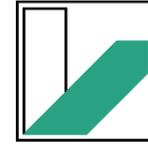


Berechnung von vorgespannten Schraubenverbindungen mit der FEA

9. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag

Dipl.-Ing. Martin Zimmermann
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universität Bayreuth



Gliederung:

- VDI 2230
- Vorgespannte Schraubverbindungen
- Schraubenberechnungsverfahren
- Schraubenberechnung und Simulation
- Kenngrößen bei der Schraubenberechnung
- Praktisches Beispiel



VDI 2230

ICS 21.088.10

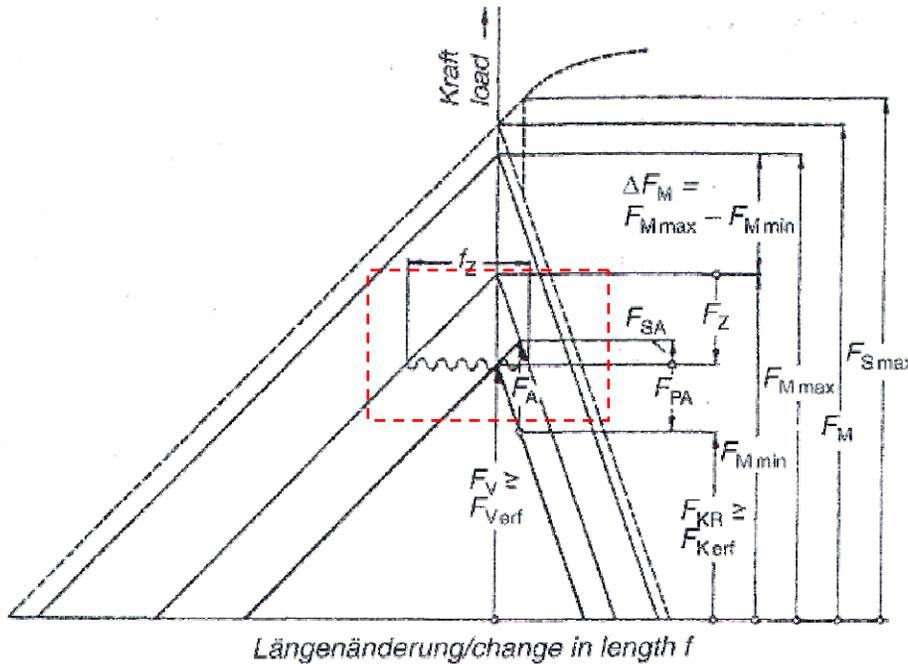
VDI-RICHTLINIEN

Februar 2003
February 2003

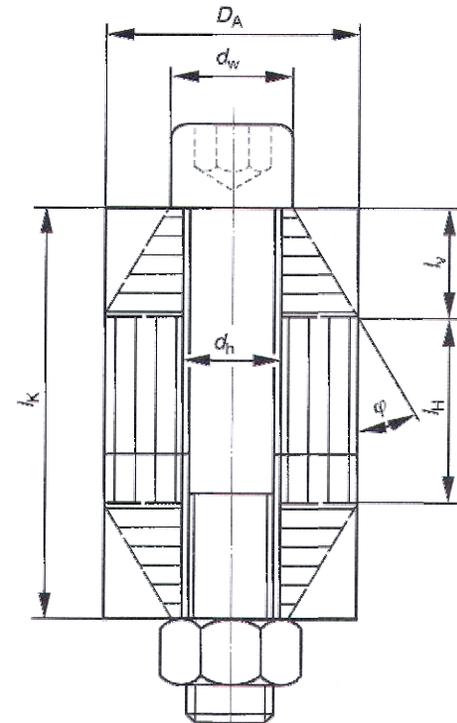
<p>VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE</p>	<p>Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubverbindungen Zylindrische Einschraubverbindungen</p> <p>Systematic calculation of high duty bolted joints Joints with one cylindrical bolt</p>	<p>VDI 2230</p> <p>Blatt 1 / Part 1</p> <p>Ausg. deutsch/englisch Issue German/English</p>
--	---	--

behandelt Besonderheiten von Schraubverbindungen:

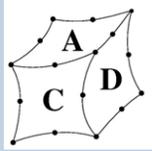
- exzentrische Verspannung
- exzentrische Belastung
- Biege- und Querkrafteinflüsse



Verspannungsschaubild



Druckkegel und Druckzylinder



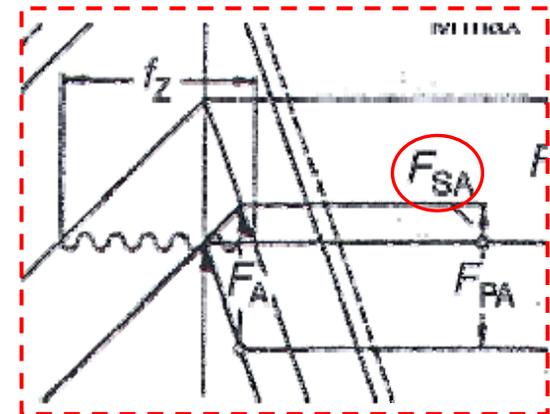
Vorgespannten Schraubverbindungen

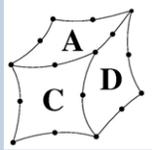
Funktion der Vorspannung von Schrauben:

- Erzeugung eines definierten Vorverspannungszustandes
- Wirkung von Betriebskräften (Ausschlagkräften) nur entsprechend eines Faktors Ψ auf die Schraube (Kraftverhältnis, Flanscentlastung)
- Erzielen eines geminderten Ausschlages der Betriebsspannung auf die Schraube
→ Erhöhung des Betrages der möglichen dynamischen Betriebslast
- basiert auf dem Verhältnis der Schraubensteifigkeit zur Gesamtsteifigkeit der Schraubenanordnung (Regelfall < 1)

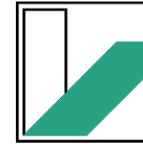
Vorspannung wie weit :

- drehmomentgesteuert bis 90% der Streckgrenze
- Streckgrenzenüberschreitende Anziehverfahren bis über 100% der Streckgrenze

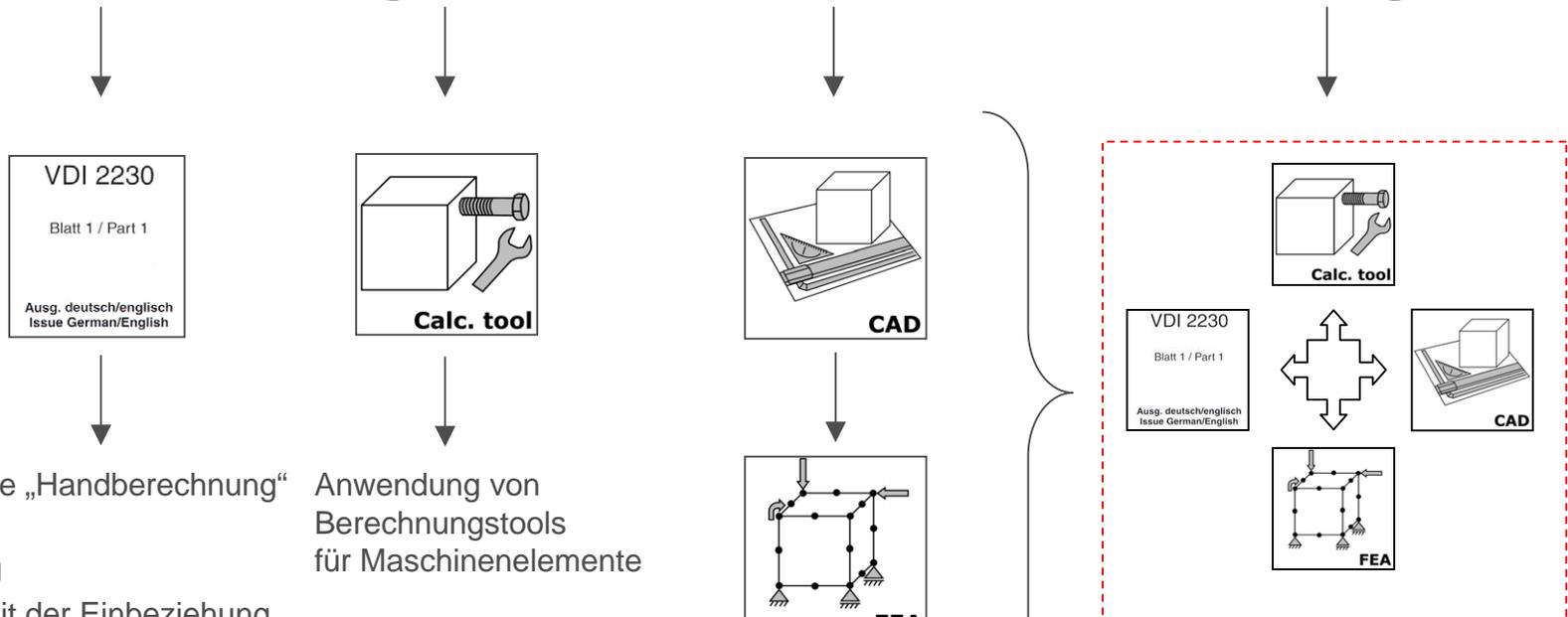




Schraubenberechnungsverfahren



Berechnung einer Schraubenverbindung



- analytische „Handberechnung“ nach VDI
- aufwendig
- Möglichkeit der Einbeziehung von unterstützender Softwaretechnik, z.B. MCAD

Anwendung von Berechnungstools für Maschinenelemente

Kostenbehaftete Software:

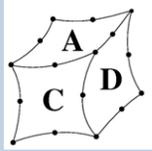
- KISSsoft
- MDesign

Kostenlose Software:

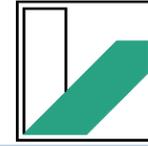
- *xbolt, wbolt*

Anwendung von CAD-Modellen als Grundlage einer numerischen Festkörpersimulation

gemischte Anwendung von zur Verfügung stehenden Verfahren



Schraubenberechnung und Simulation



Komplette numerische Simulation einer Schraubverbindung:

- detaillierte Modellerstellung der Schraube und Flanschteile
- Kontinuumsrechnung der Flanschteile und Schraube
- Kontaktrechnung der Schraubenflanken und Flanschstöße
→ hoher nichtlinearer Rechenaufwand
- nahezu Verzicht auf analytisch abgeleitete Formeln

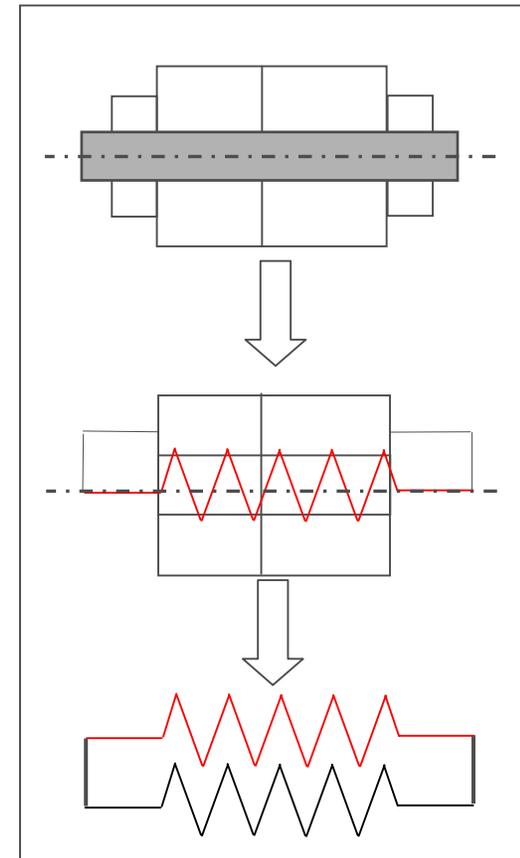
Teilweise numerische Simulation einer Schraubverbindung:

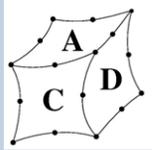
- detaillierte Modellerstellung der Flanschteile
- Schraube als Ersatzfedersteifigkeit
- Kontinuumsrechnung der Flanschteile
- Kontaktrechnungen der Flanschstöße
- Anwendung analytischer Formeln nach VDI 2230

Reine analytische Schraubenberechnung:

- Ersatzfedersteifigkeiten für Flansch und Schraube
- geschlossene Anwendung analytischer Formeln nach VDI 2230

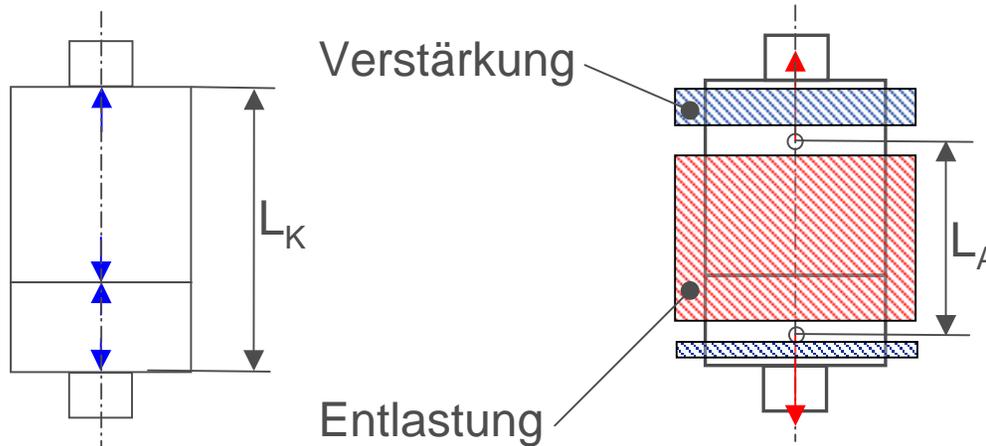
Abstraktion





Krafteinleitungsfaktor und Kraftverhältnis

Der Krafteinleitungsfaktor wird aus der gedachten Angriffposition der Betriebskraft abgeleitet und bestimmt damit linear das Kraftverhältnis!



Krafteinleitungsfaktor

$$n = L_A / L_K$$



Kraftverhältnis

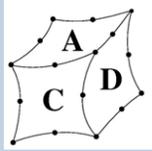
$$\Phi = n \cdot \Phi_K = n \cdot \frac{\delta_P}{\delta_P + \delta_S}$$



**Kraftverhältnis
bestimmt
Schraubenbetriebskraft**

Die willkürliche Festlegung des Krafteinleitungsfaktors führt zu falschen Ergebnissen.

Die VDI 2230 rät von der früher in der Fachliteratur propagierten Längenverhältnisbildung ab. Diese Annahmen gelten nur für rein zylindrische Teile.

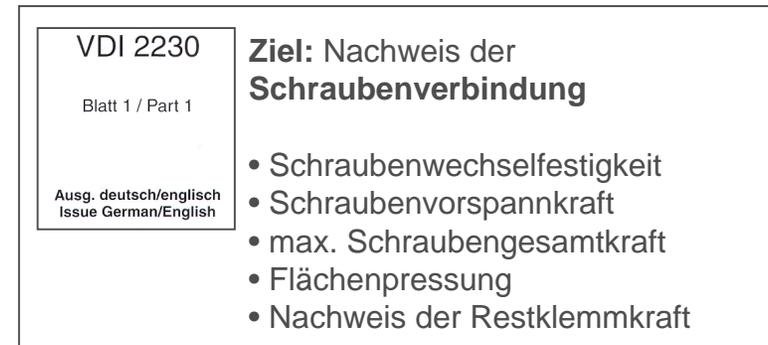
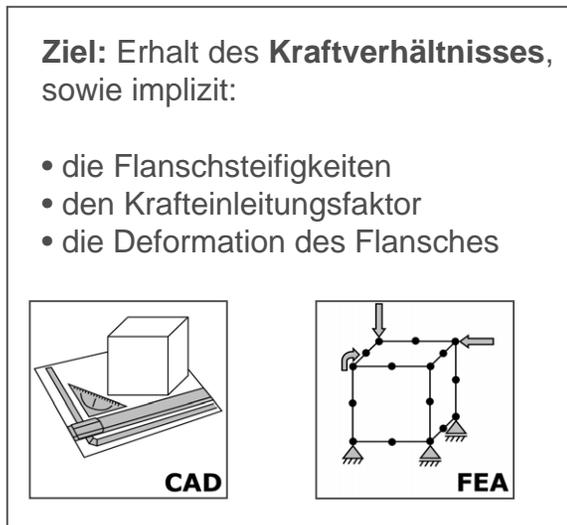


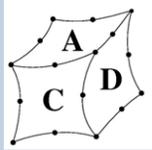
Verfahrenssynthese



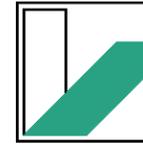
Darstellung: Schraubenberechnung durch teilweise Anwendung numerischer Simulation (FEA)

Geometrieingabedaten, Materialeingabedaten,
Vorspannkraft, Betriebsbelastungen





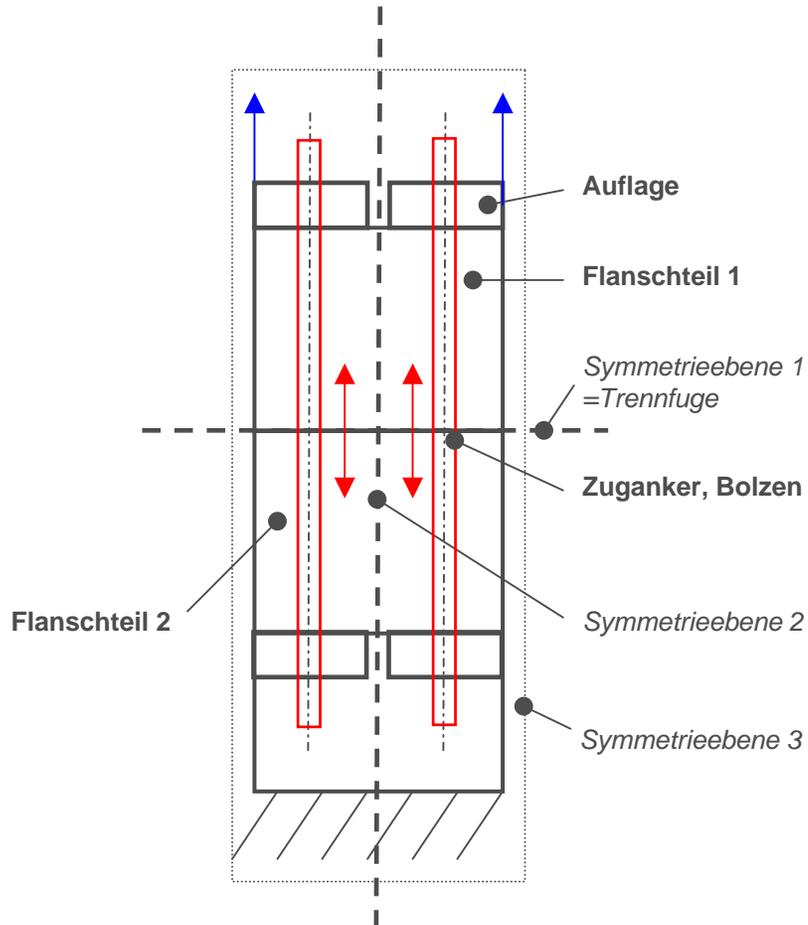
Praktisches Beispiel zur Schraubenberechnung



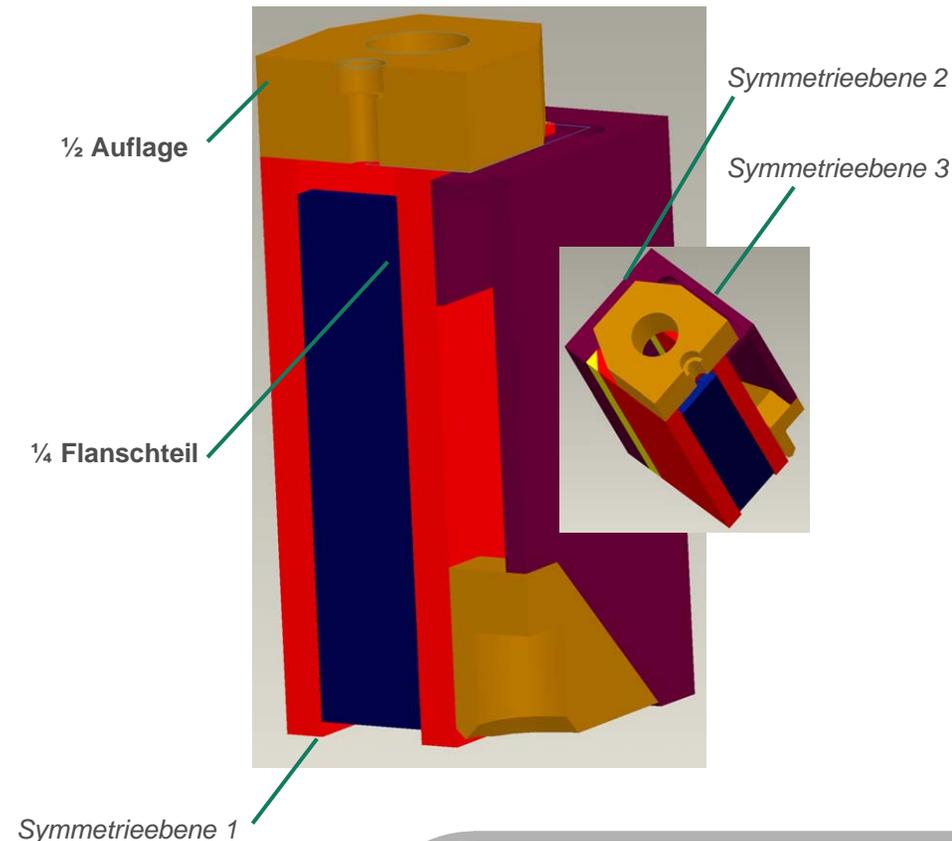
UNIVERSITÄT
BAYREUTH

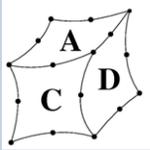
durch effiziente analysegerechte
Modellierung zum Minimalmodell

Schema



CAD-Modell der
Schweißbaugruppe

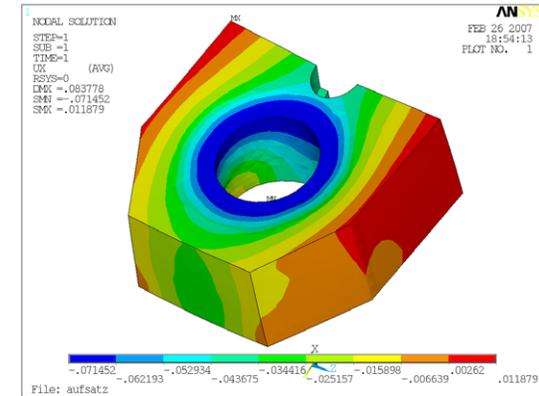




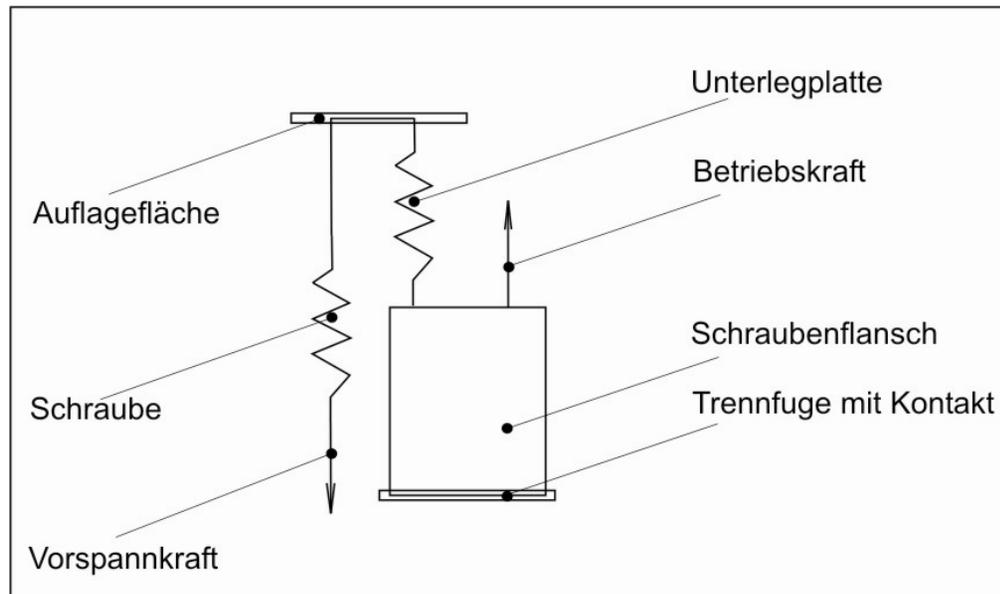
Modellsynthese

Abstraktion:

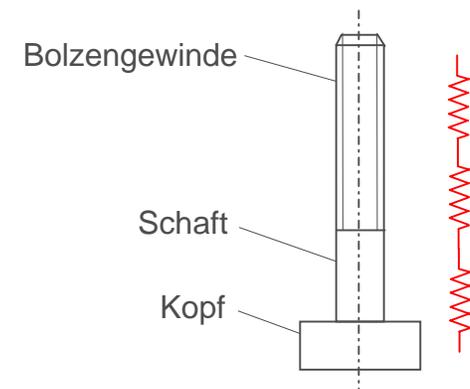
1. Die Schraube/der Bolzen wird durch eine Feder mit einer Federsteifigkeit nach VDI 2230 ersetzt.
2. Die Unterlegplatte wird durch eine Feder, deren Federsteifigkeit in einer FE-Vorabanalyse ermittelt wurde, angesetzt.
3. Die Trennfuge wird mit ebenen Kontaktelementen modelliert.
4. Lediglich der Schraubenflansch wird vom CAD-Modell als Kontinuum übernommen und vernetzt.
5. Berechnung erfolgt geometrisch nichtlinear (große Verformungen).

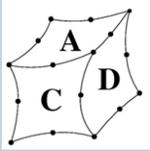


Modell einer Schraubenaufgabe

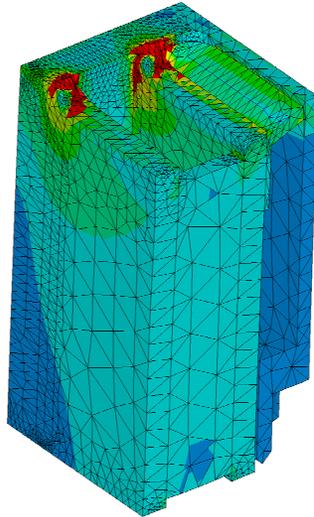


serielle Anreihung von Ersatzzyklindern für Schraubensteifigkeiten

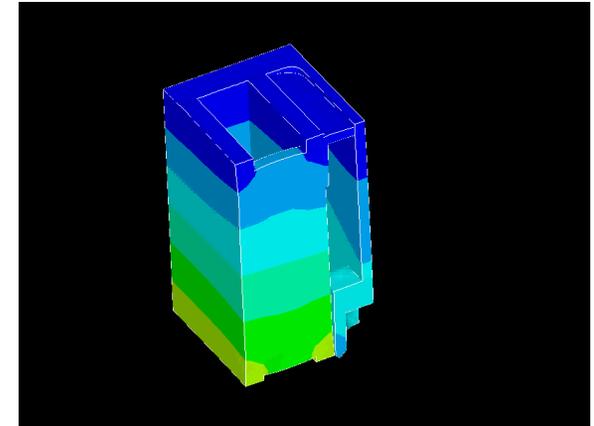




Ergebnisdarstellung



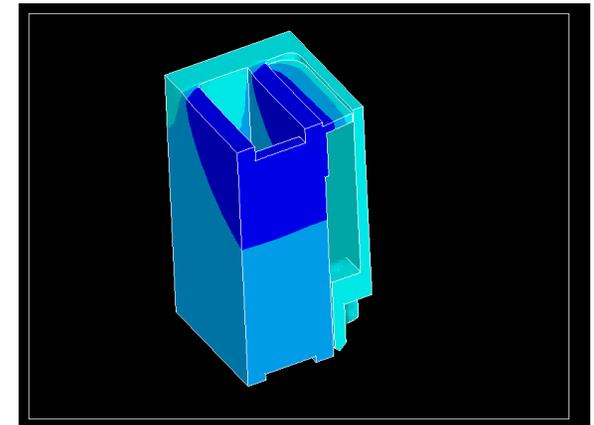
Deformation unter
Vorspannkraft



Vergleichsspannung nach von Mises:

rot - hohe Vergleichsspannung
blau - geringe Vergleichsspannung

Deformation unter
Betriebskraft



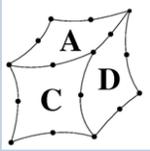
Ermittlung von Kennwerten

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

F_{SA} ← Schraubenzusatzkraft, FE-Modell Federkraft
 F_A ← Betriebskraft, FE-Modell Randbedingung

$$\Phi = n \Phi_K = n \cdot \frac{\delta_P}{\delta_P + \delta_S}$$

δ_P ← Flanschsteifigkeit aus Verschiebungslösung FE
 $\delta_P + \delta_S$ ← Schraubensteifigkeit analytisch



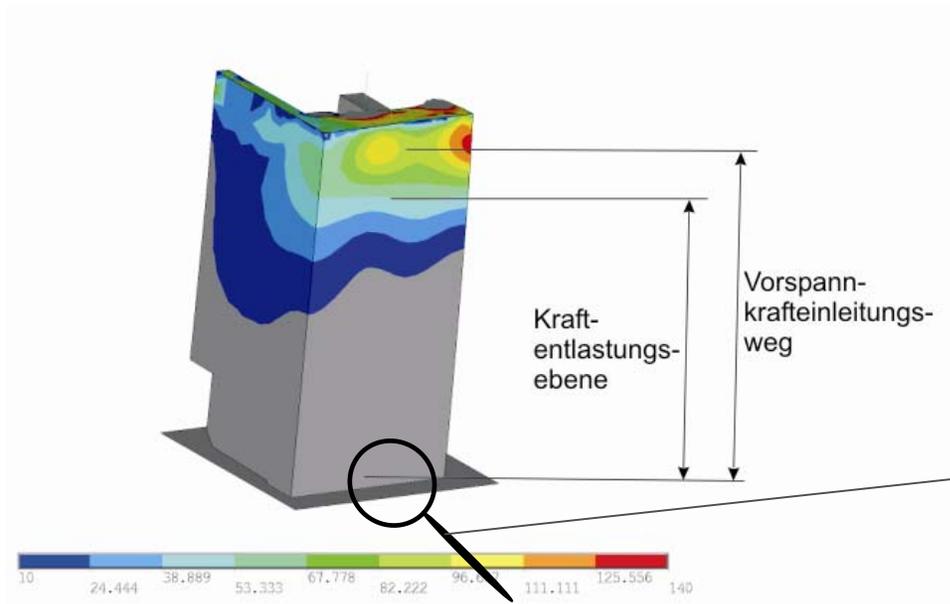
Weitere Aspekte



Grafische Abschätzung der **Krafteinleitungsverhältnisse** anhand der Spannungskomponente in vertikaler Richtung.

Merkmale:

- ungenau
- quantitative Auswertung besser
- gut geeignet zur prinzipiellen Vorstellung



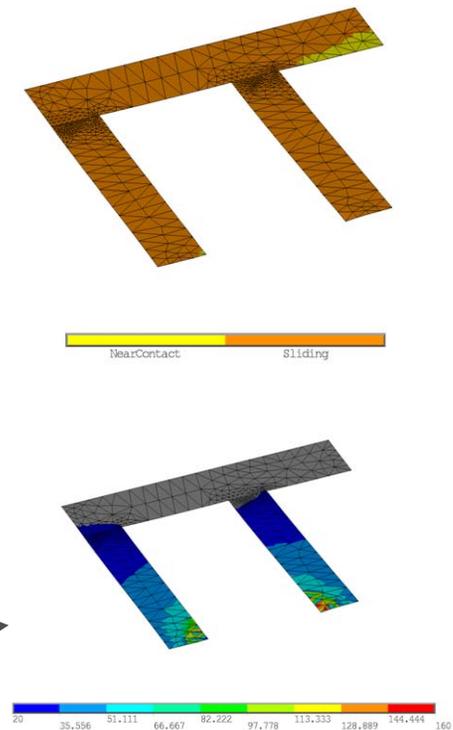
Spannungskomponente in Vorspannkraftrichtung

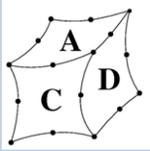
rot - hohe Spannung

blau - geringe Spannung

Beurteilung der **Kontaktfuge:**

- Kontaktspannung
- Kontaktart





Zusammenfassung

1. Die Simulation von Schraubverbindungen lässt eine **Vielzahl Modellbildungsvarianten** zu.
2. Die „**rein analytische**“ **Berechnung** ist aus aktueller Sicht aufgrund der zur Verfügung stehenden Simulationstechnik und Berechnungssoftware zeitlich aufwendig, ungenau (entscheidende Faktoren Krafteinleitung und Kraftverhältnis) und damit **unrentabel**.
3. Oftmals sind **Modellfehler in der FEA** vorhanden → Modelle sind **dennoch leistungsfähiger** als gedachte Ersatzzyylinder der analytischen Berechnung.
4. Die vollständige **Kontinuumsberechnung** inklusive **Kontaktrechnungen** an Flansch und Gewindekontakten ist mit hohem **Modellierungs- und Rechenaufwand** verbunden.
5. Die geeignete Anwendung von **FEA** in **Kombination** mit analytischen Betrachtungen und der **VDI 2230** wird als **effizient** angesehen.