# Experimentalphysik (H.-C. Schulz-Coulon)

Robin Heinemann

October 26, 2016

## Contents

# 1 Begrüßung ist langweilig

# 2 Begrüßung2 ist auch langweilig

# 3 Moodle

Passwort: F=ma

# 4 Klausur

11.02.2017 (9 Uhr) 60% Übungspunkte

# 5 Bücher

| Buch | Bemerkung |
|---|---|
| Heintze; Lehrbuch zur Experimentalphysik I | |
| Haliday, Resnick, Walker; Physik | |
| Tipler, Allen; Physik | |
| Demtröder; Experimentalphysik I | |
| Bergman | |

online...

# 6 Einleitung

## 6.1 Eigenschaften der Physik

Physik ist <u>nicht</u> axiomatisch!

- Nicht alle Gesetze der Natur sind bekannt.
- Die bekannten Naturgesezte sind <u>nicht</u> unumstößlich
- unfertig
- empirisch
- quantitativ
- experimentell
- überprüfbar

- braucht Mathematik
- Gefühl für Größenordnungen und rationale Zusammenhänge

### 6.1.1 Beispiel

Fermi-Probleme:

- Anzahl der Klabirstimmer in Chicago?
- Anzahl der Autos in einem 10km Stau?
- Anzahl von Fischen im Ozean

## 6.2 Maßeinheiten

Internationales Einheitensystem (SI)

### 6.2.1 Basisgrößen

| Größe | Einheit | Symbol |
|---|---|---|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunden | s |

1. Meter Strecke, die das Lich im Cakuum während der Dauer von $\frac{1}{299792458}$s durchläuft.
2. Sekunde Das 9 192 631 770-fache der Periodendauder der am Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nukulids $Cs_{133}$ entsprechenden Strahlung.
3. Kilogramm Das Kilogramm ist die Einheit der Masse, es ist gleich der Masse des internationalen Kilogrammprototyps (ist scheiße).
   (a) Avogadroprojekt
   $$N_A = \frac{MVn}{m}$$
   $N_A$: Avogardokonstante ($N_A = 6.022\,141\,5 \times 10^{23}$)

### 6.2.2 Weitere Größen

| Größe | Einheit | Symbol |
|---|---|---|
| Strom | Ampere | A |
| Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtstärke | Candla | cd |

# 7 Mechanik

Kinematik: Beschreibung der Bewegung Dynamik: Ursache der Berwegung

## 7.1 Kinematik des Massenpunktes

### 7.1.1 Eindimensionale Bewegung

1. **TODO** Skizze 1 $x_1, t_1 \longrightarrow x_2, t_2$ Geschwindigkeit

$$v = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad [v] = \mathrm{m\,s^{-1}} \text{ abgeleitete Größe}$$

2. Momentangeschwindigkeit

$$v := \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \dot{x}$$

3. Beschleunigung

$$a := \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = \ddot{x} \quad [a] = \mathrm{m\,s^{-2}}$$

4. Freier Fall $a = \text{const.}$ (Behauptung)

$$a = \ddot{x} = \text{const} = \dot{v}$$

$→§ Integration:

$$v(t) = \int_0^t a \mathrm{d}t + v_0 = at + v_0$$

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v(t) \mathrm{d}t = x_0 + \int_0^t (at + v_0) \mathrm{d}t = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$$

Bei unserem Fallturm

$$x(t) = \frac{1}{2} a t^2 \to a = \frac{2x}{t^2}$$

| $x$[m] | $t$[ms] | $\frac{2x}{t^2}[\mathrm{m\,s^{-2}}]$ |
|---|---|---|
| 0.45 | 304.1 | 9.7321696 |
| 0.9 | 429.4 | 9.7622163 |
| 1.35 | 525.5 | 9.7772861 |
| 1.80 | 606.8 | 9.7771293 |

$$x(t) = \frac{1}{2} g t^2, \ g = 9.81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$$

Die Erdbeschleunigung $g$ ist für alle Körper gleich (Naturgesetz).

### 7.1.2 Bewegung im Raum

1. **TODO** Skizze 2 Ortsvektor:

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) & y(t) & z(t) \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}$$

   Durschnittsgeschwindigkeit

$$\frac{\Delta\vec{r}_{12}}{\Delta t} = \frac{\vec{r_2} - \vec{r_1}}{\Delta t} = \vec{v_D}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t} = \dot{\vec{r}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) & \dot{y}(t) & \dot{z}(t) \end{pmatrix}^{\mathsf{T}} = \begin{pmatrix} v_x & v_y & v_z \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}$$

$$\vec{a}(t) = \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = \dot{\vec{v}}(t) = \ddot{\vec{r}}(t) = \begin{pmatrix} \ddot{x} & \ddot{y} & \ddot{z} \end{pmatrix}^{\mathsf{T}} = \begin{pmatrix} a_x & a_y & a_z \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}$$

   $\rightarrow$ Superpositionsprinzip:
   Kinematik kann für jede einzelne (Orts)komponente einzeln betrachtet werden.

$$\vec{a_0} = \text{const}$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r_0} + \vec{v_0}(t - t_0) + \frac{1}{2}\vec{a}(t^2 - t_0^2) = \begin{pmatrix} x_0 + v_{x,0}(t - t_0) + \frac{1}{2}a_{x,0}(t^2 - t_0^2) \\ y_0 + v_{y,0}(t - t_0) + \frac{1}{2}a_{y,0}(t^2 - t_0^2) \\ z_0 + v_{z,0}(t - t_0) + \frac{1}{2}a_{z,0}(t^2 - t_0^2) \end{pmatrix}$$

2. Horizontaler Wurf

3. **TODO** Skizze 3

$$t_0 = 0$$

$$\vec{a_0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -g \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}$$

$$\vec{v_0} = \begin{pmatrix} v_{x,0} & 0 & 0 \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}$$

$$\vec{x_0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}$$

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} v_{x,0}t & 0 & \frac{1}{2}gt^2 \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}$$

4. Schiefer Wurf

$$\vec{a_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}$$

$$\vec{v_0} = \begin{pmatrix} v_{x,0} \\ 0 \\ v_{z,0} \end{pmatrix}$$

$$\vec{r_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_0 \end{pmatrix}$$

$$r(t) = \begin{pmatrix} v_{x,0}t \\ 0 \\ -\frac{1}{2}gt^2 + v_{z,0}t + z_0 \end{pmatrix}$$

$$z(x) = -\frac{1}{2}\frac{g}{v_{x,0}^2}x^2 + \frac{v_{z,0}}{v_{x,0}}x + z_0$$

5. Nachtrag

$$a = \dot{v}$$

$$\int_0^t \dot{v}\mathrm{d}t' = \int_0^t a\mathrm{d}t'$$

$$v \mid_0^t = at' \mid_0^t$$

$$v(t) - \underbrace{v(0)}_{v_0} = at$$

$$v(t) = at + v_0$$

analog:

$$x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

(a) **TODO** Skizze Wurfparabel

$$\tan\varphi = \frac{v_{z,0}}{v_{x,0}}$$

$$v_0^2 = v_{x,0}^2 + v_{z,0}^2$$

Scheitel:

$$Z'(x_s) = 0$$

$$x_s = \frac{v_0^2}{2g}\sin 2\varphi$$

Wurfweite:

$$Z(x_w) = 0$$

$$x_w = \frac{v_0^2}{2g}\sin 2\varphi(1+\sqrt{1+\frac{2gz_0}{v_0^2\sin^2\varphi}})$$

Optimaler Winkel: $\varphi_{opt}, x_w$ max.

$$z_0 = 0 \Rightarrow \sin 2\varphi = 1 \rightarrow \varphi = 45°$$

$$z_0 \neq 0 \Rightarrow \sin\varphi_{opt} = (2+\frac{2gz_0}{v_0^2})^{-\frac{1}{2}}$$

6. Gleichförmige Kreisbewegung

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R\cos\varphi \\ R\sin\varphi \end{pmatrix}$$

mit $\varphi = \varphi(t)$

$$\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R\dot{\varphi}\sin\varphi \\ R\dot{\varphi}\cos\varphi \end{pmatrix}$$

Gleichförmige Kreisbewegung: $\dot{\varphi} = \text{const}$ Definition Winkelgeschwindigkeit:

$$\omega = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = \dot{\varphi} \quad [w] = \mathrm{rad\,s^{-1}} = 1/\mathrm{s}$$

Für $\omega = \text{const.}$:

$$\vec{r} = R\begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \quad \rightarrow |\vec{r}(t)| = r = \text{const}$$

$$\vec{v} = R\omega\begin{pmatrix} -\sin\varphi \\ \cos\varphi \end{pmatrix} \quad \rightarrow |\vec{r}(t)| = r = \text{const}$$

$$\vec{v} \perp \vec{r} \Leftrightarrow \vec{v}\cdot\vec{r} = 0$$

(a) **TODO** Skizze Kreisbewegung

(b) Mitbewegtes Koordinatensystem

$$\vec{r}(t) = R\vec{e_R} \quad \vec{e_R} = \begin{pmatrix} \cos\varphi(t) \\ \sin\varphi(t) \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}(t) = R\omega\vec{e_t} \quad \vec{e_t} = \begin{pmatrix} -\sin\varphi(t) \\ \cos\varphi(t) \end{pmatrix}$$

$$\vec{t} \neq \text{ const das heißt } \vec{a}(t) \neq 0$$

Kreisbeschleunigung

$$\vec{a}(t) = \begin{pmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R\omega^2\cos\varphi \\ -R\omega^2\sin\varphi \end{pmatrix} = -R\omega^2\vec{e_R} \Rightarrow \vec{a} \parallel \vec{r}$$

$$|\vec{a}(t)| = R\omega^2 = \frac{v^2}{R} \neq 0$$

Zentripetalbeschleunigung Zeigt in Richtung des Ursprungs.

$$\vec{a}_{zp} = -R\omega^2\vec{e_R}$$

(c) Allgemein

$$\vec{\omega}$$

Räumliche Lage der Bewegungsebene

$$\vec{v} = \vec{w} \times \vec{r} \quad v = \omega r$$

$$\vec{a} = \vec{w} \times \vec{v}$$

i. **TODO** Skizze omega

7. Allgemeine Krummlinige Bewegung

$$\vec{v} = v\vec{e_t}$$

$$\vec{a} = \dot{\vec{v}} = \frac{\mathrm{d}(v\vec{e_t})}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\vec{e_t} + v\frac{\mathrm{d}ve_t}{\mathrm{d}t}$$

$$\vec{e_t} = \cos\rho\vec{e_x} + \sin\rho\vec{e_y}$$

$$\vec{e_n} = -\sin\rho\vec{e_x} + \cos\rho\vec{e_y}$$

$$\frac{\mathrm{d}\vec{e_t}}{\mathrm{d}t} = \dot{\rho} - \sin\rho\vec{e_x} + \cos\rho\vec{e_y} = \dot{\rho}\vec{e_n}$$

$$\vec{a} = \dot{v}\vec{e_t} + \frac{v^2}{\rho}\vec{e_n}$$

(a) **TODO** Skizze

8. Relativbewegung

- $S$-Laborsystem
- $S'$-Bewegtes System
- $\vec{u} = (u, 0, 0) = \text{const}$ Geschwindigkeit von S' im System S
- Punkt $P = (x, y, z)$ in $S$
- Punkt $P' = (x', y', z')$ in $S'$
- Zeitpunkt $t = 0: \quad S = S', P = P'$

(a) **TODO** Skizze Bewegtes Bezugssystem

(b) Galilei-Transformation

i. Eindimensional

$$x' = x - ut$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$v' = v - u$$
$$t' = t$$

ii. Dreidimensional

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t$$
$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$$
$$\vec{a}' = \vec{a}$$

### 7.2 Newtonsche Dynamik

Warum bewegen sich Körper?
Newton 1686: Ursache von Bewegungsänderungen sind Kräfte. Newtonsche Gesetze (Axiome)

1. Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, sofern er nicht durch Kräfte gezwungen wird diesen Bewegungszustand zu verlassen

2. Die Änderung einer Bewegung wird durch Einwirken einer Kraft verursacht. Sie geschieht in Richtung der Kraft und ist proportional zu Größe der Kraft

3. Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 die Kraft $F_{12}$, so reagiert Körper 2 auf den Körper 1 mit der Gegenkraft $F_{21}$ und es gilt $F_{21} = -F_{12}$ (actio = reactio)

### 7.2.1 Kraft und Impuls

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

Superpositions von Kräften (Zusatz zu den Newtonschen Gesetzen (Korollar)):

$$\vec{F}_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i$$

1. **TODO** Skizze Addition von Kräften
2. Grundkräfte der Natur
   - Elektromagnetische Kraft
   - Starke Draft
   - Schwache Kraft
   - Gravitation
3. Impuls
$$\vec{P} = m\vec{v} \quad [\vec{P}] = \mathrm{kg\,m\,s^{-1}}$$
4. Kraft
$$\vec{F} = \frac{\mathrm{d}\vec{P}}{\mathrm{d}t} = \dot{\vec{P}} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m\vec{v})$$
   $m = \text{const.}$:
$$\vec{F} = m\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = m\dot{\vec{v}} = m\ddot{\vec{x}} = m\vec{a}$$
5. Grundgesetz der Dynamik
$$\vec{F} = \dot{\vec{P}} \text{ beziehungsweise } \vec{F} = m\vec{a}$$
   (a) Trägheitsprinzip (Impulserhaltung)
$$\vec{P} = m\vec{v} = \text{const}, \ \vec{P} = 0 \text{ für } \vec{F} = 0$$
6. Expermiment
$$\vec{F}_G = \underbrace{m\vec{g}}_{Kraft} = \underbrace{(m+M)}_{Trgheit}\vec{a} = m_{\text{ges}}\vec{a}$$
$$\vec{a} = \frac{m}{m+M}\vec{g} \overset{d=1}{\Longleftrightarrow} a = \frac{m}{m+M}g = \frac{m}{m_{textges}}g$$

(a) Erwartung: $a\tilde{\frac{m}{m_{\text{ges}}}}$, $a = \frac{2\Delta s}{\Delta s}$, weil $\Delta s = \frac{1}{2}a\Delta t^2$

(b) Messung:

| $m$[g] | $M$[g] | $m_{\text{ges}}$[g] | $\frac{m_{\text{ges}}}{m}$ | $\Delta s$[mm] | $\Delta t$[s] | $a$[meter/s] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 470 | 480 | 48 | 800 | 2.75 | 0.21157025 |
| 40 | 440 | 480 | 12 | 800 | 1.40 | 0.81632653 |
| 10 | 1910 | 1920 | 192 | 800 | 5.55 | 0.051943836 |
| 40 | 1880 | 1920 | 48 | 800 | 2.79 | 0.20554721 |

(c) **TODO** Skizze

7. Trägheitsprinzip - "revisited" **Definition**: Ein Bezugssystem in dem das Trägheitsprinzip gilt nennt man ein Inatialsystem.

   In einem beschleunigten Bezugsystem gilt das Trägheitsprinzip nicht. Beschleunigte Systeme $\neq$ Inatialsysteme. Das Trägheitsprinzip ist Galilei-invariant.

   (a) **TODO** Skizze whatever

   (b) Trägheitsprinzip: [moderne Formulierung]: Es gibt Inatialsysteme, das heißt Koordinatensysteme in denen ein Kräftefreier Körper im Zustand der Ruhe oder der gradlinig gleichförmigen Bewegung verbleibt.

8. Actio gleich Reactio

$$\underbrace{\vec{F_{12}}}_{\text{Kraft}} = \underbrace{-\vec{F_{21}}}_{\text{Gegenkraft}}$$

   (a) **TODO** Skizze von Körpern

   (b) **TODO** (Skizze) Expermiment

      i. Erwartung:

$$v_1 = v_2 \to a_1 = a_2 \to F_1 = F_2 \checkmark$$

      Nichttrivialer Fall:
      Kraftstoß:
      Magnetische Kraft: $F_{\text{mag}}\tilde{\frac{1}{r^2}}$

$$v_{1,2} = \int_0^{t_{1,2}} a(t)\mathrm{d}t = a_{\text{eff}}T$$

$$\to F_1(t) = F_2(t) \to v_1 = v_2$$

(c) Expermiment 2

$$m_1 = 241.8\,\mathrm{g} \wedge 2 = 341.8\,\mathrm{g} \Rightarrow \frac{m_2}{m_1} \approx 1.5$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \to \frac{v_1}{v_2} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{71}{48} \approx 1.5$$

$$a\tilde{v}, F = ma \to \frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{F_1}{F_2}$$

$$1 = \frac{F_1}{F_2} \Rightarrow F_1 = F_2$$

(d) Beispiele

- Kraft und Gegenkraft (TODO Skizze)