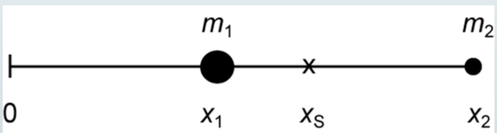
5. Teilchensysteme und Impulserhaltung

5.1 Massenmittelpunkt

Massenmittelpunkt:

V: 2 Wagen auf Balken



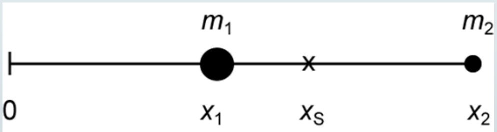
Spezialfall 1 dim. Welt: $m_{Ges} \cdot x_s = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2$

Massenmittelpunkt / Schwerpunkt:

5.1 Massenmittelpunkt

Massenmittelpunkt:

V: 2 Wagen auf Balken



Spezialfall 1 dim. Welt: $m_{Ges} \cdot x_s = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2$

Massenmittelpunkt / Schwerpunkt:

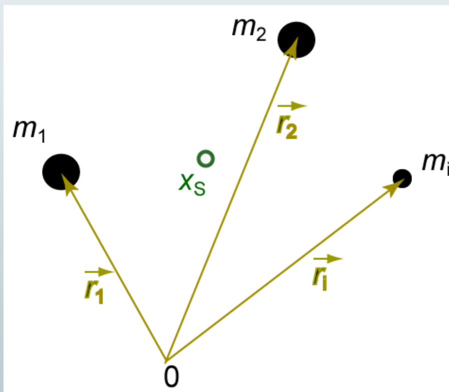
$$x_s = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_{Ges}} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i}$$

5.1 Massenmittelpunkt

Allgemein:

$$m_{Ges} \cdot \vec{r}_s = \sum_i m_i \vec{r}_i$$

$$\vec{r}_s = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}$$



5.1 Massenmittelpunkt

V: Schraubenschlüssel mit Markierung

Vergleich mit Ball

Trägheitssatz und Newton II für ein System von Teilchen:

Der Massenmittelpunkt eines Systems bewegt sich unter dem Einfluss einer resultierenden äußeren Kraft wie ein Teilchen mit der Masse:

$$(m_{Ges} = \sum_i m_i)$$

5.1 Massenmittelpunkt

V: Schraubenschlüssel mit Markierung

Vergleich mit Ball

Trägheitssatz und Newton II für ein System von Teilchen:

Der Massenmittelpunkt eines Systems bewegt sich unter dem Einfluss einer resultierenden äußeren Kraft wie ein Teilchen mit der Masse:

$$(m_{Ges} = \sum_i m_i)$$

Spezialfall:

$$\vec{F} = 0; \Rightarrow \vec{v}_{Schwerpunkt} = konst;$$

(d. h. der Massenmittelpunkt bewegt sich geradlinig gleichförmig oder ruht)

5.2 Impuls als Bewegungsgröße

Def.: $\boxed{\vec{p} = m \cdot \vec{v}}$

$$F_{ext} = m_{Ges} \cdot a_{sp}$$
$$F_{ext} = m_{Ges} \cdot \dot{v}_{sp}$$

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

Mit Hilfe des Impulses lässt sich die Grundgleichung der Mechanik allgemein formulieren:

$$\boxed{\vec{F} = \dot{\vec{p}}}$$

5.2 Impuls als Bewegungsgröße

$$\boxed{\vec{F} = \dot{\vec{p}}}$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \longrightarrow \begin{aligned} \vec{F}dt &= d\vec{p} \\ \vec{F}\Delta t &= \Delta\vec{p} \end{aligned}$$

↑

Aussagen ablesen können

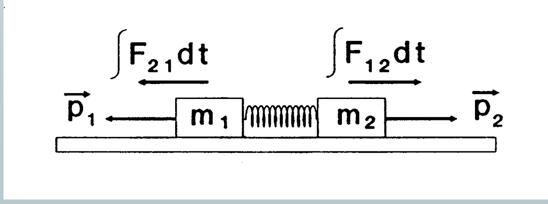
5.2 Impuls als Bewegungsgröße

Kraftstoß und Impulsänderung:

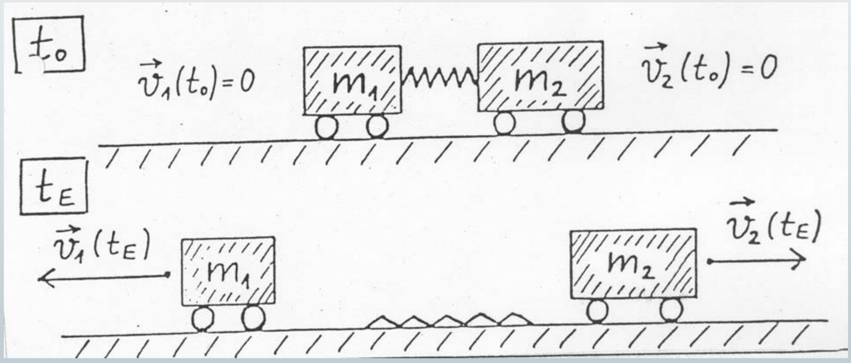
$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\boxed{\int \vec{F} dt = \int d\vec{p} = \Delta \vec{p}}$$

Kraftstoß = Impulsänderung



5.3 Impulserhaltungssatz (←→actio = reactio)



5.3 Impulserhaltungssatz (←→actio = reactio)

Theorie:

vereinfachend
F_i = konst.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$
$$m_1 \cdot a_1 = -m_2 \cdot a_2$$

$$m_1 \cdot \frac{\Delta v_1}{\Delta t} = -m_2 \cdot \frac{\Delta v_2}{\Delta t}$$
$$m_1 \cdot \Delta v_1 = -m_2 \cdot \Delta v_2$$

$$m_1(v_1' - v_1) = -m_2(v_2' - v_2)$$
$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v_1' + m_2 \cdot v_2'$$

Gesamtimpuls vorher = Gesamtimpuls nachher
(Impulserhaltung)

5.3 Impulserhaltungssatz (←→actio = reactio)

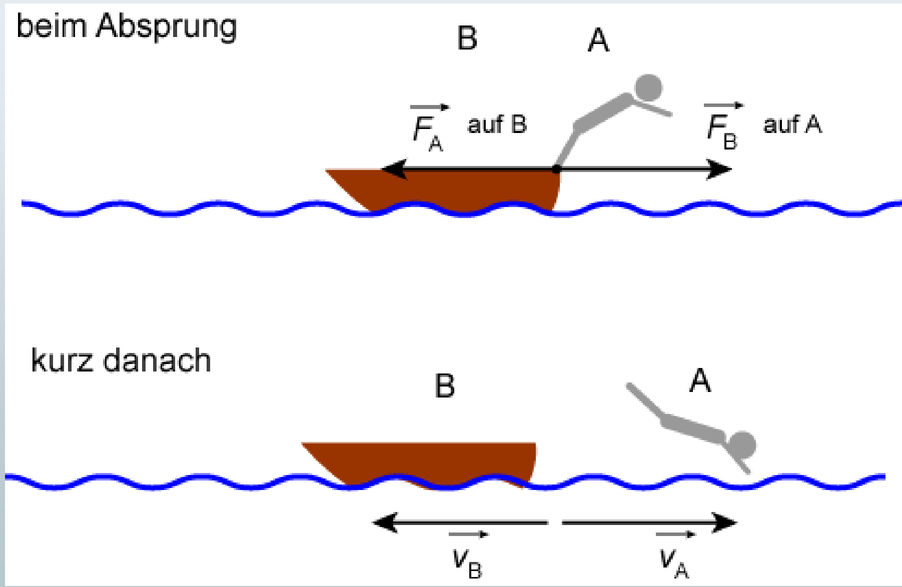
Allgemein:

$$\vec{F}_a = 0 \Rightarrow \frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \quad \text{oder} \quad \vec{p} = const.$$

Impulssatz:

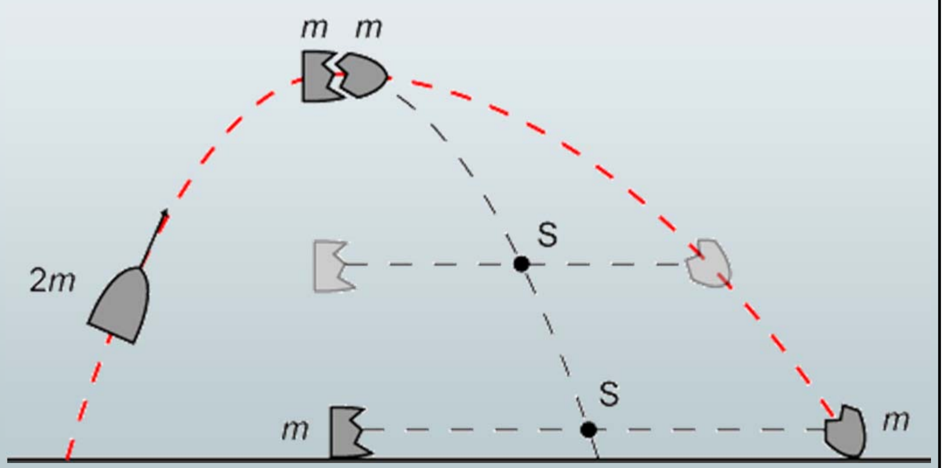
Ohne Einwirkung äußerer Kräfte bleibt in einem
System die Summe aller Impulse konstant.

5.3 Impulserhaltungssatz (←→actio = reactio)



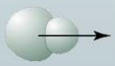
 13

5.3 Impulserhaltungssatz (←→actio = reactio)



 14

5.3 Stoßarten

Stoßart		Charakteristik $E_{Kin,nach} - E_{Kin,vor} = \Delta Q$
Elastisch		Summe der kinetischen Energie vor und nach dem Stoß gleich $\Delta Q = 0$
Ineleastisch		Summe der kinetischen Energie nach dem Stoß kleiner $\Delta Q < 0$
unelastisch		Die Körper bewegen sich nach dem Stoß zusammen mit gleicher Geschwindigkeit $\Delta Q < 0$
überelastisch		$\Delta Q > 0$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Experimente zum geraden unelastischen Stoß

Spezialfall: $v_1' = v_2' = v'$

$$a) \quad m_2 = m_1 \quad \Rightarrow \quad v' = \frac{1}{2} v_1$$

$$b) \quad m_1 = 2 \cdot m_2 \quad \Rightarrow \quad v' = \frac{2}{3} v_1$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Unelastisch: Körper haften nach dem Stoß aneinander, **d. h.** $v_1' = v_2' = u'$

Impulssatz:

Energiesatz:

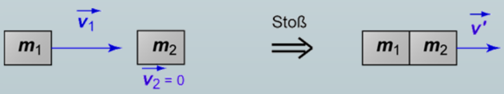
5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Unelastisch: Körper haften nach dem Stoß aneinander, **d. h.** $v_1' = v_2' = u'$

Impulssatz: $$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v'$$

Energiesatz: $$\frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \cdot v'^2 + \Delta Q$$

Sei speziell v_2=0 (ruhendes Target):



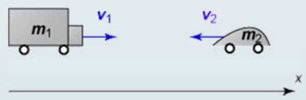
$$\boxed{\Rightarrow v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1}$$

➔ Inelastisch Stoß auf Fahrbahn: Geschwindigkeiten messen

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Beispiel: Zusammenstoß LKW - PKW

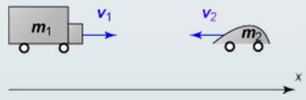
m_1= 15 t; v_1= 100 km/h
m_2= 1,5 t; v_2=-100 km/h



5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Beispiel: Zusammenstoß LKW - PKW

m_1= 15 t; v_1= 100 km/h
m_2= 1,5 t; v_2=-100 km/h

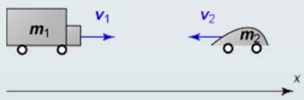


Frontaler Zusammenstoß, vollkommen inelastisch: $\vec{v_1}' = \vec{v_2}' = \vec{v}'$

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v'$$

Beispiel: Zusammenstoß LKW - PKW

m_1= 15 t; v_1= 100 km/h
m_2= 1,5 t; v_2=-100 km/h



Frontaler Zusammenstoß, vollkommen inelastisch: $\vec{v}_1{}' = \vec{v}_2{}' = \vec{v}\,'$

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v'$$

$$\vec{v}\,' = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad \vec{v}\,' = \frac{(15 \cdot 10^3) \cdot 100 + (1{,}5 \cdot 10^3) \cdot (-100)}{(15 + 1{,}5) \cdot 10^3} \text{ km h}^{-1} \vec{e}_x$$

$$\underline{\underline{\vec{v}\,' \approx 82 \text{ km h}^{-1} \cdot \vec{e}_x}}$$

Der LKW verliert nur ca. 20% seiner Geschwindigkeit

Energieabgabe beim unelastischen Stoß:

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Energieabgabe beim unelastischen Stoß: $(v_2 = 0;)$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \cdot v'^2$$
$$= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{m_1 + m_2} \cdot v_1^2$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Energieabgabe beim unelastischen Stoß: $(v_2 = 0;)$

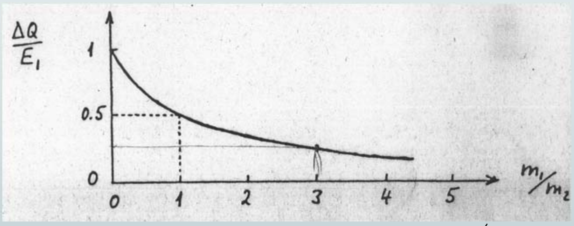
$$\Delta Q = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \cdot v'^2$$
$$= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{m_1 + m_2} \cdot v_1^2$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1^2$$
$$= \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$
$$\Delta Q = \frac{m_2}{m_1 + m_2} * E_1$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\Delta Q}{E_1} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{1 + m_1/m_2}$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

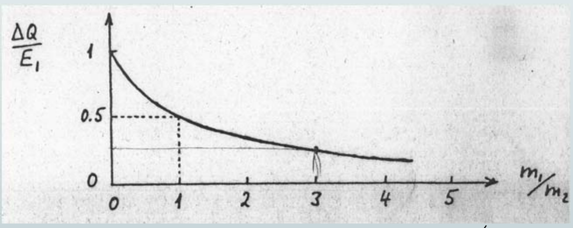
Energieabgabe: $\frac{\Delta Q}{E_1} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{1 + {m_1}/{m_2}}$



➔ Je leichter das Projektil, umso höher ${\Delta Q}/{E_1}$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Energieabgabe: $\frac{\Delta Q}{E_1} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{1 + {m_1}/{m_2}}$



➔ Je leichter das Projektil, umso höher ${\Delta Q}/{E_1}$

Spezialfälle:

a) $m_1 = m_2$: $\Delta Q = \frac{1}{2} E_1$

b) $m_1 << m_2$: $\Delta Q \approx E_1$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Weiterer spezieller Fall: $m_1 = m_2 = m; \quad \vec{v}_1 = -\vec{v}_2 = \vec{v}$

$$\Delta Q = 2E_1 = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} m \cdot v^2 \right)$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

B) Elastischer Stoß

I) Impulssatz: $$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = m_1 \cdot \vec{v}_1' + m_2 \cdot \vec{v}_2'$$

II) Energiesatz: $$\frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2'^2$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Spezialfall: $v_2 = 0$ (ruhendes Target)

aus IS: $$m_1 \cdot \vec{v}_1 + 0 = m_1 \cdot \vec{v}_1' + m_2 \cdot \vec{v}_2' \qquad (1)$$

aus ES: $$\frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2'^2 \qquad (2)$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

(1') $$v_2' = \frac{m_1}{m_2} \cdot (v_1 - v_2')$$

(2') $$m_1 \left(v_1^2 - v_1'^2\right) = m_2 \cdot v_2'^2$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

(1') $$v_2' = \frac{m_1}{m_2} \cdot (v_1 - v_2')$$

(2') $$m_1\left(v_1^2 - v_1'^2\right) = m_2 \cdot v_2'^2$$

(1') in (2'): $$m_1(v_1 - v_1')(v_1 + v_1') = \frac{m_1^2}{m_2}(v_1 - v_1')^2$$

$$m_2(v_1 + v_1') = m_1(v_1 - v_1')$$

$$v_1'(m_1 + m_2) = v_1(m_1 - m_2)$$

$$\boxed{v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1}$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

$$\boxed{v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1}$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

in (1)
$$m_1 \cdot v_1 = m_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2'$$

$$m_1 \cdot v_1 \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) = m_2 \cdot v_2'$$

$$\frac{m_1}{m_2} \left(\frac{+2m_2}{m_1 + m_2} \right) \cdot v_1 = v_2'$$

$$\boxed{v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1}$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

$$\boxed{v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1} \qquad \boxed{v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1}$$

$m_1 = m_2; \; v_2 = 0;$ zwei gleiche Massen:

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

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

$m_1 = m_2;\ v_2 = 0;$ zwei gleiche Massen:

$\Rightarrow v_1' = 0;\ v_2' = v_1$ vollständige Energieübertragung

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

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

$m_1 = m_2;\ v_2 = 0;$ zwei gleiche Massen:

$\Rightarrow v_1' = 0;\ v_2' = v_1$ vollständige Energieübertragung

$m_1 << m_2:$ El. Stoß auf Wand

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

$$\boxed{v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1} \qquad \boxed{v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1}$$

$m_1 = m_2;\ v_2 = 0;$ zwei gleiche Massen:

$\Rightarrow v_1' = 0;\ v_2' = v_1$ vollständige Energieübertragung

$m_1 << m_2:$ El. Stoß auf Wand

$v_1' = -v_1;\ v_2' = 0$ sehr geringer Energieübertragung

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

$$\boxed{v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1} \qquad \boxed{v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1}$$

$m_1 = m_2;\ v_2 = 0;$ zwei gleiche Massen:

$\Rightarrow v_1' = 0;\ v_2' = v_1$ vollständige Energieübertragung

$m_1 << m_2:$ El. Stoß auf Wand

$v_1' = -v_1;\ v_2' = 0$ sehr geringer Energieübertragung

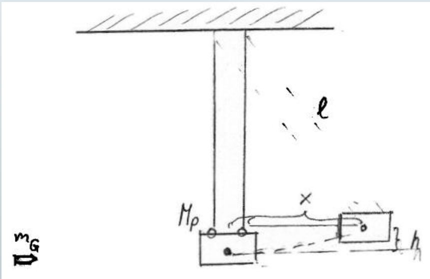
$m_1 >> m_2:$

$v_1' \approx v_1;\ v_2' \approx 2v_1$ sehr geringer Energieübertragung

➔ Kugelpendel

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

– Messung von Geschw. m. d. ballistischen Pendel



$$(l-h)^2 + x^2 = l^2$$

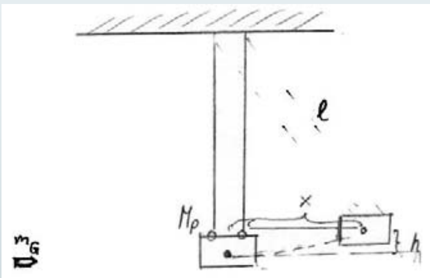
$$x^2 = l^2 - l^2 + 2\cdot l\cdot h - h^2$$

$$\approx 2\cdot l\cdot h \qquad (l >> h)$$

$$h \approx \frac{x^2}{2\cdot l}$$

$M_P = 646\text{g};\qquad M_G = 0{,}49\text{g};\qquad l = 1\text{m};$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)



Impulssatz:
(für Geschoss+Pendel)

$$m_G \cdot v_G + 0 = (m_G + M_P)v_P$$

$$\Rightarrow \qquad v_G = \frac{m_G + M_P}{m_G}\cdot v_P$$

v_P aus Energiebetrachtung:

$$\frac{1}{2}(m_G + M_P)\cdot {v_P}^2 = (m_G + M_P)\cdot g\cdot h$$

$$v_P = \sqrt{2\cdot g\cdot h} = x\sqrt{g/l}$$

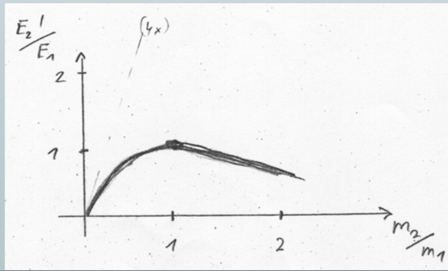
$$\Rightarrow v_G = \frac{m_G + M_P}{m_G}\cdot x\cdot\sqrt{g/l}$$

5.4 Stoßprozesse (eindim. /kollineare Stöße)

Relativer Energieübertrag: E_2'/E_1

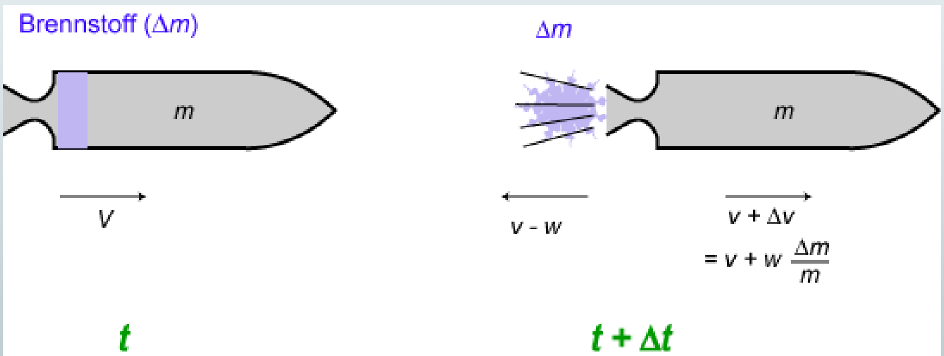
$$E_2' = \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2'^2 = \frac{m_2}{2} \cdot \left(\frac{2m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2} \right)^2 ; \qquad E_1 = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2$$

$$E_2'/E_1 = \frac{4m_1 m_2}{(m_1+m_2)^2} = \frac{4\, m_2/m_1}{\left(1 + m_2/m_1\right)^2}$$



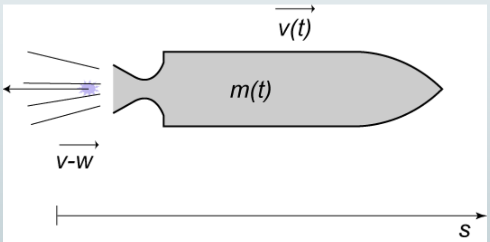
Max. bei $m_1 = m_2$

5.5 Raketenphysik



5.5 Raketenphysik

Prinzip:
Antrieb durch Rückstoß ausströmenden Gase;
Impulserhaltung für Gesamtsystem (Rakete + ausströmenden Gas)



$|\vec{w}| = w$ Ausströmgeschw. der Gase <u>relativ zur Rakete</u>

v(t) : Geschwindigkeit der Rakete im raumfesten System

$v_G(t) = v(t) - w$ Momentangschwindigkeit

m_R: Masse Rakete;
m_G: Masse der ausgestoßenen Gase;

5.5 Raketenphysik

Aufstellen der Bewegungsgleichung für den kräftefreien Raum

Impulssatz bei momentanem Masseausstoß (dm_G):

$$mv = \underbrace{dm \cdot (v - w)}_{\text{Gase}} + \underbrace{(m - dm_G) \cdot (v + dv)}_{\text{Rakete}}$$

Bewegungsgleichung:

$$\boxed{m_R \frac{dv}{dt} = +w \frac{dm_G}{dt} = -w \frac{dm_R}{dt}}$$

(dm * dv vernachlässigt)

Schubkraft

5.5 Raketenphysik

Aufstellen der Bewegungsgleichung für den kräftefreien Raum

Impulssatz bei momentanem Masseausstoß (dm_G):

$$mv_R = \underbrace{dm_R \cdot (v - w)}_{\text{Gase}} + \underbrace{(m - dm_G)\cdot(v + dv)}_{\text{Rakete}}$$

Bewegungsgleichung:

$$\boxed{m_R \frac{dv}{dt} = +w\frac{dm_G}{dt} = -w\frac{dm_R}{dt}}$$

(dm * dv vernachlässigt)

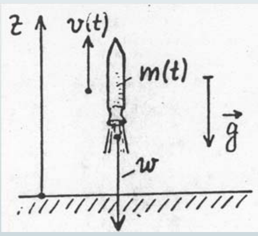
Schubkraft

$$-\frac{dm_R}{dt} = \frac{dm_G}{dt} > 0;\; w < 0; \qquad \Rightarrow F_s > 0;$$

realistisch: $\frac{dm}{dt} = const.; w = const. \qquad \Rightarrow F_s = const.$

5.5 Raketenphysik

Rakete im Schwerefeld (Raketenstart)



äußeres Kraftfeld

$\vec{F}_G = m\vec{g}$

kommt hinzu;

Bewegungsgleichung:

$$\boxed{m\frac{dv}{dt} = \underbrace{w\frac{dm_G}{dt}}_{\text{Schubkraft}} \underbrace{- mg}_{\text{Schwerkraft}}}$$

$F_s > 0$ $\qquad$ $F_G < 0$

man beachte: $m = m(t)$!

5.5 Raketenphysik

Integration der Bewegungsgleichung:

$$dv = w\frac{dm_G}{m_R} - g \cdot dt$$

$$\int_0^v dv = -w\int_{m_0}^{m}\frac{dm_R}{m(t)} - g\int_0^t dt$$

$$\boxed{v(t) = w \cdot \ln\frac{m_o}{m(t)} - g \cdot t}$$

mit $m_0 = m(t=0)$=Masse der vollgetankten Rakete bei Zündung

5.5 Raketenphysik

Diskussion:

a) Bedingung für Abheben: $\frac{dv}{dt} > 0 \quad \Leftrightarrow \quad F_S > |F_G|$

entscheidende Parameter für Schubkraft: $|w|$ und $\frac{dm}{dt}$;

$|w|$ hängt von Brennkammerdruck und -temperatur sowie vom verwendeten Gasgemisch ab;

5.5 Raketenphysik

Diskussion:

a) Bedingung für Abheben: $\frac{dv}{dt} > 0 \quad \Leftrightarrow \quad F_S > |F_G|$

entscheidende Parameter für Schubkraft: $|w|$ und $\frac{dm}{dt}$;

$|w|$ hängt von Brennkammerdruck und -temperatur sowie vom verwendeten Gasgemisch ab;

<u>In der Praxis:</u>

$\text{fl. } H_2 - \text{fl. } O_2 \rightarrow \text{hohes } |w| \left(\sim 4{,}5 \frac{km}{s} \right), \text{ aber kleines } \frac{dm}{dt}$

$\text{Kerosin - fl. } O_2 \rightarrow \text{kleines } |w| \left(\sim 2{,}5 \frac{km}{s} \right), \text{ aber höheres } \frac{dm}{dt}$

5.5 Raketenphysik

b) <u>Endgeschwindigkeit v_E</u> (=Geschwindigkeit bei Brennschluss $t = t_E$)

$$v_E = w \cdot \ln \frac{m_0}{m_E} - g \cdot t_E$$

mit $m_E = m(t = t_E)$ Masse der leergebrannten Rakete bei Brennschluss

entscheidende Parameter: $|w|$ und $\frac{m_0}{m_E}$

5.5 Raketenphysik

b) Endgeschwindigkeit v_E (=Geschwindigkeit bei Brennschluss $t = t_E$)

$$v_E = w \cdot \ln \frac{m_0}{m_E} - g \cdot t_E$$

mit $m_E = m(t = t_E)$ Masse der leergebrannten Rakete bei Brennschluss

entscheidende Parameter: $|w|$ und $\frac{m_0}{m_E}$

In der Praxis: $|w| = 2{,}5 \;\; bis \;\; 4{,}5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ (siehe oben)

$$\frac{m_0}{m_E} \leq 6$$

$$\Rightarrow v_E \leq 8 \frac{km}{s}$$

zum Vergleich: Fluchtgeschwindigkeit v_{min}=11,2 km/s → Mehrstufenprinzip!

5.5 Raketenphysik

Daten der Saturn V (Apollo-Projekt)

$$m_o = 2950\text{t}; \quad m_{Treibstoff} = 2000\text{t}; \quad \frac{m_0}{m_E} = \frac{2900}{700} \approx 4;$$

1. Stufe: Kerosin + fl. O_2

$$|w| = 2{,}2 \frac{\text{km}}{\text{s}}; \quad \frac{dm}{dt} = 15 \frac{\text{t}}{\text{s}}; \quad F_s = 3{,}3 \cdot 10^7 \text{N};$$

Brenndauer: $t_E \approx 2 \text{ min}$

2., 3. Stufe: fl. H_2 + fl. O_2

5.5 Raketenphysik

Endgeschwindigkeit v_E

nach 1. Stufe ------ 2 km/s
nach 2. Stufe ------ 6,8 km/s
nach 3. Stufe ------ 7,85 km /s

Umlaufbahn in 185 km Höhe

Beschleunigung der Rakete:

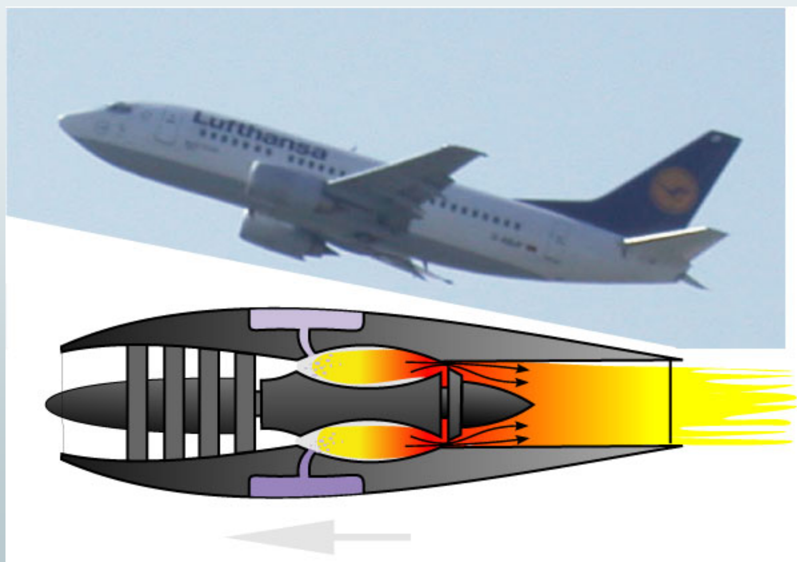
a) am Anfang (kurz nach Start:

$$a_A = \frac{F_s - m_0 \cdot g}{m_0} \approx 2\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 0{,}2 \cdot g;$$

b) am Ende (kurz vor Brennschluss):

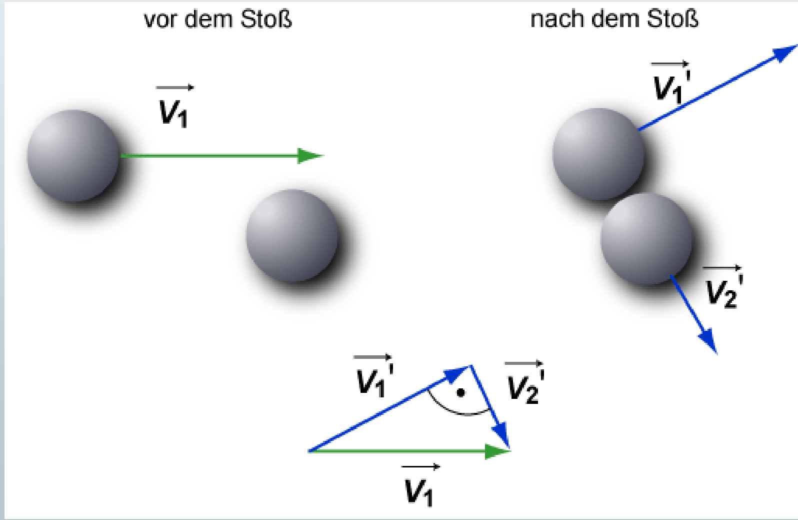
$$a_E = \frac{F_s - m_E \cdot g}{m_E} \approx 40\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 4 \cdot g;$$

5.5 Raketenphysik

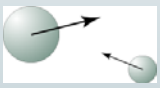
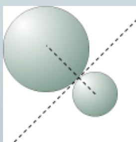
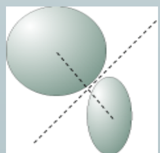


Die heißen Verbrennungsgase strömen
aus den Brennkammern nach hinten aus.

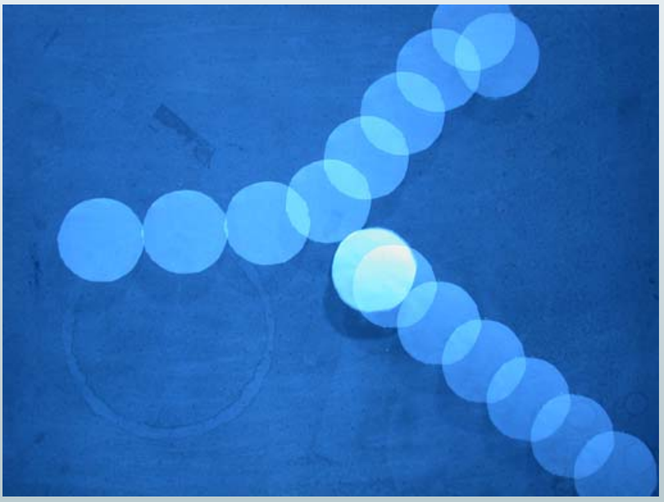
5.6 Stöße - zweidimensional



5.6 Stöße - zweidimensional

Stoßart		Charakteristik
gerade		Geschwindigkeitsvektoren liegen auf einer Geraden
schief		Geschwindigkeitsvektoren liegen in einer Ebene und schließen einen Winkel ein
zentral		Die Schwerpunkte liegen auf der Stoßnormalen (Senkrechte zur Stoßebene)
exzentrisch		Die Schwerpunkte liegen nicht auf der Stoßnormalen => Rotation

5.6 Stöße - zweidimensional



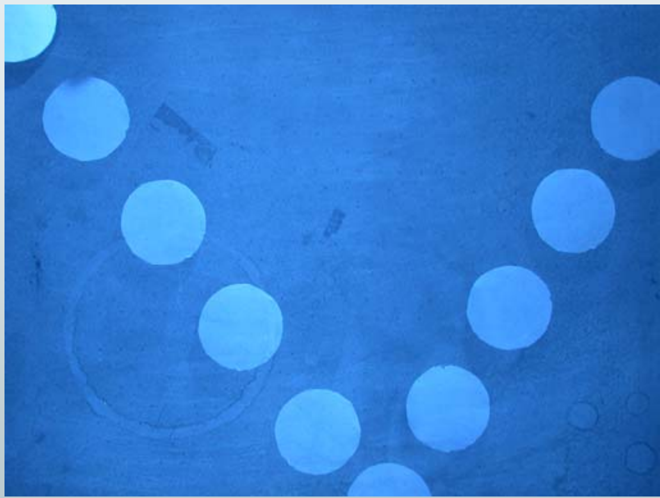
© R. Girwidz 57

5.6 Stöße - zweidimensional

Bei gleichen Massen stehen die Geschwindigkeitsvektoren nach dem Stoß senkrecht aufeinander.

© R. Girwidz 58

5.6 Stöße - zweidimensional



5.6 Stöße - zweidimensional