

# Was gibt es in Vorlesung 2 zu lernen?

- Physikalische Größen
  - bestehen immer aus Maßzahl und Einheit
- Einheiten
  - sieben Grundeinheiten im SI-System
- Messen
  - Vergleich mit einem Maßstab
  - Messgröße wird als Vielfaches einer Einheit bestimmt
  - Jedes Messergebnis hat einen Fehler!
  - Fehlerrechnung ergibt Vertrauensintervall

## Was gibt es in Vorlesung 2 zu lernen?

- Klassische Mechanik (nicht zu schnell und nicht zu klein) wird in Kinematik und Dynamik unterteilt
- Kinematik beschreibt Bewegungen nur, Dynamik fragt nach den Ursachen für die Bewegung (Kräfte)
- Kinematik des Massepunktes

# Physikalische Größen I

- Formulierung von Naturgesetzen mit Hilfe mathematischer Gleichungen
- in Gleichungen erscheinen physikalische Begriffe in Form **physikalischer Größen**
- Physikalische Größe = Produkt aus Maßzahl und Einheit (z. B. 3,4 m  $\Leftrightarrow$  Maßzahl: 3,4 Einheit: m (Meter))
- Basisgrößen (z. B. Länge)  $\Rightarrow$  abgeleitete Größen (z. B. Volumen)

Schreibweisen:

- $L$  = physikalische Größe (z. B. Länge  $L$ ), z. B.  $L = 1 \text{ m}$
- $[L]$  = nur Einheit, z. B.  $[L] = \text{m}$
- $\{L\}$  = nur Maßzahl, z. B.  $\{L\} = 1$

# Physikalische Größen II

- vektorielle Größen: Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$ , Kraft  $\mathbf{F}$ , ...  
Betrag und Richtung zur vollständigen Beschreibung erforderlich
- skalare Größen: Masse  $m$ , ... Nur ein Wert beschreibt Größe vollständig (keine Richtung)

## Dimension einer Größe

- Dimension gibt qualitativ den Zusammenhang der Größe mit den entsprechenden Basisgrößen an
- Beispiel: Basisdimensionen Mechanik sind  $l$ ,  $t$ ,  $m$
- Dimension Volumen  $V = l^3$ , Dimension Dichte  $\rho = Ml^{-3}$
- Einheit  $[V] = \text{cm}^3$  oder  $\text{m}^3$  oder  $\text{km}^3$ .....

# Basiseinheiten

Basisgröße		Basiseinheit	
Symbol	Bezeichnung	Symbol	Bezeichnung
l	Länge	m	Meter
t	Zeit	s	Sekunde
m	Masse	kg	Kilogramm
I	elektrische Stromstärke	A	Ampere
T	Temperatur	K	Kelvin
n	Stoffmenge	mol	Mol
I <sub>v</sub>	Lichtstärke	cd	Candela

- Internationales Einheitensystem (SI-Einheiten)
- andere Systeme: Halten Sie sich davon fern, wenn nicht nötig!

Vorsatz- bezeichnung	Vorsatz- symbol	Wert	Beispiel
Exa	E	$10^{18}$ Einheiten	Eg Exagramm
Peta	P	$10^{15}$ Einheiten	PJ Petajoule
Tera	T	$10^{12}$ Einheiten	TΩ Teraohm
Giga	G	$10^9$ Einheiten	GeV Gigaelektronenvolt
Mega	M	$10^6$ Einheiten	MW Megawatt
Kilo	k	$10^3$ Einheiten	km Kilometer
Hekto <sup>1)</sup>	h	$10^2$ Einheiten	hl Hektoliter
Deka <sup>1)</sup>	da	$10^1$ Einheiten	dag Dekagramm
Dezi <sup>1)</sup>	d	$10^{-1}$ Einheiten	dm Dezimeter
Zenti <sup>1)</sup>	c	$10^{-2}$ Einheiten	cm Zentimeter
Milli	m	$10^{-3}$ Einheiten	ms Millisekunde
Mikro	μ	$10^{-6}$ Einheiten	μA Mikroampere
Nano	n	$10^{-9}$ Einheiten	nm Nanometer
Piko	p	$10^{-12}$ Einheiten	pF Pikofarad
Femto	f	$10^{-15}$ Einheiten	fm Femtometer
Atto	a	$10^{-18}$ Einheiten	am Attometer

## Einheiten: Vorsilben

Oft ist die  
Basiseinheit im  
Bezug auf die  
Größenordnung  
unpassend  
(F, J,..)  
=>  
Vorsilben

<sup>1)</sup> Diese Vorsätze sollen nur bei solchen Einheiten angewendet werden, bei denen sie bisher bereits üblich waren: s. die obigen Beispiele sowie hPa (Hektopascal).

# Rechnen mit Einheiten

- In physikalischen Gleichungen tauchen die Größen mit Einheit auf!
- Es empfiehlt sich, alles auf SI-Basiseinheiten umzurechnen. Das vermeidet Fehler!
- Am Ende kann das Ergebnis wieder auf handliche Einheiten umgerechnet werden
- Merke: Werden alle Größen in SI-Basiseinheiten eingesetzt, dann ergibt sich das richtige Ergebnis in der zugehörigen SI-Einheit
- Klausurtyp: Das Ergebnis muss die richtige Einheit haben (z. B. zurückgelegter Weg = m). Sonst ist eventuell in der Rechnung etwas falsch!

# Rechnen mit Einheiten: Beispiel

$$t = 55 \text{ min} \quad , \quad s = 1,2 \text{ km}$$



# Basiseinheit Zeit: Sekunde

1 Sekunde = 1 s = 9192631770 Schwingungen des  
Hyperfeinübergangs von  $^{133}\text{Cs}$

- Ursprüngliche Definition durch Bruchteile der Erdumdrehung:  
1/86400 eines mittleren Sonnentages
- Gebräuchliche SI-fremde Einheiten:  
1 min = 60 s ; 1 h = 3600 s, 1 d =  $86,4 \times 10^3$  s
- Zeitmessung:  
mechanische Uhren (10<sup>-1</sup> s)  
Quarzuhren (10<sup>-6</sup> s)  
Atomuhren (10<sup>-9</sup> s - 10<sup>-12</sup>s)

# Basiseinheit Zeit

## Zeitspektrum

- Licht durch Atomkern (gerechnet)  $10^{-23}$  s
- Halbwertszeit des  $\pi$ -Mesons  $10^{-16}$  s
- Umlaufzeit des Elektrons im Atom  $10^{-12}$  s
- Funkendauer  $10^{-6}$  s
- Menschlicher Pulsschlag 1 s
- Erdalter  $10^{17}$  s

# Basiseinheit Länge: Meter

1 Meter = 1 m = Strecke, die das Licht in der Zeit  
1/199792458 Sekunden durchläuft

- Die Lichtgeschwindigkeit ist also definiert!  $c = 299792458 \text{ m/s}$
- ursprünglich 10-millionster Teil der Entfernung Äquator-Pol über Paris (1795)
- Urmeter: Stab mit zwei Markierungen, wird in Paris aufbewahrt
- SI-fremde Einheiten: pm, nm,  $\mu\text{m}$ , cm, dm, km
- Angelsächsisches System: 1'' (Zoll = Inch) =  $25,4 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Längenmessung:

Gliedermaßstab	$(10^{-3} \text{ m})$
Messschieber	$(10^{-5} \text{ m})$
Interferometer	$(10^{-9} \text{ m})$

# Basiseinheit Länge

## Längenspektrum

• Durchmesser Proton	$10^{-15}$ m
• Durchmesser Atomkern	$10^{-14}$ m
• Durchmesser Atom	$10^{-10}$ m
• Bakterie	$10^{-6}$ m
• Mensch	2 m
• Erdradius	$10^6$ m
• Abstand Erde-Sonne	$10^{12}$ m
• Durchmesser Milchstraße	$10^{21}$ m
• fernster Nebel	$10^{25}$ m

# Basiseinheit Masse: Kilogramm

1 Kilogramm = 1 kg = Masse des internationalen  
Kilogramm-Prototyps

- Masse von 1 L Wasser bei Normalbedingungen (Druck, Temperatur)
- SI-fremde Einheiten: ng,  $\mu\text{g}$ , Mg ([t] = Tonne)
- Angelsächsisches System: stone ( $\sim 6,35$  kg), pound ( $\sim 454$  g)
- für atomare Massen: *atomare Masseneinheit* u, 1 u entspricht 1/12 der Masse von  $^{12}\text{C}$ ,  $1 \text{ u} = 1,66043 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- nicht mit „Gewicht“ verwechseln: Gewicht bezeichnet eine Kraft. Gewicht eines Körpers ist auf Erde und Mond unterschiedlich, die Masse nicht!

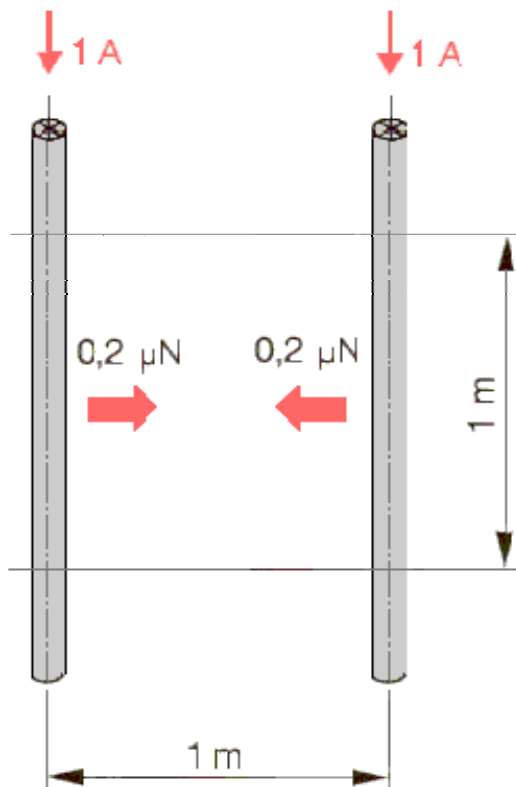
# Basiseinheit Masse

## Massenspektrum

• Ruhemasse Elektron	$10^{-30}$ kg
• Ruhemasse Proton	$10^{-27}$ kg
• Grippevirus	$10^{-19}$ kg
• Bakterie	$10^{-12}$ kg
• menschliche Eizelle	$10^{-9}$ kg
• Mensch	$10^2$ kg
• Masse Erde	$10^{24}$ kg
• Masse Sonne	$10^{30}$ kg
• beobachtbares Universum	$10^{53}$ kg

# Basiseinheit elektrische Stromstärke: Ampere

1 Ampere = 1 A: Es fließt ein Strom von 1 A durch zwei parallele Leiter im Abstand von 1 m, wenn er zwischen den Leitern pro 1 m Länge eine Kraft von  $2 \times 10^{-7}$  N hervorruft.



- Definition über die magnetische Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern
- SI-fremde Einheiten: fA, pA, nA, µA, mA, kA

# Basiseinheit Temperatur: Kelvin

1 Kelvin = 1 K = 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser

- Absoluter Nullpunkt entspricht 0 K
- SI-fremde Einheiten: °C (Grad Celcius)
- Intervalle sind auf der der Kelvin- und Celsius-Skala gleich
- 0 °C entspricht 273,13 K
- Fahrenheit ist Mist aber in den USA gebräuchlich



# Basiseinheit Stoffmenge: Mol

1 Mol = 1 mol = Stoffmenge, die soviel Einzelteilchen (Atome/Moleküle..) wie 12 g  $^{12}\text{C}$  enthält

- 1 mol enthält  $N_A$  Teilchen
- $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (Avogadro-Zahl)
- in einem  $\text{cm}^{-3}$  Festkörper sind etwa  $N_A$  Atome (Größenordnung)

Das ist eine tolle Zahl, die man sich merken könnte!

# Basiseinheit Lichtstärke: Candela

1 Candela = 1 cd = Lichtstärke einer Strahlung von 540 THz (550 nm) mit 1/683 Watt/Sr Strahlstärke

- Isotrope Lichtquelle mit  $I = 1$  cd strahlt einen Lichtstrom  $d\Phi$  von 1 Lumen pro  $d\Omega = 1$  sr ab.  $I = d\Phi/d\Omega$  .
- Haushaltskerze strahlt etwa 12 Lumen in den gesamten Raumwinkel =>  $I = 1$  cd
- Empfindlichkeit des Auges geht in diese Definition ein!

Diese Einheit spielt im Verlauf der weiteren Vorlesung (und wahrscheinlich auch in Ihrem weiteren Studium) keine Rolle mehr.

# Messen I

Messen ist der Vergleich der zu messenden Größe mit  
einem „Maßstab“

=>

Messgröße wird als Vielfaches einer Einheit bestimmt

Beispiele:

Länge der Tischkante  $\Leftrightarrow$  Gliedermaßstab (Meter)

Gewicht einer Melone  $\Leftrightarrow$  Gewichtsstücke (Kilogramm)

Zeit bis zum Ende der Vorlesung  $\Leftrightarrow$  Oszillator bekannter Frequenz (s)

# Messen: Einschub

**Versuch: Messung der Schwingungsdauer eines Pendel mittels einer Stoppuhr**

# Messen II

Jede Messung hat einen Fehler!  
Fehler gehört zum Messergebnis!

**systematische Fehler:** Fehler im Versuchsaufbau, fehlerhaftes Messgerät,.....

**statistische Fehler:** schwankende Versuchsbedingungen, Ablesegenauigkeit

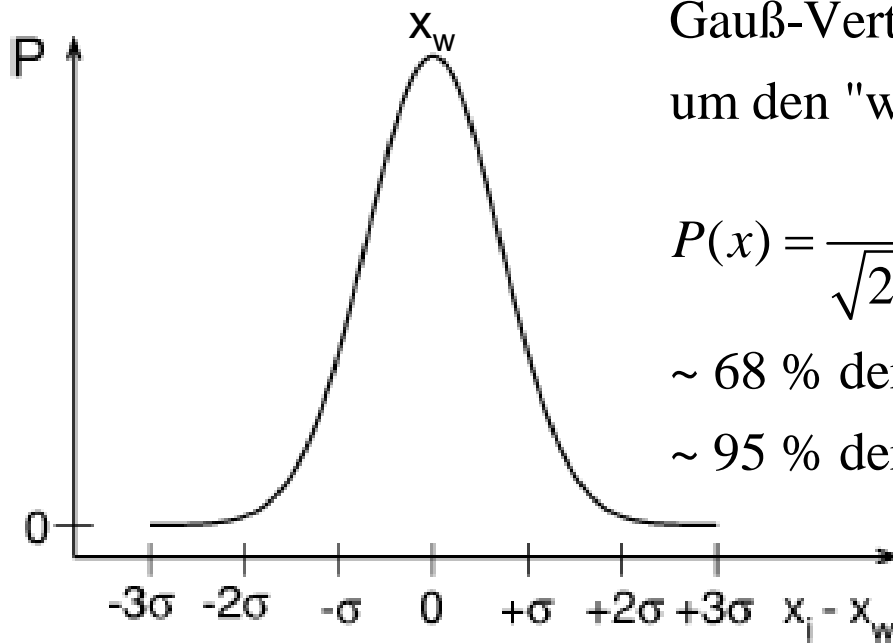
# Messen III

## Versuch: Schwingungsdauer Fadenpendel

1 Messung => 1 Wert mit unbekannter Genauigkeit

N Messungen => N Werte, die Abschätzung der Genauigkeit erlauben

Bei statistischen Fehlern ergibt sich eine Gauß-Verteilung der Wahrscheinlichkeit  $P$  um den "wahren Wert"  $x_w$



$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(x)}} e^{-\frac{(x_i - x_w)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Gaußglocke})$$

~ 68 % der Messwerte liegen innerhalb von  $\pm \sigma$

~ 95 % der Messwerte liegen innerhalb von  $\pm 2\sigma$

# Messen IV

**Für statistische Fehler (Gaußglocke) gelten folgende Beziehungen:**

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{arithmetischer Mittelwert})$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Standardabweichung, mittlere Fehler der Einzelmessung } x_i)$$

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma(x)}{N} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{mittlerer Fehler des Mittelwertes})$$

in der Regel gibt man das Ergebnis mit dem Vertrauensbereich von  $\pm \sigma$  an

$$x_w = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x})$$

# Messen: Fehlerfortpflanzung

**Wie groß ist der Fehler von  $y$ , wenn  $y = F(z_1, z_2, \dots)$ ? Antwort gibt das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz!**

$$\sigma(y) = \sqrt{\sigma^2(z_1) \left( \frac{\partial F}{\partial z_1} \right)^2 + \sigma^2(z_2) \left( \frac{\partial F}{\partial z_2} \right)^2 + \dots}$$

Beispiel:  $v = l/t$

$$F(l, t) = \frac{l}{t} \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial l} = \frac{1}{t} \quad \text{und} \quad \frac{\partial F}{\partial t} = -\frac{l}{t^2}$$

also ergibt sich für den Fehler in  $v$

$$\sigma(v) = \sqrt{\sigma(l)^2 \frac{1}{t^2} + \sigma(t)^2 \left( -\frac{l}{t^2} \right)^2}$$



# Mechanik: Allgemeines

- Die **Mechanik** beschäftigt sich mit der Bewegung von Körpern, unterteilt in Kinematik und Dynamik.
- **Kinematik** = Lehre von der Bewegung ohne Berücksichtigung der Ursache (Kräfte)
- **Dynamik** = Zusammenhang zwischen Bewegung und Kraft
- keine geschlossene Theorie: klassische Mechanik, Quantenmechanik (sehr klein), Relativitätstheorie (sehr schnell): hier zunächst **klassische Mechanik**

# Klassische Mechanik

Zunehmende Komplexität:

1. Kinematik von Massepunkten (Wie bewegt sich der MP als Funktion der Zeit?)
2. Dynamik des MP (Warum bewegt sich ein MP so wie er sich bewegt? => Kräfte)
3. Teilchensysteme
4. starre ausgedehnte Körper
5. deformierbare Körper

# Kinematik: Beschreibung der Bewegung

- **Allgemeine Bewegungsform:** Translation des Schwerpunktes  $S$  + Rotation um eine Achse durch den Schwerpunkt
- **Massepunkt** = ein Körper der Masse  $m$  kann modellhaft als MP behandelt werden, falls seine räumliche Ausdehnung keine Rolle spielt (Masse im Schwerpunkt konzentriert)
- für MP nur Translation!  
(Ein Punkt kann sich nicht drehen, da er keine Ausdehnung hat.)

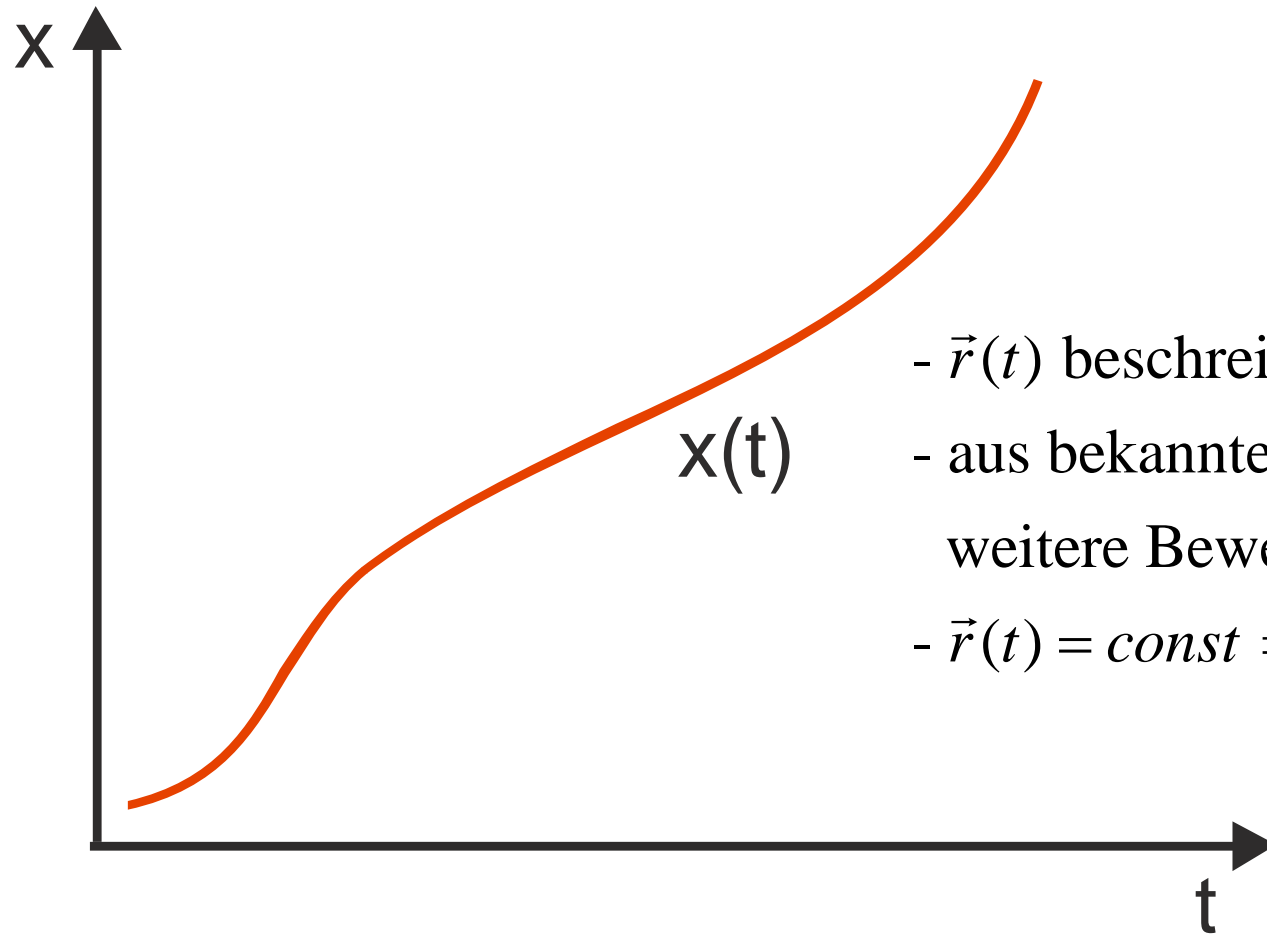
# Kinematik des Massepunktes: Bezugssystem

- Gesucht:  $\mathbf{r}(t)$  für einen MP (oder ausgedehnten Körper)  
„Bahnkurve“
- Zur Beschreibung ist ein **Bezugssystem** erforderlich (Achsen, auf die sich die Koordinatenangaben beziehen)
  - ruhende Bezugssysteme = gibt es fast nicht (Fixsterne)
  - Inertialsysteme = gleichförmig bewegte Systeme (wichtigste Klasse)
  - beschleunigte Systeme => Auftreten von Scheinkräften
- Wahl des Bezugssystems muss man sich klar machen  
(Mann im Zug: Fährt das Bezugssystem Zug oder ruht es auf den Schienen?)
- Geschickte Wahl des Bezugssystems vereinfacht viele Probleme

# Kinematik des Massepunktes: Inertialsystem

- Inertialsysteme werden nicht beschleunigt!
- physikalische Gesetze gelten in allen Inertialsystemen (d. h. es gilt die gleiche Gleichung)
- die Zahlenwerte variieren jedoch! (Mann im Zug)
- Wirkung von Kräften in jedem Inertialsystem gleich
- genauer im Abschnitt über die Relativitätstheorie

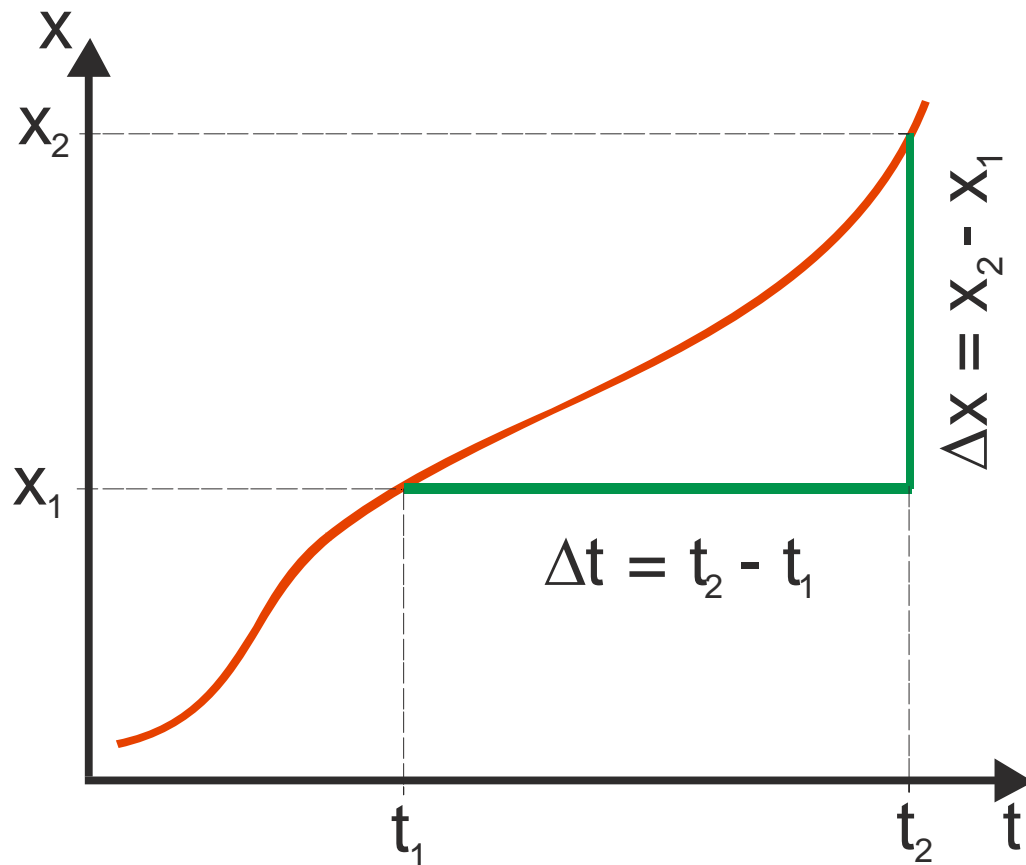
# Kinematik Bewegungsgrößen: Ort



- $\vec{r}(t)$  beschreibt die Bahnkurve
- aus bekannten  $\vec{r}(t)$  ergeben sich weitere Bewegungsgrößen
- $\vec{r}(t) = const \Rightarrow$  keine Bewegung

# Kinematik Bewegungsgrößen: Geschwindigkeit

Geschwindigkeit: Wegstrecke pro Zeit



- $\vec{v}(t)$  = Geschwindigkeit
- mittlere Geschwindigkeit in  $\Delta t$

$$\langle v_x \rangle_{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

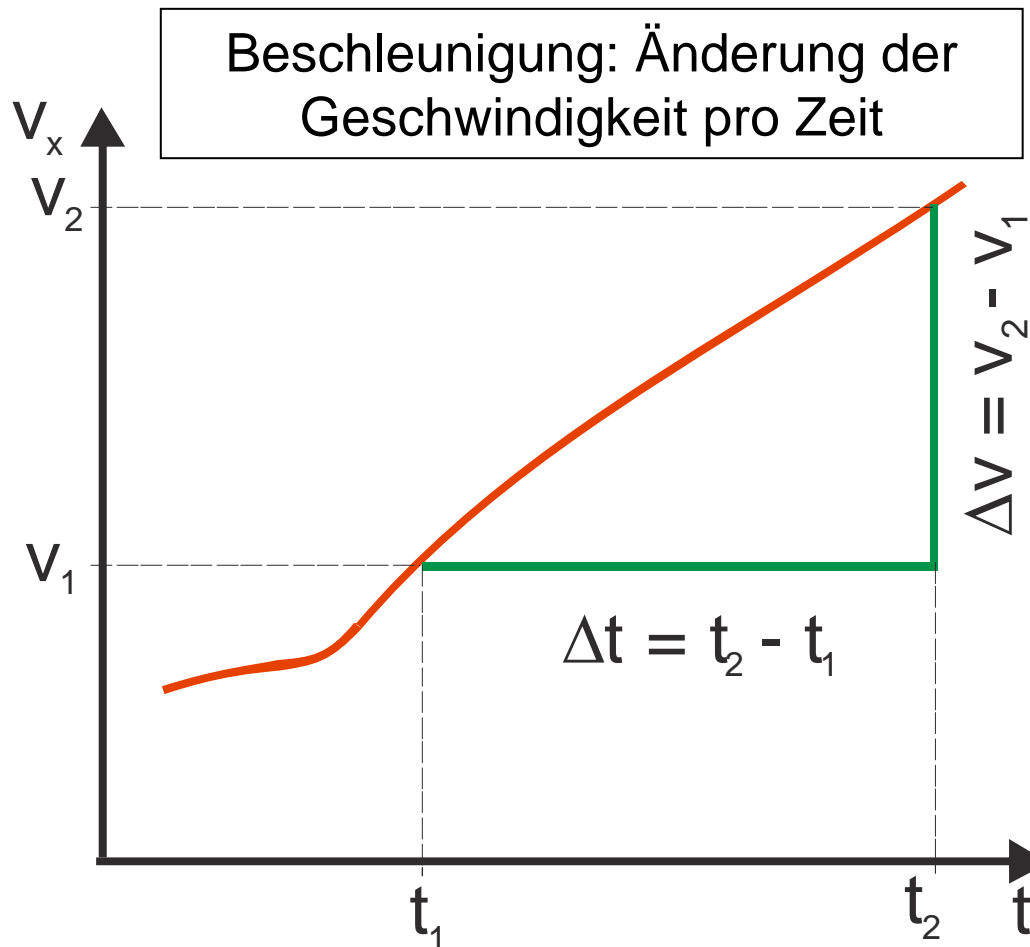
- Momentangeschwindigkeit  
(oft: Geschwindigkeit)

$$v_x(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \underbrace{\frac{dx(t)}{dt}}_{\text{Ableitung nach } t} = \dot{x}(t)$$

- in Vektorschreibweise

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \underbrace{\frac{d\vec{r}(t)}{dt}}_{\text{Ableitung nach } t} = \dot{\vec{r}}(t)$$

# Kinematik Bewegungsgrößen: Beschleunigung



- $\vec{a}(t)$  = Beschleunigung
- mittlere Beschleunigung in  $\Delta t$

$$\langle a_x \rangle_{\Delta t} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$$

- Momentanbeschleunigung  
(oft: Beschleunigung)

$$a_x(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x(t)}{dt} = \ddot{x}(t)$$

Ableitung nach t

- in Vektorschreibweise

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} =$$

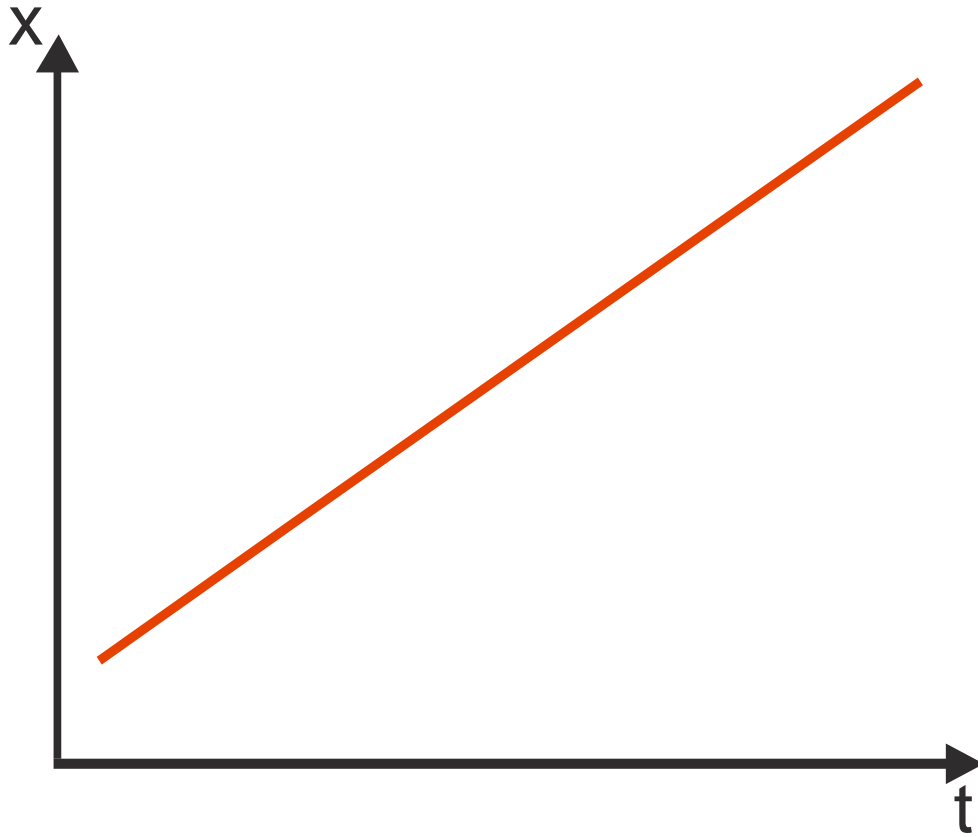
Ableitung nach t

$$\frac{d}{dt} \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \frac{d^2\vec{r}(t)}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}(t)$$

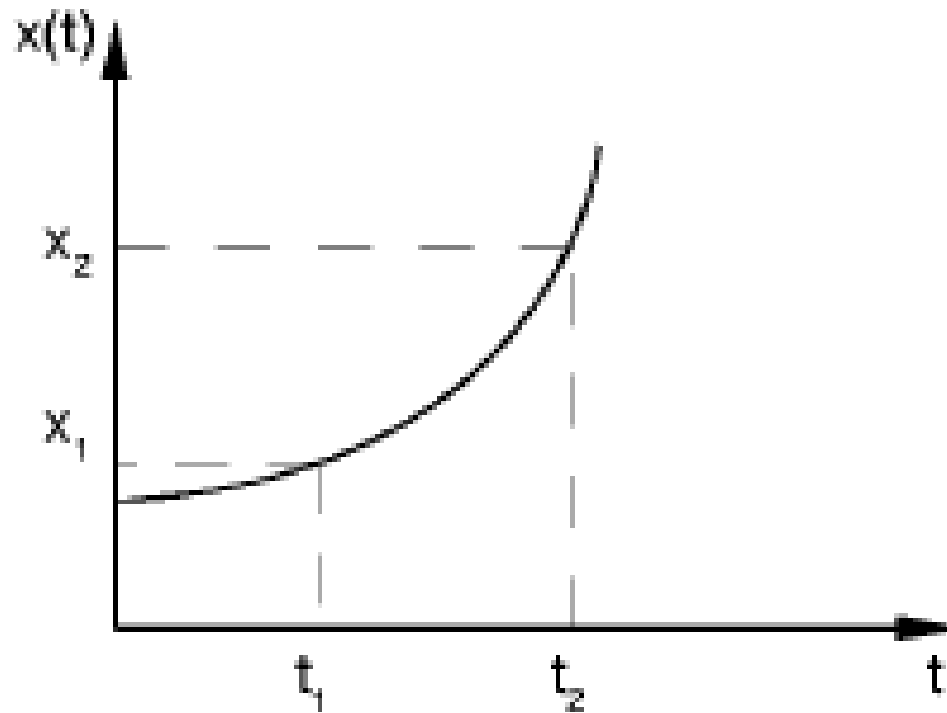
2. Ableitung nach t



# (Geradlinige) Gleichförmige Bewegung



# Gleichmäßig beschleunigte Bewegung



# Superpositionsprinzip

Für kinematische Vektoren ( $r$ ,  $v$ ,  $a$ ) gilt das Superpositionsprinzip (Vektoraddition)!

- Bewegung in eine Richtung hat keinen Einfluss auf dazu senkrechte Richtungen
- Superpositionsprinzip ist unabhängig von Größe und Richtung der Einzelvektoren und der Reihenfolge der Addition
- Superpositionsprinzip ist ein experimenteller Befund

**Beispiel: Fallversuch nach Galilei!**

# Was sollten Sie aus Vorlesung 2 mindestens gelernt haben/lernen?

- Physikalische Größen
  - bestehen immer aus Maßzahl und Einheit
  - die Einheit muss passen, sonst stimmt Ihre Rechnung nicht
- Einheiten
  - m, s, kg, A, T, n sind für uns die wichtigsten Grundeinheiten im SI-System
  - wichtige Vorsilben: nano (n,  $10^{-9}$ ), mikro ( $\mu$ ,  $10^{-6}$ ), milli (m,  $10^{-3}$ ), zenti (c,  $10^{-2}$ ), dezi (d,  $10^{-1}$ ), kilo (k,  $10^3$ ), Mega (M,  $10^6$ ), Giga (G,  $10^9$ )

# Was sollten Sie aus Vorlesung 2 mindestens gelernt haben/lernen?

- Messen
  - extrem wichtiger Prozess in den Naturwissenschaften
  - Vergleich der Messgröße mit einem Maßstab
  - jede Messung hat einen Fehler
  - statistische Fehler werden durch Gauß-Glocke beschrieben
- klassische Mechanik
  - beschreibt Bewegung von Körpern, solange nicht zu schnell ( $< 10\% c$ ) und nicht zu klein
  - Kinematik beschreibt Bewegung
  - Dynamik beschäftigt sich mit der Ursache der Bewegung (Kräfte)

## Was sollten Sie aus Vorlesung 2 mindestens gelernt haben/lernen?

- Konzept des Massepunktes
  - ein Körper kann als Massepunkt (Masse im Schwerpunkt konzentriert) genähert werden, wenn seine räumliche Ausdehnung für die Beschreibung keine Rolle spielt
  - für einen Massepunkt nur Translation

Was sollten Sie aus Vorlesung 2 mindestens gelernt haben/lernen?

## Bewegungsgrößen in der Kinematik

Ort:  $\vec{r}(t)$

Geschwindigkeit:  $\vec{v}(t) = \frac{d \vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}(t)$

Beschleunigung:  $\vec{a}(t) = \frac{d \vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}(t)$

Was sollten Sie aus Vorlesung 2 mindestens gelernt haben/lernen?

gleichförmige (gradlinige) Bewegung

Ort:

$$\boxed{\vec{r}(t) = \vec{v}_0 t + \vec{r}_0} ,$$

$\vec{r}_0 = \vec{r}(t = 0)$  Startort

Geschwindigkeit:

$$\boxed{\vec{v}(t) = \vec{v}_0 = \vec{v}(t = 0)}$$

Beschleunigung:

$$\boxed{\vec{a}(t) = 0}$$



# Was sollten Sie aus Vorlesung 2 mindestens gelernt haben/lernen?

gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Ort:

$$\vec{r}(t) = \frac{1}{2} \vec{a}_0 t^2 + \vec{v}_0 t + \vec{r}_0 \quad ,$$

$\vec{r}_0 = \vec{r}(t = 0)$  Startort

Geschwindigkeit:

$$\vec{v}(t) = \vec{a}_0 t + \vec{v}_0 \quad ,$$

$\vec{v}_0 = \vec{v}(t = 0)$  Startgeschwindigkeit

Beschleunigung:

$$\vec{a}(t) = \vec{a}_0$$