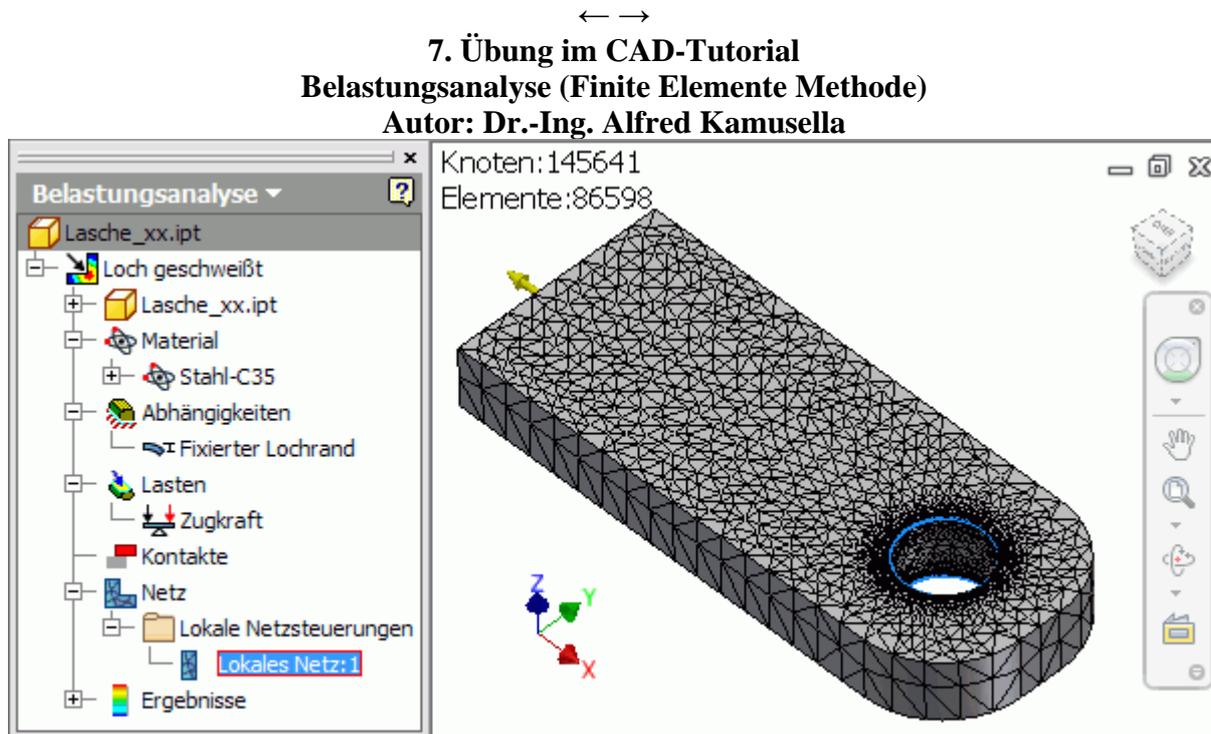


# Software: CAD - Tutorial - Belastungsanalyse

Aus OptiYummy

↑



*Geirrt zu haben, ist menschlich,  
 und einen Irrtum einzugestehen  
 Kennzeichen eines Weisen.  
 - Hieronymus -*

Im CAD-System *Autodesk Inventor Professional* existiert ein Modul, um innerhalb der CAD-Umgebung die mechanische Belastung von konstruierten Bauteilen untersuchen zu können. Diese Belastungsanalyse basiert auf der Technologie des FEM-Programms ANSYS. Nach der Definition der Bauteil/Baugruppen-Lasten (*Loads*) und Einspann-Bedingungen (*Constraints*) hat man u.a. folgende Möglichkeiten der Analyse:

1. Veranschaulichen der Bauteilverformung
2. Analysieren der Belastung anhand der Vergleichsspannung
3. Überprüfen von Sicherheitsfaktoren.
4. Analysieren von Eigenfrequenzen (*Moden*)

Im Folgenden wird an zwei Beispielen ein Einstieg in die Methodik der Belastungsanalyse aus der Sicht eines CAD-Nutzers gegeben:

1. Prozess der Finite-Element-Modellierung und -Simulation anhand eines einfachen "2D"-Bauteils (**Lasche**).
2. Anwendung der Methode auf eine Baugruppe (**Gummipuffer**).

## Bauteil-Belastung

### 0. Aufgabenstellung

- Die im Titelbild abgebildete Lasche wird im Loch-Innern mit einem biegesteifen Bolzen verschweißt.
- Wie groß darf die Zugkraft maximal sein, damit bei einem Sicherheitsfaktor=2 die maximal zulässige Vergleichsspannung nicht überschritten wird?
- Wie groß ist die maximale Verformung für den zulässigen Lastfall?
- Wie ändert sich die Belastung, wenn die Lasche mittels Spielpassung auf einem biegesteifen Bolzen befestigt wird?

## 1. Preprocessing (Modellbildung)

- . Geometrie-Modellierung (Bauteil "Lasche\_xx")
- . Definition physikalischer Eigenschaften (Material)
- . Netzgenerierung
- . Hinzufügen der Lasten (Loads)
- . Randbedingungen definieren (Constraints)

## 2. Modellberechnung

- . Belastungsanalyse

## 3. Postprocessing (Ergebnisse)

- . Auflage-Reaktionen
- . Vergleichsspannung
- . Deformation
- . Beanspruchung (Sicherheitsfaktor)

## 4. Konstruktive Änderung

- . Spielpassung auf biegesteifem Bolzen

## Baugruppen-Belastung

Es sollen sowohl die Materialbelastung als auch die Verformung eines Gummipuffers bei Einwirkung von Kräften untersucht werden:

- . An den Stirnflächen des Gummizylinders sind Stahlscheiben verklebt (Durch Vulkanisieren, damit keine zusätzliche Zwischenschicht entsteht).
- . Das Durchgangsloch hat einen Durchmesser von 4 mm.
- . Die Gesamthöhe des Puffers (Scheiben plus Gummi) beträgt 30 mm.
- . Die Stahlscheiben haben folgende Eigenschaften:
  - . Material Stahl C35
  - . Außendurchmesser 20 mm
  - . Lochdurchmesser 4 mm
  - . Dicke 0,5xx mm (mit xx=Teilnehmer-Nr. **01...99**)
- . Der Gummi hat folgende Material-Eigenschaften:
  - . E-Modul = 5 N/mm<sup>2</sup>
  - . Poisson Zahl=0,5 (idealisiert!)
  - . Expansionskoeff. therm.=1E-4/K
  - . Zugfestigkeit= 10 MPa
  - . Druckfestigkeit=110 MPa
  - . Dichte=1,1 g/cm<sup>3</sup>



**Hinweis:** Eine Querkontraktionszahl von 0,5 ist der maximal mögliche Wert und entspricht einem inkompressiblem Material. Einige Gummiarten erreichen fast diesen Wert:

- . Für den obigen Verwendungszweck kann man  $\nu=0,49$  annehmen.
- . Bei FE-Programmen kann dieser nahe am Grenzwert=0,5 liegende  $\nu$ -Wert zu Problemen führen, da in den Gleichungssystemen der Quotient  $(1-2\nu)$  auftaucht. Bei  $\nu=0,5$  kommt es zur Division durch Null, kurz davor können die großen Zahlen Ursache von Fehlern sein.

Welchen konkreten Wert man benutzt, ist nicht egal! Bereits die geringe Änderung von  $\nu$  zwischen 0,48 und 0,4998 ändert die **Kompressibilität** um den Faktor 100 :

<b>v:</b>	0,33	0,42	0,48	0,498	0,4998
-----------	------	------	------	-------	--------

<b>K/E:</b>	1	2	10	100	1000
-------------	---	---	----	-----	------

K=Kompressionsmodul, E=Elastizitätsmodul

(Siehe: Fachwissen-Dichtungstechnik )

**Vorgehensweise:**

- . CAD-Modell entwickeln
- . Preprocessing (Netz, Constraint, Load)
- . Postprocessing
- . Symmetrieschnitt
- . Unterschiedliche Lastfälle (Flächenlast, Eigengewicht, Rotation)

**Einzusendende Ergebnisse**

Teilnehmer der Lehrveranstaltung "CAD-Konstruktion" schicken ihre Ergebnisse per Mail an **a.kamusella@ifte.de**.

- . Als Anhang der Mail mit (xx=Teilnehmer-Nummer 01...99) ist ein Archiv-File (z.B. **Belastung\_xx.ZIP**) mit folgendem Inhalt zu senden:
  1. Die Bauteil-Datei **Lasche\_xx.ipt**
  2. Der zugehörige *reduzierte* Ordner **Lasche\_xx**
  3. Die Baugruppen-Datei Datei **Gummipuffer\_xx.iam** mit den zugehörigen Bauteil-Dateien **Stahlscheibe\_xx.ipt** und **Gummihülse.ipt**.
  4. Der zugehörige *reduzierte* Ordner **Gummipuffer\_xx**
- . Zur Reduktion der gesendeten Datenmenge sind in den Unterordner **\AIP\FEA\** alle Dateien *\*.fms* und *\*.fres* zu löschen!
- . Die gestellten Fragen sind als Text innerhalb der Mail zu beantworten.

Einsendeschluss ist die Nacht vor dem nächsten Übungskomplex (bzw. 14 Tage nach der Übung).

← →

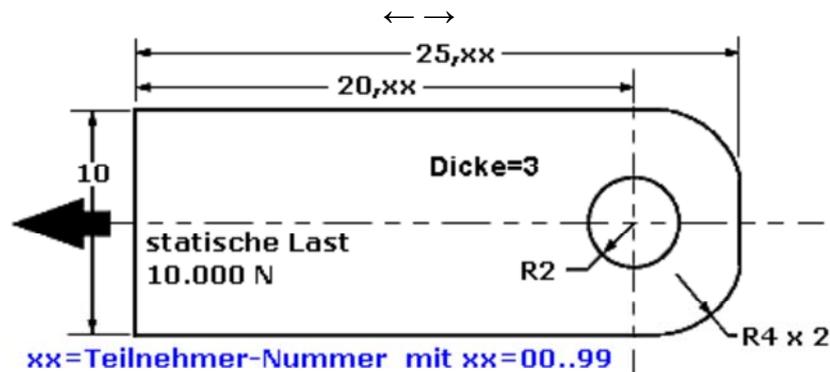
Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: \\_CAD\\_ - \\_Tutorial\\_ - \\_Belastungsanalyse](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_CAD_-_Tutorial_-_Belastungsanalyse)“

---

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Geometriemodell

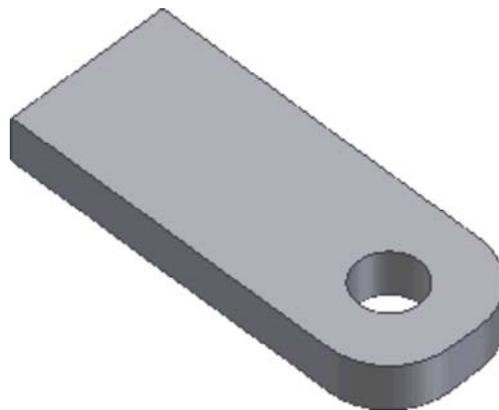
Aus OptiYummy

↑



Geometrie-Modellierung (Bauteil "Lasche\_xx")

In diesem Übungskomplex wird mit den Mitteln des CAD-Systems die gleiche Bauteil-Belastung simuliert, wie dies im **FEM-Tutorial** im ersten Übungskomplex **FEM-Prozess (Beispiel 2D-Mechanik)** beschrieben ist. Die Abfolge der Prozess-Schritte im CAD-System entspricht denen bei der Nutzung eines FEM-Programms und beginnt auch hier mit der Geometrie-Modellierung:



Das zu untersuchende Bauteil kann innerhalb eines CAD-Systems als CAD-Modell meist bedeutend leichter modelliert werden, als in einem FEM-Programm:

- . Wir definieren dafür im *Autodesk Inventor* ein Projekt **Belastung\_xx** (**xx**=Teilnehmer-Nr. 00...99).
- . Die Bauteil-Datei soll den Namen **Lasche\_xx.ipt** erhalten. Wir entwickeln dieses Bauteil aus einer rechteckigen Platte als Basiselement.
- . Die Bohrung und die Abrundung ergänzen wir nach den Prinzipien der materialabtragenden Fertigung.

← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: CAD - Tutorial - Belastung - Geometriemodell>“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Material

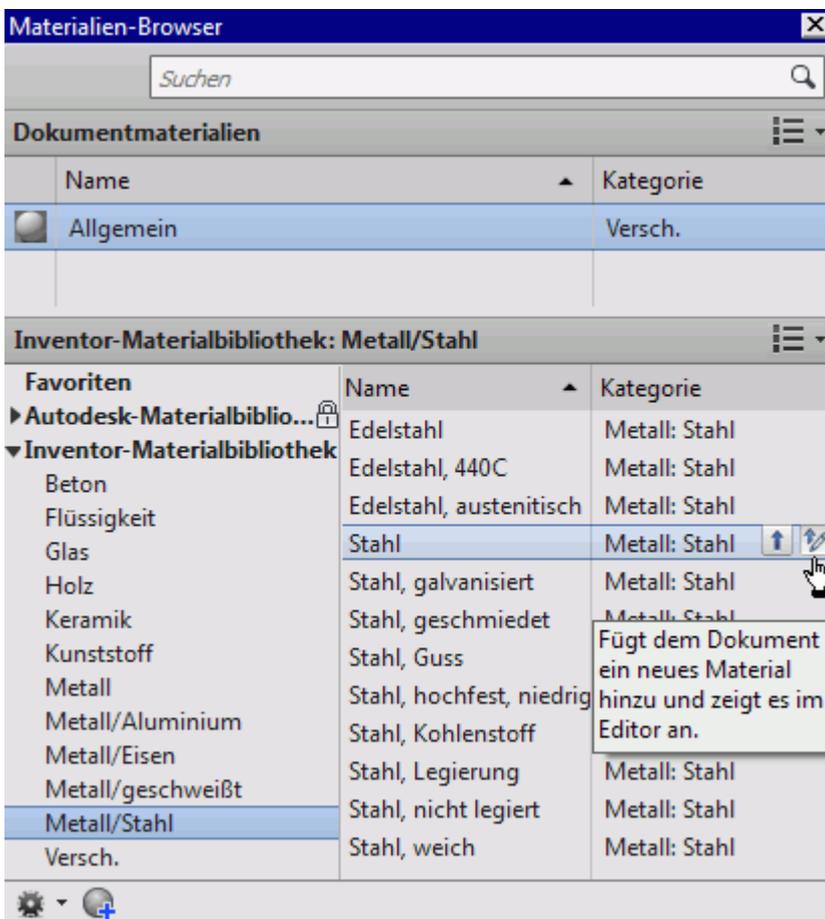
Aus OptiYummy

↑

← →

## Definition physikalischer Eigenschaften (Material)

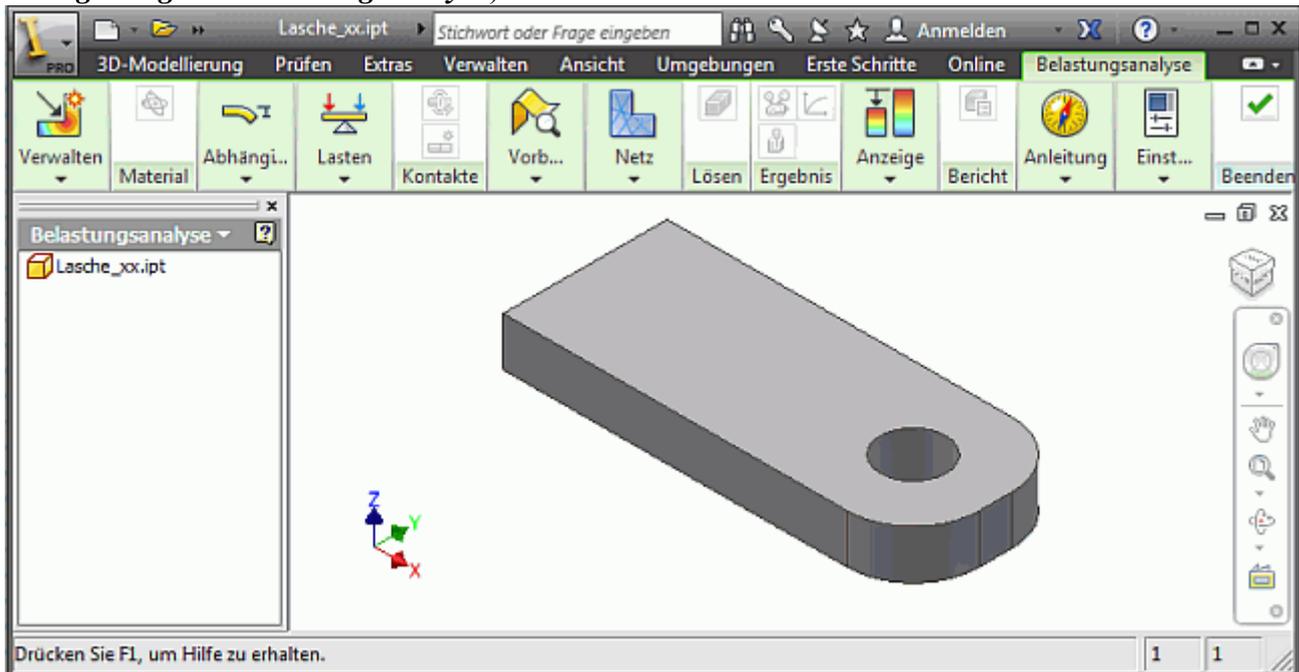
Die Daten für unseren Stahl C35 unterscheiden sich von den Einträgen in der mitgelieferten Materialbibliothek! Wir definieren deshalb auf Basis von "Stahl" ein neues Material "Stahl-C35" (*MFL > Extras > Material* öffnet den Materialien-Browser). Das neue Material wird nur zum Bestandteil des aktuellen CAD-Dokuments. Die gelb markierten Felder des als Basis benutzten Stahl-Materials erhalten die erforderlichen neuen Werte:



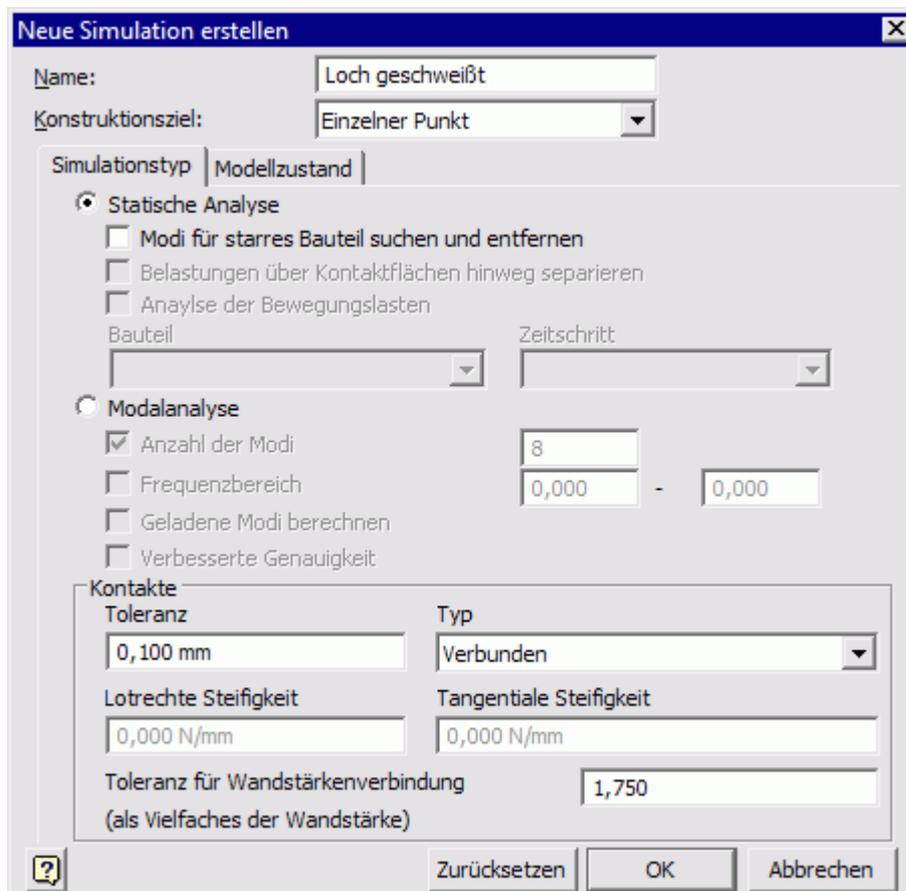
**Hinweis:** Die Werte des E-Moduls und des Schubmoduls sind über die Poissonsche Zahl miteinander verknüpft und können nicht unabhängig voneinander geändert werden.

In den *iProperties* > **Physikalisch** muss dieses neue Material Stahl-C35 dem Bauteil noch zugewiesen werden.

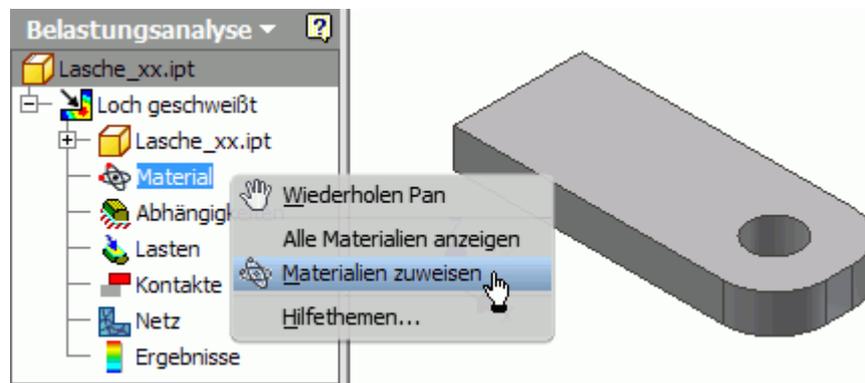
Für die weiteren Schritte der Belastungsanalyse nutzen wir die speziell dafür bereitgestellte Arbeitsumgebung (**MFL** > **Umgebungen** > **Belastungsanalyse**):



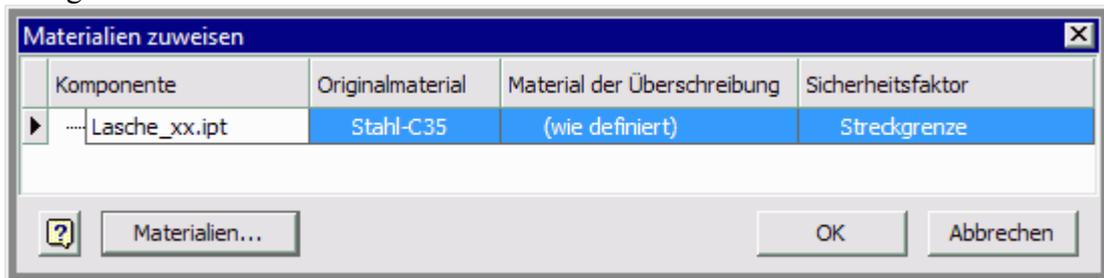
Wir werden zuerst eine statische Analyse für die Variante des auf einem Bolzen verschweißten Lochrandes untersuchen. Das verdeutlichen wir über den Namen der neu erstellten Simulation (**MFL** > **Belastungsanalyse** > **Verwalten** > **Neue Simulation erstellen**). Die anderen Simulationsparameter behalten ihre Standardvorgaben:



Innerhalb der Simulation beginnen wir mit der Überprüfung der Material-Zuweisung:

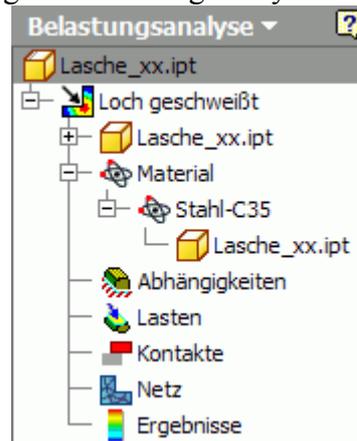


Da wir unserem Bauteil bereits Stahl-C35 als Material in den *iProperties* zugewiesen hatten, wird es auch für die Belastungssimulation benutzt:



Anderenfalls erschiene am verwendeten Standardmaterial ein Warnsymbol und wir müssten die Materialzuweisung über die *iProperties* noch nachholen.

Es ist sinnvoll, über das Kontextmenü **Alle Materialien anzeigen** zu aktivieren. Die verwendeten Material werden dann in der Browser-Darstellung der Belastungsanalyse eingeblendet:



← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: \\_CAD\\_ - \\_Tutorial\\_ - \\_Belastung\\_ - \\_Material](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_CAD_-_Tutorial_-_Belastung_-_Material)“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Netzgenerierung

Aus OptiYummy

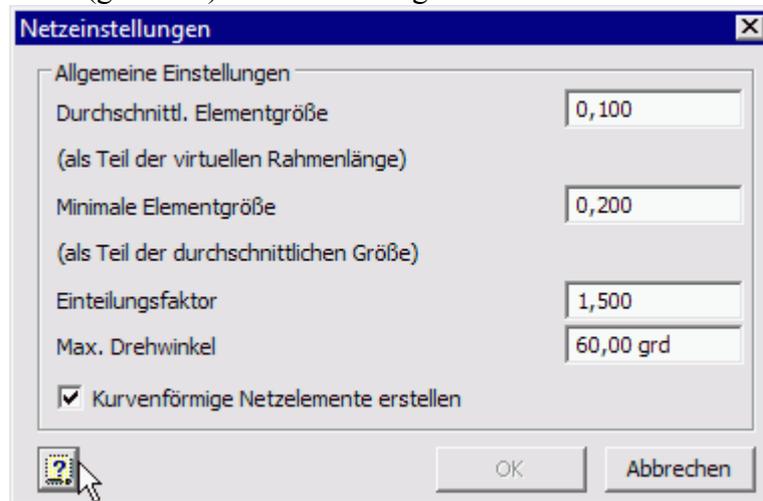
↑

← →

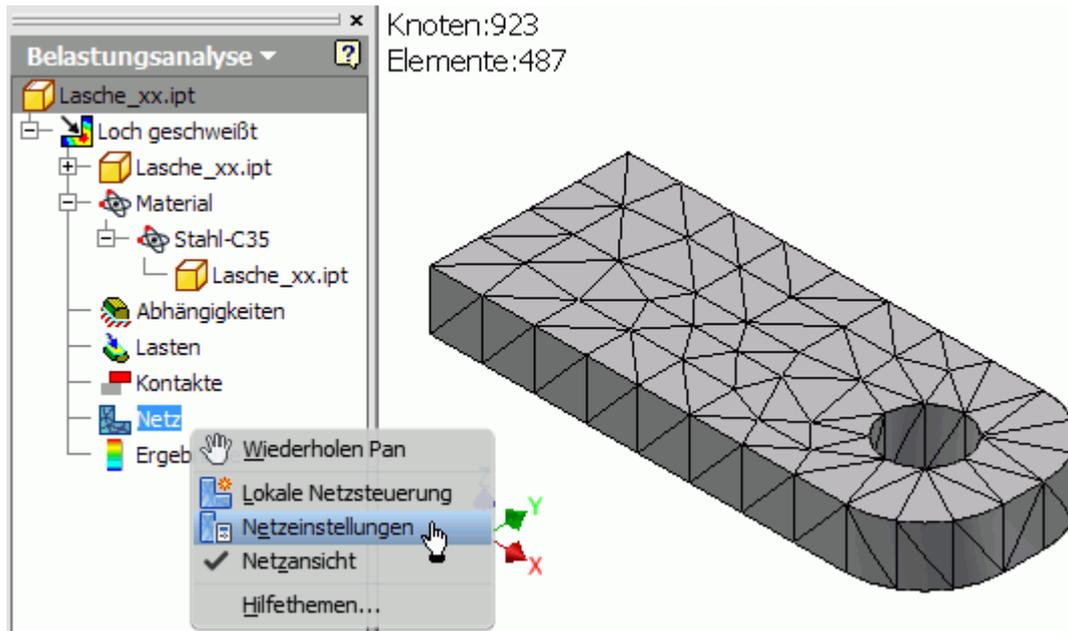
## Netzgenerierung

Für die Vernetzung der Geometrie benötigt man ein gewisses Wissen zu Finite-Elemente-Modellen, weil die Qualität des generierten Netzes entscheidend für die Qualität der Simulationsergebnisse ist:

- Ein grobes Netz wird schnell berechnet, die Ergebnisse können aber zu ungenau sein.
- Ein feineres Netz benötigt mehr Zeit für die Berechnung, liefert aber meist genauere Ergebnisse.
- Wir werden vorerst die Standard-Einstellung nutzen und später die Netzfeinheit im Rahmen der zumutbaren Wartezeiten erhöhen.
- Wir werfen einen Blick in die (globalen) Netzeinstellungen und lesen die Erläuterungen in der Hilfe:



- Die Steuerung der lokalen Vernetzung nutzen wir vorläufig nicht.
- Die Netzansicht schalten wir ein. Es werden nur Tetraeder-Elementen verwendet:



- Die Vernetzung ist noch sehr grob. Wir werden sie später iterativ optimieren.

← →

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Loads

Aus OptiYummy

↑

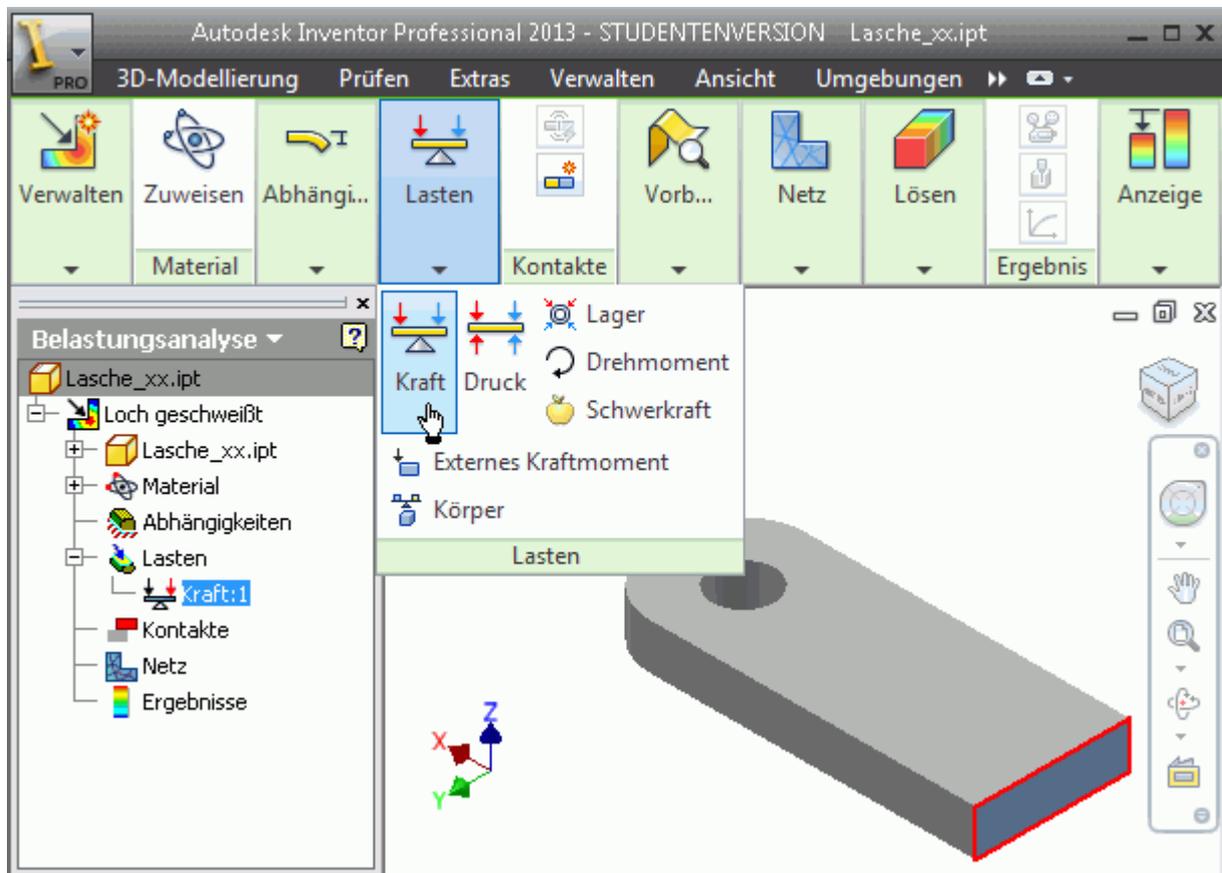
← →

## Hinzufügen der Lasten (Loads)

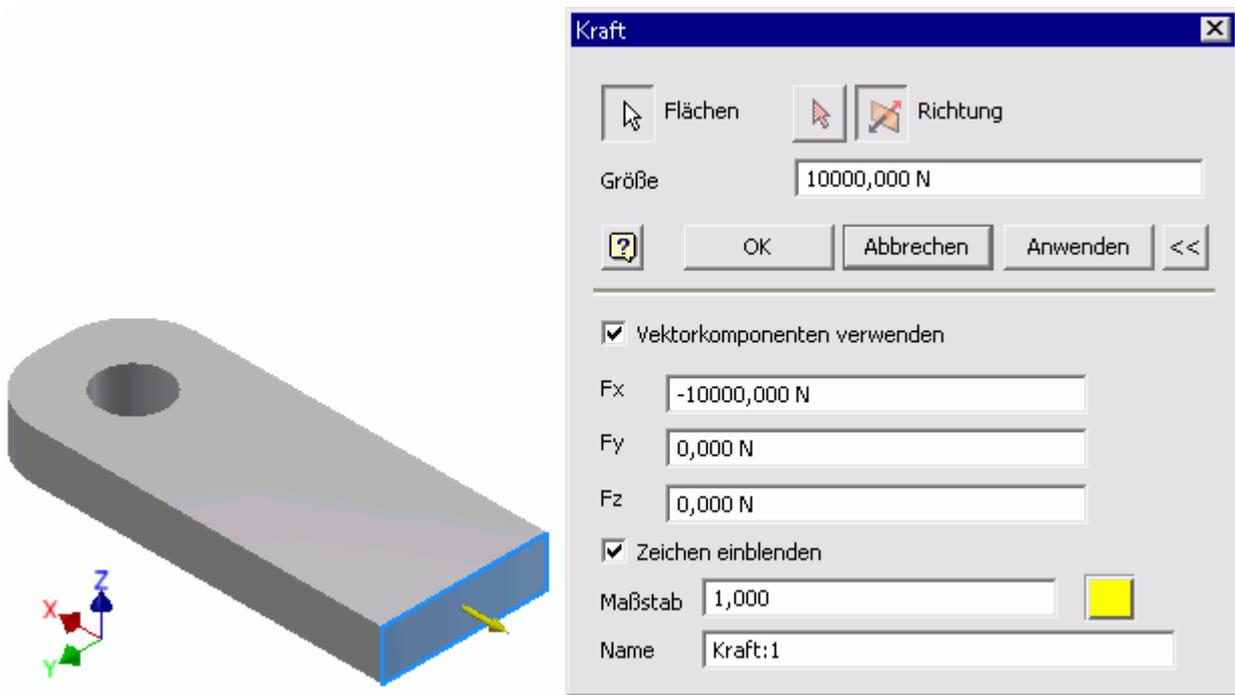
Lasten sind die auf das Bauteil wirkenden Kräfte bzw. Momente. Neben der direkten Wirkung einer Kraft können Lasten auch aus weiteren Ursachen resultieren, z.B.:

1. Druckbelastung einer Fläche.
2. Wirken einer translatorischen Beschleunigung (z.B. Gravitation) auf die Masse des Bauteils.
3. Wirken einer Drehbeschleunigung infolge Rotation des Bauteils auf die Drehträgheit des Bauteils.

Die Zugkraft in Längsrichtung der Lasche soll gleichmäßig über der ganzen Querschnittsfläche wirken. Wenn wir die Kraft auf die entsprechende Fläche positionieren, so gewährleistet der FEM-Modul die gleichmäßige Aufteilung der Kraft auf alle Elemente (im Sinne einer "Druck"-Belastung):



Standardmäßig wirkt die Kraft auf der Vektor-Normalen der gewählten Fläche. Man kann hier jedoch auch Vektor-Komponenten verwenden, da das Bauteil orthogonal am Ursprung verankert wurde:



Die definierten Lasten erscheinen im Belastungsanalyse-Browser. Die automatisch vergebenen Bezeichner kann man umbenennen.

← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: CAD - Tutorial - Belastung - Loads>“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Constraints

Aus OptiYummy

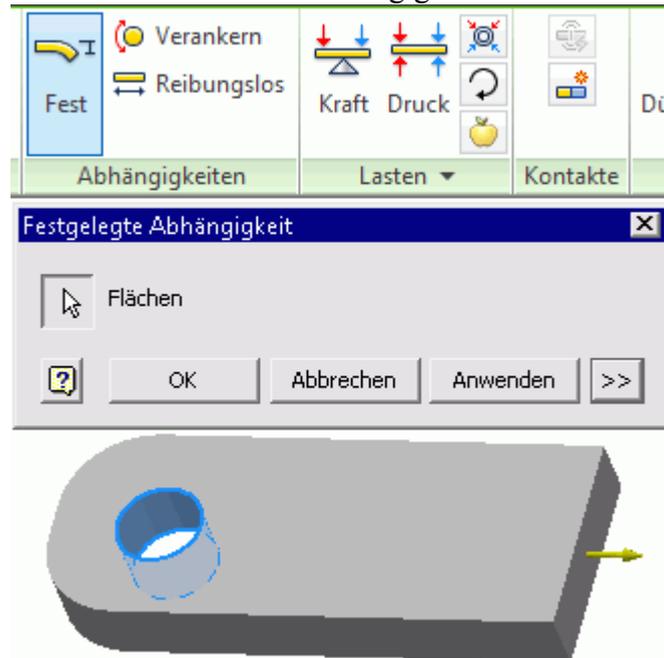
↑

← →

## Randbedingungen definieren (Constraints)

Im Beispiel sei der innere Lochrand starr mit einem bedeutend härteren Bolzenmaterial verschweißt. Der Lochrand ist also praktisch fest:

Damit eine Belastung im Bauteil entsteht, müssen zusätzlich zu den eingprägten Lasten auch Lagerstellen im Sinne von "Einspannungen" definiert werden, welche die resultierenden Reaktionskräfte aufnehmen. Dies geschieht im Autodesk Inventor z.B. über die Abhängigkeit "fest":



Die Knoten (Ecken der Tetraeder) des Netzes, welche sich auf dem Rand des Loches befinden, werden mit dieser Abhängigkeit fixiert.

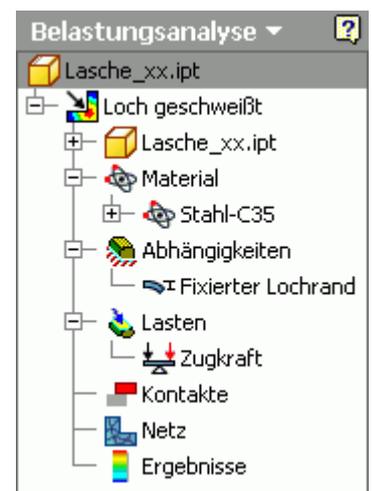
Infolge der am Bauteil angreifenden Lasten wird sich das Bauteil verformen. Die fixierten Knoten behalten jedoch ihre ursprüngliche Position in Bezug zum Ursprung-Koordinatensystem des Bauteils bei.

Über den erweiterten Dialog könnte man die Beweglichkeit z.B. der gewählten Fläche gezielt nur in einzelne Koordinaten-Richtungen einschränken. Dies ist im Beispiel auf Grund der Idealisierung jedoch nicht erforderlich.

Die Randbedingungen erscheinen wie die Lasten im Browser der Belastungsanalyse. Man sollte dafür sinnvolle Bezeichner vergeben.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:\\_CAD\\_-\\_Tutorial\\_-\\_Belastung\\_-\\_Constraints](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_CAD_-_Tutorial_-_Belastung_-_Constraints)“



# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Belastungsanalyse

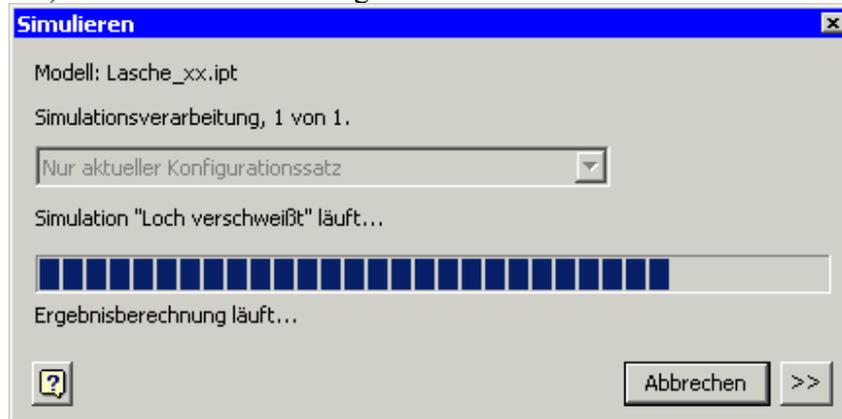
Aus OptiYummy

↑

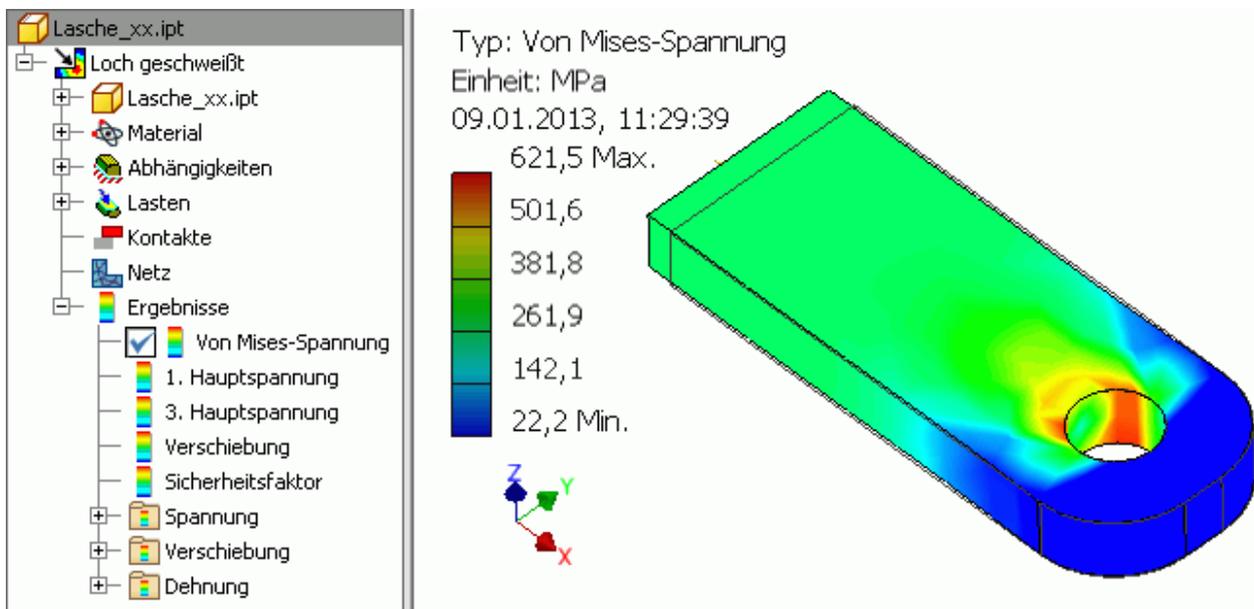
← →

## Belastungsanalyse

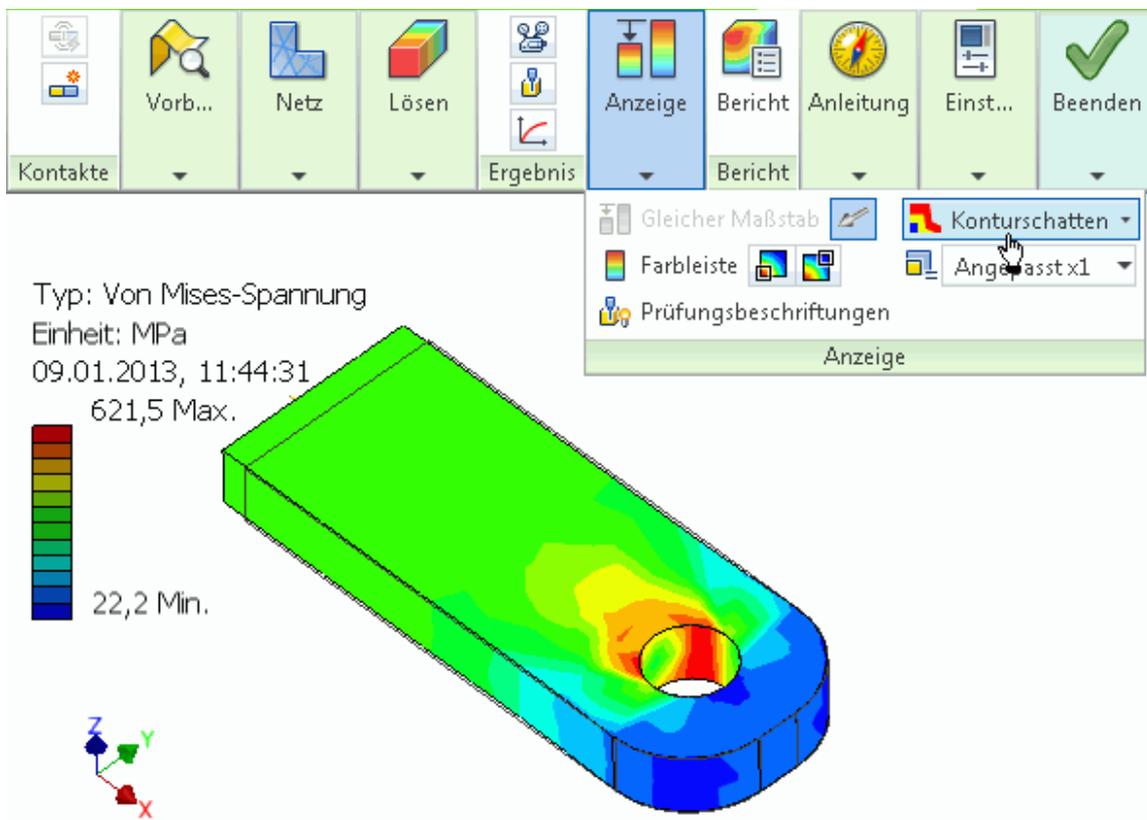
(unter *MFL* > *Lösen*) startet nach dem Betätigen von **Ausführen** die Modellberechnung:



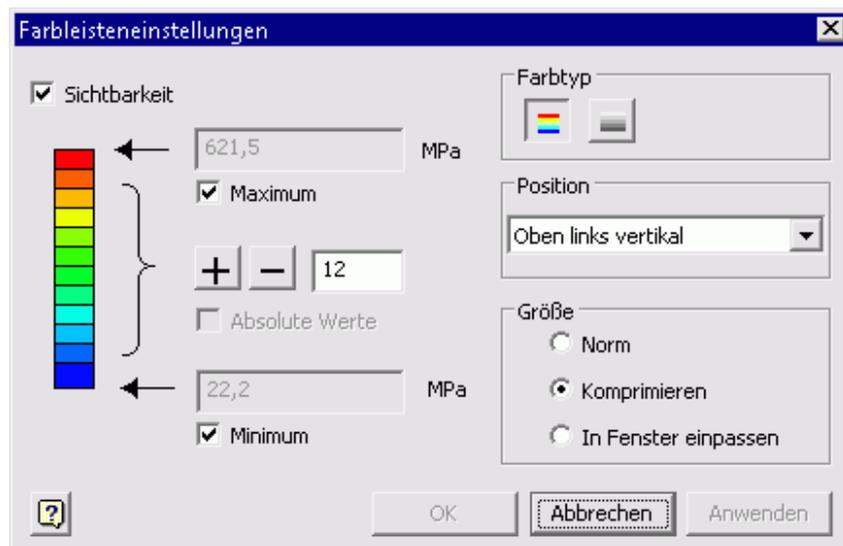
- Der FEM-Solver informiert während der Berechnung über den Fortschritt der Simulation.
- Infolge unserer sehr groben Vernetzung erfolgt die Berechnung so schnell, dass man den Fortschrittsbalken kaum erkennt.
- Als Ergebnis der Simulation erscheint standardmäßig die Kontur-Darstellung der Mises-Vergleichsspannung (im folgenden Bild mit ausgeblendetem Netz). Die Verformung des Bauteils wird mit einem Skalierungsfaktor (Standard=0.1) normiert auf die Maximalabmessung des Bauteils dargestellt:



- Die glattschattierte Darstellung der Farb-Kontur ist ungünstig für das Erkennen von Vernetzungsfehlern, deshalb sollte man die Anzeige auf Konturschatten umstellen. Die "ausgefransten" und unsymmetrischen Spannungsverläufe deuten dann darauf hin, dass die Vernetzung noch zu grob ist:



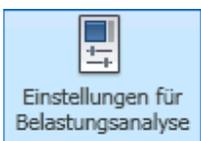
**MFL > Belastungsanalyse > Anzeige > Farbleiste** öffnet einen Dialog zur Farbleisteneinstellung:



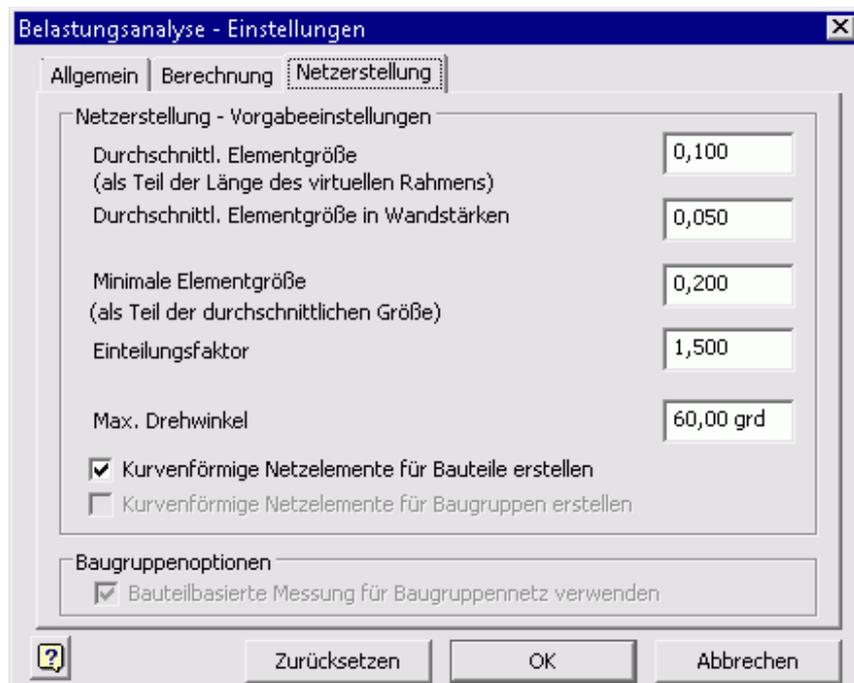
- Man kann maximal 12 Farb- bzw. Graustreifen zur Unterteilung der Skala verwenden.
- Mittels manueller Eingabe von Minimum und Maximum kann man einen Spannungsbereich "zoomen".
- Außerhalb des Bereichs liegende Spannungswerte werden dann rot bzw. blau dargestellt.
- Die Wirkung veränderter Einstellungen kann man durch "Anwenden" überprüfen.

**Anmerkung:**

Ist die Glattschattierung aktiviert, sind die Farbleisteneinstellungen deaktiviert und die Anzahl der Farben beträgt 5.



ermöglicht unter anderem die Änderung der Standardwerte für die globalen Vernetzungsparameter:

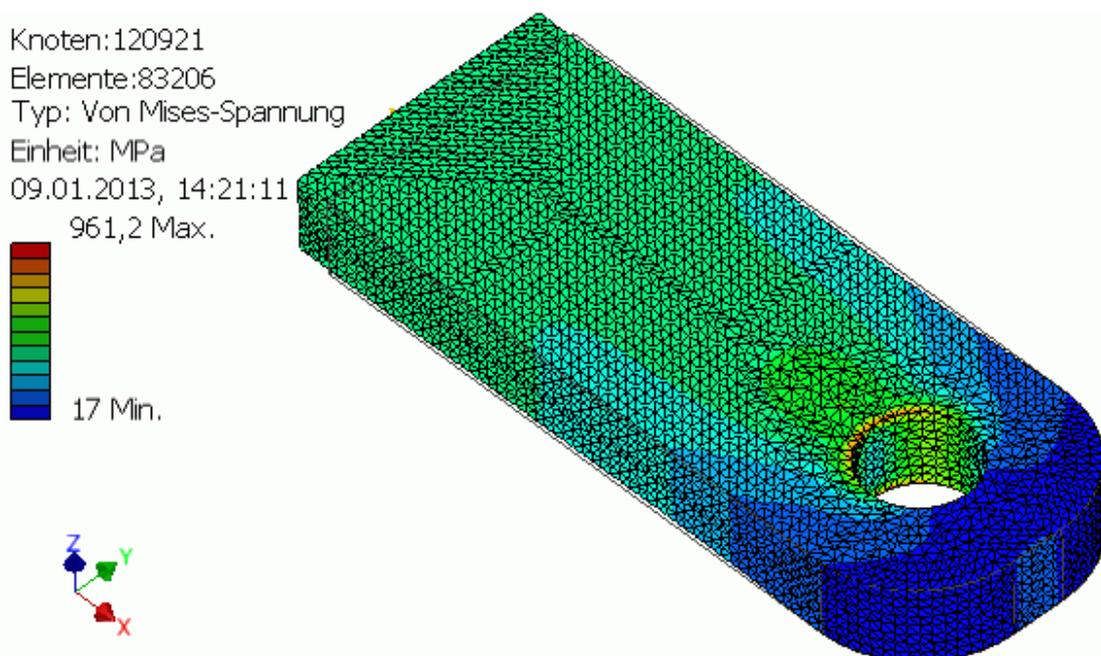


### Erläuterungen zu den Elementgrößen:

- Die **durchschnittliche Elementgröße** bezieht sich auf die max. Abmessungen des Bauteils. Standardmäßig würde diese Strecke in ungefähr 10 Elemente unterteilt.
- Die **durchschnittliche Elementgröße in Wandstärken** bezieht sich nur auf sogenannte Wandstärke-Elemente (in Gußteilen).
- Die **minimale Elementgröße** bezieht sich auf die durchschnittliche Elementgröße. Standardmäßig besitzen die kleinsten Elemente 1/5 dieser Größe.

Diese Standardwerte werden als Anfangswerte für die Netzeinstellungen eines Bauteils verwendet. Eine Änderung der Elementgrößen für das aktuelle Bauteil-Netz müssen wir deshalb im Belastungsanalyse-Browser über die Netzeinstellung vornehmen:

- Wir verringern nur die **durchschnittliche Elementgröße** vorsichtig z.B. jeweils durch halbieren. Die Simulation sollte hinreichend genau sein, wenn sich der Maximalwert der berechneten Spannung bei einer weiteren Elementverkleinerung praktisch nicht mehr ändert.
- Das Netz sollte man zur Kontrolle einblenden:



- Man wird diesen Zustand hinreichender Genauigkeit für die höchste Spannungsbelastung mit den Ressourcen

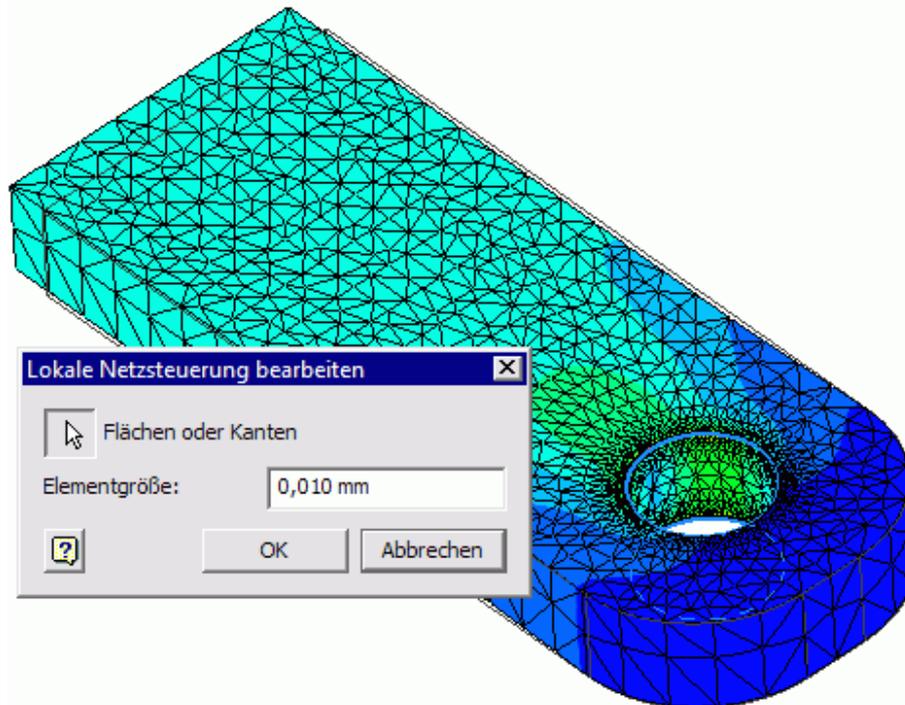
eines PC für dieses konkrete Beispiel wahrscheinlich nicht erreichen. Dabei sollte man sich jedoch bewusst sein, dass die größten Berechnungsfehler an den Kanten der Bohrung auftreten. Dies widerspiegelt sich im angezeigten Maximalwert.

Bei ca. 100000 Elementen reicht unter Umständen der Speicher nicht mehr und es rechnet schon sehr lange.

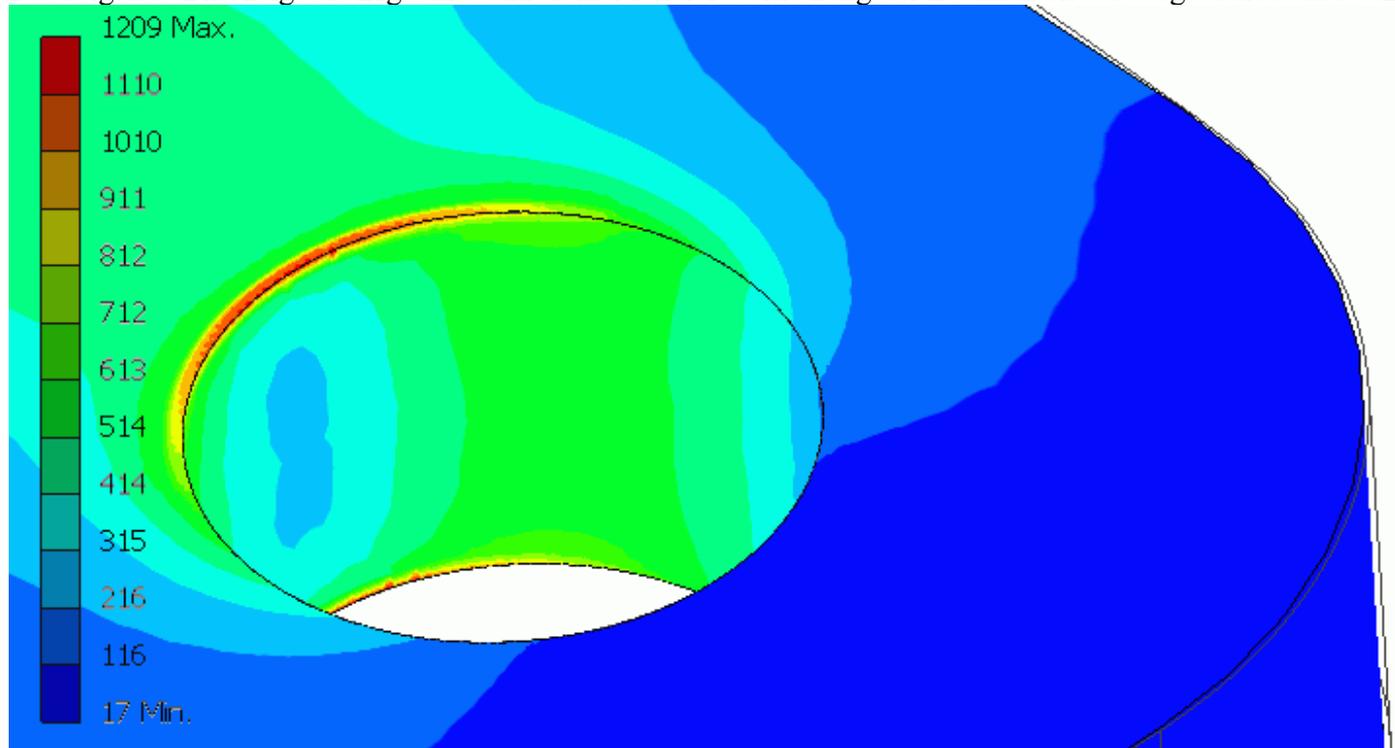
Die ausschließlich globale Verringerung der Elementgröße ist kein gangbarer Weg:

Global verringert man die durchschnittliche Elementgröße bei Bedarf nur geringfügig im Vergleich zu den Vorgaben. Ziel ist hierbei nur die Glättung der Ergebnisse in den unkritischen Bereichen des Bauteils.

An den kritischen Stellen verfeinert man die Vernetzung dagegen extrem (im Beispiel am Lochrand). Mittels **lokaler Netzsteuerung** verringert man dort die Elementgröße (in mm) soweit, dass das Netz noch berechenbar bleibt:



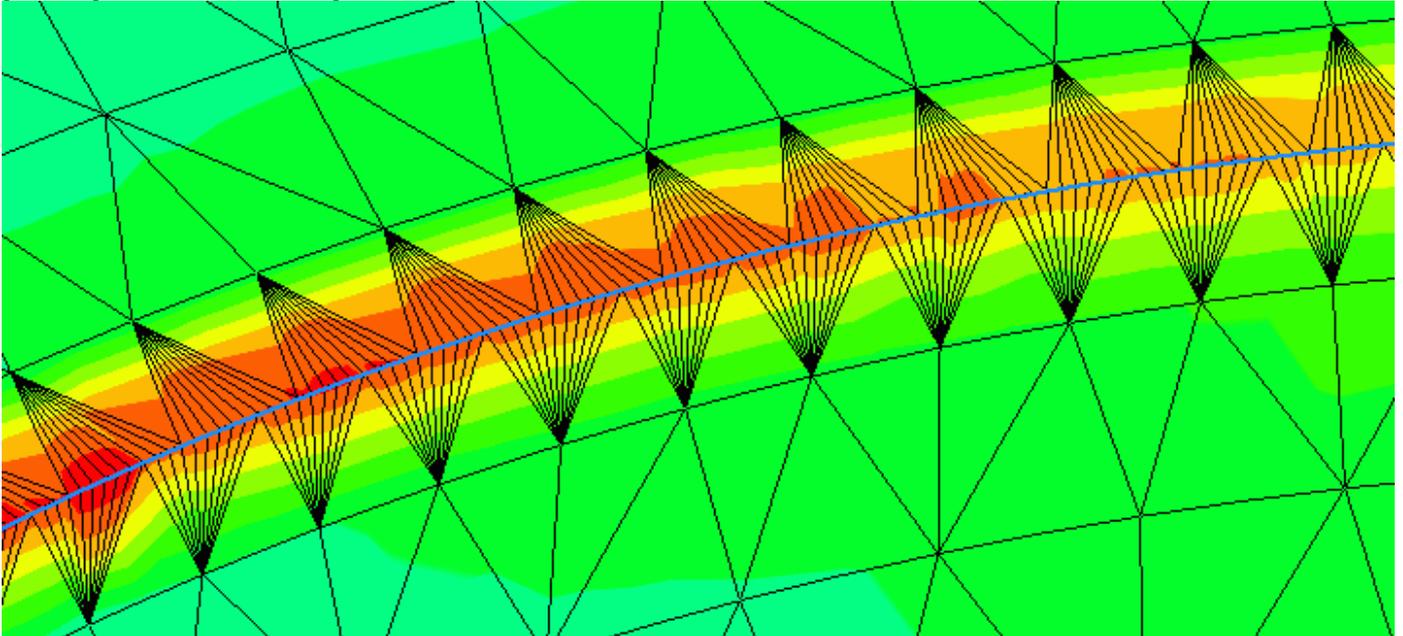
Das folgende Bild zeigt die Ergebnisse mit feiner lokaler Vernetzung der Lochkanten bei ausgeblendetem Netz:



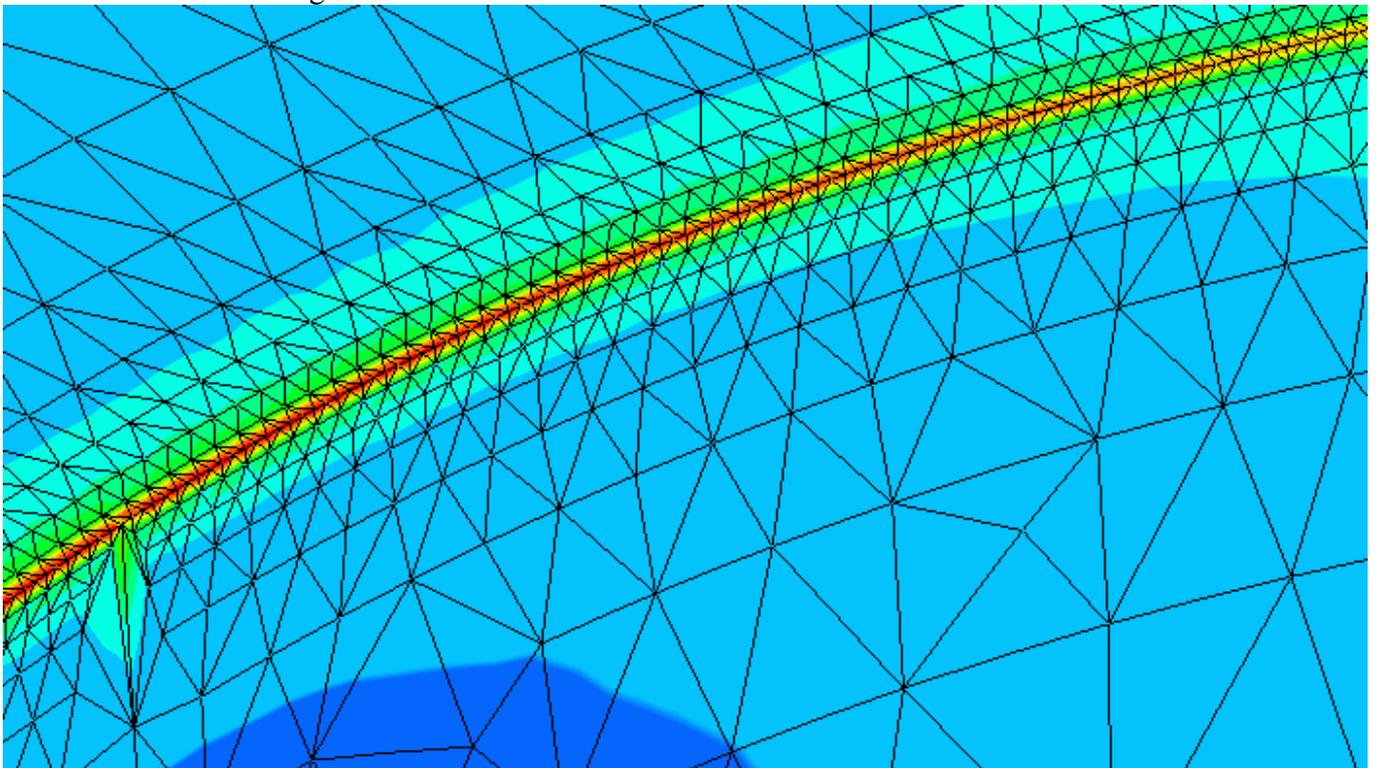
Es fällt auf, dass die Extrembelastung an den Bohrungskanten trotz der sehr feinen lokalen Vernetzung einen sehr ausgefranzten Verlauf aufweist:

Blenden wir das Netz wieder ein und zoomen noch stärker an den Lochrand heran, so erkennen wir die Ursache

der unstetigen Spannungsverläufe in dem ungünstigen Übergang zwischen feiner lokaler Vernetzung und grober globaler Vernetzung. Es entstehen dadurch extrem schmale Elemente an den Lochkanten:

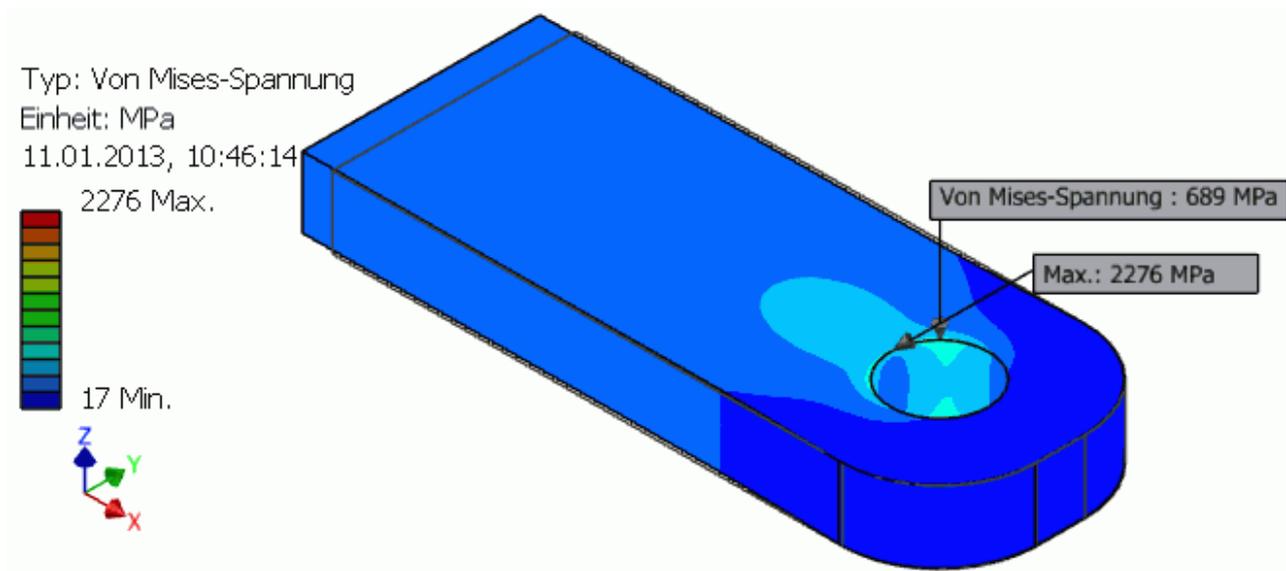


Man muss in den globalen **Netzeinstellungen** die **minimale Elementgröße** soweit verringern, dass eine "harmonische" Vernetzung im Bereich der Lochkanten entsteht:



Das schließt nicht aus, dass an den "Nahtstellen" der Modelle noch gewisse Störungen im Netz existieren, wie man im obigen Bild links unten erkennt.

Maximal- und Minimalwert der für die Anzeige gewählten Ergebnisgröße kann man über die Anzeige-Steuerung einblenden. Der Maximalwert befindet sich im Beispiel in einem Element der Lochkante in Zugrichtung:



- . Zusätzlich kann man mittels  Prüfen beliebige zusätzliche Ergebniswerte an der Netzoberfläche wählen. Das Beispiel zeigt, dass bereits sehr dicht neben den Spannungsspitzen an der Lochkante die Belastung auf wesentlich kleinere Werte gesunken ist.
- . Durch einige Überlegungen werden wir noch feststellen, dass die Spannungswerte in der Lochinnenfläche und insbesondere am Lochrand infolge vereinfachter Modellannahmen fragwürdig sind!

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: CAD - Tutorial - Belastung - Belastungsanalyse](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:CAD-Tutorial-Belastung-Belastungsanalyse)“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Auflage-Reaktionen

Aus OptiYummy

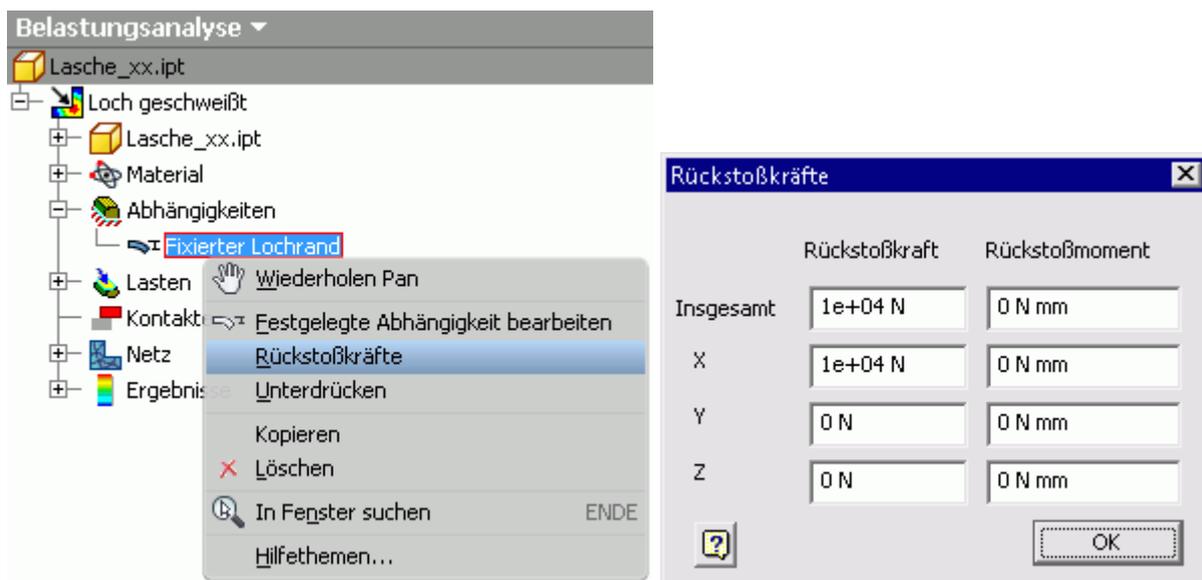
↑

## ← → Auflage-Reaktionen

- Für die Dimensionierung der Lagerstellen sind die Lagerkräfte und Momente von Interesse.
- Außerdem bieten die Auflagereaktionen eine Möglichkeit der Modell-Validierung - für jeden mechanischen Freiheitsgrad  $i$  muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\Sigma \text{Auflagereaktionen}_i + \Sigma \text{Last}_i = 0$$

- Leider kann man nur auf die einzelnen Lagerstellen "Abhängigkeit Festgelegt i" zugreifen und muss dann selbst die Summe bilden. Da im Beispiel nur eine Einspannung existiert, stellt dies hier kein Problem dar.
- Die Auflagereaktionen (schlecht übersetzt als "Rückstoßkraft") bekommt man nur zu Gesicht, wenn man im Browser mit der rechten Maustaste das Kontextmenü der entsprechenden Einspannung aktiviert:



- Für unser Beispiel sollte der Betrag der Auflagekraft genau dem Betrag der Lastkraft entsprechen. Es ist kein Restfehler erkennbar..
- Das berechnete Reaktionsmoment ist Null infolge der symmetrischen Befestigung und Belastung.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:\\_CAD\\_-\\_Tutorial\\_-\\_Belastung\\_-\\_Auflage-Reaktionen](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_CAD_-_Tutorial_-_Belastung_-_Auflage-Reaktionen)“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Vergleichsspannung

Aus OptiYummy

↑

← →

## Interpretation der Vergleichsspannung

Nach der Simulation wird standardmäßig die berechnete mechanische Mises-Vergleichsspannung farblich codiert auf der Oberfläche des Bauteils als "Kontur-Darstellung" angezeigt. Die Farbskala ist dabei automatisch zwischen dem Minimal- und Maximal-Wert der Spannung linear skaliert.

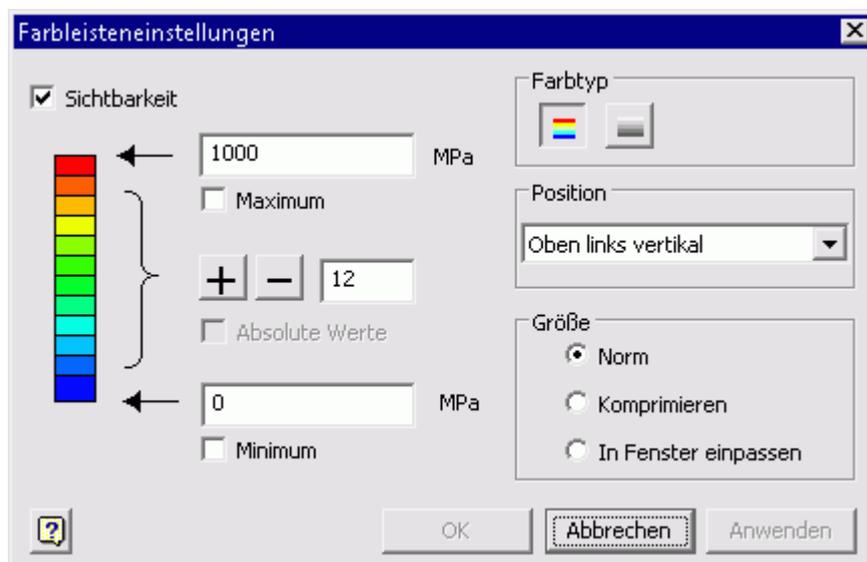
Für das Bauteil wird der dreidimensionale Spannungszustand berechnet. Der Spannungszustand an einer beliebigen Position ist durch drei Normalspannungen (Spannung XX, Spannung YY und Spannung ZZ) sowie drei Schubspannungen (Spannung XY, Spannung YZ und Spannung XZ) definiert. Alternativ kann man jeweils eine dieser Spannungskomponenten als Kontur-Darstellung aktivieren (Häkchen im Browser).

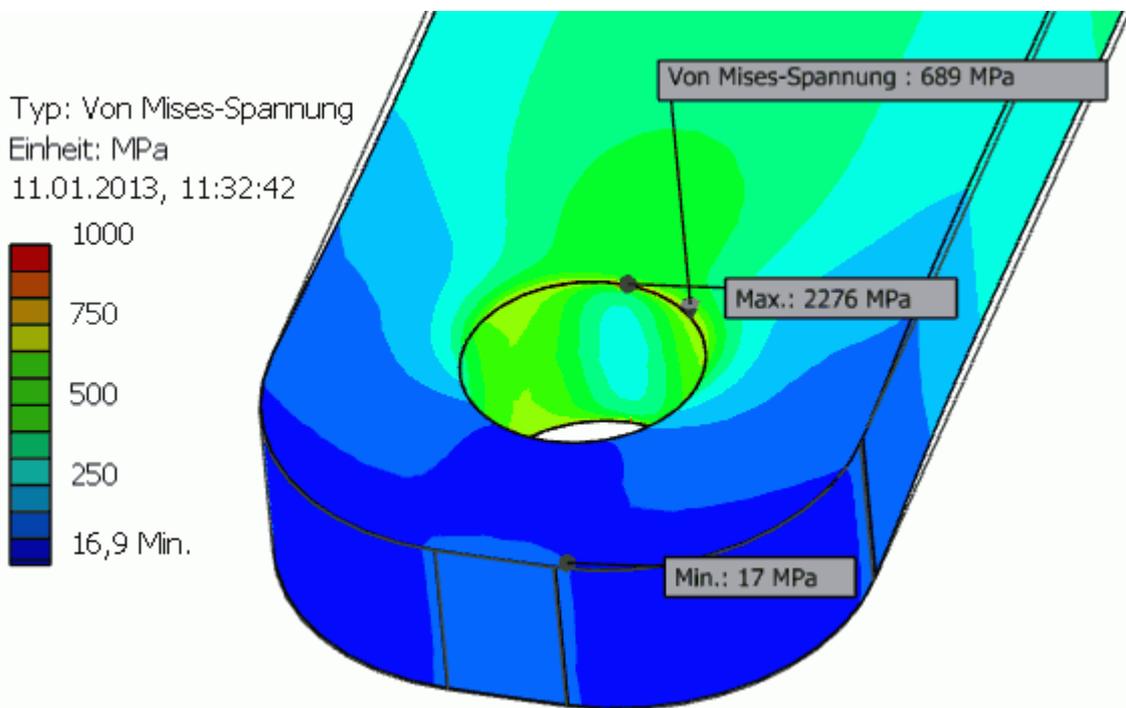
Die **Mises-Vergleichsspannung** liefert aber meist schon hinreichende Aussagen in Bezug auf die Bauteilbelastung:

- Die maximale Vergleichsspannung basiert in der vorliegenden Implementierung auf der Bruchhypothese der maximalen Vergleichsspannung für dehnbare Materialien (von-Mises-Hencky-Theorie).
- Diese Theorie eignet sich für zähe, verformbare Materialien wie Aluminium, Bronze oder Stahl.

### **Hinweis:**

Die Grenzen der Farbleiste schränken wir auf einen sinnvollen Bereich ein. Die automatische Skalierung "verbraucht" bereits ca. die Hälfte des Farbspektrums für den engen Bereich am Lochrand:





### 1. Überprüfung wertmäßig bekannter Spannungswerte:

- Abtasten der bekannten Punkte mittels *Prüfen*.
- So muss z.B. die Spannung in der Nähe der Last-Zugkraft entsprechend der Querschnittsfläche 333 MPa betragen.

### 2. Überprüfung der erwarteten Extrem-Bereiche:

- Da der Lochrand fixiert wurde, tritt die maximale Belastung am Loch in Zugrichtung auf. Die stärkste Belastung erfolgt dort direkt an den Kanten des Loches. Dort existiert der stärkste Gradient für die Verformung in Z-Richtung, weil sich die Dicke der Lasche durch die Zugkraft verringert, dies jedoch direkt am Loch wegen der Fixierung nicht möglich ist.
- Infolge der Nachgiebigkeit des Materials ist die Belastung auf der anderen Seite des Loches am geringsten. Das Material "fließt" praktisch um den Bolzen herum.
- Die berechneten Maximalwerte sind falsch, da sie vor allem aus den Idealisierungen der Befestigungsstelle resultieren!
- Die berechneten Minimalwerte nahe Null sind prinzipiell richtig. Anzuzweifeln ist die räumliche Verteilung der gering belasteten Bereiche, weil das Material sich in der Realität in der Umgebung des Loches anders verformen wird!

### 3. Deutung von Besonderheiten:

- Im Beispiel wäre eine Besonderheit die leichte Spannungserhöhung am Rand des Bogens hinter dem Minimum. Erklärbar ist dies durch die Spannungen quer zur Zugrichtung, welche durch das "Fließen" des Materials um den Bolzen entstehen.
- Mysteriöser ist im Loch der Bereich geringerer Spannung innerhalb des maximal belasteten Bereiches. Erklärbar wird dies durch die Dickenänderung der Lasche infolge der Zugspannung. Die Dicke der Lasche kann sich an der Einspannung nicht ändern, was zusätzliche Spannungen am Lochrand "produziert".

**Achtung:** Die berechneten Ergebnisse darf man nie kritiklos akzeptieren!

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:\\_CAD\\_-\\_Tutorial\\_-\\_Belastung\\_-\\_Vergleichsspannung](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_CAD_-_Tutorial_-_Belastung_-_Vergleichsspannung)“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Deformation

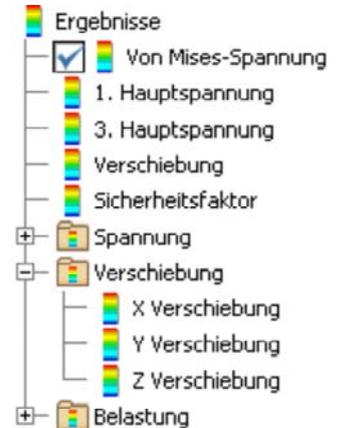
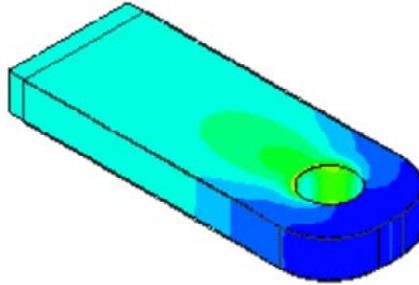
Aus OptiYummy



← →  
Deformation

Aus den aufgebrachtten Lasten resultiert infolge der Einspannungen an den Lagerstellen eine Deformation des Bauteils:

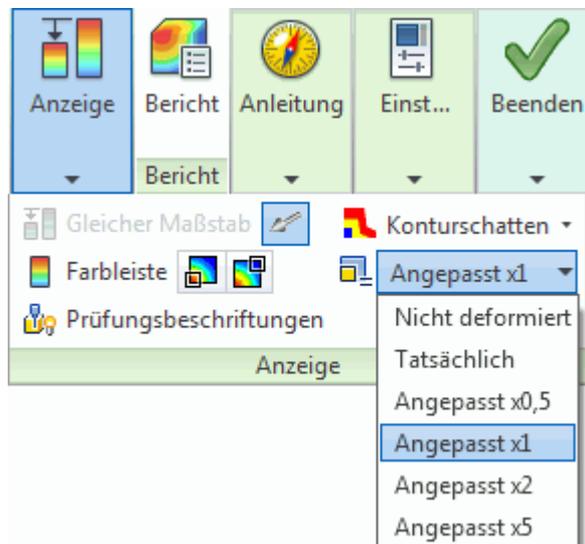
Diese Verformung wurde standardmäßig bereits zusammen mit der Mises-Vergleichsspannung im Vergleich zum Drahtgitter der Ausgangsform dargestellt:



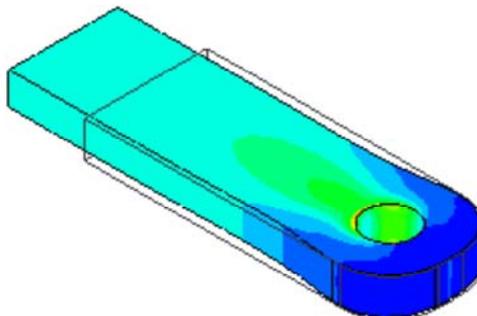
In den Einstellungen zur Belastungsanalyse ist unter "Allgemein" ein globaler Zeichenmaßstab von 10% eingestellt.

Bezogen auf die maximale Abmessung des Bauteils wird der Punkt mit der größten Verschiebung damit um 10% versetzt dargestellt. Die anderen Punkte werden dazu im richtigen Verhältnis verschoben.

Zusätzlich gibt es unter **MFL > Anzeige** die Möglichkeit, den Maßstab der Deformationsdarstellung zu ändern:

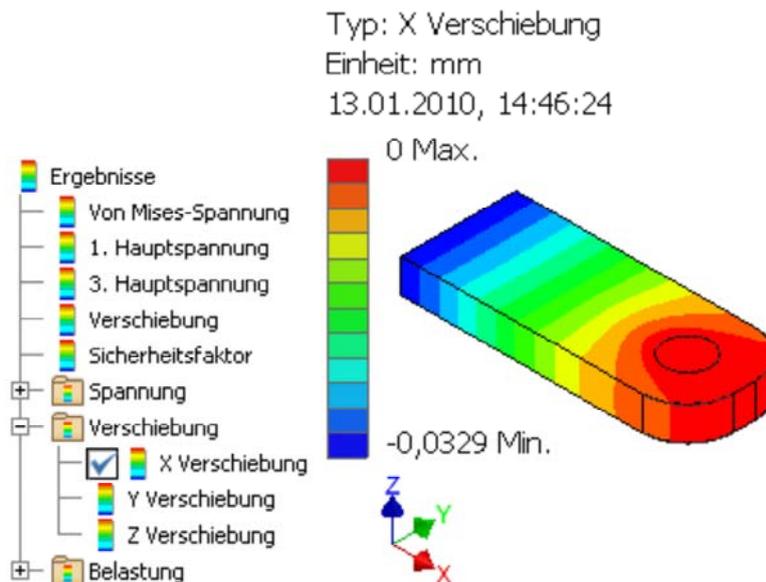


"Angepasst x5" (Maßstab 5:1) ergibt dann eine extrem überzeichnete Darstellung:



Man kann diese Art der Deformationsdarstellung auch abschalten oder auf die tatsächliche Verformung umschalten. Letzteres macht meist keinen Sinn, da die Deformationen häufig im Mikrometer-Bereich liegen und damit unsichtbar bleiben.

Jedem Punkt des Bauteils ist ein Verschiebungsvektor zugeordnet. Die drei Komponenten (X,Y,Z) der Verschiebung werden separat als Ergebnisse der Simulation bereitgestellt. Davon kann man eine Verschiebungsrichtung auswählen, welche dann anstatt der Spannungen als Kontur auf dem Bauteil dargestellt wird:

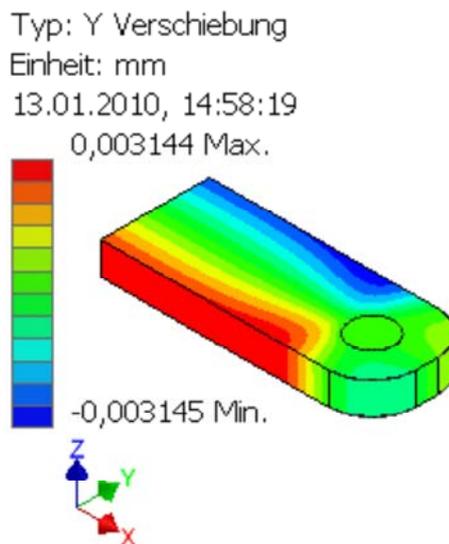


In diesem Fall ist das Abschalten der Deformationsdarstellung sinnvoll.

An der Farbskala erkennt man, dass im Beispiel die maximale Verschiebung in X-Richtung ca. 33  $\mu\text{m}$  beträgt.

Das Vorzeichen der Verschiebungswerte ist positiv in Richtung der zugehörigen Koordinaten-Achse.

Die Deformation findet nicht nur in Richtung der Zugbelastung statt, sondern es erfolgt auch eine Einschnürung quer zur Zugbelastung. Diese Einschnürung in Y-Richtung beträgt im Beispiel ca. 3  $\mu\text{m}$  auf jeder Seite:



**Hinweis:** Für obige Darstellungen wurde in den Farbleisteneinstellungen das Häkchen für "Absolute Werte" entfernt. Anderenfalls würden nur positive Verschiebungswerte erscheinen.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: CAD - Tutorial - Belastung - Deformation](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_CAD_-_Tutorial_-_Belastung_-_Deformation)“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Beanspruchung

Aus OptiYummy

↑

← →

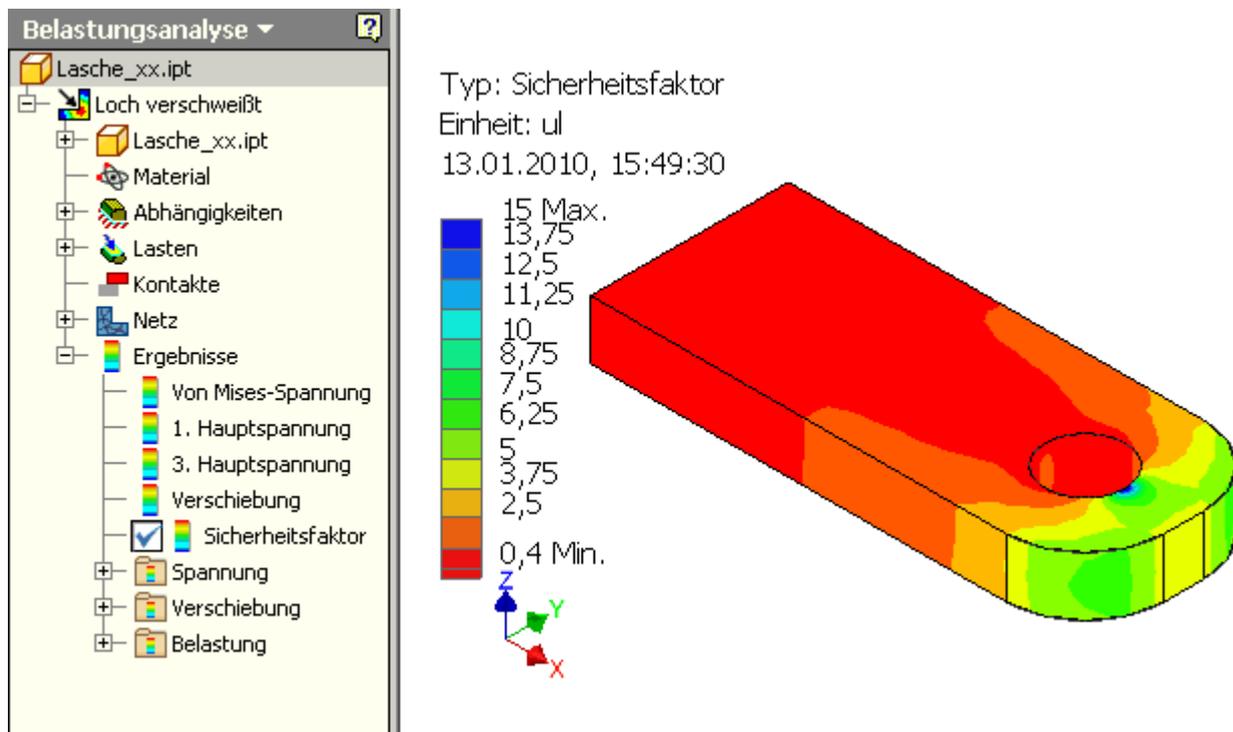
## Beanspruchung (Sicherheitsfaktor)

Der **Sicherheitsfaktor** (gegen Fließen) für verformbare Materialien wird definiert als das Verhältnis der Streckgrenze des Materials zur maximal auftretenden Belastung:

$$S_F = R_e / \sigma_{\max}$$

Ein Sicherheitsfaktor kleiner 1 weist normalerweise auf einen Konstruktionsfehler hin, der mit ziemlicher Sicherheit zu einer Zerstörung des Teils führt:

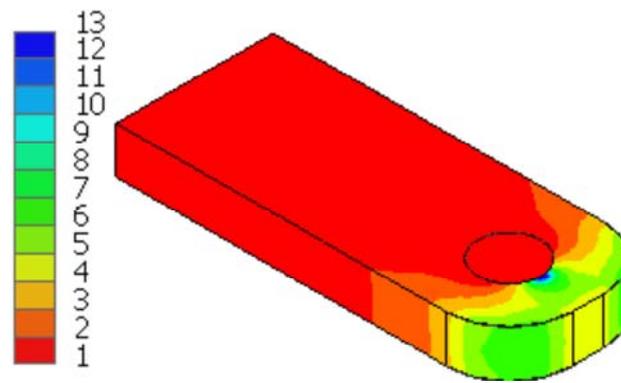
*Autodesk Inventor* bietet die Möglichkeit, den "aktuellen" Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit von der Position auf dem Bauteil grafisch darzustellen:



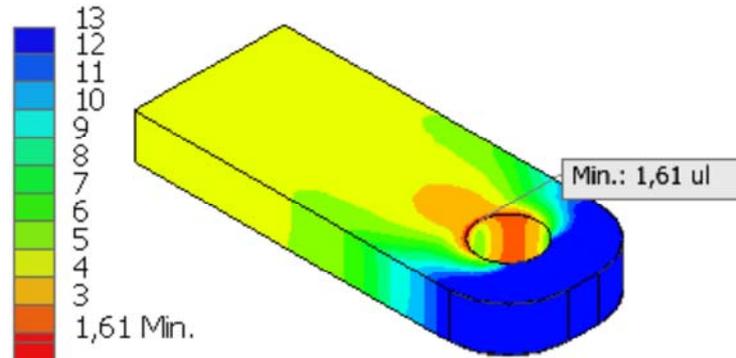
"Rote" Gebiete kennzeichnen im Beispiel die Bereiche mit einem Sicherheitsfaktor < 1.

Wir wollen die Kraft nun soweit verringern, dass an keiner Position des Bauteils ein Sicherheitsfaktor=2 unterschritten wird.

Dazu verändern wir die Skalierung der Farbleiste so, dass der rote Bereich bei dem Sicherheitsfaktor=2 endet (12-er Farbleiste / untere Grenze=1 / obere Grenze=13):



- . Dann verringern wir die Zugkraft soweit, bis kein Bereich mehr rot markiert ist.
- . Mit dem folgenden Bild wurde das noch nicht ganz erreicht:



- . Der Minimalwert wird auf der Farbskala zusätzlich angezeigt, wenn er in den Grenzen der Skala liegt.
- . Die Position des Minimalwertes kann man über die Anzeige-Optionen einblenden lassen
- . Im Beispiel liegt dieser Wert wie erwartet auf der Loch-Kante. Man müsste also die Zugkraft noch etwas verringern, wenn man den Sicherheitsfaktor 2 einhalten muss.

### Fragen:

- . Wie groß ist die zulässige Zugkraft, wenn der Sicherheitsfaktor=2 im Modell an allen Stellen eingehalten werden soll.
- . Wie groß ist die maximale Verformung bei dieser ermittelten zulässigen Zugkraft?

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:\\_CAD\\_-\\_Tutorial\\_-\\_Belastung\\_-\\_Beanspruchung](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_CAD_-_Tutorial_-_Belastung_-_Beanspruchung)“

# Software: CAD - Tutorial - Belastung - Spielpassung

## Aus OptiYummy

↑

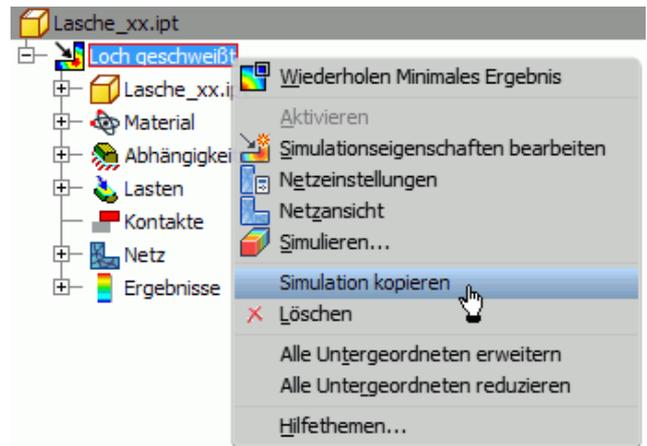
← →

### Spielpassung auf biegesteifem Bolzen

Die Annahme einer festen und absolut steifen Verbindung zwischen Lasche und einem unverformbaren Bolzen ist sicher etwas unrealistisch. Die resultierenden Belastungen werden sich von den realen Verhältnissen wahrscheinlich stark unterscheiden.

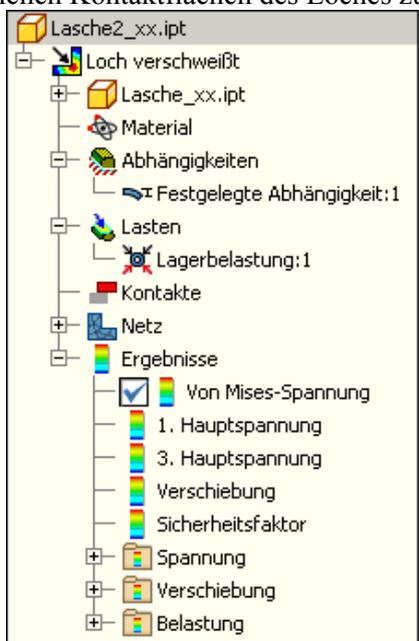
Ein üblicher Fall ist die Befestigung der Lasche mittels Spielpassung an einem Bolzen. Dieser soll vereinfacht wieder als biegesteif angenommen werden. Wir konfigurieren eine neue Simulation innerhalb der Belastungsanalyse so, dass diese Belastungsverhältnisse nachgebildet werden:

- Kopie der vorhandenen Simulation "Loch geschweißt" erzeugen und "Spielpassung" nennen.
- Darin Ersatz der "Abhängigkeit festgelegt" durch eine "Lagerbelastung" mit Kraft in der Koordinatenrichtung, wir beginnen wieder mit einer Kraft von 10000 N, um direkt vergleichbare Ergebnisse zu erhalten
- Ersatz der Last-Kraft durch eine Einspannung (Abhängigkeit festgelegt).
- Veränderte lokale Vernetzung: gesamter Lochrand anstatt der Lochkanten / zusätzlich Kante um die jetzt fixierte (festgelegte) Stirnfläche.

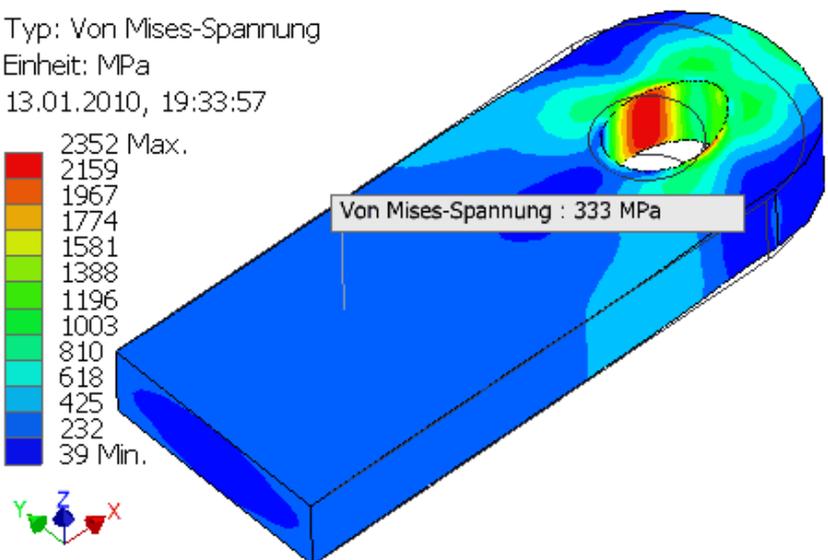
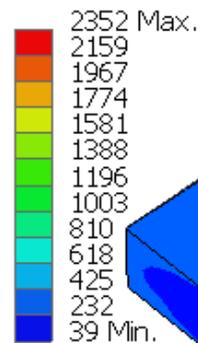


Die berechnete Belastung unterscheidet sich grundlegend von der mit der Fixierung des Lochrandes:

- Das Loch wird aufgeweitet.
- Es drückt nur ca. die Hälfte der Innenwand des Loches auf den Bolzen.
- Die höchste Belastung entsteht nun auf der abgerundeten Seite der Lasche und durch Druckbelastung an den seitlichen Kontaktflächen des Loches zum Bolzen:



Typ: Von Mises-Spannung  
Einheit: MPa  
13.01.2010, 19:33:57



### Fragen:

- Welche Zugkraft verträgt unter diesen Bedingungen die Lasche, damit der Sicherheitsfaktor  $> 2$  für das gesamte Bauteil gilt?
- Wie groß ist die maximale Verformung für den zulässigen Lastfall?

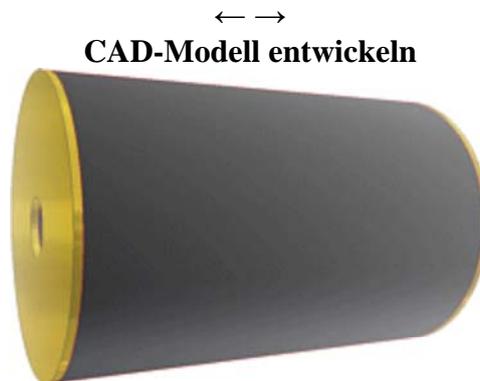
← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: CAD - Tutorial - Belastung - Spielpassung>“

# Software: FEM - Tutorial - 3D-Mechanik - CAD-Modell

Aus OptiYummy

↑



Bei dem Gummipuffer handelt es sich um einen Körper, der aus mehreren Teilen unterschiedlicher Materialien zusammengesetzt ist. Damit muss er im Autodesk Inventor als Baugruppe auf der Grundlage der Einzelteil-Modelle definiert werden. Die FEM-Belastungsanalyse erfolgt dann auf Basis dieser Baugruppe.

## Stahlscheiben

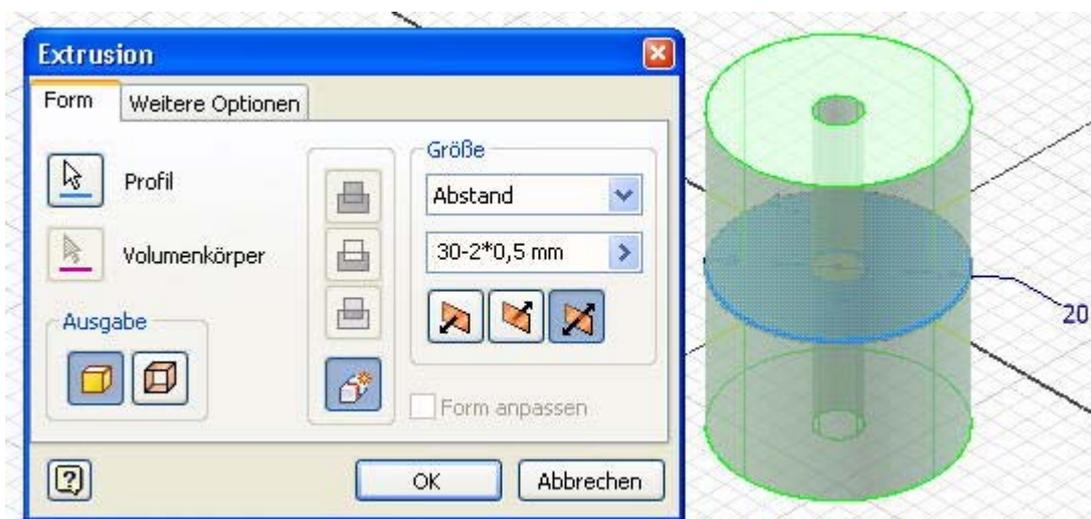
Die Stahlscheiben haben folgende Eigenschaften:

- . Material Stahl C35
- . Außendurchmesser 20 mm
- . Lochdurchmesser 4 mm
- . Dicke 0,5xx mm (mit xx=Teilnehmer-Nr. 01...99)

### Hinweise:

- . Für die Vernetzung der Bauteile innerhalb der Baugruppe ist es entscheidend, dass der **Kreis** in der Basis-Skizze **verdreh sicher am Koordinatensystem verankert** wird! Bei der Definition des Kreises sollte man vorsichtshalber stets die gleiche Koordinatenachse zur "Befestigung" verwenden (z.B. die X-Achse).
- . Für das Material Stahl-C35 verwenden wir die gleichen Werte, wie für die vorherige Lasche.
- . Wir verwenden für die Bauteildatei den Namen **Stahlscheibe\_xx.ipt**

## Gummihülse



Die Gesamthöhe des Gummipuffers von 30 mm setzt sich zusammen aus der Höhe der Gummihülse und der Dicke=0,5xx mm der beiden Stahlscheiben. Auch bei der Gummihülse müssen wir unbedingt auf die **Verdrehsicherheit** bei der Modellentwicklung achten!

Für das Gummimaterial benötigen wir wieder eigene Parameter:

- Auf der Basis des vorhandenen Materials Kautschuk definieren wir Gummi mit unseren speziellen Parametern:

Medien	
Name	Seitenverhältnis
Gummi - schwarz - Version 1.1	Aussehen
<b>Gummi</b>	<b>Physisch</b>
Physisch Eigenschaften	
▼ <b>Informationen</b>	Name: Gummi
	Beschreibung: Synthese-Gummi
	Schlüsselwörter: Tragwerk, Kunststoff
	Typ: Kunststoff
	Subklasse: Elastomer
	Quelle: FEM-Tutorial
	Quelle-URL: www.optiyummy.de
▼ <b>Einfach thermisch</b>	Wärmeleitfähigkeit: 0,140 W/(m·K)
	Spezifische Wärme: 0,450 J/(g·°C)
	Wärmeausdehnungskoeffizient: 100,000 µm/(m·°C)
▼ <b>Mechanisch</b>	Verhalten: Isotrop
	Elastizitätsmodul (Young): 0,005 GPa
	Poissonsche Zahl: 0,49
	Schubmodul: 0,500 MPa
	Dichte: 1,100 g/cm <sup>3</sup>
▼ <b>Stärke</b>	Streckspannung: 10,000 MPa
	Zugfestigkeit: 27,600 MPa

- Wir speichern die Bauteildatei als **Gummihülse\_xx.ipt**.

## Gummipuffer (Baugruppe)

Beginnend mit der Gummihülse als Basis-Bauteil montieren wir die beiden Scheiben mittels der Abhängigkeit "Einfügen".

Wir speichern die Baugruppendatei als **Gummipuffer\_xx.iam**.

← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software: FEM - Tutorial - 3D-Mechanik - CAD-Modell>“

# Software: FEM - Tutorial - 3D-Mechanik - CAD-Belastungsanalyse Preprocessing

Aus OptiYummy

↑

← →

## Preprocessing (Material, Load, Constraint, Kontakte, Netz)

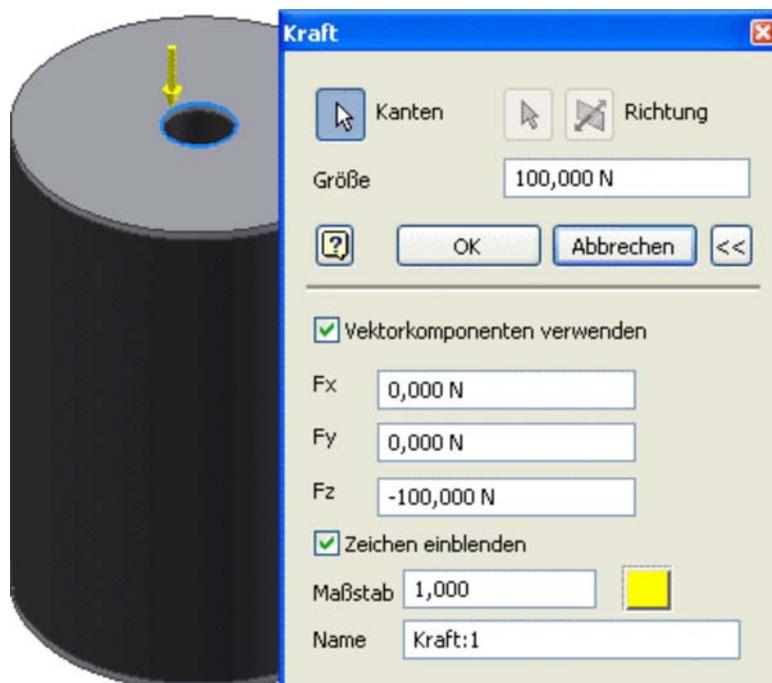
Zur Durchführung der Belastungsanalyse wechseln wir nun in die dafür bereitgestellte Arbeitsumgebung (**MFL > Umgebungen > Belastungsanalyse**). Wir werden unterschiedliche **Lastfälle** als **Simulationen** in dieser Umgebung nachvollziehen. Der gesamte FEM-Prozess wird zuerst ausführlich am Beispiel von Streckenlasten auf den Lochrändern der Scheiben erläutert. Dazu erstellen wir eine neue Simulation **Streckenlast** (Konstruktionsziel="Einzelner Punkt"):

### 1. Material

Die den Bauteilen zugewiesenen Materialien stehen auch für die Belastungsanalyse zur Verfügung:

Materialien zuweisen			
Komponente	Originalmaterial	Material der Überschreibung	Sicherheitsfaktor
[-] Gummipuffer_xx.iam			
Gummihülse_xx:1	Gummi	(wie definiert)	Streckgrenze
Stahlscheibe_xx:1	Stahl-C35	(wie definiert)	Streckgrenze
Stahlscheibe_xx:2	Stahl-C35	(wie definiert)	Streckgrenze

### 2. Hinzufügen der Lasten (Loads)



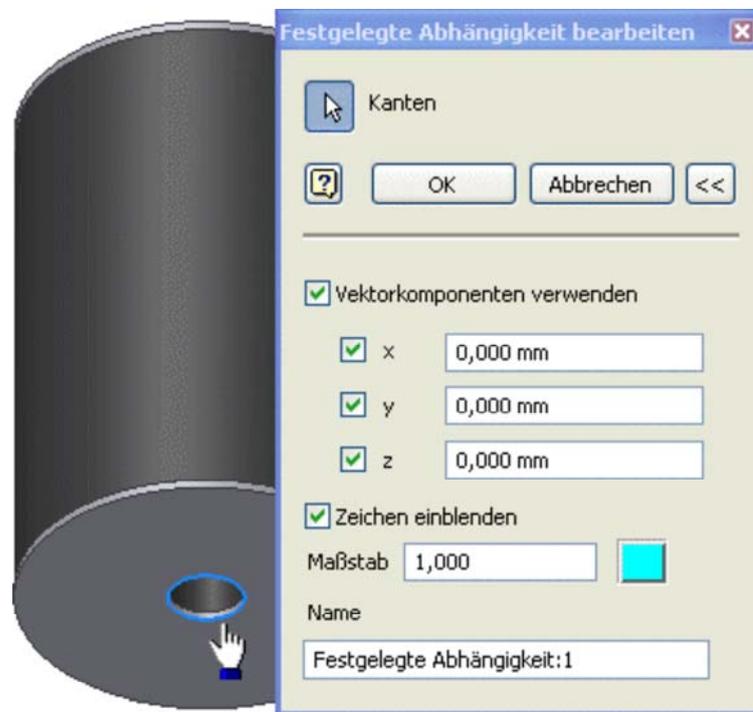
Die Druck-Kraft von 100 N wird der äußeren Lochkante der oberen Stahlscheibe zugewiesen.

### 3. Randbedingungen definieren (Constraints)

Um das Bauteil symmetrisch zu belasten, muss die Gegenkraft auf den Lochrand der unteren Stahlscheibe aufgebracht werden.

Die Gegenkraft entsteht als Auflagereaktion in geeignet definierten Randbedingungen.

Wir definieren die Abhängigkeit "fest" auf der äußeren Lochkante der unteren Stahlscheibe:



**Hinweis:** In der Realität kann durch die Belastung eine Verschiebung der Punkte auf der Lochkante in der XY-Ebene stattfinden. Man muss diese Richtungen jedoch fixieren, weil ansonsten eine Fehlermeldung des Solvers erscheint, dass die Randbedingungen unzureichend sind.

#### 4. Kontakte zwischen Bauteilen definieren

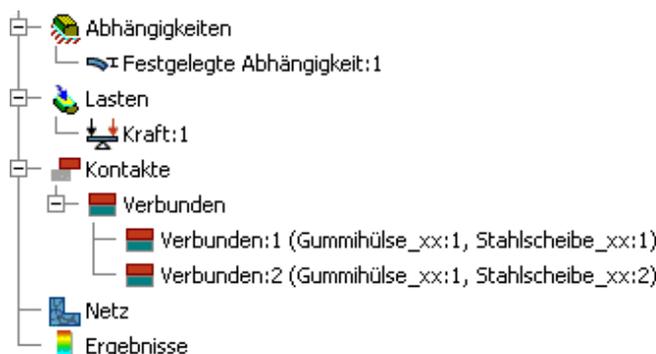
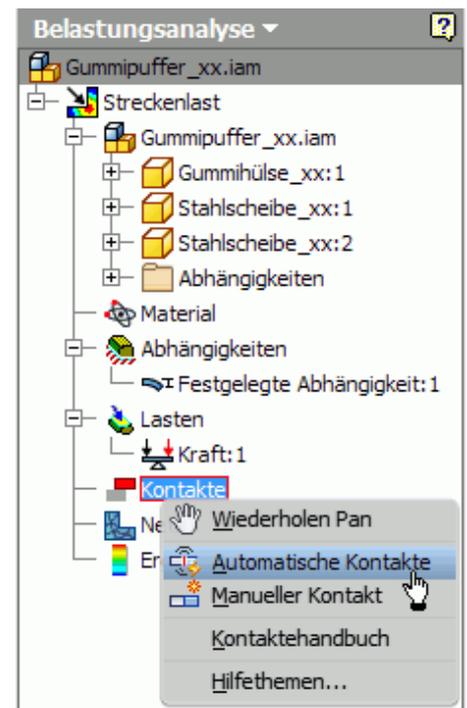
Die Anordnung der Bauteile innerhalb der Baugruppe wurden bereits über Zusammenbau-Abhängigkeiten definiert (im Beispiel durch "Einfügen").

Damit ist aber noch nicht definiert, wie sich die einzelnen Kontaktflächen zwischen den Bauteilen bei einer Belastung der Baugruppe verhalten (z.B. Starr verbunden? / Aufeinander gleitend? / usw. ).

Deshalb müssen in Vorbereitung der FE-Simulation die Eigenschaften der **Kontakte** zwischen den Bauteilen näher spezifiziert werden.

Im Beispiel genügt für die Kontaktflächen die Standardannahme "Fest verbunden", welche durch die Funktion **Automatische Kontakte** anhand der konkreten Baugruppen-Geometrie ermittelt wird.

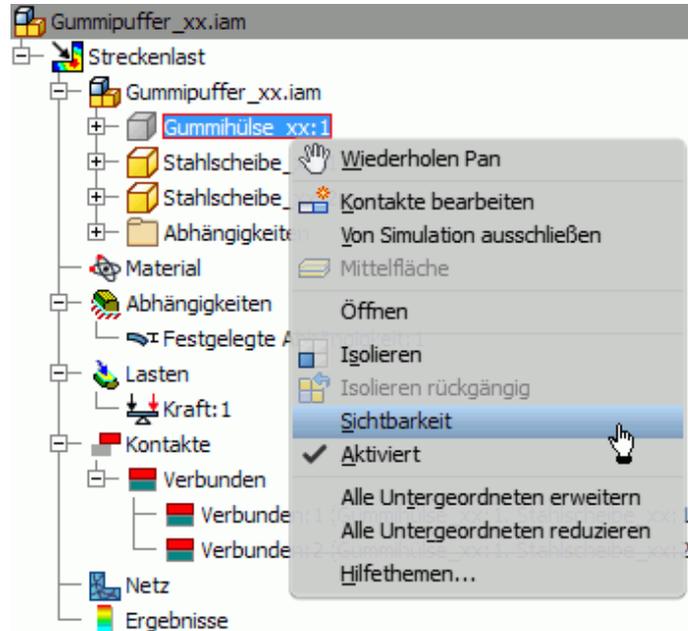
Zwischen den Stahlscheiben und der Gummihülse werden die Kontakte automatisch ergänzt. Mittels Kontextmenü **Kontakt Bearbeiten** werfen wir einen Blick in die Liste möglicher Kontakt-Eigenschaften, ohne eine Änderung vorzunehmen:



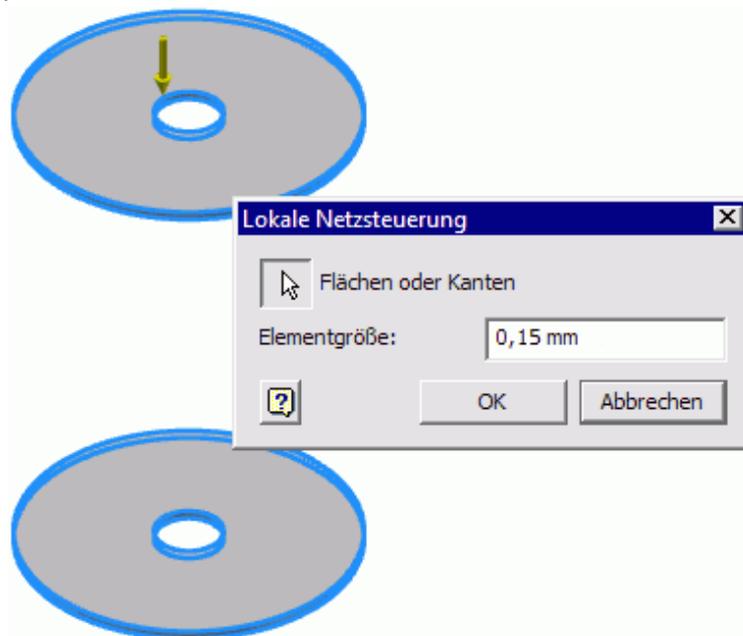
Bis auf den Feder-Kontakt erhält man bei allen Kontakt-Paarungen keinen Zugriff auf Kontakt-Parameter. Beim Feder-Kontakt kann man Steifigkeiten senkrecht und tangential zur Kontaktstelle angeben.

## 5. Vernetzung

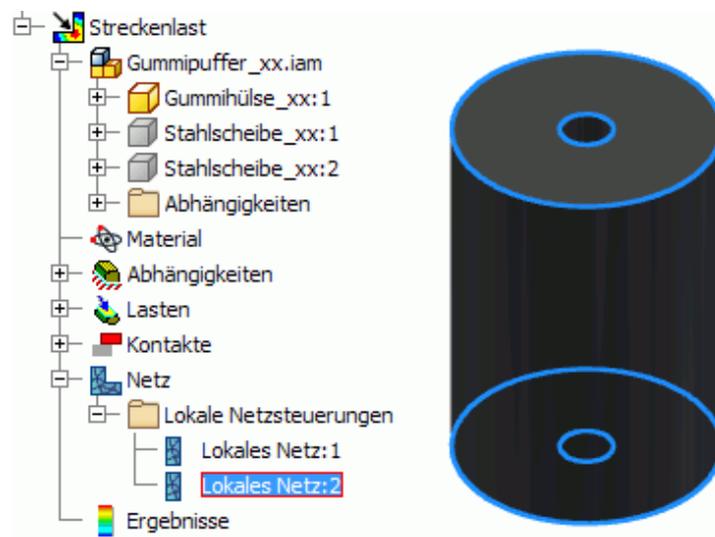
- Ausgehend von unseren Erfahrungen mit der **Belastungsanalyse eines Bauteils** lassen wir die (globalen) Netzeinstellungen vorläufig unverändert (Standard-Vorgaben).
- An den Stellen, wo wir die stärksten Gradienten der mechanischen Spannung erwarten, verkleinern wir mittels **Lokaler Netzsteuerung** die Elementgröße. Das betrifft alle Kanten der Scheiben und der Gummihülse.
- Es ist nicht ganz einfach, die praktisch übereinander liegenden Kanten von Stahlscheibe und Gummihülse gezielt auszuwählen. Deshalb sollte man störende Bauteile jeweils ausblenden. Wir machen zuerst die Gummihülse unsichtbar:



- Nun können wir ungestört alle Kanten der Stahlscheiben mit einer lokalen Netzsteuerung versehen (z.B. Elementgröße=0,15 mm):

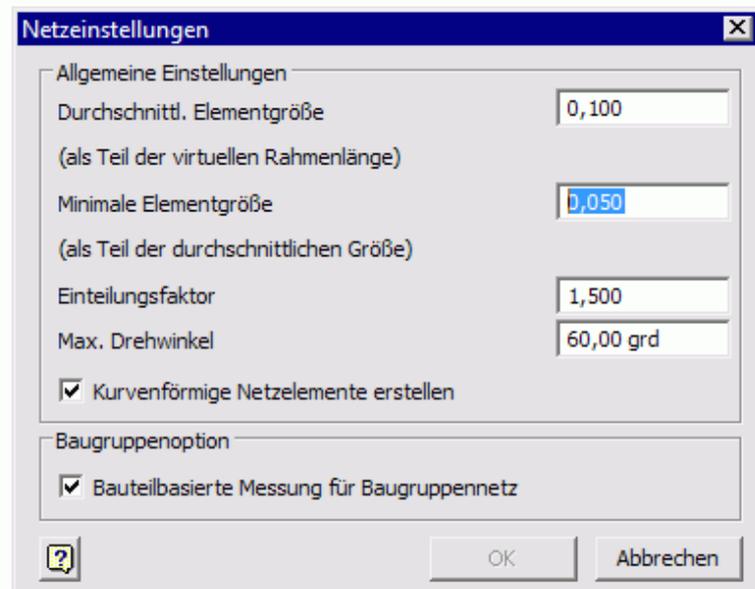


- Um die zugehörigen Kanten der Gummihülse zu markieren, ist es günstig, dafür die Stahlscheiben unsichtbar zu machen.
- An der Gummihülse muss man die gleiche Elementgröße verwenden, wie an den angrenzenden Kanten der Stahlscheiben:



Die (globale) Netzsteuerung sollte man abschließend benutzen, um einen "harmonischen" Übergang zwischen grober globaler Vernetzung und feiner lokaler Vernetzung durch Verkleinern der **Minimalen Elementgröße** zu konfigurieren:

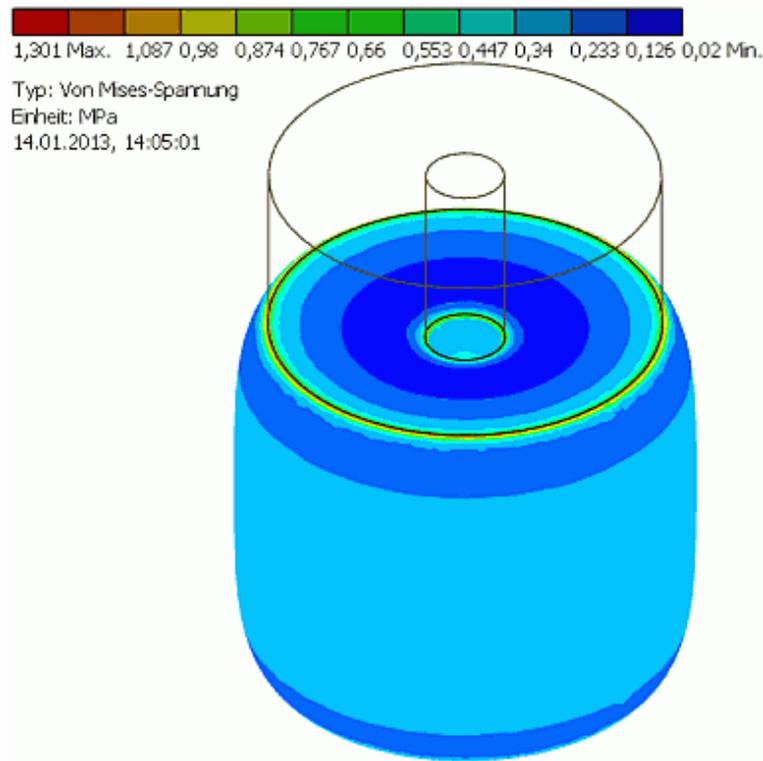
Knoten:149842  
Elemente:86548



### Hinweise:

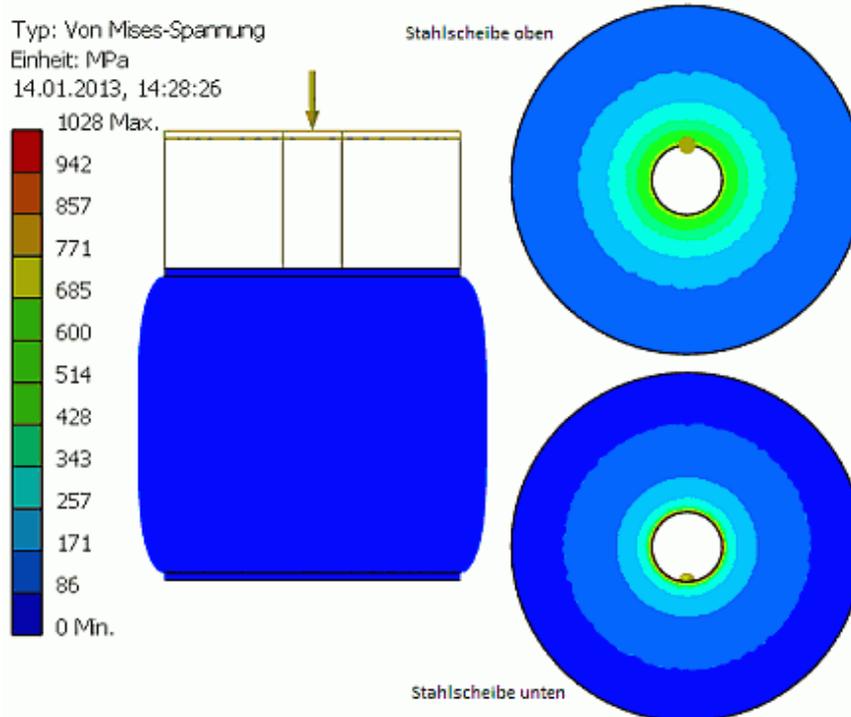
- Bei **Bauteilbasierter Messung** bezieht sich die durchschnittliche Elementgröße auf die Abmessungen des jeweiligen zu vernetzenden Bauteils. Damit ist eine günstigere Anpassung des Netzes an unterschiedliche Bauteilgrößen möglich.
- Um zu kontrollieren, ob die gewünschte lokale Vernetzungssteuerung an der Gummihülse wirkt, muss man nach dem Vernetzen die Stahlscheiben kurzzeitig wieder unsichtbar machen.
- Bei Verwendung der Materialfarben ist die Vernetzung wegen des dunklen Hintergrundes kaum sichtbar. Deshalb wurden in der Baugruppendatei den Bauteilen hellere Farben zugewiesen (iProperties > Exemplar).

Das benutzte Netz ist ein guter Kompromiss zwischen Berechnungszeit und -qualität. Das folgende Bild zeigt die Mises-Spannung in der Gummihülse (Stahlscheiben unsichtbar) mit stark übertriebener Deformation (angepasst x5):



- Die maximalen Spannungsbelastungen treten direkt an den Kanten des Gummis auf. Der Bereich dieser maximalen Belastung ist wie bei der zuvor untersuchten Lasche extrem schmal.
- Eine stark vergrößerte Ansicht zeigt "ausgefranste" Grenzen zwischen den Spannungsbereichen. Diese resultieren aus der teilweise etwas groben Vernetzung. Eine feinere Vernetzung ist jedoch kaum noch realisierbar, weil bereits ca. 100000 Elemente vorhanden sind.

Blenden wir die Stahlscheiben wieder ein, so ergibt sich die folgende Darstellung:



- Man sieht in der übertriebenen Deformation, wie der Gummi unter den Kanten der Stahlscheiben hervorquillt. Das erklärt die starke Spannungsbelastung an den Kanten.
- Die obere Scheibe (Streckenlast auf dem Lochrand) zeigt eine andere Spannungsbelastung als die untere Scheibe (Fixierung des Lochrandes) trotz gleicher Kraftbelastung. Dies zeigt erneut den starken Einfluss von möglichst realitätsnahen Randbedingungen.



# Software: FEM - Tutorial - 3D-Mechanik - CAD-Belastungsanalyse Postprocessing

Aus OptiYummy

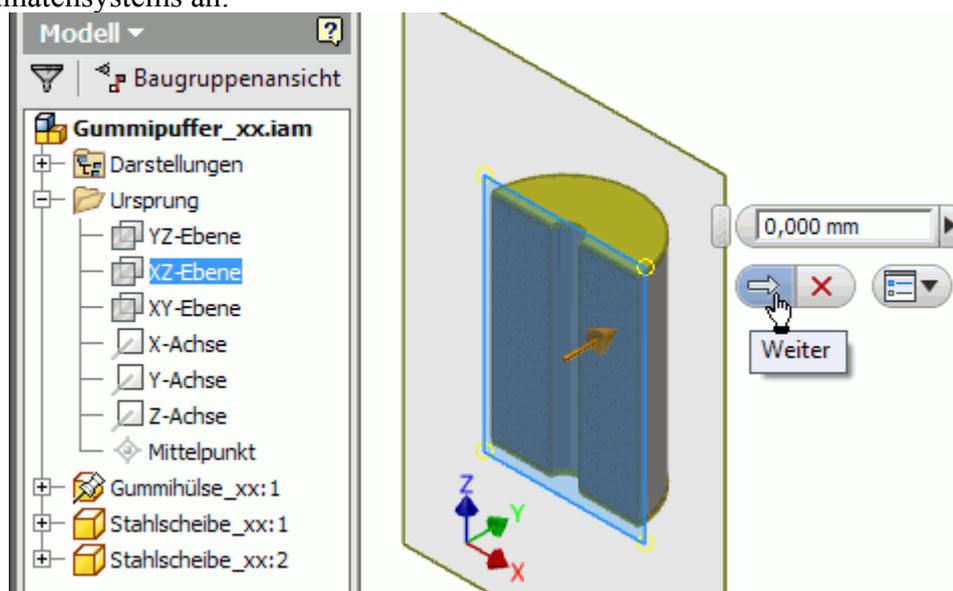
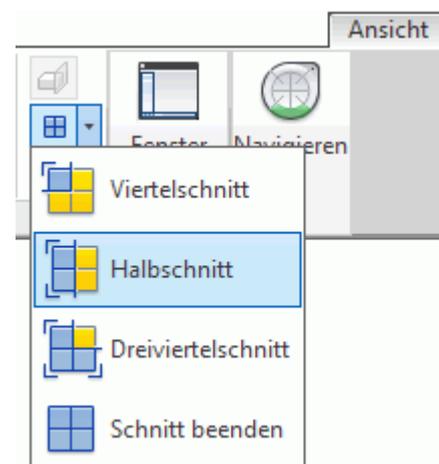
↑

← →

## Postprocessing

Insbesondere im *Postprocessing* wird deutlich, dass die Möglichkeiten der Ergebnis-Darstellung in einem CAD-System im Vergleich zu einem FEM-System eingeschränkt sind:

- Zumindest bis zur Version *Autodesk Inventor 2013* wird die Ergebnisdarstellung nur auf Oberflächen sichtbarer Bauteile generiert.
- Mit einer Schnittdarstellung kann man zumindest den Blick auf verdeckte Oberflächen ermöglichen (im Beispiel auf die Mantelfläche der Bohrung).
- Zur Erzeugung einer Schnittansicht muss man die Belastungsanalyse beenden. Innerhalb der Baugruppenansicht kann man unter **MFL > Ansicht** eine geeignete Schnittansicht erzeugen.
- Im Beispiel bietet sich ein Halbschnitt entlang der XZ-Ebene des Ursprungskoordinatensystems an:



- **Achtung:** Die Definition der Schnittdarstellung muss man unbedingt mit **Kontextmenü > OK** abschließen:

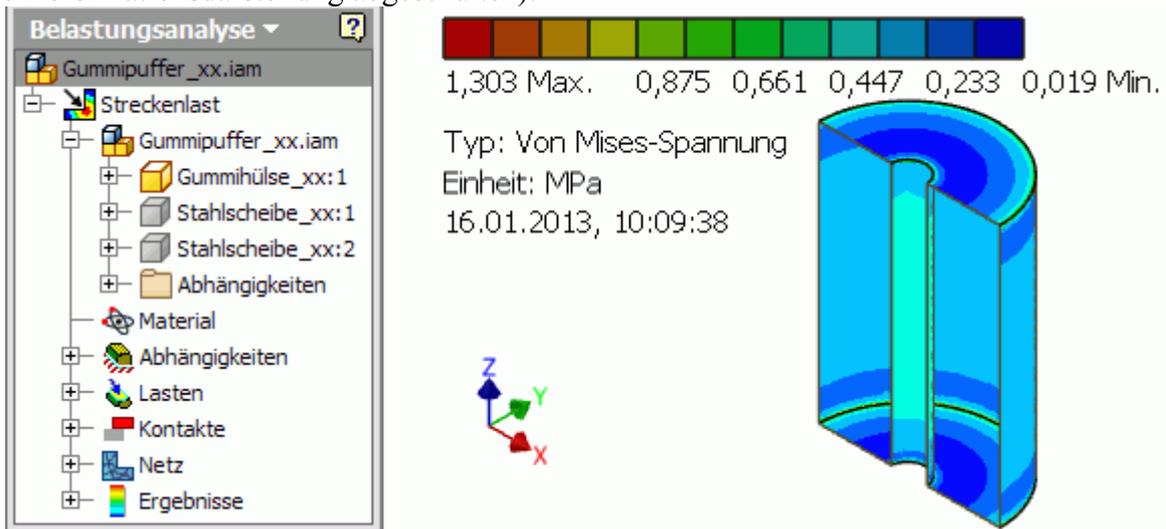


Nach Rückkehr in die Umgebung der Belastungsanalyse besteht jedoch leider keine Möglichkeit, auf diesen Schnitten die Farbverläufe zu erzeugen:

- Standardmäßig ist in der Belastungsanalyse-Umgebung nach dem Erstellen eines Netze die Drahtkörperansicht als visueller Stil aktiviert. Ergebnisse werden auf den sichtbaren äußeren Hüllflächen

des Drahtgitters der Baugruppe als Farbverläufe dargestellt.

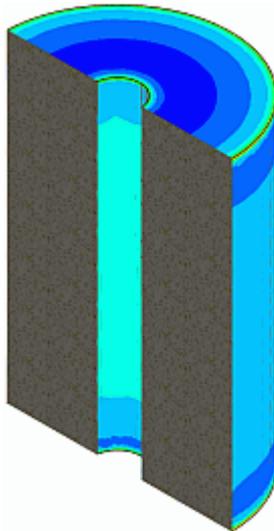
Um die Ergebnisse auf der kompletten Oberfläche eines Bauteils darzustellen, muss man störende Bauteile als unsichtbar markieren (unsichtbare Stahlscheiben für die Gummihülse im folgenden Bild, zusätzlich wurde die Deformationsdarstellung abgeschaltet):



Infolge des Halbschnitts erhält man einen Blick auf die Innenseiten der Hüllfläche. Das Körpervolumen ist hohl.

Da die extremen Belastungen häufig an äußeren und damit sichtbaren Konturen eines Bauteils auftreten, kann man mit diesen Einschränkungen der Ergebniss-Darstellung leben.

Wählt man als visuellen Stil **Schattiert mit Kanten**, so erkennt man deutlich, dass auf der Schnittfläche wirklich keine Ergebnisse dargestellt werden:



Diesen Mangel des Postprozesses werden wir zumindest für den Fall symmetrischer Teile bei symmetrischer Belastung im Folgenden umgehen.

Ziel ist die Darstellung der Ergebnisgrößen auf der Schnittfläche, um Informationen zur Belastung im Innern der Bauteile zu erhalten.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:\\_FEM\\_-\\_Tutorial\\_-\\_3D-Mechanik\\_-\\_CAD-Belastungsanalyse\\_Postprocessing](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_3D-Mechanik_-_CAD-Belastungsanalyse_Postprocessing)“

# Software: FEM - Tutorial - 3D-Mechanik - CAD-Belastungsanalyse Symmetrieschnitt

Aus OptiYummy

↑

← →

## Symmetrieschnitt durch Baugruppe

Die Simulation mit dem Finite-Elemente-Netz der kompletten Puffer-Baugruppe stößt bereits an Grenzen der Berechenbarkeit auf normaler PC-Technik. Man kann Symmetrieeigenschaften ausnutzen, um nur einen Teil des gesamten Netzes zu verwenden. Über die Symmetriebeziehungen können die berechneten Ergebnisse auf die restlichen Teile des Netzes projiziert werden (Spiegelungen, Drehungen). Vorhandene Symmetrien werden bestimmt durch:

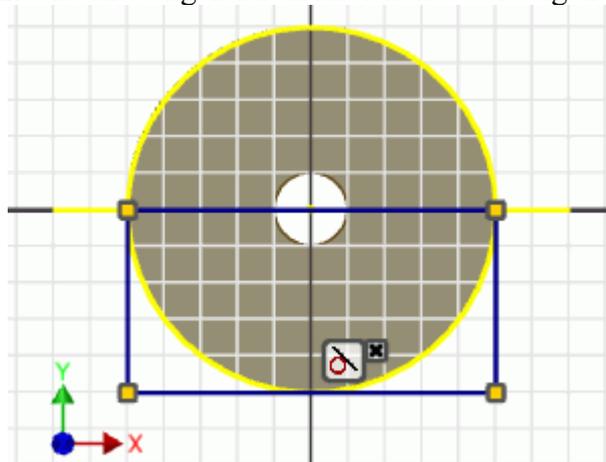
1. Geometrie des Untersuchungsobjekts (einschließlich Verteilung der Materialien)
2. Art der Zwangsbedingungen ("Einspannung")
3. Form der Last (Kraft-Angriffstellen und -Richtung)
4. Isotropie des Materials

In unserem Fall sprechen alle 4 Kriterien für die Möglichkeit, nur einen Teil des Gummipuffers zu modellieren (Zylinder, keine asymmetrische Einspannung, Material isotrop), solange die Lastkraft den Puffer nicht asymmetrisch verformt:

- . Eigentlich würde ein "unendlich schmales Tortenstück" des quer halbierten Puffers ausreichen.
- . Um den Prozess einfach und anschaulich zu gestalten, beschränken wir uns hier auf eine komplette Hälfte des Gummipuffers. Damit erhalten wir auch die gewünschte komplette Ergebnisdarstellung auf der Schnittfläche (XZ-Ebene des Ursprungs koordinatensystems).

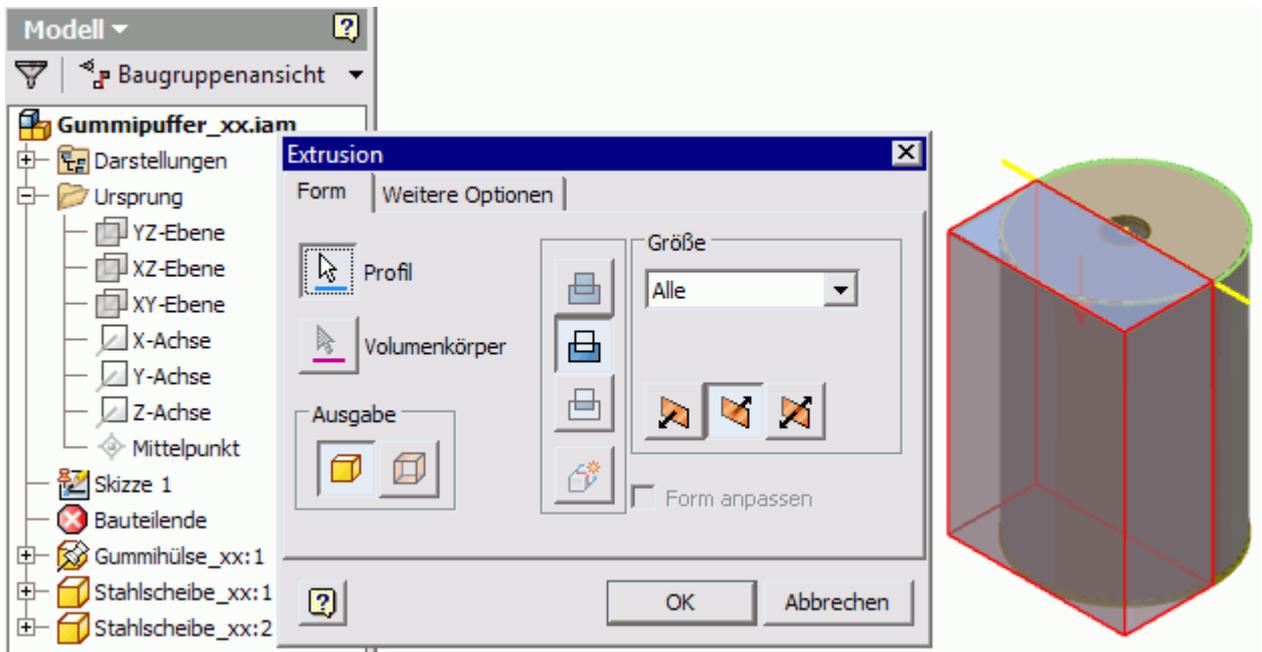
Dafür beenden wir vorläufig die Belastungsanalyse. Die erforderlichen Konstruktionsschritte für das definierte Entfernen einer Baugruppenhälfte werden ausführlich erläutert:

- . Die aktivierte Schnittdarstellung schalten wir aus (*MFL > Ansicht > Darstellung > Schnitt beenden*).
- . Die beiden Stahlscheiben machen wir wieder sichtbar.
- . Aktivieren der *MFL > 3D-Modellierung*-Registerkarte zum Modellieren eines Quaders als "Schnittwerkzeug".
- . **2D-Skizze** auf die Deckfläche der oberen Stahlscheibe
- . **Geometrie projizieren** äußerer Kreisring der Stahlscheibe und X-Achse des Ursprungs koordinatensystem
- . **Rechteck (drei Punkte)** koinzident und tangential an Kreishälfte befestigen:



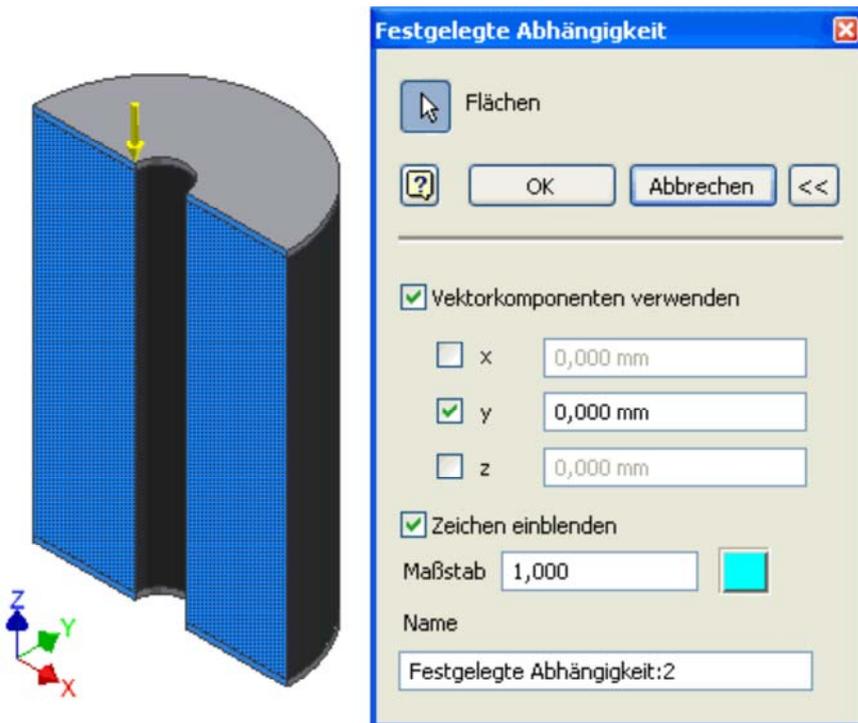
Damit ist das rechteckige Schnittprofil unabhängig vom Pufferdurchmesser immer hinreichend groß:

- . Mittels **Extrusion** (Differenz) des Rechteck-Profiles können wir nun eine Hälfte der Baugruppe entfernen:

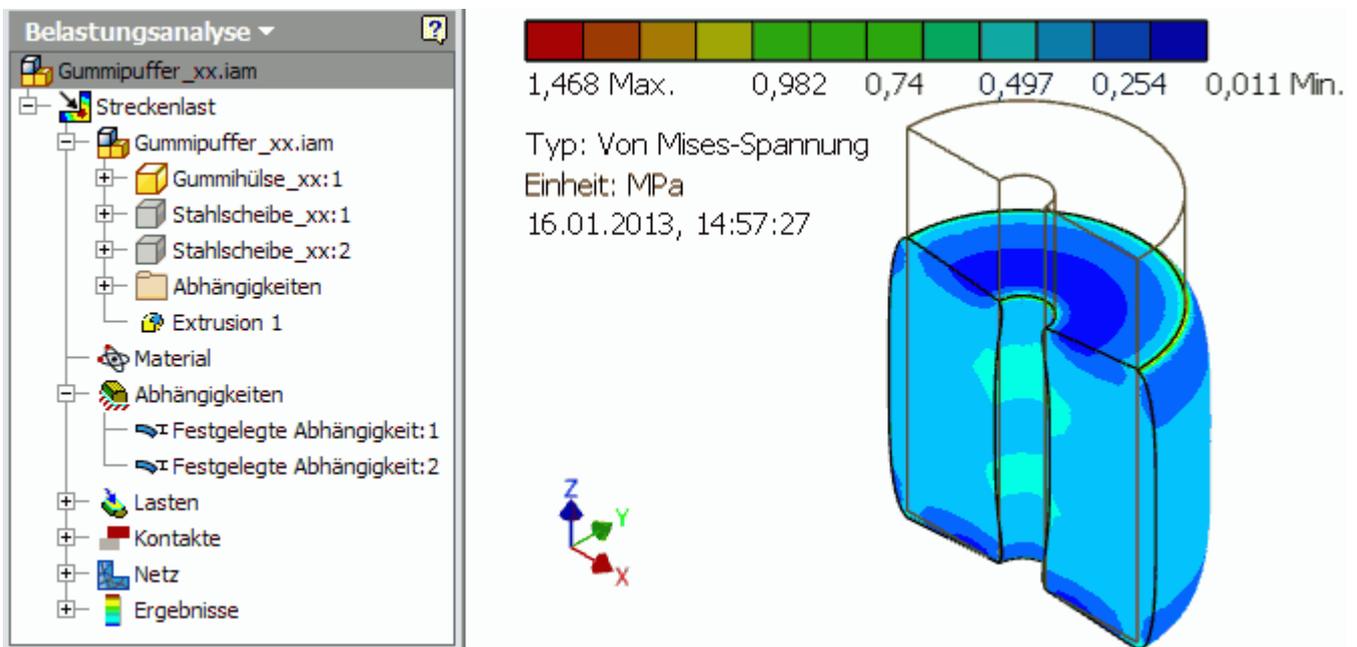


Nach Wechsel in die Belastungsanalyse müssen wir die Simulation entsprechend der Symmetrieeigenschaften umkonfigurieren:

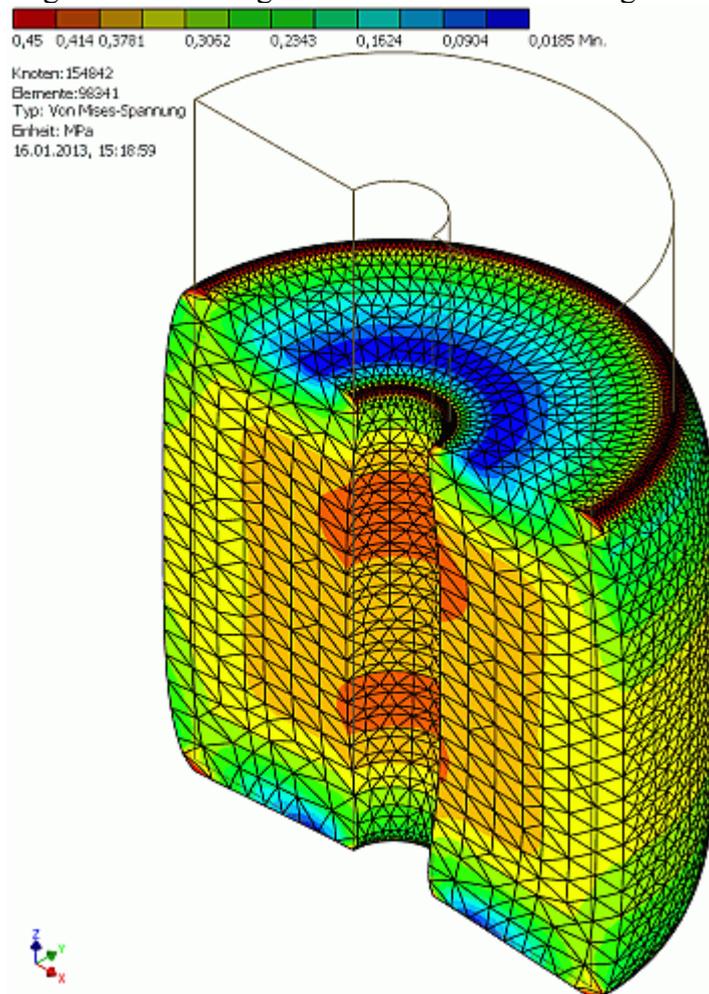
- Die Kraft der Streckenlast darf nur noch 50 N betragen.
- Die (automatischen) Kontakte muss man aktualisieren.
- Für die Schnittflächen muss mittels zusätzlicher festgelegter Abhängigkeit die Bewegung in Y-Richtung verhindert werden:



Mit dem reduzierten Netz gelingen unter Beachtung der Symmetriebedingungen nun vergleichbare Ergebnisse wie mit dem kompletten Modell (Deformationsdarstellung angepasst x5):



Das reduzierte Netz ermöglicht eine Verfeinerung insbesondere der globalen Elementgröße. Nach einer Anpassung des Maximalwertes der Farbskala auf einen sinnvollen Wert unterhalb des berechneten Extremwertes ergibt sich z.B. folgender Verlauf der Belastung:



### Fragen (Streckenlast)

1. Wie groß ist der Maximalwert der Mises-Spannung im Gummimaterial.
2. Wie stark wird der Gummipuffer maximal zusammengedrückt (in Z-Richtung).



Von „[http://www.optiyoumy.de/index.php?title=Software:\\_FEM\\_-\\_Tutorial\\_-\\_3D-Mechanik\\_-\\_CAD-Belastungsanalyse\\_Symmetrieschnitt](http://www.optiyoumy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_3D-Mechanik_-_CAD-Belastungsanalyse_Symmetrieschnitt)“

# Software: FEM - Tutorial - 3D-Mechanik - CAD-Belastungsanalyse Lastfaelle

Aus OptiYummy



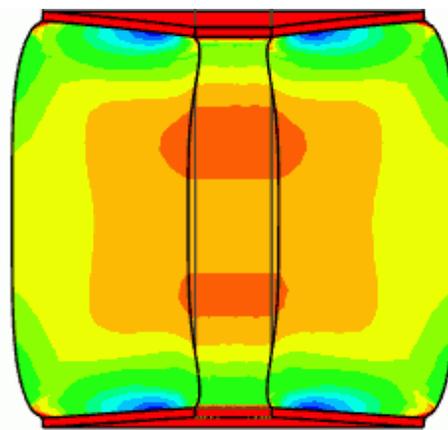
Unterschiedliche Lastfälle (Flächenlast, Eigengewicht, Rotation)

## Inhaltsverzeichnis

- . 1 Streckenlast
- . 2 Flaechenlast
- . 3 Eigengewicht
- . 4 Rotation
- . 5 Fragen (Deformation)

## Streckenlast

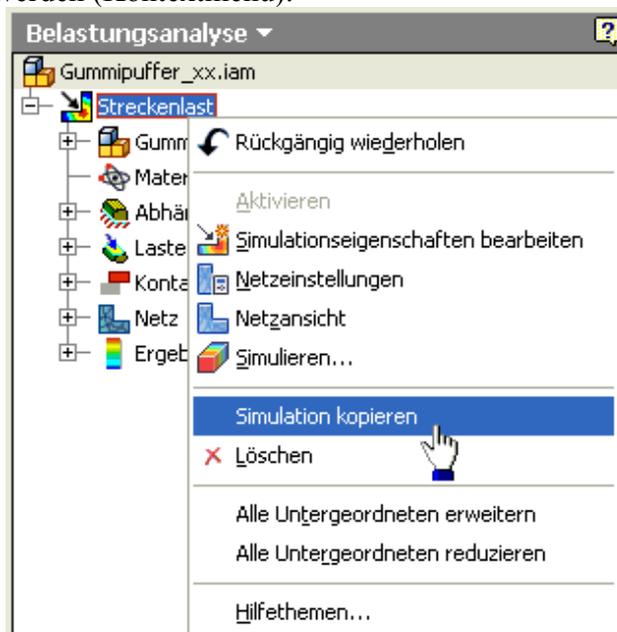
Das nebenstehende Bild zeigt die (übertriebene) Verformung des Gummipuffers bei einer Streckenbelastung an den Lochkanten der Stahlscheiben:



- . Die obere Stahlscheibe etwas wird stärker deformiert als die untere Stahlscheibe.
- . Ursache ist die Fixierung der unteren Lochkante, welche eine Änderung der Öffnungsgröße an dieser Stelle verhindert.
- . Diese idealisierte Randbedingung führt auch zu einer leicht unsymmetrischen Belastung der Gummihülse.

In FEM-Systemen kann man auf Basis eines Finite-Element-Modells mehrere Lastfälle definieren. Das spart sowohl Modellierungsaufwand als Rechenzeit bei der Simulation. Auch in der Belastungsanalyse des *Autodesk Inventor* besteht die Möglichkeit, mehrere Lastfälle zu berechnen. Allerdings muss jeder Lastfall in einer separaten Simulation definiert werden, d.h., es werden getrennte Finite-Elemente-Modelle dafür benutzt:

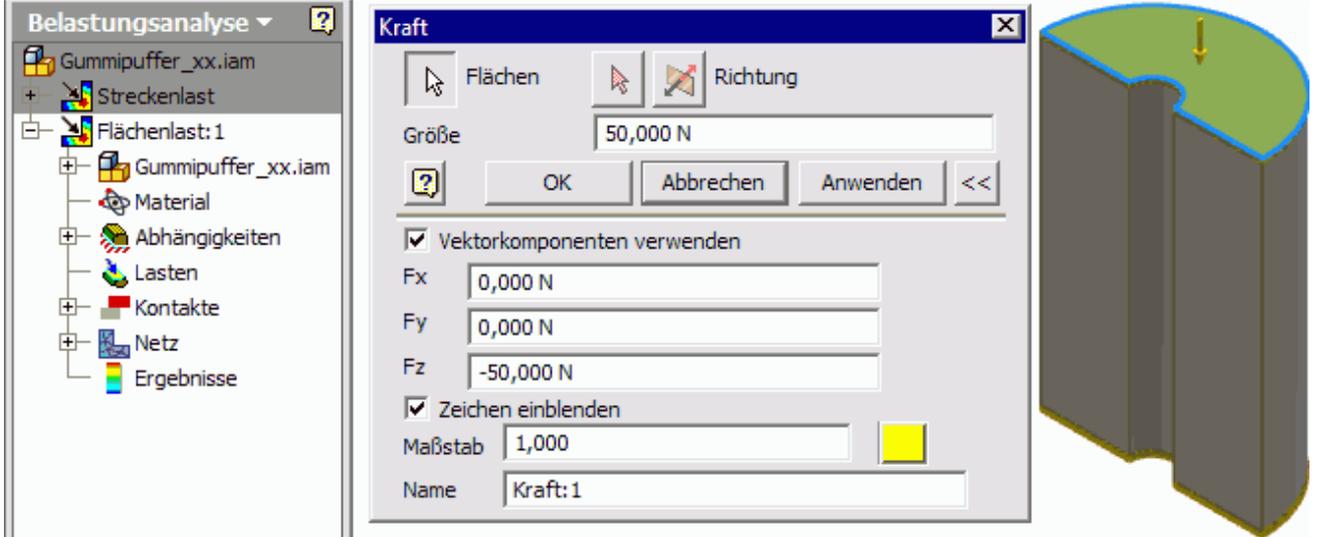
- . Es ist nicht erforderlich, für jeden Lastfall eine neue Simulation zu erstellen. Vorhandene Simulationen (z.B. Streckenlast) können kopiert werden (Kontextmenü):



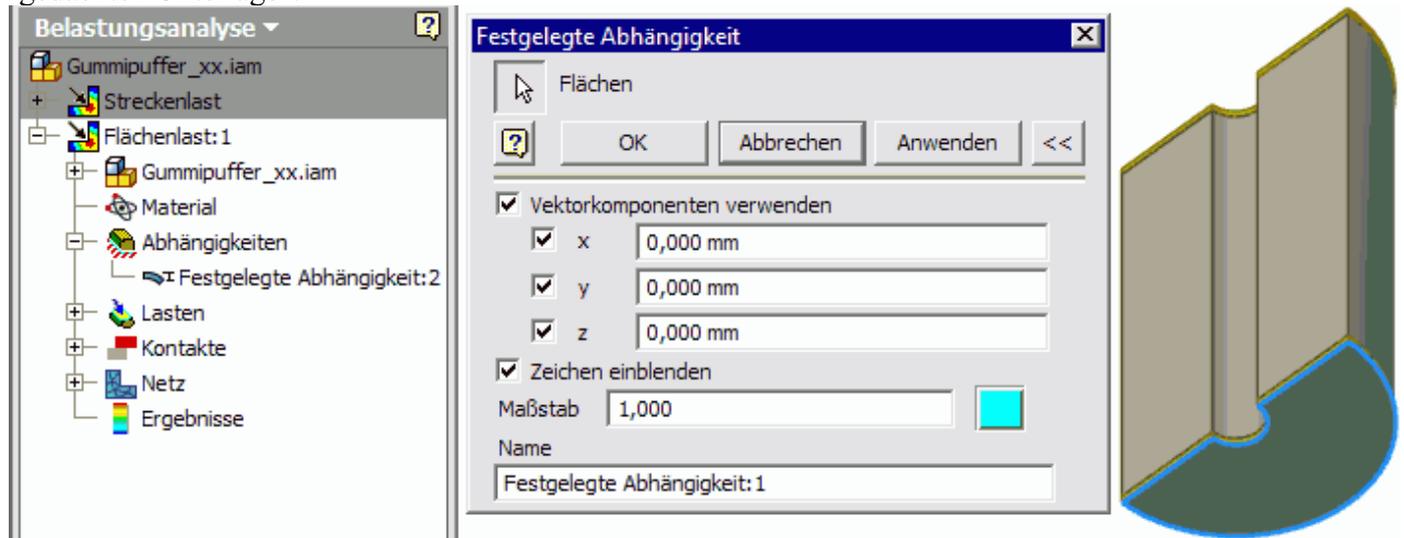
Das hat den Vorteil, dass man nach Vergabe eines neuen Bezeichners für die Simulation (z.B. Flächenlast), nur die Lasten bzw. einzelne Abhängigkeiten neu definieren muss.

### Flaechenlast

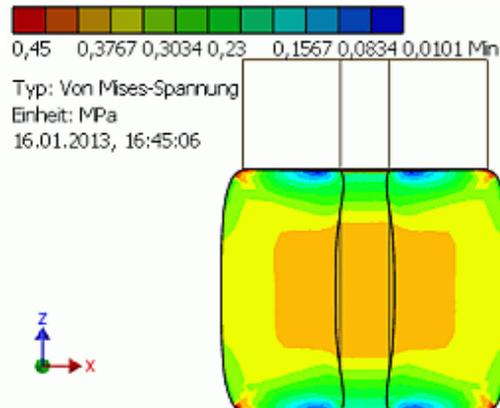
Nach dem Löschen der ursprünglichen Kraftbelastung weist man die neue Kraftbelastung der Scheibenfläche zu:



Die bisherige Festlegung der unteren Lochkante sollte eine Streckenlast für die Reaktionskraft nachbilden. Diese Festlegung löschen wir, um eine Flächenlast für die Reaktionskraft nachzubilden. Da die gesamte untere Scheibenfläche gleichmäßig belastet werden soll, fixieren wir sie vollständig auf der "gedachten Unterlage":



Die Belastung des Gummimaterials ist bei Flächenbelastung der Stahlscheiben erwartungsgemäß etwas geringer als bei der Streckenlast auf dem Lochrand:

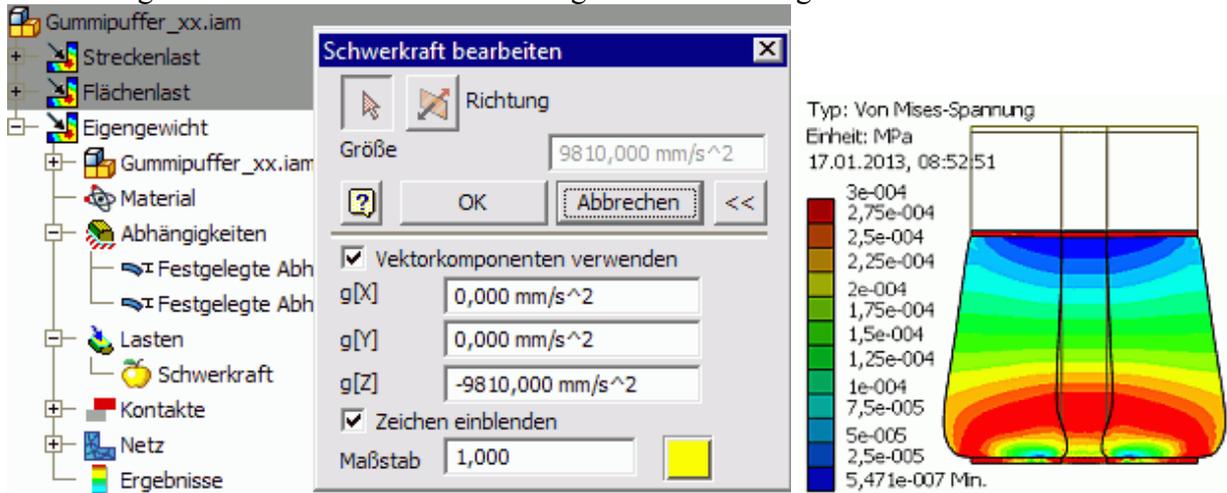


Die Stahlscheiben verbiegen sich praktisch nicht. Damit ist die Fixierung der unteren Scheibenfläche keine schlechte Näherung.

### Eigengewicht

Ausgehend von einer Kopie der Flächenlast-Simulation konfigurieren wir eine Eigengewicht-Simulation:

- . Die Abhängigkeiten lassen wir unverändert (Gummipuffer steht auf Unterlage).
- . Die Lastkraft auf die obere Fläche löschen wir.
- . Stattdessen konfigurieren wir die Schwerkraft in negativer Z-Richtung als Last:

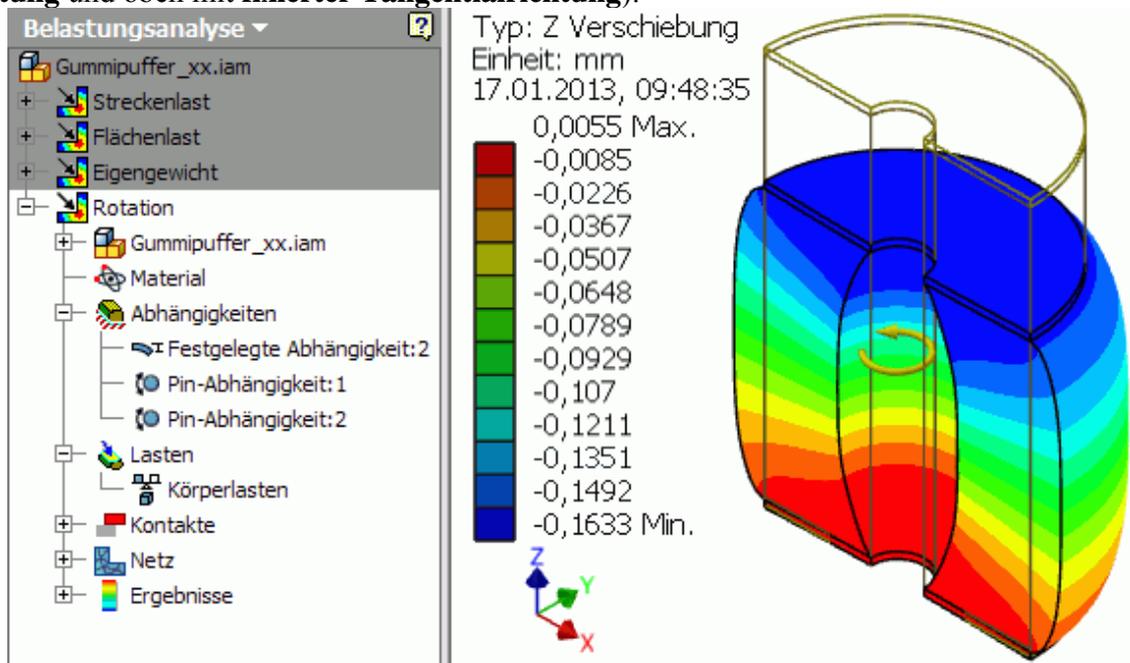


- . Man erkennt deutlich, dass die Verformung des Puffers im unteren Teil erwartungsgemäß wesentlich größer ist als im oberen Teil.

### Rotation

Nun wird es fast zur Routine, eine Rotation-Simulation für eine Drehzahl von 10000 Umdrehungen/min zu konfigurieren:

- . Die Drehzahl definieren wir als Körperlast (Winkelgeschwindigkeit um die Z-Achse von **10000 rpm**).
- . Auch hier ist die Definition geeigneter Abhängigkeiten ein Problem. Als günstig haben sich in den Scheibenlöchern **Pin-Abhängigkeiten** erwiesen (zusätzlich zur **fixierten Radialrichtung** unten mit **fixierter Axialrichtung** und oben mit **fixierter Tangentialrichtung**):



### Fragen (Deformation)

Wie groß ist die maximale Verformung des Gummipuffers in Z-Richtung für die Lastfälle *Flächenlast=100 N*, *Eigengewicht* und *Rotation=10000 rpm*.



Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:\\_FEM\\_-\\_Tutorial\\_-\\_3D-Mechanik\\_-\\_CAD-Belastungsanalyse\\_Lastfaelle](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_3D-Mechanik_-_CAD-Belastungsanalyse_Lastfaelle)“