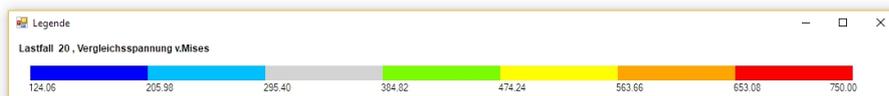
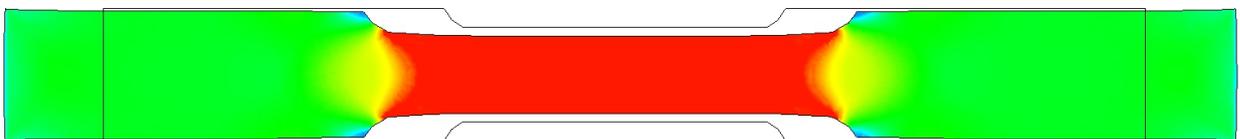
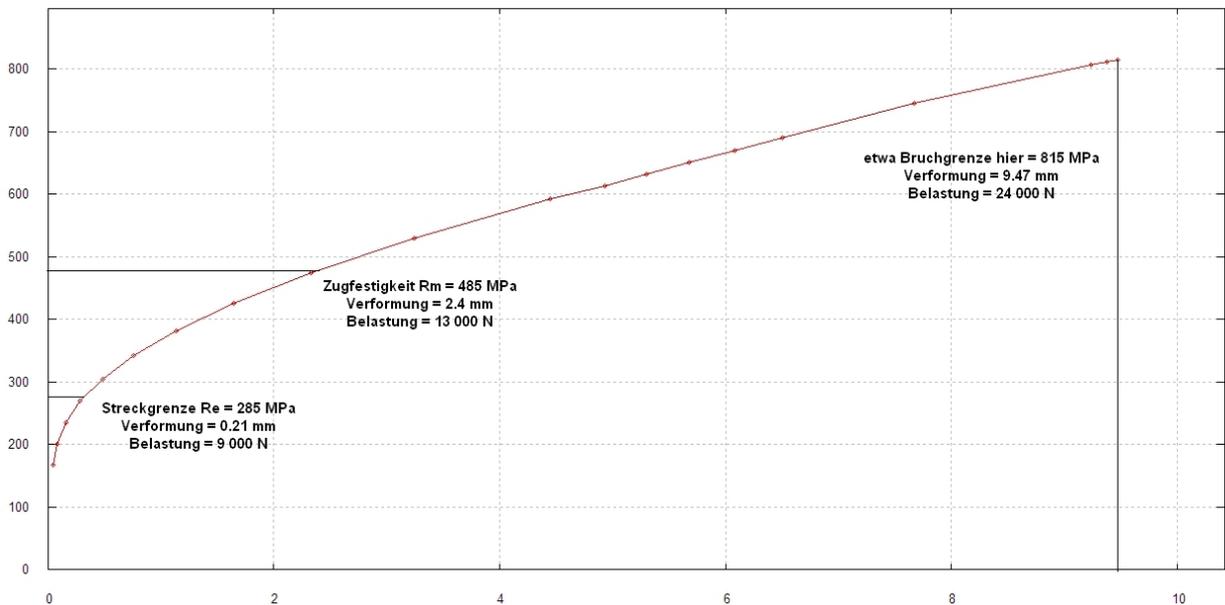


FEM-System MEANS V12

Nichtlineare FEM-Analyse einer Zugprobe mit Vergleich der Zugkraft zwischen Stahl und Aluminium

Stress-Displacement-Diagramm of the FE-Project: C:\projekt\zugversuch\qua2.fem



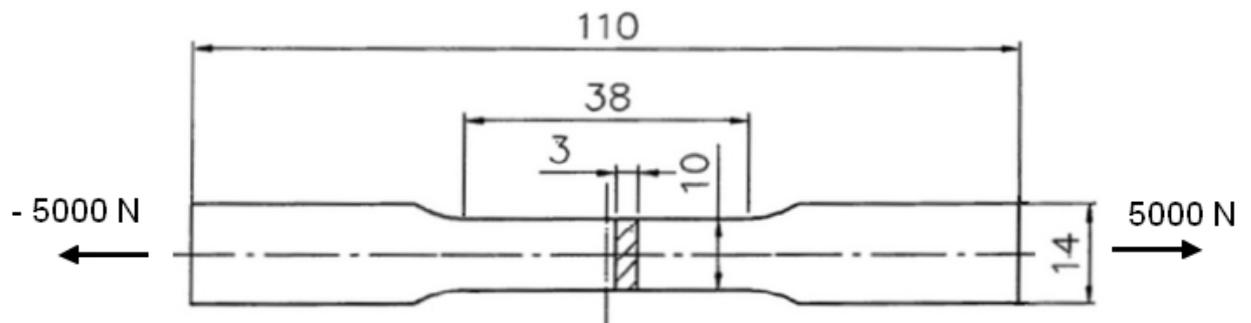
www.femcad.de

www.fem-infos.com

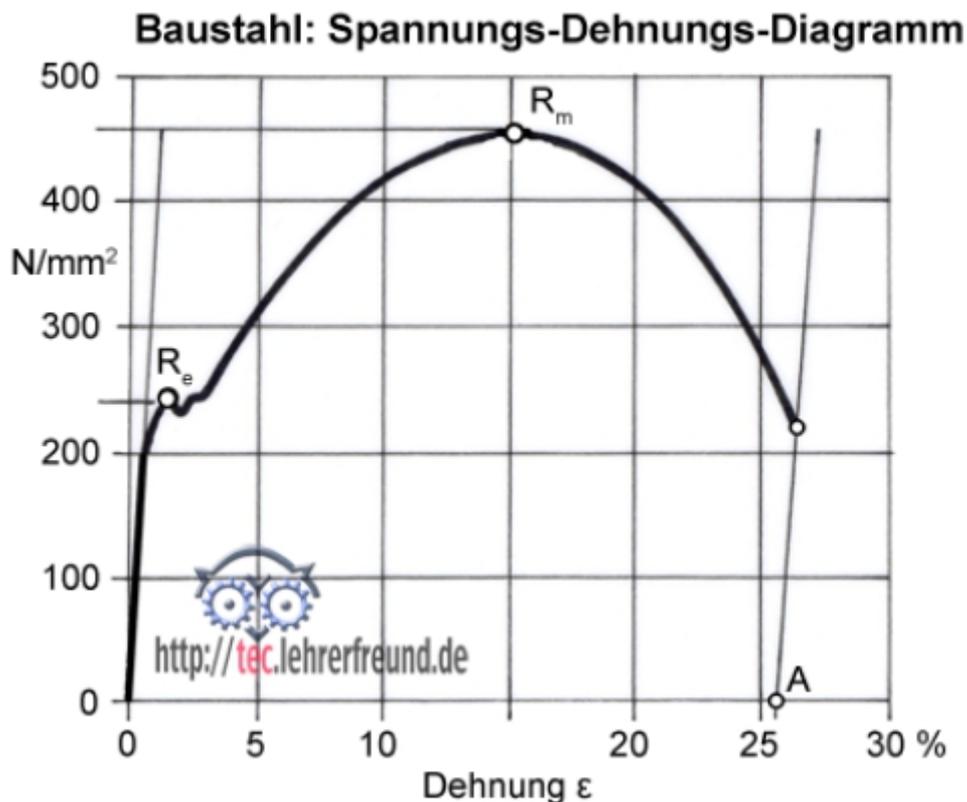
Kapitel 12: Nichtlineare Analyse einer Zugprobe

Zugprüfkörper

Der Zugprüfkörper ist aus Stahl mit den Abmessungen 110 x 14 x 3 und wird beidseitig mit einer axialen Zugbelastung von 5000 N belastet. Die Belastung wird schrittweise über die Dehngrenze $R_{0,2}$, Streckgrenze R_e und Zugfestigkeit R_m bis zur Fließgrenze und schließlich zur Bruchdehnung erhöht.



Bis zur Fließgrenze bleibt das Metall elastisch und nimmt wieder die ursprüngliche Form ein, wenn man die Belastung zurücknimmt. Wird die belastende Spannung im Material jedoch größer, dann beginnt es, zu »fließen«, d. h. sich bleibend zu verformen. Schließlich bricht es.

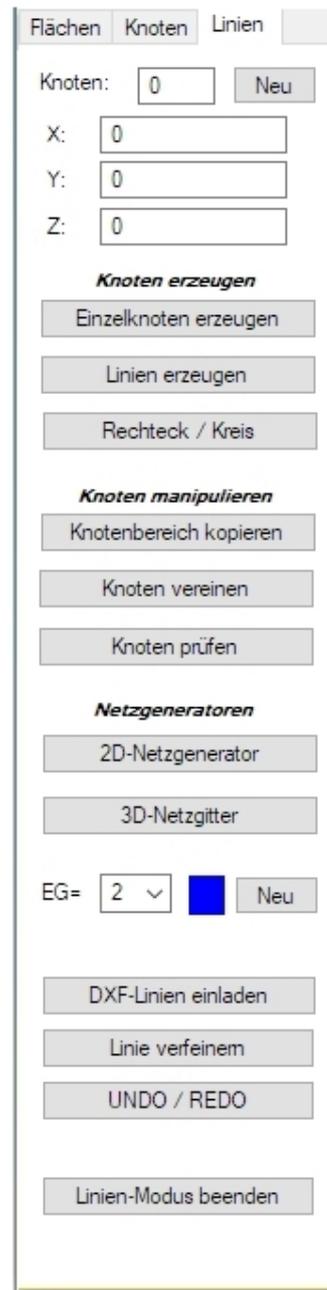
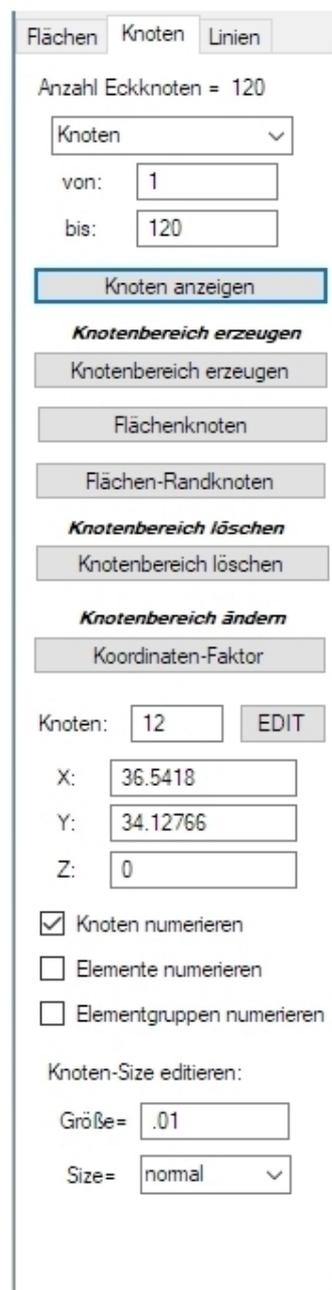


Linienmodell erzeugen

Mit MEANS V11 wird zuerst das Register „Ansicht“ und „Linien-Modus“ gewählt ein Liniemodell mit 6 Knoten und 6 Linien einzugeben.



Während der Eingabe kann zwischen Knoten- und Linien-Modus gewechselt werden.



Linienmodell mit 16 Knotenpunkten:



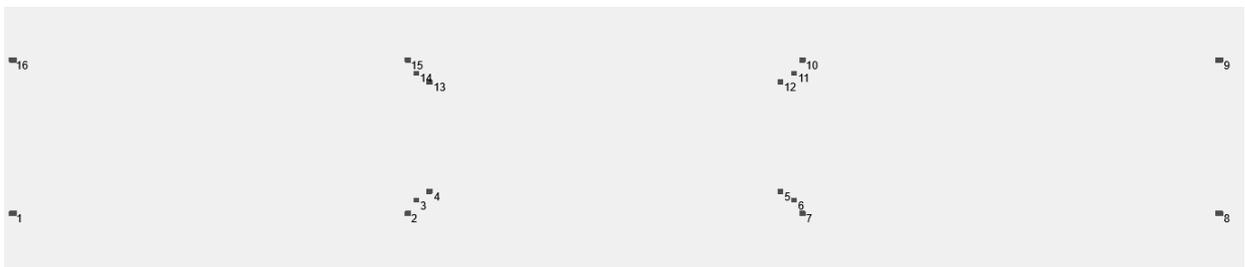
Knoten 1:	x = 0	y = 0	9:	x = 110	y = 14
2:	x = 36	y = 0	10:	x = 72	y = 14
3:	x = 36.8	y = 1.2	11:	x = 71.2	y = 12.8
4:	x = 38	y = 2	12:	x = 70	y = 12
5:	x = 70	y = 2	13:	x = 38	y = 12
6:	x = 71.2	y = 1.2	14:	x = 36.8	y = 12.8
7:	x = 72	y = 0	15:	x = 36	y = 14
8:	x = 110	y = 0	16:	x = 0	y = 14

Wählen Sie im Linien-Modus das Menü “Neu” um den Knoten 1 zu erzeugen und geben die Knotenkoordinaten X = 0, Y = 0, Z = 0 ein. Danach wählen Sie Menü “Einzelknoten erzeugen” um den Knoten 1 in das FEM-Netz zu addieren.

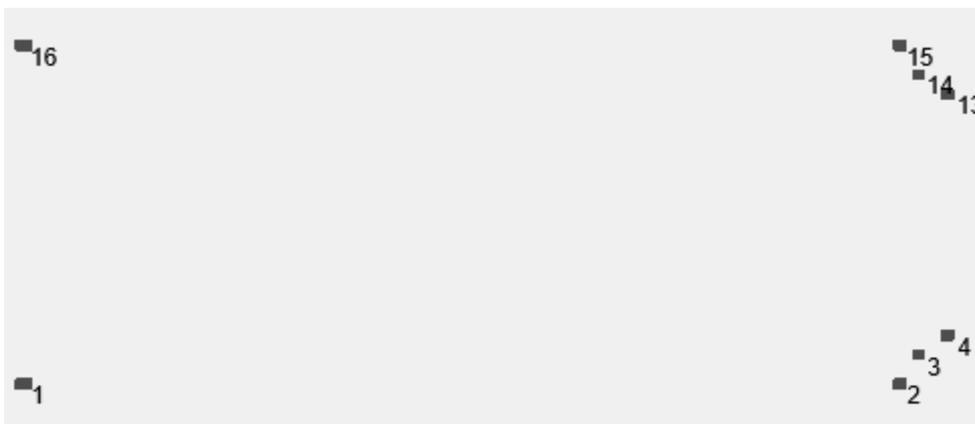
Wiederholen Sie die Eingabe bis zum letzten Knoten:

Wählen Sie im Linien-Modus das Menü “Neu” um den Knoten 16 zu erzeugen und geben die Knotenkoordinaten X = 0, Y = 14, Z = 0 ein. Danach wählen Sie Menü “Einzelknoten erzeugen” um den Knoten 16 in das FEM-Netz zu addieren.

Nach der Eingabe werden alle 16 Knotenpunkte numeriert dargestellt:

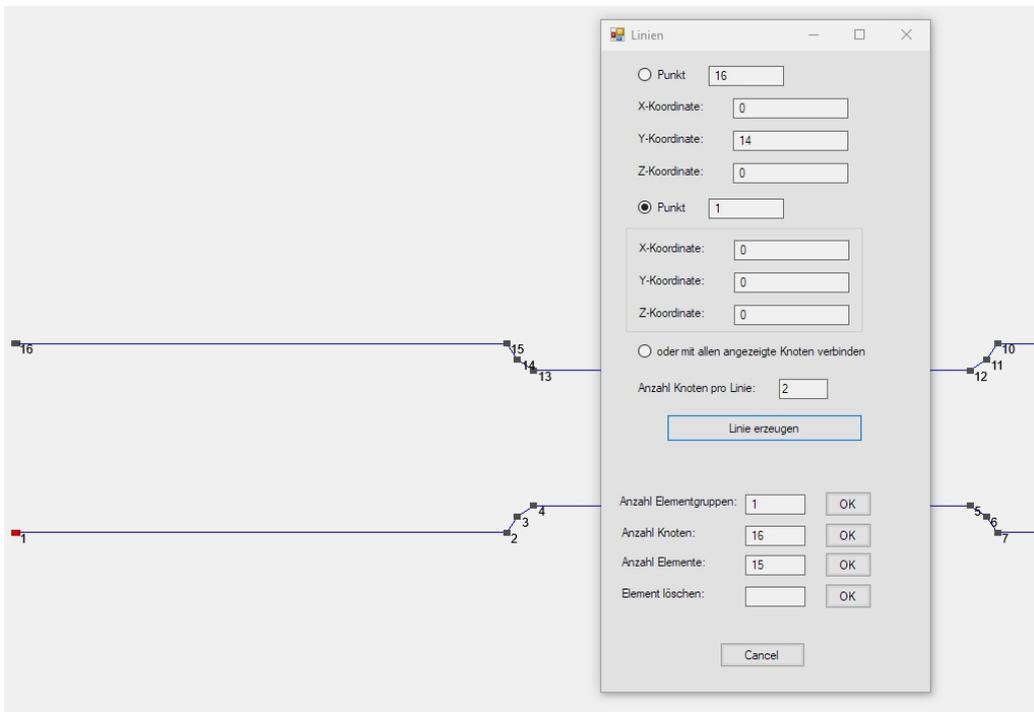


und mit “Knoten-Size editieren” und “Größe=0.02” vergrößert:



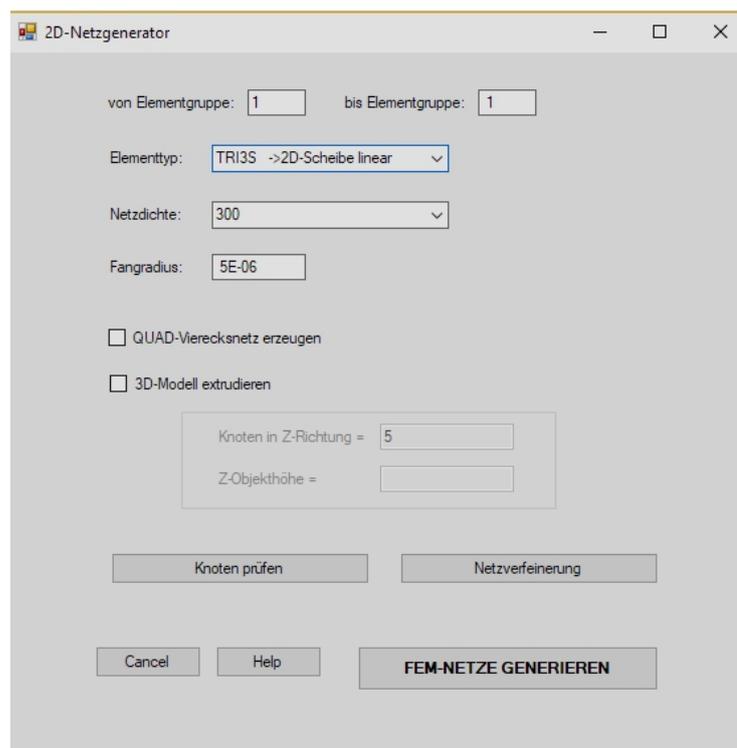
Linien erzeugen

Verbinden Sie im Linien-Modus mit Menü "Linien verbinden" nun alle Knoten zu einer Außenlinie.

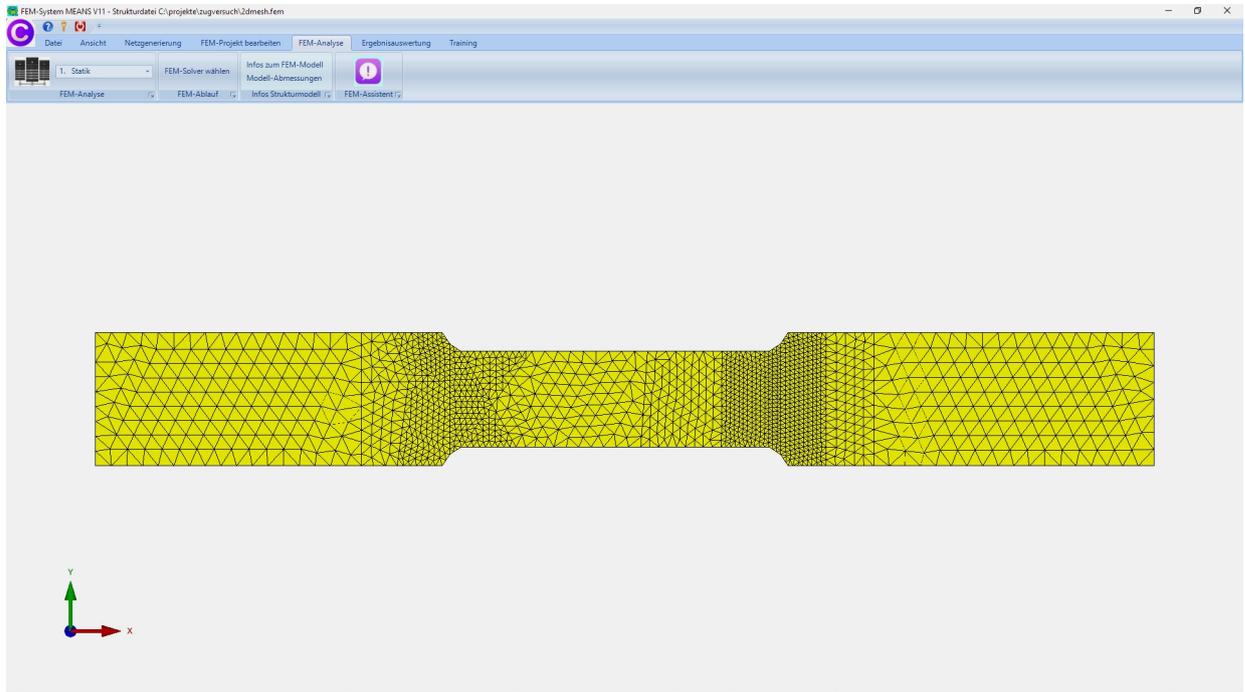


Netzgenerierung

Sichern Sie nun das Linienmodell unter einem beliebigen Namen und wählen Menü „2D-Netzgenerator“ um ein Netz mit dem Elementtyp "TRI3S" und einer Netzdichte von "300" zu generieren.

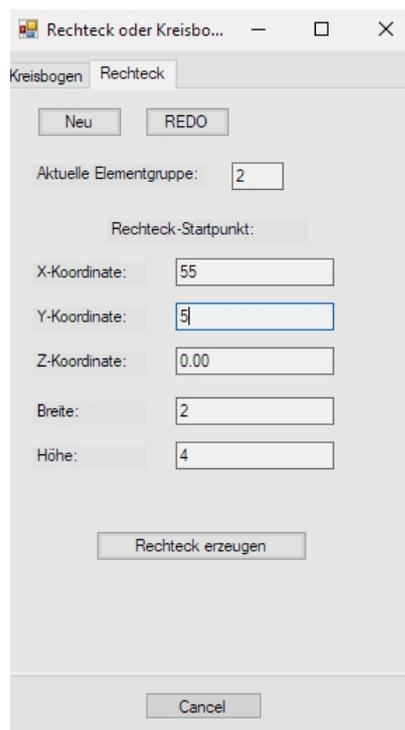


Wählen Sie die Ansicht „Von Vorne“ damit das 2D-Netz in der XY-Ebene zu sehen ist, dannach wählen Sie das Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und „Elementgruppen“ um der Elementgruppe eine beliebige Farbe z.B. Gelb zu geben.
Nach der 2D-Netzgenerierung erhält man ein FEM-Netz bestehend aus 2955 TRI3S-Scheibenelementen und 1596 Knotenpunkten



Verfeinerung

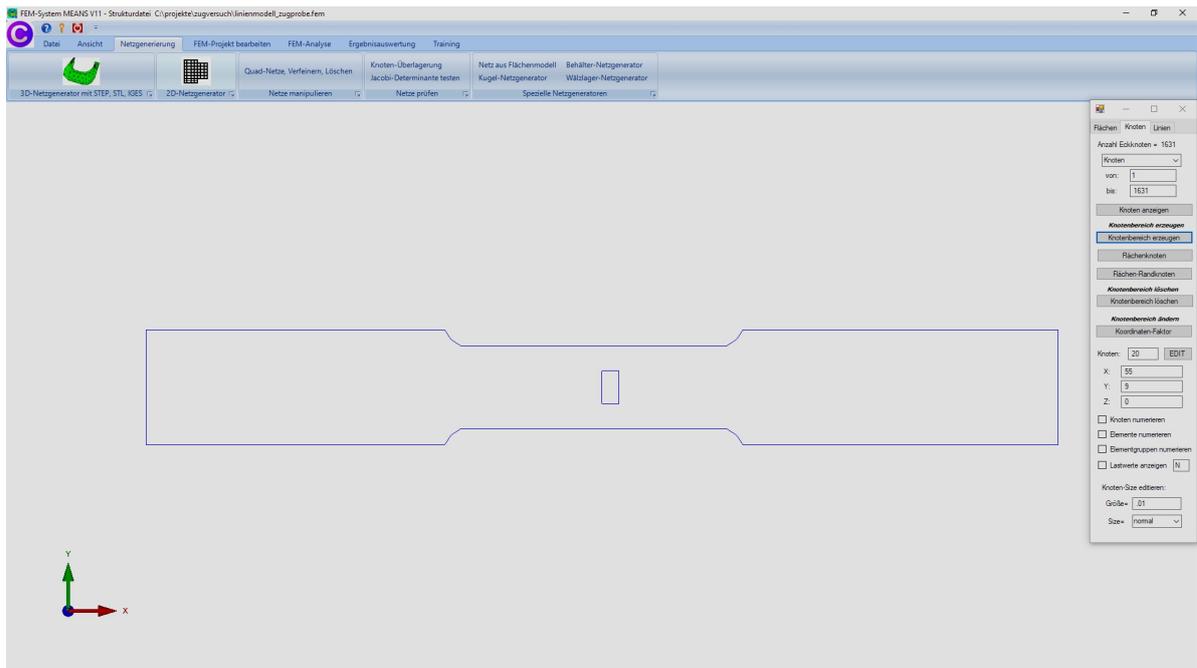
Verfeinern Sie das Linienmodell indem Sie in der Mitte bei $X= 55$, $Y=5$, $Z=0$ mit der Breite=2 und der Höhe =4 ein Rechteck mit der Elementgruppe 2 einfügen.



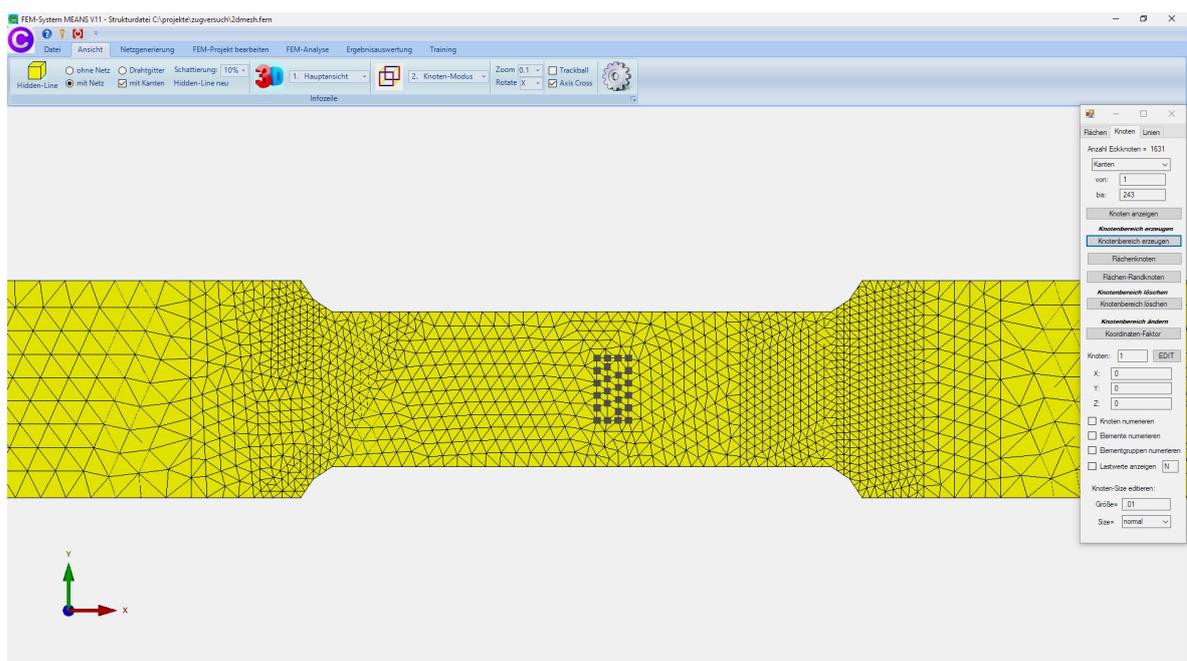
Wählen Sie im 2D-Netzgenerator "Netzverfeinerung" und geben folgende 2 Zeilen ein.

	No.	Main Group	Subgroup	Refine	Holes	Mesh Density
▶	1	1	0	0	0	0
*	2	2	1	1	0	0

Wiederholen Sie die Netzgenerierung mit diesem erweiterten Linienmodell



und man erhält im FEM-Netz eine Knotenreihe bei X=55 für die X-Randbedingungen.

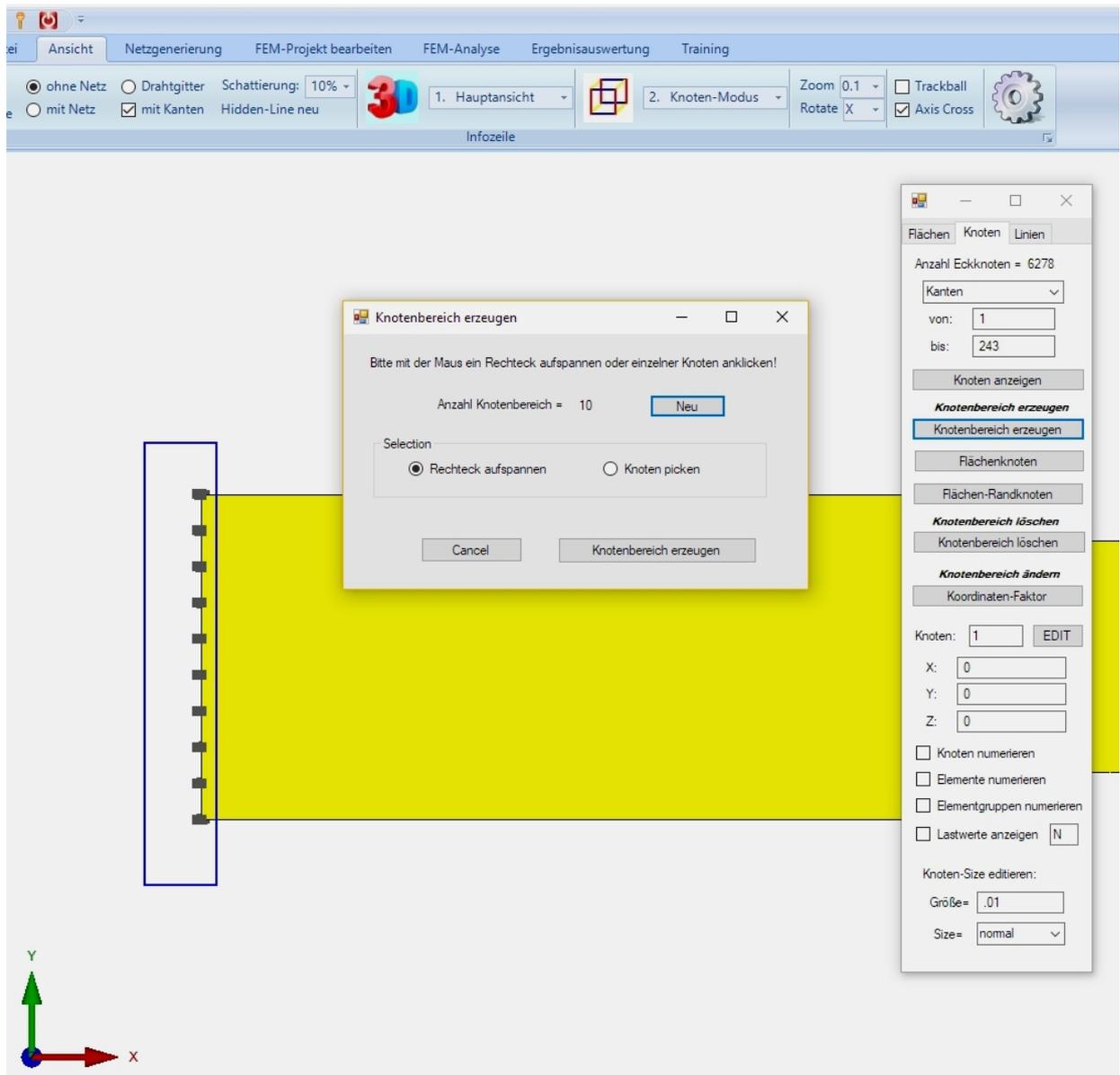


Eingabe der Zugbelastung

Die Zuglast von 5000 N wird zuerst in eine Linienlast $5000 \text{ N} / 14 \text{ mm} = 357.14 \text{ N/m}$ umgerechnet damit eine gleichmäßige Kraftverteilung auf beiden Seiten erreicht wird.

Eingabe der Linienlast mit einem Knotenbereich

Erzeugen Sie zuerst im Knoten-Modus einen Knotenbereich indem Sie ein Rechteck mit gedrückter linker Maustaste über den linken Seitenrand aufspannen und loslassen., dann wählen Sie Register "FEM-Projekt bearbeiten" und "Linienbelastung"

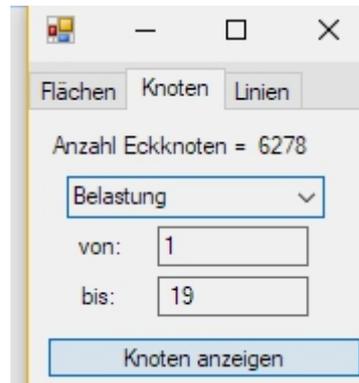


Geben Sie Lastfall 1 ein mit dem Lastwert "-357.14" in "X-Richtung" mit der Selektion "alle angezeigten Knoten" und wählen "Belastung erzeugen".

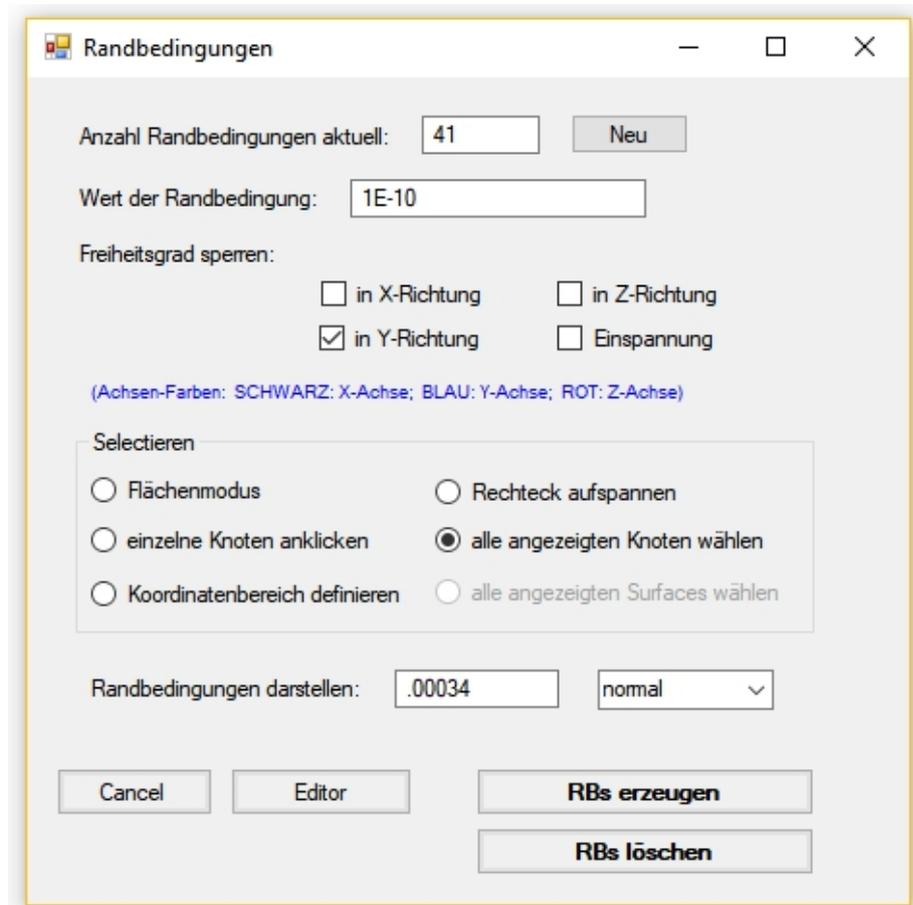
Randbedingungen erzeugen

Damit sich die Zugprobe gleichmäßig nach links und rechts verformen kann werden die Knotenpunkte der Linienlast in Y-Richtung sowie in der Probenmitte die Knoten bei $X=55$ in X-Richtung gesperrt.

Im Knoten-Modus und “Belastungen” zuerst die Knotenpunkte der Belastungen als Knotenbereich darstellen,



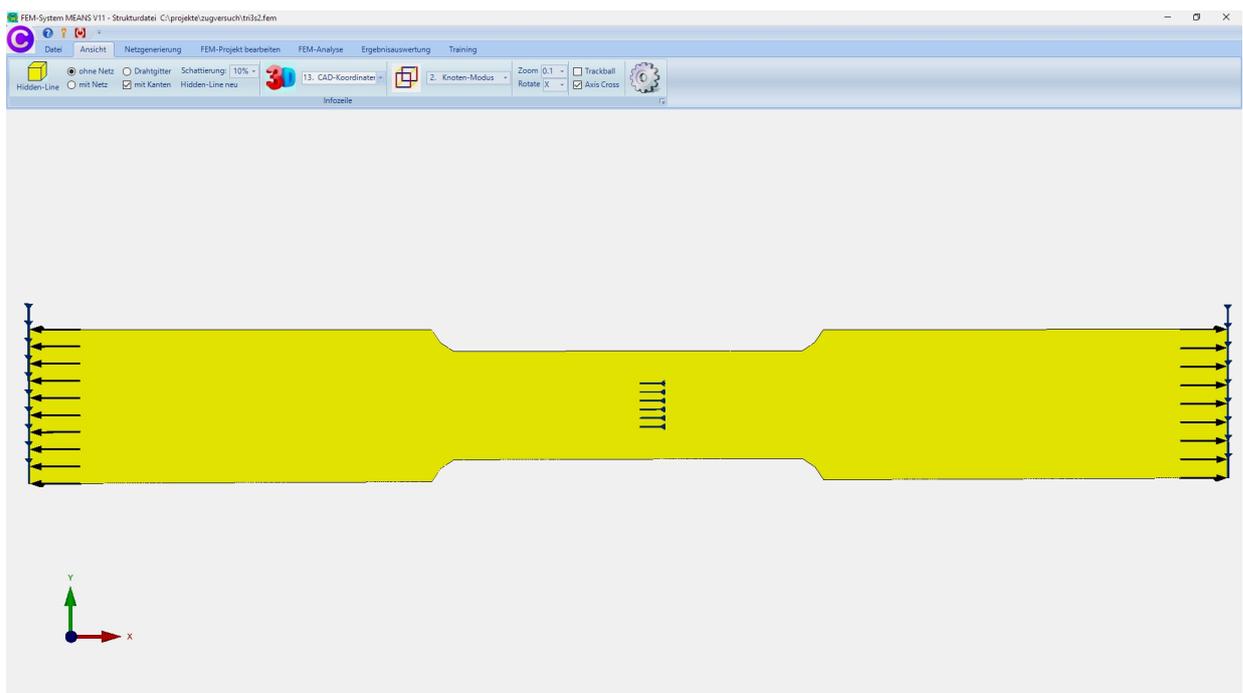
dann mit Register “FEM-Projekt bearbeiten” und “Randbedingungen” mit der Selektion “alle angezeigten Knoten” die Knoten in Y-Richtung sperren.



Die Randbedingungen in X-Richtung bei $X=55$ kann man am einfachsten mit der Selektion "Koordinatenbereich definieren" erzeugen.

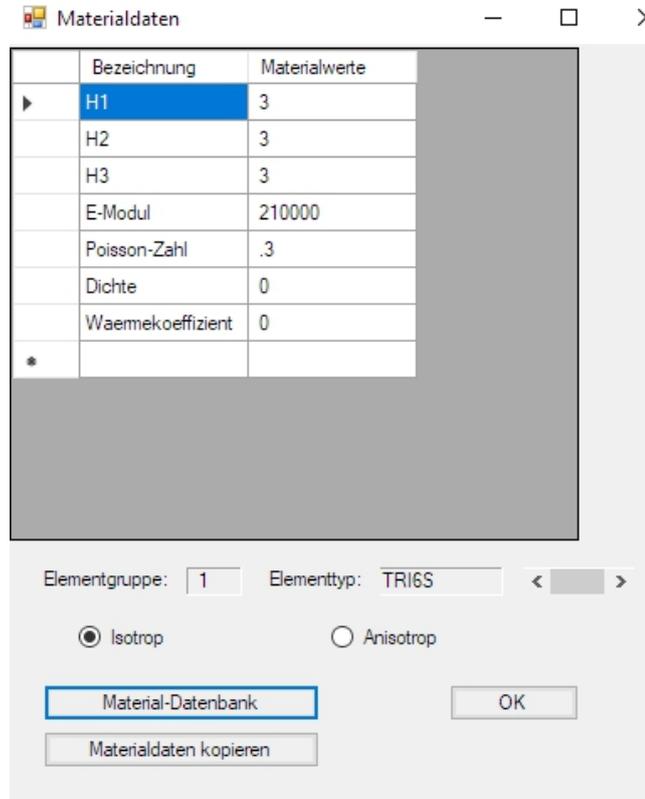


FEM-Netz mit Belastungen und Randbedingungen



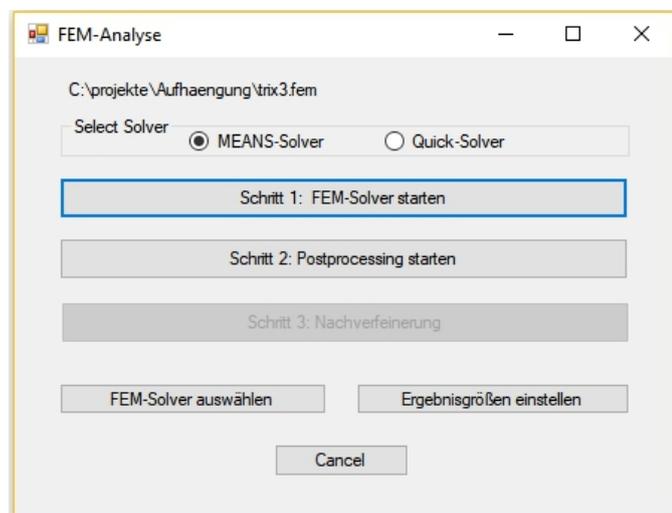
Materialdaten eingeben

Wählen Sie das Register “FEM-Projekt bearbeiten” und “Materialdaten” um den E-Modul und die Poisson-Zahl für Stahl einzugeben. Ebenfalls müssen hier noch die drei Wandstärken $H_{1,2,3} = 3 \text{ mm}$ für das dreieckige TRI3S-Scheibenmodell eingegeben werden.



Lineare Statik-Analyse

Sichern Sie jetzt das Modell mit Register “Datei” und “Sichern” unter einem Namen in das Projekt-Verzeichnis ab und wählen Register “FEM-Analyse” und “Statik” um die Verformungen und Spannungen mit dem MEANS-Solver oder Quick-Solver zu berechnen.



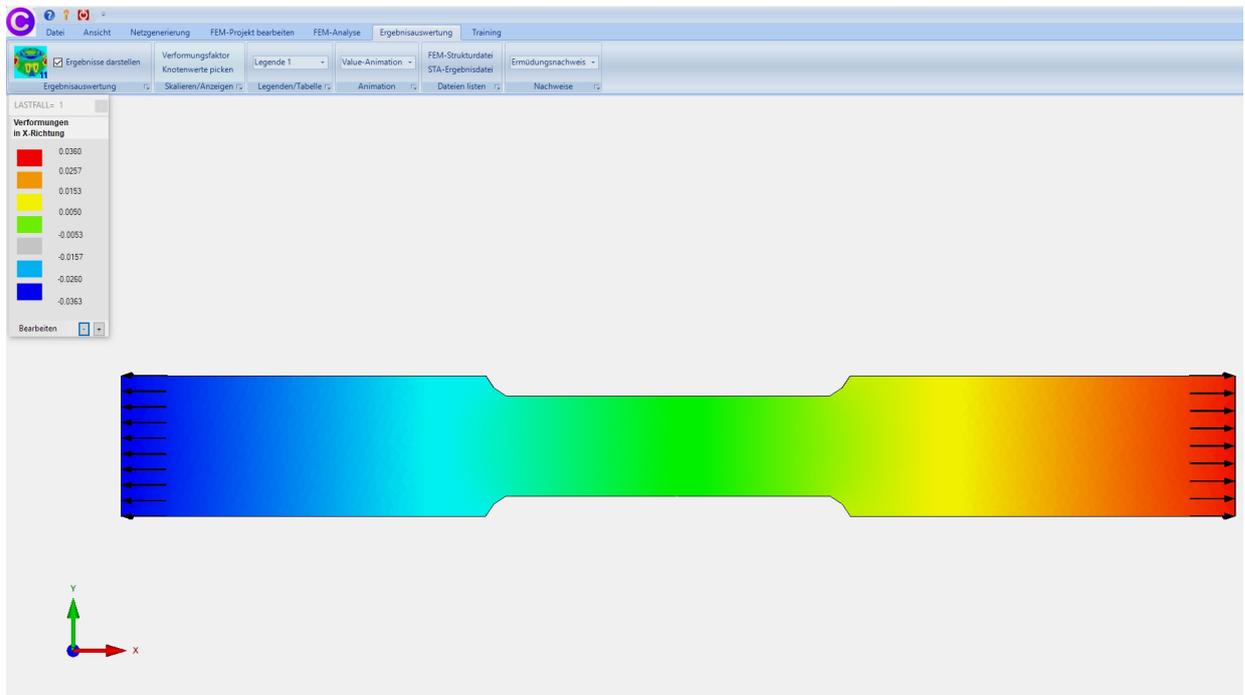
Postprocessing



Wählen Sie das Register “Ergebnisauswertung” und das Icon  um die Verformungen und Spannungen für die lineare Statikberechnung darzustellen.

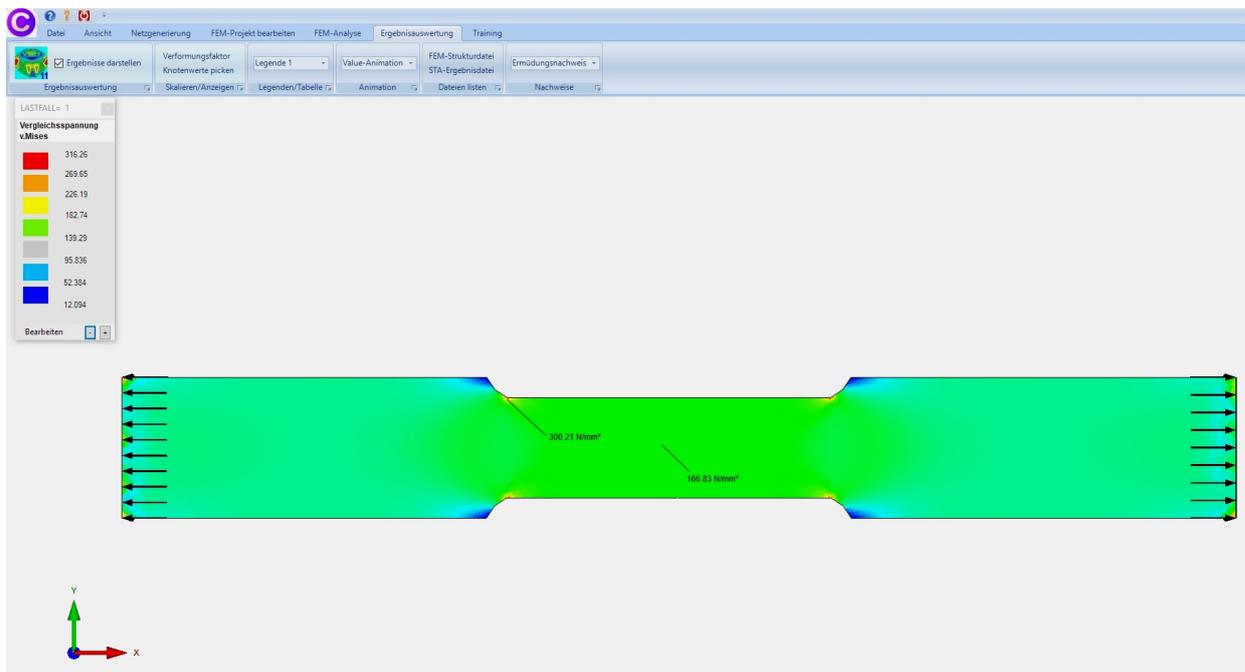
Max. Verformungen in X-Richtung

Die maximalen Verformungen in X-Richtung betragen -0.0363 mm



Max. v.Mises-Knotenspannungen

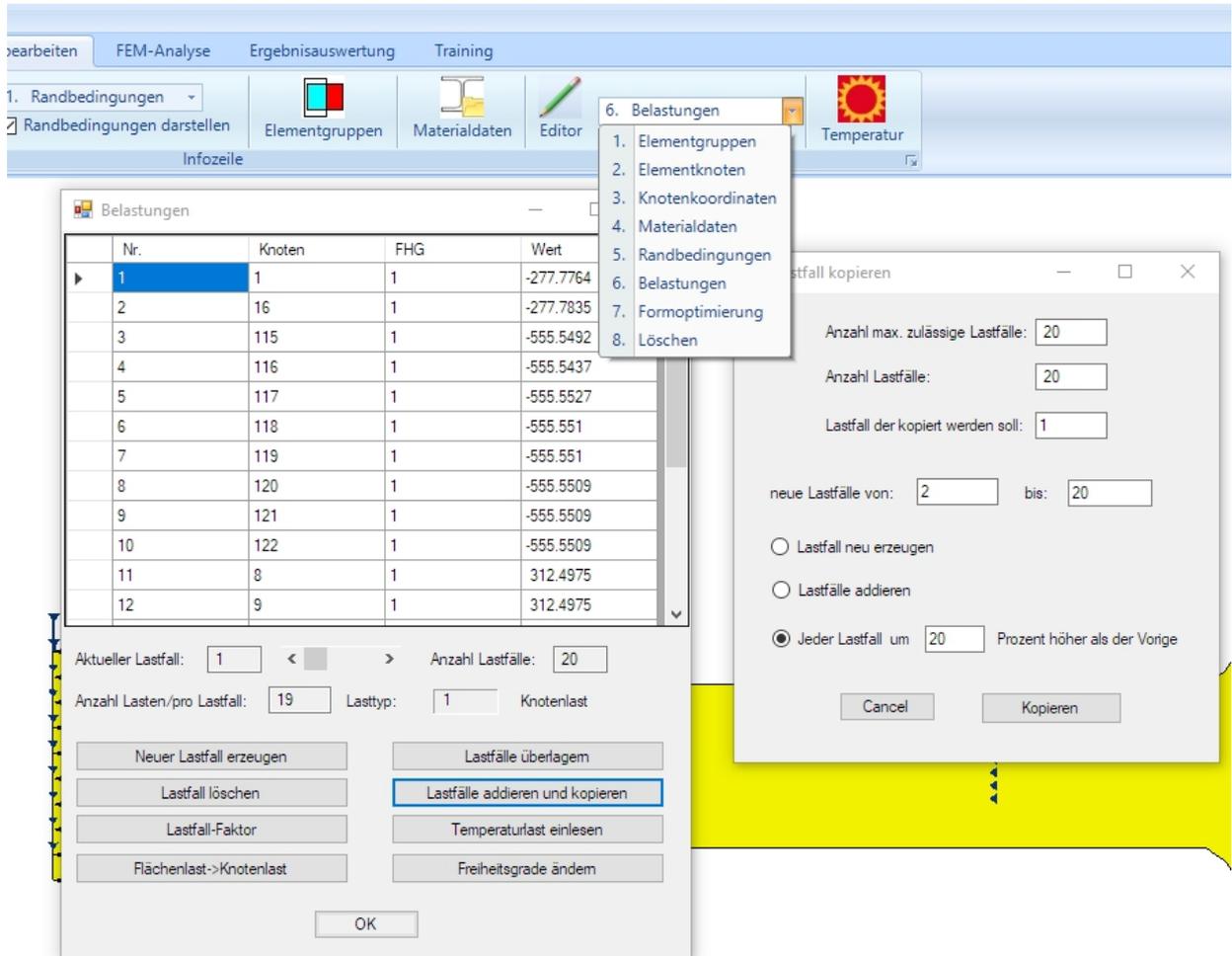
Die v.Mises-Knotenspannungen in der Mitte betragen 167 MPa



Eingabe eines Lastbereiches

Es folgt eine nichtlineare FEM-Analyse indem die Zugprobe von 5000 N bis 25000 N schrittweise höher belastet werden soll. Geben Sie nun diesen Lastbereich ein indem Sie das Register "FEM-Projekt bearbeiten" und "Belastungen" wählen.

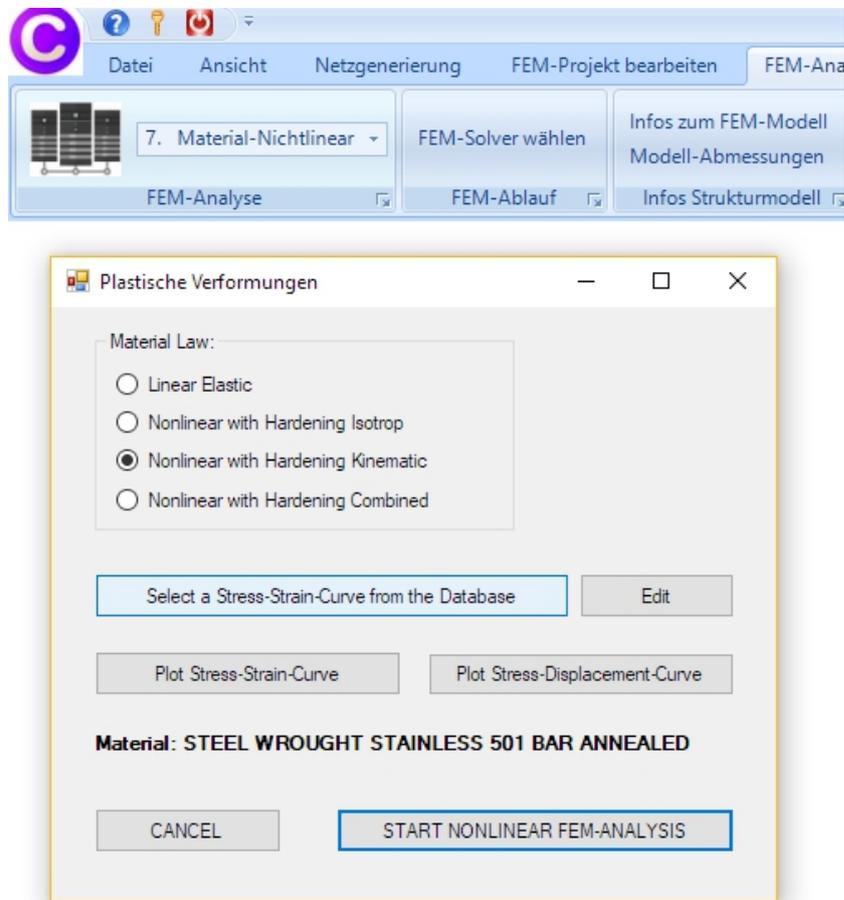
Im Editor wählen Sie "Lastfälle addieren und kopieren" und kopieren Lastfall 1 auf die neuen Lastfälle von 2 bis 20 mit der Option "Jeder Lastfall um 20% höher als der Vorige".



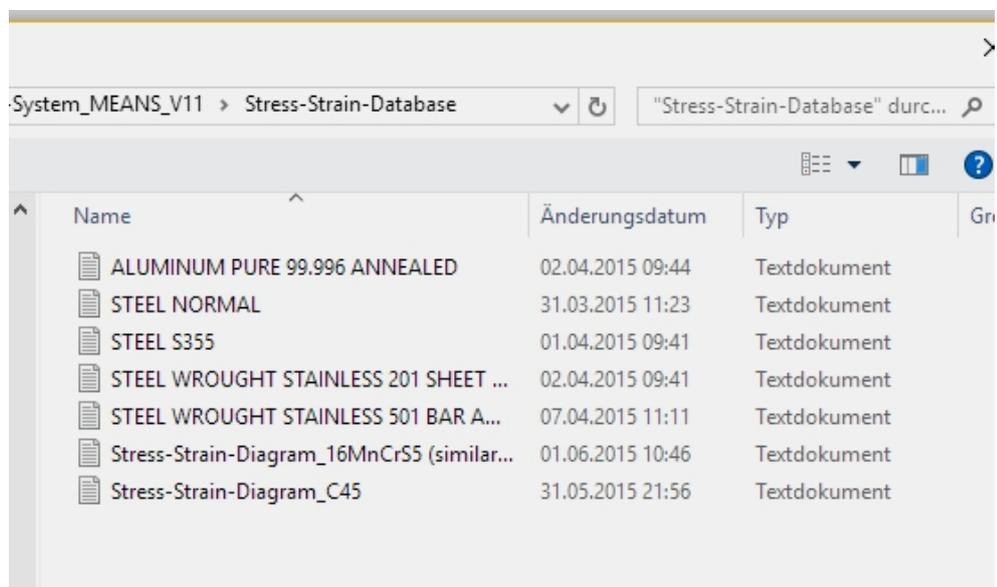
Jetzt muß das FEM-Modell unter einem anderen Namen neu abgespeichert werden.

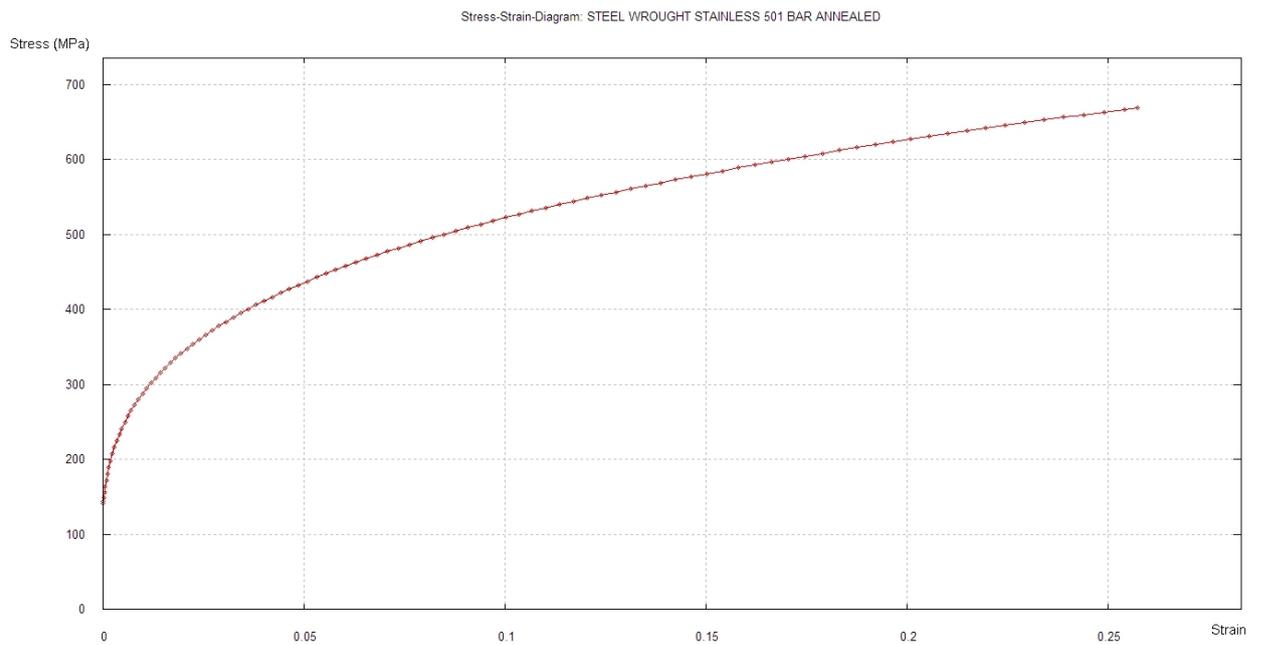
Nichtlineare Statik-Analyse für Stahl

Wählen Sie den FEM-Solver mit Register "FEM-Analyse" und "Material-Nichtlinear" und wählen mit "Select a Stress-Strain-Curve from the Database" die Spannungs-Dehnungs-Kurve "STEEL WROUGHT STAINLESS 501 BAR ANNEALED" aus und starten die "START NONLINEAR FEM-ANALYSIS" die nichtlineare Analyse um die Verformungen und Spannungen iterativ zu berechnen.

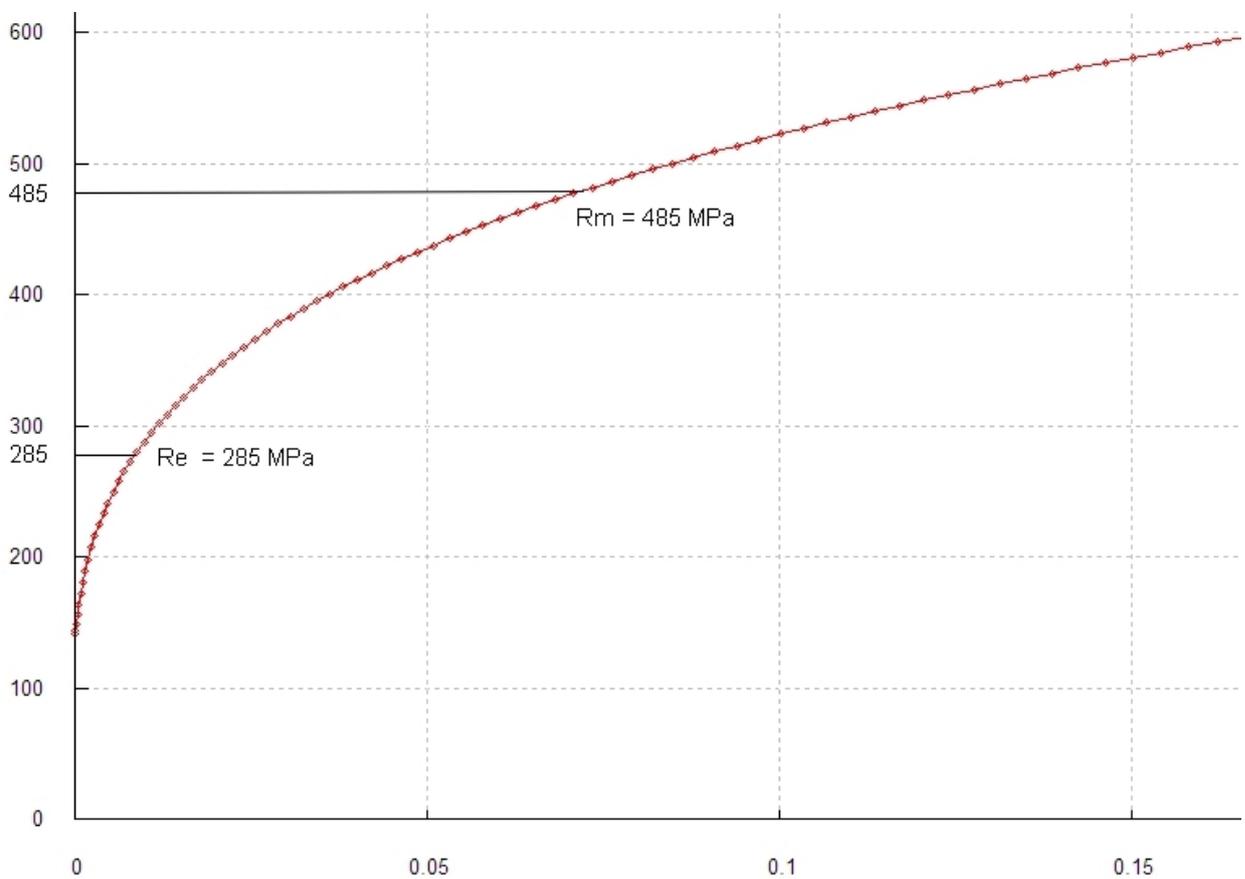


Stress-Strain-Datenbank die mit Notepad beliebig erweitert werden kann:



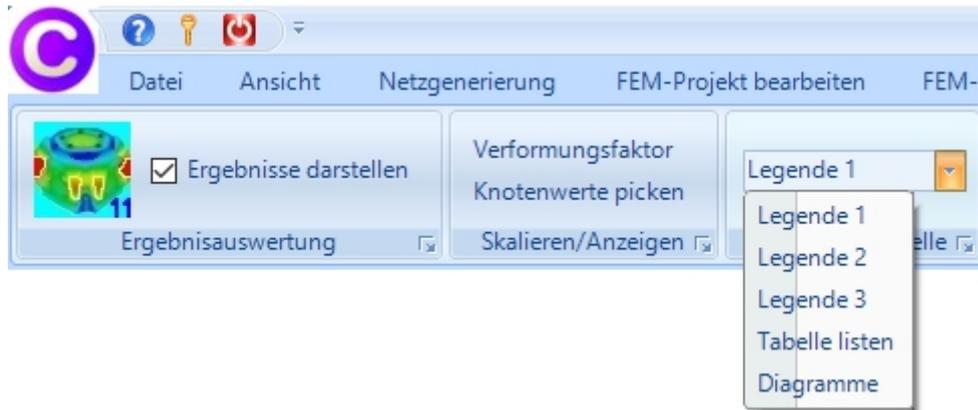
Spannungs-Dehnungs-Diagramm STEEL WROUGHT STAINLESS 501

STEEL WROUGHT STAINLESS 501BAR ANNEALED ist ein gehärteter Edelstahl und ist unter der EU-Bezeichnung "12CrMo19-5" mit der Streckgrenze $R_e = 285$ MPa und der Zugfestigkeit $R_m = 485$ MPa bekannt.



Postprocessing

Nach der FEM-Analyse wählen Sie das Register “Ergebnisauswertung” und das Menü “Diagramm” um die Verformungen und Spannungen für einen bestimmten Knoten für alle Lastfälle übersichtlich aufzulisten.



Geben Sie den Lastfallbereich ein sowie Knoten 114 für die Verformungen und den Knoten 2364 für die Spannungen und wählen “Starten”. Nach der Auflistung wählen Sie “Stress-Displacement-Diagramm” oder “Stress-Load-Diagramm”.

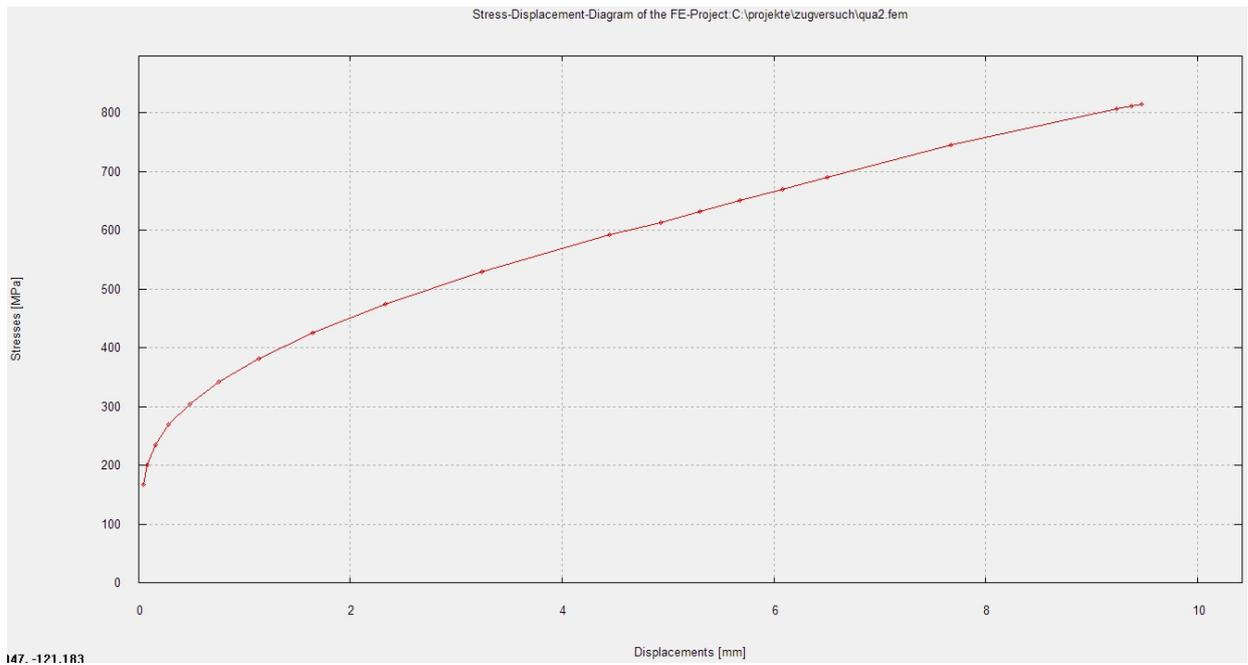
Stress-Displacement-Diagramm

Anzahl Lastfälle = Knoten für Verformungen = in FEM-File: C:\projekte\zugversuch\qua2.fem
 Knoten für Spannungen = Result-File: C:\projekte\zugversuch\qua2.FRD

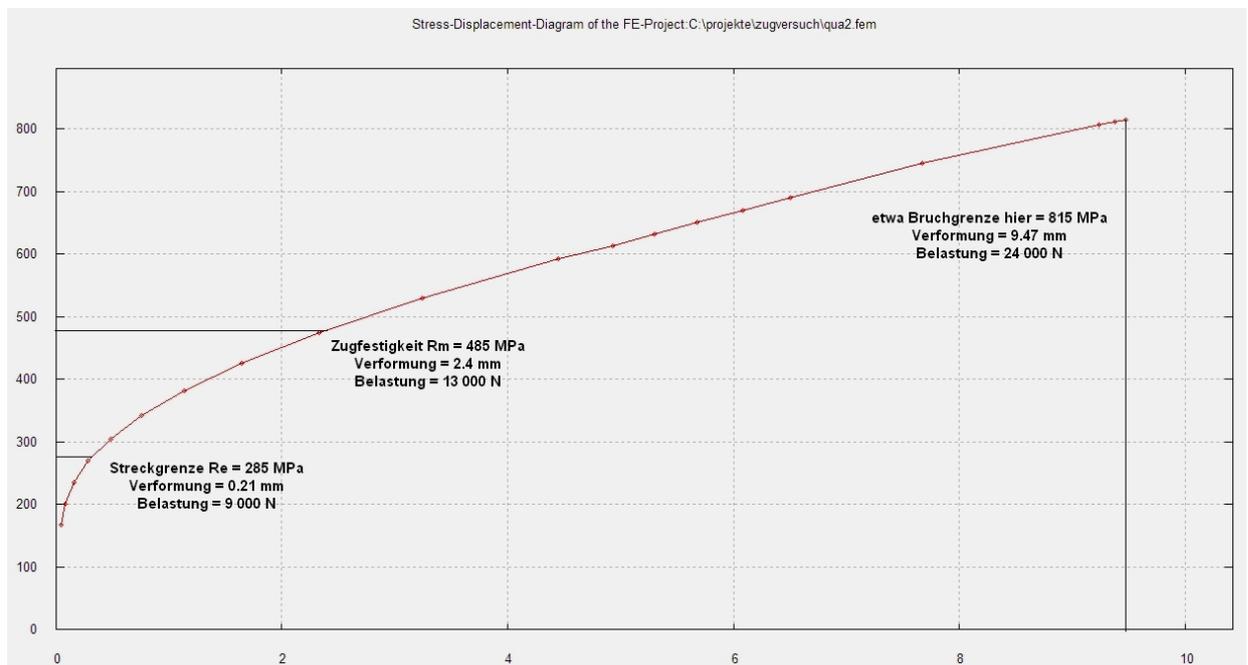
LF	Knoten	X-Verformung	Y-Verformung	Z-Verformung	Knoten	Spannung	Last FX
1	114	0.04404	0.00	0.00	2364	166.65	4999.96
2	114	0.07963	0.00	0.00	2364	200.29	5999.95
3	114	0.15763	0.00	0.00	2364	234.33	6999.95
4	114	0.28657	0.00	0.00	2364	269.07	7999.94
5	114	0.48068	0.00	0.00	2364	304.98	8999.93
6	114	0.75515	0.00	0.00	2364	342.46	9999.92
7	114	1.13250	0.00	0.00	2364	382.24	10999.91
8	114	1.64509	0.00	0.00	2364	425.45	11999.91
9	114	2.33308	0.00	0.00	2364	474.18	12999.90
10	114	3.24294	0.00	0.00	2364	528.96	13999.89
11	114	4.44930	0.00	0.00	2364	593.14	14999.88
12	114	4.93158	0.00	0.00	2364	613.71	15999.87
13	114	5.29819	0.00	0.00	2364	632.02	16999.87
14	114	5.67714	0.00	0.00	2364	650.87	17999.86
15	114	6.07950	0.00	0.00	2364	670.46	18999.85
16	114	6.50883	0.00	0.00	2364	690.87	19999.84
17	114	7.67638	0.00	0.00	2364	745.37	20999.84
18	114	9.23725	0.00	0.00	2364	807.74	21999.83
19	114	9.37998	0.00	0.00	2364	811.77	22999.82
20	114	9.47485	0.00	0.00	2364	815.52	23999.81

Gesamt: 289997.8

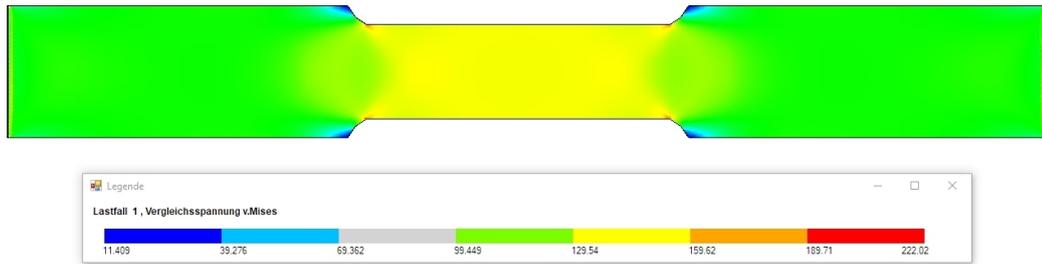
Fertig, die Diagramme können nun dargestellt werden!



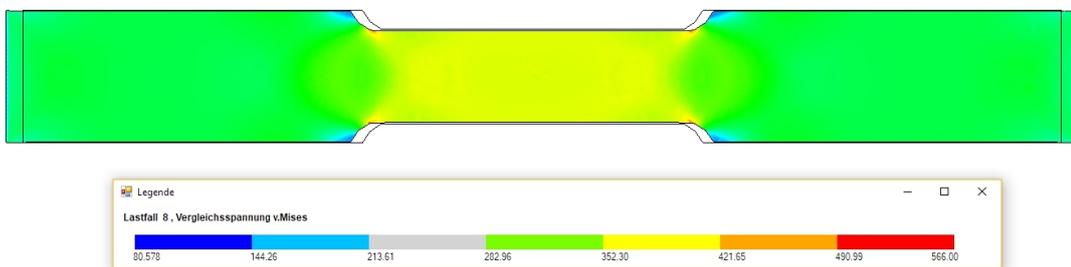
Im Diagramm kann jetzt abgelesen werden bei welcher Zugkraft **ungefähr** die Streckgrenze und Zugfestigkeit sowie die maximale X-Verformung liegen. Die Ergebnisse aus einem Zugkraftversuch stimmen auch relativ gut mit MEANS V11 überein: <https://www.lehrerfreund.de/technik/1s/werkstoffpruefung-1-zugversuch/3826>



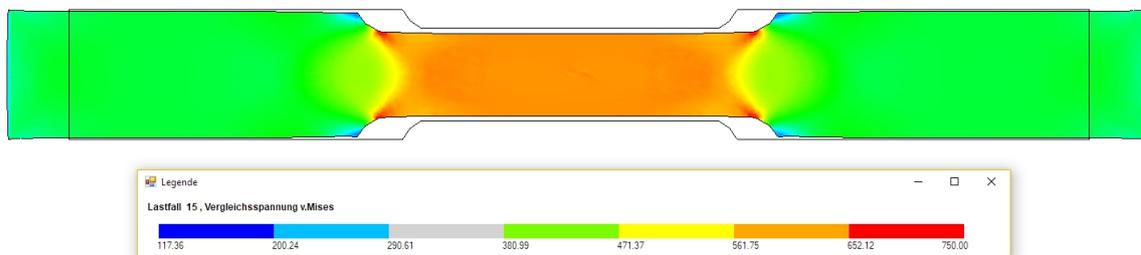
Lastfall 1: Zugkraft = 5000 N, max. X-Verformung = 0.044 mm, v.Mises = 167 MPa



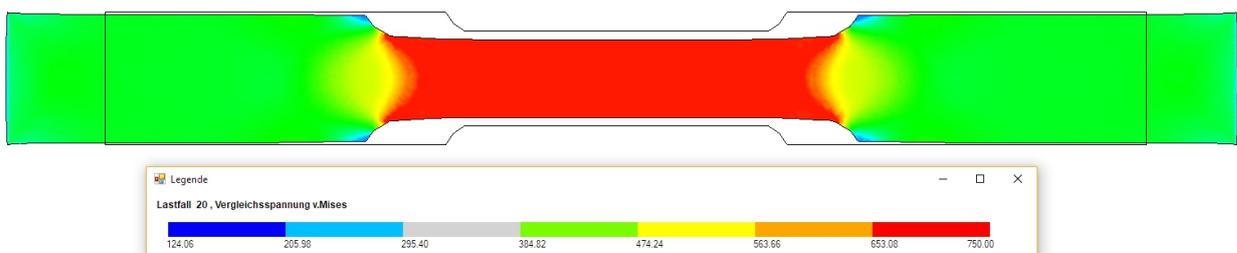
Lastfall 8: Zugkraft = 12 000 N, max. X-Verformung = 1.64 mm, v.Mises = 425 MPa



Lastfall 15: Zugkraft = 19 000 N, max. X-Verformung = 6.07 mm, v.Mises = 670 MPa



Lastfall 20: Zugkraft = 24 000 N, max. X-Verformung = 9.47 mm, v.Mises = 815 MPa

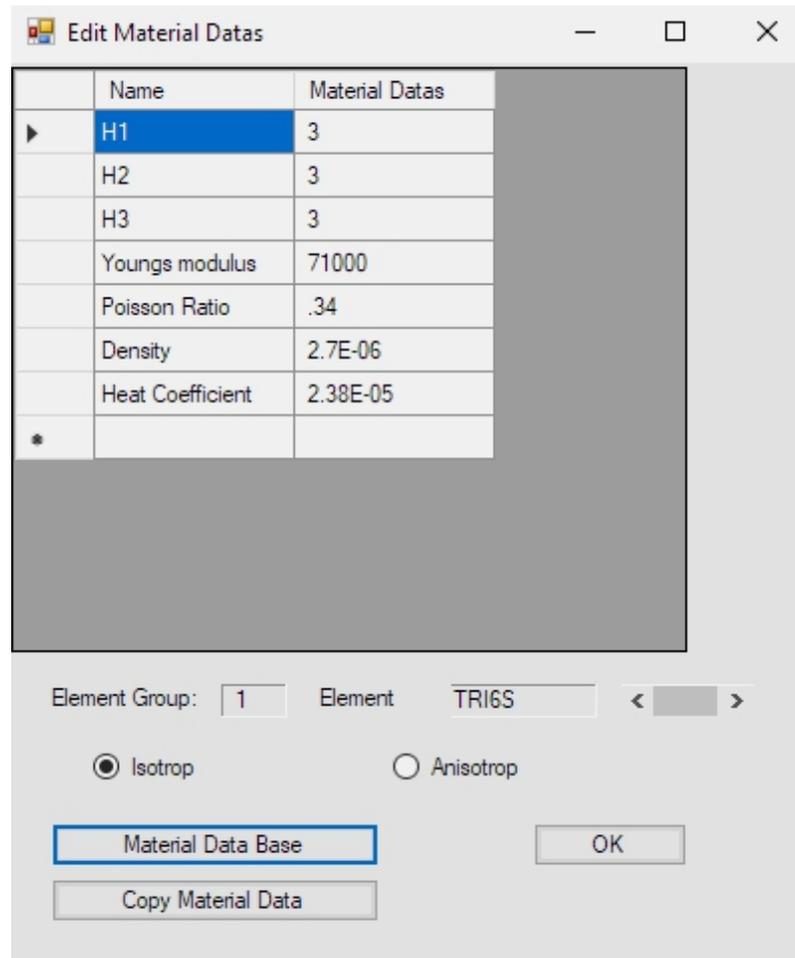


Nichtlineare Statik-Analyse für Aluminium

Es folgt mit der gleichen Zugprobe eine nichtlineare Analyse mit Aluminium um auch für diesen Werkstoff die Zugkraft für die Streckgrenze und Zugfestigkeit zu berechnen.

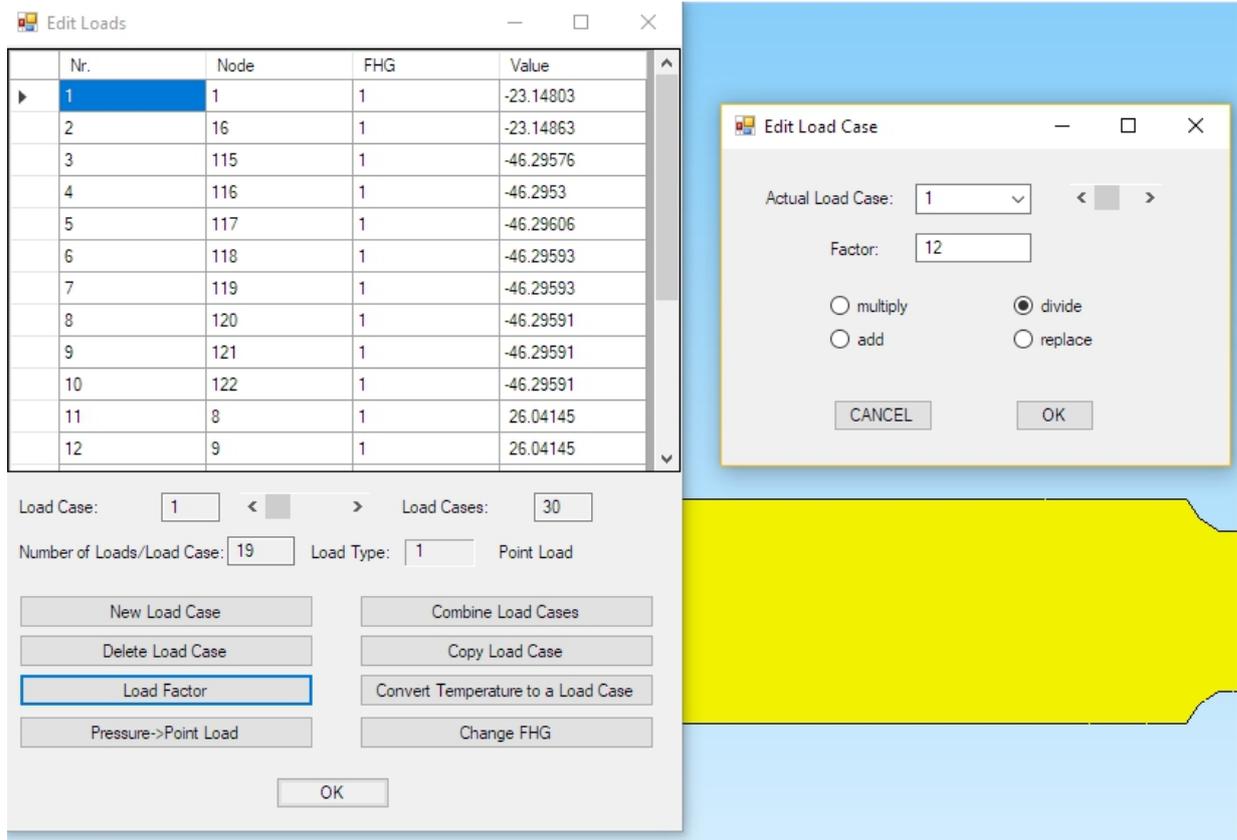
Materialdaten eingeben

Als erstes müssen die Materialdaten von Stahl auf Aluminium umgestellt werden. Wählen Sie Register "FEM-Projekt bearbeiten" und "Materialdaten" um das E-Modul von 71 000 MPa und die Poisson-Zahl von 0.34 einzugeben.



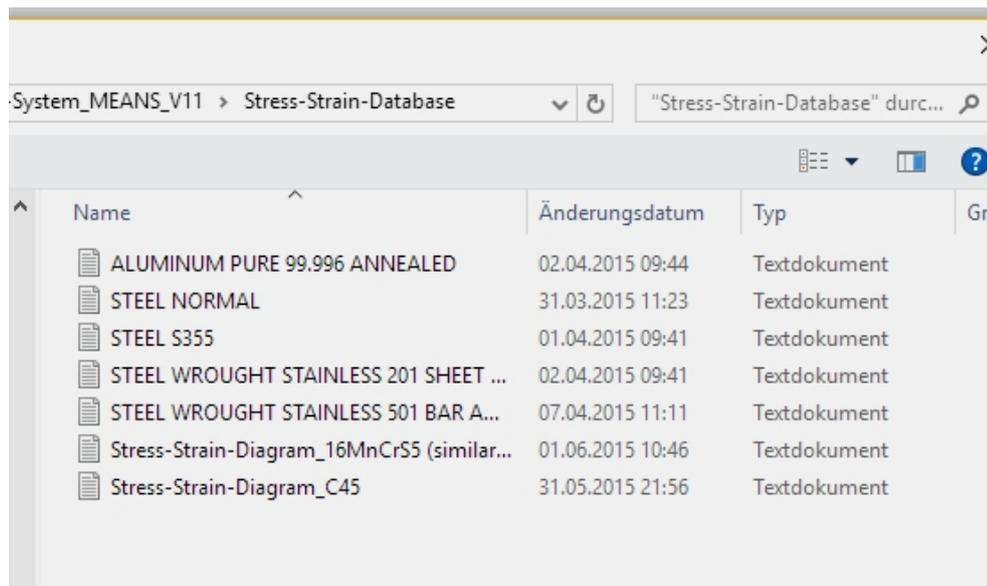
Lastbereich auf Aluminium umstellen

Die Streckgrenze von Alu ist wesentlich kleiner als die von Stahl, darum muß jetzt der Lastbereich entsprechend verkleinert werden. Wählen Sie Register "FEM-Projekt bearbeiten" und "Belastungen" und dividieren Lastfall 1 mit einem Lastfall-Faktor 12. Dannach kopieren Sie wieder Lastfall 1 auf Lastfall 2 bis 20 mit der Option "Jeder Lastfall um 20% höher als der Vorige".



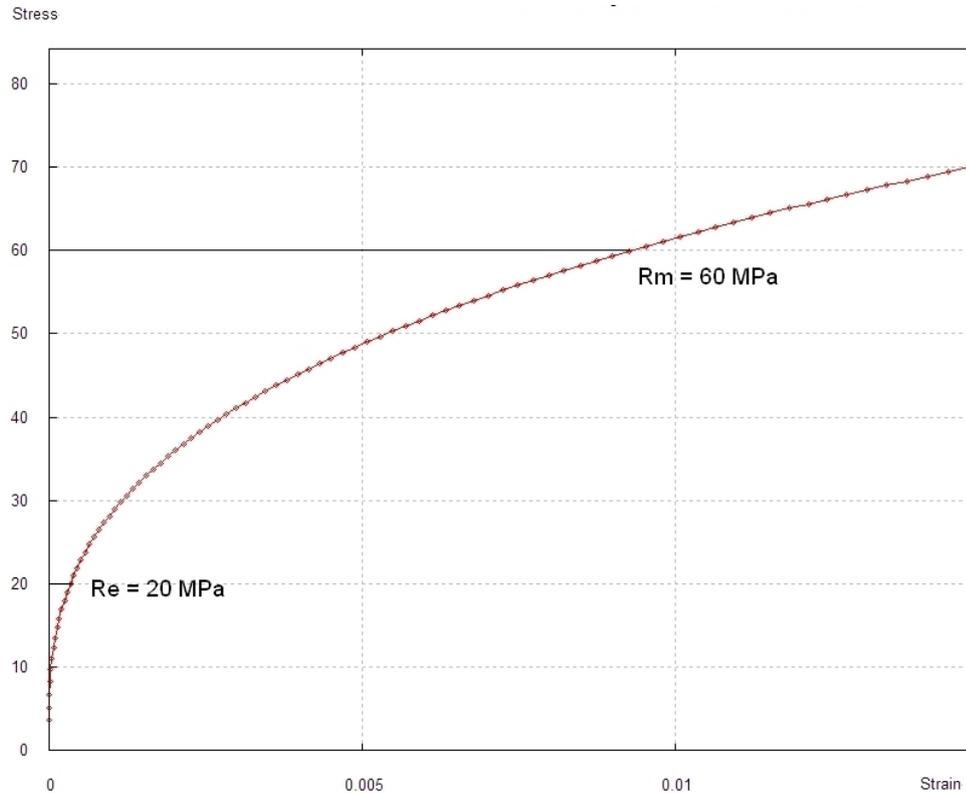
FEM-Solver starten

Wählen Sie den FEM-Solver mit Register "FEM-Analyse" und "Material-Nichtlinear" und wählen diesmal aus der Stress-Strain-Datenbank das Spannungs-Dehnungs-Diagramm "**ALUMINIUM PURE 99.996 ANNEALED**" aus.

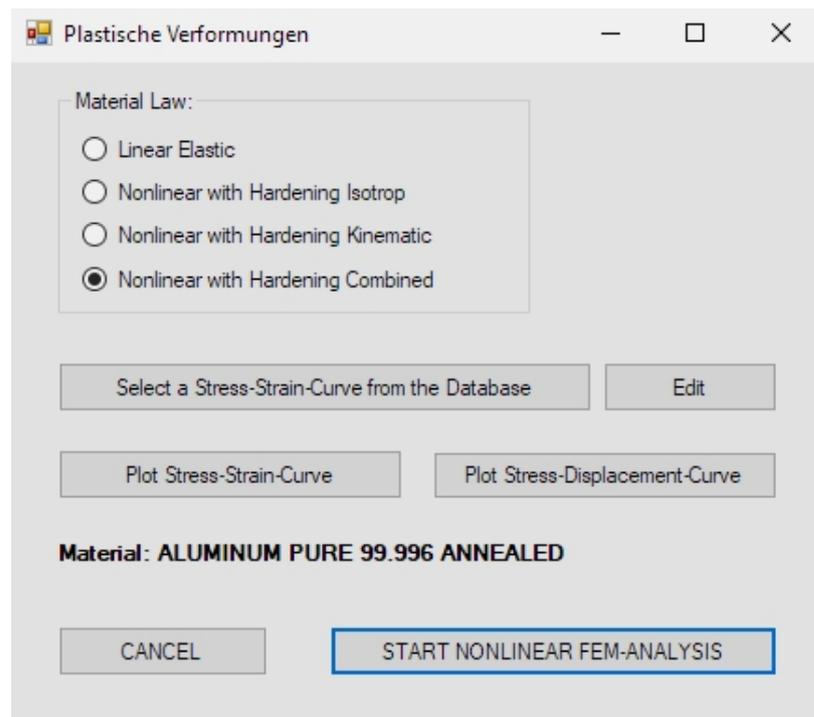


ALUMINIUM PURE 99.996 ANNEALED ist ein weichgeglühtes und reines Aluminium mit einer Streckgrenze von nur $R_e = 20$ MPa und einer Zugfestigkeit von $R_m = 60$ MPa

EN AW 1050 A / Al99,5		nicht aushärtbar						
EN 573 Teil 3			EN 755 Teil 2					
Legierung	Profilart	Zustand	Wandstärke über (mm)	Wandstärke unter (mm)	Rm min (N/mm ²)	Rp0,2 min (N/mm ²)	A min [%]	A50 min [%]
EN AW		F, H112 ⁶⁾	alle		60	20	25	23

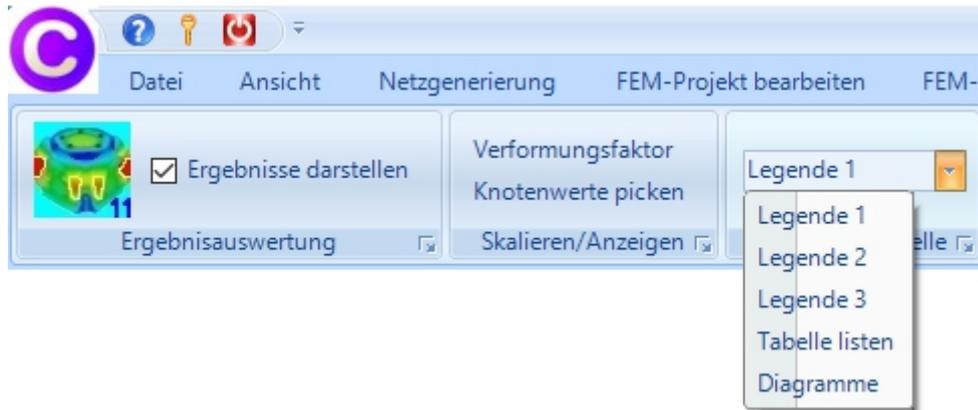


Wählen Sie “Nonlinear with Hardening Combined” sowie “START NONLINEAR FEM-ANALYSIS” um die Verformungen und Spannungen iterativ zu berechnen.



Postprocessing

Nach der FEM-Analyse wählen Sie das Register “Ergebnisauswertung” und das Menü “Diagramm” um die Verformungen und Spannungen für einen bestimmten Knoten für alle Lastfälle übersichtlich aufzulisten.



Geben Sie den Lastfallbereich ein sowie Knoten 114 für die Verformungen und den Knoten 13 für die Spannungen und wählen “Starten”. Nach der Auflistung wählen Sie “Stress-Displacement-Diagramm” oder “Stress-Load-Diagramm” um die Zugkraft bei der Streckgrenze und Zugfestigkeit abzulesen.

Stress-Displacement-Diagramm

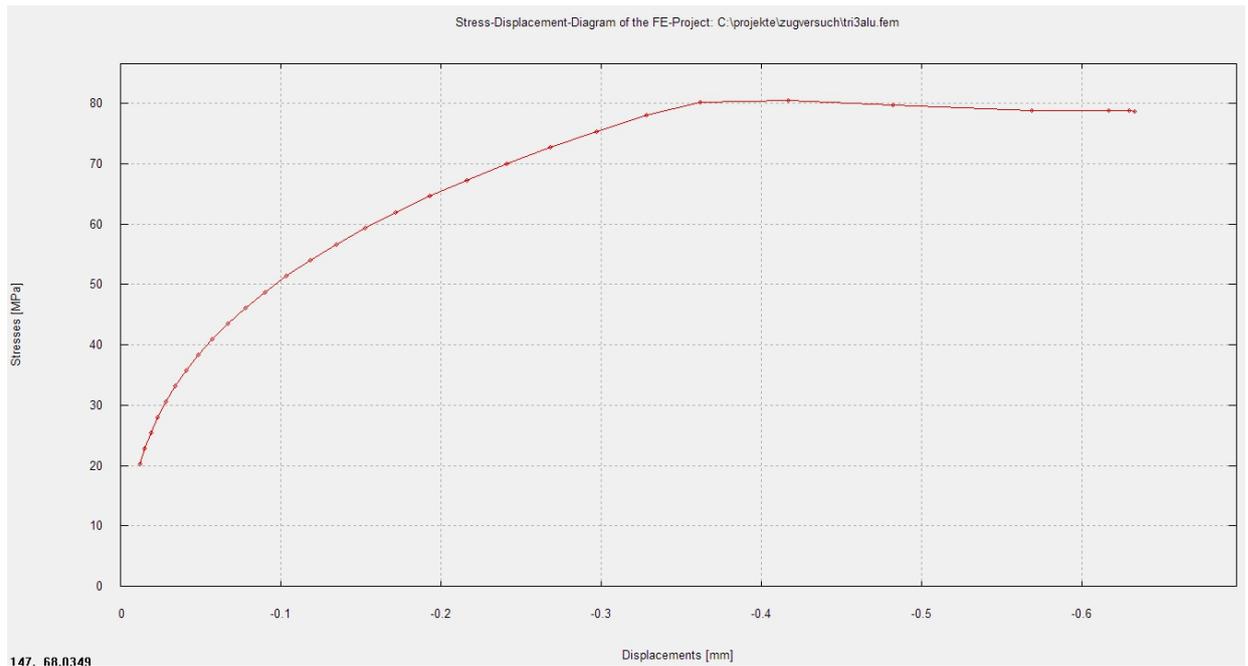
Load Cases: Node for Displacement: FEM-File: C:\projekte\zugversuch\tri3alu.fem
 Node for Stresses: Result-File: C:\projekte\zugversuch\tri3alu.FRD

LC	Node	X-Displacement	Y-Displacement	Z-Displacement	Node	Stress	Load FX
9	114	-0.05735	0.00	0.00	13	40.892	-916.66
10	114	-0.06710	0.00	0.00	13	43.501	-979.16
11	114	-0.07799	0.00	0.00	13	46.118	-1041.66
12	114	-0.09012	0.00	0.00	13	48.742	-1104.16
13	114	-0.10355	0.00	0.00	13	51.373	-1166.66
14	114	-0.11838	0.00	0.00	13	54.010	-1229.16
15	114	-0.13468	0.00	0.00	13	56.655	-1291.66
16	114	-0.15253	0.00	0.00	13	59.306	-1354.16
17	114	-0.17201	0.00	0.00	13	61.965	-1416.66
18	114	-0.19322	0.00	0.00	13	64.629	-1479.16
19	114	-0.21626	0.00	0.00	13	67.302	-1541.66
20	114	-0.24119	-0.01	-0.01	13	69.981	-1604.15
21	114	-0.26813	-0.01	-0.01	13	72.668	-1666.65
22	114	-0.29717	-0.01	-0.01	13	75.364	-1729.15
23	114	-0.32842	-0.01	-0.01	13	78.068	-1791.65
24	114	-0.36199	-0.01	-0.01	13	80.132	-1854.15
25	114	-0.41655	-0.01	-0.01	13	80.499	-1947.11
26	114	-0.48202	-0.01060	-0.01060	13	79.642	-2047.34
27	114	-0.56879	-0.01242	-0.01242	13	78.781	-2165.07
28	114	-0.61667	-0.01342	-0.01342	13	78.759	-2399.29
29	114	-0.62957	-0.01368	-0.01368	13	78.719	-2503.61
30	114	-0.63310	-0.01374	-0.01374	13	78.693	-2607.93

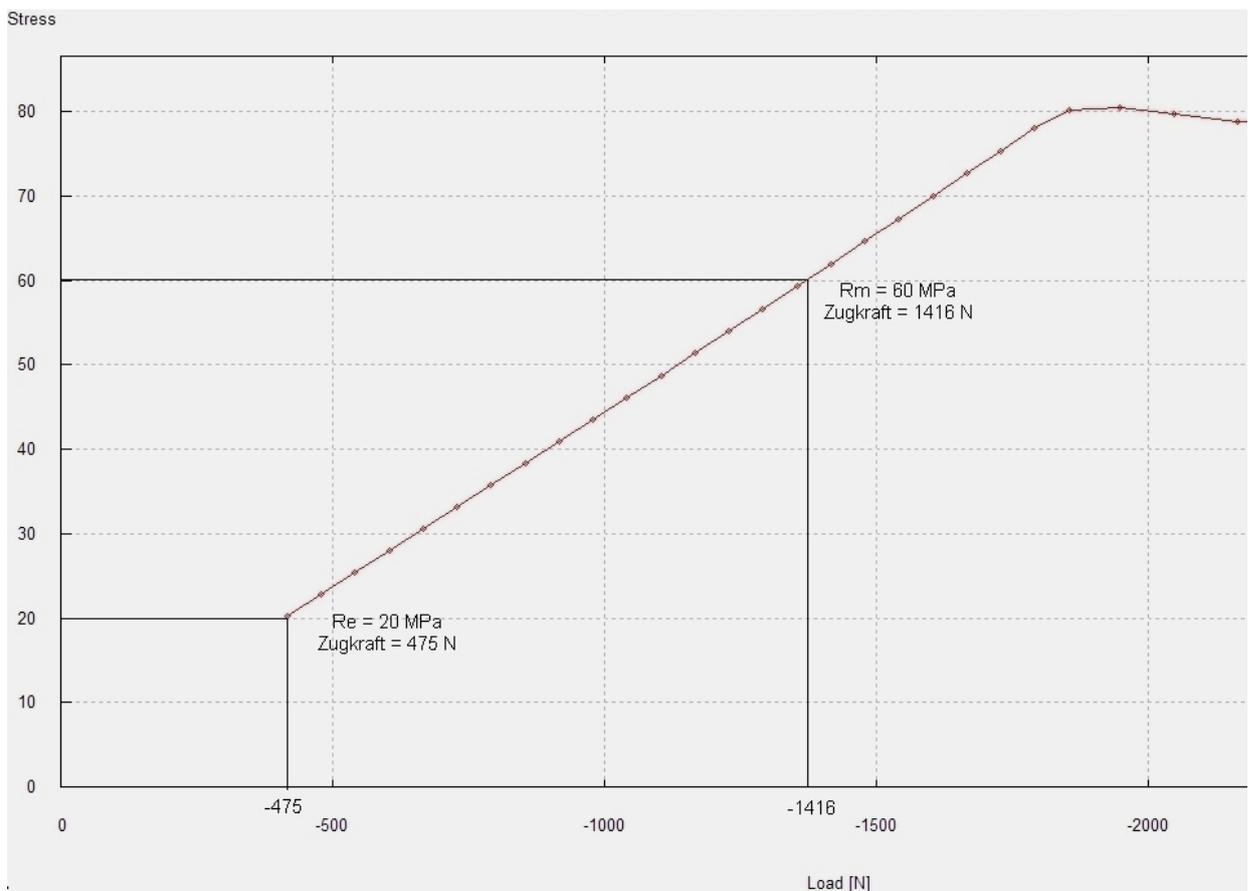
Ready, please plot the diagrams! Complete: -40920.13

Buttons: Cancel, Start, Stop, Stress-Displacement-Diagram, Stress-Load-Diagram

Spannungs-Verformungs-Diagramm:



Spannungs-Lastkraft-Diagramm



Im Diagramm kann jetzt abgelesen werden daß die Zugkraft bei der Streckgrenze bei ca. 475 N und die Zugkraft bei der Zugfestigkei bei ca. 1416 N liegt. Die max. Zugkraft liegt bei ca. 2600 N und die max. X-Verformung liegt bei ca. 0.63 mm.