

Schraubennachweis nach VDI 2230 im Zusammenhang mit der FE-Analyse

CADFEM Schweiz 2013, Zürich

Beat Schmied
Schmied Engineering GmbH, CH-4563 Gerlafingen

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung / Definitionen
- FE-Modellklassen nach VDI 2230 Blatt2
- Strukturspannungsnachweis
 - KISSsoft-Parameter für FE-Simulation
 - Direkte Auswertung von FE-Ergebnissen nach VDI
 - Detaillierter-Nachweis mit KISSsoft
- Fragen

Vorweg

- Dieser kurze Beitrag kann nur auf das Zusammenspiel zwischen der FE-Simulation und dem Nachweis nach VDI 2230 eingehen.
- Für eine fundierte Einführung in die Richtlinie bietet CADFEM ein entsprechendes Seminar an.

Einleitung

Grundsätzliches zur VDI 2230

- Es handelt sich um einen Nennspannungsnachweis. Mit dem Entwurf von Blatt 2 wird jedoch der Bezug zur FE-Simulation hergestellt.
- Basis ist die kraftschlüssige Verbindung. Diese Bedingung ist zentral für wiederkehrende Lasten. Können die verspannten Bauteile unter zyklischer Belastung auch nur minimale Relativbewegungen ausführen, ist das Lockern und damit das Versagen nur eine Frage der Zeit.
 - ⇒ Dieses lokale Kriterium muss jede Schraube im Verband erfüllen.
- Bei extremen Ausnahmelasten ist das lokale Kriterium nicht sinnvoll und vor allem unwirtschaftlich. In diesen Fällen genügt es eine ausreichende Rutschsicherheit für die ganze Schraubengruppe nachzuweisen
 - ⇒ globales Kriterium (in VDI 2230 als Nachweis nicht enthalten).
- Die Richtlinie behandelt auch das einseitige Klaffen der Verbindung. Das vollständige Abheben ist jedoch nicht abgedeckt und in KISSsoft nicht enthalten. Dies kann in Ausnahmesituation jedoch zulässig sein, solange die Schraube nicht plastifiziert und damit an Vorspannung verliert.

Einleitung

Anwendung - Linearportale

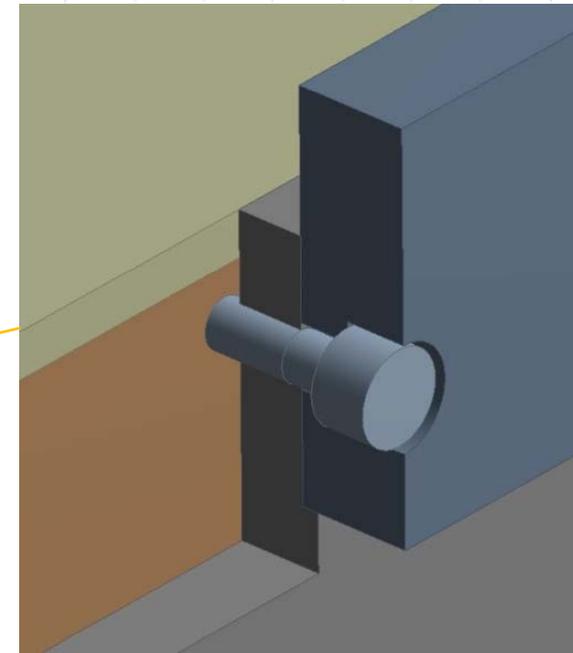
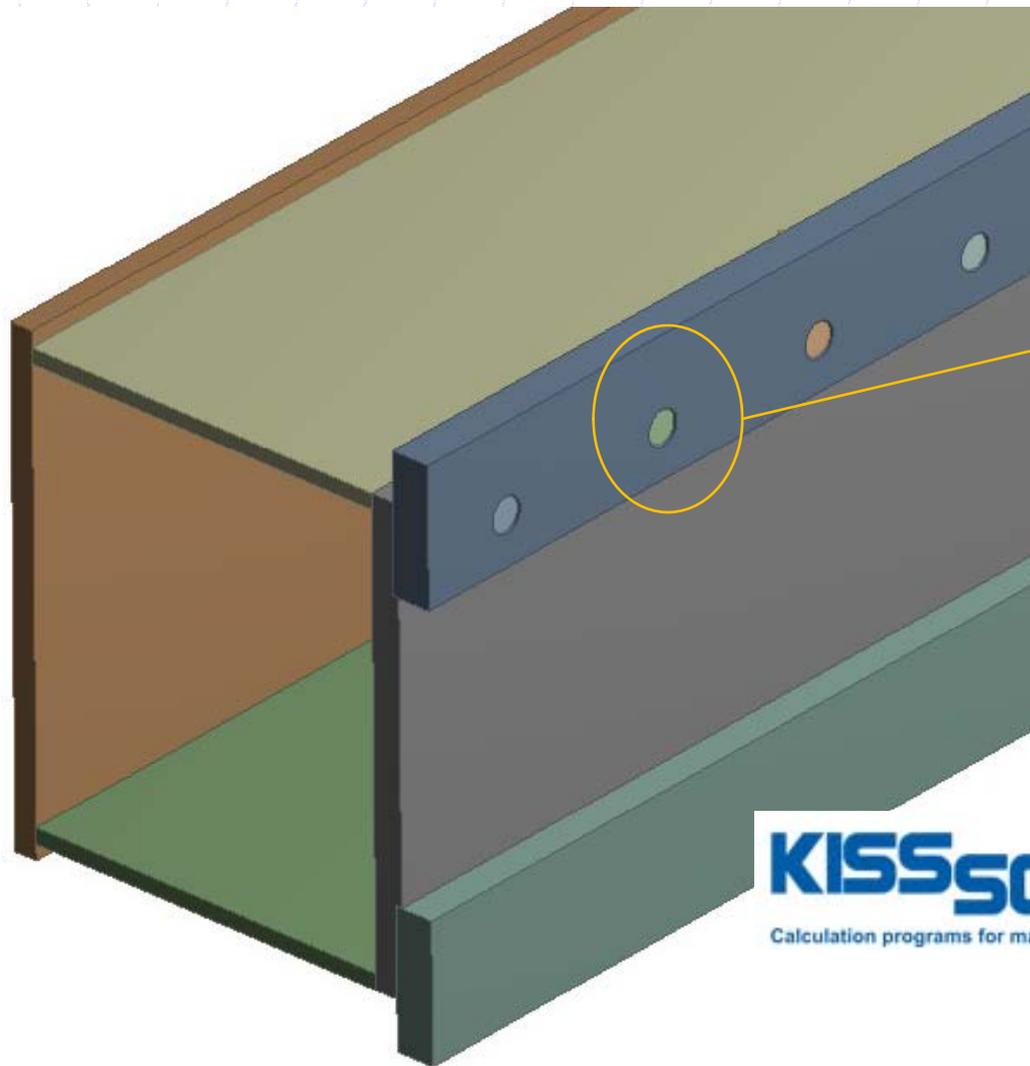


GÜDEL

Güdel AG, Langenthal
www.gudel.com

Einleitung - Anwendungsbeispiel

Nachweis der Schienenschrauben der Y-Achse



KISSSOFT
Calculation programs for machine design

ANSYS[®]

Verspannungsschaubild

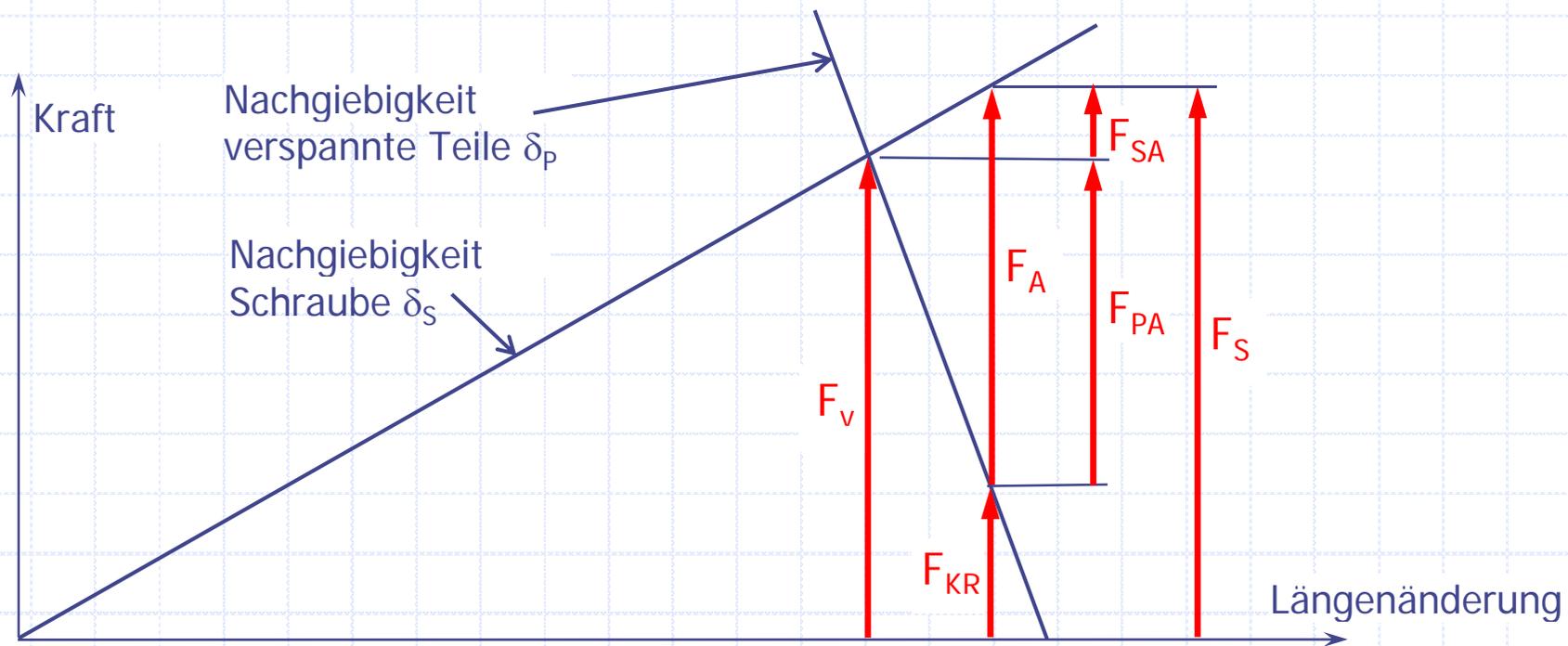
F_V Schraubenvorspannkraft (Lastschritt 1) $\leq 0.9 \cdot F_{S \text{ Rp}0.2}$

F_S Schraubenkraft (Lastschritt i) $\leq F_{S \text{ Rp}0.2}$

F_{SA} axiale Schraubenzusatzkraft (massgebend für Ermüdung) $\leq F_{SA \text{ zul}}$

F_A axiale Betriebskraft auf Schraubenverbindung (wird für Nachweis benötigt)

F_{KR} Restklemmkraft in der Trennfuge $\geq F_{KR \text{ erf}}$



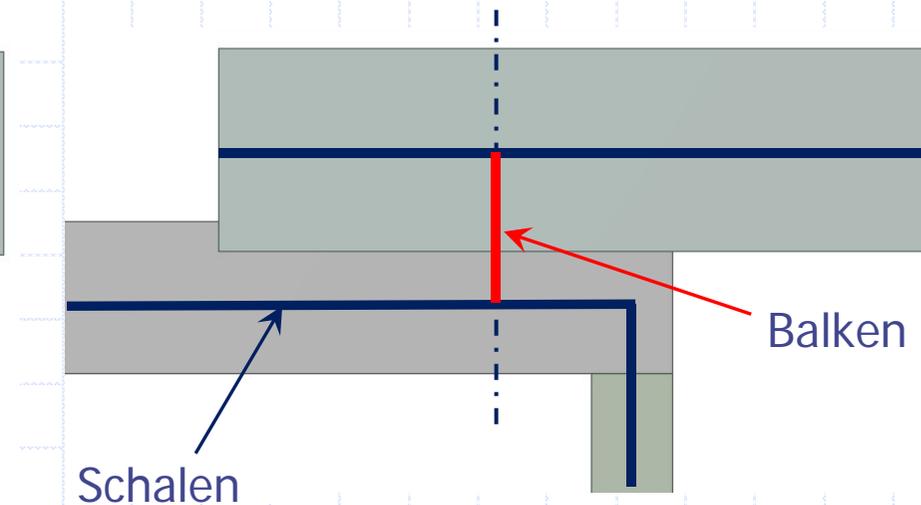
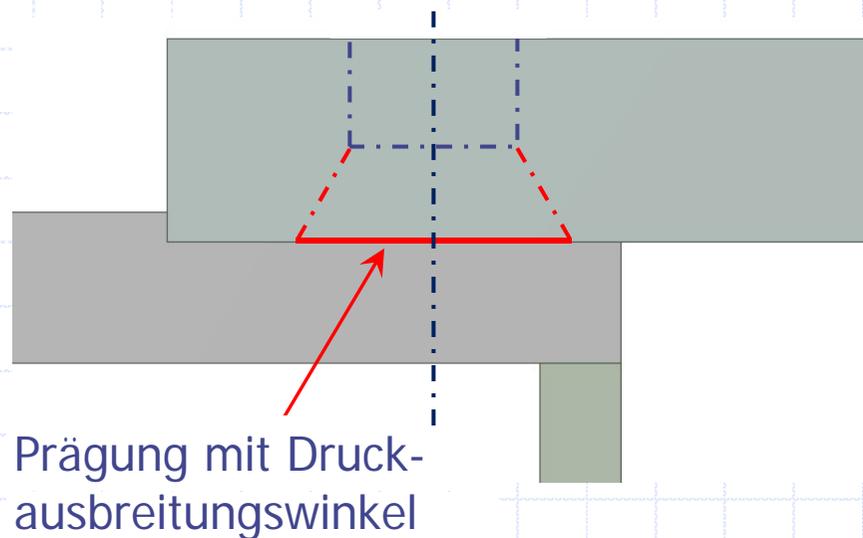
FE-Modellklassen

nach VDI 2230 Blatt 2

Entwurf 2011: Systematische Berechnung hochbeanspruchter
Schraubenverbindungen - Mehrfachschraubenverbindungen

Nennspannungsnachweis

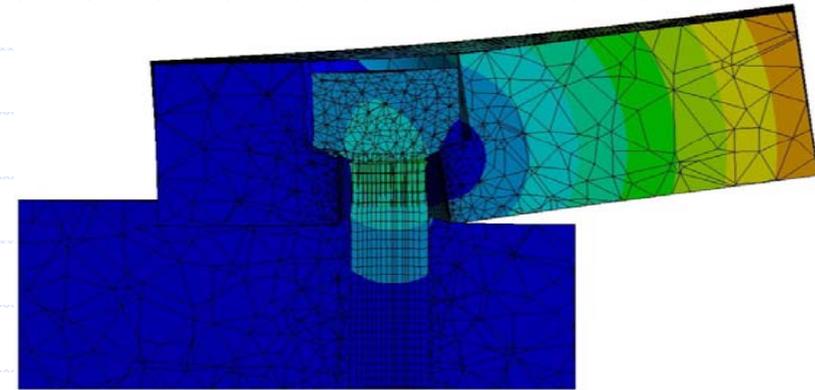
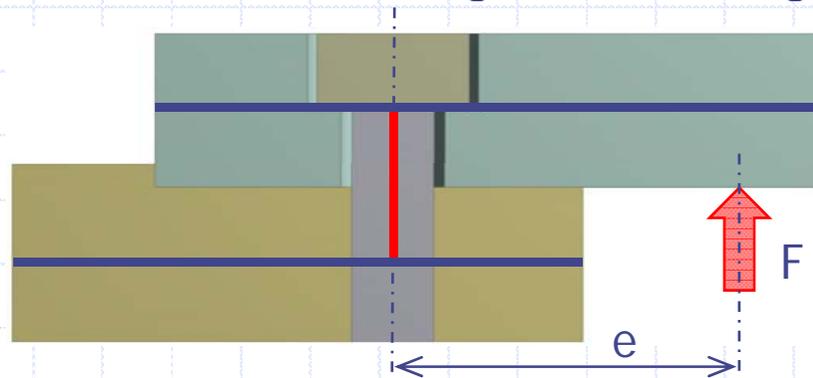
- I. Keine Schraube, keine Bohrung, nur Kontakt
⇒ Schnittgrößen im Verbundkontakt
- II. Schraube vereinfacht modelliert ohne Vorspannung
als Balken (oder Feder oder Gelenk)
⇒ Schnittgrößen im Balken



- ⇒ Die lokalen Steifigkeitsverhältnisse werden analytisch berücksichtigt.
- ⇒ Das FE-Modell liefert einzig die Betriebslasten.

Hinweis zu Schalenmodellen ohne Vorspannung

Die lokale Steifigkeit der Verbindung muss im Modell enthalten sein. Die Schraube alleine ergibt in der Regel ein viel zu weiches Verhalten.



Biegemoment auf Schraubenverbindung

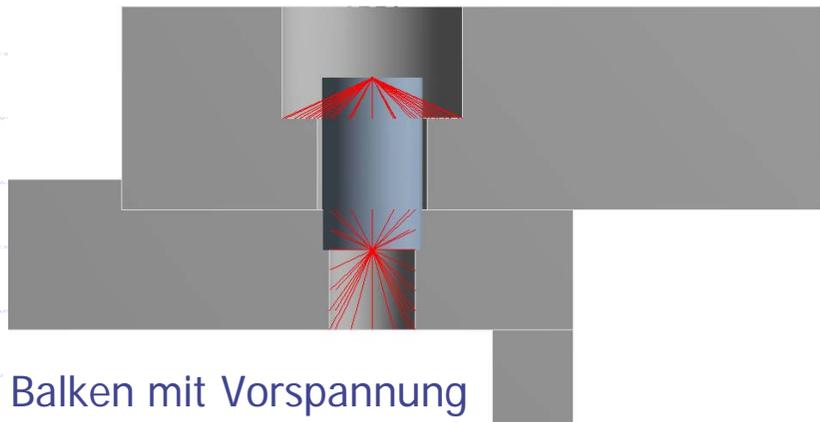
$$M_b = e \times F = 225 \text{ Nm}$$

Bei genügender Vorspannung nimmt der Kontakt zwischen den Bauteilen das Moment auf. Für die Schraube selber verbleiben noch $M_b \approx 1.1 \text{ Nm}$

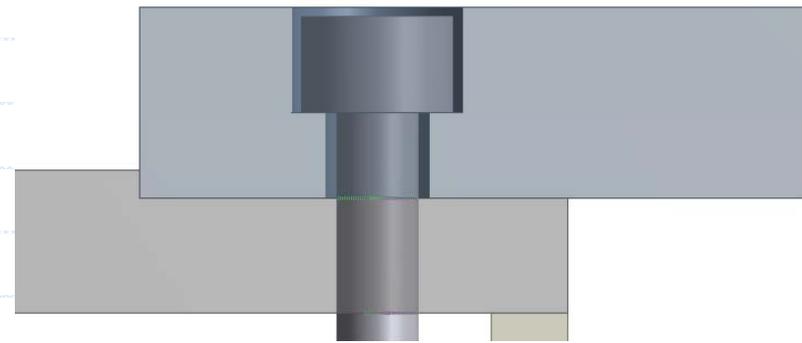
Möglichkeiten: Entweder Kontakt zwischen den Bauteilen mit Kontaktsteifigkeit definieren oder der Schraube einen grösseren Durchmesser zuordnen.

Strukturspannungsnachweis ¹⁾

- III. Schraube vereinfacht modelliert mit Vorspannung
Gewindebereich mit Kerndurchmesser ²⁾, Kontaktdefinitionen
⇒ Schraubenkraft, Schnittgrößen im Kontakt
⇒ Die lokalen Steifigkeitsverhältnisse sind mindestens teilweise im FE- Modell enthalten.



Balken mit Vorspannung



Schraubenschaft mit Vorspannung

- 1) Der Begriff „Strukturspannungsnachweis“ ist für Schraubenverbindungen nicht üblich. Es ist eine „Schmied’sche“ Analogie zum Schweissnahtnachweis.
- 2) Statt Kerndurchmesser oft Durchmesser des Spannungsquerschnitts (direkte Spannungsauswertung, steifere Schraube ergibt höheren Schraubenanteil F_{SA}).

Kerbspannungsnachweis

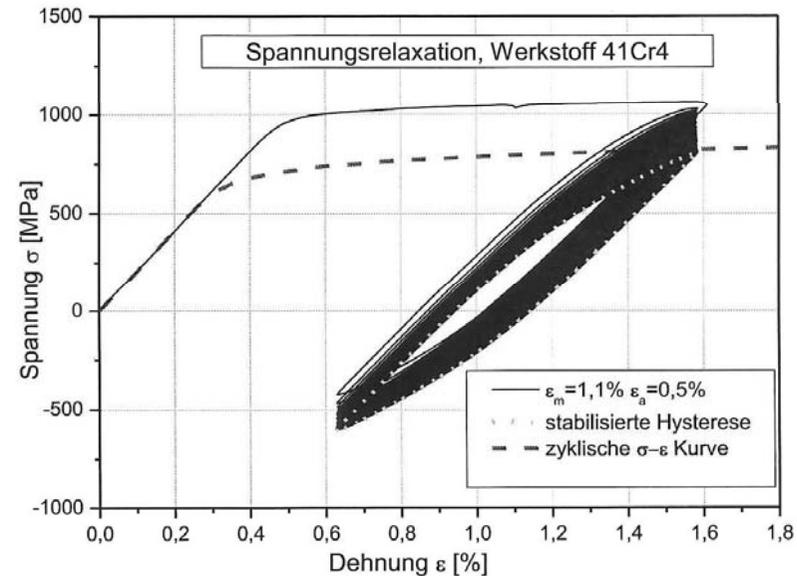
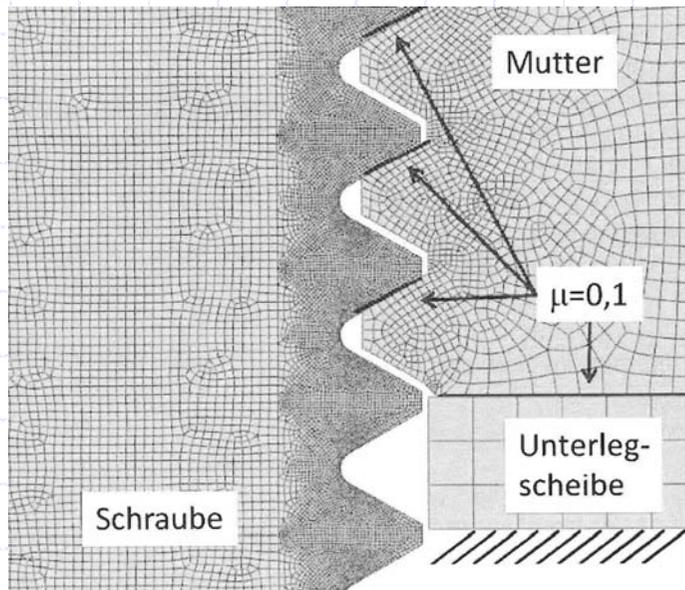
IV. Schraube mit exakter Gewindegeometrie

⇒ örtliche Spannungen

⇒ in VDI 2230 nicht enthalten, siehe z. B. FKM Heft 309-201

Gewindeverbindungen örtlich – 2010 – Abschlussbericht Nr. 279

örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen

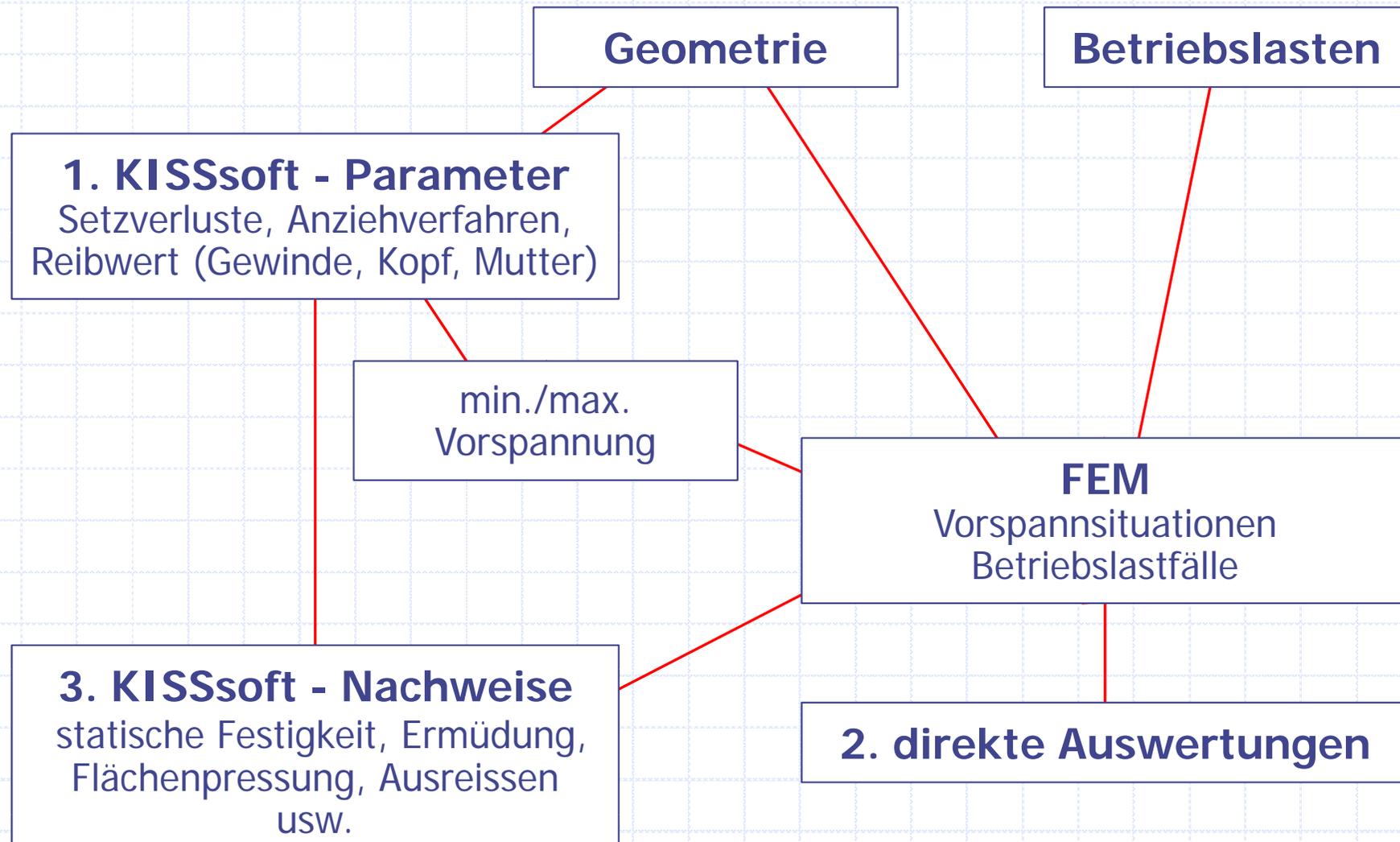


Auf den Kerbspannungsnachweis wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Strukturspannungsnachweis

FE-Modelle mit Schraubenvorspannung

Zusammenspiel von FEM und KISSsoft



Strukturspannungsnachweis

1. KISSsoft-Parameter für die FE-Simulation

FE-Analyse

In der Regel sind mindestens 2 Lastfälle zu untersuchen.

- Schraubenvorspannung mit Maximalwert F_{Vmax}
 - ⇒ Flächenpressungen unter Betriebslast
 - ⇒ ev. Spannungen in verspannten Bauteilen
 - ⇒ ev. Ausreißen des Gewindes
- Schraubenvorspannung mit Minimalwert F_{Vmin} abzüglich Setzverluste
 - ⇒ Kraftschluss
 - ⇒ Klaffen ⇒ Biegebeanspruchung der Schraube
 - ⇒ Dichtheit der Verbindung

Schraubenvorspannung

Die Konstruktionsunterlagen und Montageinstruktionen sollten definieren:

- Schraubentyp inkl. Lieferzustand
- Anziehverfahren inkl. Prozedere insbesondere Soll-Anziehdrehmoment.

Unter Annahme der zu erwartenden Reibwert-Bandbreite werden danach die Montagevorspannkraften F_{Mmax} und F_{Mmin} ermittelt.

Einfache Abschätzung nach VDI 2230 für M12-8.8

Metallisch blank, montiert im Anlieferungszustand

⇒ Reibungszahlklasse B ⇒ $\mu = 0.06$ bis 0.16

Drehmomentgesteuertes Anziehen mit Schätzen der Reibungszahl

⇒ Anziehungsfaktor $\alpha_A \approx 1.6$ bis 2.0

⇒ Streuung der Vorspannkraft $\pm 23\%$ bis $\pm 33\%$

Wahl für mittleren Reibwert $\mu \approx 0.11$

⇒ Soll-Anziehdrehmoment 80 Nm

⇒ Montagevorspannkraft $\approx 40 \text{ kN}$

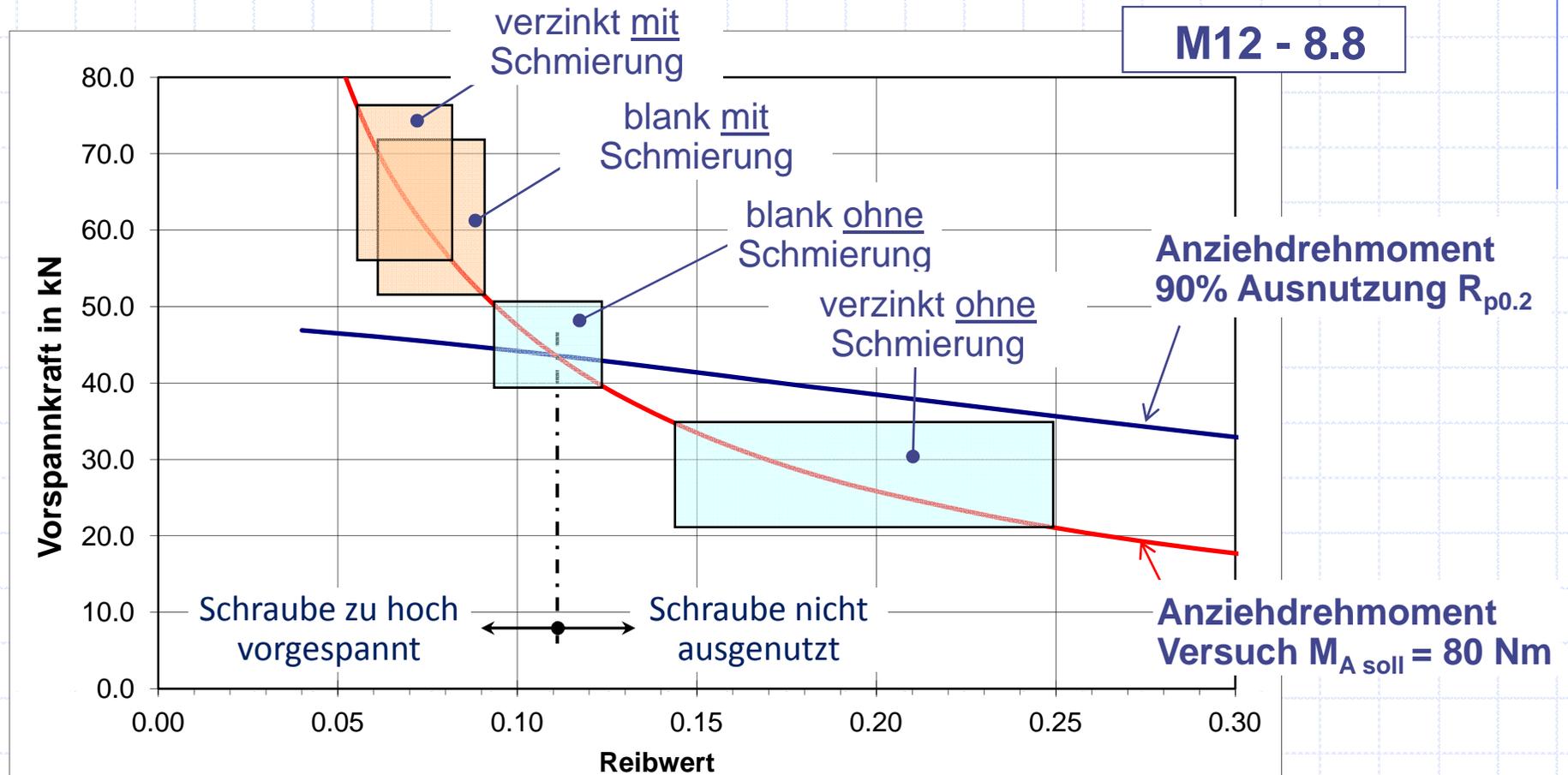
Rechnerische Montagekräfte

⇒ $F_{Mmax} \approx 1.25 \cdot 40 \approx 50 \text{ kN}$

⇒ $F_{Mmin} \approx 0.75 \cdot 40 \approx 30 \text{ kN}$

⇒ $\alpha_A \approx 1.67$

Reale Vorspannkraft - die grosse Unbekannte



Ergebnisse einer nicht repräsentativen Versuchsreihe

Nachträgliche Setzverluste

Nach dem Anziehen stellen sich unter Belastung noch weitere Setzverluste ein. Insbesondere bei Verbindungen mit kleinen Klemmlängenverhältnissen können diese einen deutlichen Vorspannkraft

Tabelle 5.4/1. Richtwerte für Setzbeträge bei Schrauben, Muttern und kompakten verspannten Teilen aus Stahl

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

Beim VDI Nachweis wird der Setzverlust bei beiden Vorspannkraften abgezogen. Es gibt Literaturen, die den Abzug nur bei F_{Mmin} vornehmen.

Bsp. M12-8.8 mit $L_k/D \approx 1.0$

Setzverlust $F_z \approx 5 \text{ kN}$

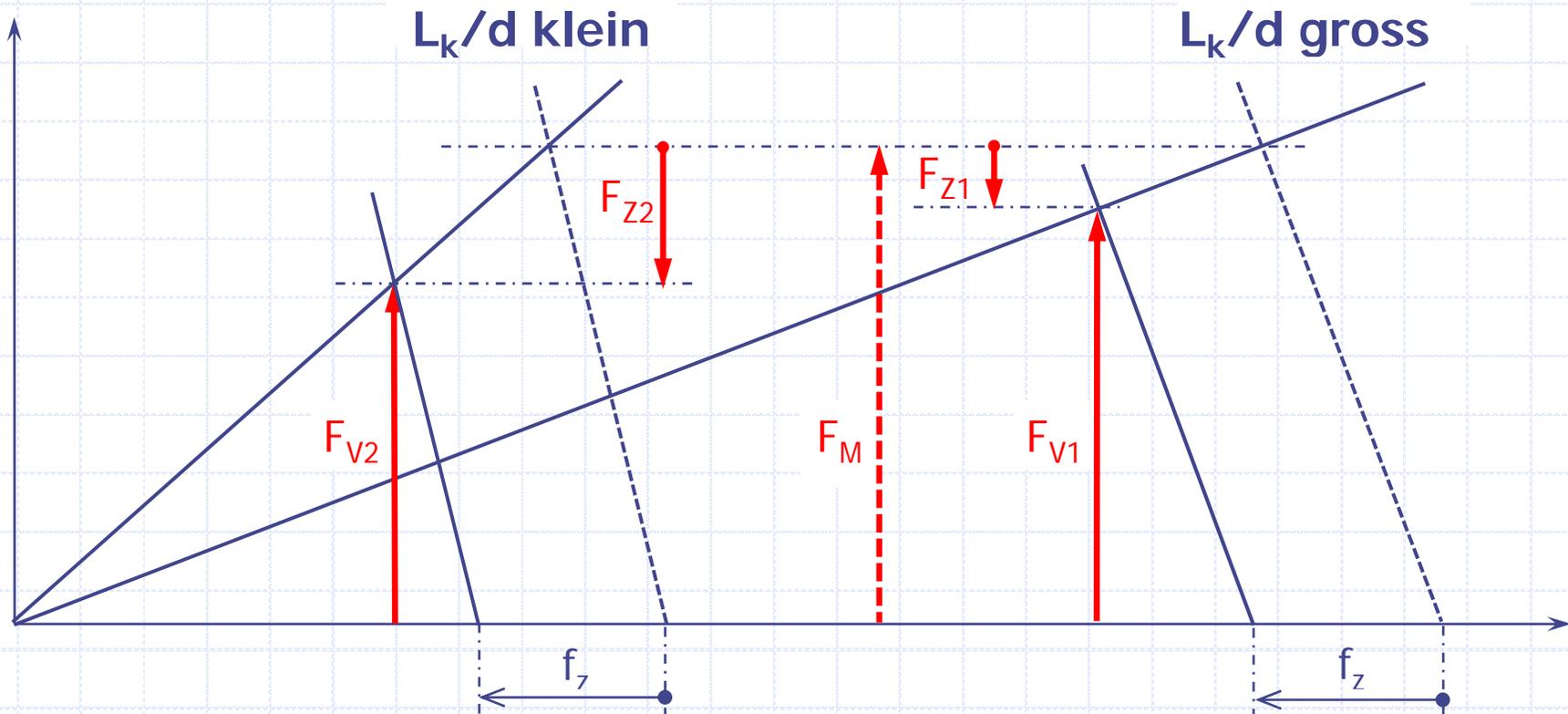
Vorspannkraft für FE-Simulation

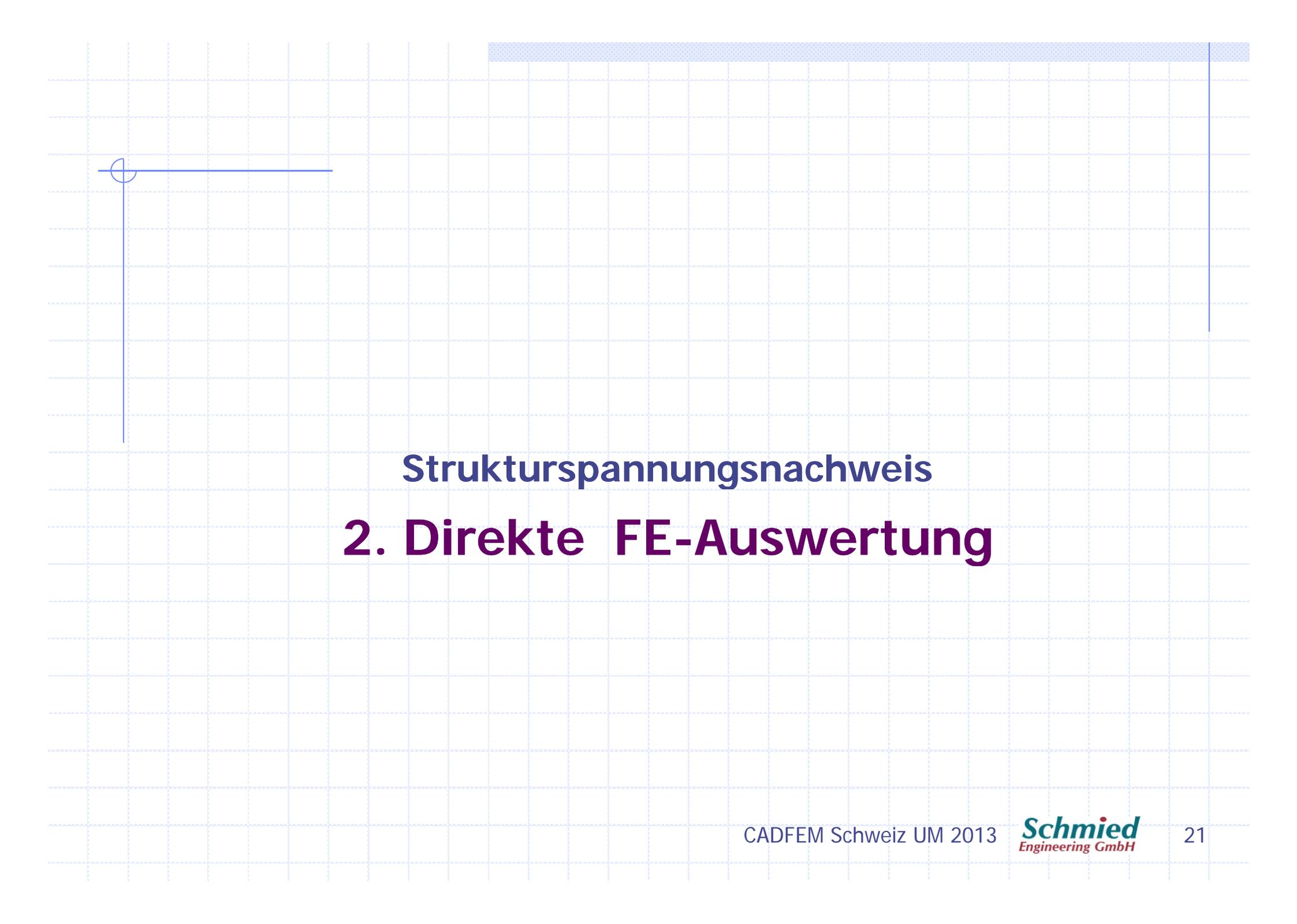
$$\Rightarrow F_{Vmax} \approx (50) / 45 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{Vmin} \approx 25 \text{ kN}$$

Einfluss der Setzverluste

Vergleich zweier Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Klemmlängenverhältnissen.





Strukturspannungsnachweis

2. Direkte FE-Auswertung

Direkte Beurteilung - Ermüdung

Auswertung der Schraubenzusatzkräfte über die verschiedenen Lastfälle

$$\sigma_a = \frac{F_{SAo} - F_{SAu}}{2 \cdot A_s} \leq \frac{\sigma_{AS}}{j_D}$$

F_{SAo} max. Schraubenzusatzkraft
 F_{SAu} min. Schraubenzusatzkraft
 A_s Spannungsquerschnitt
 σ_{AS} Grenzamplitude nach VDI 2230 (99% $P_{\bar{u}}$)
 j_D Sicherheitsfaktor (KISSsoft 1.0)

Wird Kopf und Schaft getrennt modelliert, kann bei exzentrisch belasteten Schrauben das Biegemoment über Kontaktauswertung ermittelt werden.

$$\sigma_a = \frac{F_{SAo} - F_{SAu}}{2 \cdot A_s} + \frac{M_{bo} - M_{bu}}{2 \cdot W_s} \leq \frac{\sigma_{AS}}{j_D}$$

W_s Widerstandsmoment von A_s

Da die Mittelspannung (Torsion) ohne Einfluss auf die Grenzamplitude ist, lassen sich die Spannungen auch direkt im FE-Modell auswerten.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{1o} - \sigma_{1u}}{2} \leq \frac{\sigma_{AS}}{j_D}$$

Bedingung: Spannungsquerschnitt modellieren
 σ_1 Hauptspannung

Direkte Beurteilung - maximale Schraubenspannung

Bei nicht klaffenden Verbindungen herrscht im Schraubenschaft ein 1-achsiger Spannungszustand. Die Torsionsspannung aus dem Anziehvorgang ist noch zu überlagern.

$$M_G = F_{M_{max}} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1.155 \cdot \mu_{Gmin} \right)$$

$k_\tau = 0.5$ Reduktionsfaktor
 d_2 Flankendurchmesser
 p Gewindesteigung
 μ_G Reibwert im Gewinde

$$\sigma_{red,B} = \sqrt{\sigma_z^2 + 3 \cdot (k_\tau \cdot \tau_t)^2} \leq R_{p0.2min}$$

Für die Berechnung der Torsionsspannung ist im Gewindebereich der Kerndurchmesser d_3 und im Schaft der Nenndurchmesser d zu verwenden.

Schrauben werden idealerweise auf 90% von $R_{p0.2min}$ vorgespannt. Unter äusserer Last werden 100% zugelassen.

Direkte Beurteilung - Flächenpressung

Am Einfachsten erfolgt der Nennspannungsnachweis mit der maximalen Schraubenkraft. Für den Nachweis mit der örtlichen Flächenpressung ist meist die Kontaktvernetzung zu grob.

$$p_{nenn} = \frac{F_{S \max}}{A_{\text{kontakt}}} \leq \frac{p_G}{j_G}$$

$F_{S \max}$	max. Schraubenkraft
A_{kontakt}	Auflagefläche unter Kopf oder Mutter
σ_{AS}	Grenzflächenpressung nach VDI 2230
j_G	Sicherheitsfaktor

Die Richtlinie bezeichnet ihre Werte für die Grenzflächenpressungen als Kurzzeit- und Richtwerte, nennt aber keinen Sicherheitsfaktor. KISSsoft setzt in der Regel $j_G = 1$.

Faustregel Schmied

Sicherheitsfaktor für übliche Anwendungen je nach Spannungsart

- für Nennspannung $\Rightarrow j_G \approx 1.2 \dots 1.5$
- für örtliche Pressung in FE $\Rightarrow j_G \approx 1.0 \dots 1.2$

Strukturspannungsnachweis

3. Detaillierter Nachweis mit KISSsoft

Umsetzungsschwierigkeiten

KISSsoft benötigt für den Nachweis die Nachgiebigkeiten der Schraube und der verspannten Bauteile. Beide ergeben sich nicht so ohne Weiteres aus der FE-Simulation und müssen indirekt ermittelt werden.

Die lokalen Gegebenheiten (exzentrische Verspannung und/oder exzentrische Belastung) sind in KISSsoft, analog dem analytischen Nachweis, zu definieren. Da dazu Vereinfachungen und Annahmen nötig sind, verliert die FE-Simulation mindestens einen Teil ihres Nutzens.

KISSSOFT
Release 03/2013B

Basisdaten | Verspannte Teile | Vorgaben | Resultate aus FEM Berechnung

Eingabegrößen

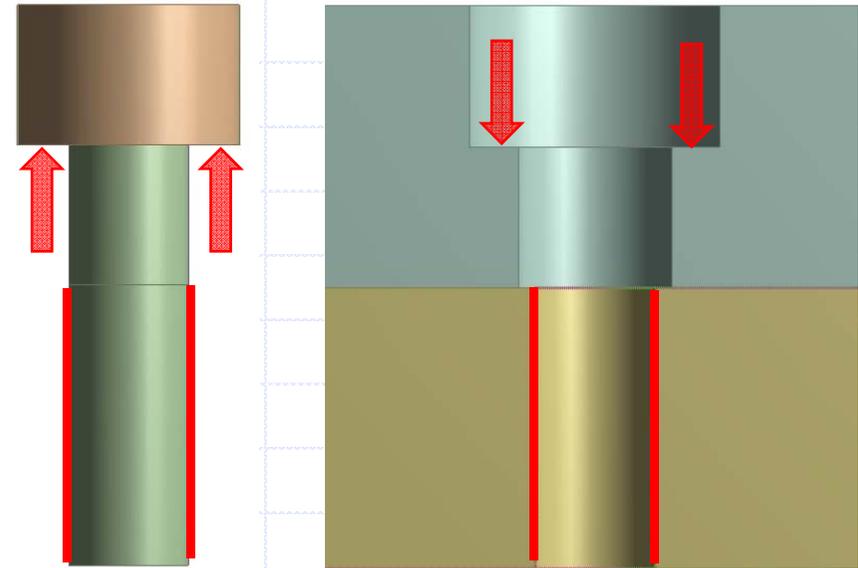
Modellierung FEM: Modellklasse III

Nachgiebigkeit Schraube	δ_s	0.0000	10^{-6} mm/N	Schraubenzusatzkraft (min/max)	F_{SA}	0.0000	0.0000	N
Nachgiebigkeit Platten	δ_p	0.0000	10^{-6} mm/N	Schraubenzusatzmoment (min/max)	M_{SA}	0.0000	0.0000	Nm
Vorspannkraftsänderung	ΔF_{ver}	0.0000	N	Flächenpressung	p_{max}	0.0000	N/mm ²	<input type="checkbox"/>
Abhebekraft	F_{Kab}	0.0000	N					<input type="checkbox"/>

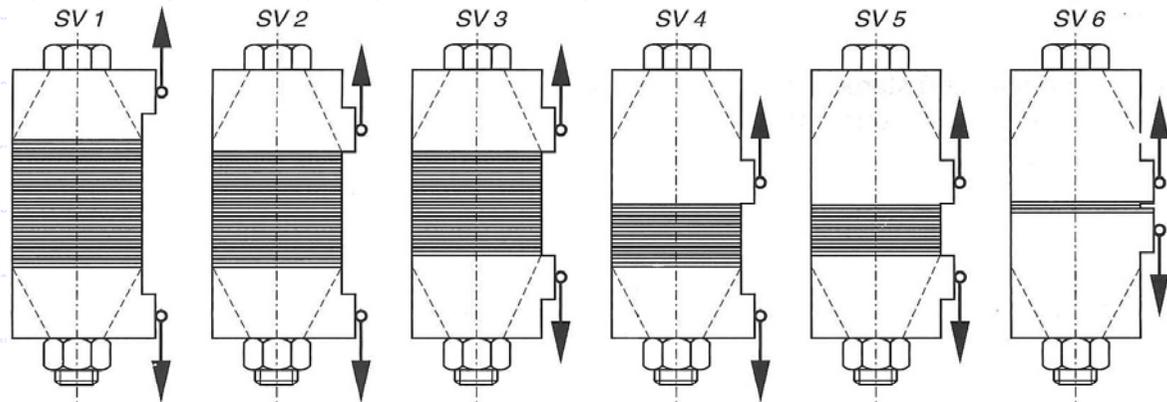
Ermittlung der Nachgiebigkeiten

Die Nachgiebigkeit werden bei zentrischer oder exzentrischer Verspannung ermittelt.

Damit verbleibt aber immer noch die Frage nach dem **Krafteinleitungs-faktor n**. Diese lässt sich immer nur näherungsweise beantworten. Deshalb hat Schmied-Engineering einen anderen Ansatz gewählt.

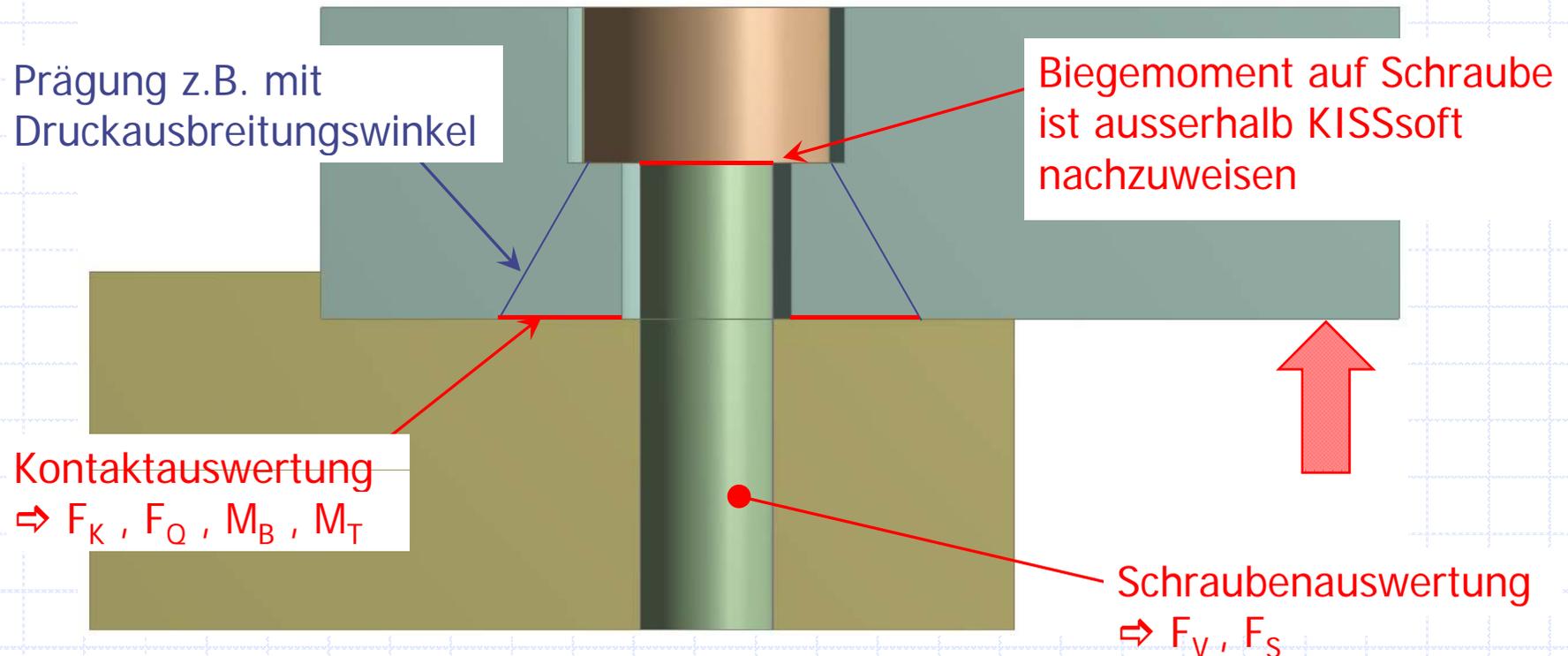


Verbindungstypen nach VDI \Rightarrow n



Ansatz Schmied - Simulation

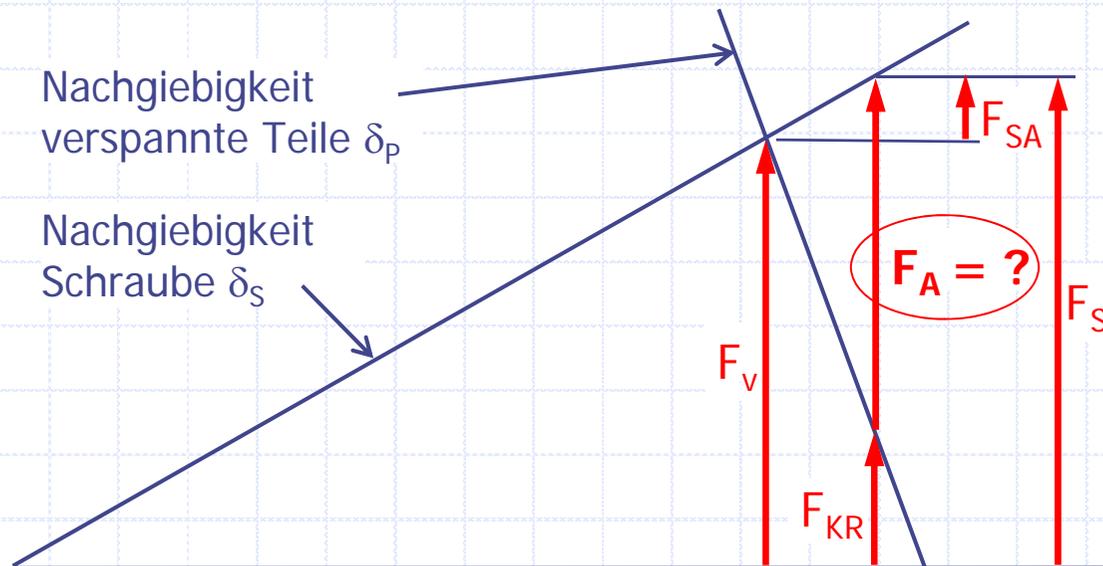
In der FE-Simulation sind alle relevanten Aspekte (exzentrische Verspannung, beliebige Krafteinleitung) enthalten. Also sollen alle diese Effekte möglichst direkt in den Nachweis übernommen werden. Dazu sind beim betreffenden **Betriebslastfall** die gezeigten Grössen auszuwerten.



Auswertung der FE-Simulation

Aus der Simulation folgen die Vorspannkraft F_V im 1. Lastschritt und die Schraubenkraft F_S im Betriebslastfall. Die auf die einzelne Schraube wirkende Betriebslast F_A ist nicht direkt ablesbar.

Mit der vorgeschlagenen Modellierung ergibt sich jedoch die Kontaktkraft F_K die der Restvorspannkraft F_{KR} entspricht. Nun kann das Kraftverhältnis, in dem alle lokalen Effekte enthalten sind, ermittelt werden.



$$\phi_{FE} = \frac{F_{SA}}{F_A} = \frac{F_S - F_V}{F_S - F_{KR}}$$

ϕ_{FE} Kraftverhältnis der Simulation

Vorgehen für KISSsoft-Nachweis

Das aus der FE-Simulation folgende Biegemoment im Kontakt wird in eine erforderliche Restklemmkraft umgerechnet, die das Klaffen innerhalb der geprägten Fläche verhindern soll.

$$F_{KA} = M_{BA} \cdot \frac{A_{präg}}{W_{präg}}$$

In KISSsoft wird die Verbindung als zentrisch belastete Einzelschraube unter Längs- und Querkraft definiert. Die Schraube und die Bauteile werden ganz normal definiert. Die Berechnung erfolgt in zwei Durchgängen.

Im 1. Durchlauf wird ein beliebiger Krafteinleitungsfaktor n_1 definiert, wodurch sich als Ergebnis das Kraftverhältnis ϕ_1 ergibt. Für den 2. Durchlauf wird der korrigierte Krafteinleitungsfaktor n_2 verwendet.

$$n_2 = \frac{\phi_{FE}}{\phi_1} \cdot n_1$$

Durchführen des Nachweises

1. Berechnung einer zentrisch verspannten und zentrisch belasteten Einzelschraube.
2. Definition der Geometrie der verspannten Bauteile und der Schraube
⇒ Setzverlust sollte mit FE-Vorgabe übereinstimmen.
3. Manuelle Vorgabe der korrigierten Krafteinleitungsfaktors n_2 .
4. Definition der Vorspannmethode mit entsprechenden Parametern
⇒ Vorspannkraften F_{vmin} und F_{vmax} sollten mit den FE-Vorgaben übereinstimmen.
5. Vorgabe der Lasten aus der FE-Simulation mit dem Biegemoment umgerechnet in die erforderliche Restklemmkraft.
6. Berechnung durchführen und auswerten
⇒ passen die Schraubenzusatzkraft F_{SA} und die Restklemmkraft F_{KR} zu den FE-Ergebnissen?