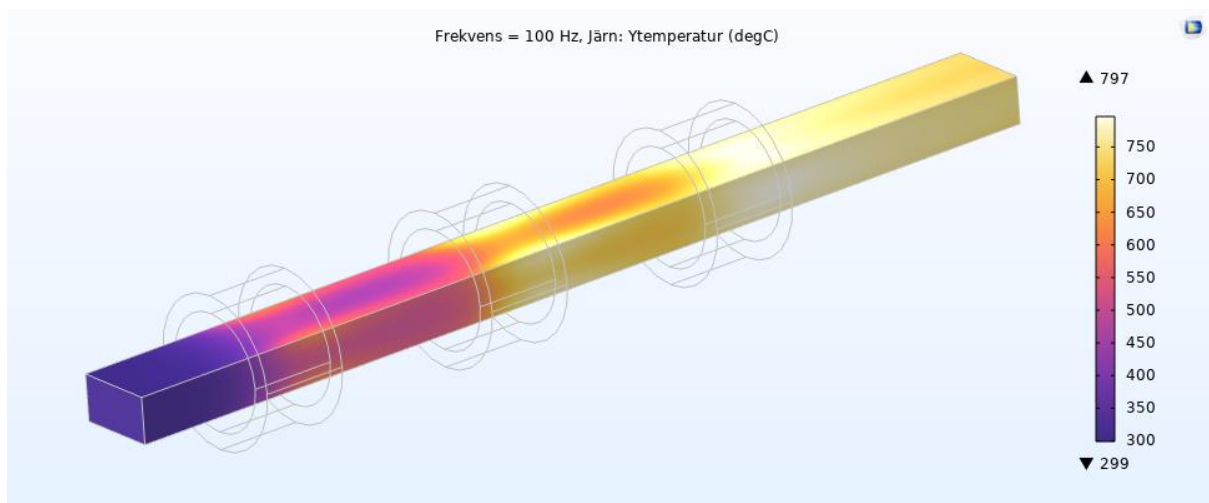


## BILAGA E

### Induktionsuppvärmning – simulering med COMSOL Multiphysics®



## Innehållsförteckning

Materialparametrarnas påverkan på temperaturen och simuleringen .....	4
Introduktion .....	4
Modellbeskrivning .....	5
Utdata från simuleringarna .....	6
Konstanta materialparametrar .....	7
Numeriska resultat .....	7
Resultat .....	8
Slutsatser .....	12
Relativ permeabilitet och BH-kurvor .....	13
Numeriska resultat .....	17
Resultat .....	18
Slutsatser .....	19
Temperaturberoende elektrisk konduktivitet .....	20
Numeriska resultat .....	21
Resultat .....	22
Slutsatser .....	23
Temperaturberoende termisk konduktivitet .....	24
Numeriska resultat .....	25
Resultat .....	26
Slutsatser .....	27
Temperaturberoende värmekapacitivitet .....	28
Numeriska resultat .....	29
Resultat .....	30
Slutsatser .....	33
Temperaturberoende densitet .....	34
Numeriska resultat .....	35
Resultat .....	36
Slutsatser .....	36
Curietemperatur och den relativa permeabiliteten .....	37
Numeriska resultat .....	38
Resultat .....	39
Slutsatser .....	44
Sammanfattning, temperaturberoende materialparametrar .....	44

Spolfrekvensens påverkan på temperaturen och simuleringen .....	49
Meshkonvergensstudie .....	58
Hörnradiens påverkan på temperaturen och simuleringen .....	64
Introduktion .....	64
Numeriska resultat .....	64
Resultat .....	65
Mesh och meshkonvergensstudie vid avrundade hörn.....	70
Sammanfattning.....	72

# Materialparametrarnas påverkan på temperaturen och simuleringen

## Introduktion

Att ta fram fullständiga materialdata för att simulera en process med induktionsuppvärmning kräver mycket information. I princip alla materialparametrar är temperaturberoende och det kan till och med vara svårt att hitta materialdata utan temperaturberoende egenskaper. Därför är det av stor vikt att förstå hur olika parametrar slår mot den slutgiltiga temperaturen och i slutändan hur simuleringsresultaten kommer att stämma mot verkligheten.

För att beskriva ämnet behövs följande indata för materialegenskaperna:

- Värmeöverföring
  - Termisk konduktivitet [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
  - Värmekapacitet [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
  - Densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- Elektromagnetism
  - Elektrisk konduktivitet [ $\text{S}/\text{m}$ ]
  - Relativ permeabilitet [1]
  - Relativ permittivitet [1]

Alla dessa parametrar, bortsett från den relativa permittiviteten som sätts till 1, är dessutom temperaturberoende. Men hur mycket påverkas den simulerade temperaturen om konstanta värden används jämfört med om temperaturberoende egenskaper beaktas? I det här kapitlet studeras hur materialdata påverkar ämnets simulerade temperaturfördelning. Tre olika material jämförs:

- Järn
- Lågkolhaltigt stål 1020 (Low Carbon Steel 1020)
- Rostfritt stål 430 (Stainless Steel 430)

Valet av ovanstående material baseras på att COMSOL Multiphysics och tillägsprodukten Material Library innehåller nödvändiga data för dessa material, samt att projektets partners har ett intresse av denna typ av material.

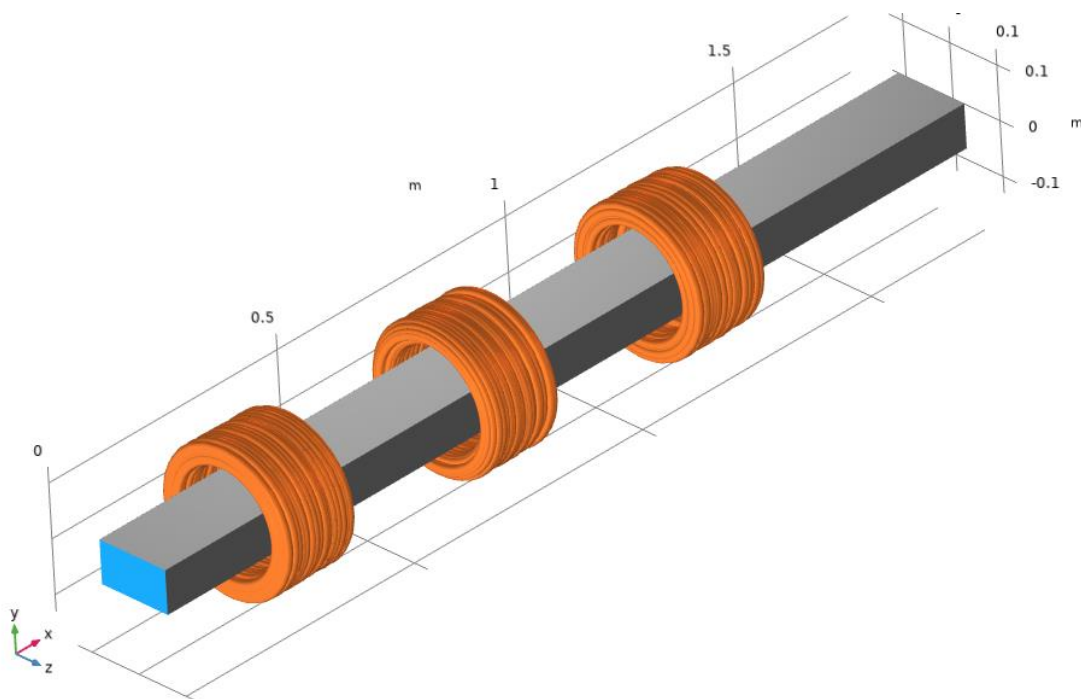
## Modellbeskrivning

För att studera de olika materialen har en exempelmodell utvecklats. Modellen innehåller tre cylindriska spolrar som beskrivs med följande indata:

- Strömstyrka = 2000 A
- Frekvens = 100 Hz
- Lindning
  - Antal varv = 24
  - Elektrisk konduktivitet =  $6 \cdot 10^7$  S/m (koppar)
  - Kvadratisk tvärsnitt, 18x18 mm med godstjocklek 2 mm
- Geometri
  - Yttre diameter = 26 cm
  - Inre diameter = 20 cm
  - Bredd = 15 cm

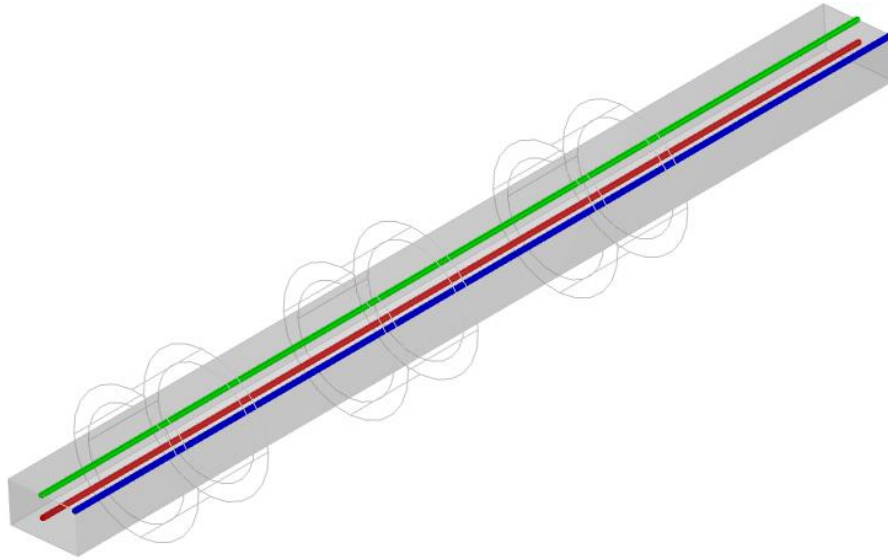
Figuren nedan visar geometrin som har använts. Ämnet har ett rektangulärt tvärsnitt med bredden 14 cm och höjden 8 cm och det har längden 1.75 m. Ämnet rör sig genom ugnen med en konstant matningshastighet av 5 mm/s i positiv x-led och kan antas vara oändligt lång. Detta antagande gör att modellen inte behöver använda så kallade "rörliga ränder" vilket snabbar upp beräkningstiden avsevärt. Ämnet anses ha en konstant temperatur innan det matas genom ugnen (blåmarkerad i figuren). Denna temperatur sätts till 300 °C så att ämnets Curietemperatur uppnås under uppvärmningsprocessen för att kunna studera dess inverkan. Randen på motsatt sida anses vara termisk isolerad. Ämnets övriga ränder antas ha ett värmeövergångstal som sätts till  $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  samt värmestrålning mot omgivningen där emissiviteten sätts till 0.5. Den omgivande temperaturen sätts till 20 °C. Dessa parametrar bör studeras noggrannare i en riktig modell, men kan anses vara acceptabla i syftet att jämföra hur materialparametrarna påverkar temperaturfördelningen.

Värmeöverföring beräknas endast i ämnet och inte i spolarna. Modellen innehåller också en luftdomän där magnetiska flödestäthet och magnetisk fältstyrka beräknas.



## Utdata från simuleringarna

För att kunna jämföra resultaten används 3D-plottar för temperatur, magnetisk flödestäthet och materialdata. Temperaturen och temperaturgradienterna i ett tvärsnitt i den högra ändan visualiseras med en 2D-plot. För att åskådliggöra effekterna av olika materialdata och materialval visualiseras temperaturen längs tre olika linjer som grafer. De olika linjernas placering visas i figuren nedan. Den blå linjen kallas "Hörn", den röda kallas "Centrum" och den gröna kallas "Ovansida".



Vidare beräknas medeltemperatur och maxtemperatur i ämnet. Då spolen matas med en strömstyrka så beräknas effekten som krävs för att driva spolen. Den effekt som upptas av ämnet beskrivs som upptagen effekt. Verkningsgraden beskrivs som upptagen effekt dividerat med spoleffekten.

## Konstanta materialparametrar

I det enklaste fallet sätts alla materialparametrar till konstanta värden. Detta är naturligtvis långt ifrån korrekt, men informationen från simuleringen kan användas som en initialt test och för att undersöka de grundläggande egenskaperna. Modellen har fördelen att den löser snabbt och stabilt. Följande materialparametrar användes:

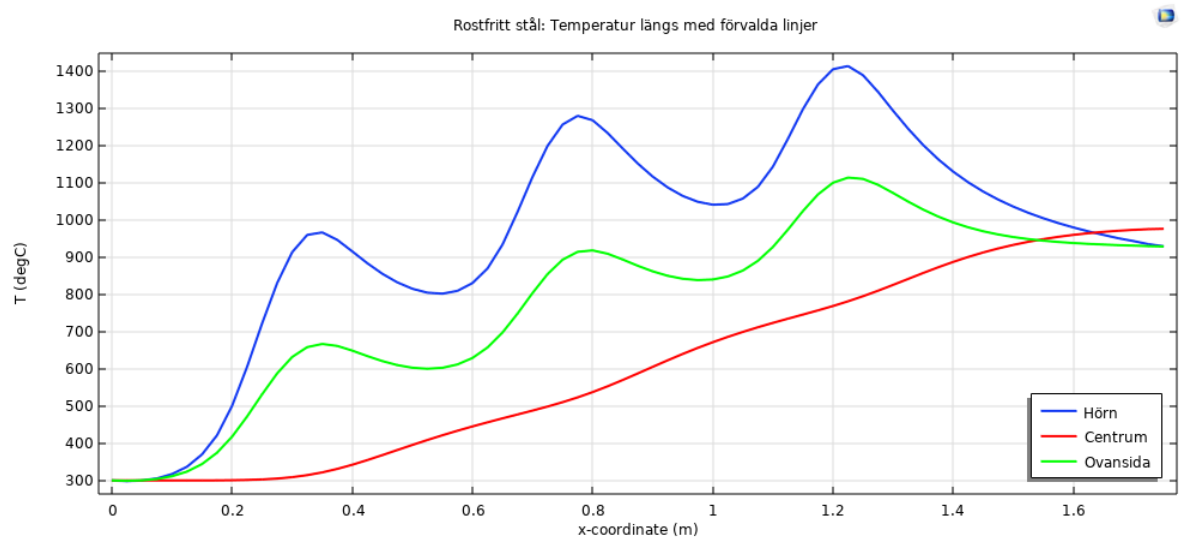
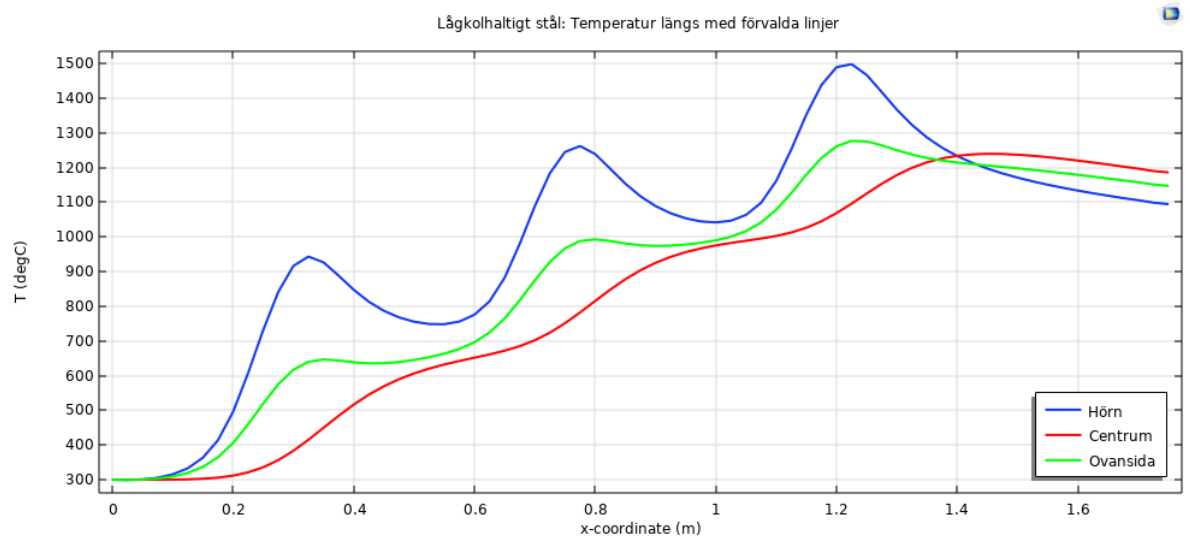
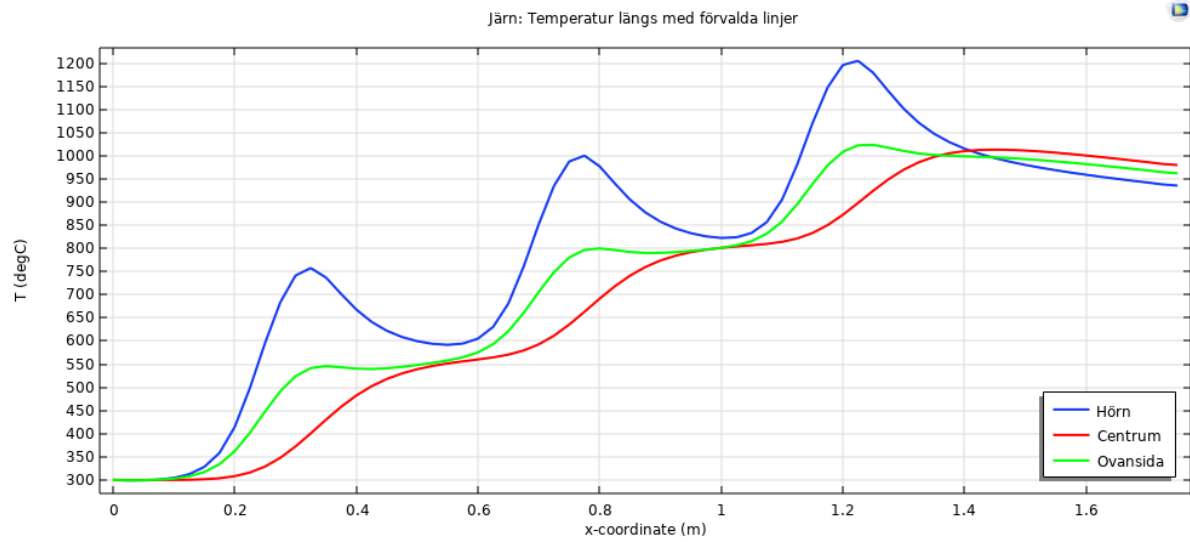
	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Relativ permeabilitet [1]</b>	1200	1662	503
<b>Elektrisk konduktivitet [S/m]</b>	$1.10 \cdot 10^7$	$5.87 \cdot 10^6$	$1.66 \cdot 10^6$
<b>Termisk konduktivitet [W/(m·K)]</b>	80.6	63.7	21.4
<b>Värmekapacitivitet [J/(kg·K)]</b>	446.5	446.5	467.9
<b>Densitet [kg/m<sup>3</sup>]</b>	7855	7860	7965

## Numeriska resultat

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	738	890	751
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1205	1498	1413
<b>Spoleffekt [kW]</b>	180	249	207
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	167	235	194
<b>Verkningsgrad [%]</b>	92.5	94.6	93.5

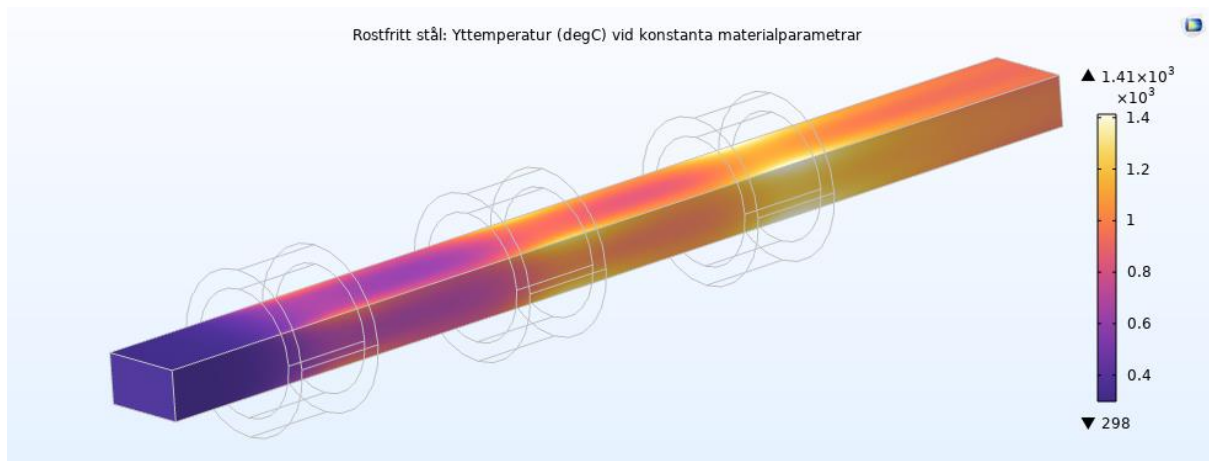
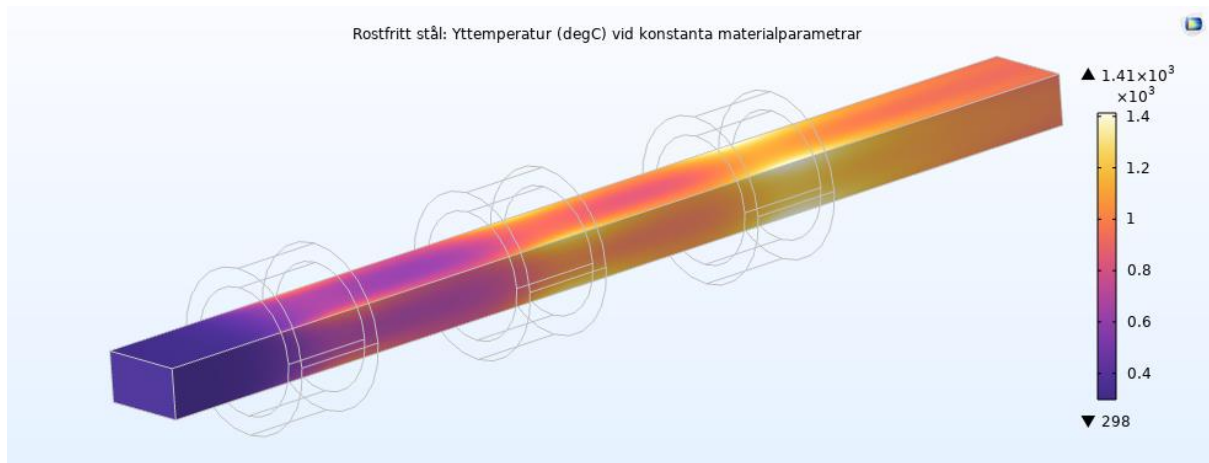
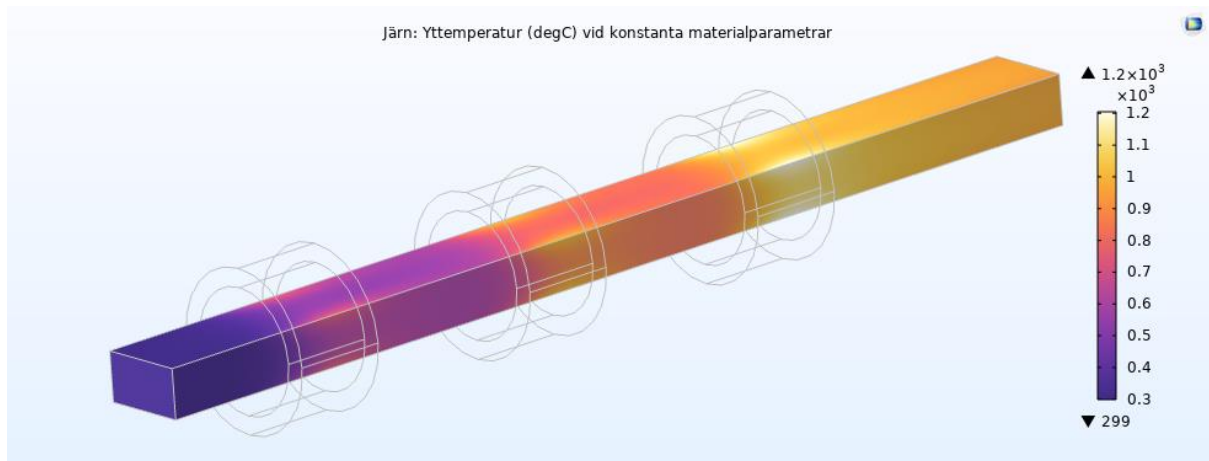
## Resultat

Figurerna nedan visar temperaturerna längs tre olika positioner i tvärsnittet.

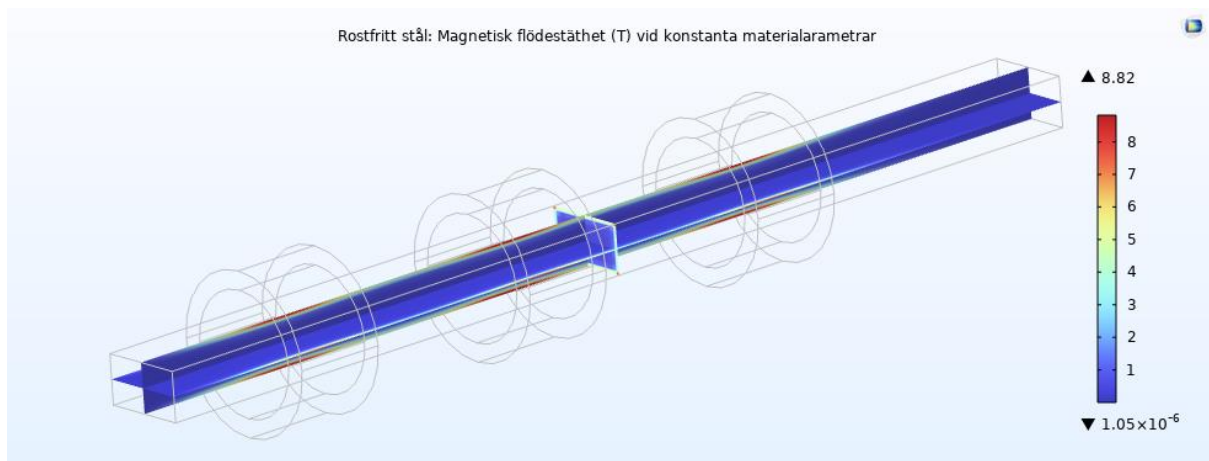
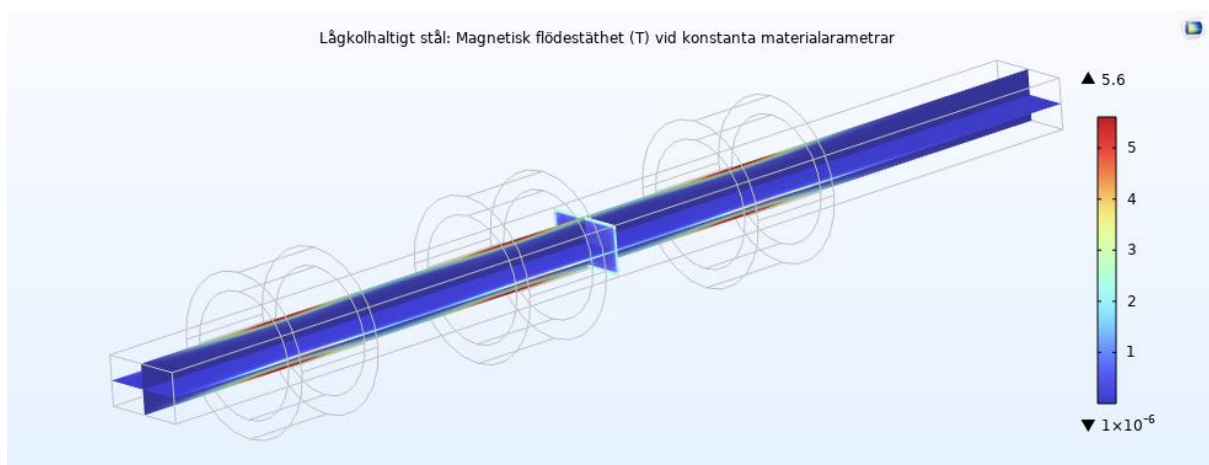
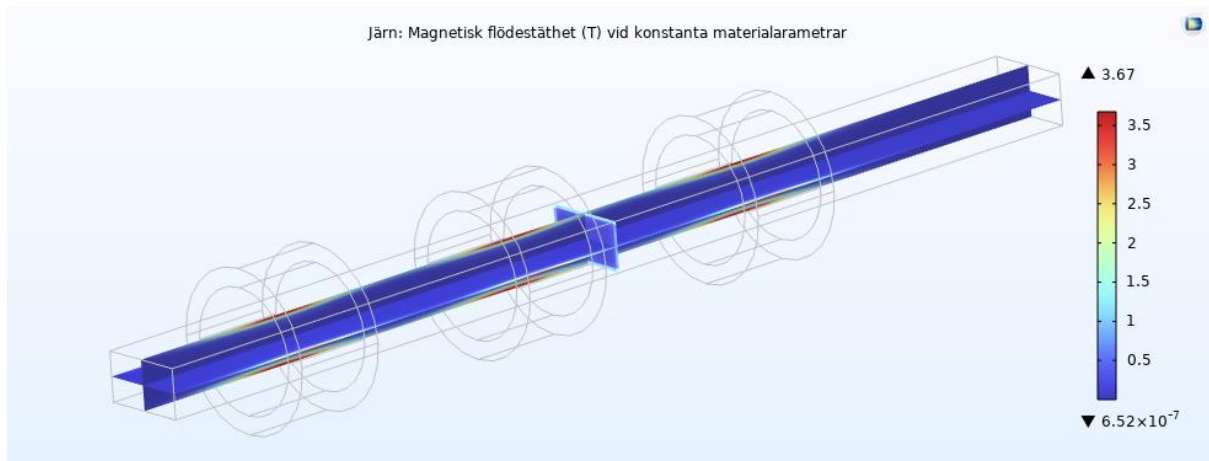




Figurerna nedan visar yttemperaturen för de olika materialen.

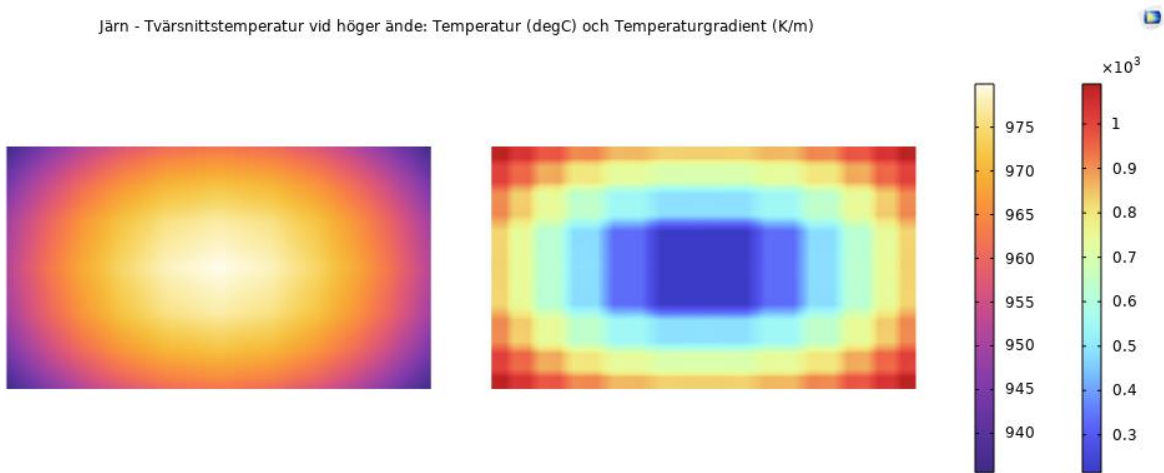


Figurerna nedan visar den magnetiska flödestätheten i de olika ämnena.

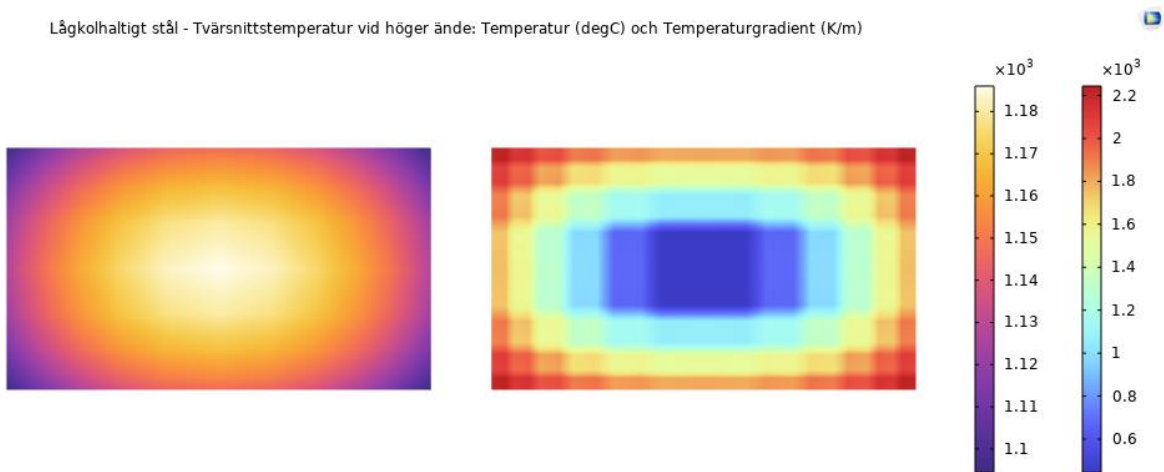


Figurerna nedan visar temperaturen och temperaturgradienterna i ett tvärsnitt vid den högra änden av ämnet.

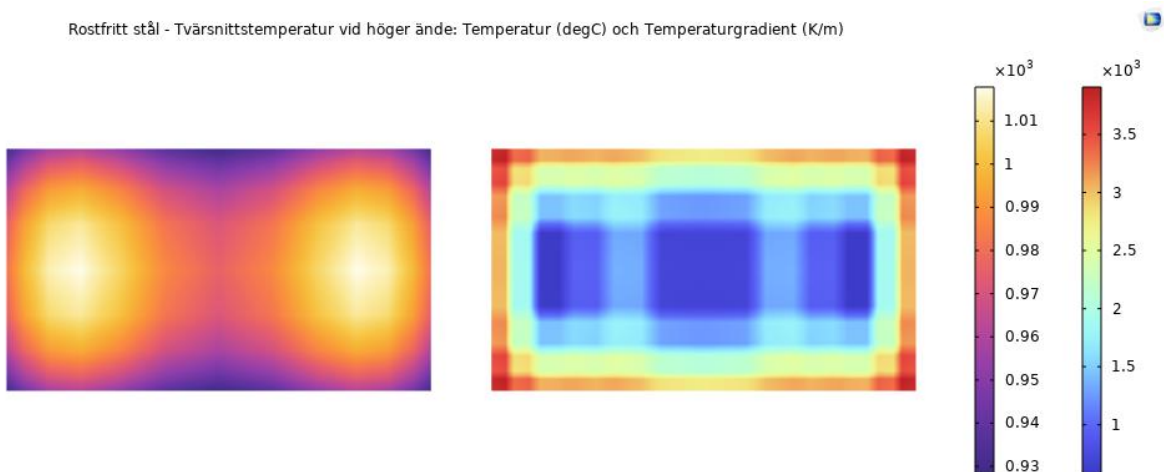
Järn - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Lågkolhaltigt stål - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Rostfritt stål - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



## Slutsatser

Om den termiska konduktiviteten är låg ökar maxtemperaturen, men temperaturen i centrum minskar. Om till exempel järnets termiska konduktivitet halveras, så blir maxtemperaturen 1323 °C i stället för 1205 °C, men medeltemperaturen är fortfarande cirka 740 °C. Om enbart den elektriska konduktiviteten för järn halveras så blir maxtemperaturen 1475 °C i stället för 1205 °C och medeltemperaturen stiger till 902 °C i stället för 730 °C. Att halvera den relativa permeabiliteten påverkar inte resultaten nämnvärt, maxtemperaturen blir 1195 i stället °C för 1205 °C, men vi vet att relativa permeabiliteten går mot ett vid höga temperaturer (Curiepunkten), så detta måste beaktas och studeras senare.

Det rostfria stålet har den lägsta elektriska konduktiviteten vilket gör att den magnetiska flödestätheten blir högre i ämnet och ämnet värms effektivare. Samtidigt har det också lägst relativa permeabilitet vilket minskar uppvärmningen.

Temperaturgradienterna i tvärsnittet längst till höger (efter ämnet har lämnat ugnen) är högst för det rostfria stålet.

## Relativ permeabilitet och BH-kurvor

För ferromagnetiska material är förhållandet mellan den magnetiska flödestätheten  $B$  [T] och den magnetiska fältstyrkan  $H$  [A/m] olinjärt och kan beskrivas med:

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

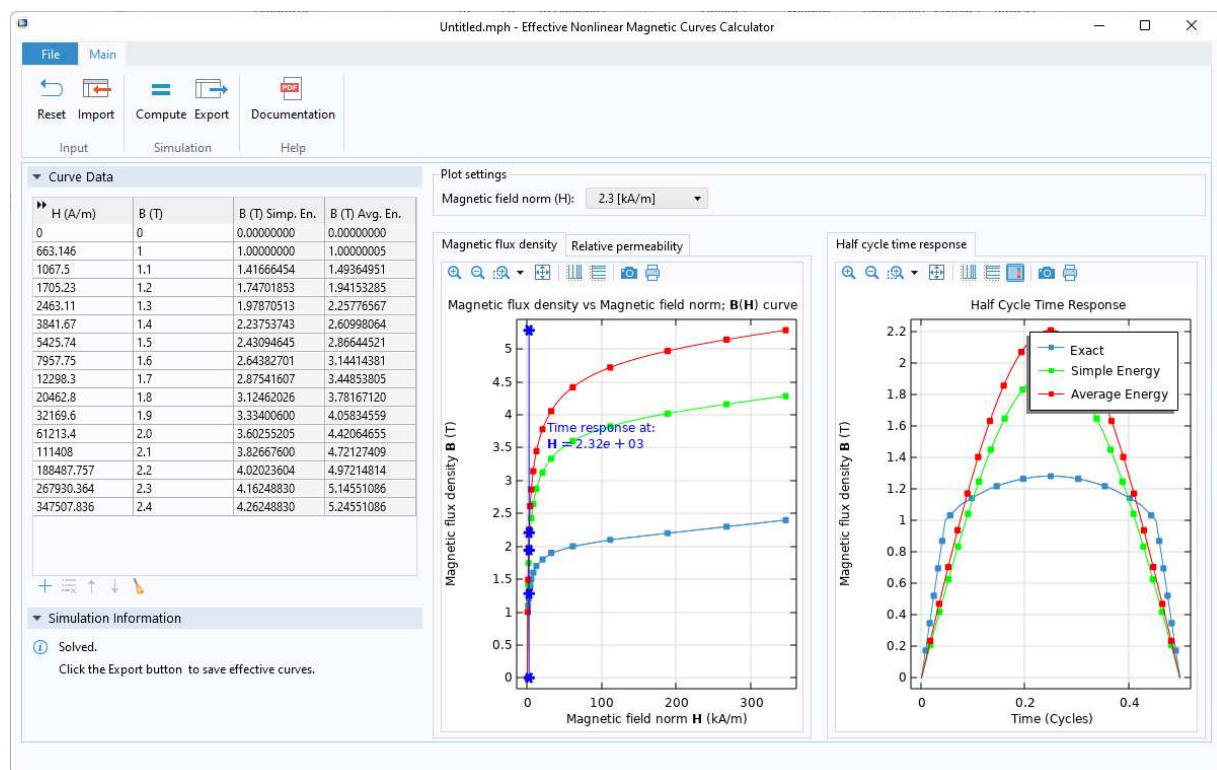
där konstanten  $\mu_0$  är permeabiliteten för vakuum och  $\mu_r$  är den relativa permeabiliteten.

Vanligtvis införs BH-kurvor eller HB-kurvor direkt i mjukvarorna som kan simulera ferromagnetiska material och denna data överförs automatiskt till en relativ permeabilitet.

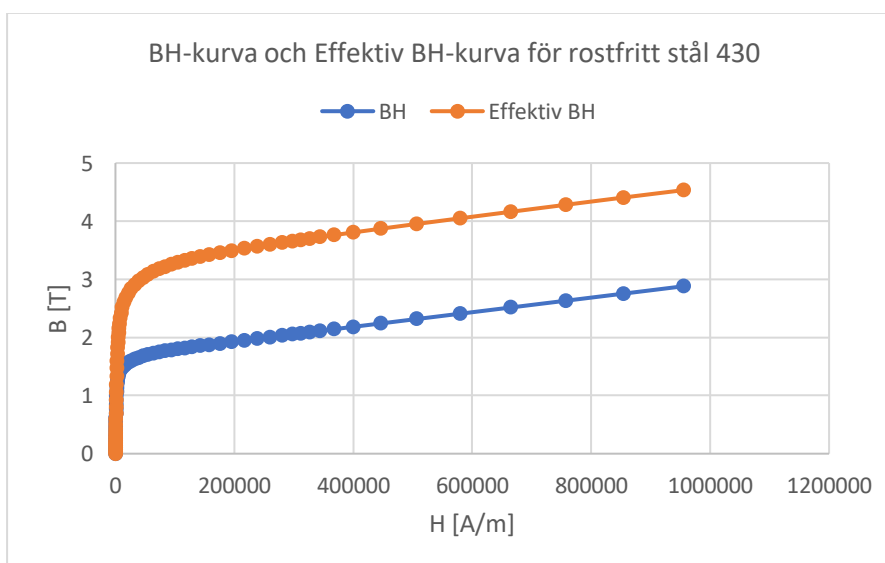
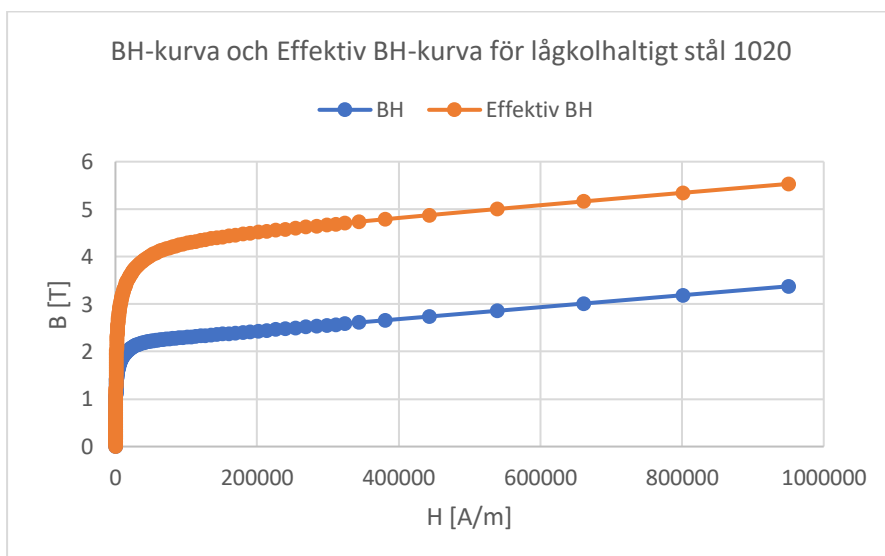
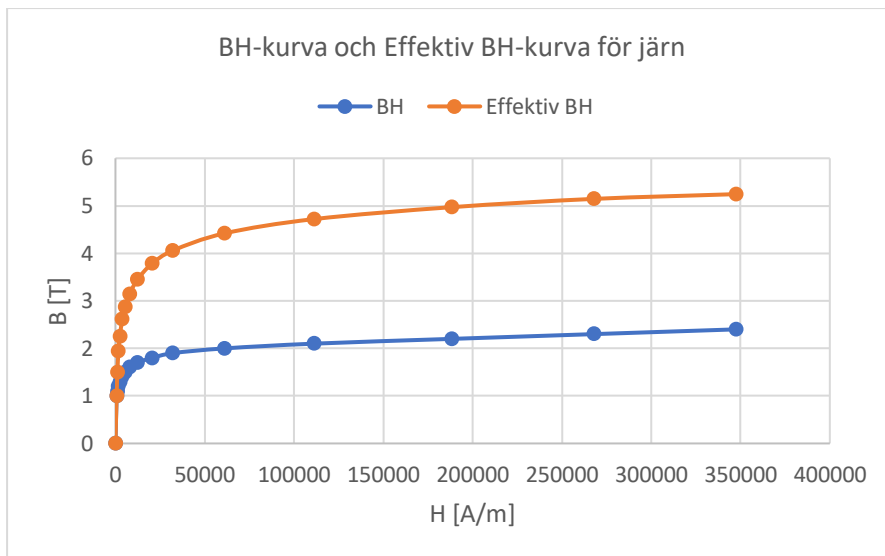
På grund av de extremt stora skillnaderna på tidsskalorna för spolens frekvens som kan vara ca 1000 Hz, vilket motsvarar en period av 1 ms, och tiden för uppvärmning som är mycket längre är det nästan omöjligt att simulera hela problemet i tidsdomänen. För att snabba upp en analys av induktionsuppvärmning så simuleras i stället det elektromagnetiska problemet i frekvensdomänen medan det termiska problemet studeras i tidsdomänen. När simuleringen utförs i frekvensdomänen måste även BH-kurvorna uppdateras för att stödja denna förändring. BH-kurvorna kan omformas till så kallade "Effektiva BH-kurvor" vilket beskrivs på följande länk:

<https://www.comsol.com/blogs/model-magnetic-materials-in-the-frequency-domain-with-an-app/>

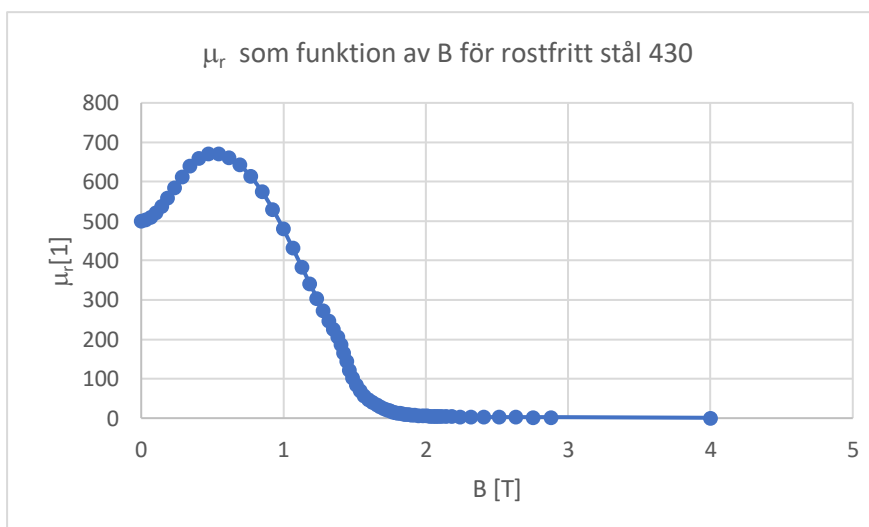
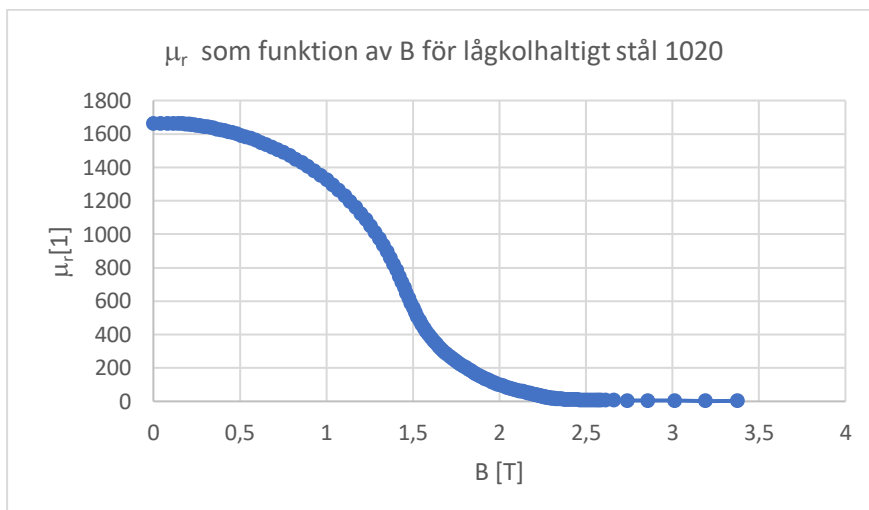
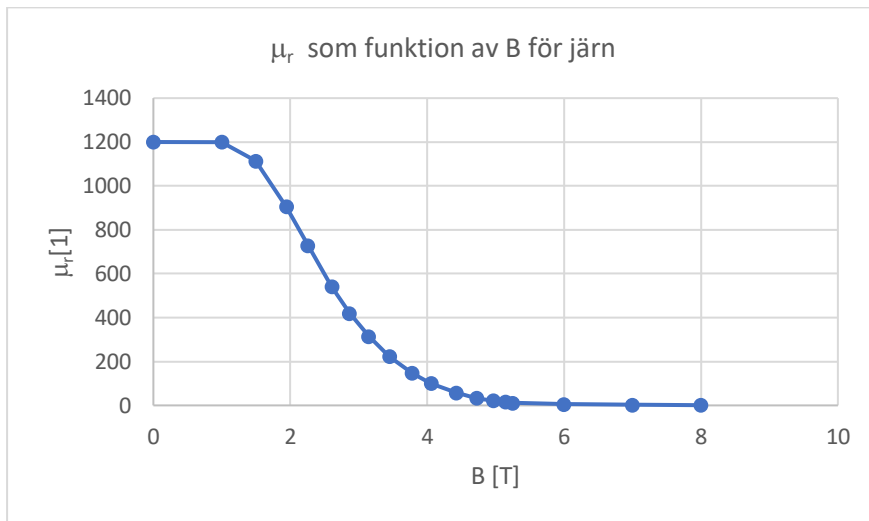
Figuren nedan visar appen som används för att omvandla BH-kurvor till Effektiva BH-kurvor. Appen följer med som en del av AC/DC Module i COMSOL Multiphysics



För de tre studerade materialen har BH-kurvorna transformerats till Effektiva BH-kurvor.

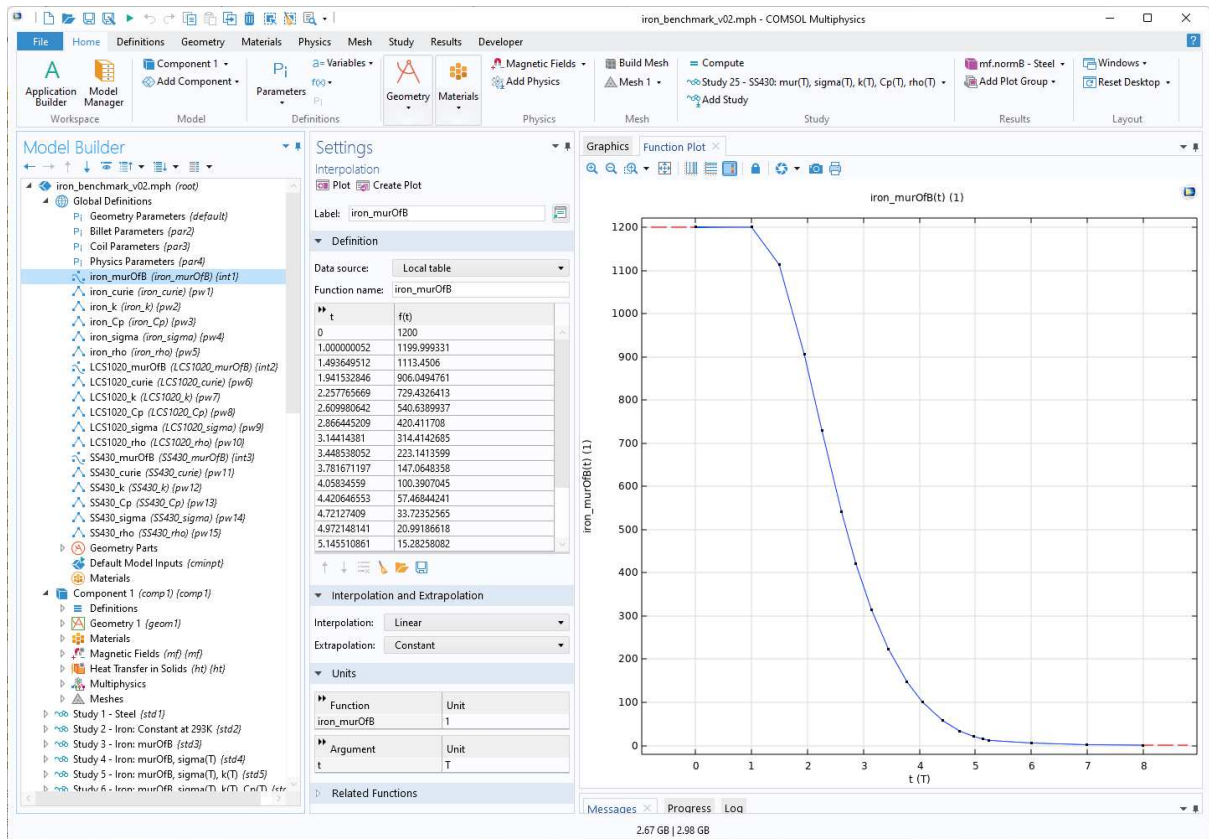


I slutet av detta kapitel kommer de effektiva BH-kurvorna att göras temperaturberoende. Därför omvandlas de Effektiva BH-kurvorna redan nu så att den relativa permeabiliteten beskrivs som en funktion av den magnetiska flödestätheten:





I COMSOL Multiphysics införs data för den relativa permeabiliteten som en interpolationsfunktion som ges namnet *iron\_murOfB* och argumentet är normen av den magnetiska flödestätheten.



Figuren nedan visar inställningar för ämnets materialegenskaper i COMSOL Multiphysics. Den relativa permeabiliteten är beroende av den magnetiska flödestätheten, *mf.normB*. Övriga materialparametrar baseras på en temperatur av 20 °C (293 K).

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_iso...	iron_sigma(293)	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilononr_i...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_iso ; ...	1+iron_murOfB(mf.normB)	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	iron_rho(293)	kg/m <sup>3</sup>	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii...	iron_k(293)	W/(m-K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	iron_Cp(293)	J/(kg-K)	Basic
Magnetic flux density norm	normB	BH(normHin)	T	B-H curve
Magnetic field norm	normH	BH_inv(normBin)	A/m	B-H curve
Magnetic coenergy density	Wpm	BH_prim(normHin)	J/m <sup>3</sup>	B-H curve
Effective magnetic flux density nor...	normBeff	BHeff(normHeffin)	T	Effective B-H curve
Effective magnetic field norm	normHeff	BHeff_inv(normBeffin)	A/m	Effective B-H curve



Alla materialparametrar är konstanta bortsett från den relativa permeabiliteten.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Relativ permeabilitet [1]</b>	BH-kurva	BH-kurva	BH-kurva
<b>Elektrisk konduktivitet [S/m]</b>	$1.10 \cdot 10^7$	$5.87 \cdot 10^6$	$1.66 \cdot 10^6$
<b>Termisk konduktivitet [W/(m·K)]</b>	80.6	63.7	21.4
<b>Värmekapacitivitet [J/(kg·K)]</b>	446.5	446.5	467.9
<b>Densitet [kg/m<sup>3</sup>]</b>	7855	7860	7965

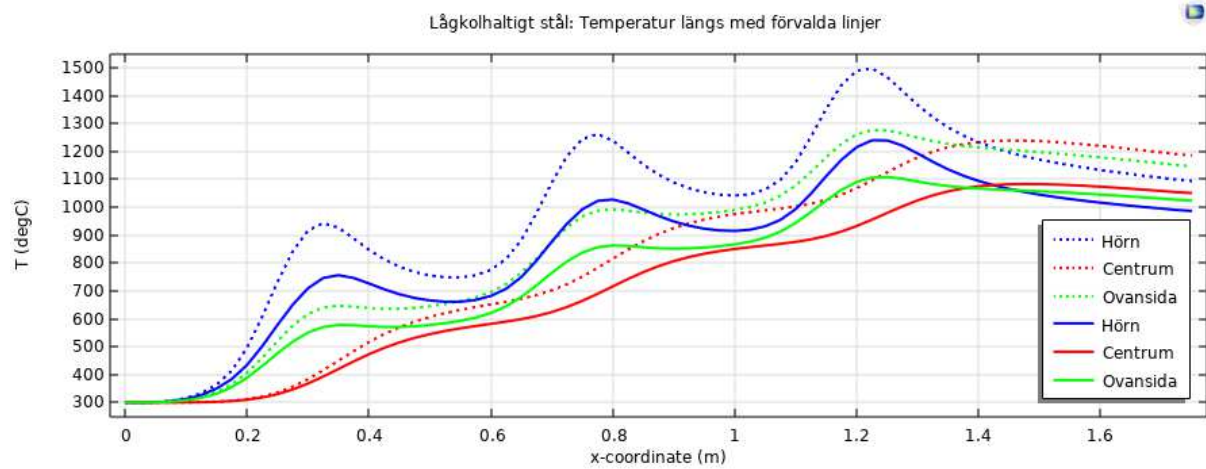
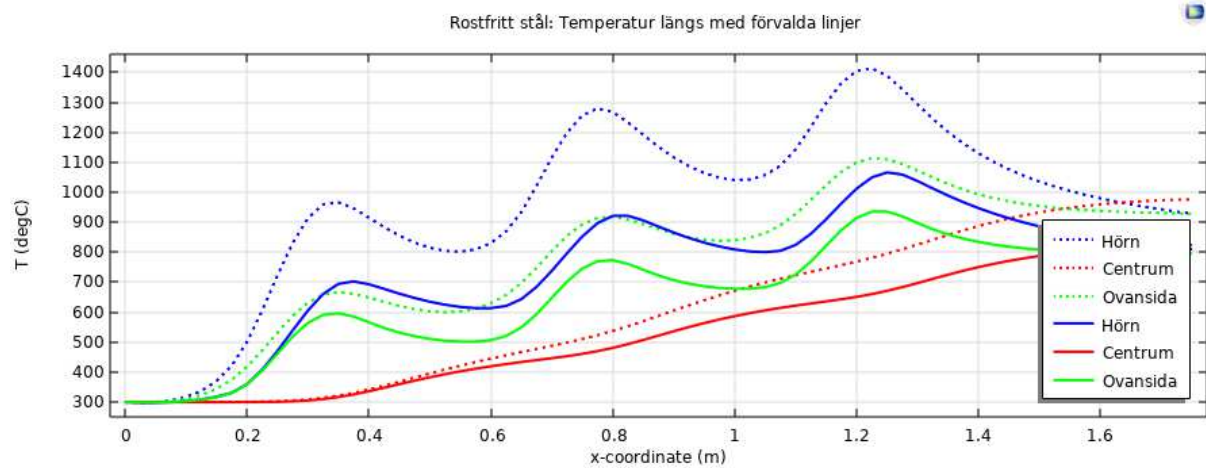
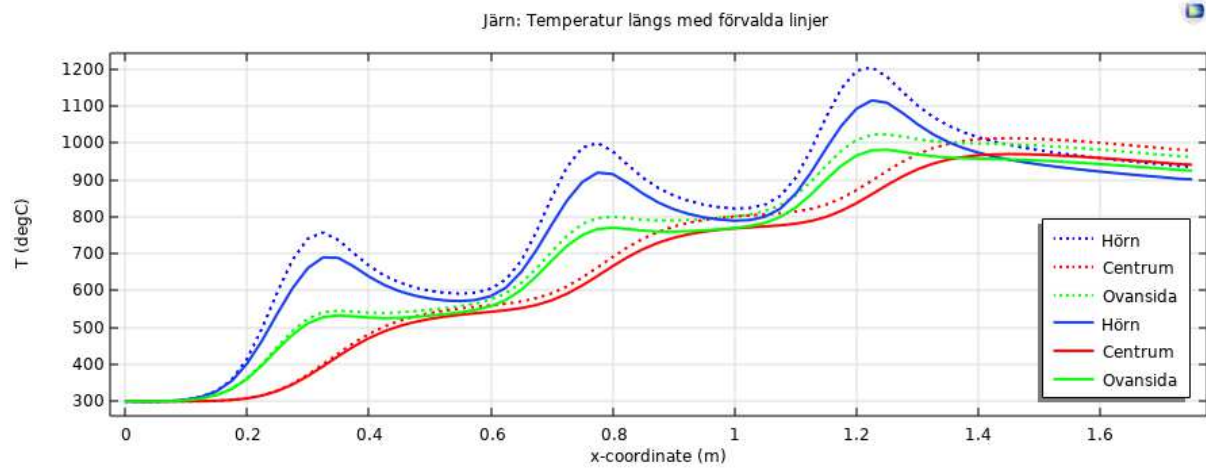
#### Numeriska resultat

Införandet av BH-kurvorna förändrar resultaten avsevärt. I tabellen nedan är värdena inom parentes resultaten för simuleringen med enbart konstanta materialparametrar.

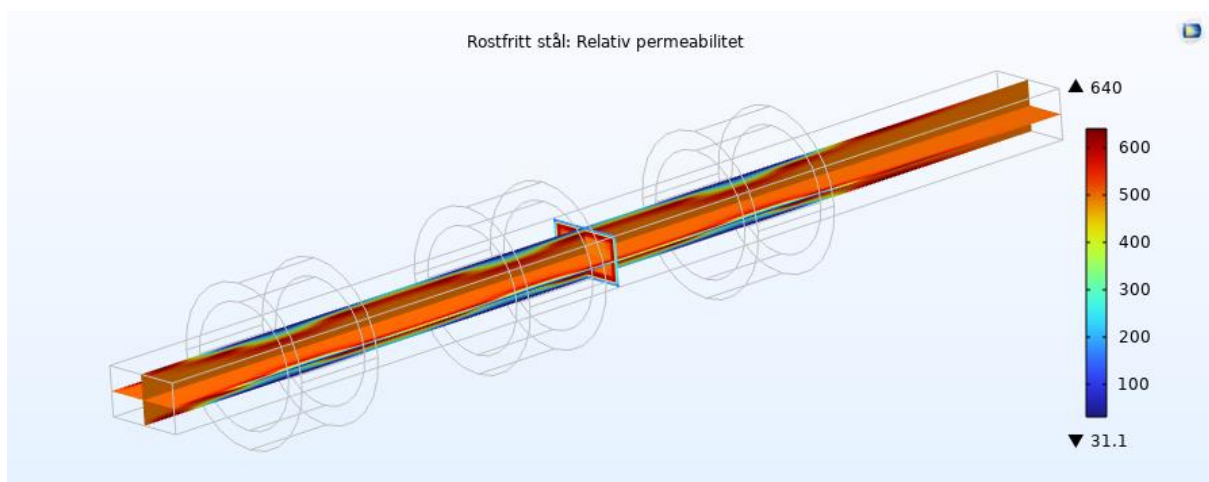
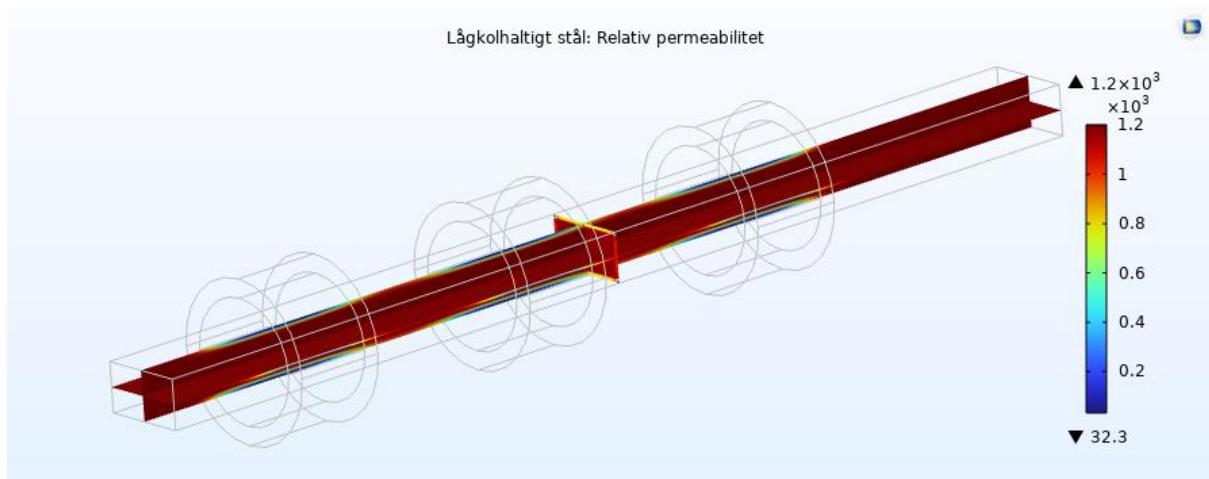
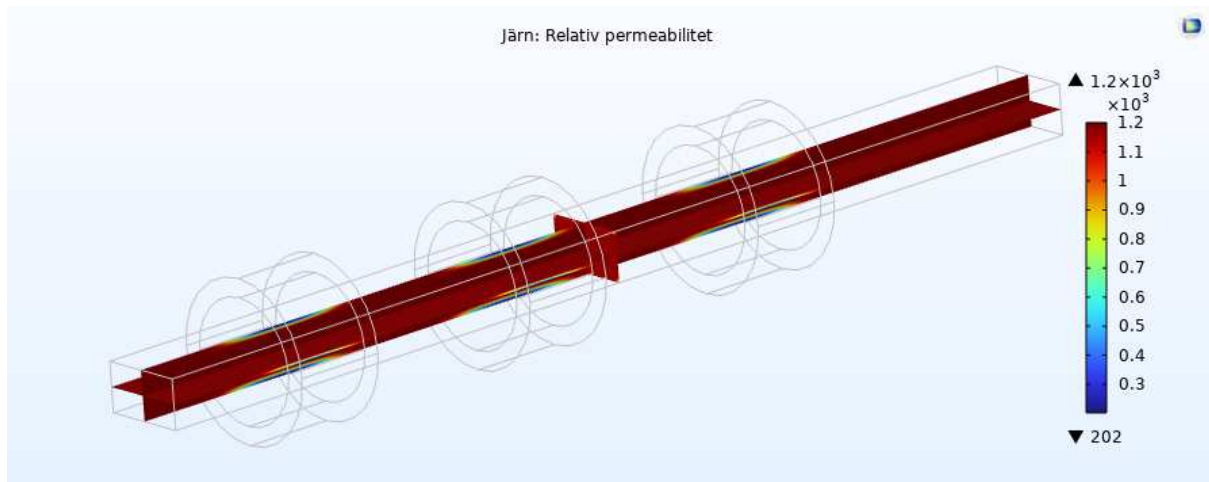
	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	984 (738)	1059 (890)	918 (751)
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1389 (1205)	1515 (1498)	1364 (1413)
<b>Spoleffekt [kW]</b>	169 (180)	202 (249)	154 (207)
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	155 (166)	188 (235)	141 (194)
<b>Verkningsgrad [%]</b>	92.0 (92.5)	93.3 (94.6)	91.2 (93.5)

## Resultat

De prickade linjerna i grafen nedan indikerar att konstanta materialparametrar har använts i simuleringen och de heldragna linjerna indikerar att BH-kurvor har inkluderats. Ytemperaturerna sjunker för alla de tre materialen när BH-kurvor används i stället för att använda en konstant hög relativ permeabilitet.



Den relativa permeabiliteten blir lägre där den magnetiska flödestätheten är stor, det vill säga vid ytan, vilket tydliggörs i figurerna nedan.

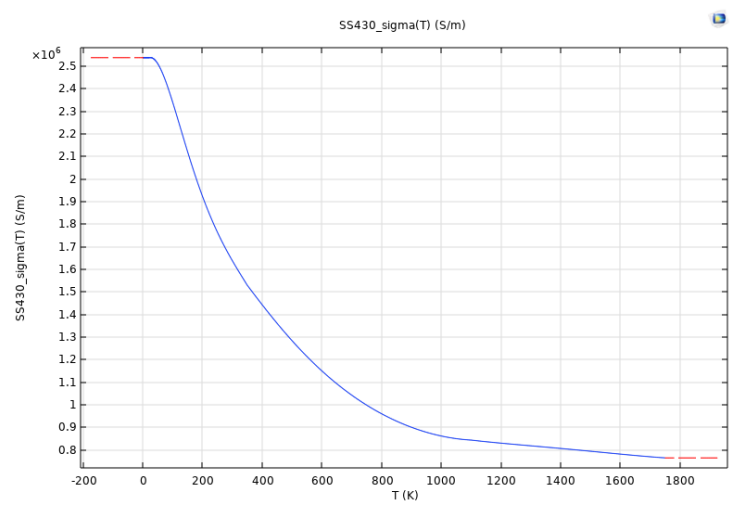
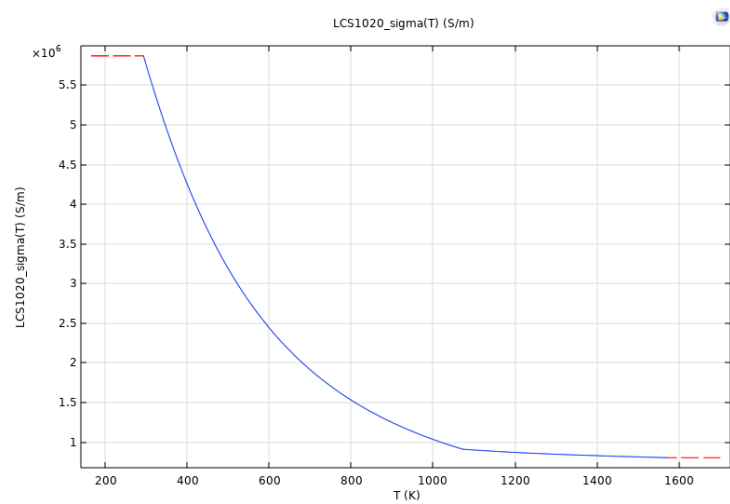
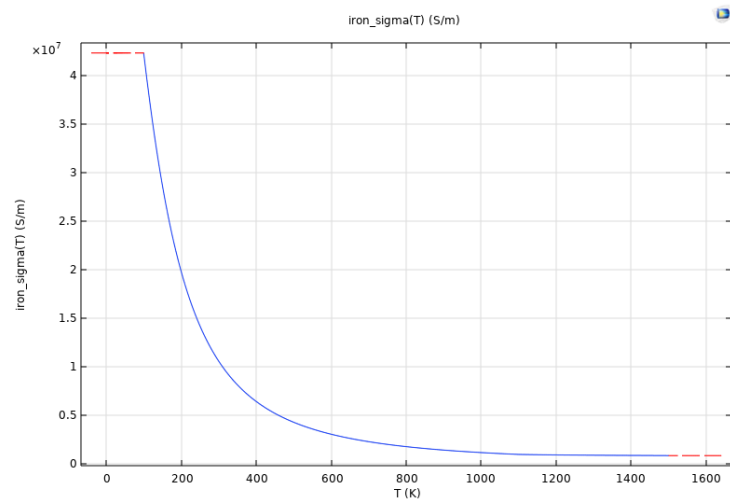


### Slutsatser

Då BH-kurvor inkluderas värms ämnet mindre på ytan, men mer inuti ämnet. Detta gör att de konvektiva värmeförlusterna mot luften minskar, samtidigt som ämnets medeltemperatur ökar.

## Temperaturberoende elektrisk konduktivitet

Den elektriska konduktiviteten för järn, lågkolhaltigt stål och rostfritt stål är temperaturberoende enligt nedanstående figurer.



Vid nästa simulering är alla materialparametrar konstanta bortsett från den elektriska konduktiviteten som är beroende av temperaturen, T. Precis som i föregående simulering beskrivs den relativa permeabiliteten med en BH-kurva.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Relativ permeabilitet [1]</b>	BH-kurva	BH-kurva	BH-kurva
<b>Elektrisk konduktivitet [S/m]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Termisk konduktivitet [W/(m·K)]</b>	80.6	63.7	21.4
<b>Värmekapacitet [J/(kg·K)]</b>	446.5	446.5	467.9
<b>Densitet [kg/m<sup>3</sup>]</b>	7855	7860	7965

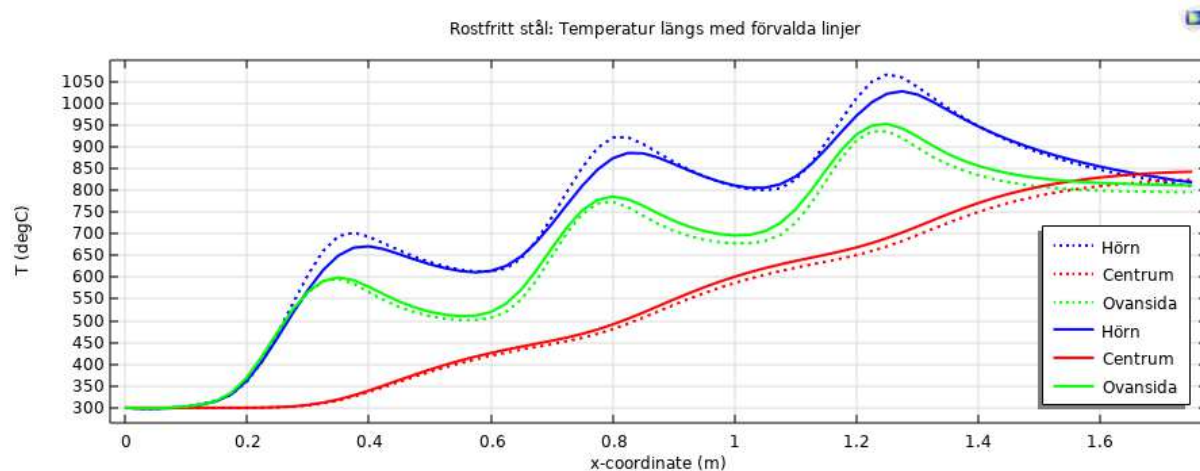
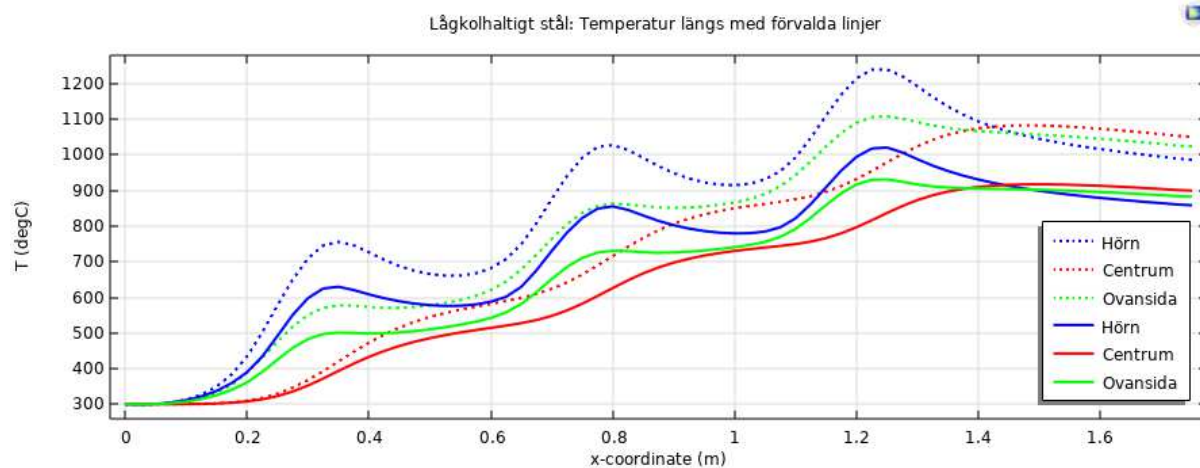
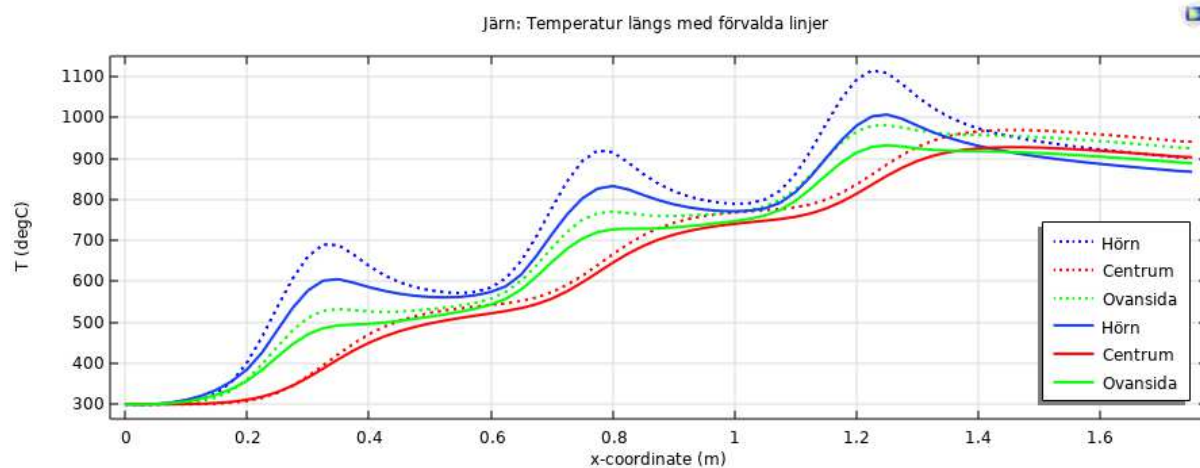
#### Numeriska resultat

Införandet av en temperaturberoende elektrisk konduktivitet förändrar resultaten. I tabellen nedan är värdena inom parentes resultaten för simuleringen med BH-kurva och konstanta materialparametrar.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	958 (984)	956 (1059)	928 (918)
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1285 (1389)	1299 (1515)	1334 (1364)
<b>Spoleffekt [kW]</b>	158 (169)	157 (202)	158 (154)
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	144 (155)	143 (188)	144 (141)
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.4 (92.0)	91.3 (93.3)	91.4 (91.2)

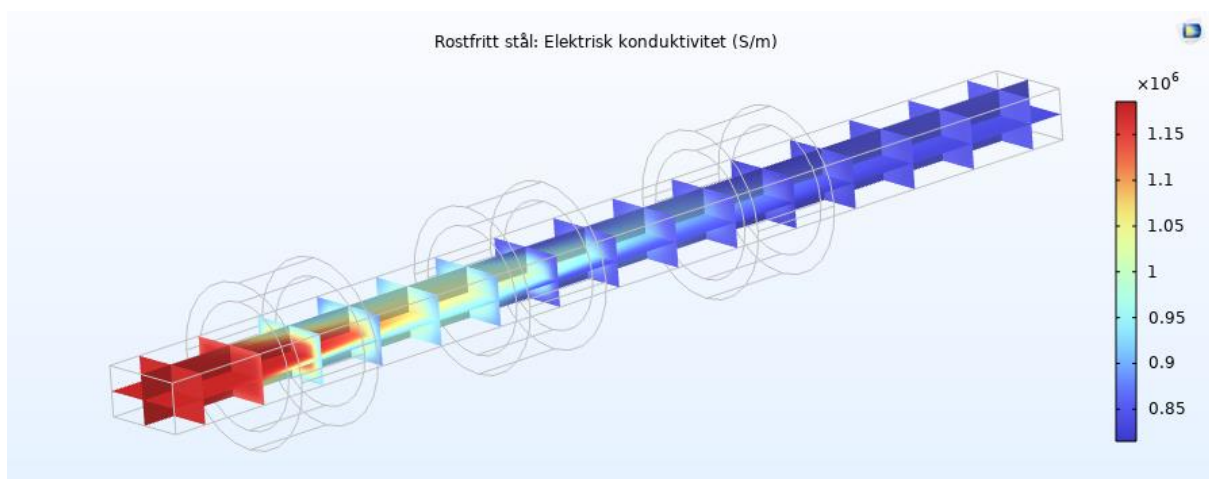
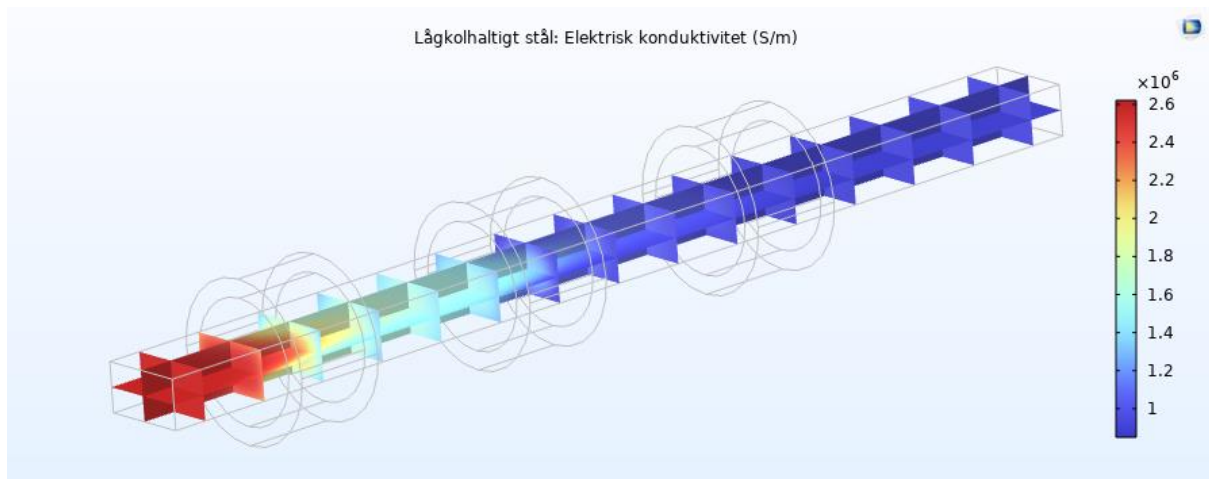
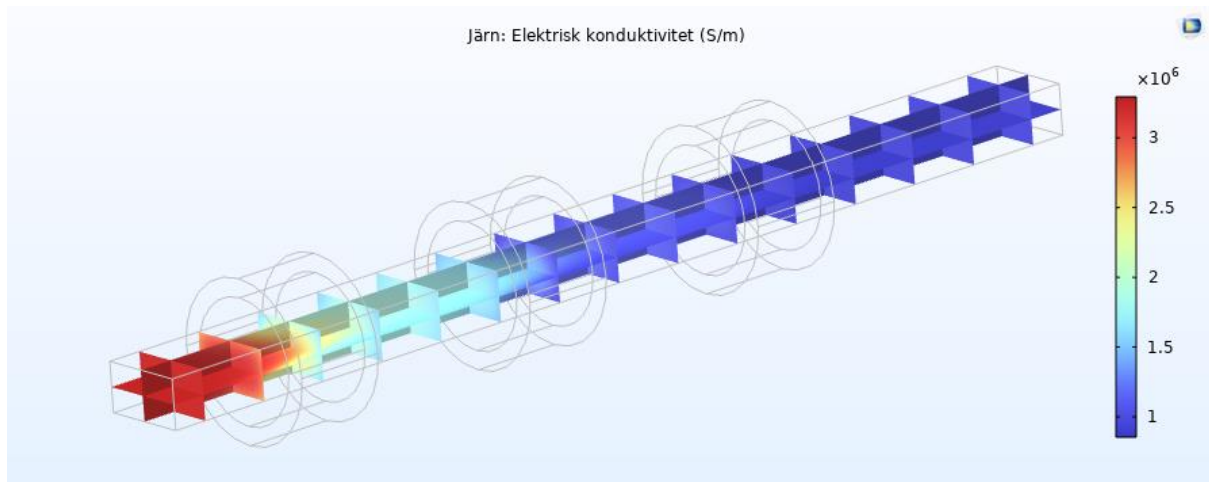
## Resultat

De prickade linjerna i grafen nedan indikerar att BH-kurvor har inkluderats och i de heldragna linjerna har även temperaturberoende elektrisk konduktivitet använts. Yttertemperaturerna sjunker för alla de tre materialen eftersom den elektriska konduktiviteten sjunker vid ytorna som blir varmast.





Den elektriska konduktiviteten varierar med en faktor  $\sim 3$  för järn och lågkolhaltigt stål, men skillnaden är inte lika stor för det rostfria stålet.

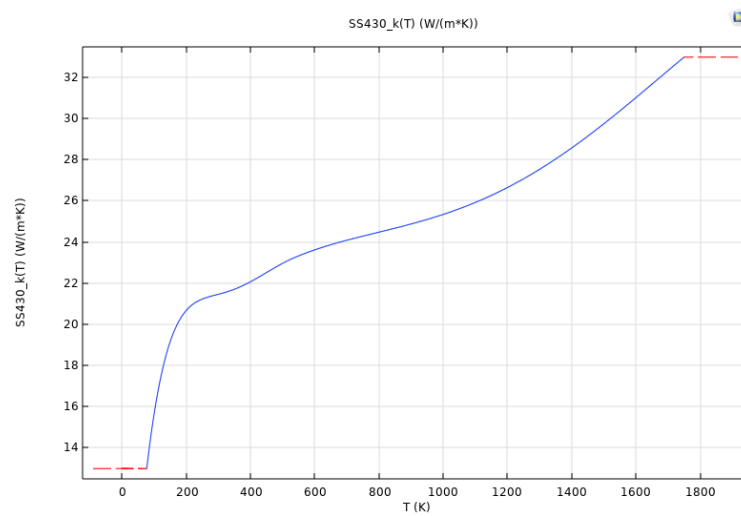
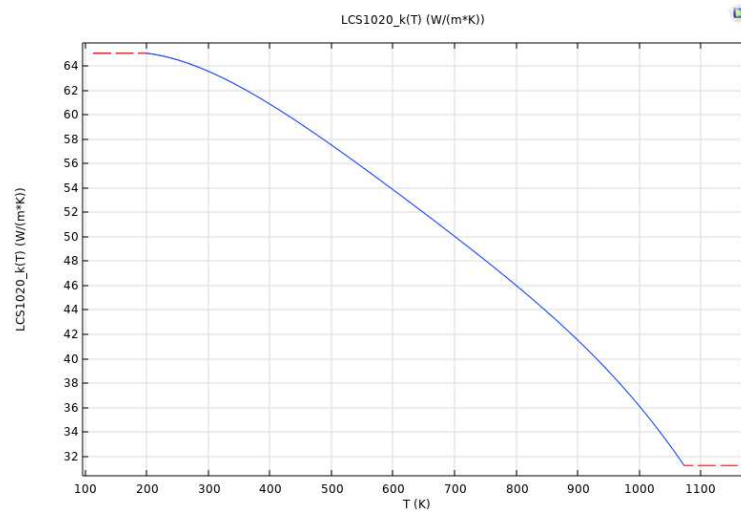
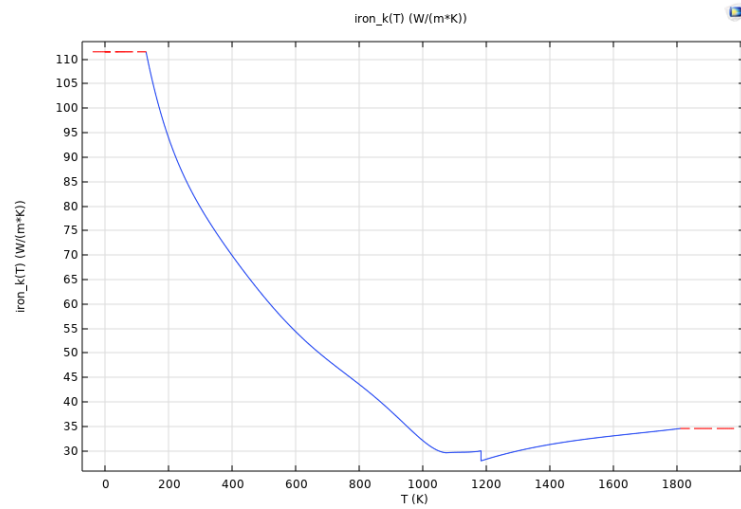


### Slutsatser

Då den elektriska konduktiviteten kan vara starkt temperaturberoende påverkas naturligtvis resultaten avsevärt också. För vissa material som till exempel rostfritt stål är inte den elektriska konduktiviteten starkt temperaturberoende och behöver då inte inkluderas om det är svårt att ta fram materialparametrar.

## Temperaturberoende termisk konduktivitet

Den termiska konduktiviteten för järn, lågkolhaltigt stål och rostfritt stål är temperaturberoende enligt nedanstående figurer.





Vid nästa simulering är endast värmekapaciteten och densiteten konstanta.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Relativ permeabilitet [1]</b>	BH-kurva	BH-kurva	BH-kurva
<b>Elektrisk konduktivitet [S/m]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Termisk konduktivitet [W/(m·K)]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Värmekapacitet [J/(kg·K)]</b>	446.5	446.5	467.9
<b>Densitet [kg/m<sup>3</sup>]</b>	7855	7860	7965

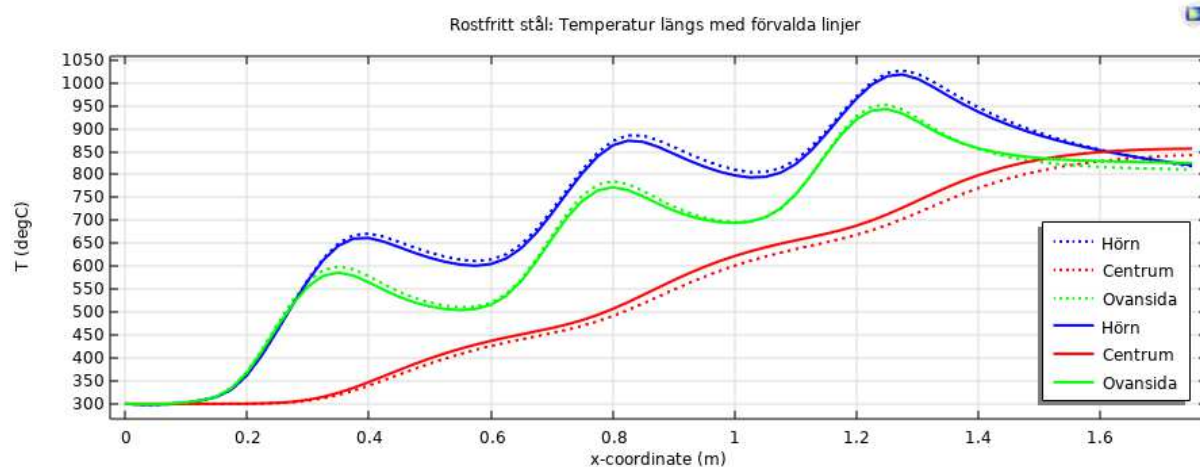
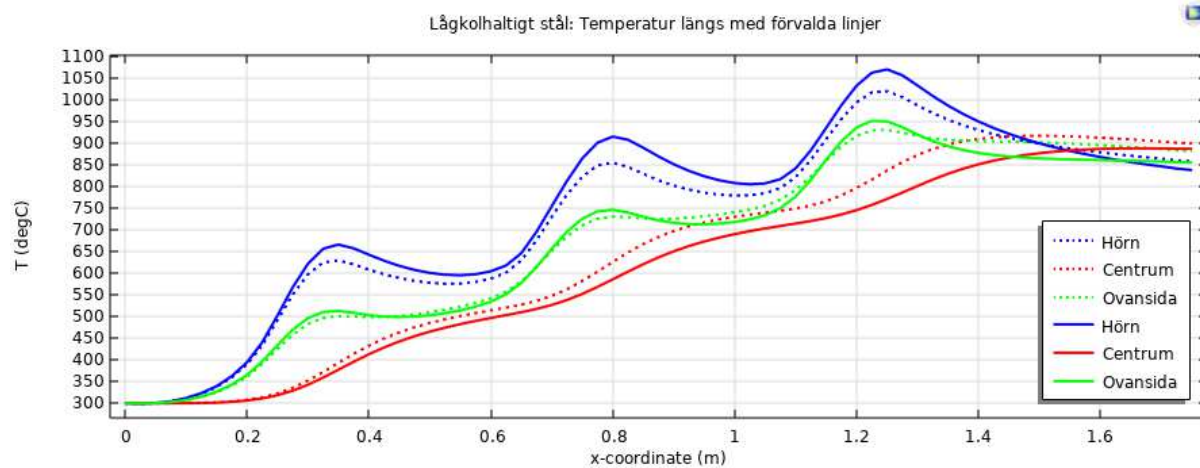
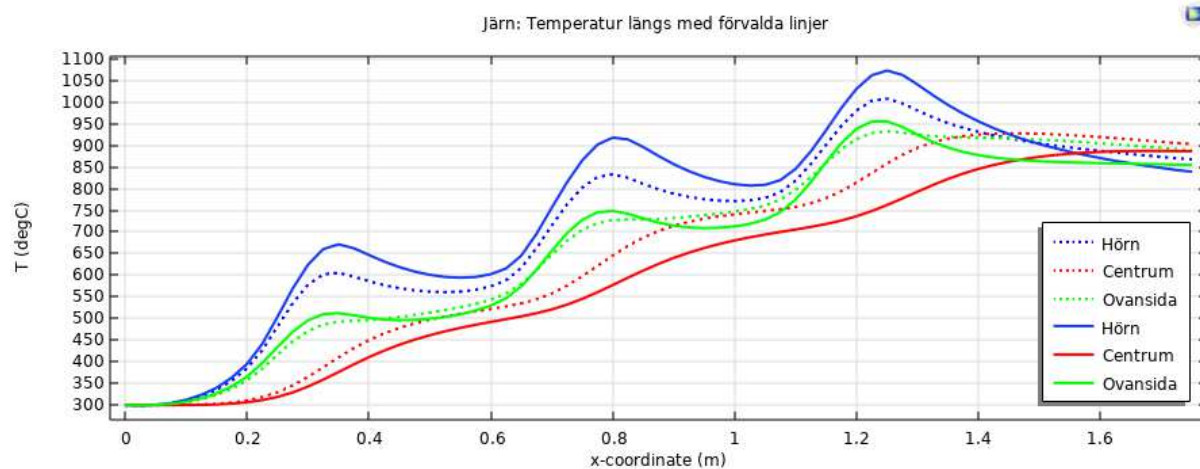
#### Numeriska resultat

Införandet av temperaturberoende termisk konduktivitet förändrar inte resultaten i tabellen nedan avsevärt. Värdena inom parentes är resultaten för simuleringen utan införandet av temperaturberoende termisk konduktivitet.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	950 (958)	951 (956)	930 (928)
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1362 (1285)	1358 (1299)	1316 (1334)
<b>Spoleffekt [kW]</b>	157 (158)	157 (157)	158 (158)
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	143 (144)	143 (143)	144 (144)
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.4 (91.4)	91.3 (91.3)	91.4 (91.4)

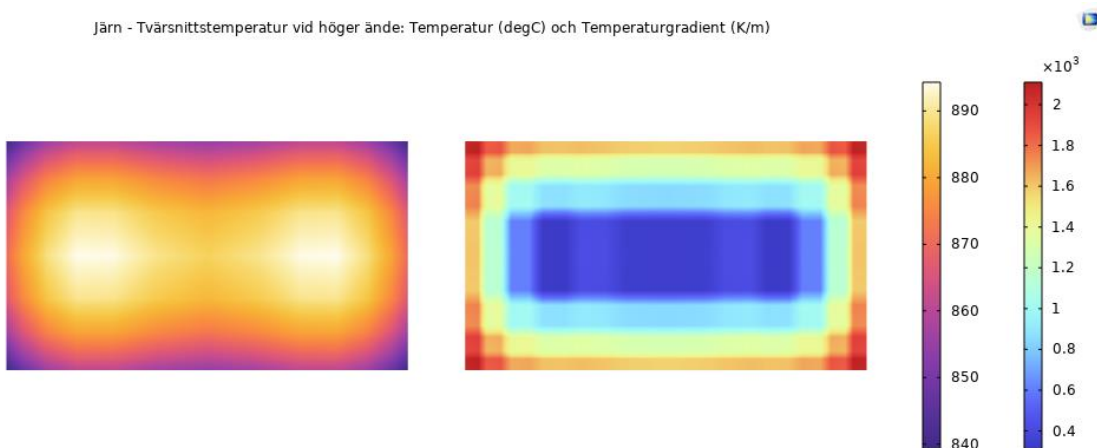
## Resultat

De heldragna linjerna i grafen nedan indikerar att temperaturberoende termisk konduktivitet har inkluderats och de prickade linjerna är föregående lösning.

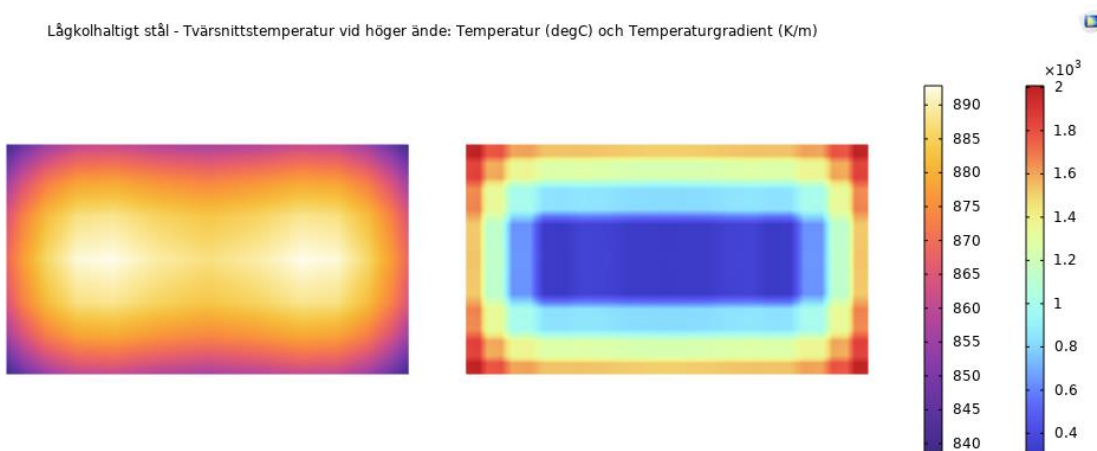


Figurerna nedan visar temperaturen och temperaturgradienterna i tvärsnittet längst till höger.

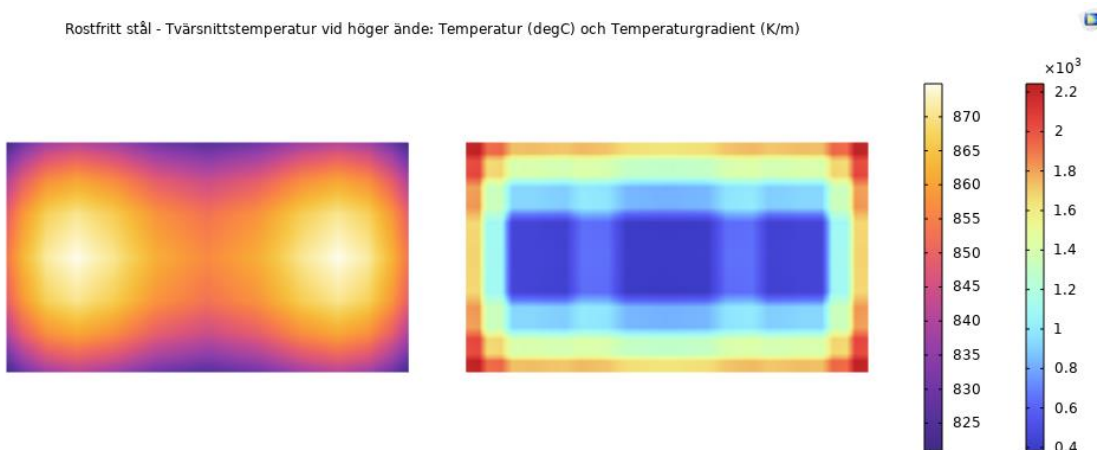
Järn - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Lågkolhaltigt stål - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Rostfritt stål - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



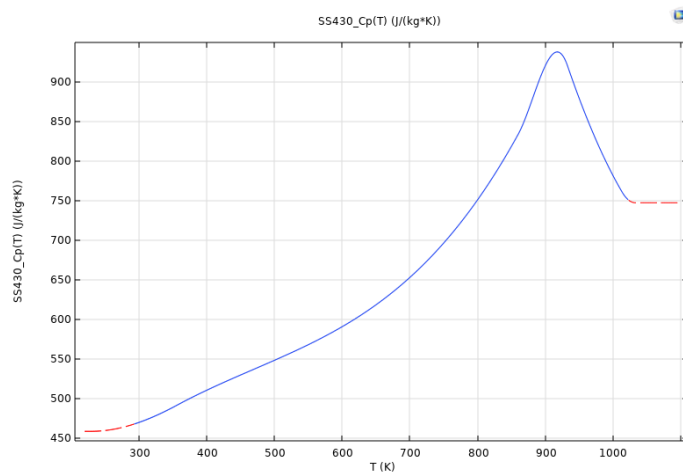
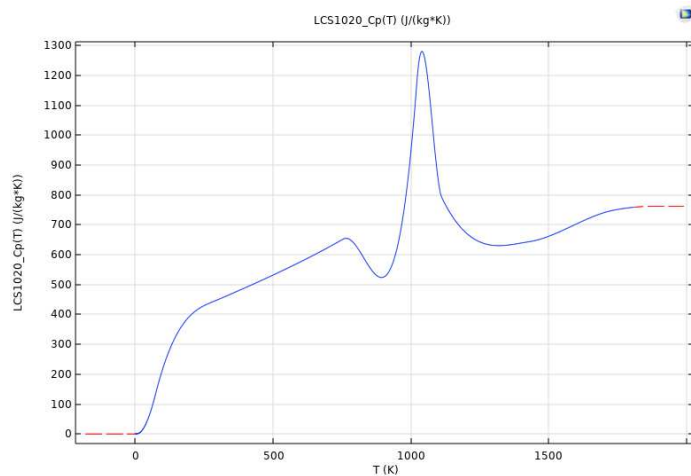
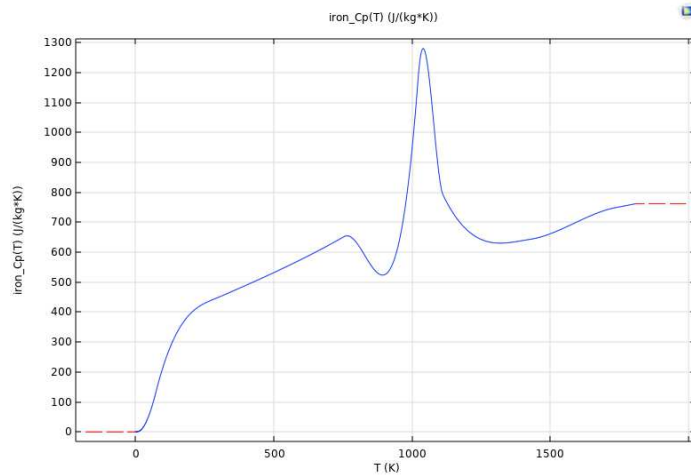
### Slutsatser

Även om det inte är några större skillnader i medeltemperatur och maxtemperatur vid användandet av temperaturberoende termisk konduktivitet är det inte oviktigt att beakta.

Temperaturgradienterna ökar markant och detta är av stor vikt om man behöver förhindra till exempel sprickbildning. Temperaturgradienterna vid höger ände ökar med en faktor av  $\sim 2$  för järn och lågkolhaltigt stål, men inte avsevärt för rostfritt stål när temperaturberoende termisk konduktivitet används.

## Temperaturberoende värmekapacitet

Värmekapaciteten är temperaturberoende enligt nedanstående figurer. Inbyggda funktioner i COMSOL Multiphysics gör det lätt att "jämna ut" funktionerna för att enklare uppnå numerisk konvergens då finita elementmetoden kan få problem med singulära punkter. Följande analys tar alltså hänsyn till Curiepunkten i den termiska analysen, men inte i den elektromagnetiska vilket görs senare i kapitlet. Notera att värmekapaciteten som har använts för lågkolhaltigt stål är samma som för järn eftersom data saknades för höga temperaturer.



Vid nästa simulering är alla materialparametrar temperaturberoende bortsett från BH-kurvorna och densiteten.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Relativ permeabilitet [1]</b>	BH-kurva	BH-kurva	BH-kurva
<b>Elektrisk konduktivitet [S/m]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Termisk konduktivitet [W/(m·K)]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Värmekapacitivitet [J/(kg·K)]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Densitet [kg/m<sup>3</sup>]</b>	7855	7860	7965

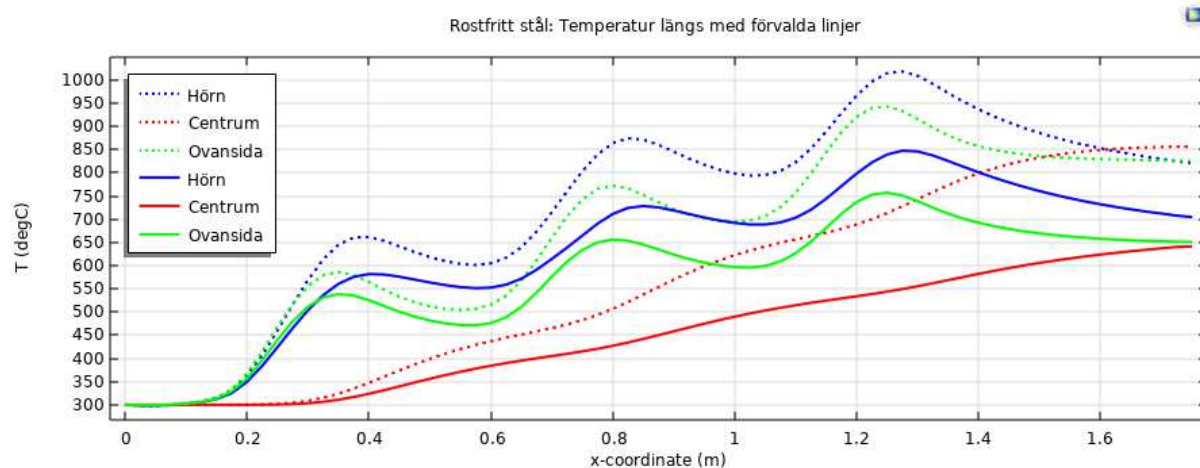
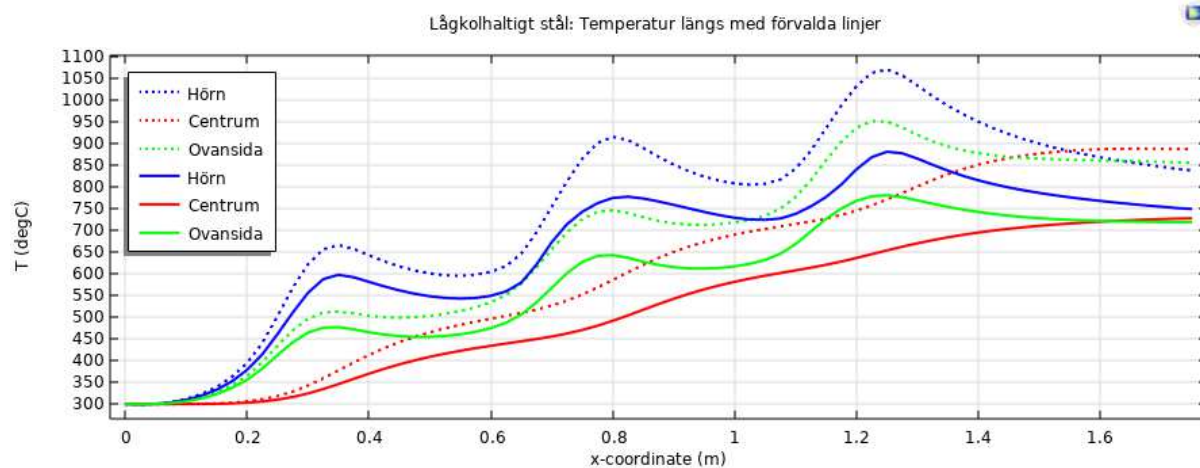
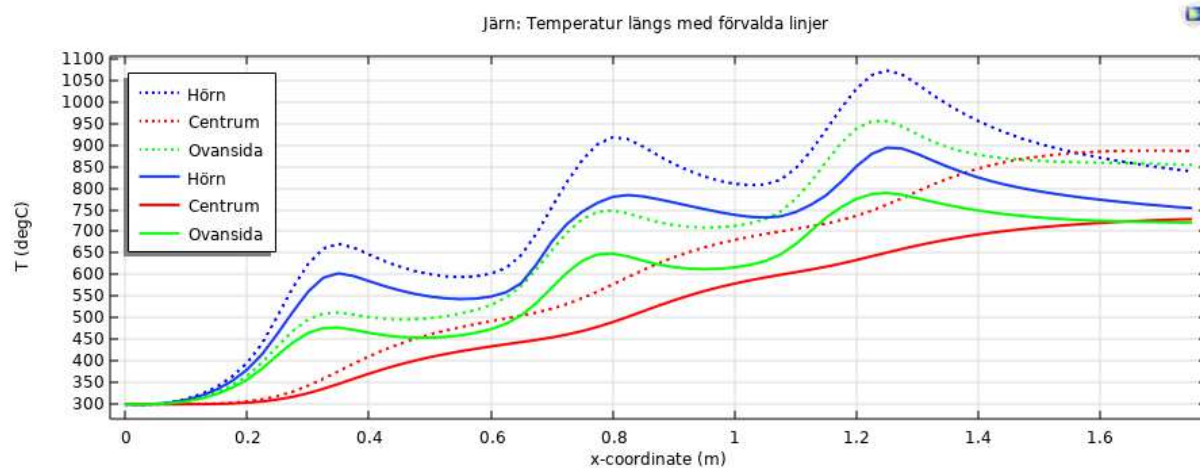
#### Numeriska resultat

Införandet av temperaturberoende värmekapacitivitet förändrar resultaten avsevärt. I tabellen är värdena inom parentes resultaten för simuleringen utan användandet av temperaturberoende värmekapacitivitet. Medeltemperaturen minskar med cirka 100 °C och maxtemperaturen minskar med cirka 200 °C vilket måste anses vara mycket.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	858 (950)	856 (951)	821 (930)
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1175 (1362)	1162 (1358)	1134 (1316)
<b>Spoleffekt [kW]</b>	157 (157)	157 (157)	158 (158)
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	143 (143)	144 (143)	144 (144)
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.4 (91.4)	91.4 (91.3)	91.4 (91.4)

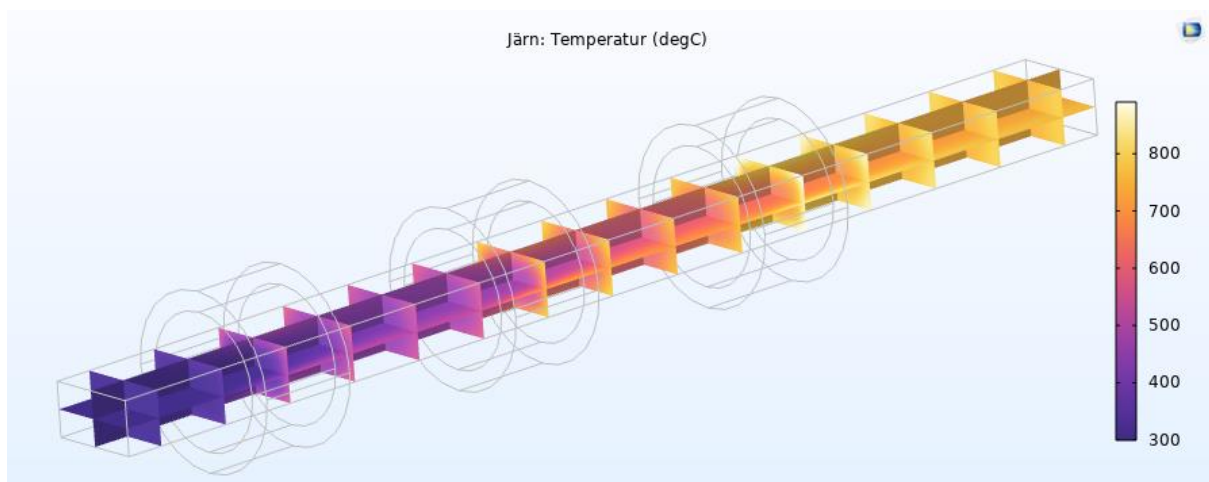
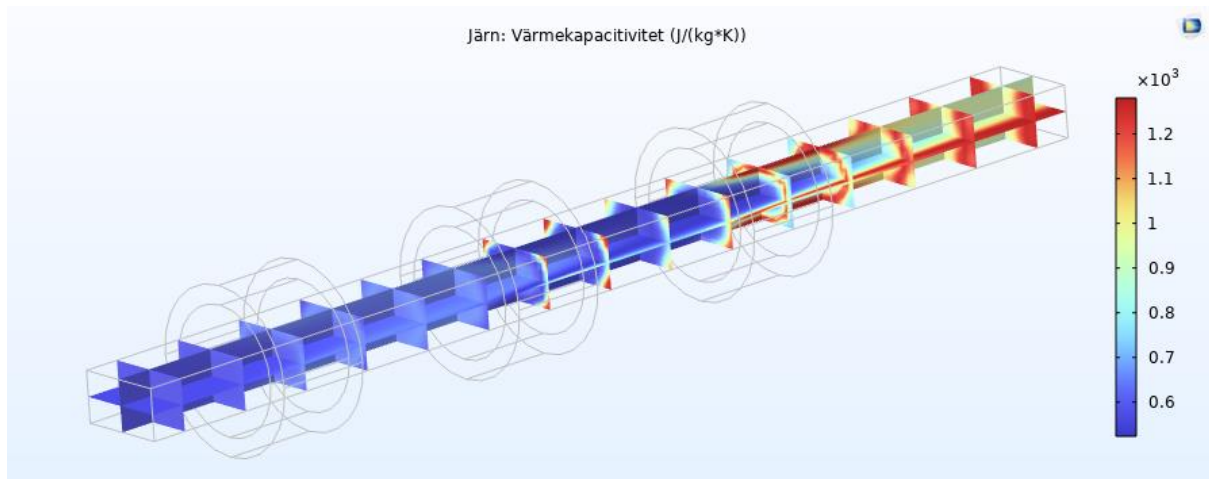
## Resultat

De heldragna linjerna i grafen nedan indikerar att temperaturberoende värmekapacitet har inkluderats och de prickade linjerna är föregående lösning. Temperaturen i centrum av ämnet förändras drastiskt.

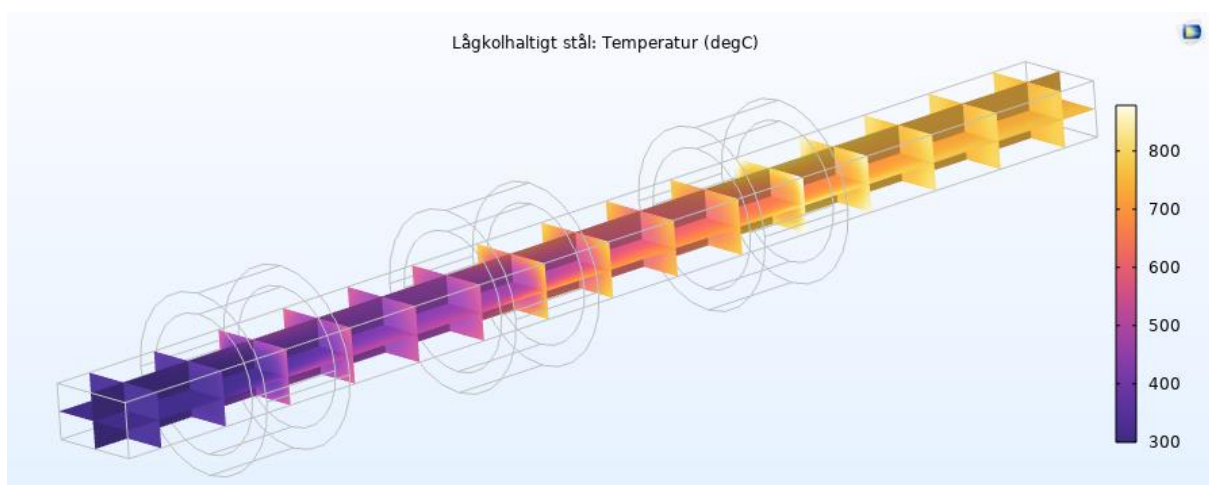
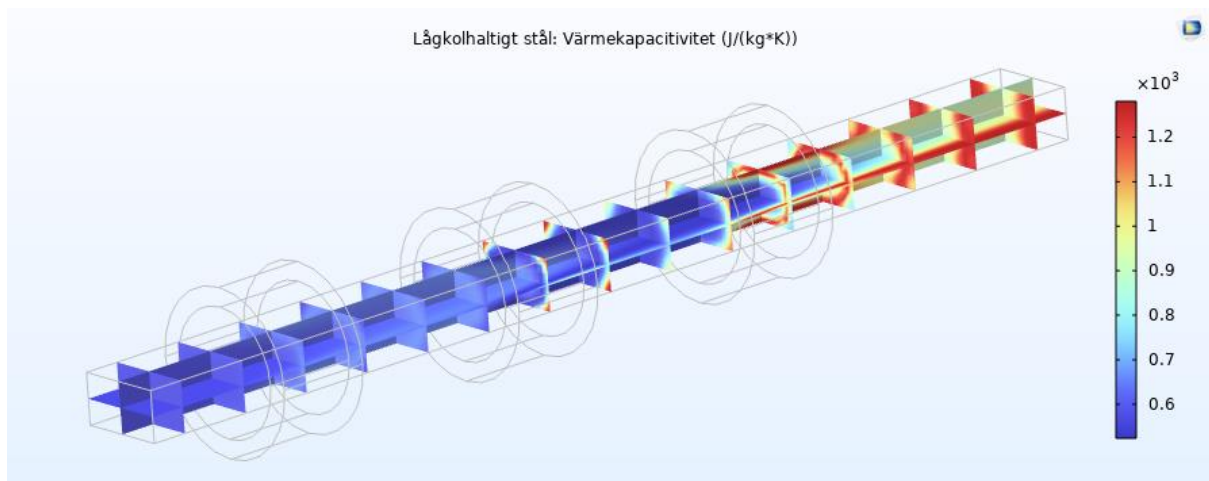




Värmekapaciteten kan visualiseras för att få en bättre uppfattning om hur den påverkar den slutgiltiga temperaturen. Ett vant öga ser att upplösningen ser lite ojämn ut. Om en finare mesh används blir utbredningen jämnare. Curietemperaturen för järn är 770 °C och detta uppnås vid den tredje spolen.

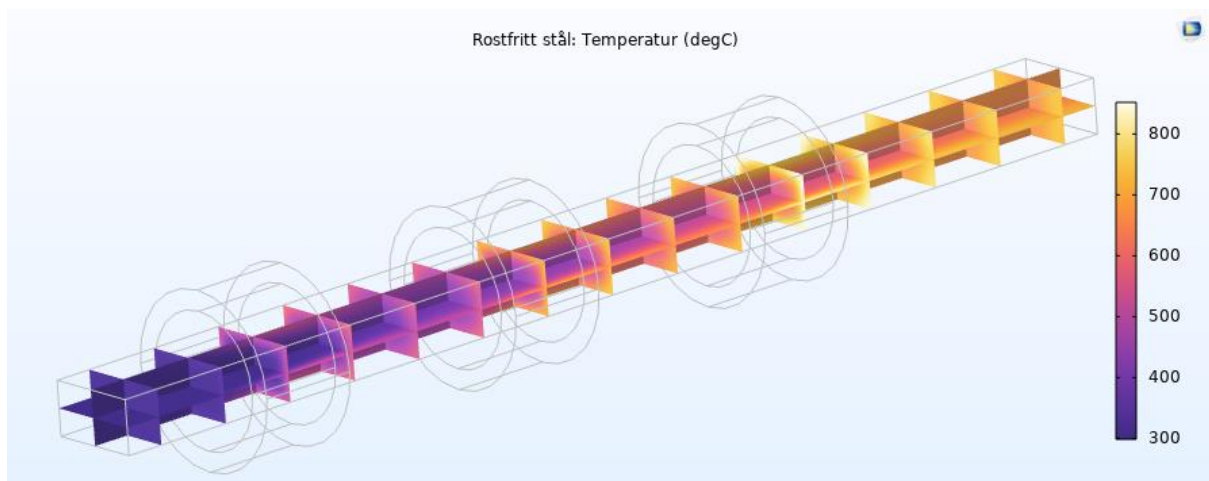
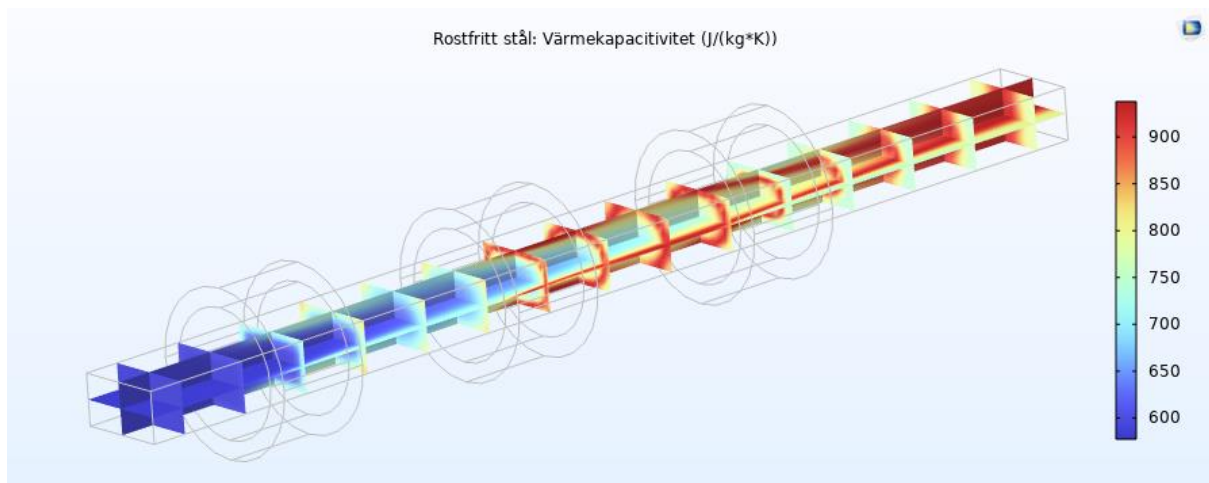


Curiepunkten och värmekapaciteteten för lågkolhaltigt stål har satts till samma som för järn.





Curietemperaturen för det rostfria stålet är 650 °C och som ses i figurerna nedan uppnås detta redan vid den andra spolen.

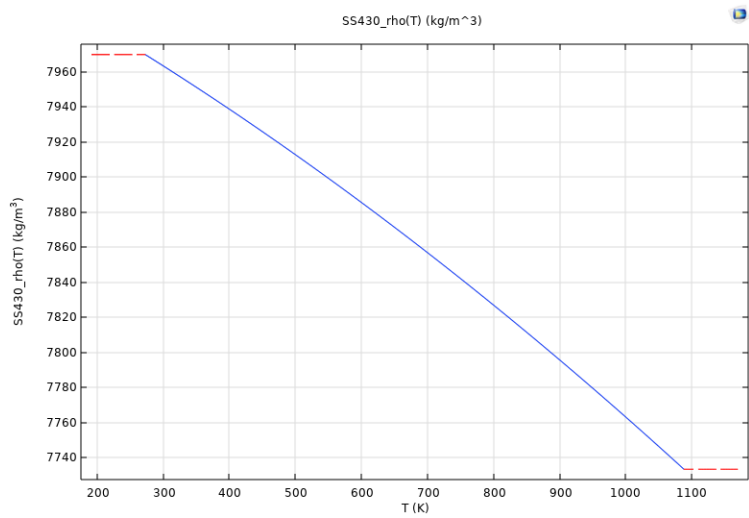
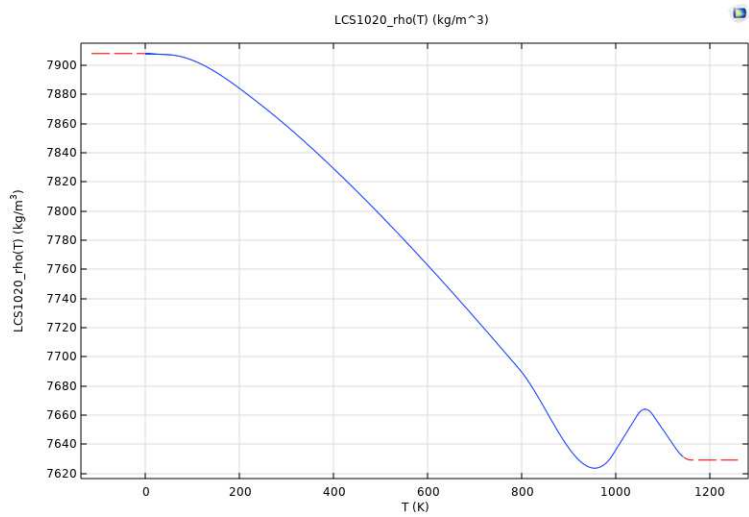
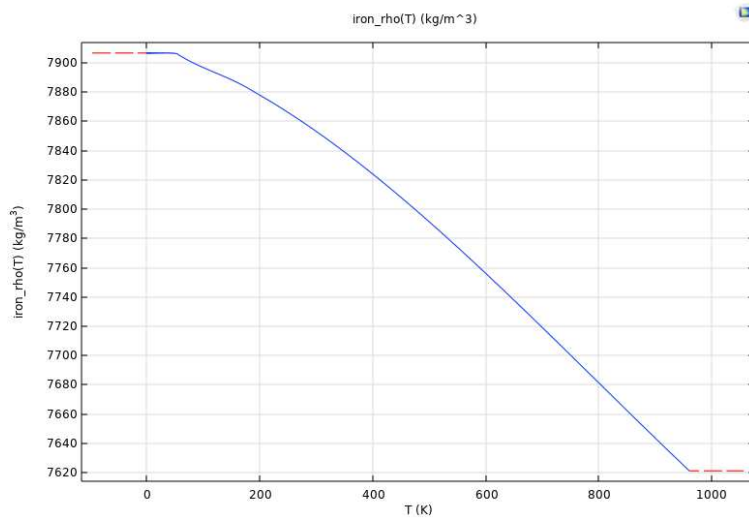


#### Slutsatser

Redan innan Curietemperaturen uppnås påverkar den temperaturberoende värmekapaciteten den slutgiltiga temperaturutbredningen. Om Curietemperaturen uppnås under processen bör dess temperaturberoende absolut beaktas för att få korrekta resultat.

## Temperaturberoende densitet

Densiteten för järn, lågkolhaltigt stål och rostfritt stål är temperaturberoende enligt nedanstående figurer.



I den näst sista simulering är alla materialparametrar temperaturberoende bortsett från BH-kurvorna.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Relativ permeabilitet [1]</b>	BH-kurva	BH-kurva	BH-kurva
<b>Elektrisk konduktivitet [S/m]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Termisk konduktivitet [W/(m·K)]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Värmekapacitivitet [J/(kg·K)]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T
<b>Densitet [kg/m<sup>3</sup>]</b>	Beroende av T	Beroende av T	Beroende av T

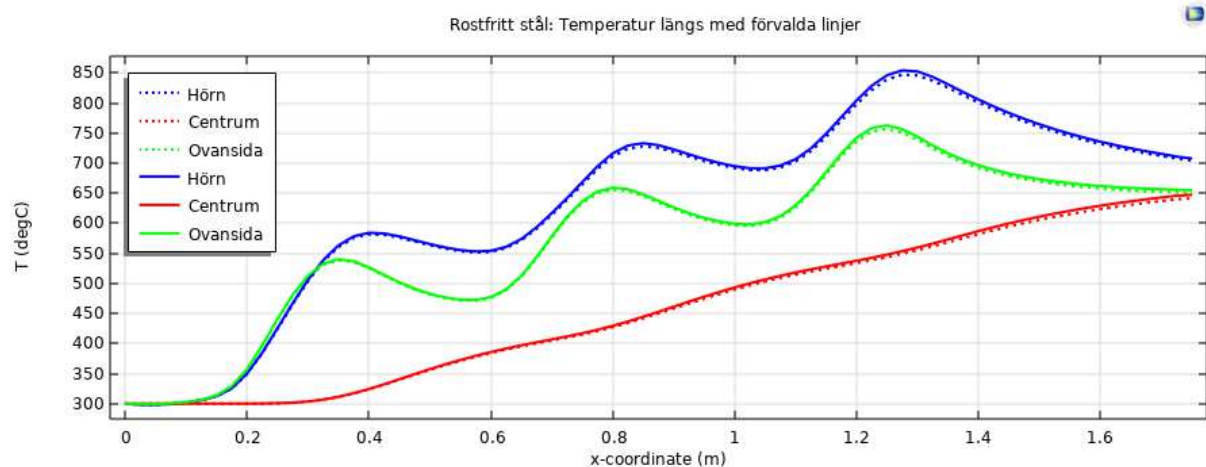
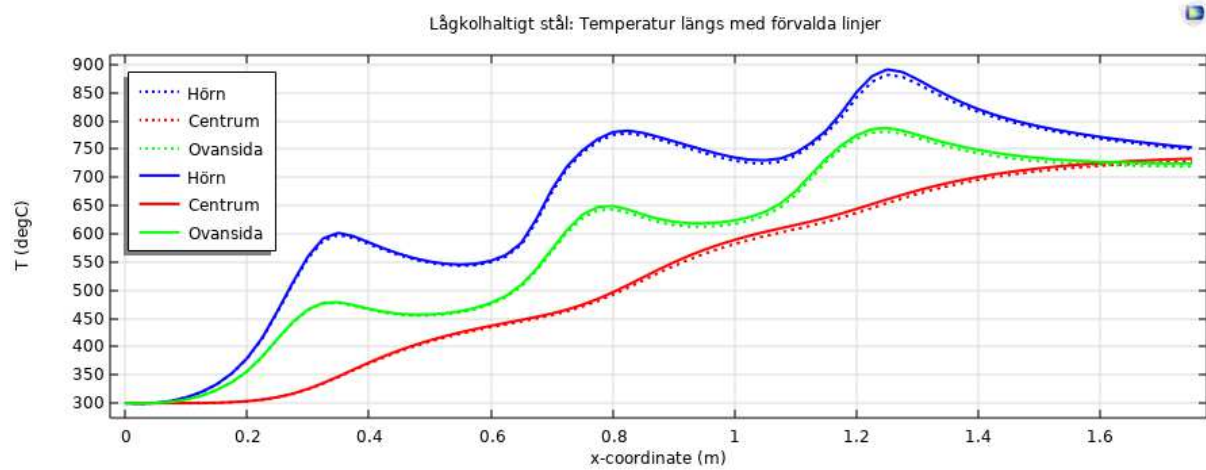
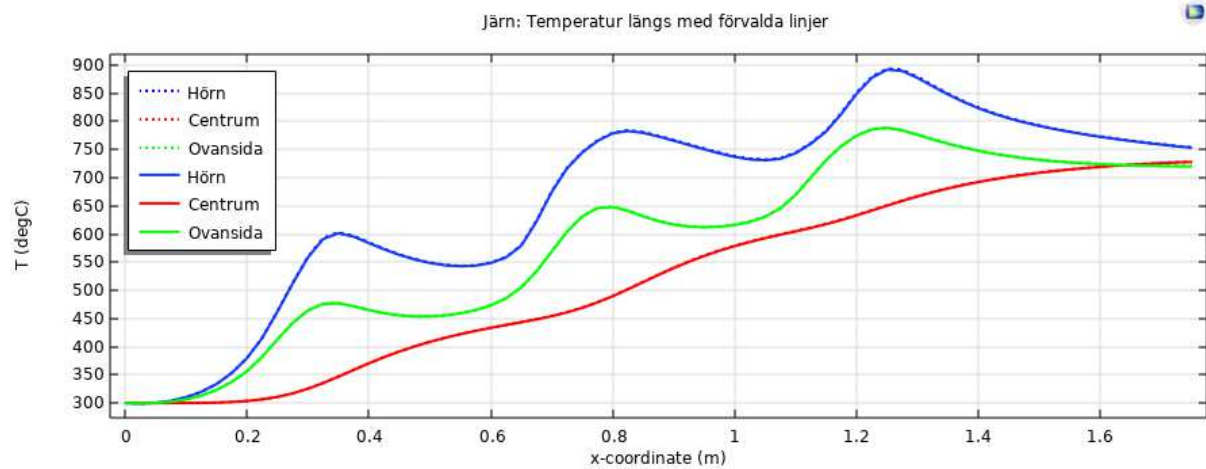
#### Numeriska resultat

Som förväntat har den temperaturberoende densiteten liten påverkan på resultaten då densiteten inte förändras mycket vid olika temperaturer. I tabellen är värdena inom parentes resultaten för simuleringen utan användandet av temperaturberoende densitet.

	<b>Järn</b>	<b>Lågkolhaltigt stål 1020</b>	<b>Rostfritt stål 430</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	858 (858)	861 (856)	825 (821)
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1173 (1175)	1171 (1162)	1141 (1134)
<b>Spoleffekt [kW]</b>	157 (157)	157 (157)	158 (158)
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	143 (143)	144 (144)	145 (144)
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.4 (91.4)	91.4 (91.4)	91.4 (91.4)

## Resultat

Densiteten är temperaturberoende i de heldragna linjerna och de prickade linjerna är föregående lösning.



## Slutsatser

Att använda konstant densitet är en möjlig förenkling, då dess inverkan på temperaturen är minimal.

## Curietemperatur och den relativa permeabiliteten

Ett ferromagnetiskt material förlorar sina ferromagnetiska egenskaper när Curietemperaturen överskrids. Detta påverkar naturligtvis även uppvärmningen. För att ta hänsyn till BH-kurvans temperaturberoende kan följande formel för den temperaturberoende relativa permeabiliteten  $\mu_T$  användas:

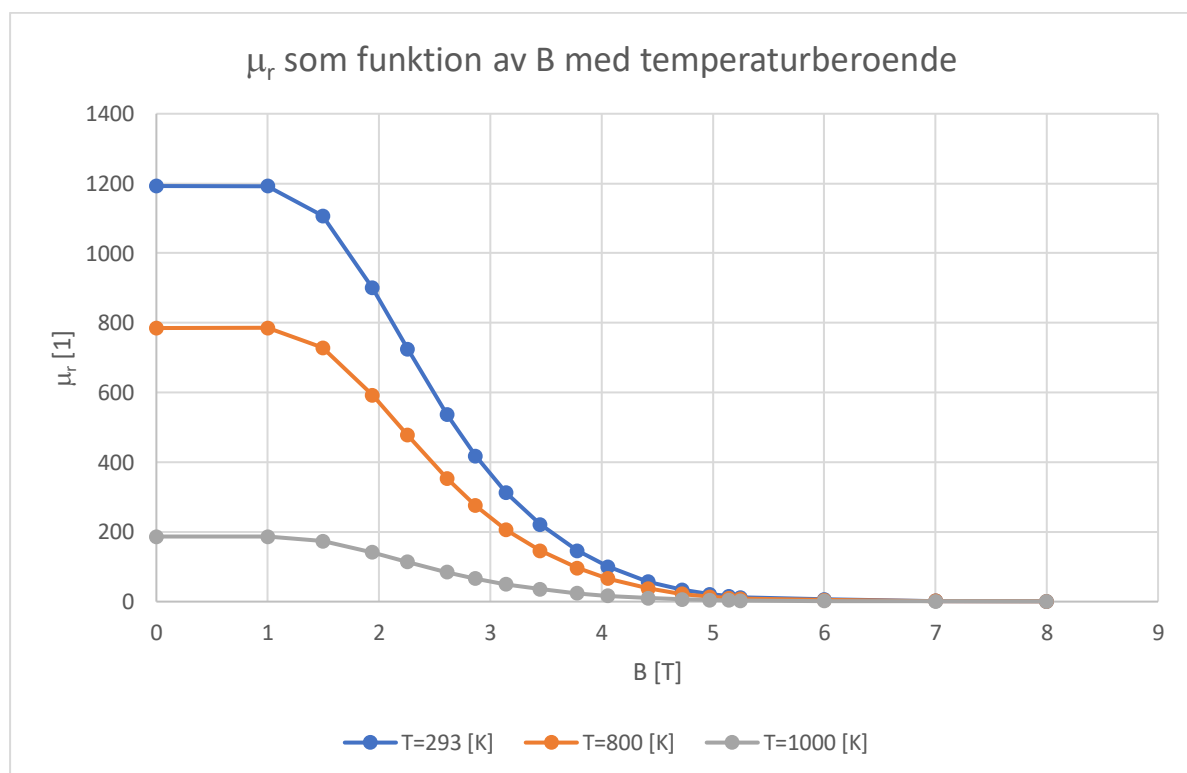
$$\mu_T = 1 + (\mu_r - 1) \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^\beta \right)$$

där  $\mu_r$  är den relativa permeabiliteten som har använts tidigare,  $T$  är temperaturen och  $T_c$  är materialets Curietemperatur.  $\beta$  är den karaktäristiska exponenten för temperaturberoendet. Ett högt värde på  $\beta$  innebär att den relativa permeabiliteten ändras hastigt vid Curiepunkten. Enligt CENOS användarmanual bör värdet sättas till mellan 4 och 6, se följande länk:

<https://documentation.cenos-platform.com/docs/explained/material-props>

I modellen som undersöks i denna rapport sattes värdet på  $\beta$  till 4.

I figuren visas den relativa permeabiliteten för järn med temperaturerna 293 K, 800 K och 1000 K. Curietemperaturen för järn är 1043 K och då blir den relativa permeabiliteten lika med 1 för temperaturer över Curietemperaturen. Det lågkolhaltiga stålet och det rostfria stålet behandlas med samma formel som ovan.



I den sista simuleringen är alla materialparametrar temperaturberoende. Inställningar för ämnets materialegenskaper i COMSOL Multiphysics visas i figuren nedan. Den beroende variabeln  $T$  är temperaturen i ämnet. Alla materialparametrar använder interpolationsfunktioner.

Material Contents					
Property	Variable	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_iso...	iron_sigma(T)	S/m	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r_i...	1	1	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_iso ;...	murT	1	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	iron_rho(T)	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii...	iron_k(T)	W/(m·K)	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	iron_Cp(T)	J/(kg·K)	Basic	
Magnetic flux density norm	normB	BH(normHin)	T	B-H curve	
Magnetic field norm	normH	BH_inv(nor...	A/m	B-H curve	
Magnetic coenergy density	Wpm	BH_prim(no...	J/m <sup>3</sup>	B-H curve	
Effective magnetic flux density norm	normBeff	BHeff(norm...	T	Effective B-H curve	
Effective magnetic field norm	normHeff	BHeff_inv(n...	A/m	Effective B-H curve	

Den relativa permeabiliteten är en variabel som beskrivs i figuren nedan. Om temperaturen är högre än Curietemperaturen  $iron\_Tc$ , sätts den relativa permeabiliteten till 1, annars används formeln som beskrivs tidigare.

Variables				
Name	Expression	Unit	Description	
murT	$\text{if}(T < \text{iron\_Tc}, 1 + (\text{iron\_murOfB}(\text{mf.normB}) - 1) * (1 - (T/\text{iron\_Tc})^{\text{beta}}), 1)$			

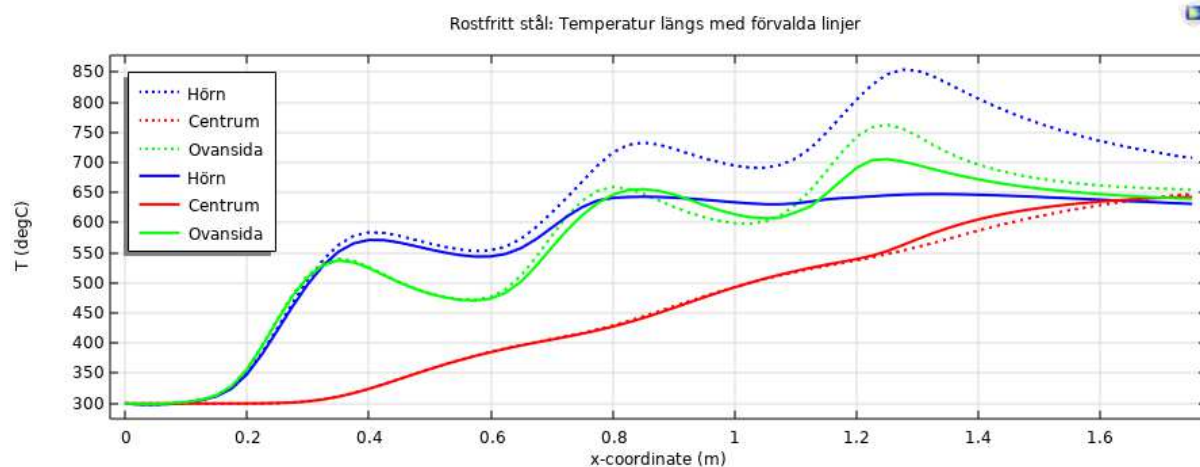
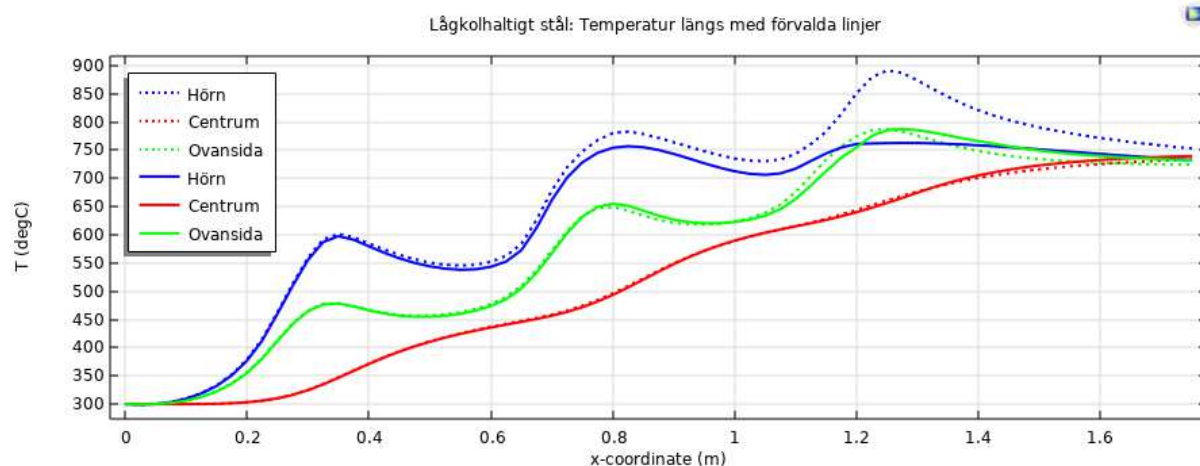
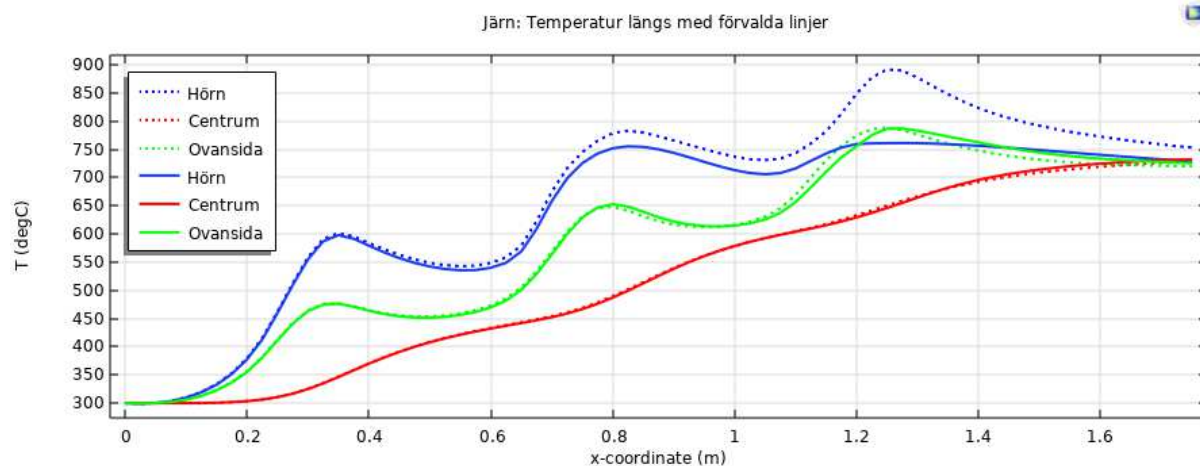
### Numeriska resultat

Eftersom temperaturen är högre än Curietemperaturen i stora delar av ämnet har detta väldigt stor påverkan på resultaten som kan ses i tabellen nedan. Värdena inom parentes är resultaten för simuleringen utan användandet av temperaturberoende BH-kurva.

	Järn	Lågkolhaltigt stål 1020	Rostfritt stål 430
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	852 (858)	856 (861)	804 (825)
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1070 (1173)	1071 (1171)	979 (1141)
<b>Spoleffekt [kW]</b>	151 (157)	153 (157)	138 (158)
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	137 (143)	140 (144)	124 (144)
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.0 (91.4)	91.2 (91.4)	90.2 (91.4)

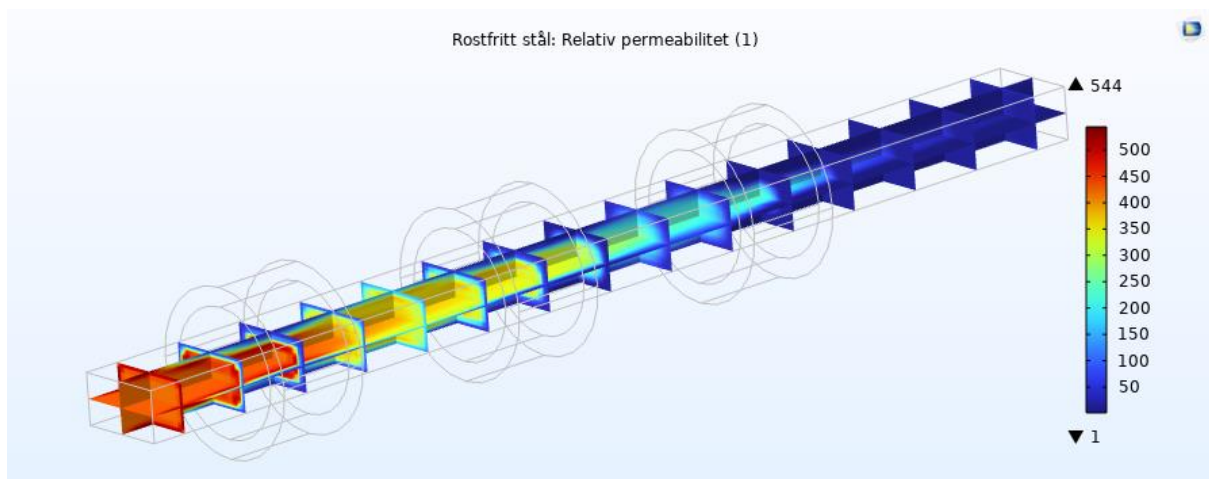
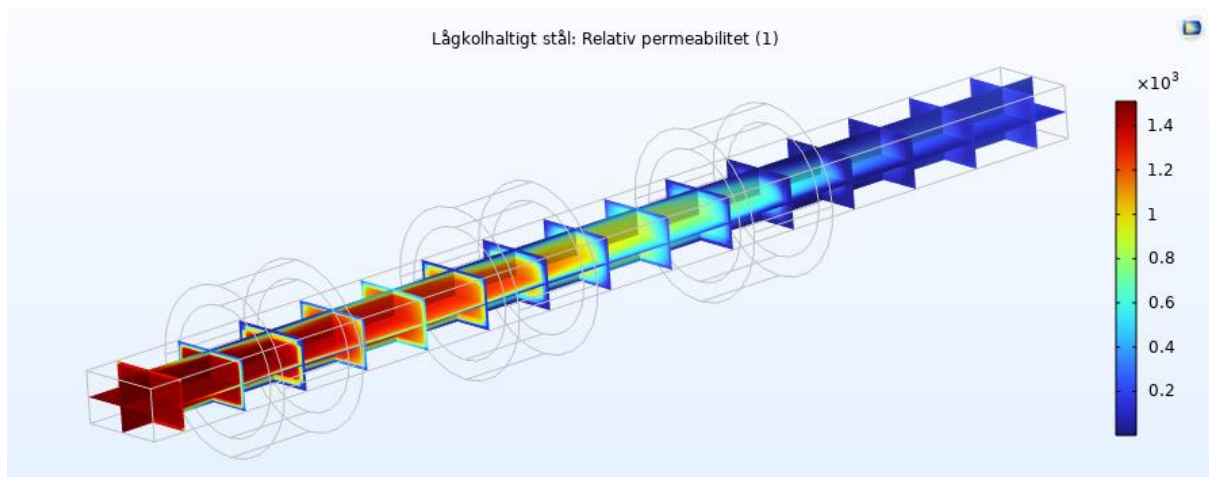
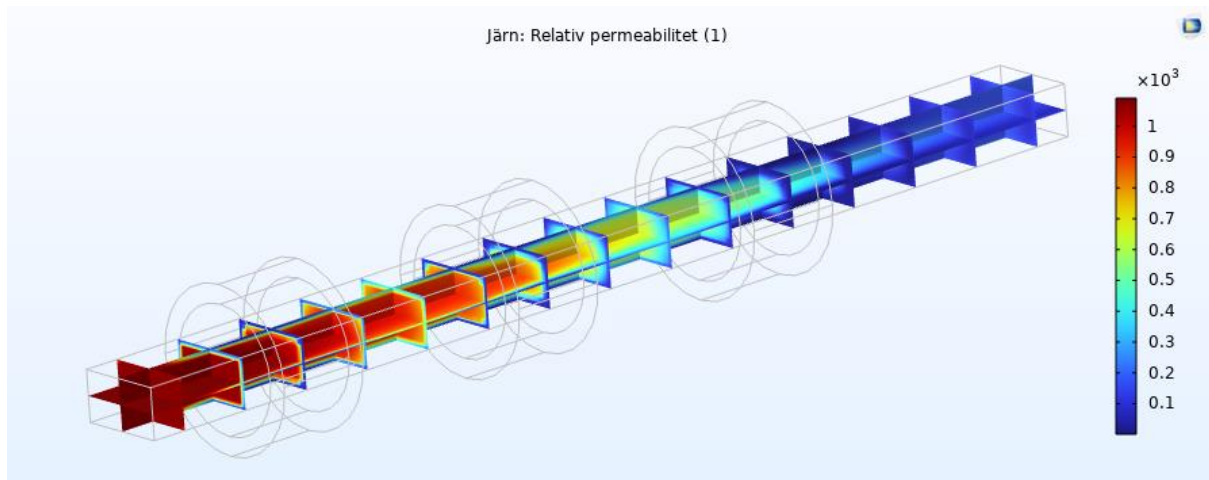
## Resultat

De heldragna linjerna representerar lösningen när hänsyn har tagits till temperaturberoende BH-kurvor och de prickade linjerna är föregående lösning. Temperaturen i centrum ändras inte nämnvärt, men temperaturen på ytan påverkas mycket om temperaturberoende BH-kurvor inkluderas.



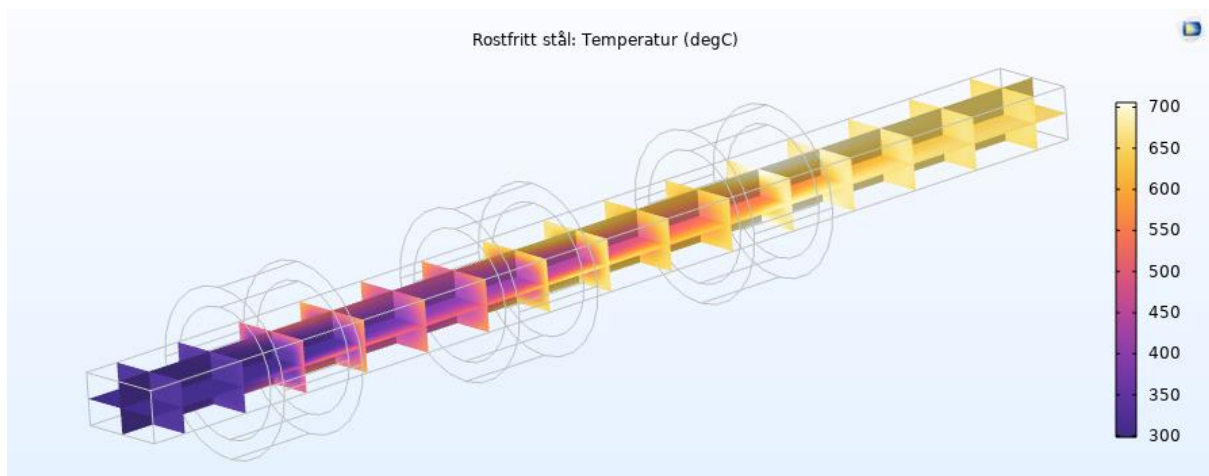
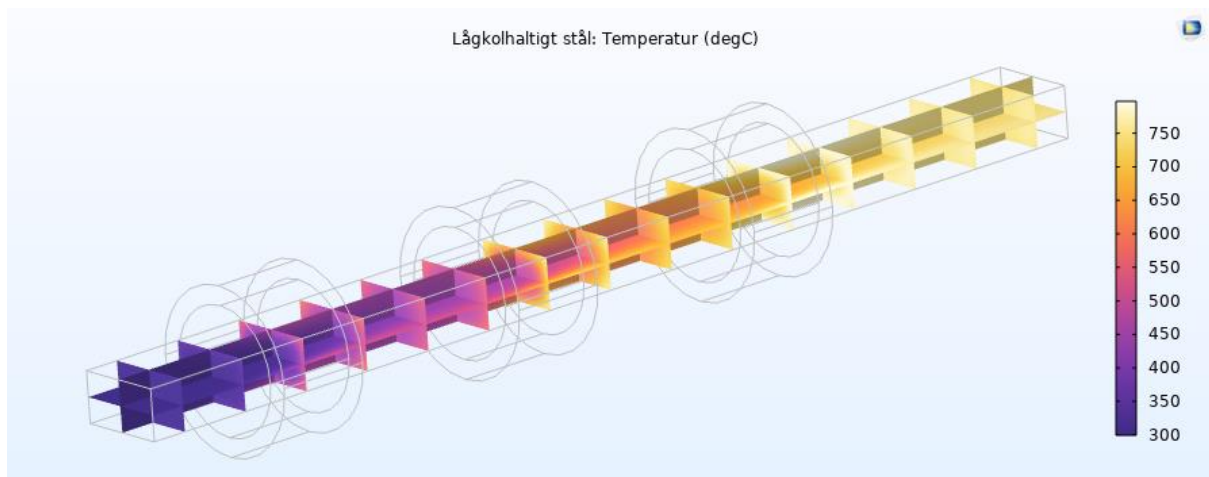
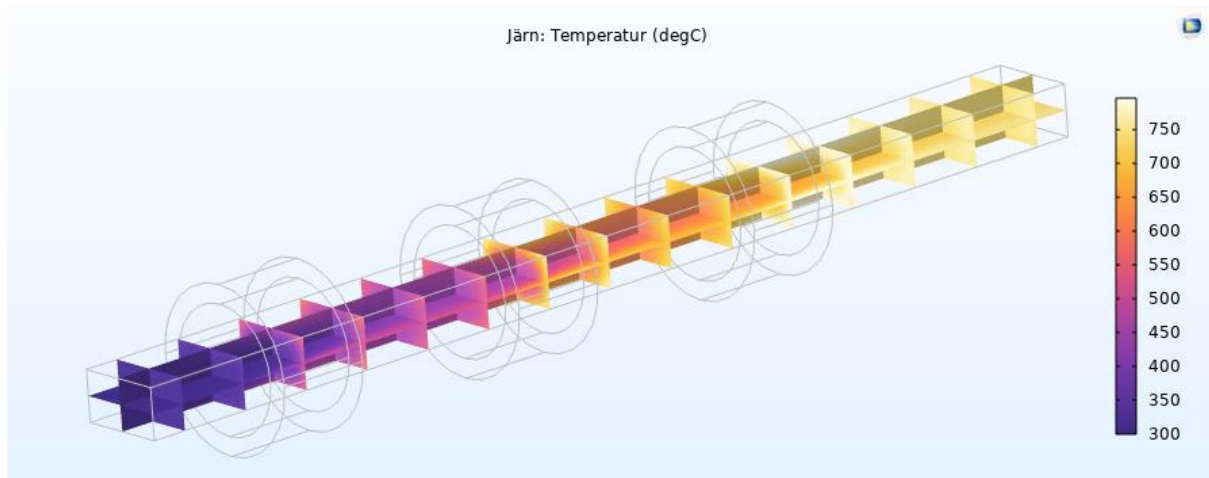


Ämnet mättas desto varmare det är och den relativa permeabiliteten är låg nära ytan där den magnetiska flödestätheten är hög.

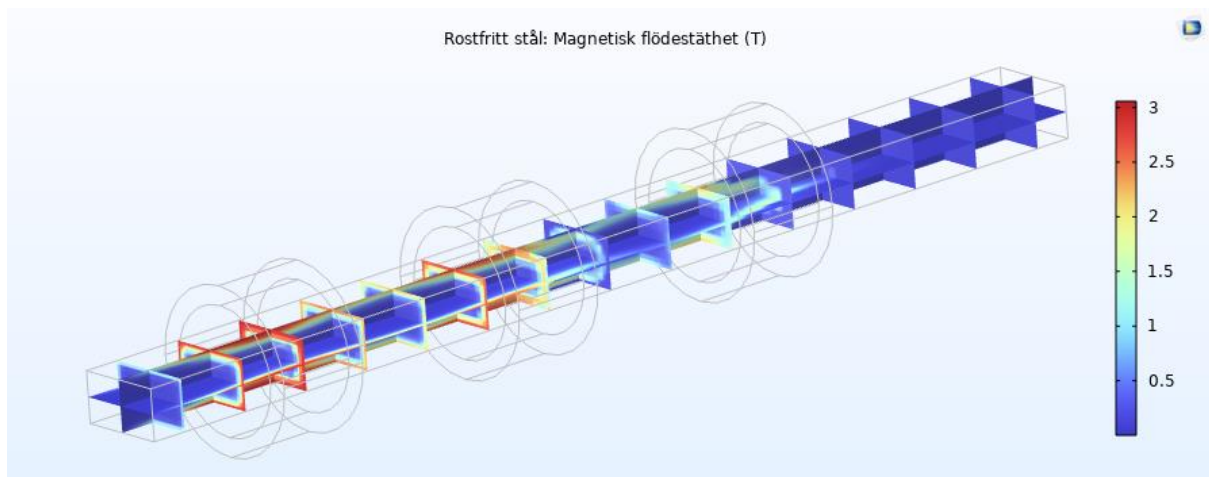
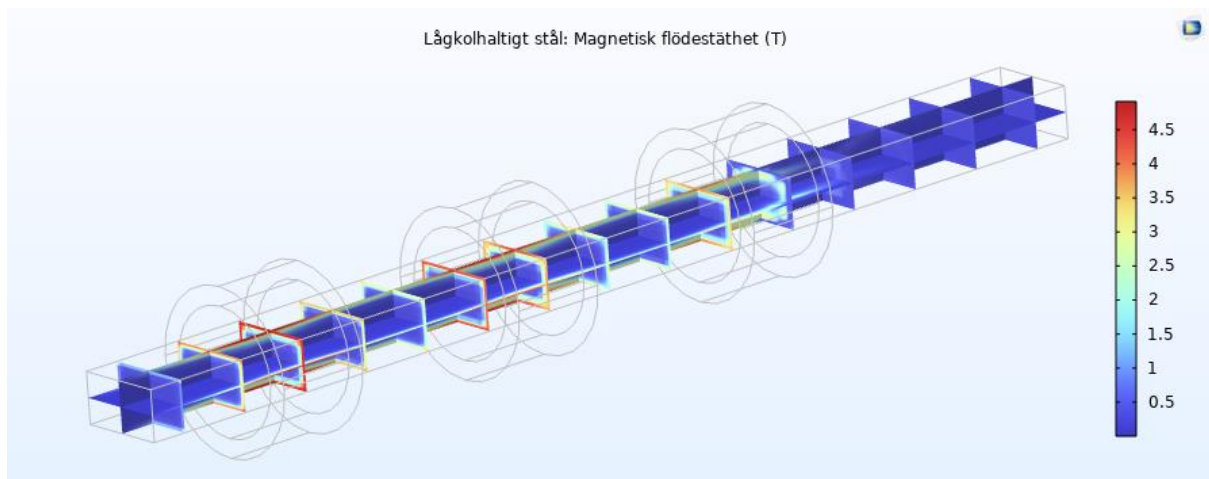
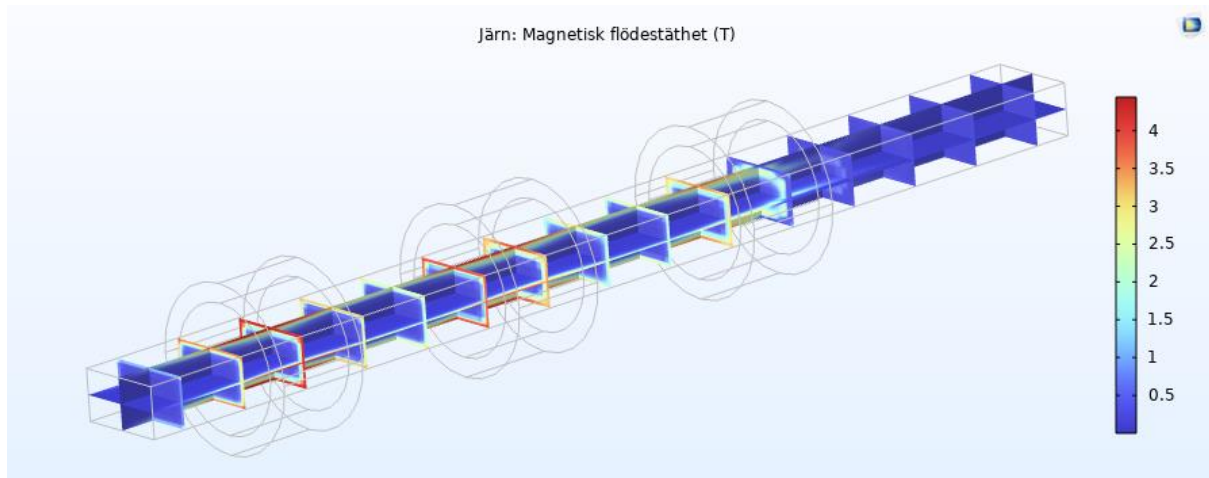




Temperaturen på ytan är strax över Curietemperaturen när ämnet går genom den tredje spolen, men för att värma den långt över Curietemperaturen behövs högre spoleffekt.

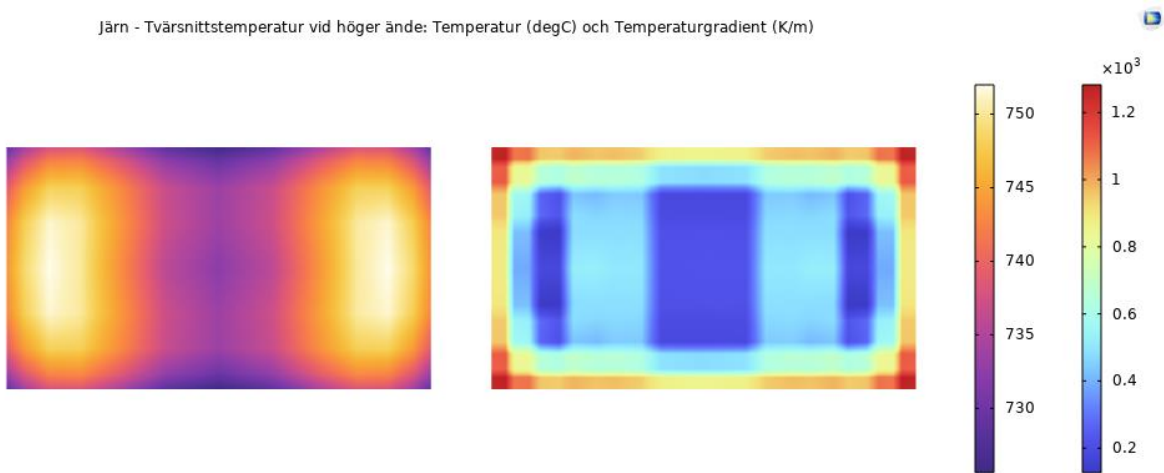


Den magnetiska flödestätheten minskar om temperaturberoende BH-kurvor inkluderas. Lösningen ser lite "skakig" ut, men det har ingen större inverkan på resultaten. En möjlig förbättring är att använda en finare mesh eller ickelinjära finita element, men då blir beräkningstiden längre.

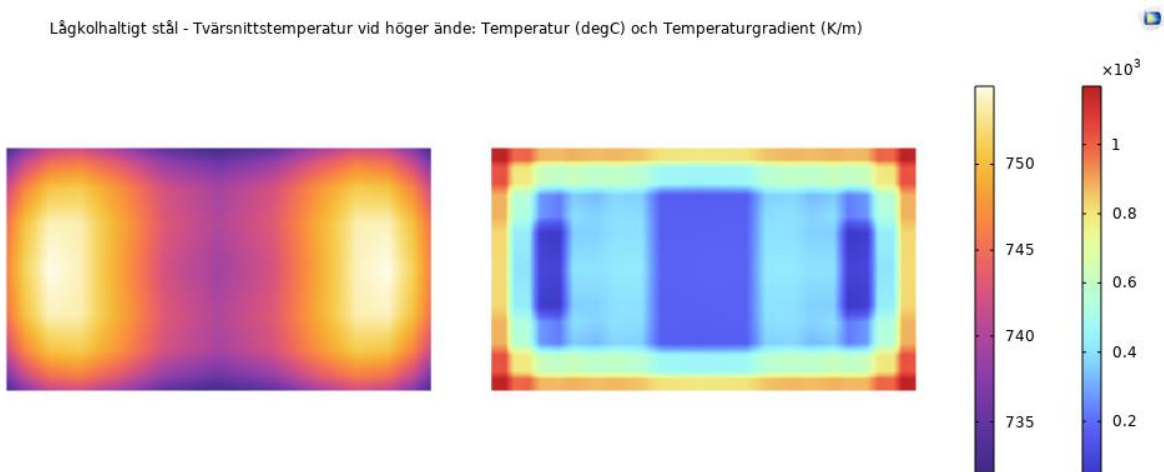


Temperaturen och temperaturgradient i tvärsnittet vid höger ände har ett helt annat utseende än fallet då enbart konstanta materialparametrar användes (se kapitlet "Konstanta materialparametrar" – "Resultat").

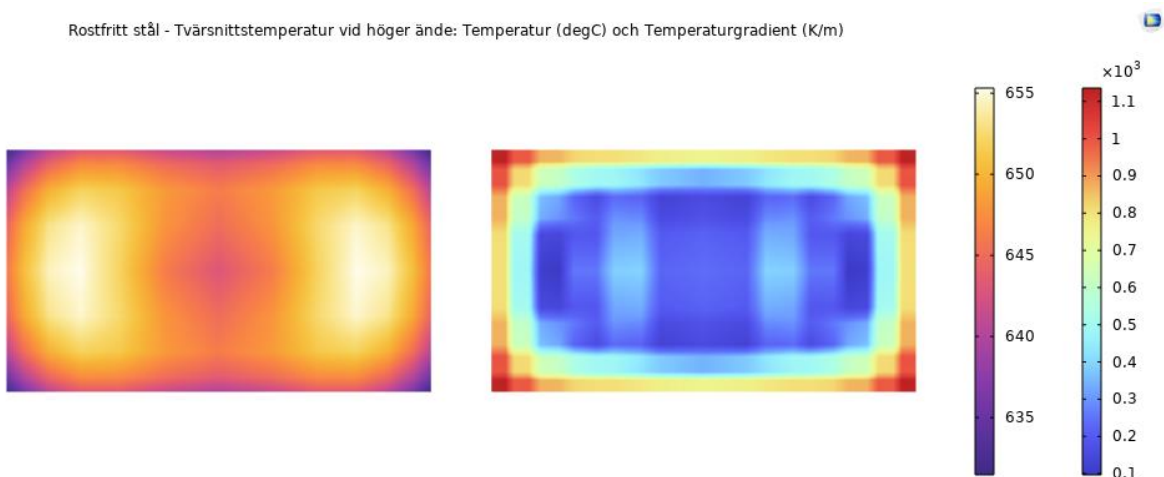
Järn - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Lågkolhaltigt stål - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Rostfritt stål - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



## Slutsatser

Om Curietemperaturen uppnås måste BH-kurvorna ta hänsyn till detta, då den relativa permeabiliteten ändras radikalt och förändrar den simulerade temperaturen.

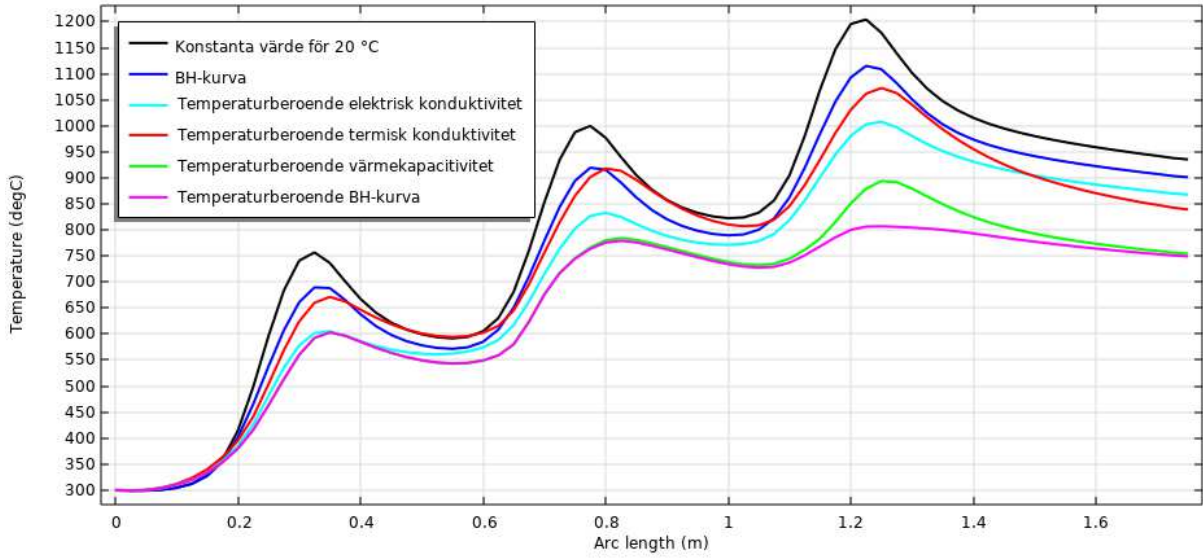
## Sammanfattning, temperaturberoende materialparametrar

De tre studerade materialen har väldigt temperaturberoende egenskaper som därför bör beaktas vid varje simulering, bortsett från densiteten som inte varierar speciellt mycket. Naturligtvis spelar de temperaturberoende egenskaperna mindre roll om temperaturdifferenserna är små, men så är ju sällan fallet vid induktionsuppvärmning.

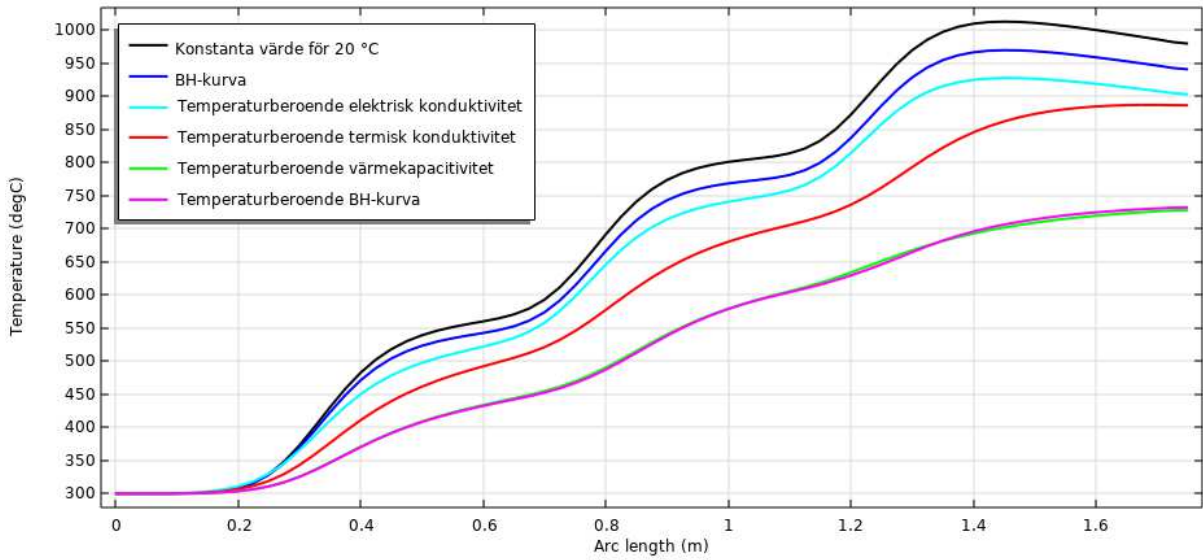
När den magnetiska flödestätheten i materialet är högt bör materialets BH-kurvor beaktas, då det har stor påverkan på den simulerade temperaturen. Om materialets Curietemperatur överskrids måste även detta inkluderas i simuleringarna. Då materialets egenskaper ändras drastiskt då curiepunkten nås, skapar detta svårigheter för numeriska lösare varför materialdata bör jämnas ut med lämpliga funktioner.

En bra jämförelse är att studera hur de olika materialbeskrivningarna påverkar temperaturen vid de tre valda linjerna som beskrevs i början av kapitlet. På följande sidor är den svarta grafen temperaturen längs den valda linjen när enbart konstanta materialdata används. För den blå grafen har BH-kurvan inkluderats. För den tredje färgen läggs temperaturberoende elektrisk konduktivitet till den föregående lösningen och så vidare.

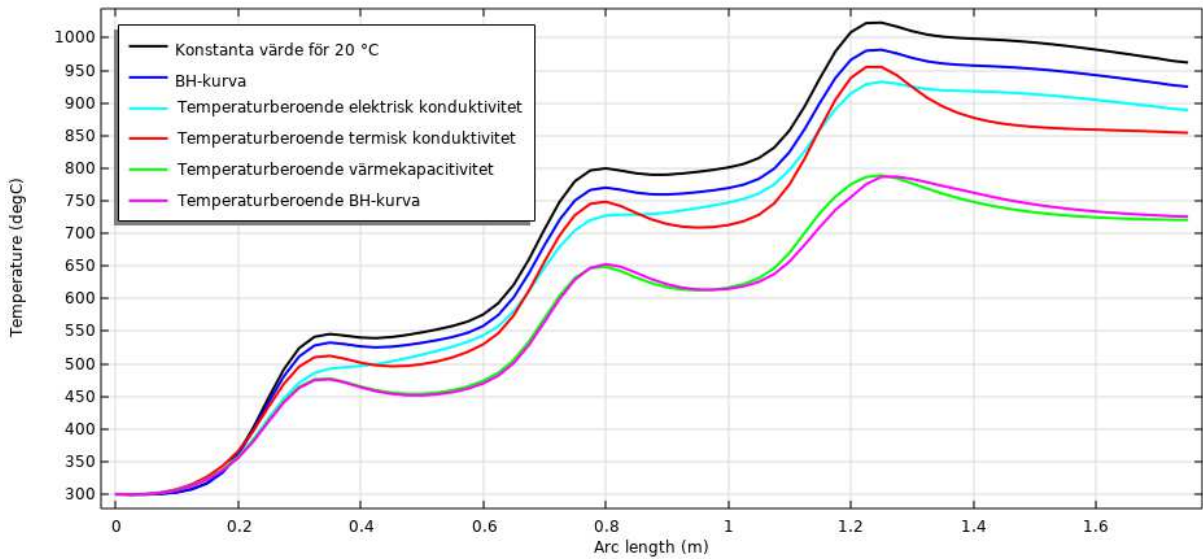
Järn: Temperatur längs hörn (degC)



Järn: Temperatur längs centrum (degC)

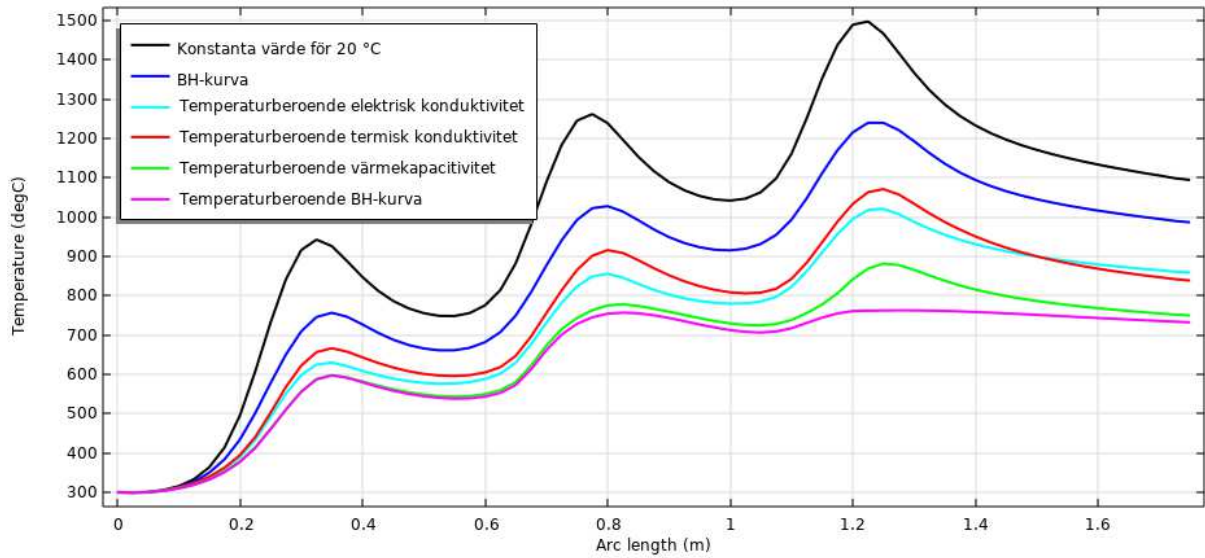


Järn: Temperatur längs ovsida (degC)

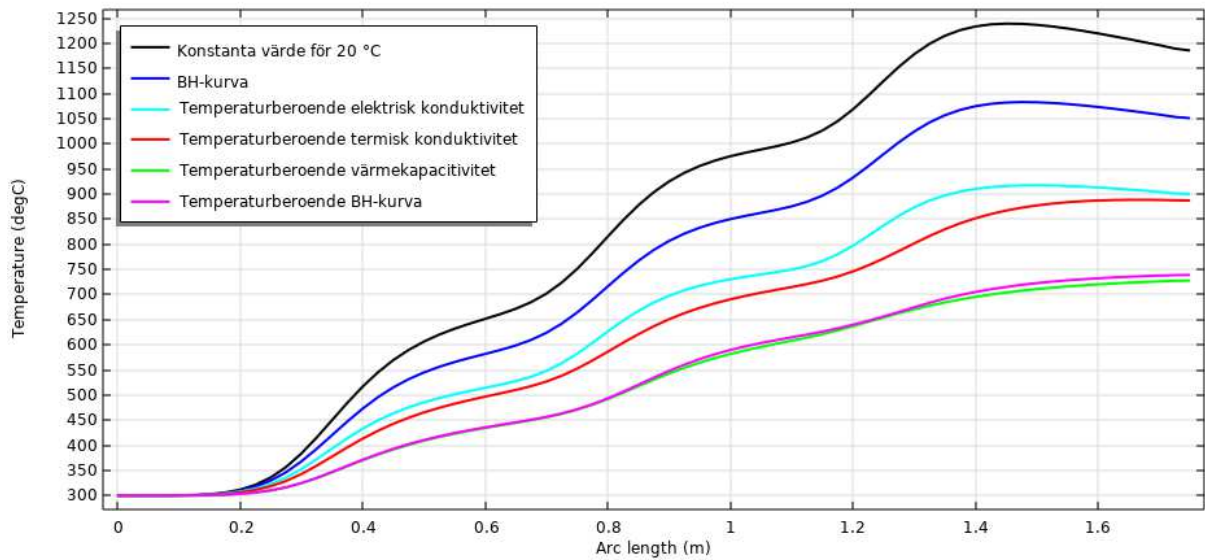




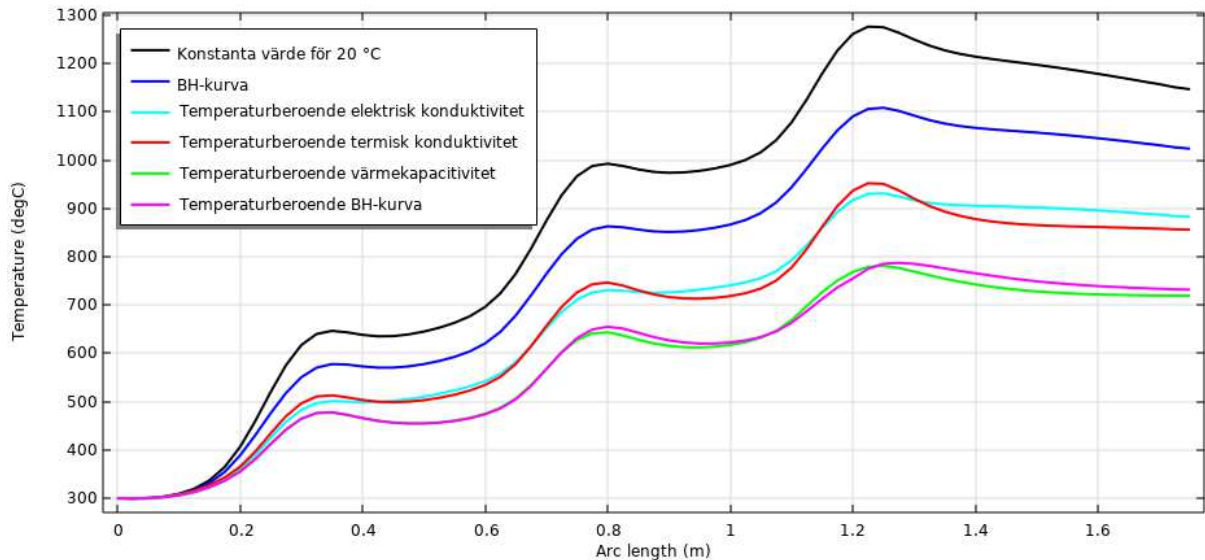
Lågkolhaltigt stål: Temperatur längs hörn (degC)



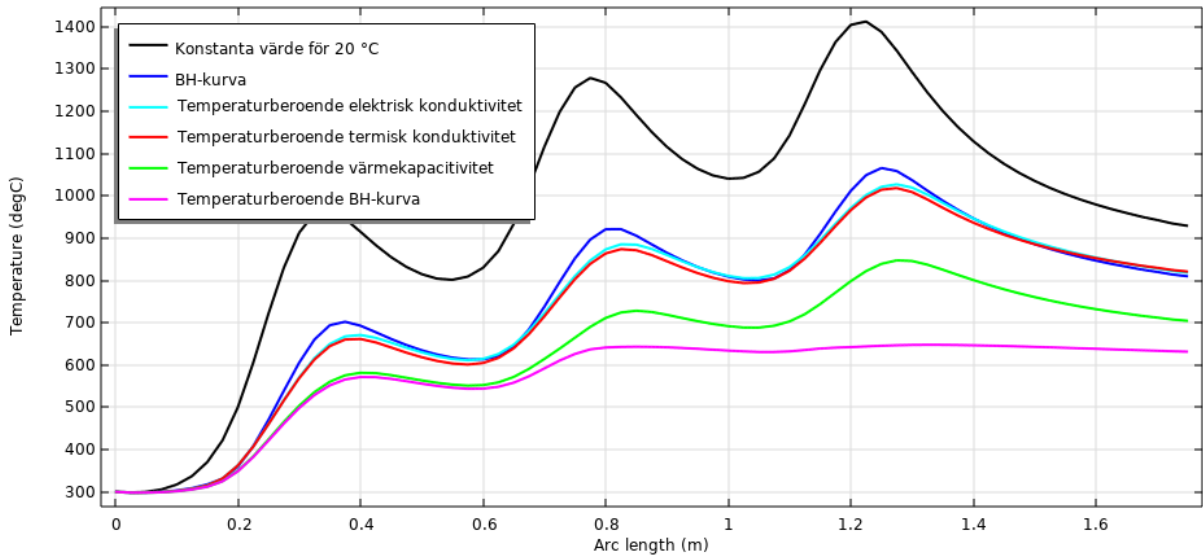
Lågkolhaltigt stål: Temperatur längs centrum (degC)



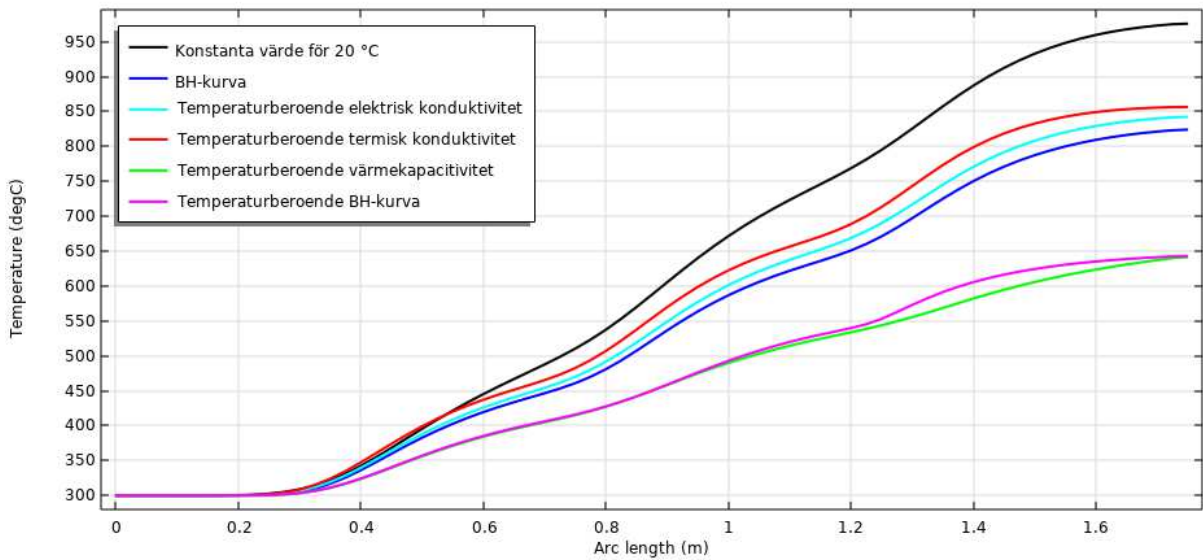
Lågkolhaltigt stål: Temperatur längs ovsida (degC)



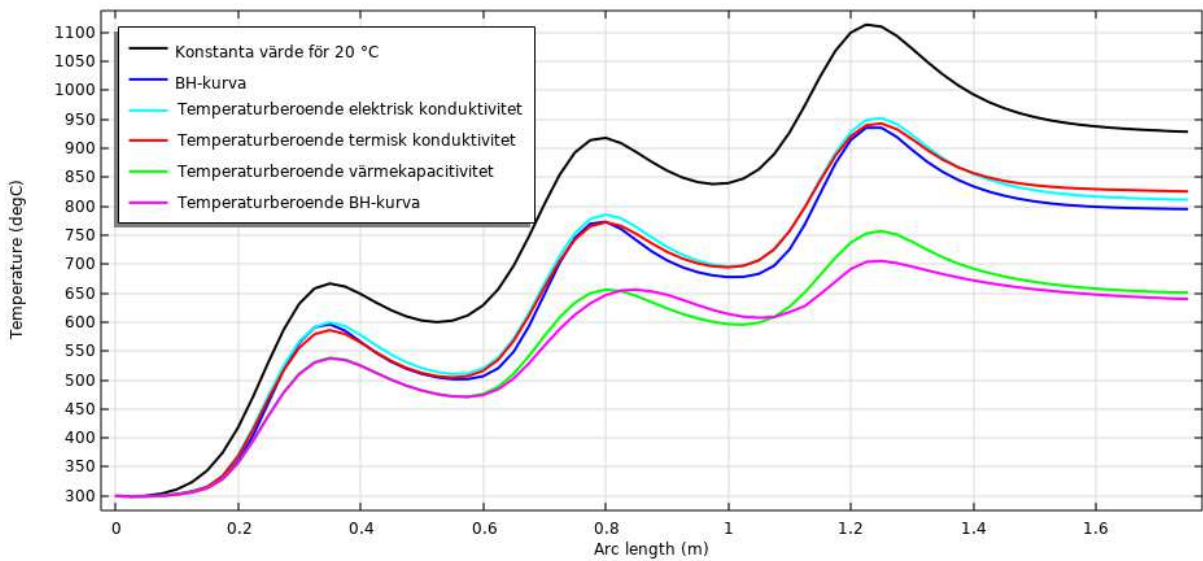
Rostfritt stål: Temperatur längs hörn (degC)



Rostfritt stål: Temperatur längs centrum (degC)

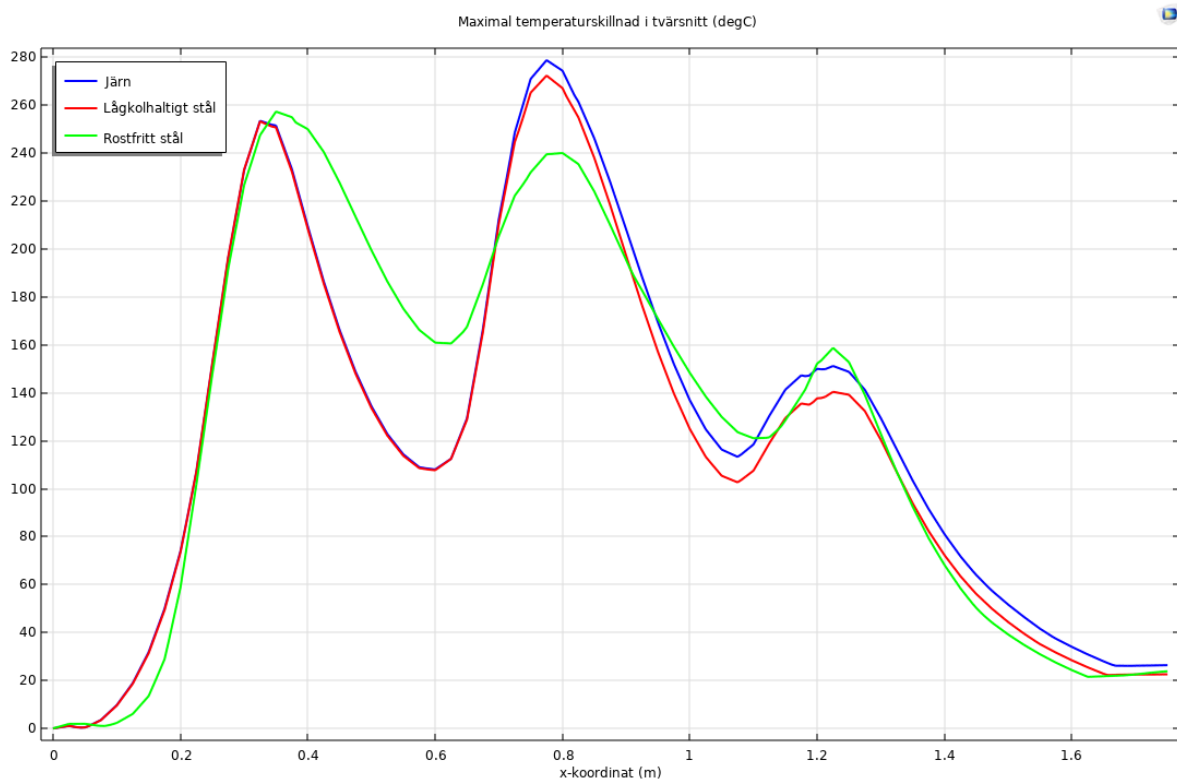


Rostfritt stål: Temperatur längs ovsida (degC)





En ytterligare jämförelse är att visualisera den maximala temperaturskillnaden i tvärsnittet längs med ämnet. Figuren nedan visar resultatet för de tre olika materialen för de sista simuleringarna där alla materialparametrar var temperaturberoende.



## Spolfrekvensens påverkan på temperaturen och simuleringen

Vid en låg frekvens på spolarna ökar den magnetiska flödestätheten vilket gör att användandet av BH-kurvor har stor inverkan på resultaten. Om en hög frekvens i stället används, så kan BH-kurvorna vara av mindre vikt, men detta beror naturligtvis på många andra parametrar. Därför bör den aktuella magnetiska flödestätheten studeras innan användaren väljer att använda BH-kurvor eller inte.

Det så kallade inträngningsdjupet beskrivs med:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}}$$

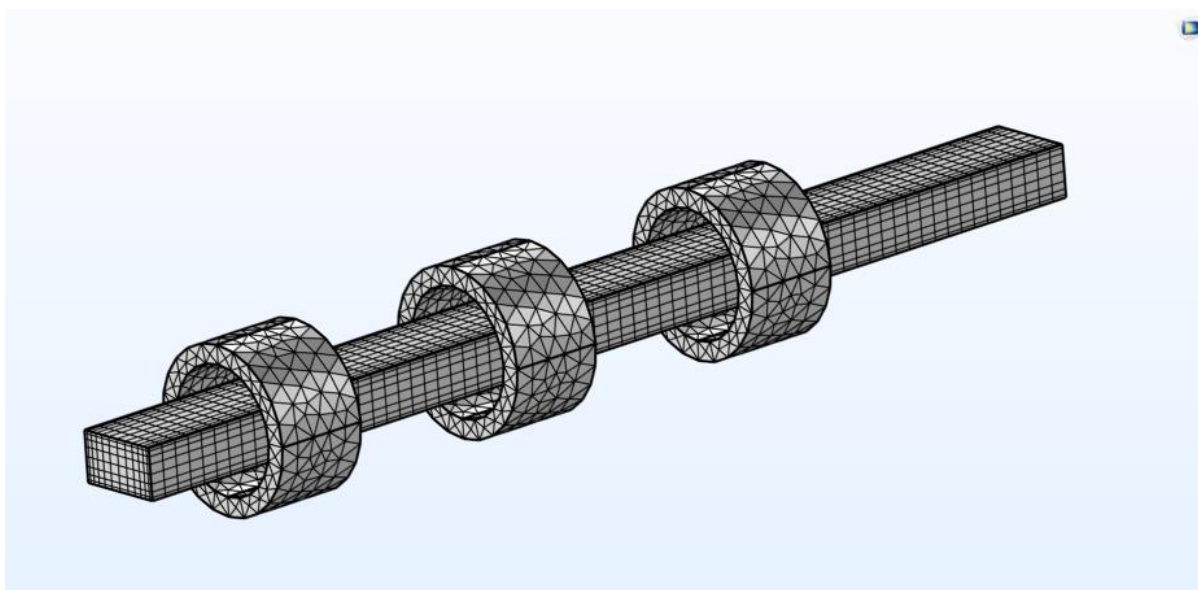
där  $f$  är frekvensen och  $\sigma$  är den elektriska konduktiviteten.

Tabellen nedan innehåller inträngningsdjupet för ett material med  $\mu_r = 1$  och  $\sigma = 1 \cdot 10^7$  för olika frekvenser.

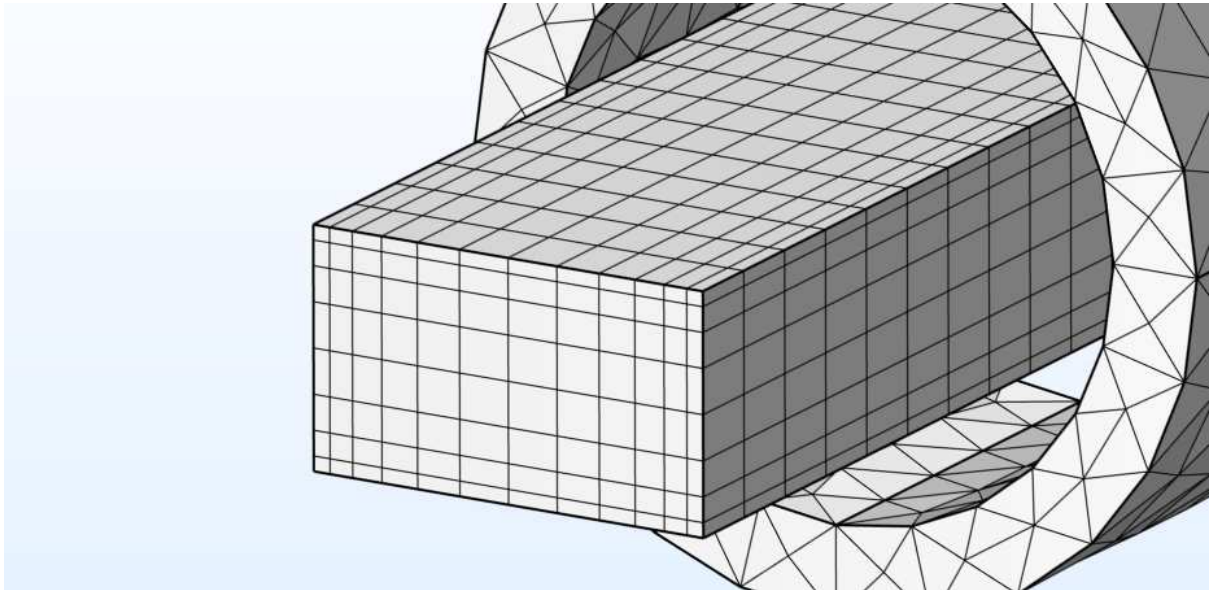
Frekvens, $f$ [Hz]	Inträngningsdjup [mm]
50	23
100	16
200	11
400	8

Detta innebär att all ström koncentreras till ett område med tjockleken  $\delta$  kring ämnet som då värms upp mer vid ytan än inuti materialet. Så enkelt sammanfattat värms ämnet mer på ytan vid en högre frekvens än en lägre.

För att lösa upp strömmarna vid ytan brukar man generellt säga att det finita elementnätet bör ha en storlek som är i närheten eller mindre än inträngningsdjupet. Ju finare nätet är, desto bättre blir upplösningen och noggrannheten. Tyvärr kräver ett fint nät mer beräkningskraft och det tar längre tid att lösa problemet. För den tidigare studerade modellen som använde frekvensen 100 Hz har följande mesh använts. Notera att luftdomänen är gömd för att kunna åskådliggöra meshen i ämnet och i spolarna.



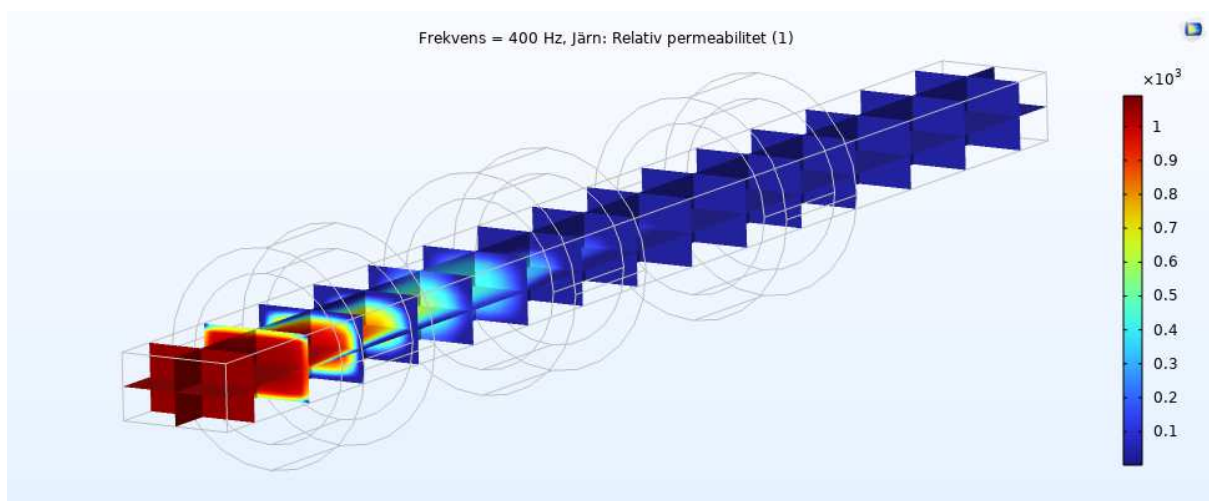
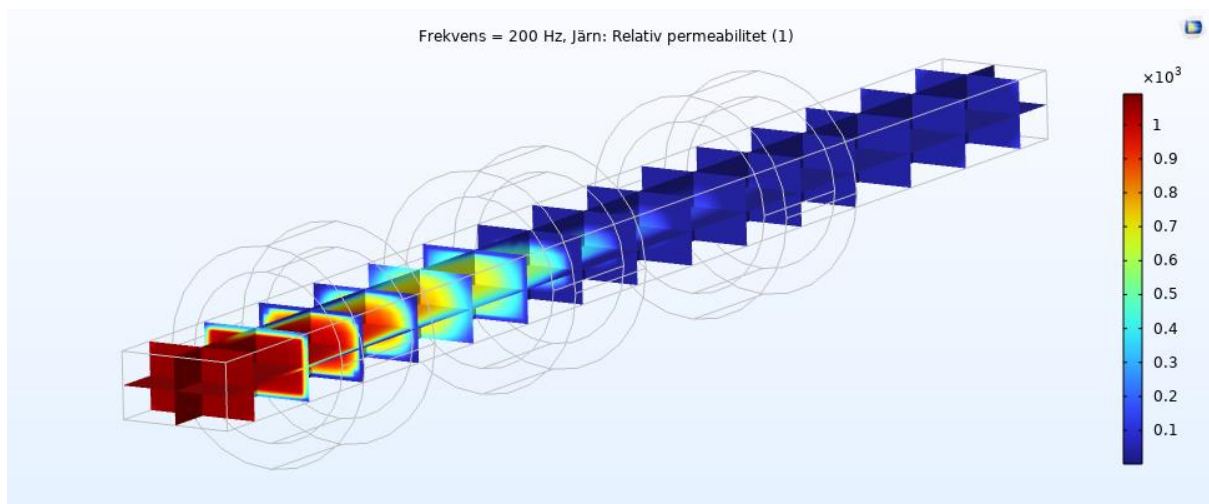
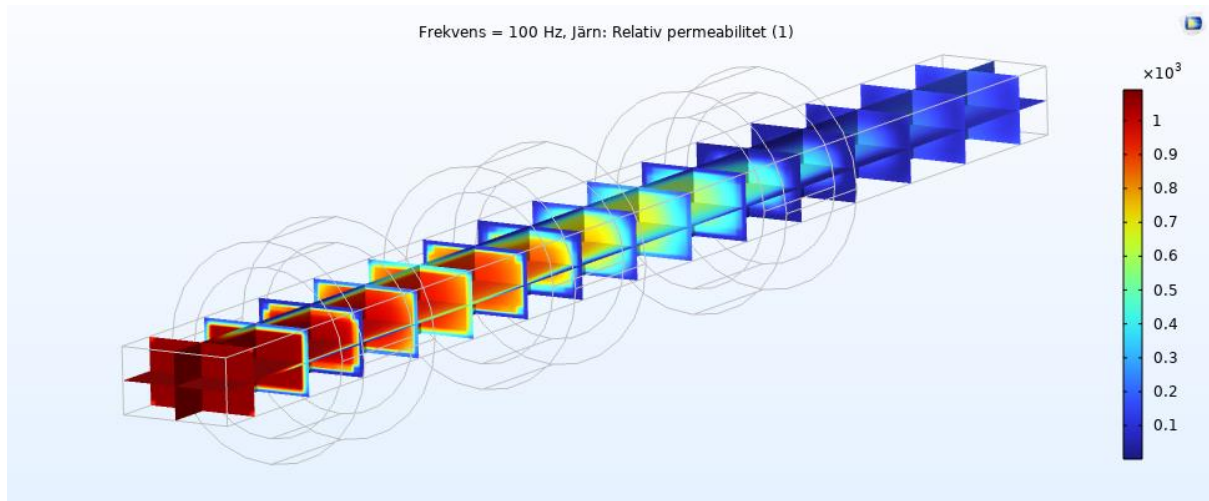
Meshen är finare längs kanterna och består av 12 element i bredden och 8 element i höjded och den växer från ytan och inåt. Elementet vid ytan är ~5 mm.



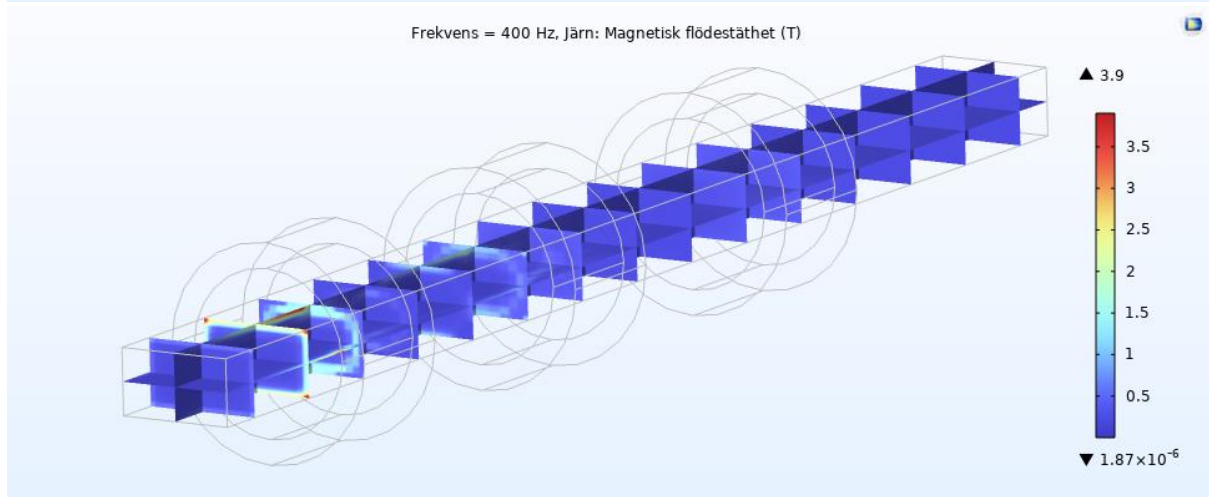
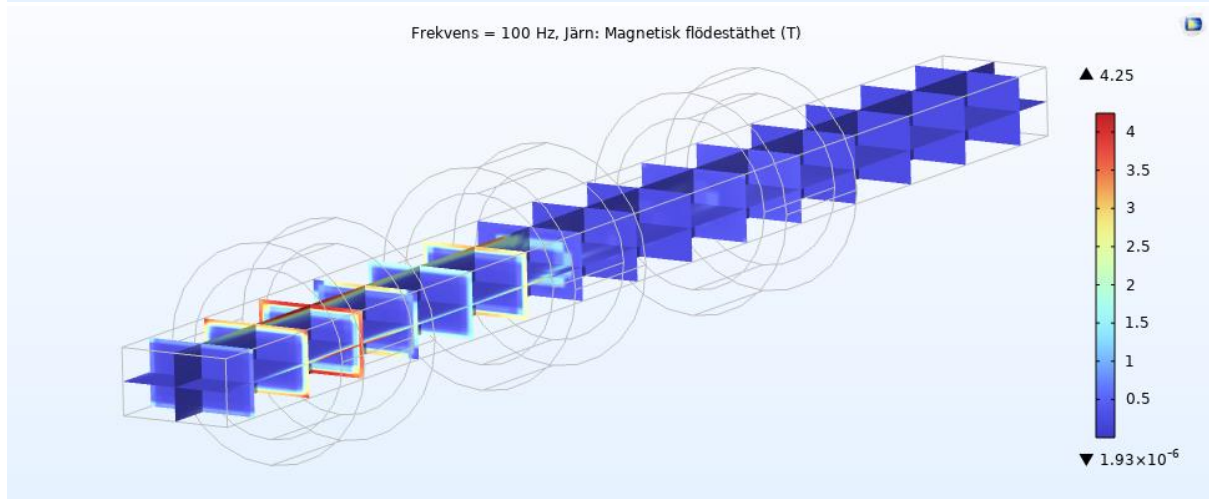
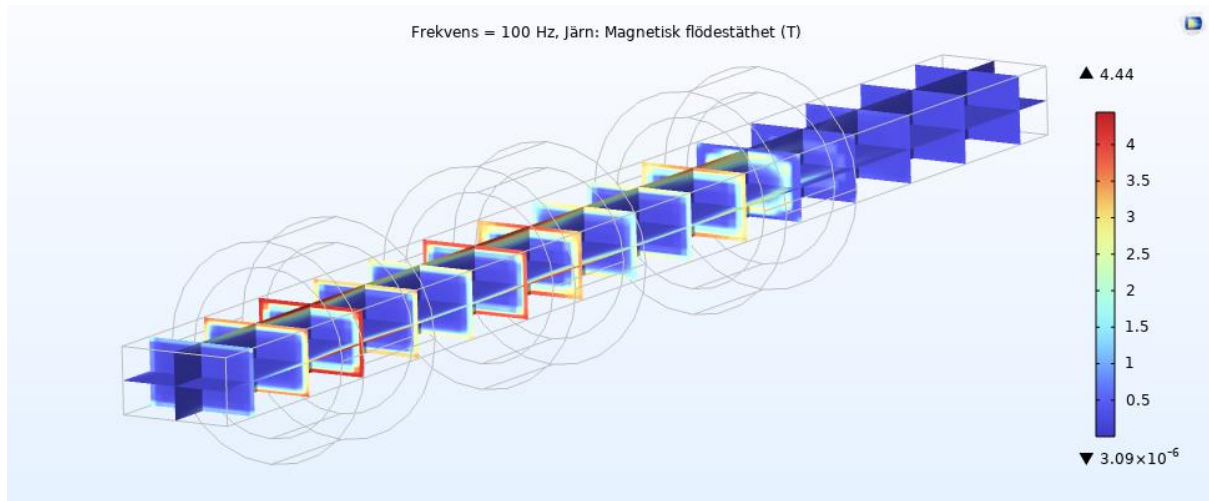
Eftersom den relativa permeabiliteten i ämnet varierar kraftigt, så är det svårt att veta exakt vilken meshstorlek som bör användas och därför bör en meshkonvergensstudie utföras för att kontrollera resultaten. Detta kommer att beskrivas något senare.

För att studera hur ämnets materialegenskaper och slutligen temperaturen påverkas av spolfrekvensen så används samma modell som tidigare, men endast järn studeras. Samtliga parametrar inklusive BH-kurvan är beroende av temperaturen. Frekvenserna som jämförs är 100 Hz (samma som i tidigare modell), 200 Hz och 400 Hz.

I figurerna nedan visas den relativa permeabiliteten för de olika frekvenserna. På ytorna mäts järnet redan vid den första spolen. Vid en högre frekvens mäts järnet tidigare och är i princip helt mättat när det når den tredje spolen.

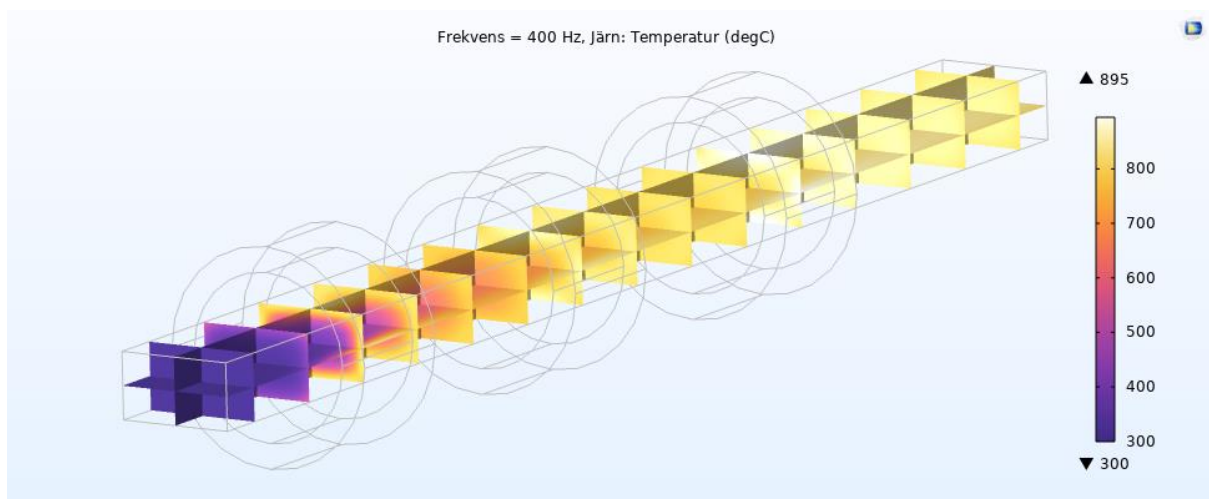
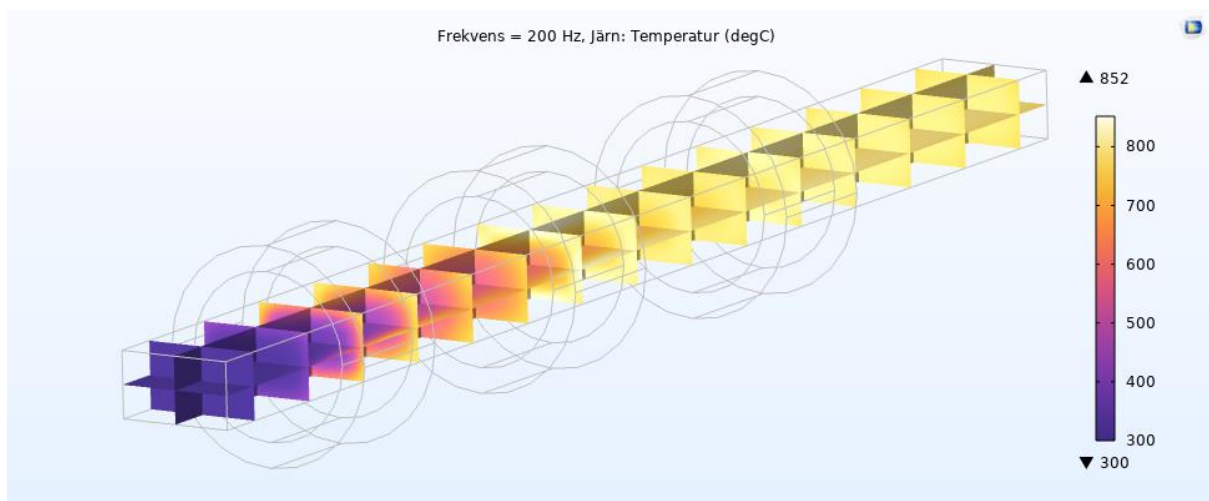
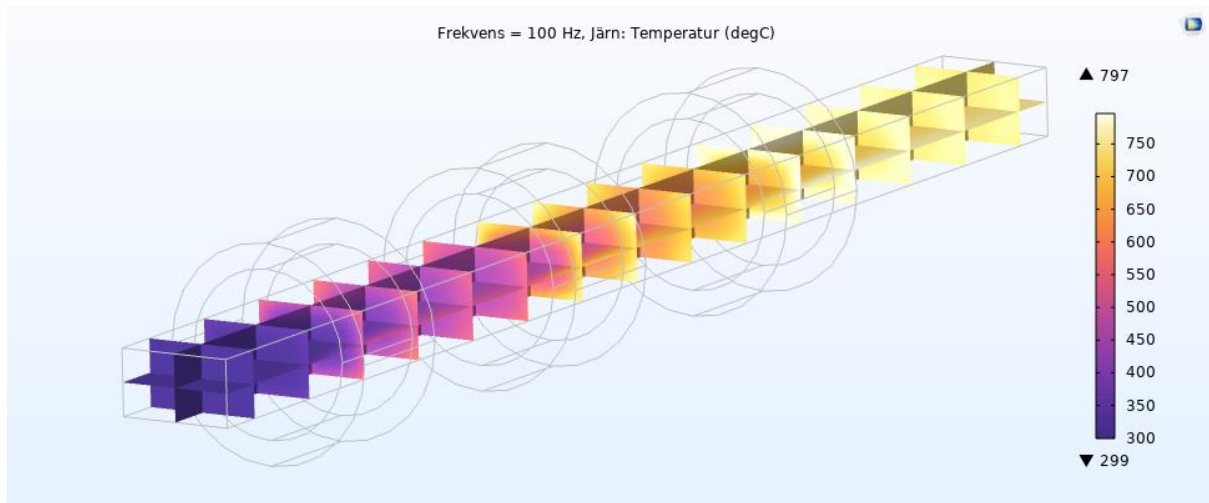


Figurerna nedan visar den magnetiska flödestätheten vid de olika frekvenserna. Koncentration av en hög magnetisk flödestäthet på ytan är relativt utspridd längs ämnets längd när frekvensen är 100 Hz, men för en högre frekvens är den endast koncentrerad kring den första spolen.

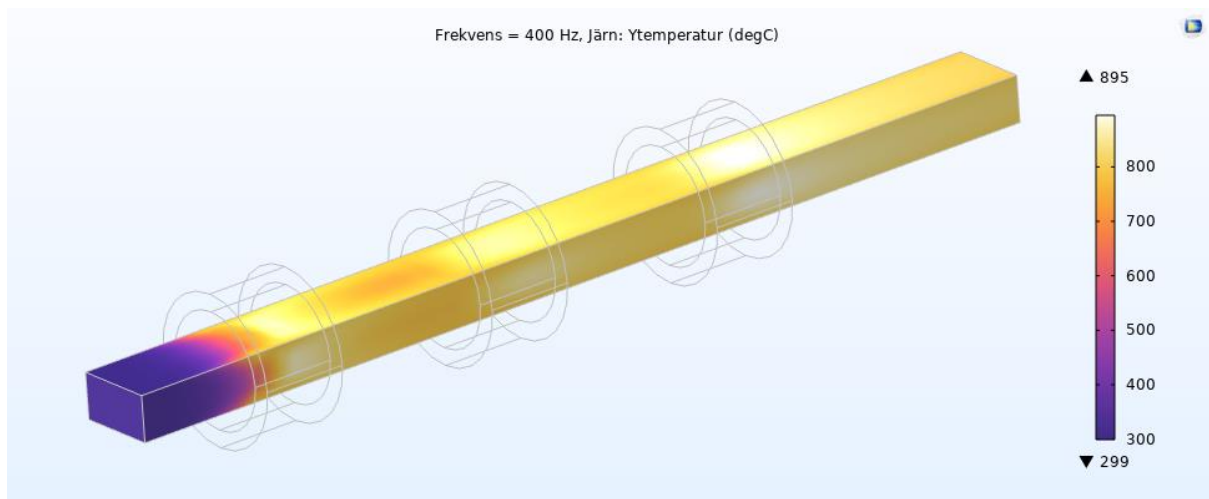
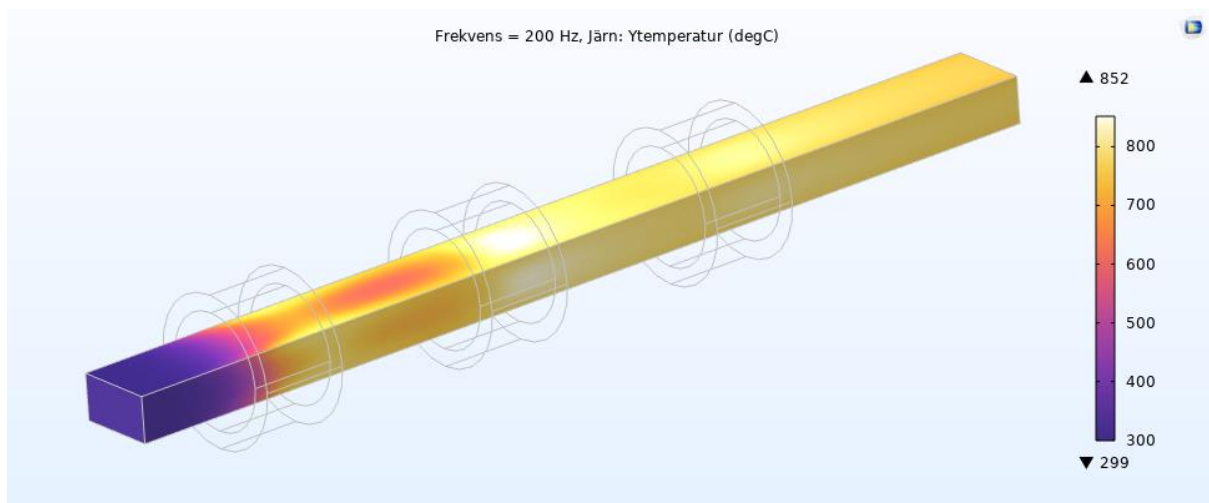
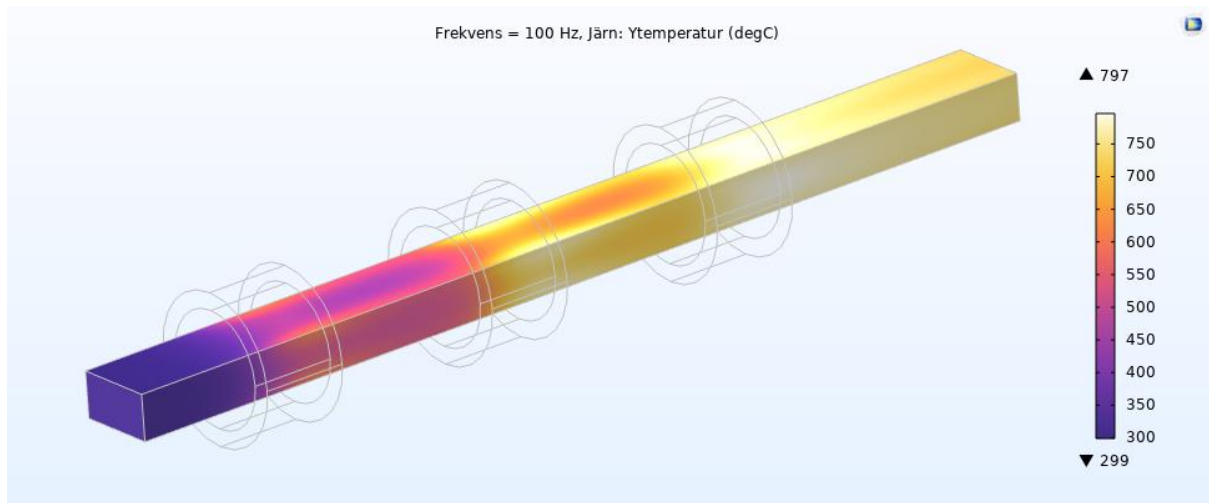




Figurerna nedan visar temperaturen för de olika frekvenserna. Temperaturen ökar snabbare med en hög frekvens och maxtemperaturen ökar också.



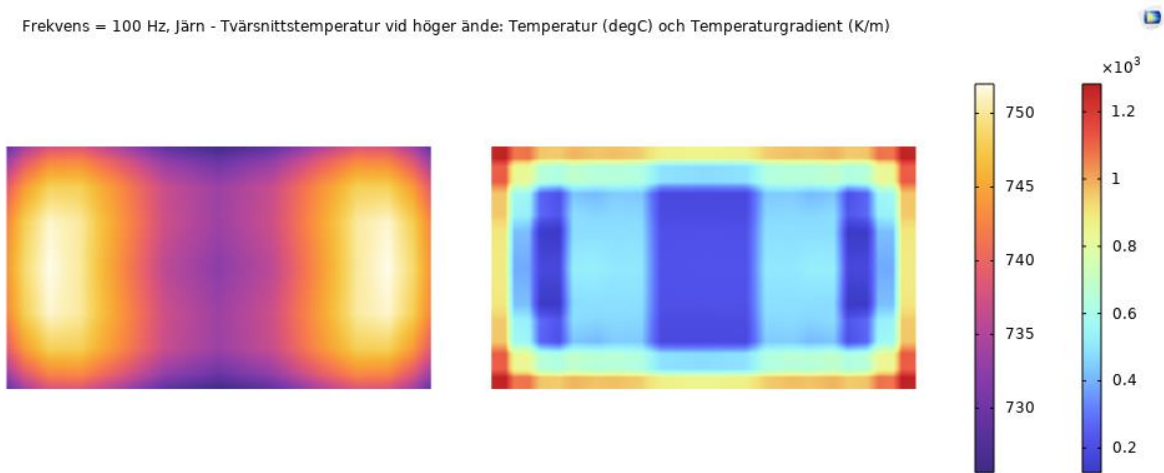
Figurerna nedan visar yttemperaturerna vid de olika frekvenserna. När frekvensen är 400 Hz når ytan i princip maxtemperatur redan vid den första spolen.



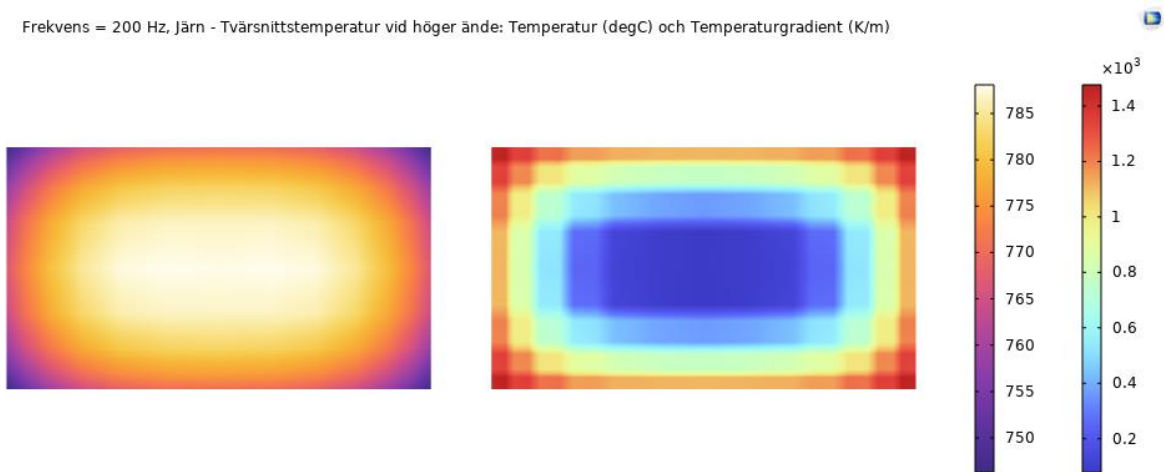


Figurerna nedan visar temperaturen och temperaturgradienterna i tvärsnittet i den högra ändan vid olika frekvenser. Temperaturgradienterna ökar när frekvensen ökar då ämnet värms mer vid ytan.

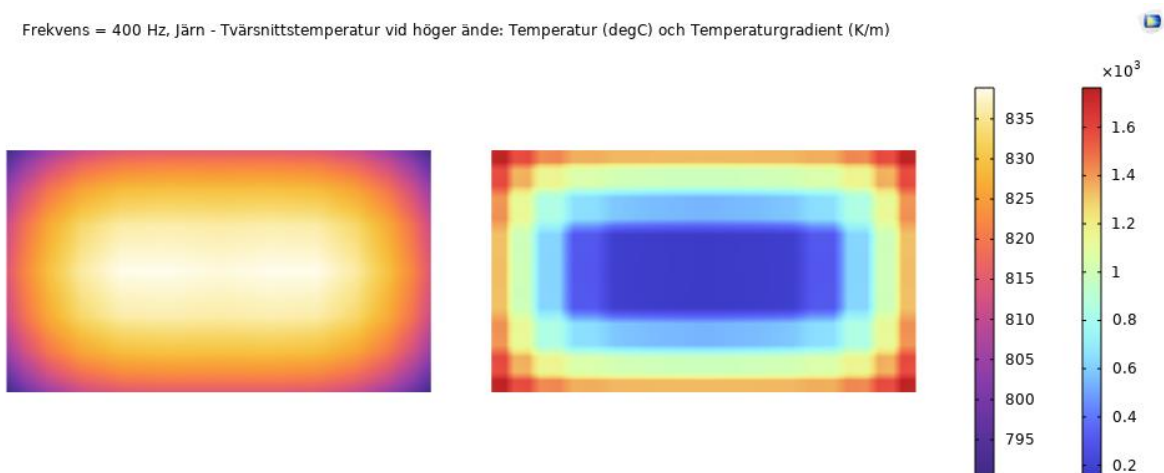
Frekvens = 100 Hz, Järn - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



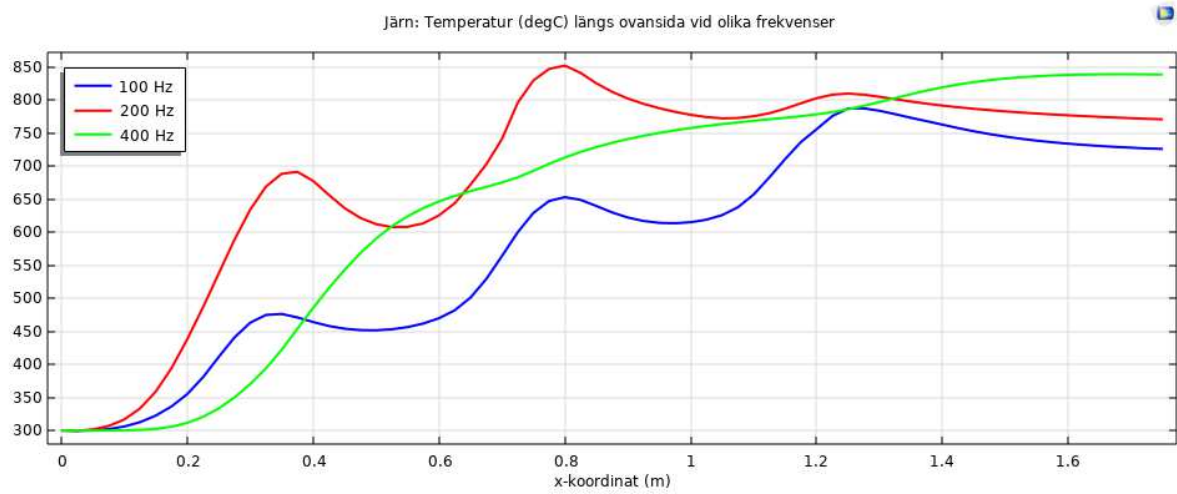
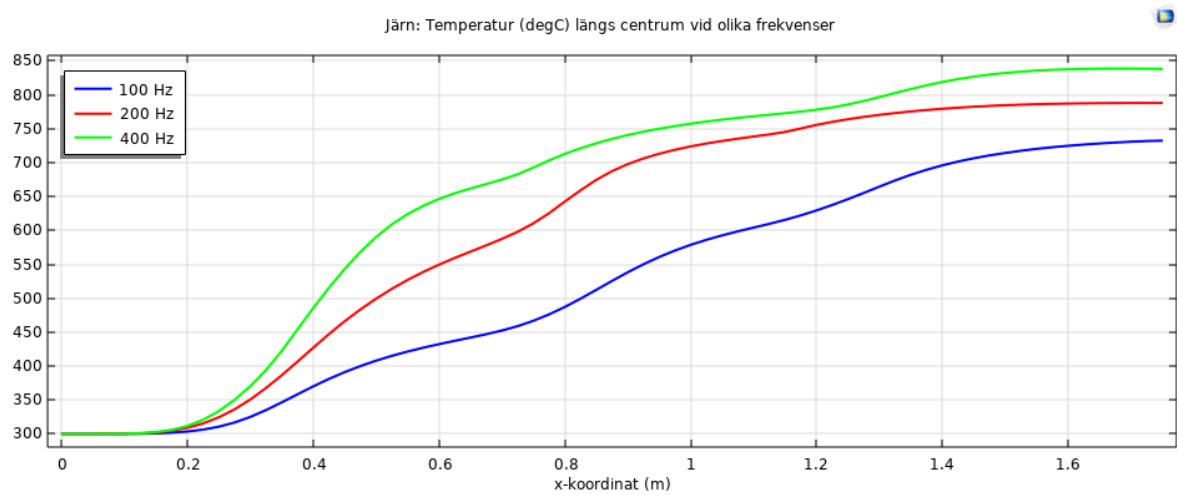
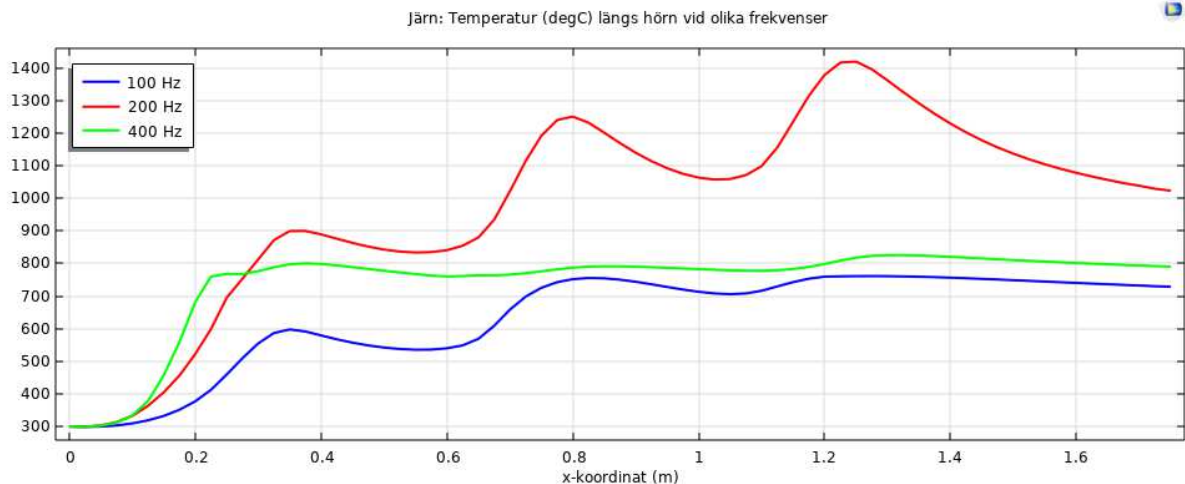
Frekvens = 200 Hz, Järn - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Frekvens = 400 Hz, Järn - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Figurerna nedan visar hur temperaturen i hörnet, på ovansidan och i centrum påverkas av de olika frekvenserna. Från den första grafen är det uppenbart att hörnen blir fullständigt mättade redan vid den första spolen för frekvensen 400 Hz och att temperaturen i princip når ett maxvärde då. Hörnet har högst temperatur när frekvensen är 200 Hz. Den andra grafen visar att temperaturen i centrum av ämnet blir som varmast vid den högsta frekvensen. Den tredje grafen visar att temperaturen på ovansidan inte påverkas lika mycket vid genomgången av spolarna då temperaturen växer stadigt utan toppar och dalar.



Tabellen nedan visar de numeriska värden vid de olika frekvenserna. Verkningsgraden blir högre vid en hög frekvens, men de oönskade temperaturgradienterna ökar.

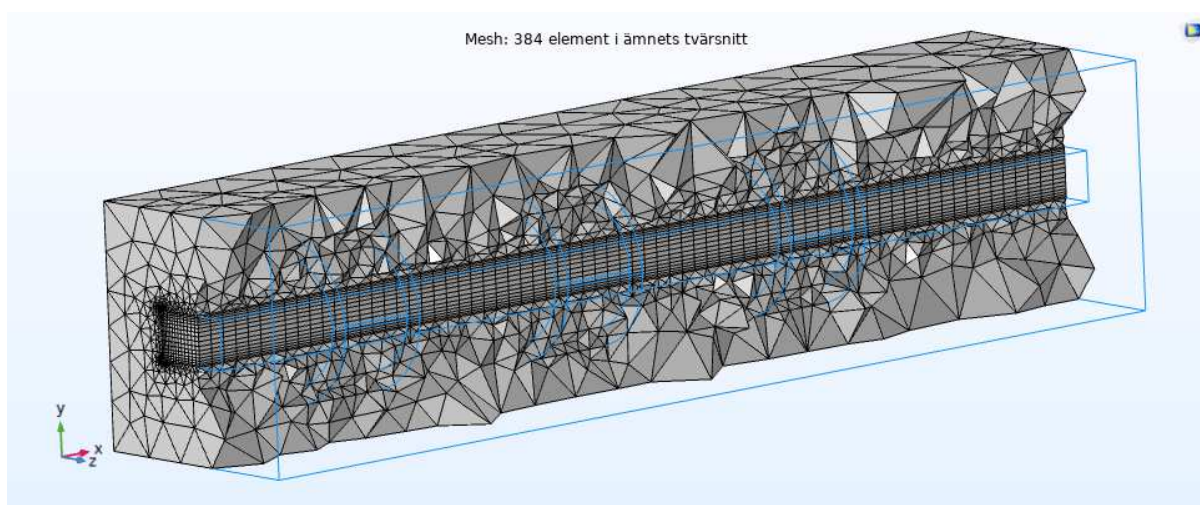
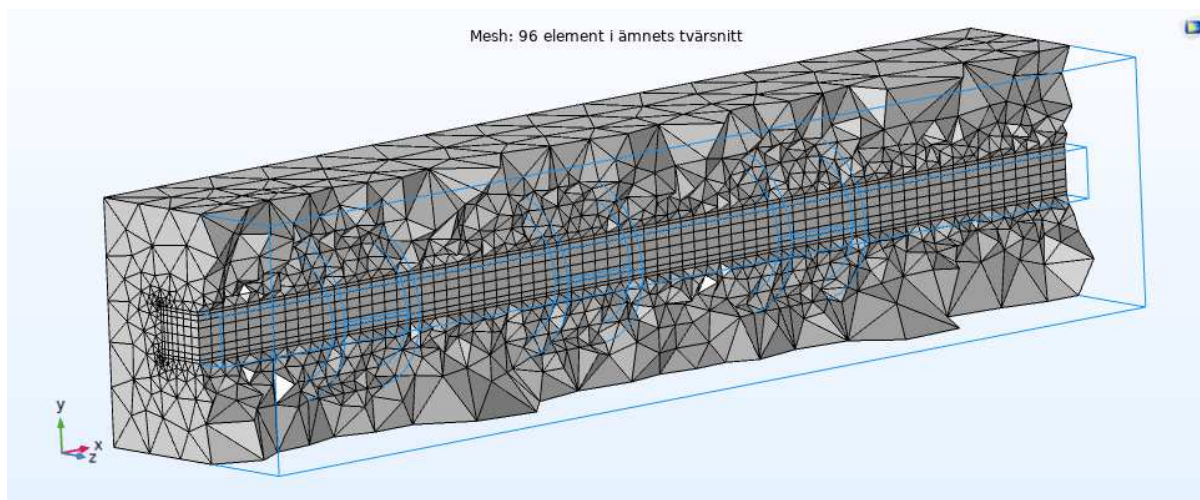
	<b>100 Hz</b>	<b>200 Hz</b>	<b>400 Hz</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	852	941	991
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1070	1125	1168
<b>Spoleffekt [kW]</b>	151	178	203
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	137	163	190
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.0	92.3	93.4

Spolarna matas med en ström och därav är spoleffekten olika för de olika frekvenserna. Det är värt att notera att de tre spolarna har satts till att vara exakt likadana. Det är naturligtvis möjligt att variera de individuella spolarnas effekt och frekvens för att optimera uppvärmningen, men detta behandlas inte i denna rapport.

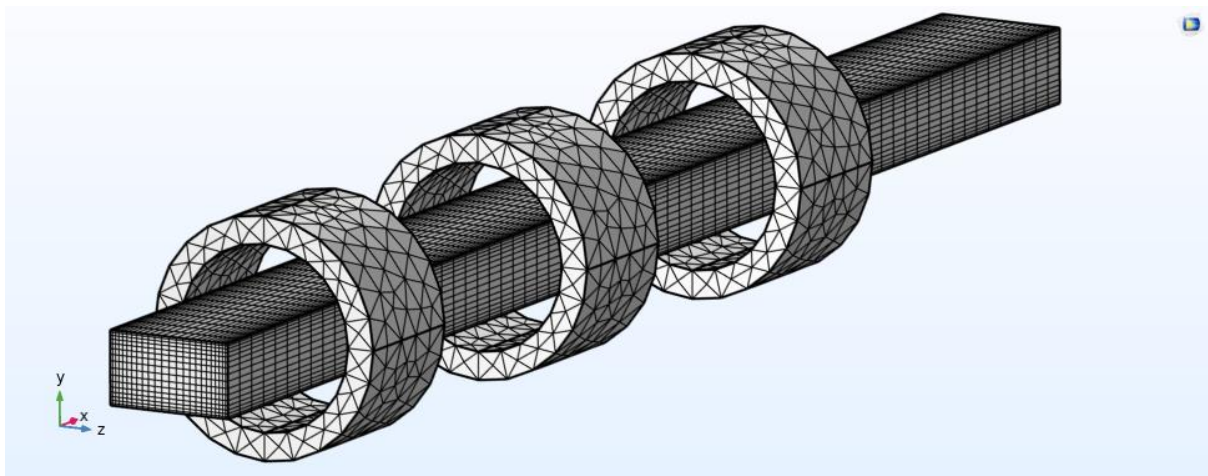
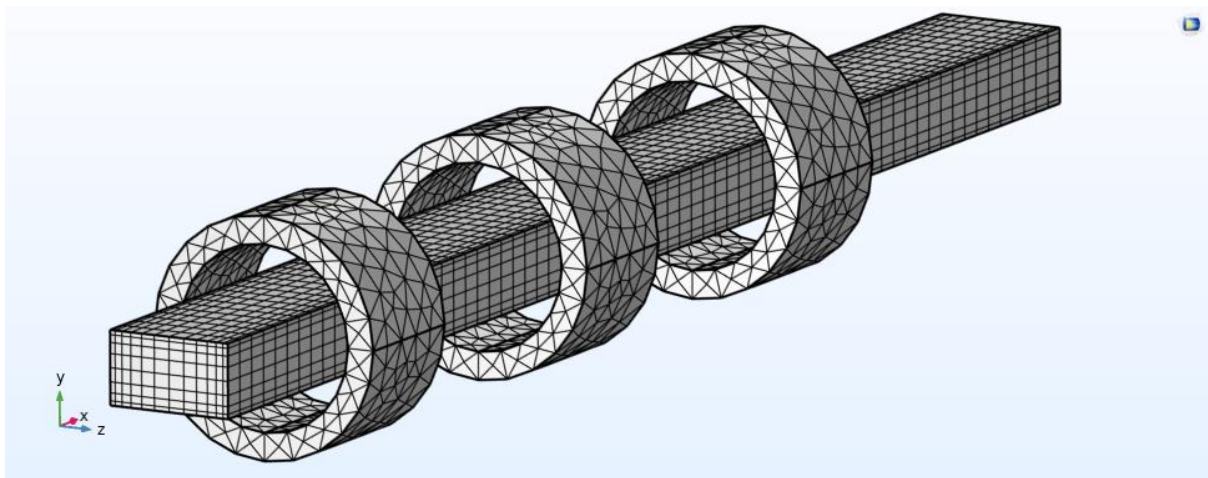
## Meshkonvergenstudie

COMSOL Multiphysics använder finita elementmetoden och lösningarna är därför beroende av hur fint elementnät (mesh) som används. Ett fint nät ger noggrannare resultat, men kräver mer beräkningskraft. Att simulera induktionsuppvärmning med temperaturberoende materialparametrar är tidskrävande eftersom problemet är extremt icke linjärt. Därför används gärna så få element som möjligt i beräkningen för att få resultat så snabbt som möjligt, men det får inte vara till bekostnad av noggrannheten. Som tidigare beskrivits är inträngningsdjupet beroende på materialets relativa permeabilitet som kan variera kraftigt i olika delar av ämnet. Storleken på meshen är i sin tur beroende av inträngningsdjupet samt många andra parametrar. Så i slutändan är det inte lätt att redan innan simuleringens början veta vilken mesh som krävs, även för en expert på området. Därför är det vanligt att göra en så kallad meshkonvergenstudie där två eller fler lösningar jämförs mot varandra när olika meshstorlekar testas.

Två olika meshar har jämförts och meshstorleken i ämnet har varierats, men eftersom luften även är med i den elektromagnetiska beräkningen har antalet element automatiskt ändrats där också. Den första meshen har totalt 60 000 element och den andra har 94 000 element, men det är fyra gånger så många element i ämnet i den finare meshen. Antalet element i x-led i ämnet är samma för båda mesharna. Figurerna nedan visar mesharna för de två studerade fallen.



Figurerna nedan visar de olika mesharna när luftdomänen är gömd. Den första meshen har 12x8 element i ämnets tvärsnitt och den finare meshen har 24x16 element i tvärsnittet.



Resultaten från de olika simuleringarna presenteras i tabellerna nedan. Baserat på resultaten ser vi att värdena ändras väldigt lite i förhållande till de olika mesharna och modellen innehåller många andra felkällor som har större påverkan på resultatet än meshen.

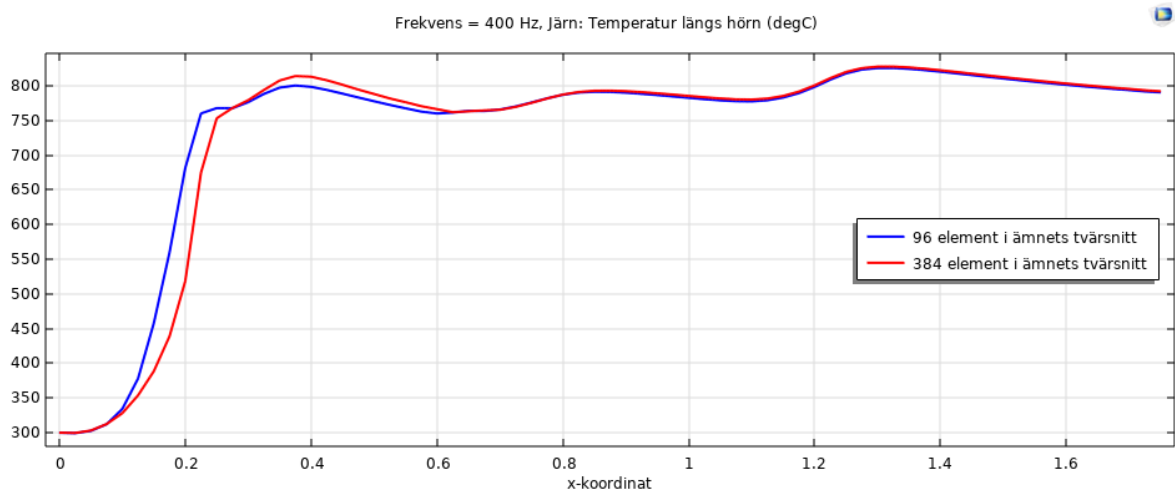
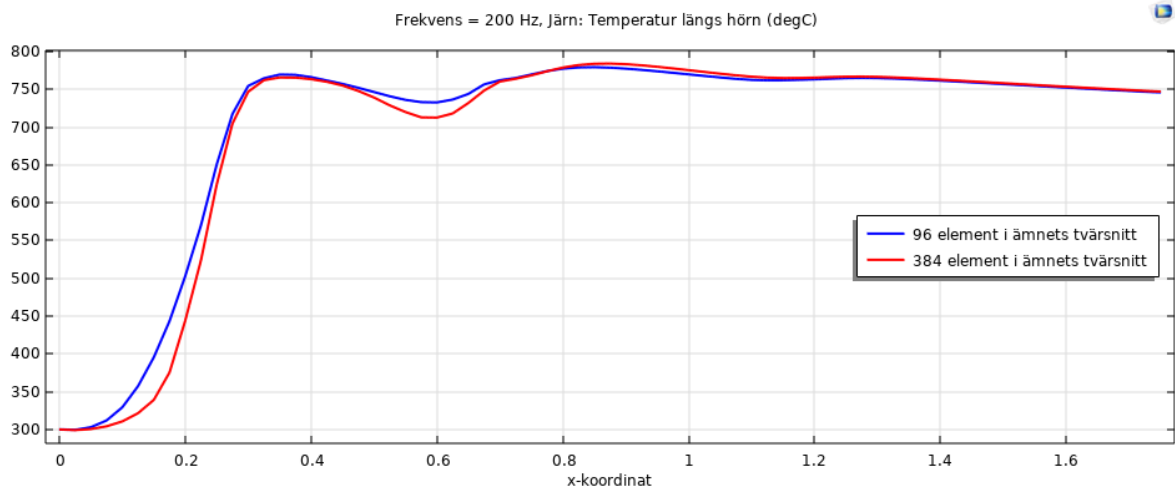
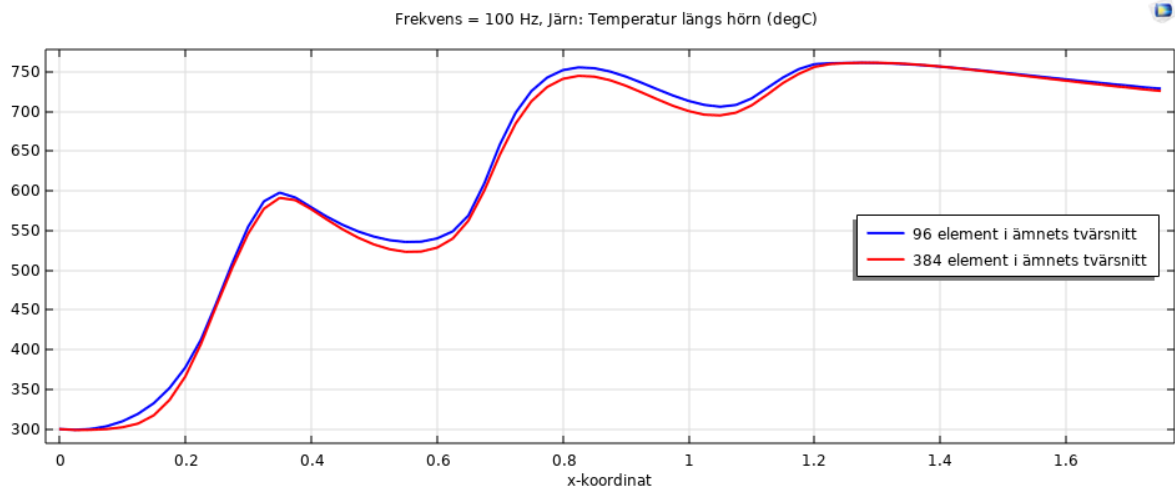
<b>Frekvens = 100 Hz</b>	<b>96 element i tvärsnitt</b>	<b>384 element i tvärsnitt</b>	<b>Differens %</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	852	846	0.7
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1070	1070	0
<b>Spoleffekt [kW]</b>	151	149	~ 0
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	137	135	~ 0
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.0	90.8	~ 0

<b>Frekvens = 200 Hz</b>	<b>96 element i tvärsnitt</b>	<b>384 element i tvärsnitt</b>	<b>Differens %</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	941	934	0.7
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1125	1130	0.4
<b>Spoleffekt [kW]</b>	178	177	~ 0
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	163	163	~ 0
<b>Verkningsgrad [%]</b>	92.3	92.3	~ 0

<b>Frekvens = 400 Hz</b>	<b>96 element i tvärsnitt</b>	<b>384 element i tvärsnitt</b>	<b>Differens %</b>
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	991	987	0.4
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1168	1173	0.4
<b>Spoleffekt [kW]</b>	203	204	~ 0
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	190	191	~ 0
<b>Verkningsgrad [%]</b>	93.4	93.4	~ 0

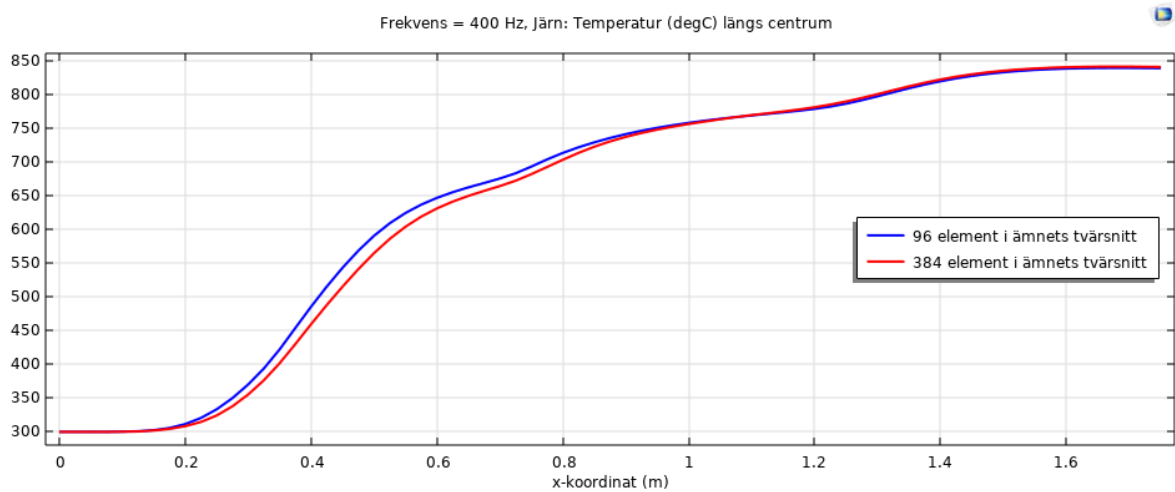
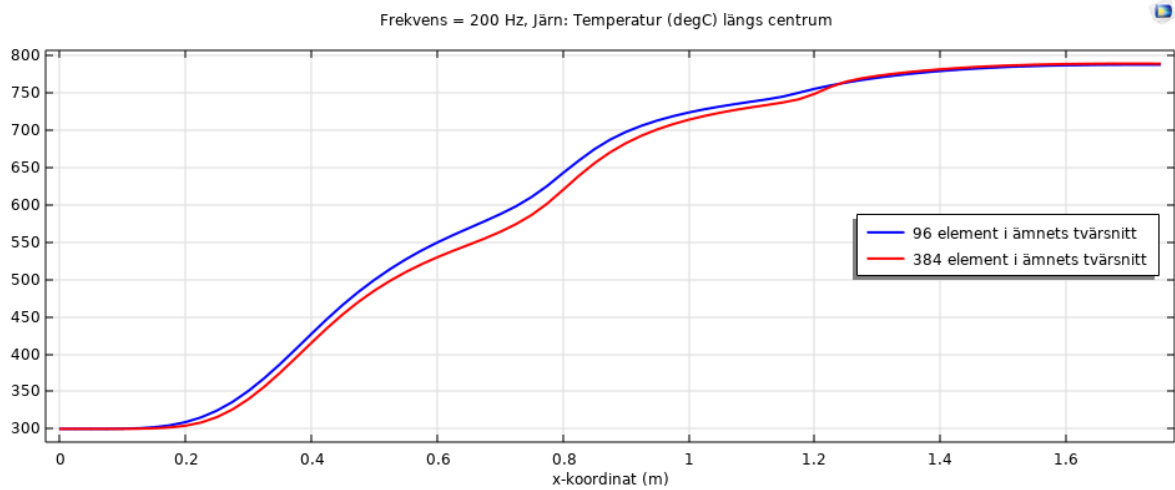
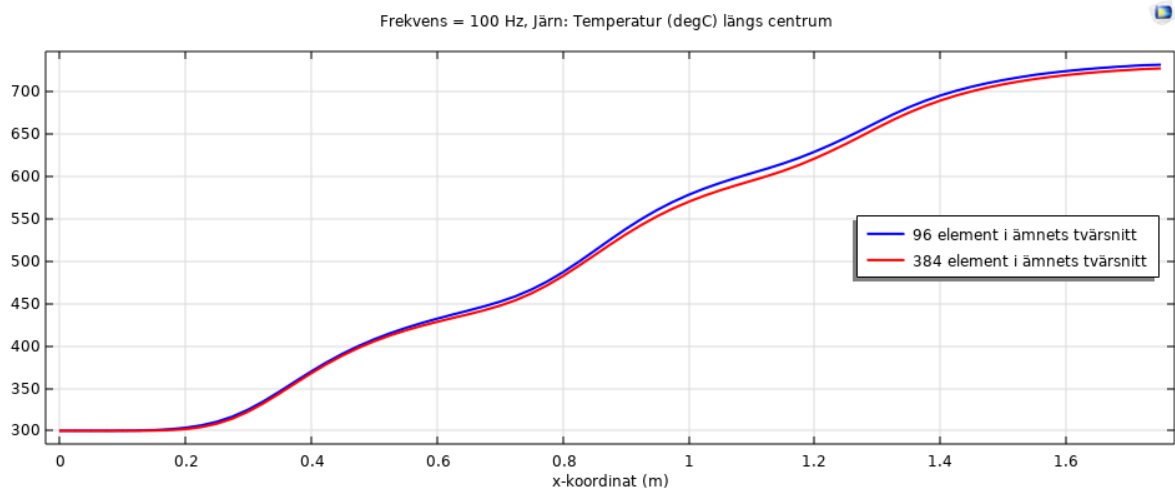


Figurerna nedan visar temperaturen längs ett av ämnets hörn för de tre olika frekvenserna och meshstorlekarna. Det finns en viss avvikelse, men kurvorna får ändå anses ligga nära varandra.

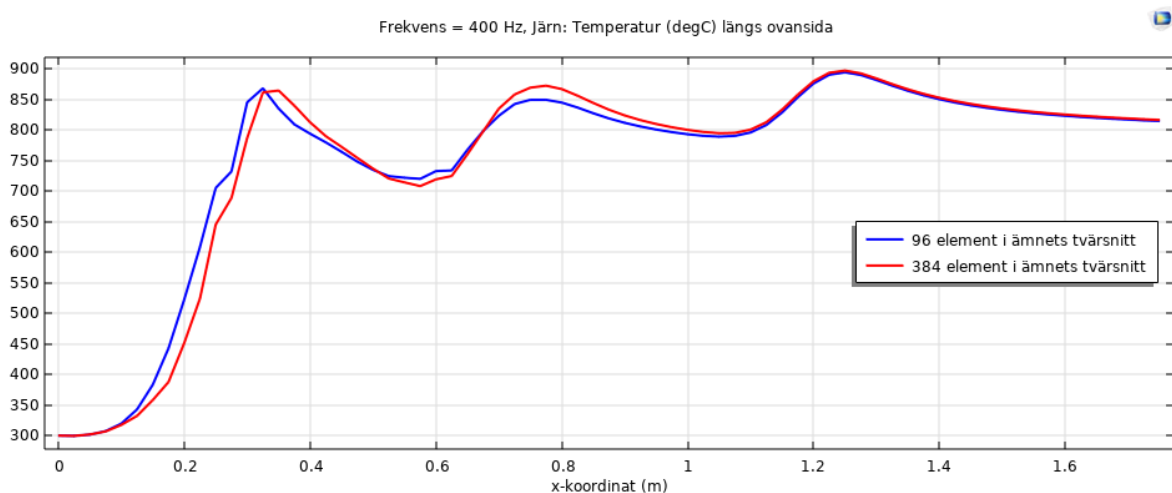
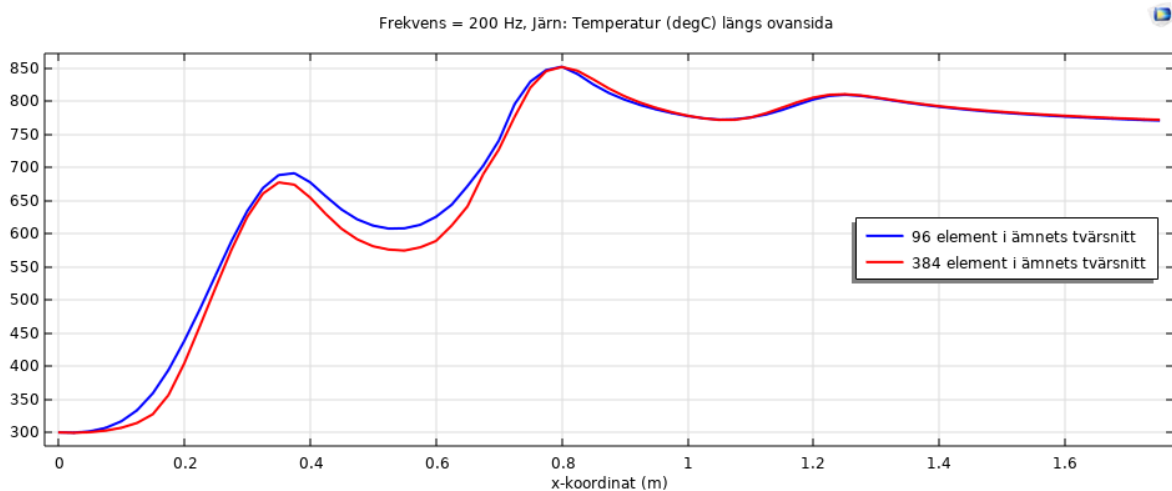
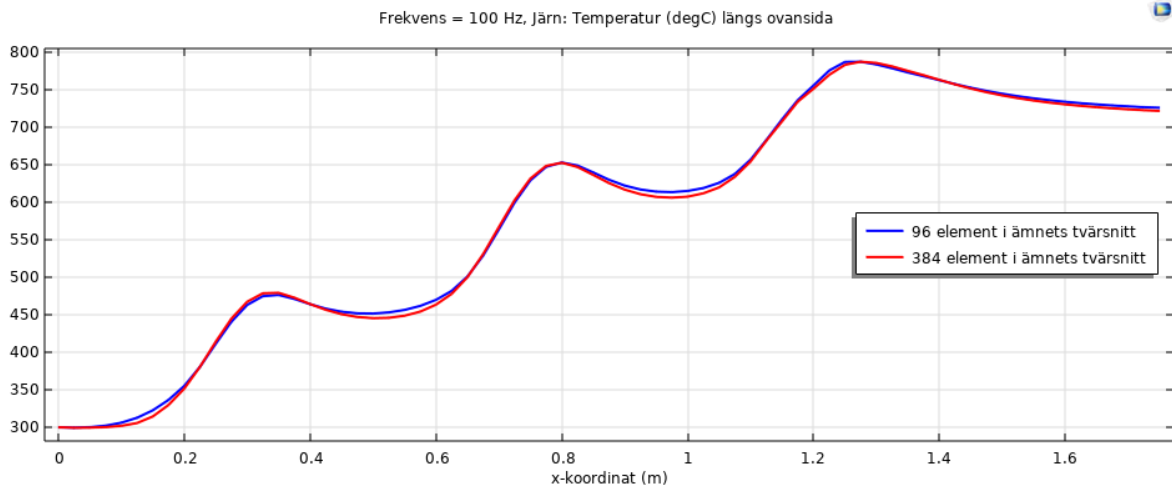




Figurerna nedan visar temperaturen i ämnets centrum. Sluttemperaturen varierar väldigt lite, men en viss temperaturdifferens påvisas när ämnet befinner sig i ugnen.



De sista figurerna som studeras är temperaturen på ovansidan av ämnet. Även vid denna position ger de två mesharna liknande resultat. Det kan vara värt att notera att för frekvensen 400 Hz ser lösningen lite "skakig" ut vid ingången till den första spolen. Sedan tidigare vet vi att det är stora temperaturgradienter i detta område. En möjlig förbättring är att använda en finare mesh i den första delen av ungen.



## Hörnradiens påverkan på temperaturen och simuleringen

### Introduktion

I de tidigare studerade fallen har ett rektangulärt tvärsnitt använts, men hur påverkas temperaturen och framför allt temperaturgradienterna om hörnen rundas av? I detta kapitel kommer de fyra följande fallen nedan att studeras.



Det första fallet har ingen avrundning och de tre övriga fallen har hörnradien 10 mm, 17 mm och 24 mm. Ämnet har som tidigare bredden 14 cm och höjden 8 cm och det har längden 1.75 m. Ämnet som simuleras är järn med temperaturberoende egenskaper och frekvensen sätts till 100 Hz. Övriga indata är samma som tidigare.

När hörnen rundas av minskar ämnets volym, men under simuleringarna har samma strömstyrka, 2000 A, använts för att driva spolarna.

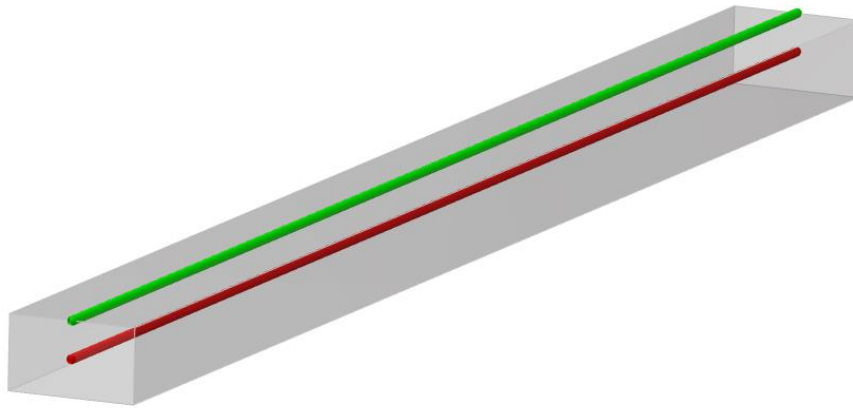
### Numeriska resultat

	Ingen radie	Radie 10 mm	Radie 17 mm	Radie 24 mm
<b>Medeltemperatur [°C]</b>	852	846	848	853
<b>Maxtemperatur [°C]</b>	1070	1070	1071	1071
<b>Spoleffekt [kW]</b>	151	148	147	145
<b>Upptagen effekt [kW]</b>	137	134	133	132
<b>Verkningsgrad [%]</b>	91.0	90.8	90.8	90.7

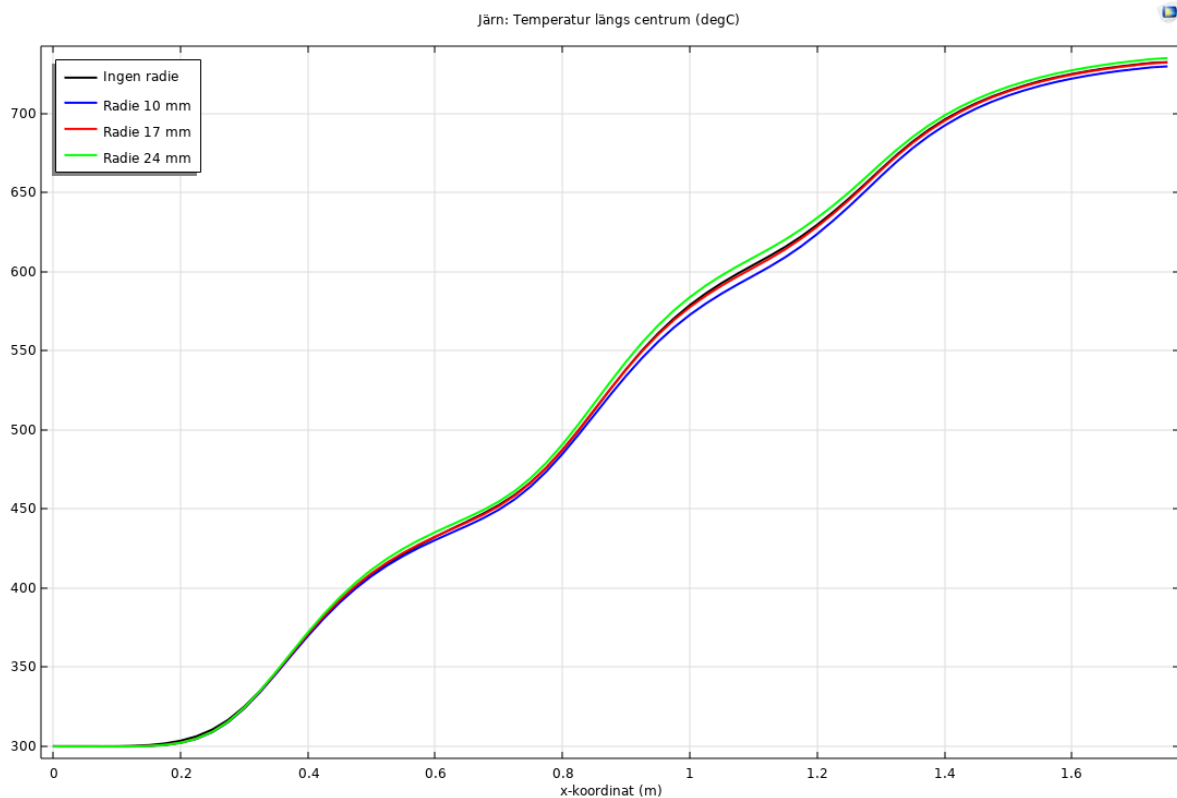
Tabellen ovan visar att det är relativt liten differens i resultaten mellan de olika tvärsnittens utformning.

## Resultat

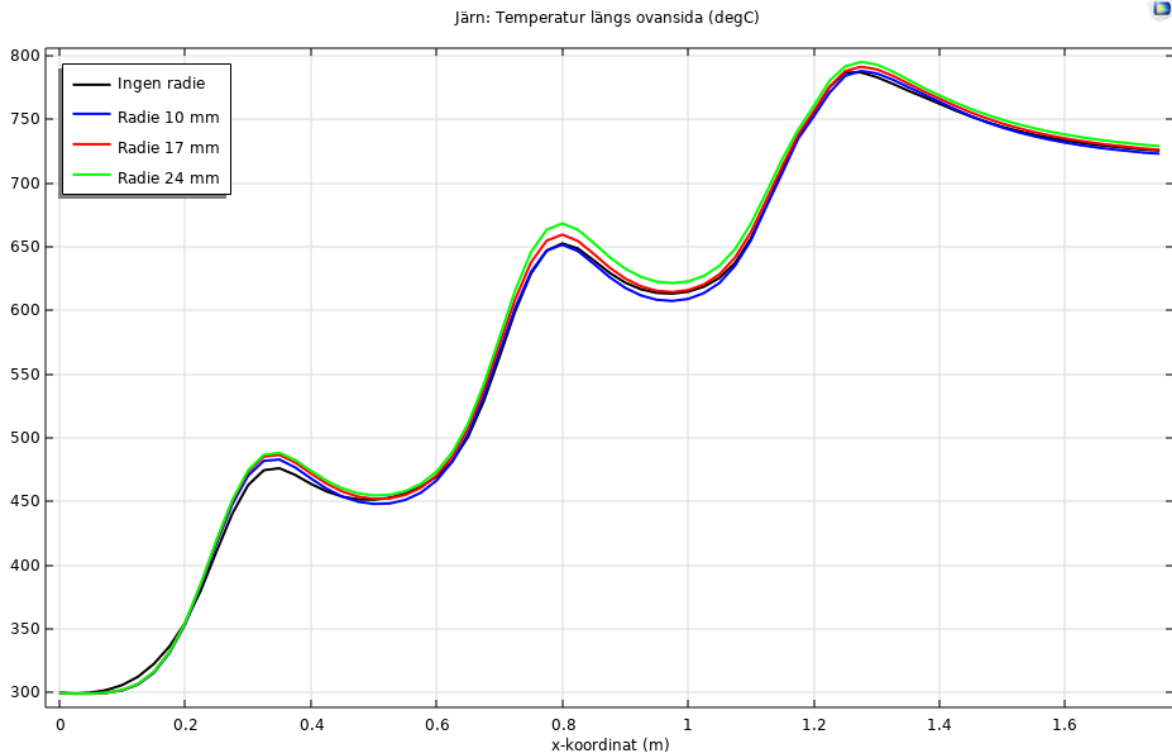
För att jämföra de olika tvärsnitten väljs två linjer där temperaturen visualiseras. Den röda linjen benämns som "Centrum" och den gröna benämns som "Ovansida".



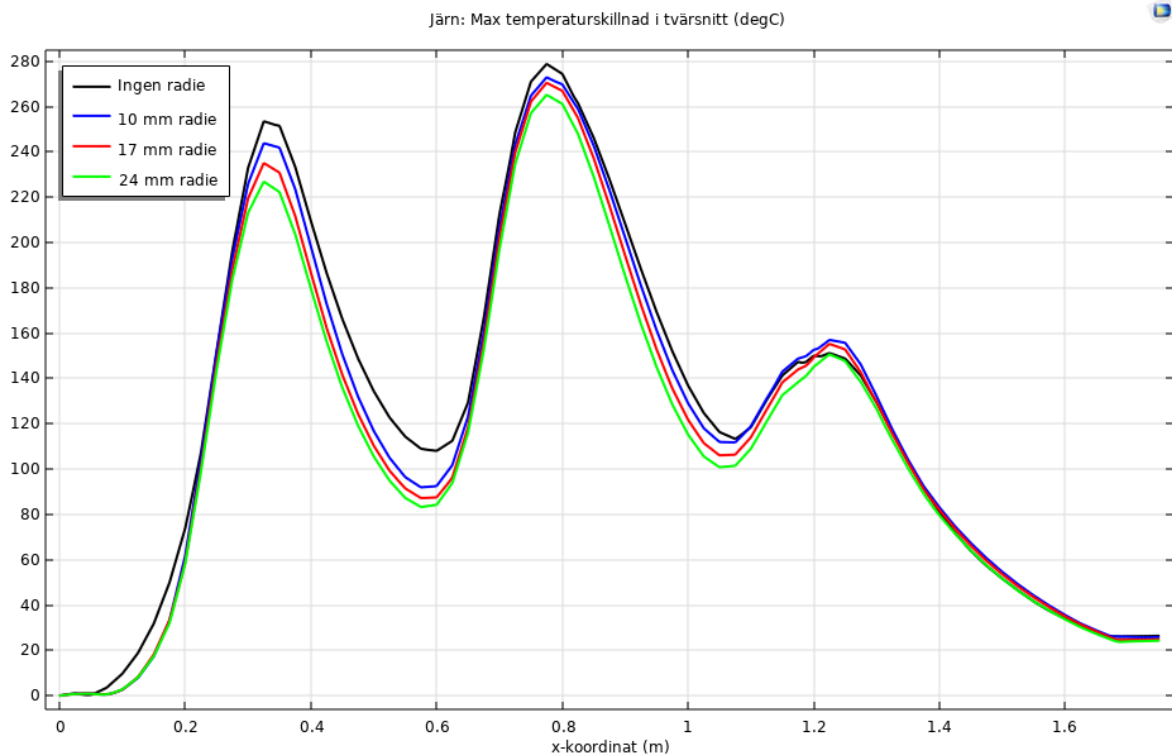
Figuren nedan visar temperaturen i centrum för de olika tvärsnitten. Temperaturen blir något högre när en avrundning används, men skillnaderna är relativt små.



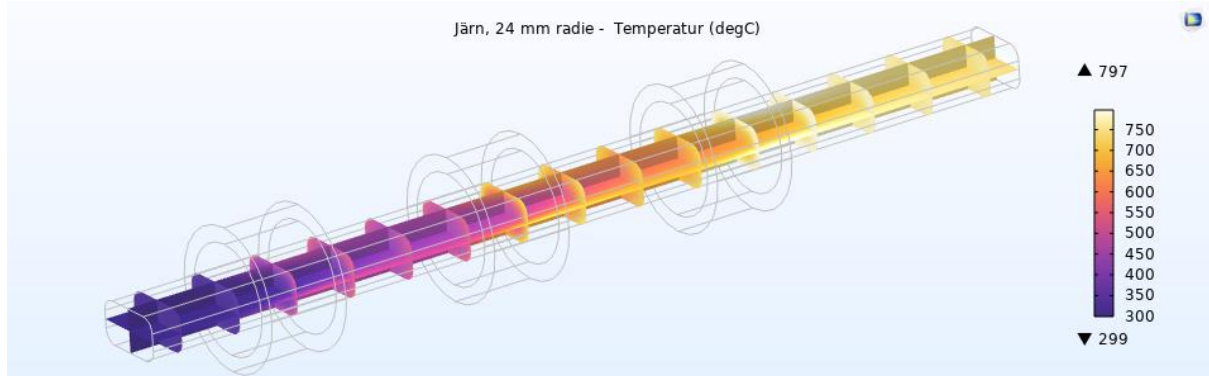
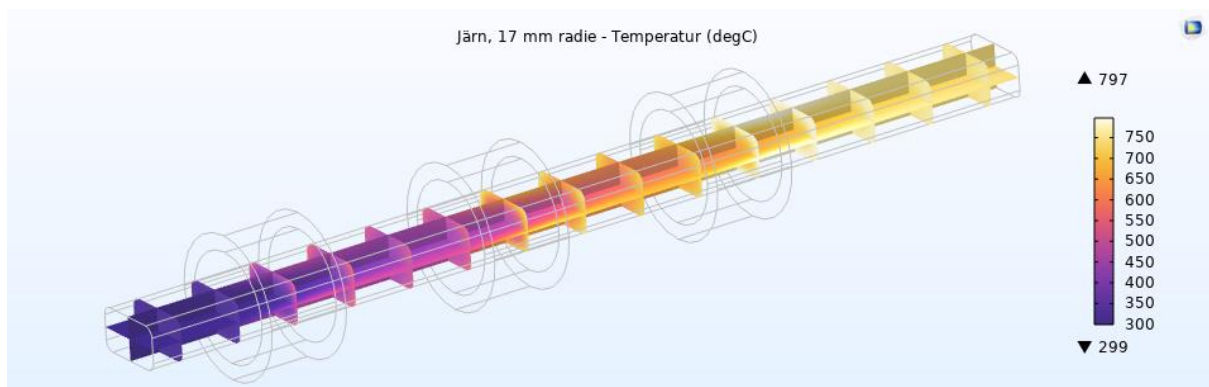
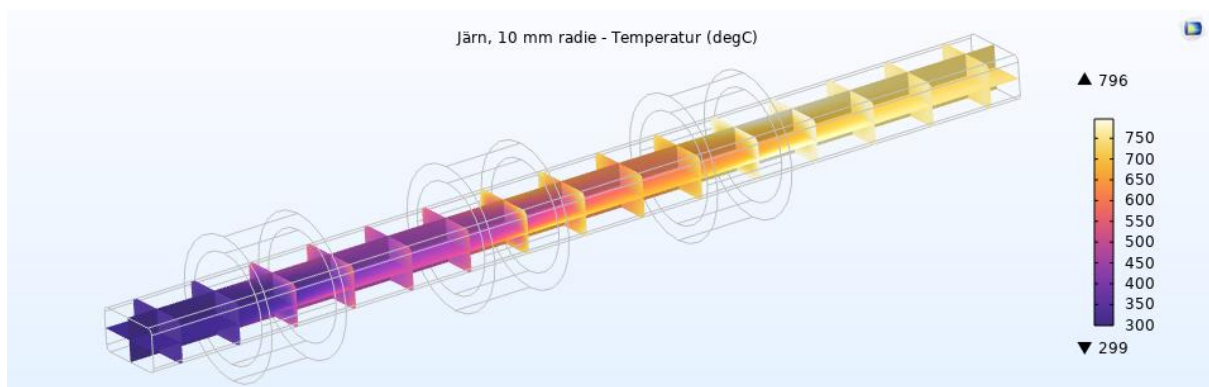
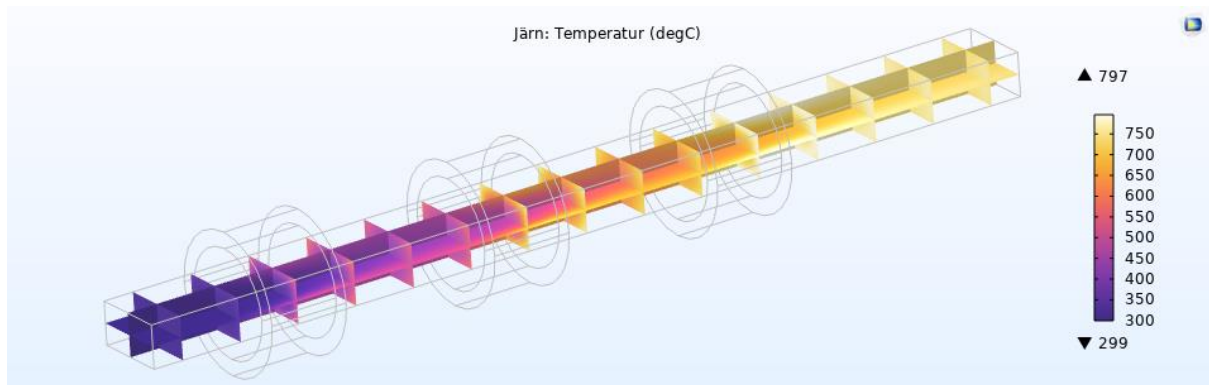
Figuren nedan visar temperaturen på ovansidan för de olika tvärsnitten. Även här ökar temperaturen något när hörnen är avrundade.



En annan parameter av intresse är den maximala temperaturskillnaden i tvärsnittet längs med ämnets längd. Detta visas i figuren nedan. Temperaturskillnaderna minskar avsevärt inuti ugnen med avrundade hörn, men differenserna är små när ämnet har lämnat ugnen och kyls ned.

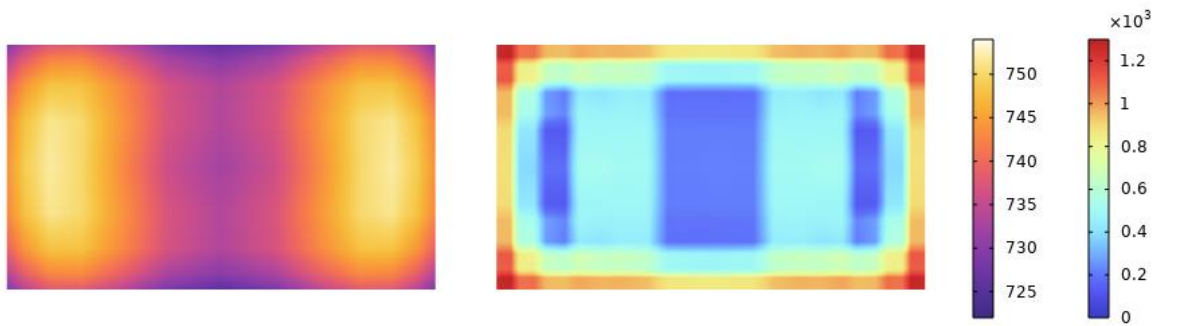


Temperaturen för de olika tvärsnitten visas i figurerna nedan.

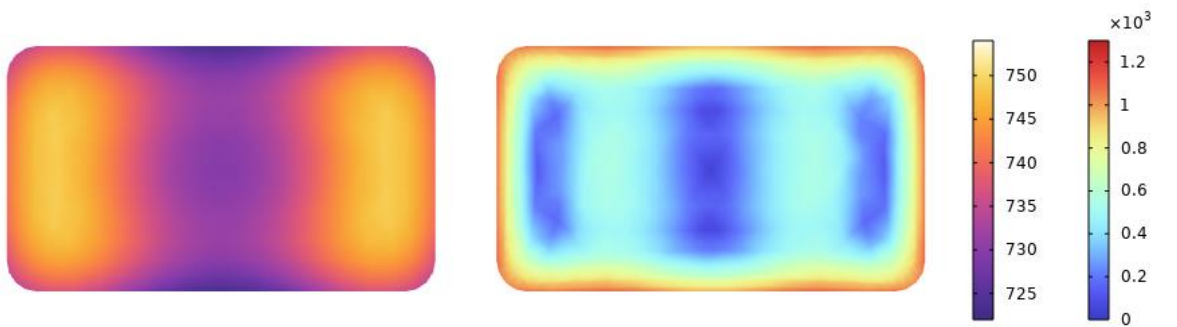


Vid ämnets högra ände jämförs både temperatur och temperaturgradienter. I figurerna nedan så är det tydligt att gradienterna minskar redan då den minsta radien används jämfört med ett helt rektangulärt tvärsnitt. Notera att de fyra figurerna använder samma magnitud på färgskalan.

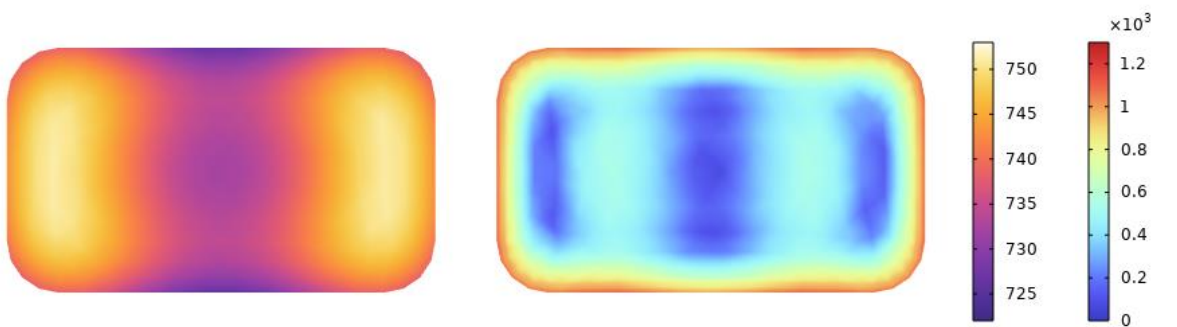
Järn - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



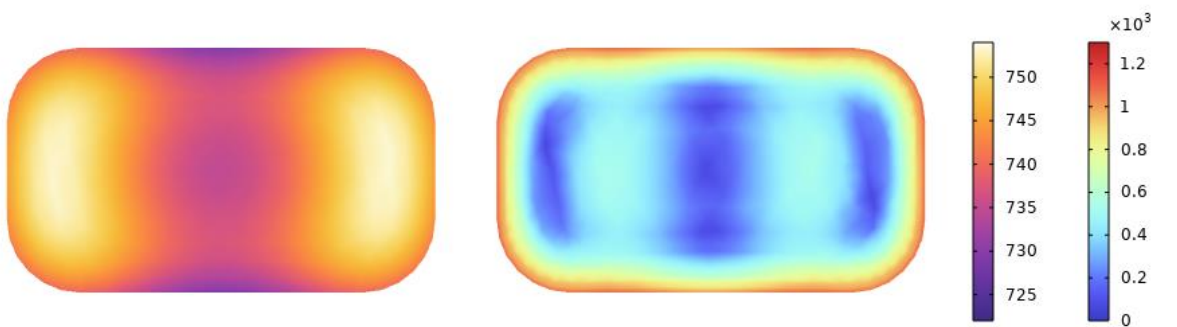
Järn, radie = 10mm - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



Järn, radie 17mm - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



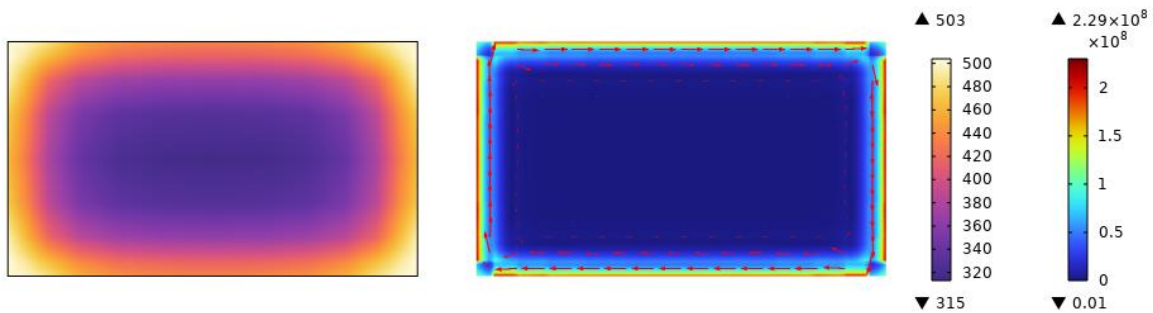
Järn, radie 24 mm - Tvärsnittstemperatur vid höger ände: Temperatur (degC) och Temperaturgradient (K/m)



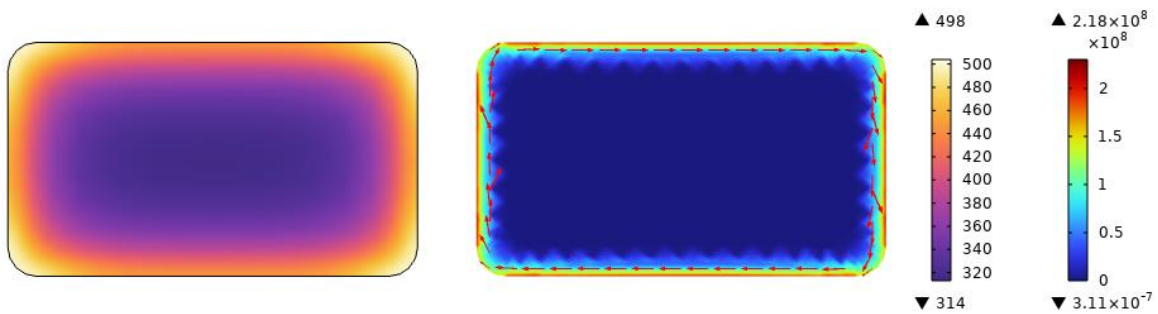


I ett tvärsnitt i mitten av den första spolen visas temperaturen och figurerna till höger visar strömriktningen med pilar i logaritmisk skala samt den elektromagnetiska uppvärmningen. Den elektromagnetiska uppvärmningen ser ut att vara lite dåligt upplöst för fallen med de avrundade hörnen och orsaken till detta är att en annan typ av mesh har använts, men resultaten är tillräckligt noggranna för att se skillnaderna mellan de olika fallen. Figurerna använder samma färgskala.

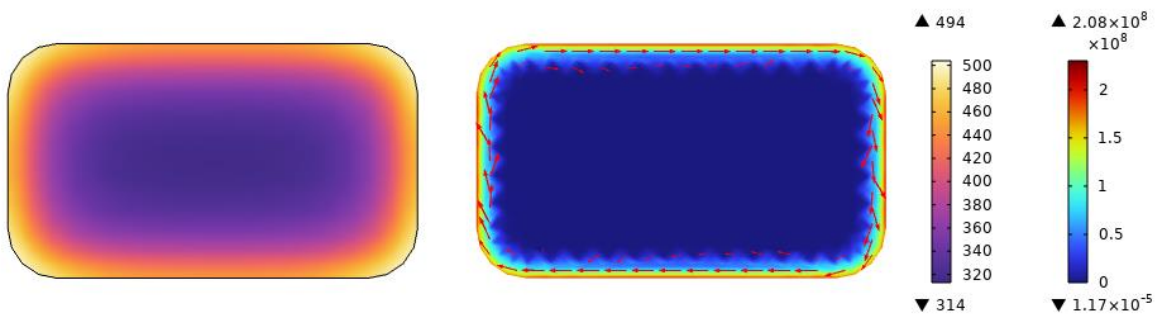
Järn - Strömriktning och Uppvärmning ( $W/m^3$ ) samt Temperatur (degC) vid första spolen



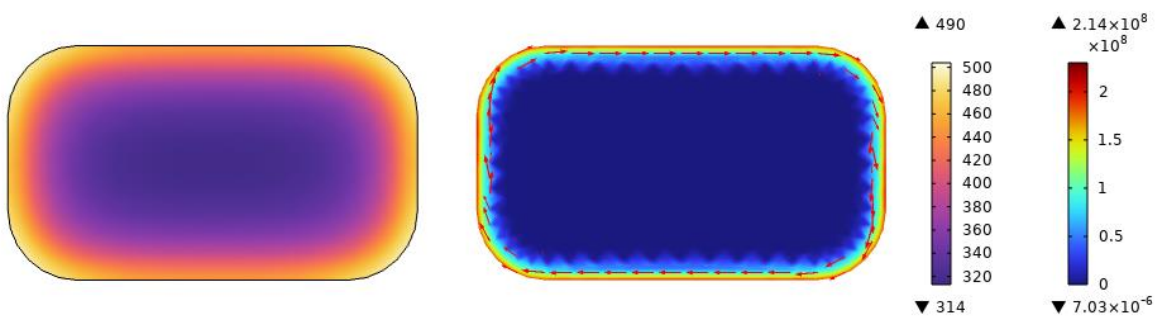
Järn, 10 mm radie - Strömriktning och Uppvärmning ( $W/m^3$ ) samt Temperatur (degC) vid första spolen



Järn, 17 mm radie - Strömriktning och Uppvärmning ( $W/m^3$ ) samt Temperatur (degC) vid första spolen

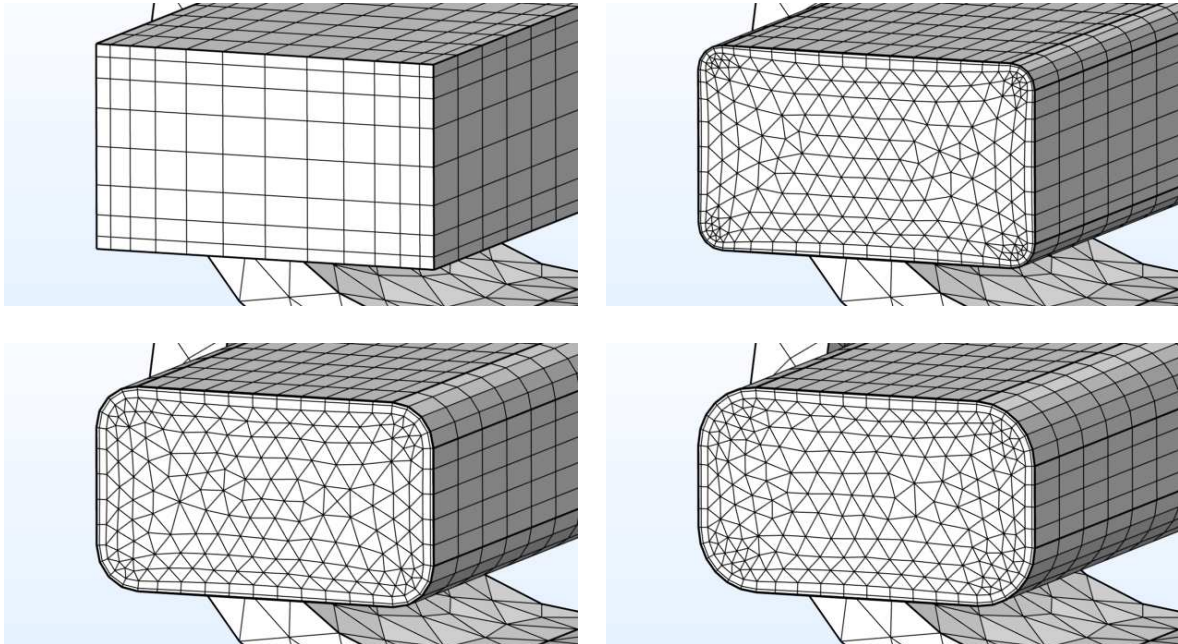


Järn, 24 mm radie - Strömriktning och Uppvärmning ( $W/m^3$ ) samt Temperatur (degC) vid första spolen

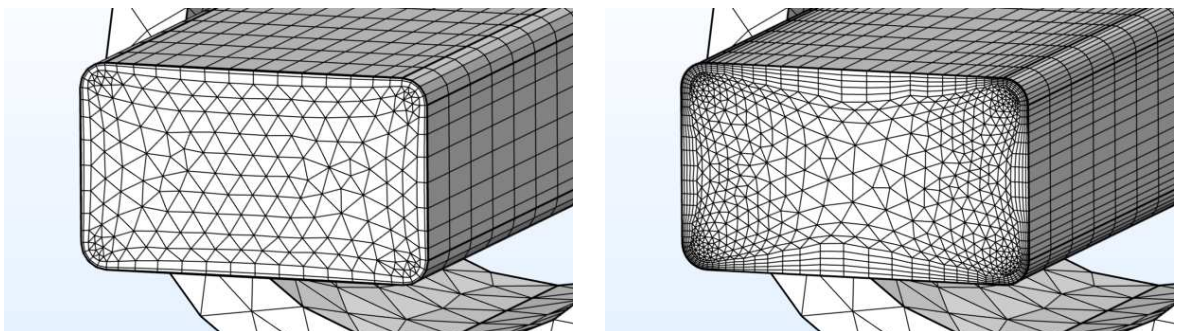


## Mesh och meshkonvergenstudie vid avrundade hörn

När hörnen avrundas kan inte tvärsnittet använda en helt rektangulär mesh. I stället har en triangulär mesh med så kallade "boundary layers", randlager, använts för att göra meshen finare närmast ytan. Antalet element i modellerna med avrundade hörn blir fler än vid det rektangulära tvärsnittet, men det är enkelt för användaren att manuellt ställa in storleken. Figurerna nedan visar de olika mesharna som har använts.



För fallet där radien är 10 mm har ytterligare en mesh testats. I figurerna nedan visas den ursprungliga meshen till vänster och den förfinade meshen till höger. Den ursprungliga meshen har 546 element i ämnets tvärsnitt och den förfinade meshen har 1602 element i ämnets tvärsnitt. Antalet element i x-led är samma som i tidigare modeller.

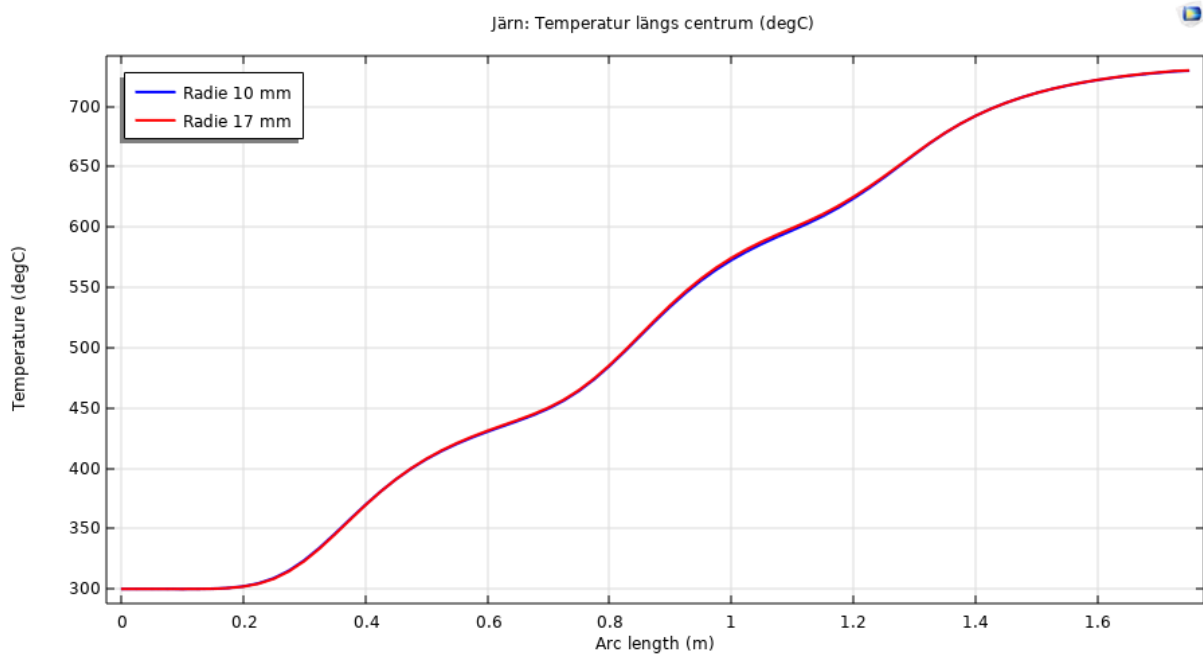


Totalt har den ursprungliga meshen 98 000 element och den förfinade meshen har 195 000 element.

Resultaten från de två simuleringarna presenteras i tabellen nedan. Värdena ändras väldigt lite i förhållande till de olika meshstorlekarna vilket innebär att den grövre meshen kan användas vilket leder till kortare lösningstid.

	546 element i tvärsnitt	1602 element i tvärsnitt	Differens %
Medeltemperatur [°C]	846	848	0.1
Maxtemperatur [°C]	1070	1072	~ 0
Spoleffekt [kW]	148	148	~ 0
Upptagen effekt [kW]	134	135	~ 0
Verkningsgrad [%]	90.8	90.9	~ 0

Temperaturen i centrum visas i figuren nedan och temperaturdifferenserna är små varför den ursprungliga meshen kan anses vara tillräckligt fin för att uppnå godtagbar noggrannhet.



## Sammanfattning

Järn, lågkolhaltigt stål och rostfritt stål som matas genom en induktionsugn med tre spolar har studerats. Materialparametrarnas temperaturberoende och dess inverkan på lösningen har jämförts. Tre olika spolfrekvenser har testats och en meshkonvergensstudie har bekräftat att lösningarna har godtagbar felmarginal med hänsyn till meshens storlek.

Materialparametrar har stor inverkan på simuleringsresultaten. Då metallers egenskaper är starkt temperaturberoende och induktionsugnar skapar stora temperaturskillnader i ämnet måste detta beaktas för att uppnå noggranna resultat.

Att ta fram temperaturberoende egenskaper är inte en lätt uppgift, men produkten Material Library som finns i COMSOL Multiphysics har ett antal material som kan användas, modifieras och återanvändas.

Om Curietemperaturen uppnås, så måste detta beaktas i simuleringen för att resultaten ska vara godtagbara. BH-kurvor kan göras beroende av temperaturen med enkla formuleringar, men på grund av de skarpa gradienterna som curiepunkten skapar kan det vara problematiskt att numeriskt lösa problemen. Det är också av vikt att jämna ut kurvor som till exempel värmekapacititeten för att förhindra singulära punkter.

Spolarnas frekvens har stor inverkan på hur materialet värms upp. En hög frekvens värmer ämnet mer på ytan än en låg frekvens. En hög frekvens skapar större temperaturgradienter i ämnet, men ger samtidigt en högre verkningsgrad.

En meshkonvergensstudie har utförts och den visar att den meshstorlek som initialt har använts visar upp tillräcklig noggrannhet för att förutspå temperaturen. Modellen ska dock ses som ett test för modelleringsförfarandet och är långt ifrån färdig för att användas av industrin i syfte att jämföra modellen mot uppmätt data. Till exempel har mycket enkla randvillkor för värmetransporten ansatts och spolarnas utformning är inte specificerade enligt data från någon leverantör.

Slutligen har en analys av hur tvärsnittets geometriska form påverkar temperaturen och framför allt hur temperaturgradienterna i ämnet minskas genom att runda av hörnen. En ny mesh med triangulära element och randlager användes. Trots att den initiala meshen var relativt grov räcker den för att förutspå temperaturen med tillräcklig noggrannhet i förhållande till beräkningstid och övriga felkällor.