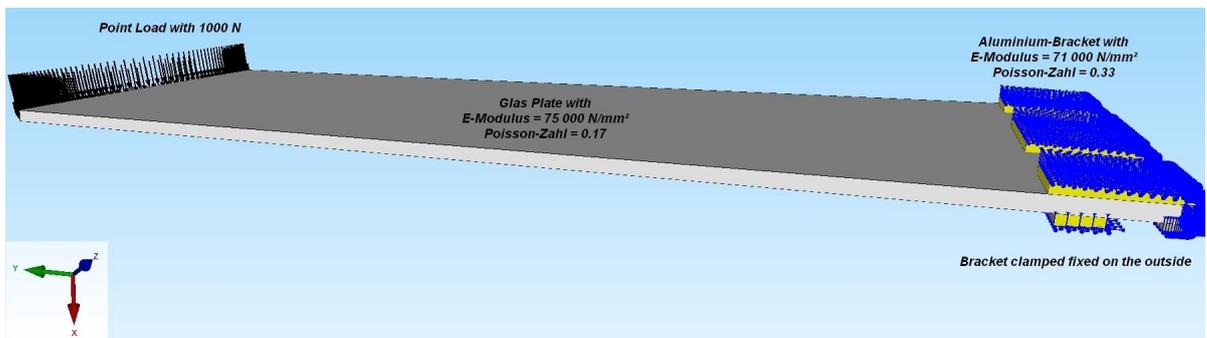


Kapitel 26: Kontakt-Analyse einer Glas-Balustrade und einer Verbundglasplatte

Teil 1: Kontakt-Analyse einer Glasplatte

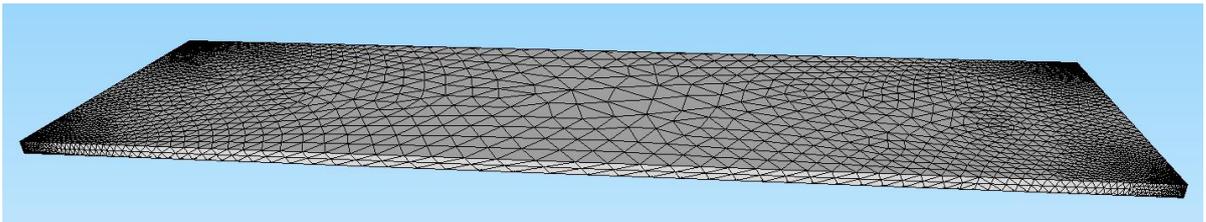
Die Glas-Balustrade-Baugruppe besteht aus einer Glasplatte, Aluminium-Halterung und einem U-Stahlprofil. Welche Verformungen und Spannungen entstehen wenn die linke Seite mit 1000 N belastet wird. Die Halterung ist in dem U-Profil fest eingespannt. Das U-Profil wird nicht berechnet da dort die Spannung sehr gering ist.

Baugruppe



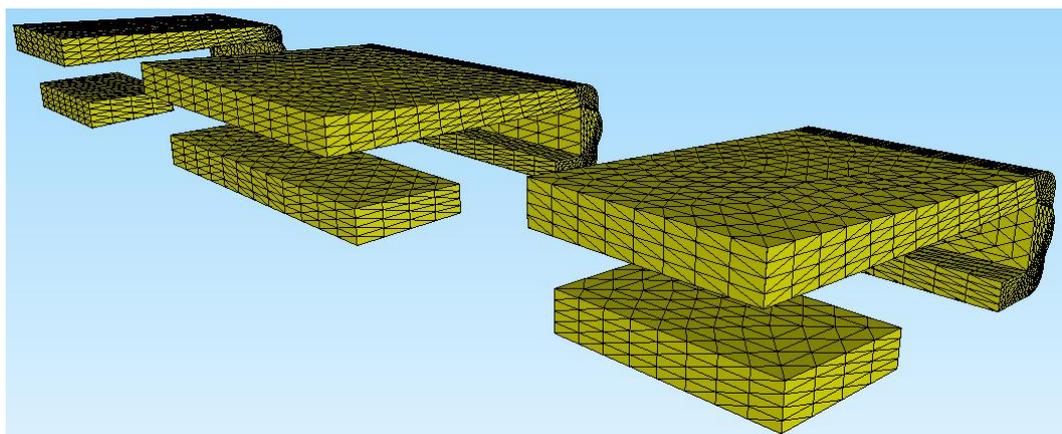
Glasplatte

Mit den Maßen 1333 mm x 400 mm x 15.33 mm besteht aus 45 864 Tetraedern und 10 804 Knoten die mit dem 3D-Netzgenerator NETGEN generiert wurden.



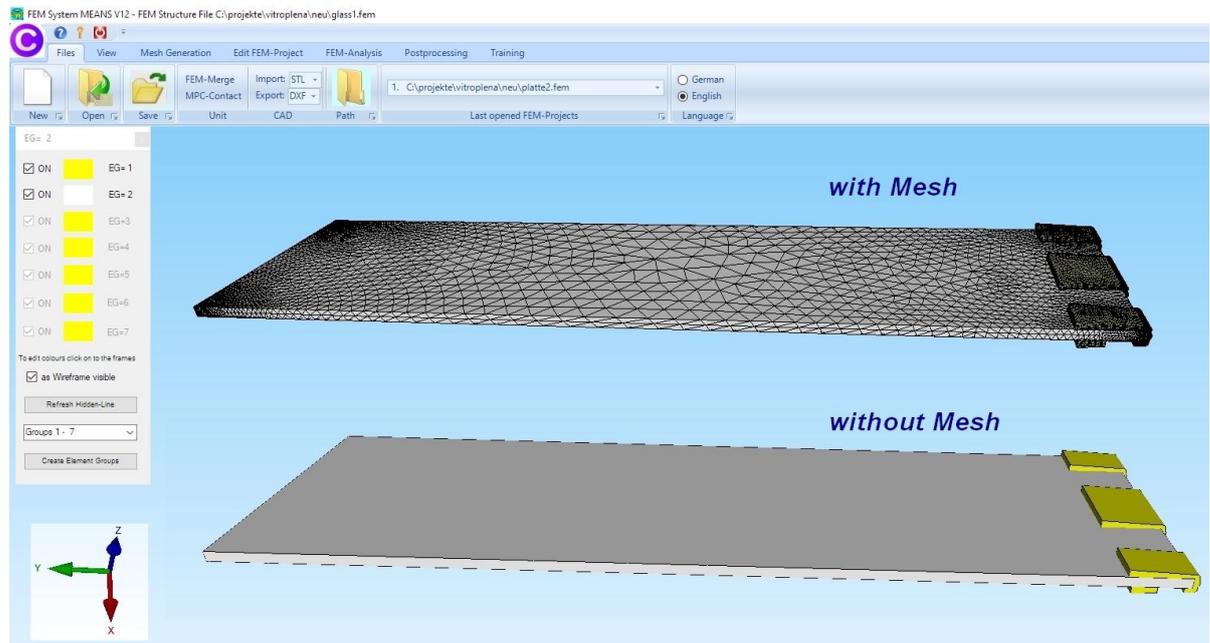
Aluminium-Halterung

besteht aus 44 928 Tetraedern und 10 354 Knoten die mit dem 3D-Netzgenerator NETGEN generiert wurden.



FEM-Zuladung

Wählen Sie das Register „Datei“ und Menü „FEM-Zuladung“ und vereinen die beiden Strukturen zu einem Haupt-Netz mit 90 792 Tetraedern, 21 158 Knoten und 2 Elementgruppen.

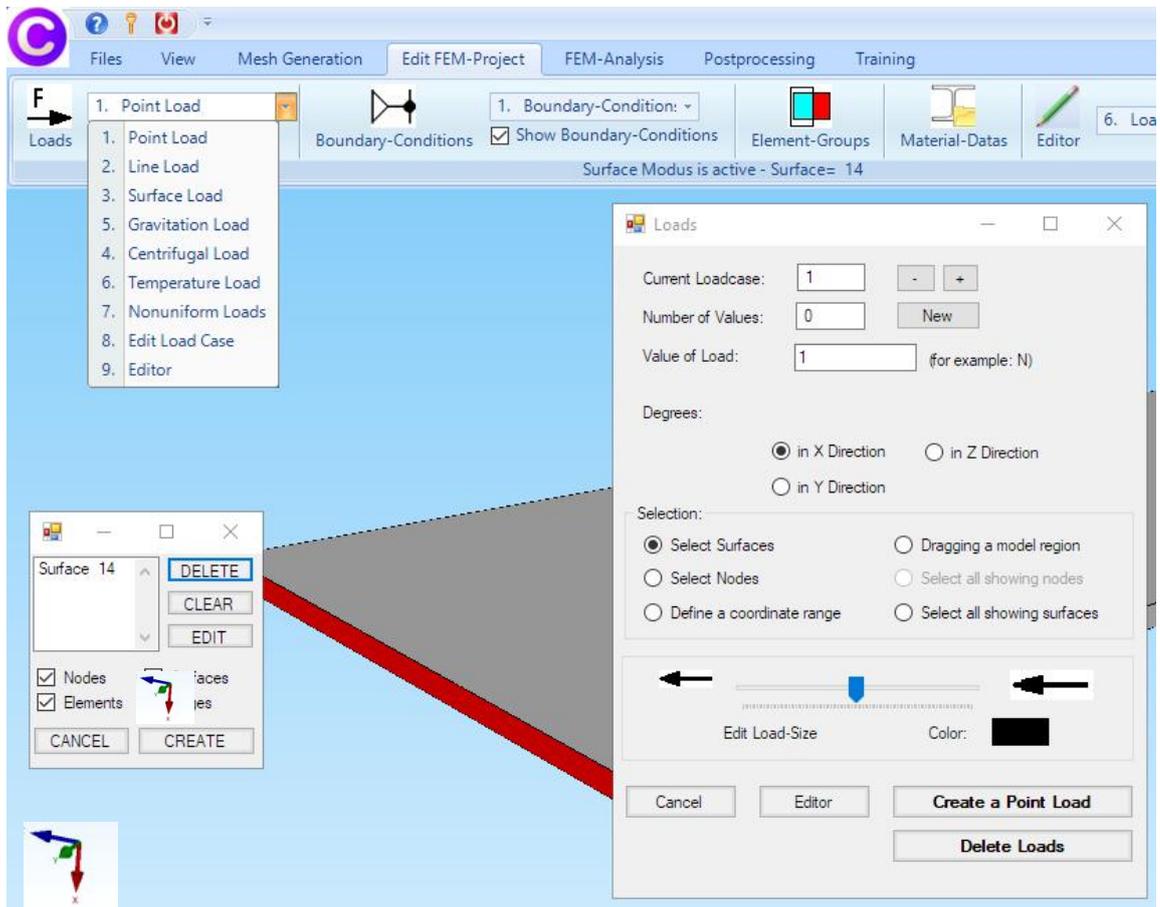


Erzeugung Lastfall 1

Die Glasplatte wird auf der linken Seite mit 1000 N belastet.

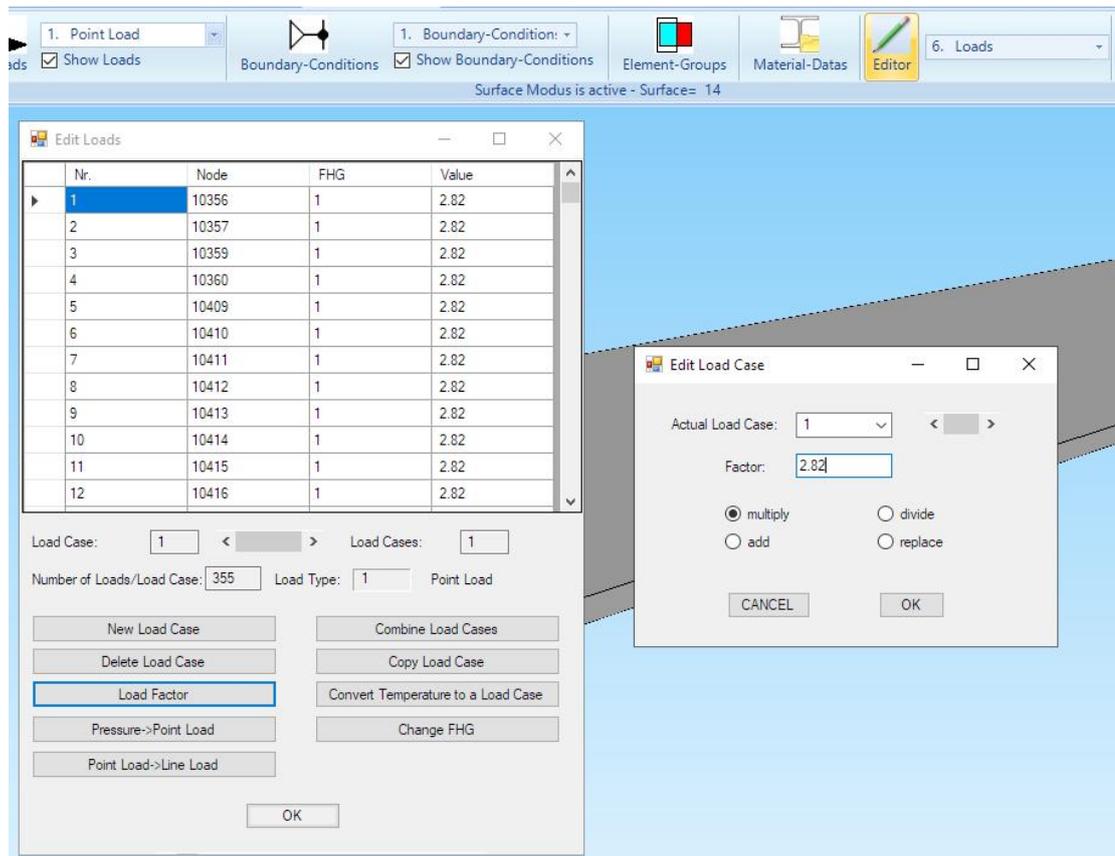
Zuerst muß das Flächenmodell mit Register „Ansicht“ und dem Icon  erzeugt werden.

Wählen Sie Register „FEM-Projekt“ und „Knotenbelastung“ und erzeugen eine Knotenbelastung in X-Richtung mit dem Lastwert = 1 N (Eingabe 1 weil Anzahl Knotenpunkte noch unbekannt ist) indem Sie die Fläche 14 auf der linken Seite anklicken.

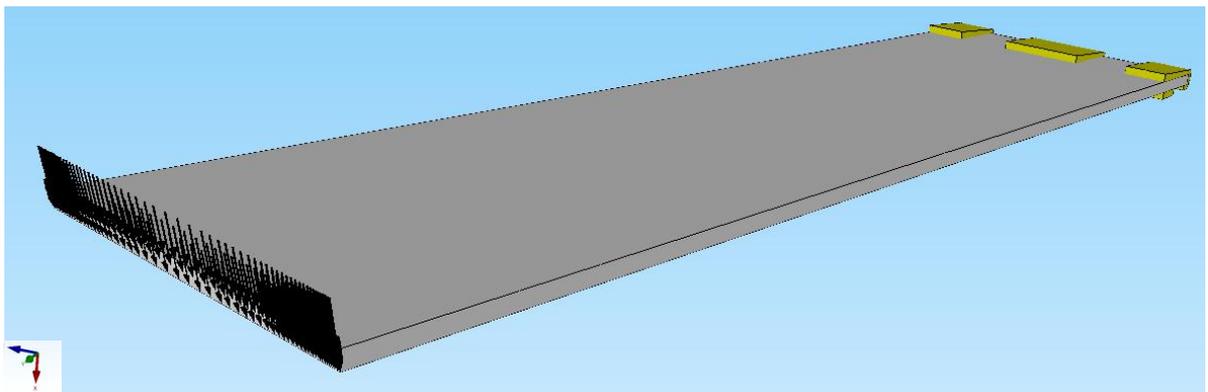


Lastfall-Faktor

Wählen Sie „Editor“ und multiplizieren Sie den Lastwert mit dem Last-Faktor 2.82 der sich aus $1000 \text{ N} / 355$ berechnen läßt.

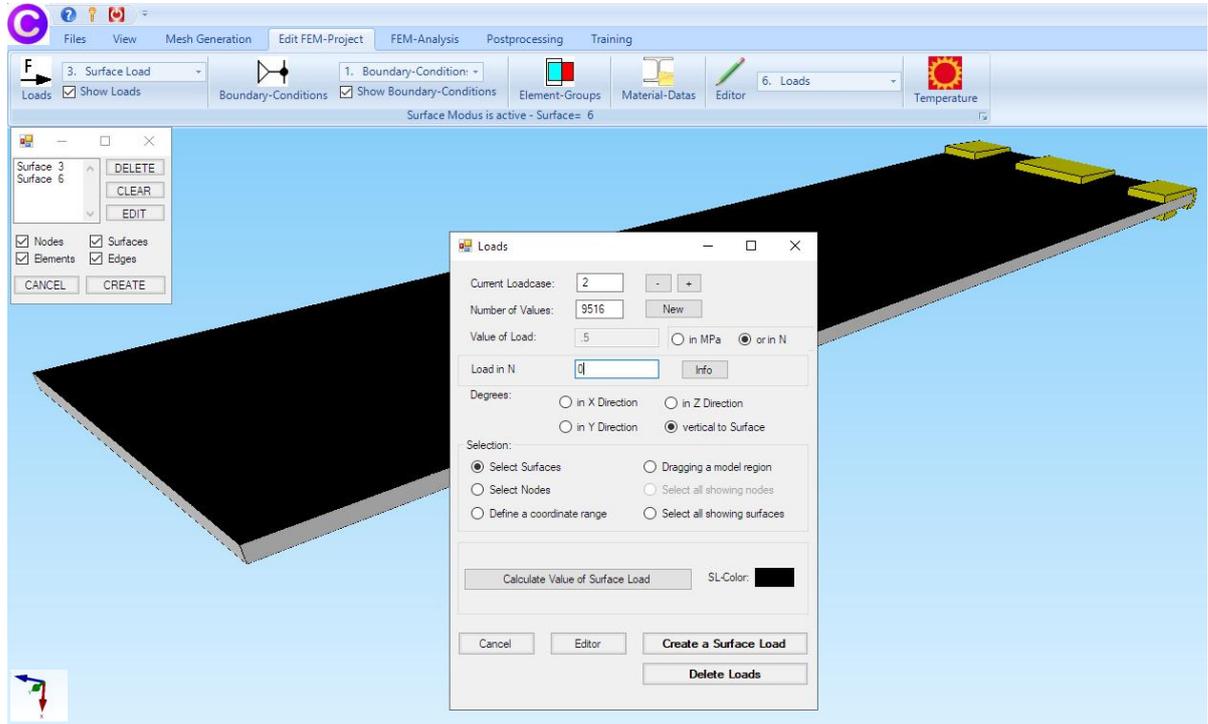


Knotenbelastung mit Lastfall 1 sollte zu sehen sein:

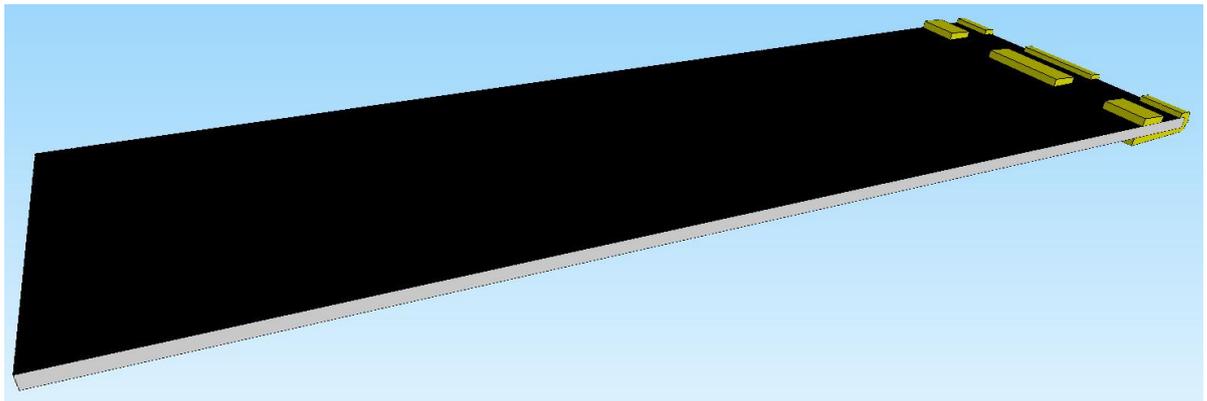


Erzeugung Lastfall 2 mit der MASTER-Kontaktfläche

Lastfall 2 ist die MASTER-Kontaktfläche zwischen Glasplatte und Halterung. Wählen Sie „FEM-Projekt“ und „Flächenlast“ um eine Flächenlast „senkrecht zur Fläche“ mit Surface 3 und 6 zu erzeugen. Der Lastwert kann einen beliebigen Wert haben da er hier nicht benötigt wird.



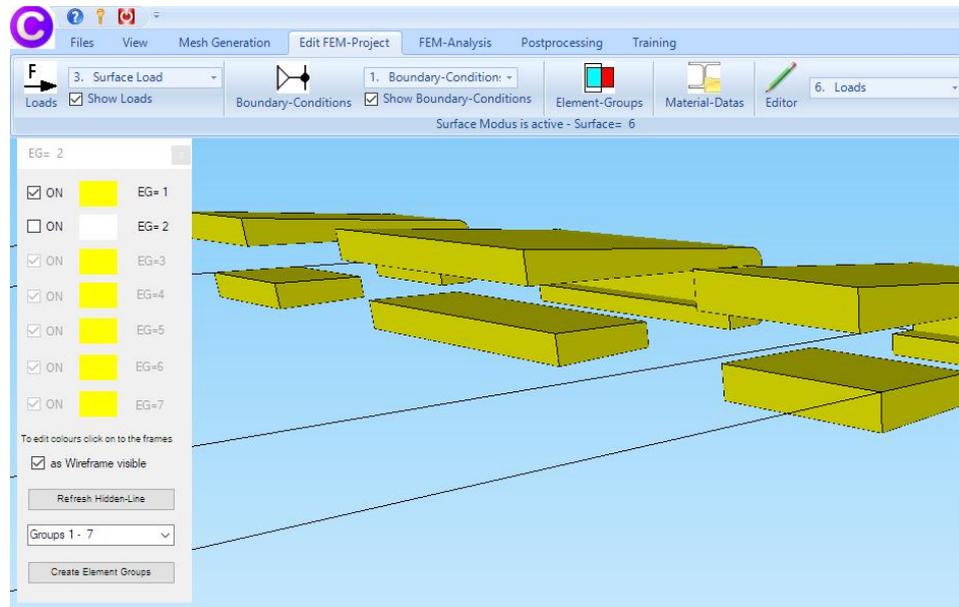
Obere Master-Kontaktfläche 3



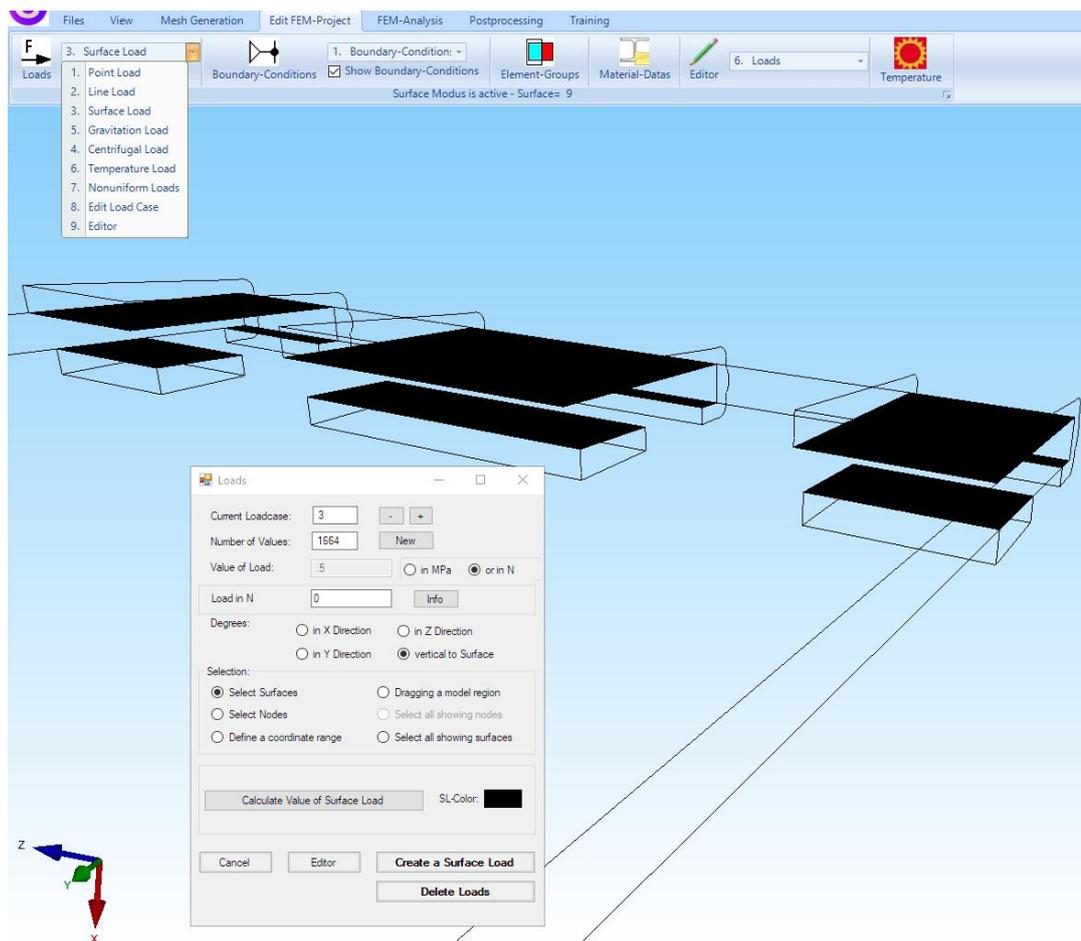
Untere Master-Kontaktfläche 6

Erzeugung Lastfall 3 mit der SLAVE-Kontaktfläche

Lastfall 3 ist die SLAVE-Kontaktfläche für die zweite Kontaktdefinition zwischen Glasplatte und Halterung. Zuvor blenden Sie noch die Elementgruppe 2 mit Menü „Element Gruppen“ aus sodaß nur noch die Halterung zu sehen ist.

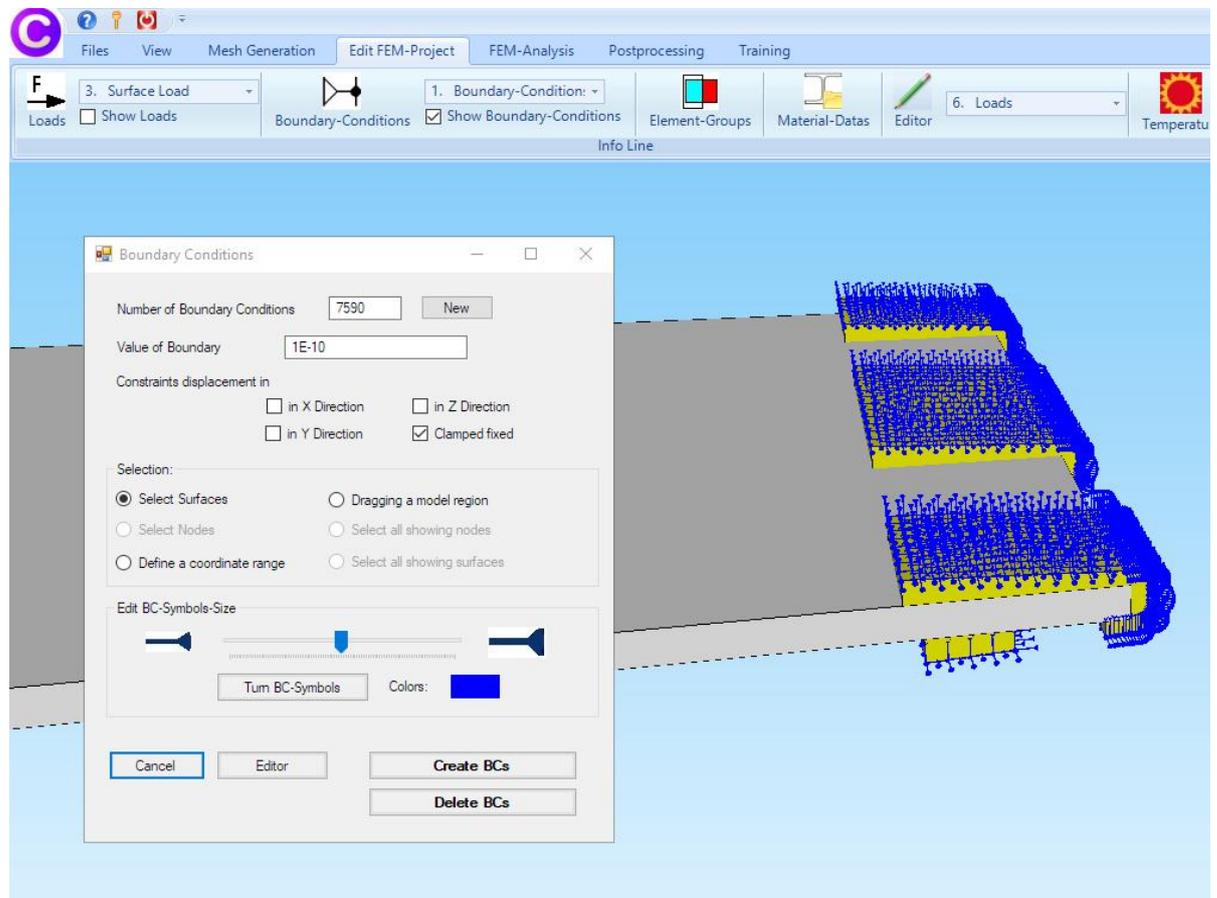


Wählen Sie „FEM-Projekt“ und „Flächenlast“ um eine Flächenlast „senkrecht zur Fläche“ mit den 9 Halterung-Surfaces zu erzeugen (siehe schwarze Flächen).



Halterung einspannen

Die Halterung ist in dem U-Profil fest eingespannt. Wählen Sie Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und „Randbedingungen“ um die 6 Surfaces der Halterung fest einzuspannen.



Materialdaten

Wählen Sie Register „FEM-Projekt bearbeiten“, „Materialdaten“ und „Material-Datenbank“ um die Materialdaten für die Glasplatte mit einem E-Modul von 75 000 N/mm² und einer Poisson-Zahl von 0.17 und für die Alu-Halterung mit einem E-Modul von 71 000 N/mm² und einer Poisson-Zahl von 0.17 einzugeben.

The screenshot shows the 'Edit Material Datas' window. On the left, a table lists material properties for the selected material:

Name	Material Datas
Youngs modulus	75000
Poisson Ratio	.17
Density	2.200002E-06
Heat Coefficient	5.4E-06

The main area shows the 'Material Data Base' with the following properties for the selected 'Aluminium' material:

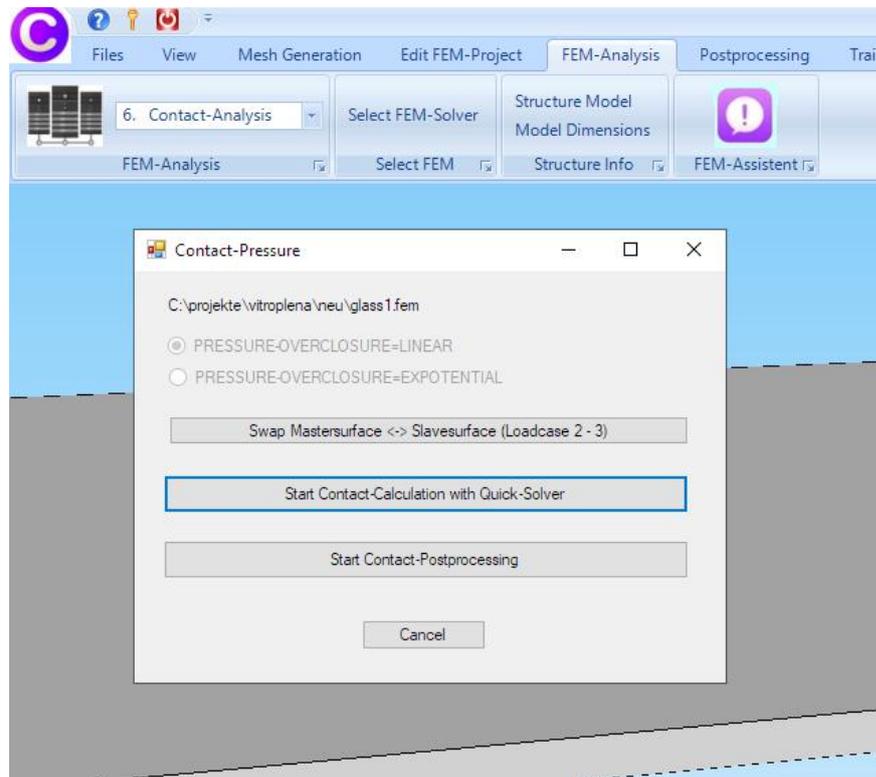
- Material: Aluminium
- E-Modulus (MPa): 71000
- Poisson Ratio: 0.34
- Density (kg/mm³): 2.70000262148073E-06
- Heat Coefficient: 0.000239
- Heat Conductivity (W/mmk): 0.230000010924414

Below these fields is a table of the 'Material Data Base':

Material	Young Modulus	Poisson-Value	Density	Heat Coefficient
Aluminium	71000	0.34	2.700003E-06	0.000239
Bronze	110000	0.44	8.700008E-06	0.00017
Cadmium	51000	0.3	0	0
Celluloid	2500	0.29	0	0
Ceramic	160000	0.3	2.100002E-06	0.00003
Cilicium	210000	0.28	6.300006E-06	0.000012
Clinker	27000	0.3	0	0.000058
Concrete	20000	0.1	2.600003E-06	0.000012
Constantan	163000	0.33	8.800009E-06	0
Glass - Window Glass	210000	0.28	2.500002E-06	0.000011
Glass Quarz	75000	0.17	2.200002E-06	0.0000054
Glass technical	50000	0.25	2.480002E-06	0
Gold	78000	0.42	1.929002E-05	0.000014
Graphite	79000	0.371	1.050001E-05	0.000019
Gray Cast	108000	0.22	7.200007E-06	0.0000104
Ice (-4 °C)	9600	0.33	9.170009E-07	0.000065
Iron	211000	0.28	6.600007E-06	0.000011
Kupfer	123000	0.35	8.933009E-06	0.000016
Lithium	4910	0.36	5.350005E-07	0.000058
Luranyl	2500	0.29	1.990001E-06	0
Magnesium	44000	0.28	1.740002E-06	0.000024
Marble	72000	0.3	2.600003E-06	0
Messing	103000	0.35	8.100008E-06	0.0000183
Mica	160000	0.17	2.600003E-06	0.000013
Nickel	205000	0.44	1.134001E-05	0.000028
Nickel Silver	110000	0.37	8.300008E-06	0
PBT CRASTIN T841 FR	3900	0.32	1.540001E-06	0
PBT Ultradur B 4406	3000	0.32	1.450001E-06	0
PBT Ultradur B 4406 GF-10	5500	0.32	1.500001E-06	0
Platin	170000	0.39	2.140002E-05	0.0000088
Polyamid 66	3100	0.32	1.140001E-06	0.0001
Polystyrol	3200	0.35	1.050001E-06	0
Porcellan	58000	0.23	2.300002E-06	0.000003
Rubber hard	5000	0.44	1.134001E-06	0.000017
Rubber soft	930	0.44	1.134001E-06	0.000017

Kontakt-Analyse

Wählen Sie Register „FEM-Analyse“ und Menü „Kontaktbedingungen“ um die Verformungen und Spannungen mit dem Quick-Solver zu berechnen.



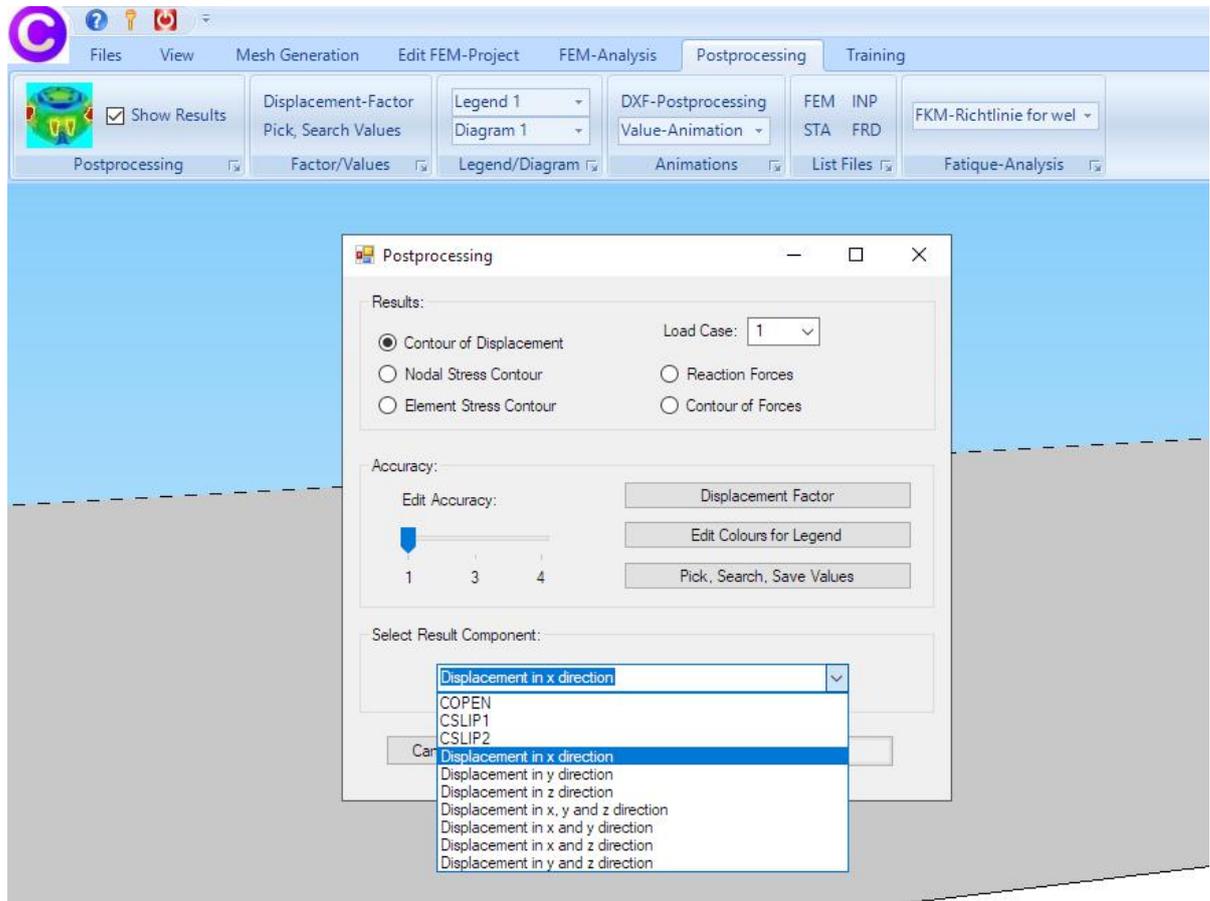
Die Kontakt-Analyse benötigt ca. 15 Iterationen für die Berechnung. Die Rechenzeit für das lineare TET4-Element beträgt ca. 2 Minuten und die Rechenzeit für das quadratische und genauere TET10-Element benötigt ca. 10 Minuten.



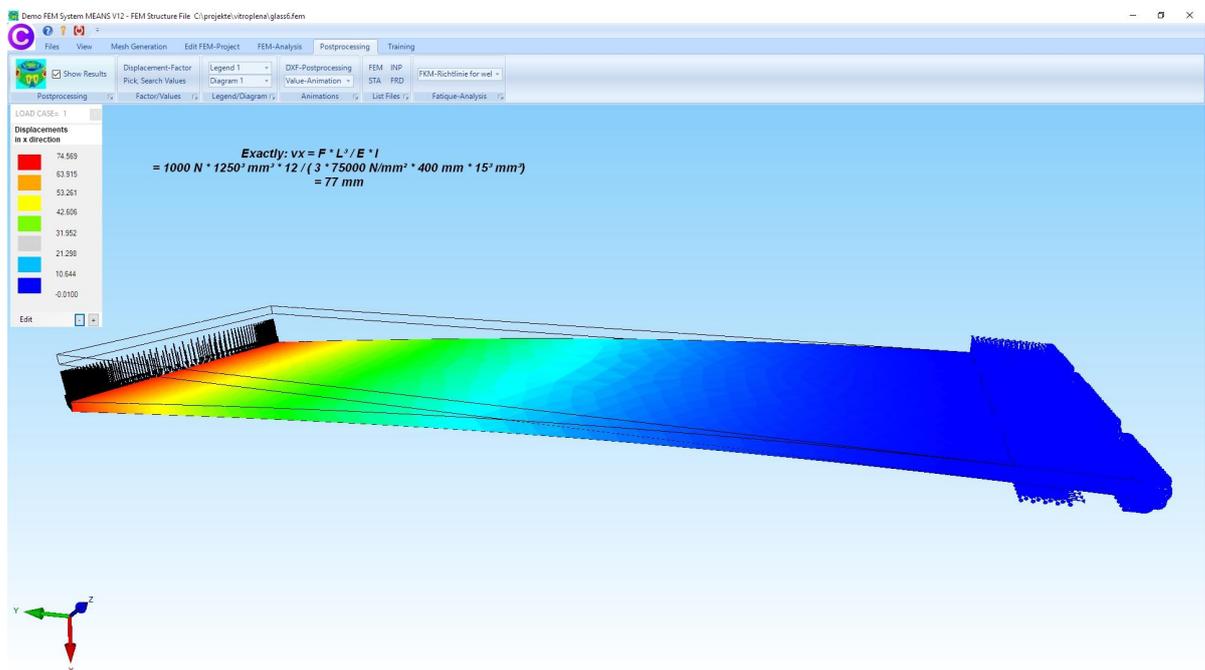
Postprocessing



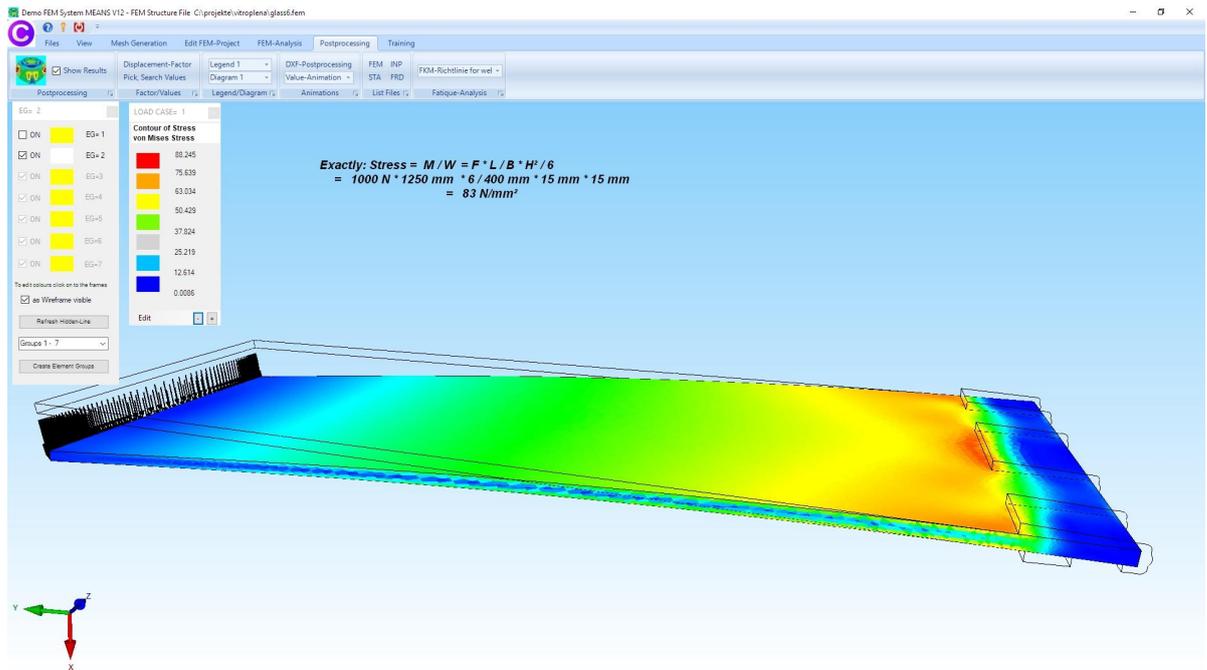
Wählen Sie Register „Ergebnisauswertung“ und das Icon um die Ergebnis-größen wie Verformungen und Spannungen auszuwerten.



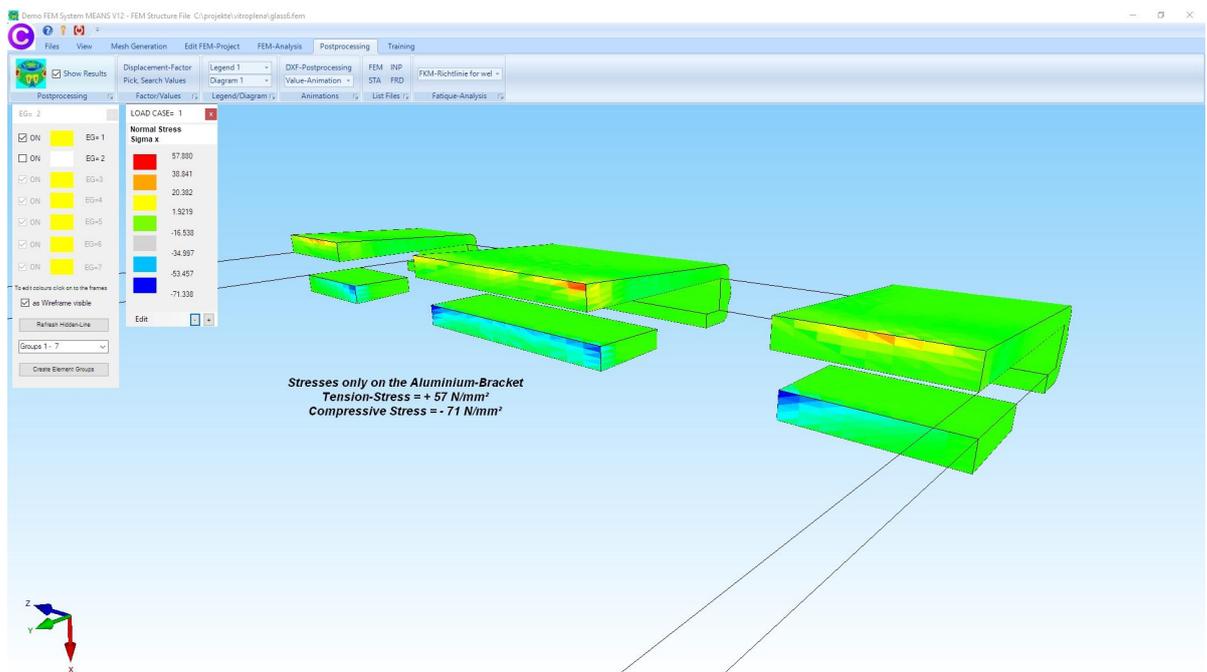
Max. X-Verformung = 74 mm (exakt = 72 mm mit fester Einspannung)



Max. v.Mises-Spannung der Glassplatte = 88 N/mm² (exakt = 79,8 N/mm²)



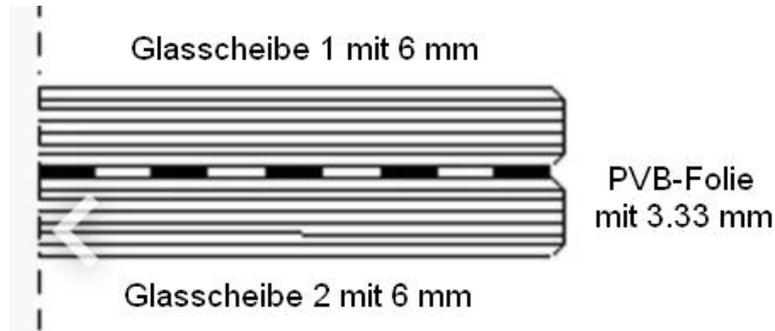
Max. Zugspannung der Aluminium-Halterung = + 57 N/mm²
Min. Druckspannung der Aluminium-Halterung = -71 N/mm²



Teil 2: Lineare Statik-Analyse einer Verbundglasplatte

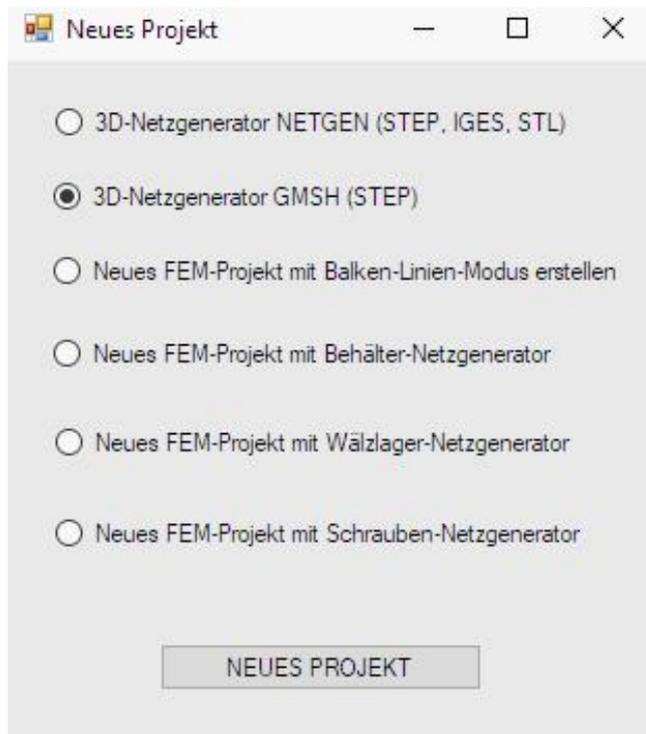
Die vorige Glasplatte 1333 mm x 400 mm x 15.33 mm wird jetzt als Verbundglas mit einem 3-schichtigen Aufbau und folgenden Materialdaten berechnet:

Glasscheibe 1:	Dicke = 6 mm	E-Modul = 75 000 N/mm ²	P = 0.17
PVB-Folie:	Dicke = 3.33 mm	E-Modul = 3 N/mm ²	P = 0.498
Glasscheibe 2:	Dicke = 6 mm;	E-Modul = 75 000 N/mm ²	P = 0.17



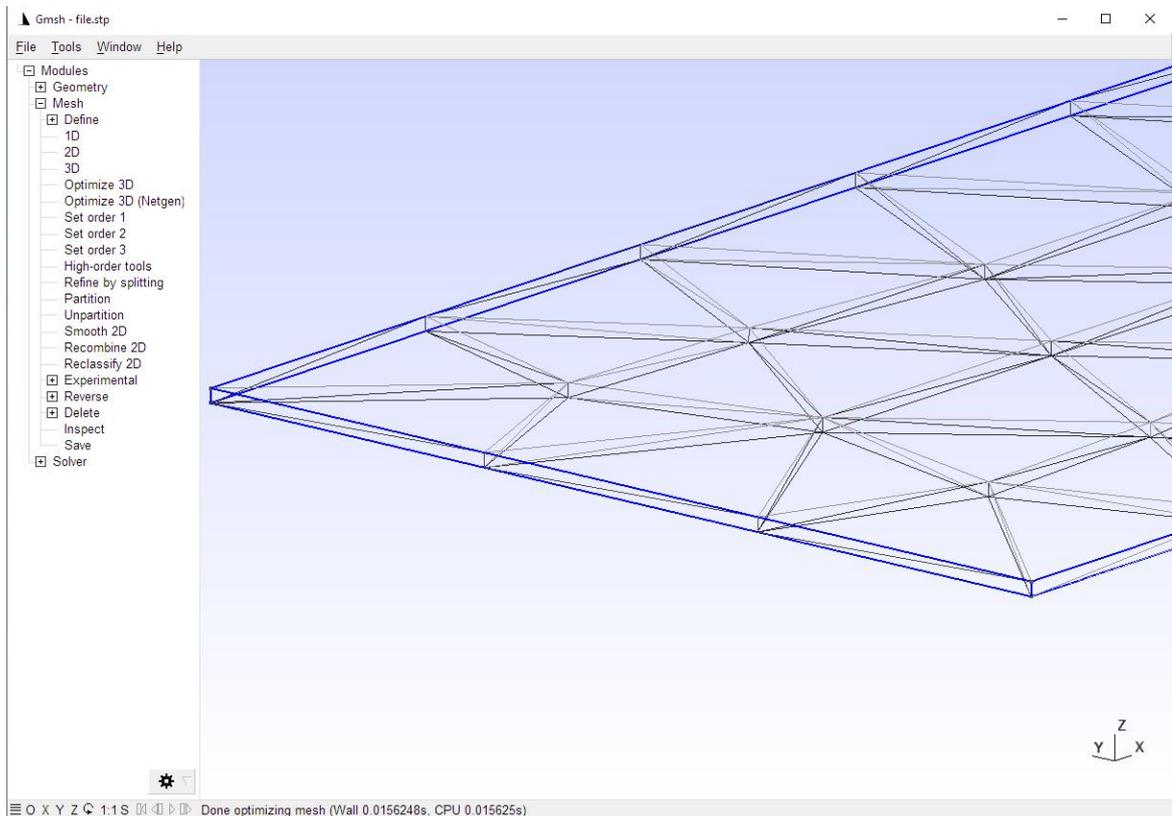
Schicht 1 erzeugen

Glasscheibe 1 mit den Maßen 1333 mm x 400 mm x 6 mm wird zuerst im CAD-System eingegeben und als STEP-File abgespeichert. Wählen Sie in MEANS V12 Register „Datei“ und Menü „Neu“ und wählen „3D-Netzgenerator GMSH (STEP)“.



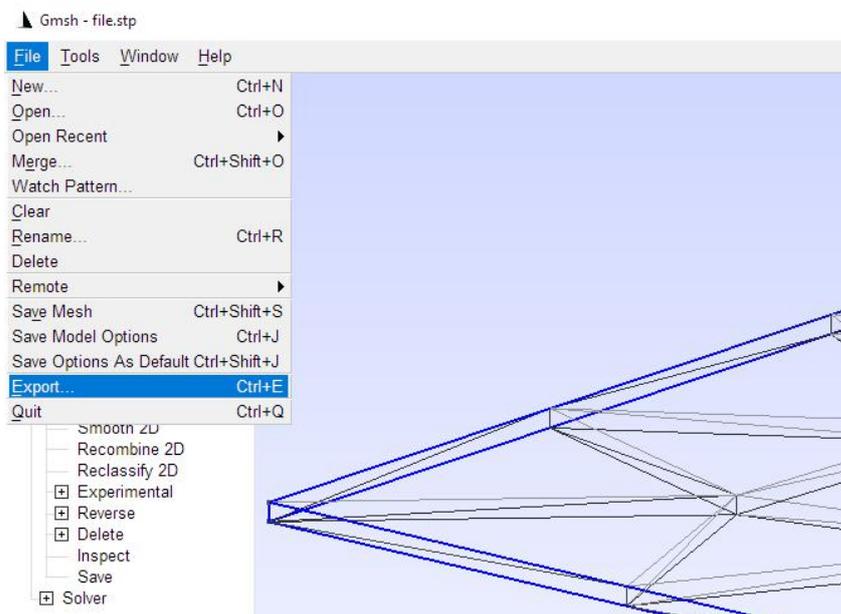
GMSH ist ebenfalls wie NETGEN ein sehr leistungsfähiger STEP-Tetraeder-Netzgenerator mit einer sehr einfachen Bedienung.

Wählen Sie Menü „3D“ um zuerst ein grobes Tetraeder-Netz aus 256 Elementen und 112 Knoten zu generieren wobei obere und untere Netzdichte gleich sein sollten.



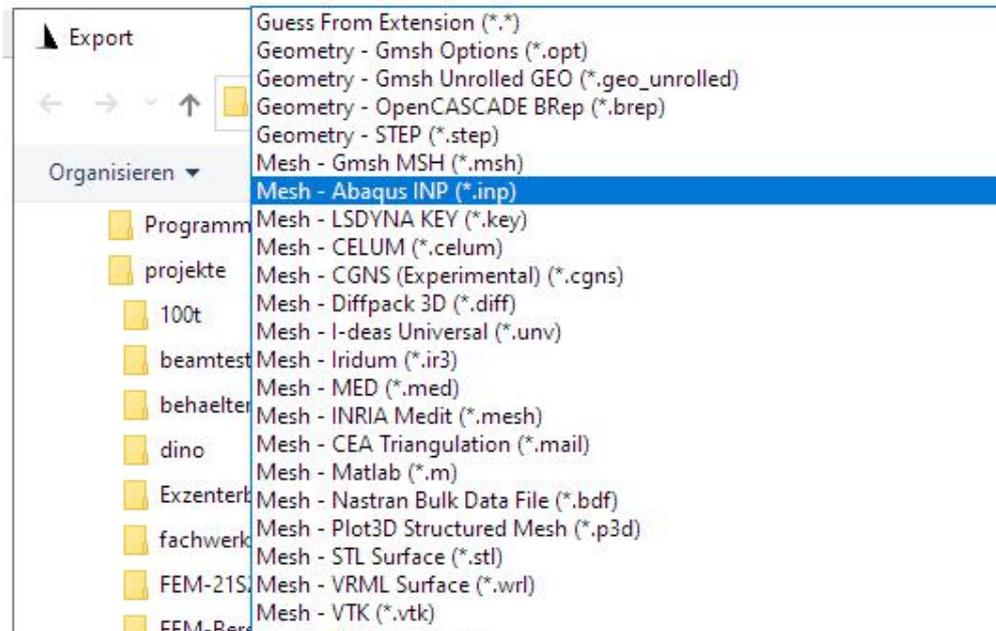
Refine by splitting

Die Netzverfeinerung wird erst später in MEANS V12 durchgeführt. In GMSH kann man aber auch mit Menü „Refine by splitting“ das Netz 8x feiner vernetzen.

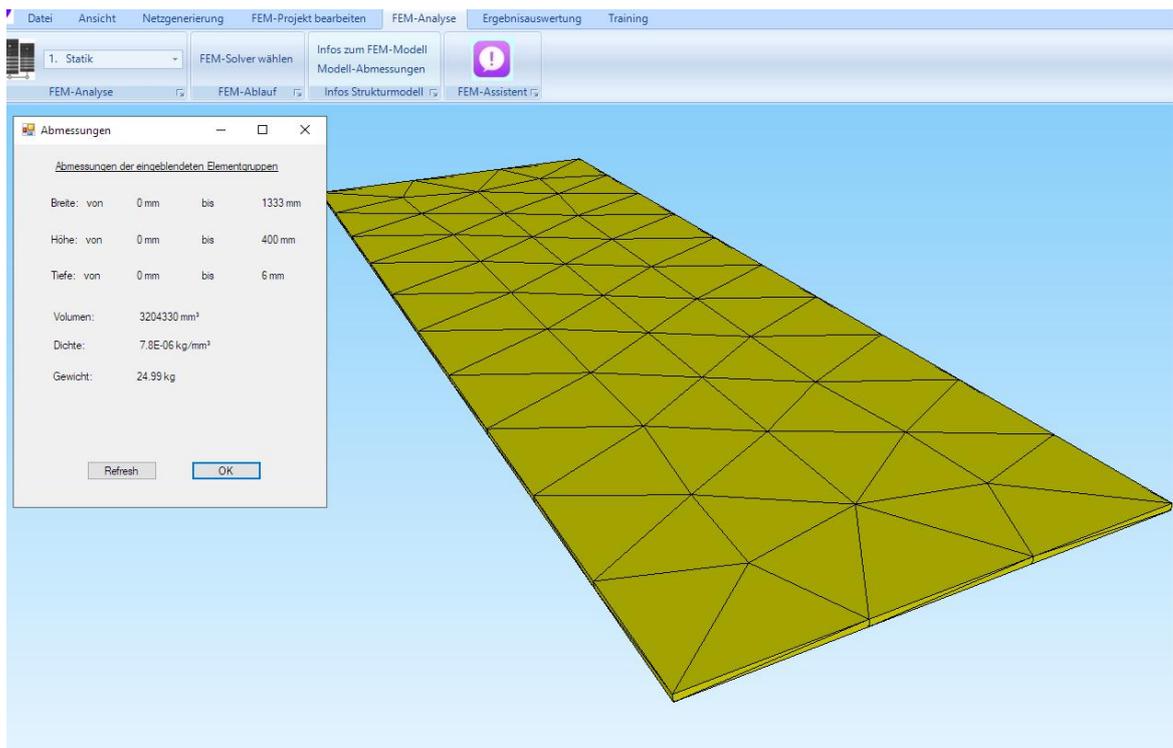


Export im INP-Abaqus-Format

Wählen Sie Menü „File“ und „Export“ sowie „Mesh - Abaqus INP (*.inp)“ und exportieren das INP-File mit gleichem Namen damit es automatisch in MEANS V12 eingeladen und dargestellt wird.

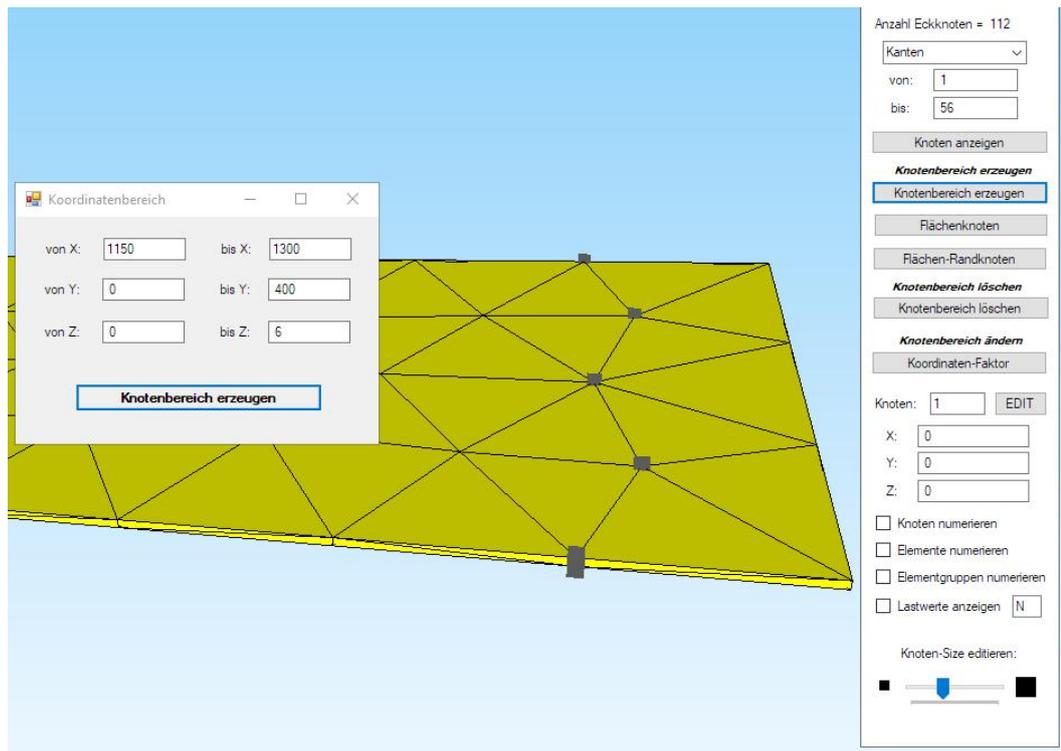


Die Glasscheibe wird in MEANS V12 automatisch dargestellt und hat eine Z-Tiefe von 0 mm bis 6 mm.

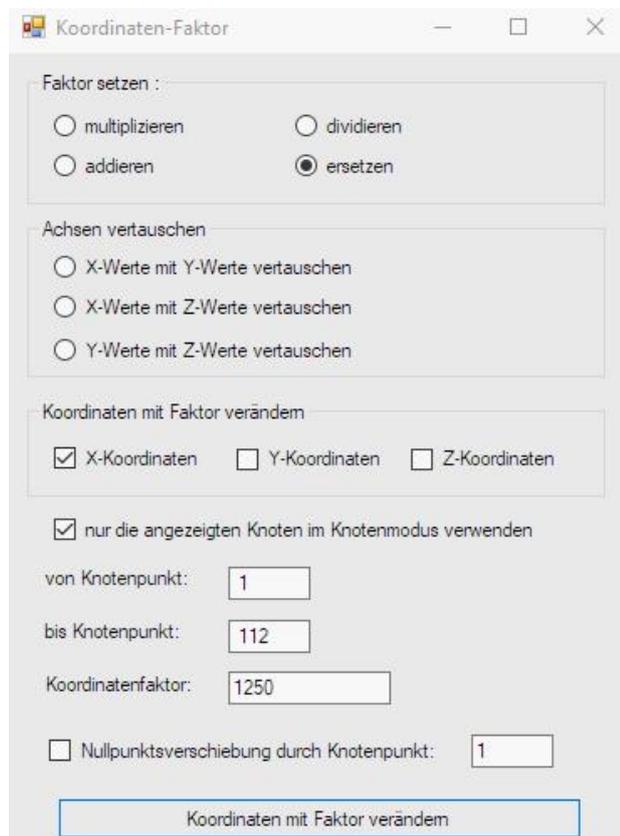


Netz glätten

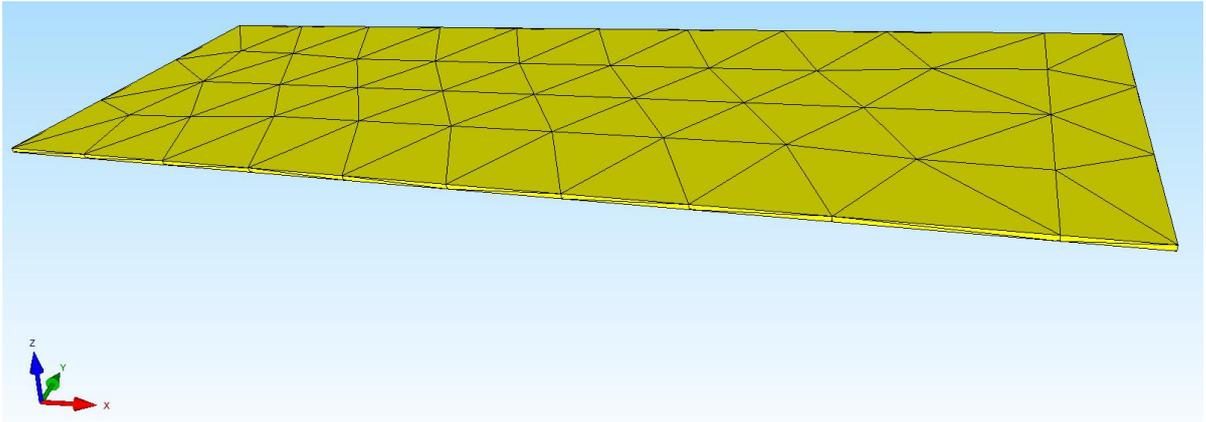
Damit das Netz von 1250 mm bis 1333 mm eingespannt werden kann erzeugen Sie folgenden Knoten-Koordinatenbereich von X = 1150 mm bis X = 1300 mm und



ersetzen mit „Koordinaten-Faktor“ alle X-Werte des Knotenbereiches mit 1250 mm.



Das Netz kann nun von 1250 mm bis 1333 mm exakt eingespannt werden. Speichern Sie dieses Modell unter dem Namen „Schicht_1.fem“ ab.



Schicht 2 erzeugen

Um die PVB-Folie in die Mitte zu verschieben wählen Sie Register „Ansicht“ und

Faktor setzen :

multiplizieren dividieren
 addieren ersetzen

Achsen vertauschen

X-Werte mit Y-Werte vertauschen
 X-Werte mit Z-Werte vertauschen
 Y-Werte mit Z-Werte vertauschen

Koordinaten mit Faktor verändern

X-Koordinaten Y-Koordinaten Z-Koordinaten

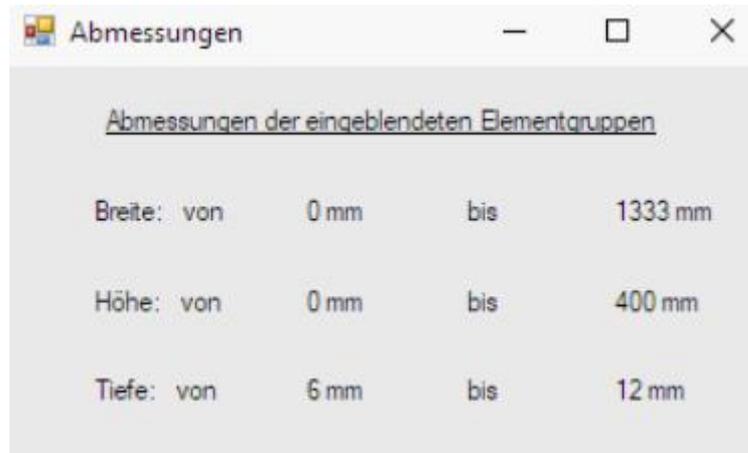
nur die angezeigten Knoten im Knotenmodus verwenden

von Knotenpunkt:

bis Knotenpunkt:

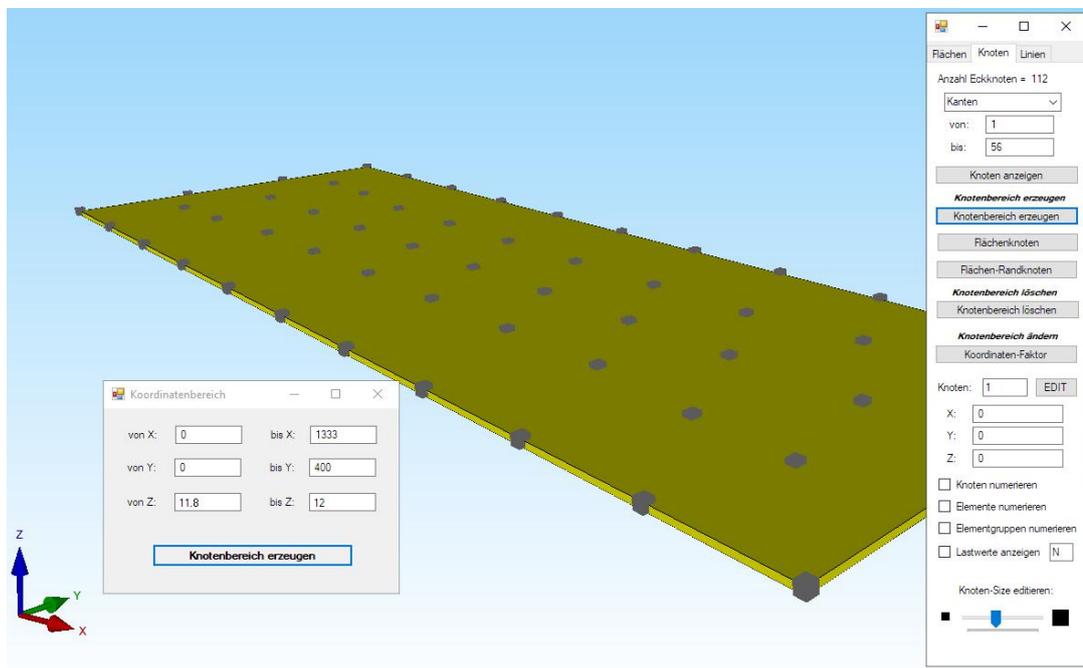
Koordinatenfaktor:

„Knoten-Modus“ sowie „Koordinaten-Faktor“ und addieren 6 mm in Z-Richtung. Danach wählen Sie Register „FEM-Analyse“ und „Modell-Abmessungen“ um die neue Z-Tiefe von 6 mm bis 12 mm zu überprüfen.



Knotenbereich der oberen Fläche verschieben

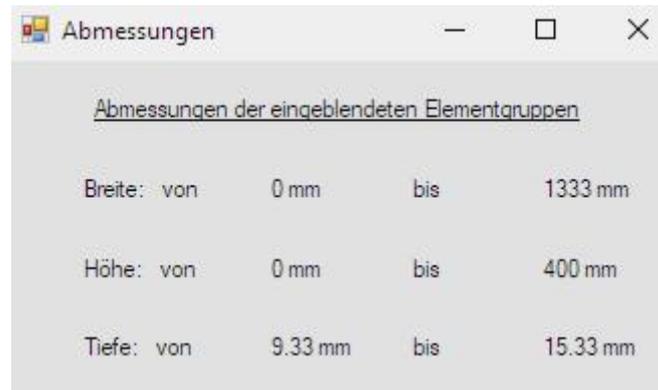
Die Knoten der oberen Fläche müssen von 12 mm auf 9.33 mm subtrahiert werden. Erzeugen Sie dazu im Knoten-Modus einen Knotenkoordinatenbereich von 11.8 mm bis 12 mm.



Dannach wählen Sie Koordinaten-Faktor und addieren in Z-Richtung den Wert -2.67 mm um den Wert 9.33 mm zu erhalten. Mit Menü „Modell-Abmessungen“ kann die Eingabe wieder überprüft werden. Speichern Sie das Netz mit „Schicht_2.fem“ ab.

Schicht 3 erzeugen

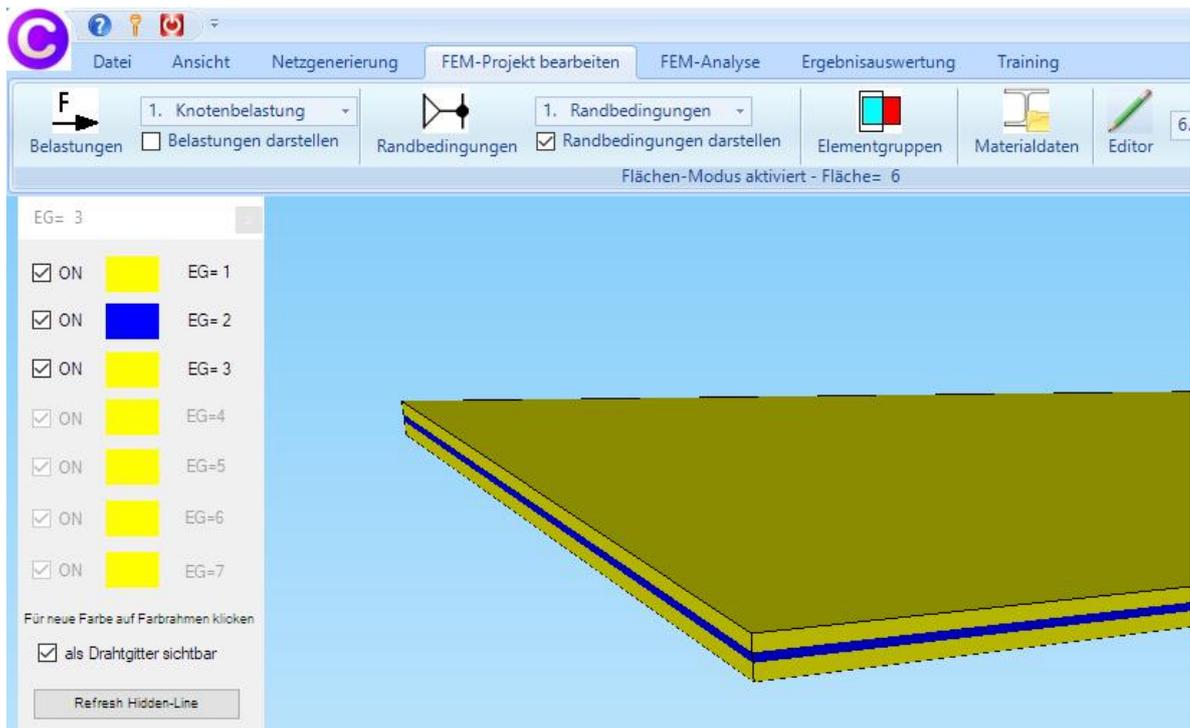
Laden Sie das erste Modell „Schicht_1.fem“ wieder ein und addieren mit einem Koordinaten-Faktor von 9.33 mm alle Z-Werte. Speichern Sie das Netz mit der Z-Tiefe von 9.33 mm bis 15.33 mm als „Schicht_3.fem“ ab.



Schichten zusammenfügen

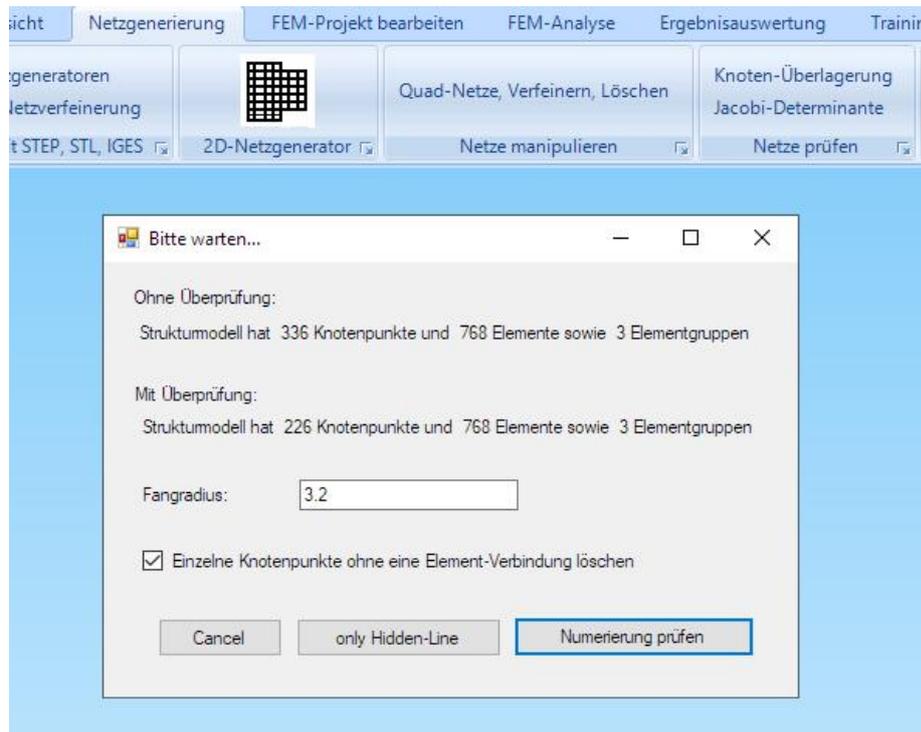
Laden Sie mit Register „Datei“ das erste Netz „Schicht_1.fem“ wieder ein und laden mit Menü „FEM-Zuladung“ die Netze „Schicht_2.fem“ und „Schicht_3.fem“ nacheinander ein, sodaß ein Hauptnetz mit 3-Schichten entsteht.

Wählen Sie Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und „Elementgruppen“ um das FEM-Netz aus 3 Elementgruppen darzustellen.



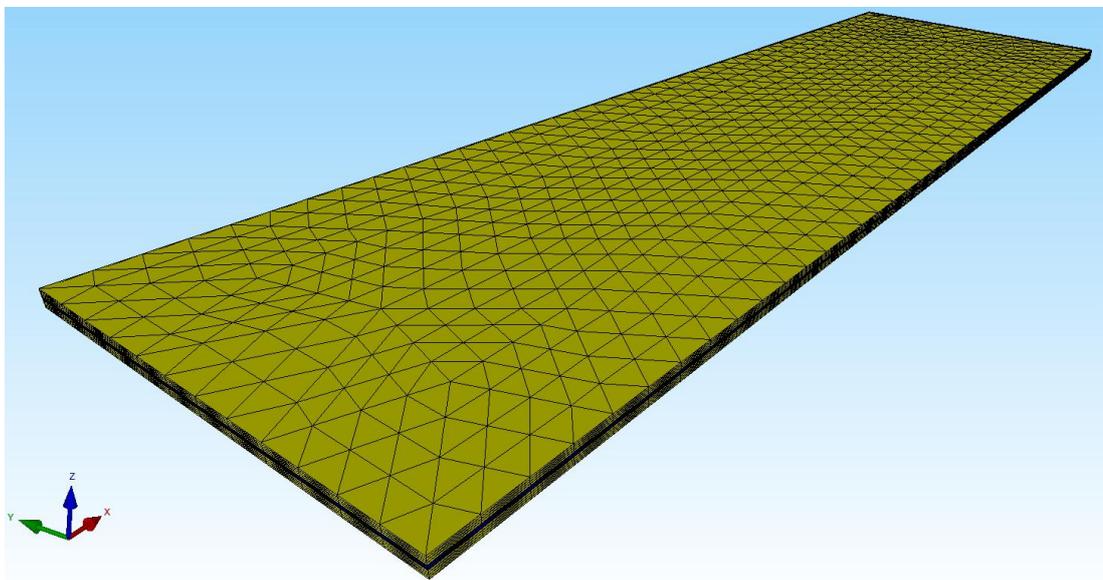
Knoten-Überlagerung

Führen Sie mit Register „Netzgenerierung“ und „Knoten-Überlagerung“ einen Knoten-Test mit dem Fangradius „3.2“ durch um alle überlagerten Knoten zu löschen. Die Struktur besteht nun aus 768 Tetraedern und 226 Knotenpunkten.



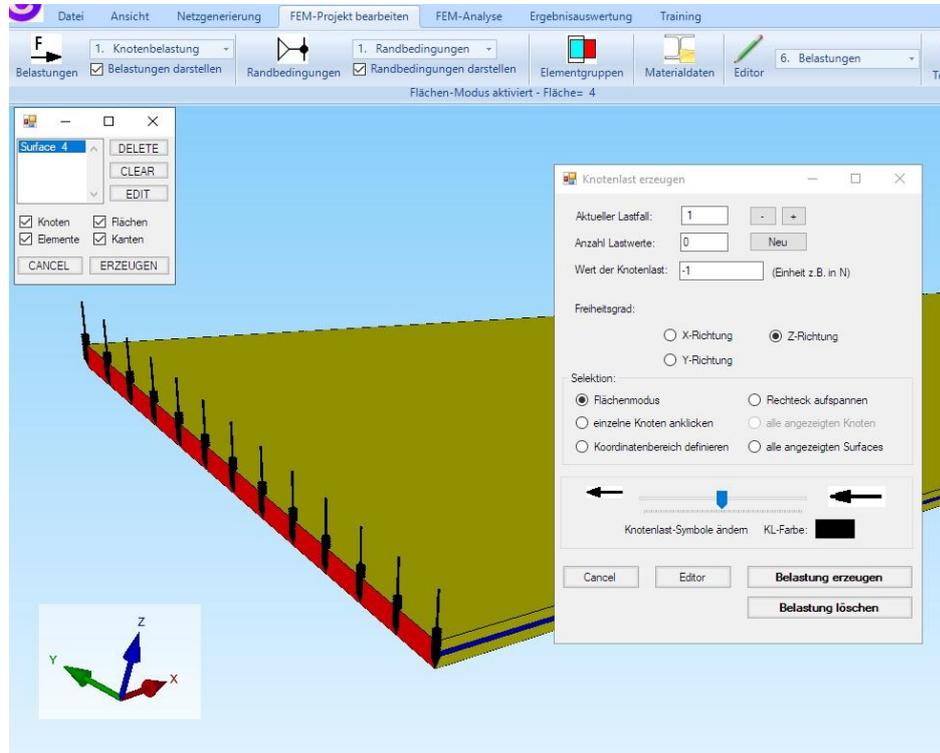
Nachverfeinerung

Zum Schluß wählen Sie das Register „Netzgenerierung“ und das Menü „Lokale Netzverfeinerung“ sowie zweimal Menü „FEM-Netz alles 8x feiner“ um die VSG-Scheibe mit 49 152 Tetraedern, 9541 Knotenpunkten und 3 Elementgruppen zu erhalten.

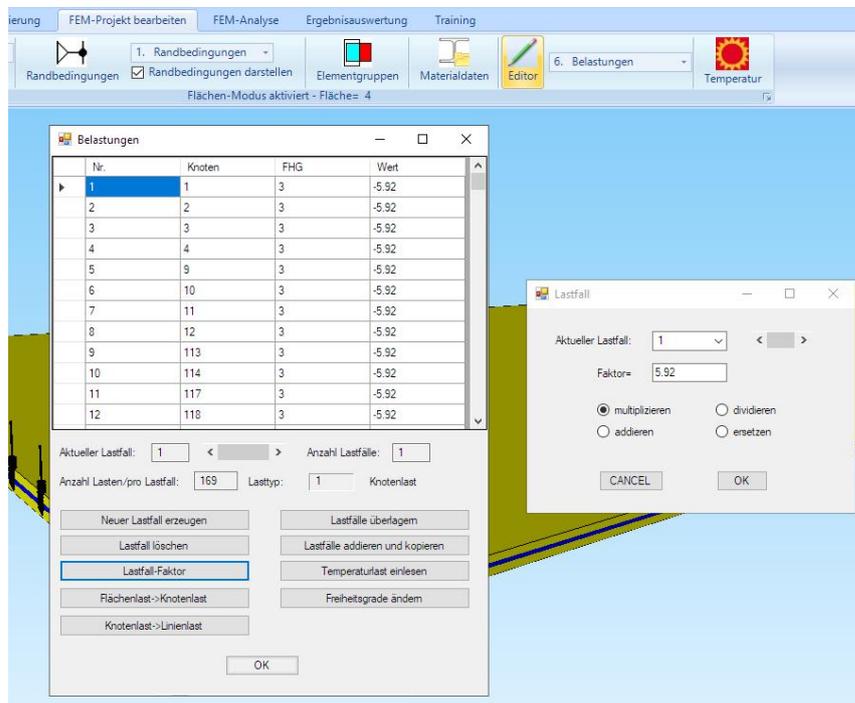


Erzeugung Lastfall 1

Die Verbundplatte wird auf der linken Seite mit 1000 N belastet. Zuerst muß das Flächenmodell mit Register „Ansicht“ erzeugt werden. Dann wählen Sie Register „FEM-Projekt“ und „Knotenbelastung“ und erzeugen eine Knotenbelastung in Z-Richtung mit dem Lastwert = 1 N indem Sie die linke Fläche 4 anklicken.

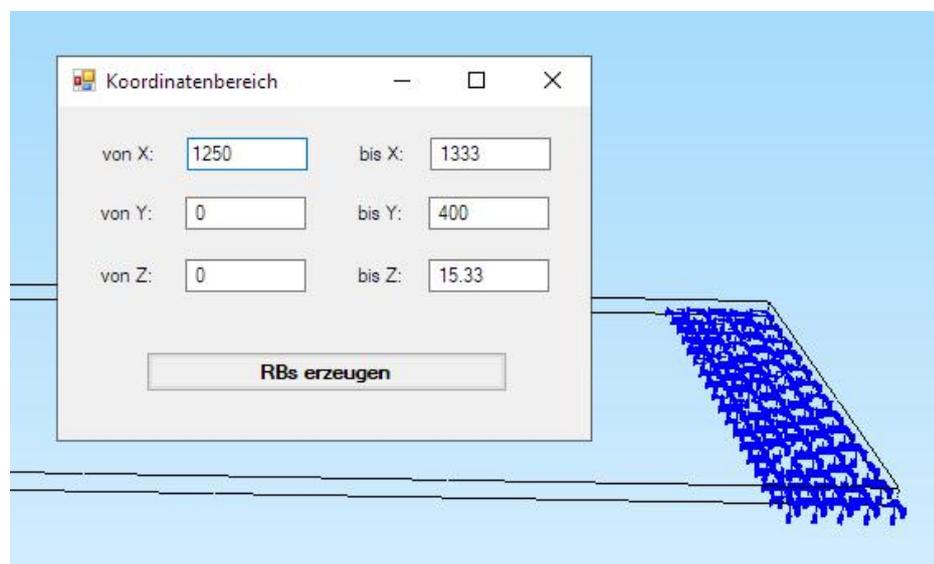
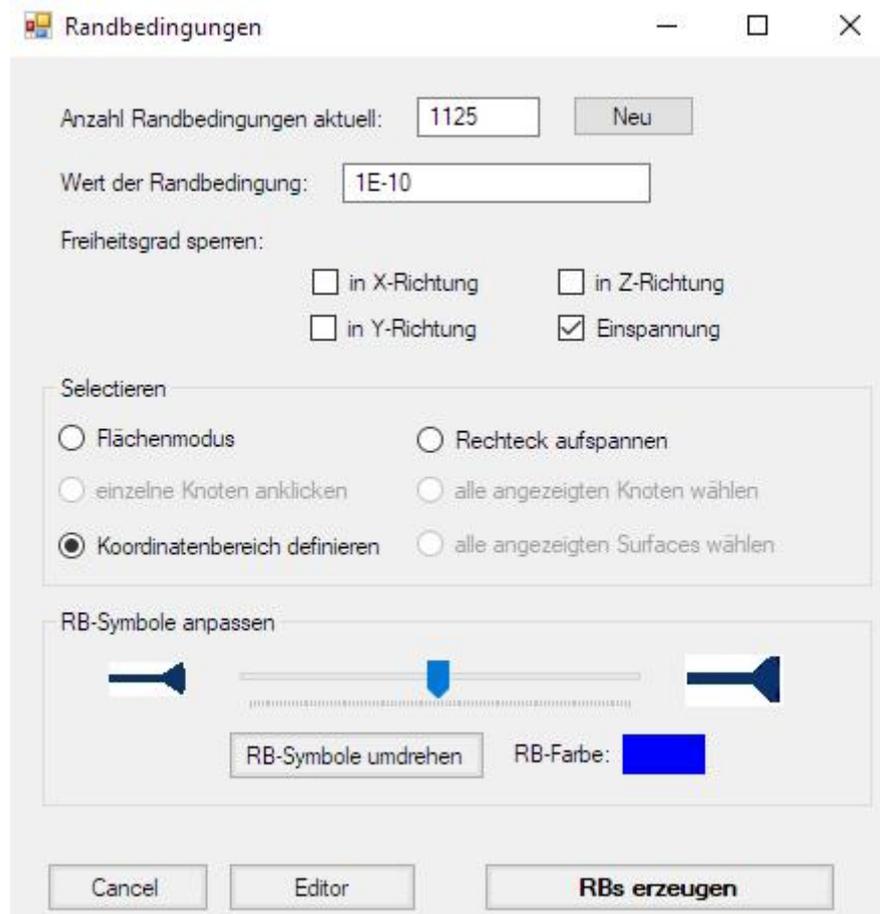


Wählen Sie „Editor“ und multiplizieren Sie den Lastwert mit dem Last-Faktor 5.92 der sich aus $1000 \text{ N} / 169$ berechnen läßt.



Einspannung

Die Verbundplatte wird von 1250 mm bis 1333 mm fest eingespannt. Wählen Sie Register „FEM-Projekt bearbeiten“ sowie „Randbedingungen“ und „Koordinatenbereich definieren“ um die Platte fest einzuspannen.

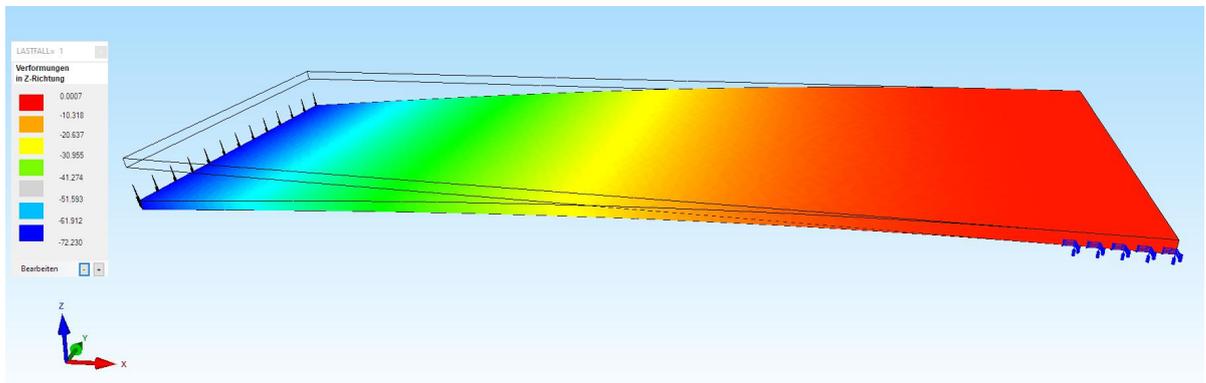


Zum Schluß folgen die Eingabe der Materialdaten der 3 Elementgruppen und die Statik-Analyse mit dem Quick-Solver wie bereits in Teil 1 beschrieben worden ist.

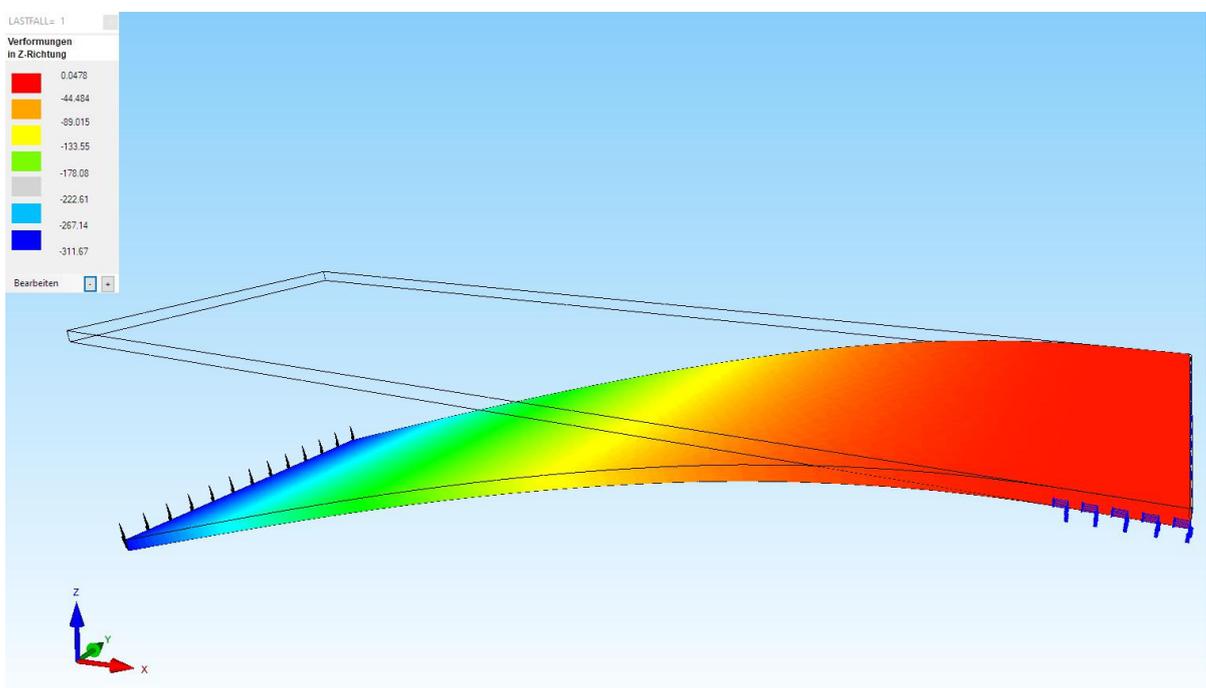
Ergebnisse

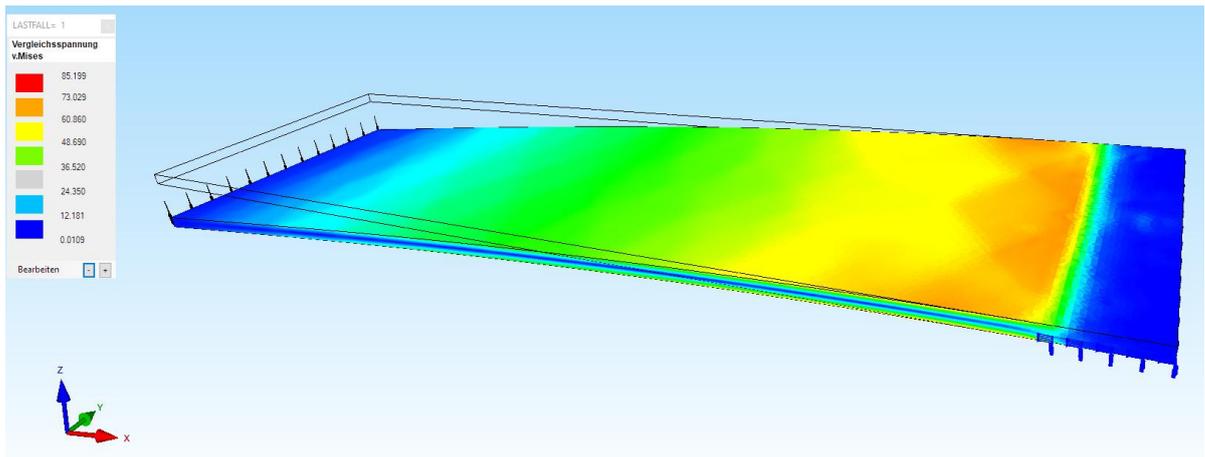
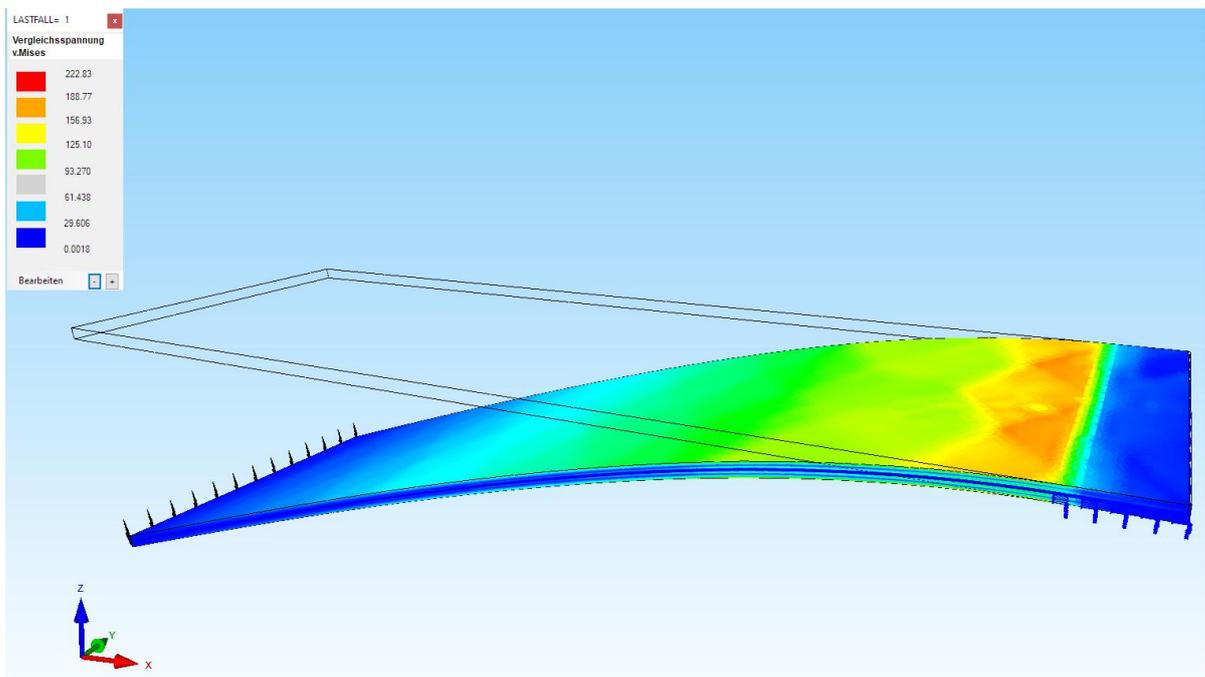
Es folgt ein Ergebnisvergleich zwischen einer monolithischen Glasscheibe und der 3-schichtigen Verbundglasplatte mit 2 Glasscheiben und einer PVB-Folie.

Max. Z-Verformung monolithischen Glasscheibe = -72.23 mm (exakt = 72 mm)



Max. Z-Verformung mit 3-schichtiger Verbundglasplatte = -311.67 mm

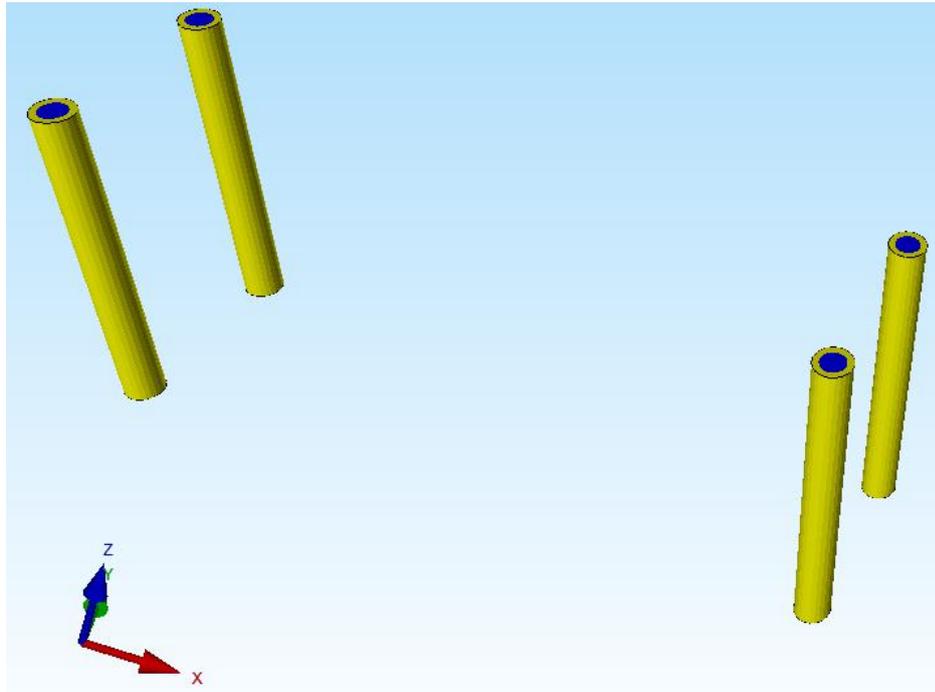


Max. v.Mises-Spannung = 85.2 N/mm² der monolithischen Glasplatte**Max. v.Mises-Spannung = 222 N/mm² mit 3-schichtiger Verbundglasplatte****Verbundglas-Effekt**

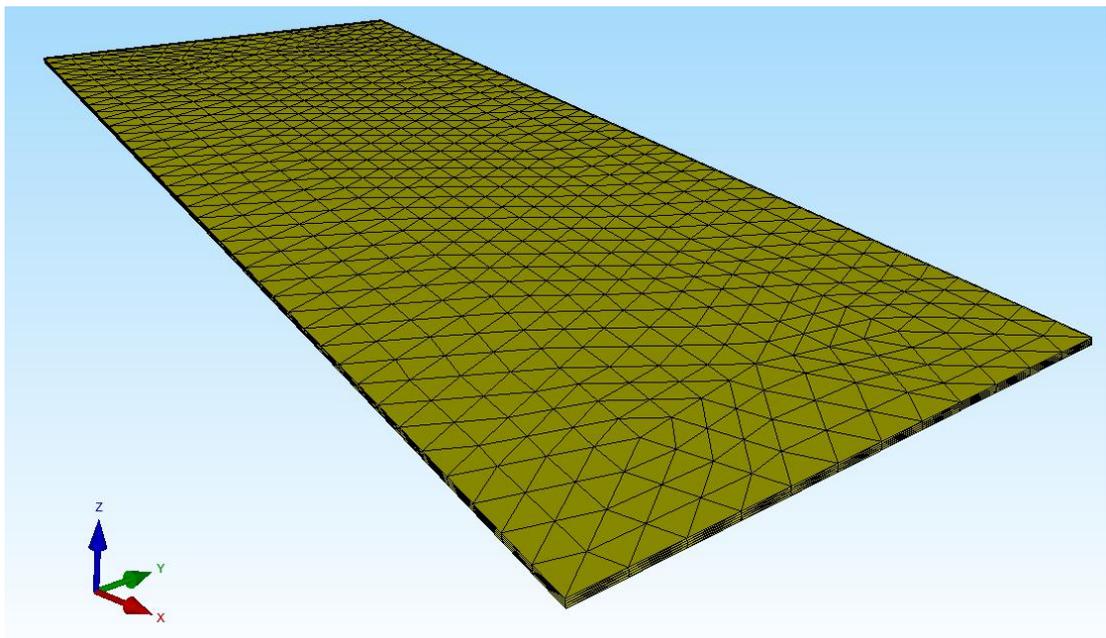
Die lineare Statik-Analyse gilt nur bis zur Bruchspannung - darum kann leider nicht berücksichtigt werden, daß nach dem Bruch die Glassplitter an der Folie haften bleiben und damit das Tragverhalten wieder erhöhen. An diesem Effekt wird heute besonders an Auto-Windschutzscheiben geforscht.

Teil 3: Glasplatte mit Tischbeinen verbinden und berechnen

Die Tetraeder-Glasplatte wird mit 4 Pentaeder-Alu-Tischbeinen verbunden und berechnet.

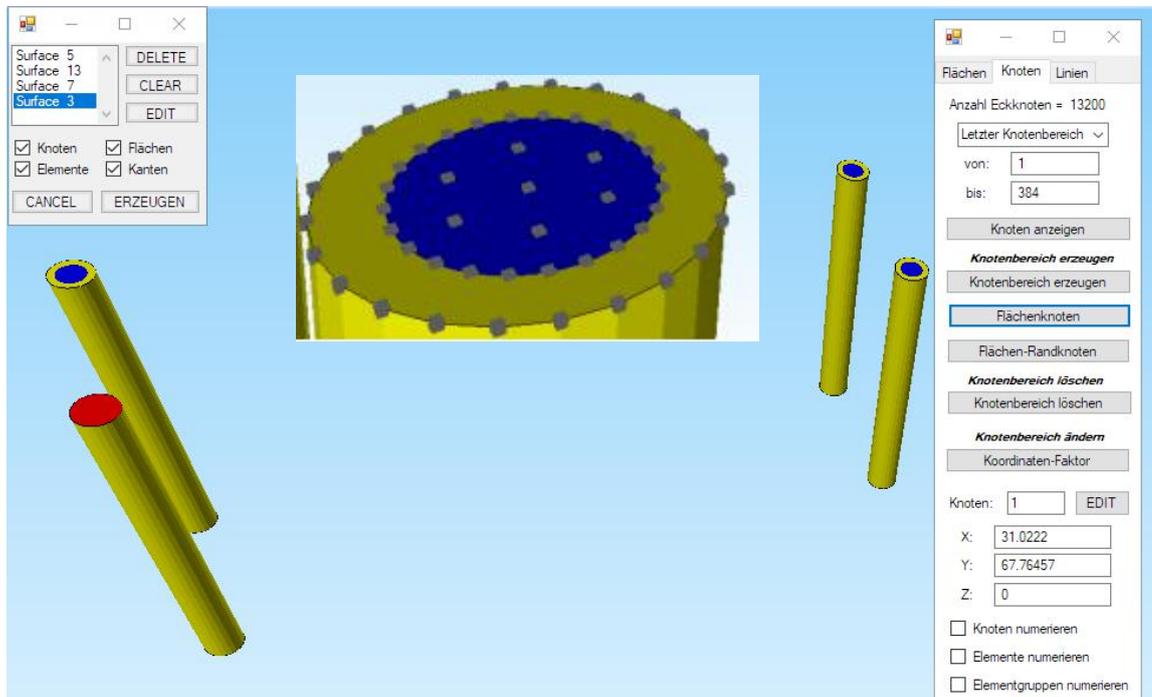


Der Knoten-Abdruck der Tischbeine bei $Z=0$ muß in das Glasplatten-Netz eingefügt werden damit Glasplatte und Tischbeine vereint werden können.



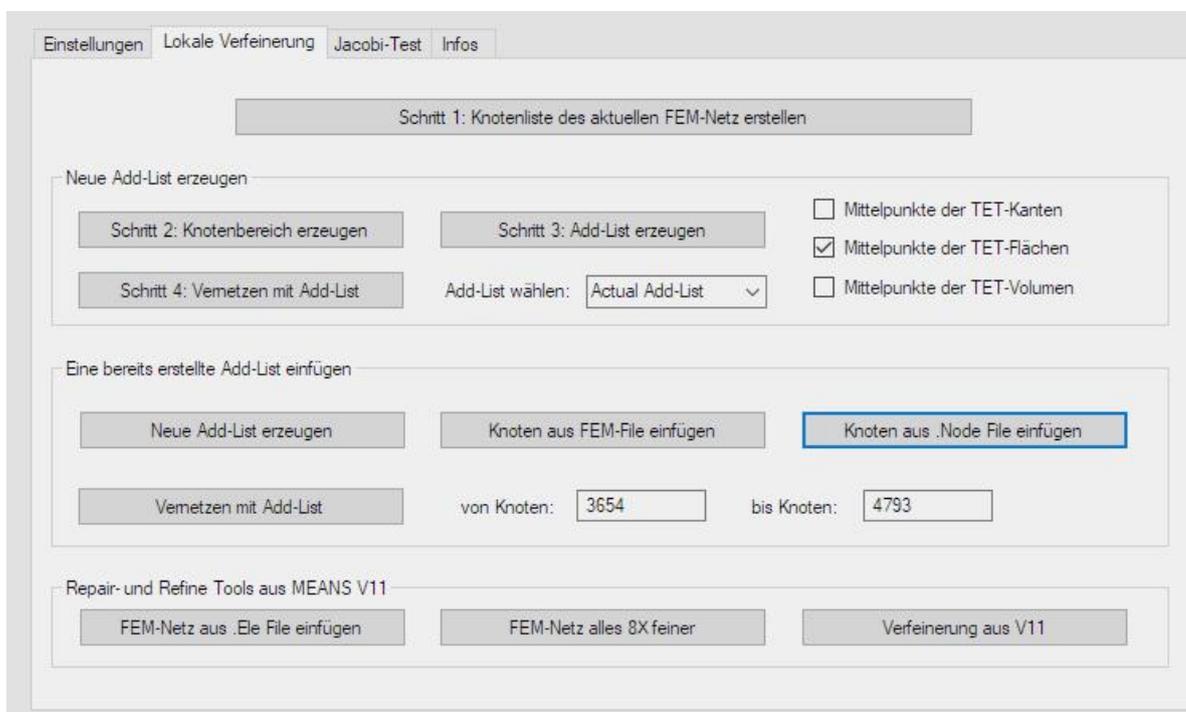
Schritt 1: Knotenbereich erzeugen

Laden Sie das FEM-Netz der Tischbeine ein und wählen Register „Ansicht“ und Menü „Knoten-Modus“ und im linken Menüfeld „Flächenknoten“ um einen Knotenbereich für die Surfaces 3, 5, 7 und 13 bei $Z = 0$ zu erzeugen.



Schritt 2: Neue Add-List erzeugen

Wählen Sie Register „Netzgenerierung“ und „Lokale Netzverfeinerung“ sowie Menü „Neue Add-List erzeugen“ und speichern den Knotenbereich unter „tab14.Node“ ab.



Schritt 3: Knotenliste des aktuellen FEM-Netzes erstellen

Die Glasplatte wieder einladen und mit Menü „Lokale Netzverfeinerung“ und „Schritt 1: Knotenliste des aktuellen FEM-Netzes erstellen“ die Anzahl der Knoten und Elemente vor dem Einfügen der Add-List merken.

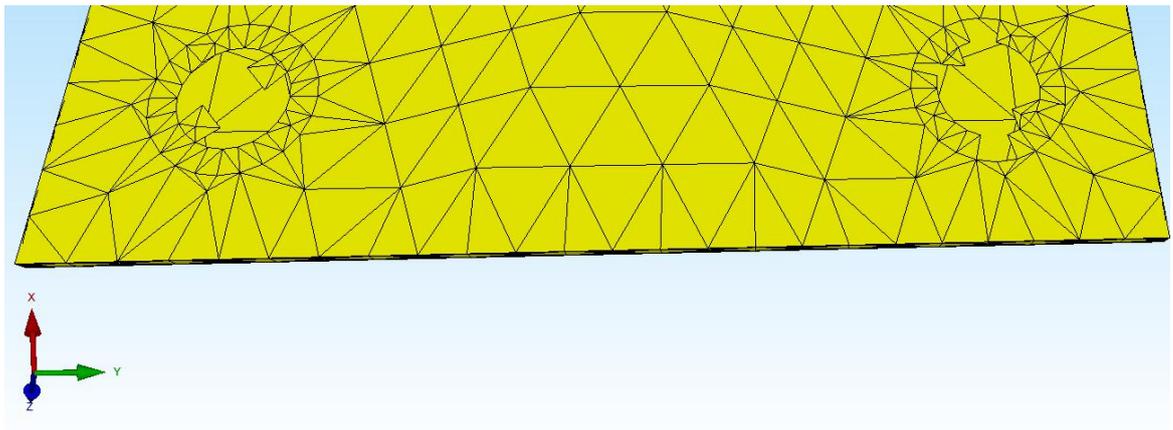
Schritt 4: Knoten aus .Node File einfügen

Dannach die Knotenliste der Tischbeine mit Menü „Knoten aus .Node File einfügen“ einladen und am Modell prüfen ob die Knoten korrekt dargestellt werden.

Schritt 5: Vernetzen mit Add-List

Jetzt mit Menü „Vernetzen mit Add-List“ den Netzgenerator aufrufen um die zusätzlichen Knoten der Tischbeine in das FEM-Netz der Glasplatte einzufügen.

Man erhält eine neue Glasplatte mit dem Knoten-Abdruck der Tischbeine



Schritt 6: Pentaeder-Netz in ein Tetraeder-Netz umwandeln

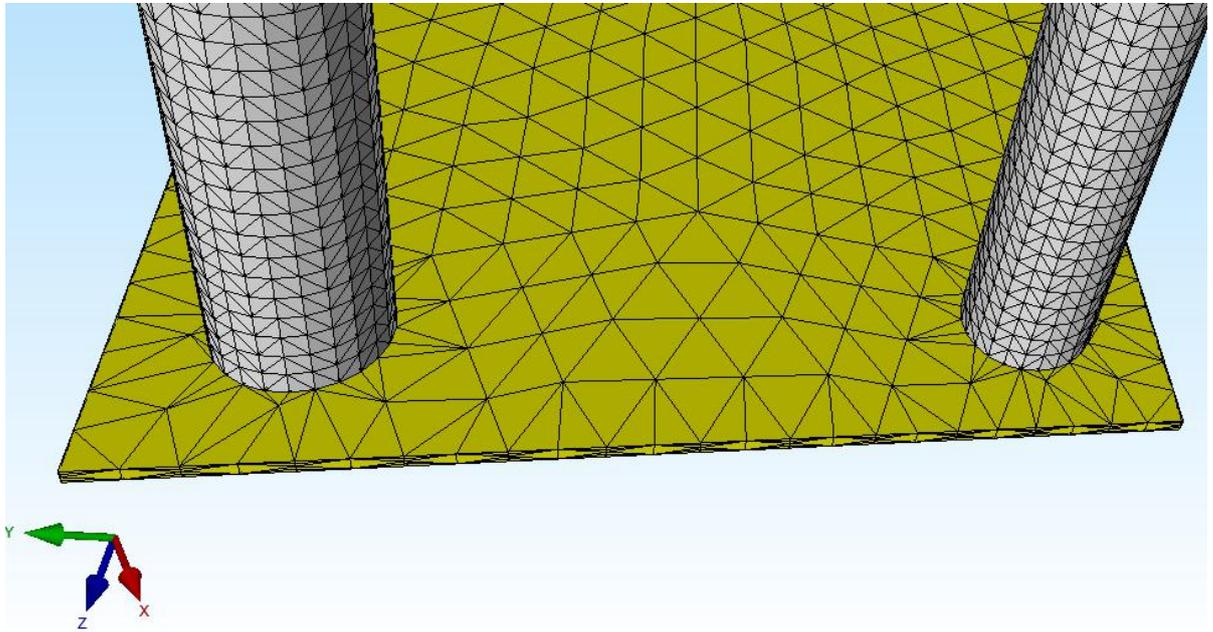
Bestehen die Tischbeine aus extrudierten Pentaedern muß vor der Zuladung mit Register „Netzgenerierung“ und Menü „HEX8/PEN6 -> TET4“ zuerst das Pentaeder-Netz in ein Tetraeder-Netz umgewandelt werden.



Schritt 7: FEM-Zuladung

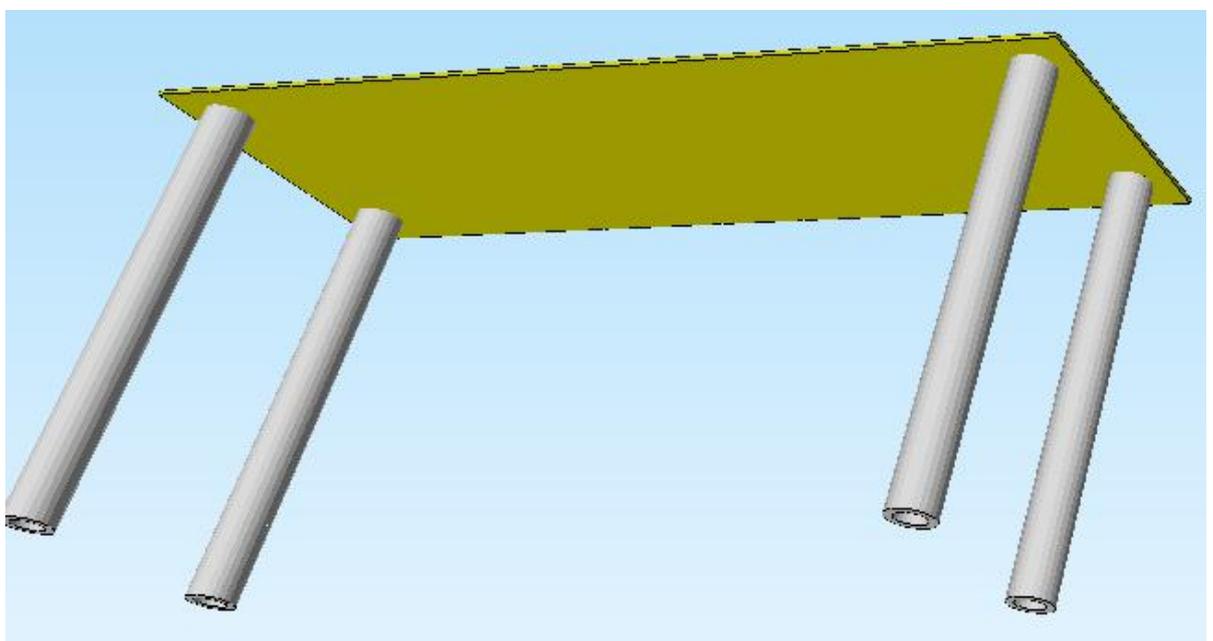
Dannach mit Register „Datei“ und „FEM-Zuladung“ das Netz der Tischbeine zur Glasplatte nachladen und zum Schluß mit Register „Netzgenerierung“ und Menü „Knoten-Überlagerung“ die überlagerten Knoten aus der Struktur herauslöschten.

Glasplatte und Alu-Tischbeine sind nun in einem FEM-Netz mit 2 Elementgruppen vereint.



CAD-Baugruppen zusammenfügen

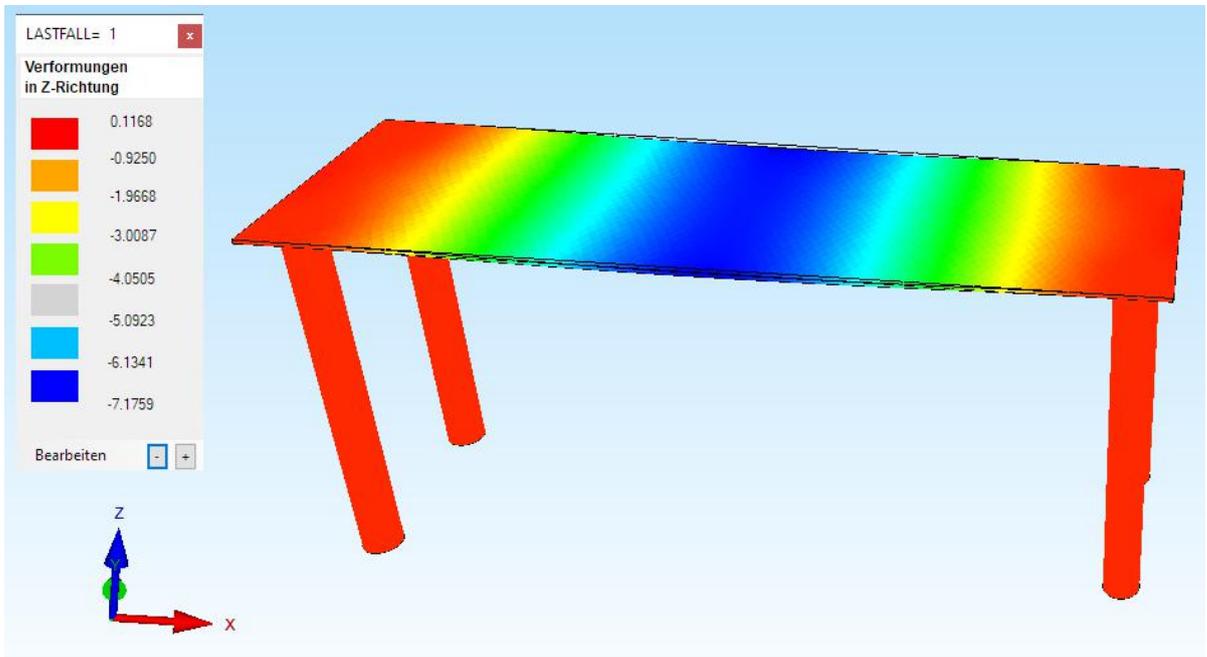
Auf diese Weise lassen sich moderate CAD-Baugruppen mit unterschiedlichen E-Modulen schrittweise zusammenfügen und berechnen.



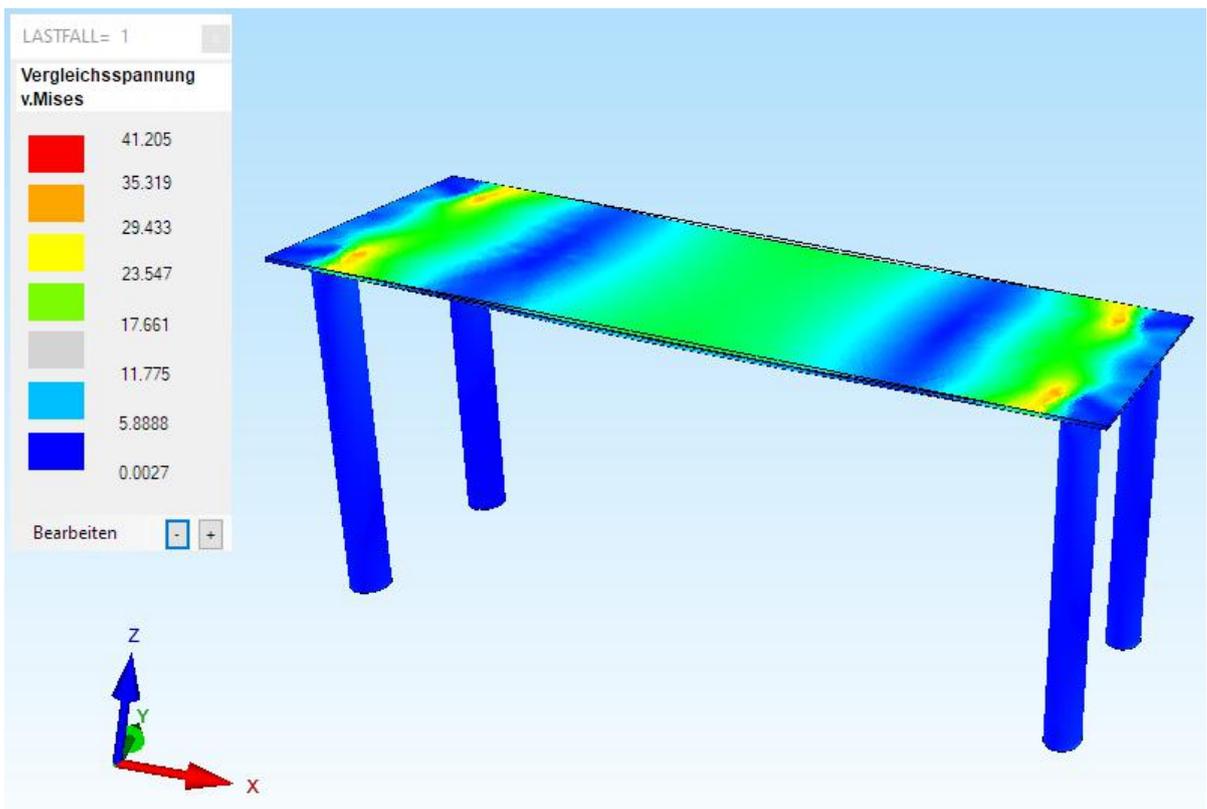
Ergebnisauswertung

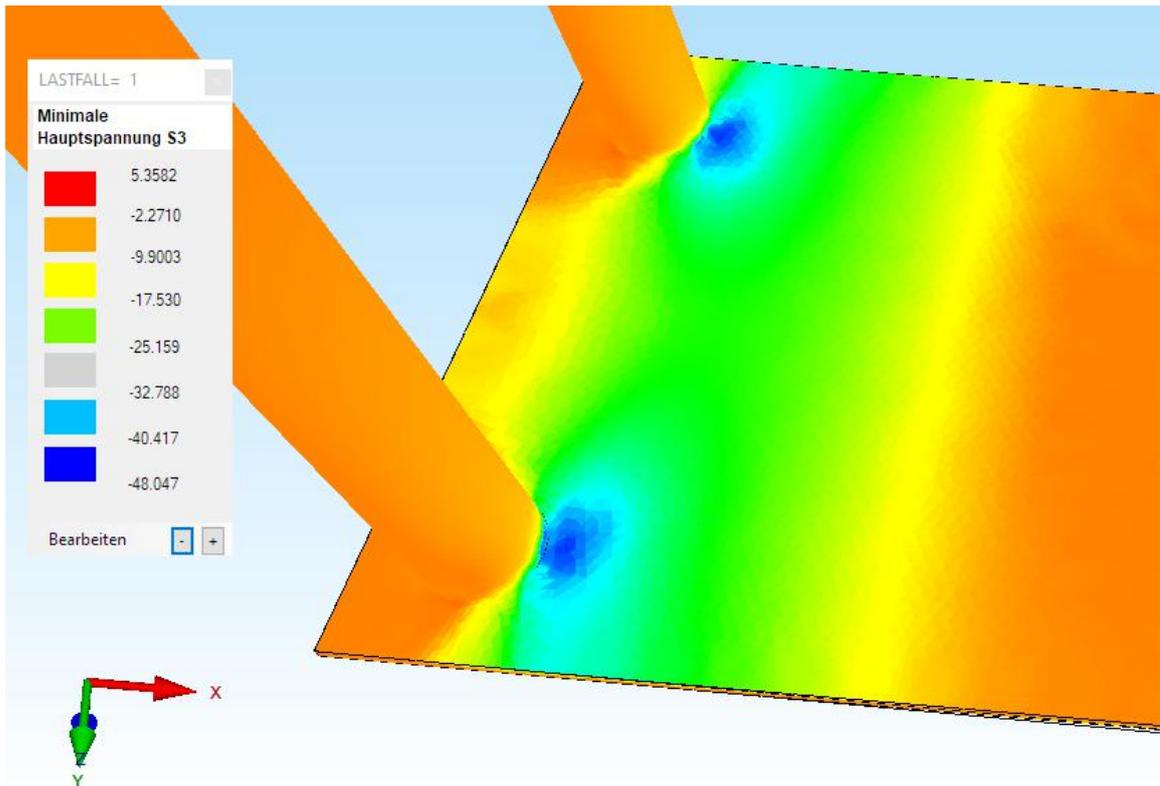
Folgende Ergebnisse erhält man wenn die Glasplatte mit 100 kg Gewicht belastet wird und die Tischbeine eingespannt sind.

Maximale Verformung in Z-Richtung = -7.17 mm



Maximale v.Mises-Vergleichsspannung = 41 N/mm²



Minimale Hauptspannung S3 = - 48 N/mm²**Maximale Schubspannung TAUxy = 9.3 N/mm²**