7 Reibung

Bei Körperkontakt tritt neben einer Normalkraft senkrecht zur Berührebene i. Allg. auch eine tangentiale Kraftkomponente auf. Zu unterscheiden ist der haftende Kontakt, der eine tangentiale Bindung darstellt, und der Gleitkontakt, bei dem die tangentiale Kraft eine eingeprägte Kraft ist. Je nach Anwendung kann Reibung nützlich oder schädlich sein. Als Haftreibung ermöglicht sie erst die Fortbewegung von Lebewesen und Fahrzeugen oder dient der Sicherung von Nagel-, Klemm- und Schraubverbindungen, als Gleitreibung kann sie für die Schwingungsdämpfung genutzt werden. In vielen Fällen ist sie aber auch ungewollt, weil sie den Energieverbrauch erhöht oder zu Lagerverschleiß führt.

Die Normalkraft ist eine Reaktionskraft, die ein Durchdringen der Körper verhindert, ein Abheben jedoch zulässt. Daher trägt man beim Freischneiden die Normalkraft als Druckkraft ein und erwartet ein positives Ergebnis für den vorzeichenbehafteten Betrag.

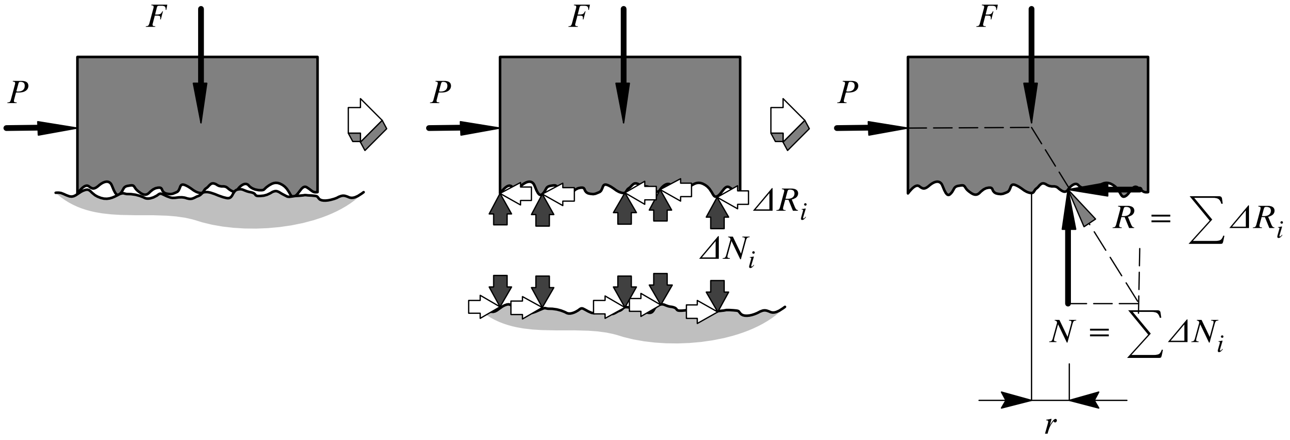
Die Gleitreibungskraft kann in vielen Fällen als geschwindigkeitsunabhängige Kraft entgegen der relativen Gleitgeschwindigkeit idealisiert und entsprechend dem Coulomb'schen Gesetz durch $R = \mu N$ beschrieben werden. Der Gleitreibungskoeffizient hängt dabei nur von der Materialpaarung ab, bei gut geschmierten Gleitkontakten kann die Widerstandskraft auch vernachlässigt werden. Im Unterschied dazu ist beim Haftkontakt die Reibkraft eine unbekannte Reaktionskraft und muss aus den Gleichgewichtsbedingungen bzw. Bewegungsgesetzen ermittelt werden. Allerdings ist sie dann betragsmäßig durch die Normalkraft begrenzt, $|R| \leq \mu_0 N$, so dass bei Überschreiten der Grenze die Haftbindung aufbricht und Gleiten einsetzt.

Bei punkt- oder linienförmigem Kontakt greift die Normalkraft im Kontaktpunkt an, der Abrollfreiheitsgrad bleibt davon unberührt. Erfolgt der Kontakt jedoch flächig, wird auch das relative Abrollen behindert. Die Normalkraft ist dann eine verteilte Kraft, die zu einer Einzelkraft mit zunächst unbekanntem Angriffspunkt in der Kontaktfläche zusammengefasst werden kann. Wie die Haftreibungskraft muss auch der Kontaktpunkt aus den Gleichgewichtsbedingungen bzw. Bewegungsgesetzen berechnet werden. Liegt er innerhalb der Berührfläche, wird das Kippen unterbunden, ansonsten setzt ein Kippen über einen Punkt der Randkurve ein.

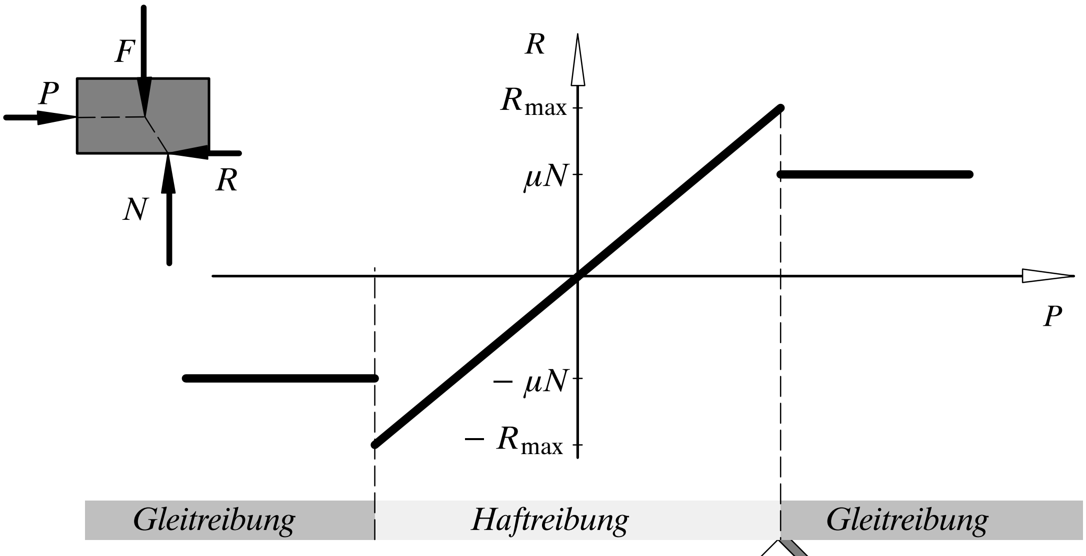
Umschlingt ein Seil einen Körper, treten ebenfalls Reibungsphänomene auf. Die Gesetze der Seilreibung ergeben sich analog aus einer infinitesimalen Anwendung der obigen Reibungsgesetze. Daher ist auch hier zwischen dem haftenden Seil, bei dem die Seilkräfte voneinander unabhängige Reaktionskräfte mit entsprechenden Grenzen sind, und dem gleitenden Seil mit einer Reibungsbeziehung zwischen den beiden Seilkräften zu unterscheiden. Einflussfaktoren sind dabei der jeweilige Gleitkoeffizient und der Umschlinkungswinkel.

7.1 Mechanik der trockenen Reibung

Widerstand aufgrund von Oberflächenrauigkeiten



Kennlinie der trockenen Reibung (Coulomb'sche Reibung)



Einsetzen der Bewegung
$R = R_{max}$

R ist eine begrenzte (unbekannte) ***Reaktionskraft****, die aus den Gleichgewichtsbedingungen folgt*

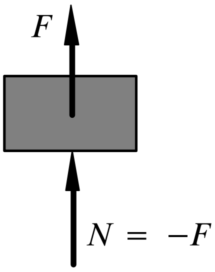
Grenzen: $|R| \leq R_{max} = \mu_0 N$

R ist eine ***eingeprägte Kraft*** *entgegen* $\vec{v}_{rel}$

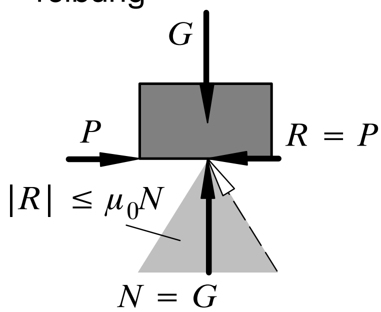
$R = \mu N$

Grenzsituationen

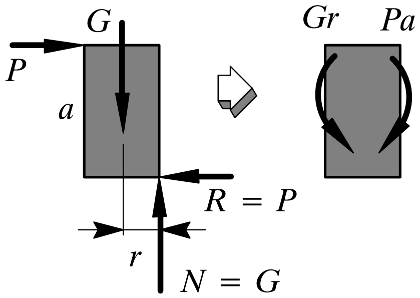
- Normalkraft wird negativ
- Kontaktkraft überschreitet Grenzwert der Haftreibung
- Normalkraft verlässt Kontaktfläche



einsetzendes Abheben



einsetzende Bewegung



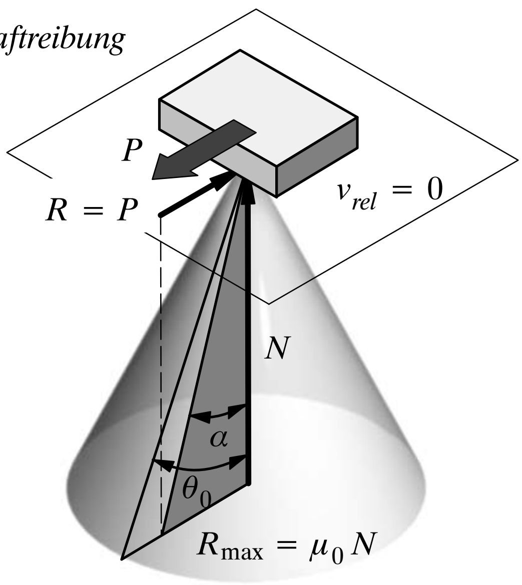
einsetzendes Kippen

Reibungskoeffizienten (Näherungswerte)

Material	*Haftreibungskoeffizient μ_o*		*Gleitreibungskoeffizient μ*	
	trocken	*geschmiert*	*trocken*	*geschmiert*
Stahl – Stahl	*0.2*	*0.1*	*0.1*	*0.01*
Stahl – Eis	–	*0.03*	–	*0.01*
Holz – Holz	*0.5*	*0.2*	*0.3*	*0.1*
Stahl – Leder	*0.6*	*0.2*	*0.2*	*0.1*
Gummi – Asphalt	*0.8*	*0.2*	*0.5*	*0.1*

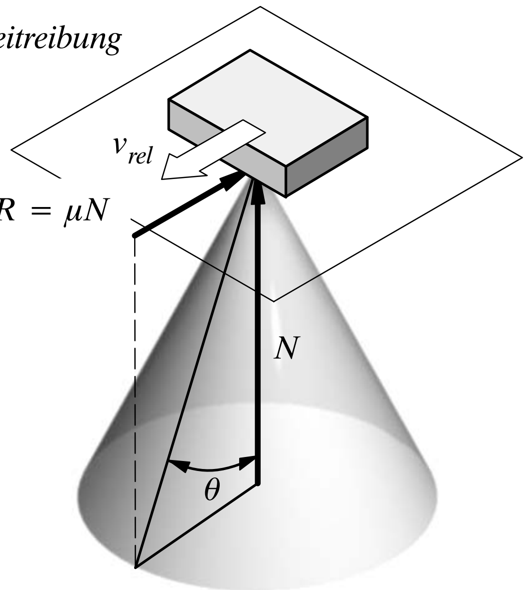
Reibungskegel

Haftreibung



$$\alpha \le \theta_0, \quad \tan\theta_0 = \frac{R_{\max}}{N} = \mu_0$$

Gleitreibung



$$\tan\theta = \frac{R}{N} = \mu$$

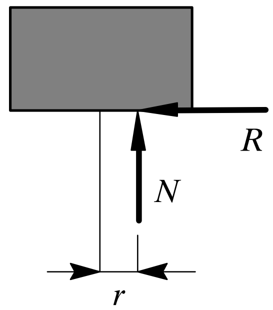
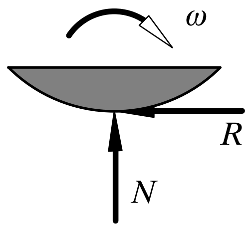
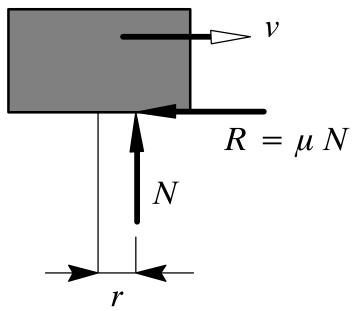
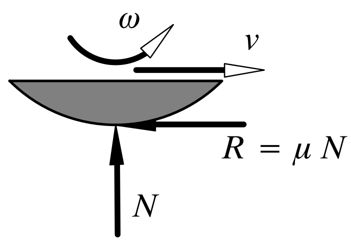
7.2 Analyse von Reibungsproblemen

<u>Vorgehen zur Lösung von Reibungsproblemen</u>

1) Freischneiden des Systems, Ersetzen der Körperkontakte durch Normalkraft N (Reaktionskraft) und Reibkraft R:

   a) $v_{rel} = 0$ (Haftreibung) → beliebige tangentiale Reaktionskraft R

   b) $v_{rel} \neq 0$ (Gleitreibung) → eingeprägte Reibkraft $R = \mu N$ entgegen $\vec{v}_{rel}$

	Flächenkontakt	*Punkt-/Linienkontakt*
Haftreibung $v_{rel} = 0$		
Gleitreibung $v_{rel} \neq 0$		

2) Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen (bzw. Bewegungsgesetze, s. Dynamik) für alle Körper (Teilsysteme)

3) <u>Statisch bestimmte Problemstellungen</u>:

   a) Lösen der Gleichgewichtsbedingungen für alle Unbekannten

   b) Prüfen gegen Abheben ($N \geq 0$), Bewegung ($|R| \leq \mu_0 N$) und Kippen

   <u>Statisch unbestimmte Probleme</u>:

   a) Annahmen über einsetzende Bewegung treffen, die mit den Bindungen verträglich sind; Wahl von $R = R_{\max} = \mu_0 N$ entgegen der angenommenen einsetzenden Bewegung in diesen Kontaktflächen

   b) Lösung der Gleichgewichtsbedingungen für die Unbekannten

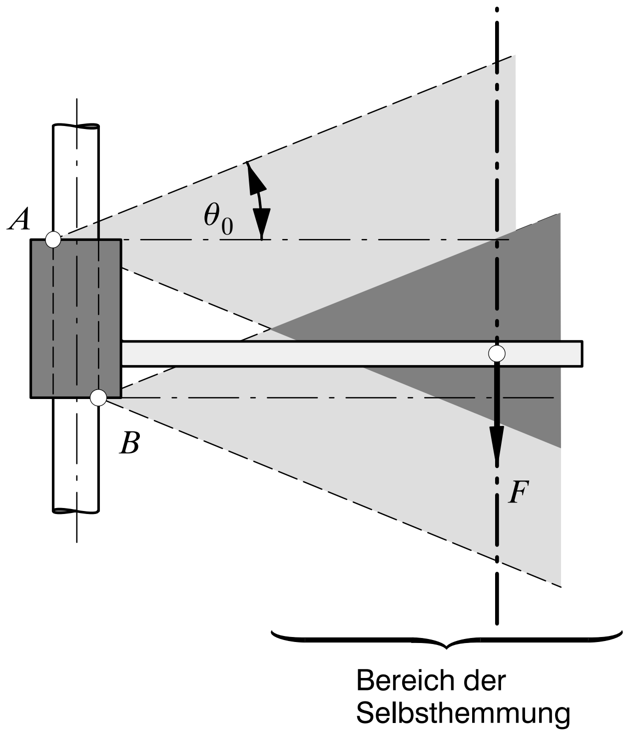
   c) Prüfen gegen Abheben ($N \geq 0$), Bewegung ($|R| \leq \mu_0 N$) und Kippen

Selbsthemmung

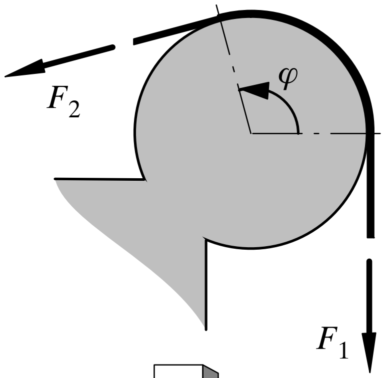
Kraftangriff verstärkt Normalkraft und damit maximale Haftreibungskraft so, dass Haftgrenze $|R| \leq \mu_0 N$ für beliebig große Kräfte F nicht erreicht wird.

Beispiel: Muffe

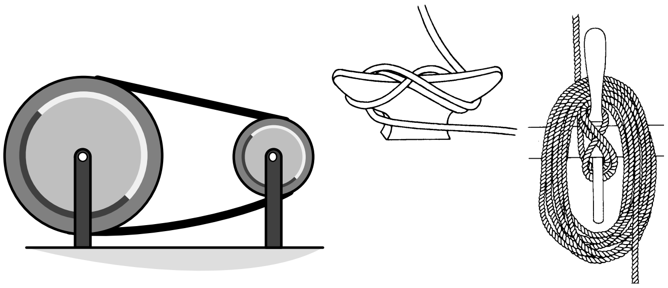
Schneidet die Wirkungslinie von $\vec{F}$ den dunklen Kegel, lässt sie sich immer so in Kontaktkräfte $\vec{F}_A$ und $\vec{F}_B$ zerlegen, dass diese das Gleichgewicht halten $(\vec{F} + \vec{F}_A + \vec{F}_B = \vec{0})$ und im jeweiligen Reibungskegel liegen.



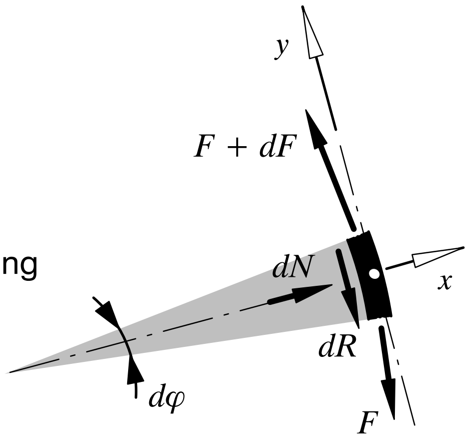
7.3 Seilreibung



Anwendung: Riemenantriebe, Seefahrt



Gleichgewichtsbedingungen für das infinitesimale Seilelement:



$$\sum F_x = dN - (F + dF)\,\frac{d\varphi}{2} - F\,\frac{d\varphi}{2} = 0$$

$$\sum F_y = F + dF - dR - F = 0$$

$$d\varphi \ll 1 \quad \Rightarrow \quad \sin\frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$$

$$\cos\frac{d\varphi}{2} \approx 1$$

- **Haftreibung:** Überprüfung gegen einsetzende Bewegung

$|dR| \leq \mu_0\, dN$ oder $|dF| \leq \mu_0\, F\, d\varphi$

$$\int_{F_1}^{F_2} \frac{dF}{F} \leq \mu_0 \int_0^{\varphi} d\varphi \qquad\qquad -\int_{F_1}^{F_2} \frac{dF}{F} \leq \mu_0 \int_0^{\varphi} d\varphi$$

$$\ln\frac{F_2}{F_1} \leq \mu_0\,\varphi \qquad\qquad \ln\frac{F_2}{F_1} \geq -\mu_0\,\varphi$$

$$\underbrace{\frac{F_2}{F_1} \leq e^{\mu_0\varphi} \qquad\qquad \frac{F_2}{F_1} \geq e^{-\mu_0\varphi}}$$

Haftgrenzen: $e^{-\mu_0\varphi} \leq \dfrac{F_2}{F_1} \leq e^{\mu_0\varphi}$

- **Gleitreibung:** Seil bewege sich in Richtung F_2

$dR = \mu\, dN$ oder $dF = \mu\, F\, d\varphi$

analog

Kraftgesetz: $\dfrac{F_2}{F_1} = e^{\mu\varphi}$