

# 1. Einführung

## 1.1. Quadratische Gleichung

$$ax^2 + bx + c = 0$$

Mitternachtsformel:

$$x_{\{1,2\}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

## 1.2. Formen

### 1.2.1. Kreis

Umfang C:

$$C = \pi \cdot 2r$$

Fläche A:

$$A = \pi \cdot r^2$$

### 1.2.2. Dreieck

Umfang C:

$$C = a + b + c$$

Fläche A:

$$A = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h$$

Pythagoras:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

### 1.2.3. Kugel

Volumen V:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

Oberfläche A:

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

## 1.3. Trigonometrie

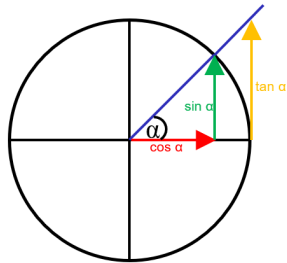
$a$  = Ankathete

$g$  = Gegenkathete

$h$  = Hypothenuse

$$\sin(a) = \frac{g}{h}, \quad \cos(a) = \frac{a}{h}, \quad \tan(a) = \frac{g}{a} = \frac{\sin(a)}{\cos(a)}$$

$$g = h \cdot \sin(a), \quad h = \frac{g}{\sin(a)}, \quad a = \arcsin\left(\frac{g}{h}\right)$$



## 1.4. Vektor

Kreuzprodukt:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_x \end{pmatrix}$$

## 1.5. Ableitung

Funktion	Ableitung
$x^a$	$a \cdot x^{a-1}$
$\frac{1}{x}$	$-\frac{1}{x^2}$
$\sqrt{x}$	$\frac{1}{2\sqrt{x}}$
$\sin(x)$	$\cos(x)$
$\cos(x)$	$-\sin(x)$
$\tan(x)$	$\frac{1}{\cos(2)^x}$

## 1.6. Integration

Funktion	Ableitung
$x^a$	$\frac{1}{a+1} x^{a+1}$
$\frac{1}{x}$	$\ln( x )$
$\sqrt{x}$	$\frac{2}{3} x^{\frac{3}{2}}$
$\sin(x)$	$-\cos(x) + \text{const}$
$\cos(x)$	$\sin(x) + \text{const}$

## 2. Statik

### 2.1. Schwerkraft

m1 = Massepunkt 1

m2 = Massepunkt 2

**Gravitationsgesetz:**

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

**Gravitationskonstante G:**

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

**Fallbeschleunigung g:**

$$m_E = 5.972 \cdot 10^{24} kg$$

$$r_E = 6378 \text{ km}$$

$$g = 6.67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{m_E}{r_E^2}$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

### 2.2. Reibung

Wenn Körper auf horizontale Fläche liegt:

$$F_G = -F_N$$

**Gleitreibungskraft:**

$F_N$  = Gleitreibung

$\mu_G$  = Gleitreibungskoeffizient

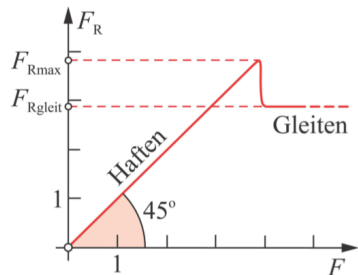
$$F_R = \mu_G \cdot F_N$$

**Haftreibungskraft:**

$F_N$  = Gleitreibung

$\mu_H$  = Haftreibungskoeffizient

$$F_R = \mu_H \cdot F_N$$



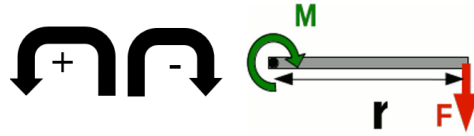
### 2.3. Drehmoment

Linke Hand Regel (Schraubenzieher):

**Drehmoment M:**

a = Hebellänge

$$M = a \cdot F$$



### 2.4. Deformierbarer Körper

A = Fläche  $m^2$ ,

F = Kraft senkrecht zur Fläche N,

E = Elastizitätsmodul  $Nm^{-2}$ ,

$\mu$  = Poissonzahl ( $< 0.5$ ),

G = Schubmodul

p = Druckspannung

#### 2.4.1. Spannung

**Zugspannung  $\sigma$ :**

$$\sigma := \frac{F_{\perp}}{A} = -p$$

$$\sigma \cdot E = \frac{F}{A}$$

**Druckspannung p:**

$$p = \frac{F}{A} = -\sigma$$

**Hook'sche Gesetz**

Relative Änderung [0-1]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

#### 2.4.2. Dehnung

A = Querschnittsfläche

**Verlängerung  $\Delta l$ :**

$$\Delta l = l \frac{F}{A}$$

**Dehnung  $\varepsilon$ :**

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

**Schubspannung  $\tau$ :**

$$\tau := \frac{F_{\parallel}}{A}$$

**Scherwinkel  $\gamma$ :**

$$\gamma = \frac{1}{G} \cdot \tau$$

**Schubmodul G:**

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$$

**Querkontraktion  $\varepsilon_q$ :**

d = Ursprungsdicke

$\Delta d$  = Dickenänderung

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta d}{d}$$

$$\varepsilon_q = -\mu \cdot \varepsilon$$

#### 2.4.3. Kompression

**Kompression:**

$\Delta p$  = Druckänderung

$\kappa$  = Kompressibilität

$$\frac{\Delta V}{V} = -\kappa \cdot \Delta p$$

#### 2.4.4. Schubbeanspruchung

**Torsionsmodul G:**

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

### 2.5. Beispiele

#### 2.5.1. Torsionsfeder

c = Konstante

$\varphi$  = Winkel der Drehung

G = Schubmodul

l = Länge der Torsionsfeder

r = Radius der Torsionsfeder

**Drehmoment Torsionsfeder:**

$$M = c \cdot \varphi$$

**Federkonstante:**

$$c = \frac{\pi G r^4}{2l}$$

**Bei M konstant:**

$$l \rightarrow 2l \Rightarrow \varphi \rightarrow 2\varphi$$

$$r \rightarrow 2r \Rightarrow \varphi \rightarrow \frac{\varphi}{16}$$

$$E \rightarrow 2E \Rightarrow \varphi \rightarrow \frac{\varphi}{2}$$

$$\mu(0.2) \rightarrow \mu(0.3) \Rightarrow \varphi(0.2) < \varphi(0.3)$$

#### 2.5.2. Schraubenfeder

k = Federkonstante

n = Windungszahl

R = Windungsradius

r = Drahtdurchmesser

x = Auslenkung

$$k = \frac{Gr^4}{4nR^3}$$

$$F = kx$$

$$x = \frac{F}{k} = \frac{4nR^3 \cdot F}{Gr^4}$$

**Bei konstanter Kraft F:**

$$r \rightarrow 2r \Rightarrow x \rightarrow \frac{x}{16}$$

$$R \rightarrow 2R \Rightarrow x \rightarrow 8x$$

$$E \rightarrow 2E \Rightarrow x \rightarrow \frac{x}{2}$$

$$\mu(0.2) \rightarrow \mu(0.3) \Rightarrow x \text{ wird grösser}$$

#### 2.5.3. Plattfeder

b = Breite Material

h = Höhe Material

l = Länge Material

p = Dichte des Materials

E = Elastizitätsmodul

z = Auslenkung

**Durchbiegung am Ende:**

$$z = \frac{4l^3}{Ebh^3}$$

**Durchbiegung in der Mitte:**

$$z = \frac{5pgl^4}{32Eh^2}$$

## Kinematik

### Bewegung

Mittlere Geschwindigkeit:

$$\vec{v} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{x(t_2) - x(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Momentane Geschwindigkeit:

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

Mittlere Beschleunigung:

$$\vec{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{v(t_2) - v(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Momentane Beschleunigung:

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

Aufprallgeschwindigkeit (Höhe h):

$$v = \sqrt{2gh}$$

### Lineare Bewegung

#### Gleichförmige Bewegung

s = Strecke (m)

v = Geschwindigkeit (frac(m,s))

t = Zeit (s)

Ort:

$$x(t) = v_0 \cdot t + x_0$$

Geschwindigkeit:

$$v(t) = v_0 = \text{konstant}$$

Beschleunigung:

$$a(t) = 0$$

Anderes:

$$s = v \cdot t$$

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

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

#### Gleichmässig beschleunigte Bewegung

a = Beschleunigung ( $\frac{m}{s^2}$ )

v = Geschwindigkeit ( $\frac{m}{s}$ )

t = Zeit (s)

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0t^2 + v_0t + x_0$$

$$v(t) = a_0t + v_0$$

$$a(t) = a_0 = \text{konstant}$$

Was häufiger antreffen sind, sind Aufgaben im Stil von Gesamtzeit 10s, ein Teil beschleunigt, ein Teil konstante Geschwindigkeit, Gesamtstrecke 100m.

$$x = \frac{1}{2}a_0t_0^2 + v_0 \cdot (t - t_0)$$

$$v_0 = a \cdot t_0$$

Ohne Anfangswerte:

x = Ort

v = Geschwindigkeit

a = Beschleunigung

$$x = \frac{v^2}{2a}$$

$$v = \sqrt{2ax}$$

$$a = \frac{v^2}{2x}$$

Mit Anfangswerte:

x = Ort

v = Geschwindigkeit

a = Beschleunigung

$x_0$  = Anfangsort

$v_0$  = Anfangsgeschwindigkeit

$$x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} + x_0$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2a \cdot (x - x_0)}$$

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot (x - x_0)}$$

Idk what this is for:

$$a = \frac{1}{2} \frac{v}{t}$$

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

$$v = a \cdot t$$

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

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

### Beliebige Bewegungen

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

Mittlere Geschwindigkeit:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)$$

Momentane Geschwindigkeit:

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

#### Beschleunigung

Mittlere Beschleunigung:

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

Momentane Beschleunigung:

$$\vec{a} := \frac{d}{dt}\vec{v} = \dot{\vec{v}} = \frac{d^2}{dt^2}\vec{r} = \ddot{\vec{r}}$$

$$\vec{a} = \frac{d^2}{dt^2}\vec{r} = \frac{d}{dt}\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{v}(t) - \vec{v}(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

$$a_{\text{tangential}} = \lim_{\Delta t} \frac{\Delta v_{\text{tangential}}}{\Delta t} = \frac{d}{dt}v = \dot{v}$$

$$a_{\text{radial}} = \lim_{\Delta t} \frac{\Delta v_{\text{radial}}}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

#### Gleichförmige Bewegung

s = Strecke entlang der Bahnkurve

$$a_{\text{tangential}} = 0$$

$$v_{\text{tangential}}(t) = v_0 = \text{konstant}$$

$$s(t) = v_0t + s_0$$

#### Gleichmässig beschleunigte Bewegung

$$a_{\text{tangential}} = a_0 \neq 0$$

$$v(t) = a_0t + v_0$$

$$s(t) = \frac{1}{2}a_0t^2 + v_0t + s_0$$

### Kreisbewegung

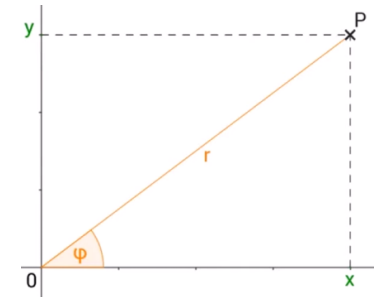
Spezialfall einer beliebigen Bewegung.

Kartesische Koordination:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} r \cdot \cos(\varphi) \\ r \cdot \sin(\varphi) \end{pmatrix}}_{\text{Polar} \rightarrow \text{Kartesisch}}$$

Polarkoordinaten:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} r \\ \varphi \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} |\sqrt{x^2 + y^2}| \\ \tan\left(\frac{y}{x}\right) \end{pmatrix}}_{\text{Kartesisch} \rightarrow \text{Polar}}$$



#### Winkelgeschwindigkeit

T = Periode (Zeit pro Umdrehung)

f = Drehfrequenz (Umdrehungen pro Sekunde)

r = Radius

s = Strecke

φ = Winkel

ω = Winkelgeschwindigkeit

Winkel φ:

$$\varphi = \frac{s}{r}$$

Winkelgeschwindigkeit ω:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$v = \omega \cdot r$$

oder irgendwie das unten

$$\omega = a \cdot t$$

**Bahngeschwindigkeit  $v$ :**

$$v = \frac{s}{T} = \frac{\varphi \cdot r}{T} = r \cdot \omega$$

**Drehfrequenz  $f$ :**

$$f = \frac{1}{T}$$

**Umlaufzeit  $T$ :**

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

**Periode:**

$$\omega = 2\pi f$$

#### 3.4.2. Winkelbeschleunigung

$\alpha$  = Winkelbeschleunigung

$$\alpha = \frac{d}{dt}\omega = \dot{\omega} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \ddot{\varphi}$$

$$a_{\text{tangential}} = \frac{d}{dt}r \cdot \omega = r \cdot \alpha$$

#### 3.4.3. Gleichförmige Kreisbewegung

$\varphi$  = Zurückgelegte Strecke auf Einheitskreisit

$\varphi_0$  = Anfangswinkel  $\omega$  = Pro Zeit Zurückgelegter Winkel

$$a = 0$$

$$\omega = \omega_0 = \text{konstant}$$

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$$

**Tacho (Bahnangaben):**

$$a = \alpha \cdot r = 0$$

$$v = w_0 \cdot r = \text{konstant} = v_0$$

$$s = w_0 r t + \varphi_0 r$$

#### 3.4.4. Gleichförmig beschleunigte Kreisbewegung

$\varphi$  = Zurückgelegte Strecke auf Einheitskreisit

$\varphi_0$  = Anfangswinkel  $\omega$  = Pro Zeit Zurückgelegter Winkel  $\omega_0$  = Anfangsgeschwindigkeit

$$a = a_0 = \text{konstant}$$

$$\omega = a_0 t + \omega_0$$

$$\varphi = \frac{1}{2}a_0 t^2 + \omega_0 t + \varphi_0$$

**Ohne Anfangswerte:**

$\varphi$  = Winkel

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$a$  = Winkelbeschleunigung

$$\varphi = \frac{\omega^2}{2a}$$

$$\omega = \sqrt{2a\varphi}$$

$$a = \frac{\omega^2}{2\varphi}$$

**Mit Anfangswerte:**

$\varphi$  = Winkel

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$a$  = Winkelbeschleunigung

$\varphi_0$  = Anfangswinkel  $\omega_0$  = Anfangsgeschwindigkeit

$$\varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2a} + \varphi_0$$

$$\omega = \sqrt{w_0^2 + 2a \cdot (\varphi - \varphi_0)}$$

$$a = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2 \cdot (\varphi - \varphi_0)}$$

### 3.5. Wurfbahnen

#### 3.5.1. Senkrechter Wurf

Maximalhöhe erreicht, wenn die Geschwindigkeit 0 ist.

$$a(t) = -g = \text{konstant}$$

$$v(t) = -gt + v_0 (v_0 < 0 = \text{nach unten werfen})$$

$$x(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t + x_0$$

#### 3.5.2. Freier Fall

$$a(t) = -g = \text{konstant}$$

$$v(t) = -gt + 0$$

$$x(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + x_0$$

#### 3.5.3. Horizontaler Wurf

$$a_{x(t)} = 0$$

$$v_{x(t)} = v_0$$

$$x(t) = v_0 t$$

$$a_{y(t)} = -g = \text{konstant}$$

$$v_{y(t)} = -gt + \underbrace{v_0}_0$$

$$x(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0$$

**Wurfhöhe:**

$v_0$  = Anfangsgeschwindigkeit

$$h = \frac{v_0^2}{2g}$$

**Steigzeit  $t$ :**

$v_0$  = Anfangsgeschwindigkeit

$$t = \frac{v_0}{g}$$

#### 3.5.4. Schiefer Wurf

Wurfweite maximiert bei Abwurfwinkel von 45°.

$$a_x = 0$$

$$v_{x(t)} = v_0 \cdot \cos(a)$$

$$x(t) = v_0 \cdot \cos(a) \cdot t + x_0$$

$$a_y = -g$$

$$v_{y(t)} = v_0 \cdot \sin(a) - g \cdot t$$

$$y(t) = -\frac{1}{2}g \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin(a) \cdot t + y_0$$

**Bahnkurve  $y(x)$ :**

$$y(x) = \tan(a) \cdot x - \frac{g}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos(a)^2} \cdot x^2$$

**Horizontale Distanz zur Zeit  $t$ :**

$$x(t) = v_0 \cdot \cos(a) \cdot t$$

**Vertikale Distanz zur Zeit  $t$ :**

$$y(t) = v_0 \cdot t \cdot \sin(a) - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

**Maximale Wurfdistanz  $d$ :**

$$d = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin(2 \cdot a)$$

**Maximale Wurfhöhe  $h_{\text{max}}$ :**

$$h_{\text{max}} = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \sin(a)^2$$

**Distanz bis zur maximalen Wurfhöhe  $X_{\text{max}}$ :**

$$X_{\text{max}} = \frac{V_0^2}{g} \cdot \sin(a)^2 \cdot \cos(a) = \frac{d}{2}$$

**Konstante horizontale Geschwindigkeit  $v_x$ :**

$$v_x = v_0 \cdot \cos(a)$$

**Vertikale Geschwindigkeit zur Zeit  $t$ :**

$$v_y = v_0 \cdot \sin(a) - g \cdot t$$

## 4. Dynamik

### Gewichtskraft:

$F_G$  = Kraft

$m$  = Masse

$$F_G = m \cdot g$$

### 4.1. Reibungskräfte

$\mu_{\text{Gleit}}$  = Gleitreibungskoeffizient

$\mu_{\text{Roll}}$  = Rollreibungskoeffizient

$F_N$  = Normalkraft

### Gleitreibung:

$$F_{\text{Gleit, R}} = \mu_{\text{Gleit}} \cdot F_N$$

### Rollreibung:

$$F_{\text{Roll, R}} = \mu_{\text{Roll}} \cdot F_N$$

### Rollreibungslänge $e$ :

$$e = \frac{r \cdot F_{\text{Reibung}}}{F_N} = r \cdot \mu_R$$

### 4.2. Arbeit und Energie

Einheit von  $W$  :  $1J = 1Nm$

$s$  = Strecke

### Arbeit $W$ :

$$W = F_s \cdot s$$

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

### Potentielle Energie $E_{\text{pot}}$ :

$m$  = Masse

$h$  = Höhe ab Referenz

$$E_{\text{pot}} = F_G \cdot h = \underbrace{m \cdot g}_{F_G} \cdot h$$

### Elastische Energie $E_{\text{ela}}$ :

$k$  = Federkonstante

$x$  = Verschiebung

$$E_{\text{ela}} = \frac{1}{2} k x_0^2$$

### Kinetische Energie $E_{\text{kin}}$ :

$m$  = Masse

$v$  = Geschwindigkeit

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

### Totale Energie $E_{\text{tot}}$ :

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

### Verschiebungsarbeit:

$$W = F \cdot s = (m \cdot a) \cdot \left( \frac{1}{2} a t^2 \right) = \frac{1}{2} m v^2$$

### Energieerhaltungssatz:

$$W = F_G \cdot h = mgh = mg \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} m v^2 = E_{\text{kin}}$$

### 4.3. Leitung / Wirkungsgrad

Einheit von  $P$  :  $1W = 1 \frac{J}{s}$

### Leistung $P$ :

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

### Watt $W$ :

$$1W = 1 \frac{J}{s}$$

### Wirkungsgrad $\eta$ :

$P_{\text{ab}}$  = Abgeführte Leistung

$P_{\text{zu}}$  Zuführte Leistung

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}}$$

### 4.4. Impuls / Impulserhaltung

#### Impuls $\vec{p}$ :

$m$  = Masse

$v$  = Geschwindigkeit

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

### 2. Newtonsches Gesetz umschreiben:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(m \cdot \vec{v}) = \frac{d}{dt} \vec{p}$$

### 4.5. Stöße

#### 4.5.1. Elastischer Stoss

Wenn sich hier zwei Körper aufeinander zu bewegen, muss die Geschwindigkeit des Körpers, welcher von rechts nach links geht, negativ sein.

$v_1$  = Geschwindigkeit von Körper 1 vor Stoss

$v_2$  = Geschwindigkeit von Körper 2 vor Stoss

$v'_1$  = Geschwindigkeit von Körper 1 nach Stoss

$v'_2$  = Geschwindigkeit von Körper 2 nach Stoss

$m_1$  = Masse von Körper 1

$m_2$  = Masse von Körper 2

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1 + \frac{2 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_2$$

$$v'_2 = \frac{2 \cdot m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_2$$

#### 4.5.2. Total inelastischer Stoss

$v_1$  = Geschwindigkeit von Körper 1 vor Stoss

$v_2$  = Geschwindigkeit von Körper 2 vor Stoss

$m_1$  = Masse von Körper 1

$m_2$  = Masse von Körper 2

$v'$  = Gemeinsame Geschwindigkeit nach Stoss

$$v' = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

#### 4.5.3. Deformationsarbeit

$v_1$  = Geschwindigkeit von Körper 1 vor Stoss

$v_2$  = Geschwindigkeit von Körper 2 vor Stoss

$m_1$  = Masse von Körper 1

$m_2$  = Masse von Körper 2

$\mu$  = Reduzierte Masse

### Relativgeschwindigkeit $v_{\text{rel}}$ :

$$v_{\text{rel}} = |v_1 - v_2|$$

### Reduzierte Masse $\mu$ :

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

### Deformationsarbeit $Q$ in $J$ :

$$Q = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2$$

oder vereinfacht:

$$Q = \frac{\mu \cdot v_{\text{rel}}^2}{m_1 + m_2}$$

### Impulssatz:

$$\vec{P}_{\text{tot}} = \vec{P}_{\text{tot}} \Leftrightarrow m_1 v_1 + m_2 v_2 \Rightarrow m_1 v' + m_2 v' = v' (m_1 + m_2)$$

### Energiesatz total elastisch:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2$$

### 4.6. Rakete

### Endgeschwindigkeit in Erdferne ( $g = 0$ ):

$u$  = Ausstoßgeschwindigkeit

$m$  = Verbleibende Masse

$$v_m = u \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m}\right) + v_0$$

### Geschwindigkeit nach Flugzeit $t$ in Erdnähe

( $g \neq 0$ ):  $m_0$  = Startmasse  $m^\circ$  = Ausgestossene

Masse pro Zeit  $v_0$  = Startgeschwindigkeit  $u$  =

Ausstoßgeschwindigkeit

$$v(t) = u \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m_0 - m^\circ t}\right) - g \cdot t + v_0$$

### Steighöhe nach Flugzeit $t$ in Erdnähe ( $g \neq 0$ ):

$m_0$  = Startmasse  $m^\circ$  = Ausgestossene Masse pro Zeit

$v_0$  = Startgeschwindigkeit  $u$  = Ausstoßgeschwindigkeit

$$h(t) = u \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t - \frac{u^\circ}{m} \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m_0 - m^\circ \cdot t}\right) \cdot (m_0 - m^\circ \cdot t)$$

### Mit Brenndauer:

$m_0$  = Startmasse  $m^\circ$  = Ausgestossene Masse pro Zeit

$m$  = Verbleibende Masse

$$t = \frac{m_0 - m}{m^\circ}$$

### Kepler Gesetze:

1. Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht
2. Der Fahrstrahl eines Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der Halbachsen der Planeten.

#### 4.6.1. Gravitation

$$G = 6.673 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

$m_E = 5.96 \cdot 10^{24} kg$  = Erdmasse

$m$  = Beliebige Masse

$r_E$  = Abstand der Masse  $m$  von der Erde

$$E_{\text{pot}} = -G \cdot \frac{m_e \cdot m}{r_E}$$

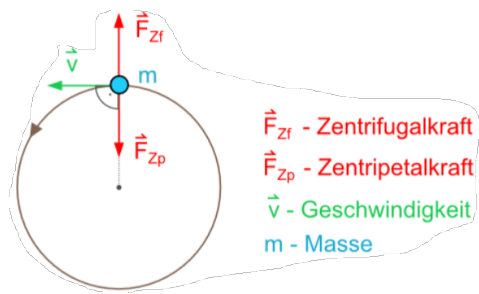
### Fluchtgeschwindigkeit $V_F$ :

$$V_F = \sqrt{2 \frac{G \cdot m_E}{r_E}} = 11.15 \frac{km}{s}$$

### Minimale Kreisbahngeschwindigkeit $V_K$ :

$$V_K = \sqrt{\frac{G \cdot m_E}{r_E}} = 7.89 \frac{km}{s}$$

### 4.7. Zentripetalkraft



#### Zentrifugalkraft vektoriell:

$m$  = Masse

$a_r$  = Radiale Zentripetalbeschleunigung

$$\vec{F}_Z = -m \cdot \vec{a}_r$$

#### Zentrifugalkraft:

$r$  = Radius

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$v = \omega \cdot r$  = Umfangsgeschwindigkeit bei Radius  $r$

$$F_Z = m \cdot a_r$$

$$F_Z = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

#### Zentripetalbeschleunigung:

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r$$

#### Corioliskraft (Betrag):

$v_r$  = Radiale Geschwindigkeit

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v_r \cdot \omega$$

#### Tangentielle Coriolisbeschleunigung:

$v_r$  = Radiale Geschwindigkeit

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$$F_C = 2 \cdot v_r \cdot \omega$$

#### Rotationsarbeit:

$v_r$  = Radiale Geschwindigkeit

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$$F_C = 2 \cdot v_r \cdot \omega$$

### 4.8. Drehbewegung

#### Drehmoment $M$ um eine vorgegebene Achse A:

$M$  = Betrag des Drehmoments um Achse A

$a$  = Winkelbeschleunigung um Achse A

$J$  = Trägheitsmoment bzgl. der Achse A

$r$  = Radius

$$M = J_A \cdot a = r \cdot F$$

#### Trägheitsmoment $J$ einer Punkt-Masse $m_0$ :

$m_0$  = Punktmasse  $r$  = Abstand der Punktmasse von der Achse A

$$J = m_0 \cdot r_A^2$$

Körper		Trägheitsmoment
Vollzylinder		$\frac{m r^2}{2}$
Hohlzylinder		$\frac{m (r_a^2 + r_i^2)}{2}$
Kugel		$\frac{2}{5} m r^2$
Quader		$\frac{m (a^2 + b^2)}{12}$

#### 4.8.1. Satz von Steiner

#### Trägheitsmoment $J_A$ bzgl. einer Achse A berechnet aus Schwerpunkts-Trägheitsmoment $J_{SP}$ :

$J_A$  = Trägheitsmoment bzgl. Achse A

$J_{SP}$  = Trägheitsmoment bzgl. Schwerpunkt

$R_A$  = Abstand der Achse A vom Schwerpunkt SP

$m$  = Masse

$$J_A = J_{SP} + m \cdot R_A^2$$

#### Trägheitsmoment $J_B$ bzgl. einer Achse B berechnet aus Trägheitsmoment $J_A$ bzgl. Achse A:

$J_A$  = Trägheitsmoment bzgl. Achse A

$J_B$  = Trägheitsmoment bzgl. Achse B

$R_{AB}$  = Abstand der parallelen Achse A und B

$m$  = Masse

$$J_B = J_A + m \cdot R_{AB}^2$$

### 4.9. Drehstuff

#### Rotationsleistung $P$ :

$M$  = Drehmoment

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$$P = M \cdot \omega$$

#### Totale Energie $E_{tot}$ :

$E_{tra}$  = Translationsenergie

$E_{rot}$  = Rotationsenergie

$$E_{tot} = E_{tra} + E_{rot}$$

#### Rotationsenergie $E_{rot}$ :

$J_{SP}$  = Trägheitsmoment bzgl. Schwerpunkt

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$$E_{rot} = \frac{J_{SP} \cdot \omega^2}{2}$$

#### Translationsenergie $E_{tra}$ :

$m$  = Masse

$v_{SP}$  = Schwerpunktgeschwindigkeit

$$E_{tra} = \frac{m \cdot v_{SP}^2}{2}$$

#### Drehimpuls $L$ bei Rotation um eine Achse A:

$J_A$  = Trägheitsmoment bzgl. Achse A

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$$L = J_A \cdot \omega$$

#### Kreisel:

$\Omega$  = Präzessions-Winkelgeschwindigkeit

$r_{os}$  = Abstand Drehpunkt zu Schwerpunkt

$m$  = Masse

$J$  = Trägheitsmoment

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit

$$\Omega = \frac{M}{L_r}$$

$$\Omega = \frac{r_{os} \cdot m \cdot g}{J \cdot \omega}$$

#### Betrag des Drehmoments durch Gewichtskraft:

$M = |\vec{M}|$  = Betrag des Drehmoment  $r_{os}$  = Abstand Drehpunkt zu Schwerpunkt

$m$  = Masse

$\beta$  = Kegelwinkel der Präzession

$$M = r_{os} \cdot m \cdot g \cdot \sin(\beta)$$

#### Radialer Drehimpuls:

$L_r$  = Radialkomponente des Drehimpuls

$L = J \cdot \omega$  = Totaler Drehimpuls

$\beta$  = Kegelwinkel der Präzession

$$L_r = L \cdot \sin(\beta) = J \cdot \omega \cdot \sin(\beta)$$

### 4.10. Translation vs Rotation

#### 4.10.1. Drehbewegung

$\Delta \theta$  = Drehwinkel

$M$  = Drehmoment

$l$  = Trägheitsmoment

#### Winkelgeschwindigkeit $\omega$ :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

#### Winkelbeschleunigung $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

#### Gleichungen für den Fall konstanter Winkelbeschleunigung:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

$$\Delta \theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2 \alpha \Delta \theta$$

#### Arbeit:

$$dW = M \cdot d\theta$$

#### Kinetische Energie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot \omega^2$$

#### Leistung:

$$P = M \cdot \omega$$

#### Drehimpuls:

$$L = l \cdot \omega$$

#### Zweites Newton'sches Axiom:

$$M = l \cdot \alpha = \frac{dL}{dt}$$

#### 4.10.2. Lineare Bewegung

$\Delta x$  = Verschiebung

$F$  = Kraft

$m$  = Masse

#### Geschwindigkeit:

$$v = \frac{dx}{dt}$$

**Beschleunigung:**

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

**Gleichungen für den Fall konstanter Beschleunigung:**

$$v = v_0 + at$$

$$\triangle x = v \cdot \triangle t$$

$$\langle v \rangle = \frac{1}{2}(v_0 + v)$$

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

$$v^2 = v_0^2 + 2a \triangle x$$

**Arbeit:**

$$dW = F \cdot ds$$

**Kinetische Energie:**

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

**Leistung:**

$$P = F \cdot v$$

**Impuls:**

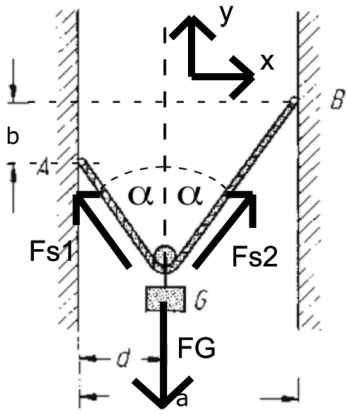
$$p = m \cdot v$$

**Zweites Newton'sches Axiom:**

$$F_{\text{ext}} = m \cdot a = \frac{dp}{dt}$$

## 5. Examples

### 5.1.1. Seilkräfte finden



Ein (masseloses) Seil ist an den Punkten A und B an zwei gegenüberliegenden Wänden befestigt, wobei die Wände im Abstand  $a = 2m$  stehen. Der Befestigungspunkt A befindet sich  $1m$  unterhalb vom Befestigungspunkt B. Eine Masse  $m_G = 20kg$  werde an das Seil gehängt (wobei sich die Masse entlang des Seils bewegen kann). Die beiden Seilenden haben einen Winkel von  $\alpha = 30^\circ$  zum Lot hin.

a) Wie gross sind die einzelnen Seilkräfte?

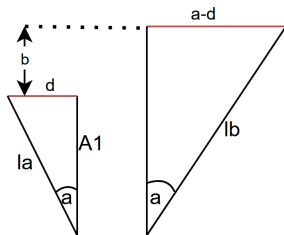
$$x = \underbrace{0}_{F_G} + \underbrace{\cos(60) \cdot F_{s1}}_{F_{s1}} - \underbrace{\cos(60) \cdot F_{s2}}_{F_{s2}} = 0$$

$$y = \underbrace{-F_G}_{F_G} + \underbrace{\cos(30) \cdot F_{s1}}_{F_{s1}} + \underbrace{\cos(30) \cdot F_{s2}}_{F_{s2}} = 0$$

Nach  $F_{s1}$  und  $F_{s2}$  auflösen oder im TR lösen gibt:

$$F_{s1} = F_{s2} = 113.27N$$

b) Wie lang sind die einzelnen Seilabschnitte?



Formel für x herausfinden:

$$\frac{d}{l_a} = \sin(\alpha) \Rightarrow d = l_a \cdot \sin(\alpha)$$

$$\frac{a-d}{l_b} = \sin(\alpha) \Rightarrow a-d = l_b \cdot \sin(\alpha)$$

$$x : \underbrace{l_a \cdot \sin(\alpha)}_d + \underbrace{l_b \cdot \sin(\alpha)}_{a-d} = a$$

Formel für y herausfinden:

$$\frac{A_1}{l_a} = \cos(\alpha) \Rightarrow A_1 = \cos(\alpha) \cdot l_a$$

$$\frac{A_1+b}{l_b} = \cos(\alpha) \Rightarrow A_1+b = \cos(\alpha) \cdot l_b$$

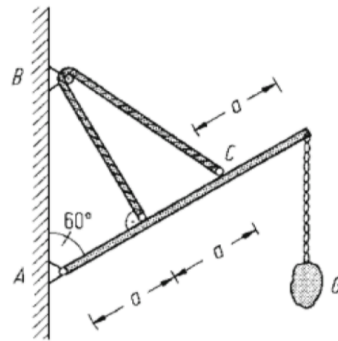
$$y : b + \underbrace{\cos(\alpha) \cdot l_a}_{A_1} = \underbrace{\cos(\alpha) \cdot l_b}_{A_1+b}$$

x und y nach  $l_a$  und  $l_b$  im TR auflösen:

$$l_A = 1.422m$$

$$l_B = 2.577m$$

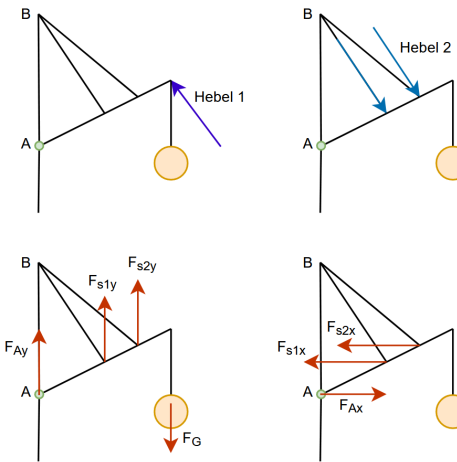
### 5.1.2. Kraft auf Kranarm



Skizze der Krankonstruktion.

Ein Kran hebt einen Stein der Masse  $G = 150kg$  wie in der Skizze dargestellt. Der Kranarm ist an Punkt A drehbar gelagert und das Seil ist in Punkt B um eine Umlenkrolle geschleift und am Kranarm fest verbunden.

Berechnen sie die Kraft, mit welcher das Kranlager an Punkt A auf den Kranarm wirkt, wenn das System im Gleichgewicht ist.



$$M = \text{Hebel 1} + \text{Hebel 2} = 0$$

$$F_X = F_{s1} + F_{s2} F_A = 0$$

$$F_Y = F_{s1} + F_{s2} F_A - F_G = 0$$

Einsetzen in Solver:

$$3 \cdot 150kg \cdot 9.81 \cdot \cos(30) - 1 \cdot F_S - 2 \cdot F_S \cdot \cos(30) = 0$$

$$-F_S \cdot \sin(30) - F_S \cdot \sin(60) + F_{Ax} = 0$$

$$F_S \cdot \cos(30) + F_S \cdot \cos(60) + A_{Ay} - 150kg \cdot 9.81 = 0$$

### 5.1.3. Ruckartige Bewegung

Auf einem Tisch steht eine Blumenvase. Wir wollen das Tischtuch wegziehen, ohne dass die Vase herunterfällt.

Das Tuch wird ruckartig auf eine konstante Geschwindigkeit  $v_0$  beschleunigt (die für die Beschleunigung benötigte Zeit wird vernachlässigt) und wird dann mit dieser konstanten Geschwindigkeit auf einer Strecke von  $60cm$  bewegt. Die Gleitreibung zwischen Vase und Tischtuch hat den Wert  $\mu_G = 0.3$ . Wie schnell muss das Tuch bewegt werden, damit sich die Vase in der gleichen Zeit höchstens  $5cm$  bewegt?

Zuerst können wir die Zeit durch einige der Grössen ausdrücken:

$$t = \frac{S_T}{v_0}$$

Beschleunigt wird unsere Vase durch die Reibung des durchrutschenden Tischtuches. Dabei können wir sagen, dass die Gesamtkraft für die Beschleunigung der Reibungskraft entsprechen muss.

$$m \cdot a = \mu_G \cdot m \cdot g$$

$$a = \mu_G \cdot g$$

Nun können wir die Strecke der Vase berechnen:

$$t = \frac{S_T}{v_0} S_V = \frac{a_v}{2} \cdot t^2$$

$$t = \frac{0.6}{v_0} 0.05 = \frac{0.3 \cdot 9.81}{2} \cdot t^2$$

$$v = 3.25 \frac{m}{s}$$

### 5.1.4. Mindestabstand Fahrzeug

Auf einer Autobahn fährt ein Fahrzeug A mit konstanter Geschwindigkeit  $v_{A0} = 110 \frac{km}{h}$ . In die Autobahn fährt ein Fahrzeug B ein. Zum Zeitpunkt des Einfahrens ( $t = 0$ ) hat Fahrzeug B eine Geschwindigkeit  $v_{B0} = 110 \frac{km}{h}$  und einen Abstand von Fahrzeug A von  $d = 200m$ . Welche (konstant angenommene) Beschleunigung  $a_B$  muss Fahrzeug B haben, wenn ein Mindestabstand der beiden von  $d_{min} = 40m$  eingehalten werden soll?

Überlegung: Der Mindestabstand muss eingehalten werden, wenn beide Fahrzeuge gleich schnell sind. Dieser Mindestabstand muss zum Zeitpunkt  $t_x$  erreicht sein. Falls A langsamer ist als B, dann vergrößert sich der Abstand, umgekehrt verringert sich der Abstand.

Somit gilt:

$$v_{A0} = v_{B0} + a_B \cdot t_x$$

Ausserdem können wir den Mindestabstand algebraisch ausdrücken. Fahrzeug A bewältigt diese Strecke mit seiner regelmässigen Geschwindigkeit  $v_{A0} \cdot t_x$ . Bei Fahrzeug B ist dies etwas mehr:

$$\text{Beschleunigung: } \frac{a_B}{2} \cdot t_x^2$$

$$\text{Startgeschwindigkeit: } v_{B0} \cdot t_x$$

$$\text{Vorsprung: } 200m$$

Zusammengesetzt:

$$d_{min} = S_B - S_A$$

$$d_{min} = \frac{a_B}{2} \cdot t_x^2 + v_{B0} \cdot t_x + d - v_{A0} \cdot t_x$$

$$t_x = 28.8$$

$$a_B = 0.39$$

### 5.1.5. Reh überfahren



Ein Bus fährt mit  $60k\frac{m}{h}$  auf einer geraden Strecke durch den Wald. Plötzlich tritt ein Reh auf die Strasse und der Fahrer beginnt  $27m$  vor dem Hindernis mit einer Vollbremsung. Es reicht gerade bis zum Stillstand  $4m$  vor dem erstarrten Reh.

Mit welcher Geschwindigkeit würde er auf das Reh prallen, wenn er erst  $22m$  vor dem Hindernis die Vollbremsung eingeleitet hätte.

Verzögerung berechnen:

$$x_1 = 27m - 4m = 23m$$

$$x_1 = \frac{v_0^2}{2a}$$

$$a = \frac{v_0^2}{2x_1} = 6.04\frac{m}{s^2}$$

$$x_2 = \frac{v_0^2 - v_1^2}{2a}$$

$$v_1 \Rightarrow \sqrt{v_0^2 - 2ax_2}$$

$$v_1 = 3.47\frac{m}{s} = 12.5\frac{km}{h}$$

#### 5.1.6. U-Bahn Beschleunigung

Eine U-Bahn legt zwischen 2 Stationen einen Weg von  $3km$  zurück. Aus der Anfahrbeschleunigung  $a_A = -0.6\frac{m}{s^2}$  und der Höchstgeschwindigkeit  $v_{max} = 90\frac{km}{h}$  soll der Anfahrweg, Bremsweg, Wegstrecker der gleichförmigen Bewegung und die Fahrzeit ermittelt werden.

Aus der konstanten Beschleunigung  $a_A$  folgt beim Anfahren ein Geschwindigkeitsverlauf

$$v_A = a_A \cdot t$$

Mit der vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit findet man die Anfahrzeit

$$t_A = \frac{v_{max}}{a_A} = \frac{90 \cdot 1000}{3500 \cdot 0.2} = 125s$$

und den Anfahrweg

$$s_A = \frac{1}{2}a_At_A^2 = \frac{1}{2} \cdot 0.2 \cdot 125^2 = 1563m$$

Beim Bremsen mit konstanter Verzögerung  $a_B$  gilt für die Geschwindigkeit

$$v_B = v_{max} + a_Bt$$

Die Zeit  $t_B$  bis zum Stillstand ( $v_B = 0$ ) ist wird daher

$$t_B = -\frac{v_{max}}{a_B} = \frac{90 \cdot 1000}{3600 \cdot (-0.6)} = 41.67s$$

und der zugehörige Bremsweg ergibt sich zu

$$s_B = v_{max}t_B + \frac{1}{2}a_Bt_B^2 = \frac{90 \cdot 1000}{3600} \cdot 41.67 - \frac{1}{2} \cdot 0.6 \cdot 41.67^2$$

$$s_B = 521m$$

Für die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit  $v_{max}$  bleibt dann ein Weg von

$$s^* = 3000 - s_A - s_B = 916m$$

Hierzu gehört eine Zeit

$$t^* = \frac{s^*}{v_{max}} = \frac{916 \cdot 3600}{90 \cdot 1000} = 36.64s$$

Die Gesamtfahrzeit wird damit

$$T = t_A + t^* + t_B = 203.31s$$

#### 5.1.7. Bremsen vor Ampel

Ein PKW-Fahrer nähert sich mit einer Geschwindigkeit von  $v_0 = 50\frac{km}{h}$  einer Ampel. Sie sprint aufu rot, wenn er noch  $l = 100m$  entfernt ist. Die Rot- und Gelbphase dauert  $t^* = 10s$ . Der Fahere möchte die Ampel gerade noch passieren, wenn sie weider auf grün wechselt.

Bei konstanter Beschleunigung  $a_0$  gilt

$$v = v_0 + a_0t$$

$$x = v_0t + a_0\frac{t^2}{2}$$

a) Mit welcher konstanten Beschleunigung  $a_0$  muss der Fahrer bremsen?

Aus der Bedingung  $x(t^*) = l$  folgt

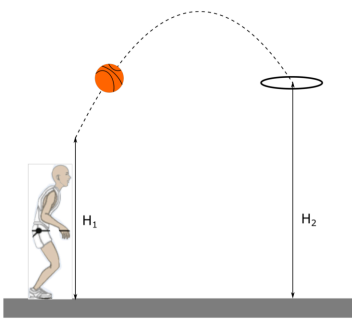
$$a_0 = \frac{2}{t^{*2}}(l - v_0t^*) = \frac{2}{10^2}\left(100 - \frac{50 \cdot 1000}{3600} \cdot 10\right) = -0.78\frac{m}{s^2}$$

b) Welche Geschwindigkeit  $v_1$  hat er auf der Höhe der Ampel?

Mit der nun bekannten Bremsverzögerung ergibt sich aus der ersten Gleichung

$$v_1 = v(t^*) = 50 \cdot \frac{1000}{3600} - 0.78 \cdot 10 = 6.09\frac{m}{s}$$

#### 5.1.8. Schiefer Wurf mit Basketball



Ein Basketball mit  $30cm$  Durchmesser soll in einem Abwurfwinkel von  $70^\circ$  zur Horizontalen direkt in den Basketball-Korb geworfen werden aus einer Höhe von  $2.1m$  (Ballmittelpunkt). Die Mitte des Korbrings von  $35cm$  Durchmesser befindet sich in einer Distanz von  $2.7m$  und in  $3.2m$  Höhe.

$$a_x = 0$$

$$v_{x(t)} = v_0 \cdot \cos(\varphi)$$

$$x(t) = v_0 \cdot \cos(\varphi) \cdot t + \underbrace{0}_{\text{Anfangshöhe}}$$

$$a_y = -g$$

$$v_{x(t)} = v_0 \cdot \sin(\varphi) - g \cdot t$$

$$y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \cdot \sin(\varphi) \cdot t + \underbrace{2.1m}_{\text{Anfangshöhe}}$$

a) Was ist die Abwurf-Geschwindigkeit unter der Annahme eines perfekten Wurfs (Ballmittelpunkt passiert genau in der Korbmitte)? Wie lange braucht der Ball bis zur Korbmitte? Formel für Abwurfgeschwindigkeit:

$$x(t) : v_0 \cdot \cos(\varphi) \cdot t = 2.7m \Rightarrow v_0 = \frac{2.7m}{\cos(\varphi) \cdot t}$$

Formel zum  $t$  herausfinden:

$$y(t) : -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \cdot \sin(\varphi) \cdot t + 2.1m = 3.2m$$

x und y nach  $t$  und  $v_0$  im TR auflösen:

$$t = 1.13s$$

$$v_0 = 6.95\frac{m}{s}$$

c) Welche maximale Höhe erreicht der Ball (Referenzpunkt: Ballmitte)?

$$h_{max} = \frac{v_0}{2 \cdot g} \cdot \sin(\varphi)^2 + 2.1m$$

$$h_{max} = \frac{6.95\frac{m}{s}}{2 \cdot g} \cdot \sin(70)^2 + \underbrace{2.1m}_{\text{Abwurfhöhe}}$$

$$h_{max} = 4.27m$$

d) In welcher Distanz und Höhe relativ zur Abwurfstelle befindet sich der Ball nach  $1.1s$ ?

$$x(1.1) = 6.95 \cdot \cos(70) \cdot 1.1 = 2.7m$$

$$y(1.1) = -\frac{1}{2}g \cdot 1.1^2 + 6.95 \cdot \sin(70) \cdot 1.1 = 1.1m$$

#### 5.1.9. Schiefer Gartenschlauch

Ein Schlauch wird so gehalten, dass ein kollimierter Wasserstrahl mit  $15\frac{m}{s}$  unter  $55^\circ$  gegenüber der Horizontalen nach oben spritzt. In  $7.0m$  Entfernung befindet sich eine Wand.

$$a_x = 0$$

$$v_{x(t)} = v_0 \cdot \cos(\varphi)$$

$$x(t) = v_0 \cdot \cos(\varphi) \cdot t + \underbrace{x_0}_{\text{Anfangshöhe}}$$

$$a_y = -g$$

$$v_{x(t)} = v_0 \cdot \sin(\varphi) - g \cdot t$$

$$y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \cdot \sin(\varphi) \cdot t + \underbrace{x_0}_{\text{Anfangshöhe}}$$

a) Wo befindet sich das Wasser  $0.5\text{ s}$  nach Verlassen der Schlauchdüse und welche Geschwindigkeit hat es? Ort:

$$x(0.5) = 15\frac{m}{s} \cdot \cos(55) \cdot 0.5s = 4.3m$$

$$y(0.5) = -\frac{1}{2}g \cdot 0.5^2 + 15\frac{m}{s} \cdot \sin(55) \cdot 0.5 = 4.9m$$

Geschwindigkeit:

$$v_{x(0.5)} = 15\frac{m}{s} \cos(55) = 8.6\frac{m}{s}$$

$$v_{y(0.5)} = 15\frac{m}{s} \cdot \sin(55) - g \cdot t = 7.3\frac{3}{s}$$

b) Nach welcher Zeit und in welcher Höhe über der Schlauchdüse trifft das Wasser auf die Wand?

$$\underbrace{7m}_{x(t)} = v_0 \cdot \cos(\varphi) \cdot t$$

$$t = \frac{7m}{15\frac{m}{s} \cdot \cos(55)} = 0.8s$$

$$y(0.8) = -\frac{1}{2}g \cdot 0.8^2 + 15\frac{m}{s} \cdot \sin(55) \cdot 0.8 = 6.7m$$

c) Wie weit (auf der Höhe der Düse) und wie hoch würde das Wasser ohne Wand spritzen?

$$d = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin(2 \cdot \varphi) = 21.55m$$

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \cdot \sin(\varphi)^2 = 7.6m$$

### 5.1.10. Konstante Beschleunigung einer Stahlkugel

Wie lange braucht eine homogene Stahlkugel zum Herabrollen auf einer 1m langen, schiefen Ebene mit einem Steigungswinkel von  $\varphi = 30^\circ$ ? Die Bewegung beginne aus dem Stillstand und Kugel rollt ohne zu gleiten. Die Kugel erfährt eine konstante Beschleunigung.

Energiebilanz:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{J \cdot \omega^2}{2}$$

$$\omega = \frac{v}{r}$$

$$J = \frac{2 \cdot m \cdot R^2}{5}$$

$$s = \frac{a \cdot t^2}{2}$$

$$v = a \cdot t$$

$$h = s \cdot \sin(\varphi)$$

Setzen wir das zusammen, kürzt sich der Radius und die Masse der Kugel heraus.

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2 \cdot \left(\frac{v}{R}\right)^2$$

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot v^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{5}\right)$$

$$m \cdot g \cdot h = \frac{7 \cdot m \cdot v^2}{10}$$

$$g \cdot h = \frac{7 \cdot v^2}{10}$$

### 5.1.11. Bowlingkugel

Eine Bowlingkugel der Masse 2.7kg und mit dem Durchmesser 22cm wird so geworfen, dass sie sich nach dem Auftreffen auf der Bahn, ohne zu rotieren mit

einer Geschwindigkeit von  $8.5\frac{m}{s}$  bewegt. Die Gleitreibungszahl zwischen Kugel und Bahn beträgt 0.3. a) Wie gross ist die lineare Beschleunigung (infolge Reibung)?

In Y-Richtung wirkt sowohl die Gewichtskraft als auch die Normalkraft. Beide kompensieren sich. In X-Richtung ist nur die Reibung entgegen der Bewegungsrichtung wirksam, die durch die Normalkraft ausgedrückt wird:

$$F_G = F_N$$

$$F_R = -\mu F_N$$

Mit dem zweiten Newtonschen Axiom ergibt sich:

$$F_{\text{res}} = ma$$

$$F_{\text{res}} = F_R$$

$$F_{\text{res}} = -\mu mg$$

$$a = -\mu g$$

c) Wie gross ist die Winkelbeschleunigung der Kugel während des Gleitens?

Die Winkelbeschleunigung  $\alpha$  erhalten wir aus der Grundgleichung der Rotation (bzgl. Schwerpunkt)

$$J_a = M_{\text{res}}$$

$$a = \frac{M_{\text{res}}}{J}$$

$$a = \frac{\mu mgR}{J}$$

$$a = \frac{\mu mgR}{\frac{2}{5}mR^2}$$

$$a = \frac{5\mu g}{2R}$$

$$a = \frac{5\mu \cdot 9.81\frac{m}{s^2}}{20.11m}$$

$$a = 66.89\frac{\text{rad}}{s^2}$$

d) Wie lange gleitet die Kugel, bevor sie zu einer reinen Rollbewegung übergeht? (Hinweis: Die Schwerpunktschwindigkeit muss hier der Tangentialgeschwindigkeit entsprechen.)

Wenn die Kugel aufhört zu gleiten, gilt die Rollbedingung:  $v = R\omega$ :

$$v = R \cdot \omega$$

$$v_0 - a \cdot t = R \cdot a \cdot t$$

$$= \frac{5\mu gt}{2}$$

$$v_0 = \frac{5\mu gt}{2} + \mu g \cdot t$$

$$= \left(\frac{7}{2}\mu g\right) \cdot t$$

$$t = \frac{2v_0}{7\mu g}$$

$$= \frac{2 \cdot 8.5\frac{m}{s}}{7 \cdot 0.3 \cdot 9.81\frac{m}{s^2}}$$

$$= 0.83s$$

### 5.1.12. Drehmoment Seiltrommel

An einer Seiltrommel mit einem Durchmesser von 29cm und einem Massenträgheitsmoment von  $3.3kgm^2$  hängt eine Masse von 70kg. Welches Drehmoment muss der Motor an der Seiltrommel aufbringen, damit die Last mit einer Beschleunigung von  $2\frac{m}{s^2}$  aufgehoben wird?

Hier müssen wir uns fragen, wo die Kraft des Motors ansetzen wird. Basierend auf der Aufgabenstellung wird wohl die Achse der Seiltrommel rotiert, somit gilt das Drehmoment um eine gegebene Achse ( $M = J_A \cdot \alpha$ ).  $J_A$  ist mit  $3.3kgm^2$  bereits gegeben. Die Winkelbeschleunigung kann mit  $\alpha = \frac{a}{r}$  berechnet werden.  $a$  entspricht  $2\frac{m}{s^2}$  und  $r = \frac{0.29}{2}$ .

Nun soll der Motor auch noch die Masse heben können. Dazu brauchen wir das Drehmoment  $M = F \cdot r$ .  $F$  entspricht hierbei  $m \cdot a$ , wobei wir a nochmals aufschlüsseln müssen, da einerseits  $g$  nach unten zieht, aber wir die Masse mit  $2\frac{m}{s^2}$  hochziehen wollen. Unser finales  $a$  ist somit  $g + 2\frac{m}{s^2}$ . Stecken wir das alles zusammen erhält man:

$$M_M = J_A \cdot \alpha + F \cdot r$$

$$M_M = 3.3 \cdot \frac{2}{0.145} + 70 \cdot (9.81 + 2) \cdot 0.145$$

$$M_M = 165.389N$$

Es kann auch sein, dass gefragt wird nach der Kraft, welche auf dem Seil wirkt. Die Gleichungen wären:

$$F_{\text{res}} = m \cdot g - s = m \cdot a$$

$$M_{\text{res}} = r \cdot s = J \cdot \frac{a}{r}$$

### 5.1.13. Winkelgeschwindigkeit Raumkapsel

Eine Raumkapsel mit starr befestigten Sonnensegeln soll ausgerichtet werden. Dazu muss sie um den Winkel  $\varphi = 180^\circ$  um ihre Längsachse gedreht werden. Dazu wird ein Elektromotor - dessen Drehachse parallel zur Längsachse des Raumschiffs ausgerichtet wird, eingeschaltet.

Das axiale Massenträgheitsmoment des Rotors des Elektromotors ist  $J_M = 0.2kg \cdot m^2$ .

Welche Winkelgeschwindigkeit  $\omega_R$  der Raumkapsel stellt sich ein, wenn der Motor mit der Drehfrequenz  $3000min^{-1}$  rotiert? Die Winkelgeschwindigkeit des Motors ist  $\omega_M = 2\pi \frac{3000}{60} = 100\pi$ .

Der Drehimpuls muss erhalten bleiben, daher kann man die beiden Formeln für den Rotationsimpuls um eine Achse gleich stellen:

$$J_M \cdot \omega_M = J_R \cdot \omega_R$$

$$\cdot 100\pi = 3 \cdot 10^3 \cdot \omega_R$$

$$\omega_R = 0.021s^{-1}$$