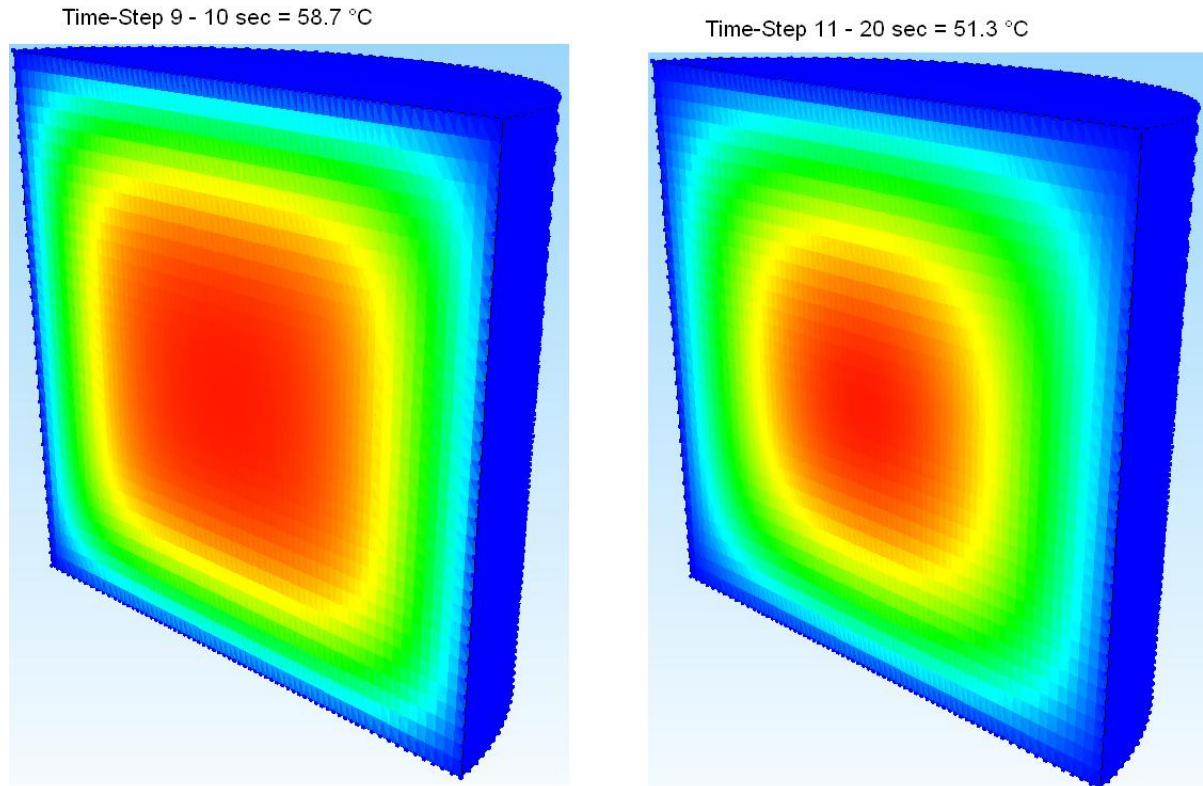


## Kapitel 16: Instationäre Temperatur-Analyse mit MEANS V12

### 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 $\rho$

Die Dichte  $\rho$  ist der Quotient aus Masse und Volumen:  $\rho = m/V$ . Wichtige Dichten sind: Aluminium = 2700 kg/m<sup>3</sup>, Stahl = 7800 kg/m<sup>3</sup>, Luft = 1.204 kg/m<sup>3</sup>, Wasser = 997 kg/m<sup>3</sup>, Eis = 920 kg/m<sup>3</sup> (Eis ist immer leichter als Wasser)

#### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

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

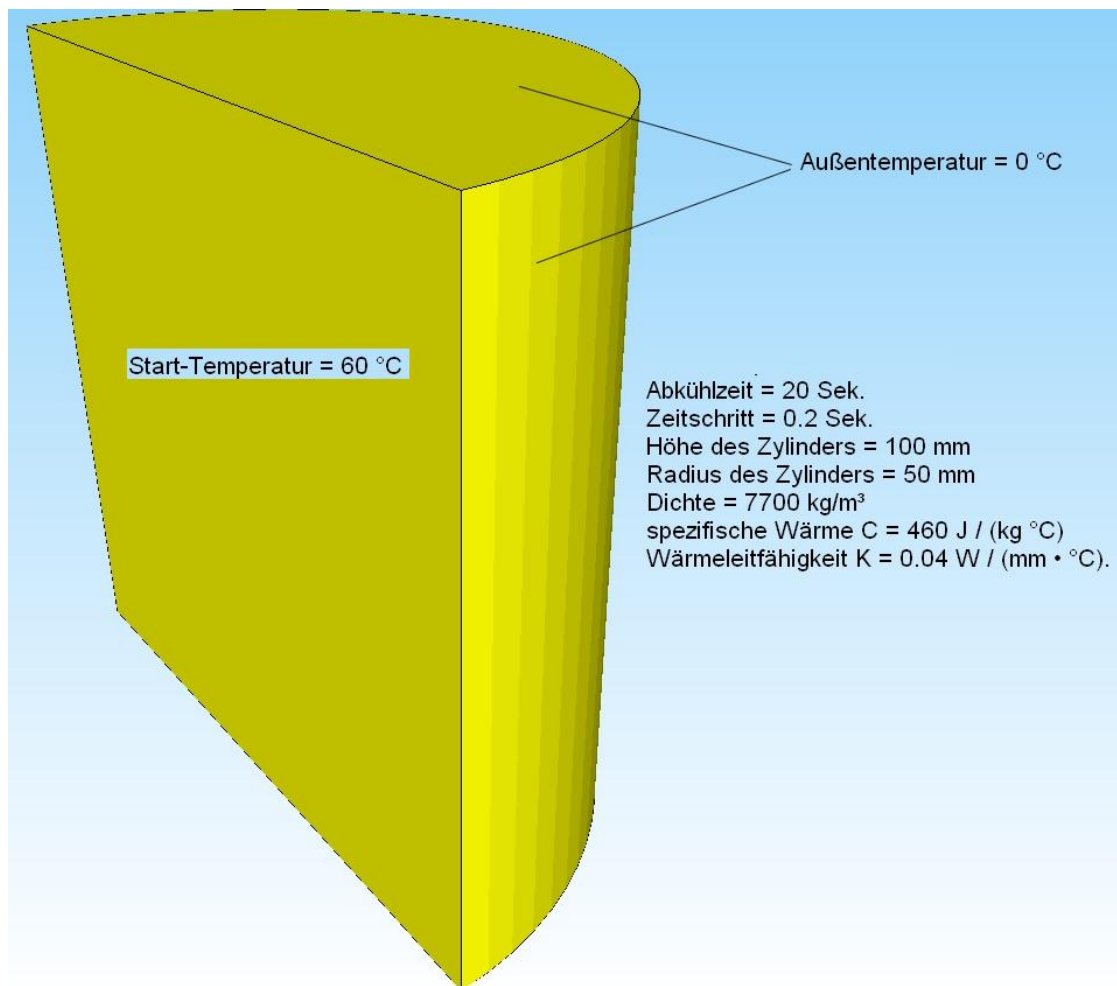
Die spezifische Wärmekapazität - welche in Formeln als "C" bezeichnet wird - ist eine Stoffkonstante. Sie gibt an, wie viel Wärme von einem Körper aufgenommen oder abgegeben werden muss, damit sich die Temperatur von 1kg des Stoffes um 1°C ändert. Wichtige spez. Wärmekapazitäten sind Aluminium = 895 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.



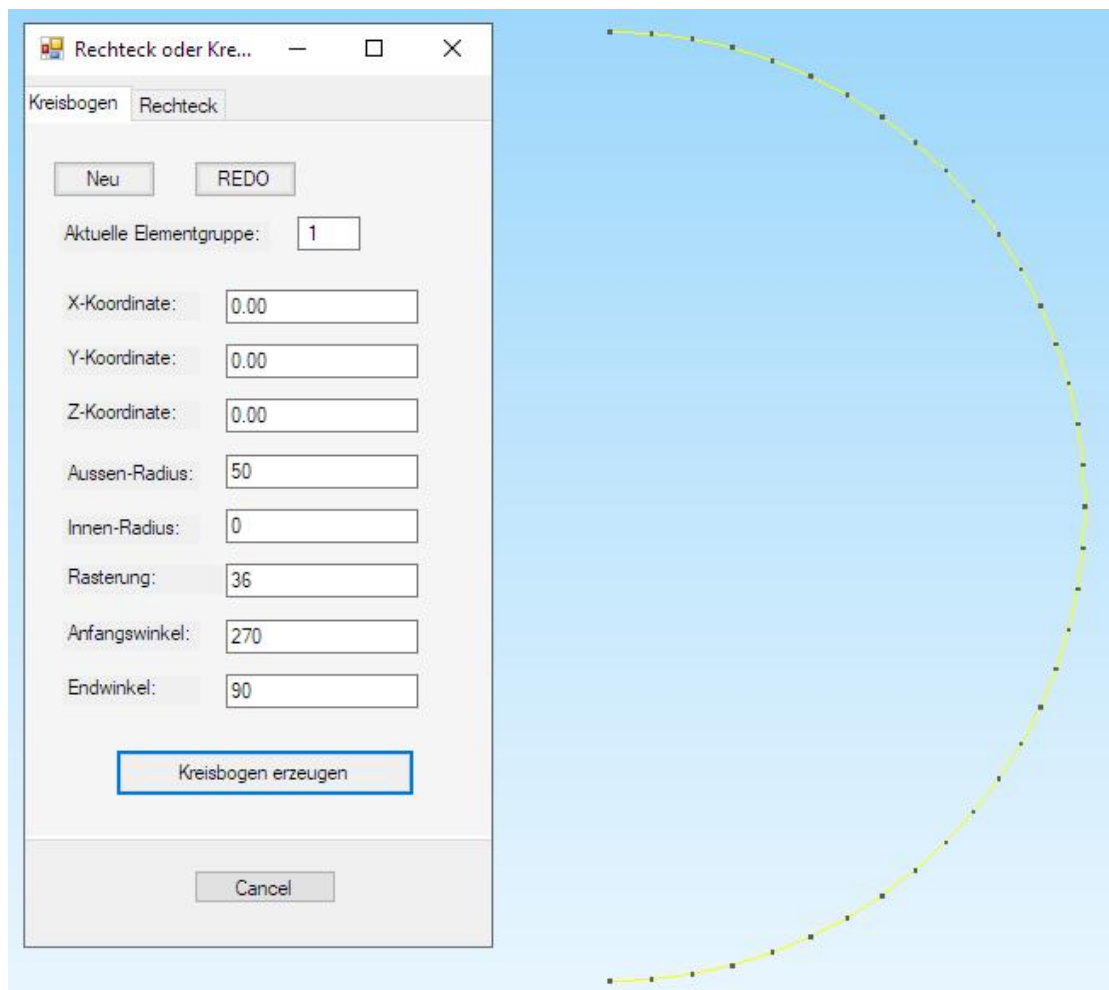
## Kreisbogen im Linien-Modus erzeugen



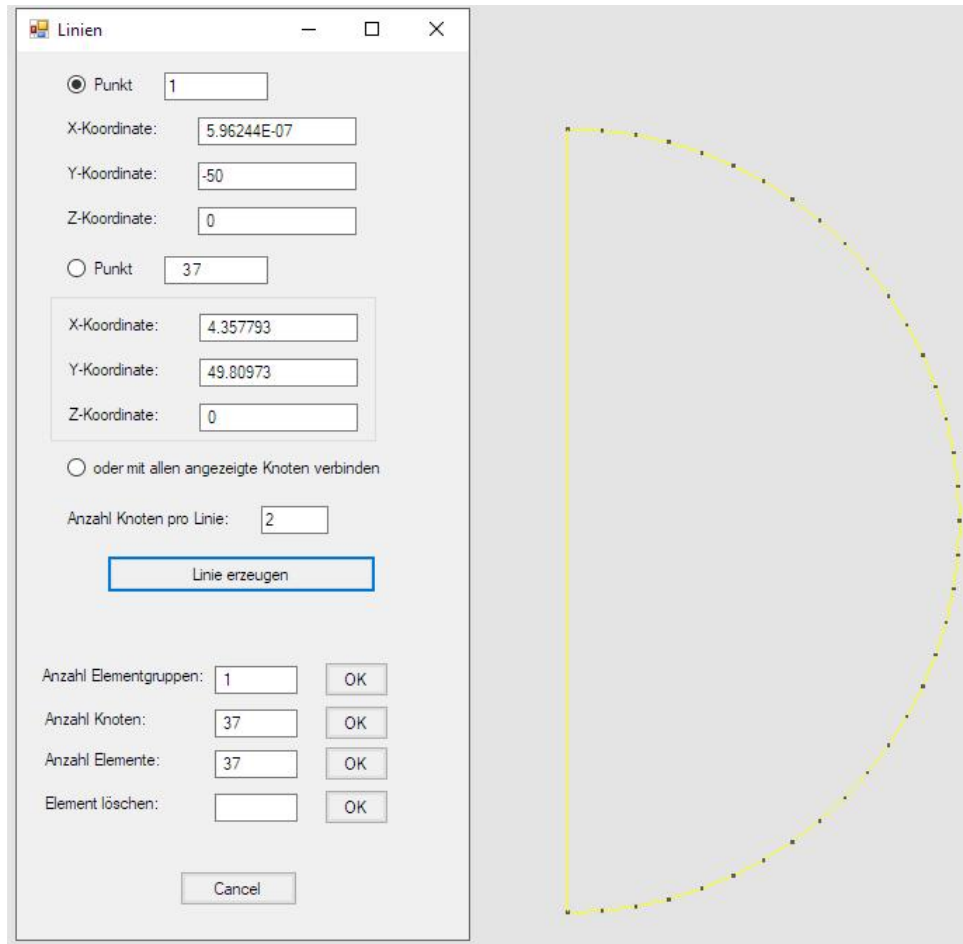
Starten Sie über das Desktop-Icon das Programm „MEANS V12 für DirectX11“ und rufen mit der Registerkarte „Ansicht“ und dem Dropdownmenü „Linien-Modus“ ein neues Seitenmenü auf der rechten Bildschirmseite auf.



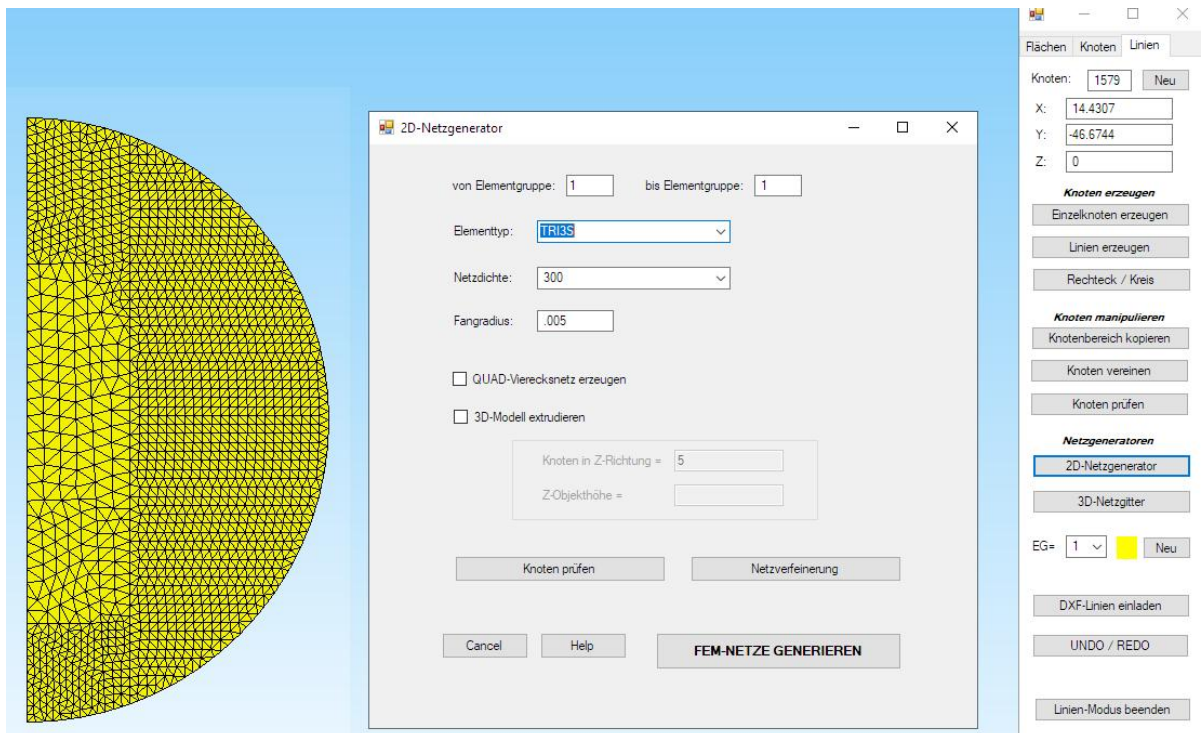
Wählen Sie hier das Menü „Kreisbogen erzeugen“ um einen halben Kreisbogen mit dem Radius = 50 mm von 270 Grad - 90 Grad zu erzeugen:



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.

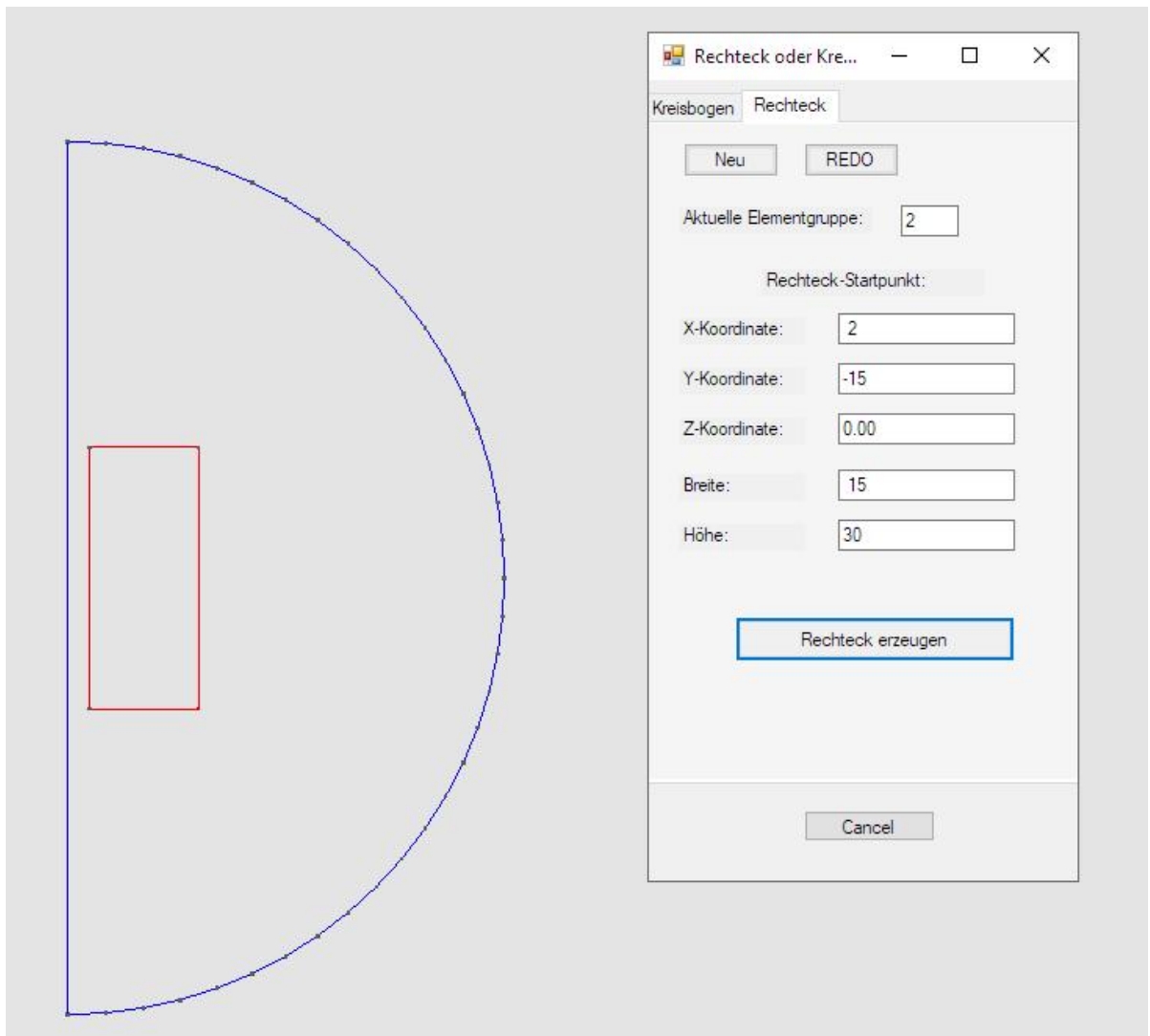


das in der Mitte ein zu grobes Netz hat und nachverfeinert werden muß.



## Netzverfeinerung

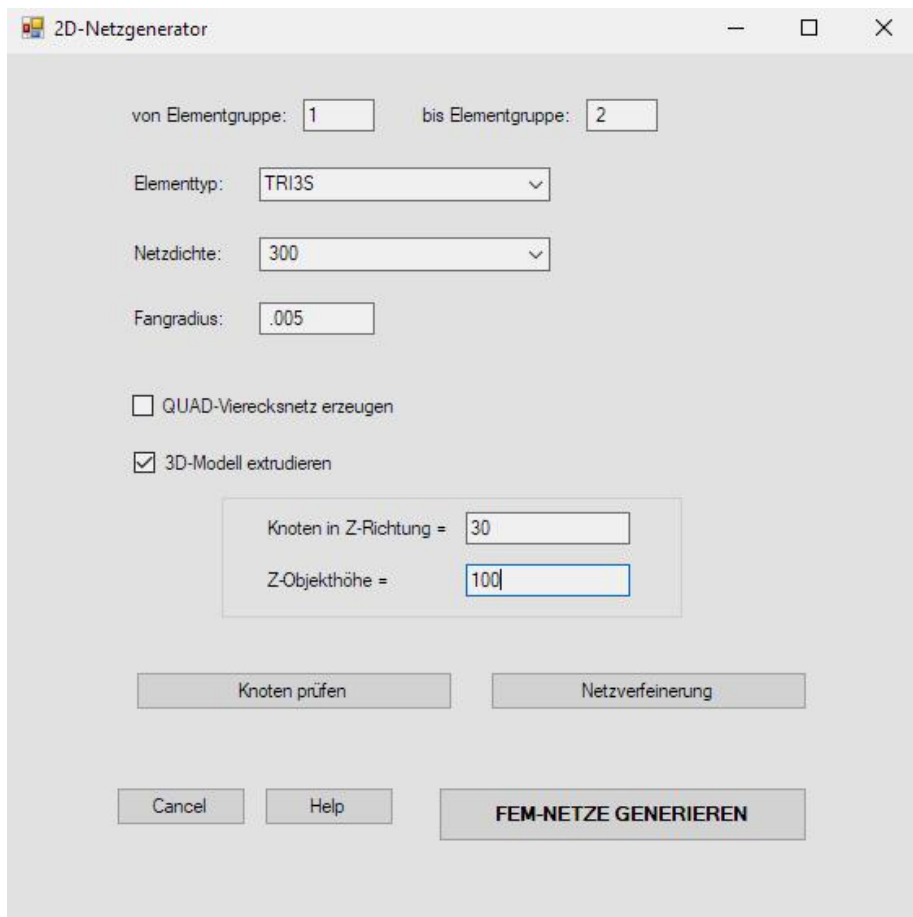
Erzeugen Sie mit Menü „Rechteck/Kreis“ folgendes Rechteck mit der EG=2 und



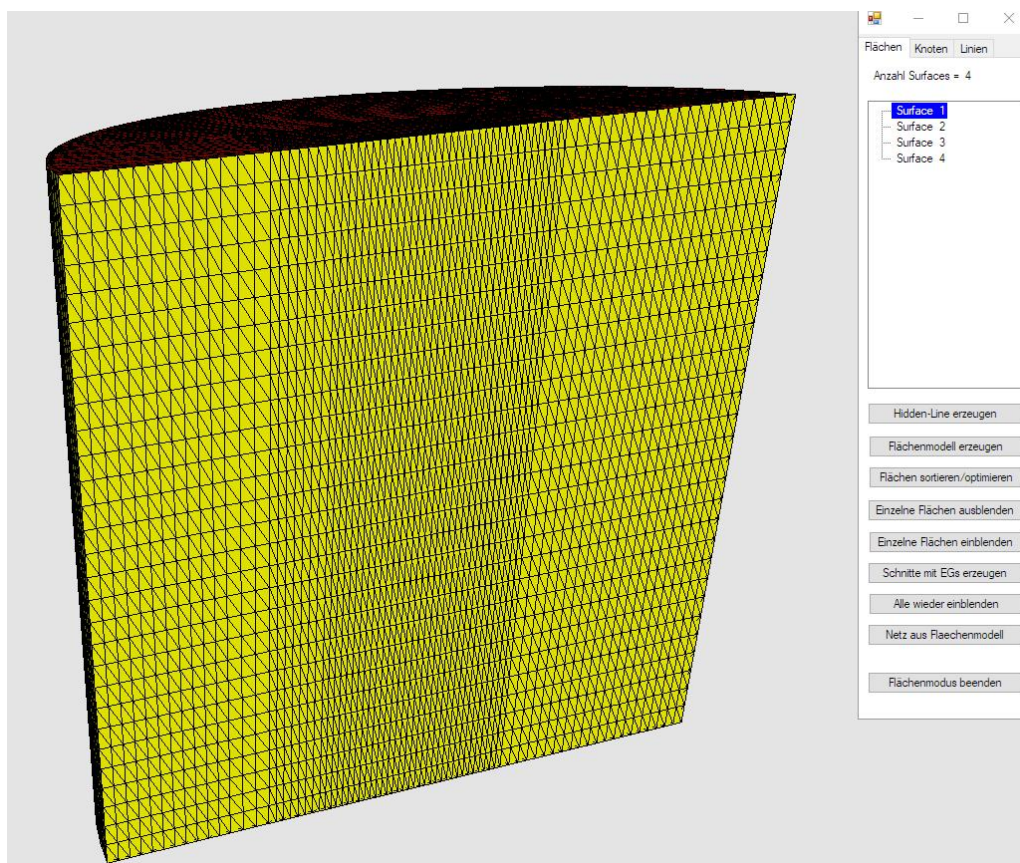
wählen dannach im 2D-Netzgenerator das Menü „Netzverfeinerung“ um das Netz in diesem Bereich nachzuverfeinern.

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.

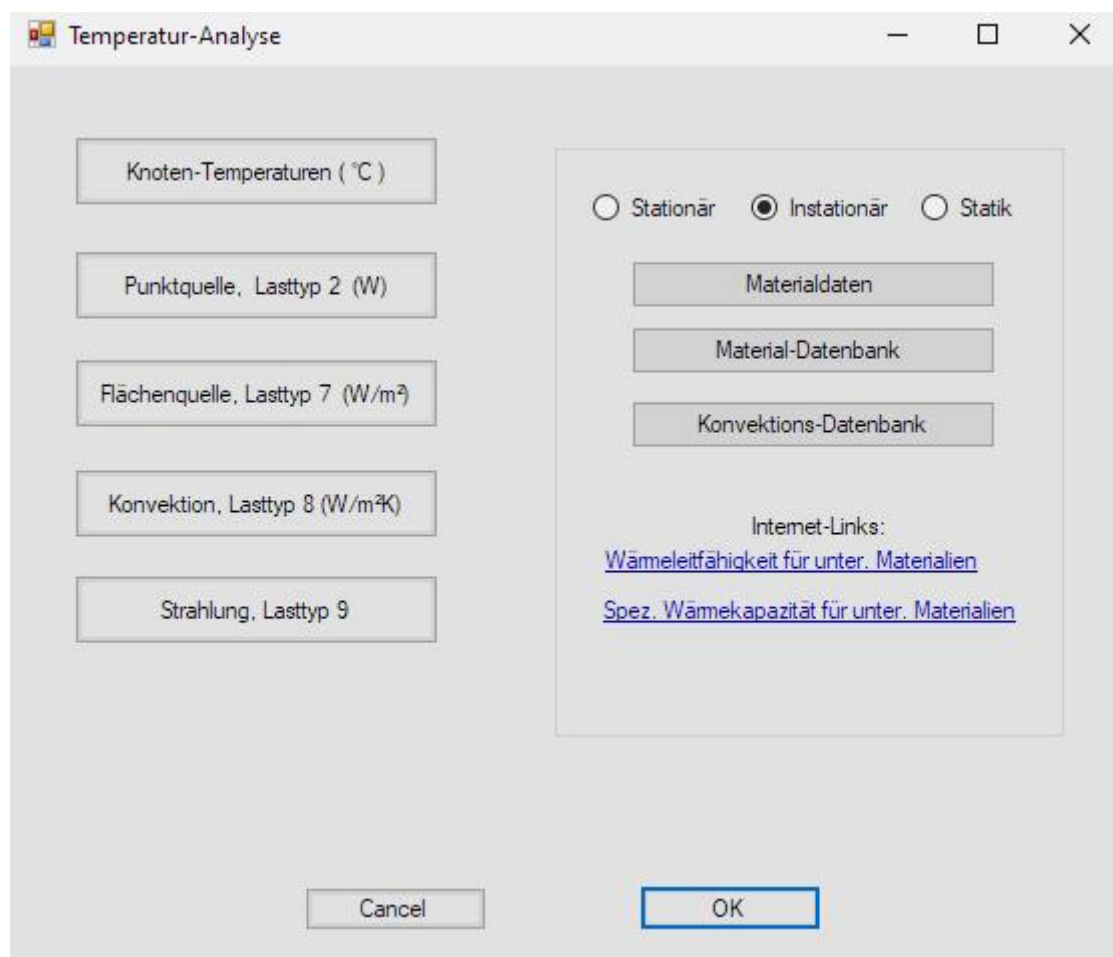


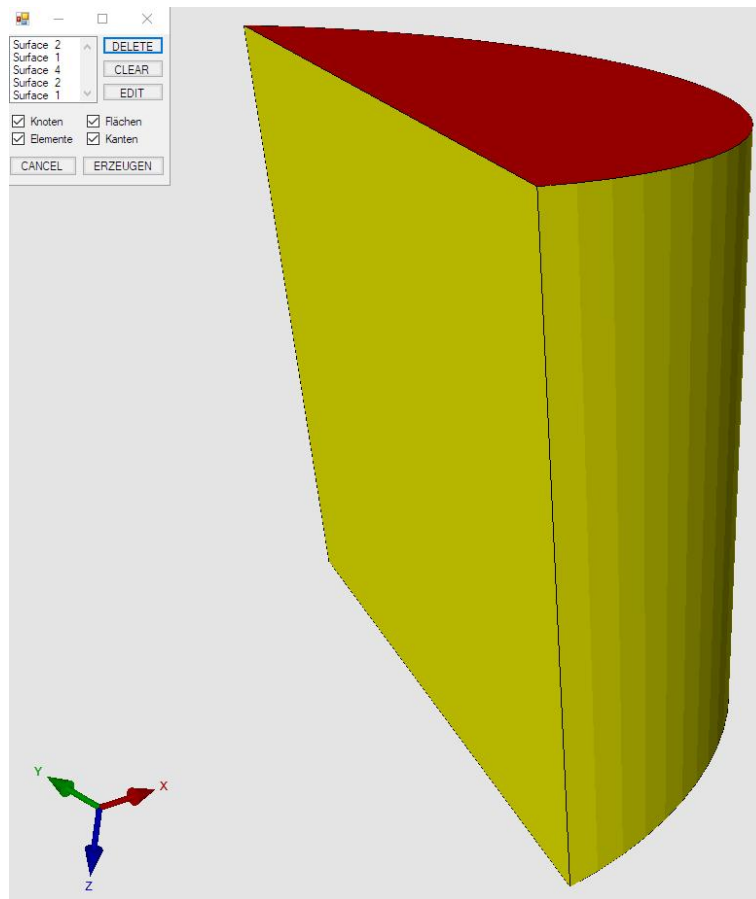
## Eingabe der Außentemperatur

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

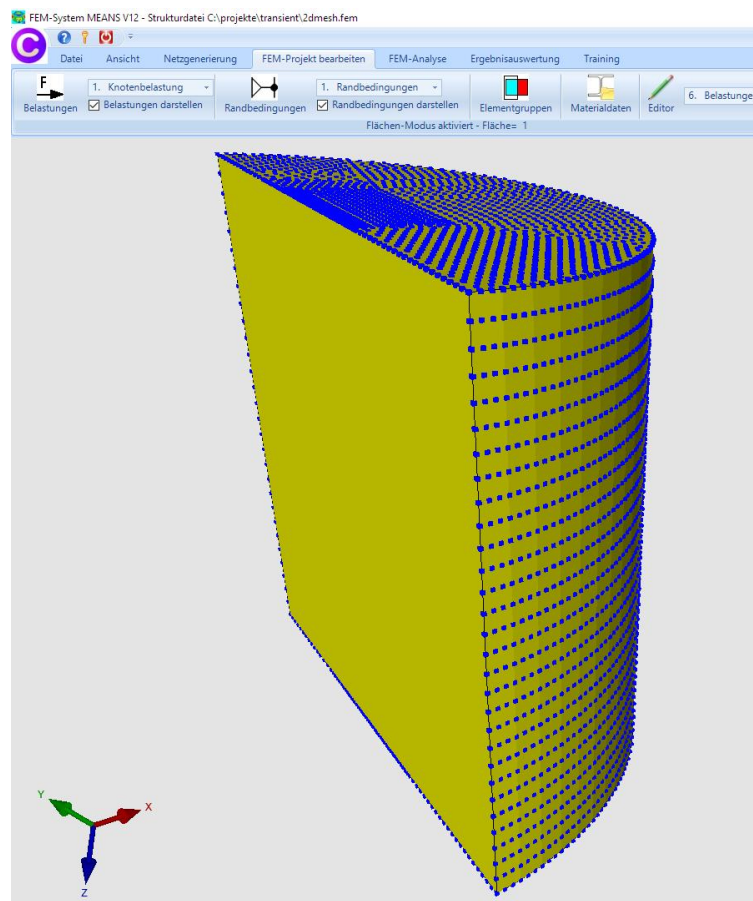


Wählen Sie Menü „Knoten-Temperaturen“ und klicken die Außen-Flächen 1, 2 und 4 an. Diese werden in der Select-Box angezeigt, dort mit Menü „Erzeugen“ die Randtemperaturen erzeugen.




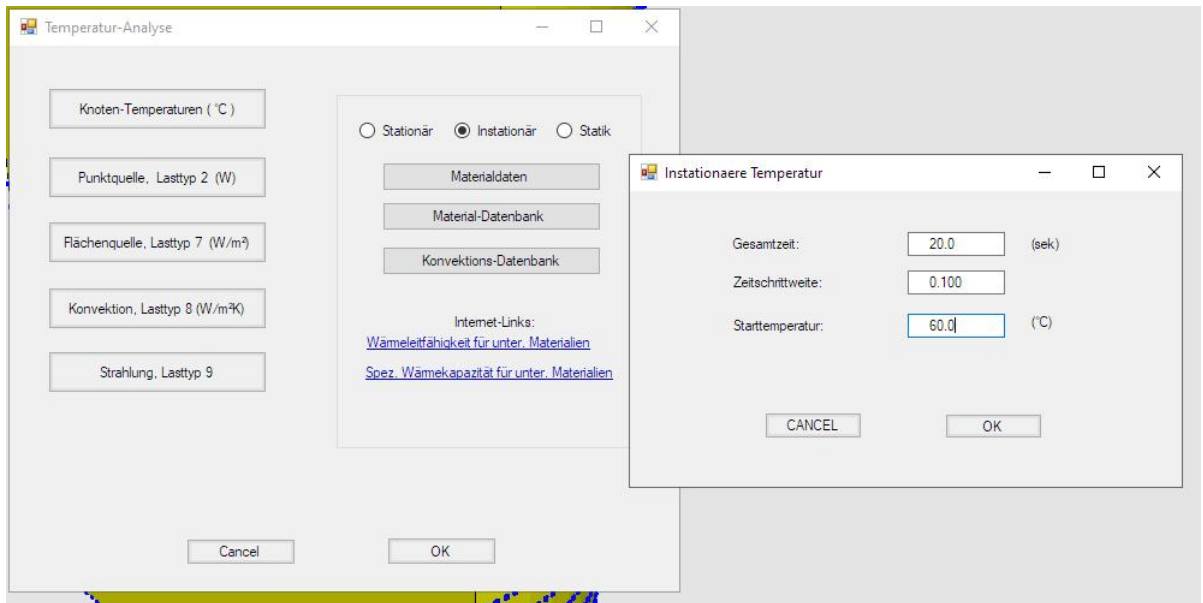


und erhält folgende Randbedingungen mit dem Wert= 0 als blaue Punkte dargestellt.



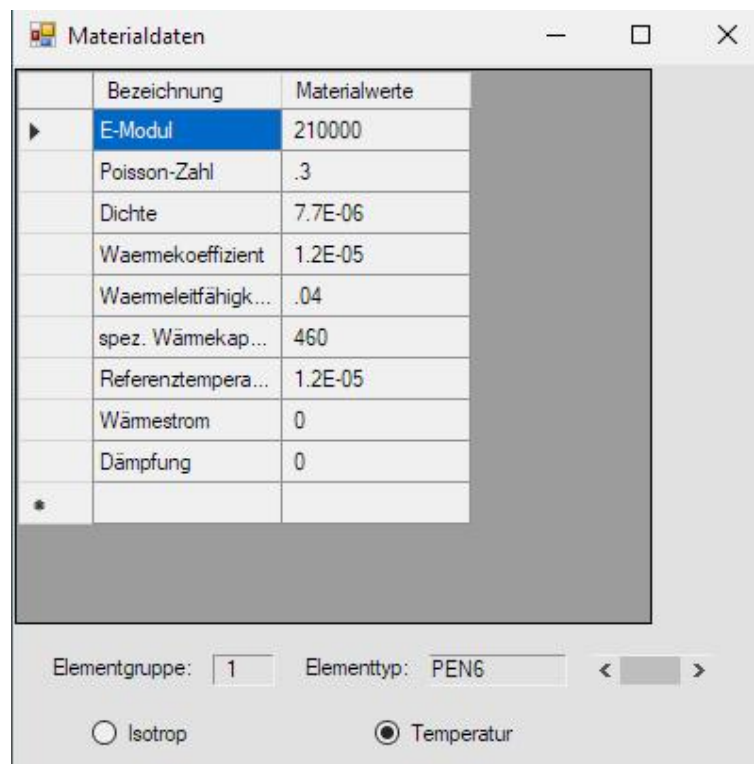


Zum Schluß wird mit  und Menü „instationär“ die instationäre Temperatur-Analyse mit der Gesamtzeit = 20 Sekunden, der Zeitschrittweite = 0.2 und der Start-Temperatur= 60 °C eingestellt.




## Materialdaten

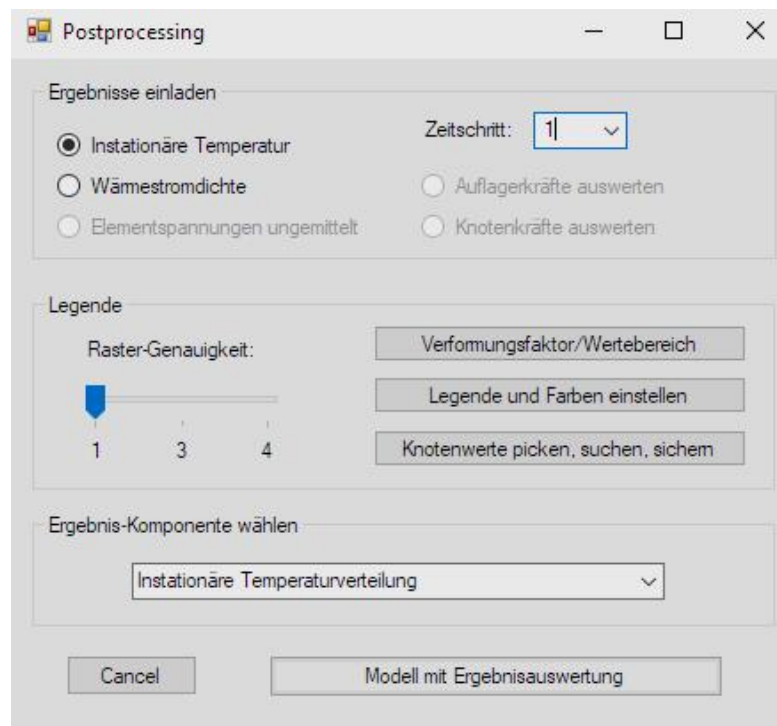
Wählen Sie das Register “FEM-Projekt bearbeiten” und das Icon  und geben folgende Materialdaten ein:



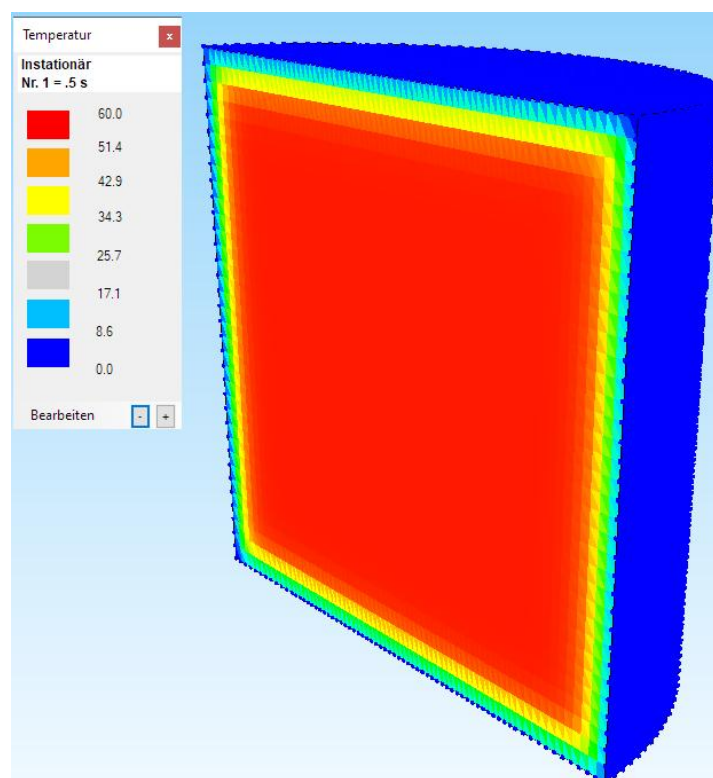
## Postprocessing



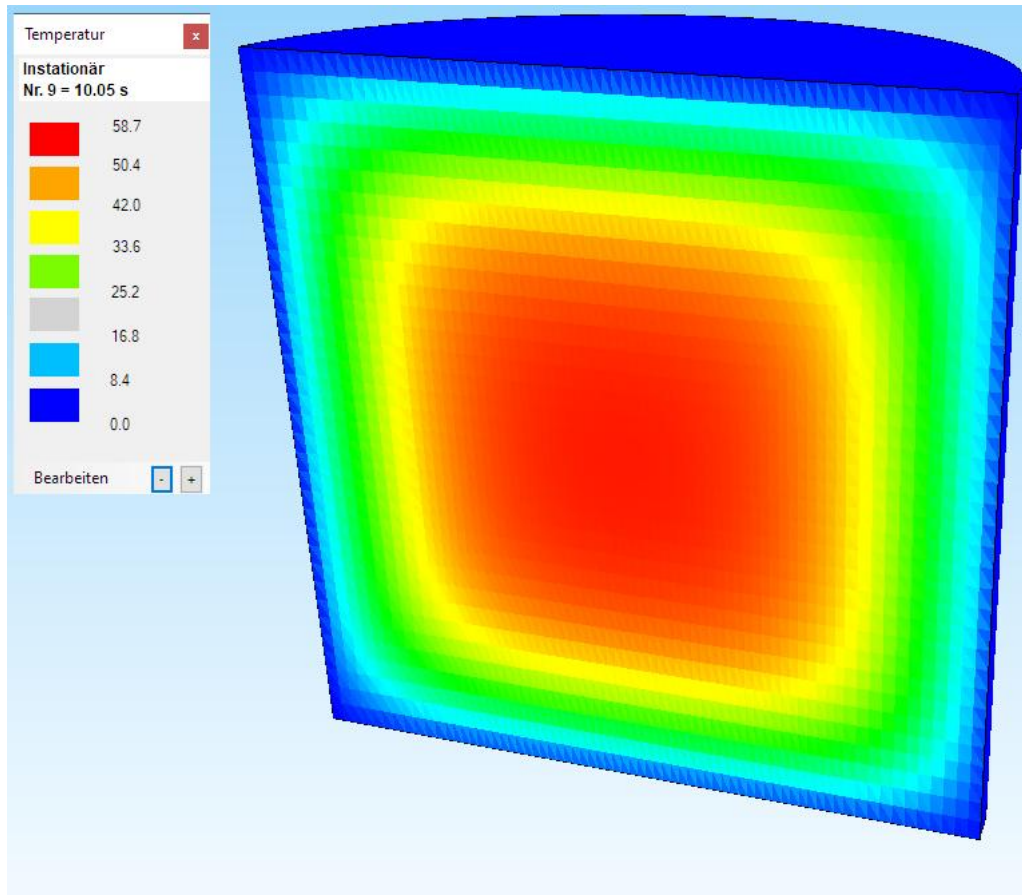
Nach der FEM-Analyse mit dem Quick-Solver folgt mit dem Icon  und Register „Ergebnisauswertung“ die Ergebnisauswertung der instationären Temperaturverteilungen für jeden Zeitschritt als 3D-Grafik oder mit einem Diagramm.



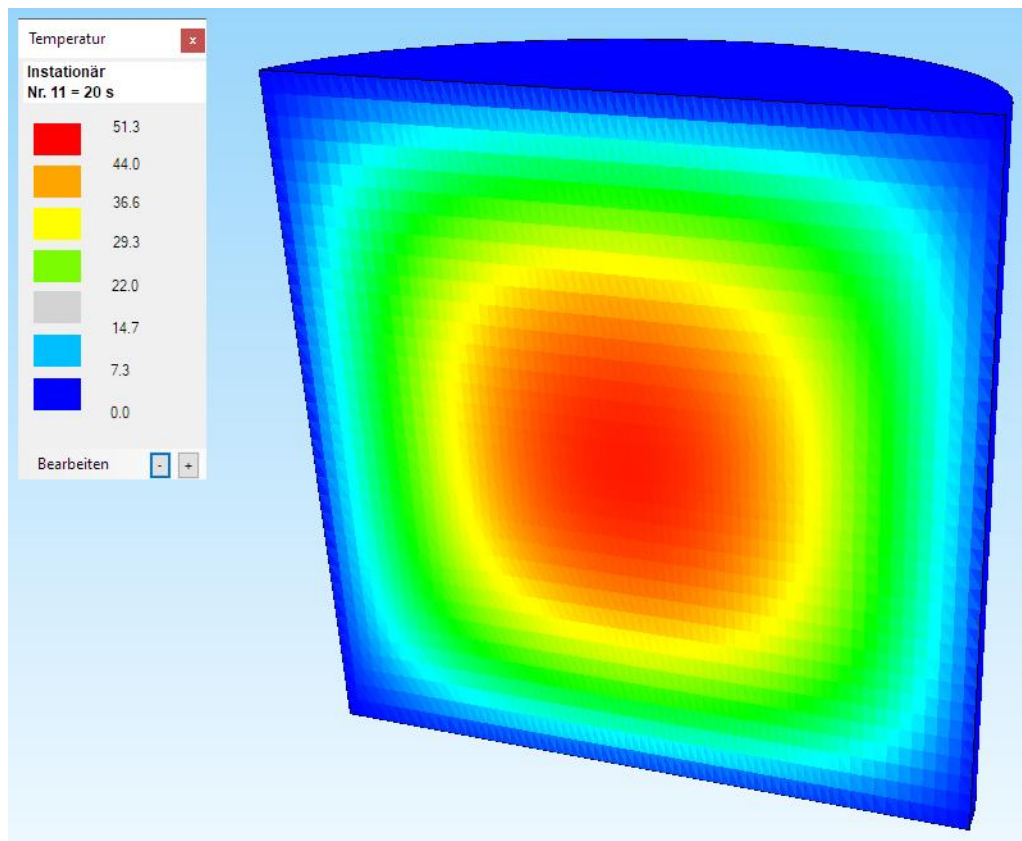
**Zeitschritt 1 mit dem Ausgangszustand und der Start-Temperatur 60 °C**



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

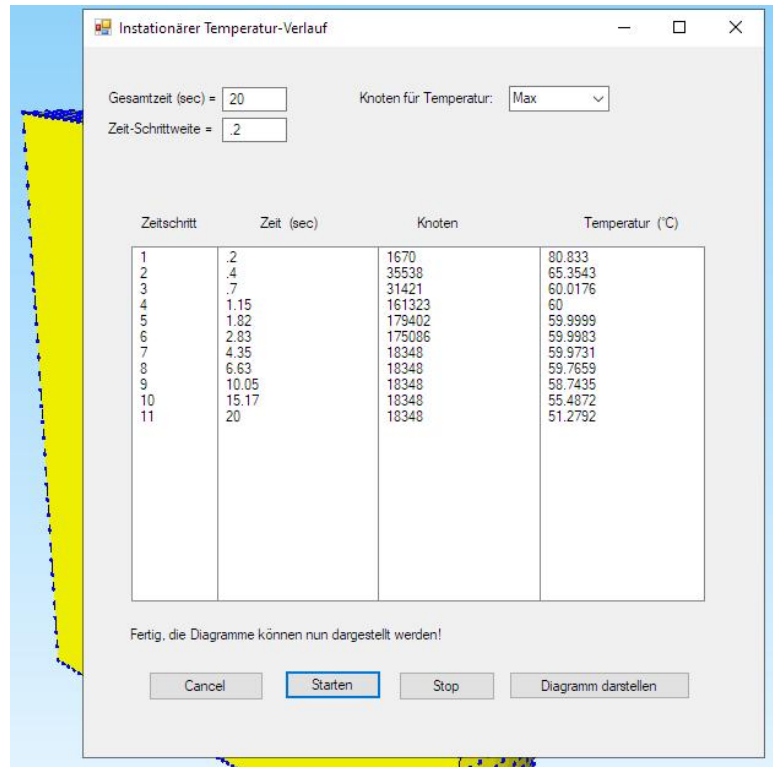


**Zeitschritt 11 nach 20 sec mit der max. Temperatur = 51.3 °C (exakt = 51.1 °C)**



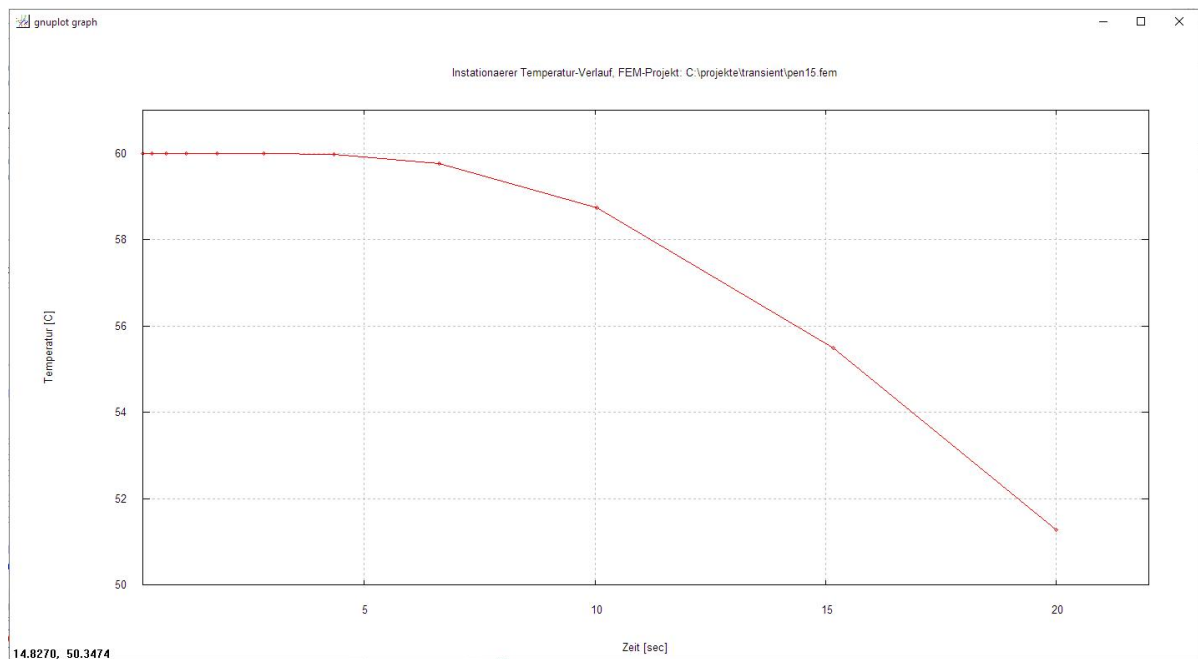
## Zeitschritt-Temperatur-Diagramm

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.



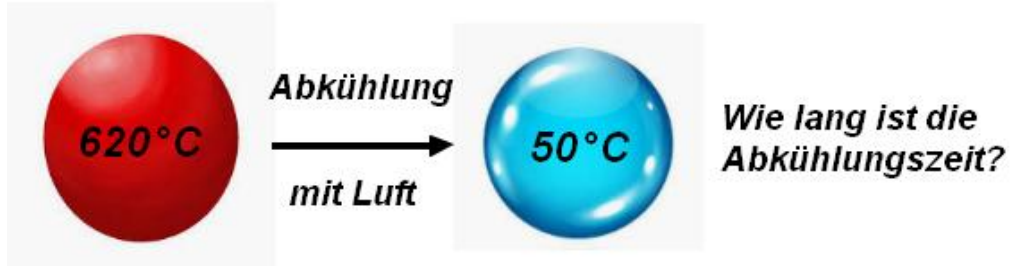
## Diagramm editieren

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

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

$D = 24 \text{ mm}$

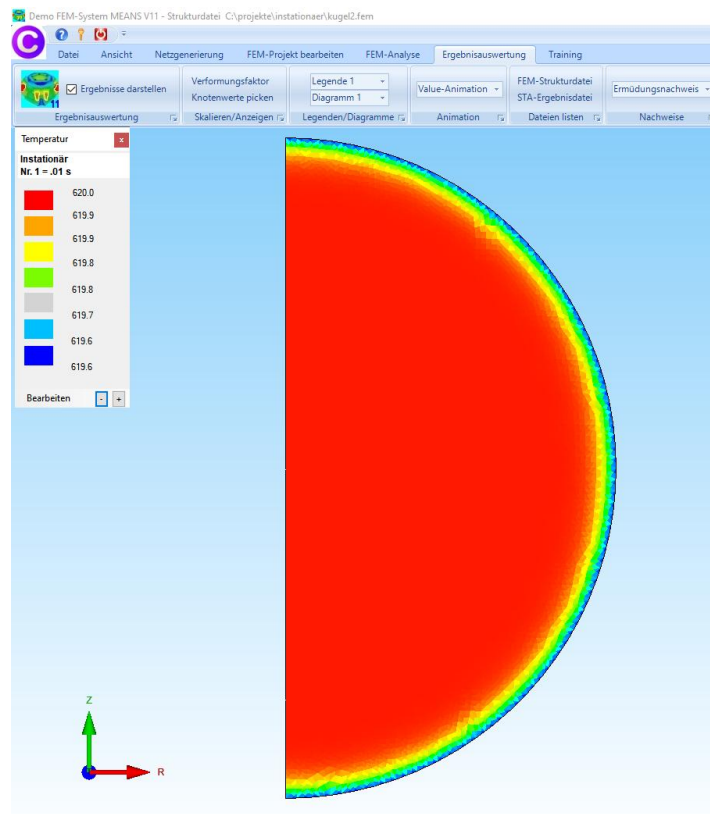
von der Anfangstemperatur  $\vartheta_o = 620 \text{ °C}$  in einem Luftstrom mit dem

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.

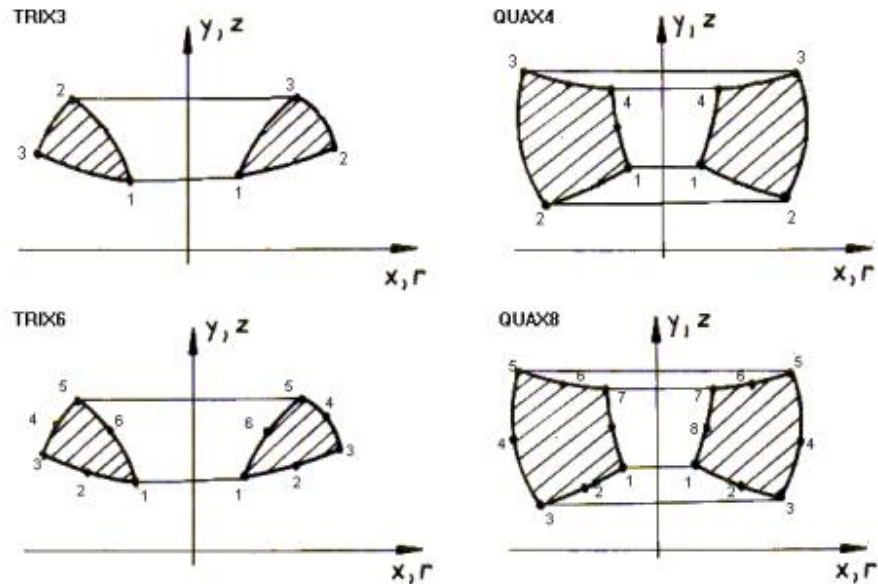
Berechnen Sie die dafür notwendige Abkühlzeit  $t$



## 2D-Berechnung


### FEM-Modell

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



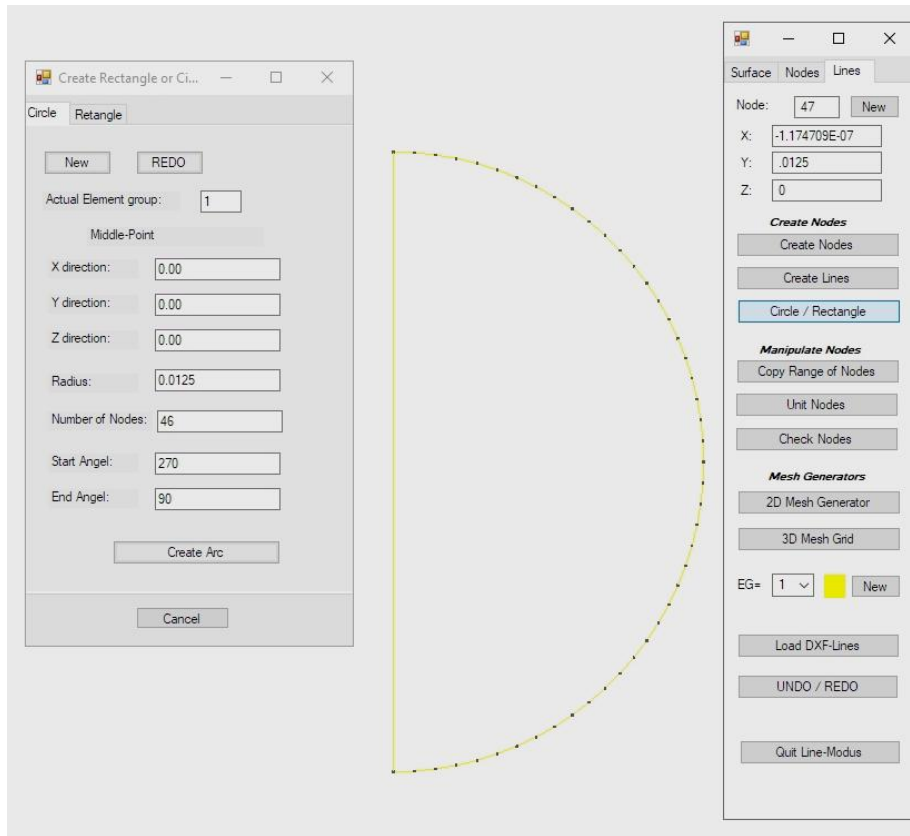
### Kreisbogen erzeugen



Starten Sie über das Desktop-Icon  das Prgramm „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:



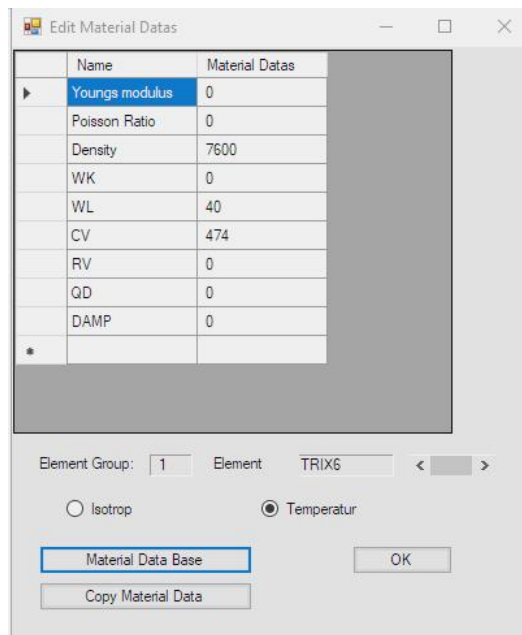
Dannach wählen Sie „Linie erzeugen“ um die Knoten 47 und 1 mit einer Linie zu verbinden. Zum Schluß wählen Sie Menü „2D Netzgenerator“ um ein TRIX3-Netz zu generieren.



## 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  $7600 \text{ kg/m}^3$ , der Wärmeleitfähigkeit von  $40 \text{ W/mk}$  und der Spezifische Wärmekapazität von  $474 \text{ J/(kgK)}$ .



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
<b>Stahl</b>	<b>210000000000</b>	<b>0.3</b>	<b>7600</b>	<b>0.00001</b>	<b>40</b>	<b>474</b>
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)

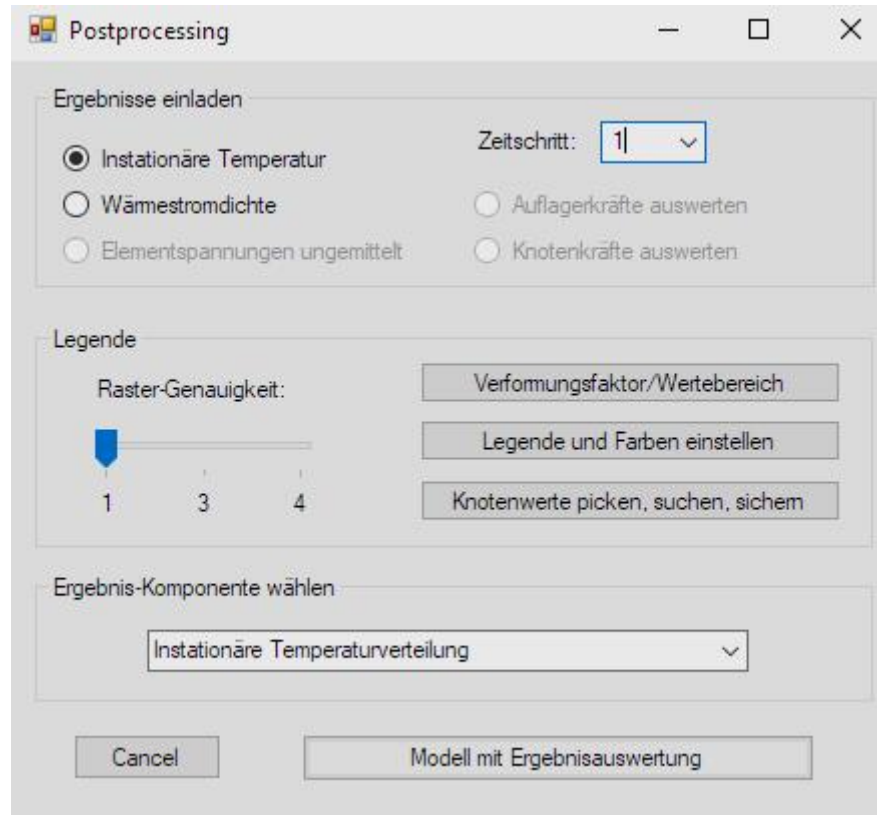
CANCEL OK



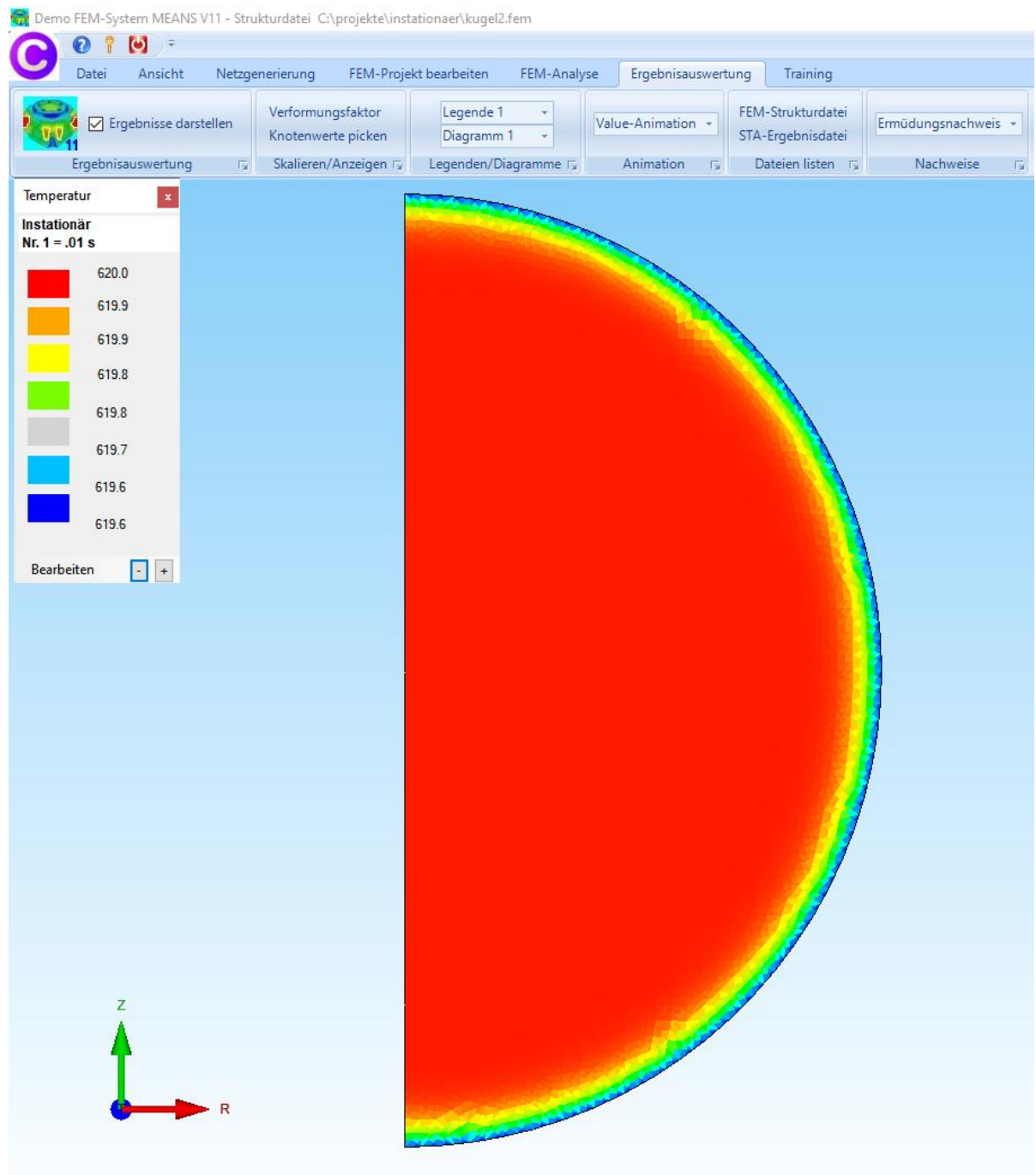
## Postprocessing



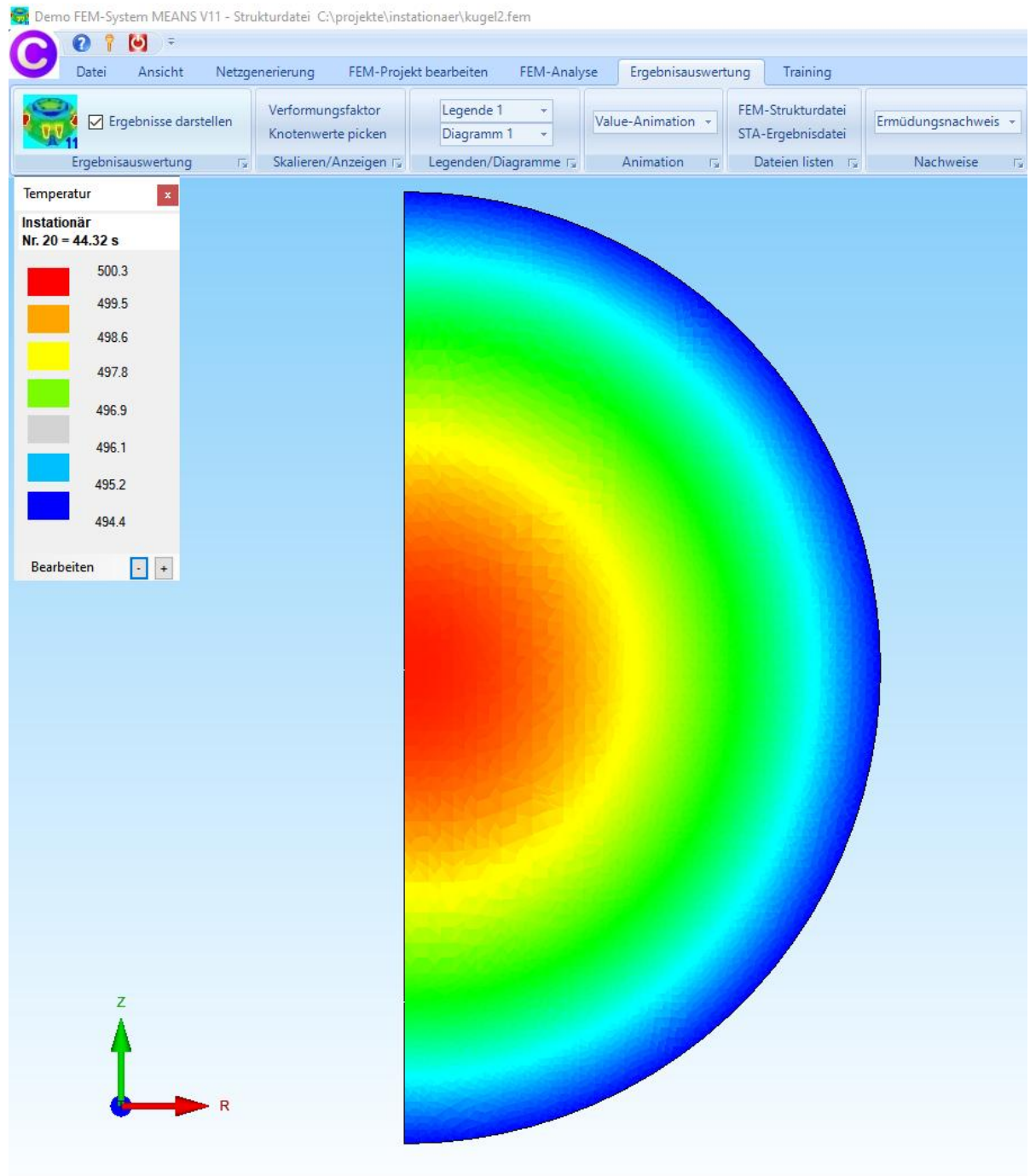
Wählen Sie das Register “Ergebnisauswertung” und das Icon um die Temperaturverteilungen für jeden Zeitschritt darzustellen.



### 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

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

