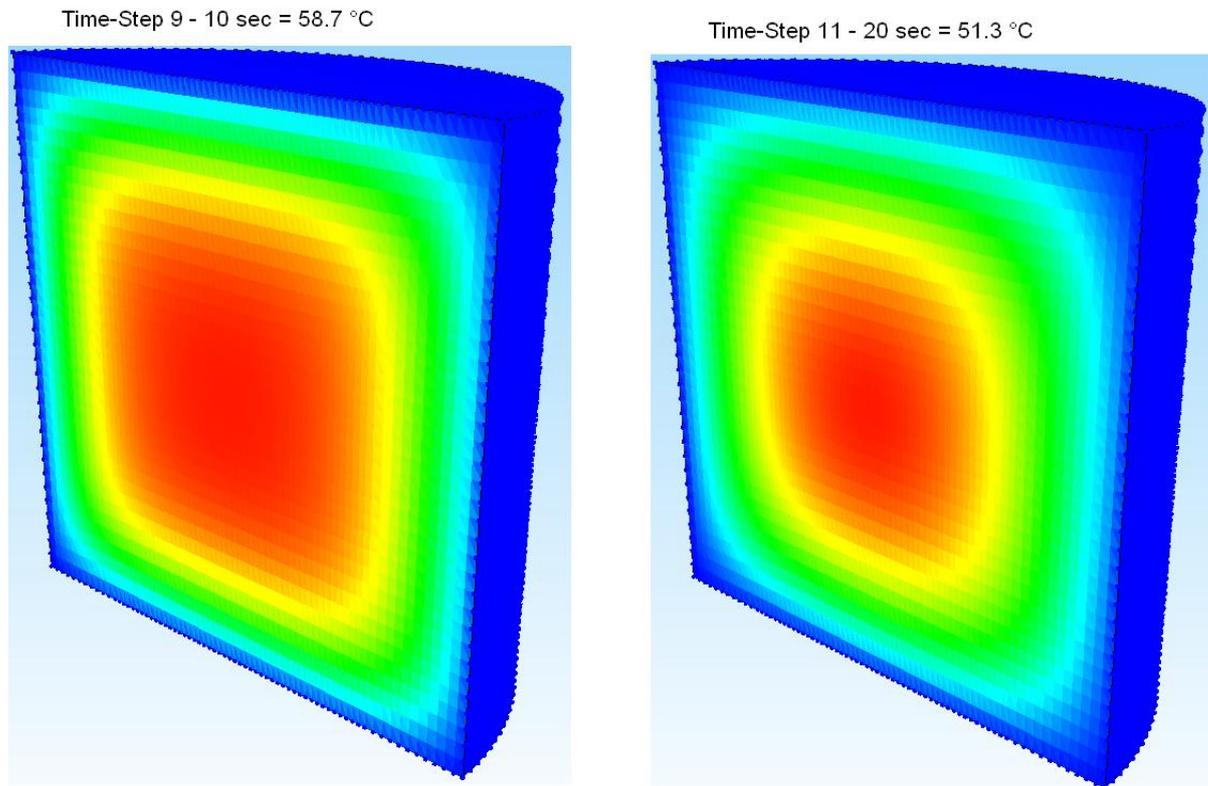


Kapitel 16: Instationäre Temperatur-Analyse mit MEANS V12

Was ist eine Instationäre Temperaturverteilung

Unter instationärer Wärmeleitung wird die Erwärmung und Kühlung von festen Körpern verstanden, die Temperatur ist also abhängig von der Zeit.



Materialdaten für die instationäre Temperatur:

Dichte ρ

Die Dichte ρ ist der Quotient aus Masse und Volumen: $\rho = m/V$. Wichtige Dichten sind: Aluminium = 2700 kg/m³, Stahl = 7800 kg/m³, Luft = 1.204 kg/m³, Wasser = 997 kg/m³, Eis = 920 kg/m³ (Eis ist immer leichter als Wasser)

Wärmeleitfähigkeit λ

Unter Wärmeleitung versteht man den Transport von Wärme in einem Medium ohne Stofftransport (wie beispielsweise bei der Konvektion). Wichtige Wärmeleitfähigkeiten sind Aluminium = 220 W/(mK), Stahl = 40 W/(mK), Luft = 0.0181 W/(mK), Wasser = 0.6 W/(mK), Eis = 2.13 W/(mK)

Spezifische Wärmekapazität C

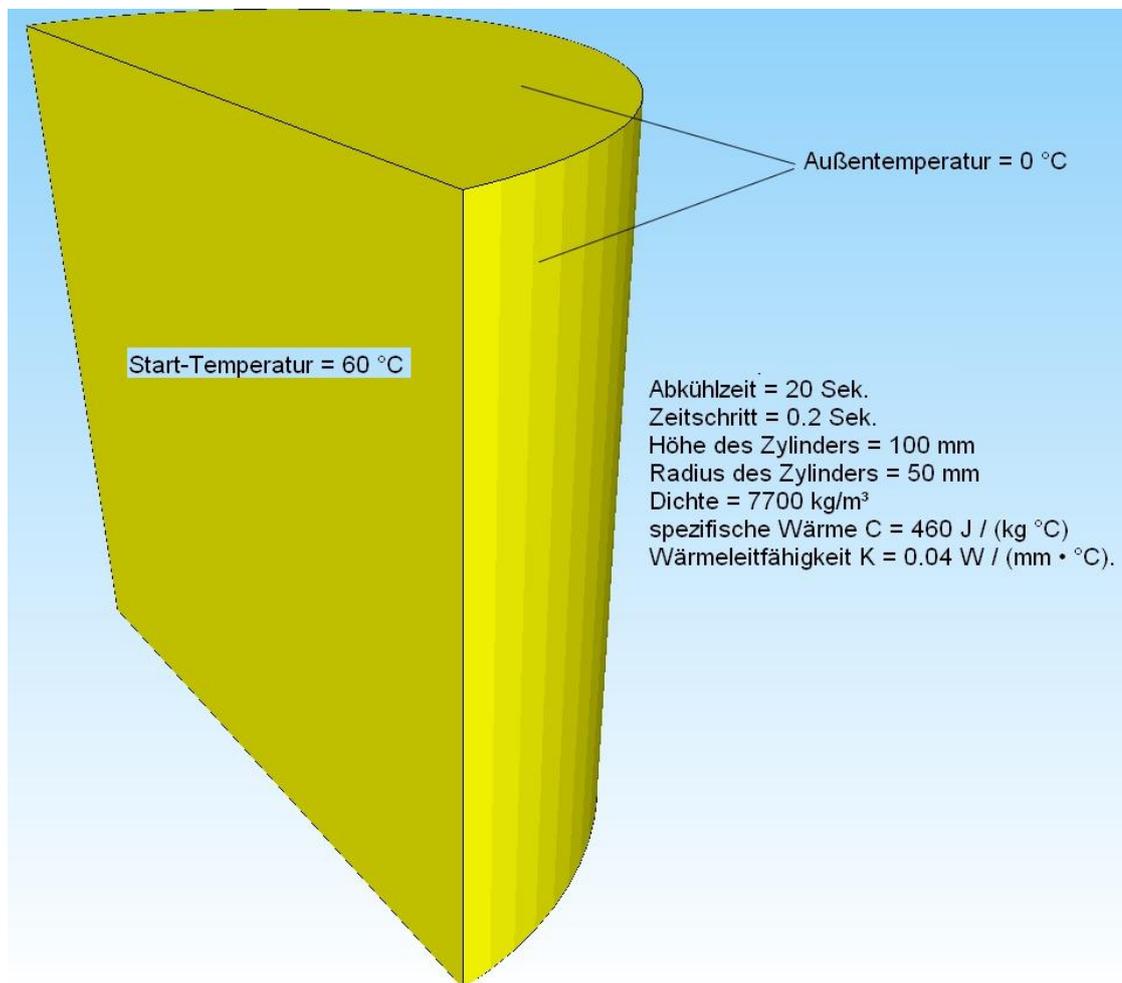
Die spezifische Wärmekapazität - welche in Formeln als "C" bezeichnet wird - ist eine Stoffkonstante. Sie gibt an, wie viel Wärme von einem Körper aufgenommen oder abgegeben werden muss, damit sich die Temperatur von 1kg des Stoffes um 1°C ändert. Wichtige spez. Wärmekapazitäten sind Aluminium = 895 J/(kg·K), Stahl = 540 J/(kg·K), Luft = 1010 J/(kg·K), Wasser = 4190 J/(kg·K), Eis = 2060 J/(kg·K)

Gesamtzeit, Zeitschritt und Starttemperatur

Weiterhin ist die Eingabe der Gesamtzeit in Sekunden sowie der Zeitschritt und die Starttemperatur in °C erforderlich.

Beispiel 1: Abkühlung eines Zylinders

Es wird eine Kühlung eines zylindrischen Körpers betrachtet, im Inneren des Volumens beträgt die Anfangstemperatur = 60 °C und an den Außenflächen ist die ständige Außentemperatur = 0 °C. Die Abkühlzeit beträgt 20 Sekunden.



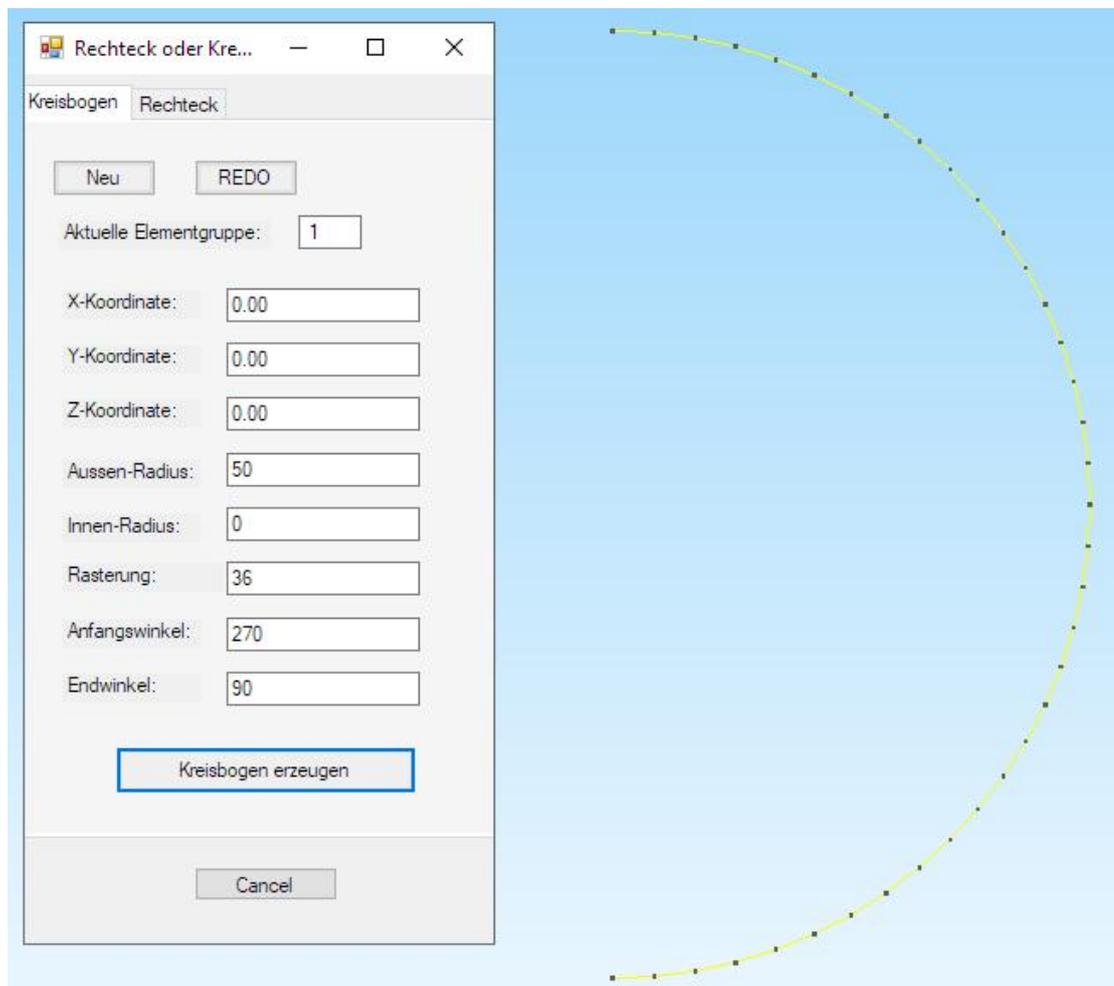
Kreisbogen im Linien-Modus erzeugen



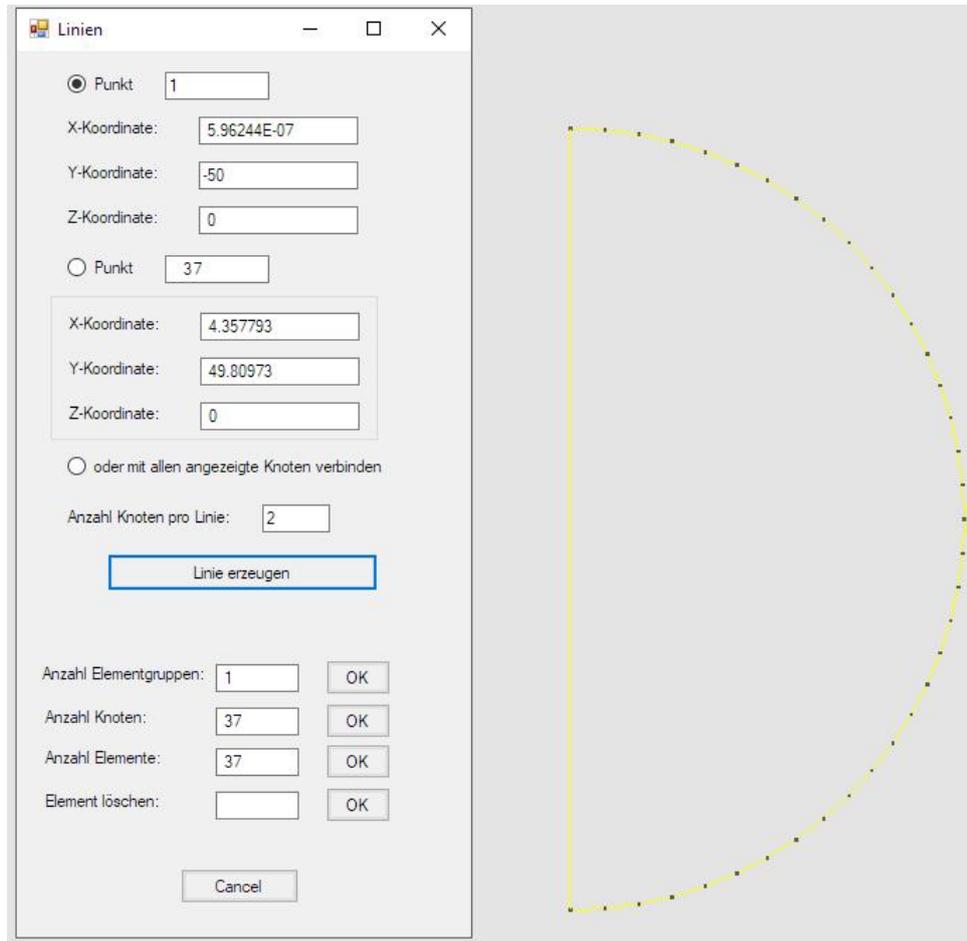
Starten Sie über das Desktop-Icon das Programm „MEANS V12 für DirectX11“ und rufen mit der Registerkarte „Ansicht“ und dem Dropdownmenü „Linien-Modus“ ein neues Seitenmenü auf der rechten Bildschirmseite auf.



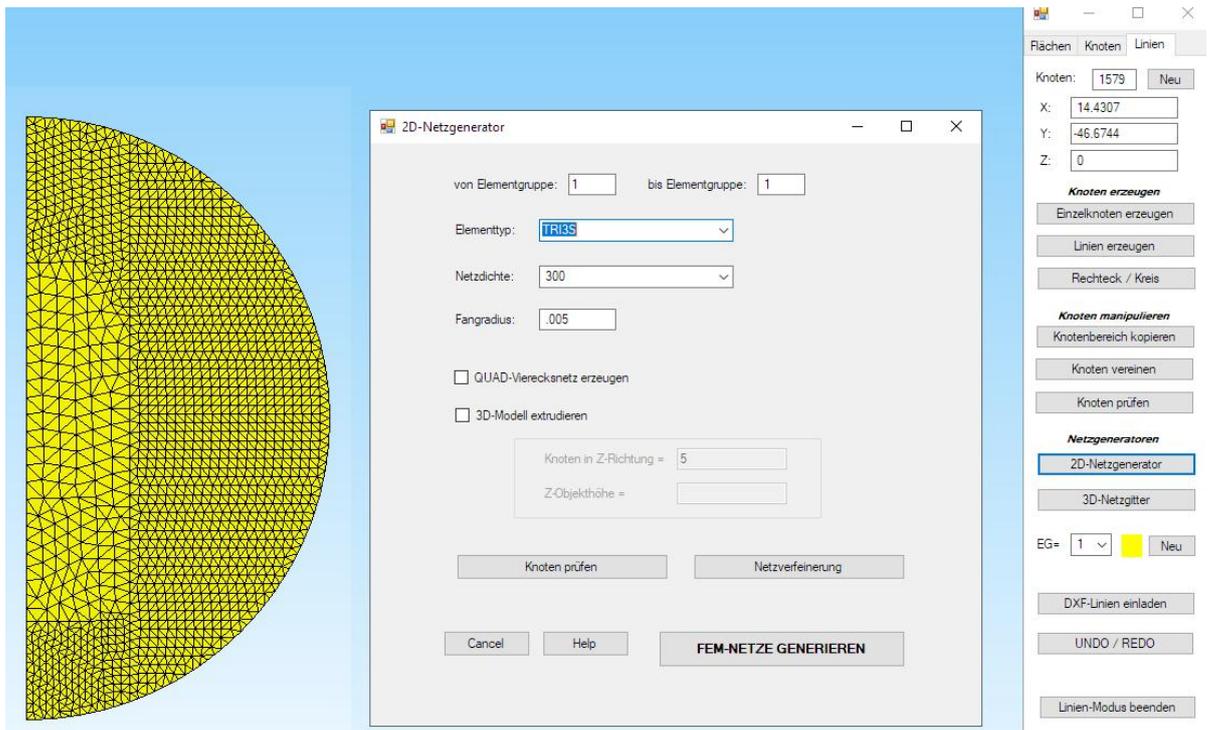
Wählen Sie hier das Menü „Kreisbogen erzeugen“ um einen halben Kreisbogen mit dem Radius = 50 mm von 270 Grad - 90 Grad zu erzeugen:



Dannach wählen Sie „Linie erzeugen“ um die Knoten 37 und 1 mit einer Linie zu verbinden. Wählen Sie Menü „2D Netzgenerator“ um ein 2D-Netz zu generieren.

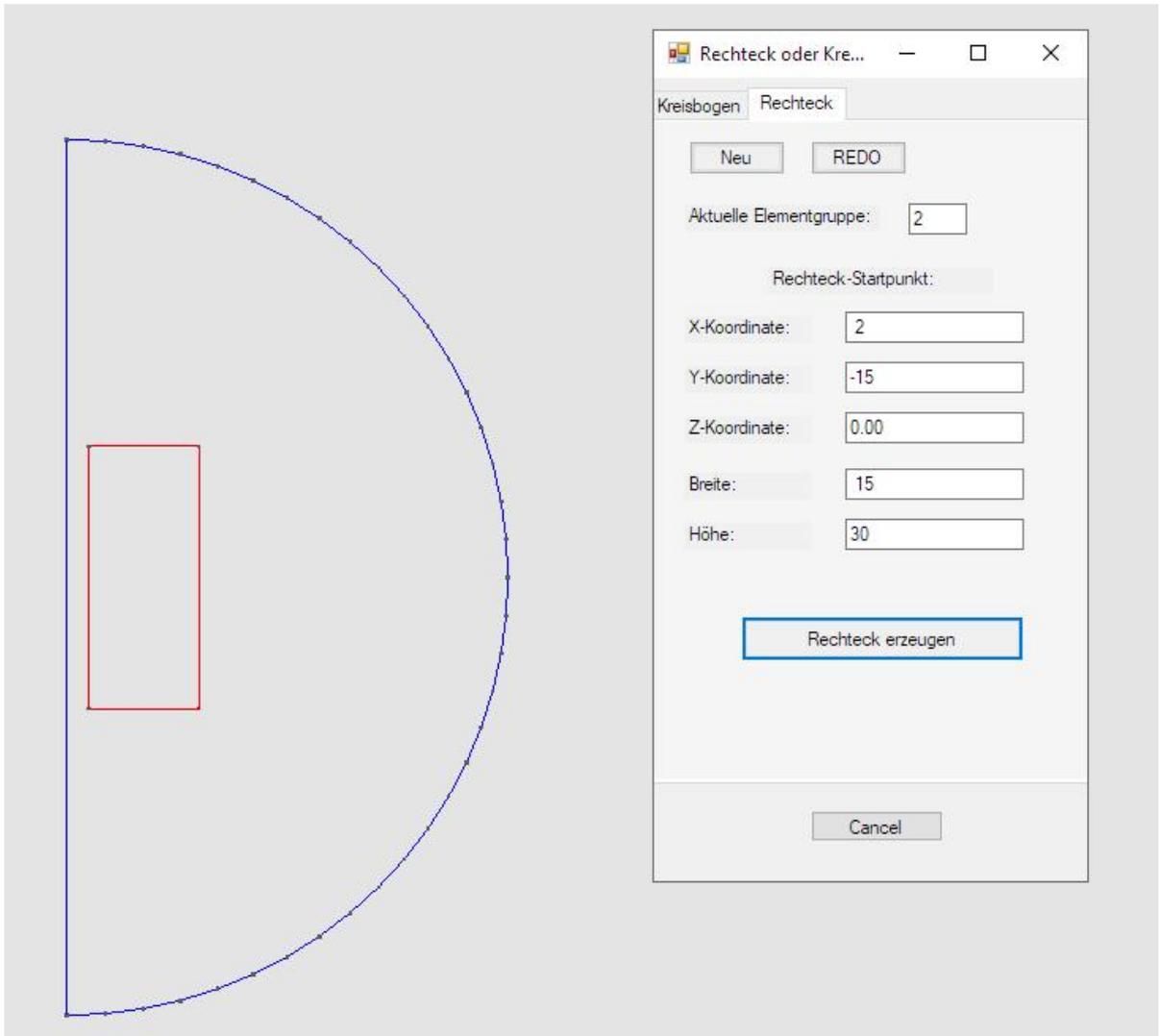


das in der Mitte ein zu grobes Netz hat und nachverfeinert werden muß.



Netzverfeinerung

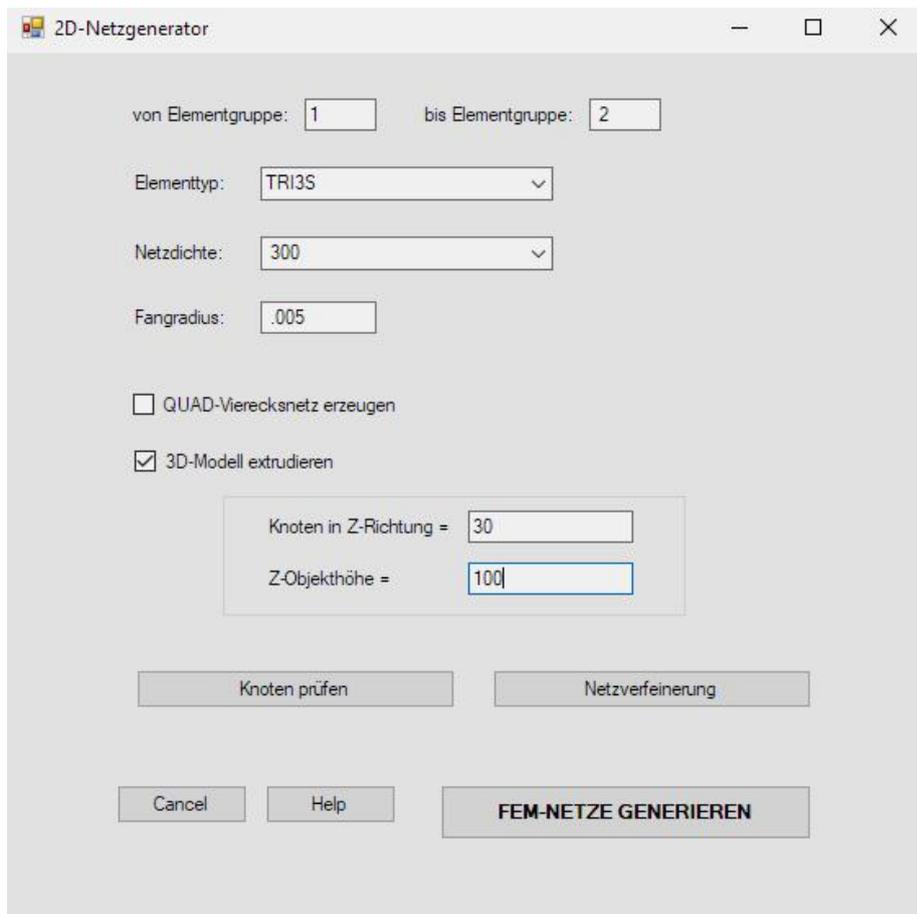
Erzeugen Sie mit Menü „Rechteck/Kreis“ folgendes Rechteck mit der EG=2 und



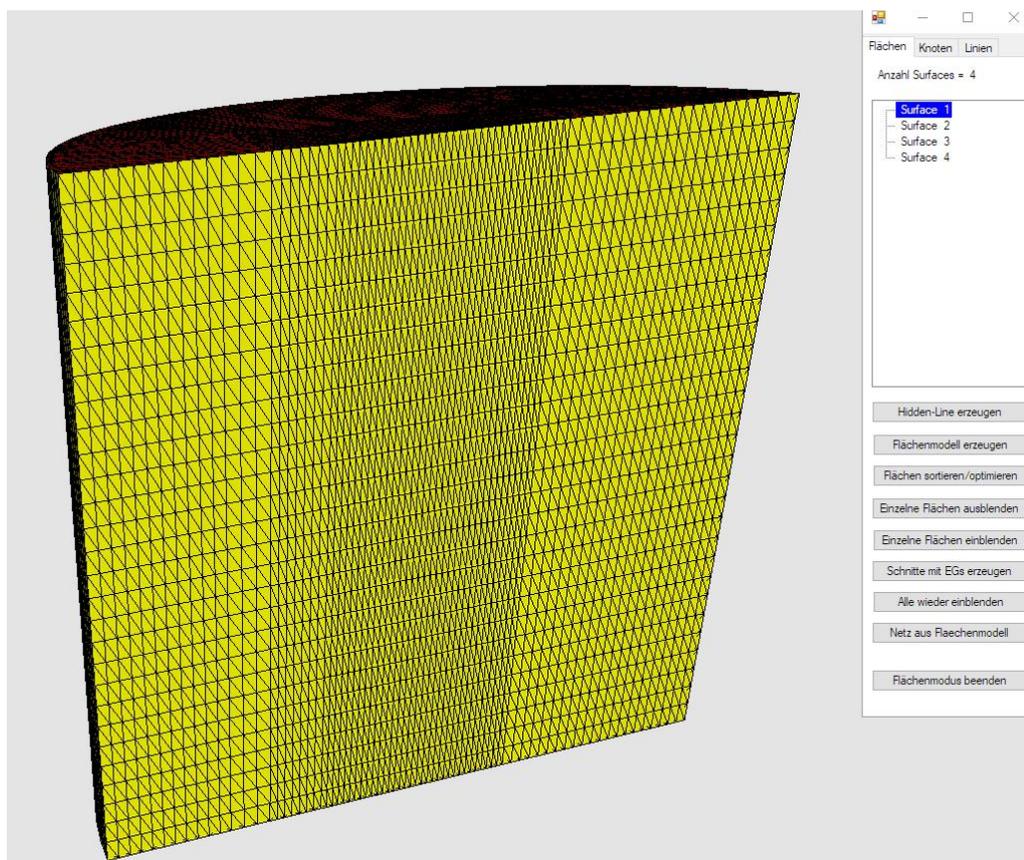
wählen dannach im 2D-Netzgenerator das Menü „Netzverfeinerung“ um das Netz in diesem Bereich nachzuverfeinern.

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

Danach generieren Sie in einem Arbeitsgang mit Menü „2D-Netzgenerator“ zuerst ein 2D-Netz mit einer anschließenden 3D-Extrudierung mit der Einstellung „3D-Modell extrudieren“ sowie einer Netzdichte in Z-Richtung = 30 und einer Z-Objekthöhe = 100.



Man erhält ein FEM-Netz aus 67728 PEN6-Volumenelementen und 37380 Knoten.

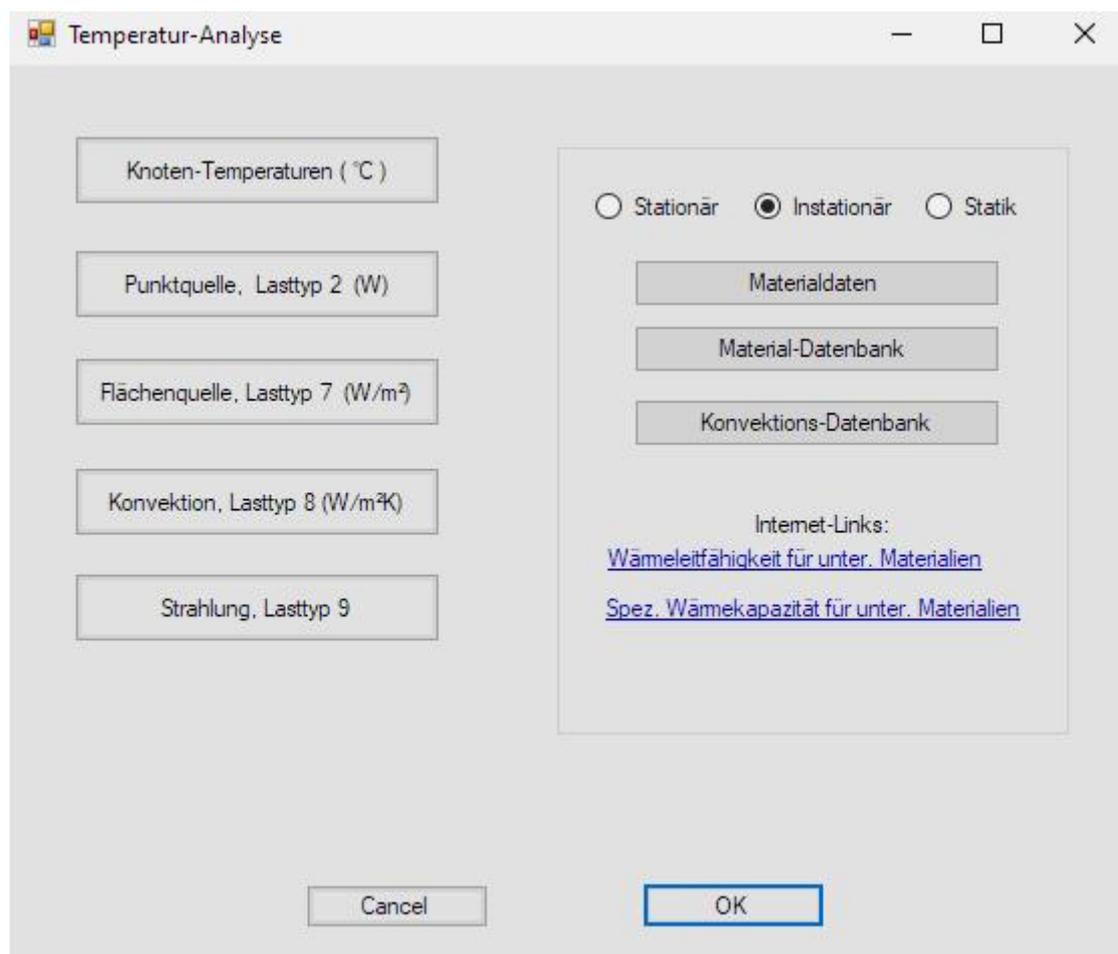


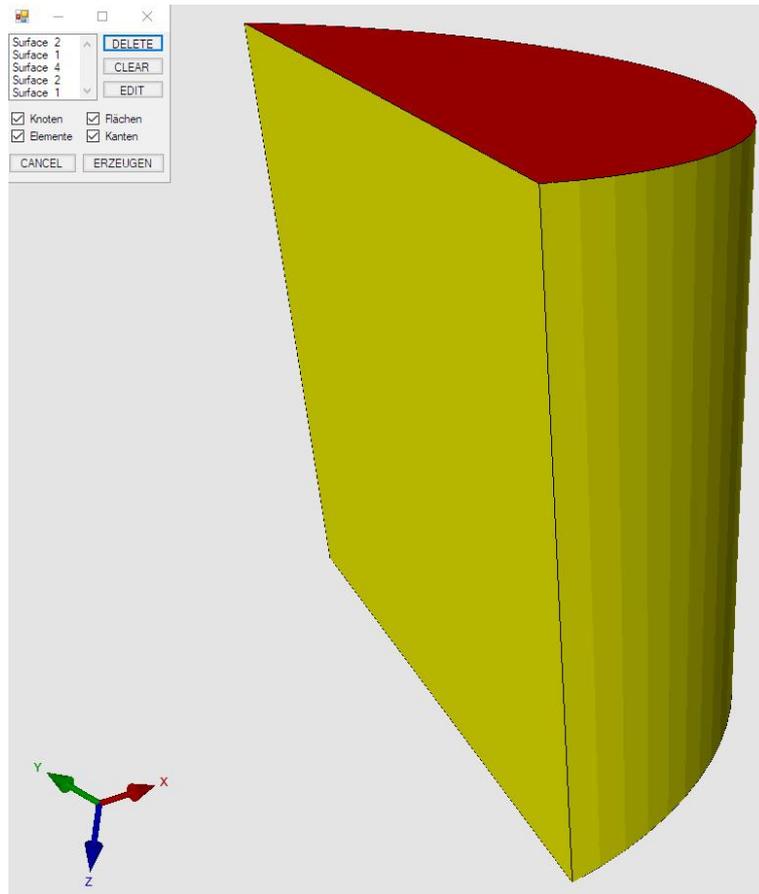
Eingabe der Außentemperatur

Wählen Sie Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und das Icon  um die ständige Außentemperatur von 0 °C einzugeben.

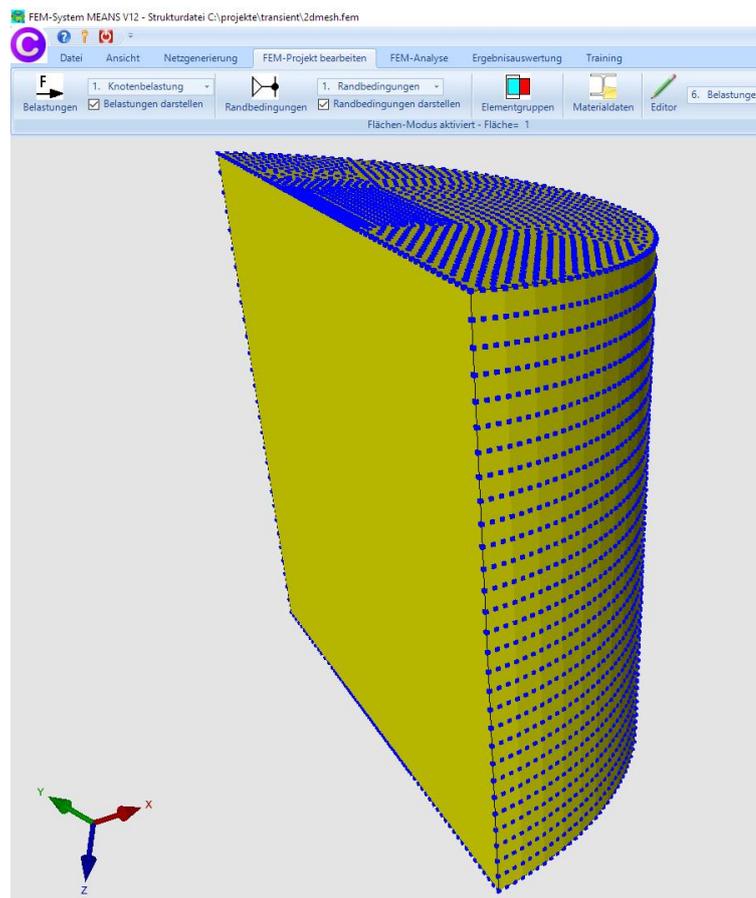


Wählen Sie Menü „Knoten-Temperaturen“ und klicken die Außen-Flächen 1, 2 und 4 an. Diese werden in der Select-Box angezeigt, dort mit Menü „Erzeugen“ die Randtemperaturen erzeugen.

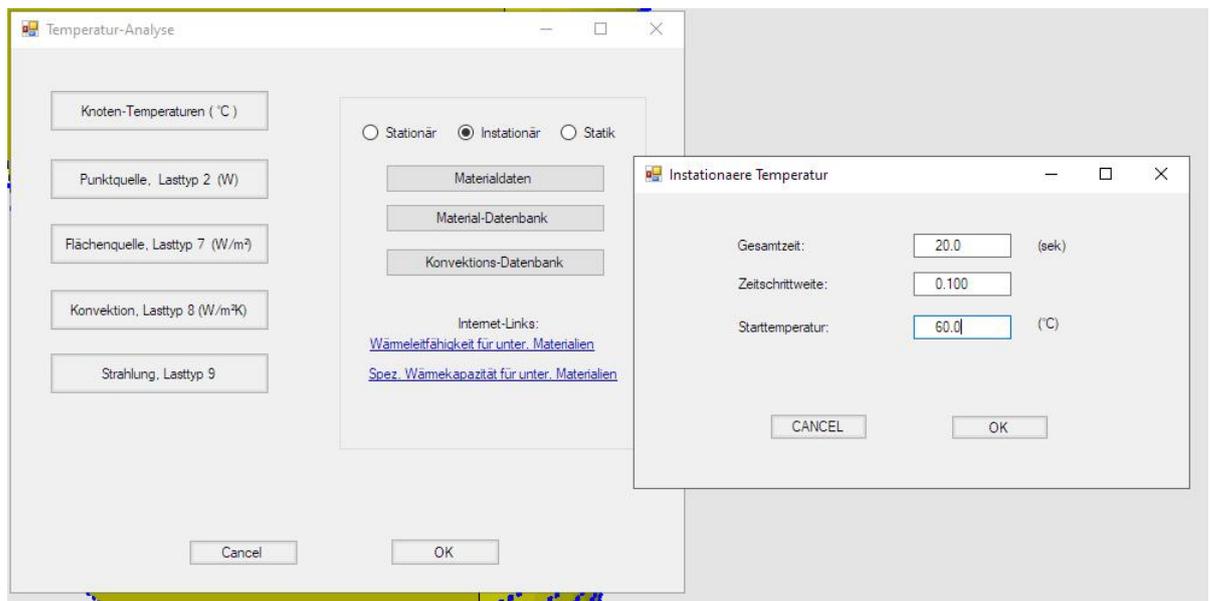




und erhält folgende Randbedingungen mit dem Wert= 0 als blaue Punkte dargestellt.

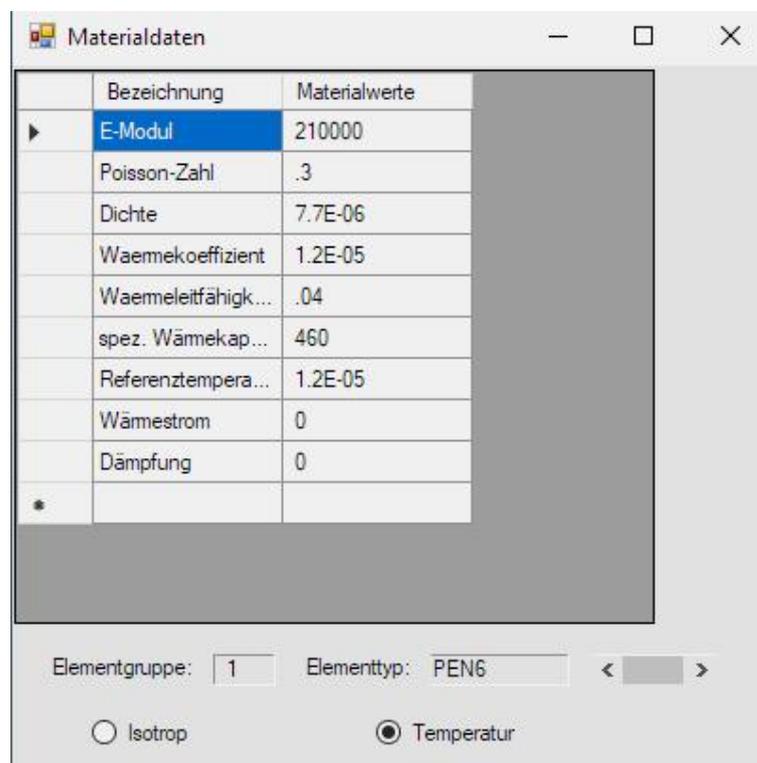


Zum Schluß wird mit  und Menü „instationär“ die instationäre Temperatur-Analyse mit der Gesamtzeit = 20 Sekunden, der Zeitschrittweite = 0.2 und der Start-Temperatur= 60 °C eingestellt.



Materialdaten

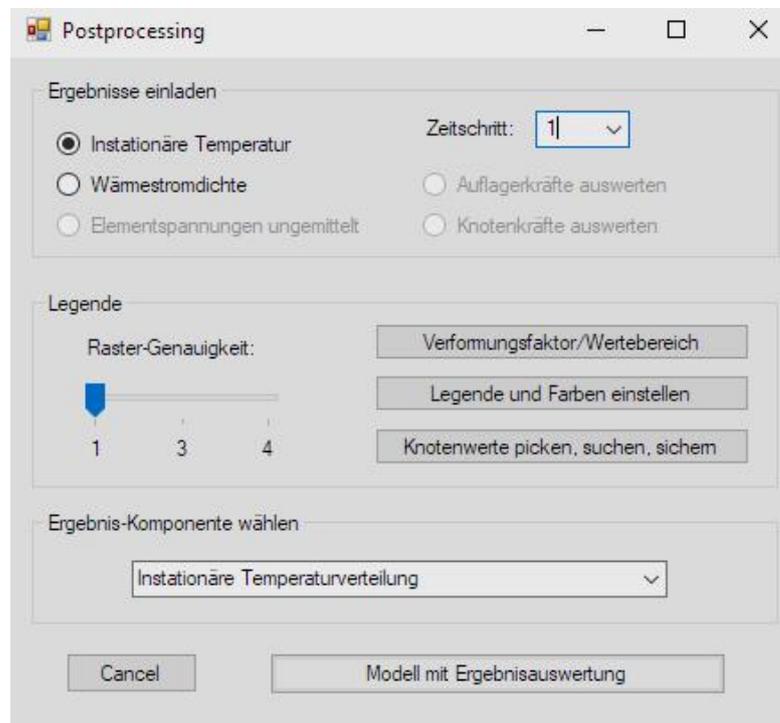
Wählen Sie das Register “FEM-Projekt bearbeiten” und das Icon  und geben folgende Materialdaten ein:



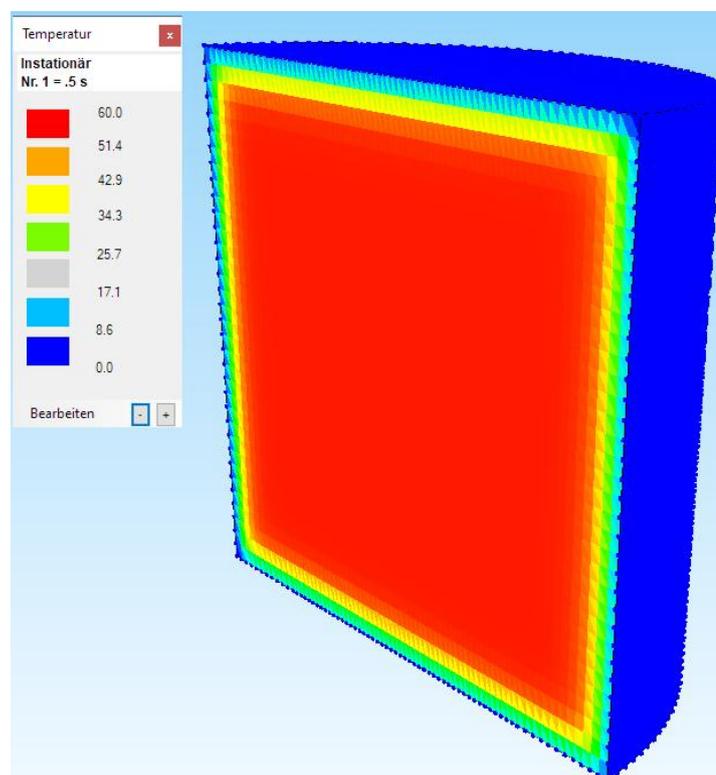
Postprocessing



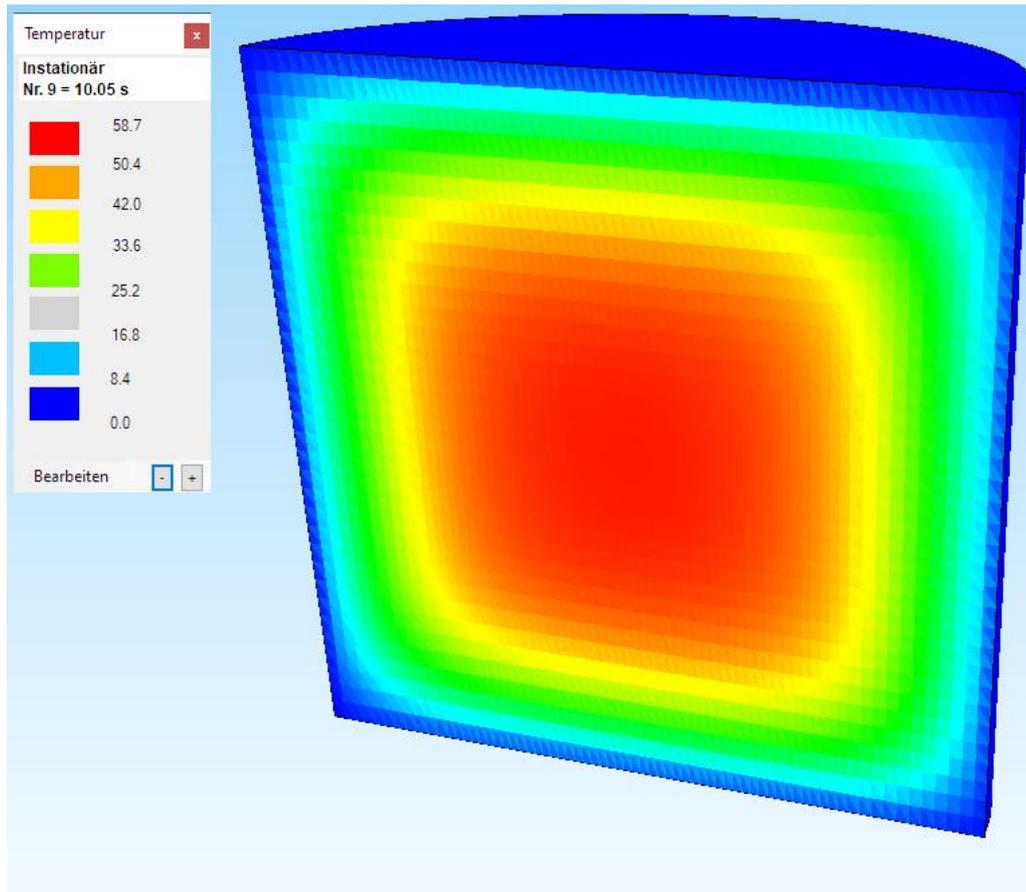
Nach der FEM-Analyse mit dem Quick-Solver folgt mit dem Icon  und Register „Ergebnisauswertung“ die Ergebnisauswertung der instationären Temperaturverteilungen für jeden Zeitschritt als 3D-Grafik oder mit einem Diagramm.



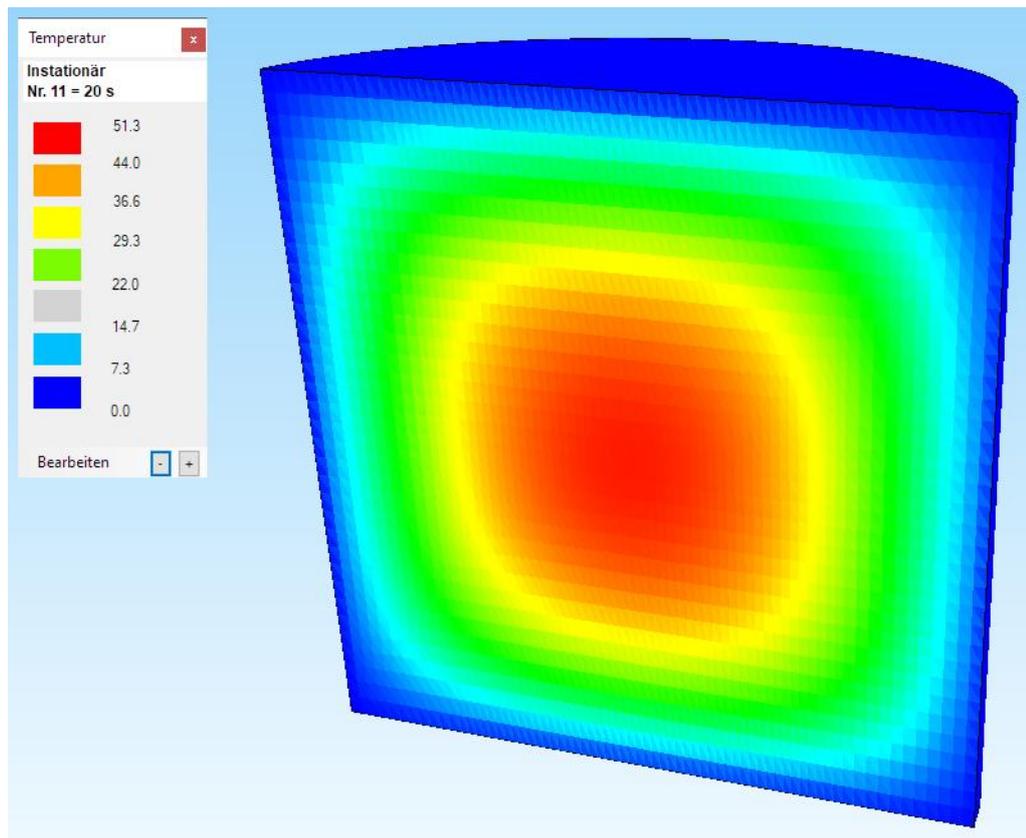
Zeitschritt 1 mit dem Ausgangszustand und der Start-Temperatur 60 °C



Zeitschritt 9 nach 10 sec mit der max. Temperatur = 58.7 °C (exakt = 59.3 °C)



Zeitschritt 11 nach 20 sec mit der max. Temperatur = 51.3 °C (exakt = 51.1 °C)



Zeitschritt-Temperatur-Diagramm

Die einzelnen Zeitschritte können in einem Diagramm dargestellt werden, wählen Sie Register „Ergebnisbewertung“ und „Diagramm 2“. Dort wählen Sie „Starten“ um nach der Auflistung der maximalen Knoten-Temperaturen mit dem Menü „Diagramm darstellen“ das Zeitschritt-Temperatur-Diagramm darzustellen.

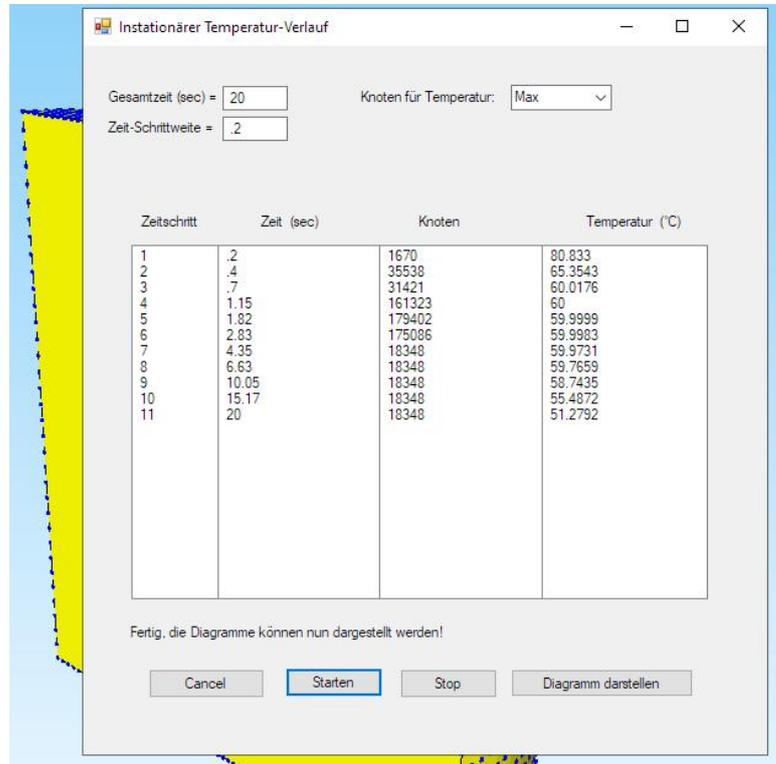
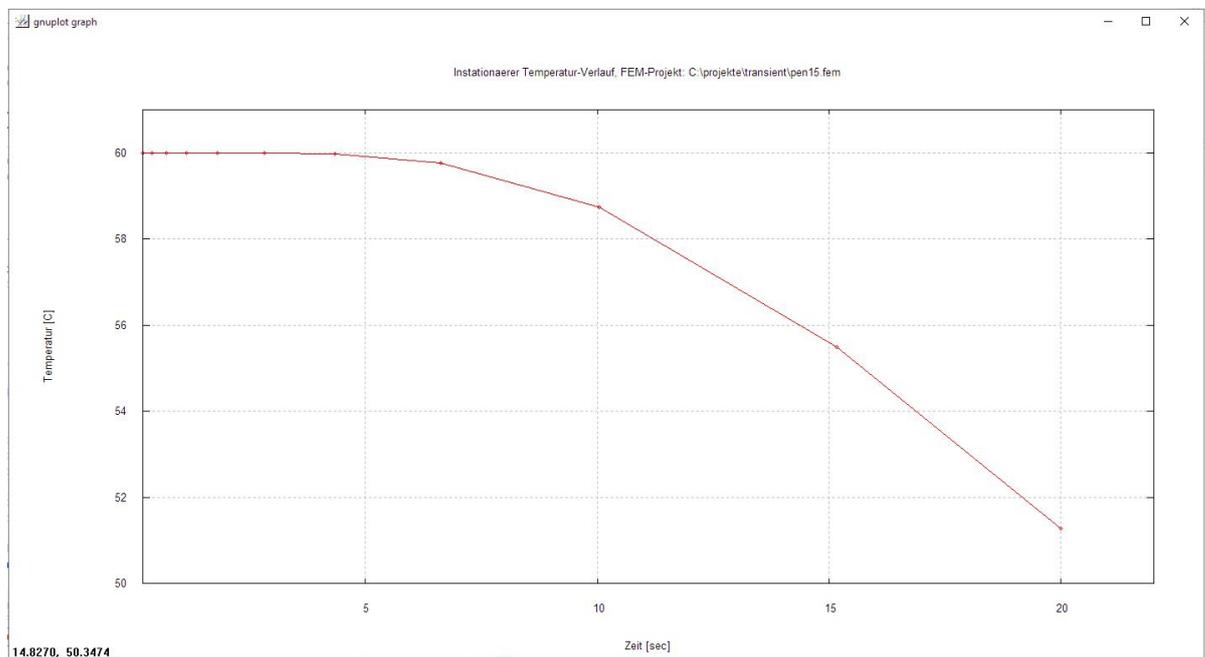


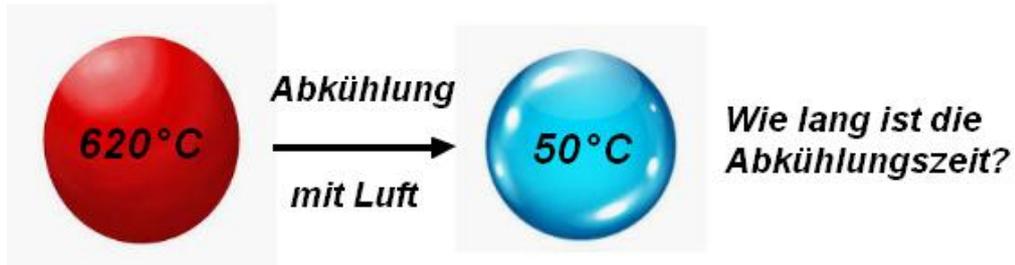
Diagramm editieren

Im aktuellen Projekt-Verzeichnis befinden sich **diagram.dat** und **diagram.plt** die mit einem Texteditor editiert und mit der Anwendung GNUPLOT.EXE im GNUPLOT-Verzeichnis mit Menü „Open“ neu eingeladen und geplottet werden können.



Beispiel 2: Abkühlung von Metallkugeln

Das folgende Beispiel stammt aus dem Buch "Praxis der Wärmeübertragung" von Rudi Marek, ISBN 978-3-446-46124-6 und wird mit dem Ergebnis von MEANS V12 verglichen.



In der Kugellagerfabrik von Eddy Eckig sollen Metallkugeln

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 40 \text{ W/(m K)}$

Dichte $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$

$C_p = 474 \text{ J / (kg K)}$

$D = 24 \text{ mm}$

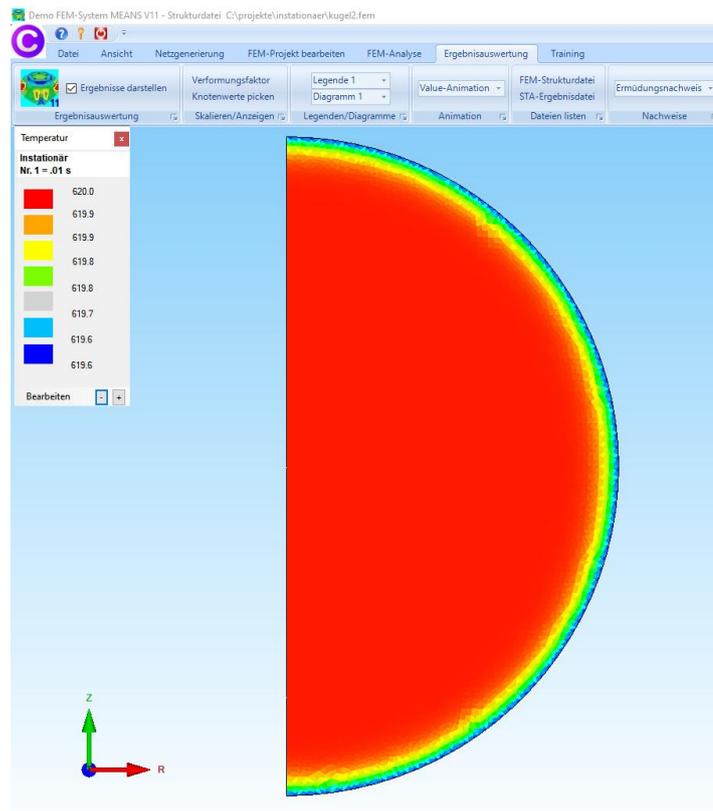
von der Anfangstemperatur $\vartheta_o = 620 \text{ °C}$ in einem Luftstrom mit dem

Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha = 80 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$ und der

Umgebungstemperatur $\vartheta_K = 20 \text{ °C}$

auf die Endtemperatur $\vartheta_E = 50 \text{ °C}$ abgekühlt werden.

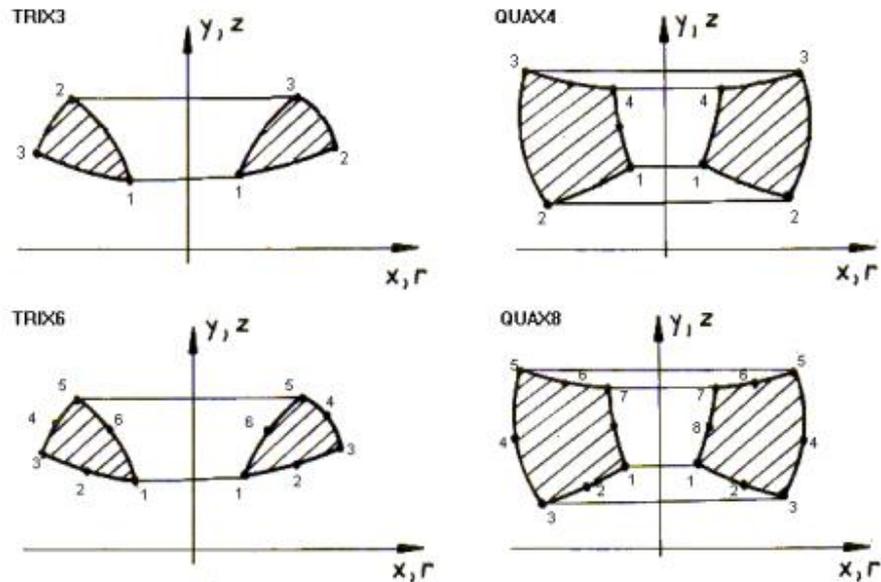
Berechnen Sie die dafür notwendige Abkühlzeit t



2D-Berechnung

FEM-Modell

Da die Metallkugel eine rotationssymmetrische Kugel ist kann die Berechnung mit den axialsymmetrischen Rotationsscheiben TRIX6 und QUAX8 erheblich vereinfacht werden.



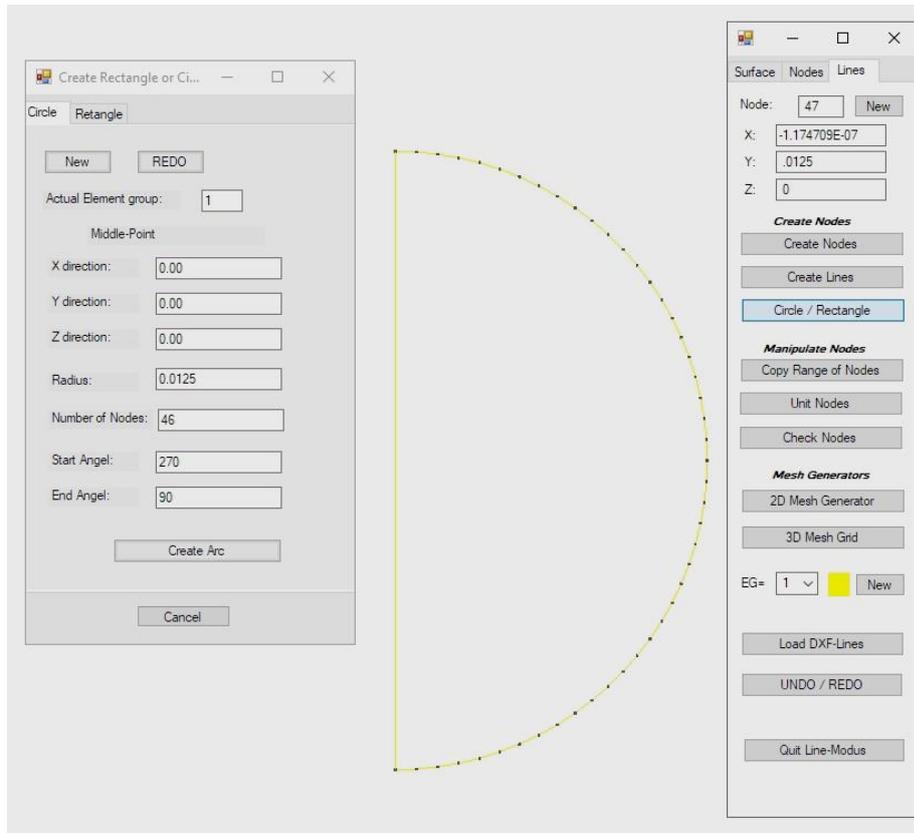
Kreisbogen erzeugen



Starten Sie über das Desktop-Icon das Programm „MEANS V12 für DirectX11“ und schalten mit der Registerkarte „Ansicht“ und dem Dropdownmenü „Linien-Modus“ den Linien-Modus ein. Es erscheint auf der rechten Seite ein neues Seitenmenü, wählen Sie hier das Menü „Kreisbogen erzeugen“ um einen halben Kreisbogen mit dem Radius = 0.0125 m von 270 Grad - 90 Grad zu erzeugen:



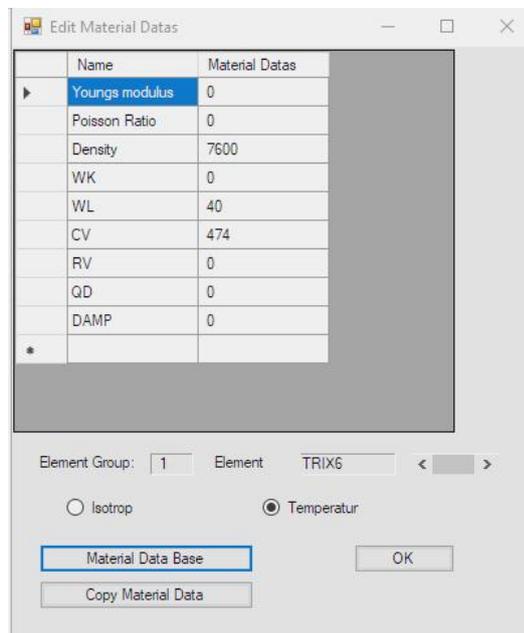
Dannach wählen Sie „Linie erzeugen“ um die Knoten 47 und 1 mit einer Linie zu verbinden. Zum Schluß wählen Sie Menü „2D Netzgenerator“ um ein TRIX3-Netz zu generieren.



Materialdaten



Wählen Sie das Register "FEM-Projekt bearbeiten" und das Icon und übernehmen aus der selbst erweiterbaren Materialdatenbank das Material "Stahl" mit der Dichte von 7600 kg/m^3 , der Wärmeleitfähigkeit von 40 W/mk und der Spezifische Wärmekapazität von 474 J/(kgK) .



Wählen Sie "Materialdatenbank" um die Materialdaten für Stahl zu übernehmen:

Material-Datenbank

Werkstoff: Dichte (kg/m³): spez. Wärmekapazität (J/kgK):

E-Modul (N/m²): Wärmeausdehnungskoeffizient:

Poisson-Zahl: Wärmeleitfähigkeit (W/mK): Sortieren nach:

Buttons: Add, Delete, Save, **Material übernehmen**, Datenbank einladen, Datenbank sichern, Meter Millimeter, Beenden

Werkstoff	E-Modul	Poisson-Zahl	Dichte	Wärmeausdehnungskoeffizient	Wärmeleitfähigkeit	spez. Wärmekapazität
Keramik	16000000000	.3	2100	0.00003	2.5	920
Klinker	27000000000	.3	0	0.000058	0.1	0
Konstantan	163000000000	0.33	8900	0	0	0
Kupfer	123000000000	.35	8933	0.000016	401	385
Lithium	4910000000	0.36	535	0.000058	84.7	3482
Luranyl	2500000000	0.29	1090	0	0	0
Magnesium	44000000000	.28	1740	0.000024	156	1046
Marmor	72000000000	.3	2600	0	2.8	0
Messing	103000000000	0.35	8100	0.0000183	120	120
Neusilber	110000000000	0.37	8300	0	0	0
Nickel	205000000000	0.44	11340	0.000028	35	35
PBT CRAFTIN T341 FR	3900000000	0.32	1540	0	0.26	0.185
PBT Ultradur B 4406	30000000000	0.32	1450	0	0.185	0
PBT Ultradur B 4406 GF-10	55000000000	0.32	1500	0	0	0
Platin	170000000000	0.39	21400	0.0000088	71	133
Plexiglas	32000000000	0.35	1200	0	0	0
Polyamid 66	31000000000	0.32	1140	0.0001	0.23	0
Polystyrol	32000000000	0.35	1050	0	0.032	1250
Porzellan	58000000000	0.23	2300	0.000003	0	0
Silber	79000000000	0.371	10500	0.0000189	429	234
Silikon	9300000000	0.44	11340	0.000017	35	35
Silizium	210000000000	0.28	6300	0.000012	84.7	50
Stahl Chromnickel	200000000000	0.37	7900	0	0	0
Stahl Federstahl	220000000000	0.29	7900	0	0	0
Stahl legiert (1 °C)	210000000000	0.28	6300	0.000011	50	520
Stahl unlegiert (1 °C)	210000000000	0.28	6300	0.000011	50	490
Stahl-Nickel	210000000000	0.31	8800	0	0	0
Stahl	210000000000	0.3	7600	0.00001	40	474
Titan	110000000000	0.36	0	0	0	0
Vanadium	130000000000	0.36	0	0	0	0
Vulkanfaser	49000000000	0.36	0	0	0	0
Wolfram	390000000000	0.29	19300	0	0	0
Zelluloid	25000000000	0.29	0	0	0	0
Zink	98000000000	0.25	7000	0.00003	110	110
Zinn	55000000000	0.33	7200	0.000022	67	221

Wählen Sie "Instationär" um die Gesamtzeit, Zeitschritt und die Starttemperatur einzugeben.

Temperatur-Analyse

Knoten-Temperaturen (°C)

Punktquelle, Lasttyp 2 (W)

Flächenquelle, Lasttyp 7 (W/m²)

Konvektion, Lasttyp 8 (W/m²K)

Strahlung, Lasttyp 9

Stationär **Instationär** Statik

Materialdaten

Material-Datenbank

Konvektions-Datenbank

Internet-Links:
[Wärmeleitfähigkeit für unter Materialien](#)
[Spez. Wärmekapazität für unter Materialien](#)

Cancel OK

Instationäre Temperatur

Gesamtzeit: (sek)

Zeitschrittweite:

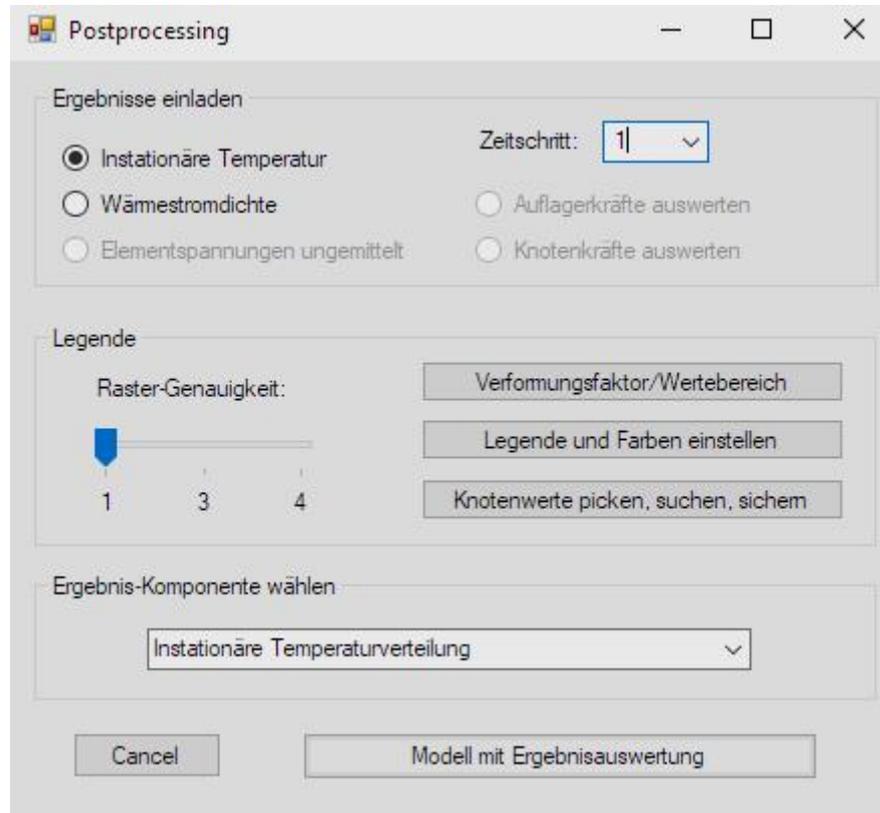
Starttemperatur: (°C)

CANCEL OK

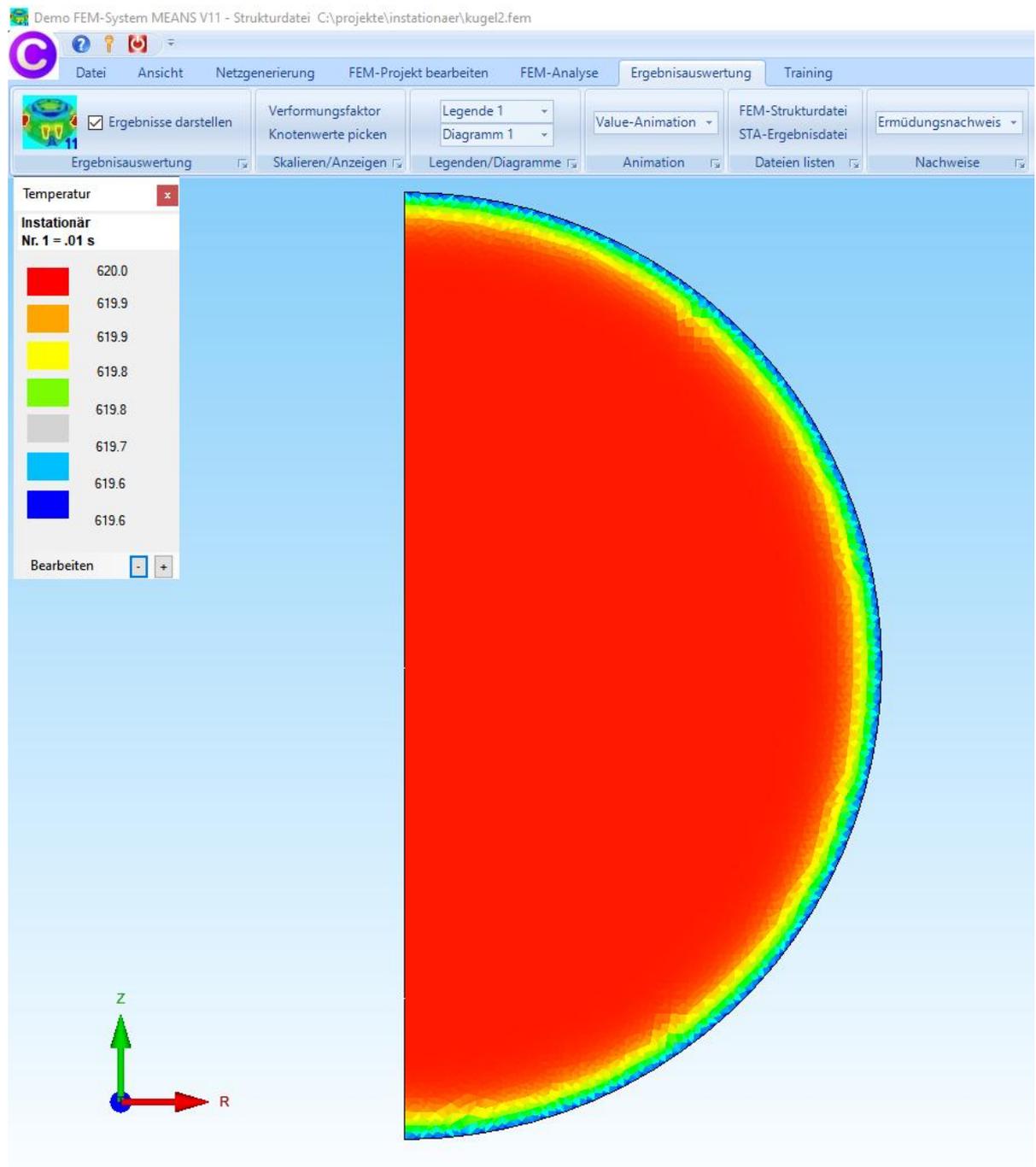
Postprocessing



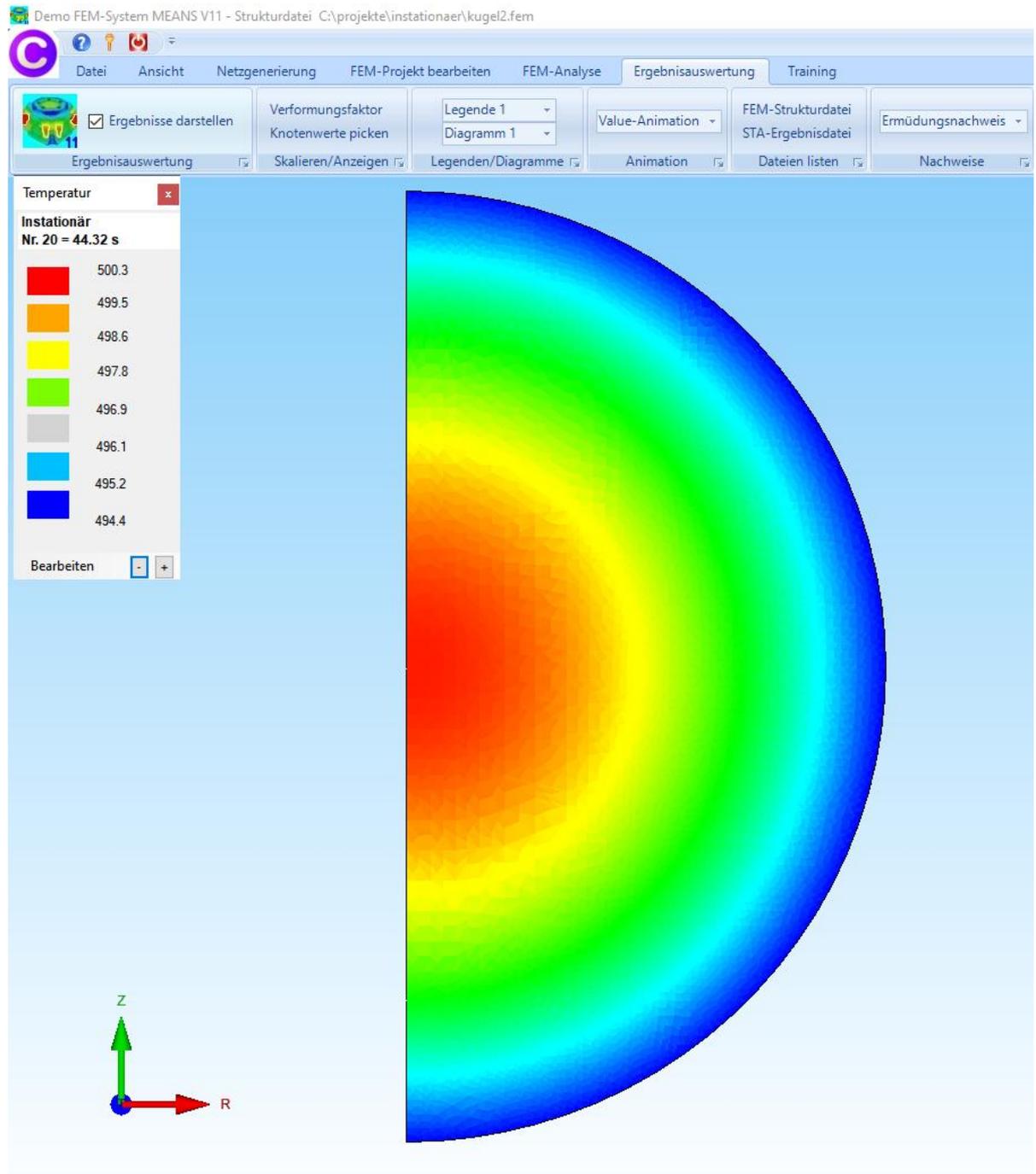
Wählen Sie das Register “Ergebnisauswertung” und das Icon  um die Temperaturverteilungen für jeden Zeitschritt darzustellen.



Ausgangszustand mit einer Anfangstemperatur von 620°C



Temperaturverteilung nach 44.32 sec beträgt 500.3 °C



Temperaturverteilung mit QUAX8 nach 664.95 sec beträgt 56°C

Die Abkühlzeit bei 50°C beträgt somit

$$50^{\circ}\text{C} * 665 \text{ sec} / 56^{\circ}\text{C} = 593 \text{ sec} = 9.8 \text{ min}$$

