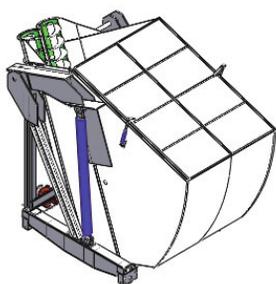
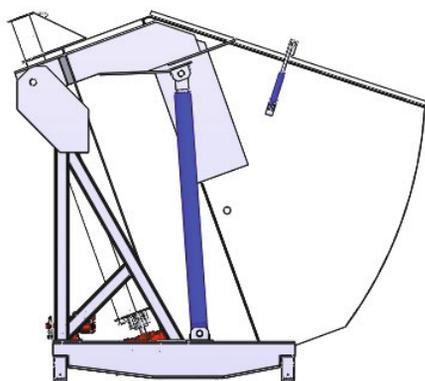


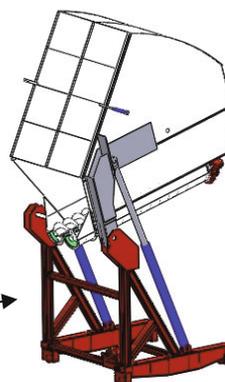
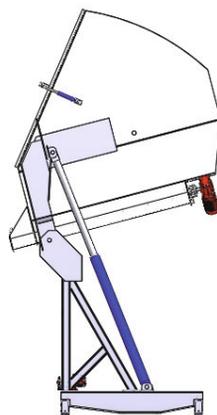
8 Berechnung einer Schweißkonstruktion

Bei dem nun folgenden Projekt geht es um die Untersuchung einer Schweißkonstruktion bezüglich ihrer Festigkeit und Steifigkeit. Die unten dargestellte Kippmulde wird in Position (1) gefüllt. Dann wird die Mulde mit Hilfe von zwei Hydraulikzylindern in Position (2) aufgestellt und so entleert. Da die komplette Kippmulde (mit Füllung) ein Gewicht von ca. 55 Tonnen besitzt, ist eine Festigkeitsberechnung unerlässlich. Bei falscher Dimensionierung der Bauteile sind Menschen in Gefahr und die Kippmulde könnte stark beschädigt werden, was zu unerwünschten Folgekosten führt (die CAD-Daten dieses Projektes wurden von der Firma **VERITEC AG** Anlagen-und Gerätebau in Oberuzwil (CH) zur Verfügung gestellt).

Position (1)



Position (2)



Fahrgestell

Es wird nun gezeigt, wie man das Fahrwerk (oben rot dargestellt) mit einer FEM-Analyse mit **SolidWorks Simulation** untersuchen könnte. Natürlich muss man zuerst wissen, wo welche Kräfte wirken. Dazu muss man für verschiedene Positionen die Kräfte in allen Lagerstellen mit Hilfe der technischen Mechanik berechnen. An diesem Beispiel wird auch gezeigt, wie die grundsätzliche Vorgehensweise für eine grössere Analyse aussehen sollte.

Schritte einer FEM-Analyse [7]:

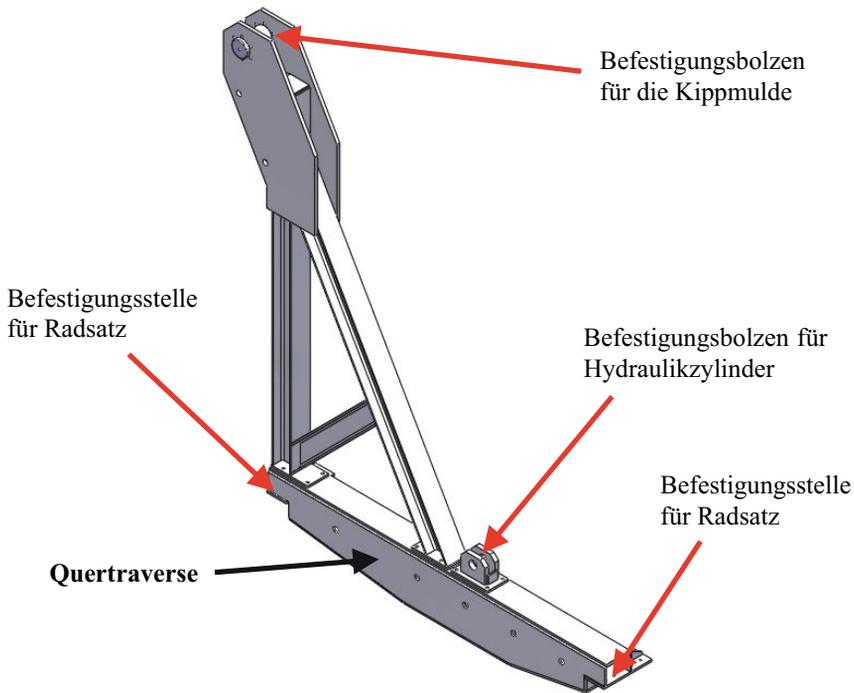
Analyseschritt (allgemein)	Problemstellung (konkret)
1. Problem erkennen und formulieren	Das Fahrgestell wird durch sehr große Kräfte belastet. Es muss so konstruiert und hergestellt werden, dass eine vollumfängliche Funktionweise gewährleistet ist. Die Vorrichtung muss die Anforderungen an die Festigkeit wie auch Steifigkeit erfüllen.
2. Aufgabe definieren und gewünschtes Ergebnis spezifizieren	Es soll untersucht werden, wie groß die zu erwartenden Spannungen in der gesamten Fahrgestell-Konstruktion sind. Es ist somit ein Spannungsnachweis zu erbringen. Auch soll aufgezeigt werden, wie groß die zu erwartenden Verformungen sind.
3. CAD-Modell aufbereiten und vereinfachen	Es wird nur ein Teil des Fahrgestells ohne Radsatz untersucht. Alle Schrauben werden nicht in die Analyse miteinbezogen. Schweißnähte werden nur an einigen Stellen modelliert.
4. Detailmodellierung	Die Lager- und Lastdefinitionen werden festgelegt. Alle Kontaktstellen müssen definiert werden. Vernetzung des gesamten Modells.
5. Berechnungen durchführen	Analyse mit Solver durchführen.
6. Ergebnisse darstellen	Die Spannungs- und Verformungsdarstellungen anzeigen.
7. Ergebnisse bewerten	Sind die simulierten Spannungen und Verformungen zulässig? Kontrollrechnungen „von Hand“ durchführen → Validierung
8. Modell ändern und optimieren	Falls die Spannungen und Verformungen zulässig sind, kann die Analyse beendet werden. Oftmals findet man in der Konstruktion aber noch Stellen, die man optimieren kann (z. B. bei großen Steifigkeitssprüngen).

Wir steigen beim 3.Schritt ein, weil die ersten beiden schon erledigt sind.

3. CAD-Modell aufbereiten und vereinfachen

Aus Symmetriegründen untersuchen wir nur einen Teil des Fahrgestells. Natürlich könnte man auch die Radsätze und alle Schrauben in die Analyse miteinbeziehen. Wir werden aber sehen, dass schon für das vereinfachte Modell eine lange Rechenzeit benötigt wird.

Das vereinfachte Modell sieht folgendermaßen aus:



4. Detailmodellierung

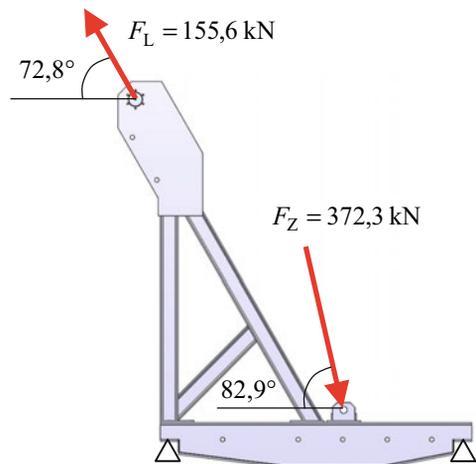
Für die Definition von Lager- und Laststellen sollen die unten dargestellten Werte verwendet werden:

F_L : Lagerkraft pro Seite

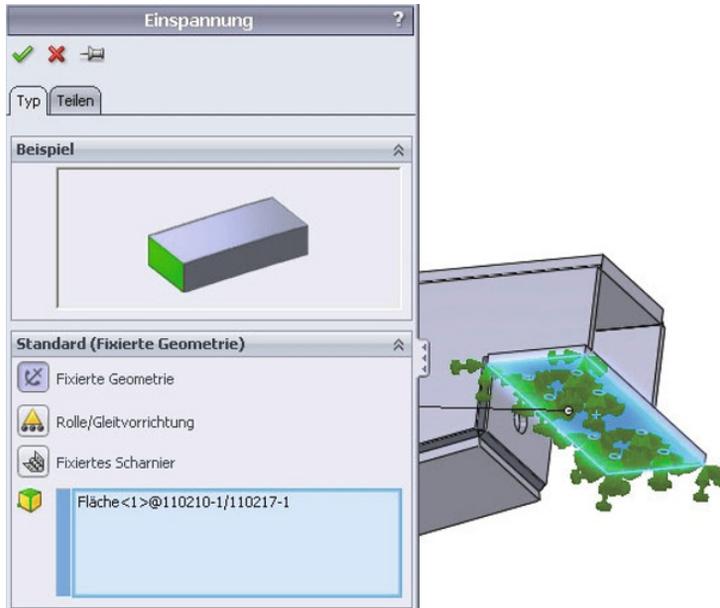
F_Z : Zylinderkraft pro Seite

Für die Schraubverbindungen verwenden wir das Verbindungsglied *Stift*. Die Schweißnähte werden nur in der Quertraverse modelliert (Kehlnähte).

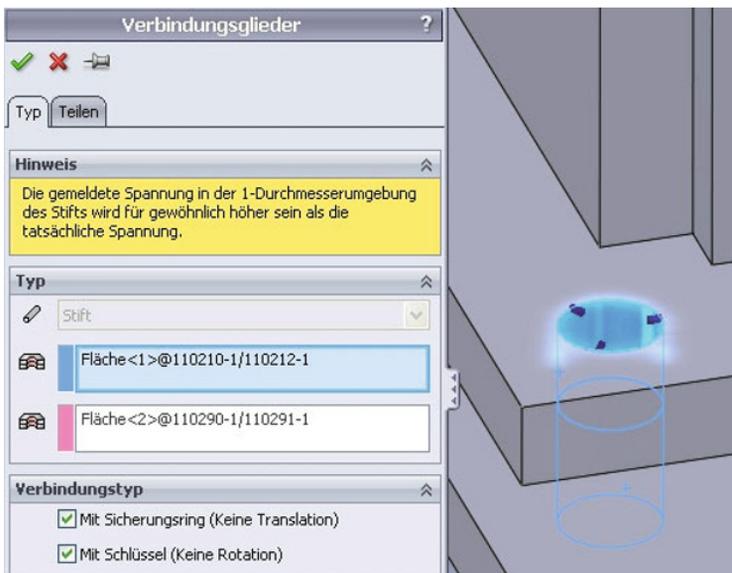
Für die Kontaktstellen *Verbunden* könnte ein *Globaler Kontakt*, der *Komponentenkontakt* oder *Kontaktsätze* verwendet werden. Hier wird der Komponentenkontakt verwendet. Bei den Lagerstellen wird eine *Fixierte Geometrie* verwendet, die alle Translationen und Rotationen verhindert.



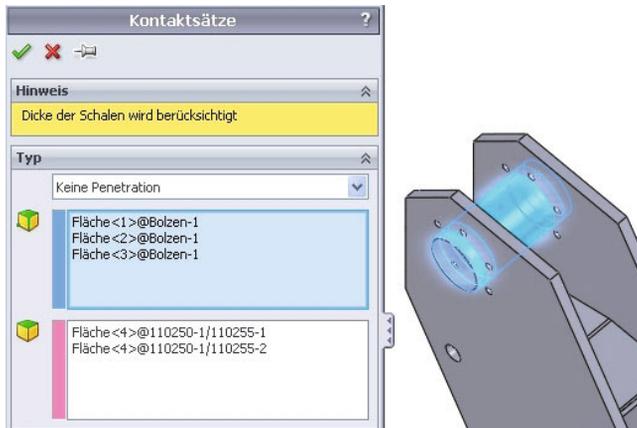
1. Öffnen Sie das Modell *Fahrwerk.SLDASM*.
2. Weisen Sie das Material *Unlegierter Baustahl* allen Teilen zu.
3. Definieren Sie zweimal *Fixierte Geometrie* auf die ganze Auflagefläche.



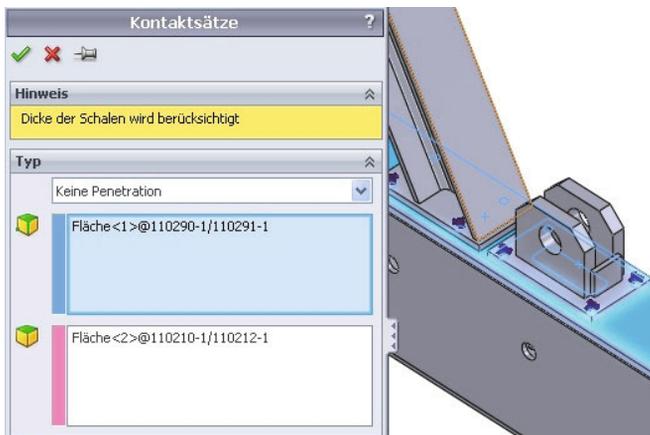
4. Definieren Sie bei jeder Schraubverbindung einen *Stift* wie unten dargestellt. Es sind insgesamt 12 Verschraubungen vorhanden. Aktivieren Sie *keine Translation* und *keine Rotation*, weil eine angezogene Schraube beides verhindert.



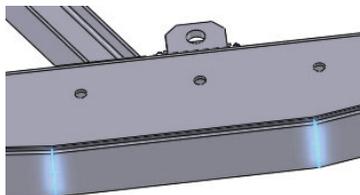
5. Der Bolzen oben soll die beiden Seitenplatten nicht durchdringen (penetrieren) können. Wählen Sie deshalb den Kontaktsatz **Keine Penetration** für den Bolzen und die Platten. Der Bolzen besteht aus drei Teilflächen, weil für die Lastdefinition nur die Fläche zwischen den Platten benötigt wird.

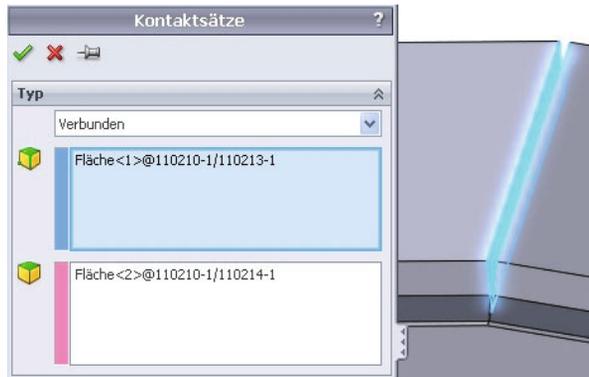


6. Für die beiden Flanschplatten, die auf der unteren Quertraverse befestigt werden und auch für den Lagerbock, müssen neben den Stiftverbindungen noch jeweils ein Kontaktsatz **Keine Penetration** definiert werden. Auch hier können die Platten die Grundplatte nicht durchdringen. Das ergibt drei neue Kontaktsätze.

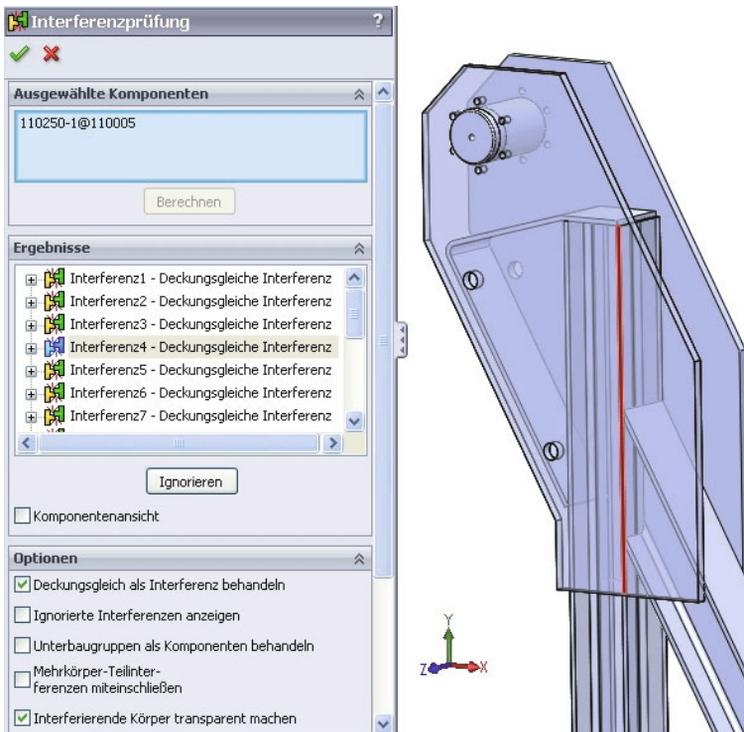


7. Zwischen den drei Platten an der Unterseite der Quertraverse wählen Sie den Kontaktsatz **Verbunden**, weil es dort Schweißnähte gibt (die aber nicht modelliert sind).





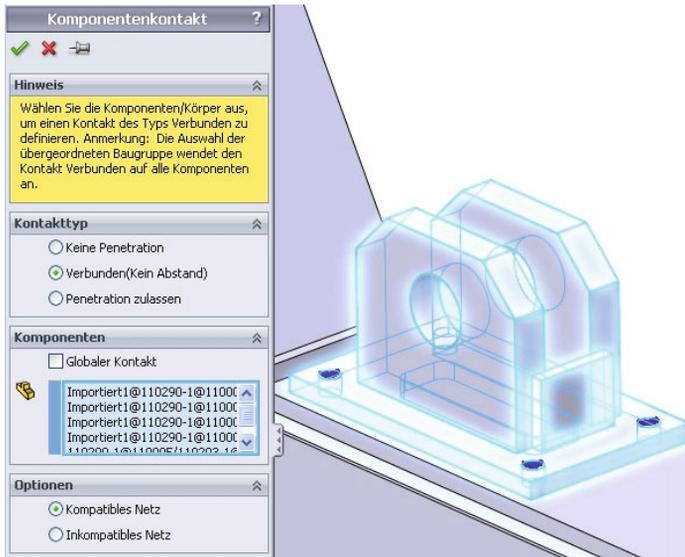
8. Der ganze auf die Quertraverse geschraubte Teil ist eine Schweißkonstruktion. Für diesen wenden wir einen **Komponentenkontakt Verbunden** an. Zuvor prüfen wir aber noch, ob sich alle Teile berühren, d. h. die Berührungsflächen deckungsgleich sind. Das macht man mit der Interferenzprüfung. Es muss unbedingt **Deckungsgleich als Interferenz behandeln** aktiviert werden. Jetzt kann man kontrollieren, ob sich alle miteinander verschweißten Teile auch berühren. Liegt ein Spalt vor, muss ein **Kontaktsatz Verbunden** (wie oben) gewählt werden.



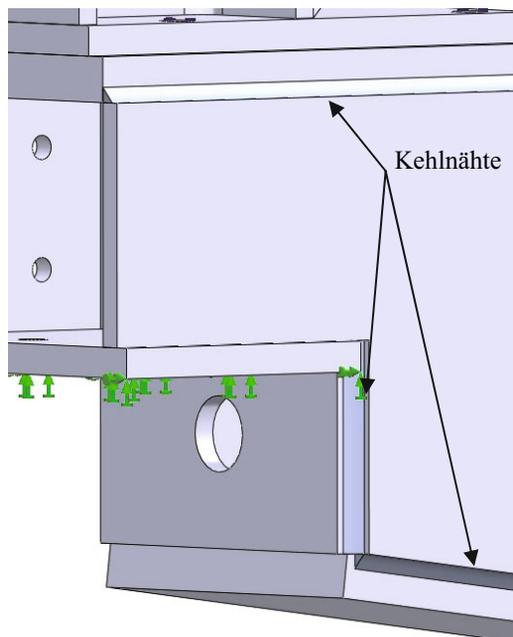
9. Erstellen Sie nun einen Komponentenkontakt für die ganze obere Baugruppe. Wählen Sie **Verbunden (Kein Abstand)** und **Kompatibles Netz**. Mit einem kompatiblen Netz werden die Ergebnisse genauer. Es kann aber sein, dass mit dieser Einstellung Probleme bei der Vernetzung auftreten. Dazu kann man dann aber bei der Vernetzung diese Einstellung wählen.



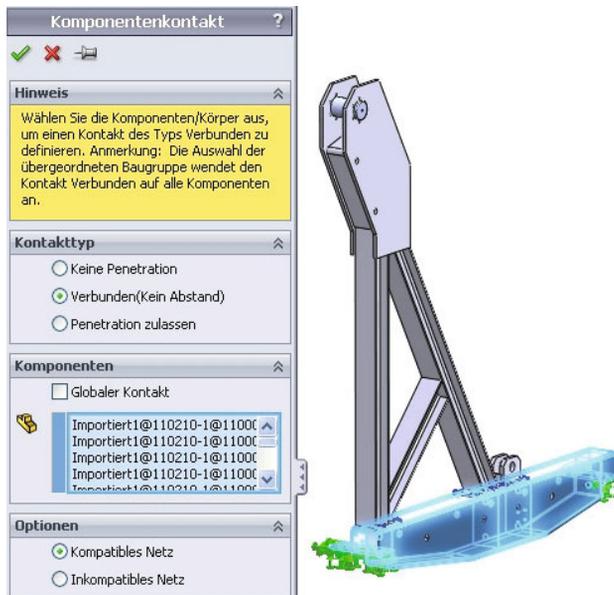
10. Auch für den Lagerbock erstellen Sie einen Komponentenkontakt **Verbunden**. Es sei hier bemerkt, dass dieser Kontakt nicht ganz der Realität entspricht. Er bedeutet nämlich, dass die Berührungsflächen miteinander verschmolzen sind. Sowohl bei der oben aufgeschraubten Schweißkonstruktion wie auch beim Lagerbock sind im CAD-Modell keine Schweißnähte modelliert. Um eine möglichst realitätsnahe Simulation zu erhalten, müsste man aber diese noch einfügen. Für die hier gezeigte Simulation verzichten wir aber darauf. Nur bei der Quertraverse sind, wie wir gleich sehen werden, einige Schweißnähte modelliert.



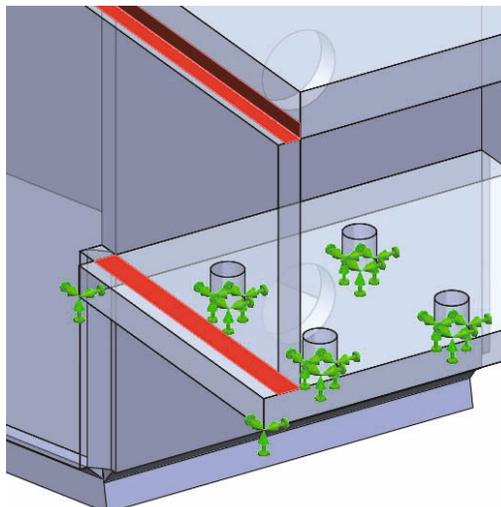
11. Bei der Quertraverse wurden wie unten ersichtlich einige Kehlnähte modelliert. Es ist nicht Ziel der Simulation, Spannungen in den Schweißnähten zu ermitteln. Dann müsste man die Schweißnähte sehr fein vernetzen, was für die Analyse dieser Konstruktion sehr viel Rechenzeit bedeuten würde. Wir wollen aber die Wirkung der Schweißnähte auf die Gesamtkonstruktion in der Simulation mit berücksichtigen.



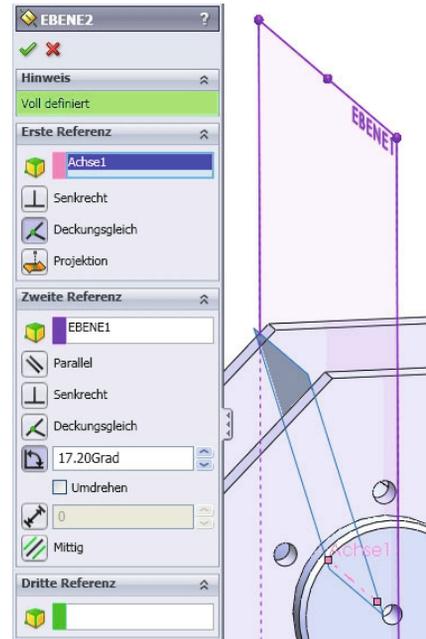
Wir erstellen also einen weiteren Komponentenkontakt **Verbunden** für die gesamte Quertraverse. Wichtig ist, dass Sie alle Teile, die zu dieser Konstruktion gehören, anwählen.



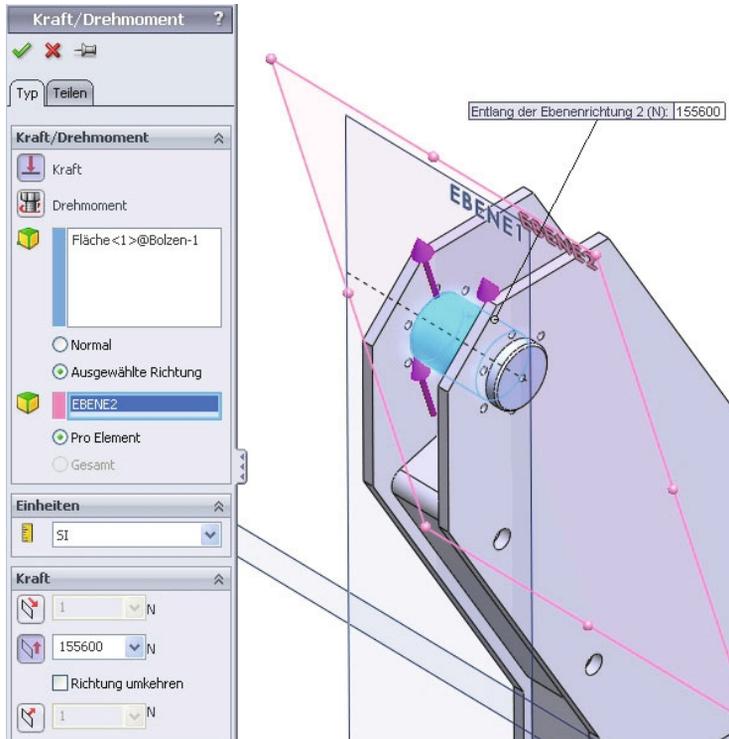
Beachten Sie aber, dass somit alle sich berührenden Flächen miteinander verschmolzen sind. Die oberen beiden roten Flächen (Bild unten) sind die Berührungsflächen der Kehlnaht mit den Platten. Die untere Fläche ist einfach die Berührungsfläche der Platten. Natürlich hätte man auch hier Kehllähte modellieren können, was wieder zur höheren Genauigkeit der Ergebnisse beitragen würde, die benötigte Rechenzeit dementsprechend aber ebenfalls erhöhen würde. Es sind jetzt alle Kontaktstellen definiert worden.



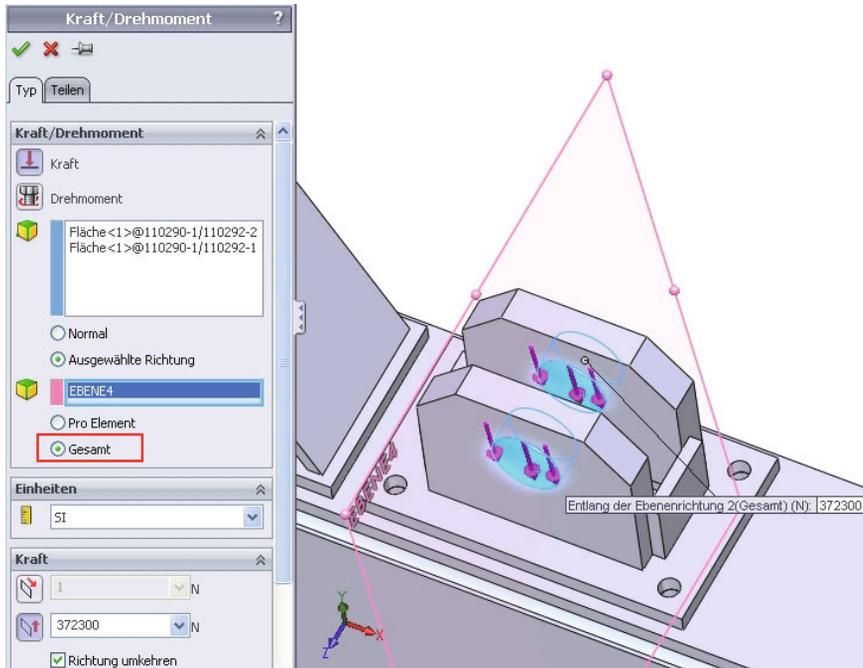
12. Jetzt fehlen noch die Externen Lasten. Für die Richtung dieser Lasten müssen zuerst Ebenen (Einfügen-Referenzgeometrie) eingefügt werden. Es wurden zuerst die *Ebene1* und die *Achse1* erstellt. Mit diesen wird dann die *Ebene2* mit einem Winkel von $17,2^\circ$ ($90^\circ - 72,8^\circ = 17,2^\circ$) erstellt. Auf die gleiche Weise kann die Ebene beim Lagerbock erstellt werden.



Definieren Sie die Lagerkraft $F_L = 155,6 \text{ kN}$ wie unten dargestellt.



Definieren Sie die Lagerkraft $F_Z = 372,3 \text{ kN}$ wie unten dargestellt. Achten Sie unbedingt darauf, dass **Gesamt** und nicht **Pro Element** aktiviert ist, weil sonst eine doppelte Kraft wirkt (Genau dies sind die Fehler, die man als Anfänger sehr schnell begeht!)



13. Jetzt kommen wir zur Vernetzung. Man beginnt meist mit einer größeren Vernetzung, die man im weiteren Verlaufe schrittweise verfeinern kann. Wir wählen eine Elementgröße 30 mm. Übernehmen Sie die Einstellungen vom rechten Bild und lassen Sie vernetzen.



Nach erfolgreicher Vernetzung kann man Details zur Vernetzung darstellen lassen: Wählen Sie dazu mit Rechtsklick auf Netz **Details ...**

In dieser Übersicht finden Sie diverse Angaben zur durchgeführten Vernetzung.

Zum Beispiel:

- Vernetzungstyp: Volumenkörperelemente (Schalen- und Balkenelemente)
- Automatischer Übergang: ausgeschaltet (die Vernetzung braucht bedeutend mehr Zeit, wenn diese Option eingeschaltet ist)
- Elementgröße: 30 mm inkl. Toleranz 1,5 mm
- Gesamtknotenanzahl: 208 442
- Gesamtelementanzahl: 108 593
- Dauer der Vernetzung: 43 Sekunden

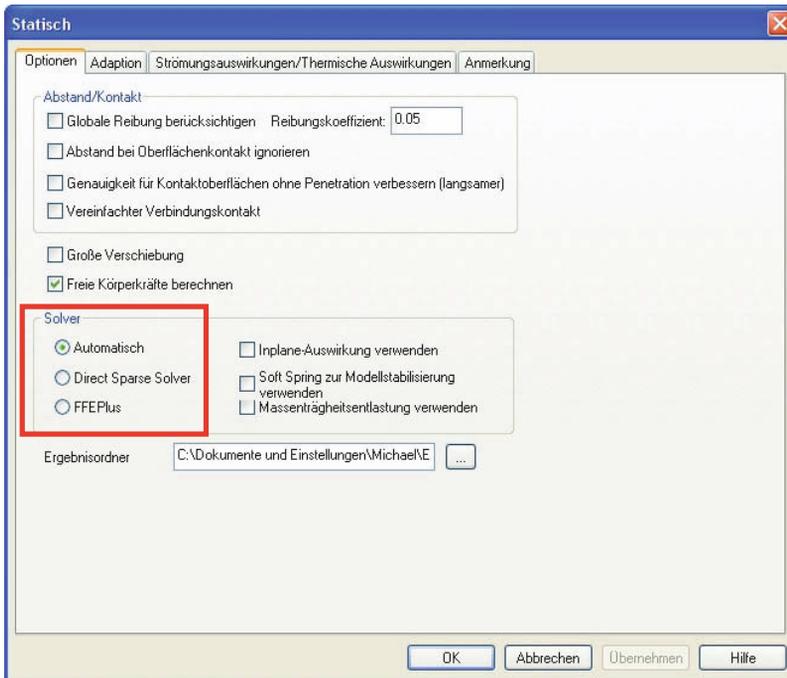
Die Detailmodellierung ist somit abgeschlossen. Jetzt kann die Berechnung durchgeführt werden.

5. Berechnungen durchführen

Bevor Sie nun die Analyse ausführen, folgen Bemerkungen zum Gleichungslöser. Wie wir im 1. Kapitel schon erfahren haben, wird bei der Finite-Elemente-Analyse ein Problem durch eine Reihe von algebraischen Gleichungen dargestellt, die gleichzeitig gelöst werden müssen. Es gibt zwei Arten von Lösungsverfahren: **direkte** und **iterative** Verfahren. Direkte Verfahren lösen die Gleichungen mittels numerischer Techniken. Iterative Verfahren lösen die Gleichungen mittels Näherungstechniken, wobei bei jeder Iteration eine Lösung angenommen wird und die mit ihr verbundenen Fehler bewertet werden. Es werden so viele Iterationen durchgeführt, bis der Fehler kleiner als eine vorgegebene Größe ist. Mit Rechtsklick auf **Volumenkörpervernetzung Eigenschaften ...** erhalten Sie das Fenster auf der nächsten Seite. Beim Solver haben Sie folgende Einstellmöglichkeiten:

- **Automatisch:** Dies ist die Standardeinstellung für statische Analysen. Der Solver wählt den Gleichungslöser selbst, den er für die Problemstellung besser findet.
- **Direct Sparse Solver:** Dies ist der direkte Gleichungslöser. Es ist der genauere Lösungsalgorithmus. Er braucht aber mehr Speicher. Dies führt bei größeren Berechnungen (mit vielen Freiheitsgraden) schnell zu Problemen.
- **FFEPlus:** Dies ist der iterative Gleichungslöser. Er arbeitet bei großen Problemen mit einer hohen Anzahl von Freiheitsgraden (über 100 000) effizienter.

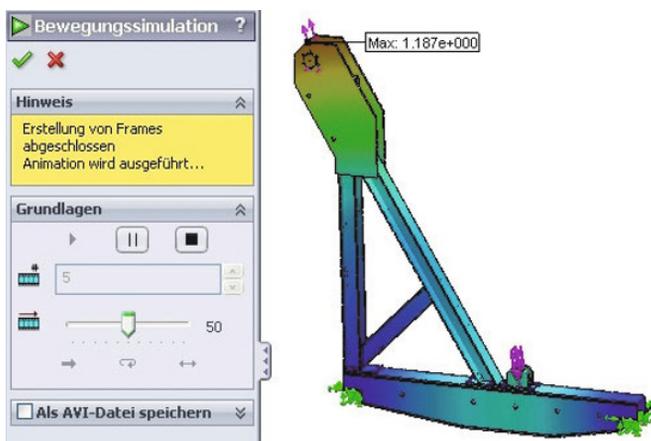
Netz Details	
Studienname	Volumenkörpervernetzung (-Standard-)
Vernetzungstyp	Volumenkörpervernetzung
Verwendeter Vernetzungstyp	Standardnetz
Automatischer Übergang	Aus
Automatische Netschleifen einbeziehen	Ein
Jacobi-Punkte	4 Punkte
Elementgröße	30 mm
Toleranz	1,5 mm
Vernetzungsqualität	Hoch
Gesamtknotenanzahl	208442
Gesamtelementanzahl	108593
Maximales Seitenverhältnis	57.415
Prozentsatz von Elementen mit Seitenverhältnis < 3	83.1
Prozentsatz von Elementen mit Seitenverhältnis > 10	0.205
% von verzerrten Elementen (Jacobi)	0
Vernetzen der fehlgeschlagenen Teile mit inkompatiblem Netz wiederholen	Aus
Dauer bis zur Beendigung der Vernetzung (hh:mm:ss)	00:00:43
Computer-Name	D9M4KP2L



Lassen Sie die Einstellung auf *Automatisch* und führen Sie die Analyse aus. Diese Analyse beansprucht je nach zur Verfügung stehender Rechnerleistung eine recht lange Zeit (mehrere Stunden).

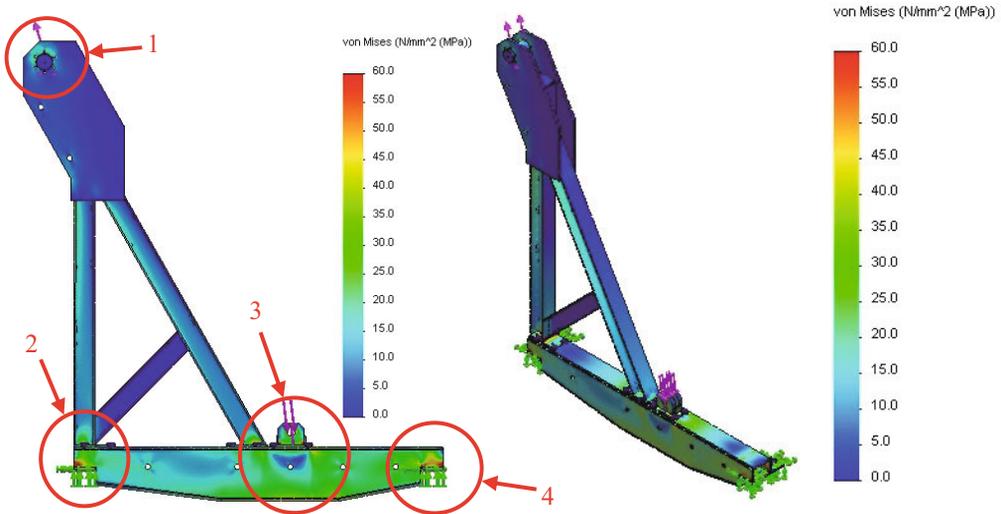
6. Ergebnisse darstellen und 7. Ergebnisse bewerten

Wurde die Analyse erfolgreich durchgeführt, können die Ergebnisse angezeigt werden. Für eine erste Kontrolle des Modells ist es empfehlenswert, eine Bewegungssimulation der Verformung zu erstellen. Wenn die so dargestellte Verformung keinen Sinn macht (weil sich z. B. Stellen nicht verformen, obwohl sie es eigentlich müssten), weiß man sofort, dass das Modell vermutlich Fehler hat. Mit Rechtsklick auf *Verschiebung1* wählen Sie *Bewegungssimulation* (Zuerst müssen Sie *Verschiebung1* angezeigt haben).



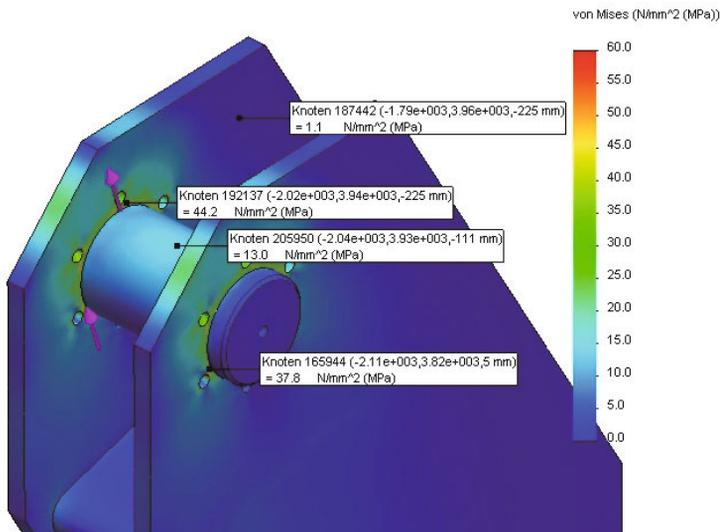
Diese Bewegungssimulation können Sie auch als AVI-Datei speichern. Dasselbe können Sie übrigens auch für die Spannung durchführen.

Wir untersuchen zunächst die Von-Mises-Spannungen in der Konstruktion. Man sieht sehr schnell, wo sich die kritischen Stellen befinden. Die Stellen 1 – 4 werden genauer untersucht.



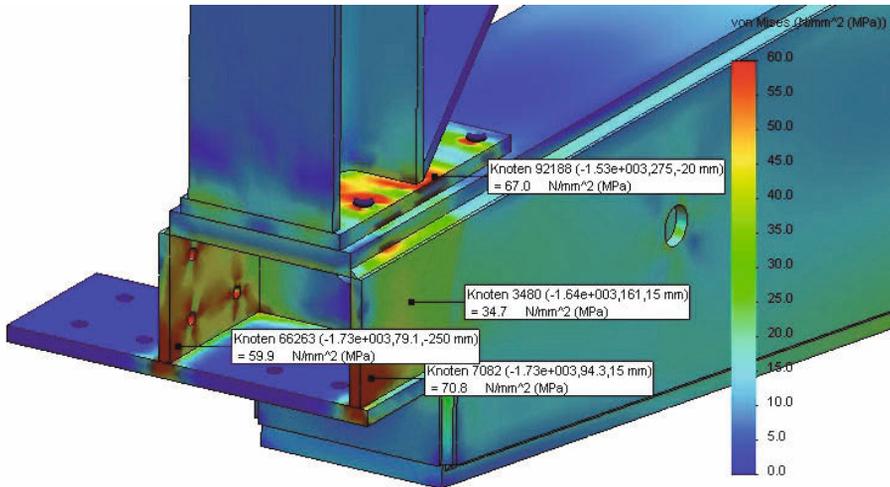
Man kann mit *Sondieren* gezielt Spannungswerte herausmessen.

Stelle 1: Bolzen oben => Von-Mises-Spannungen



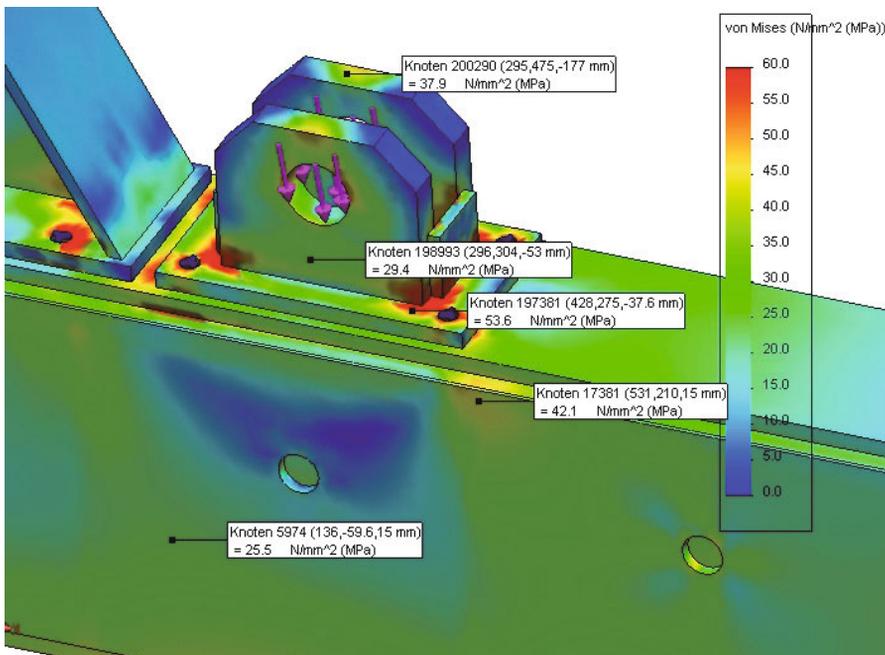
Wenn man von einer zweifachen Sicherheit gegen Fließen ausgeht, beträgt die zulässige Spannung (Material S235) ca. $110 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Es sind somit keine problematischen Stellen zu erkennen.

Stelle 2: Befestigung Radsatz links => Von-Mises-Spannungen

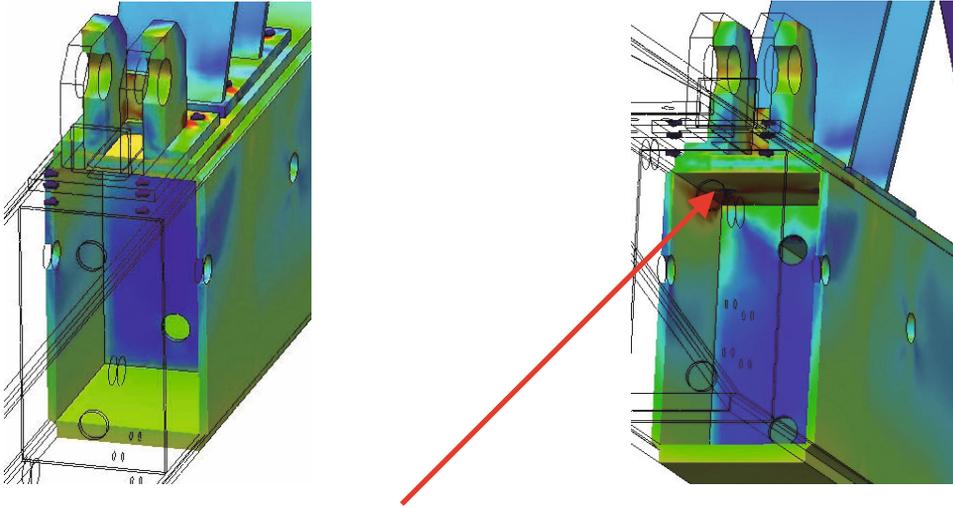


Auch hier sieht es mit den simulierten Spannungswerten gut aus.

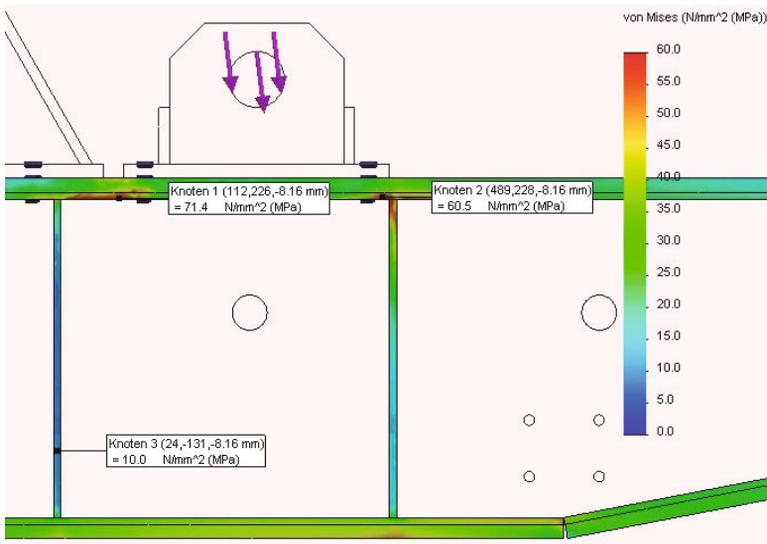
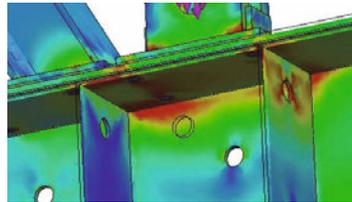
Stelle 3: Befestigung Lagerbock => Von-Mises-Spannungen



Die Spannungswerte sind zulässig. Wählen Sie nun mit Rechtsklick auf **Spannung1 Profil-Clipping**. Als Referenzelement nehmen Sie **Ebene5**. So erhalten wir einen Blick ins Innere der Quertraverse. Wenn man hier **Sondieren** möchte, kann man das leider nur auf der Schnittfläche.



Hier könnte noch eine kritische Stelle sein. Wir versuchen, an dieser Stelle einige Werte zu sondieren. Wählen Sie dazu **Profil-Clipping** (Rechtsklick auf Spannung1) auf **Ebene vorne** und man erhält wieder eine Einsicht ins Innere. Jetzt sondieren wir einige Werte im Schnitt.



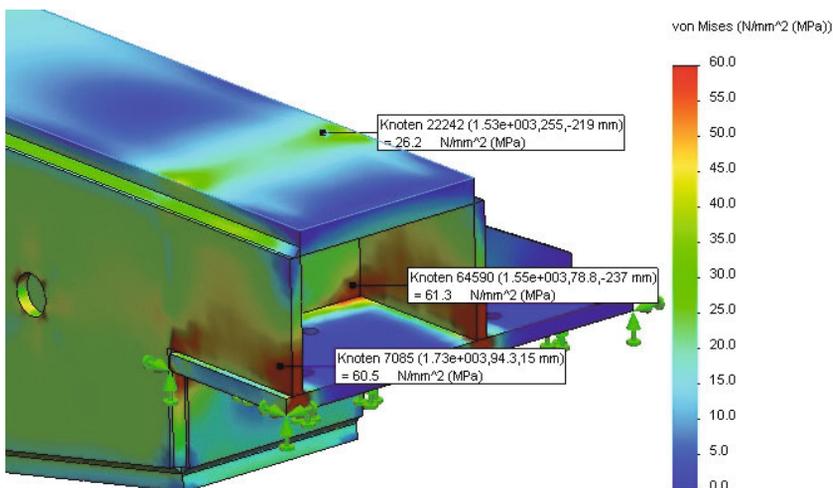
Es sieht auch hier gut aus mit den simulierten Spannungswerten.

Um das **Profil-Clipping** wieder aufzuheben, klickt man wieder mit Rechtsklick auf **Spannung1**, dann **Profil-Clipping**. Im erscheinenden Fenster das Feld **Clipping ein/aus** anwählen.



Probieren Sie doch auch hier alle Möglichkeiten in diesem Fenster aus. Natürlich sollte es nie in eine Spielerei ausufern. Denn das Anwenden dieses Analysewerkzeuges soll ja die Effizienz im Konstruktions- und Entwicklungsprozess steigern!

Stelle 4: Befestigung Radsatz rechts => Von-Mises-Spannungen



Auch hier liegen die simulierten Von-Mises-Spannungswerte im zulässigen Bereich.

Wenn Sie den Bereich der Legende anders einstellen wollen, müssen Sie auf die Legende Doppelklicken. Dann erscheint links am Bildschirm das folgende Fenster für die Einstellung der **Diagrammoptionen**:



Neben **Minimum- und Maximumbeschriftung**, d. h. dass in der Spannungsdarstellung diese beiden Werte an den jeweiligen Knoten angezeigt werden, können Sie **Definiert** aktivieren. Unten dürfen Sie dann den kleinsten und größten Wert definieren.

Auch können Sie Einstellungen generell zum Format der Legende und auch Farboptionen nach Ihrem Belieben verändern.

FEM-Analyseergebnisse müssen kontrolliert werden. Das erreicht man durch die so genannte Validierung bzw. Verifizierung.

Validierung = Alternative theoretische Überprüfung, z. B. durch Kontrollrechnungen

Verifizierung = Überprüfung der Simulationsergebnisse durch praktische Messungen

Für eine Verifizierung muss das reale Modell vorhanden sein. Da dies hier nicht der Fall ist, wird jetzt an einer Stelle eine Kontrollrechnung durchgeführt. Man wählt für diese Kontrollrechnung eine Stelle in der Konstruktion aus, bei der man mit vernünftigem Aufwand die inneren Beanspruchungen berechnen kann.

Es gilt übrigens zu beachten, dass bei der bisherigen Untersuchung weder die Schweißeigenstressungen noch das Eigengewicht der Konstruktion berücksichtigt wurden. Bei einer Schweißkonstruktion entstehen immer Schweißeigenstressungen. Diese zu berechnen ist unmöglich, da sie von diversen Faktoren abhängen. Neben dem angewandten Schweißverfahren hat auch die ausgeführte Schweißfolge einen großen Einfluss auf deren Entstehung. Schweißeigenstressungen können zum Beispiel durch Spannungsarmglühen weitestgehend eliminiert werden. Da es sich hier aber um eine sehr große Schweißkonstruktion handelt, ist das schwierig zu realisieren.

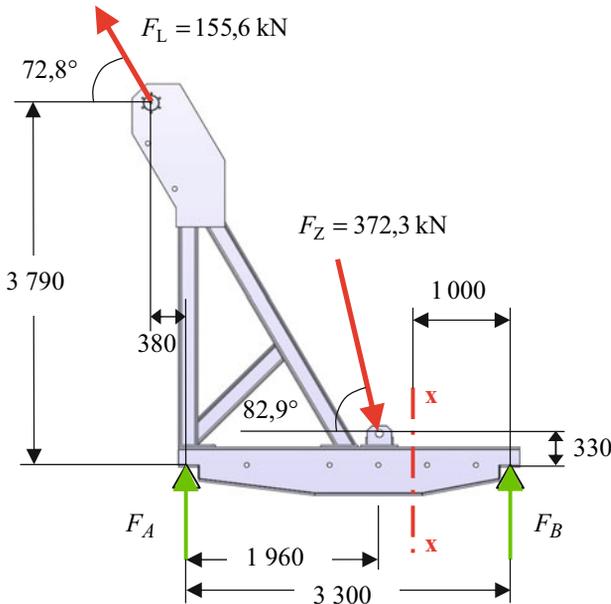
Im **Schnitt x-x** in der Skizze auf der nächsten Seite sollen die Biegespannungen in der obersten und untersten Faser berechnet werden. Dazu muss man das Fahrgestell zuerst Freimachen und alle Lagerkräfte bestimmen. Das Eigengewicht wird auch bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt, weil wir die so erhaltenen Werte ja mit den Simulationswerten vergleichen wollen.

In den beiden Lagerstellen A und B wirken nur Kräfte in y-Richtung. Die x-Komponenten der Lager- und Zylinderkraft (F_L und F_Z) heben sich gegenseitig auf (Fahrgestell mit Behälter und Zylinder sind ein abgeschlossenes System). Um die Lagerkräfte zu berechnen, stellen wir die Gleichgewichtsbedingungen auf (erforderliche Masse aus dem CAD-Modell):

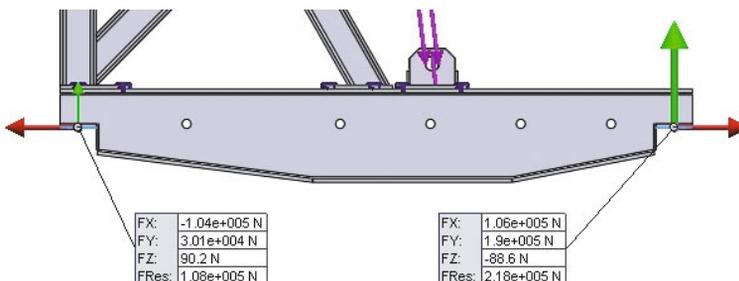
$$\sum F_y = 0 = F_A + F_B + F_L \cdot \sin(72,8^\circ) - F_Z \cdot \sin(82,9^\circ)$$

$$\sum M_A = 0 = F_B \cdot 3\,300 \text{ mm} + F_L \cdot \cos(72,8^\circ) \cdot 3\,790 \text{ mm} - F_L \cdot \sin(72,8^\circ) \cdot 380 \text{ mm} - F_Z \cdot \cos(82,9^\circ) \cdot 330 \text{ mm} - F_Z \cdot \sin(82,9^\circ) \cdot 1\,960 \text{ mm}$$

Die Lösungen des Gleichungssystems sind $F_A = 32,5 \text{ kN}$ und $F_B = 188,3 \text{ kN}$.



Aus einer FEM-Analyse können auch Ergebniskräfte ermittelt werden. Wählen Sie mit Rechtsklick auf **Ergebnisse Ergebniskraft auflisten...**. Denken Sie immer daran: Die Finite-Elemente-Methode ist eine Näherungsmethode. Überschätzen Sie also die Genauigkeit von simulierten Werten nicht. Zudem gehen wir bei der obigen „Handrechnung“ von starren, d. h. unverformten Körpern aus. Das bedeutet: Auch die Handrechnung ist nicht exakt. Diesen Umstand muss man bei der Interpretation von FEM-Ergebnissen berücksichtigen.



Der simulierte Wert für die Kraft F_A ist 30,1 kN (FY) und für die Kraft F_B 190 kN (FY). Diese Werte stimmen einigermaßen mit den oben berechneten überein. Die beiden Kräfte in x-Richtung (FX) heben sich praktisch auf. Die Kräfte in z-Richtung (FZ) sind im Verhältnis zu den anderen Kräften sehr klein und deshalb vernachlässigbar. Diese Kontrolle ist sehr wichtig, um Fehler bei der Lösung des obigen Gleichungssystems auszuschließen.

Zur Spannungsberechnung betrachten wir im Folgenden den Schnitt x-x.

Die Biegespannung berechnet man mit:

$$\sigma_b = \frac{M_{bmax}}{W_y}$$

Das maximale Biegemoment an dieser Stelle beträgt:

$$\begin{aligned} M_{bmax} &= F_B \cdot 1\,000 \text{ mm} \\ &= 188\,301,7 \text{ N} \cdot 1\,000 \text{ mm} \\ &= 1,883 \cdot 10^8 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Berechnen wir noch das Flächenmoment I_y und das Widerstandsmoment W_y :

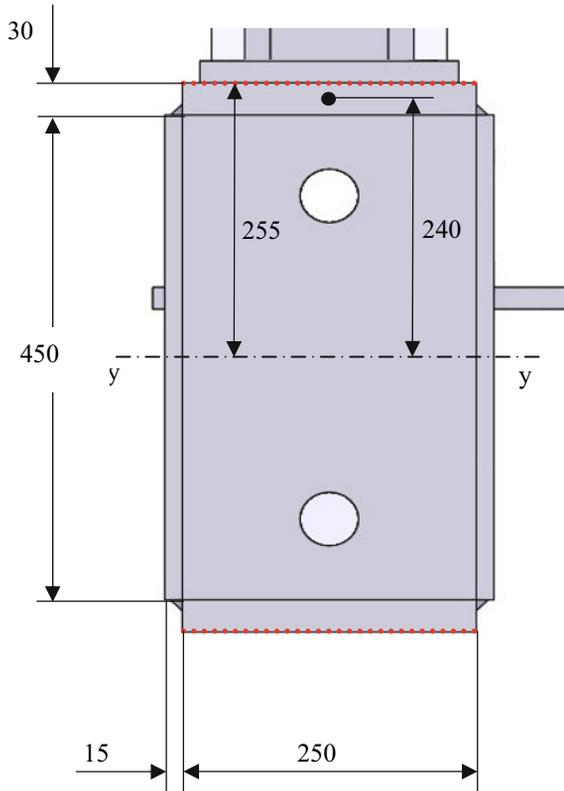
$$\begin{aligned} I_y &= 2 \cdot \frac{15 \cdot 450^3}{12} \text{ mm}^4 + 2 \cdot \left(\frac{250 \cdot 30^3}{12} + 7\,500 \cdot 240^2 \right) \text{ mm}^4 \\ &= 1,093 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$W_y = \frac{I_y}{e} = \frac{1,093 \cdot 10^9 \text{ mm}^4}{255 \text{ mm}} = 4,29 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

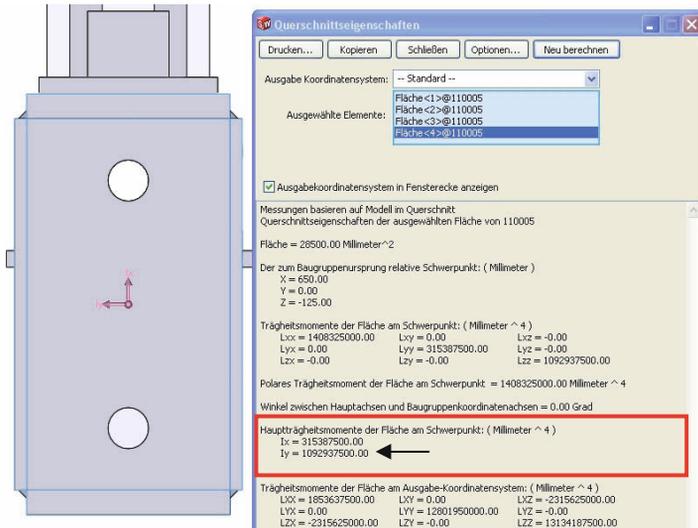
Somit wird die Nennbiegespannung in den Randfasern:

$$\sigma_b = \frac{M_{bmax}}{W_y} = \frac{1,883 \cdot 10^8 \text{ Nmm}}{4,29 \cdot 10^6 \text{ mm}^3} = 44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\dots)$$

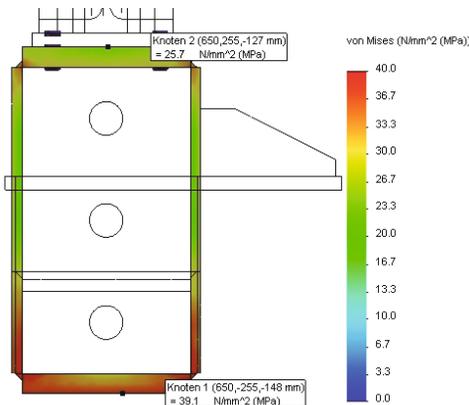
Man kann das Flächenmoment übrigens auch mit SolidWorks überprüfen. Wählen Sie unter Extras **Eigenschaften Querschnitt** (oder **Evaluieren Querschnitseigenschaften**). Hier können Sie die vier Flächen (Schweißnähte nicht berücksichtigen) anwählen und dann **Neu berechnen**



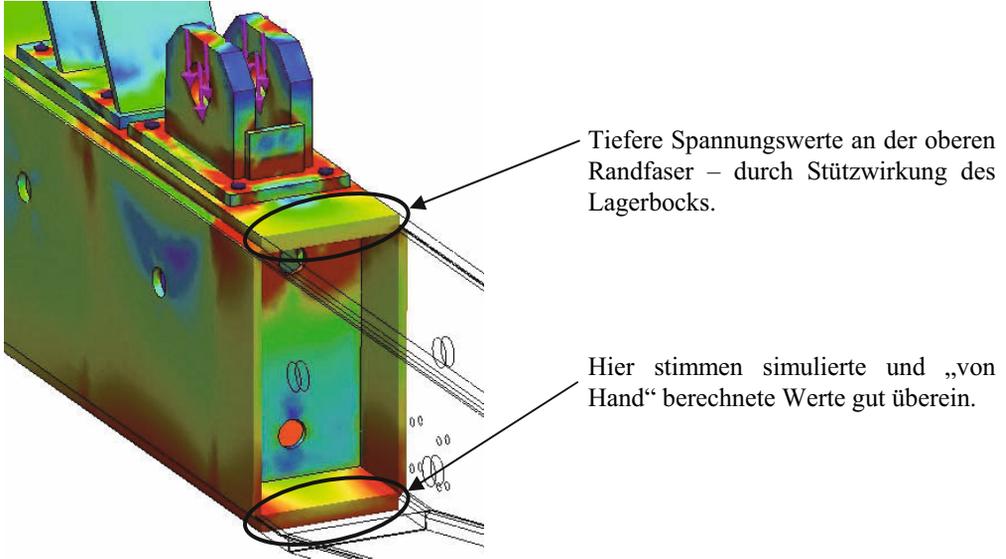
anklicken. Das Programm berechnet dann verschiedene Werte – unter anderem den Schwerpunkt und die Hauptträgheitsmomente (Flächenmomente). Beim Vergleich des oben berechneten Wertes $I_y = 1,093 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$ und dem von SolidWorks berechneten Wert $I_y = 1\,092\,937\,500 \text{ mm}^4$ stellen wir eine gute Übereinstimmung fest. Genau diese Kontrollmöglichkeiten von „Handrechnungen“ und Simulationenwerten geben dem Konstrukteur ein vernünftiges Maß an Sicherheit, was die Richtigkeit der Berechnungen betrifft.



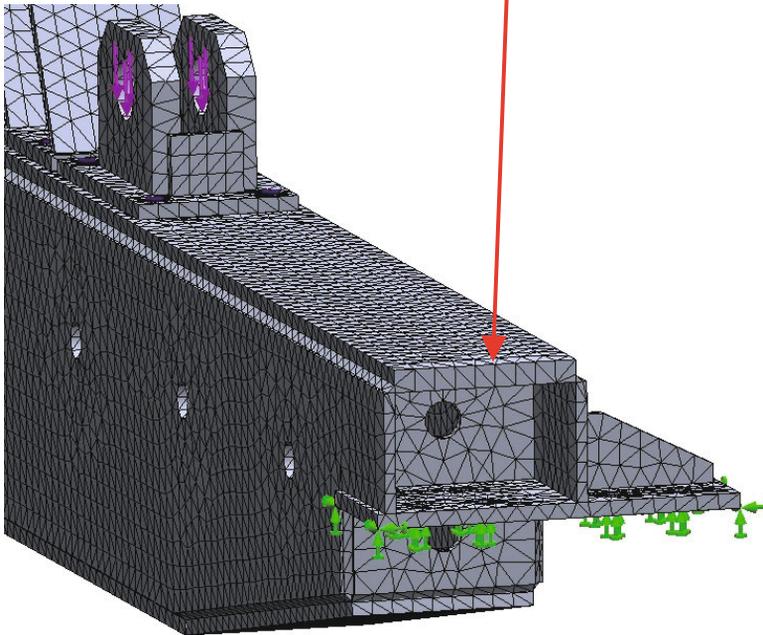
Obigen Wert für die Biegespannung vergleichen wir mit dem Simulationenwert. Mit **Profil-Clipping** (Ebene5) kann man die gesuchten Werte sondieren. In der obersten Randfaser ist die simulierte Spannung $25,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ (Biegedruckspannung) bedeutend tiefer als der berechnete Wert $44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. In der untersten Randfaser liegen der simulierte Wert $39,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und der berechnete Wert $44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ viel enger beisammen.



Die größere Abweichung in der oberen Randfaser kann unter anderem durch die Stützwirkung des Lagerbocks, die auch noch an dieser Stelle wirksam ist, erklärt werden.



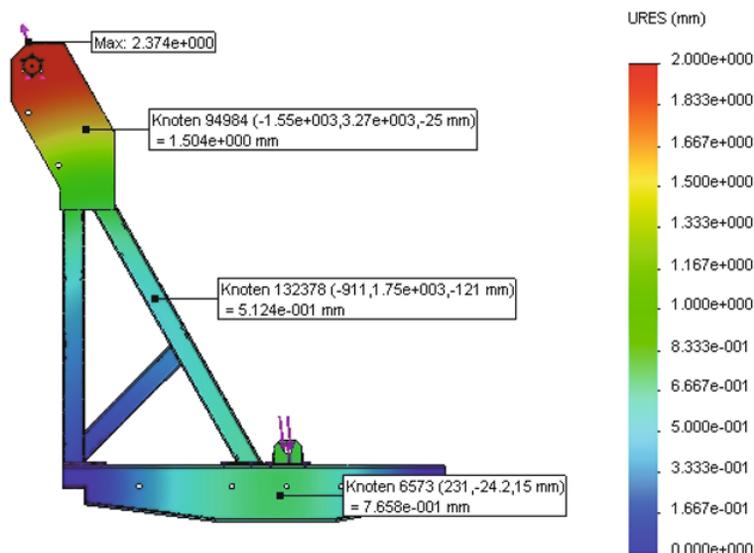
Um die Spannungswerte noch genauer zu simulieren, wäre es jetzt ratsam, eine feinere Vernetzung anzuwenden. Man sollte zum Beispiel an dieser Stelle mindestens eine zweite Lage von Volumenkörpern haben.



Um diese Baugruppe aber noch feiner vernetzen zu können, benötigt man eine sehr gute Rechnerleistung.

Wir betrachten die Validierung als abgeschlossen. Natürlich könnte man noch weitere Stellen untersuchen. Weil es eine doch recht gute Übereinstimmung zwischen dem simulierten und berechneten Wert gibt, können wir davon ausgehen, dass das Modell mit all seinen Kontaktstellen richtig aufbereitet wurde.

Jetzt überprüfen wir noch die Verformungen im Modell. Für diese wird eine Kontrollrechnung sehr schwierig.



Die maximale Verformung ist den Erwartungen gemäß an der obersten Stelle und beträgt ca. 2,4 mm. Solange eine auftretende Verformung die Funktion der Vorrichtung nicht negativ beeinflusst, was hier ausgeschlossen werden kann, ist sie als zulässig zu betrachten. Man kann diese Verformung auch ins Verhältnis zu den Fertigungstoleranzen setzen. Das Fahrwerk ist ca. 4 300 mm hoch. Für die Toleranzklasse mittel (Allgemeintoleranz ISO 2768-m) beträgt die Toleranz für dieses Nennmaß ± 2 mm. Da die zu erwartende maximale Verformung etwa gleich groß ist wie die Toleranz, kann sie als zulässig betrachtet werden.

8. Modell ändern und optimieren

In einem nächsten Schritt könnte die Konstruktion optimiert werden. Treten zum Beispiel an bestimmten Stellen zu hohe Spannungen oder Verformungen auf, könnte das Modell hier gezielt verändert werden. Natürlich müsste dann die Analyse neu durchgeführt werden, um die Auswirkungen der Konstruktionsänderungen beurteilen zu können. Es handelt sich hier um einen iterativen Prozess, indem man sich schrittweise an eine möglichst optimale Lösung herantastet. Wichtig ist, dass man bei den Änderungen nicht zu viel auf einmal verändert, da es dann sehr schwierig wird, richtige Schlüsse zu ziehen.