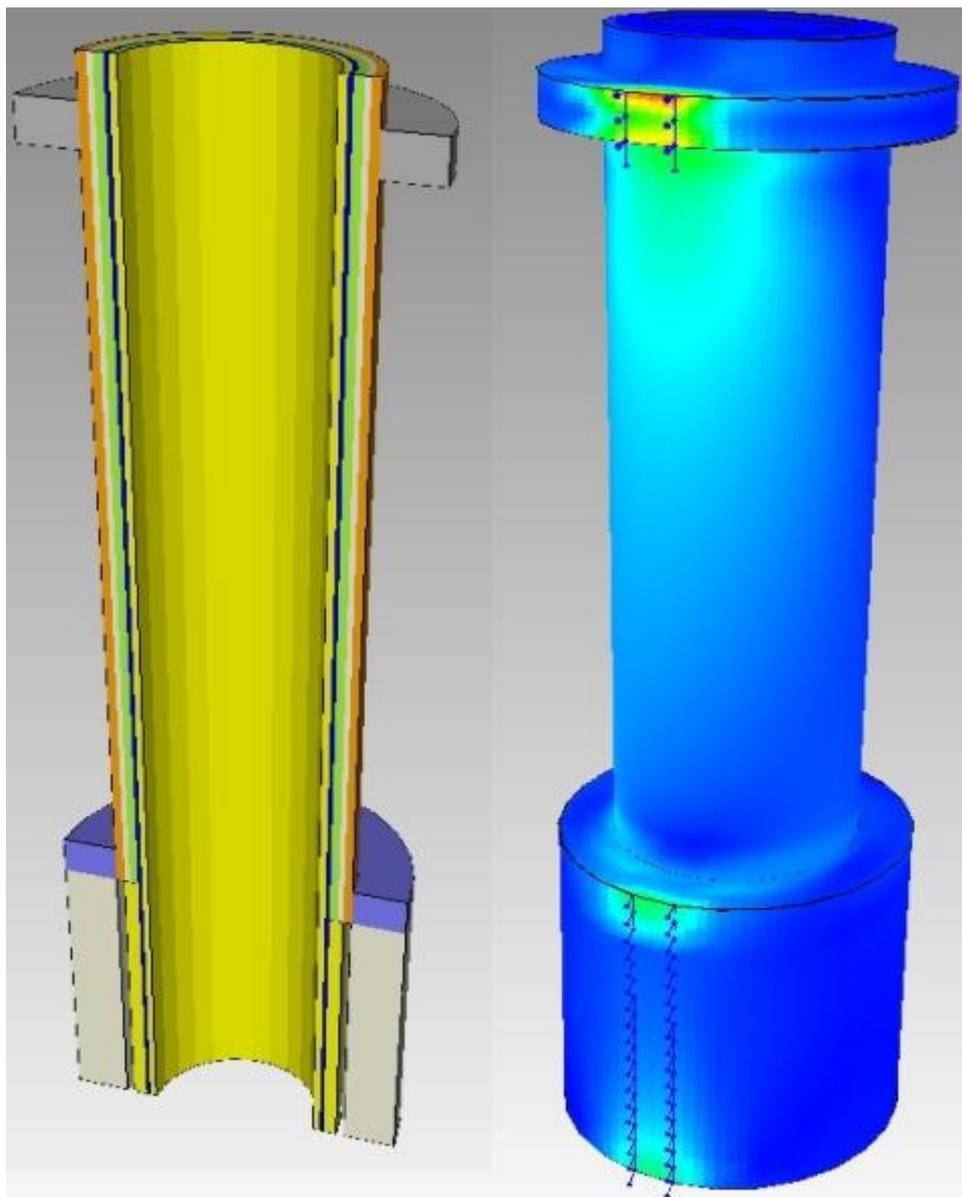


Kapitel 33: 3D-Netzgenerator SOLIDGEN für Wärmetauscher- und Batterie-Strukturen

Mit dem neuen 3D-Netzgenerator SOLIDGEN (ab MEANS Update vom 1.7.2023) können Zylinder und Quader aus der 2D-Ansicht in die Tiefe extrudiert werden. Ebenso können ganze Zylinder-Gruppen (siehe Batterie-Pack) in relativ kleine und genaue Hexaeder-Netze generiert werden die sonst mit den gängigen Tetraeder-Netzgeneratoren (z.B. NETGEN oder GMSH) nur mit sehr großem Modellierungs- und Zeitaufwand möglich sind.

Wärmetauscher aus 22 542 Hexaedern und 24 674 Knoten

Struktur besteht aus 3 Rohren, 2 Isolierungen, 1 Betonschicht und 3 Luftschichten

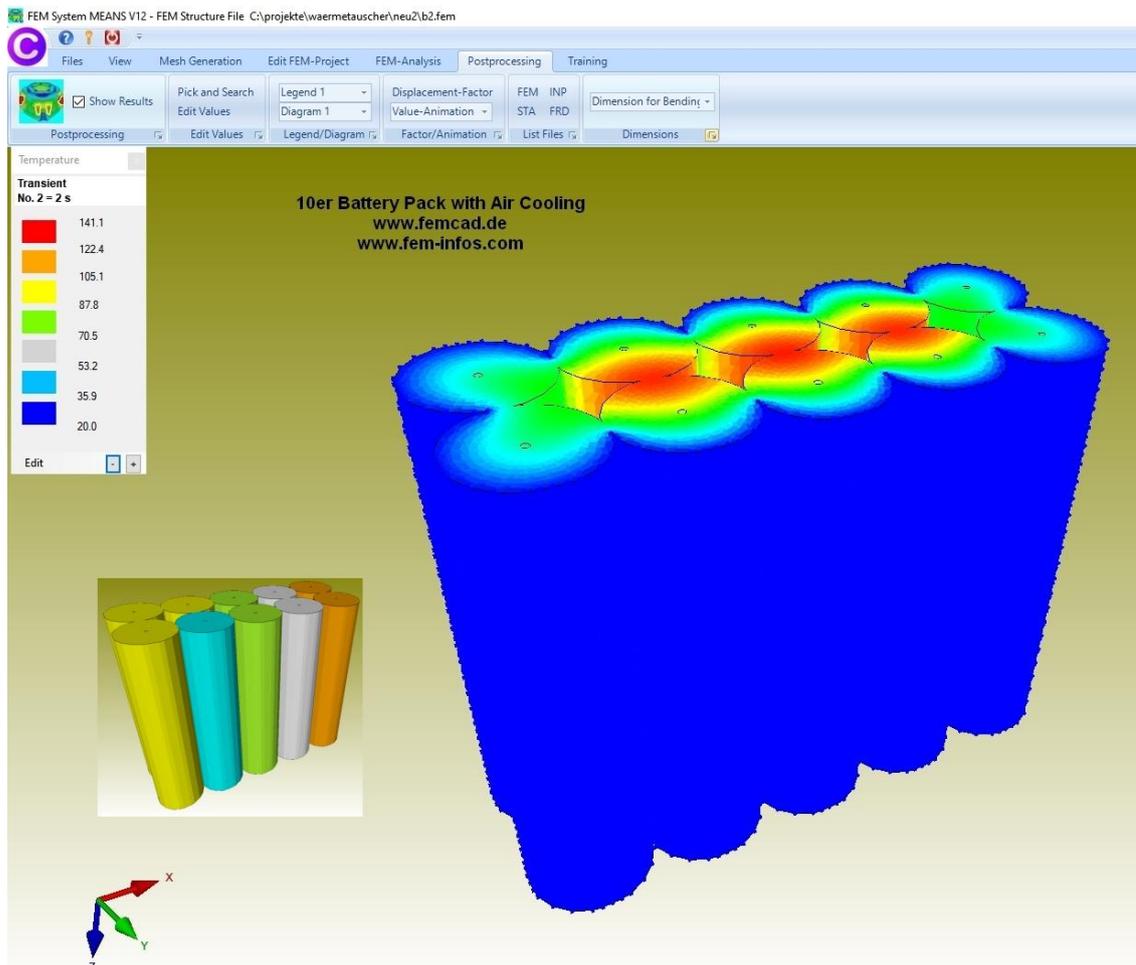


Batterie-Pack

Es wird mit SOLIDGEN ein 10er Batterie-Pack bestehend aus 10 Zylindern generiert und mit MEANS und Zusatzmodul TEMPERATUR mit einer Luft-Kühlung berechnet. Eine Kühlung ist sehr wichtig, da durch die in Reihe geschalteten Akkus wegen der höheren Stromleistung sehr schnell überhitzen, auslaufen oder altern können. Fällt nur eine Batterie aus ist der gesamte Stromspeicher kurzgeschlossen und kann im Extremfall sogar explodieren. Da große Temperaturdifferenzen auch höhere Verformungen und Spannungen erzeugen sollte das Batterie-Pack möglichst schonend und gleichmäßig abgekühlt werden.



FEM-Modell aus 26 680 Hexaedern und 34 424 Knoten



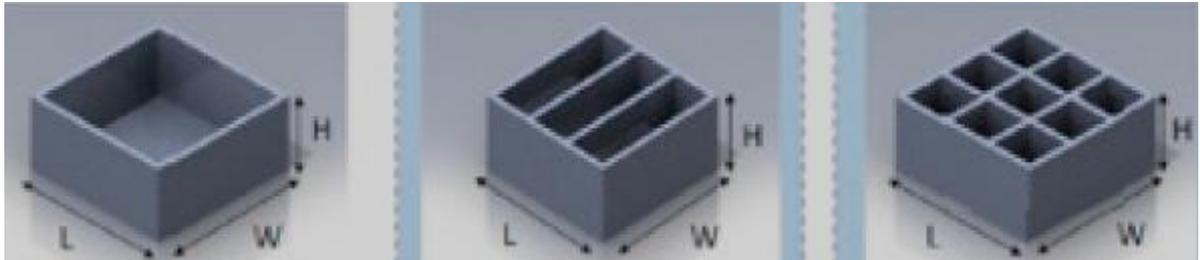
16er Batterie-Pack mit drei verschiedenen Kühlungssystemen

Im folgenden werden die instationären Temperaturverteilungen eines 16er Batterie-Packs mit folgenden drei Abkühlungssystemen berechnet:

**alle Außenflächen
1x1 Kühlung**

**+ alle Horizontalflächen
4x1 Kühlung**

**+ alle Vertikalflächen
4x4 Kühlung**



Netzgenerierung mit SOLIDGEN

Zuerst werden 4 Zylinder und 4 Quader mit den Durchmessern, Mittelpunkten, Breiten und Höhen in einem übersichtlichen Formular von SOLIDGEN eingegeben und generiert.

Mesh Generator SOLIDGEN for Cylinders and Quaders

Mesh-Density: X-ND-CYL: Y-ND-CYL: Z-ND-CYL: X-ND-QU:

Number of Element Groups: Start-Angel: End-Angel: Y-ND-QU:

10 Battery Pack 16 Battery Pack with Cooling Spaces Heat Exchanger

[16 Battery-Pack with 4 models, each with 4 Cylinders and 4 Quaders](#)

Inside-Cylinder 1
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

Quader 1
 X-V1: Y-V1: X-V2: Y-V2: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

Inside-Cylinder 2
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

Quader 2
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

Inside-Cylinder 3
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

Quader 3
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-D: Y-D: Y-V4: Name:

Inside-Cylinder 4
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

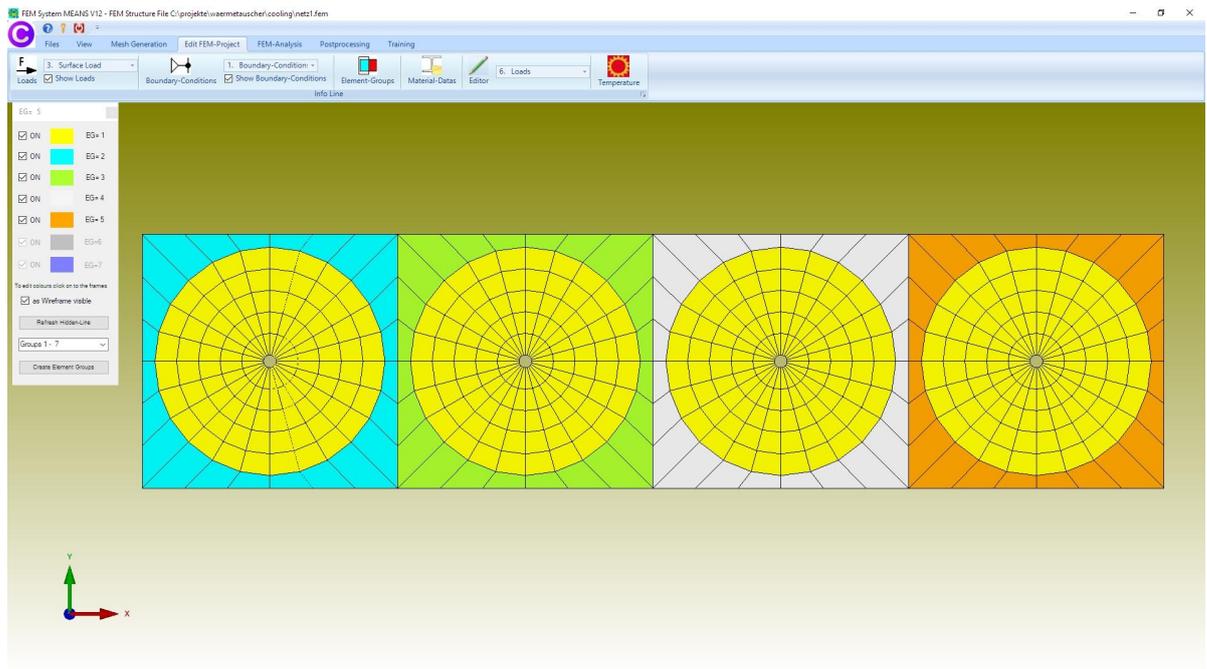
Quader 4
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

Cylinder 9
 Di: Da: X-MP: Y-MP: X-V4: NGR:
 Z-MP: Z-L: X-V3: Y-V3: Y-V4: Name:

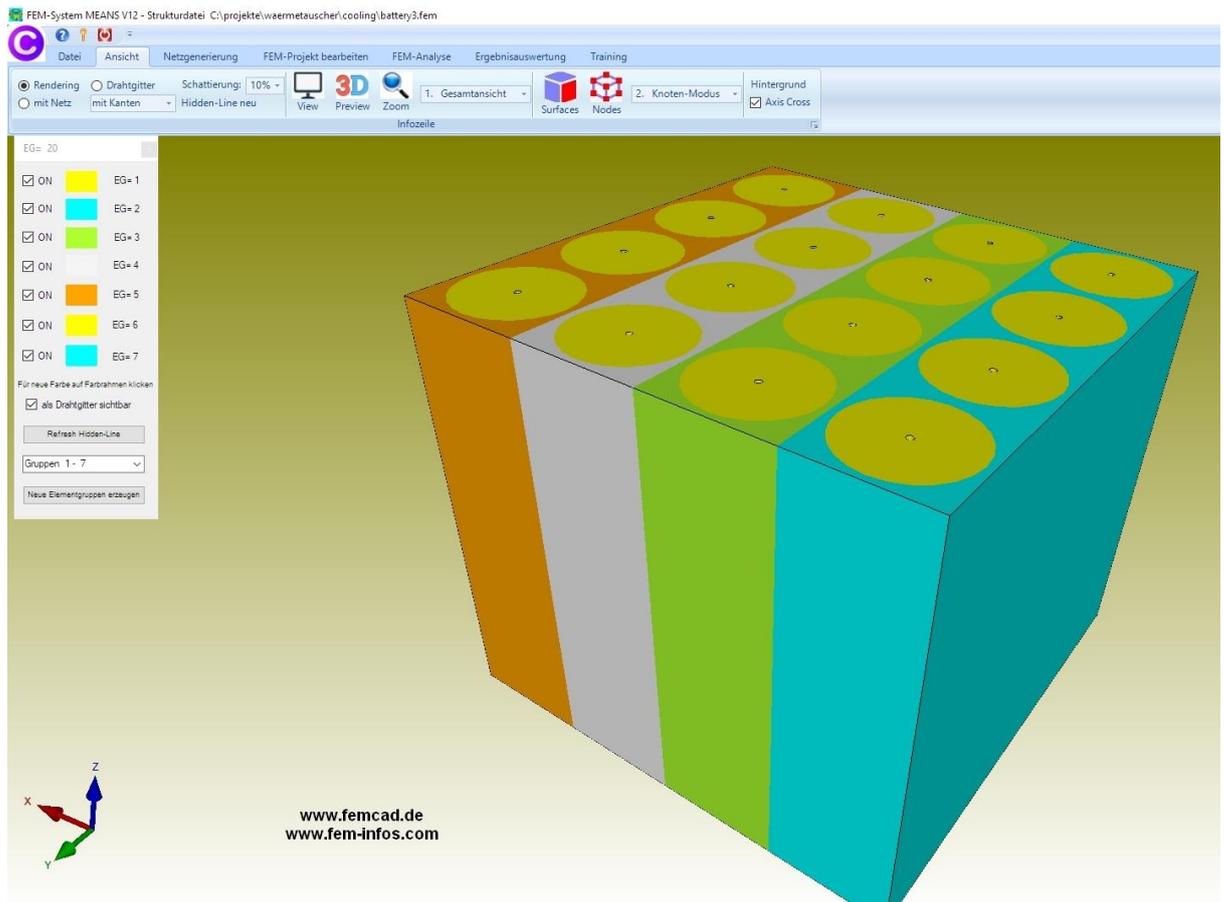
MESH-GENERATION

Save Load Cancel

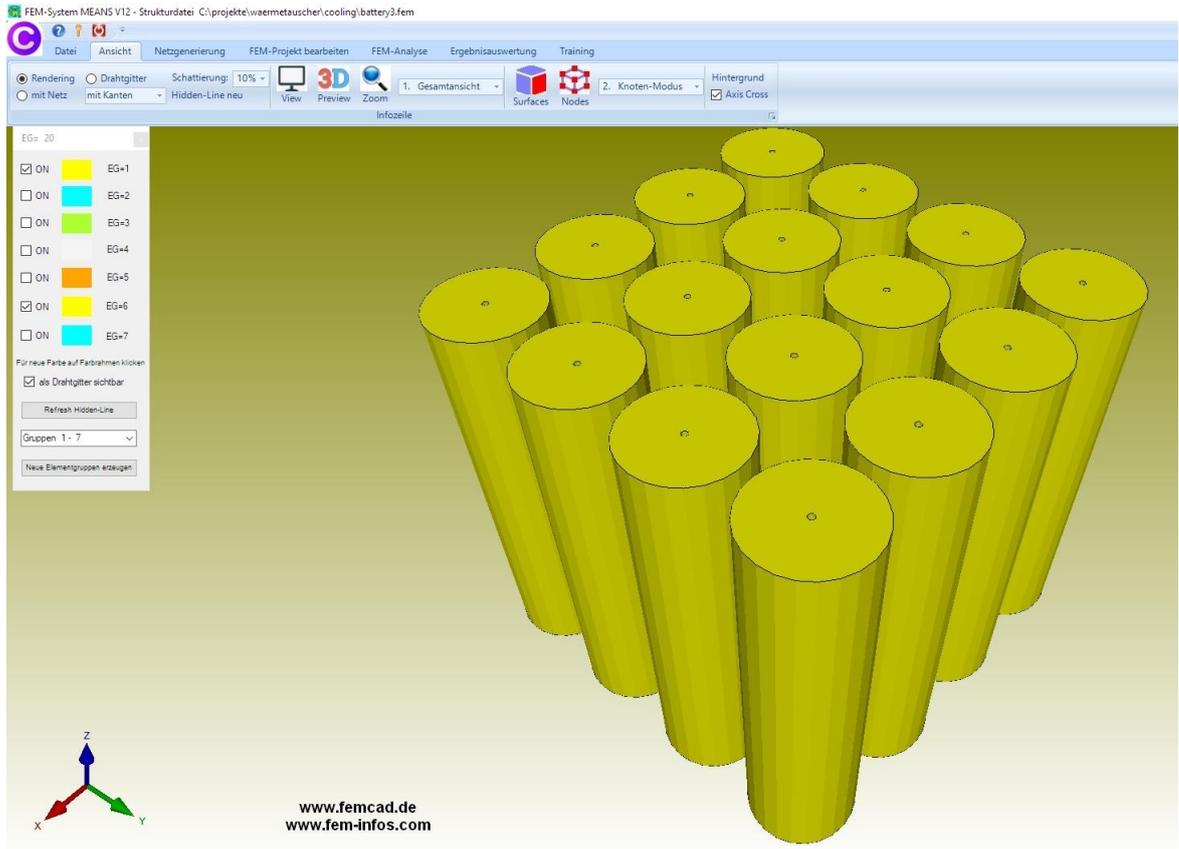
Es wird ein 2D-QUAD-Netz generiert und anschließend mit den Z-Höhen und Z-Längen in ein 3D-Hexaeder-Modell extrudiert.



Im letzten Schritt werden 4 Netze die jeweils um 20 mm in Y-Richtung versetzt sind zu einem FEM-Modell aus 54 303 Hexaeder-Elementen, 65 171 Knoten und 20 Elementgruppen zusammengeladen.

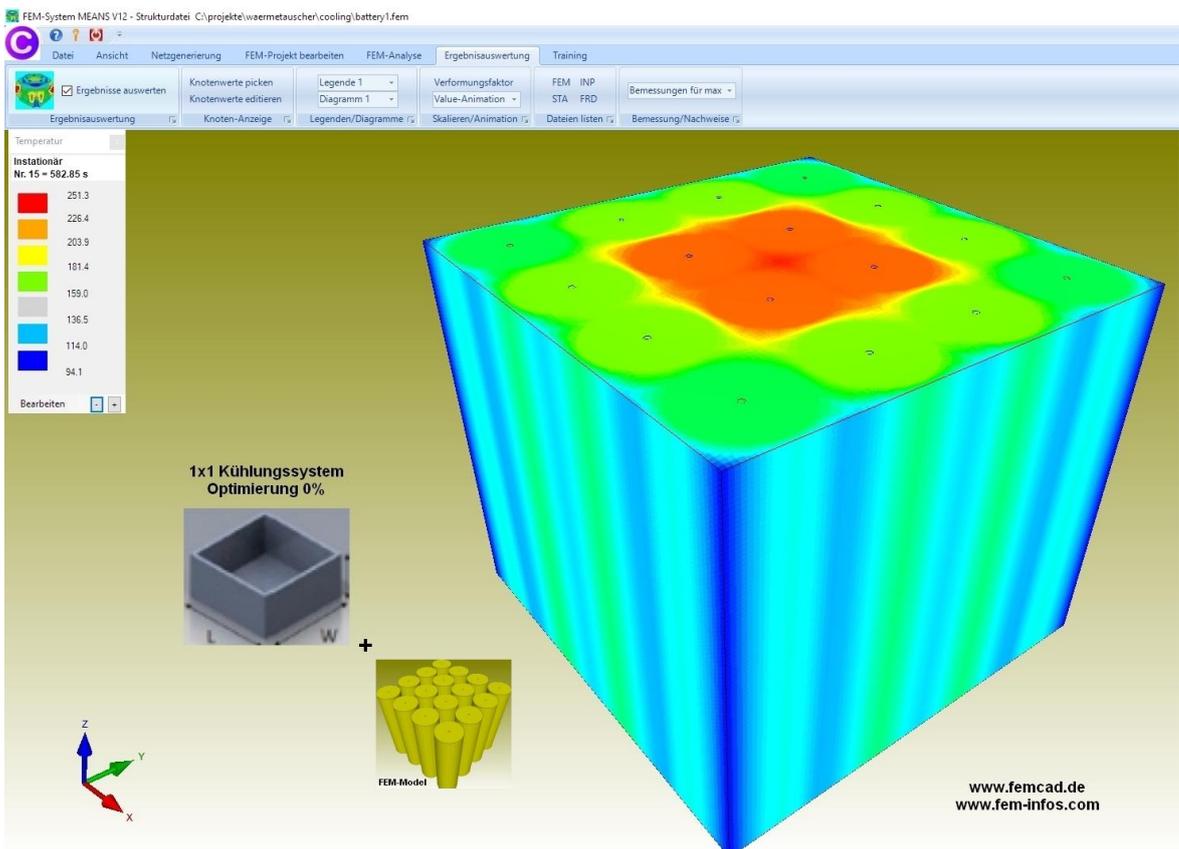


FEM-Modell mit 16 Zylindern ohne Quader



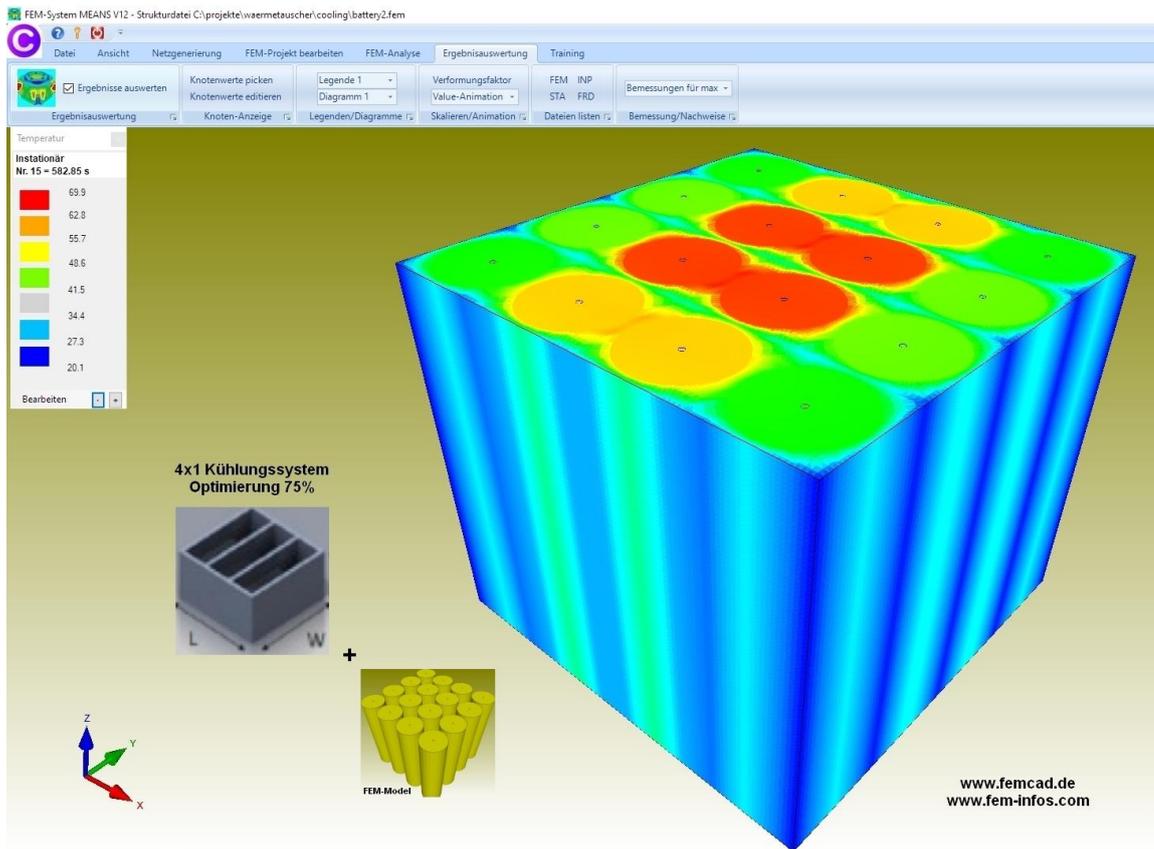
1x1 Kühlung nach 15 Zeitschritten und 585 Sekunden

max. Temperatur = 251.3° C; min. Temperatur = 94.1° C



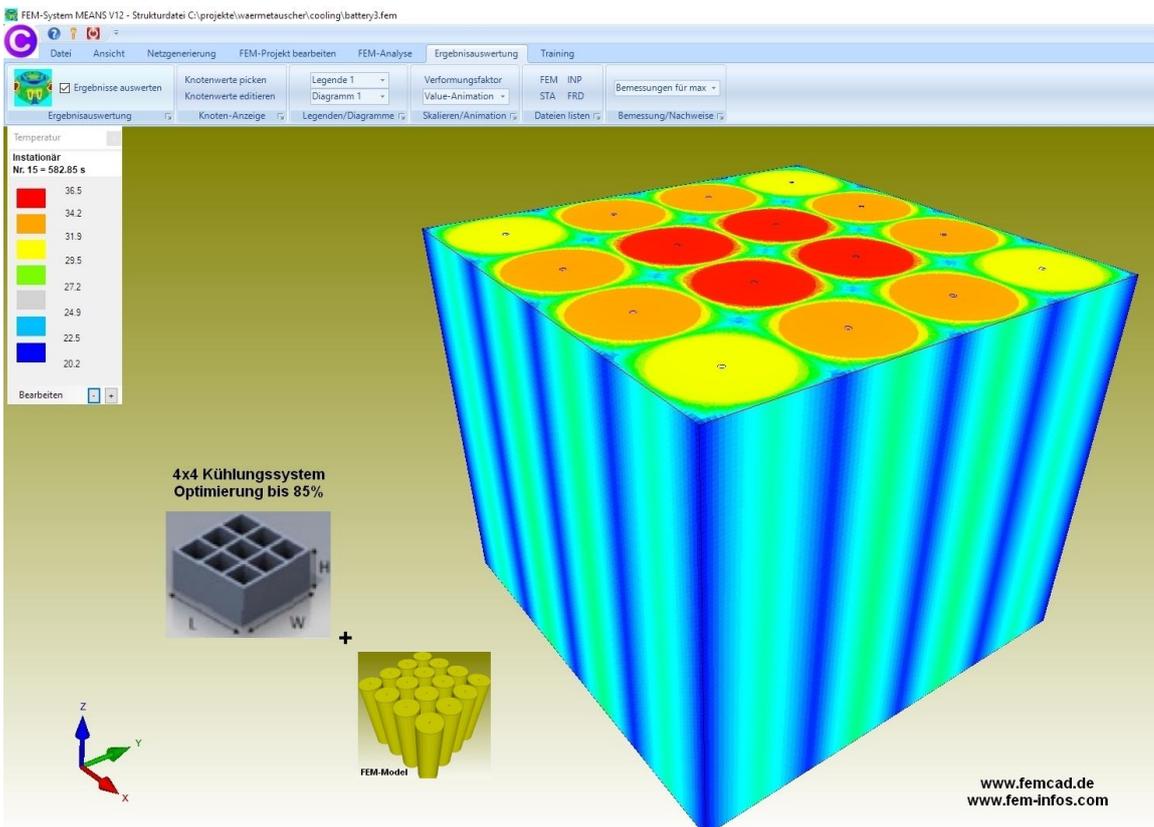
4x1 Kühlung nach 15 Zeitschritten und 585 Sekunden

max. Temperatur = 69.9° C; min. Temperatur = 20.1° C



4x4 Kühlung nach 15 Zeitschritten und 585 Sekunden

max. Temperatur = 36.5° C; min. Temperatur = 20.2° C



SOLIDGEN-Formular

Wählen Sie Register „Netzgenerierung“ und Menü „SOLIDGEN“ um das Formular von SOLIDGEN anzuzeigen um batterieähnliche Strukturen aus Zylindern und Quadern zu generieren:

- Zylinder, bis zu 9 Zylinder können gleichzeitig generiert werden
- Zylinder die andere berühren, z.B. 10er Batterie-Pack mit Y-ND-CYL = 20
- Zylinder in einem Quader, z.B. 16er Batterie-Pack mit Y-ND-CYL = 24
- Quader, z.B. für geschichtete Strukturen, z.B. Fußbodenheizung (i.V.)

Mehre Teilnetze können mit einer FEM-Zuladung zu einem Hauptnetz verbunden werden. Um ein 2D-Netz mit Kreis und Rechteck zu generieren geben Sie folgendes in das SOLIDGEN-Formular ein:

Mesh-Density:	X-ND-CYL:	<input type="text" value="6"/>	Y-ND-CYL:	<input type="text" value="24"/>	Z-ND-CYL:	<input type="text" value="25"/>	X-ND-QU:	<input type="text" value="0"/>			
Number of Element Groups:	<input type="text" value="2"/>	Start-Angel:	<input type="text" value="0"/>	End-Angel:	<input type="text" value="360"/>	Y-ND-QU:	<input type="text" value="0"/>				
Innen-Zylinder 1											
Di:	<input type="text" value="1"/>	Da:	<input type="text" value="18"/>	X-MP:	<input type="text" value="0"/>	Y-MP:	<input type="text" value="0"/>	X-V4:	<input type="text" value="0"/>	NGR:	<input type="text" value="1"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="0"/>	X-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V4:	<input type="text" value="0"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Quader 1											
X-V1:	<input type="text" value="-10"/>	Y-V1:	<input type="text" value="-10"/>	X-V2:	<input type="text" value="10"/>	Y-V2:	<input type="text" value="-10"/>	X-V4:	<input type="text" value="-10"/>	NGR:	<input type="text" value="2"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="10"/>	Y-V3:	<input type="text" value="10"/>	Y-V4:	<input type="text" value="10"/>	Name	<input type="text" value=""/>

Netzdichten:

X-ND-CYL: Anzahl Knotenpunkte in X-Richtung bzw. Radius

Y-ND-CYL: Anzahl Knotenpunkte um den Umfang (je größer desto kreisförmiger)

Z-ND-CYL: Anzahl Knotenpunkte in Z-Richtung

X-ND-QU: Anzahl Knoten in X-Richtung bei einem Quader

Y-ND-QU: Anzahl Knoten in Y-Richtung bei einem Quader

Zylinder-Eckdaten:

Innen-Durchmesser Di = 1 mm (hier kleine Bohrung um Pentaeder zu vermeiden)

Außen-Durchmesser Da = 18 mm

X-MP = X-Mittelpunkt

Y-MP = Y-Mittelpunkt

Z-MP = Z-Mittelpunkt bei Zylindern oder Z-Startpunkt bei Quadern

Z-L = Länge in Z-Richtung (für 2D = 0)

Quader-Eckdaten:

X-V1 = X-Punkt 1

Y-V1 = Y-Punkt 1

X-V2 = X-Punkt 2

Y-V2 = Y-Punkt 2

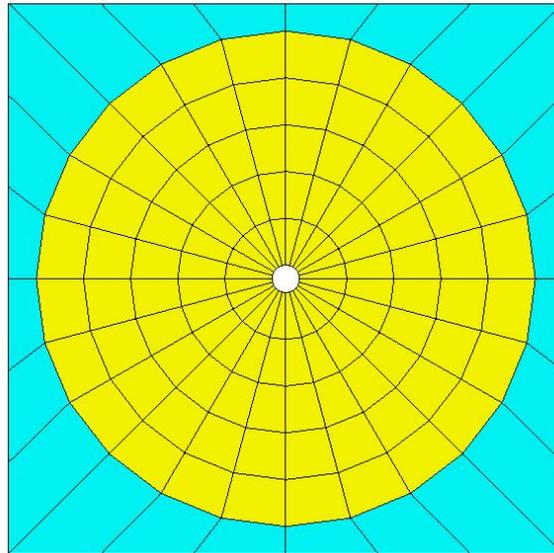
X-V3 = X-Punkt 3

Y-V3 = Y-Punkt 3

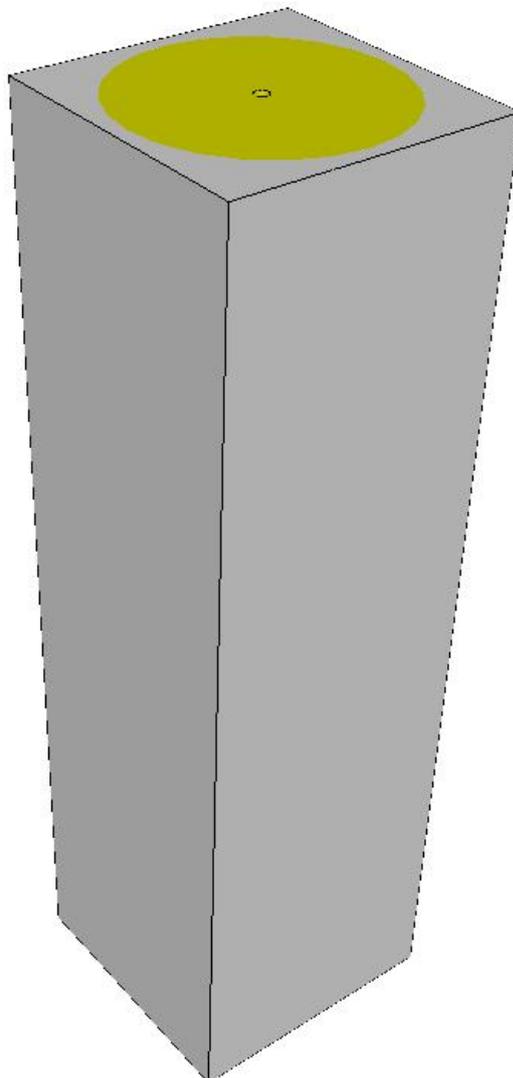
X-V4 = X-Punkt 4

Y-V4 = Y-Punkt 4

Wählen Sie das Menü „Mesh Generation“ um mit $Z-L = 0$ ein 2D-Netz aus 140 QUA4S-Scheibenelementen und 168 Knotenpunkten zu erzeugen.



Wählen Sie das Menü „Mesh Generation“ um mit $Z-L = 70$ ein 3D-Netz aus 3456 HEX8-Volumenelementen und 6400 Knotenpunkten zu erzeugen.



Erzeugung des 4x1 Modells

Klicken Sie auf „16er Batterie-Pack“ dann werden die Eckdaten für 4 Zylinder und 4 Quader angezeigt und wählen Menü „Mesh Generation“.

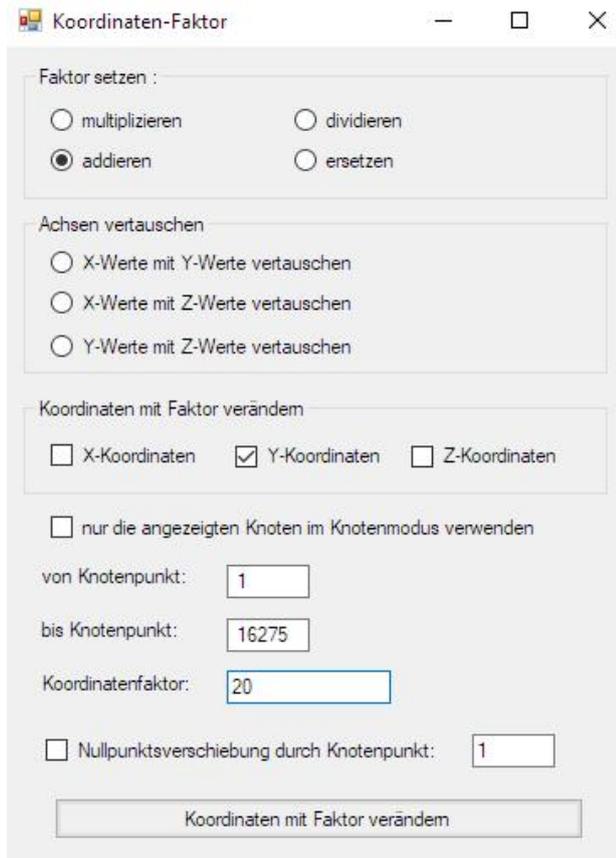
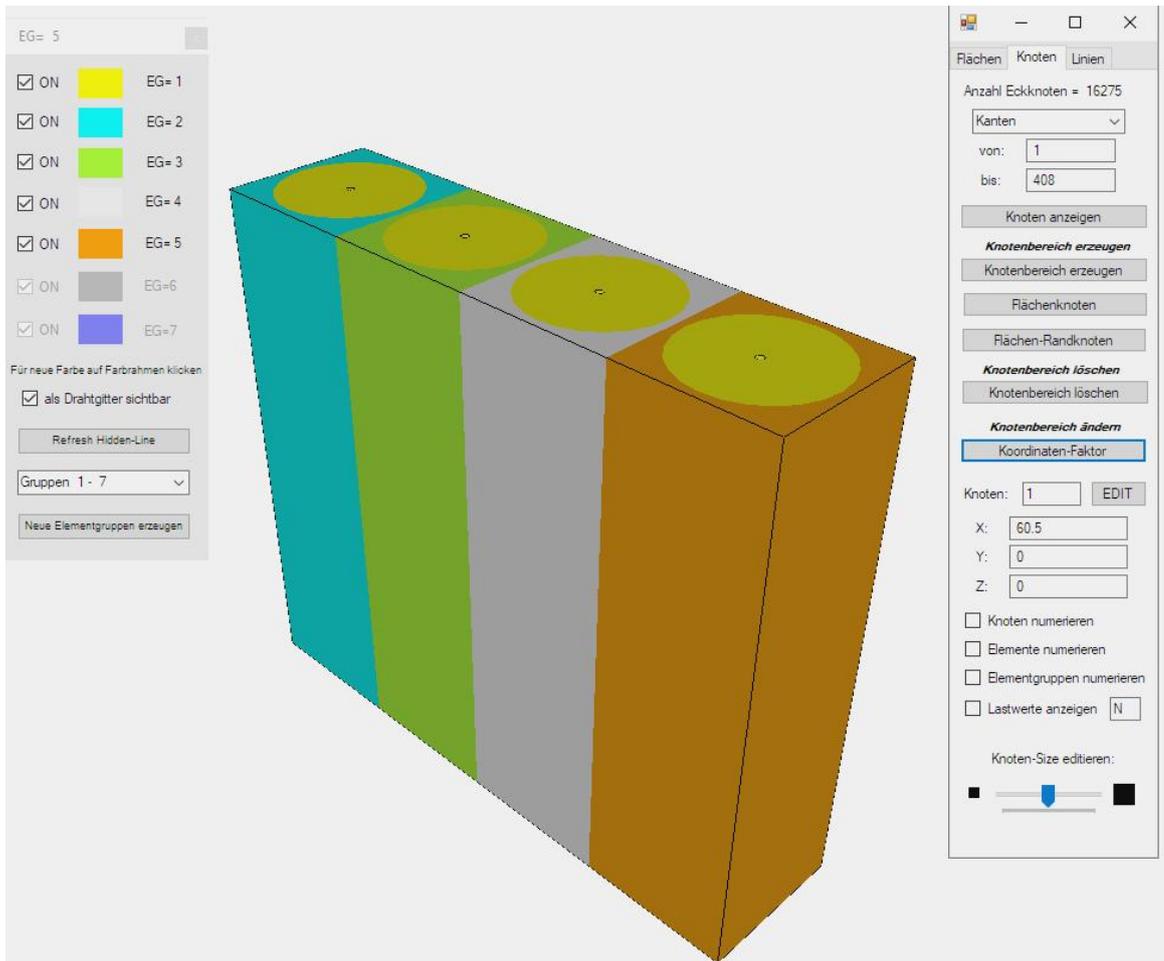
Mesh-Density:	X-ND-CYL:	<input type="text" value="6"/>	Y-ND-CYL:	<input type="text" value="24"/>	Z-ND-CYL:	<input type="text" value="25"/>	X-ND-QU:	<input type="text" value="0"/>			
Number of Element Groups:	<input type="text" value="8"/>	Start-Angel:	<input type="text" value="0"/>	End-Angel:	<input type="text" value="360"/>	Y-ND-QU:	<input type="text" value="0"/>				
Innen-Zylinder 1											
Di:	<input type="text" value="1"/>	Da:	<input type="text" value="18"/>	X-MP:	<input type="text" value="0"/>	Y-MP:	<input type="text" value="0"/>	X-V4:	<input type="text" value="0"/>	NGR:	<input type="text" value="1"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V4:	<input type="text" value="0"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Quader 1											
X-V1:	<input type="text" value="-10"/>	Y-V1:	<input type="text" value="-10"/>	X-V2:	<input type="text" value="10"/>	Y-V2:	<input type="text" value="-10"/>	X-V4:	<input type="text" value="-10"/>	NGR:	<input type="text" value="2"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="10"/>	Y-V3:	<input type="text" value="10"/>	Y-V4:	<input type="text" value="10"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Innen-Zylinder 2											
Di:	<input type="text" value="1"/>	Da:	<input type="text" value="18"/>	X-MP:	<input type="text" value="20"/>	Y-MP:	<input type="text" value="0"/>	X-V4:	<input type="text" value="0"/>	NGR:	<input type="text" value="1"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V4:	<input type="text" value="0"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Quader 2											
Di:	<input type="text" value="10"/>	Da:	<input type="text" value="-10"/>	X-MP:	<input type="text" value="30"/>	Y-MP:	<input type="text" value="-10"/>	X-V4:	<input type="text" value="10"/>	NGR:	<input type="text" value="3"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="30"/>	Y-V3:	<input type="text" value="10"/>	Y-V4:	<input type="text" value="10"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Innen-Zylinder 3											
Di:	<input type="text" value="1"/>	Da:	<input type="text" value="18"/>	X-MP:	<input type="text" value="40"/>	Y-MP:	<input type="text" value="0"/>	X-V4:	<input type="text" value="0"/>	NGR:	<input type="text" value="1"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V4:	<input type="text" value="0"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Quader 3											
Di:	<input type="text" value="30"/>	Da:	<input type="text" value="-10"/>	X-MP:	<input type="text" value="50"/>	Y-MP:	<input type="text" value="-10"/>	X-V4:	<input type="text" value="30"/>	NGR:	<input type="text" value="4"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-D:	<input type="text" value="50"/>	Y-D:	<input type="text" value="10"/>	Y-V4:	<input type="text" value="10"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Innen-Zylinder 4											
Di:	<input type="text" value="1"/>	Da:	<input type="text" value="18"/>	X-MP:	<input type="text" value="60"/>	Y-MP:	<input type="text" value="0"/>	X-V4:	<input type="text" value="0"/>	NGR:	<input type="text" value="1"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V4:	<input type="text" value="0"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Quader 4											
Di:	<input type="text" value="50"/>	Da:	<input type="text" value="-10"/>	X-MP:	<input type="text" value="70"/>	Y-MP:	<input type="text" value="-10"/>	X-V4:	<input type="text" value="50"/>	NGR:	<input type="text" value="5"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="70"/>	X-V3:	<input type="text" value="70"/>	Y-V3:	<input type="text" value="10"/>	Y-V4:	<input type="text" value="10"/>	Name	<input type="text" value=""/>
Cylinder 9											
Di:	<input type="text" value="1400"/>	Da:	<input type="text" value="1500"/>	X-MP:	<input type="text" value="0"/>	Y-MP:	<input type="text" value="0"/>	X-V4:	<input type="text" value="0"/>	NGR:	<input type="text" value="9"/>
Z-MP:	<input type="text" value="0"/>	Z-L:	<input type="text" value="500"/>	X-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V3:	<input type="text" value="0"/>	Y-V4:	<input type="text" value="0"/>	Name	<input type="text" value=""/>

Man erhält ein FEM-Netz aus 13 824 HEX8-Elementen, 16 275 Knoten und 5 Elementgruppen. Speichern Sie das Modell unter dem Namen „Teil1.fem“ ab.

Koordinaten-Faktor

Wählen Sie im rechten Menü das Register „Knoten“ und „Koordinaten-Faktor“ und addieren wie im Bild gezeigt das Modell um 20 mm in Y-Richtung.

Der Koordinaten-Faktor läßt sich auch über Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und „Knotenkoordinaten“ aufrufen.



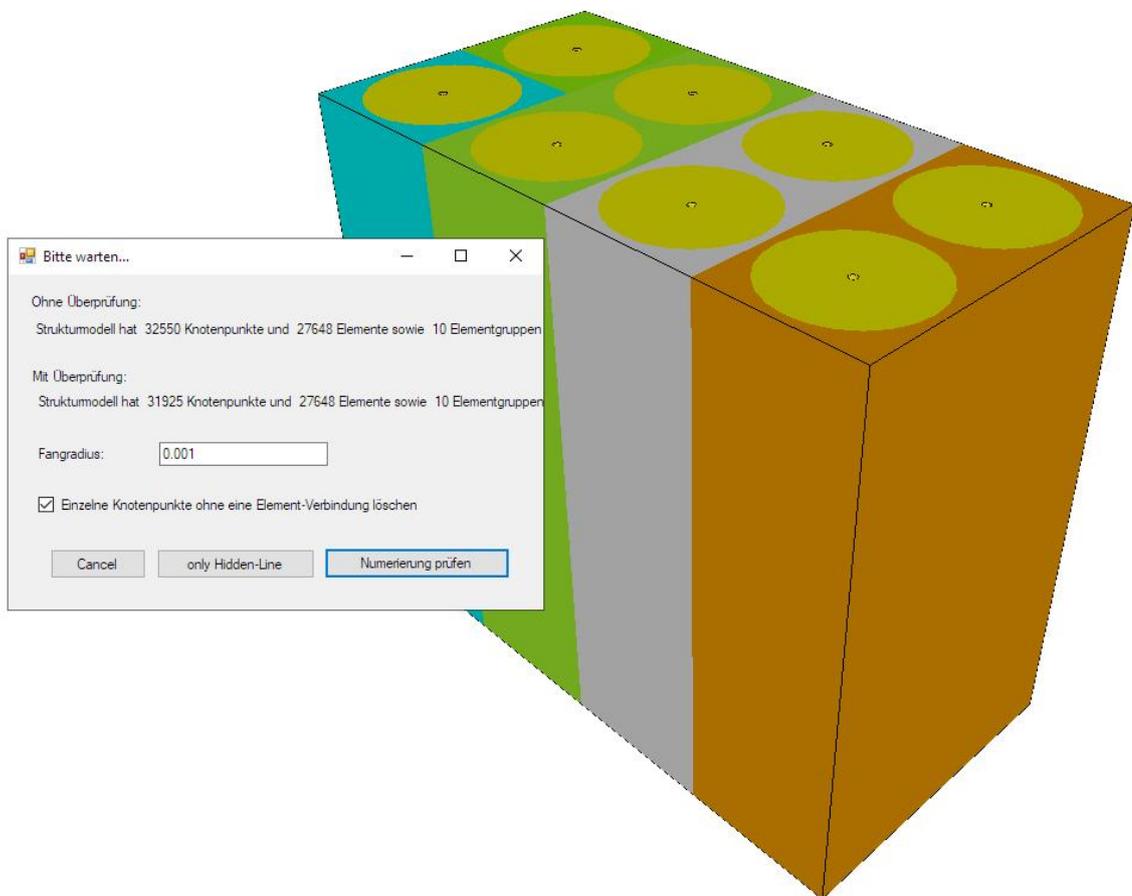
FEM-Zuladung

Dannach mit Menü „FEM-Zuladung“ das abgespeicherte Modell „Teil1.fem“ zum aktuellen Modell zuladen und mit einem Fangradius von „0.001“ die überlagerten Knoten löschen.



Erzeugung des 4x2 Modells

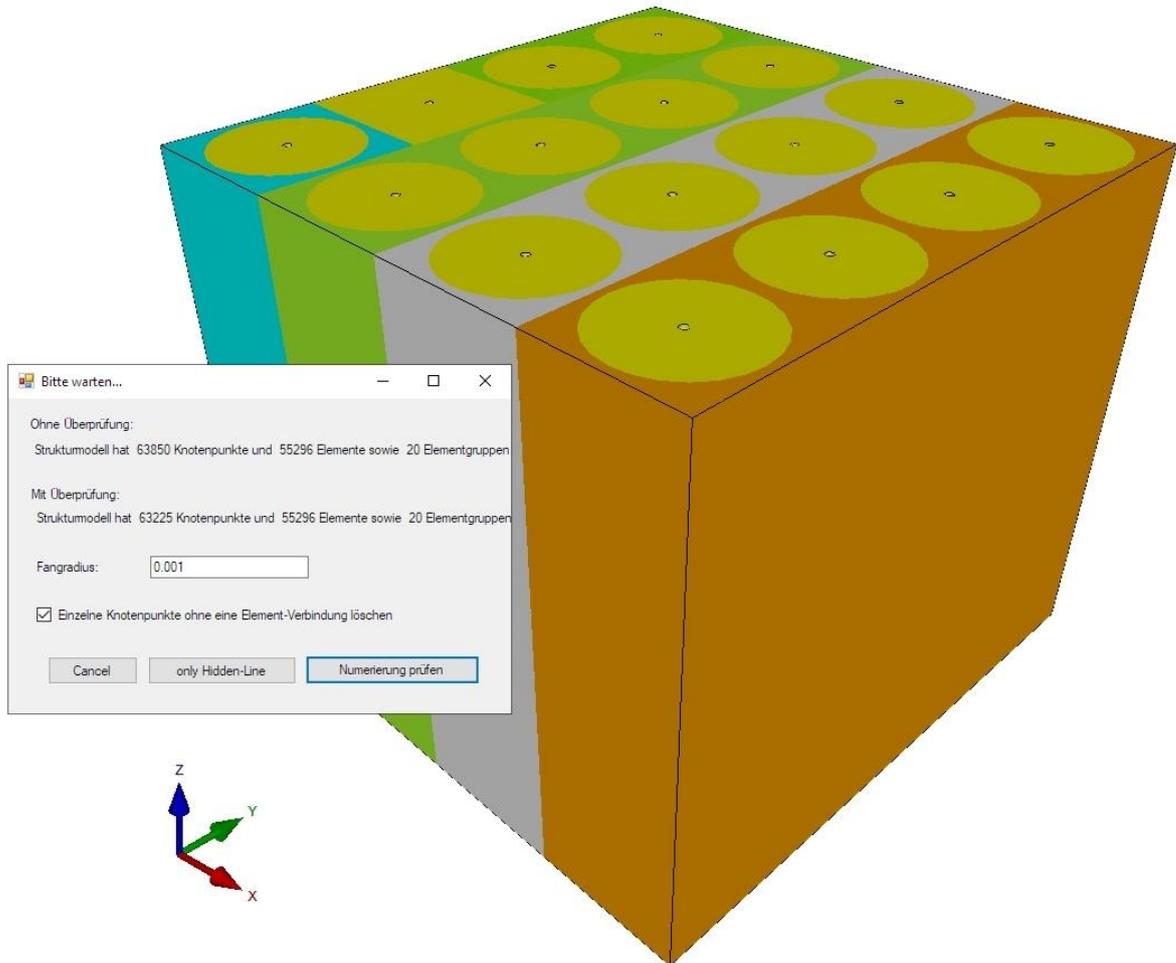
Nach der Erzeugung des Hidden-Lines speichern Sie das Modell unter „Teil2.fem“ für die nächste FEM-Zuladung ab.



Erzeugung des 4x4 Modells

Nun addieren Sie wieder mit „Koordinaten-Faktor“ die Y-Koordinaten um 40 mm und fügen über die FEM-Zuladung wieder beide Modelle zusammen und löschen mit einer Modell-Überprüfung und dem Fangradius „0.001“ die überlagerten Knoten.

Man erhält ein FEM-Netz aus 62235 Knoten, 55296 Hexaeder-Elementen und 20 Elementgruppen.



Berechnung der Konvektion

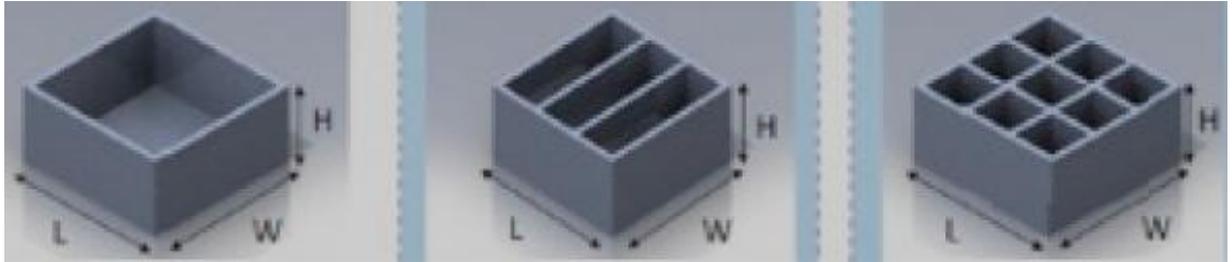
Das 16er Batterie-Pack wird mit einer Luftkühlung gekühlt, aus der Literatur wird eine Wärmeübergangszahl von $120 \text{ W/m}^2\text{K}$ für „kräftig bewegt“ bei einer Umgebungstemperatur von 20°C gewählt.

Luft an der Wand		Wärmeübergangskoeffizient α ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)
Luft senkrecht zur Metallwand [6]	ruhend	3,5...35
Luft senkrecht zur Metallwand [6]	mäßig bewegt	23...70
Luft senkrecht zur Metallwand [6]	kräftig bewegt	58...290

Erzeugung der Luft-Kühlung mit einer Konvektion

Die Batterien werden über die Außen- und Innenwände mit einer mittleren Luft-Strömung abgekühlt.

Es stehen folgende drei Kühlungssysteme zur Auswahl:



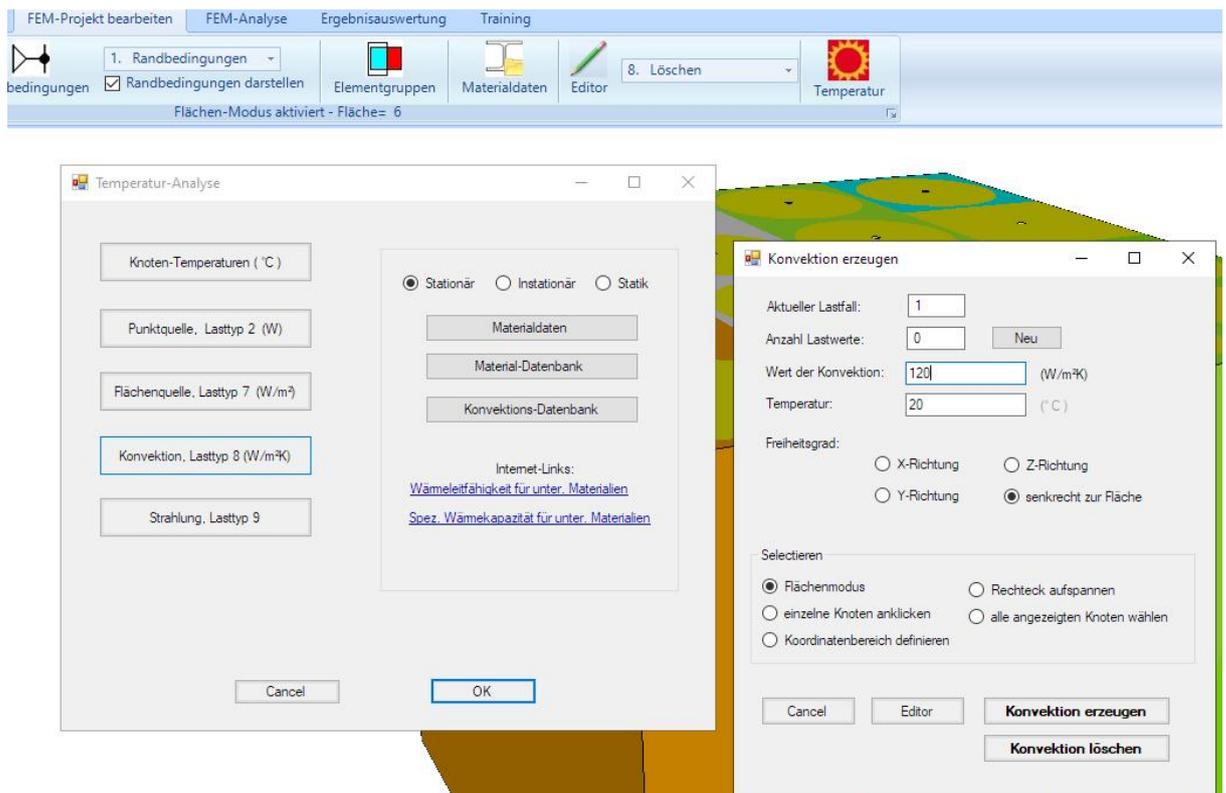
Kühlung Außenwände

+ Kühlung Horizontalwände

+ Kühlung Vertikalwände

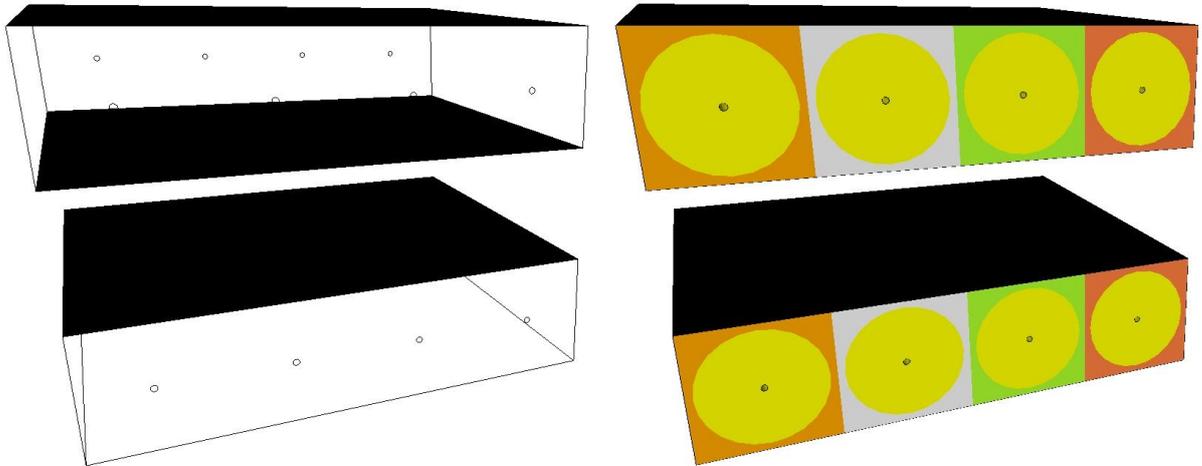
Konvektion der Außenwände

Wählen Sie Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und das Icon  und wählen Menü „Konvektion, Lasttyp 8 (W/m²K)“. Dann im neuen Fenster die Selektion „Flächenmodus“ wählen und die 4 Außenflächen 1, 6, 11 und 16 anklicken um die Konvektion von 120 W/m²K bei einer Umgebungstemperatur von 20° C zu erzeugen.

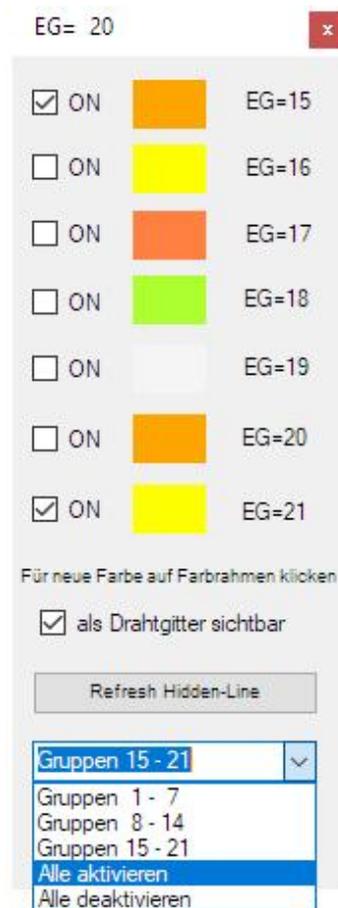


Konvektion der Horizontalwände

Für die Horizontal-Innenflächen werden die Elementgruppen 6, 7, 8, 9 und 10 sowie die Reihe 16, 17, 18, 19 und 20 ausgeblendet und im „Flächen-Modus“ muß ein neues Flächenmodell erzeugt werden. Jetzt liegen die Horizontal-Flächen außen und können als Konvektionsflächen selektiert werden.

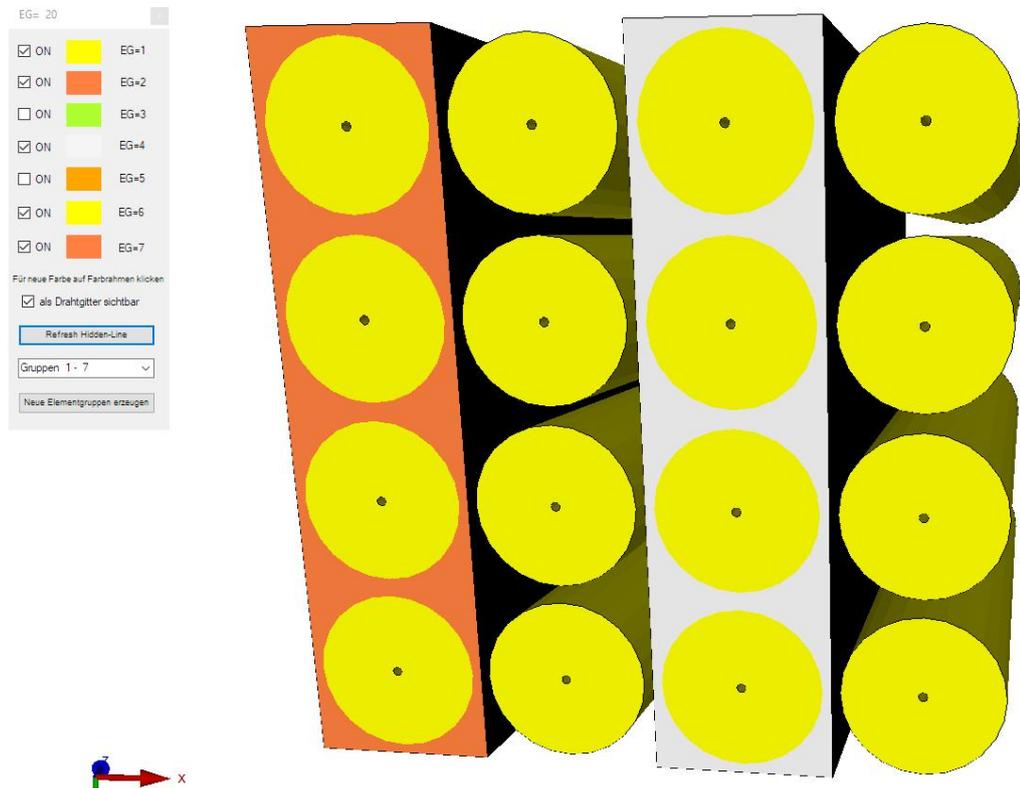


Mit „Alle aktivieren“ und Menü „Refresh Hidden-Line“ werden wieder alle 20 Elementgruppen dargestellt:

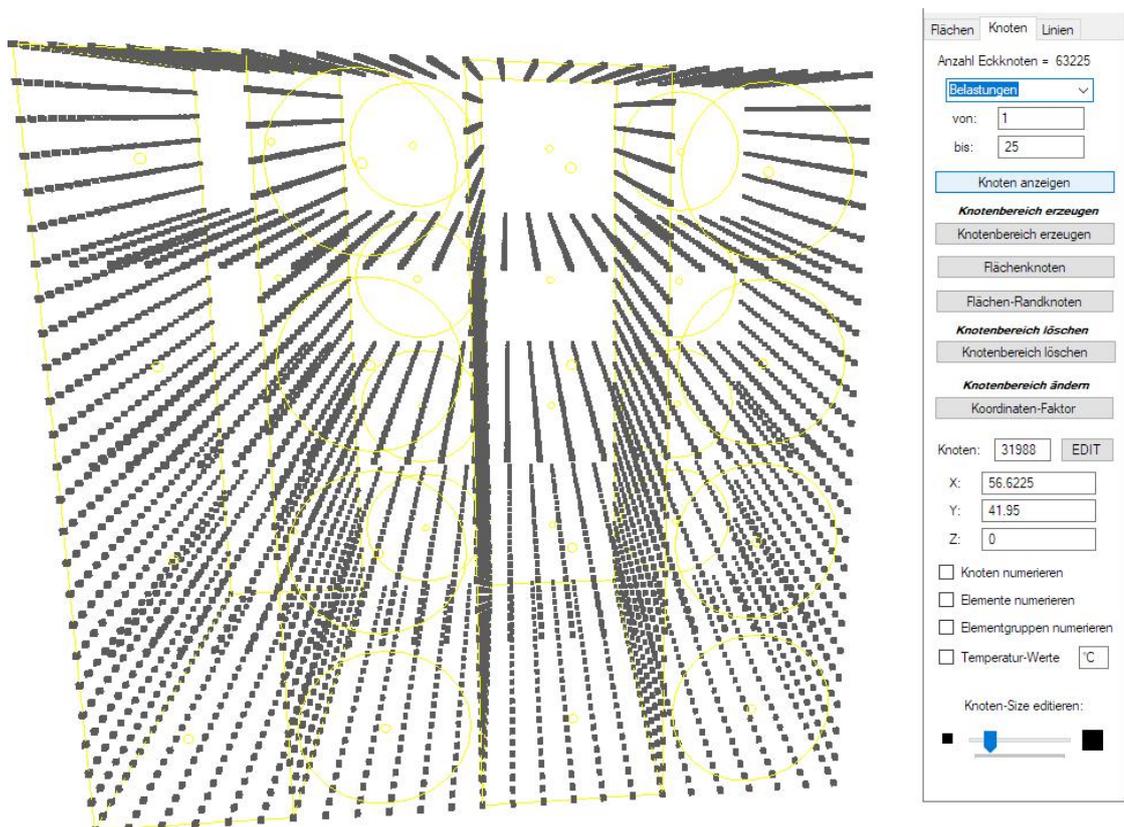


Konvektion der Vertikalwände

Um diese Flächen selektieren zu können müssen die Elementgruppen 3, 8, 13 und 18 sowie 5, 10, 15 und 20 ausgeblendet werden. Dannach muß wieder ein neues Flächenmodell erzeugt und die 3 Vertikalwände mit der Konvektion belastet werden.



Kontrolle der Außen- und Innenflächen mit Drahtgitter und Knotenbereich:



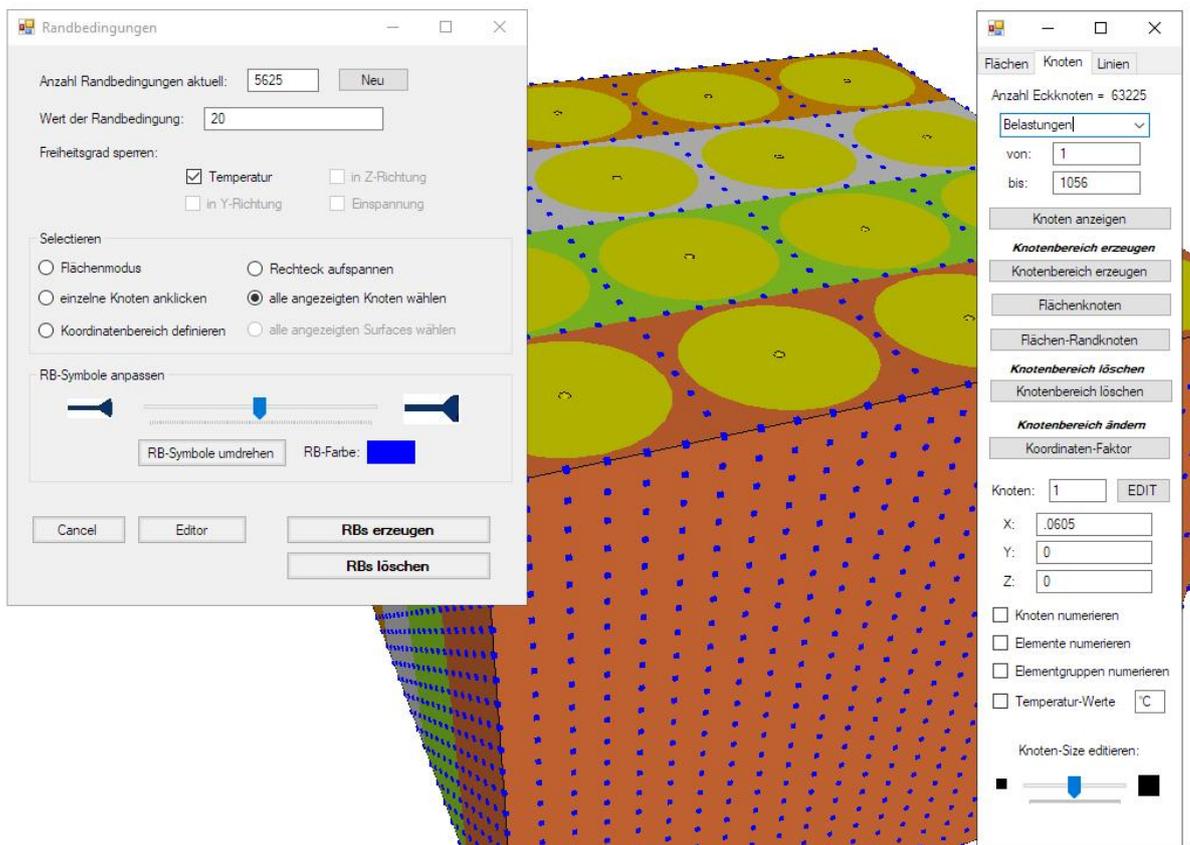
Eingabe einer Kühlmittel-Kühlung

Um eine Kühlmittel-Kühlung zu simulieren müssen die Konvektions-Flächen in Temperatur-Randbedingungen mit einer Knotentemperatur von 20°C umgewandelt werden.

Wählen Sie mit Register „Ansicht“ und „Knoten-Modus“ um alle Knoten der Konvektions-Belastung anzuzeigen.

Dannach wählen Sie das Temperatur-Icon  und erzeugen die Temperatur-Randbedingungen mit der Selektion „alle angezeigten Knoten wählen“.

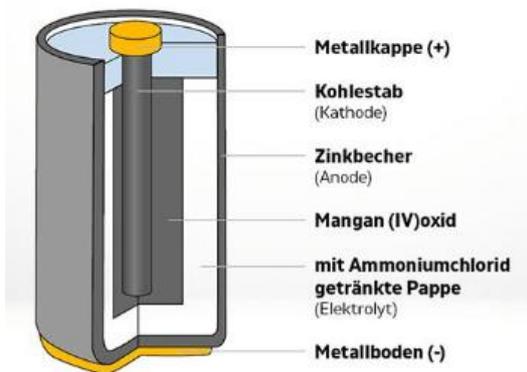
Anschließend muß die Konvektion mit „FEM-Projekt bearbeiten“, „Editor“ und „Löschen“ gelöscht werden.



Eingabe der Materialdaten

Batterien bestehen überwiegend aus Zink-Kohle oder Lithium-Graphit Materialverbindungen mit einem flüssigen Elektrolyt und einem beschichteten Separator.

Zink-Kohle-Batterie



Lithium-Graphit-Batterie

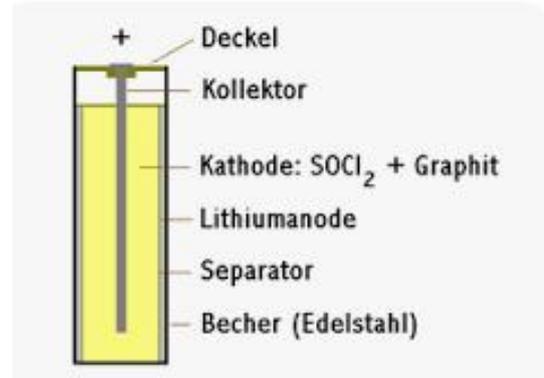


Table-2.1: 21700 Lithium-ion cell specification

Item	Specification*
Rated discharge capacity (1C-rate)	3,2Ah
Nominal Voltage	3,56 V
Rated Discharge energy	11,4 Wh
Density	2560 kg/m3
Heat Capacity	1000 J/(kg*K)
Radial Thermal Conductivity	1 W/(m2K)
Axial Thermal Conductivity	25 W/(m2K)
Tangential Thermal Conductivity	25 W/(m2K)
Internal Resistace	50 mΩ

Table-2.2: The physical and initial conditions are as shown in the table below:

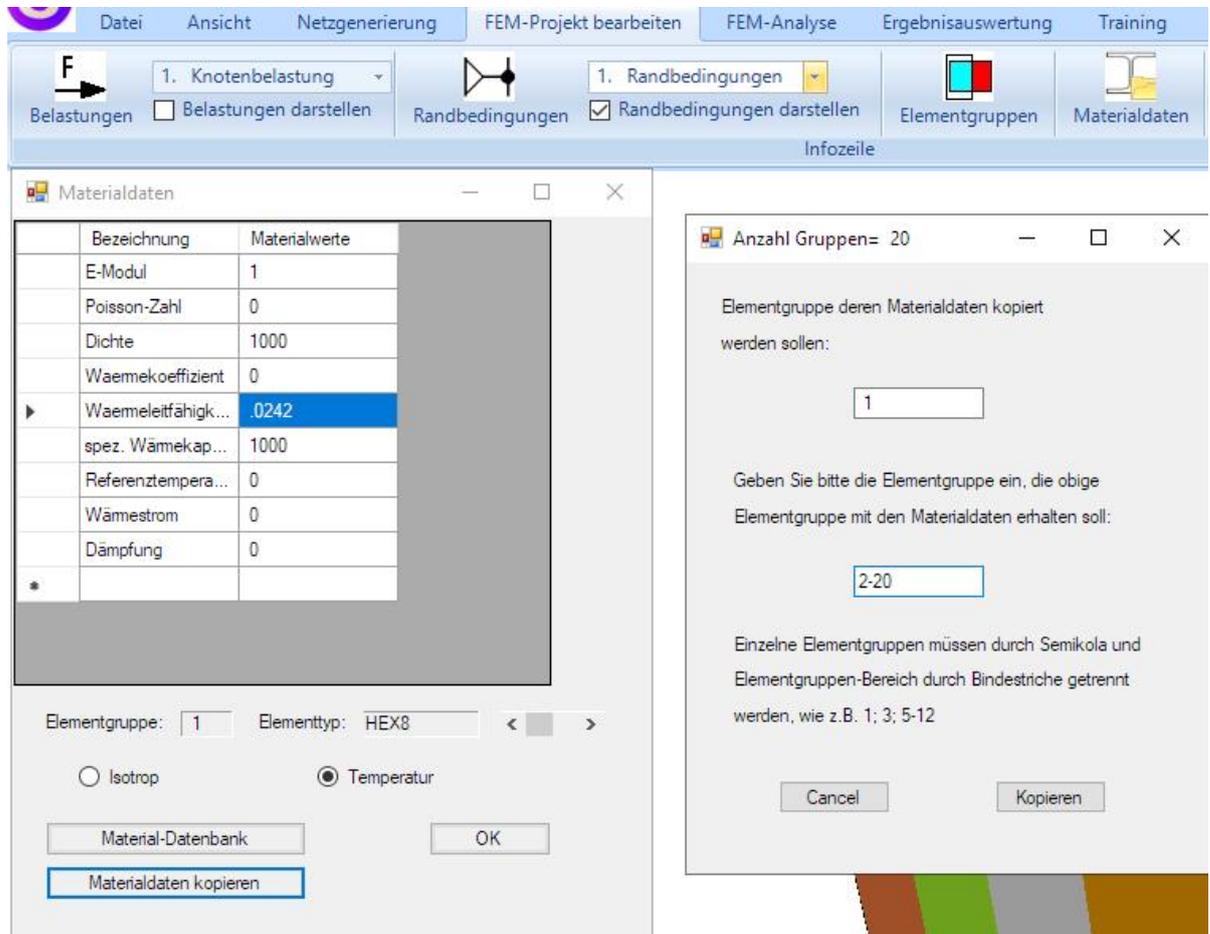
Battery Initial Temperature	20 oC
Coolant Inlet Temperature	20 oC
Coolant Inlet Velocity	0.1 -1m/s
Heat Generation	0.5-2.5 w/Cell
Cell conductivity	Kr = 1 w/m*k Ka = 25 w/m*k

Quelle:

Elementgruppe Luft

Es wird angenommen, Luftströmung und Kühlmittel umströmen die zylindrischen Batterie-Zellen durch Zwischenräume aus Luft mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.0242 W/mK.

Geben Sie die Materialdaten von Luft mit Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und „Materialdaten“ in Elementgruppe 1 ein. Dann mit „Materialdaten kopieren“ diese auf die Elementgruppen von 2-20 kopieren.



Elementgruppe Batterie

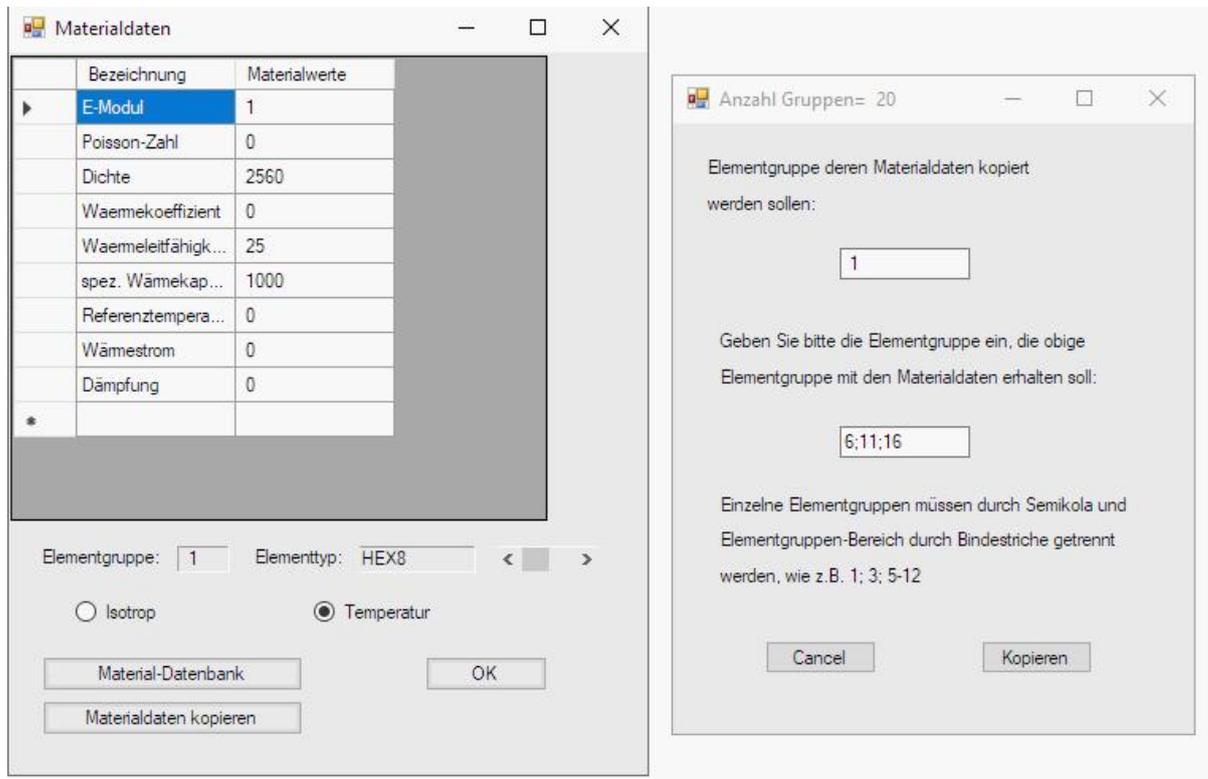
Es werden folgende Materialdaten aus Tabelle 2.1 übernommen:

Wärmeleitfähigkeit = 25 W/mK

Spez. Wärmekapazität = 1000 J/kgK

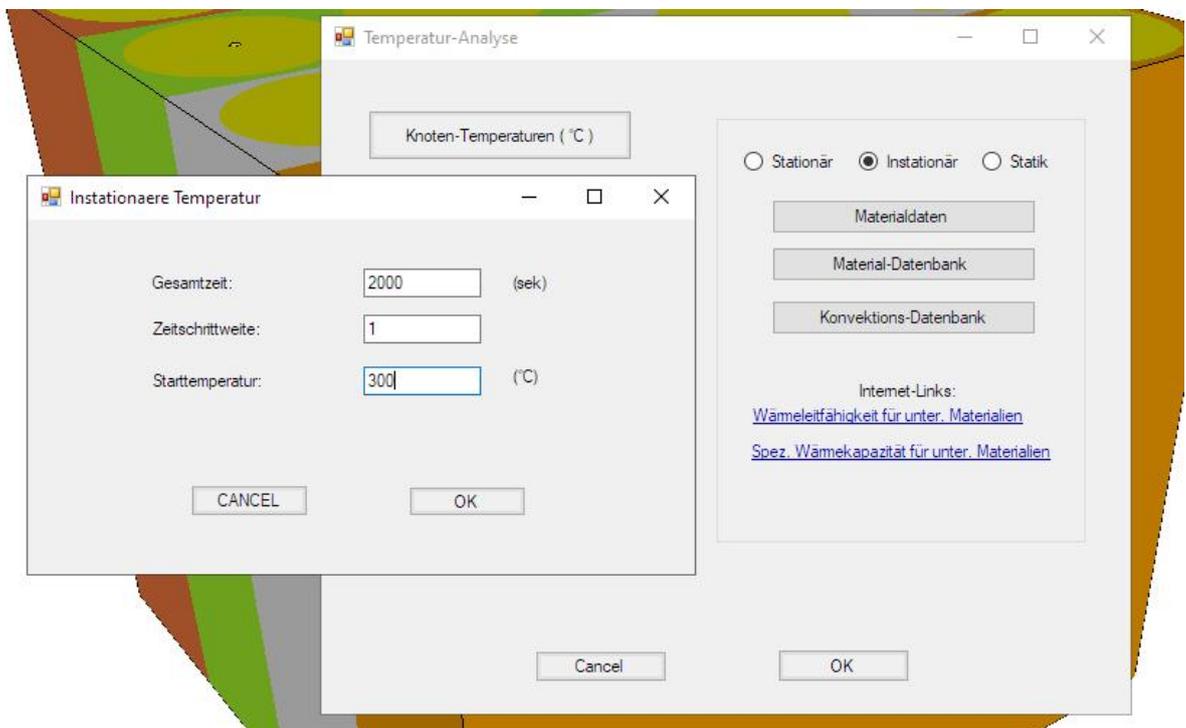
Dichte = 2560 kg/m³

Geben Sie diese Werte in Elementgruppe 1 ein und kopieren diese auf die Elementgruppen 6, 11 und 16.



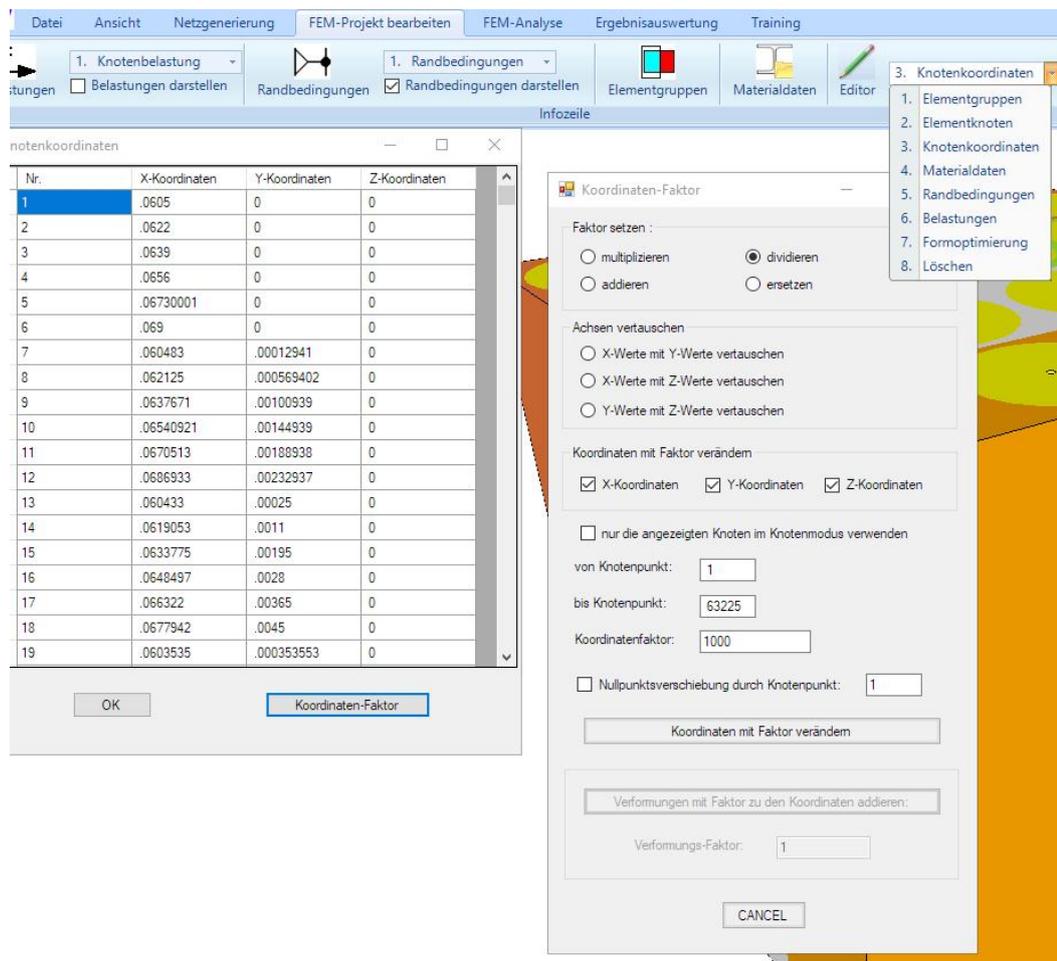
Eingabe Gesamtzeit, Zeitschritt und Starttemperatur

Über das Temperatur-Icon  werden die Parameter für eine instationäre Temperaturanalyse eingegeben: Gesamtzeit = 2000 Sekunden, Zeitschrittweite = 1 und die Starttemperatur = 300 °C ein.



Koordinaten von Millimeter auf Meter umstellen

Die Koordinaten sind in Millimeter generiert und müssen mit Register „FEM-Projekt bearbeiten“ und „Knotenkoordinaten“ auf Meter umgestellt werden.



FEM-Analyse

Die beiden FEM-Modelle unter einem beliebigen Namen sichern und mit Register „FEM-Analyse“ und „Temperatur“ die Knotentemperaturen und Wärmestromdichte mit dem Quick-Solver berechnen.

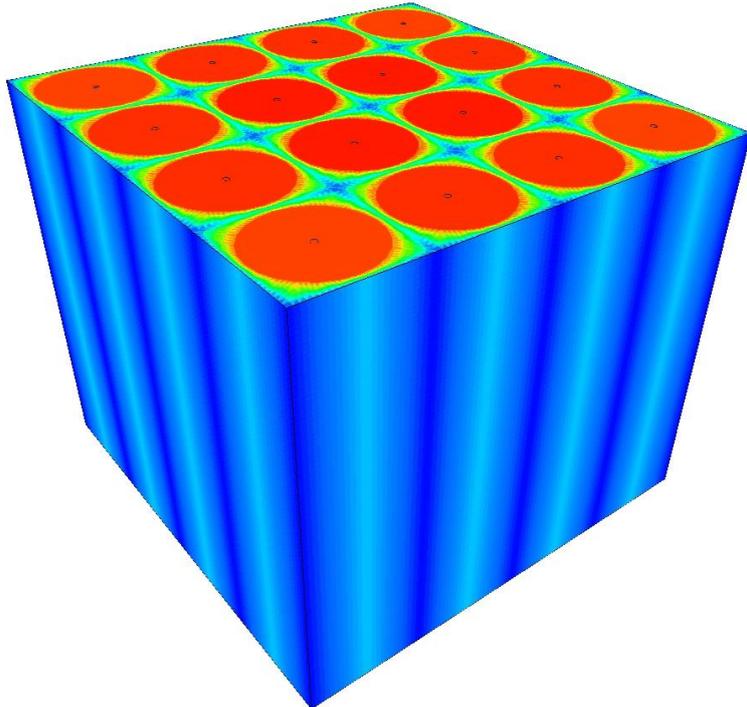
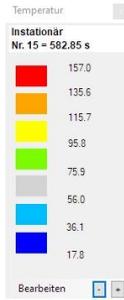


Postprocessing

Nach der FEM-Analyse mit Register „Ergebnisauswertung“ die Temperaturverteilungen für Konvektion und Kühlmittel für Zeitschritt 15 auswerten.

Luft-Kühlung nach 582 Sekunden

max. Temperatur = 157 °C; min. Temperatur = 17.8° C



Kühlmittel-Kühlung nach 582 Sekunden

max. Temperatur = 134.1° C; min. Temperatur = 20° C

