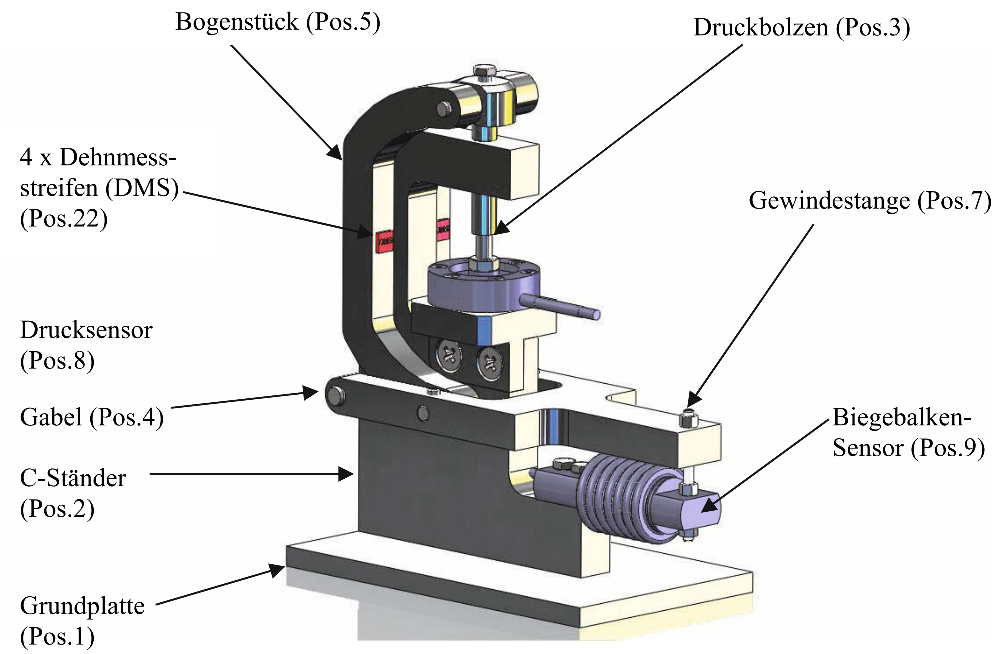
7 Projekt Hebelpresse

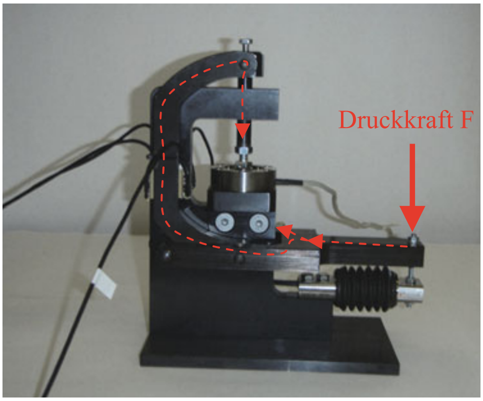
Bei diesem Projekt werden verschiedene Berechnungen und Simulationen für die unten dargestellte Hebelpresse durchgeführt. Es wird auch aufgezeigt, wie Spannungen an Bauteilen gemessen werden können. In der Praxis wird das häufig mit Dehnmessstreifen realisiert. Natürlich kann man dies nur am realen Bauteil durchführen. Die Hebelpresse wurde für diesen Zweck hergestellt und an vier Stellen am Bogenstück mit Dehnmessstreifen versehen. Es kann auf diese Weise gezeigt werden, wie die berechneten bzw. simulierten Werte mit den Messwerten übereinstimmen. Auf die Grundlagen der Dehnmesstechnik wird an entsprechender Stelle in diesem Kapitel eingegangen. Bei den Simulationen werden zuerst (immer bei der jeweiligen Aufgabe) nur Einzelteile simuliert. Am Schluss des Kapitels erfolgt dann die Simulation der gesamten Baugruppe. Simulationswerte aus Baugruppenanalysen bilden grundsätzlich die Realität besser ab.

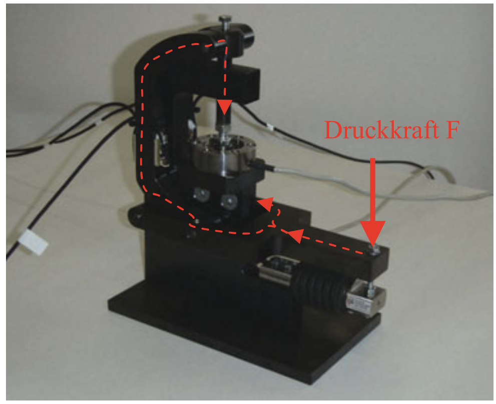
Aufbau der Hebelpresse:



Die Baugruppen- und Einzelteilzeichnungen zur Hebelpresse finden Sie in Kapitel 7.2. Der Druck- und der Biegebalken-Sensor kann eine Maximalkraft von 5 kN bzw. 1 kN aufnehmen. Die Gabel (Pos.4) wird mit einer Druckkraft F wie unten dargestellt belastet. Der dadurch erzeugte Kraftfluss fließt durch die Gabel über Stifte (Bolzen) in die beiden Bogenstücke (Pos.5). Diese leiten die Kraft über den oberen Stift (Bolzen) in den Druckbolzen (Pos.3). Die Kraft im Druckbolzen kann nun dazu verwendet werden, z. B. eine Buchse in eine Bohrung einzupressen.

M. Brand, *Grundlagen FEM mit SolidWorks 2010*, DOI 10.1007/978-3-8348-9838-8_7,

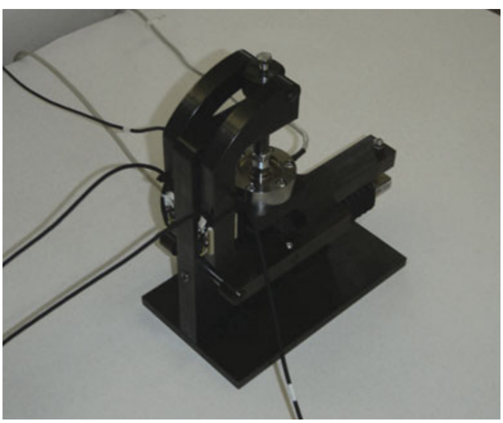


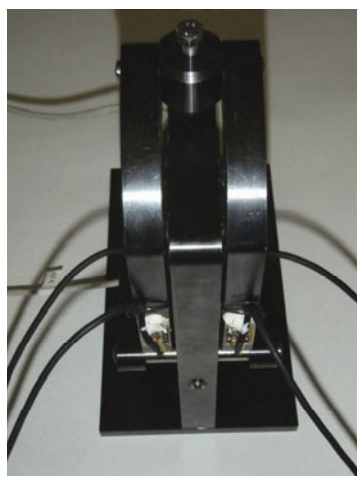


Kraftfluss bis zum „Einpressen“

Die Ausführung der beiden Bogenstücke (Pos.5) widerspricht ganz klar dem Konstruktionsgrundsatz **„Leite Kräfte auf möglichst direktem Weg“.** Natürlich ermöglicht diese Ausführung eine viel bessere Zugänglichkeit zum Einpressbereich, was hier erwünscht ist. Bei Aufgabe 7 soll dort berechnet werden, wie dick eine direkte Verbindung zwischen Druckbolzen (Pos.3) und Gabel (Pos.4) sein müsste, damit die gleiche Normalspannung im Querschnitt auftritt, wie im Falle des Bogenstückes.

Die Druckkraft F erzeugt man durch das Anziehen einer Sechskantmutter an der Gewindestange (Pos.7). Diese Kraft wird dann mit dem Biegebalkensensor (Pos.9) gemessen. Mit dem Drucksensor (Pos.8) misst man die am Druckbolzen (Pos.3) wirksame Kraft, die zum Einpressen zur Verfügung steht. Die vier an den Bogenstücken angebrachten Dehnmessstreifen (Pos.22) messen die an der Oberfläche entstehenden Dehnungen.





7.1 Berechnungen

Es folgen nun einige Aufgaben zu obiger Hebelpresse. Alle Angaben sind den Zeichnungen weiter hinten zu entnehmen. Die Belastung ist als statisch, d. h. ruhend anzunehmen.

Material Teile: Baustahl S235

Material Bolzen: Vergütungsstahl 38Cr2

Bei den Aufgaben geht es um folgende Themen:

- Momentengleichgewicht
- Druckspannung
- Biegespannung
- Abscherspannung
- Zusammengesetzte Beanspruchung
- Flächenpressung
- Kraftumlenkung

In der Gewindestange wirken $F_{\text{min}} = 200\ \text{N}$ und $F_{\text{max}} = 800\ \text{N}$. Lösen Sie die folgenden Aufgaben:

Aufgabe 1

Wie groß ist die Kraft im Druckbolzen Pos.3?

Bestimmen Sie die maximale Druckspannung im Druckbolzen (unter Berücksichtigung des Gewindes: Rechnen Sie mit dem Kerndurchmesser $6{,}8\ \text{mm}$ => diesen Bohrungs-Durchmesser hat SolidWorks automatisch erstellt) und die Sicherheit gegen Fließen.

Aufgabe 2

Berechnen Sie die maximale Biegespannung (mit Streckenlast) im Bolzen mit der Sicherheit gegen Fließen, die Abscherspannung, die Flächenpressungen und die Durchbiegung beim Bolzen Pos.21.

Aufgabe 3

Berechnen Sie die resultierenden Normalspannungen im Bogenstück Pos.5 an der Stelle, wo die Dehnmessstreifen angebracht sind.

Aufgabe 4

Berechnen Sie die Biegespannung (mit Einzellast), die Abscherspannung und die Flächenpressung im Bolzen Pos.11.

Aufgabe 5

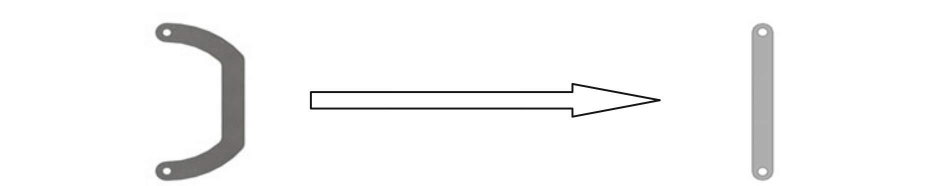
Berechnen Sie die Biegespannung (mit Einzellast), die Abscherspannung und Flächenpressung im Bolzen Pos.10.

Aufgabe 6

Überlegen Sie, wo sich die kritische Stelle an der Gabel befindet. Berechnen Sie an dieser kritischen Stelle die Normalspannungen in der Gabel Pos.4.

Aufgabe 7

Wie dick müsste das Bogenstück Pos.5 sein, wenn die Kraft ohne Umlenkung vom oberen zum unteren Bolzen geleitet werden würde (die Breite von 20 mm soll beibehalten werden)? Dabei soll im Querschnitt in der Mitte die gleiche maximale Normalspannung $21{,}7\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$, wie bei Aufgabe 3 berechnet wurde, wirken.



Aufgabe 8

Welche Kräfte wirken in den Schrauben Pos.18, die den Biegebalkensensor am Ständer (Pos.2) befestigen (Abstand Mitte Bohrung zur Kippkante $7{,}5\ \mathrm{mm}$)?

Lösungen:

Jede Aufgabe wird mit $F_{\mathrm{min}} = 200\ \mathrm{N}$ berechnet (Klammerwerte sind zum Vergleich mit $F_{\mathrm{max}} = 800\ \mathrm{N}$ berechnet). Alle für die Berechnungen benötigten Masse sind den Zeichnungen im Kapitel 7.2 zu entnehmen. Die FEM-Analysen wurden der Einfachheit halber nur mit $F_{\mathrm{min}} = 200\ \mathrm{N}$ durchgeführt.

Aufgabe 1:

Kraft im Druckbolzen:

$$\sum M = 0 = F_{\mathrm{Druckbolzen}} \cdot 58\ \mathrm{mm} - 200\ \mathrm{N} \cdot 198{,}75\ \mathrm{mm}$$

$$\Rightarrow F_{\mathrm{Druckbolzen}} = 685\ \mathrm{N}\ (2\,741\ \mathrm{N})$$

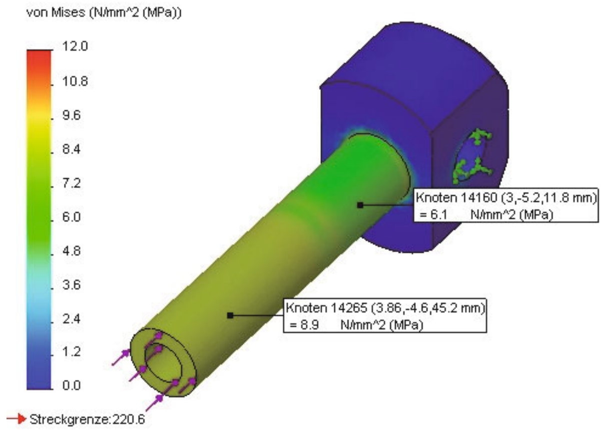
Druckspannung im Druckbolzen: $$\sigma_{\mathrm{d}} = \frac{F_{\mathrm{Druckbolzen}}}{\frac{\pi \cdot ((12\ \mathrm{mm})^2 - (6.8\ \mathrm{mm})^2)}{4}} = 8{,}9\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2} \left(35{,}7\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}\right)$$

Sicherheit gegen Fließen: $$\nu = \frac{\sigma_{\mathrm{dzul}}}{\sigma_{\mathrm{d}}} = \frac{R_{\mathrm{e}}}{8{,}9\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}} = \frac{235\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}}{8{,}9\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}} = 26{,}4\ (6{,}6)$$

FEM-Analyse zu Aufgabe 1:

1. Zuerst öffnen Sie die Datei Druckbolzen.SLDPRT.
2. Erstellen Sie eine statische Studie.
3. Weisen Sie ***Unlegierten Baustahl*** zu.
4. Wählen sie ***Fixierte Geometrie*** für die Bohrung.
5. Definieren Sie die Kraft $F = 685\ \mathrm{N}$ an der Unterseite des Druckbolzens. Vernetzen Sie mit einer Elementgröße von ca. $2{,}4\ \mathrm{mm}$.

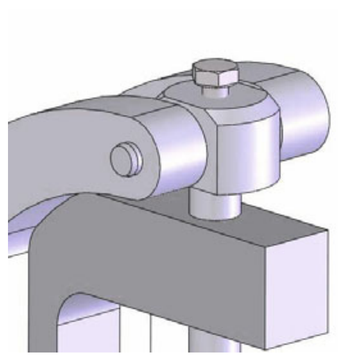
6. Zeigen Sie die ***Spannung1*** an und ***Sondieren*** Sie an verschiedenen Stellen des Druckbolzens.



Die maximale Von-Mises-Spannung im Bolzens beträgt $\sigma_{\text{max}} = 8{,}9\,\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Die berechnete Druckspannung an dieser Stelle beträgt $\sigma_{\text{d}} = 8{,}9\,\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Wir erkennen eine sehr gute Übereinstimmung.

Aufgabe 2:

Zuerst berechnen wir die maximale **Biegespannung** im Bolzen. Beim Freimachen des Bolzens kann man die angreifenden Kräfte als Einzel- oder Streckenlasten annehmen. In den Zeichnungen zur Hebelpresse finden Sie die Masse mit Toleranzangabe zu den Bohrungen im Druckbolzen und dem Bogenstück. Der Bolzen hat einen Durchmesser 8 h11. Es liegen also folgende Passungen vor:



Bohrung Druckbolzen / Bolzen: Passung H7/h11

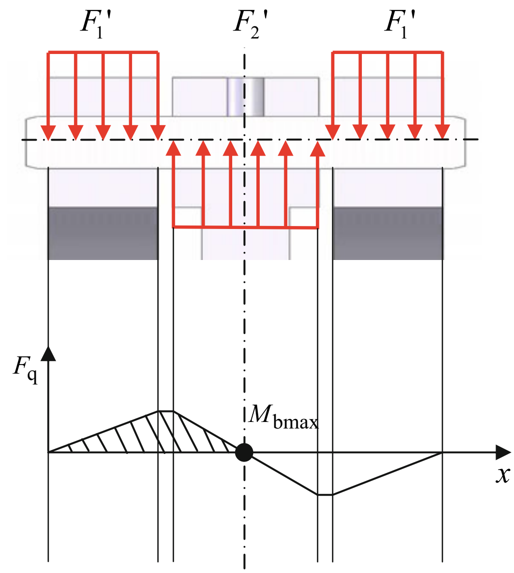
Bohrung Bogenstück / Bolzen: Passung H7/h11

In beiden Fällen handelt es sich um Spielpassungen.

Die Lasten nehmen wir, wie in der Aufgabenstellung verlangt, als Streckenlasten an.

Streckenlast $F_1' = \dfrac{685\text{ N}/2}{15\text{ mm}} = 22{,}8\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}} \left(91{,}4\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}}\right)$,

Streckenlast $F_2' = \dfrac{685\text{ N}}{20\text{ mm}} = 34{,}3\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}} \left(137{,}1\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}}\right)$



Die Situation entspricht beinahe dem Einbaufall 1 bei Roloff/Matek Kap. 9 [5]. Der Ständer und die Bogenstücke haben aber 2 mm Abstand. Deshalb rechnen wir das maximale Biegemoment mit Hilfe des Querkraft-Verlaufes aus:

Aus dem Querkraft-Verlauf $F_q(x)$ kann das maximale Biegemoment M_{bmax} in der Mitte des Bolzens berechnet werden.

Es entspricht dem Flächeninhalt der schraffierten Fläche:

$$M_{bmax} = \frac{342{,}5\ \text{N} \cdot 15\ \text{mm}}{2} + 342{,}5\ \text{N} \cdot 2\ \text{mm} + \frac{342{,}5\ \text{N} \cdot 10\ \text{mm}}{2} = 4\,966{,}3\ \text{Nmm} \quad (19\,872{,}3\ \text{Nmm})$$

Das Widerstandsmoment kann ebenfalls berechnet werden:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot (8\ \text{mm})^3}{32} = 50{,}3\ \text{mm}^3$$

Somit wird die maximale **Biegespannung** im Bolzen:

$$\sigma_b = \frac{M_{bmax}}{W} = \frac{4\,966{,}3\ \text{Nmm}}{50{,}3\ \text{mm}^3} = 98{,}8\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (395{,}3\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Es ist mit folgender Sicherheit gegen Fließen zu rechnen:

$$\nu = \frac{\sigma_{bzul}}{\sigma_{bmax}} = \frac{550\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{98{,}8\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 5{,}6 \quad (1{,}4)$$

(zulässige Biegespannung für 38Cr2 $\sigma_{bzul} = R_e = 550\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)

Wir sehen, dass bei der maximalen Kraft von $F_{max} = 800\ \text{N}$ der Bolzen stark beansprucht wird und nahe an die Fließgrenze gerät.

Abscherspannung im Bolzen (Beachte: es sind zwei Scherflächen!):

$$\tau_a = \frac{F}{A} = \frac{685\ \text{N}}{2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (8\ \text{mm})^2} = 6{,}8\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (27{,}3\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Wir berechnen hier die Sicherheit gegen Bruch: $\nu = \frac{\tau_{\text{azul}}}{\tau_a} = \frac{0.8 \cdot 800\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{6{,}8\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 94{,}1\ (23{,}4)$

Für die zulässige Scherfestigkeit τ_{azul} wird die Scherfestigkeit $\tau_{\text{aB}} \approx 0.8 \cdot R_m$ [3] eingesetzt.

Die Sicherheit gegen Abscheren ist sehr hoch.

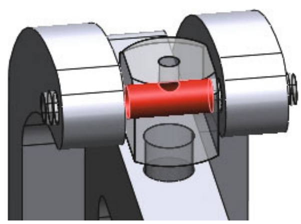
Flächenpressung:

Da der Bolzen (38 Cr 2) die höhere Festigkeit als der Druckbolzen und die Bogenstücke (S235) besitzt, vergleichen wir die vorhandene Flächenpressung mit dem zulässigen Flächenpressungswert für S235:

$$p_{\text{zul}} = 0{,}35 \cdot R_m = 0{,}35 \cdot 360\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 126\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5]$$

Vorhandene Flächenpressung im **Druckbolzen**:

$$p_{\text{vorhSt}} = \frac{F}{A_{\text{proj}}} = \frac{685\ N}{8\ \text{mm} \cdot 20\ \text{mm}} = 4{,}3\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\ (17{,}1\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

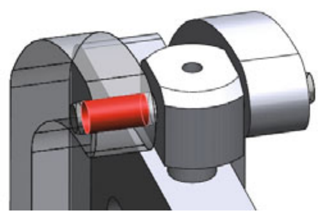


Sicherheit Flächenpressung **Druckbolzen**:

$$\nu = \frac{p_{\text{zul}}}{p_{\text{vorhSt}}} = \frac{126\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{4{,}3\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 29{,}4\ (7{,}4)$$

Vorhandene Flächenpressung im **Bogenstück**:

$$p_{\text{vorhB}} = \frac{F}{A_{\text{proj}}} = \frac{685\ \text{N}/2}{8\ \text{mm} \cdot 15\ \text{mm}} = 2{,}9\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\ (11{,}4\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$



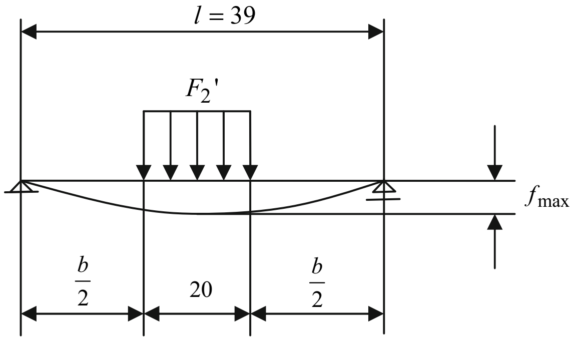
Sicherheit Flächenpressung im **Bogenstück**:

$$\nu = \frac{p_{\text{zul}}}{p_{\text{vorhSt}}} = \frac{126\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{2{,}9\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 43{,}4\ \ (11{,}1)$$

Auch die Flächenpressung stellt kein Problem dar.

Zum Schluss die zu erwartende **Durchbiegung** in der Mitte des Bolzens:

Wir verzichten auf eine Herleitung und vereinfachen das Berechnungsmodell folgendermaßen: Balken auf zwei Stützen mit einer Streckenlast in der Mitte.



Maximale Durchbiegung [1]:

$$f_{\max} = \frac{F_2' \cdot (l^2 - b^2) \cdot (5\,l^2 - b^2)}{384 \cdot EI}$$

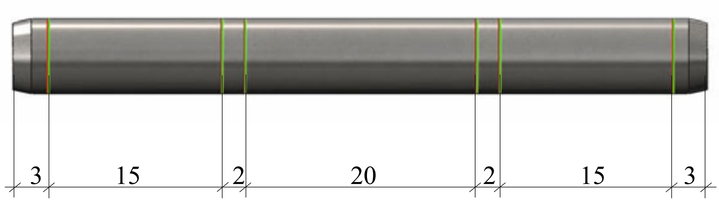
$$f_{\max} = \frac{34{,}3\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}} \cdot ((39\ \mathrm{mm})^2 - (19\ \mathrm{mm})^2) \cdot (5 \cdot (39\ \mathrm{mm})^2 - (19\ \mathrm{mm})^2)}{384 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2} \cdot \frac{\pi \cdot (8\ \mathrm{mm})^4}{64}} = 0{,}018\ \mathrm{mm}\ (0{,}071\ \mathrm{mm})$$

Als möglicher Richtwert für die maximal zulässige Durchbiegung findet man bei [5] $f_{\mathrm{zul}} \approx \frac{l}{3000} \approx \frac{39\ \mathrm{mm}}{3000} \approx 0{,}013\ \mathrm{mm}$, was unter obigen Werten liegt. Am einfachsten wäre es, den Durchmesser des Bolzens zu vergrößern, damit die Durchbiegung kleiner wird, worauf wir hier aber verzichten.

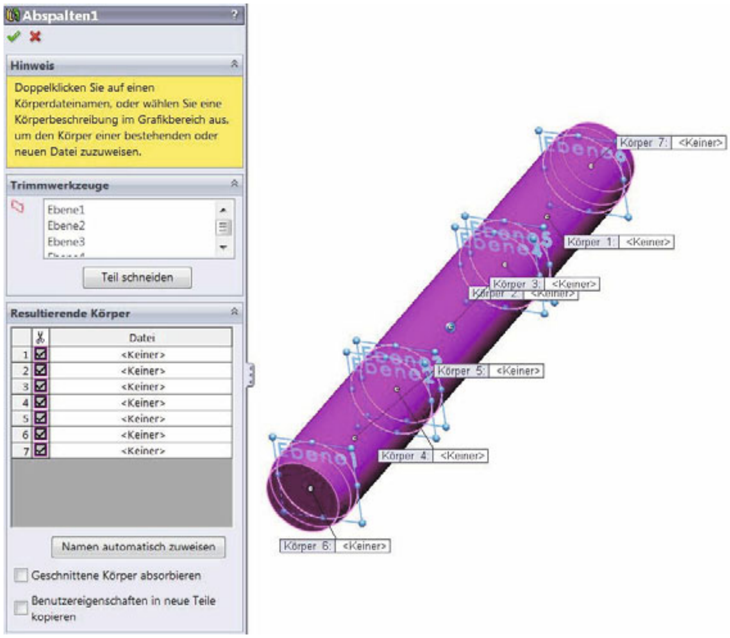
FEM-Analyse zu Aufgabe 2:

Für diese Simulation verwenden wir Balken- statt Volumenkörperelemente, weil es sich um einen stabförmigen Körper handelt.

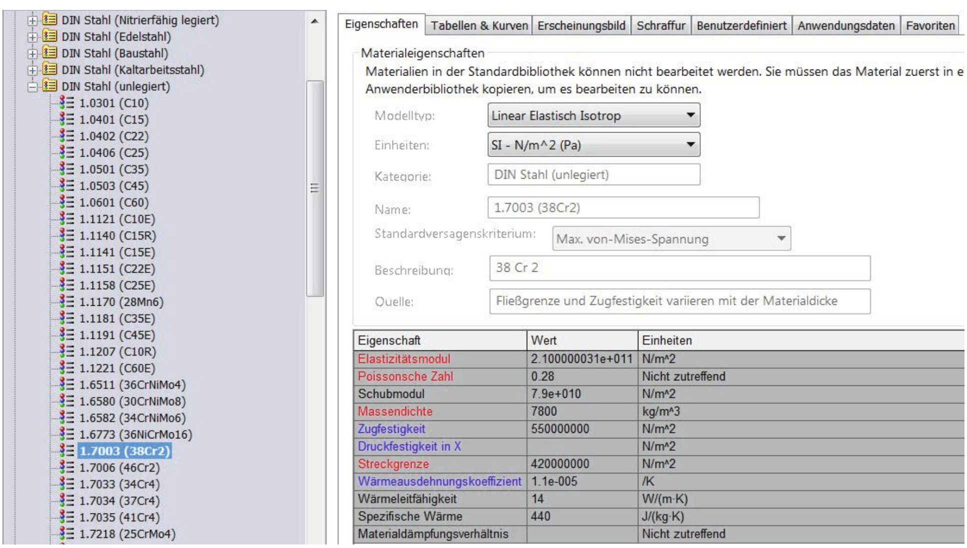
1. Zuerst öffnen Sie das Modell vom Bolzen Pos.21. Fügen Sie die unten dargestellten Ebenen hinzu (***Einfügen-Referenzgeometrie-Ebene***).



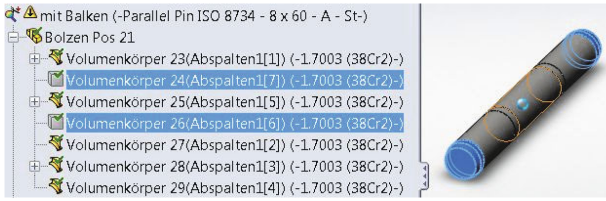
2. Teilen Sie den Körper durch ***Abspalten*** (***Einfügen-Features-Abspalten***) in 7 Teilkörper auf. Verwenden Sie dazu die im ersten Schritt erstellten 6 Ebenen als Trimmwerkzeuge. Als resultierenden Körper behalten Sie alle 7 durch das Abspalten entstandenen Teilkörper.



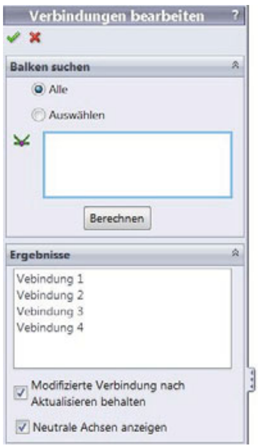
3. Erstellen Sie eine statische Studie.
4. Weisen Sie dem Bolzen mit Rechtsklick auf ***Bolzen Pos 21 Material auf alle Körper anwenden*** das Material Vergütungsstahl 38Cr2 zu (***Anwenden-Schließen***). Falls Sie diesen Stahl nicht in der Datenbank haben, wählen Sie eine Stahlsorte mit möglichst gleichen Festigkeitswerten: Streckgrenze $R_e = 420\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, Zugfestigkeit $R_m = 550\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.



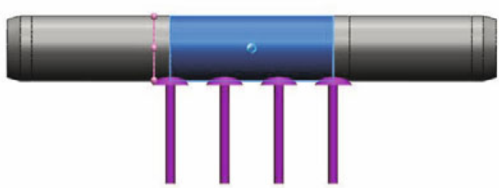
5. Schließen Sie die beiden unten dargestellten Körper aus der Analyse aus, weil Sie auf die Ergebnisse der Simulation keinen Einfluss haben. Wandeln Sie die anderen Körper in Balken um (mit Rechtsklick auf dem jeweiligen Element und ***Als Balken behandeln*** wählen).



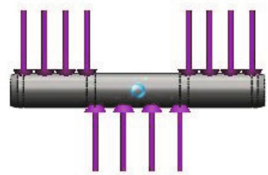
6. Wählen Sie im Menu ***Verbindungen bearbeiten Berechnen***. Das Programm erstellt die dargestellten Knoten. Als Verbindung zwischen den Teilkörpern wurde automatisch der Typ ***Verbunden*** gewählt.



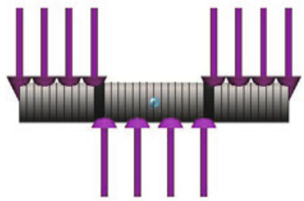
7. Definieren Sie unter ***Externe Lasten*** die Kraft $F = 685\ \mathrm{N}$ für den mittleren Balken.



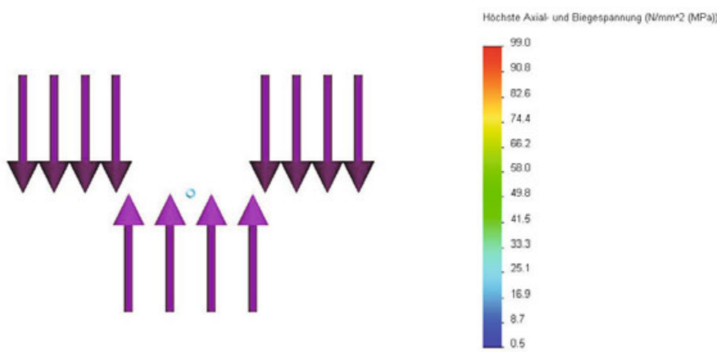
8. Auf die gleiche Weise können die ***Kraft-2*** und die ***Kraft-3*** definiert werden. Nach erfolgter Definition sieht das so aus:



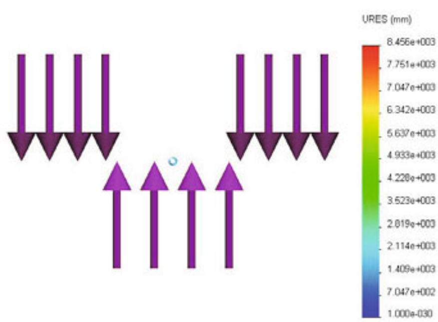
9. Wenn sie die Vernetzung erstellen, können Sie bei Balkenelementen keine Elementgröße wählen. Das Programm wählt diese automatisch. Das vernetzte Modell sieht dann so, wie wir es im 2. Kapitel bei den Grundbeanspruchungsarten schon gesehen haben, aus. Jeder hohle Zylinder entspricht einem Element.



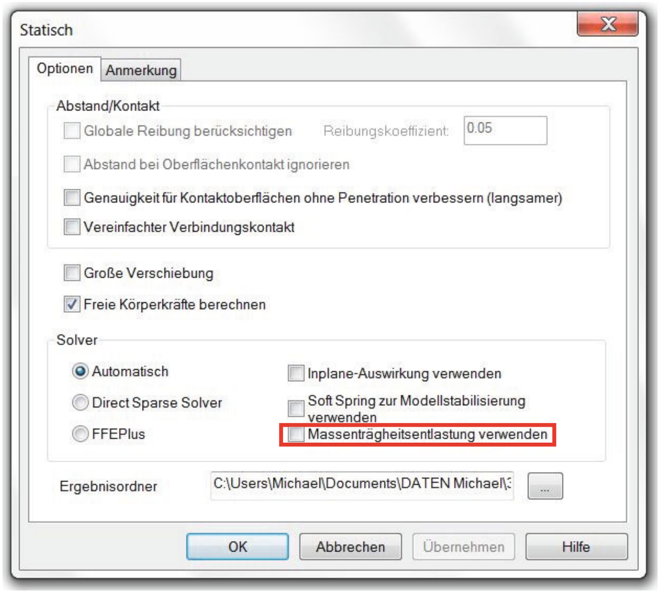
10. Führen Sie jetzt die Studie aus. Das erste Ergebnis für die Biegespannung im Bolzen sieht verwirrend aus. Das Bauteil ist verschwunden.



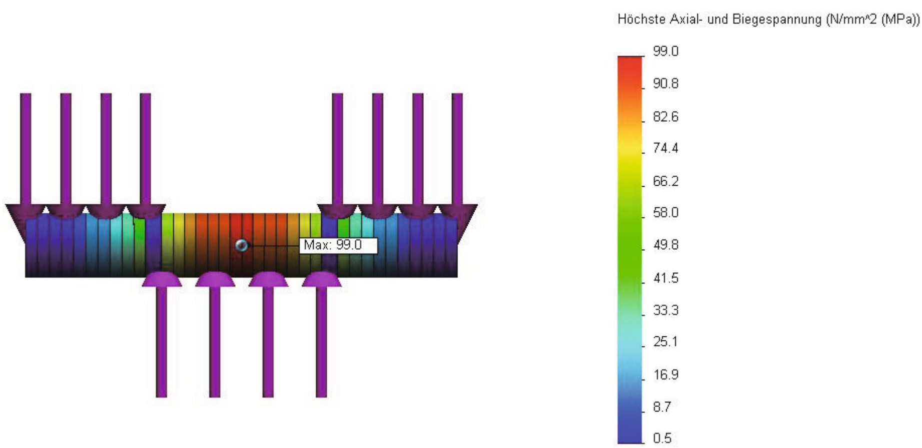
Auch bei der Verschiebungsdarstellung ist das Bauteil nicht sichtbar. Die resultierenden Verschiebungswerte sind sehr hoch (ca. 8 000 mm !)



Bei dieser Simulation wirken nur Kräfte, aber keine Lagerbedingungen. Für diese Situation kann man unter Eigenschaften die Option ***Massenträgheitsentlastung verwenden*** aktivieren. Es werden dann automatisch kleine Ausgleichskräfte gesetzt, die das Modell stabilisieren.

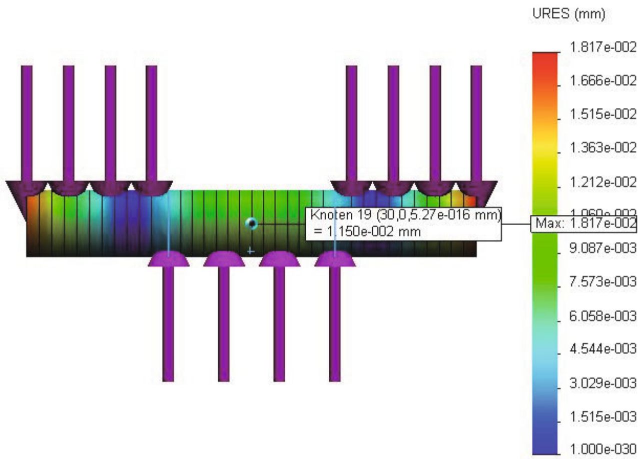


Nach Aktivierung dieser Option und erneutem Ausführen der Analyse sieht das Ergebnis richtig aus. Erwartungsgemäß wird eine maximale Biegespannung in der Mitte des Bolzens angezeigt.



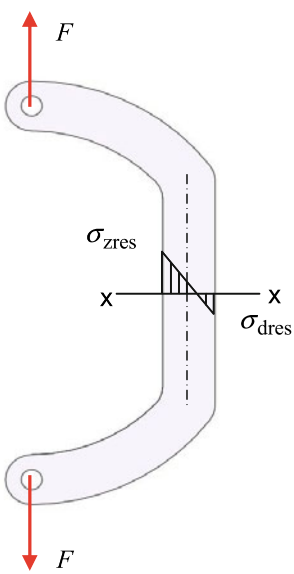
Die maximale Biegespannung in der Mitte des Bolzens beträgt $99\ \dfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$. Die berechnete Biegespannung an dieser Stelle beträgt $\sigma_b = 98{,}8\ \dfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$. Die Abweichung ist sehr gering.

Die simulierte Verformung in der Mitte des Bolzens beträgt $0{,}0115\,\text{mm}$. Der „von Hand“ mit dem vereinfachten Berechnungsmodell berechnete Wert $0{,}018\,\text{mm}$ liegt etwas höher.



Auf die Simulation der Flächenpressung bzw. Abscherspannung wird verzichtet.

Aufgabe 3:



Im Schnitt x-x wirkt eine Biege- und eine Zugspannung (Zusammengesetzte Beanspruchung).

Zugspannung:

$$\sigma_z = \frac{F}{A} = \frac{342{,}5\ \text{N}}{15\ \text{mm} \cdot 20\ \text{mm}} = 1{,}1\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4{,}6\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Biegespannung:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{F \cdot 60\ \text{mm}}{\frac{15\ \text{mm} \cdot (20\ \text{mm})^2}{6}} = 20{,}6\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (82{,}2\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Resultierende Zugspannung:

$$\sigma_{zres} = \sigma_b + \sigma_z = 21{,}7\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (86{,}8\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Resultierende Druckspannung: $\sigma_{dres} = \sigma_b - \sigma_z = 19{,}5\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (77{,}7\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$

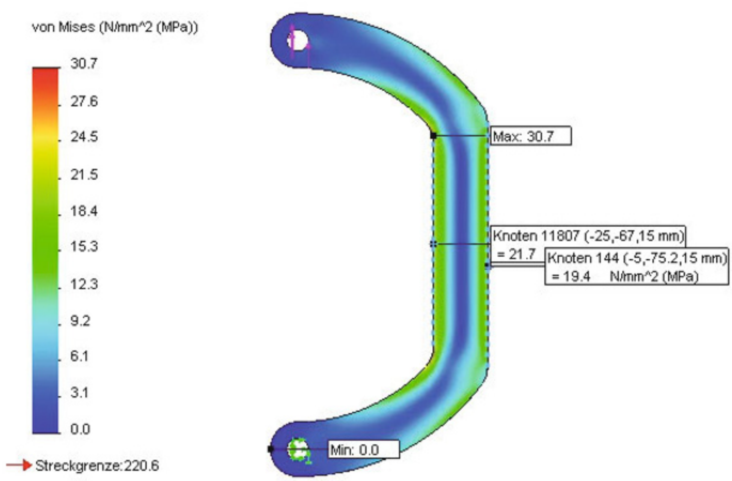
Sicherheiten gegen Fließen innen: $\nu = \dfrac{\sigma_{\text{zul}}}{\sigma_{\text{zres}}} = \dfrac{235\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{21{,}7\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 10{,}8 \quad (2{,}7)$

Sicherheiten gegen Fließen außen: $\nu = \dfrac{\sigma_{\text{zul}}}{\sigma_{\text{zres}}} = \dfrac{235\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{19{,}5\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 12{,}1 \quad (3)$

Die Beanspruchung an dieser Stelle ist unproblematisch.

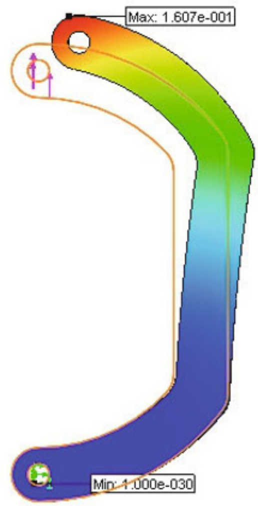
FEM-Analyse zu Aufgabe 3:

1. Zuerst öffnen Sie das Modell des Bogenstücks Pos.5.
2. Erstellen Sie eine statische Studie.
3. Weisen Sie unlegierten Baustahl zu.
4. Wählen sie ***Fixierte Geometrie*** für die untere Bohrung.
5. Definieren Sie die Kraft $F = 342{,}5\ \text{N}$ in der oberen Bohrung.
6. Vernetzen Sie mit einer Elementgröße von ca. $4{,}16\ \text{mm}$ und führen die Analyse aus. Sondieren Sie anschließend an der Innen- und Außenseite.



Die beiden Von-Mises-Spannungen entsprechen exakt den berechneten Werten: An der Innenseite wurden $21{,}7\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ berechnet und der simulierte Wert an dieser Stelle ist genau gleich groß und dasselbe gilt für die Außenseite mit $19{,}4\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

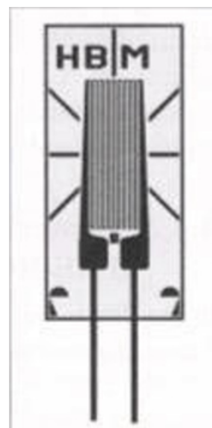
Die maximale Von-Mises-Spannung $30{,}7\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$ tritt in den Radien auf, weil die Kraftumlenkung an dieser Stelle am stärksten ist. Die Verformung des Bogenstückes sieht so aus:



Sie beträgt maximal $0{,}16\ \mathrm{mm}$.

Am realen Modell der Hebelpresse wurden exakt an diesen Stellen Dehnmessstreifen angebracht, um die örtlichen Spannungen zu messen. Es wird jetzt kurz erklärt, wie diese Dehnmessstreifen funktionieren:

Technische Bauteile unterliegen häufig komplexen und zum Teil unbekannten Beanspruchungen. Sie sind dementsprechend schwierig zu berechnen. Es ist daher zweckmäßig, den Verformungszustand experimentell zu ermitteln und mit Hilfe der gemessenen Verformungsgrößen sowie der elastischen Kennwerte auf den Spannungszustand und damit auf die äußeren Beanspruchungen zu schließen. Am häufigsten wird dazu der Folien-Dehnmessstreifen verwendet. Er besteht aus einem dünnen Draht, der in eine dünne Kunststofffolie eingebettet ist.



Der Dehnmessstreifen wird auf die Bauteiloberfläche geklebt. Erfährt das Bauteil z. B. eine Längenänderung, dann ändert sich auch die Länge des Drahtes. Dies ergibt eine Widerstandsänderung im Draht, weil

$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$, wobei

R: Elektrischer Widerstand

l: Drahtlänge

ρ: spezifischer elektrischer Widerstand

Wenn die Drahtlänge l größer wird, ändert sich auch der Widerstand. Diese Widerstandsänderung ist proportional zur Dehnung ε.

Es gilt: $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$

Der k-Faktor eines Dehnmessstreifens ist ein Maß für seine Empfindlichkeit. Die Widerstandsänderung ΔR und der Widerstand R sind Messwerte. Somit kann man die Dehnung ε berechnen. Aus der Festigkeitslehre kennen wir folgenden Zusammenhang:

Die mechanische Spannung beträgt: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, wobei

E E-Modul (bei Stahl ca. $210\,000\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$)

ε Dehnung in %

Dazu ein einfaches Zahlenbeispiel:

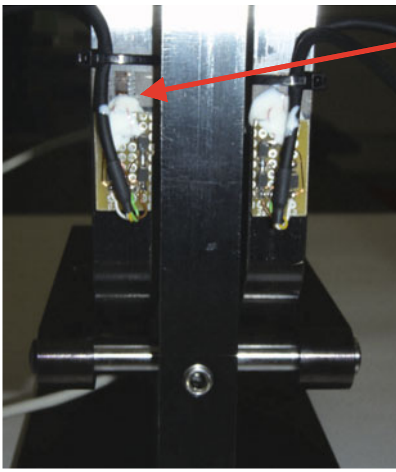
Wir erhalten aus der Messung mit einem Dehnmessstreifen eine Dehnung $\varepsilon = 0{,}0002 = 0{,}02\ \%$.

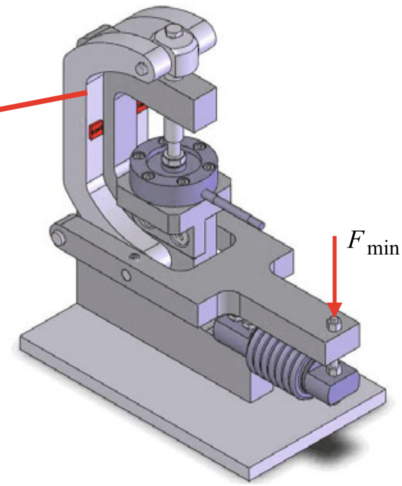
Wie groß ist die mechanische Spannung an dieser Stelle, wenn das Bauteil aus Stahl ist?

Sie beträgt:

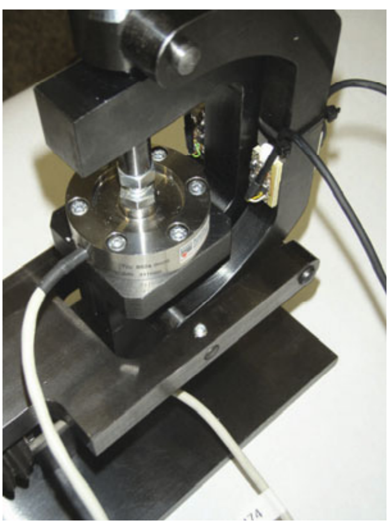
$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 210\,000\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2} \cdot 0{,}0002 = \ 42\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$$

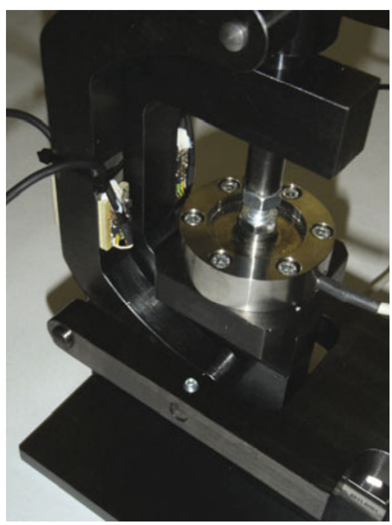
An der Hebelpresse sind nun vier solcher Dehnmessstreifen aufgeklebt worden. Mit diesen misst man nach Aufbringen der Kraft $F_{\mathrm{min}} = 200\ \mathrm{N}$ an der Gewindestange (Pos.7) vier Dehnungen.





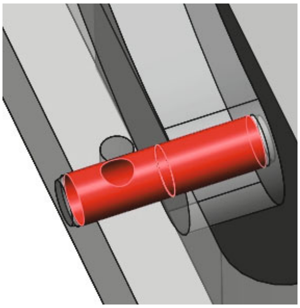
Diese vier Dehnungen multipliziert man mit dem E-Modul und erhält dann die örtlichen Spannungen.



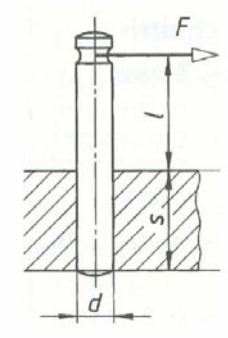


Aufgabe 4:

Es sollen für den Bolzen Pos.11 die Biegespannung (mit Einzellast berechnet), die Abscherspannung und die Flächenpressung berechnet werden.



Bei dieser Bolzenverbindung handelt es sich nach [5] um eine Steckstiftverbindung.



Man setzt für $l = \dfrac{15\ \text{mm}}{2} = 7{,}5\ \text{mm}$ und für $F = 342{,}5\ \text{N}$ ein.

So erhält man für die Biegespannung:

$$\sigma_\text{b} = \frac{M_\text{bmax}}{W} = \frac{2\,568{,}8\ \text{Nmm}}{50{,}3\ \text{mm}^3} = 51{,}5\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (204{,}5\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Das Biegemoment beträgt:

$$M_\text{bmax} = 342{,}5\ \text{N} \cdot 7{,}5\ \text{mm} = 2\,568{,}8\ \text{Nmm} \quad (10\,278{,}8\ \text{Nmm})$$

Das Widerstandsmoment kann ebenfalls berechnet werden:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot (8\ \text{mm})^3}{32} = 50{,}3\ \text{mm}^3$$

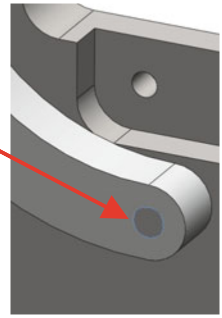
Abscherspannung im Bolzen: (Beachte: es gibt nur eine Scherfläche!)

$$\tau_\text{a} = \frac{F}{A} = \frac{342{,}5\ \text{N}}{\frac{\pi}{4} \cdot (8\ \text{mm})^2} = 6{,}8\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (27{,}3\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Da es sich hier um eine Steckstiftverbindung handelt, kann die **Flächenpressung** nach [5] folgendermaßen berechnet werden: ($s = 15\ \text{mm}$ und $d = 8\ \text{mm}$)

$$p_\text{max} = \frac{F \cdot (6 \cdot l + 4 \cdot s)}{d \cdot s^2} = \frac{342{,}5\ \text{N} \cdot (6 \cdot 7{,}5\ \text{mm} + 4 \cdot 15\ \text{mm})}{8\ \text{mm} \cdot (15\ \text{mm})^2} = 20\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (80\ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Die berechneten Spannungen wie auch die Flächenpressung sind kleiner als die zulässigen Werte.



Sowohl die oben berechnete maximale Biegespannung als auch die Abscherspannung wirken in der gleichen Schnittfläche:

Es kann somit die Von-Mises-Vergleichsspannung in dieser Schnittfläche berechnet werden:

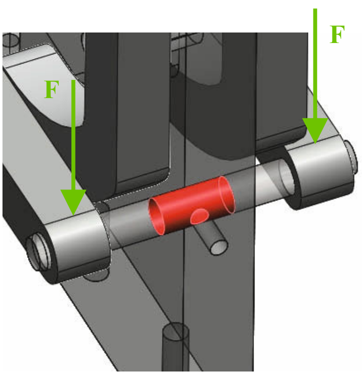
$$\sigma_{\mathrm{V}} = \sqrt{\sigma_{\mathrm{b}}^{2} + 3 \cdot \tau_{\mathrm{a}}^{2}} = \sqrt{(51{,}5\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^{2}})^{2} + 3 \cdot (6{,}8\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^{2}})^{2}}$$

$$= 52{,}8\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^{2}}\ (206{,}3\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^{2}})$$

Auch dieser Wert ist zulässig, wenn man von $\sigma_{\mathrm{zul}} = 550\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^{2}}$ ausgeht. Es wird hier keine FEM-Simulation durchgeführt. Diese könnte man analog zu Aufgabe 2 realisieren.

Aufgabe 5:

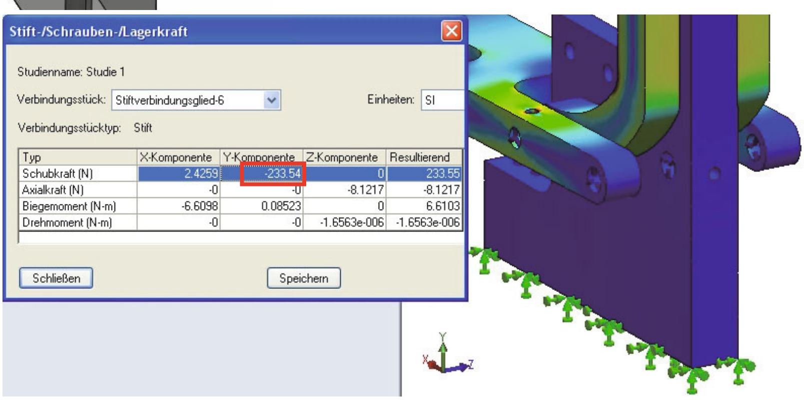
Jetzt berechnen wir die Biegespannung, die Abscherspannung und die Flächenpressung im Bolzen Pos.10 (siehe dazu die erste Zeichnung in Kap. 7.2 Zeichnungen). Er ist wie unten ersichtlich im Ständer fixiert. Diese Fixierung wirkt wie eine feste Einspannung. Wir betrachten nur noch eine Hälfte des Bolzens. Die maximale Biege- und Abscherspannung tritt in der Querschnittsfläche unmittelbar vor dem Ständer auf.



Zuerst muss die Kraft F berechnet werden. Dazu braucht man z. B. die Gleichgewichtsbedingung:

$$\sum F_{\mathrm{y}} = 0 = -200\ \mathrm{N} + 685\ \mathrm{N} - 2 \cdot F$$

Für die Kraft F erhält man $242{,}5\ \mathrm{N}$ ($970{,}5\ \mathrm{N}$). Zur Kontrolle kann man in SolidWorks die Stiftkraft anzeigen lassen. Mit Rechtsklick auf ***Ergebnisse*** kann man ***Stift-/Schrauben-/Lagerkraft auflisten…*** wählen. Als Verbindungsstück müssen Sie ***Stiftverbindungsglied-6*** wählen. Die oben berechnete Kraft entspricht in der Auswertung der y-Komponente $-233{,}54\ \mathrm{N}$.



Typ	X-Komponente	Y-Komponente	Z-Komponente	Resultierend
Schubkraft (N)	2.4259	-233.54	0	233.55
Axialkraft (N)	-0	-0	-8.1217	-8.1217
Biegemoment (N-m)	-6.6098	0.08523	0	6.6103
Drehmoment (N-m)	-0	-0	-1.6563e-006	-1.6563e-006

Die **Biegespannung** wird somit:

$$\sigma_\mathrm{b} = \frac{M_\mathrm{bmax}}{W} = \frac{5\,941{,}3\ \mathrm{Nmm}}{98{,}2\ \mathrm{mm}^3} = 60{,}5\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}\quad (242{,}2\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})$$

Das Biegemoment beträgt:

$M_\mathrm{bmax} = 242{,}5\ \mathrm{N} \cdot 24{,}5\ \mathrm{mm} = 5\,941{,}3\ \mathrm{Nmm}\ \ (23\,777{,}3\ \mathrm{Nmm})$ Das Widerstandsmoment kann ebenfalls berechnet werden:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot (10\ \mathrm{mm})^3}{32} = 98{,}2\ \mathrm{mm}^3$$

Abscherspannung im Bolzen: (Beachte: es gibt nur eine Scherfläche!)

$$\tau_\mathrm{a} = \frac{F}{A} = \frac{242{,}5\ \mathrm{N}}{\frac{\pi}{4} \cdot (10\ \mathrm{mm})^2} = 3{,}1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}\quad (12{,}4\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})$$

Es kann somit die Von-Mises-Vergleichsspannung in dieser Schnittfläche berechnet werden:

$$\sigma_\mathrm{V} = \sqrt{{\sigma_\mathrm{b}}^2 + 3 \cdot {\tau_\mathrm{a}}^2} = \sqrt{(60{,}5\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})^2 + 3 \cdot (3{,}1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})^2} = 60{,}7\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}\ (243{,}2\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})$$

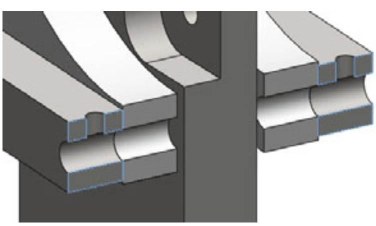
Vorhandene Flächenpressung im Ständer:

$$p_\mathrm{vorhSt} = \frac{F}{A_\mathrm{proj}} = \frac{485\ \mathrm{N}}{10\ \mathrm{mm} \cdot 20\ \mathrm{mm}} = 2{,}4\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}\ (9{,}7\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})$$

Alle Werte sind zulässig.

Aufgabe 6:

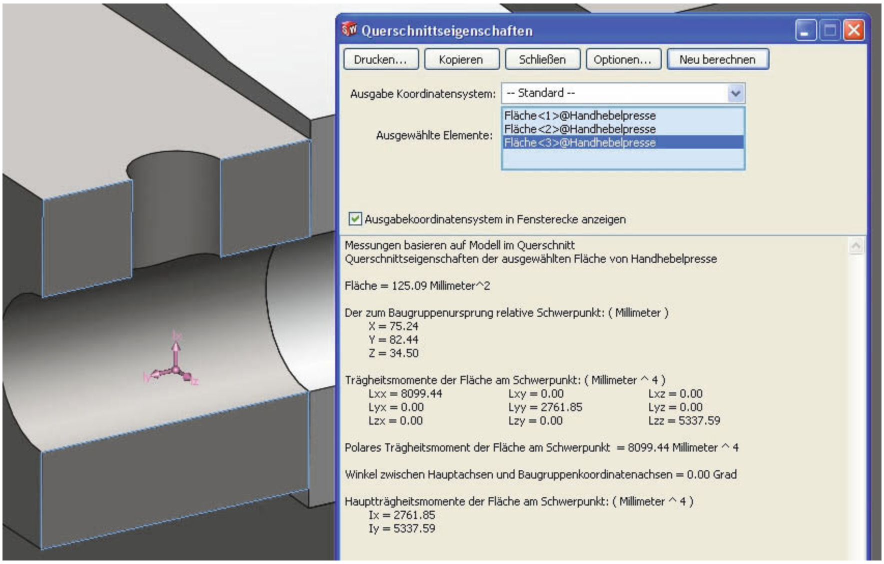
Die kritische, d. h. die am stärksten beanspruchte Stelle ist im unten dargestellten Schnitt sichtbar.



Diese Querschnittsfläche wird vor allem auf Biegung beansprucht. Wir berechnen also die Biegespannung:

Das Flächenmoment bestimmen wir mit Hilfe von SolidWorks. Mit dem Klicken auf ***Querschnittseigenschaften*** (Evaluieren) erscheint das unten dargestellte Fenster. Wählen Sie die Flächen an und lassen dann neu berechnen:

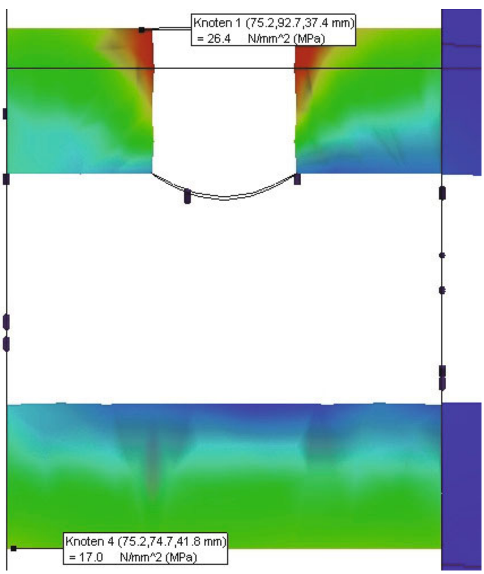
Wir brauchen das Flächenmoment $I_\mathrm{y} = 5\,337{,}6\ \mathrm{mm}^4$ (Kontrollieren Sie das Resultat doch mit einer „Handrechnung“). Für die Berechnung der beiden Widerstandsmomente brauchen wir auch den Schwerpunkt. Wenn Sie weniger rechnen möchten, öffnen Sie am besten das Gabelstück separat und lassen den Schwerpunkt in Bezug zum Teile-Ursprungs berechnen. Er befindet sich $7{,}7\ \mathrm{mm}$ von der Unterkante entfernt.



Für die Biegespannung (Biegezug) in der oberen Randfaser ($e_1 = 10{,}3$ mm) erhält man: (Beachten Sie: nur die halbe Kraft verwenden, wenn Sie nur mit einer Fläche rechnen!)

$$\sigma_b = \frac{M_{\mathrm{bmax}}}{I_y} \cdot e_1 = \frac{100\ \mathrm{N} \cdot 140{,}75\ \mathrm{mm}}{5\,337{,}6\ \mathrm{mm}^4} \cdot 10{,}3\ \mathrm{mm} = 27{,}2\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2} \quad (108{,}6\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})$$

Für die Biegespannung (Biegedruck) in der unteren Randfaser ($e_2 = 7{,}7$ mm) erhält man:



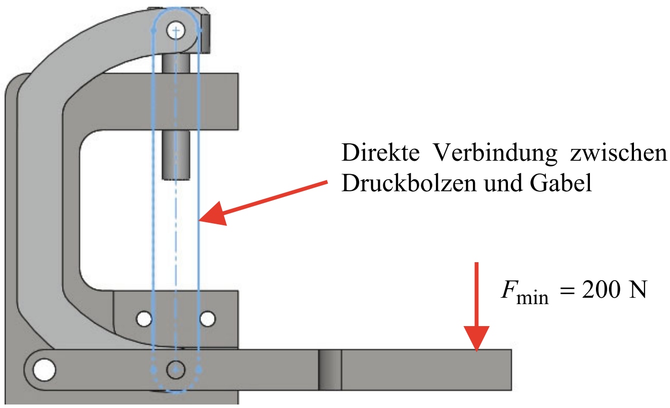
$$\sigma_b = \frac{M_{\mathrm{bmax}}}{I_y} \cdot e_1 = \frac{200\ \mathrm{N} \cdot 140{,}75\ \mathrm{mm}}{5\,337{,}6\ \mathrm{mm}^4} \cdot 7{,}7\ \mathrm{mm}$$
$$= 20{,}3\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2} \quad (81{,}2\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2})$$

Das maximale Biegemoment an dieser Stelle kann man auf verschiedene Arten berechnen. Hier wurde die Kraft $F_{\mathrm{min}} = 200$ N (800 N) mit dem Wirkabstand zur kritischen Stelle 140,75 mm multipliziert.

Sie sehen die ungefähre Übereinstimmung der Werte.

Aufgabe 7:

Die Ausführung der beiden Bogenstücke (Pos.5) widerspricht ganz klar dem Konstruktionsgrundsatz **„Leite Kräfte auf möglichst direktem Weg“.** Natürlich ermöglicht diese Ausführung eine viel bessere Zugänglichkeit zum Einpressbereich, was hier erwünscht ist. Es soll berechnet werden, wie dick eine direkte Verbindung (bei gleichbleibender Breite 20 mm) zwischen Druckbolzen (Pos.3) und Gabel (Pos.4) sein müsste, damit die gleiche Normalspannung im Querschnitt auftritt, wie im Falle des Bogenstückes.



Die bei Aufgabe 3 berechnete maximale Normalspannung $\sigma_{\text{zres}} = 21{,}7\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ entsteht bei der Kraft $F_{\text{min}} = 200\text{ N}$. Mit der Kraft $F = \dfrac{F_{\text{Druckbolzen}}}{2} = 342{,}5\text{ N}$, die in der direkten Verbindung wirkt, kann folgende Gleichung für die Zugspannung aufgestellt werden (x ist die gesuchte Dicke):

$$\sigma_{\text{z}} = 21{,}7\,\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \frac{342{,}5\text{ N}}{20\text{ mm}\cdot x}$$ => daraus ergibt sich $x = 0{,}79\text{ mm}$ für die gesuchte Dicke.

Mit diesem Beispiel kann man sehr schön aufzeigen, dass die Zugbeanspruchung ökonomischer ist als die Biegebeanspruchung. Sie benötigt für die gleiche Kraft bedeutend weniger Material.

Aufgabe 8:

Es sollen die Schraubenkräfte F_1 und F_2 berechnet werden. Wie man in der untenstehenden Grafik erkennen kann, ist die Schraubenkraft F_2 größer als F_1. Sie lassen sich mit Hilfe des Momentengleichgewichtes und des Strahlensatzes berechnen.

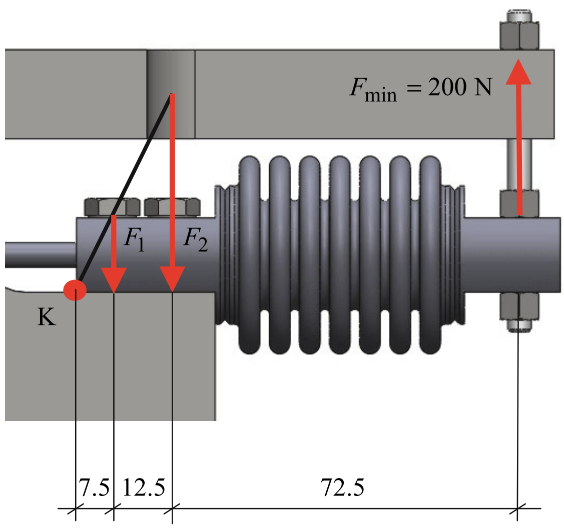
Momentengleichgewicht für die Kippkante K:

$$\sum M_K = 0 = 200 \text{ N} \cdot 92.5 \text{ mm} - F_1 \cdot 7.5 \text{ mm} - F_2 \cdot 20 \text{ mm}$$

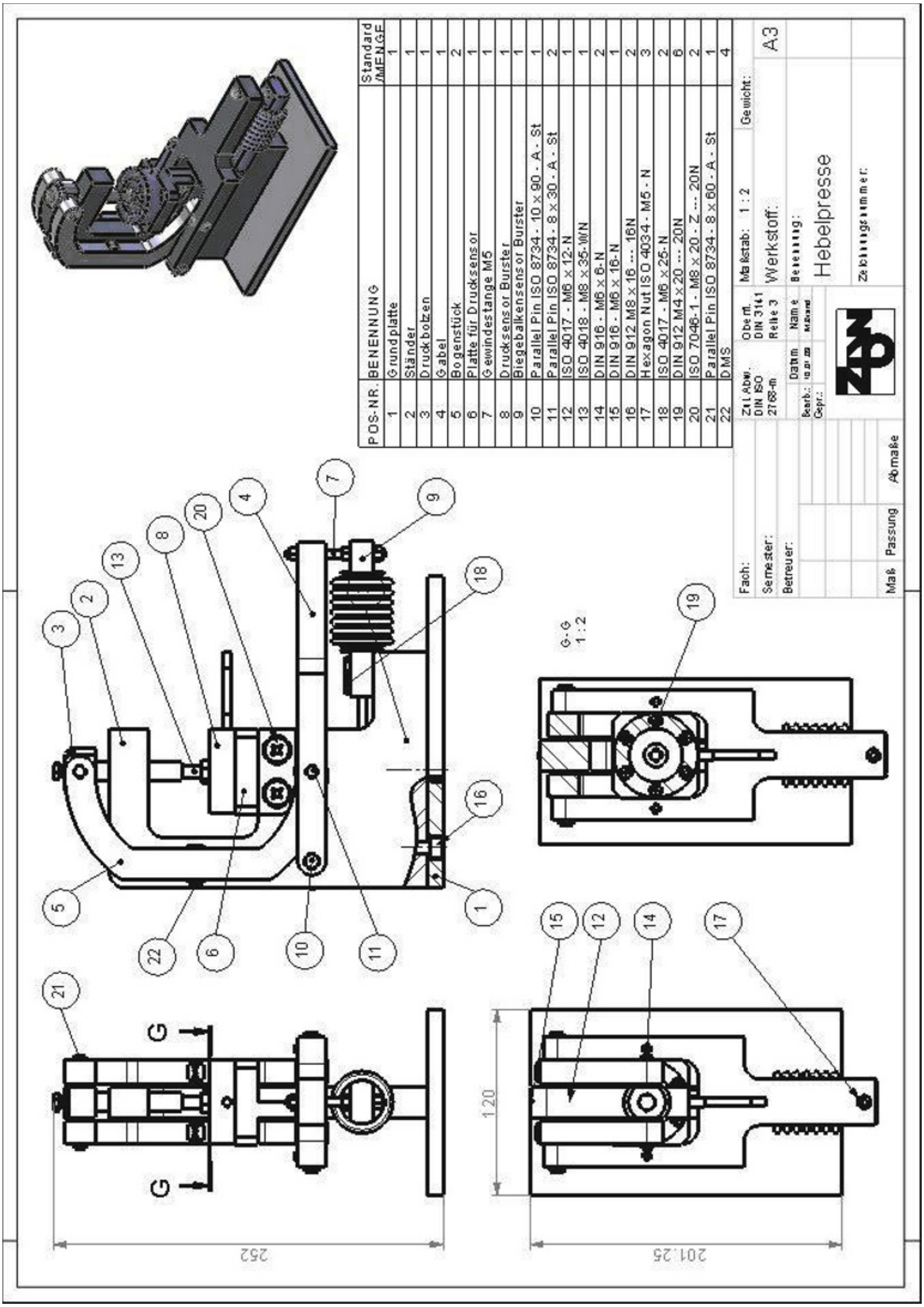
Strahlensatz für die beiden Schraubenkräfte:

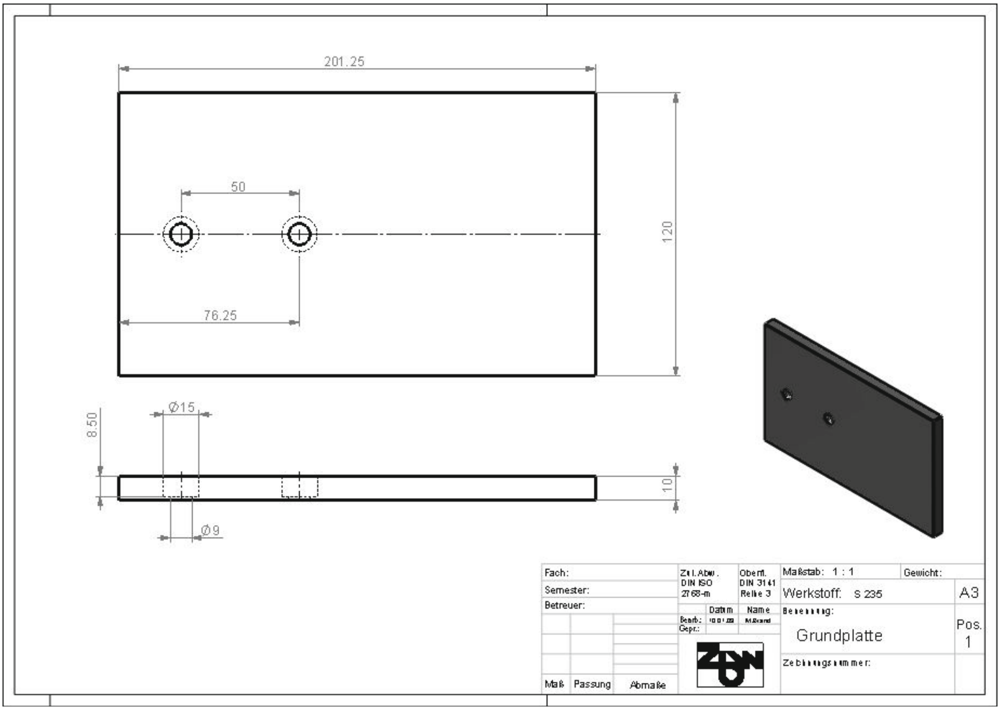
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{7,5 \text{ mm}}{20 \text{ mm}}$$

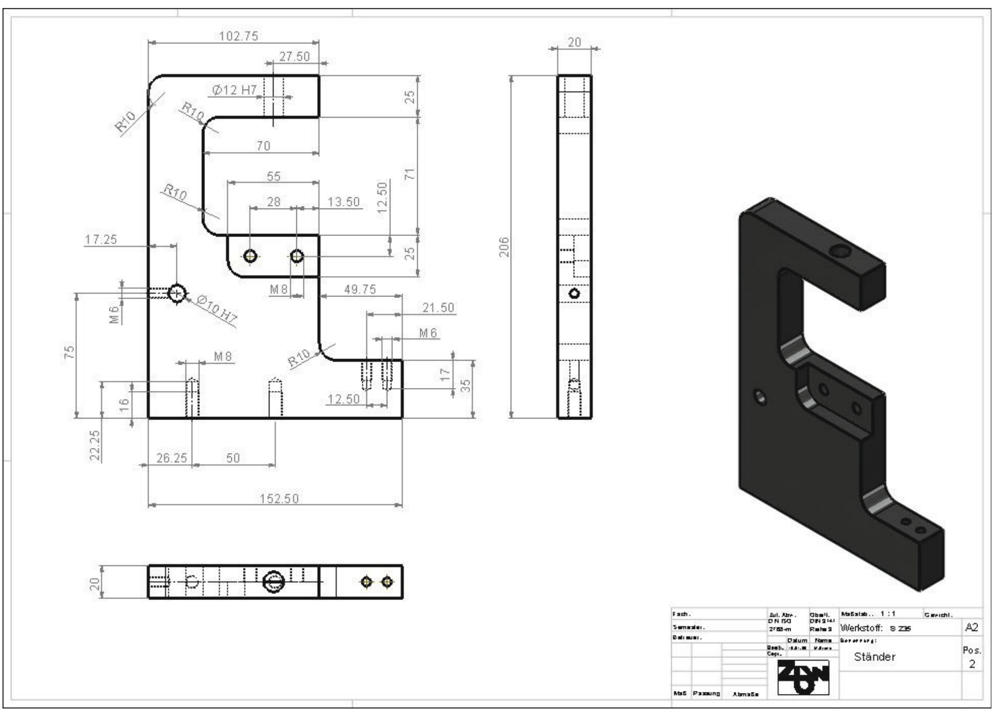
Das Auflösen beider Gleichungen ergibt $F_1 = 304,1 \text{ N } (1\ 216,4 \text{ N})$ und $F_2 = 811 \text{ N } (3\,243,8 \text{ N})$.

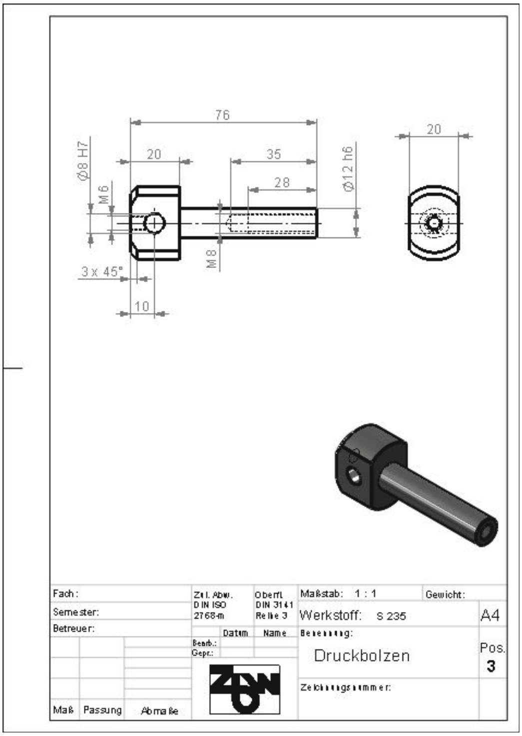


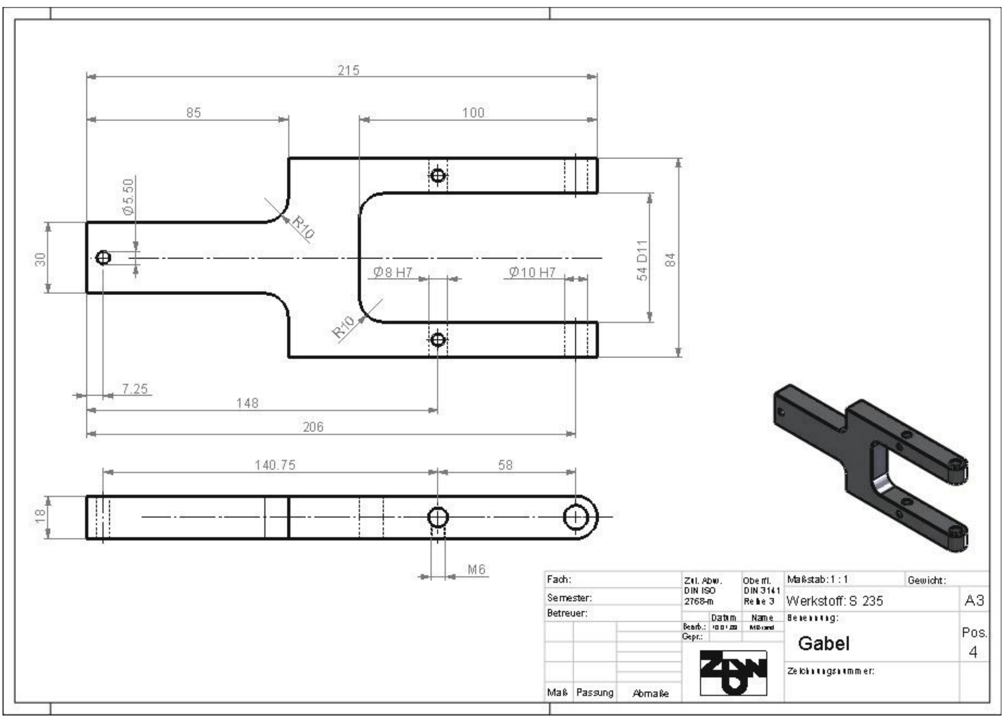
7.2 Zeichnungen (Geometrische Abmessungen für Berechnungen)

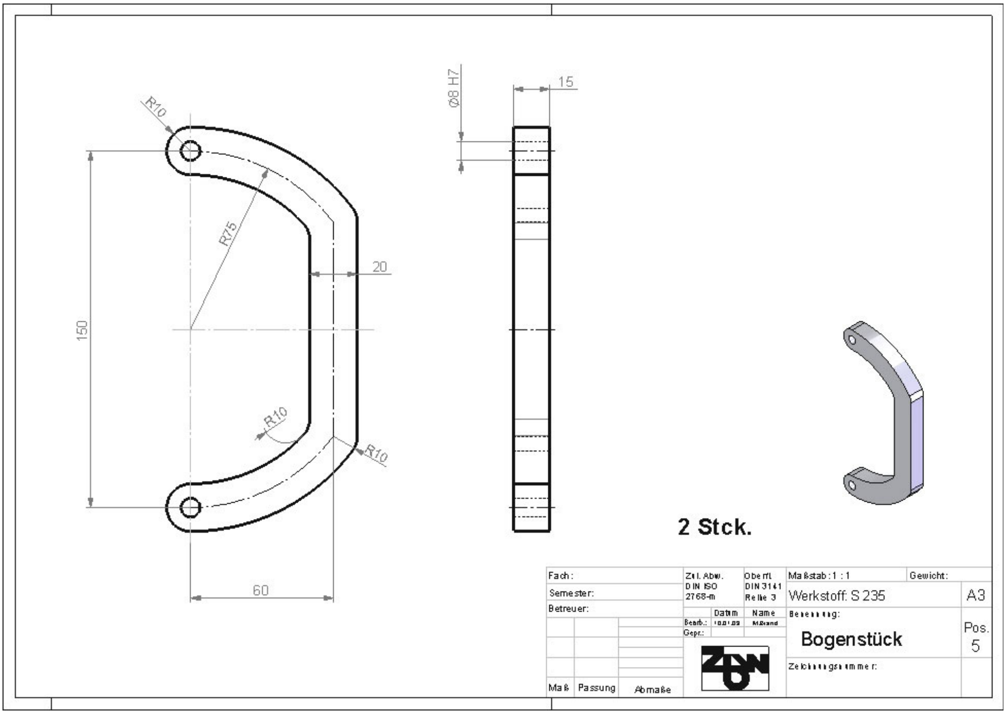


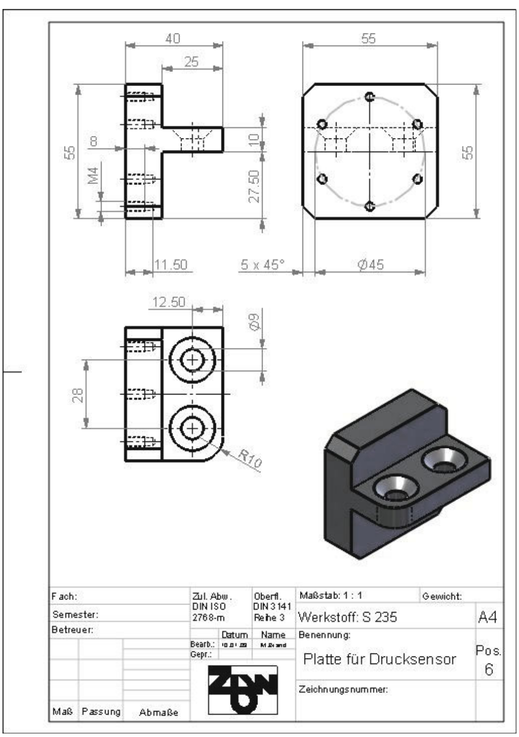

201.25
50
76.25
120
Ø15
8.50
10
Ø9
Fach:
Semester:
Betreuer:
Maßstab: 1 : 1
Gewicht:
Werkstoff: S 235
A3
Grundplatte
Pos.
1
Maß
Passung
Abmaße

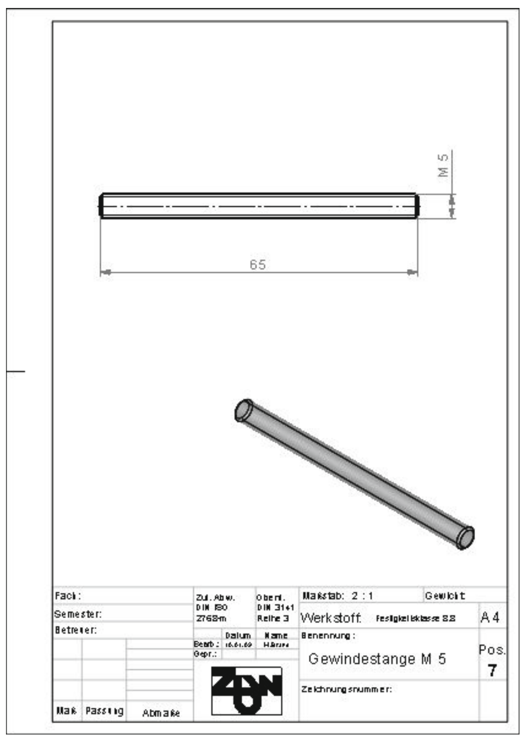

102.75
27.50
Ø12 H7
R10
25
70
71
55
28
13.50
12.50
17.25
M8
49.75
Ø10 H7
M6
21.50
75
M6
17
35
16
12.50
22.25
26.25
50
152.50
20
206
20
Werkstoff: S 235
A2
Ständer
Pos.
2


76
20
35
28
Ø8 H7
M6
Ø12 h6
M8
3 x 45°
10
20
Fach:
Semester:
Betreuer:
Maßstab: 1 : 1
Gewicht:
Werkstoff: S 235
A4
Druckbolzen
Pos.
3
Maß
Passung
Abmaße


215
85
100
Ø5.50
R10
30
Ø8 H7
Ø10 H7
54 D11
84
7.25
148
206
140.75
58
18
M6
Fach:
Semester:
Betreuer:
Maßstab: 1 : 1
Gewicht:
Werkstoff: S 235
A3
Gabel
Pos.
4
Maß
Passung
Abmaße


R10
R75
20
150
R10
R10
60
Ø8 H7
15
2 Stck.
Fach:
Semester:
Betreuer:
Maß Passung Abmaße
Zul. Abw. DIN ISO 2768-m
Oberfl. DIN 3141 Reihe 3
Maßstab: 1 : 1
Gewicht:
Werkstoff: S 235
A3
Benennung:
Bogenstück
Pos. 5
Zeichnungsnummer:

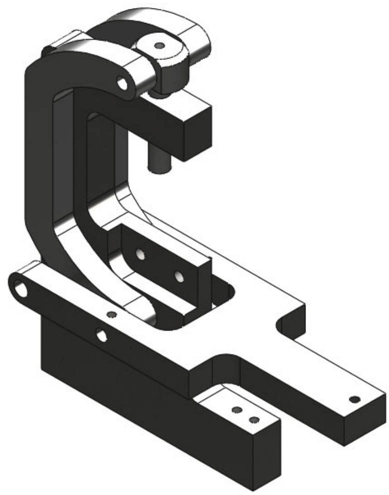

40
25
55
8
M4
10
27.50
11.50
5 x 45°
55
55
Ø45
12.50
Ø9
28
R10
Fach:
Semester:
Betreuer:
Maß Passung Abmaße
Zul. Abw. DIN ISO 2768-m
Oberfl. DIN 3141 Reihe 3
Maßstab: 1 : 1
Gewicht:
Werkstoff: S 235
A4
Benennung:
Platte für Drucksensor
Pos. 6
Zeichnungsnummer:


M 5
65
Fach:
Semester:
Betreuer:
Maß Passung Abmaße
Zul. Abw. DIN ISO 2768-m
Oberfl. DIN 3141 Reihe 3
Maßstab: 2 : 1
Gewicht:
Werkstoff: Festigkeitsklasse 8.8
A 4
Benennung:
Gewindestange M 5
Pos. 7
Zeichnungsnummer:

7.3 Simulation Hebelpresse als Baugruppe

Bei obigen Simulationen wurden immer nur Einzelteile analysiert. Es folgt nun der Versuch, die komplette Hebelpresse in einer Simulation zu analysieren. Wir wissen aus dem vorherigen Kapitel, wie man vorzugehen hat.

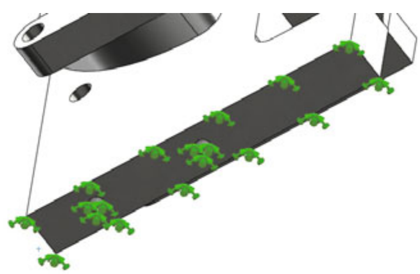
Bei einer Baugruppensimulation stellt sich immer die Frage, welche Teile man in der Simulation integrieren möchte. Bei dieser Simulation werden zuerst alle Teile, die wir für die Simulation nicht benötigen, unterdrückt. Dazu gehören die Dehnmessstreifen, die Schrauben und Bolzen (inkl. Gewindestange), die Sensoren und auch die Platte für den Drucksensor. Das aufbereitete, unten dargestellte Modell ist somit vereinfacht worden und kann für die Simulation verwendet werden.



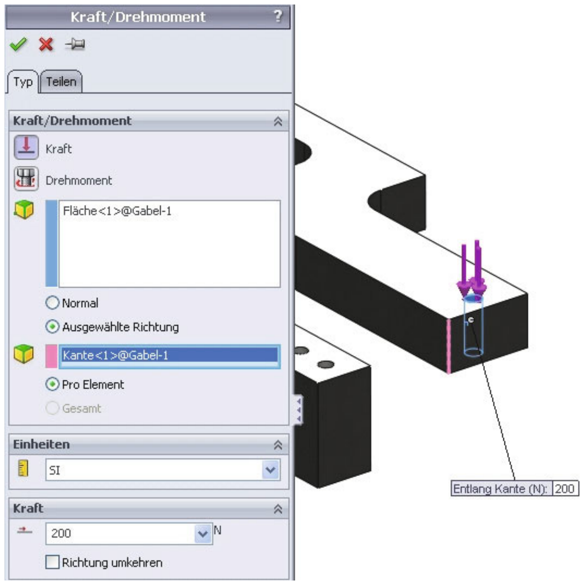
FEM-Analyse der ganzen Baugruppe:

Öffnen Sie die Baugruppe Hebelpresse.sldasm und erstellen Sie eine statische Studie. Führen Sie anschließend die folgenden Schritte durch:

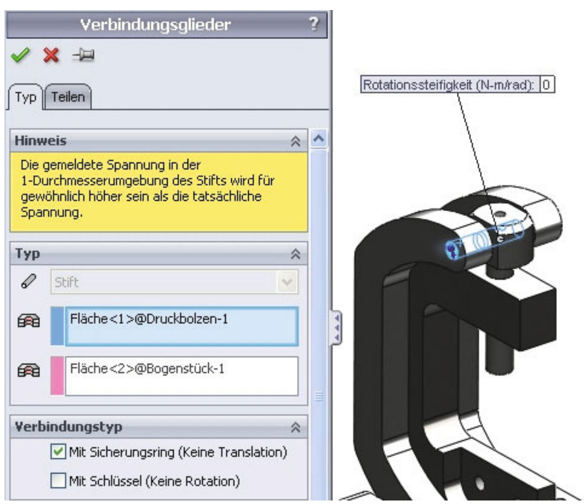
1. Material ***Unlegierter Baustahl*** anwenden (gleichzeitig auf alle Komponenten).
2. ***Fixierte Geometrie*** an der unteren Fläche des Ständers definieren.



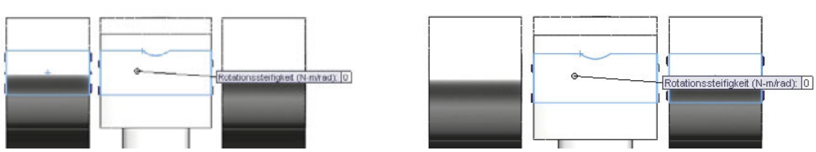
3. Kraft $F = 200$ N an der Bohrung in der Gabel definieren.



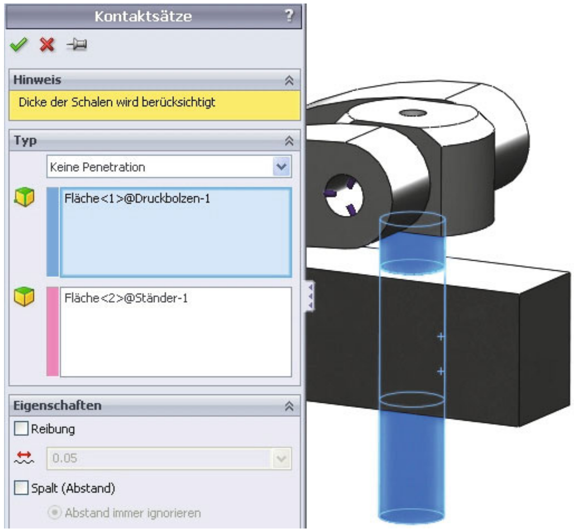
4. Bei jeder Bolzenverbindung definieren Sie ein Verbindungsglied ***Stift***. Man könnte die Bolzen auch in die Analyse mit einbeziehen, was aber mehr Rechnerleistung und Rechenzeit benötigt. Beim Verbindungstyp ***mit Sicherungsring (keine Translation)*** aktivieren. Die Rotation hingegen muss zugelassen werden.



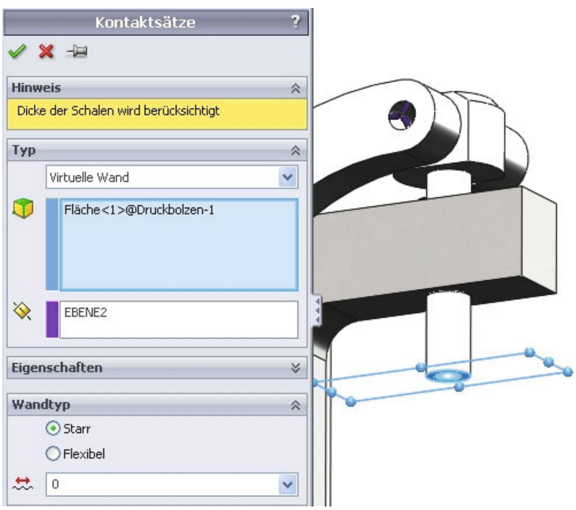
Sie müssen insgesamt sechs Stiftverbindungen definieren. Bei durchgehenden Bolzen (z. B. Pos.21) müssen für die statische Analyse zwei Stiftverbindungen angebracht werden.



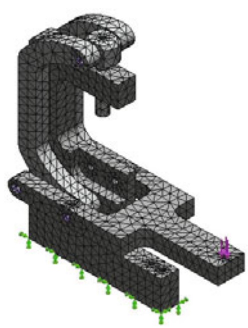
5. Definieren Sie einen Kontaktsatz ***Keine Penetration*** für den Druckbolzen im Ständer.



6. Der Druckbolzen drückt über eine Schraube (hier unterdrückt) auf den Drucksensor. Definieren Sie für die Fixierung des Druckbolzens den Kontaktsatz ***Virtuelle Wand*** und wählen Sie die ***Fläche<1>Druckbolzen-1*** und die ***EBENE2*** an. Die virtuelle Wand soll starr sein.

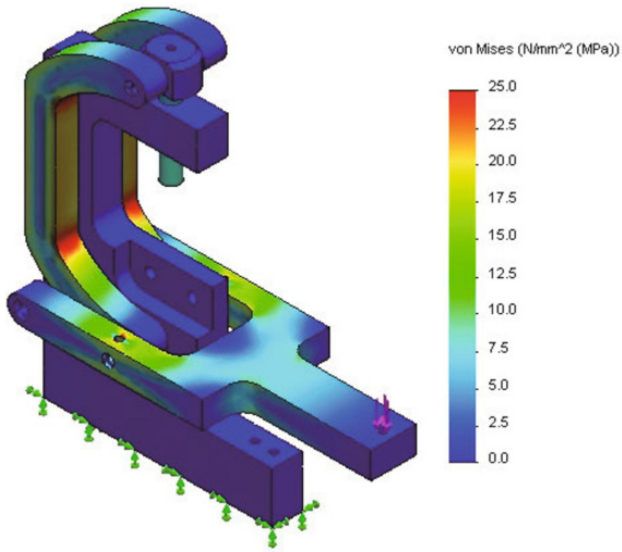


7. Vernetzen Sie jetzt die Baugruppe mit einer Elementgröße von ca. 8,9 mm .

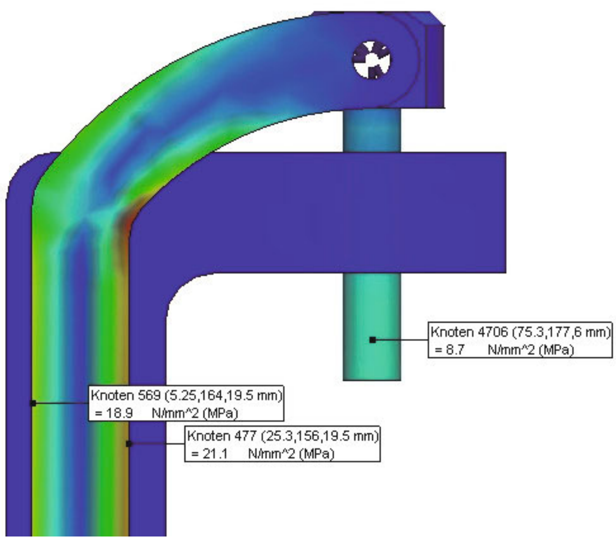


8. Führen Sie die Analyse aus.

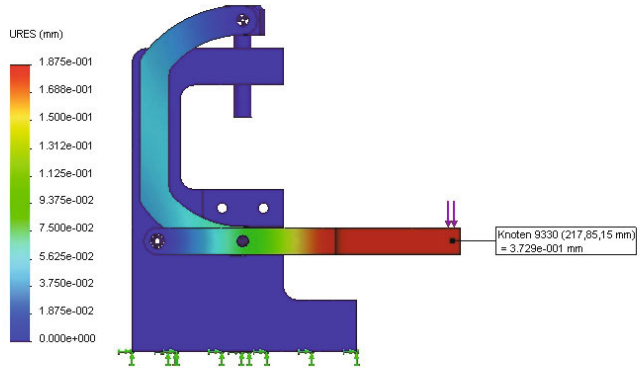
9. Interpretation der Ergebnisse: Zuerst der Spannungsaufbau in der Hebelpresse. Weil man das System mit einer virtuellen Wand beim Druckbolzen abgeschlossen hat, sieht man keinen Spannungsaufbau im Ständer.



Sondieren Sie die weiter vorne berechneten und simulierten Werte hier in der Baugruppe und vergleichen Sie:

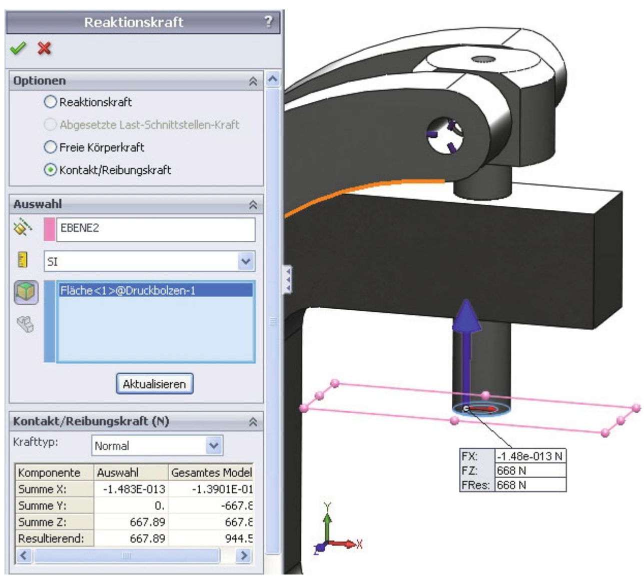


Der Wert für die Druckspannung im Druckbolzen (aus Aufgabe 1) $\sigma_d = 8{,}9\ \frac{N}{mm^2}$ stimmt gut mit dem Wert $\sigma_d = 8{,}7\ \frac{N}{mm^2}$ aus der Baugruppensimulation überein. Auch die resultierenden Zugspannungswerte an der Innenfläche des Bogenstückes stimmen ziemlich gut überein (berechnet $\sigma_{\text{resz}} = 21{,}7\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ zu $\sigma_{\text{resz}} = 21{,}1\,\dfrac{\text{N}}{\text{mm}^2}$). Dasselbe gilt für die resultierende Druckspannung in der Außenfläche. Nun zur Verformung:



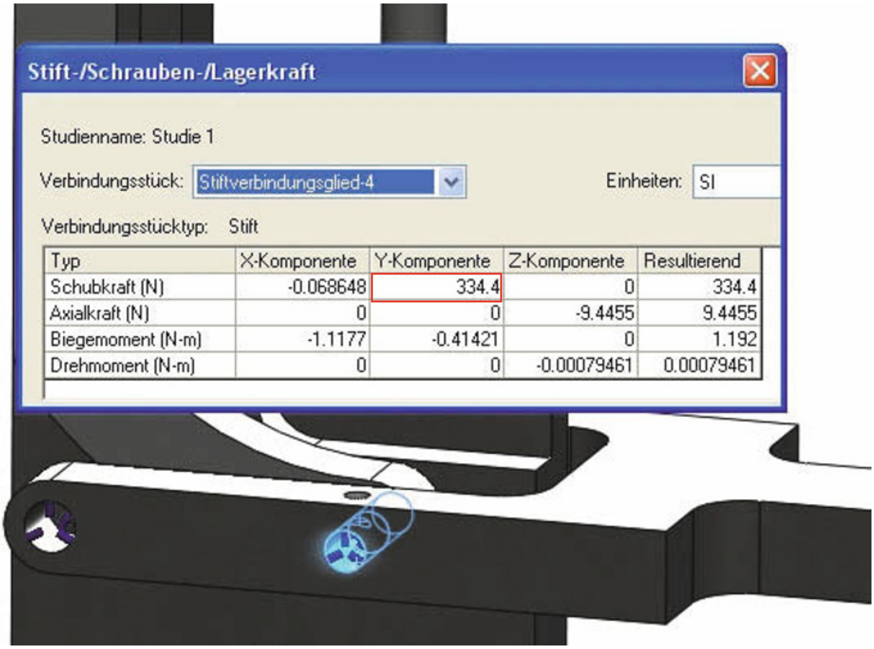
Die zu erwartende maximale Verformung liegt also bei ca. $0{,}37\ \text{mm}$.

Wie wir schon im vorherigen Kapitel gesehen haben, können aus einer FEM-Analyse auch Kräfte ermittelt werden. Bei Aufgabe 1 wurde für $F_{\text{min}} = 200\ \text{N}$ eine Kraft im Druckbolzen $F_{\text{Druckbolzen}} = 685\ \text{N}$ mit dem Momentengleichgewicht berechnet. Wählen Sie mit Rechtsklick auf Ergebnisse ***Ergebniskraft auflisten…***.



Die an dieser Stelle wirkende simulierte Kraft beträgt $668\ \text{N}$. Die Abweichung ist kleiner als 5 %. Denken Sie daran: Bei der Berechnung von Hand gehen Sie immer von starren Körpern aus. In der Realität verformen sich aber alle belasteten Bauteile, was auch zu einer Veränderung der Geometrie führt.

Sie können auch mit Rechtsklick auf Ergebnisse ***Stift-/Schrauben-/Lagerkraft*** anwählen und sich für jede vorhandene Stiftverbindung die Kräfte und Momente anzeigen lassen:



So beträgt zum Beispiel die Schubkraft im ***Stiftverbindungsglied-4*** ziemlich genau der Hälfte der vorher ermittelten Kraft, nämlich $334\ \text{N}$.