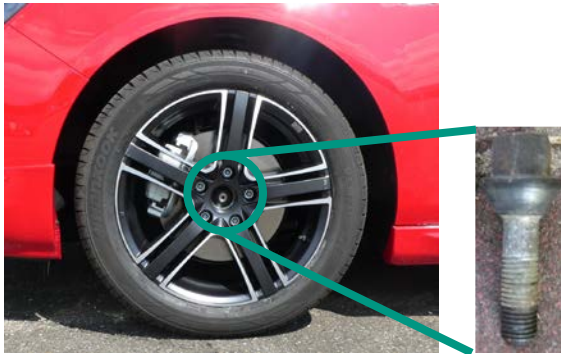


Schraubenverbindungen 1 – Grundfunktion und Wirkung im System

Vorlesung Maschinenkonstruktionslehre C – WS25/26


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





 Motivation, Lernziele und Übersicht

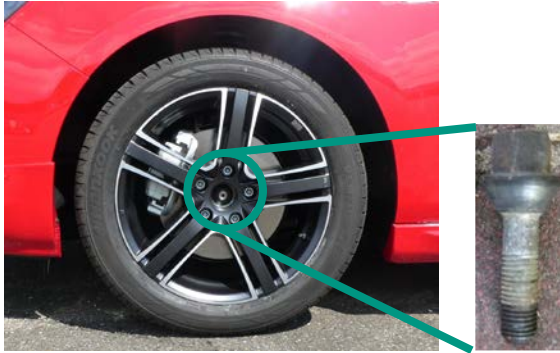
 Klassifikation

 Modellbildung der montierten Schraubenverbindung

 Modellbildung im Betrieb

 Zusammenfassung






 Motivation, Lernziele und Übersicht

 Klassifikation

 Modellbildung der montierten Schraubenverbindung

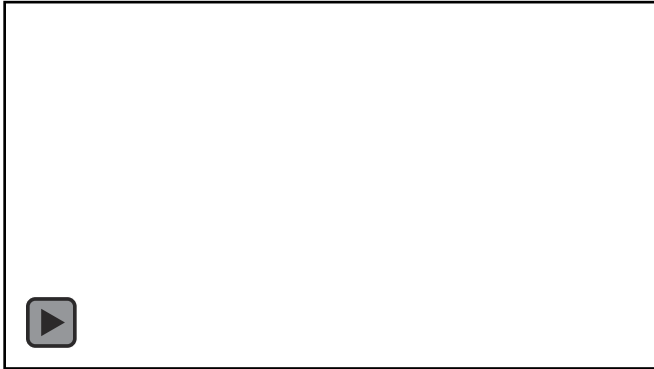
 Modellbildung im Betrieb

 Zusammenfassung

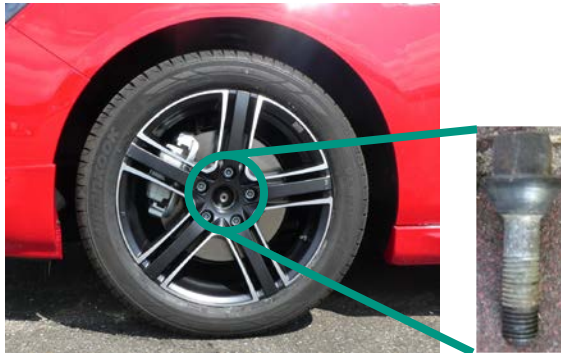


Maschinenkonstruktionslehre C – Schraubenverbindungen 1

Schraubenverbindungen sind toll – bis sie es nicht mehr sind

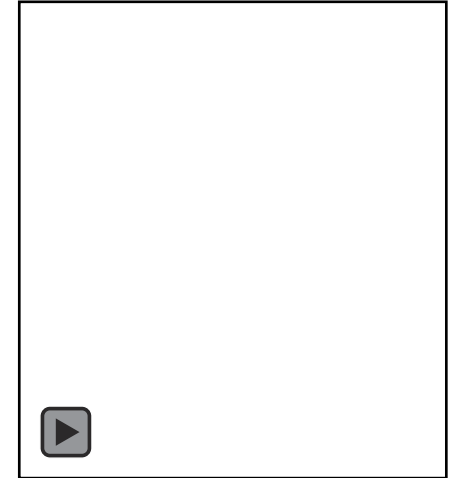


Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=lxZnJ7LhHiA>



Kernfragen dieser Vorlesung:

- Wie verhindern wir kritisches Versagen?
- Wie können Schrauben ausgelegt werden?
- Wo liegen Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Schraubenverbindungen?
- Wie können wir durch gezielte konstruktive Maßnahmen auf Schraubverbindungen einwirken?



Maschinenkonstruktionslehre C – Schraubenverbindungen 1

Wie hat die Schraubverbindung versagt?



Anderer Fall:

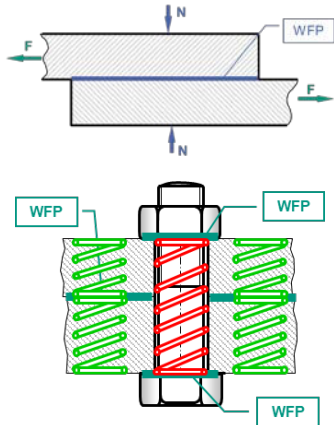


Es gibt viele Stellen, an denen die Verbindung versagen kann → Was kann man als Konstruktion-Ingenieur*In tun, damit derartiges Versagen nicht stattfindet?

Übersicht Vorlesungen Schraubenverbindungen 1

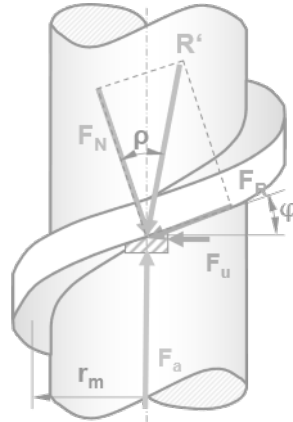
Inhalte der Vorlesungen und Übung zu Schraubenverbindungen

Vorlesung 1



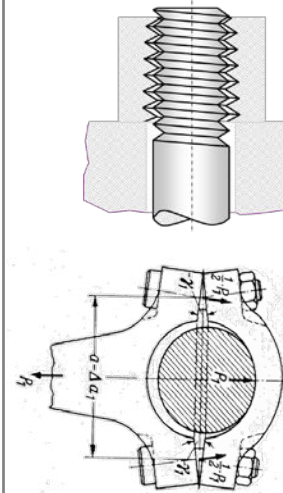
Grundfunktion und Wirkung im System

Vorlesung 2



Wirkprinzip

Vorlesung 3

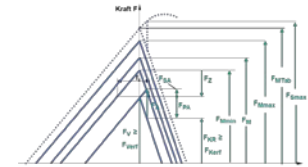


Gestaltung

Übung



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



Dimensionierung

Lernziele der Vorlesung

Schraubenverbindungen 1 - Grundfunktion und Wirkung im System

Problem

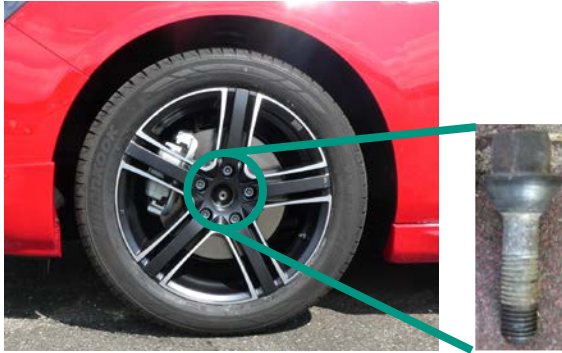
Schraubenverbindungen sind nicht einfach auszulegen, denn es wirken viele Gestaltungselemente zusammen.

Ziele

- **Klassifikation** von Schraubenverbindungen kennen und unterscheiden können
- Grundvoraussetzungen für die Funktionserfüllung von Kraft-Schraubverbindungen kennen und erklären können
- Mithilfe eines Federmodells die Funktion und die wirkenden Kräfte in der Schraube erklären können
- Ein Verspannungsschaubild einer Schraubverbindung erstellen, erklären und diskutieren können
- Die verschiedenen Einflüsse von Betriebskräften und Setzen auf die Be- und Entlastung in einer Schraubverbindung erklären können


Fazit

Die Schraubverbindung ist eine der zentralen Verbindungsarten im Maschinenbau. Vor allem hochbelastete Kraftschrauben müssen für eine sichere Funktionserfüllung dimensioniert werden. Dafür verwendete Materialwerte, aber auch statische und dynamische Lasten sowie die Auswirkung auf die Bauteilgestaltung sind dafür entscheidend.



 Motivation, Lernziele und Übersicht

 Klassifikation

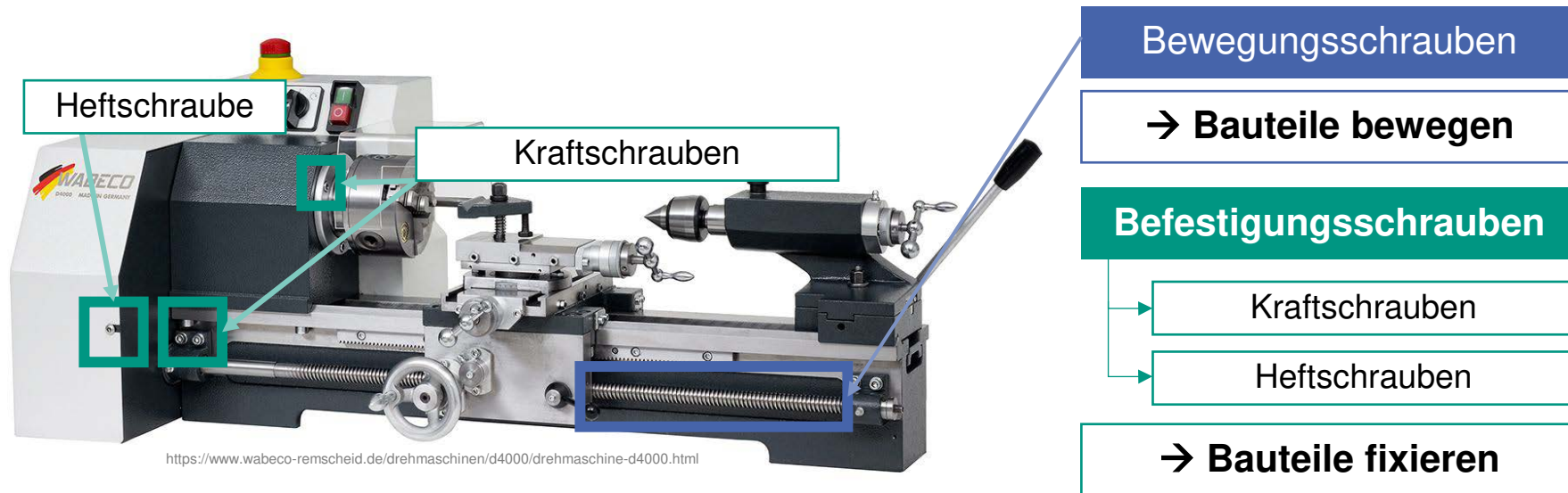
 Modellbildung der montierten Schraubenverbindung

 Modellbildung im Betrieb

 Zusammenfassung

Klassifizierung von Schrauben

Welche Klassen von Schrauben können an der Drehmaschine identifiziert werden?

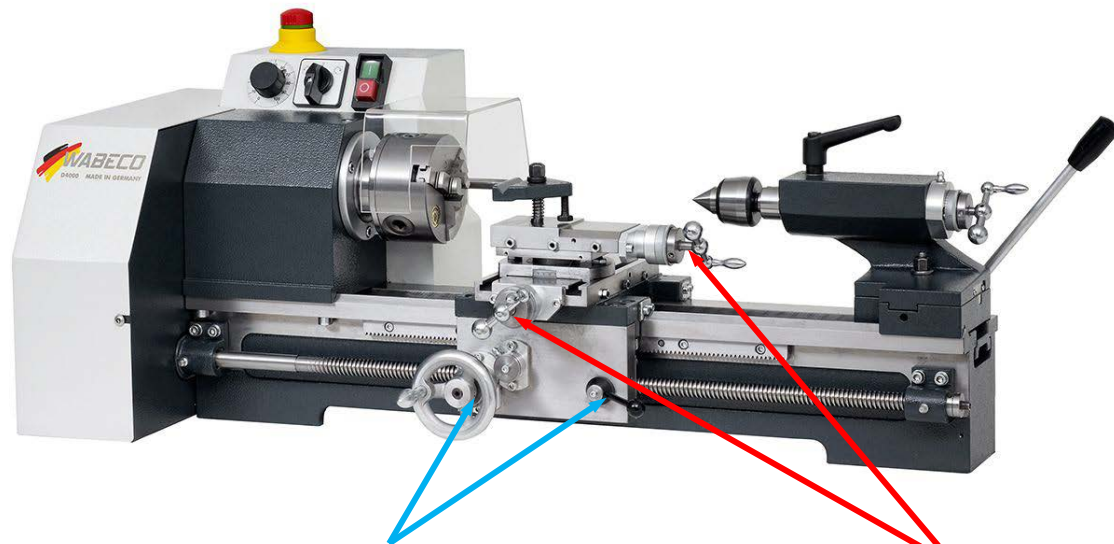


Kernaussage

Schraubenverbindungen können bewegen oder befestigen.

Schraubenverbindungen - Grundfunktion

Gestaltung von Bewegungsschrauben



Bewegungsschraube

- Niedrige Kraftübertragung mit hoher Präzision
→ Stellfunktion/Verschieben

Bewegungsschraube

- Hohe Kraftübertragung mit niedriger Präzision
→ Getriebefunktion

Bewegungsschrauben

→ Bauteile bewegen

Befestigungsschrauben

Kraftschrauben

Heftschrauben

→ Bauteile fixieren

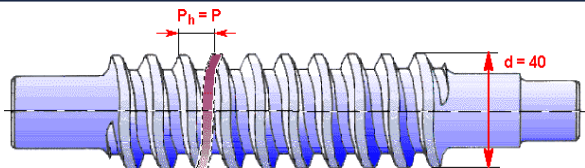
Schraubenverbindungen - Grundfunktion

Wie unterscheide ich verschiedene Bewegungsschrauben?

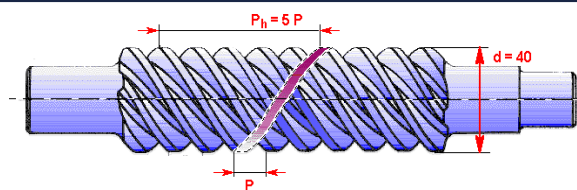
Kernaussage

Die Hauptfunktion von Bewegungsschrauben ist die Bewegungswandlung (Dreh-/Längsbewegung).
Die Steigung der Schraube bestimmt den Weg, der pro Umdrehung zurückgelegt wird.

Eingängige Bewegungsschrauben



Mehrgängige Bewegungsschrauben



eingängig: Tr dxP = Tr 40x7
→ Pro Umdrehung wenig Verstellweg

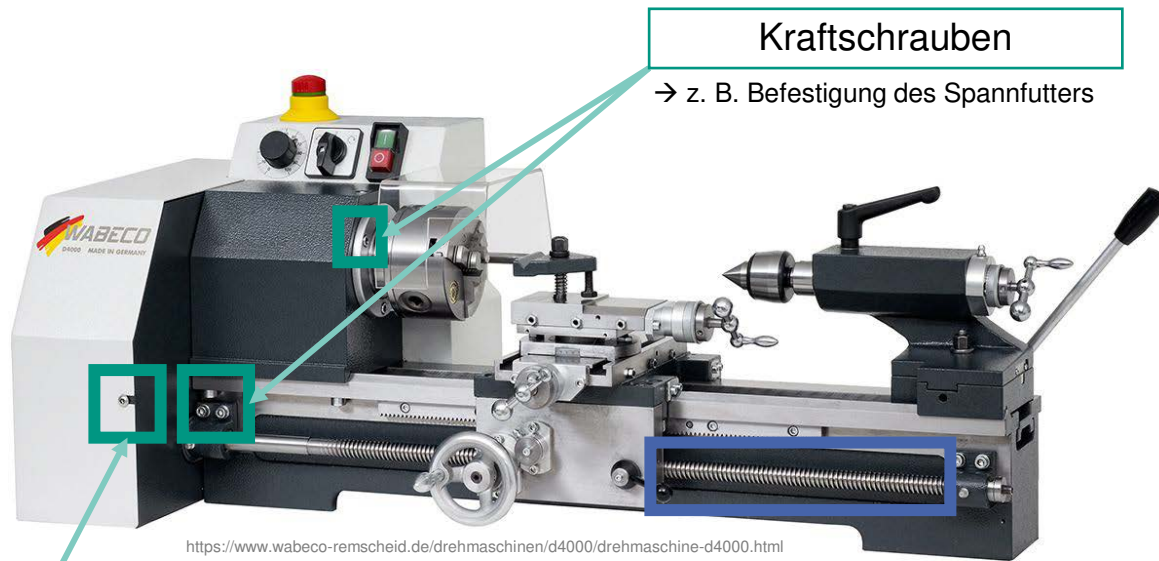
fünfgängig: Tr dxP_h = Tr 40x35
→ Pro Umdrehung größerer Verstellweg

Bei großen Steigungen werden in mehrgängigen Bewegungsschrauben unabhängige Gewindegänge parallel geschaltet, um die Beanspruchbarkeit zu erhöhen!

Tr [] ... Trapezgewinde
d [mm] ... Durchmesser
P [mm] ... Steigung

Klassifizierung von Schraubenverbindungen

Befestigungsschrauben werden grundlegend in Kraft- und Heftschrauben unterschieden



Bewegungsschrauben

→ Bauteile bewegen

Befestigungsschrauben

Kraftschrauben

Heftschrauben

→ Bauteile fixieren

Schraubenverbindungen – Grundfunktionen

Hoch belastete Kraftschrauben müssen dimensioniert werden!

Kernaussage

Die Hauptfunktion von Kraftschrauben ist die Bauteilverbindung zur Übertragung von Kräften und Momenten

Befestigungsschrauben

→ Kraftschrauben

→ Heftschrauben

→ Bauteile fixieren



Hohe Beanspruchung



Niedrige Beanspruchung

Kernaussage

Schraubenverbindungen mit hoher Beanspruchung müssen nach DIN 2230 Dimensioniert werden.
→ Übung Schraubendimensionierung

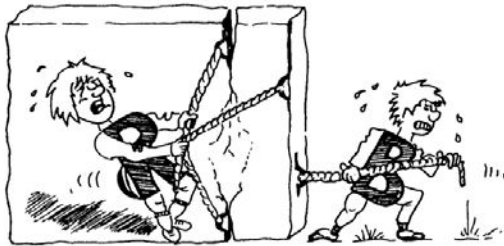
Schraubenverbindungen – Dimensionierung

Wie gehe ich bei der Dimensionierung vor?

Annahme

Beanspruchung x Sicherheitsfaktor \leq Beanspruchbarkeit (vgl. VL Dimensionierung!)

Dimensionierung – Grundgleichung der Dimensionierung
Was sind die Grundgrößen der Dimensionierung?



Beanspruchbarkeit R („Resistivity“):
Widerstand gegen die entsprechende Beanspruchung

Beanspruchung B:
z. B. Kraft auf eine Fläche / Flächenpressung

MKLC – Dimensionierung I –
Einführung und Grundlagen



IPEK
Institut für Produktentwicklung

Frage 1: Wie beanspruchbar ist die Bauteilverbindung „Schraube“?

Frage 1a:
Wie beanspruchbar ist das **Bauteil Schraube**?

Frage 1b:
Wie beanspruchbar sind die Platten?

Frage 2: Welche Beanspruchung wirkt in der Schraubverbindung?



Schraubenverbindungen – Dimensionierung

Wie gehe ich bei der Dimensionierung vor?

Frage 1a: Wie beanspruchbar ist das Bauteil Schraube?

Frage 2: Welche Beanspruchung wirkt in der Schraubverbindung?

Antwort 1a: Die Beanspruchbarkeit der Schraube kann anhand der ihrer Bezeichnung abgelesen werden.



Quelle: <https://www.rosentaler-schrauben.de>

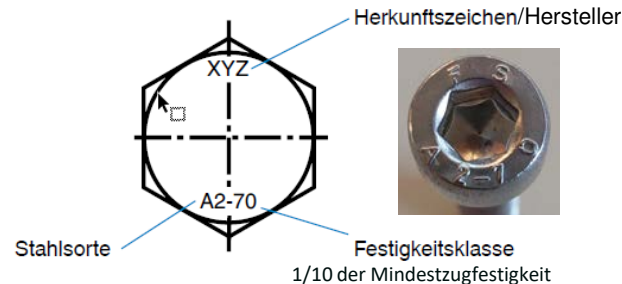
Standardschraube M10 8.8

M – Metrisches Gewinde,
10 – Durchmesser,

X.X:

Erste Zahl: Zugfestigkeit/100
→ 800 N/mm²,
Zweite Zahl: Streckgrenze/10
→ 80% der Zugfestigkeit
→ 640 N/mm²

Edelstahl/rostfreie Stähle



Quelle: <https://www.bossard.com>

Schraubenverbindungen – Dimensionierung

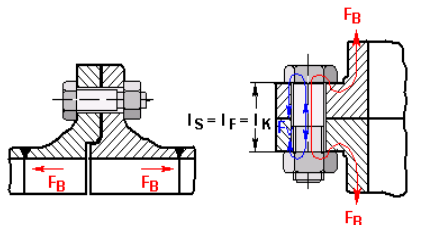
Wie gehe ich bei der Dimensionierung vor?

Frage 1a: Wie beanspruchbar ist das Bauteil Schraube?

Frage 2: Welche Beanspruchung wirkt in der Schraubverbindung?

Antwort 2: Um die Beanspruchung zu bestimmen, muss zunächst die Verbindungsart unterschieden werden, da hier jeweils unterschiedliche Kräfte und Momente wirken.

Flanschverbindung

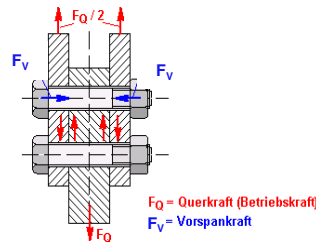


F_B = Betriebskraft
 F_V = Vorspannkraft

Hinweis: Betriebskraft F_B bezieht sich auf die gesamte Schraubverbindung

- Die Betriebskraft wirkt in **Richtung der Schraubenachse**
- Die Betriebskraft wirkt somit parallel zur Vorspannkraft = **Formschluss**

Laschenverbindungen

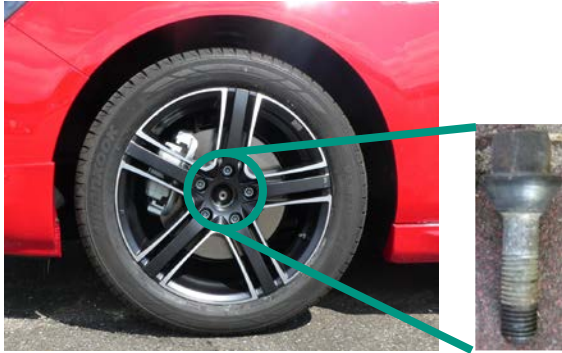


F_Q = Querkraft (Betriebskraft)
 F_V = Vorspannkraft

- Die Betriebskraft wirkt **senkrecht zur Schraubenachse**
- Die Betriebskraft wirkt somit senkrecht zur Vorspannkraft = **Reibschluss**


Kernaussage:

In Schraubverbindungen gibt es je nach Lastfall Bereiche, die auf Zug und die auf Druck beansprucht sind. Mit einem Feder-Ersatzmodell kann diese Beanspruchung veranschaulicht werden.



 Motivation, Lernziele und Übersicht

 Klassifikation

 Modellbildung der montierten Schraubenverbindung

 Modellbildung im Betrieb

 Zusammenfassung



Schraubenverbindungen – Wirkung im System

Eine Schraubenverbindung kann als Verbund von Zug- und Druckfedern verstanden werden

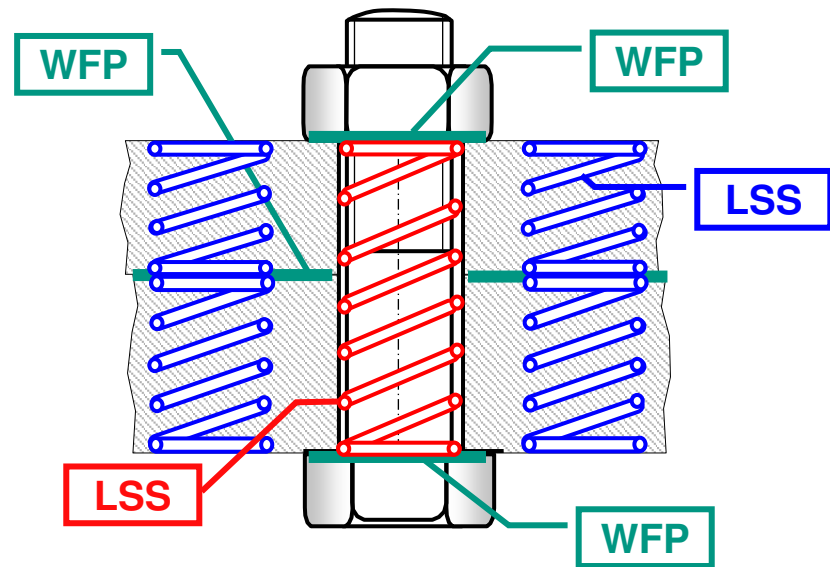
Wenn wir die Schraubenverbindung als Federmodell betrachten, dann können wir die elastischen Eigenschaften modellieren, weil wir die mechanischen Ersatzeigenschaften der verschalteten Federn kennen

Wie wirken die Elemente aufeinander?

LSS=Federn: Druckfeder  Zugfeder 

Kernaussage:

Befestigungsschrauben verspannen die zu verbindenden Bauteile in Richtung der Schraubenachse und erzeugen damit eine Pressung in den Wirkflächenpaaren (WFP) der Fügestelle. Die Schraube wird gelängt, die Platte gestaucht.



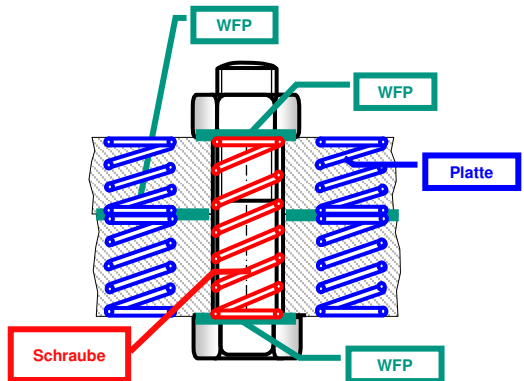
WFP...Wirkflächenpaar
LSS...Leitstützstruktur

Schraubenverbindungen – Wirkung im System

Was passiert beim Montieren der Schraubverbindung in WFP?

Federmodell:

$$f_i = \delta_j \cdot F_i$$



Nachgiebigkeit
Platte: δ_p

Nachgiebigkeit
Schraube: δ_s

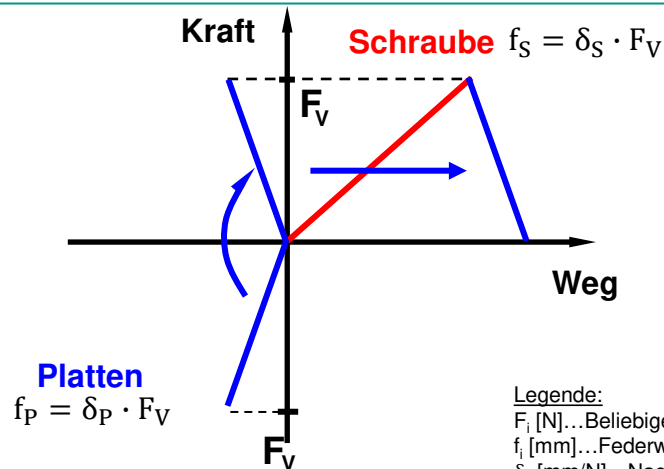
Kernaussage:

Die Steigung im Kraft-Weg-Diagramm hängt von der Nachgiebigkeit (Federkonstante) der Schraube bzw. Platte ab.

Verspannungsschaubild der Schraubverbindung

1. Spiegeln der Platten-Kennlinie

2. Parallel verschieben

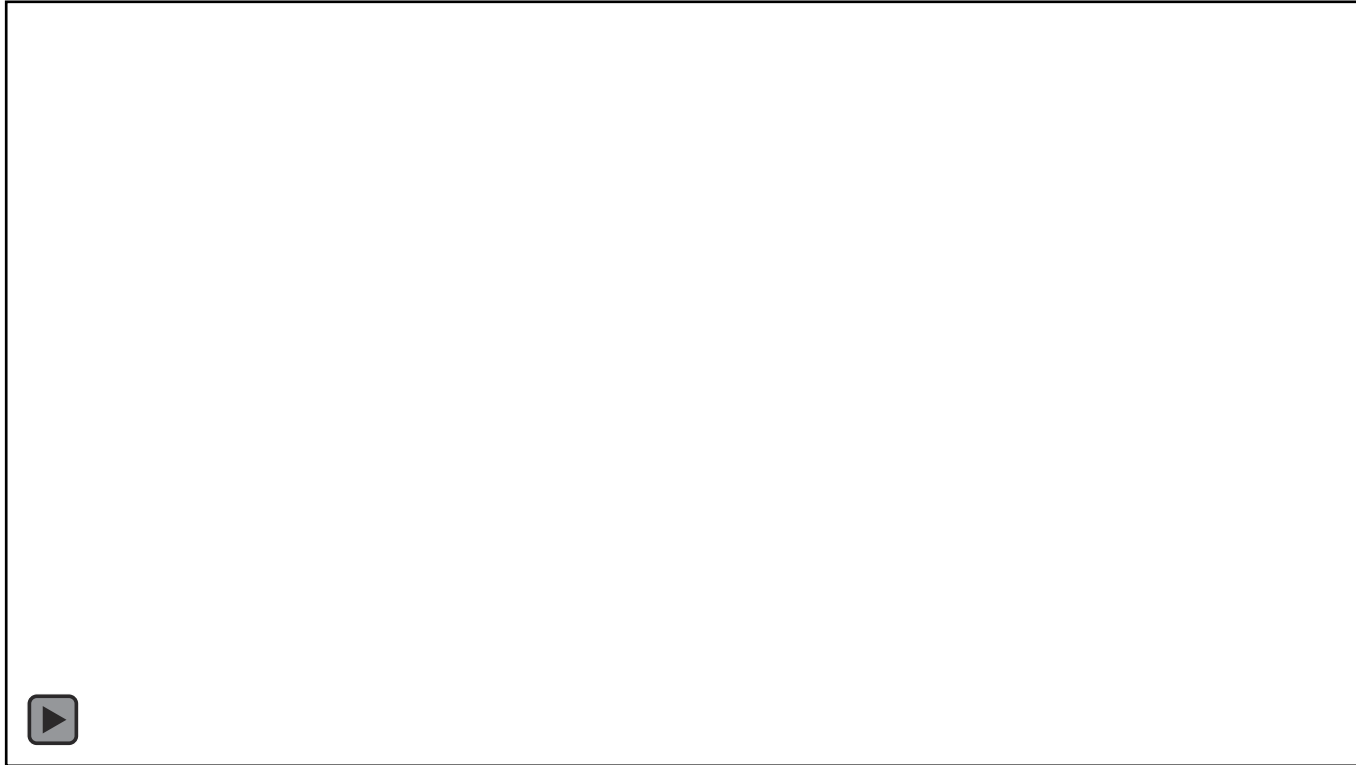


Legende:

F_i [N]...Beliebige Kraft
 f_i [mm]...Federweg durch Kraft F_i
 δ_i [mm/N]...Nachgiebigkeit
 F_v [N]...Vorspannkraft
 $i=s$ [...]...Index für Schraube
 $i=p$ [...]...Index für Platte
LSS [...]...Leitstützstruktur
WFP [...]...Wirkflächenpaar

Schraubenverbindungen – Wirkung im System

Herleitung des Verspannungs-Schaubilds der Schraubenverbindung



Quelle: https://www.youtube.com/watch?v=Go8C_kMeupw


Maschinenkonstruktionslehre C – Schraubenverbindungen 1

Inhaltsverzeichnis



 Motivation, Lernziele und Übersicht

 Klassifikation

 Modellbildung der montierten Schraubenverbindung

 Modellbildung im Betrieb

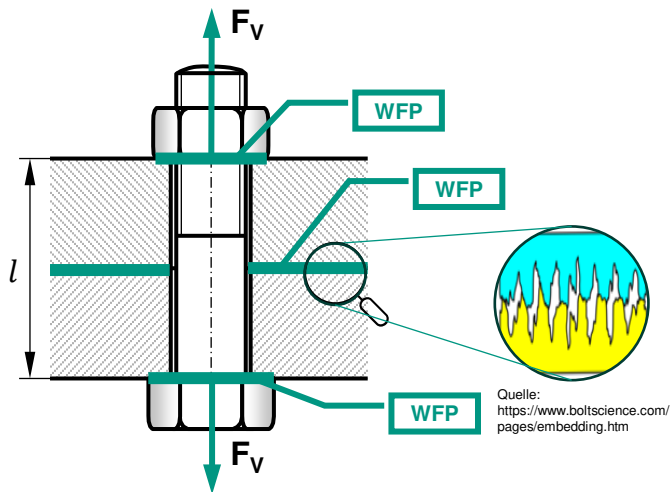
 Zusammenfassung



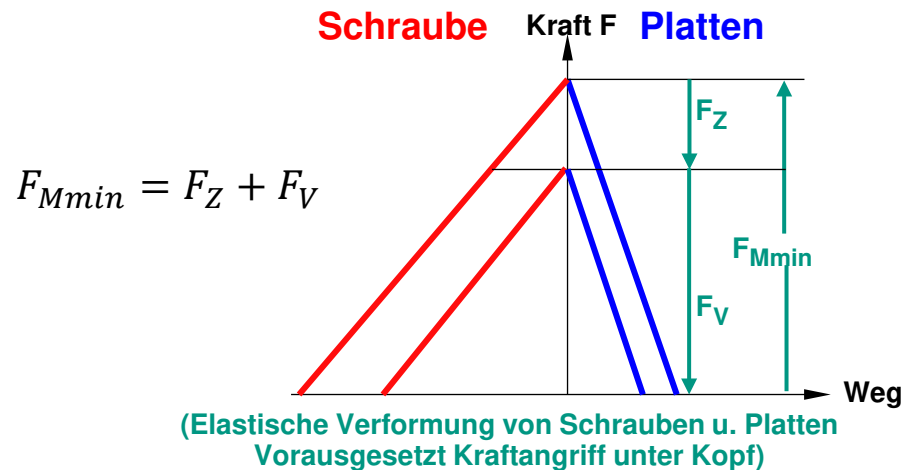
Schraubenverbindungen – Setzen

Durch plastische Verformung verliert die Spannung Vorspannung

- Beim Setzen werden **Rauheiten** durch plastische Verformung geglättet
- Setzen tritt in jedem lasttragenden Wirkflächenpaar auf, also an den **Schraubenkopf-** oder **Mutterauflagen**, den **Trennfugen** und zwischen allen **Gewindeflanken**



Setzen reduziert die Vorspannkraft!



Legende:

F_{Mmin} [N] ... minimale Montagevorspannkraft

F_Z [N] ... Vorspannkraftverlust durch Setzen

F_V [N] ... Vorspannkraft

Schraubenverbindungen – Setzen

Der Einfluss von Setzen auf die Schraubenverbindung hängt von den verwendeten Materialien und ihrer Rauheit ab

Setzbetrag

$$\text{Setzkraft } F_Z = \frac{1}{\delta_S + \delta_P} \cdot f_Z$$

Gemittelte Rauhtiefe R_z nach DIN 4768	Belastung	Richtwerte für Setzbeträge in μm			
		im Gewinde	je Kopf oder Mutternauf- lage	je innere Trennfuge	
< 10 μm	Zug/Druck Schub	3 3	2,5 3	1,5 2	
10 μm bis < 40 μm	Zug/Druck Schub	3 3	3 4,5	2 3,5	
40 μm bis < 160 μm	Zug/Druck Schub	3 3	4 6,5	3 3,5	

Wie kann das Setzen beeinflusst werden?

- Flächenpressung in Kopf- und Mutterauflage muss begrenzt werden.
- Oberflächenrauheit muss passend gewählt werden.

$$p_{\text{zul}} < R_{p0,2}$$

→ Sonst plastische Verformung und großer Verlust der Vorspannkraft durch Setzerscheinungen in den WFP!

Legende:

F_M [N] ...Montagevorspannkraft

F_V [N] ...Vorspannkraft

p_{zul} [MPa]...Zulässige Flächenpressung

$R_{p0,2}$ [MPa]...Dehngrenze

F_Z [N] ... Vorspannkraftverlust durch Setzen

f_Z [mm]...Verschiebung Schraube aufgrund von Setzen

δ_S [mm/N]...Nachgiebigkeit Schraube

δ_P [mm/N]...Nachgiebigkeit Platte

Schraubenverbindungen – Setzen

Die notwendige Vorspannkraft und der Setzverlust ergeben die notwendige Montagevorspannkraft

Gesamte Nachgiebigkeit der Verbindung

$$f_Z = \underbrace{(\delta_S + \delta_P)}_{\text{Weg durch Montage}} \cdot F_M - \underbrace{(\delta_S + \delta_P)}_{\text{Notwendiger Weg für Vorspannung}} \cdot F_V = \overbrace{(\delta_S + \delta_P)}^{\text{Gesamte Nachgiebigkeit der Verbindung}} \cdot \underbrace{(F_M - F_V)}_{F_Z, \text{ da } F_M = F_Z + F_V}$$

Zulässiger Weg-“Verlust“ durch Setzen

Weg durch Montage

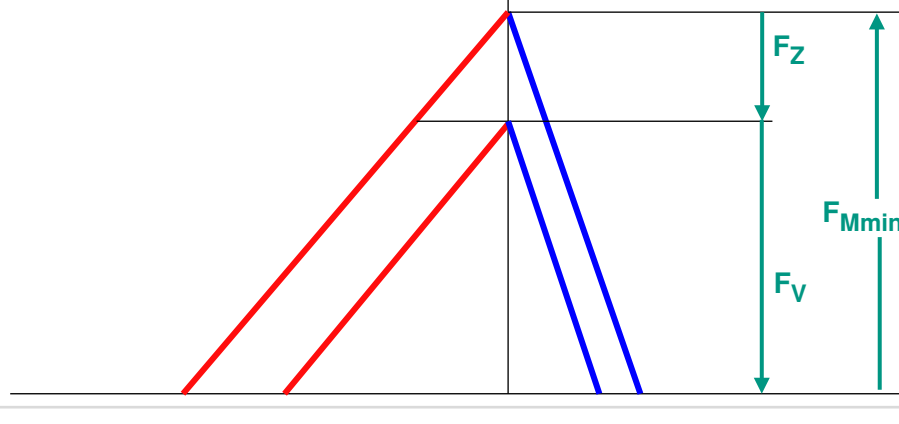
Notwendiger Weg für Vorspannung

F_Z , da $F_M = F_Z + F_V$

Schraube

Kraft F

Platten



(Elastische Verformung von Schrauben u. Platten vorausgesetzt Kraftangriff unter Kopf)

Legende:

F_M [N]...Montagevorspannkraft

F_Z [N]...Vorspannkraftverlust durch Setzen

F_V [N]...Vorspannkraft

δ_S [mm/N]... Nachgiebigkeit Schraube

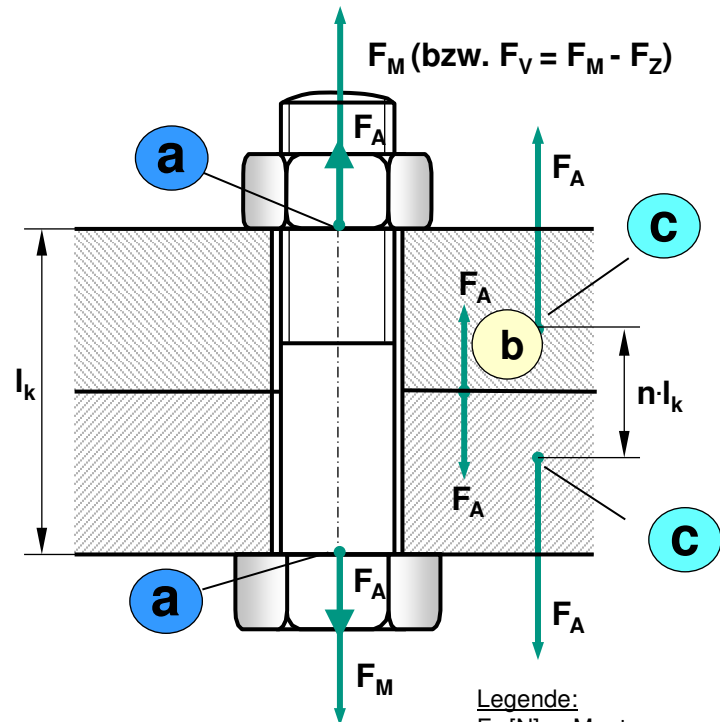
δ_P [mm/N]...Nachgiebigkeit Platte

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall

Die Kräfte in der Schraubverbindung ändern sich bei zusätzlicher Betriebslast

Die Betriebskraft F_A kann an drei unterschiedlichen Bereichen in die Schraubverbindung eingeleitet werden (**Kraftangriff** stets **zentrisch**):

	Lastfall
a	Direkt unter dem Schraubkopf und der Mutterauflage
b	In der Trennfuge der verspannten Teile (eher theoretischer Grenzfall)
c	Zwischen den Grenzfällen a und c (allgemeiner Fall)



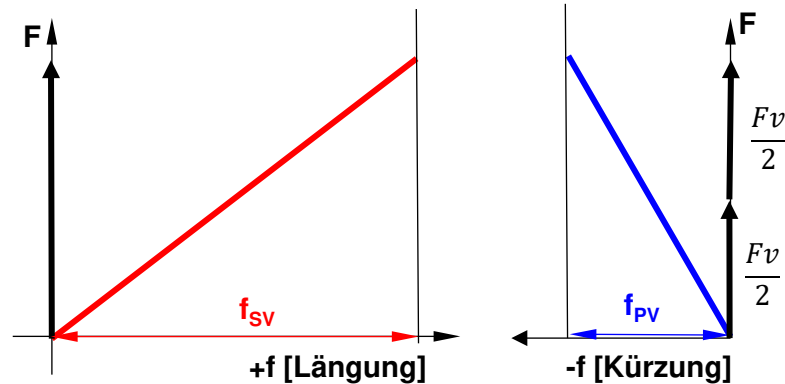
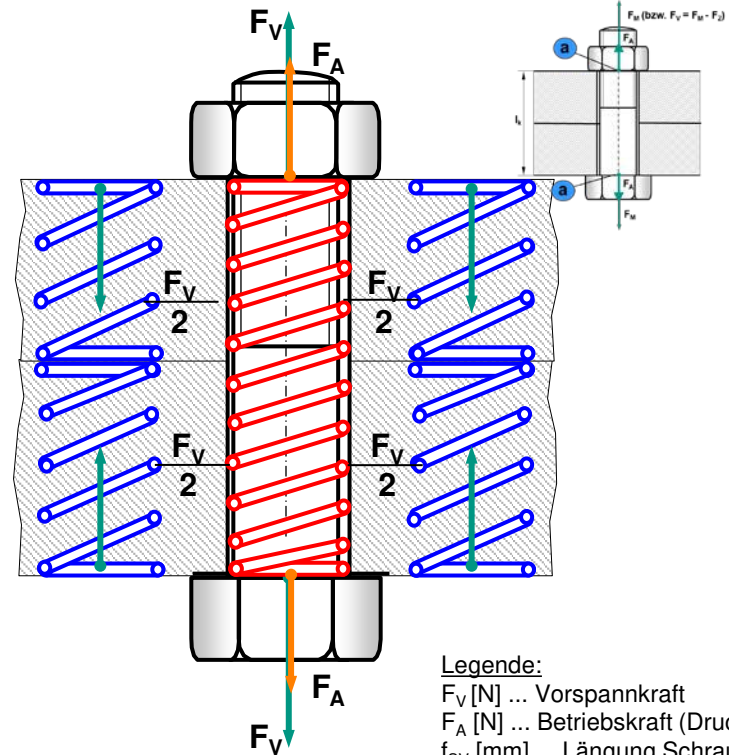
Legende:

- F_M [N] ... Montagevorspannkraft
- F_Z [N] ... Vorspannkraftverlust durch Setzen
- F_A [N] ... Betriebskraft
- F_V [N] ... Vorspannkraft

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall **a**

Was passiert bei einer Betriebskraft direkt unter Schraubenkopf und Mutterauflage?

- Durch die Betriebskraft F_A an, werden Teile oder Teilbereiche der Schraubenverbindung zusätzlich be- oder entlastet
- Entsprechend der zusätzlichen Be- oder Entlastung kommt es durch die Betriebskraft zu zusätzlichen Längungen oder Kürzungen
- **Wie genau lässt sich das modellieren?**

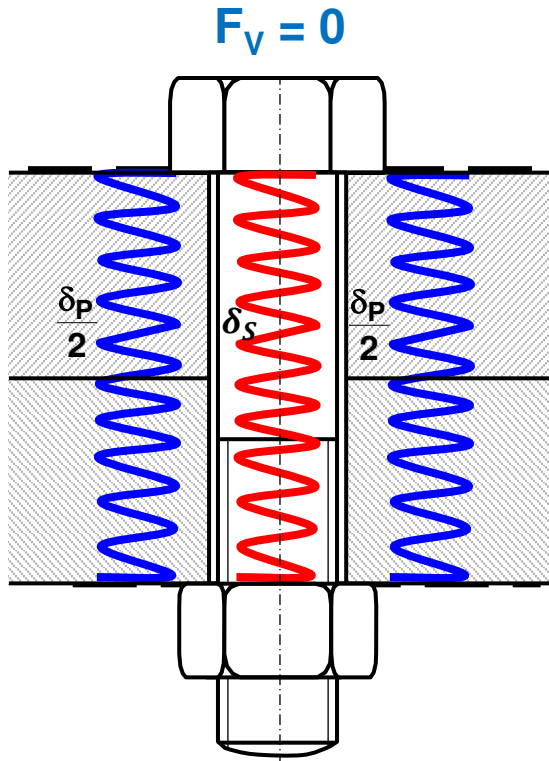


Legende:

- F_V [N] ... Vorspannkraft
- F_A [N] ... Betriebskraft (Druck)
- f_{sv} [mm] ... Längung Schraube
- f_{pv} [mm] ... Längung Platte

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall **a**

Montage der Schraubenverbindung



Legende:

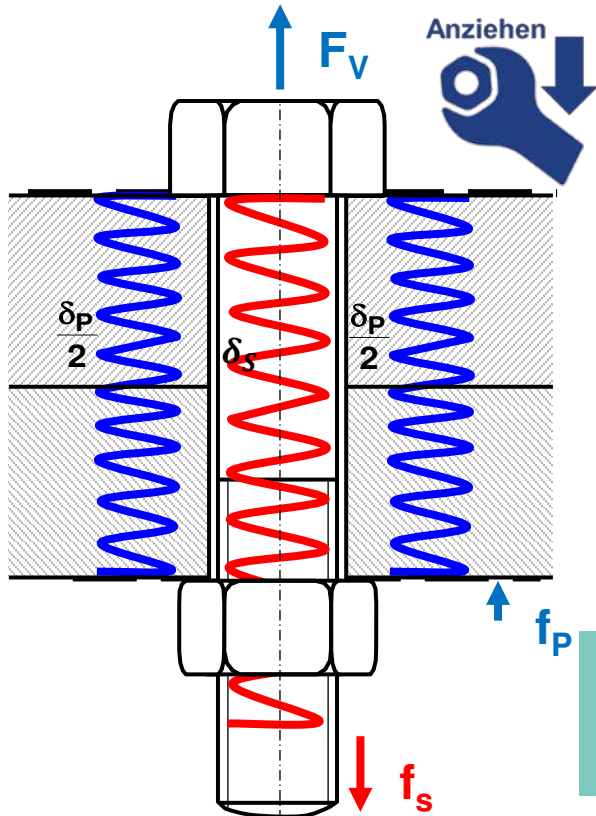
F_V [N]... Vorspannkraft

δ_S [mm/N]... Nachgiebigkeit Schraube

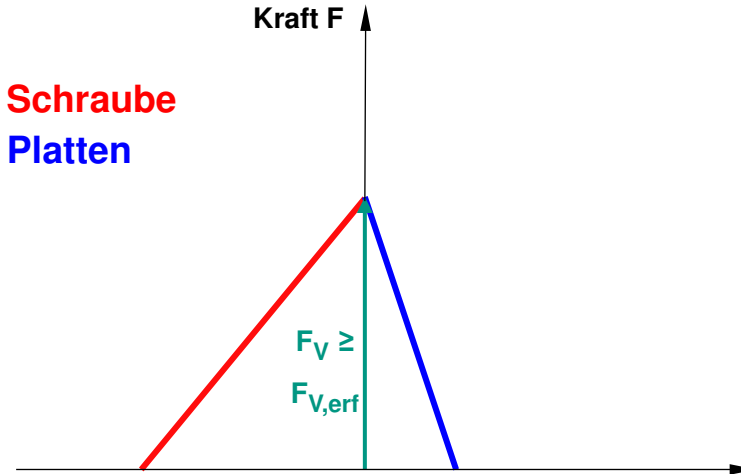
δ_p [mm/N]... Nachgiebigkeit Platte

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall a

Montage der Schraubenverbindung



Schraube
Platten



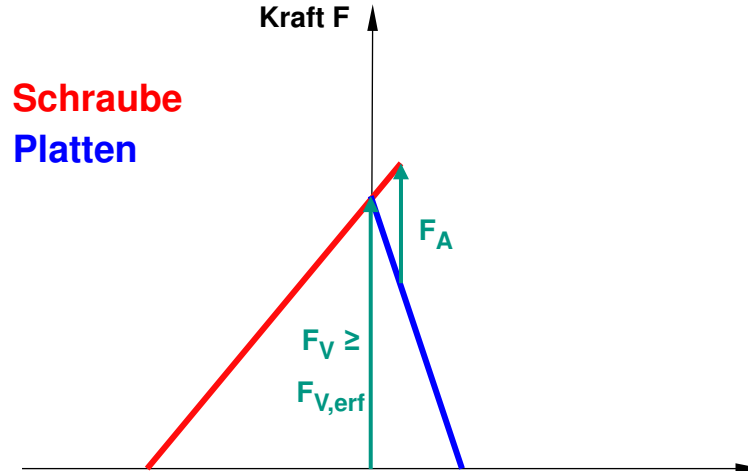
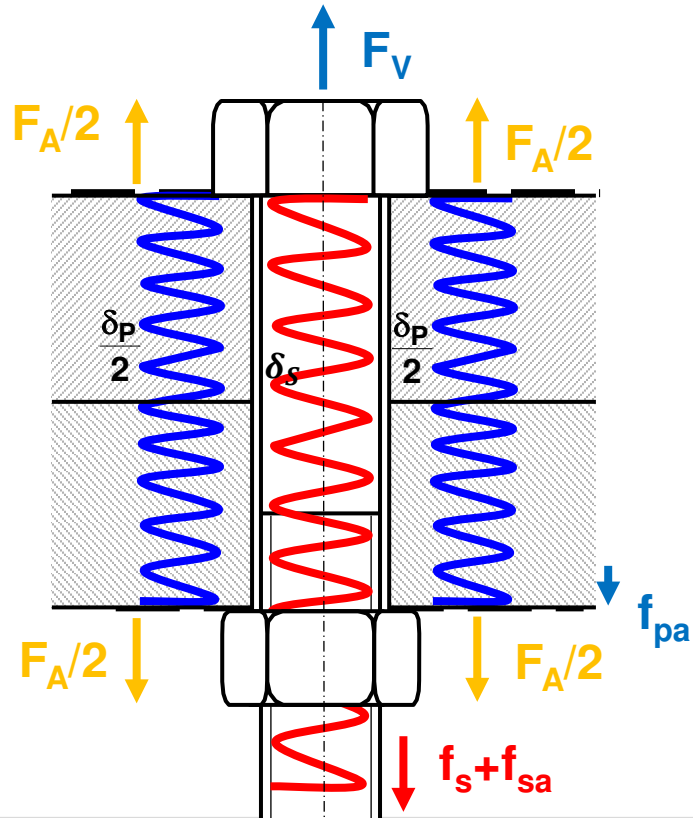
(Elastische Verformung von Schrauben u. Platten
Vorausgesetzt Kraftangriff unter Kopf)

Durch die Vorspannung entsteht eine Zuglast auf die Schraube, → die Schraube langt sich	Durch die Vorspannung entsteht eine Drucklast auf die Platte, → Die Platte verpresst sich
---	--

- Legende:
- F_{Mmin} [N] Minimale Montagevorspannkraft
 - F_z [N] ...Vorspannkraftverlust durch Setzen
 - F_V [N] ...Vorspannkraft
 - $F_{V,erf}$ [N] ...erforderliche Vorspannkraft
 - f_p [mm] ...elastische Verformung der Platte
 - f_s [mm] ...elastische Verformung der Schraube

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall a

Eine Betriebskraft ändert die Verspannungssituation



(Elastische Verformung von Schrauben u. Platten
Vorausgesetzt Kraftangriff unter Kopf)

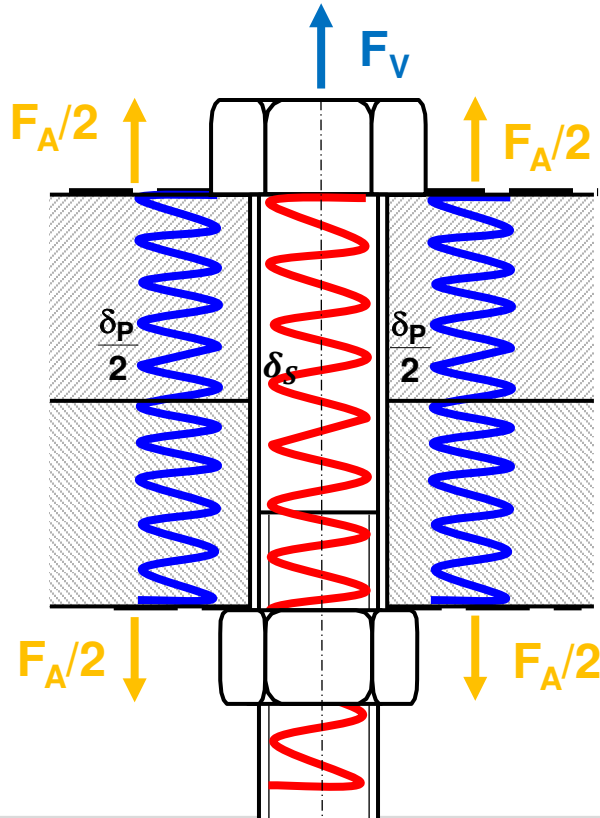
Durch die Betriebskraft entsteht eine zusätzliche Zuglast → die Schraube längt sich weiter

Durch die Betriebskraft wird die Platte entlastet → die Platte kann sich längen

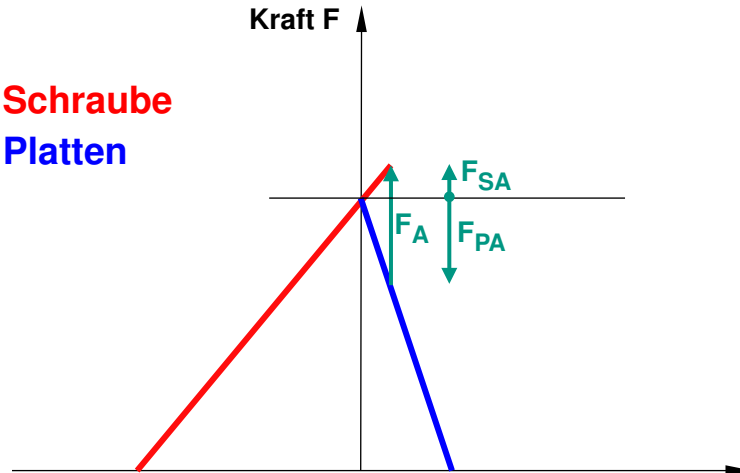
- Legende:
- F_A [N]...Betriebskraft
 - F_{Mmin} ...[N] Minimale Montagevorspannkraft
 - F_z [N]...Vorspannkraftverlust durch Setzen
 - F_V [N]...Vorspannkraft
 - $F_{V,erf}$ [N]...erforderliche Vorspannkraft
 - f_p [mm]...elastische Verformung der Platte
 - f_s [mm]...elastische Verformung der Schraube



Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall a



Schraube
Platten



(Elastische Verformung von Schrauben u. Platten
Vorausgesetzt Kraftangriff unter Kopf)
(ohne thermische Zusatzkraft ΔF_{vth})

$$\Phi_K = \frac{F_{SA}}{F_A}$$

Das Aufbringen einer Betriebskraft im Lastfall a bedeutet:

eine zusätzliche Belastung der Schraube um F_{SA}

eine zusätzliche Entlastung der Platten um F_{PA}

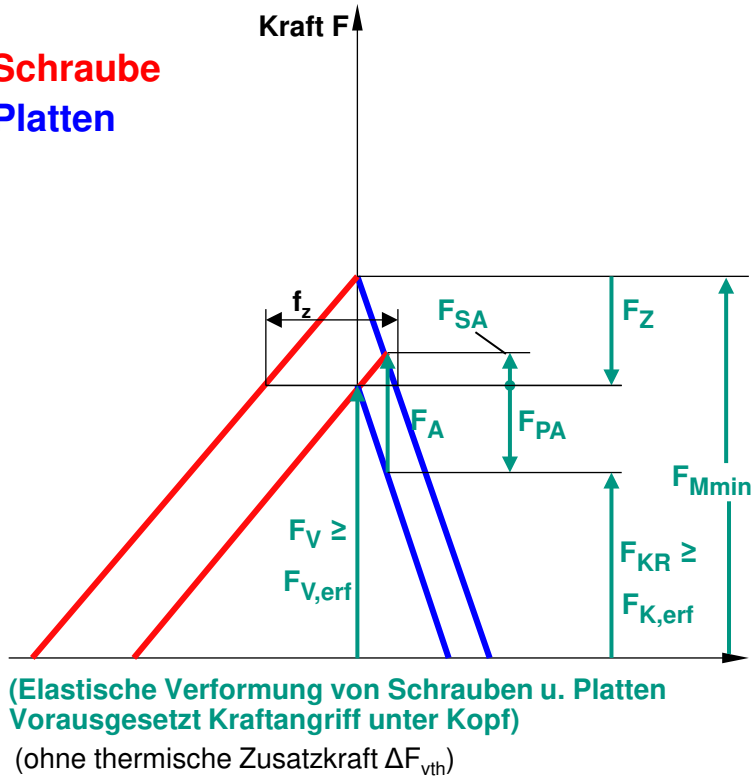
Legende:

- F_A [N]...Betriebskraft
- F_{Mmin} ...[N] Minimale Montagevorspannkraft
- F_Z [N]... Vorspannkraft-verlust durch Setzen
- F_V [N]... Vorspannkraft
- $F_{V,ert}$ [N]...erforderliche Vorspannkraft
- f_p [mm]...elastische Verformung der Platte
- f_s [mm]...elastische Verformung der Schraube
- F_{PA} [N]...Anteil Betriebskraft Platten
- F_{SA} [N]...Anteil Betriebskraft Schraube
- Φ_K []...Kraftverhältnis

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall **a**

Versagen kann durch unzulässige Be- und Entlastung auftreten

Schraube
Platten



Das Aufbringen einer Betriebskraft bedeutet

eine zusätzliche Längung der Schraube durch die Zuglast um F_{SA}

eine zusätzliche Längung der Platten durch die Entlastung um F_{PA}

Wichtig:
Der gesamte Federweg f_{ges} bleibt bei Belastung unverändert, solange die Platten nicht klaffen.

Die Funktion ist erfüllt, solange

$$F_{Smax} > F_A + F_{SA} = F_V + \Phi_K \cdot F_A$$

→ sonst Bruch der Schraube

$$F_V - F_{KR} > F_{PA}$$

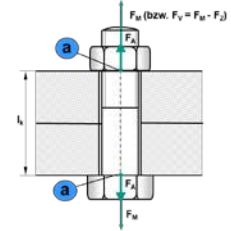
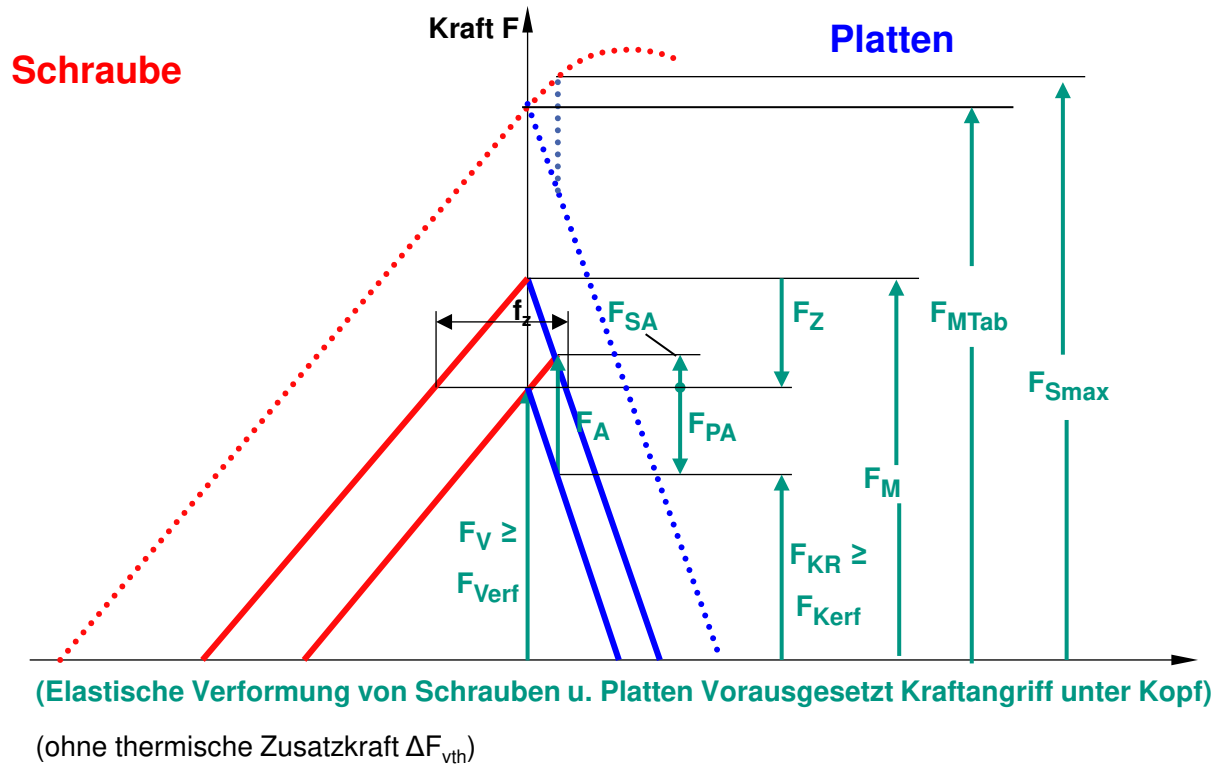
→ Sonst Klaffen (Kontaktverlust)

Legende:

F_A [N]...Betriebskraft
 F_{Mmin} ...[N] Minimale Montagevorspannkraft
 F_Z [N]...Vorspannkraft-verlust durch Setzen
 F_V [N]...Vorspannkraft
 $F_{V,erf}$ [N]...erforderliche Vorspannkraft
 f_p [mm]...elastische Verformung der Platte
 f_s [mm]...elastische Verformung der Schraube
 F_{PA} [N]...Anteil Betriebskraft Platten
 F_{SA} [N]...Anteil Betriebskraft Schraube
 Φ_K [...]...Kraftverhältnis
 f_z [mm]...Setzbetrag

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall a

Die Kenngrößen im Verspannungsschaubild bauen aufeinander auf

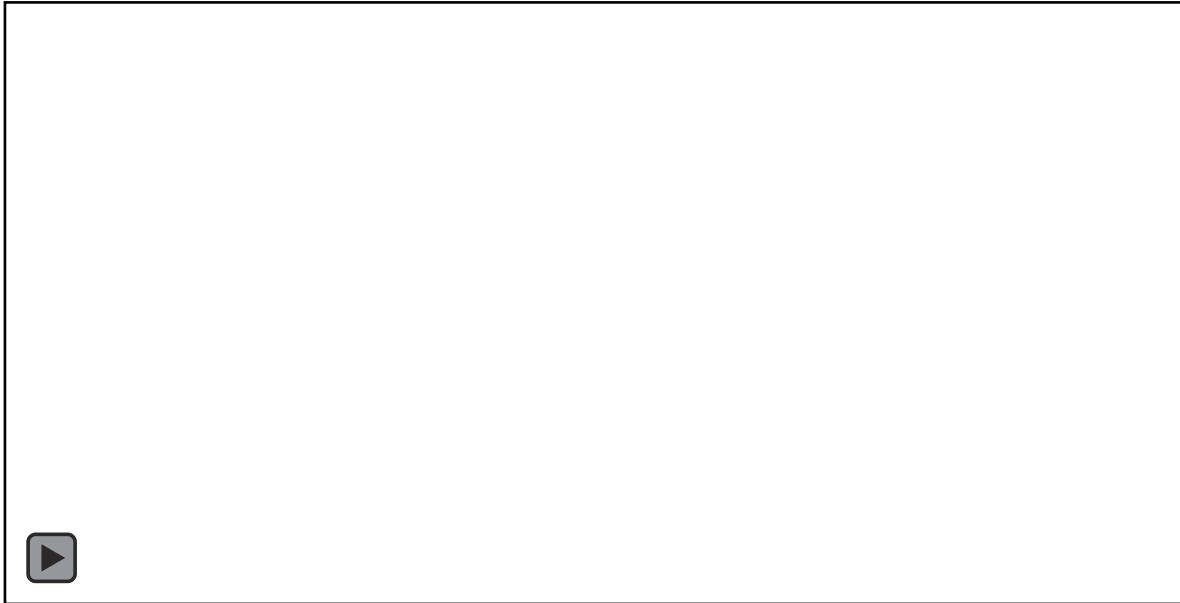


Legende:

- F_{Smax} [N]...Maximal ertragbare Schraubenkraft
- F_A [N]...Betriebskraft
- F_{Mmin} ...[N] Minimale Montagevorspannkraft
- F_Z [N]...Vorspannkraft-verlust durch Setzen
- F_V [N]...Vorspannkraft
- $F_{V,erf}$ [N]...erforderliche Vorspannkraft
- f_p [mm]...elastische Verformung der Platte
- f_s [mm]...elastische Verformung der Schraube
- F_{PA} [N]...Anteil Betriebskraft Platten
- F_{SA} [N]...Anteil Betriebskraft Schraube
- Φ_K [...]...Kraftverhältnis
- f_z [mm]...Setzbetrag
- F_{MTab} [N]...Tabellenwert Montagevorspannkraft
- F_M [N]...Montagevorspannkraft
- F_Z [N]...Vorspannkraftverlust durch Setzen
- F_{KR} [N]...Restklemmkraft
- F_{Kerf} [N]...Erforderliche Klemmkraft

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall **a**

Mit screwEd können Verspannungszustände dargestellt werden

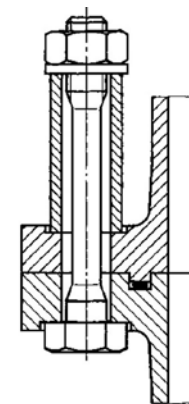


<https://www.ipek.kit.edu/downloads/screw/screw.html>

Konstruktionswissen zur Schraubenverbindung

Wie können Schrauben vor zu hoher Belastung geschützt werden?

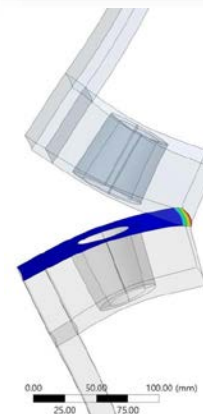
Sollfunktion ZWECK		Lösbare Bauteilverbindung
Wirkung im System: WAS bewirkt das Bauteil?		Die Schraubverbindung verbindet zwei Bauteile (Platten) form- bzw. reibschlüssig, indem Sie die Platten verpresst.
Wirkprinzip WIE bewirkt es das?		Die Schraube wird durch eine Vorspann- und Betriebskraft gelängt, während sie die Platten stauchen.
Funktionales Verhalten beeinflussen		Schraubenkraft minimieren
Gestaltmerkmale	Elastizität der Schraube erhöhen	<p>Wenn die Schraube länger und dünner wird, Dann verringert sich die Schraubenkraft weil die Schraube elastischer wird, da $\delta = \frac{L}{E \cdot A}$</p>



Konstruktionswissen zur Schraubenverbindung

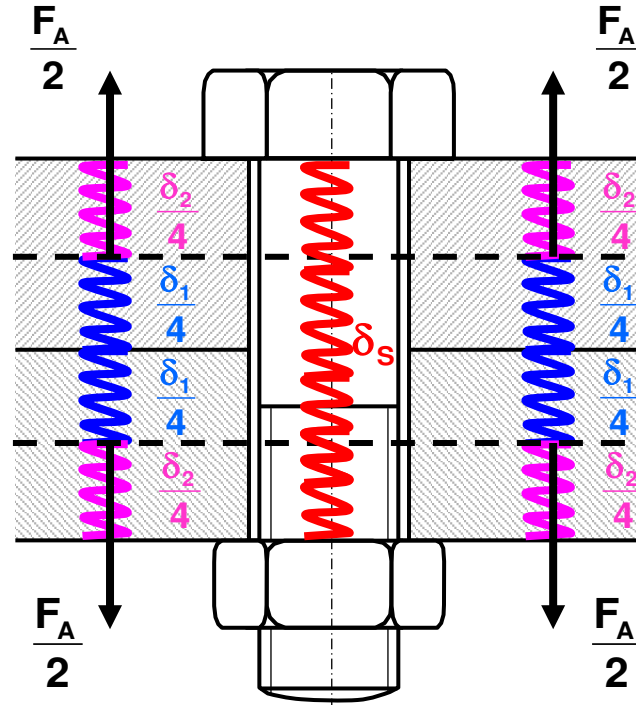
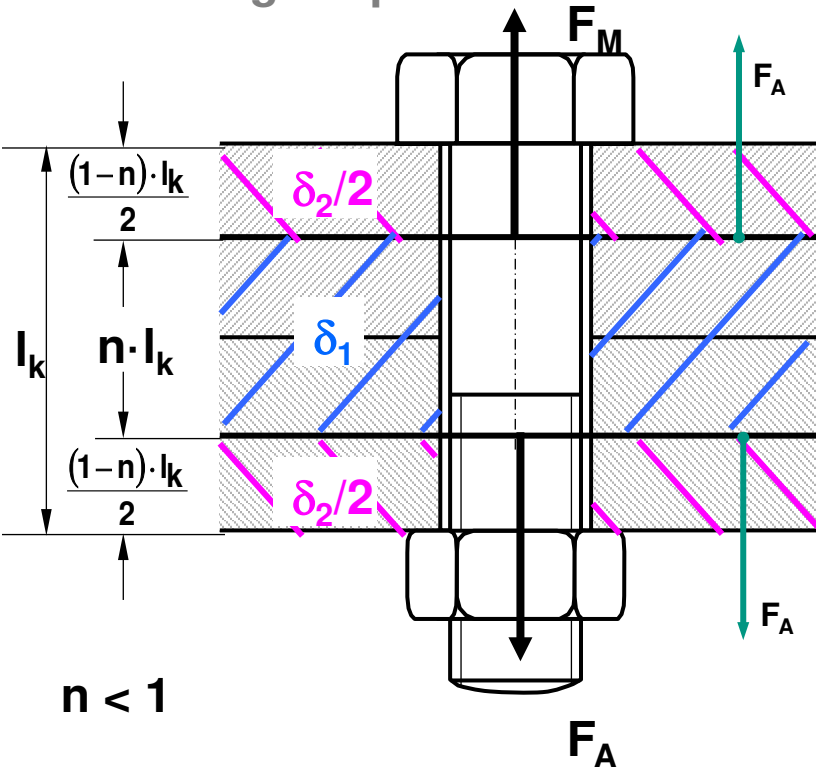
Wie kann das Klaffen verhindert werden?

Sollfunktion ZWECK		Lösbare Bauteilverbindung
Wirkung im System: WAS bewirkt das Bauteil?		Die Schraubverbindung verbindet zwei Bauteile (Platten) form- bzw. reibschlüssig, indem Sie die Platten verpresst. Sie behält dabei eine notwendige Grenzkraft bei, sodass kein Spalt entsteht (→ Klaffen)
Wirkprinzip WIE bewirkt es das?		Die Schraube speichert eine genügend große Dichtkraftreserve, sodass die restliche Klemmkraft $F_{KR} \geq 0$ ist
Funktionales Verhalten beeinflussen		Schraubenkraft maximieren, da dadurch das Kraftverhältnis Φ_K erhöht wird, da für die Grenzkraft gegen Klaffen gilt: $F_{Aab} = \frac{1}{1-\Phi_K} \cdot F_V$
Gestaltungsmerkmale	Steifigkeit der Schraube erhöhen	Wenn die Schraube kürzer und breiter werden, Dann erhöht sich der Anteil der Schraubenkraft an der Betriebskraft und damit die Dichtkraftreserve weil die Steifigkeit der Schraube und somit Φ_K steigt
	Steifigkeit der Platten Senken	Wenn die Platte durch eine Hülse weniger steif wird, Dann steigt der Anteil der Schraubenkraft an der Betriebslast Weil sich der Anteil der Betriebslast auf die Platten senkt






Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall C

Wie verändert sich unser Verständnis, wenn wir einen beliebigen Kraftangriffspunkt betrachten?



Platte in 2 Federn aufgeteilt:

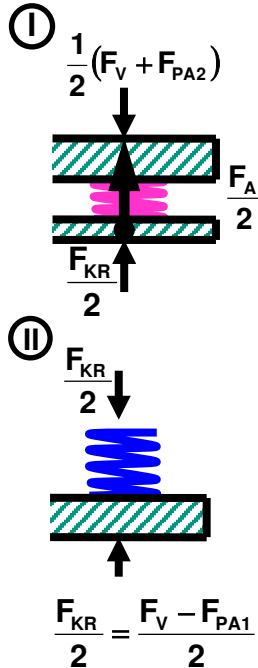
-  Druckfeder (≡ Teilplatte 1) mit δ_1
-  Druckfeder (≡ Teilplatte 2) mit δ_2
- $\delta_p = \delta_1 + \delta_2$
-  Zugfeder (≡ Schraube) mit δ_s

Legende:

- F_M [N] ... Montagevorspannkraft
- F_A [N] ... Betriebskraft
- l_F [mm] ... Flanschlänge
- l_K [mm] ... Klemmlänge
- δ_F [mm/N] ... Nachgiebigkeit Flansch
- δ_S [mm/N] ... Nachgiebigkeit Schraube
- n [] ... Krafteinleitungsfaktor

Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall **C**

Im Allgemeinen Fall scheint die Schraube weicher und die Platte steifer



- Gleichgewicht mit Schraube:

$$\cancel{F_V} + F_{PA2} = \cancel{F_V} + F_{SA}$$

$$\rightarrow F_{PA2} = F_{SA}$$

- Kräftebilanz I:

$$\cancel{F_V} + F_{PA2} = F_A + \cancel{F_V} - F_{PA1}$$

$$\rightarrow F_A = F_{PA1} + F_{SA}$$

$$f_{ges} = f_{SV} + f_{PV} = \text{const.}$$

$$\delta_1 \cdot F_{PA1} - \delta_2 \cdot F_{PA2} = \delta_S \cdot F_{SA}$$

$$\delta_1 \cdot (F_A - F_{SA}) - \delta_2 \cdot F_{SA} = \delta_S \cdot F_{SA}$$

Kernaussage

$$F_{SA} = F_A \cdot \frac{\delta_1}{\delta_S + \delta_2 + \delta_1}$$

Eine Schraubenverbindung mit allgemeinem Kraftangriff verhält sich wie eine mechanisch äquivalente

Schraubenverbindung mit
 $\delta'_S = \delta_S + \delta_2 > \delta_S \rightarrow$ **Weicher**
 $\delta'_P = \delta_1 < \delta_P \rightarrow$ **Steifer**

Legende:

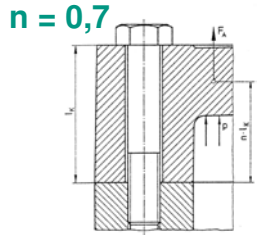
F_A [N] ... Betriebskraft
 F_{PA} [N] ... Anteil Betriebskraft Platten

F_{SA} [N] ... Anteil Betriebskraft Schraube
 F_{KR} [N] ... Restklemmkraft
 F_V [N] ... Vorspannkraft



Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall C

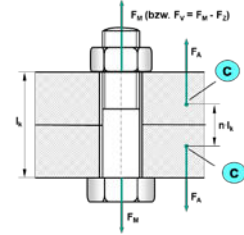
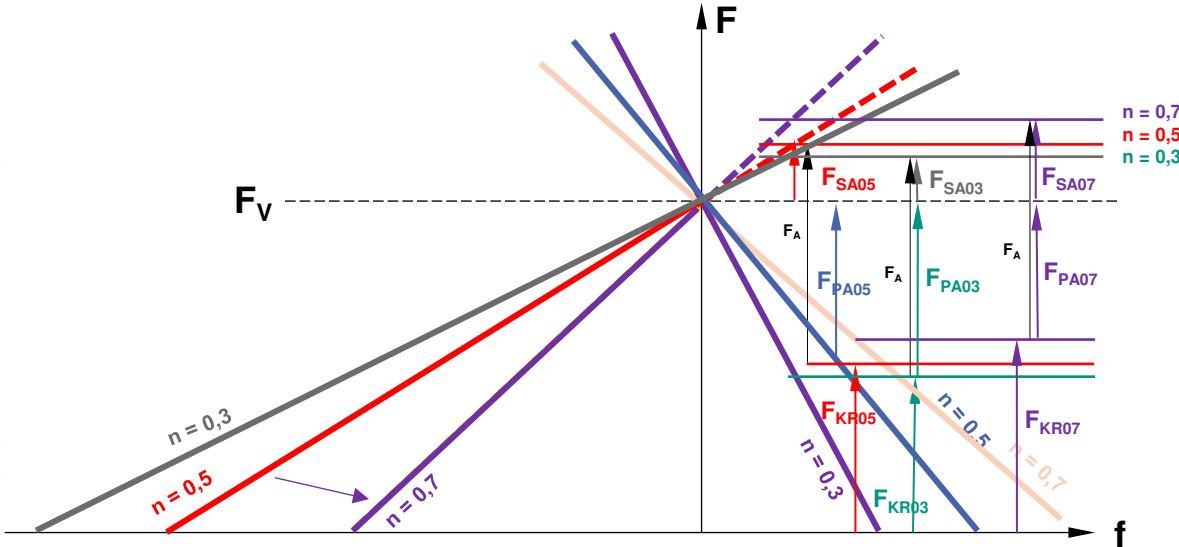
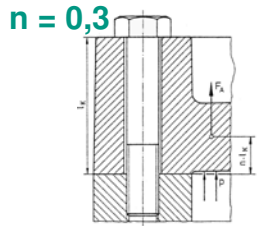
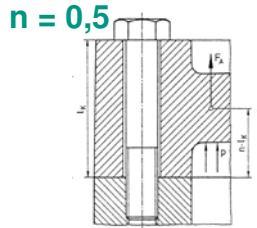
Ändern wir die Krafteinleitung, so ändern wir die Krafteinflüsse



$$\delta_P = \delta_1 + \delta_2$$

$$\delta_1 = n \cdot \delta_P; \quad \delta_2 = (1 - n) \cdot \delta_P \rightarrow F_{SA} = F_A \cdot \frac{n \cdot \delta_P}{\delta_S + \delta_P}$$

$$F_{SA} = F_A \cdot n \frac{\delta_P}{\delta_S + \delta_P} = F_A \cdot n \cdot \Phi_K$$



Abhängig von der Krafteinleitung n ändern sich die Steigungen im Verspannungsschaubild.

- Legende:**
- F_A [N] ... Betriebskraft
 - F_{PA} [N] ... Anteil Betriebskraft Platten
 - F_{SA} [N] ... Anteil Betriebskraft Schraube
 - F_{KR} [N] ... Restklemmkraft
 - F_V [N] ... Vorspannkraft
 - f_{PV} [mm] ... Verschiebung Platte
 - f_{SV} [mm] ... Verschiebung Schraube
 - f_{ges} [mm] ... Gesamtverschiebung
 - n [] ... Krafteinleitungsfaktor
 - Φ_K [] ... Kraftverhältnis
 - δ_S [mm/N] ... Nachgiebigkeit Schraube
 - δ_P [mm/N] ... Nachgiebigkeit Platte

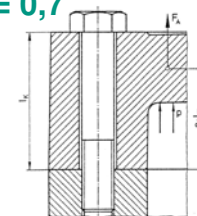
Konstruktionswissen zur Schraubenverbindung

Wie können Schrauben vor zu hoher Belastung geschützt werden?

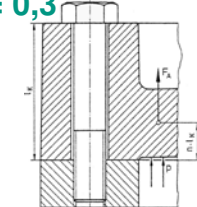
Sollfunktion ZWECK		Lösbare Bauteilverbindung
Wirkung im System: WAS bewirkt das Bauteil?		Die Schraubverbindung verbindet zwei Bauteile (Platten) form- bzw. reibschlüssig, in dem Sie die Platten verpresst.
Wirkprinzip WIE macht es das?		Die Schraube wird durch eine Vorspann- und Betriebskraft gelängt, während sie die Platten komprimiert.
Funktionales Verhalten beeinflussen		Schraubenkraft minimieren
Gestaltmerkmale	Krafteinleitungspunkt ändern	<p>Wenn sich der Krafteinleitungsfaktor verringert, Dann verringert sich die Schraubenkraft weil die Schraube elastischer wirkt, da $F_{SA} = F_A \cdot n \frac{\delta_P}{\delta_S + \delta_P} = F_A \cdot n \cdot \Phi_K$</p>



$n = 0,7$



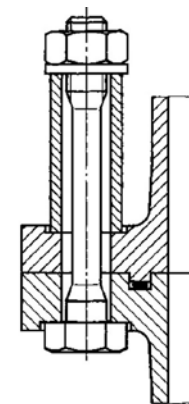
$n = 0,3$



Konstruktionswissen zur Schraubenverbindung

Wie können Schrauben vor zu hoher Belastung geschützt werden?

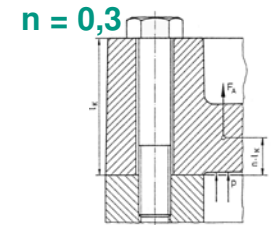
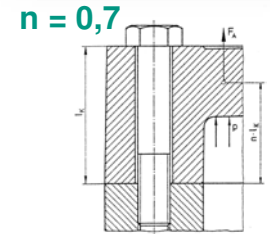
Sollfunktion ZWECK		Lösbare Bauteilverbindung
Wirkung im System: WAS bewirkt das Bauteil?		Die Schraubverbindung verbindet zwei Bauteile (Platten) form- bzw. reibschlüssig, indem Sie die Platten verpresst.
Wirkprinzip WIE bewirkt es das?		Die Schraube wird durch eine Vorspann- und Betriebskraft gelängt, während sie die Platten stauchen.
Funktionales Verhalten beeinflussen		Schraubenkraft minimieren
Gestaltmerkmale	Krafteinleitung durch Hülse verändern	Wenn die Platte durch eine Hülse ergänzt wird Dann reduziert sich die Betriebskraft auf die Schraube Weil sich der Krafteinleitungspunkt verändert und damit die Schraube „weicher“ wirkt.



Konstruktionswissen zur Schraubenverbindung

Wie kann das Klaffen verhindert werden?

Sollfunktion ZWECK		Lösbare Bauteilverbindung
Wirkung im System: WAS bewirkt das Bauteil?		Die Schraubverbindung verbindet zwei Bauteile (Platten) form- bzw. reibschlüssig, in dem Sie die Platten verpresst.
Wirkprinzip WIE macht es das?		Die Schraube wird durch eine Vorspann- und Betriebskraft gelängt, während sie die Platten komprimiert.
Funktionales Verhalten beeinflussen		Restklemmkraft erhöhen
Gestaltmerkmale	Krafteinleitungspunkt ändern	Wenn sich der Krafteinleitungsfaktor erhöht, Dann erhöht sich die Restklemmkraft weil die Schraube mehr Betriebskraft aufnimmt und somit die Entlastung der Platten reduziert wird

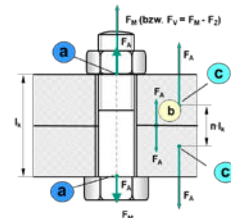


Schraubenverbindungen – Modellbildung im Lastfall

Auch Grenzfälle sind durch das allgemeine Modell abbildbar

- Aus allgemeinem Fall **c** → Grenzfälle **a**, **b**

$$F_{SA} = F_A \cdot \frac{\delta_1}{\delta_S + \delta_2 + \delta_1} = F_A \cdot n \frac{\delta_P}{\delta_S + \delta_P}$$

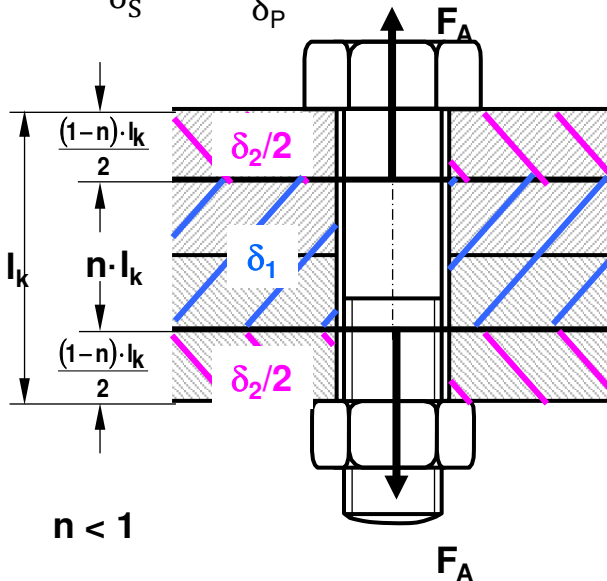


- **a** $n=1$ Kraftangriff unter Kopf
 $\delta_2 \rightarrow 0; \delta_1 \rightarrow \delta_P$

- **b** $n=0$ Kraftangriff in der Klemmfuge
 $\delta_2 \rightarrow \delta_P; \delta_1 \rightarrow 0$

Kernaussage:

Für $n=0$ gilt:
 $F_{SA}=0$, die Schraube wird nicht stärker belastet.
 Die Platte erscheint ∞ steif.

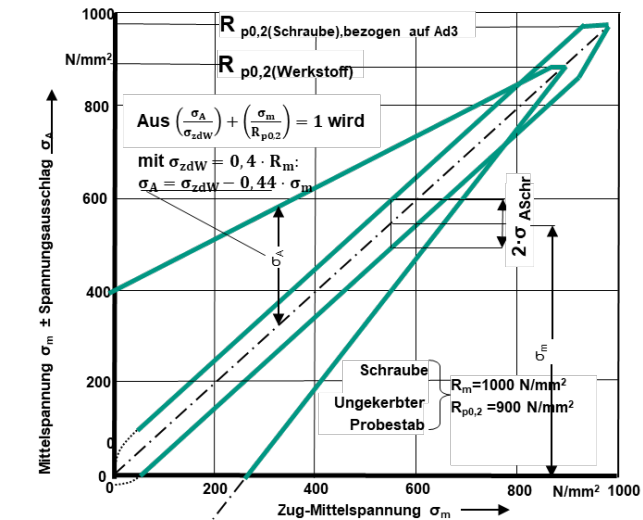
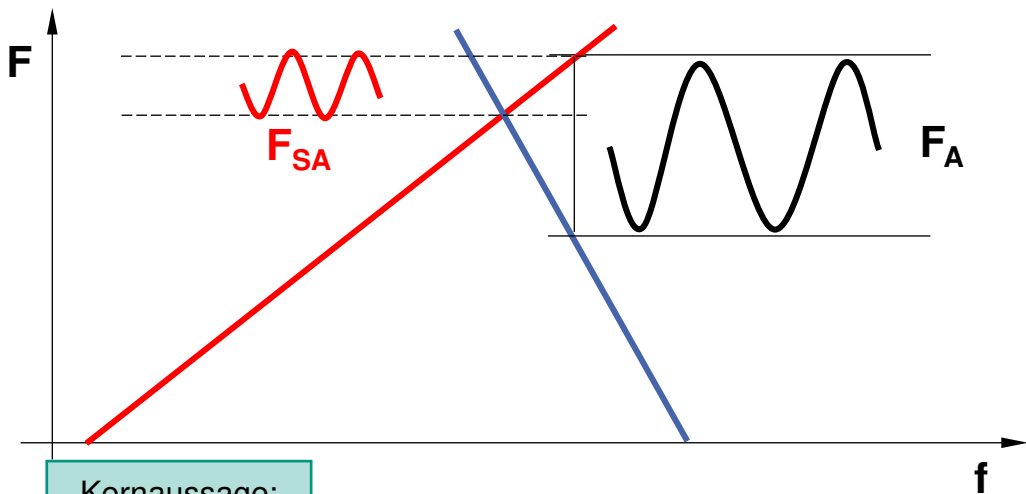


Legende:
 F_A [N] ... Betriebskraft
 F_{SA} [N] ... Anteil Betriebskraft Schraube
 n [] ... Kräfteinleitungsfaktor
 δ_S [mm/N] ... Nachgiebigkeit Schraube
 δ_P [mm/N] ... Nachgiebigkeit Platte

Schraubenverbindungen – Wirkung im System

Auch dynamische Belastungen müssen für die Dimensionierung beachtet werden

■ $F_S = F_V + \Phi_K \cdot F_A$



Smith-Diagramm eines ungekerbten Rundstabs und einer Schraube der Festigkeitsklasse 10.9

Quelle: Wiegand/Kloos/Thomala

Kernaussage:

Auf die Schraubenbeanspruchung F_{SA} **entfällt nur ein Teil** der dynamischen Gesamtbetriebskraft F_A .
Die Schraubenkraft im Betrieb wird wesentlich durch das Verformungsverhalten der Schraubenverbindung (Gestalt der Stützstrukturen) beeinflusst!

Legende:

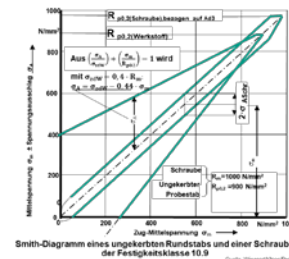
- F_A [N] ... Betriebskraft
- F_S [N] ... Schraubenkraft
- F_V [N] ... Vorspannkraft
- F_A [N] ... Axialkraft
- Φ_K [] ... Kraftverhältnis
- t [s] ... Zeit



Konstruktionswissen zur Schraubenverbindung

Wie kann meine Schraube Dauerfest gestaltet werden?


Sollfunktion ZWECK		Lösbare Bauteilverbindung
Wirkung im System: WAS bewirkt das Bauteil?		Die Schraubverbindung verbindet zwei Bauteile (Platten) form- bzw. reibschlüssig, in dem Sie die Platten verpresst.
Wirkprinzip WIE bewirkt es das?		Aufgrund des Gewindes ist die Schraube ein hochgradig gekerbtes Bauteil.
Funktionales Verhalten beeinflussen		Dauerfestigkeit gewährleisten
Gestaltungsmerkmale	Schraubenfestigkeit senken	Wenn die Schraube eine geringere Festigkeit hat, Dann erhöht sich die Dauerfestigkeit weil die Schraube sich an den Kerben mehr plastische Verformung zulässt.
	Kerbschlagzähigkeit erhöhen	Wenn die Schraube nach der Fertigung nochmals kalt-verformt wird (schlussrollen), Dann erhöht sich die Dauerfestigkeit Weil die eingebrachte Druckspannung der Zugspannung durch den Betrieb entgegenwirkt





 Motivation, Lernziele und Übersicht

 Klassifikation

 Modellbildung der montierten Schraubenverbindung

 Modellbildung im Betrieb

 Zusammenfassung



Problem

Schraubenverbindungen sind nicht einfach auszulegen, denn es wirken viele Gestaltungselemente zusammen.

Ziele

- **Klassifikation** von Schraubenverbindungen kennen und unterscheiden können F11
- Grundvoraussetzungen für die Funktionserfüllung von Kraft-Schraubverbindungen kennen und erklären können F14ff
- Mithilfe eines Federmodells die Funktion und die wirkenden Kräfte in der Schraube erklären können F18ff
- Ein Verspannungsschaubild einer Schraubverbindung erstellen, erklären und diskutieren können F19ff
- Die verschiedenen Einflüsse von Betriebskräften und Setzen auf die Be- und Entlastung in einer Schraubverbindung erklären können F21

Fazit

Die Schraubverbindung ist eine der zentralen Verbindungsarten im Maschinenbau. Vor allem hochbelastete Kraftschrauben müssen für eine sichere Funktionserfüllung dimensioniert werden. Dafür verwendete Materialwerte, aber auch statische und dynamische Lasten sowie die Auswirkung auf die Bauteilgestaltung sind dafür entscheidend.