



# Engaging Physics Tutoring

Physik I

Lektion 5

*Zentripetalkraft*  
*Reibung*

# Themen der Lektion

Zentripetalkraft in  
Kreisbewegungen

Reibungskräfte

Statische Reibung

Dynamische Reibung

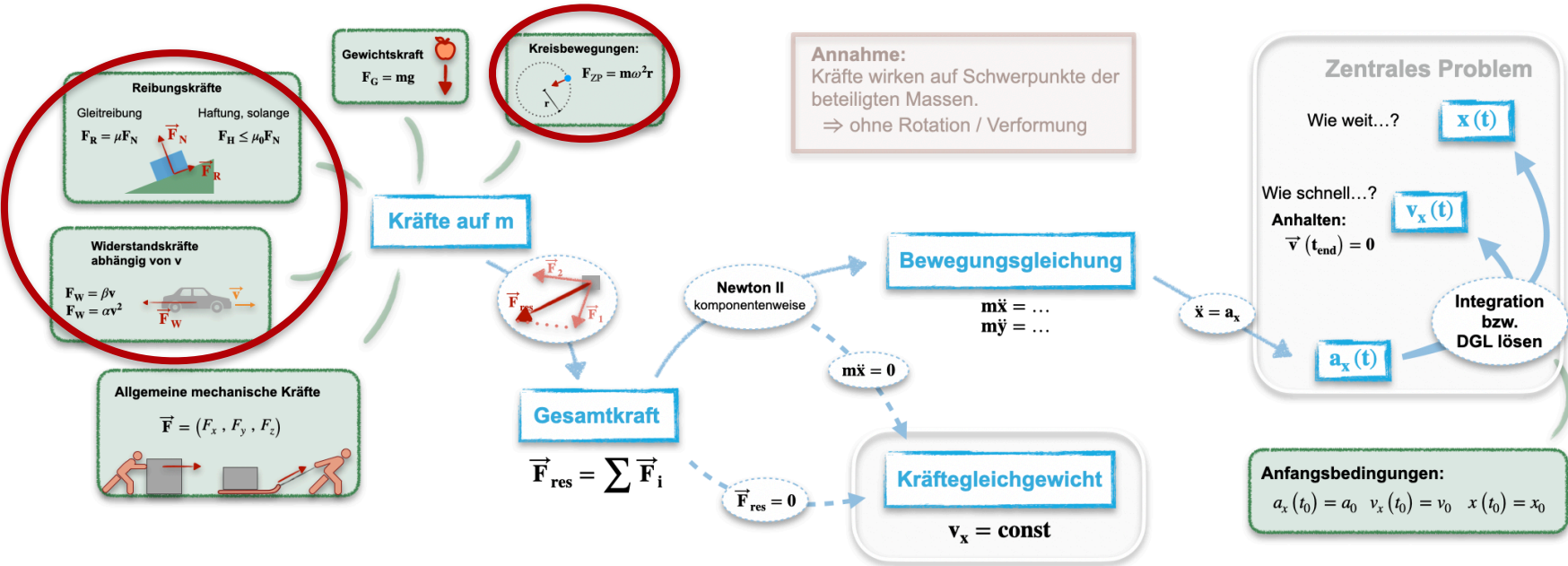
Luftwiderstand

# Einordnung: Was machen wir gerade?

## Kräfte aufstellen



## Problem lösen



# Zentripetalkraft - Diskussion

# Diskussion über Zentripetalkraft

Aus welchen Kräften setzt sich in den abgebildeten Situationen die Zentripetalkraft zusammen?

Looping



Bild: faz.net

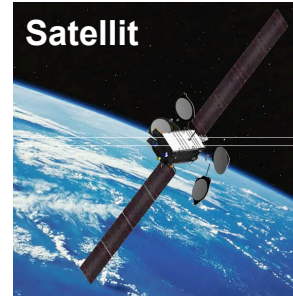


Bild: Boeing Satellite Systems - SES-15 Hybrid Satellite



Bild: <https://www.fotocommunity.de/photo/jahrmaktsvergnuegen-kettenkarussell-fotowabo/41459865>



Bild: <https://www.skysportaustria.at/erste-frau-ueber-80-m-wlodarczyk-mit-neuem-hammerwurf-weltrekord/>

# Diskussion über Zentripetalkraft

Aus welchen Kräften setzt sich in den abgebildeten Situationen die Zentripetalkraft zusammen?

Looping



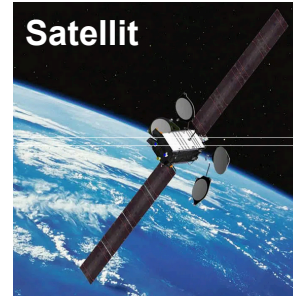
Normalkraft und  
Gewichtskraft



Tornado

Bild: faz.net

Druckgradientkraft



Satellit

Bild: Boeing Satellite Systems -  
SES-15 Hybrid Satellite

Gravitationskraft



Kettenkarussell

Bild: <https://www.fotocommunity.de/photo/jahrmaktsvergnuegen-kettenkarussell-fotowabo/41459865>

Seilkraft und  
Gewichtskraft



Hammerwurf

Bild: <https://www.skysportaustria.at/erste-frau-ueber-80-m-wlodarczyk-mit-neuem-hammerwurf-weltrekord/>

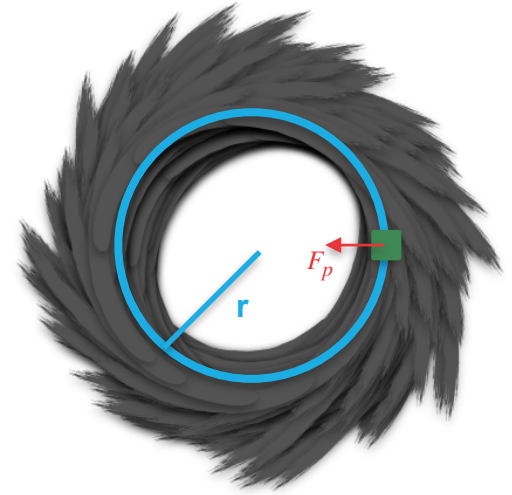
Seilkraft

# Tornado und Zentripetalkraft

# Kräfte im Tornado

Im Zentrum eines Tornados herrscht ein viel tieferer Luftdruck als ausserhalb. Der Druckunterschied bewirkt eine Druckgradientkraft auf die Luftmassen, die kreisförmig um das Zentrum strömen.

Wir betrachten einen mittelgrossen Tornado. Vereinfachend nehmen wir an, dass die Windgeschwindigkeit rein vom lokalen Druckgradienten bestimmt wird. In einem Abstand von  $r = 200$  m vom Zentrum herrsche eine Windgeschwindigkeit von  $v = 55 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .



Wie gross ist der Druckgradient  $\frac{\partial p}{\partial r}$  in diesem Bereich?

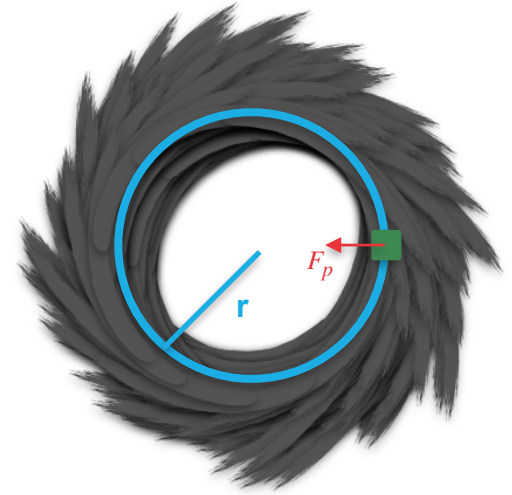
Info: Druckgradientkraft  $\left| F_p \right| = \frac{m}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$ ,  
mit  $m$  Masse des betrachteten Luftpakets  
und  $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$  Dichte des Pakets.



# Kräfte im Tornado

Im Zentrum eines Tornados herrscht ein viel tieferer Luftdruck als ausserhalb. Der Druckunterschied bewirkt eine Druckgradientkraft auf die Luftmassen, die kreisförmig um das Zentrum strömen.

Wir betrachten einen mittelgrossen Tornado. Vereinfachend nehmen wir an, dass die Windgeschwindigkeit rein vom lokalen Druckgradienten bestimmt wird. In einem Abstand von  $r = 200$  m vom Zentrum herrsche eine Windgeschwindigkeit von  $v = 55 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .



Wie gross ist der Druckgradient  $\frac{\partial p}{\partial r}$  in diesem Bereich?

$$\begin{aligned} |F_{ZP}| &= |F_p| \\ \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial r} &= \frac{\rho v^2}{r} = 15.1 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \\ |F_{ZP}| &= m \frac{v^2}{r} \end{aligned}$$

Info: Druckgradientkraft  $|F_p| = \frac{m}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$ ,  
mit  $m$  Masse des betrachteten Luftpakets  
und  $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$  Dichte des Pakets.

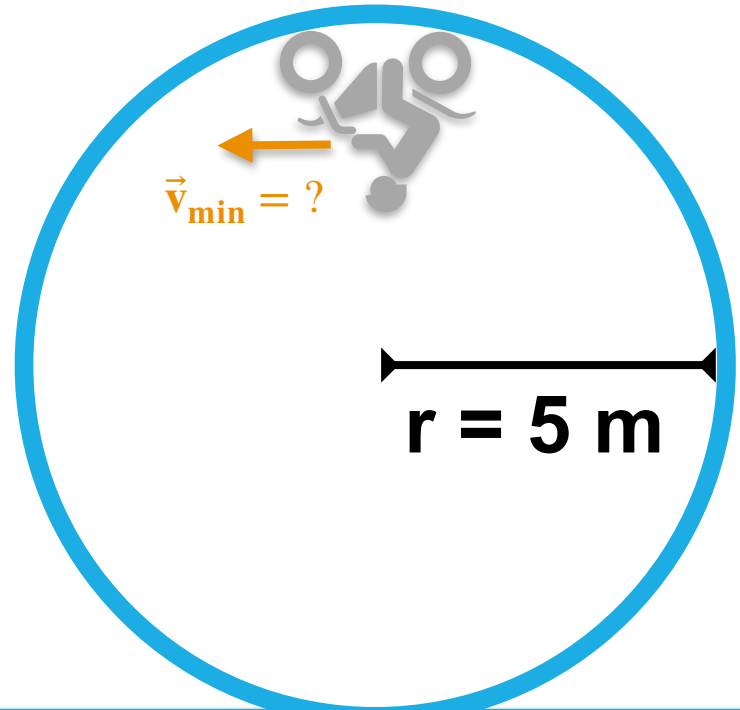
# Motorrad in Looping

# Motorrad im Looping

## Fragen:

Welche Kräfte wirken im höchsten Punkt auf den Fahrer im Looping?

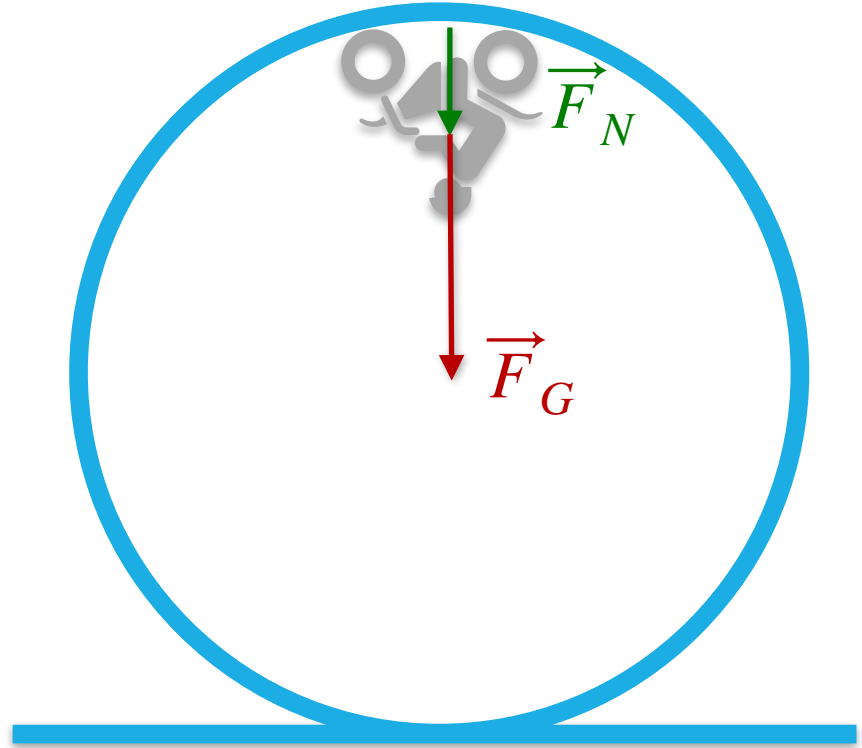
Welche Geschwindigkeit muss der Fahrer am höchsten Punkt mindestens noch haben, um durch den Looping zu kommen?



# Motorrad im Looping - Kräfte im Scheitelpunkt

Zentripetalkraft wird von Gewichtskraft und Normalkraft zusammen aufgebracht.

$$\vec{F}_{ZP} = \vec{F}_G + \vec{F}_N$$



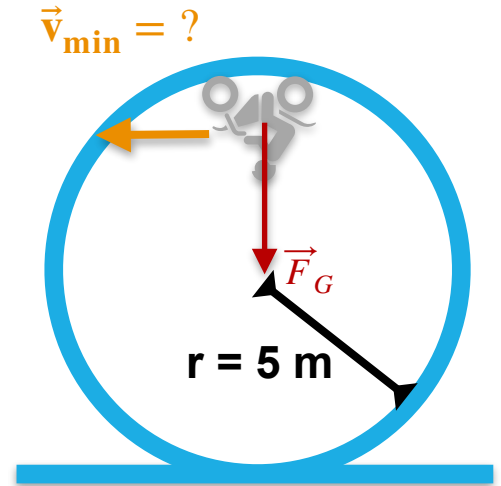
# Motorrad im Looping - minimale Geschwindigkeit im Scheitelpunkt

Bei der minimalen Geschwindigkeit  
übernimmt die Gewichtskraft die  
Zentripetalkraft alleine:  $F_N(v_{min}) = 0$

betragsmässig gilt  $|F_{ZP}(v_{min})| = |F_G|$

$$\Rightarrow m \frac{v_{min}^2}{r} = mg$$

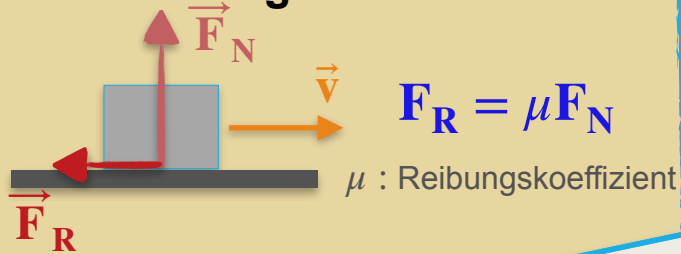
$$\Rightarrow v_{min} = \sqrt{gr} = \sqrt{50} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 25.5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$



# Übersicht Reibung

# Reibung an Oberflächen

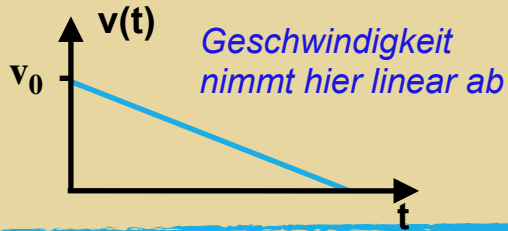
## Gleitreibung



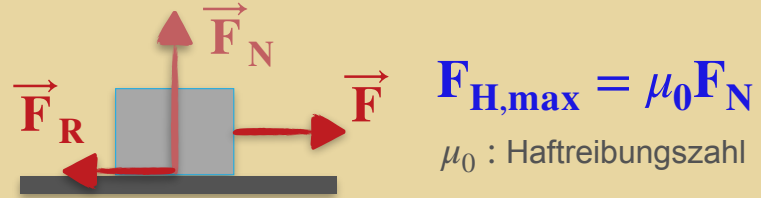
Haftreibung > Gleitreibung  
 $\mu_0 > \mu$

Spezialfall:  $F_x = 0$

$$m\ddot{x} = -F_R \Rightarrow \dot{x} = v_0 - \frac{F_R}{m}t$$



## Haftreibung (statisch)



## Kräftegleichgewicht:

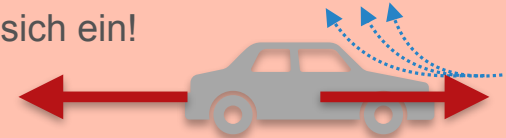
$\vec{F}_R = \vec{F}$  solange  $\vec{F}_R < \vec{F}_{H,max}$

dann: plötzliches Gleiten

Reibung abhängig von  $v$ : z.B.  $F_W = \alpha v^2$   $F_W = \beta v$

Bei konstanter Beschleunigung (z.B. freier Fall):

Kräfte-Gleichgewicht stellt sich ein!



# Haft- und Gleitreibung an der schiefen Ebene

Bedingung für Haften:

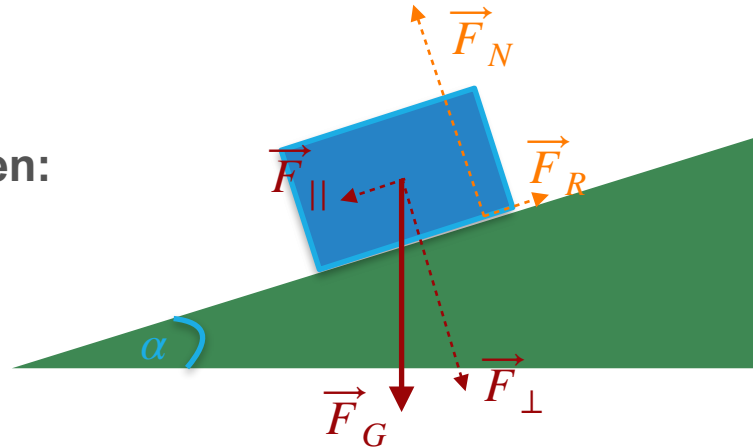
Kräftegleichgewicht!

$$F_R = F_{\parallel}$$

$$F_R < \mu_0 F_N$$

$$|F_N| = |F_{\perp}|$$

(alles betragsmässig betrachtet)



Gleitreibung:

Kraft bremst das Gleiten

$$F_R = \mu F_N = \mu F_G \cos \alpha$$

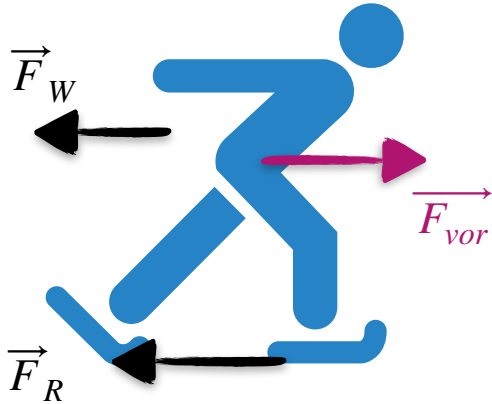
Newton II:

$$m\dot{s} = F_{\parallel} - F_R$$



# Rechnung zu Reibung und Luftwiderstand

# Beispielaufgabe: Eisschnellauf



**Kräfte:**

Konstante Antriebskraft

$$F_{vor} = 80 \text{ N}$$

Kufenreibung

$$F_R = const.$$

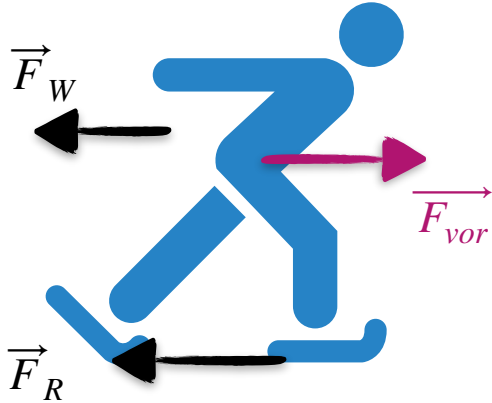
Luftwiderstand:

$$F_W = \alpha v^2$$

**Bewegungsgleichung:**

**Berechne maximale Geschwindigkeit:**

# Beispielaufgabe Reibung: Eisschnelllauf



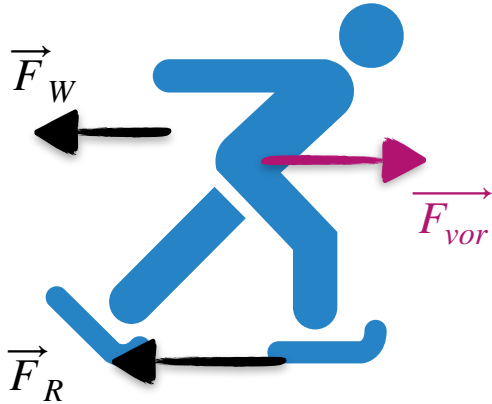
<b>Kräfte:</b>	Konstante Antriebskraft	$F_{vor} = 80 \text{ N}$
	Kufenreibung	$F_R = const.$
	Luftwiderstand:	$F_W = \alpha v^2$

**Bewegungsgleichung:**  $m\ddot{x} = F_{vor} - F_R - \alpha v^2$

**Berechne maximale Geschwindigkeit:**

$$m\ddot{x} = 0 \quad v_{max} = \sqrt{\frac{F_{vor} - F_R}{\alpha}}$$

# Beispielaufgabe Reibung: Eisschnelllauf



Beispiel für typische Werte:

$$\alpha \sim 0.3 \frac{kg}{m} \quad \left| \vec{F}_R \right| = 30 \text{ N}$$
$$\rightarrow v = 13 \frac{m}{s} = 46.5 \frac{km}{h}$$

<b>Kräfte:</b>	Konstante Antriebskraft	$F_{vor} = 80 \text{ N}$
	Kufenreibung	$F_R = const.$
	Luftwiderstand:	$F_W = \alpha v^2$

**Bewegungsgleichung:**  $m\ddot{x} = F_{vor} - F_R - \alpha v^2$

**Berechne maximale Geschwindigkeit:**

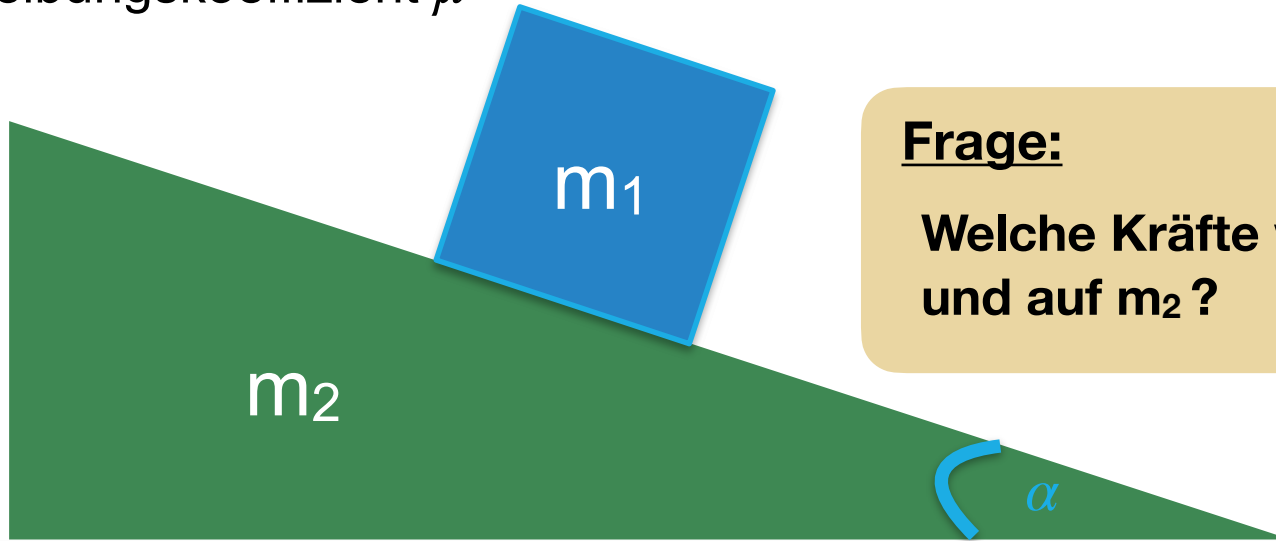
$$m\ddot{x} = 0 \quad v_{max} = \sqrt{\frac{F_{vor} - F_R}{\alpha}}$$

# Block gleitet auf Rampe

# Block auf Rampe

$m_1$  gleitet auf Rampe ab,  
mit Reibungskoeffizient  $\mu$

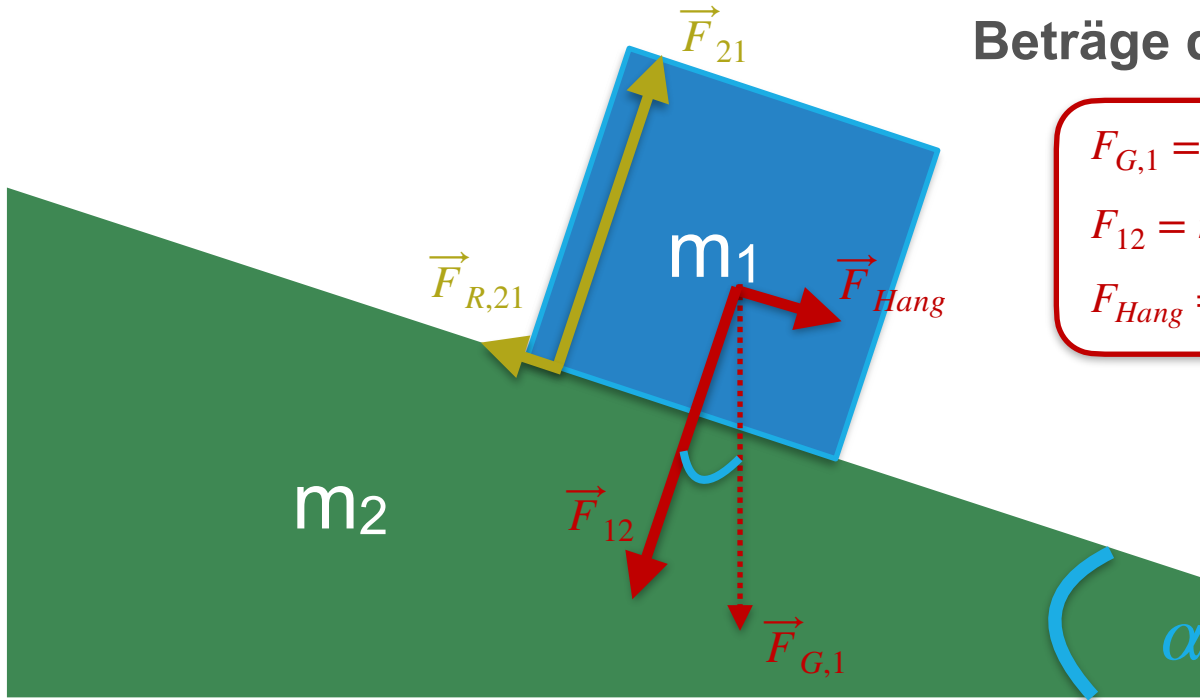
$m_2$  haftet auf Ebene



**Frage:**

**Welche Kräfte wirken je auf  $m_1$   
und auf  $m_2$  ?**

# Block auf Rampe - Kräfte auf $m_1$



Beträge der Kräfte:

$$F_{G,1} = m_1 g$$

$$F_{12} = m_1 g \cdot \cos \alpha$$

$$F_{Hang} = m_1 g \cdot \sin \alpha$$

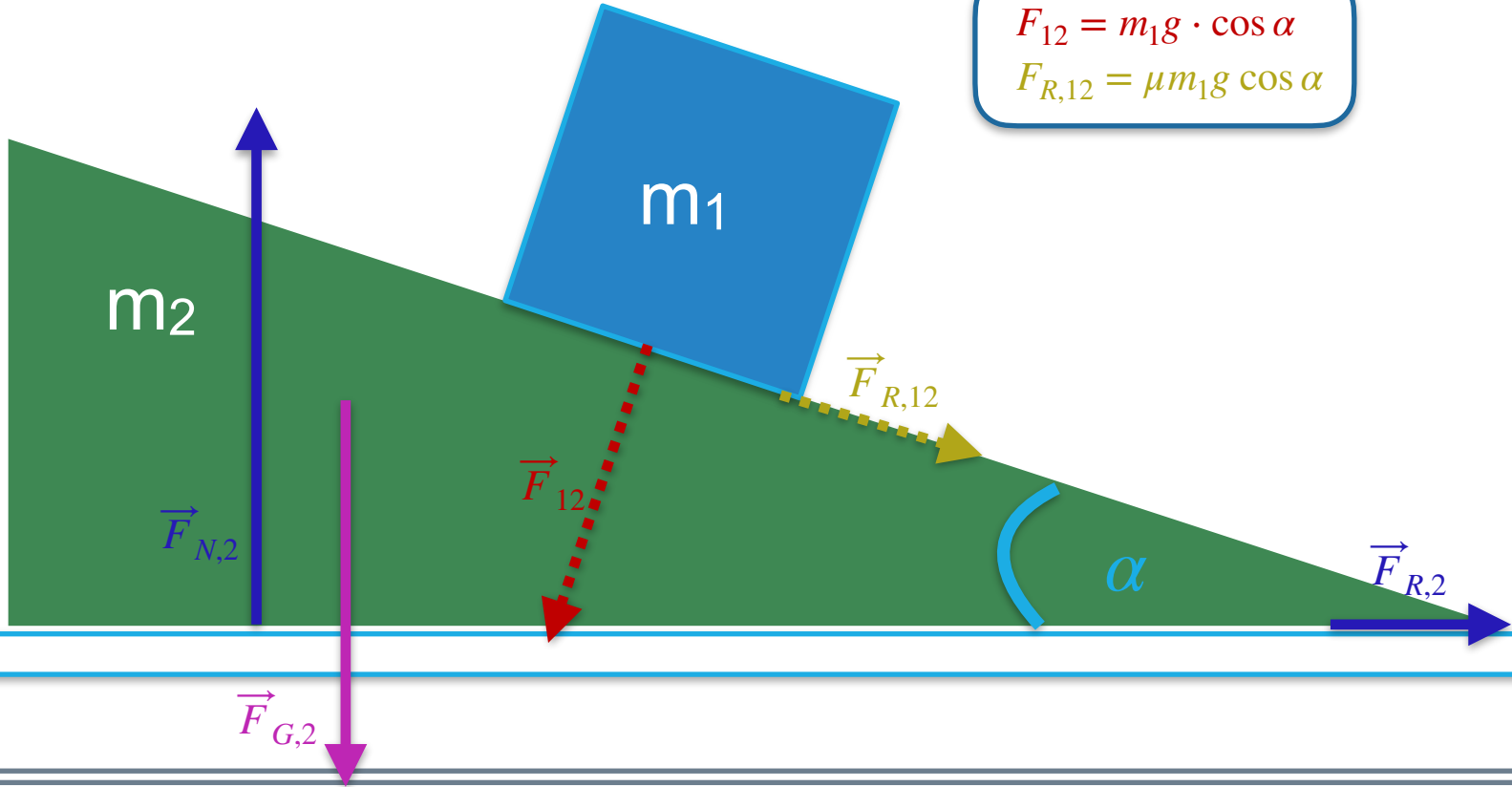
$$|F_{21}| = |F_{12}| = m_1 g \cos \alpha$$

$$F_{R,21} = \mu F_{21} = \mu m_1 g \cos \alpha$$

# Block auf Rampe - Kräfte auf $m_2$

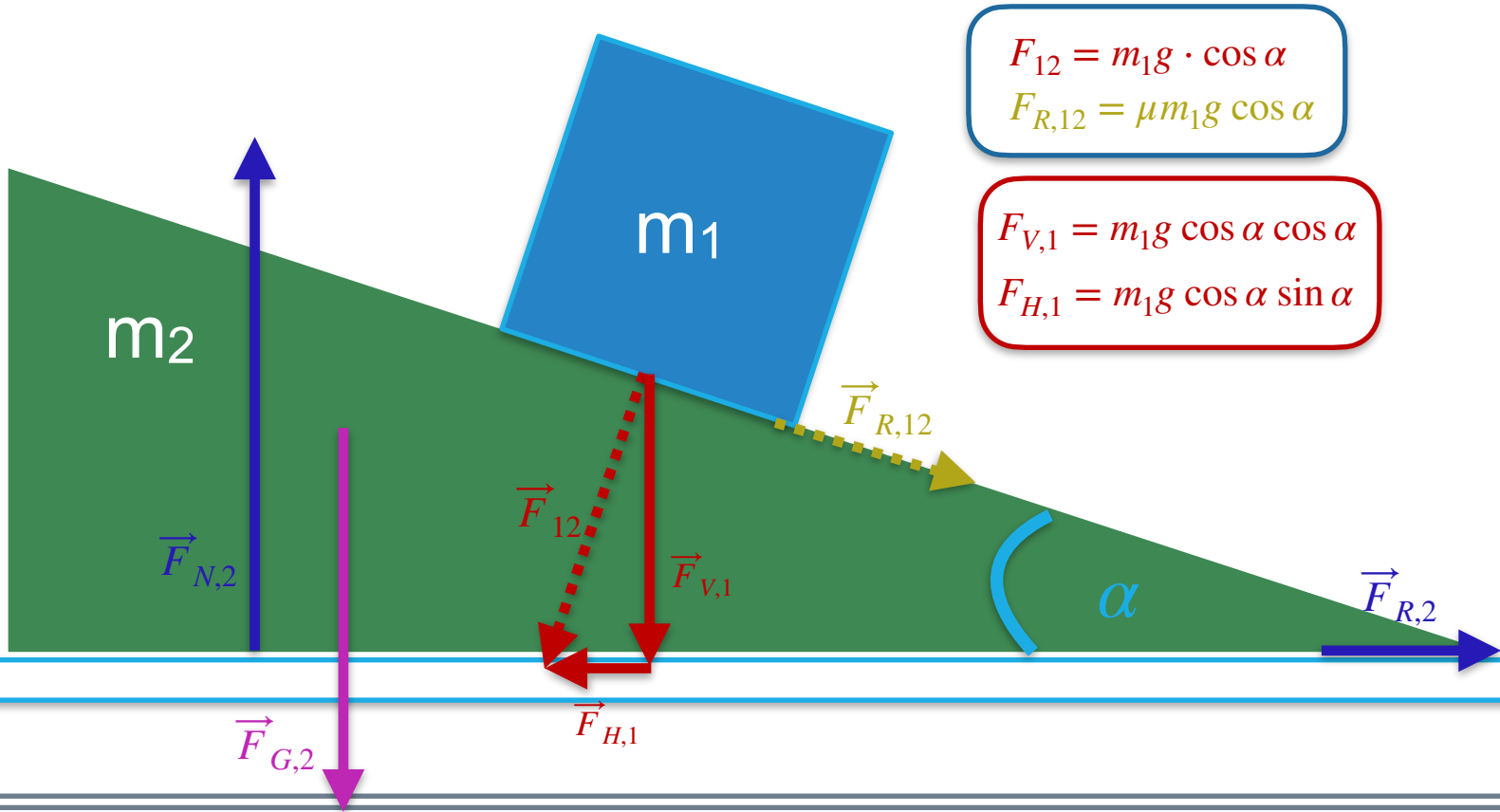
$$F_{12} = m_1 g \cdot \cos \alpha$$

$$F_{R,12} = \mu m_1 g \cos \alpha$$

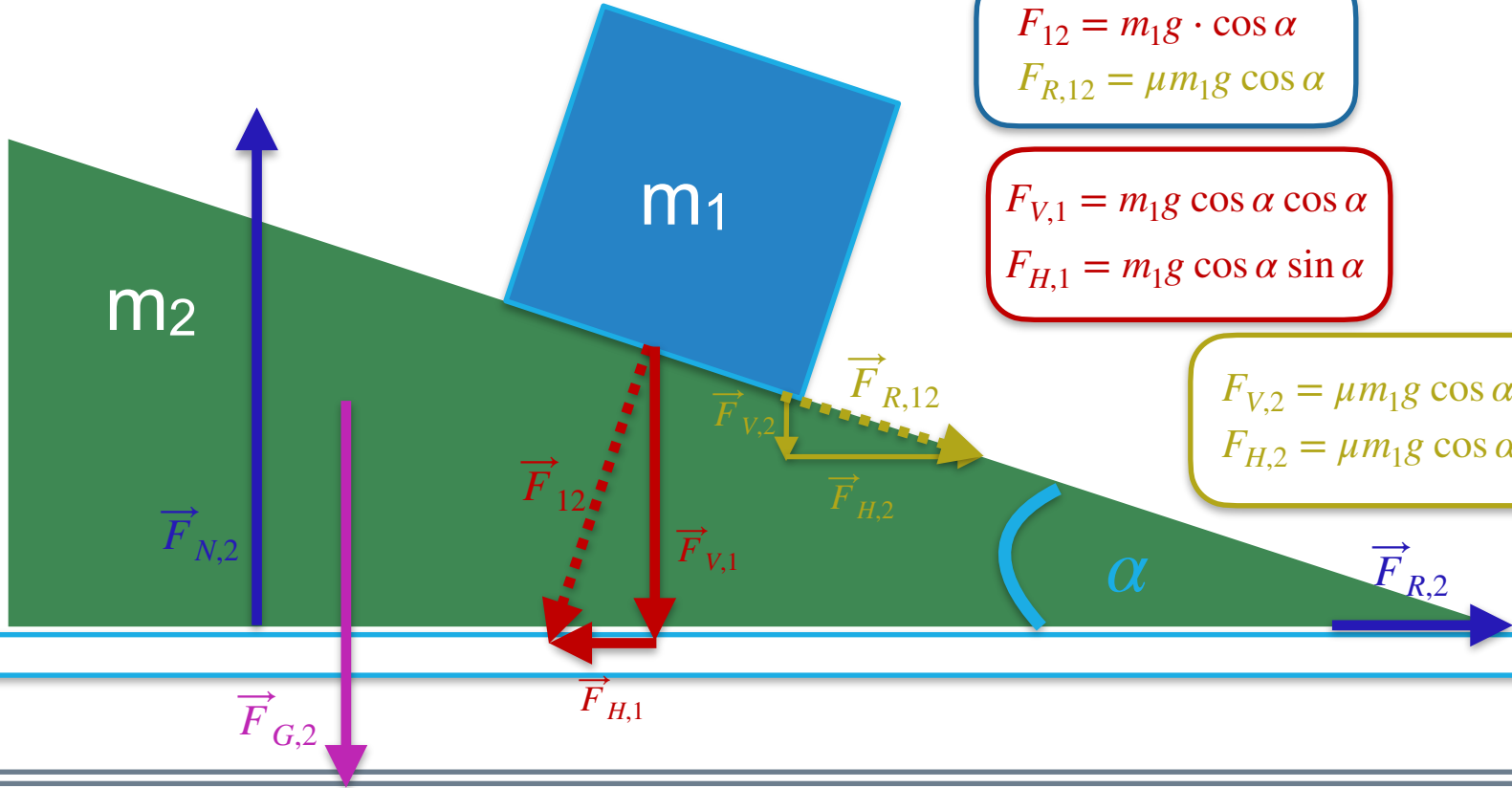




# Block auf Rampe - Kräfte auf $m_2$



# Block auf Rampe - Kräfte auf $m_2$



$$F_{12} = m_1 g \cdot \cos \alpha$$

$$F_{R,12} = \mu m_1 g \cos \alpha$$

$$F_{V,1} = m_1 g \cos \alpha \cos \alpha$$

$$F_{H,1} = m_1 g \cos \alpha \sin \alpha$$

$$F_{V,2} = \mu m_1 g \cos \alpha \sin \alpha$$

$$F_{H,2} = \mu m_1 g \cos \alpha \cos \alpha$$

# Clicker-Fragen

# Frage 1

Krishnas «Butterball» ist ein besonderer Felsen in Tamil Nadu, Indien. Wie kann es sein, dass der Felsen in dieser Position bleibt?

- a) Die Reibungskraft ist gerade genau so gross wie die Hangabtriebskraft.
- b) Die Reibungskraft ist viel grösser als die Hangabtriebskraft.
- c) Die Normalkraft kompensiert die Reibungskraft gerade so, dass die Hangabtriebskraft null wird.
- d) Die Normalkraft ist grösser als die Gravitationskraft, sodass die Hangabtriebskraft null wird.

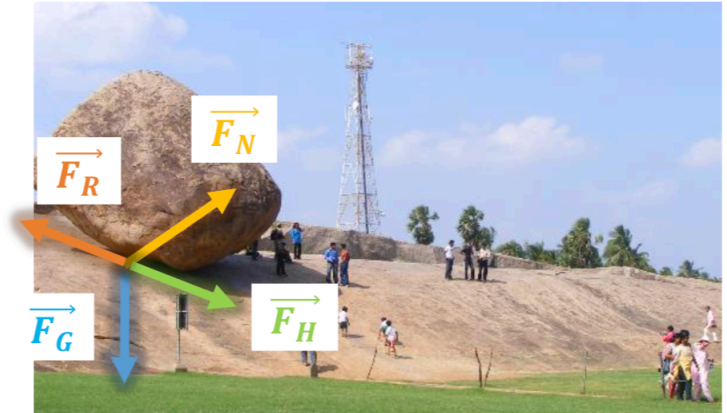


# Frage 1

- b) nicht, dann würde der Stein nach oben beschleunigt und es gäbe kein Gleichgewicht.
- c) nicht, weil die Normalkraft die Reibungskraft erzeugt:  $F_R = \mu F_N$ .
- d) nicht,  $F_N \leq F_G$  mit Gleichheit bei horizontaler Fläche.

Krishnas «Butterball» ist ein besonderer Felsen in Tamil Nadu, Indien.  
Wie kann es sein, dass der Felsen in dieser Position bleibt?

- a) Die Reibungskraft ist gerade genau so gross wie die Hangabtriebskraft.
- b) Die Reibungskraft ist viel grösser als die Hangabtriebskraft.
- c) Die Normalkraft kompensiert die Reibungskraft gerade so, dass die Hangabtriebskraft null wird.
- d) Die Normalkraft ist grösser als die Gravitationskraft, sodass die Hangabtriebskraft null wird.



## Frage 2



Ein Hundeschlitten startet. Zu welchem Zeitpunkt wenden die Tiere die meiste Kraft auf?

- a) Wenn sie den Schlitten in Bewegung setzen müssen.
- b) Wenn der Schlitten auf dem Schnee beginnt zu rutschen.
- c) Beides braucht gleich viel Kraft, da sich die Masse des Schlittens und somit die Reibung nicht ändert.
- d) Kann man nicht sagen, man muss die Schneebedingungen kennen.

## Frage 2



Ein Hundeschlitten startet. Zu welchem Zeitpunkt wenden die Tiere die meiste Kraft auf?

Haftreibung ist grösser als Gleitreibung

- a) Wenn sie den Schlitten in Bewegung setzen müssen.
- b) Wenn der Schlitten auf dem Schnee beginnt zu rutschen.
- c) Beides braucht gleich viel Kraft, da sich die Masse des Schlittens und somit die Reibung nicht ändert.
- d) Kann man nicht sagen, man muss die Schneebedingungen kennen.