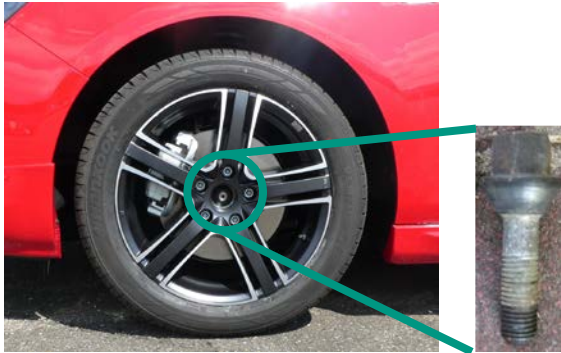


## Schraubenverbindungen 2 – Wirkprinzip

Vorlesung Maschinenkonstruktionslehre C – WS25/26

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

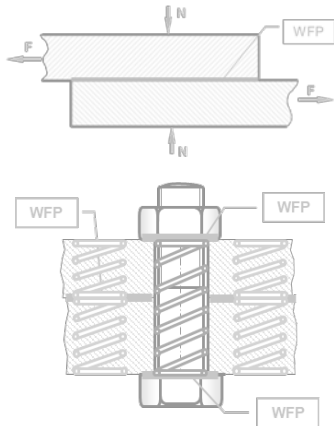
---



# Übersicht Vorlesungen Schraubenverbindungen

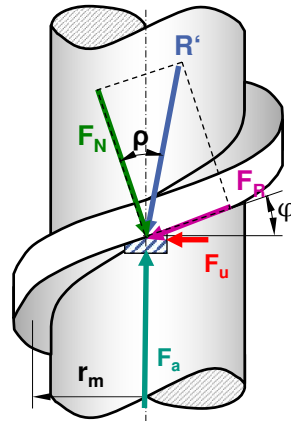
## Inhalte der vier Vorlesungen zu Schraubenverbindungen

### Vorlesung 1



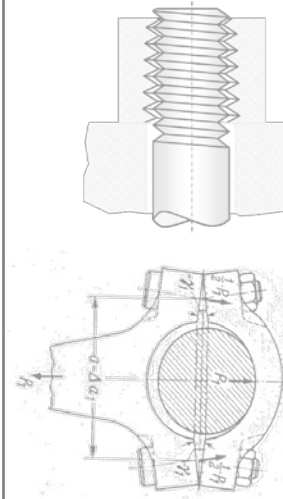
Grundfunktion und Wirkung im System

### Vorlesung 2



Wirkprinzip

### Vorlesung 3

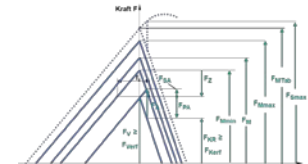


Gestaltung

### Übung



$$F_{Mzul} \geq F_{Mmax}$$



Dimensionierung

# Lernziele der Vorlesung

## Schraubenverbindungen 2 – Wirkprinzip

### Problem

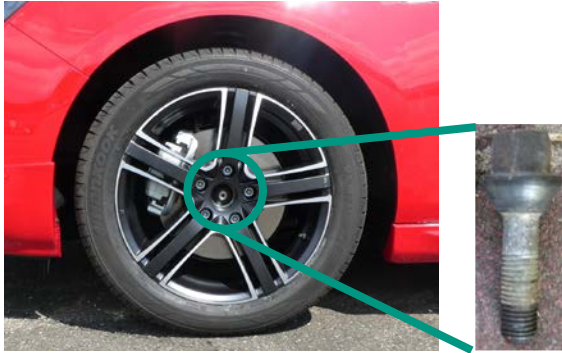
Konstruktionsingenieurinnen und Konstruktionsingenieure müssen die Zusammenhänge im **Wirkprinzip** der **Schraubenverbindung** verstehen, damit sie bei **Problemen** in der Praxis **geeignet reagieren** können.










### Ziele

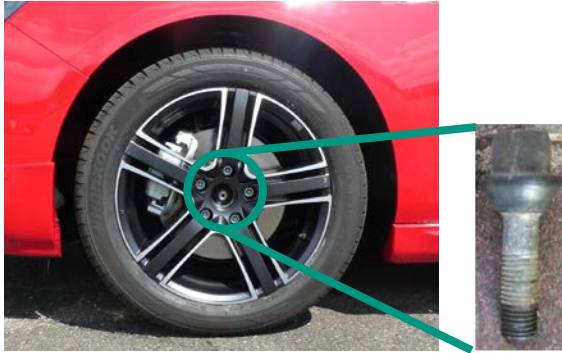
- **Wirkprinzip** einer **Schraubenverbindung** verstehen und wiedergeben können
- Herleitung der **Schraubenlinie** und ihrer geometrischen Zusammenhänge nachvollziehen
- **Kräfte** und **Mechanik** innerhalb einer Schraubenverbindung erkennen und im zugehörigen Verspannungsschaubild abbilden können
- **Vorgänge** beim **Anziehen** und **Lösen** einer Schraubenverbindung erklären können
- Einfluss von **Reibung** in der Schraubverbindung verstehen und einordnen können
- **Schraubgleichung** verstehen, anwenden und diskutieren können










### Fazit

Die Kenntnis über das **Wirkprinzip** einer Schraubenverbindung ist entscheidend, um diese in der **Praxis erfolgreich einsetzen** bzw. bei **Problemen geeignet reagieren** zu können  
Die theoretischen Zusammenhänge liefern dabei u.a. die Grundlage für die **Dimensionierung** der Schraubverbindung.



-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung



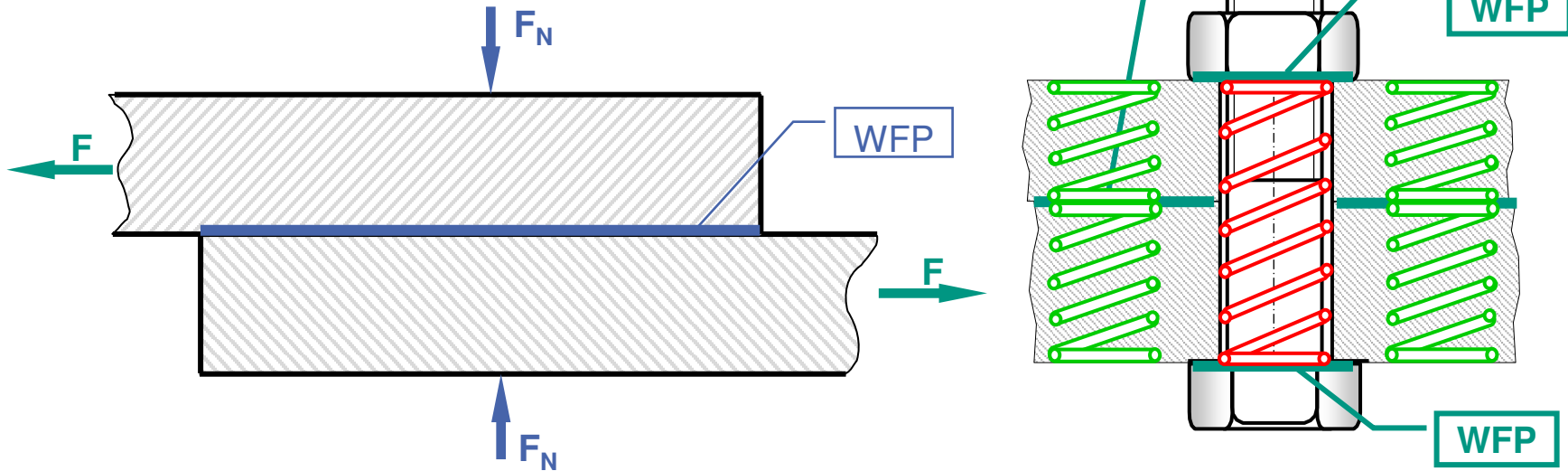
-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

# Schraubenverbindungen – Einführung Wirkprinzip

## Die Schraubverbindung basiert auf einer Normalkraft

### Frage

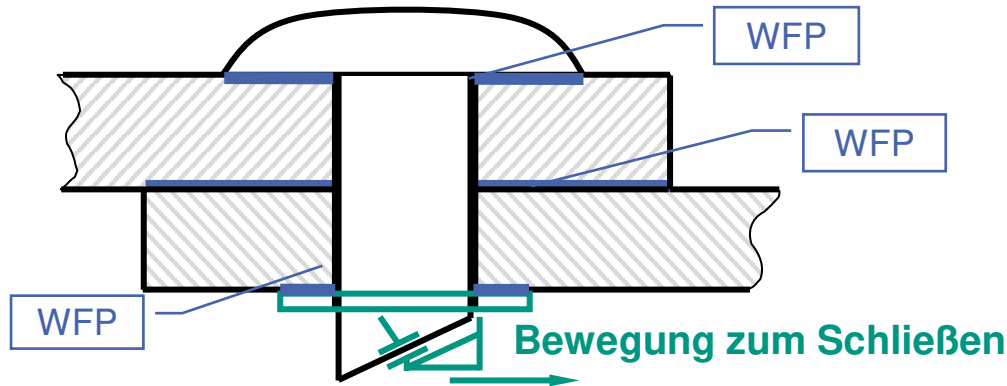
Wie schafft es die Schraube die Normalkraft  $F_N$  aufzubringen?



# Schraubenverbindungen – Einführung Wirkprinzip

## Der Keileffekt führt zur lösbaren Verbindung über Reibschluss

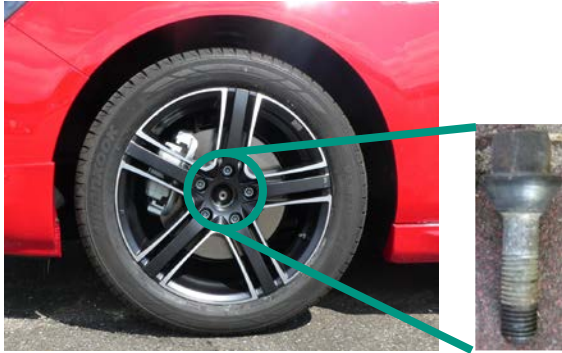
- Nachteil: Niet nicht lösbar
- Idee: Ein WFP verschiebbar machen












### Antwort

Durch einen flachen Keil erzeugt die Schraube im Gewindepaar eine Normalkraft.

- **Frage:** Welche Bedingung muss bei Befestigungsschrauben erfüllt sein?
- Damit das schließende WFP erhalten bleibt, muss auf dem „Keil“ Selbsthemmung herrschen.
- Nur dann löst sich das System nicht selbständig! → Reibschluss!



-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

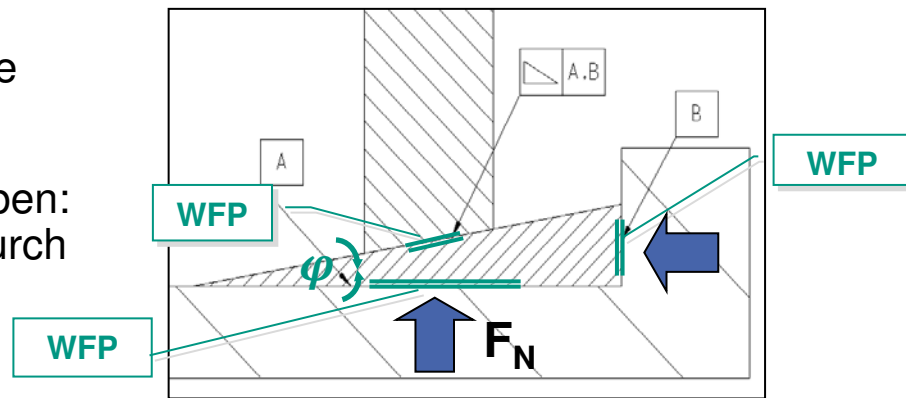
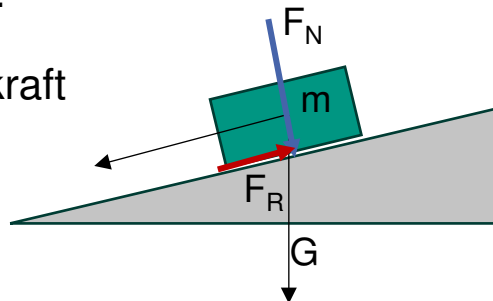
# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

## Keileffekt dient als Wirkprinzip für die Aufbringung von Kräften und deren Verstärkung

- Der **Keileffekt** entsteht durch die Anordnung von zwei WFP, die einen flachen Winkel  $\varphi$  zueinander bilden und **eventuell** einem **dritten WFP** zur Erzeugung einer zusätzlichen Kraft oder Bewegung.
- Durch diese **Anordnung der WFP** kann eine **Kraftverstärkung** erzielt werden.
- Kennzeichen der Gewinde bzw. der Schrauben: große Kraft bzw. Bewegungsübersetzung durch flachen Winkel  $\varphi$ .

Grundlage: Reibkraft

$$F_R = \mu F_N$$



Legende:

$\varphi$  [°] ... Keilwinkel

$F_N$  [N] ... Normalkraft

$F_R$  [N] ... Reibkraft

$\mu$  [ ] ... Reibungskoeffizient

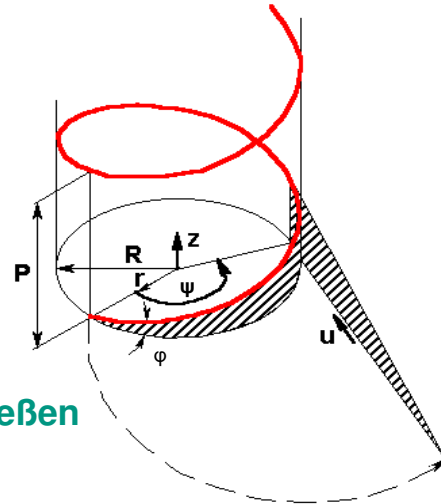
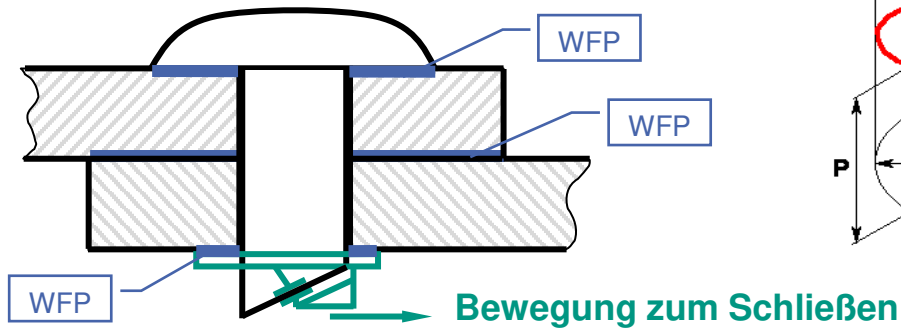
$G$  [N] ... Erdanziehungskraft

$m$  [kg] ... Masse

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

Durch „Aufwickeln“ des Keils kann das WFP vergrößert werden

- **Problem:** Keilwinkel muss flach sein für Selbsthemmung und gleichzeitig benötigt man ein großflächiges Wirkflächenpaar, um die hohen Kräfte zu übertragen
- **Idee:** Keilförmige WFP werden auf einen Zylinder aufgewickelt!
- **Modellvorstellung:** Aufwickeln einer windschiefen Geraden auf der Mantelfläche eines senkrechten Kreiszylinders

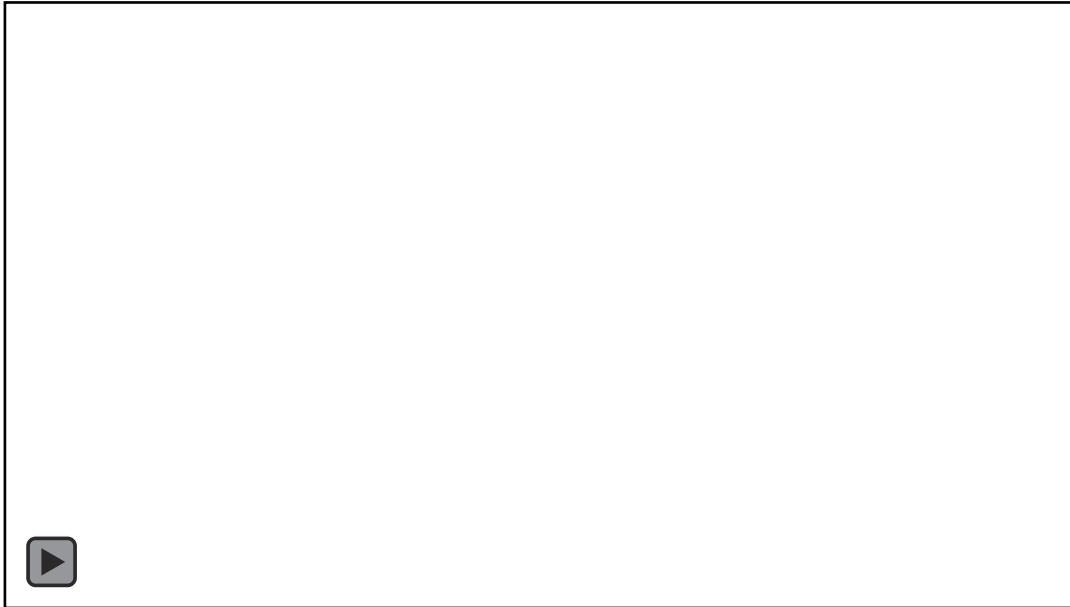


## Legende:

- $\phi$  [°] ...Steigungswinkel der Schraubenlinie
- $\psi$  [rad] ...Umfangswinkel in Bogenmaß
- $P$  [mm] ...Gewindesteigung
- $R$  [mm]...Radius
- $Z$  [mm] ...Höhe des Gewindes
- $u$  [ ]...Tangentiale an Schraubenlinie

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

## Eine Schraubenlinie verläuft auf der Mantelfläche eines Zylinders



### Kernaussage:

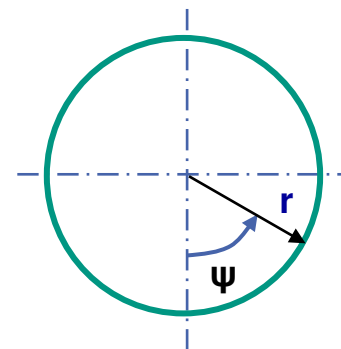
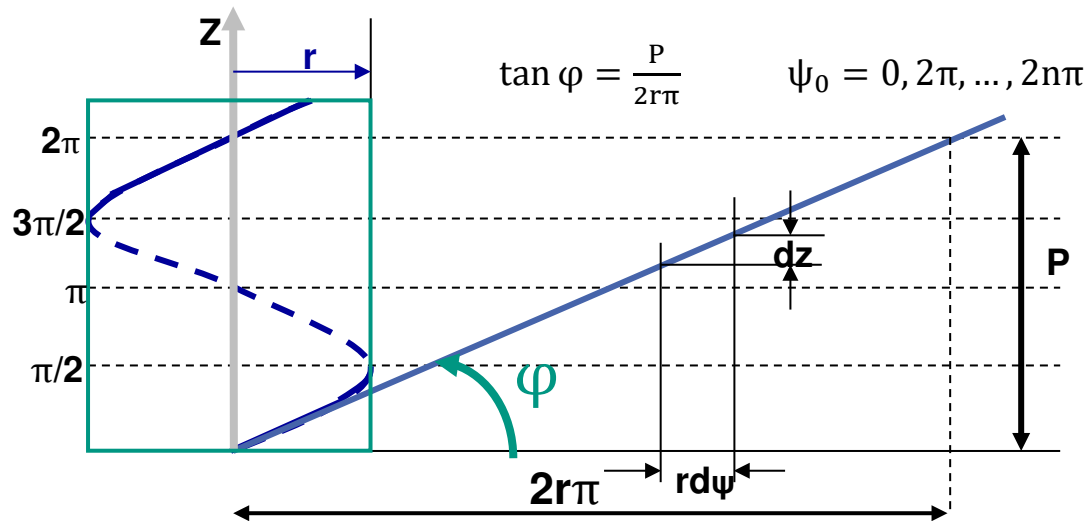
Eine Schraubenlinie entsteht, wenn ein Punkt auf der Mantellinie eines senkrechten Kreiszylinders mit dem Radius  $r$  um die Achse eine Drehbewegung und in Achsrichtung eine Verschiebung so erfährt, dass Drehwinkel und Verschiebung in einem festen, konstanten Verhältnis zueinander stehen.

YouTube:  
[https://www.youtube.com/watch?v=OBay9LV6vp0&list=PLj33AqgE64zaqEqVNoS4BX0Uda\\_6D2PPq&index=18](https://www.youtube.com/watch?v=OBay9LV6vp0&list=PLj33AqgE64zaqEqVNoS4BX0Uda_6D2PPq&index=18)



# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

Die Steigung der Schraubenlinie wird über den Umfang abgewickelt



Ausschnittbetrachtung der Abwicklung über

ähnliche Dreiecke:  $\frac{rd\psi}{dz} = \frac{2\pi r}{P}$

Integration liefert Schraubenlinie im Raum:  $\psi = \frac{2\pi}{P} \cdot z$

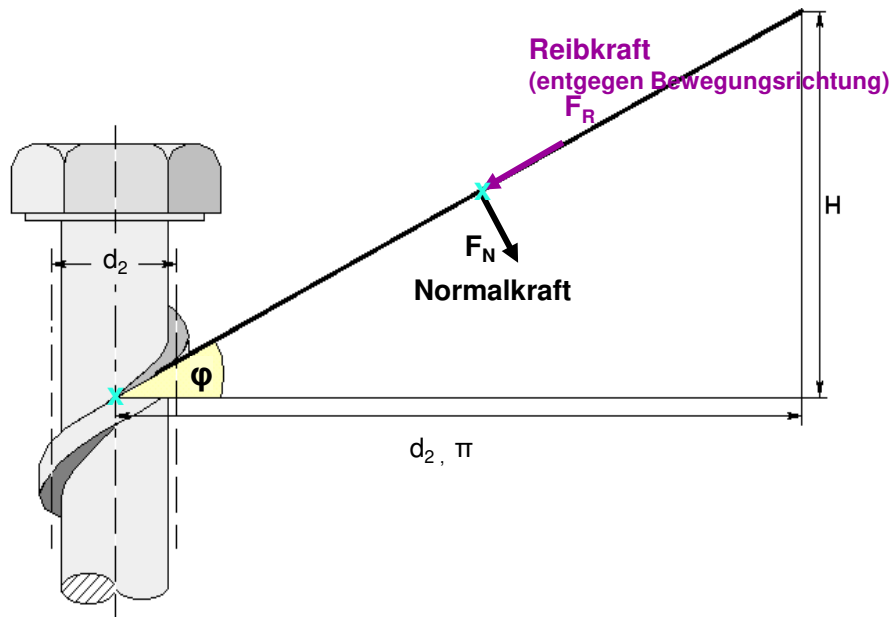
Legende:

- $\varphi$  [°] ...Steigungswinkel der Schraubenlinie
- $\psi$  [rad] ...Umfangswinkel in Bogenmaß
- $P$  [mm] ...Gewindesteigung
- $Z$  [mm] ...Höhe des Gewindes



# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

## Die Schraubenlinie stellt die Basis eines Gewindes dar



Wird der Keilmechanismus auf einen zylindrischen Grundkörper „aufgewickelt“, entsteht das **Gewinde**.

### Kernaussage

Man kann die Kräfte in der Schraubenverbindung über die schiefe Ebene beschreiben.

#### Legende:

$F_a$  [N] ... **Axialkraft** (gewünscht)

$F_u$  [N] ... **Umfangskraft** (Beim Festziehen oder Lösen aufgebrauchte Kraft)

$F_R$  [N] ... **Reibkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

$F_N$  [N] ... **Normalkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

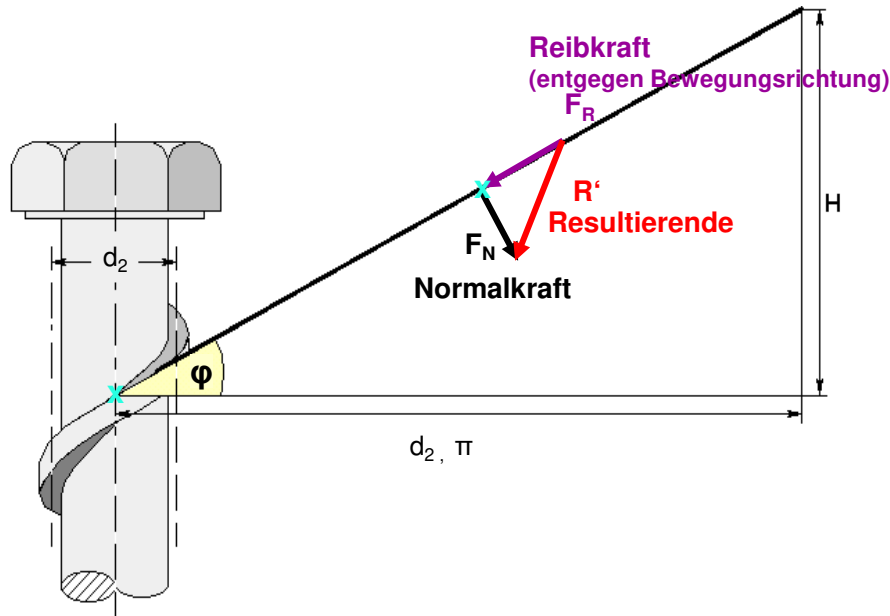
$\varphi$  [°] ... **Steigungswinkel** der Schraubenlinie

$R$  [N] ... **Resultierende**

$d_2$  [mm] ... **Flankendurchmesser** des Schraubengewindes

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

Die Schraubenlinie stellt die Basis eines Gewindes dar



Wird der Keilmechanismus auf einen zylindrischen Grundkörper „aufgewickelt“, entsteht das **Gewinde**.

## Kernaussage

Man kann die Kräfte in der Schraubenverbindung über die schiefe Ebene beschreiben.

### Legende:

$F_a$  [N] ... **Axialkraft** (gewünscht)

$F_u$  [N] ... **Umfangskraft** (Beim Festziehen oder Lösen aufgebrauchte Kraft)

$F_R$  [N] ... **Reibkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

$F_N$  [N] ... **Normalkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

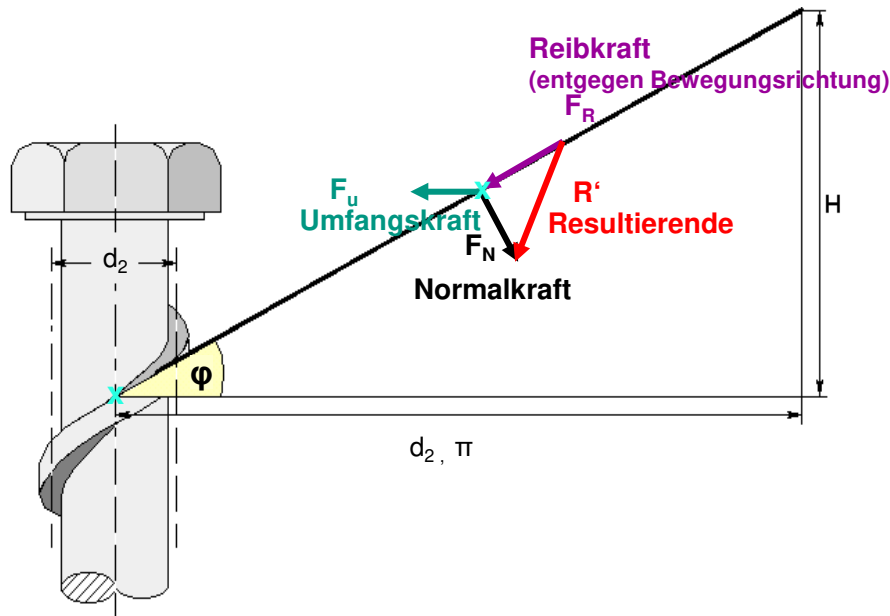
$\varphi$  [°] ... **Steigungswinkel** der Schraubenlinie

$R$  [N] ... **Resultierende**

$d_2$  [mm] ... **Flankendurchmesser** des Schraubengewindes

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

Die Schraubenlinie stellt die Basis eines Gewindes dar



Wird der Keilmechanismus auf einen zylindrischen Grundkörper „aufgewickelt“, entsteht das **Gewinde**.

## Kernaussage

Man kann die Kräfte in der Schraubenverbindung über die schiefe Ebene beschreiben.

### Legende:

$F_a$  [N] ... **Axialkraft** (gewünscht)

$F_u$  [N] ... **Umfangskraft** (Beim Festziehen oder Lösen aufgebrauchte Kraft)

$F_R$  [N] ... **Reibkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

$F_N$  [N] ... **Normalkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

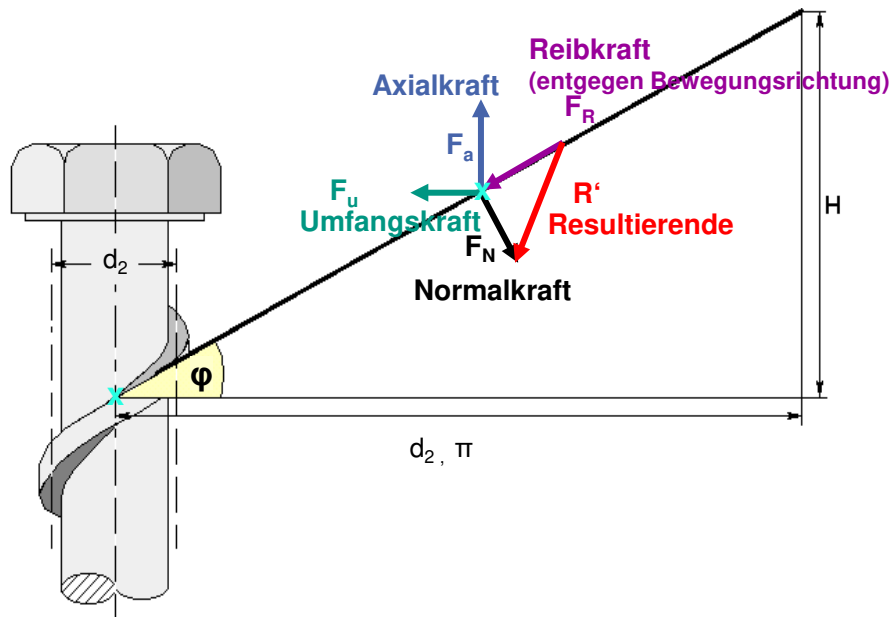
$\varphi$  [°] ... **Steigungswinkel** der Schraubenlinie

$R$  [N] ... **Resultierende**

$d_2$  [mm] ... **Flankendurchmesser** des Schraubengewindes

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

Die Schraubenlinie stellt die Basis eines Gewindes dar



Wird der Keilmechanismus auf einen zylindrischen Grundkörper „aufgewickelt“, entsteht das **Gewinde**.

## Kernaussage

Man kann die Kräfte in der Schraubenverbindung über die schiefe Ebene beschreiben.

### Legende:

$F_a$  [N] ... **Axialkraft** (gewünscht)

$F_u$  [N] ... **Umfangskraft** (Beim Festziehen oder Lösen aufgebrauchte Kraft)

$F_R$  [N] ... **Reibkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

$F_N$  [N] ... **Normalkraft** (Kraft auf der Gewindeflanke)

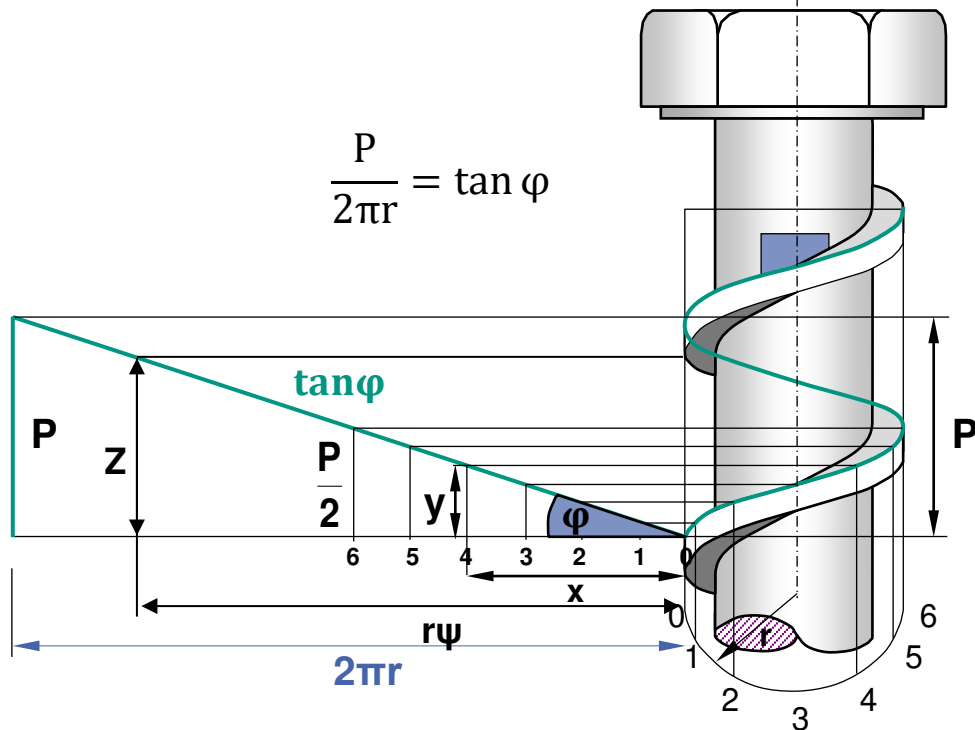
$\varphi$  [°] ... **Steigungswinkel** der Schraubenlinie

$R$  [N] ... **Resultierende**

$d_2$  [mm] ... **Flankendurchmesser** des Schraubengewindes

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

In der dreidimensionalen Betrachtung ist der Steigungswinkel abhängig vom Abstand zum Kern



$$\frac{P}{2\pi r} = \tan \varphi$$

Annahme: mittlerer Radius

$P = \text{const.}$ , unabhängig von  $r$

$$\frac{z}{P} = \frac{r\psi}{2\pi r} \quad z = \frac{P}{2\pi r} \cdot \psi r \quad z = \frac{P}{2\pi} \cdot \psi$$

Legende:

$\varphi$  [°] ...Steigungswinkel der Schraubenlinie

$\psi$  [rad]...Umfangswinkel in Bogenmaß

$P$  [mm]...Gewindesteigung

$Z$  [mm] ...Höhe des Gewindes

$r$  [mm] ...Radius

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

## Gewindeflächen sind technisch genutzte Schraubenflächen

- Durch die Abhängigkeit der Steigung vom Radius gibt es mehrere **Schraubenlinien**. Die Menge aller Schraubenlinien wird als **Schraubenfläche** bezeichnet.
- Technisch genutzte Schraubenflächen werden als **Gewinde** bezeichnet!
- Technisch genutzte Schraubenflächen entstehen durch die Verwendung **definierter Profile als Gewindegrundform** (AB) z.B. Dreieck, Trapez, Rechteck
  - Bsp.: Trapezgewinde (Siehe Steinhilper, Sauer)
- Ein Gewinde ist ein Lösungselement für die Funktion: **Lösbarkeit der Bauteilverbindung** ermöglichen



siehe **VL 3**  
Gestaltung:  
Gewindearten

# Schraubenverbindungen – Keileffekt/ Schraubenlinie

Selbsthemmung ist bei Befestigungsschrauben zwingend, bei Bewegungsschrauben je nach Funktion optional

## Bewegungsschraube selbsthemmend



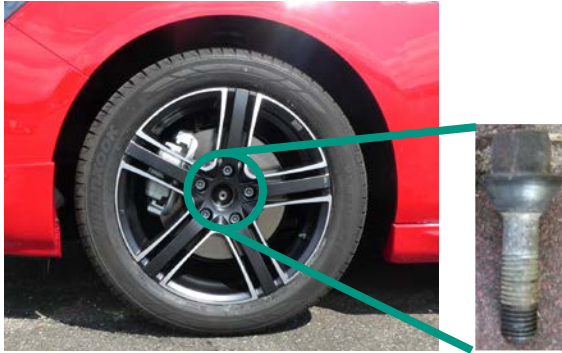
Vermutlich alte Weinpresse aus Holz










## Kernaussage

Befestigungsschrauben und Bewegungsschrauben nutzen den **Keileffekt**, um **Kraftverstärkungen** zu erzielen.

**Befestigungsschrauben** sind **immer selbsthemmend** (um unbeabsichtigtes Lösen zu verhindern).

**Bewegungsschrauben** sind je nach Auslegung der Gewindesteigung **selbsthemmend möglich**.



-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  **Mechanik der Schraube**
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

## Anziehen und Lösen unterscheiden sich durch die zu überwindenden Kräfte

### Fragestellung:

Was genau passiert beim Anziehen  
bzw. Lösen der Last?

- Es werden Anteile des Gesamtanziehmomentes  $M_M$  in axiale Kraft  $F_A$  umgesetzt.

### Wir unterscheiden zwei Fälle:

- Anziehen; Heben einer Last
- Lösen; Senken einer Last



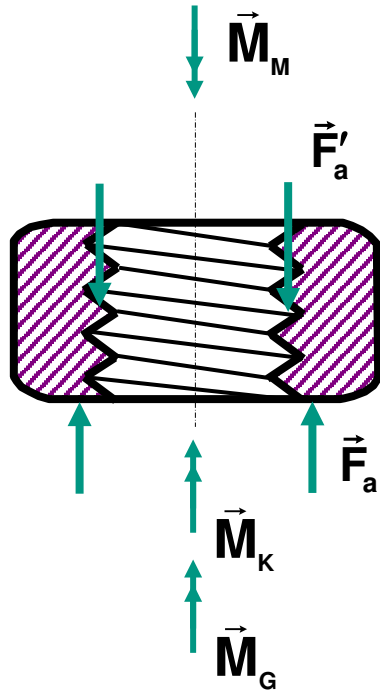
### Legende:

$F_A$  [N] ... Axialkraft

$M_M$  [Nm] ... Gesamtanziehmoment

# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

Das Anziehmoment wird nur zu einem Teil in Axialkraft umgesetzt



$\vec{F}_a$  – äußere Kraft an der Mutterauflage

$\vec{F}'_a$  – entsprechende Gegenkraft; von Schraube auf die Mutter übertragen

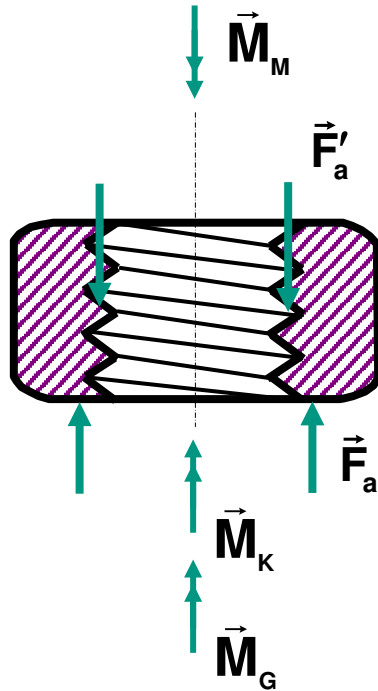
$\vec{M}_M$  – Gesamtanziehmoment

$\vec{M}_K$  – Reibmoment in der Kopfauflage

$\vec{M}_G$  – Gewindemoment (von Schraube) auf Mutter im Gewinde übertragen

# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

Das Anziehmoment wird nur zu einem Teil in Axialkraft umgesetzt



- Momentengleichgewicht:

$$\vec{M}_M - \vec{M}_K - \vec{M}_G = 0$$

$$\vec{M}_M = \vec{M}_K + \vec{M}_G$$

- Kräftegleichgewicht:

$$F_a = F'_a$$

- Gesucht:  $M_M = f(F_a)$

- Zunächst:  $M_G = f(F_a)$

Legende:

$\vec{F}_a$  [N] ...äußere Kraft an der Mutterauflage

$\vec{F}'_a$  [N] ...entsprechende Gegenkraft; von Schraube auf die Mutter übertragen

$\vec{M}_M$  [Nm] ...Gesamtanziehmoment

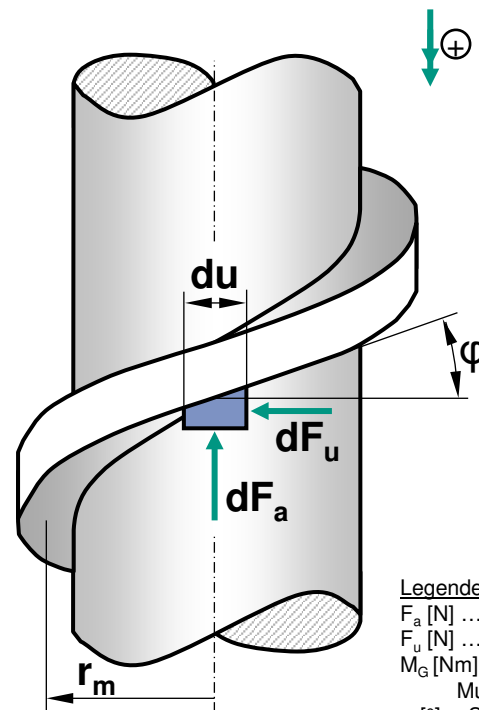
$\vec{M}_K$  [Nm] ...Reibmoment in der Kopfauflage

$\vec{M}_G$  [Nm] ...Gewindemoment (von Schraube) auf Mutter im Gewinde übertragen

# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

Das Gewindemoment wird an einem Element der Mutter betrachtet

- $dM_G = dF_u \cdot r_m$
- Gesamtes Moment aus der Integration über den Umfang!
- Annahme: Für alle folgenden Darstellungen wirkt  $F_u$  nach links (Montagedrehrichtung)



Legende:

$F_a$  [N] ...äußere Kraft an der Mutterauflage

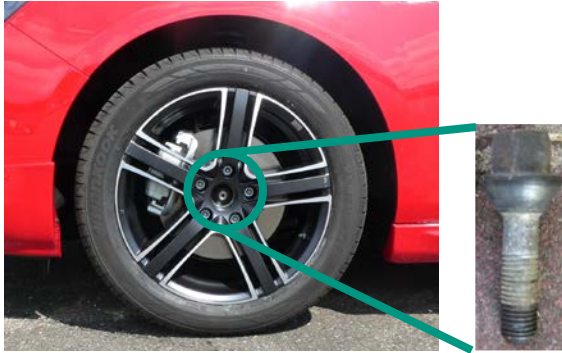
$F_u$  [N] ...Umfangskraft



$M_G$  [Nm] ...Gewindemoment (von Schraube) auf Mutter im Gewinde übertragen

$\varphi$  [°] ...Steigungswinkel

$r_m$  [mm] ...mittlerer Radius

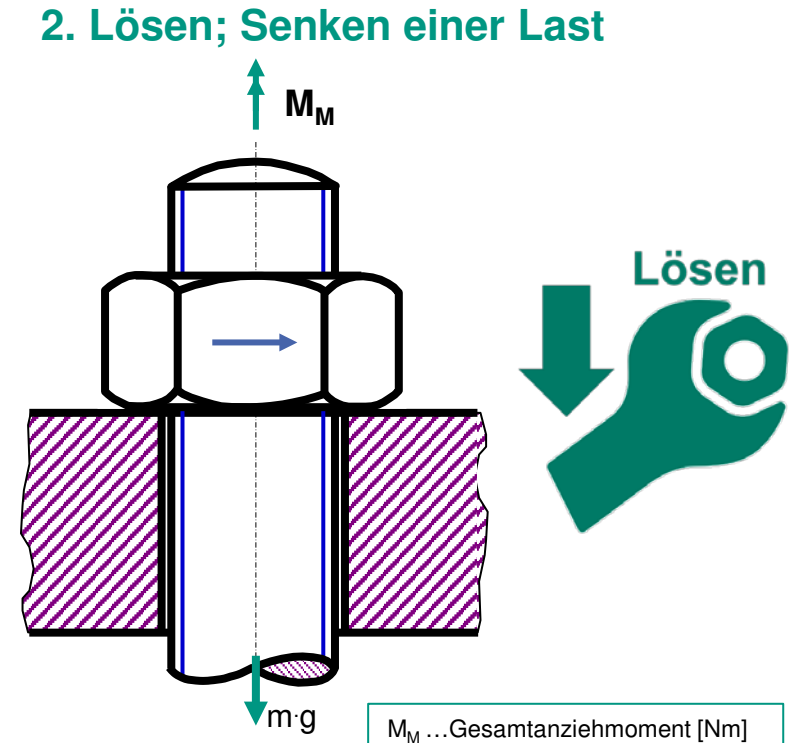
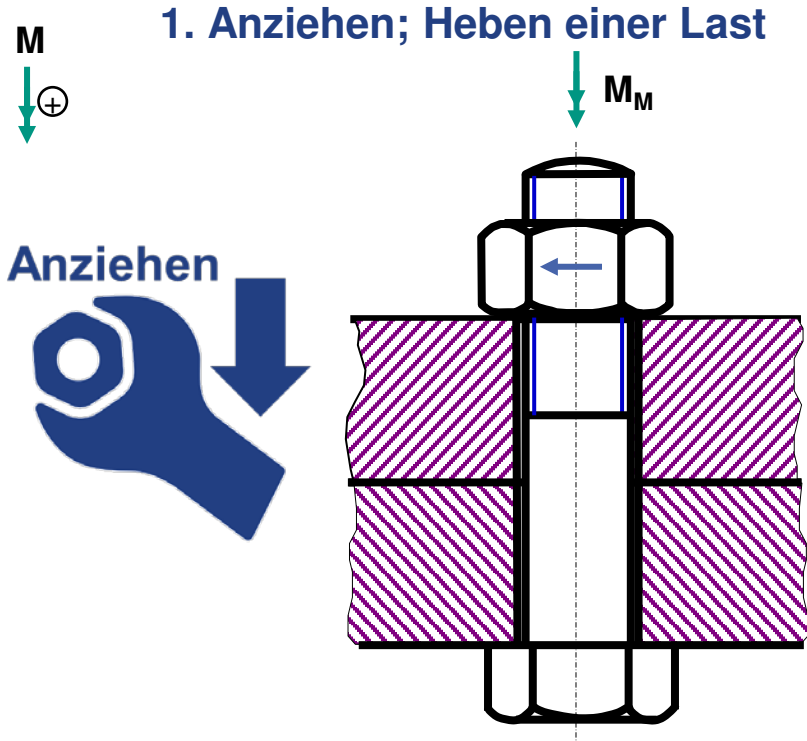
$u$  [mm] ...Länge Element

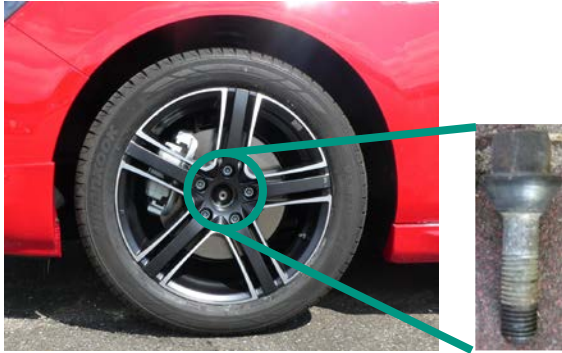







-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

## Anziehen und Lösen unterscheiden sich durch die Lastfälle





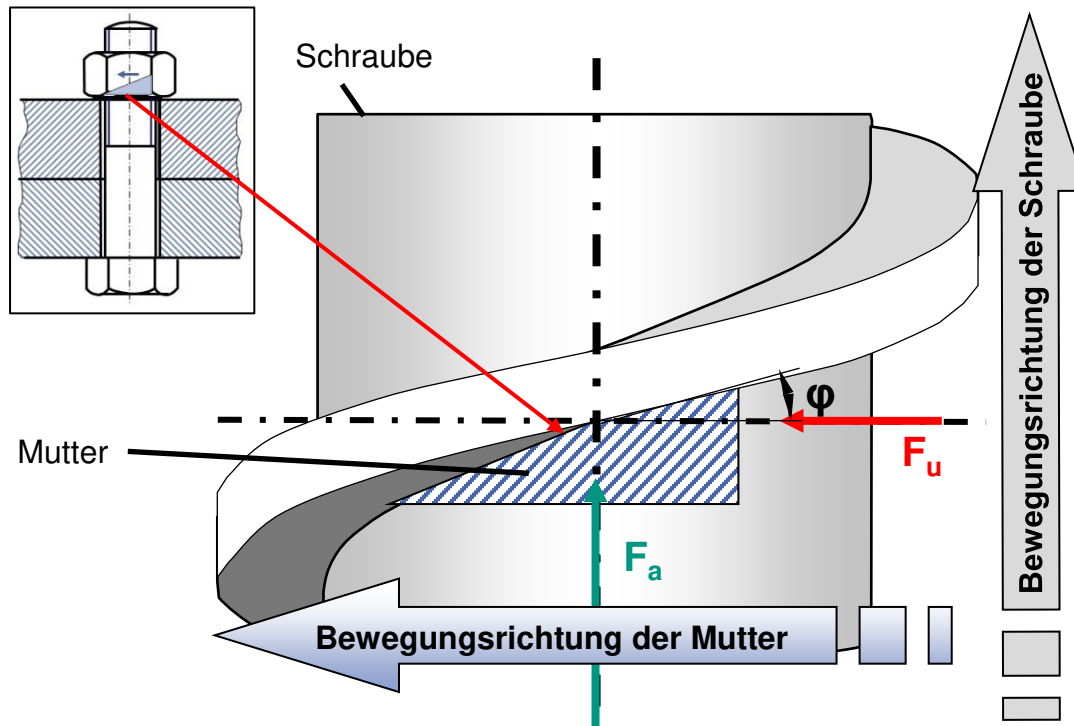
-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

# Schraubenverbindungen – Betrachtung von 2 Fällen

## Fall 1: Anziehen einer Schraubenverbindung oder Heben einer Last



Heben einer Last → Drehen der Mutter bewegt die Schraube nach oben



**Freischneiden der Mutter** →  
Anbringen von  $F_u$  und  $F_a$  auf ein  
kleines Mutterelement

### Kernaussage

Wird ein Anziehmoment auf  
die Schraube aufgewendet so  
wird dieses in eine axiale Kraft  
gewandelt.

Legende:

$F_a$  [N] ... Axialkraft

$F_u$  [N] ... Umfangskraft

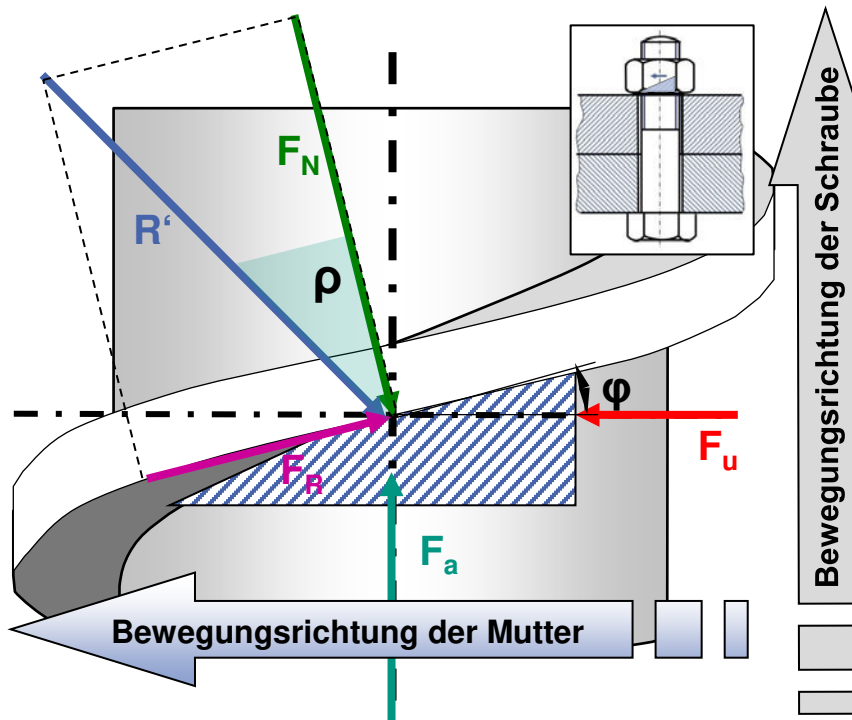
$\varphi$  [°] ... Steigungswinkel



# Schraubenverbindungen – Betrachtung von 2 Fällen

## Fall 1: Anziehen einer Schraubenverbindung oder Heben einer Last

Heben einer Last → Drehen der Mutter bewegt die Schraube nach oben



**Freischneiden der Mutter** →  
Anbringen von  $F_u$  und  $F_a$  auf ein  
kleines Mutterelement

Aufstellen des Reibkegels mit  
Winkel  $\rho$

### Legende

$F_a$  [N] ... Axialkraft

$F_u$  [N] ... Umfangskraft

$\varphi$  [°] ... Steigungswinkel

$R'$  [N] ... Resultierende

$F_R$  [N] ... Reibkraft

$F_N$  [N] ... Normalkraft

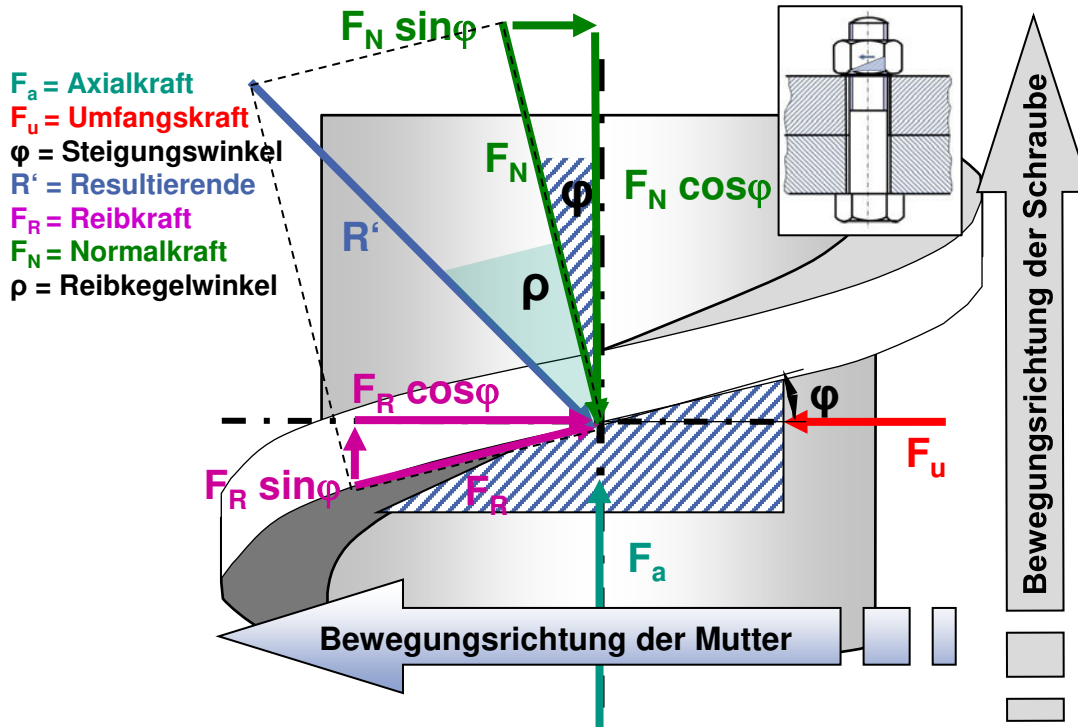
$\rho$  [°] ... Reibkegelwinkel



# Schraubenverbindungen – Betrachtung von 2 Fällen

## Fall 1: Anziehen einer Schraubenverbindung oder Heben einer Last

Heben einer Last → Drehen der Mutter bewegt die Schraube nach oben



- $F_a$  = Axialkraft
- $F_u$  = Umfangskraft
- $\varphi$  = Steigungswinkel
- $R'$  = Resultierende
- $F_R$  = Reibkraft
- $F_N$  = Normalkraft
- $\rho$  = Reibkegelwinkel

$$F_a = F_N \cos \varphi - F_R \sin \varphi$$

$$F_u = F_R \cos \varphi + F_N \sin \varphi$$

$$F_R = \mu_G F_N$$

$$\frac{F_u}{F_a} = \frac{\mu_G \cos \varphi + \sin \varphi}{\cos \varphi - \mu_G \sin \varphi}$$

$$= \frac{\mu_G + \tan \varphi}{1 - \mu_G \tan \varphi}$$

$$F_a = F_N \cos \varphi - \mu_G F_N \sin \varphi$$

$$F_u = \mu_G F_N \cos \varphi + F_N \sin \varphi$$

Mit  $\mu_G = \tan \rho$

$$\frac{F_u}{F_a} = \tan(\varphi + \rho)$$

### Legende

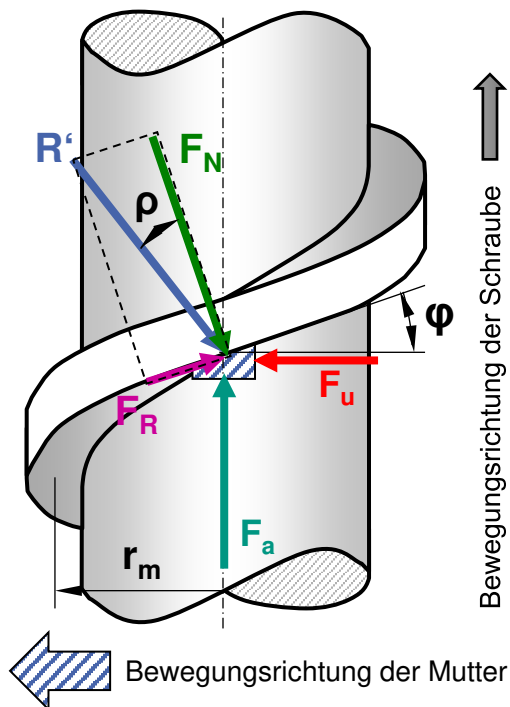
- $F_a$  [N] ... Axialkraft
- $F_u$  [N] ... Umfangskraft
- $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel
- $R'$  [N] ... Resultierende
- $F_R$  [N] ... Reibkraft
- $F_N$  [N] ... Normalkraft
- $\rho$  [°] ... Reibkegelwinkel
- $\psi$  [rad] ... Umfangswinkel in Bogenmaß
- $\mu_G$  [ ] ... Gewindereibwert



# Schraubenverbindungen – Betrachtung von 2 Fällen

## Fall 1: Anziehen einer Schraubenverbindung oder Heben einer Last

Heben einer Last → Drehen der Mutter bewegt die Schraube nach oben



Anbringen von  $F_u$  und  $F_a$  auf ein kleines Mutterelement

Zusammenhang zwischen  $F_u$  und  $F_a$ :

$$\frac{F_u}{F_a} = \tan(\varphi + \rho)$$

Gewindemoment Mutter:

$$M_G = F_u \cdot r_m = F_a \cdot r_m \tan(\varphi + \rho)$$

### Legende







- $F_a$  [N] ... Axialkraft
- $F_u$  [N] ... Umfangskraft
- $R'$  [N] ... Resultierende
- $F_R$  [N] ... Reibkraft
- $F_N$  [N] ... Normalkraft
- $\rho$  [°] ... Reibkegelwinkel
- $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel
- $\psi$  [rad] ... Umfangswinkel in Bogenmaß
- $r_m$  [mm] ... mittlerer Radius

### Achtung

Durch den flachen Winkel  $\varphi$  im Keil wird das eingeleitete Moment in große Axialkräfte übersetzt. Vorsicht: Durch starkes Anziehen wird die Schraube übermäßig gelängt und kann abreißen.





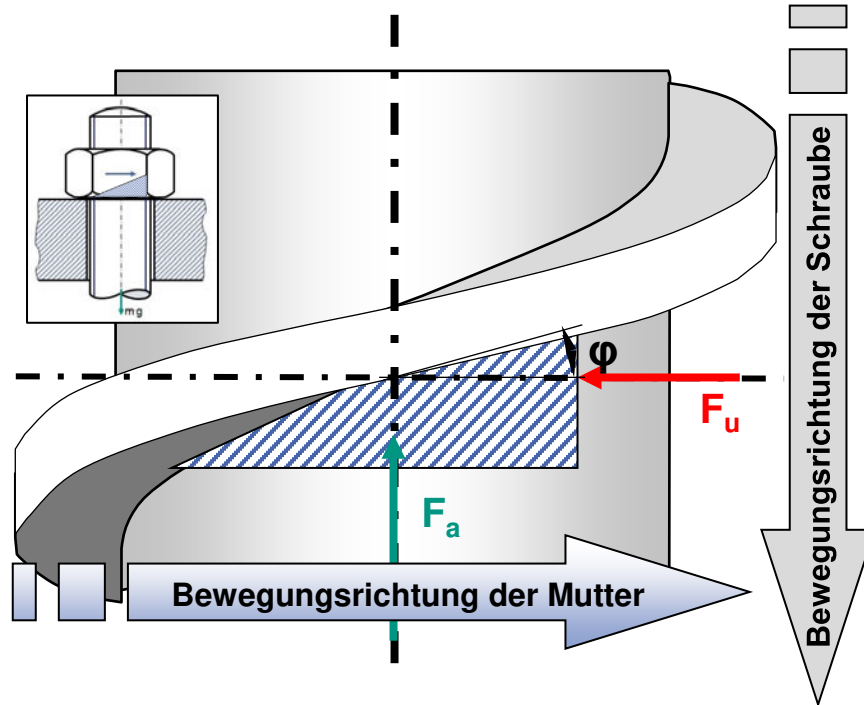
-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

## Fall 2: Lösen einer Schraubenverbindung oder Senken einer Last



Senken einer Last → Drehen der Mutter bewegt Schraube nach unten



Analog zu Fall 1 außer  $F_R$  in andere Richtung

**Freischneiden der Mutter** →  
Anbringen von  $F_u$  und  $F_a$  auf ein  
kleines Mutterelement

Legende:

$F_a$  [N] ... Axialkraft

$F_u$  [N] ... Umfangskraft

$F_R$  [N] ... Reibkraft

$\varphi$  [°] ... Steigungswinkel der Schraubenlinie

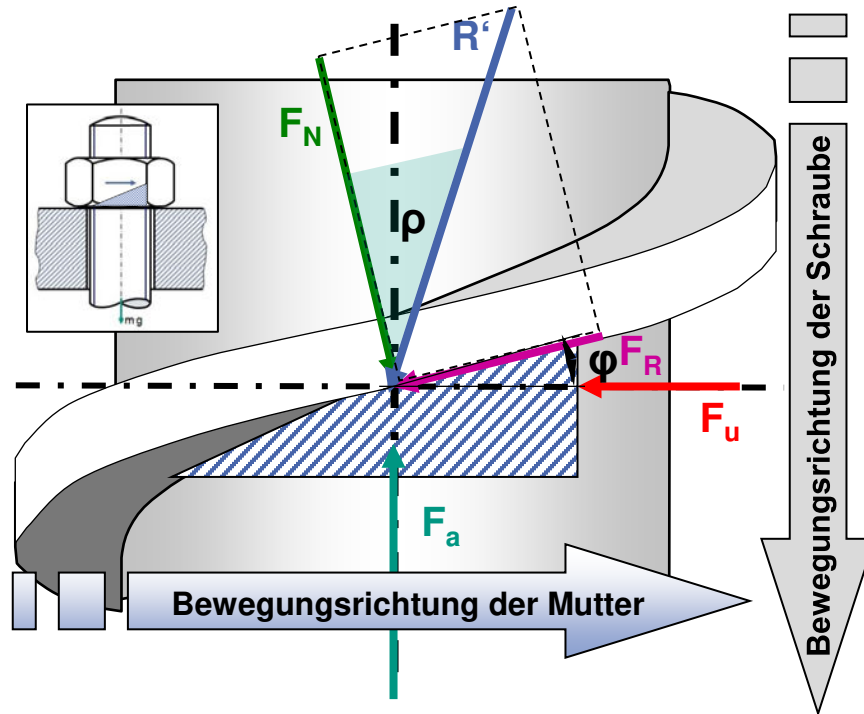


# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

## Fall 2: Lösen einer Schraubenverbindung oder Senken einer Last



Senken einer Last → Drehen der Mutter bewegt Schraube nach unten



Analog zu Fall 1 außer  $F_R$  in andere Richtung

**Freischneiden der Mutter** →  
Anbringen von  $F_u$  und  $F_a$  auf ein  
kleines Mutterelement

Legende:

- $F_a$  [N] ... Axialkraft
- $F_u$  [N] ... Umfangskraft
- $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel
- $R'$  [N] ... Resultierende
- $F_R$  [N] ... Reibkraft
- $F_N$  [N] ... Normalkraft
- $\rho$  [°] ... Reibkegelwinkel

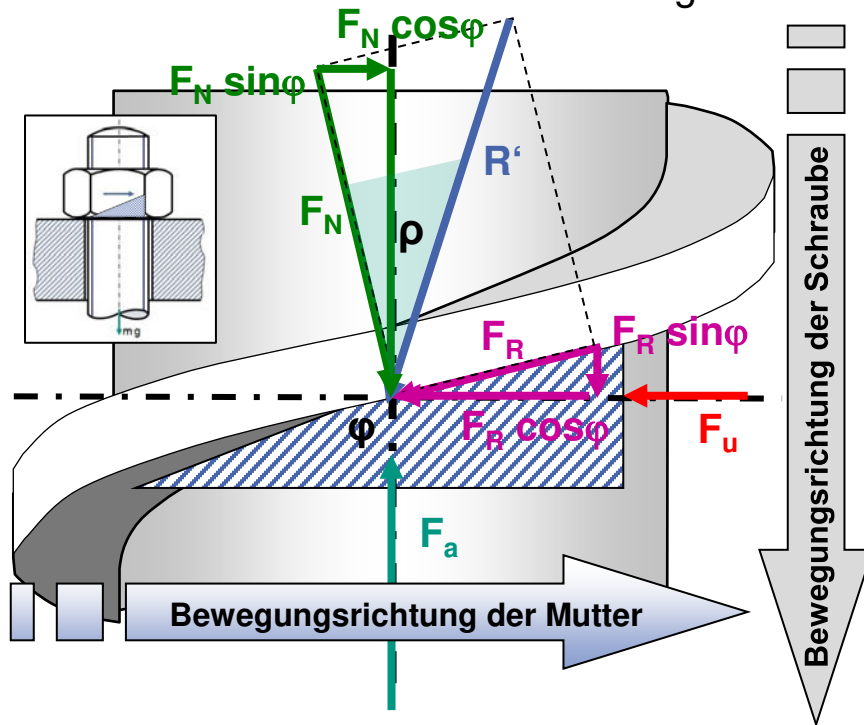


# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

## Fall 2: Lösen einer Schraubenverbindung oder Senken einer Last



Senken einer Last → Drehen der Mutter bewegt Schraube nach unten



$$F_a = F_N \cos \varphi + F_R \sin \varphi$$

$$F_u = -F_R \cos \varphi + F_N \sin \varphi$$

$$F_R = \mu_G F_N$$

$$F_a = F_N \cos \varphi + \mu_G F_N \sin \varphi$$

$$F_u = -\mu_G F_N \cos \varphi + F_N \sin \varphi$$

$$\frac{F_u}{F_a} = \frac{-\mu_G \cos \varphi + \sin \varphi}{\cos \varphi + \mu_G \sin \varphi} = \frac{-\mu_G + \tan \varphi}{1 + \mu_G \tan \varphi}$$

Mit  $\mu_G = \tan \rho$

$$\frac{F_u}{F_a} = \tan(\varphi - \rho)$$

Legende:

- $F_a$  [N] ... Axialkraft
- $F_u$  [N] ... Umfangskraft
- $F_u$  [N] ... Resultierende
- $F_R$  [N] ... Reibkraft
- $F_N$  [N] ... Normalkraft
- $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel
- $\rho$  [°] ... Reibkegelwinkel
- $\Psi$  [rad] ... Umfangswinkel in Bogenmaß
- $\mu_G$  [...] ... Gewindereibwert

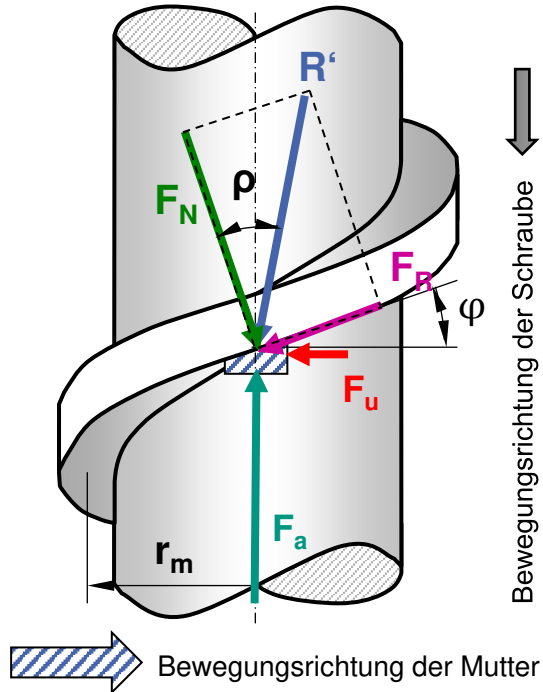


# Schraubenverbindungen – Mechanik der Schraube

## Fall 2: Lösen einer Schraubenverbindung oder Senken einer Last



Senken einer Last → Drehen der Mutter bewegt Schraube nach unten



- Aufbringen von  $F_u$  und  $F_a$  auf ein kleines Mutterelement
- Zusammenhang zwischen  $F_u$  und  $F_a$ :

$$\frac{F_u}{F_a} = \tan(\varphi - \rho)$$

- Gewindemoment Mutter:

$$M_G = F_u \cdot r_m = F_a \cdot r_m \tan(\varphi - \rho)$$

- Anm.: Je nach den Verhältnissen von  $\rho$  und  $\varphi$  zueinander ist  $F_u$  qualitativ negativ, positiv oder =0 (Selbsthemmung, siehe spätere Folien)

### Kernaussage

*Achtung:* Es ist ein Unterschied, ob man die Schraube anzieht oder löst. Lastrichtung beeinflusst über Reibungskräfte die Orientierung der Kraftvektoren.

#### Legende:

- $F_a$  [N] ... Axialkraft
- $F_u$  [N] ... Umfangskraft
- $R'$  [N] ... Resultierende
- $F_R$  [N] ... Reibkraft
- $F_N$  [N] ... Normalkraft
- $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel
- $\rho$  [°] ... Reibkegelwinkel
- $\psi$  [rad] ... Umfangswinkel in Bogenmaß
- $\mu_G$  [ ] ... Gewindereibwert
- $r_m$  [mm] ... mittlerer Radius





-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

Die Schraubengleichung dient zur Berechnung Kräfte in der Schraubverbindung

- **Abbildung** der **Schraubenlinie** in die Ebene führt im folgenden auf die **schiefe Ebene**.
- Die **Betrachtung** der **schiefen Ebene** ist **Basis** für die Herleitung der **Schraubengleichung**.
- Mit der **Schraubengleichung** können wir die **Aufteilung** in **Axialkraft** und **Umfangskraft** in der **Schraubenverbindung** bestimmen.
- Diskussion der **Schraubengleichung** anhand **Zwei Fallbeispielen**

Fallbeispiele im folgenden:

**Fall1: Anziehen; Heben einer Last**

**Fall2: Lösen; Senken einer Last**

**Fall2.1: Keine Selbsthemmung**

**Fall2.2: Übergangsbereich**

**Fall2.3: Selbsthemmung**

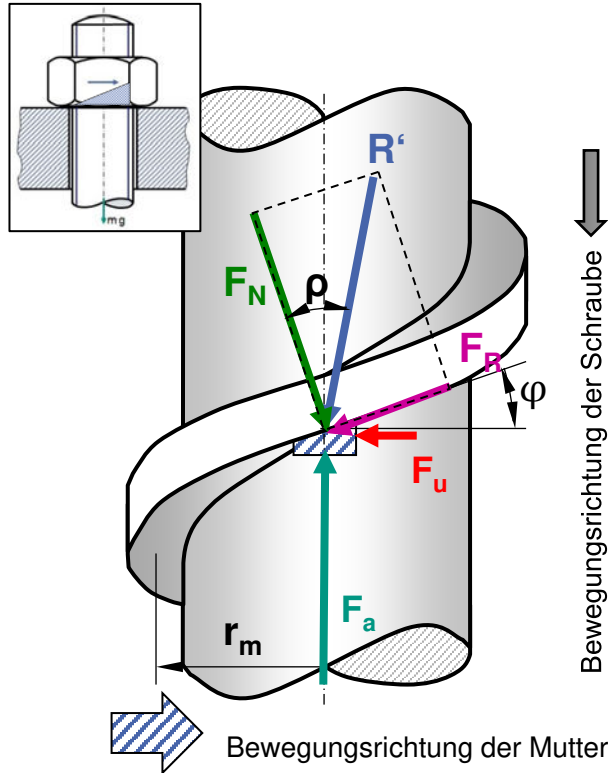
**Sonderfall: Ohne Reibung**

Kernaussage

Die Lastrichtung beeinflusst über Reibungskräfte die Orientierung der Kraftvektoren

# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

Bei Anziehen und Lösen unterscheidet sich das Gewindemoment



- $M_G = F_u \cdot r_m = F_a \cdot r_m \tan(\varphi \pm \rho)$

Fall 1 „Last heben“: + Anziehen (Verspannen)

Fall 2 „Last senken“: - Losdrehen (Lösen)

- $\tan \varphi = \frac{P}{2\pi \cdot r_m} = \frac{P}{\pi \cdot d_2}$

- $\tan \rho = \mu_G$

Legende:

$F_a$  [N] ...Axialkraft

$F_u$  [N] ...Umfangskraft

$R'$  [N] ...Resultierende

$F_R$  [N] ...Reibkraft

$F_N$  [N] ...Normalkraft

$\varphi$  [°] ...Steigungswinkel

$\rho$  [°] ...Reibungswinkel

$\psi$  [rad]...Umfangswinkel in Bogenmaß

$\mu_G$  [ ]...Gewindereibwert

$r_m$  [mm] ...mittlerer Radius

$d_2$  [mm]...Flankendurchmesser des

Schraubengewindes

$M_G$  [Nm]...Gewindemoment

$P$  [mm] ...Gewindesteigung

# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

## Fall 1 Hoher Anteil des Anzugsmoments geht in Reibungsverluste



### ■ Fall 1:

Zum Verspannen bzw. Lastheben muss äußeres Moment aufgebracht werden!

- $M_G = F_a \cdot r_m \cdot \tan(\varphi + \rho)$
- $\varphi \rightarrow$  Anteil zur Erzeugung der Längskraft
- $\rho \rightarrow$  Anteil zur Überwindung der Reibung im Gewinde
- ISO-Gewinde:  $\varphi \approx 3^\circ$

Großer Reibanteil!

$$\begin{aligned} \mu_G = 0,12 &\rightarrow \rho \approx 7^\circ & \frac{M_{\text{Reib}}}{M_G} \approx 70\% \\ \mu_G = 0,14 &\rightarrow \rho \approx 8^\circ & \frac{M_{\text{Reib}}}{M_G} \approx 73\% \end{aligned}$$

### Kernaussage

Die größten Anteile des Gewindemomentes müssen für Reibung aufgebracht werden!

#### Legende:

$F_a$  [N] ... Axialkraft  
 $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel der Schraubenlinie  
 $\psi$  [rad] ... Umfangswinkel in Bogenmaß  
 $\rho$  [°] ... Reibungswinkel  
 $r_m$  [mm] ... mittlerer Radius  
 $\mu_G$  [ ] ... Gewindereibwert  
 $M_G$  [Nm] ... Gewindemoment  
 $M_{\text{Reib}}$  [Nm] ... Reibmoment



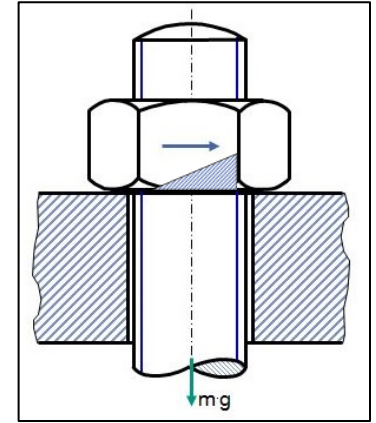
# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

## Fall 2 Moment zum Lösen hängt vom Steigungs- und Reibungswinkel ab



- **Fall 2:** Lösen einer Schraubenverbindung oder Senken einer Last
  - Senken einer Last
- Drehen der Mutter bewegt Schraube nach unten

- $M_G = F_u \cdot r_m = F_a \cdot r_m \tan(\varphi - \rho)$
- Mit  $\varphi < \rho$  (Steigungswinkel < Reibungswinkel)  
 $M_G < 0$



- Moment zum Drehen der Mutter muss entgegen der Montagedrehrichtung aufgebracht werden

### Kernaussage

Reibkräfte wirken immer der Bewegung entgegen

**Selbsthemmung!**

### Legende:

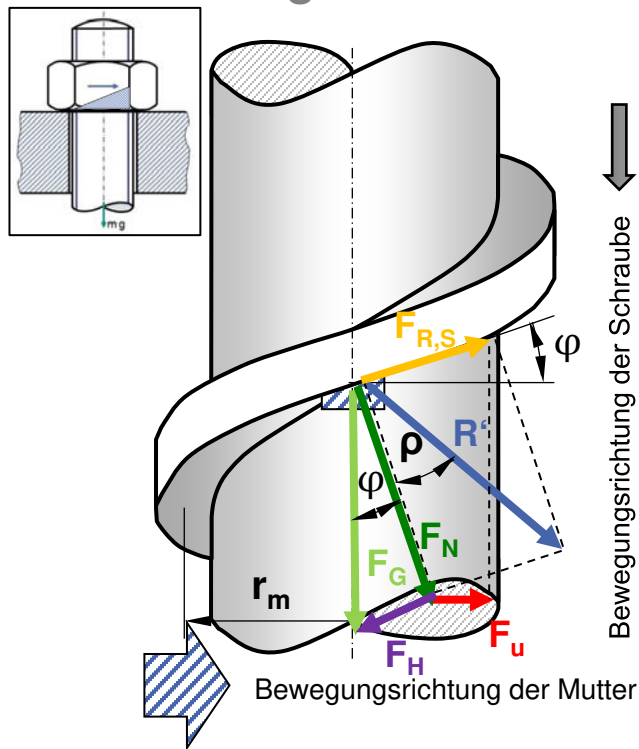
- $F_a$  [N] ... Axialkraft
- $F_u$  [N] ... Umfangskraft
- $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel der Schraubenlinie
- $\rho$  [°] ... Reibungswinkel
- $r_m$  [mm] ... mittlerer Radius
- $M_G$  [Nm] ... Gewindemoment





# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

**Fall 2** Selbsthemmung wird durch das Verhältnis von Steigungs- und Reibungswinkel definiert



- Detaillierte Diskussion Fall 2

- $M_G = F_a \cdot r_m \cdot \tan(\varphi - \rho)$

- Fallunterscheidung:

- **2.1:**  $\varphi - \rho > 0$  bzw.  $\varphi > \rho$  (Keine Selbsthemmung)

- **2.2:**  $\varphi - \rho = 0$  bzw.  $\varphi = \rho$  (Übergangsbereich)

- **2.3:**  $\varphi - \rho < 0$  bzw.  $\varphi < \rho$  (Selbsthemmung)

Sehr steil: „Fällt“ auf schiefer Ebene

Legende:

$F_G$  [N] ... Gewichtskraft [N]

$F_U$  [N] ... Umfangskraft

$F_{R,S}$  [N] ... Reibkraft auf Schraube [N]

$R'$  [N] ... Resultierende

$F_H$  [N] ... Hangabtriebskraft [N]

$F_N$  [N] ... Normalkraft

$\varphi$  [°] ... Steigungswinkel

$\rho$  [°] ... Reibungswinkel

$M_G$  [Nm] ... Gewindemoment

$r_m$  [mm] ... mittlerer Radius



# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

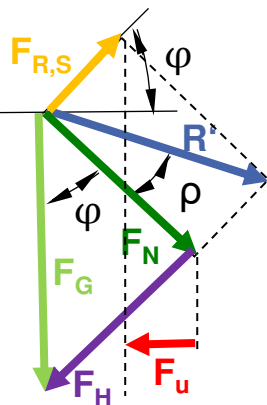
**Fall 2.1** Ist der Steigungswinkel größer als der Reibungswinkel, liegt keine Selbsthemmung vor



- **Fall 2.1** Keine Selbsthemmung
- $\varphi - \rho > 0$  oder  $\varphi > \rho$  ( $F_H > F_{R,S}$ )
- **Steigungswinkel > Reibungswinkel**



**Fall 2.1 Keine Selbsthemmung**  
Schraube löst sich unmittelbar. Vorspannung geht wieder verloren. Keine Klemmkraft und damit Kraftübertragung möglich.



## Kernaussage

Wenn der **Steigungswinkel größer** als der **Reibungswinkel** ist,  
**dann** löst sich die Schraube **selbständig** (keine Selbsthemmung),  
**weil** die Hangabtriebskraft ( $F_H$ ) größer als die Reibkraft auf die Schraube ist (resultierende Umfangskraft  $F_U$  führt zum Lösen der Schraube).

### Legende:

$F_G$  [N] ...Gewichtskraft [N]  
 $F_U$  [N] ...Umfangskraft  
 $F_{R,S}$  [N] ...Reibkraft auf Schraube [N]  
 $R'$  [N] ...Resultierende  
 $F_H$  [N] ...Hangabtriebskraft [N]  
 $F_N$  [N] ...Normalkraft  
 $\varphi$  [°] ...Steigungswinkel  
 $\rho$  [°] ...Reibungswinkel  
 $M_G$  [Nm]...Gewindemoment  
 $r_m$  [mm]...mittlerer Radius





# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

**Fall 2.2** Ist der Steigungswinkel gleich dem Reibungswinkel, ist die Grenze der Selbsthemmung erreicht

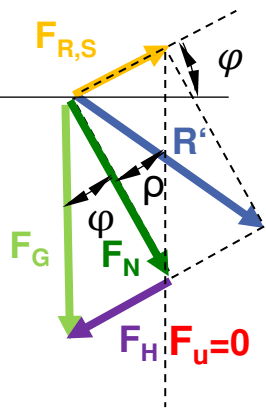
- **Fall 2.2** Übergangsbereich
- $\varphi - \rho = 0$  oder  $\varphi = \rho$  ( $F_H = F_{R,S}$ )
- **Steigungswinkel = Reibungswinkel**



**Fall 2.2 Übergangsbereich**  
Schraube löst sich gerade so nicht mehr von alleine. Durch zu geringe Anzugmomente oder Störgrößen (Vibration bei der Fahrt) kommt die Schraube aus dem Gleichgewichtszustand und löst sich. Die Vorspannung geht verloren. Keine Klemmkraft und damit Kraftübertragung möglich.

## Kernaussage

Wenn der **Steigungswinkel gleich** dem **Reibungswinkel** ist, dann ist der **Grenzfall** der Selbsthemmung erreicht, **weil** die Hangabtriebskraft ( $F_H$ ) und die Reibkraft auf die Schraube gleich groß sind. Eine kleine Änderung des Lastfalls kann zum Verlassen des Gleichgewichtszustands führen.



### Legende:

$F_G$  [N] ...Gewichtskraft [N]  
 $F_u$  [N] ...Umfangskraft  
 $F_{R,S}$  [N] ...Reibkraft auf Schraube [N]  
 $R'$  [N] ...Resultierende  
 $F_H$  [N] ...Hangabtriebskraft [N]  
 $F_N$  [N] ...Normalkraft [N]  
 $\varphi$  [°] ...Steigungswinkel  
 $\rho$  [°] ...Reibungswinkel  
 $M_G$  [Nm]...Gewindemoment  
 $r_m$  [mm]...mittlerer Radius



# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

**Fall 2.3** Ist der Steigungswinkel kleiner als der Reibungswinkel, liegt Selbsthemmung vor



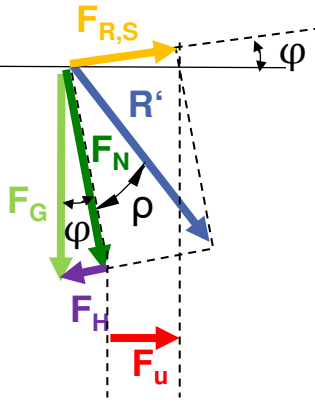
- **Fall 2.3** Selbsthemmung
- $\varphi - \rho < 0$  oder  $\varphi < \rho$  ( $F_H < F_{R,S}$ )
- **Steigungswinkel < Reibungswinkel**



**Fall 2.3 Selbsthemmung**  
Schraube löst sich nicht mehr von alleine. Die Vorspannung bleibt bestehen. Klemmkraft vorhanden und damit Kraftübertragung möglich.

## Kernaussage

Wenn der **Steigungswinkel kleiner** als der **Reibungswinkel** ist,  
dann löst sich die Schraube nicht selbständig (**Selbsthemmung liegt vor**),  
weil die Hangabtriebskraft ( $F_H$ ) kleiner als die Reibkraft auf die Schraube ist. Zum Lösen muss daher ein äußeres Moment aufgebracht werden (resultierende Umfangskraft  $F_u$  wirkt lösen entgegen).



### Legende:

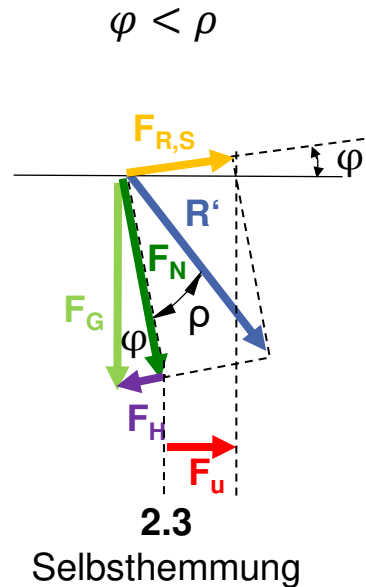
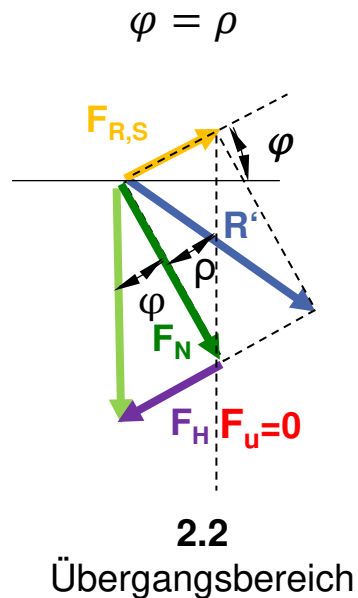
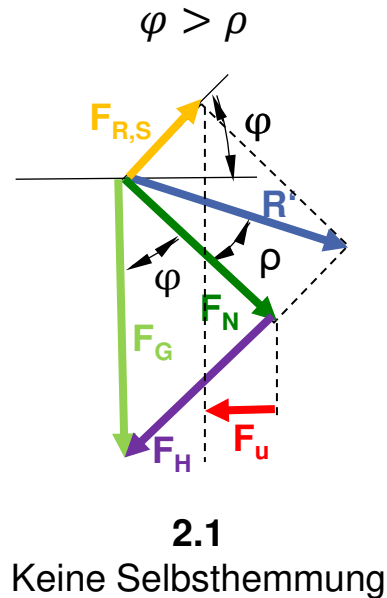
- $F_G$  [N] ...Gewichtskraft [N]
- $F_u$  [N] ...Umfangskraft
- $F_{R,S}$  [N] ...Reibkraft auf Schraube [N]
- $R'$  [N] ...Resultierende
- $F_H$  [N] ...Hangabtriebskraft [N]
- $F_N$  [N] ...Normalkraft
- $\varphi$  [°] ...Steigungswinkel
- $\rho$  [°] ...Reibungswinkel
- $M_G$  [Nm]...Gewindemoment
- $r_m$  [mm]...mittlerer Radius



# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

**Fall 2** Die Selbsthemmung ist abhängig von dem Verhältnis von dem Steigungswinkel und dem Reibungswinkel

- $M_G = F_a \cdot r_m \cdot \tan(\varphi - \rho)$  (- Zeichen: Last senken/ Lösen)
- Fallunterscheidung:



Legende:

- $F_G$  [N] ...Gewichtskraft [N]
- $F_u$  [N] ...Umfangskraft
- $F_{R,S}$  [N] ...Reibkraft auf Schraube [N]
- $R'$  [N] ...Resultierende
- $F_H$  [N] ...Hangabtriebskraft [N]
- $F_N$  [N] ...Normalkraft
- $\varphi$  [°] ...Steigungswinkel
- $\rho$  [°] ...Reibungswinkel
- $M_G$  [Nm]...Gewindemoment
- $r_m$  [mm]...mittlerer Radius

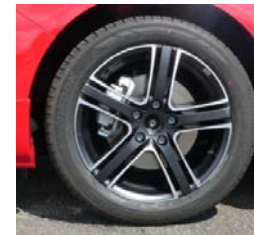
# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

**Sonderfall:** Die Betrachtung des Gewindes ohne Reibung kann in der Praxis durch dynamische Lastfälle auftreten

- $M_G = F_a \cdot r_m \cdot \tan(\varphi \pm \rho)$
- Betrachtung: Was passiert, wenn das Gewinde keine Reibung aufweisen würde?  $\rho = 0$
- Die Reibschlussverbindung des WFP im Gewinde erzeugt das zweite WFP unter dem Schraubenkopf!
  - Keine Reibkraft unter dem Schraubenkopf
  - Verbindung geht von selbst auf!

## Kernaussage

Wenn im Betrieb z.B. durch Schwingungen oder axial pulsierende Kräfte der Reibschluss aufgehoben wird, löst sich eine Schraubenverbindung selbstständig!

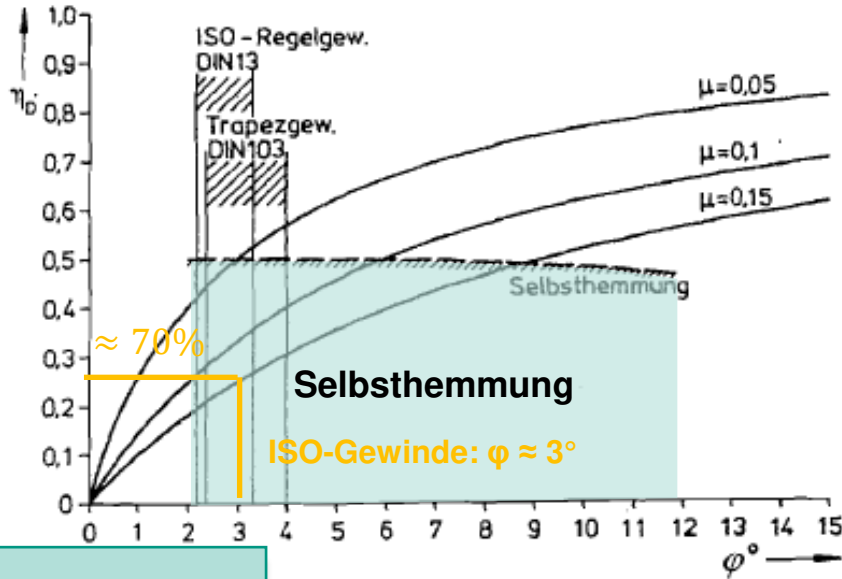


### Legende:

$F_a$  [N] ...Axialkraft  
 $\varphi$  [°] ...Steigungswinkel der Schraubenlinie  
 $\rho$  [°] ...Reibungswinkel  
 $r_m$  [mm]...mittlerer Radius  
 $M_G$  [Nm] ...Gewindemoment

# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

Reibung in Befestigungsschrauben ist essenziell für Wirkprinzip



## Kernaussage

Eine Befestigungsschraube nutzt als Wirkprinzip den Keileffekt zur Kraftübersetzung und den flachen Keilwinkel und die Reibung für die Selbsthemmung.

- Definition:  
Das Verhältnis der Nutzenergie am Ausgang zur am Eingang aufgewendeten Arbeit  
→ Umwandlung des Drehmomentes in Längskraft

$$\eta_D = \frac{F_S \cdot P}{M_G \cdot 2\pi} = \frac{\tan \varphi}{\tan(\varphi + \rho')}$$

### Legende:

$F_S$  [N] ... Schraubenkraft  
 $\varphi$  [°] ... Steigungswinkel der Schraubenlinie  
 $\rho$  [°] ... Reibungswinkel  
 $P$  [mm] ... Gewindesteigung  
 $M_G$  [Nm] ... Gewindemoment  
 $\eta_D$  [...] ... Wirkungsgrad Drehmoment  
 $\mu$  [...] ... Reibwert

Quelle: Steinhilper, Sauer

# Schraubenverbindungen – Schraubengleichung

Die Flankenneigung des Gewindes kann durch zusätzliche Reibung einen positiven Einfluss auf die Selbsthemmung haben

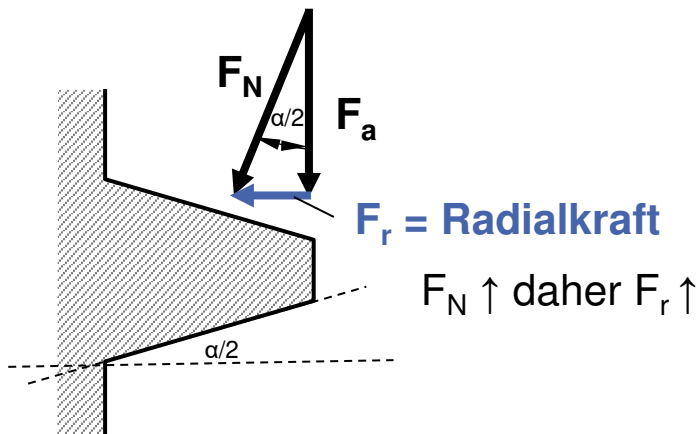
- Es gilt:  $\cos \frac{\alpha}{2} < 1$  deshalb  $\mu' > \mu_G$ !



Gewindereibung

## Kernaussage

Bei **geneigten Gewindeflanken** entsteht **zusätzlich eine Reibkraft**, die zu einer größeren **Selbsthemmung** führt.












- **Wenn** die Gewindeform durch die Neigung der Flanken verändert wird, **dann** vergrößern sich die auftretenden Reibungskräfte (nicht der reale Reibwert), **weil** sich durch die Neigung der Flanken die Normalkraft vergrößert!  
→ **Positiver Einfluss auf die Selbsthemmung**

### Legende:

$F_N$  [N] ... Normalkraft  
 $F_a$  [N] ... Axialkraft  
 $F_r$  [N] ... Radialkraft  
 $\alpha$  [°] ... Flankenwinkel  
 $\mu_G$  [ ] ... Gewindereibwert  
 $\mu'$  [ ] ... Modifizierter Reibwert für die Berücksichtigung der Neigung





-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung



# Schraubenverbindungen – Kraftverteilung Anziehen/Lösen

## Streuungen im Reibwert haben signifikanten Einfluss auf die Funktion der Schraubenverbindung

### ■ Anziehen – Abschätzung mit Annahme hoher Reibung

$$\frac{M_R}{M_a} = \frac{1,155\mu_G + \mu_K \frac{D_{Km}}{d_2}}{\varphi}$$

$$\varphi \approx 3^\circ \rightarrow \varphi = 0,052 \text{ im Bogenmaß}$$

$$\mu_G = \mu_K = 0,2 \text{ (sehr hoher Wert)}$$

$$\frac{D_{Km}}{d_2} \approx 1,5$$

$$\rightarrow \frac{M_R}{M_a} \approx 10$$

### Fragestellung

Welcher **Anteil** des **Drehmoments** beim **Anziehen** geht in die **Reibung** und welcher Anteil in die **Klemmkraft** über?

### Kernaussage

Wenn der **Reibwert streut**, dann wird die **Streuung der Vorspannkraft** in einer Verbindung sehr stark beeinflusst, weil der in **Reibung** umgesetzte Anteil des Anzugsmoments in **Klemmkraft** umgesetzten Anteil um ein **Vielfaches übersteigt**.

→ Bei hochwertigen Schraubenverbindungen ist die Messung des Anzugsmomentes daher nicht ausreichend!

### Legende:

$\varphi$  [rad]...Steigungswinkel der Schraubenlinie

$\rho$  [rad]...Reibungswinkel

$M_R$  [Nm]...Anteil Reibmoment

$M_a$  [Nm]...Anteil Klemmkraft

$D_{Km}$  [mm] ...Wirksamer Durchmesser des Kopfreibmoments

$\mu_K$  [ ]...Reibungszahl in der Kopfauflage

$\mu_G$  [ ]...Gewindereibwert

$d_2$  [mm] ...Flankendurchmesser des Schraubengewindes



# Schraubenverbindungen – Kraftverteilung Anziehen/Lösen

## Abschätzung der Handkraft beim Anziehen



$$M_M = F_a \left[ \frac{d_2}{2} \tan(\varphi \pm \rho') \pm \frac{D_{km}}{2} \mu_K \right]$$

Beispiel:  $\varphi = 3^\circ \xrightarrow{\text{rad}} 0,0524$  **bei**  $\mu_G = \mu_K 0,12$   $\xrightarrow{\frac{D_{km}}{d_2} = 1,5} M_M = F_a \cdot d_2 [0,186]$

Handkraft  $F_H$  an einem Hebelarm  $r_H$

$$r_H = 15 \cdot d_2$$

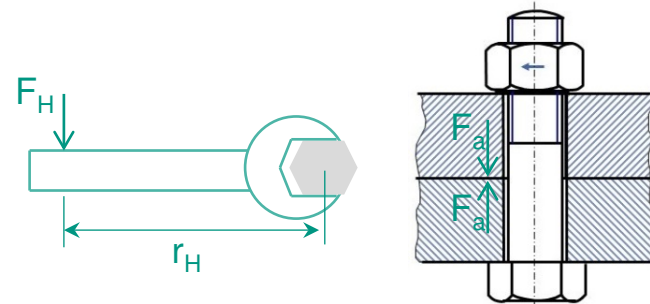
$$\xrightarrow{M_M = F_H \cdot r = F_H \cdot 15 \cdot d_2 = F_a \cdot d_2 \cdot 0,186}$$

$$F_a = 81 \cdot F_H$$

**Kraftverstärkung:  $F_a \approx 100 F_H$**

### Kernaussage

**Wenn** die Schraube mit der **Hand angezogen** wird,  
**dann** ist mit einer starken **Streuung** der erzeugten **Axialkraft** zu rechnen,  
**weil** eine etwa eine **ehundertfache Kraftverstärkung** von der Handkraft zur Axialkraft vorliegt.



#### Legende:

$F_a$  [N]...Axialkraft  
 $F_H$  [N]...Handkraft  
 $\varphi$  [°]...Steigungswinkel  
der Schraubenlinie  
 $\rho$  [°]...Reibungswinkel  
 $\mu_G$  [...]...Gewindereibwert  
 $\mu_K$  [...]...Reibungszahl in  
der Kopfauflage

$D_{km}$  [mm] ...Wirksamer  
Durchmesser des  
Kopfreibwinkels  
 $r_H$  [mm]...Hebelarmhandkraft  
 $M_M$  [Nm]...Montagemoment  
 $M_R$  [Nm]...Anteil Reibmoment  
 $M_a$  [Nm]...Anteil Klemmkraft  
 $d_2$  [mm] ...Flankendurchmesser  
des Schraubengewindes



# Schraubenverbindungen – Kraftverteilung Anziehen/Lösen

Die Zuverlässigkeit einer Schraubenverbindung wird durch die richtige Gestaltung gewährleistet



- **Lösen** – Abschätzung mit Annahme minimaler Reibung

## Fragestellung

Welcher **Anteil** des **Drehmoments** beim **Lösen** geht in die **Reibung** und welcher Anteil in die **Klemmkraft** über?

Ungünstiger Fall:

- $\mu_G = \mu_K = 0,07$  (z.B. mit MoS<sub>2</sub>)  $\frac{M_R}{M_a} = 2,9$
- $\frac{D_{Km}}{d_2} = 1$  (Kopfreibmomentdurchmesser = Flankengewindedurchmesser)
- → Beim metrischem ISO-Gewinde (eingängig) liegt immer Selbsthemmung vor!
- → Schraube löst sich nicht selbständig!

## Kernaussage

**Wenn** bei einem metrischen ISO-Gewinde in allen Betriebszuständen eine Verspannkraft  $F_a$  vorliegt,

**dann** wird keine Schraubensicherung benötigt,

**weil** immer Selbsthemmung vorliegt.

→ Zuverlässigkeit einer Schraubenverbindung wird durch richtige Gestaltung, Dimensionierung und Montage gesichert, nicht durch Schraubensicherungen!

## Legende:

$M_R$  [ Nm ... Anteil Reibmoment

$M_a$  [Nm] ... Anteil Klemmkraft

$D_{Km}$  [mm] ... Wirksamer Durchmesser des Kopfreibmoments

$\mu_K$  [ ] ... Reibungszahl in der Kopfauflage

$\mu_G$  [ ] ... Gewindereibwert

$d_2$  [mm] ... Flankendurchmesser des Schraubengewindes





-  Einführung Wirkprinzip
-  Keileffekt / Schraubenlinie
-  Mechanik der Schraube
-  Betrachtung von 2 Fällen
  -  Anziehen
  -  Lösen
-  Schraubengleichung
-  Kraftverteilung Anziehen/Lösen
-  Zusammenfassung

# Lernziele der Vorlesung

## Schraubenverbindungen – Wirkprinzip

### Problem

Konstruktionsingenieurinnen und Konstruktionsingenieure müssen die Zusammenhänge im **Wirkprinzip** der **Schraubenverbindung** verstehen, damit sie bei **Problemen** in der Praxis **geeignet reagieren** können.

### Ziele

- **Wirkprinzip** einer **Schraubenverbindung** verstehen und wiedergeben können F9
- Herleitung der **Schraubenlinie** und ihrer geometrischen Zusammenhänge nachvollziehen F14+15
- **Kräfte** und **Mechanik** innerhalb einer Schraubenverbindung erkennen und im zugehörigen Verspannungsschaubild abbilden können F23
- **Vorgänge** beim **Anziehen** und **Lösen** einer Schraubenverbindung erklären können F30+35
- Einfluss von **Reibung** in der Schraubverbindung verstehen und einordnen können F41+44+53+67
- **Schraubengleichung** verstehen, anwenden und diskutieren können F39

### Fazit

Die Kenntnis über das **Wirkprinzip** einer Schraubenverbindung ist entscheidend, um diese in der **Praxis erfolgreich einsetzen** bzw. bei **Problemen geeignet reagieren** zu können  
Die theoretischen Zusammenhänge liefern dabei u.a. die Grundlage für die **Dimensionierung** der Schraubverbindung.