI jene Form der Ortsveränderung, bei der ein Körper "in irgend welchen" **gleichen** Zeitabschnitten **Δt** stets __gleiche W e g abschnitte__ **Δs** zurücklegt.

● **Weg-Zeit-Diagramm** einer ***gleichförmigen*** **Bewegung**



Aus der obigen Definition folgt, daß der Graph einer gleichförmigen Bewegung im **s-t-**Diagramm eine **Gerade** ist, d.h. es ist **s ~ t**. Analog zur Geradengleichung **y = m · x** in der Mathematik gilt damit folgende Funktionsgleichung:

$\mathbf{s = K \cdot t}$, wobei der Steigungsfaktor $K = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

● **definiert** ist als die "**Geschwindigkeit v**" , d.h.:

$$\boxed{v = \frac{\Delta s}{\Delta t}}$$

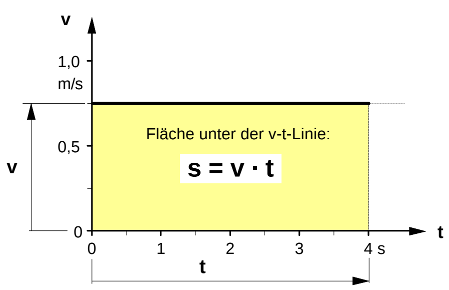
Maßeinheit der Geschwindigkeit **v** :

$$[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{1\ \text{m}}{1\ \text{s}} = 1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

● Damit gilt für das **Weg-Zeit-Gesetz** der ***gleichförmigen*** Bewegung:

$$\boxed{s = v \cdot t}$$ wobei __**v = konstant**__ ist.

● **Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm** der ***gleichförmigen*** **Bewegung**



Da die Geschwindigkeit **v** konstant ist, wird in dem **v-t-**Diagramm mit dem Produkt " **v · t** " der Inhalt der Rechteck**fläche** unter der **v-t-**Linie angegeben.

Demnach kann die **Fläche** unter der **v-t-**Linie als ein Maß für den __**zurückgelegten Weg**__ gedeutet werden.

Kurs : **PRINZIPIEN der MECHANIK**	Name: PHY-8-1F.DOC - 02.09.01	
Arbeitsblatt Nr. **8** :	**Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung**	Seite **1**

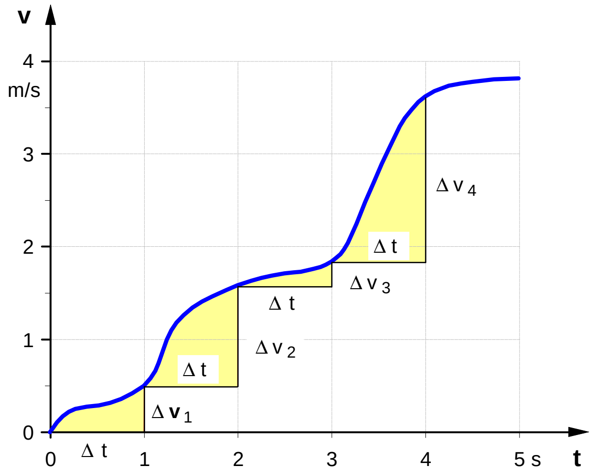
1. Die ungleichförmige Beschleunigung

> Nimmt die **Geschwindigkeit** eines Körpers in gleichen Zeitabschnitten **Δt** stets um ***ungleiche*** Beträge **Δv** zu, so führt der Körper eine ***ungleichförmig* beschleunigte Bewegung** aus.

- **Geschwindigkeit-Zeit-**Diagramm einer ***ungleichförmig*** beschleunigten Bewegung

Bei der ***ungleichförmigen*** *Beschleunigung* handelt es sich um eine sehr komplizierte Bewegungsform. Auch wenn sie den in der Realität wahrnehmbaren Bewegungen häufig entspricht, wollen wir zur Darstellung der beschleunigten Bewegung in Anlehnung an Galilei zunächst einen einfachen ***Sonderfall*** *definieren*, nämlich den der ***gleichförmigen*** *Beschleunigung*. Galilei bezog sich dabei übrigens auf "Erscheinungen", wie sie "bei den *frei fallenden Körpern in der Natur* vorkommen." Er geht davon aus, "daß ein aus der Ruhelage herabfallender Stein nach und nach neue Zuwüchse an Geschwindigkeit erlangt", und wirft dann die Frage auf: "Warum soll ich nicht *glauben*, daß solche Zuwüchse an Geschwindigkeit in *allereinfachster, Jedermann plausibler Weise* zu Stande kommen?" Weiter heißt es dann bei Galilei: "Mit dem Geiste (!) erkennen wir diese Bewegung als einförmig und in gleichbleibender Weise stetig beschleunigt, da in irgend welchen gleichen Zeiten stets gleiche Geschwindigkeitszunahmen sich addieren."

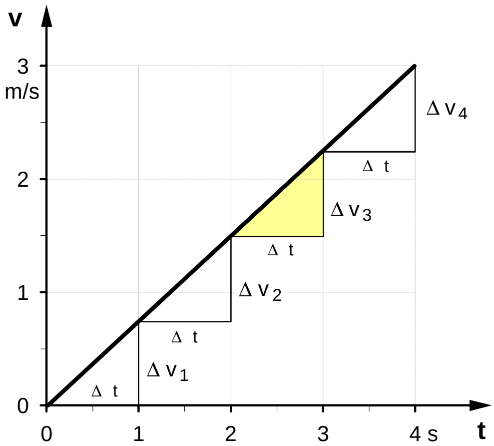
Vgl.: G.Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige (Discorsi), Leiden 1638, Nachdruck: Darmstadt 1973, S.147 und S.148.



2. Sonderfall : Die gleichförmig beschleunigte Bewegung

> Als ***gleichförmig*** **beschleunigte Bewegung** definierte GALILEI jene Form der Geschwindigkeitsänderung, bei der ein Körper "in irgend welchen" **gleichen** Zeitabschnitten **Δt** stets ***gleiche*** Geschwindigkeits**zunahmen** **Δv** erfährt. Sie wird häufig auch als ***gleichmäßig*** beschleunigte Bewegung bezeichnet.

- **Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm** einer ***gleichförmig beschleunigten*** **Bewegung**



Aus der obigen Definition folgt, daß der Graph einer gleichförmigen Beschleunigung im **v-t-**Diagramm eine **Gerade** ist. Analog zur Geradengleichung **y = m · x** in der Mathematik gilt damit folgende Funktionsgleichung:

$$\mathbf{v} = K \cdot \mathbf{t} \quad , \quad \text{wobei der Steigungsfaktor} \quad K = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

- definiert ist als die " **Beschleunigung a** " , d.h.:

$$\boxed{a = \frac{\Delta v}{\Delta t}}$$

Maßeinheit der Beschleunigung **a** :

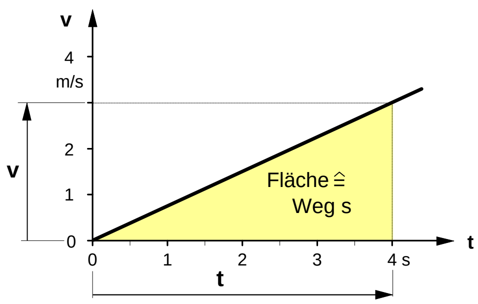
$$[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{1\ \text{m/s}}{1\ \text{s}} = 1\ \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s^2}}$$

- Damit gilt für das **Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz** der ***gleichförmig beschleunigten*** Bewegung:

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

wobei **a = konstant** ist.

- **Weg-Zeit-Gesetz** der ***gleichförmig beschleunigten*** **Bewegung**



Auch hier wollen wir von der bereits bei der gleichförmigen Bewegung entwickelten Überlegung ausgehen, daß die **Fläche** unter der **v-t-**Linie ein Maß für den zurückgelegten Weg **s** sei. Damit gilt für den in der Zeit **t** zurückgelegten **Weg** :

$$s = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t \qquad \text{mit} \qquad v = a \cdot t$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t \cdot t \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2}$$

Kurs : **PRINZIPIEN der MECHANIK**	Name: PH-13-1F.DOC - 30.11.01	
Arbeitsblatt Nr. **13** :	**Zeitintegrale in der Kinematik**	Seite **1**

1. Bestimmung der **Weg**funktion **s** = f (t) aus der **Geschwindigkeit**sfunktion **v** = f (t)

- **gegeben:** Beliebige **Geschwindigkeitsfunktion v**(t)
- **gesucht:** **Wegfunktion s** = f(t) zur Berechnung des Weges, den der Körper in einer beliebigen Zeit **t** zurückgelegt hat, d.h. also **s**(t) = **?**
- **Lösung:** Wir gehen von dem **Leitgedanken** aus, daß die *Flächen*zunahme unter der **v**(t)–Linie ein Maß für die *Weg*zunahme sei (Vgl. dazu den unten angegebenen Galilei-Text).

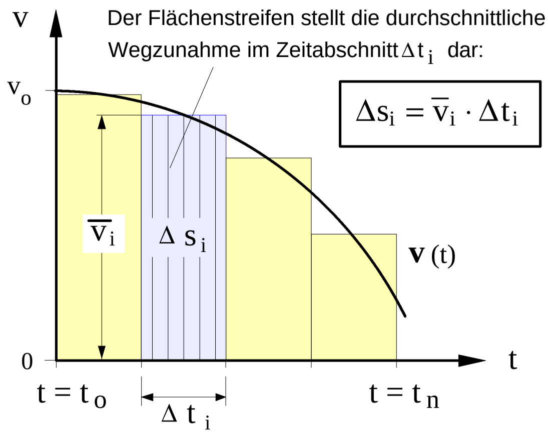


Bild 1 : Graph einer beliebigen Geschwindigkeit-Zeit-Funktion **v**(t)

$\overline{\mathbf{v}}_i$ ... Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeitabschnitt $\Delta \mathbf{t}_i$

(1) **Näherungsweise** kann als Maß für den bis zum Zeitpunkt **t** = $\mathbf{t}_n$ zurückgelegten Weg **s**(t) die *Fläche* unter der ***Treppenlinie*** angenommen werden:

$$\boxed{s(t) \approx \sum_{i=1}^{n} \Delta s_i = \sum_{i=1}^{n} \overline{v}_i \cdot \Delta t_i}$$

In Worten: Der bis zum Zeitpunkt **t** = $\mathbf{t}_n$ zurückgelegte Weg **s**(t) ist näherungsweise die Summe aller Wegzunahmen $\Delta \mathbf{s}_i$ im Zeitraum von **t** = $\mathbf{t}_o$ bis **t** = $\mathbf{t}_n$.

(2) Eine **exakte Bestimmung** der *Fläche unter der **v**–**t**–**Linie*** und damit des bis zum Zeitpunkt **t** = $\mathbf{t}_n$ **tatsächlich zurückgelegten Weges s**(t) läßt sich aus der Grenzwertbetrachtung $\Delta \mathbf{t} \to \mathbf{0}$ bzw. $\mathbf{n} \to \infty$ gewinnen:

$$\boxed{s(t) = \lim_{\substack{\Delta t \to 0 \\ (n \to \infty)}} \sum_{i=1}^{n} \overline{v}_i \cdot \Delta t_i = \int v(t)\, dt}$$

In Worten: Der zurückgelegte **Weg s**(t) ist das **Zeitintegral** der **Geschwindigkeit**.

(3) Kurzform des Lösungsweges

- geg.: **v**(t)
- ges.: **s**(t) = **?**
- Ansatz: $\mathbf{v}(t) = \dfrac{d\mathbf{s}(t)}{dt}$
- Lösung:

$$d\mathbf{s}(t) = \mathbf{v}(t) \cdot dt$$
$$\int d\mathbf{s}(t) = \int \mathbf{v}(t) \cdot dt$$
$$\mathbf{s}(t) = \int \mathbf{v}(t) \cdot dt$$

- Bedeutung des *Integralsymbols*: Gesucht wird die Stammfunktion **s**(t), also jene Funktion **s**(t), deren 1. Ableitung nach der Zeit die Funktion **v**(t) ist.

- Erstmalige Darstellung des **Integrationsprinzips** von **Galileo Galilei** aus dem Jahre 1630

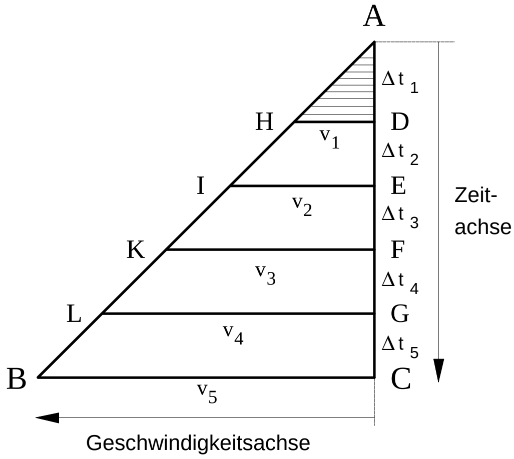


Bild 2 : Graphische Darstellung von Galilei zur Erläuterung des Integrationsprinzips (Achsenkennzeichnung von mir, J.S.)

Galilei entwickelte das Prinzip der Integration am Beispiel der von ihm als gleichförmig angenommenen Beschleunigung beim freien Fall: "Um also die unendliche Anzahl der Geschwindigkeitsstufen zu versinnlichen, welche der Stufe DH vorangehen, muß man sich unendlich viele kleinere und immer kleinere Linien denken, welche man sich parallel zu DH von den unendlich vielen Punkten der Linie DA aus gezogen zu denken hat. *Diese **unendliche Anzahl von Linien** stellt uns aber schließlich die **Fläche** des Dreiecks AHD dar. So können wir uns vorstellen, jede von dem Körper **zurückgelegte Strecke**, welche vom Ruhezustand aus in gleichförmig beschleunigter Bewegung passiert wird, habe unendlich viele Geschwindigkeitsstufen verbraucht und erforderlich gemacht, entsprechend den unendlich vielen Linien*, welche man von Punkt A beginnend, parallel der Linie HD sich gezogen denkt und desgleichen parallel den Linien IE, KF, LG, BC, wobei die Bewegung beliebig weit fortgesetzt werden kann." (Hervorhebungen von mir, J.S.)

aus: Galileo Galilei, Dialog über die beiden hauptsächlichen Weltsysteme (1635), Leipzig 1891 (Nachdruck: Darmstadt 1982), S.243 f.

(2.) Bestimmung der **Geschwindigkeit**sfunktion **v** = f (t) aus der **Beschleunigung**sfunktion **a** = f (t)

- **gegeben:** Beliebige **Beschleunigungsfunktion a**(t)
- **gesucht: Geschwindigkeitsfunktion v** = f(t) zur Berechnung der Momentangeschwindigkeit, die der Körper in einer beliebigen Zeit **t** erzielt, d.h. also **v**(t) = **?**
- **Lösung:** Wir gehen von dem **Leitgedanken** aus, daß die *Flächen*zunahme unter der **a**(t)–Linie ein Maß für die *Geschwindigkeits*zunahme sei.

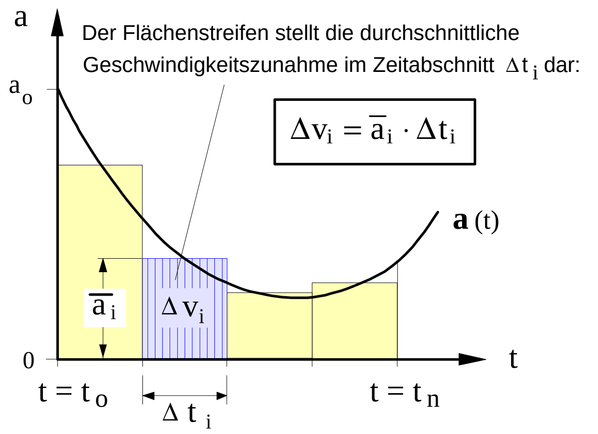


Bild 1 : Graph einer beliebigen Beschleunigung-Zeit-Funktion **v**(t)

$\bar{\mathbf{a}}_i$ ... Durchschnittsbeschleunigung im Zeitabschnitt $\Delta \mathbf{t}_i$

(1) Näherungsweise kann als Maß für die im Zeitpunkt $\mathbf{t} = \mathbf{t}_n$ erreichte Momentangeschwindigkeit **v**(t) die *Fläche* unter der ***Treppenlinie*** angenommen werden:

$$\boxed{v(t) \approx \sum_{i=1}^{n} \Delta v_i = \sum_{i=1}^{n} \bar{a}_i \cdot \Delta t_i}$$

In Worten: Die im Zeitpunkt $\mathbf{t} = \mathbf{t}_n$ erreichte Momentangeschwindigkeit **v**(t) ist näherungsweise die Summe aller durchschnittlichen Geschwindigkeitszunahmen $\Delta \mathbf{v}_i$ im Zeitraum von $\mathbf{t} = \mathbf{t}_o$ bis $\mathbf{t} = \mathbf{t}_n$.

(2) Eine **exakte Bestimmung** der *Fläche unter der **a**–**t**–Linie* und damit der bis zum Zeitpunkt $\mathbf{t} = \mathbf{t}_n$ **tatsächlich erreichten Momentangeschwindigkeit v**(t) läßt sich aus der Grenzwertbetrachtung $\Delta \mathbf{t} \to \mathbf{0}$ bzw. $\mathbf{n} \to \infty$ gewinnen:

$$\boxed{v(t) = \lim_{\substack{\Delta t \to 0 \\ (n \to \infty)}} \sum_{i=1}^{n} \bar{a}_i \cdot \Delta t_i = \int a(t)\, dt}$$

> In Worten: Die **Geschwindigkeit v**(t) ist das **Zeitintegral** der **Beschleunigung**.

(3) Kurzform des Lösungsweges

- geg.: **a**(t)
- ges.: **v**(t) = **?**
- Ansatz: $\mathbf{a}(t) = \dfrac{d\,\mathbf{v}(t)}{dt}$
- Lösung:

$$d\,\mathbf{v}(t) = \mathbf{a}(t) \cdot dt$$
$$\int d\,\mathbf{v}(t) = \int \mathbf{a}(t) \cdot dt$$
$$\mathbf{v}(t) = \int \mathbf{a}(t) \cdot dt$$

- Bedeutung des *Integralsymbols*: Gesucht wird die Stammfunktion **v**(t), also jene Funktion **v**(t), deren 1. Ableitung nach der Zeit die Funktion **a**(t) ist.

(3.) **Anwendung** der **Zeitintegrale** auf die **gleichmäßig beschleunigte Bewegung**

$$\boxed{a(t) = a = \text{const.}}$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$dv = a \cdot dt \quad \Rightarrow \quad \int dv = \int a \cdot dt$$

$$v = \int a \cdot dt \quad \text{mit } a = \text{const.}$$

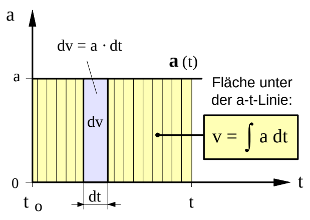
$$\boxed{v(t) = a \cdot t + v_0}$$

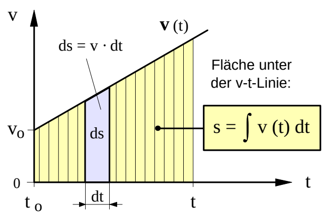
$$v = \frac{ds}{dt} \quad \Rightarrow \quad ds = v \cdot dt$$

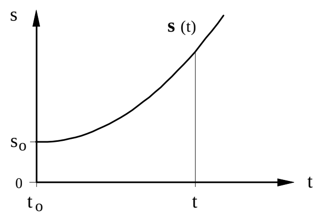
$$\int ds = \int v \cdot dt \;\Rightarrow\; s = \int v \cdot dt$$

$$s(t) = \int v(t) \cdot dt = \int (a \cdot t + v_0) \cdot dt$$

$$\boxed{s(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0}$$

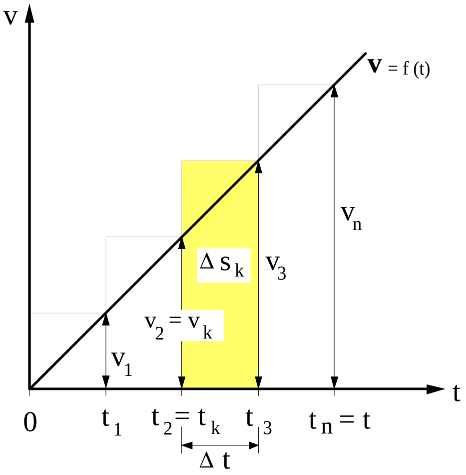






4. Mathematische Formalisierung des Integrationsprinzips von Galilei:

Das Zeitintegral $\int$ v dt als Grenzwert einer Summe



- gegeben : **v**(t) = **a · t** , wobei **a** = **const.**
- gesucht : **s**(t) = **?**
- Lösung :

(1) **Näherungsweise** gilt für den in der Zeitspanne Dt zurückgelegten Weg Ds$_k$ (≙ der Fläche des Rechteckstreifens) :

[1] **Ds$_k$ = v$_k$ · D**t mit k = 1, 2, ... n

(2) **Näherungsweise** gilt für den in der Zeit **t** = **t$_n$** zurückgelegten Weg **s** (≙ der Fläche unter der Treppenlinie) :

[2] $s \approx \sum_{k=1}^{n} \Delta s_k = \sum_{k=1}^{n} v_k \cdot \Delta t$ mit $v_k = a \cdot t_k$ gilt dann : [3] $s \approx \sum_{k=1}^{n} a \cdot t_k \cdot \Delta t$

[4] $s \approx \sum_{k=1}^{n} a \cdot t_k \cdot \Delta t = (a \cdot t_1) \cdot \Delta t + (a \cdot t_2) \cdot \Delta t + ... + (a \cdot t_n) \cdot \Delta t$ [4a] mit $t_1 = 1 \cdot \Delta t$; $t_2 = 2 \cdot \Delta t$; ...; $t_n = n \cdot \Delta t$

[5] $s \approx \sum_{k=1}^{n} a \cdot (k \cdot \Delta t) \cdot \Delta t = a(1 \cdot \Delta t) \cdot \Delta t + a(2 \cdot \Delta t) \cdot \Delta t + ... + a(n \cdot \Delta t) \cdot \Delta t$

[6] $s \approx \sum_{k=1}^{n} a \cdot k \cdot \Delta t^2 = a \cdot 1 \cdot \Delta t^2 + a \cdot 2 \cdot \Delta t^2 + ... + a \cdot n \cdot \Delta t^2$

[7] $s \approx a \cdot \Delta t^2 \cdot \sum_{k=1}^{n} k = a \cdot \Delta t^2 \cdot (1 + 2 + ... + n)$ [7a] mit $\sum_{k=1}^{n} k = 1 + 2 + 3 + ... + n = \frac{n}{2} \cdot (n+1)$

[8] $s \approx a \cdot \Delta t^2 \cdot \frac{n}{2} \cdot (n+1)$ mit $\Delta t = \frac{t}{n}$ (siehe [4a])

[9] $s \approx a \cdot \left(\frac{t}{n}\right)^2 \cdot \frac{n}{2} \cdot (n+1) = a \cdot \frac{t^2}{n^2} \cdot \frac{n}{2} \cdot (n+1) = a \cdot t^2 \cdot \frac{1}{2n} \cdot (n+1)$

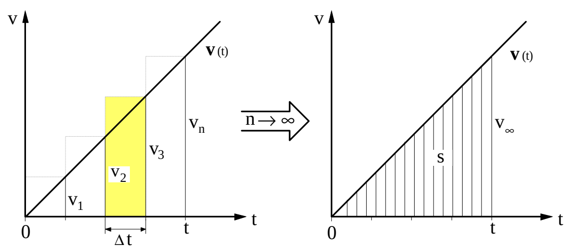
[10] $s \approx a \cdot t^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot (n+1) = a \cdot t^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right)$

(3) **Grenzwertbildung** und **Grenzübergang** für **n** ® ¥ zur Ermittlung des in der Zeit **t** tatsächlich zurückgelegten Weges (≙ der Fläche unter der v-t-Linie) :

[11] $s = \int a \cdot t \ dt = \lim_{n \to \infty} \sum_{k=1}^{n} a \cdot t_k \cdot \Delta t = \lim_{n \to \infty} a \cdot t^2 \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{n}\right)$

Wenn $n \to \infty$ geht, dann geht $\frac{1}{n} \to 0$ und für den Grenzübergang gilt: $\frac{1}{n} = \frac{1}{\infty} = 0$.

[12] Damit wird $s = \int a \cdot t \ dt = a \cdot t^2 \cdot \frac{1}{2} \ (1+0)$ und wir erhalten das bereits bekannte Weg – Zeit – Gesetz :



$$\boxed{\mathbf{s = \int a \cdot t \ dt = \frac{1}{2} \ a \cdot t^2}}$$

Galilei: "So können wir uns vorstellen, jede von dem Körper zurückgelegte Strecke, ..., habe unendlich viele Geschwindigkeitsstufen verbraucht und erforderlich gemacht, entsprechend den unendlich vielen Linien." (siehe S.1 des Arbeitsblattes)

Kurs : **PRINZIPIEN der MECHANIK**	Name:	PHY-17-1.DOC - 10.12.03
Arbeitsblatt Nr. **17** :	**Die Mechanik des Aristoteles** (und des Mittelalters)	Seite **1**

1. Über **Aristoteles** und seine **Mechanik**

"Eine unglückliche Entscheidung des ARISTOTELES bestimmte die Entwicklung der Physik bis zum 17. Jahrhundert. In seinem Werk *Problemata* hatte er festgestellt, es bestehe eigentlich für einen auf der Erde in Bewegung gesetzten Körper kein logischer Grund, wieder zur Ruhe zu kommen; ebenso wie ein Himmelskörper müßte er "ewig" weiterlaufen, es sei denn, er werde angehalten. Da aber auf der Erde alle Bewegungen nach gewisser Zeit zur Ruhe kommen, meinte ARISTOTELES, die irdischen Bewegungen seien doch wesensverschieden von den himmlischen. Wir wissen heute, daß ARISTOTELES lediglich die Wirkung der Reibung nicht richtig beurteilt hat. Die Vorstellung einer reibungsfreien, "ewigen" Bewegung auf der Erde setzt nämlich hohes Abstraktionsvermögen voraus. Für die weitere Entwicklung der Physik war daher zunächst bestimmend, daß man sich mehr auf die direkte Anschauung als auf abstrakte Vorstellungen stützte.

ARISTOTELES stellte den **Grundsatz** auf:

> "Omne quod movetur ab alio movetur". Das heißt: "**Alles, was in Bewegung ist, wird von etwas anderem bewegt.**" Dabei muß der "motor" dem sich bewegenden Körper ("mobile") selbst innewohnen oder ein "motor conjunctus", d.h. ein mit dem bewegten Körper verbundener "motor" sein.

Diesen "motor" herauszufinden, ist ein entscheidendes Problem der aristotelischen Physik. Ein Lebewesen bewegt sich aus eigenem Antrieb ("a se"). Der "motor" ist seine Seele ("anima"). Viel schwieriger ist das Problem, bei unbelebten Körpern ("corpora inanimata") den "motor" der Bewegung herauszufinden. ARISTOTELES unterscheidet in diesem Zusammenhang zunächst zwischen **natürlicher** Bewegung ("motus naturalis") und **erzwungener** Bewegung ("motus violentus"). Der nach unten fallende Stein oder der aufsteigende Rauch, der nach ARISTOTELES gleichsam eine Fallbewegung nach oben ausführt, stellen **natürliche** Bewegungen dar. Dagegen vollführt ein geworfener oder ein an einer Schnur angebundener und im Kreis herumgeschleuderter Körper eine **erzwungene** Bewegung. ...

Um den Unterschied zwischen der Physik des ARISTOTELES und der mit GALILEI und NEWTON beginnenden sog. "klassischen" Physik verstehen und die bedeutsame Leistung dieser neuen Physik würdigen zu können, wollen wir zwei zentrale Fragen der alten Physik noch etwas genauer betrachten:

Die Frage nach dem Bewegungszustand der Erde und die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der Fallgeschwindigkeit und der Schwere der Körper. Wie wir sehen werden, hängen diese beiden Probleme in der aristotelischen Philosophie eng miteinander zusammen. ARISTOTELES knüpft bei der Behandlung beider Fragen an die alltägliche Erfahrung an. Man beobachtet, daß verschieden schwere Gegenstände in der Luft mit verschiedener Geschwindigkeit fallen. Andererseits läßt sich ein schweres Fahrzeug schwerer in Bewegung setzen als ein leichtes.

Beide Erfahrungen verallgemeinert ARISTOTELES in seinem **dynamischen Grundgesetz**:

> Die **Geschwindigkeit**, mit der eine Bewegung abläuft, **ist proportional der Antriebskraft des "motors"** und **umgekehrt proportional dem "Widerstand"**, der der Bewegung entgegenwirkt.

Bei dem in der alten Physik vielzitierten Eselskarren wird die Antriebskraft vom Esel als "motor conjunctus" ausgeübt, als Widerstand wirkt das Gewicht des Karrens, indirekt über seine sogenannte "Masse", die den "Trägheitswiderstand" erzeugt. Beim Fall ist die Schwere (Gewicht) der "motor", welchem vom Medium, in dem die Körper fallen, ein Widerstand entgegengesetzt wird. Dieser Widerstand hängt von der Dichte des Mediums ab.

Man kann diese Zusammenhänge anhand von einfachen Experimenten veranschaulichen, indem man Kugeln verschiedenen Gewichts aus gleichem Stoff, aber verschiedenem Radius und aus verschiedenen Stoffen mit gleichem Radius in einen z. B. mit Wasser und einen mit Öl gefüllten Standzylinder fallen läßt.

Wir müssen uns jedoch hüten bei der Fallbewegung in der Antriebskraft "Schwere" eine Kraft zu sehen, die von außen wie bei dem Karren angreift. Wie wir bereits gesehen haben, ist die Fallbewegung für ARISTOTELES eine "natürliche" Bewegung, die im Zusammenhang mit der Natur des Körpers und der besonderen Ordnung (Struktur) des aristotelischen Kosmos steht. In diesem Kosmos befindet sich die Erde im Weltzentrum in Ruhe.

Was hat dieser Ruhezustand mit den verschiedenen Fallgeschwindigkeiten verschieden schwerer Körper zu tun? Bewegte sich nämlich die Erde, so würde sie nach ARISTOTELES bei ihrer im Vergleich zu allen anderen irdischen Körpern überwältigenden Größe allen fallenden Körpern weit vorauseilen; alle losen Gegenstände schwebten weit hinter ihr in der Luft. Die Erde würde dann einfach aus dem Universum herausfallen.

Wie wir sahen, werden die verschiedenen Bewegungsvorgänge auf der Erde und am Himmel durch die Einführung von Qualitäten, die anschaulich durch ganz bestimmte Substanzen getragen und repräsentiert werden, erklärt. Die substantielle Form des Elements bestimmt die Art seiner natürlichen Bewegung. Mit dieser "Qualitäten-Physik", die eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen vergänglichen, **irdischen** (sublunaren, d.h. unterhalb der Mondsphäre sich abspielenden) und unvergänglichen, **himmlischen** (translunaren) Vorgängen macht, wurde durch ARISTOTELES ein prinzipieller Gegensatz zwischen irdischer Mechanik und Himmelsmechanik geschaffen, der die Entwicklung des Bewegungsproblems für die nächsten Jahrhunderte bestimmte und der erst durch NEWTON endgültig überwunden wurde, der das Fallen eines Steines und die Bewegung der Planeten um die Sonne auf die gleiche physikalische Ursache zurückführte."

Quelle : W.Kuhn, Physik, Band III A: Mechanik, Braunschweig 1979 S. 17 - 21

2. **Schema** zur Unterscheidung und Einteilung der Bewegungen nach **Aristoteles**

Schließlich ging Aristoteles davon aus, daß die **Ursachen** und damit "**die Prinzipien der wahrnehmbaren Dinge auch wahrnehmbar sein müssen**". Da bei einigen Bewegungen deren **Ursache** wahrgenommen werden kann (z.B. beim Pferdewagen), bei anderen hingegen nicht (z.B. beim fallenden Stein oder bei der Planetenbewegung), sah sich ARISTOTELES genötigt, die Bewegungen gemäß seinem Grundsatz "**Jede Bewegung erfordert einen Beweger (motor)**" nach folgendem Schema zu unterscheiden:

Bewegung schwerer Körper

- **Bewegung unbelebter** schwerer Körper
  - **Natürliche Bewegung** schwerer Körper
    - **Irdische Bewegung**
      Beispiel:
      fallender Stein ⇨ motor :
      Schwere (grave) als inneres naturhaftes Bewegungsprinzip des Körpers
    - **Himmlische Bewegung**
      Beispiel:
      Mond und Planeten ⇨ motor :
      Gott, der unbewegte Beweger
  - **Erzwungene Bewegung** schwerer Körper
    Beispiel: Pferdewagen ⇨ motor : **Pferd**
    fliegender Pfeil ⇨ motor : **Luft (Medium)**
- **Bewegung belebter** schwerer Körper
  Beispiel: Taube ⇨ motor : **Seele (anima)**

Aristoteles
(384-322 v.Chr.)

3. Probleme der **Mechanik** des **Aristoteles**

► **Ziel** der mechanischen Theorie des Aristoteles: Die Unterscheidung der Bewegungen nach dem Kriterium ihrer ***wahrnehmbaren Ursachen***, dem "motor conjunctus" (das ist der mit dem bewegten Körper "verbundene Beweger"), sollte zu einem System *in sich widerspruchsfreier Klassen von Bewegungen* führen (vgl. dazu das Schema auf S.1).

- **Problem**: Die von Aristoteles gebildeten Klassen sind in sich ***nicht*** widerspruchsfrei. So endet z.B. die *erzwungene* Bewegung eines Pferdewagens, wenn das Pferd stehen bleibt oder gar vor Erschöpfung zusammenbricht, d.h. wenn die ***Ursache*** der Bewegung (der "motor conjunctus") entfällt. Hingegen endet die von dem Bogenschützen *erzwungene* Bewegung eines Pfeiles selbst dann ***nicht***, wenn dieser die Sehne des Bogens verlassen hat, obwohl er sich damit von seiner (wahrnehmbaren) Bewegungs***ursache*** getrennt hat.

► **Lösungsversuch** des *Aristoteles*: Der Pfeil (bewegter Körper) überträgt die bewegende Kraft auf die Luft (Medium), die ihrerseits die Kraft auf den Pfeil überträgt und dieser dann wiederum auf die Luft usw.. Demnach ist die Luft, also das Medium, die bewegende Ursache (der "motor conjunctus") des fliegenden Pfeiles (siehe dazu das Aristoteles-Zitat unten).

- **Problem**: Wenn die Luft die ***Ursache*** der Pfeilbewegung darstellt, so müßte der Pfeil auch ohne Bogen allein von der Luft bewegt werden können. M.a.W.: Wenn die Ursache (Luft) vorhanden ist, muß auch die Wirkung (Bewegung) da sein. Luft aber kann keinen ruhenden Pfeil –oder gar einen anderen Körper wie z.B. einen Mühlstein– in Bewegung setzen. (Einwand des *Johannes Philoponos* etwa 550 n.Chr. – siehe dazu den Text unten).

► **Lösungsversuch** (*Impetustheorie* ab ca. 1300): Jeder bewegte Gegenstand ist sein ***eigener*** Beweger, die ***Ursache*** der Bewegung ist ***ihm als Prinzip eingeprägt***, ist eine Eigenschaft von ***ihm selbst***. Der "motor conjunctus" wird überflüssig, er wird statt dessen in den bewegten Körper hineinverlegt. Dieses bewegende Prinzip wurde von den Scholastikern (wie z.B. Jean *Buridan*, William *Ockham*) als "***Impetus***" (Schwung) bezeichnet. (siehe dazu den Text unten)

- **Problem**: Wenn der bewegte Körper den "motor" der Bewegung in sich trägt, dann dürfte *keine Bewegungsänderung* auftreten, die Bewegung dürfte nie enden, ein Abbremsen und zur Ruhe kommen wäre nicht denkbar.

► **Lösung** (*Trägheitsprinzip – Galilei* und *Newton* ab ca. 1610): Der einmal in Bewegung gesetzte Körper würde sich in der Tat bis in alle Ewigkeit ***gleichförmig*** und ***geradlinig*** weiterbewegen, sofern nicht irgendwelche Kräfte ihn daran hindern. Die Bewegungs***änderung*** (z.B. Abbremsung) indessen wird durch äußere ***Kräfte*** verursacht (siehe nächstes Arbeitsblatt).

Da äußere Kräfte nur durch direkten Kontakt übertragen werden können, kann ein Körper im Wurf nur gestoßen oder gezogen werden. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß ein geworfener Körper sich weiterbewegt, auch wenn er die Hand des Werfers verlassen hat. In der aristotelischen Philosophie wird das Problem dadurch gelöst, daß man sagt, der Werfer wirke durch seine Wurfbewegung auf die Luft ein, die ihrerseits den geworfenen Körper weiterbewegt. So schreibt **Aristoteles** in der «Physica» (Physik):

«Es wird gut sein, bei den **Wurfbewegungen** zunächst eine Schwierigkeit zu besprechen. Wenn nämlich alles Bewegte von etwas bewegt wird, soweit es nicht von sich selbst bewegt wird, wie kann dann in manchen Fällen ein Körper sich stetig weiterbewegen, ohne daß derjenige ihn noch berührt, der ihn in Gang gebracht hat? Zum Beispiel beim Wurf. Wenn aber der Werfende noch eine andere Bewegung verursacht hat, z.B. die der Luft, die dann als Werkzeug weiterbewegt, dann ist das ebenso unmöglich, daß nämlich diese sich weiterbewegt, ohne daß der erste, werfend, sie noch berührt und bewegt. Es müßte doch alles zugleich sich bewegen und mit der Bewegung aufhören, sobald der erste mit seiner Bewegung aufhört, auch dann, wenn er es so macht wie der Magnet, der zum Magneten macht, und so zum Beweger macht, was er bewegt hat. Hier muß man folgendes sagen, daß der erste Beweger die **Luft** oder das Wasser instandsetzt, weiterzubewegen, oder auch sonst ein Mittel, das seiner Natur nach bewegen oder bewegt werden kann. Aber er hört nicht zu gleicher Zeit auf, sich zu bewegen und zu bewegen, vielmehr hört der Beweger nur auf, sich zu bewegen, wenn er mit der Wurfbewegung aufhört, aber Beweger ist er immer noch. Deswegen wird auch ein anderes Glied der Reihe bewegt, und bei diesem ist es auch wieder so. Die Bewegung hört erst auf, wenn im Nachbarglied die Kraft zur Bewegung nachläßt. Schließlich hört die ganze Bewegung auf, wenn ein Glied das nächste nicht mehr bewegend machen kann, sondern nur noch bewegt. In dem Fall hört dann alles zugleich auf, der Beweger, das Bewegte und die ganze Bewegung.»

Gegen diese Theorie wurden schon früh **Einwände** erhoben: Man sah es einerseits als unwahrscheinlich an, daß z. B. ein gegen den Wind fliegender Pfeil oder ein Mühlstein, der sich nach dem Wegfall seines Antriebs noch bewegt, vom Wind weiterbewegt werde. Darüber hinaus konnte man nicht verstehen, daß die Luft neben ihrer Rolle als Beweger von Dingen gleichzeitig diesen Dingen einen Widerstand entgegensetzen kann. Im 6. Jahrhundert wurde von **Johannes Philoponos** eine neue Theorie, die später sogenannte «Impetus-Theorie» entwickelt, die davon ausging, daß der Werfer dem geworfenen Ding eine Kraft, einen Schwung (impetus) einverleibt, der sich selbständig während des Fluges verringert. ...

Besonders William **Ockham** (1284-1349), Thomas Bradwardine (gest. 1349), Jean **Buridan** (gest. nach 1358) und Nicole d'Oresme (ca. 1325-1382) entwickelten die Kritik an der aristotelischen Kinematik weiter. Jean **Buridan** hat eine **Impetus-Theorie** detailliert ausgearbeitet. In seinem Kommentar zur Physik des Aristoteles «Quaestiones super Octo Libros Physicorum» heißt es:

«Darum scheint mir, wir müssen schließen, daß ein Beweger, wenn er einen Körper hewegt, diesem einen bestimmten **Impetus** aufdrückt, eine bestimmte Kraft, die diesen Körper in der Richtung weiterzubewegen vermag, die ihm der Beweger gegeben hat, sei es nach oben, nach unten, seitwärts oder im Kreis. Der mitgeteilte Impetus ist in dem gleichen Maße kraftvoller, je größer der Aufwand an Kraft ist, mit dem der Beweger dem Körper Geschwindigkeit verleiht. Durch diesen Impetus wird der Stein weiterbewegt, nachdem der Werfer aufgehört hat, ihn zu bewegen. Aber wegen des Widerstandes der Luft und auch der Schwerkraft des Steins, die ihn ständig in eine dem Streben des Impetus entgegengesetzte Richtung zwingen möchte, wird der Impetus immer schwächer. Darum muß die Bewegung des Steines allmählich immer langsamer werden. Schließlich ist der Impetus so weit geschwächt oder vernichtet, daß die Schwerkraft des Steines überwiegt und den Stein abwärts zu seinem natürlichen Ort bewegt.

Man kann, glaube ich, diese Erklärung akzeptieren, weil die anderen Erklärungen nicht richtig zu sein scheinen, während alle Phänomene mit dieser übereinstimmen.»

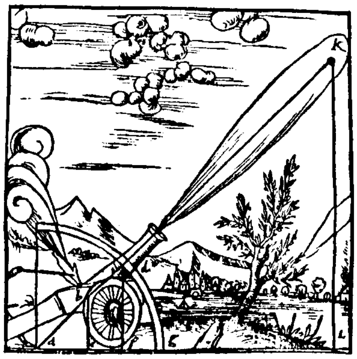


Abb. 9: Die **Wurfkurve** in der **aristotelischen Physik**

Wird ein Körper geworfen oder abgeschossen (ein Stein etwa oder eine Kanonenkugel) , so wird ihm nach Aristoteles eine künstliche Bewegung aufgezwungen. Sobald der Körper die Hand oder Kanone verläßt, wird er von der Luft weiterbewegt, die ihrerseits vom Beweger in Bewegung versetzt wurde . Ist die Bewegung der Luft erschöpft, so folgt der Körper seiner natürlichen Bewegung, die auf den Erdmittelpunkt gerichtet ist, und fällt senkrecht herab. Philoponos (6. Jh.) und Jean Buridan (14. Jh.) entwickelten eine «Impetus-Theorie», nach der die Kraft oder der Schwung (impetus) der Bewegung nicht an das umgebende Medium des geworfenen Körpers weitergegeben wird, sondern in den Körper selbst übergeht. Niccolò Tartaglia findet dann um 1540, daß die Wurfkurve überall gekrümmt ist .

Quelle: Heidelberger/Thiessen, Natur und Erfahrung, S.39 f.

Kurs : **PRINZIPIEN der MECHANIK**	Name:	PHY-18-1.DOC - 09.11.01
Arbeitsblatt Nr. **18** :	Die **Mechanik** von **Galilei** und **Newton** (Neuzeit)	Seite **1**

1. Das **Trägheitsmodell** von GALILEO GALILEI (etwa 1638)

Aristoteles' Ansicht, daß schwere Körper schneller fallen als leichte Körper, hatte Galilei mit plausiblen Gedankenexperimenten widerlegt. Wie stand es nun mit der Behauptung, daß zur Aufrechterhaltung einer Bewegung eine ständige Kraft nötig ist?

«Aristoteles **schien** hier recht zu haben; denn wie die **Erfahrung** lehrt, kommen tatsächlich alle Körper früher oder später zur Ruhe, wenn sie nicht ständig angetrieben werden. Allerdings ist auch überall die Reibung am Werk. Macht man sie kleiner, so dauert die Bewegung länger an. Eine angestoßene Kugel beispielsweise kommt auf einer waagrechten, rauhen Unterlage rasch zur Ruhe. Auf einer glatten Unterlage rollt sie schon sehr viel weiter. Kein Zweifel also, die Reibung bremst! Was aber macht die Kugel, wenn keine Reibung vorhanden ist? Kommt sie auch zur Ruhe, vielleicht erst nach sehr langem Lauf?

Da wir nicht in der Lage sind, die Reibung völlig zu beseitigen und den Lauf der Kugel beliebig lange zu verfolgen, ist diese Frage durch das Experiment nicht zu beantworten. Dennoch fand Galilei durch eine sehr geistreiche Überlegung die Lösung des Problems.

Galilei bemerkte - man sagt, angeregt durch einen im Dom zu Pisa schaukelnden Kronleuchter -, daß ein **Pendel**, wenn es nach einer Seite ausgelenkt und losgelassen wird, auf der anderen Seite fast bis zu seiner Anfangshöhe wieder emporsteigt. Daran ändert sich auch nichts, wenn der Pendelfaden beim Hinüberschwingen durch ein Hindernis, etwa durch einen eingeschlagenen Nagel, abgeknickt wird (siehe **Bild 1**). Offenbar ist es also dem Widerstand der Luft und des Fadens, aber nicht der Bahn des Pendelkörpers zuzuschreiben, daß die Anfangshöhe nicht mehr präzise erreicht wird. Wären diese Widerstände nicht vorhanden, würde das schwingende Pendel seine Anfangshöhe exakt erreichen. Dasselbe wäre auch zu beobachten, wenn der Pendelkörper nicht durch einen Faden, sondern von einer entsprechend gebogenen **Rinne** reibungsfrei geführt würde (siehe **Bild 2**).

Da man sich eine derartige Rinne aus sehr vielen schiefen, Ebenen zusammengesetzt denken kann, betrachtet Galilei nun einen Körper, welcher auf einer schiefen Ebene herabgleitet und mit der erlangten Endgeschwindigkeit auf einer zweiten schiefen Ebene wieder aufsteigt. Der Körper muß dann, falls von der Reibung abgesehen wird, genau bis zu seiner Anfangshöhe aufsteigen, gleichgültig wie groß die Neigung der schiefen Ebene ist.

Nun denkt sich Galilei die Neigung der zweiten schiefen Ebene kleiner und kleiner gemacht (siehe **Bild 3**). Stets wird der Körper auf seine alte Höhe hinaufklettern. Die Bahn und die Laufzeit freilich werden dabei länger und länger und die Vezögerung kleiner und kleiner. Hierauf geht Galilei zum Grenzfall über, zur Waagrechten. Wenn sich der Körper konsequent verhält, so muß er jetzt mit konstanter Geschwindigkeit unaufhörlich weiterlaufen, sich also auf geradliniger Bahn gleichförmig dahinbewegen, ganz im Gegensatz zur Behauptung des Aristoteles. Galilei kommt zu der wichtigen Erkenntnis:

> **Trägheitssatz**
>
> Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung auf geradliniger Bahn.

Eine schwerelose Flintenkugel würde also im luftleeren Raum geradlinig in Richtung des Flintenlaufes fortfliegen und sich mit konstanter Geschwindigkeit beliebig lange weiterbewegen. Sie benötigt demnach nicht die Luft als antreibendes Mittel, wie Aristoteles glaubte. Ganz im Gegenteil! Die Luft würde die Bewegung allmählich abbremsen.

Aristoteles war bestrebt, die komplizierten Naturerscheinungen, so wie sie vor unseren Sinnen ablaufen, direkt in Gesetze zu fassen. Galilei dagegen untersuchte mit gezielten Experimenten zunächst nur einfache Spezialfälle und tastete sich so allmählich an die niemals beobachtbaren Idealfälle heran. An diesen las er die Gesetze ab und leitete daraus umgekehrt die komplizierten Erscheinungen der beobachtbaren Welt her. Aristoteles' Weg erwies sich als nicht gangbar. Galileis Methode dagegen führte bis zum heutigen Tage zu einer Fülle neuer Erkenntnisse. So wurde er - und nicht Aristoteles - zum Begründer der heutigen Physik.

Die einfachen Spezialfälle sind es also, die untersucht werden müssen. Das ist der tiefere Grund, warum man in der Physik so wirklichkeitsfremde Situationen, wie z. B. das Abgleiten eines Körpers auf der schiefen Ebene unter Vernachlässigung der Reibung oder den freien Fall unter Außerachtlassung des Luftwiderstandes, betrachtet. Es sind dies die einfachsten Elemente, aus denen sich die Erscheinungen der Umwelt zusammensetzen lassen.»

Quelle : R.Sexl u.a., Das mechanische Universum, Frankfurt a.M. 1980, S.17 f.

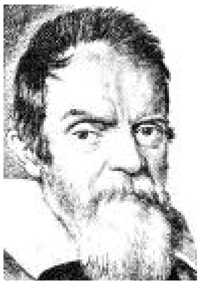


Abb. 1 : **Galileo Galilei** wurde 1564 in Pisa geboren. Hier studierte Medizin, Mathematik und Physik. Mit 25 Jahren wurde er Mathematikprofessor in Pisa, 1592 ging er an die Universität zu Padua. Dort entwickelte er ein Fernrohr, mit dem er u.a. die Oberflächenstruktur des Mondes und die Monde des Jupiter entdeckte, und bekannte sich erstmals zum Weltbild des Kopernikus, das er fortan vehement verteidigte. Deshalb wurde ihm von der Inquisition der Prozeß gemacht, er mußte abschwören und wurde 1633 zu lebenslanger Haft verurteilt (siehe dazu die Pressemeldung unten). 1642 starb Galilei in seiner Verbannung in Arcetri bei Florenz.

Bild 1 :

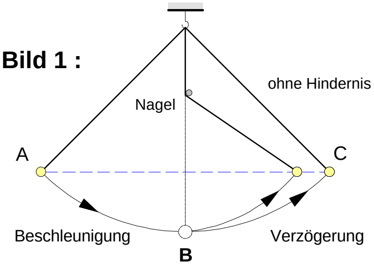


Bild 2 :

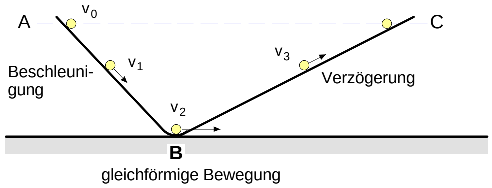
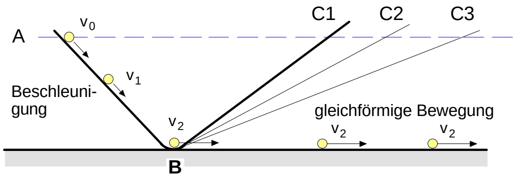


Bild 3 :



Die Erde darf um die Sonne kreisen

Papst Johannes II. rehabilitiert Galilei - Als Ketzer verurteilt

ROM (ap). Fast 360 Jahre nach der Verurteilung durch die Inquisition ist der italienische Physiker und Mathematiker Galileo Galilei von der katholischen Kirche offiziell rehabilitiert worden.

Papst Johannes Paul II. bekannte am Samstag vor Mitgliedern der vatikanischen Akademie der Wissenschaften, daß die Kirche geirrt habe, als sie Galilei am 22. Juni 1633 wegen seiner Lehre verurteilte, wonach die Erde um die Sonne kreise und nicht umgekehrt, wie nach damaliger offizieller Kirchenlehre.

Galilei hatte seiner der Lehre des Kopernikus entnommenen These abschwören müssen und war zu lebenslanger Haft verurteilt worden. Sie wurde später in Hausarrest umgewandelt.

Die Erklärung des Papstes ist das Ergebnis dreizehnjähriger Beratungen und Untersuchungen einer von Johannes Paul ernannten Kommission. Die Verurteilung Galileis sei Ergebnis eines „tragischen gegenseitigen Nichtverstehens“ und sei in der Folgezeit zu einem Symbol der unterstellten Ablehnung des wissenschaftlichen Fortschritts durch die Kirche geworden, sagte der Pontifex maximus in seiner Rede in der Sala rega des Apostolischen Palastes.

Die Theologen der damaligen Zeit hätten in ihrer Annahme geirrt, daß der Wortsinn der Heiligen Schrift den physischen Zustand der Welt beschreibe, sagte Johannes Paul weiter. Der Fall Galilei sei sogar ein Beispiel für die Vereinbarkeit von Wissenschaft und Religion. Man habe damals nur nicht erkannt, daß es „zwei Reiche des Wissens gibt: eins, dessen Quelle die Offenbarung ist und eins, welches der Verstand durch eigene Kraft erkennen kann“.

Der Papst mahnte die Wissenschaftler besonders in Hinblick auf Biologie und Biogenetik, bei ihrer Forschung die spirituelle Seite des Menschseins nicht zu vergessen.

Darmstädter Echo vom 2.11.**1992**

2. Zum **Begriff** der **Kraft** in der Mechanik von **NEWTON**

Während die **aristotelische Physik** in Anlehnung an Alltagserfahrungen von der Annahme ausging, **jede** Bewegung, also auch die gleichförmige Bewegung, bedürfe einer Kraft als Ursache, entwickelten **GALILEI** (1564-1642) und **NEWTON** (1643-1727) die Vorstellung, daß in eine mechanische Theorie die **Idee** einer **kräftefreien gleichförmigen geradlinigen Bewegung** (=**Trägheitsbewegung**) aufzunehmen sei. Diese Idee ist **spekulativ**, denn eine gleichförmige geradlinige Bewegung eines Körpers, auf den **keinerlei Kräfte** einwirken, hat noch niemand beobachtet. Sie stimmt insofern auch mit unserer Erfahrung **nicht** überein.

Dazu zunächst ein kleines Gedankenexperiment:

Wenn wir eine auf einem Nadelfilzteppichboden liegende Holzkugel kurz anstoßen und damit in Bewegung setzen, so kommt der Körper nach relativ kurzer Zeit wieder zur Ruhe, d.h. die Geschwindigkeit verringert sich relativ rasch. Wiederholen wir unser Experiment, indem wir eine genauso große und genauso schwere, jetzt allerdings glatt lackierte Holzkugel auf einer polierten, ebenen und genau waagerecht angeordneten Glasplatte kurz anstoßen, so können wir beobachten, daß die Kugel sich geradlinig bewegt und ihre Geschwindigkeit nur sehr wenig abnimmt. Wir führen diesen Unterschied auf die besondere Beschaffenheit der Oberflächen und die dadurch bedingte unterschiedliche *Reibung* zwischen der Kugel und der Rollfläche zurück.

Was würde nun geschehen, wenn man von den Besonderheiten der Oberflächen einmal absieht, **wenn also keine Reibung vorhanden wäre** und damit auch keine Reibungskräfte wirken würden? „Die Antwort liegt nahe, daß sich der Körper dann geradlinig und gleichförmig, d.h. mit unverminderter Geschwindigkeit, weiterbewegen würde. Nun ist es aber unmöglich, einen Körper jedem Krafteinfluß zu entziehen. Daher hat noch niemand eine solche Bewegung beobachtet. Dennoch wird behauptet, daß diese geradlinig gleichförmige Bewegung kräftefrei erfolgt und daß umgekehrt ein Körper auf den keine Kräfte einwirken, sich in Ruhe befindet oder sich geradlinig gleichförmig bewegt, wenn er einmal in Bewegung gesetzt wurde. Dann müßten im anderen Falle, wenn der Körper von der geradlinig gleichförmigen Bewegung abweicht, d.h. seine Geschwindigkeit ändert, indem er sich schneller oder langsamer bewegt oder seine Richtung ändert, Kräfte am Werk sein. Umgekehrt müßte sich jeder Krafteinfluß durch Änderung des Bewegungszustandes des Körpers, also durch eine Geschwindigkeitsänderung, bemerkbar machen, sei es, daß die Geschwindigkeit ihren Betrag ändert oder ihre Richtung oder beides.

Die entscheidende Wende in der Betrachtungsweise und Fragestellung bei NEWTON liegt also darin, daß er erkannte, daß ***nicht*** *nach der* ***Ursache*** *der* ***Geschwindigkeit*** eines Körpers gefragt werden muß, ***sondern*** das Augenmerk auf die Geschwindigkeits***änderungen*** und die ***Kräfte****, die solche Geschwindigkeits****änderungen*** *ver****ursachen***, zu richten ist.“ (aus: W.Kuhn, Mechanik, Braunschweig 1973, S.64 f.)

Zusammenfassung der wesentlichen **Bestimmungen** des ***Kraft*****begriffs** in der von **NEWTON** und **GALILEI** begründeten **klassischen Mechanik**

- Die **Kraft** ist die **Ursache** für die **Bewegungs*änderung*** eines Körpers und damit die Ursache für die **Abweichung** von der ***geradlinigen*** **und** ***gleichförmigen*** Bewegung.
- Die geradlinig **gleichförmige** Bewegung ist **kräftefrei** und damit vom ***Ruhe***zustand in dieser Hinsicht nicht zu unterscheiden.
- Wenn ein Körper sich im Zustand der **Ruhe** oder der geradlinig **gleichförmigen Bewegung** befindet, bedarf es einer ***Kraft*** , um diesen Zustand zu **ändern**.
- Jeder Körper ist **träge**. Sofern er sich geradlinig und **gleichförmig** bewegt, führt er eine ***Trägheitsbewegung*** aus, d.h. ohne die Einwirkung von **Kräften** ändern sich weder der **Betrag** der Geschwindigkeit noch die **Richtung** der Bewegung.

Fazit: Die **Kraft** ist die **Ursache** für die **Abweichung** von der ***Trägheitsbewegung*** und damit zugleich die **Ursache** für die ***Bewegungsänderung*** (Beschleunigung, Verzögerung oder Richtungsänderung) eines Körpers.

3. Das **Trägheitsprinzip** (**1.** Axiom der NEWTONschen Theorie)

»**Jeder Körper beharrt** in seinem **Zustande der Ruhe** oder der **gleichförmigen geradlinigen Bewegung**, wenn er nicht durch einwirkende **Kräfte** gezwungen wird, seinen Zustand zu **ändern**.«

Isaac Newton: Mathematische Prinzipien der Naturlehre, Cambridge 1686, Nachdruck der deutschen Übersetzung, Darmstadt 1963, S.32

4. Die Bestimmung der **Größe** einer **Kraft** durch das **Dynamische Grundgesetz**

a) **Kraft F** und **Bewegungsänderung a** (Beschleunigung oder Verzögerung)

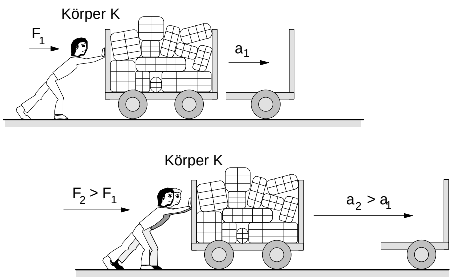


Bild 1

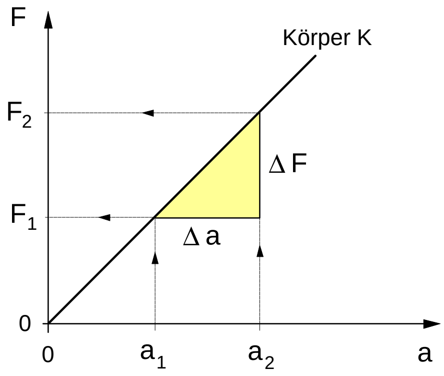


Bild 2

Nach dem **1.Axiom** von NEWTON (**Trägheitsprinzip**) weicht ein Körper dann von "der gleichförmigen geradlinigen Bewegung" ab, wenn er dazu durch "einwirkende **Kräfte** gezwungen wird". Demnach ist die **Kraft** die **Ursache** für die Abweichung von der gleichförmigen und geradlinigen Trägheitsbewegung und damit für die **Beschleunigung** (oder Verzögerung) eines Körpers. Oder umgekehrt: Die **Wirkung** der **Kraft** äußert sich in der Beschleunigung (oder Verzögerung) eines Körpers. Die Kraft selbst kann nicht wahrgenommen werden, gleichwohl aber ihre Wirkung: Daß ein Körper sich beschleunigt bewegt, läßt sich wahrnehmen und durch entsprechende Weg- und Zeitmessungen auch quantitativ bestimmen. Daher hat NEWTON die jeweilige **Beschleunigung a** eines Körpers als **Maß** für die jeweils auf ihn einwirkende **Kraft F** definiert und in seinem **2.Axiom** festgelegt: "Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft **proportional**", d.h.:

$$\boxed{F \sim a}$$

Demnach ist der Graph in dem Kraft-Beschleunigungs-Diagramm eines Körpers eine Gerade deren Steigung durch das konstante Steigungsmaß **ΔF/Δa** bestimmt ist. Der konstante Quotient **ΔF/Δa** gibt dabei an, welche Kraftänderung **ΔF** erforderlich ist, um bei einem **bestimmten** Körper K die Beschleunigungsänderung **Δa** zu bewirken.

b) **Beschleunigung**, **Trägheit** und **Masse** eines Körpers

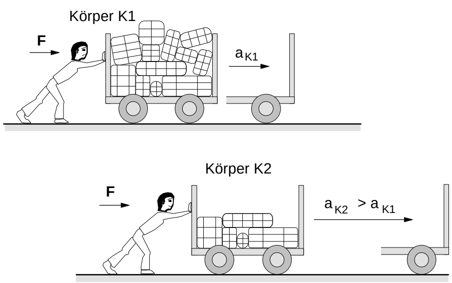


Bild 3

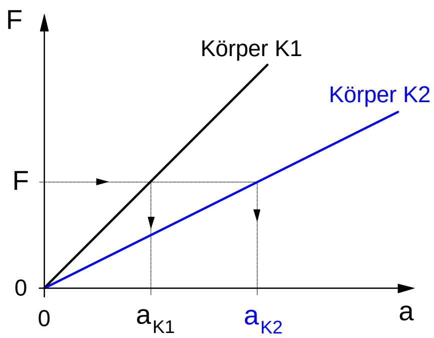
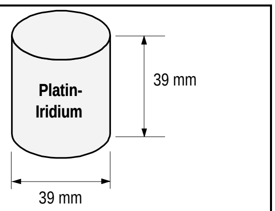


Bild 4

Die Beschleunigung **a**, die einem bestimmten Körper bei einer **gegebenen** Kraft **F** erteilt wird, ist abhängig von seiner **Trägheit**, also dem Widerstand, den er der Änderung des jeweiligen Bewegungszustandes entgegensetzt. So ist der in den Bildern **3** und **4** dargestellte Körper K1 **träger** als der Körper K2. Denn ein und dieselbe Kraft **F** bewirkt bei ihm eine kleinere Beschleunigung (a_{K1}) als bei dem weniger trägen Körper K2 (a_{K2}). Die größere **Trägheit** von Körper K1 ist bedingt durch die größere **Menge** an **Materie**, die in ihm enthalten ist. Die **Materiemenge** eines Körpers wird auch als **Masse** bezeichnet. Solange ein Körper während der Bewegung seine Masse **m** nicht ändert, bleibt auch seine Trägheit konstant. Unter dieser Voraussetzung kann der für einen bestimmten Körper konstante Quotient **ΔF/Δa** als Ausdruck seiner Trägheit und damit seiner Masse gedeutet werden. Insofern läßt sich die **Masse m** als **Maß für die Trägheit** eines Körpers bestimmen. Es gilt demnach :

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



Die **Maßeinheit** der **Masse** ist das **Kilogramm**. Ein Kilogramm (1kg) ist **definiert** als die **Masse** des **Urkilogramms**, eines in Paris aufbewahrten Zylinders aus Platin-Iridium von 39 mm Höhe und 39 mm Durchmesser.

Setzen wir diesen Ausdruck als konstanten Proportionalitätsfaktor in die obige Beziehung **F ~ a** ein, so ergibt sich:

c) **Das dynamische Grundgesetz** gemäß dem 2. Axiom von **NEWTON**

Die **Größe** einer **Kraft F**, die einen Körper mit der Masse m beschleunigt, ist bestimmt durch das **Produkt** aus der **Masse m** des Körpers und seiner jeweiligen **Beschleunigung a**.

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

5. Wiederholung: Das **1.** und **2. Newtonsche Axiom** (Axiom = Grundsatz, Prinzip)

- **Trägheitsprinzip (1. Axiom von Newton)**

> Jeder Körper beharrt im Zustand der **Ruhe** oder der **gleichförmigen geradlinigen Bewegung** , wenn er nicht durch einwirkende **Kräfte** gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

▶ Daraus folgt für den Begriff der **Kraft** :

> Die **Kraft** ist die **Ursache** der **Bewegungsänderung** von Körpern, d.h. die Ursache der Änderung des **Betrages** der Geschwindigkeit oder der **Richtung** der Bewegung.

- **Prinzip** zur Bestimmung der **Größe einer Kraft (2. Axiom von Newton)**

> Die **Änderung** der **Bewegung** eines Körpers (Beschleunigung oder Verzögerung) ist der Einwirkung der bewegenden **Kraft** (d.h. der Ursache der Bewegungsänderung) **proportional** .

$$F \sim a$$

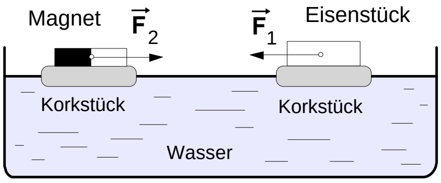
▶ Daraus folgt für die Bestimmung der Größe einer Kraft (**Dynamisches Grundgesetz**) :

> Die **Kraft F**, die einen Körper beschleunigt, ist gleich dem **Produkt** aus der **Masse m** (als Maß für die Trägheit) des Körpers und seiner **Beschleunigung a** .

$$F = m \cdot a$$

6. **Wechselwirkung** zwischen **zwei Körpern**

Zur Demonstration der Wechselwirkung zwischen zwei Körpern hat *Newton* folgenden Versuch angegeben: Ein Magnet und ein Eisenstück schwimmen je auf einem Korkstück im Wasser. Eisenstück und Magnet bewegen sich aufeinander zu und bleiben nach dem Zusammentreffen in Ruhe.



Schlußfolgerungen von Newton: Nicht nur der Magnet zieht das Eisenstück an, sondern auch umgekehrt zieht das Eisenstück den Magneten an. Ferner sind die beiden Anziehungskräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ entgegengesetzt gerichtet und haben gleiche Beträge, also ist $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$, denn wäre z.B. der Betrag der Kraft $\vec{F}_1$ größer als der Betrag der Kraft $\vec{F}_2$, dann müßte sich beide Körper nach dem Zusammentreffen unter dem Einfluß des Kraftüberschusses ($\Delta F = F_1 - F_2$) gemeinsam in Richtung der größeren Kraft $\vec{F}_1$ weiterbewegen.

- **Wechselwirkungsprinzip** oder **Reaktionsprinzip** (**3. Axiom** von **Newton**)

> Die **Wirkung** ist stets der **Gegenwirkung** gleich, oder: die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung. Bezogen auf Kräfte heißt dies: Wenn ein Körper A auf einen Körper B eine Kraft $\vec{F}_1$ ausübt, so übt der Körper B auf den Körper A **stets** eine Gegenkraft $\vec{F}_2$ aus, die **gleich groß** und **entgegengesetzt** gerichtet ist .

- **Beispiele** zum Wechselwirkungsprinzip

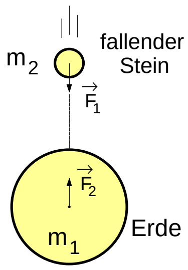


Bild **1**

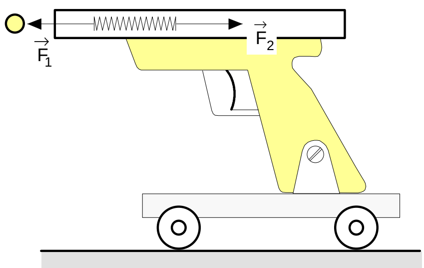


Bild **2**

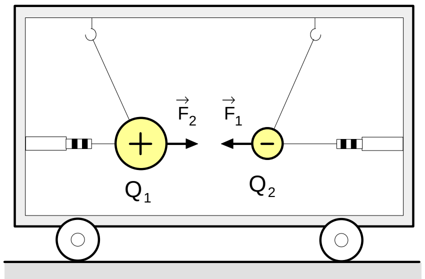


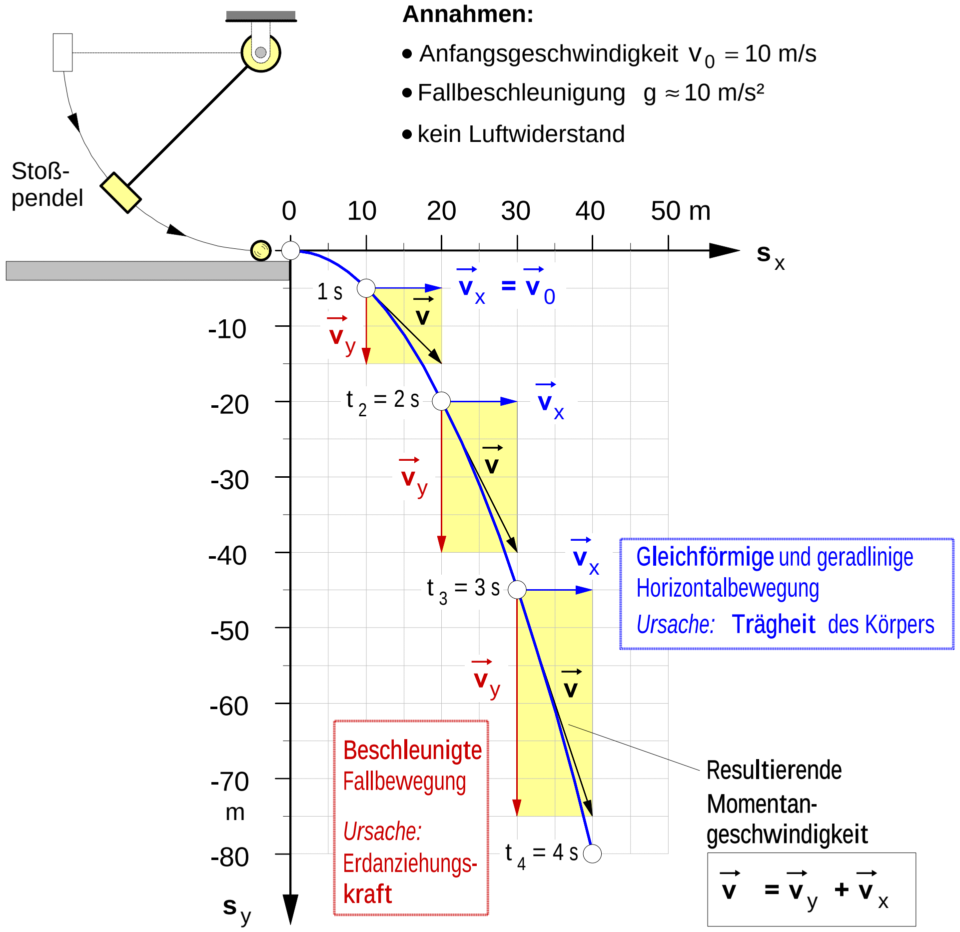
Bild **3**

● Der **waagerechte Wurf** – Eine besondere Form der Wurfbewegung

a) Wegdiagramm mit Wurfkurve (Beispiel: $\mathbf{v_o}$ = **10** m/s ; **g** ≈ **10** m/s² ; kein Luftwiderstand)

Annahmen:

- Anfangsgeschwindigkeit v_0 = 10 m/s
- Fallbeschleunigung g ≈ 10 m/s²
- kein Luftwiderstand



Aufgabe

- Berechnen Sie mit den nebenstehenden Annahmen die in der folgenden Tabelle fehlenden Werte.
- Übertragen Sie diese Werte anschließend in das Wegdiagramm und zeichnen Sie die Kennlinie $\mathbf{s_y}$ = f ($\mathbf{s_x}$).

t	s_x	s_y
1 s	**10** m	**- 5** m
2 s	**20** m	**- 20** m
3 s	**30** m	**- 45** m
4 s	**40** m	**- 80** m

b) **Begründung** der **Bewegungsformen** und kinematische Gesetze

Der mit einer Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ waagerecht geworfene Körper führt **gleichzeitig zwei Bewegungen** aus, die sich in **jedem Moment** ungestört zu einer resultierenden Geschwindigkeit $\vec{v}$ überlagern:

1. Eine kräftefreie (gleichförmige und geradlinige) **Trägheitsbewegung** mit der Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ (= $\vec{v}_x$ = const.) in waagerechter Richtung aufgrund seiner **Massenträgheit** und

2. eine **beschleunigte Fallbewegung** nach unten mit $\vec{a} = -\vec{g}$ infolge der **Erdanziehungskraft**.

▶ Für die Beträge der **Horizontalkomponenten** der Momentangeschwindigkeit $\vec{v}$ und des zurückgelegten Weges $\vec{s}$ gilt in jedem Zeitpunkt **t** :

$$\boxed{v_x = v_0} \qquad \boxed{s_x = v_x \cdot t = v_0 \cdot t}$$

▶ Für die Beträge der **Vertikalkomponenten** der Momentangeschwindigkeit $\vec{v}$ und des zurückgelegten Weges $\vec{s}$ gilt in jedem Zeitpunkt **t** :

$$\boxed{v_y = 0 - g \cdot t} \qquad \boxed{s_y = 0 - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2}$$

Weitere Aufgaben

1. Geben Sie die Funktionsgleichung $\mathbf{s_y}$ = f ($\mathbf{s_x}$) für die Wurfkurve in dem oben dargestellten Wegdiagramm an.
2. Nach obiger Darstellung hat der Körper nach 4 Sekunden eine Fallstrecke von 80 Metern zurückgelegt. Welche Zeit würde ein genau senkrecht nach unten fallender Körper für diese Fallstrecke benötigen?
3. Aus einem horizontal in einer Höhe von 125 Metern fliegenden Transportflugzeug sollen über einem Katastrophengebiet möglichst zielgenau Hilfsgüter abgeworfen werden. In welchem horizontalen Abstand vor dem Ziel muß der Abwurf erfolgen, wenn die Fluggeschwindigkeit 504 km/h beträgt (g = 9,81 m/s²) ? [706,7 m]

Kurs : **PRINZIPIEN der MECHANIK**	Name: PHY22-2F.DOC - 30.04.01	
Arbeitsblatt Nr. **22** :	**Fall-** und **Wurfbewegungen**	Seite **2**

● Der **schiefe Wurf** – Die allgemeine Form der Wurfbewegung

a) Wegdiagramm mit Wurfkurve (Beispiel: $\mathbf{v_o}$ = **36,05** m/s ; α = **56,3°** ; **g** = **10** m/s²)

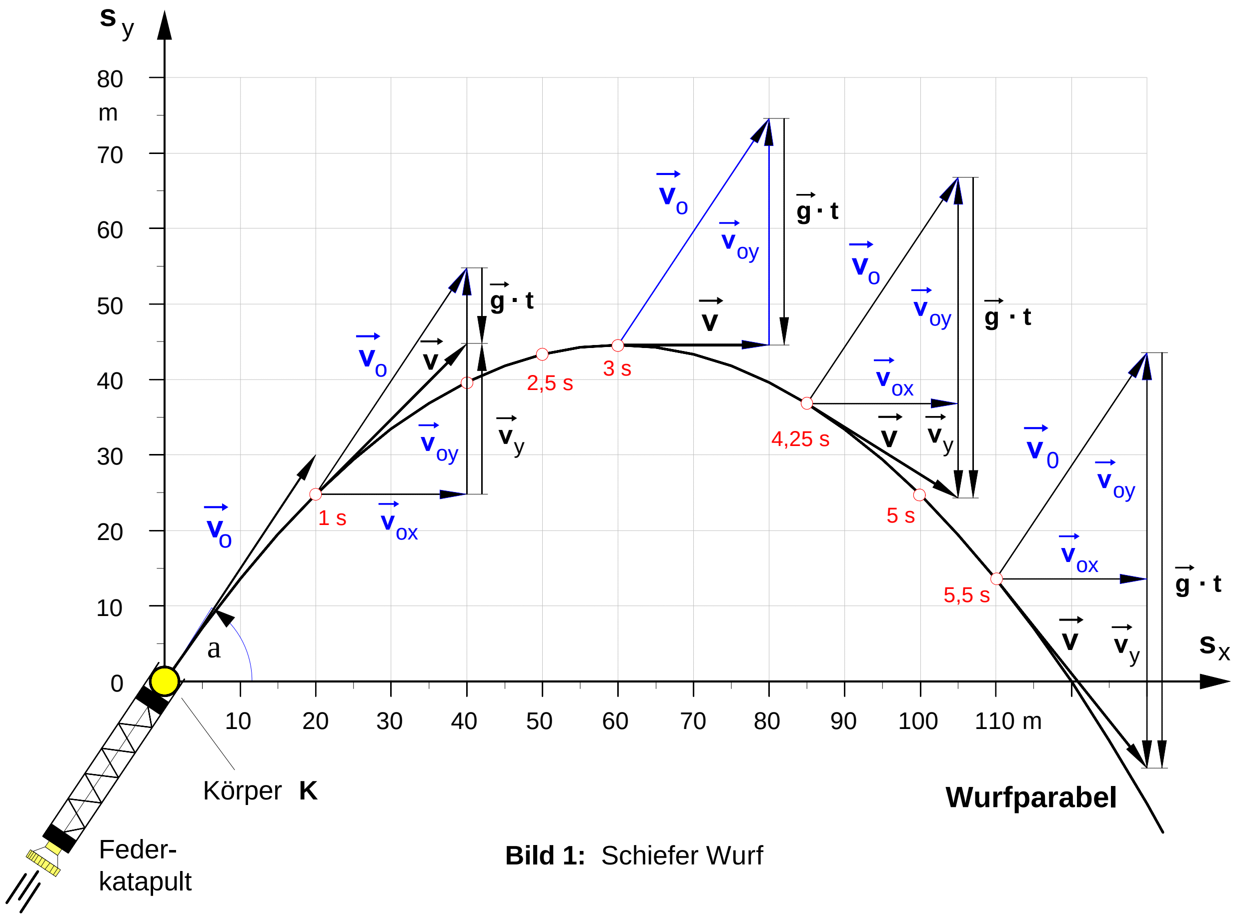


Bild 1: Schiefer Wurf

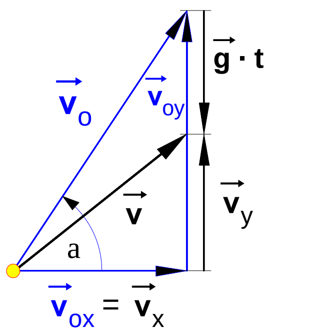


Bild 2: Geschwindigkeits-vektoren

$\vec{v}_o$ ... Anfangsgeschwindigkeit im Zeitpunkt t_o

$\vec{v}_{ox}$,$\vec{v}_{oy}$... Komponenten von $\vec{v}_o$

$\vec{v}$ ... Momentangeschwin-digkeit im Zeitpunkt **t**

$\vec{v}_x$,$\vec{v}_y$ ... Komponenten von $\vec{v}$

$\sin\alpha = \frac{v_{0y}}{v_0} \Rightarrow v_{0y} = v_0 \cdot \sin\alpha$

$\cos\alpha = \frac{v_{0x}}{v_0} \Rightarrow v_{0x} = v_0 \cdot \cos\alpha$

b) Begründung der **Bewegungsformen** und kinematische Gesetze

Der unter einem Abwurfwinkel a mit einer Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ schräg nach oben geworfene Körper **K** führt **gleichzeitig zwei Bewegungen** aus, die sich in jedem Moment ungestört überlagern:

1. Eine kräftefreie (gleichförmige und geradlinige) **Trägheitsbewegung** mit der Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ in Richtung des Wurfwinkels a infolge seiner **Massenträgheit** und

2. eine **beschleunigte Fallbewegung** nach unten mit $\vec{a} = -\vec{g}$ infolge der **Erd-anziehungskraft**.

▶ Für die Beträge der **Horizontalkomponenten** der Momentangeschwindigkeit $\vec{v}$ und des zurückgelegten Weges $\vec{s}$ gilt in jedem Zeitpunkt **t** :

$$\boxed{v_x = v_{ox} = v_0 \cdot \cos\alpha}$$

$$\boxed{s_x = v_x \cdot t = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t}$$

▶ Für die Beträge der **Vertikalkomponenten** der Momentangeschwindigkeit $\vec{v}$ und des zurückgelegten Weges $\vec{s}$ gilt in jedem Zeitpunkt **t** :

$$\boxed{v_y = v_{oy} - g \cdot t = v_0 \cdot \sin\alpha - g \cdot t}$$

$$\boxed{s_y = v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2}$$

● Wie Galilei den "freie Fall" als allgemeine Form der Fallbewegung begründete

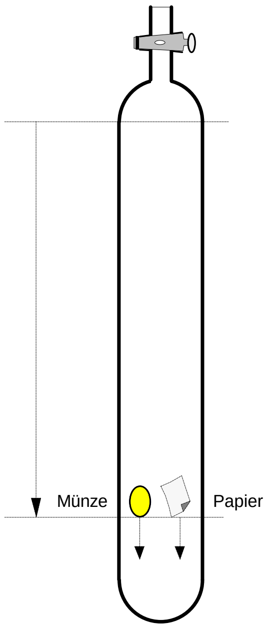
▶**Historische Vorbemerkung**: Nach ***Aristoteles*** besitzt jeder "schwere Körper", wie beispielsweise ein Stein, den man vom Boden aufhebt und dann wieder losläßt, die Eigenschaft, mit einer **bestimmten**, im gleichsam "von Natur aus" eingeprägten **Geschwindigkeit** zur Erde zu fallen, denn die Erde sei der "natürliche Ort" dieser Körper. Bei Körpern mit größerem Gewicht sei dieses Bestreben von "Natur aus" stärker ausgeprägt als bei leichteren. Daher fallen nach Aristoteles schwerere Körper auch rascher zur Erde als leichtere, denn ihnen sei von "Natur aus" nur eine geringere Fallgeschwindigkeit eingeprägt. Diese Auffassung scheint mit unseren Erfahrungen weitgehend übereinzustimmen. So fällt gemäß unseren Alltagswahrnehmungen z.B. eine Bleikugel schneller zur Erde als eine Flaumfeder.

▶Zu dieser Frage, ob schwere Körper schneller zur Erde fallen als leichte, zunächst **zwei Lehrbuchtexte** :

1. In einem weit verbreiteten Hochschullehrbuch der Experimentalphysik wird dazu festgestellt :

»Zwei gleich große Kugeln aus Aluminium und Blei, die also sehr verschiedenes Gewicht haben, lassen wir gleichzeitig aus derselben Höhe zu Boden fallen. Wir stellen fest, daß sie zur gleichen Zeit am Boden aufschlagen, wie bereits **Galilei** 1590 durch Fallversuche am schiefen Turm von Pisa festgestellt hat.« Nach einer kurzen Beschreibung eines weiteren Versuchs, demzufolge eine Flaumfeder und eine Bleikugel, die man in einem luftleer gepumpten Glasrohr gleichzeitig fallen läßt, »im gleichen Augenblick auf den Boden des Rohres aufschlagen«, kommt der Autor zum Schluß: »Wir dürfen also das **Erfahrungsgesetz** aussprechen: **Im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell**.«

Quelle: L.Bergmann - Cl.Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band I, Berlin 1961, S. 33 f.



2. In einem Physikbuch für die Oberstufe heißt es dazu:

»Galilei habe - so wird berichtet - den schiefen Turm von Pisa bestiegen und von oben verschieden schwere Körper gleichzeitig hinabgeworfen. Wenngleich dies wohl eine Legende sein dürfte, so steht doch fest, daß er Fallversuche tatsächlich durchgeführt hat. Er beobachtete dabei, daß die Körper trotz ihres unterschiedlichen Gewichtes nahezu gleichzeitig den Boden erreichten. ...

Man kann **Galileis Versuch (!)** leicht wiederholen. Man nehme eine Münze und ein kleines Stück Papier und lasse sie gleichzeitig aus der gleichen Höhe zu Boden fallen. Die Münze wird schnell unten sein, während das Stück Papier sich sehr viel länger in der Luft herumtreibt. Zerknüllt man aber das Papier und rollt es zu einem kleinen Kügelchen zusammen, dann wird es fast so schnell fallen wie die Münze. Läßt man die Fallbewegung schließlich in einem **luftleer gepumpten Glasrohr** (siehe Abb. rechts) vor sich gehen, so wird man feststellen, daß die Münze und das Stück Papier mit genau der gleichen Geschwindigkeit zu Boden fallen.«

Quelle: R.Sexl u.a., Das mechanische Universum, Eine Einführung in die Physik, Band 1, Frankfurt am Main 1980, S. 15

▶**Zwei kurze historische Zwischenbemerkungen**:

1. **Galilei** ist am 8.Januar **1642** in Arcetri bei Florenz im Hausarrest gestorben.
2. Die **Vakuum**pumpe wurde im Jahre **1650** von dem Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke erfunden.

▶Galileis Begründung **des** "freien Falls" **im Vakuum** als allgemeine Form der Fallbewegung

Salviati: ... Nachdem ich mich von der Unwahrheit dessen überzeugt hatte, daß ein und derselbe Körper in verschieden widerstehenden Mitteln Geschwindigkeiten erlange, die den Widerständen umgekehrt proportional seien, sowie von der Unwahrheit dessen, daß Körper von verschiedenem Gewicht in ein und demselben Mittel diesen Gewichten proportionale Geschwindigkeiten erlangen ... , kombinierte ich beide Erscheinungen, indem ich Körper verschiedenen Gewichtes in verschieden widerstehende Medien brachte, und fand, daß die erzeugten Geschwindigkeiten um so mehr von einander abwichen, als der Widerstand des Mediums größer war, und zwar in solchem Betrage, daß zwei Körper, die in der Luft nur sehr wenig verschieden fallen, im Wasser um's Zehnfache differieren können; auch kommt es vor, daß ein Körper in der Luft fällt, im Wasser dagegen schwebt, d.h. sich gar nicht bewegt, ja sogar emporsteigt. ... Angesichts dessen glaube ich, daß wenn man den Widerstand der Luft ganz aufhöbe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden.

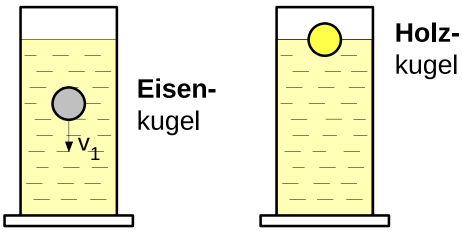
Simplicio: Das ist eine gewagte Behauptung, Herr Salviati. Ich meinerseits werde nie glauben, daß in ein und demselben Vakuum, wenn es in demselben eine Bewegung gibt, eine Wollflocke ebenso schnell wie Blei fallen werde.

Salviati: Nur gemach, Herr Simplicio, Euer Bedenken ist nicht so begründet, und ich bin nicht um Antwort in Verlegenheit. Zu meiner Rechtfertigung und zu Eurer Belehrung hört mich an : Wir wollen die Bewegung der verschiedensten Körper in einem nicht widerstehenden Mittel untersuchen, **so daß alle Verschiedenheit auf die fallenden Körper zurückzuführen wäre**. Und da nur ein Raum, der völlig luftleer ist und auch keine andere Materie enthält, sei dieselbe noch so fein und nachgiebig, geeignet erscheint das zu zeigen, was wir suchen, und da wir solch einen Raum **n i c h t** herstellen können, so wollen wir prüfen, was in feineren Medien und weniger widerstehenden geschieht im Gegensatz zu anderen weniger feinen und stärker widerstehenden. Finden wir tatsächlich, daß verschiedene Körper **immer weniger verschieden sich bewegen**, je nachgiebiger die Medien sind, und dass schließlich, trotz sehr großer Verschiedenheit der fallenden Körper im allerfeinsten Medium der allerkleinste Unterschied verbleibt, ja eine kaum noch wahrnehmbare Differenz, dann, scheint mir, dürfen wir mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen, daß im Vakuum völlige Gleichheit eintreten werde.

Quelle: Galileo Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend, Leyden 1638. In deutscher Übersetzung hrsg. von Arthur v. Oettingen, Nachdruck: Darmstadt 1973, S. 62 und 65 f.

▶ Relativ willkürlich gewähltes **Zahlenbeispiel** zur **Verdeutlichung des Gedankenganges** von **Galilei**

1. Wasser als Medium

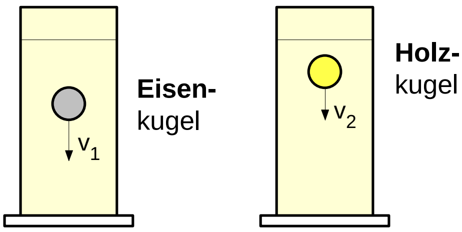


Geschwindigkeits-unterschied :

mittlere Fallgeschwindigkeit:

v_1 = 2 m/s $\quad$ v_2 = 0 m/s $\quad$ **Δv = 2 m/s**

2. Luft als Medium

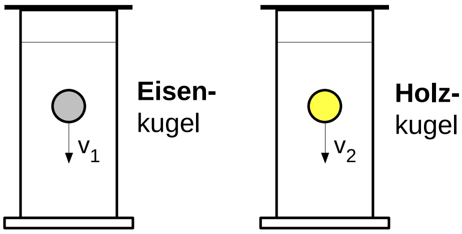


Geschwindigkeits-unterschied :

mittlere Fallgeschwindigkeit:

v_1 = 8 m/s $\quad$ v_2 = 7,5 m/s $\quad$ **Δv = 0,5 m/s**

3. Vakuum



Geschwindigkeits-unterschied :

mittlere Fallgeschwindigkeit:

v_1 = 8,2 m/s $\quad$ v_2 = 8,2 m/s $\quad$ **Δv = 0 m/s**

· **Fazit** von Galilei:

> Je dünner der Stoff (das „Medium“) ist, in dem die verschieden schweren Körper fallen, desto geringer sind die Geschwindigkeits**unterschiede**.
>
> Im völlig stofflosen, also im **leeren Raum** (Vakuum), gibt es überhaupt **keinen Unterschied** mehr, d.h. dort **fallen a l l e Körper gleich schnell**.

Anmerkung: Galilei spricht von der „Geschwindigkeit“ der fallenden Körper. Gemeint ist aber deren Beschleunigung. Denn was im stofferfüllten unterschiedlich ist bzw. im Vakuum gleich ist, ist **nicht** die „Geschwindigkeit“, sondern die **Beschleunigung**, mit der die verschiedenen Körper fallen.