

### Elektrisk ämnesvärmning för applikationer inom stålindustri

Hesam Mortazavi, Helena Malmqvist, Björn Ahlqvist, Jonas Engdahl, Mathias Forsstedt, Anette Bergén, Cecilia Lille, Björn Holmstedt, Olof Ceder, Anders Lugnet, Richard Åhlberg, Matts Persson, Jan Pettersson, Nils-Eric Wessberg, Mårten Fexby, Krister Wickman, Jonas Ekström, David Blecko, Rudiger Eichler, Magnus Dahlstrom

#### Nyckelord:

Induktion, värmeelement, elektrifiering, ämnesvärmning, konvertering, förvärmning

Kommitté TO 51  
Rapport D 892 Datum 2022-06-30

**Besöksadress**  
Kungsträdgårdsgatan 10

**Telefon**  
+46 (0)8 679 17 00

**E-post**  
office@jernkontoret.se

**Organisationsnr**  
802001-6237

**Postadress**  
Box 1721, 111 87 Stockholm

**Webbplats**  
www.jernkontoret.se

## **Distribution**

Denna rapport är öppen

## Förord

Denna studie är finansierad genom ett stöd från Energimyndigheten motsvarande 50% av stödgrundande kostnader. Resterande 50% är finansierad av de deltagande organisationsföretagen; Outokumpu AB, Linde Gas AB, Jernkontoret, Kanthal AB, Ovako Sweden AB, SSAB EMEA AB, Uddeholms AB. Projektet som leder fram till denna studie har rapporterat till en styrgrupp inom TO51 hos Jernkontoret och fått dra nytta av ett gott samarbete med SMS Elotherm samt Inductotherm. Samarbete med Deflexional AB som lett till genomförda simuleringar har medfört ökad kunskap om materialens egenskaper vid induktionsvärmning.

COWI har stått för projektledning, analys och sammanställning av resultat och företaget Ferroman AB har bidragit med teknisk specialistkunskap inom projektet genom in-kind tid.

# Innehåll

|                                                                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. SAMMANFATTNING .....</b>                                                                                               | <b>5</b>  |
| <b>1. SUMMARY .....</b>                                                                                                      | <b>8</b>  |
| <b>2. INLEDNING/BAKGRUND .....</b>                                                                                           | <b>11</b> |
| <b>3. GENOMFÖRANDE.....</b>                                                                                                  | <b>12</b> |
| <b>4. RESULTAT.....</b>                                                                                                      | <b>15</b> |
| 4.1 REDOGÖRANDE AV TEKNIKER SOM FINNS FÖR ELEKTRISK VÄRMNING.....                                                            | 15        |
| 4.1.1 Elektriskt Resistiva Värmeelement.....                                                                                 | 15        |
| 4.1.2 Induktionsvärmning.....                                                                                                | 26        |
| 4.1.3 Plasmabrännare .....                                                                                                   | 37        |
| 4.2. VIKTIGA FÖRUTSÄTTNINGAR VID VAL AV ELEKTRISK VÄRMNING .....                                                             | 38        |
| 4.2.1 Viktiga förhållanden beträffande resistiva elektriska värmelement.....                                                 | 38        |
| 4.2.2. Induktionsvärmning SSAB Borlänges stegbalksugn.....                                                                   | 40        |
| 4.2.3. Verkningsgrader med utgångspunkt: fall SSAB Borlänge.....                                                             | 43        |
| 4.2.4. Frekvens i förhållande till materialets tjocklek.....                                                                 | 46        |
| 4.3 PRESENTATION AV PRESTANDA ELEKTRISKA VÄRMNINGSSYSTEM KOPPLAT TILL ZONER, TEMPERATURER, UGNSDIMENSIONER OCH MATERIAL..... | 50        |
| 4.4. GLÖDSKALSBILDNING OCH KONTROLLERAD ATMOSFÄR I UGNAR.....                                                                | 51        |
| 4.5. ÖVERGRIPANDE EKONOMISK KALKYL FÖR ATT SKIFTA GAS TILL EL.....                                                           | 54        |
| 4.6. STYRSYSTEMET FÖR INDUKTIONSVÄRMNING .....                                                                               | 56        |
| 4.6.1. Möjligheter med effekreglering för att undvika effektoppar.....                                                       | 57        |
| 4.6.2 Störningar som elektrisk värmning kan påföra elnätet.....                                                              | 58        |
| 4.7. SIMULERING .....                                                                                                        | 60        |
| 4.7.1 Mjukvaror lämpliga för simulering induktion.....                                                                       | 62        |
| 4.7.2 Resultat simulering utförda i projektet .....                                                                          | 65        |
| <b>5. DISKUSSION .....</b>                                                                                                   | <b>68</b> |
| <b>6. PUBLIKATIONSLISTA .....</b>                                                                                            | <b>70</b> |
| <b>7. REFERENSER, KÄLLOR .....</b>                                                                                           | <b>71</b> |
| <b>8. BILAGOR .....</b>                                                                                                      | <b>72</b> |

## 1. Sammanfattning

Ämnesvärmning är en av de mest utmanande processerna för ståltillverkning. På grund av att energianvändningen är hög, kan betydande miljövinster uppnås om bränsle kan ersättas från fossilt till förnybart. Värmningsutrustning är dessutom kostsam med lång investeringscykel, vilket gör det viktigt att långsiktigt välja rätt teknik och energikälla. I denna rapport har prestanda och funktion för elektriska värmningssystem utvärderats och med utgångspunkt från dessa förutsättningar har svar på betydande frågeställningar för elektriska värmningssystem fåtts, b.la. genom god dialog med två stora/relevanta leverantörer av induktionsuppvärmningssystem, deltagande i gruppen är även Kanthal som har omfattande erfarenhet av värmningssystem där resistiv tråd används.

Projektet har utgått från vilka värmningssteg som är mest relevanta att utreda för elektrisk värmning för respektive deltagande företag. Arbetet har fokuserat på ämnesvärmning vilket ofta kräver högre temperatur ställt mot värmningssteg för efterkommande värmebehandling. I gruppen för deltagande företag finns idag flera elektriska värmningssystem som nyttjas för temperaturer  $< 1100^{\circ}\text{C}$  och därav god kännedom om dessa system. Gällande högre temperaturer och förvärmningssteg innan valsning och smide är dock hög temperatur och effekt mer betydelsefullt och inte känt i samma omfattning.

I syfte att få djupare kunskap har en konkret fallstudie (SSAB Borlänges stegbalksugn) gjorts mer ingående. Fallet representerar väl de utmaningar som finns vad gäller elektrisk ämnesvärmning med stora tonnager och höga temperaturer. I fallet framgår också utmaningar och möjligheter för en stegvis konvertering med flera olika system som samverkar för att uppnå optimal värmning med hänsyn tagen till energiperspektivet.

Utredningen för fallstudien visar att genom addera ett förvärmningssteg med induktionsvärmning kan följande resultat, mätt som energi och  $\text{CO}_2$  (koldioxid) reduktion per år, erhållas. Med förvärmning upp till  $500^{\circ}\text{C}$  kan ca 26% eller 51 tusen ton per år  $\text{CO}_2$  reduceras. Skulle ugnarna delvis konverteras med värmningselement kan ca 6-8% eller 14 tusen ton  $\text{CO}_2$  reduceras per år.

Begränsningen ligger främst i vilka zoner där element kan appliceras rent praktiskt och utan att medföra effektminskning till zonen. En hel konvertering med elektriska element kan inte uppnå den effekttäthet som krävs för att bibehålla nuvarande produktionskapacitet, inte ens med relativt kraftig förvärmning medels induktion ( $500^{\circ}\text{C}$ ). En total elektrifierad lösning innebär således ombyggnad och förlängning av befintliga ugnar samt induktionssteg.

Fler resultat som framkommit inom ramen av detta arbete beskrivs kort härnedan. Induktionsvärmning:

- Induktiva värmningssystem kan nyttjas för att höja temperaturen

på stora ämnen vilket leder till att mindre energi behöver tillföras i befintliga ugnar och därav ersätta fossilbaserad energikälla med elektrisk. Induktiva system kan även nyttjas för att tillföra energi efter en grundvärmning. Detta ger möjlighet att optimera temperatur för nästkommande processteg.

- Verkningsgraden för hybridsystem och även rena eluppvärmda system ligger högre än traditionell öppen förbränning. Detta innebär att det också finns möjlighet att reducera behovet av energi för att uppnå samma temperaturer på ämnen.
- Induktiva värmningssystem kan tillföra stor effekt på liten yta. Materialegenskaper i form av värmeöverföringsförmåga och elektromagnetism påverkar i hög omfattning utfallet efter induktionsvärmningen. I princip alla materialparametrar är temperaturberoende och arbetet i denna studie har resulterat i att visualisera utfall då materialparametrar isoleras i simulering. Detta ger bättre förståelse och ökar möjligheten att få en träffsäker prediktion som kan ligga till grund för investering.

#### Resistiva värmeelement:

- Användning av resistiva värmeelement är en energieffektiv värmningsteknik jämför med existerande gasvärmning. Minskningar av effektbehov och energiförbrukning på åtminstone 30% är realistiska enligt oberoende studier. (Pfeifer, 2017).
- För de högsta ugn- och värmningstemperaturerna mellan 1200 och 1300°C krävs användning av keramiska värmeelement. För dessa ugnstemperaturer är vägeffekter på 75 kW/m<sup>2</sup> vanligt förekommande i installationer av keramiska värmeelement. Det bedöms dock tekniskt möjligt att uppnå uppemot 100 kW/m<sup>2</sup>.
- Livslängd på resistiva element samt rullar minskar med ökad temperatur. Livslängden är även beroende på design av värmelösningen för att begränsa mekaniska belastningar på värmeelementen och erhålla en god temperaturjämnhet på värt gods och värmeelement
- Hybridteknik, att använda resistiva elektriska värmeelement i kombination med gasvärmning är en tekniskt intressant teknik under utveckling men i dagsläget finns endast ett fåtal försöksinstallationer i liten skala.
- En alternativ teknik att tillföra elektrisk värmning är genom att förvärma gas (syrgas/luft) till det existerande gasvärmningssystemet. På så sätt kan bränsleförbrukningen sänkas på existerande värmningssystem med en tekniskt mindre modifikation av existerande ugnar. En simuleringsmodell har tagits fram som visar på effekterna av denna typ av installation.

Den modell som utvecklats under projektet tillsammans med de simuleringar som är utförda för att evaluera materialegenskaper vid induktiv värmning är mycket intressanta och användbar i framtida men även för andra pågående projekt som exempelvis ELROS.

Med hänsyn tagen till dessa resultat har projektet bidragit till att främja elektrisk ämnesvärmning för stålindustrins framtida investeringar.

## 1. Summary

Electrical material heating is one of the most challenging processes for steel production. Due to the high energy use, significant environmental benefits can be achieved if fuel can be replaced from fossil to renewable. Heating equipment is expensive with a long investment cycle, which makes it important to choose the right technology and the energy source in the long term. In this report, the performance and function for electric heating systems have been evaluated and based on these conditions, answers to important questions for electric heating systems have been obtained, e.g., through good dialogue with two large / relevant suppliers of induction heating systems, participating in the group is also Kanthal who has extensive experience of heating systems where resistive wire is used.

The project starting point has been which heating steps are most relevant to investigate for electric heating for each participating company. The work has focused on material heating, which often requires a higher temperature compared to the heating steps for subsequent heat treatment. In the group for participating companies today there are several electric heating systems that are used to operate at temperatures  $<1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  and hence good knowledge of these systems. Regarding higher temperatures and preheating steps before rolling and forging, however, high temperature and power are more significant and not known to the same extent.

In order to gain deeper knowledge, a concrete case study (SSAB Borlänge's step beam furnace) has been made in more detail. The case represents well the challenges that exist in terms of electric material heating with large tonnage and high temperatures. The case also indicates the challenges and opportunities for a step-by-step conversion with several different systems that work together to achieve optimal heating, taking into account the energy perspective.

The case study shows that by adding a preheating step based on induction heating, the following results measured as energy and  $\text{CO}_2$  reduction per year, can be obtained. With preheating up to  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , about 30% or 60 thousand tons  $\text{CO}_2$  can be reduced per year. Should the furnaces be partially converted with heating elements, approximately 6-8% or 14 thousand tons of  $\text{CO}_2$  can be reduced per year. The limitation is mainly in which zones electrical elements can be applied in a purely practical manner and without causing a reduction of power to the zone. A complete conversion with electrical elements cannot achieve the power density required to maintain current production capacity, even with relatively strong preheating by induction ( $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). A total electrified solution thus involves rebuilding and extending existing furnaces as well as induction steps.

More results that have emerged within the framework of this work are described briefly below.



#### Induction heating:

- Inductive heating systems can be used to raise the temperature of large pieces of material, which means that less energy needs to be supplied to existing furnaces and thereby replace fossil-based energy source with electricity. Inductive systems can also be used to supply energy after a basic heating. This provides the opportunity to optimize temperature for the next process steps.
- The efficiency of hybrid systems and also purely electrically heated systems is higher than traditional open combustion. This means that it is also possible to reduce the need for energy to achieve the same temperatures on the materials.
- Inductive heating systems can add great power to a small area. Material properties in the form of heat transfer capacity and electromagnetism greatly affect the outcome after the induction heating. In principle, all material parameters are temperature dependent and work in this study has resulted in visualizing outcomes when material parameters are isolated in simulation. This provides a better understanding and increases the possibility of getting an accurate prediction that can be the basis for investment.

#### Resistive heating elements:

- The use of resistive heating elements is an energy-efficient heating technique compared to existing gas heating. Reductions in power requirements and energy consumption of at least 30% are realistic according to independent studies, reference Pfeifer, H. (2017).
- For the highest oven and heating temperatures between 1200 and 1300 ° C, the use of ceramic heating elements is required. For these furnace temperatures, wall effects of 75 kW / m<sup>2</sup> are common in installations of ceramic heating elements. However, it is considered technically possible to achieve up to 100 kW / m<sup>2</sup>.
- Service life of resistive elements and rollers decreases with increasing temperature. The service life is also dependent on the design of the heating solution to limit mechanical loads on the heating elements and obtain a good temperature uniformity on heated goods and heating elements.
- Hybrid technology, using resistive electric heating elements in combination with gas heating is a technically

interesting technology under development, but at present there are only a few experimental installations on a small scale.

- An alternative technique to supply electric heating is by preheating gas (oxygen / air) to the existing gas heating system. In this way, fuel consumption can be reduced on existing heating systems with a technically lesser modification of existing furnaces. A simulation model has been developed that shows the effects of this type of installation.

The model developed during the project together with the simulations performed to evaluate material properties in inductive heating are very interesting and useful in future but also for other ongoing projects such as ELROS.

Taking these results into account, the project has contributed to promoting electric blank heating for the steel industry's future investments.

## 2. Inledning/Bakgrund

Projektet har genomförts för att ge bättre förutsättningar att kunna ta rätt beslut vad gäller investeringar för ämnesvärmning. Elektriska värmningssystem är väl kända inom projektgruppen vad gäller värmebehandling, men då handlar det generellt sett om lägre temperaturer.

Genom att klarlägga förutsättningar och begränsningar för elektriska värmningssystem finns möjlighet att helt eller delvis ersätta fossila bränslen med elektricitet. Förutsatt att denna elektricitet är fossilfritt producerad kan betydande sänkningar av CO<sub>2</sub> utsläpp uppnås.

Av elproduktionen i Sverige 2017 var majoriteten vattenkraft (40%), kärnkraft (40%) och vindkraft (11%) som har betydligt mindre CO<sub>2</sub> utsläpp jämfört med fossila bränslen. Energianvändningen för stål- och metallproducenter uppgick i Sverige 2015 till 21,5 TWh där el utgör 7,4 TWh. Detta innebär att elektrifieringspotentialen ligger över 10 TWh / år med hänsyn tagen till branschens bedömning att 2-3 TWh inte går att ersätta med el. En betydande del av elektrifieringspotentialen kan alltså kopplas till ämnesvärmning.

Det övergripande målet med projektet är att ha beskrivit vilka möjligheter som finns vad gäller elektrisk ämnesvärmning av stål i ugnar. Detta för att på sikt kunna elektrifiera ugnar som idag använder fossila bränslen och därmed minska utsläpp av koldioxid. Projektet har på detaljerad nivå beskrivit tekniska lösningar och redogjort prestanda för elektrisk ämnesvärmning. Begränsningar för olika tekniska lösningar har fastställts.

Övriga mål är att ha:

1. klargjort och redovisat potentiella fördelar som kan komma av att konvertera från bränsleeldad värmning till elektriska system.
2. fått ett resultat som kan användas vid inköp av ny utrustning samt ombyggnation av befintlig utrustning.
3. definierat fortsatt nödvändig forskning inom elektrisk ämnesvärmning inom stålindustrin som tar vidare eventuella frågeställningar som uppkommer under projektets gång.

Resultatet från denna studie kan användas vid inköp av ny utrustning samt ombyggnation av befintlig utrustning.

### 3. Genomförande

Projektarbetet har genomförts med utgångspunkt i att besvara de relevanta föridentifierade punkter/ frågeställningarna som återfinns i denna rapport. Dessa är kopplade till genomförandet och numrerade 1-17.

1. Presentera prestanda elektriska värmningssystem kopplat till zoner, temperaturer, ugnsdimensioner och material
2. Definiera gränserna för elektrisk värmning, temperaturer, atmosfärer, effekter
3. Utvärdera konstruktionens betydelse med avseende på verkningsgrad, volym, luckor, tätningar, infodring, zonindelning
4. Beskriva hur värmeöverföringen påverkas av materialets yta, emissivitet betydelse för energiöverföring
5. Lista begränsningar för material kopplat till elektriska värmningssystem, Utformning, Curietemperatur, permeabilitet
6. Klargöra vilka dimensioner och former som lämpar sig för olika typer av elektrisk värmning
7. Utredda glödskaalsbildning tjocklek och vidhäftning på materialet vid olika typer av elektrisk värmning
8. Beskriva hur efterkommande valsning påverkas vid olika grad av glödskaalsbildning
9. Beskriva hur ämnen påverkas av elektrisk värmning i ugnar med kontrollerad atmosfär
10. Lista påverkansfaktorer för ämnestransporter i ugnar med elektrisk värmning
11. Utredda vilken typ av ämnestransport som lämpar sig bäst för elektrisk värmning
12. Presentera övergripande ekonomisk kalkyl för att skifta gas till el
13. Beskriva möjligheter med effekttreglering för att undvika effekttoppar
14. Presentera förutsättningar och begränsningar för kombination av elektrisk värmning med andra bränslen
15. Lista förutsättningar som är viktiga vid val av elektrisk värmning
16. Redogöra vilka tekniker som finns för elektrisk värmning
17. Redogöra vilka störningar elektrisk värmning kan påföra elnätet

*Figur 1 Punkter /frågeställningar som diskuteras i rapporten*

Inledningsvis i projektet identifierades och kartlades dessa punkter mot varje deltagande företags behov. Detta åskådliggjordes och visas i översikten i Figur 2 och är kopplat till de fall som de deltagande företagen fann relevant.

| Företag                             | Fallstudie                                                                                                   | Beskrivning                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| SSAB EMEA AB - Borlänge             | Förberedande värmning                                                                                        | Idag värms ämnen 220 x (750-1700) x (5000 – 11 000) [HxBxL] från rumstemperatur upp till 1200-1280C. Ugnarna har en nominell kapacitet om 300 ton/h, dvs 600ton/h går att producera i ifall bägge ugnarna är igång. Värmningen är uppdelad efter kampanjer, L = 1170 C, M=1220C, H=1250C och S=1280C. S kampanj har dessutom krav på upplösning av karbider vilket i praktiken sköts via att man styr så att tid över temperatur ska upprätthållas. T.ex. 20 min över 1220C.                                                                                                                                               | 1 |   |   | 1 |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | 1  |    |    |
| SSAB EMEA AB - Borlänge             |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| SSAB EMEA AB - Oxelösund            |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| SSAB EMEA AB - Oxelösund            |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| SSAB EMEA AB - Oxelösund            | Förvärmning, varmhållning                                                                                    | 1.ÄFörvärmning av kalla moderämnen, 0-300 °C. T.ex. induktionsugn. 2.ÄDiffusionsugnar för skurna eller sågade orderämnen. C:a 600 °C. Isolerade huvar med elvärmeelement. 3. ÅHållugnar för tillkapade orderämnen vid stränggjutningen utan diffkrav. C:a 300 °C. 4. ÄFörvärmning före konventionella ämnesugnar. 300-600 °C. Induktionsugnar. 5. ÄElektrisk värmning i befintliga ugnars mörkzoner. 600-800 °C. Följd av konventionell fossil eldning, 800-1050 °C. 6. ÅUgn för justering för ämnen med specifika temperatur och/eller hålltidskrav. Öppen råga om konventionell fossil eldning eller elektrisk värmning. | 1 |   |   | 1 |   | 1 | 1 |   |   |    |    |    |    |    | 1  | 1  |    |
| Outokumpu – Degerfors Long Products |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Outokumpu – Fagersta Stainless      |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Outokumpu – Fagersta Stainless      | Verkningsgrad Egenskaper induktion                                                                           | Tillgång till två induktionsugnar samt resestiv värmning vid transport                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 1  |    |
| Outokumpu -Avesta                   | Stegbalksugnar el konvertering                                                                               | Gasoleldade 2-3 timmars genomloppstid Värmning från 20° till 1250°C 100 ton / timme per ugn Ämnesformat: 2 meter x 140 mm x 10 meter 1-1,5 meter x 200 mm x 10,5 meter Ämnesvikt ca 23 ton Ugnslängd idag ca 20 meter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1 | 1 | 1 |   |   | 1 | 1 | 1 |   | 1  | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    |
| Kanthal AB - Västerås               | CASE STUDY 1. FURNACE FOR INGOT HEATING                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1 | 1 |   |   |   |   |   |   | 1 | 1  |    |    |    |    |    |    |    |
| Kanthal AB - Västerås               | CASE STUDY 2 FURNACE FOR INGOT HEATING                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |   |   | 1 | 1  |    |    |    |    |    |    |    |
| Kanthal AB - Västerås               | CASE STUDY 3 FURNACE FOR BILLET HEATING                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |   |   | 1 | 1  |    |    |    |    |    |    |    |
| Uddeholm - Hagfors                  | 1. Elektrifiering högt temp ugn 2. Elektrifiering Gropugn 3. Case för konvertering ekonomisk sammanställning | Konvertering från fossileldad ugn till elektrisk värmning. Ugnen går normalt i temperaturintervallet 1200 - 1300 grader men kan även gå upp till 1340.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1 | 1 |   |   | 1 |   |   |   |   |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |
| Ovako - Hofors                      |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   | 2 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| AGA/Linde - Stockholm               | Atmosfär påverkan vid elektrisk ämnesvärmning                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| AGA/Linde - Stockholm               |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
| COWI                                |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |   | 1 |   |   |   |   |   |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  | 1  |
| Summa                               |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 5 | 5 | 2 | 0 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4  | 1  | 0  | 1  | 4  | 4  | 4  | 0  |

Figur 2 Översikt punkter/frågeställningar gentemot deltagande företags behov

För att möjliggöra en gradvis och hanterbar omställning i termer av tid, kostnad och utförande var det speciellt värdefullt att betrakta möjligheterna med elektrisk förvärmning i kombination med existerande ugnar (hybridsystem). I syfte till att göra det arbetet mer konkret, specifikt och hanterbart mot bl.a. leverantörer samt intressant för flest deltagare beslutades det i projektet att välja ett av de diskuterade fallstudierna och därmed att utgå för vidare arbete i projektet utifrån den fallstudie som baseras på SSAB Borlänges stegbalksugn. Denna fallstudie beskrivs vidare i Bilaga A och Bilaga 1 till denna rapport.

Frågorna har besvarats genom samarbete, aktivt utbyte av information, erfarenheter samt expertis. Exempelvis har de olika deltagande organisationerna bland annat tagit ledningen för att bidra med kompetens inom ett antal relevanta områden:

- Outokumpu (Fagersta): Bidrar med erfarenheter från installationen av elektrisk ämnesvärmning i sin anläggning.

- b. Ovako: Bidrar med erfarenheter av effektregering samt de störningar som kan påföras elnätet.
- c. Uddeholm: Bidrar med underlag från ”business case” och övergripande ekonomiska kalkyl för elektrifiering av ugn med naturgaseldad brännare.
- d. SSAB: Bidrar med underlag och diskussioner kring vald fallstudie samt införskaffandet av kunskap om grundläggande orsaker till fenomen genom beräkning och simulering.
- e. Kanthal: Bidrar med beskrivelse och ökad förståelsen för värmning med hjälp av resistiva värmeelement.
- f. Linde: Bidrar till ökad förståelse för grundläggande orsaker och påverkan från olika gaser i ugnsatmosfär.
- g. Inductotherm & SMS (leverantörer av induktionsvärmningsugnar): Leverantörer har ingått ett samarbete med projektet som är baserat på fallstudien SSAB Borlänge stegbalkugn. Syftet har varit att bidra med teknisk kunskap, generell men även leverantörernas ”best available technology” samt även besvara en del konkreta frågeställningar som har ansetts relevanta för projektet.
- h. Deflexional: Bidragit med kunskap kring olika simuleringsverktyg samt effekter av induktionsvärmning på material.

COWI och Ferroman: Bidragit med projektledning, sammanställning av resultat, analys samt inrapportering till Energimyndigheten

## 4. Resultat

De värmningssystem som i detta projekt valts för studie, är elektriska och kan mycket väl vara i drift 2045 då Sverige enligt regeringens mål skall vara ett land med netto-noll CO<sub>2</sub> utsläpp. De tekniska lösningar som projektgruppen har identifierat med störst potential är följande; Elektriskt Resistiva Värmeelement, Induktionsvärmning, Plasmabrännare. Innan detta projekt påbörjades, diskuterades den framtida potentialen för plasmabrännare ingående. Efter samtal med tillverkare och experter inom plasmabränning bedömdes forskningsbehovet för Plasmabrännare, vara så pass stort att det skulle hanteras i ett separat projekt vid namn PLATIS. Projektet PLATIS utreder plasmateknikens förutsättningar av funktion och prestanda för ämnesvärmning genom specifika försök. En kort redogörelse av tekniken återfinns i denna rapport med referens till rapporten för, "PLATIS - Plasmateknik i stålindustrins ugnar".

### 4.1 Redogörande av tekniker som finns för elektrisk värmning

#### 4.1.1 Elektriskt Resistiva Värmeelement

Elektrisk värmning med resistiva värmeelement är en väl etablerad och beprövad värmningsteknik. Tekniken använder elektrisk ström som genererar värme i ett värmeelement konstruerat i ett material med högt och väldefinierat elektriskt motstånd. Värmen från elementen överförs sedan i huvudsak via strålning till det gods som ska värmas eller värmebehandlas.

Inom stålindustrin används denna teknik för elektrisk värmning i nuläget främst i ugnar för värmebehandlingsoperationer i temperaturer under ca. 1150°C - 1200°C. Några av fördelarna med tekniken är:

- Hög energieffektivitet, då energiförluster från varma avgaser elimineras eller kraftigt minskas.
- En förbättrad temperaturkontroll beroende på ökad temperaturjämnhet i ugnar och bättre reglering av värmningseffekt.
- Minskade utsläpp av koldioxid samt andra förbränningsgaser såsom NO<sub>x</sub> och SO<sub>x</sub> (kväve- och svaveloxider).
- Arbetsmiljöfördelar såsom sänkt ljudnivå.
- Ett förenklat underhållsarbete.

De elektriska värmeelementen tillverkas vanligen av metalliska material men keramiska material används också för ett högre temperaturområde. De metalliska materialen kan vara järnbaserade ferritiska legeringar av FeCrAl-typ eller nickelbaserade austenitiska legeringar.

Keramiska värmeelement används främst för sin förmåga att klara högre

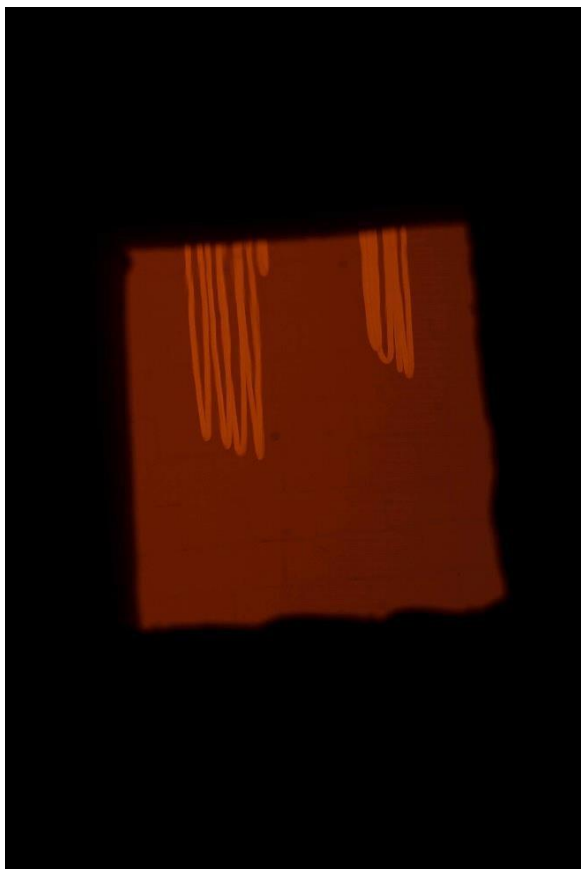
användningstemperatur. Några vanliga keramiska material för värmeelement är kiselkarbid ( $\text{SiC}$ ) och molybdendisilicid ( $\text{MoSi}_2$ ). Dessa material kan vara aktuella för ämnesvärmning med värmningstemperaturer upp mot  $1300^\circ\text{C}$ .

Ett exempel på elektrisk ämnesvärmning i drift i produktionsmiljö finns på Kanthal i Hallstahammar. Kanthal är ett av de deltagande företagen i projektet och är leverantör av material för elektrisk värmning och systemprodukter för industriell elektrisk värmning. I Hallstahammar används elektrisk värmning av ämnen i gropugnar och stegbalksugn. Värmeelementen som används är av Kanthal Super ( $\text{MoSi}_2$ ). Bilderna nedan visar dessa installationer.



*Figur 3 Elektriskt värmd gropugn på Kanthal i Hallstahammar*





*Figur 4 Elektriska värmeelement i stegbalksugn på Kanthal i Hallstahammar*

Storskalig användning av resistiva element vid högre temperaturer och krävande atmosfärer har varit begränsad, trots flertalet exempel på användning vid 1200 °C och uppåt från t.ex. glasindustrin, keramik industrin och halvledarindustrin. Nya material med högre värmetålighet öppnar möjlighet för ämnesvärmning upp mot 1300 °C, dessa material (oftast keramiska) kan dock vara känsliga för inert atmosfär. Kanthal har under lång tid drivit utvecklingen framåt och har flertal system och lösningar för olika applikationer.

Återuppvärmningsapplikationer inom stålindustrin kännetecknas generellt av relativt höga driftstemperaturer där 1150-1300°C är ett vanligt temperaturområde. Dessutom är eftervärmningsugnarna stora konstruktioner med typisk längd och bredd som överstiger 10 m. För närvarande är de i allmänhet gaseldade och effektnivåer runt 100 MW är vanliga.

Storleken och effektnivåerna för dessa ugnar är höga jämfört med befintliga elektriskt uppvärmda ugnar. Ugnstemperaturerna ligger inom ett högt intervall för element gjorda av metalliska material såsom FeCrAl-legeringar, vilket gör det utmanande att tillhandahålla tillräckligt med elektrisk kraft med hjälp av metalliska värmeelement vid de högsta ugnstemperaturerna.

Elvärme har en högre energieffektivitet jämfört med gaseldade ugnar. En huvudfaktor är minskningen av energiförluster från heta avgaser från gaseldade ugnar, se Figur 5. En konvertering till elvärmeteknik behöver inte ge den fulla effekten som används för gasuppvärmning. Ett grovt riktvärde är att 70 % av den gaseldade effekten behövs för ett elvärmesystem.

Table 1. Scenario for the replacement existing fuel based technology with electric heated furnaces.

| <b>Hot rolled steel, Germany 2015</b>                                       |                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| • Production                                                                | 40.4 10 <sup>6</sup> t (23.8 10 <sup>6</sup> t/yr flat steel)                     |
| <b>Reheating in gas fired pusher type and walking beam furnaces</b>         |                                                                                   |
| • Enthalpy difference load                                                  | 225 kWh/t                                                                         |
| • Spec. fuel consumption                                                    | 1,25 to 1,4 GJ/t (350 to 390 kWh/t)                                               |
| • Efficiency:                                                               | 58 to 65 %                                                                        |
| • Spec. Fuel consumption                                                    | <b>14.1 to 15.8 TWh<sub>fuel</sub>/yr</b>                                         |
| <b>Reheating in resistance heated pusher type and walking beam furnaces</b> |                                                                                   |
| • Efficiency el. furnace                                                    | 0.85 % (13 % wall and skid losses, 2 % others)                                    |
| • Electricity                                                               | <b>11 TWh<sub>el</sub>/yr</b>                                                     |
| <b>Consumption of renewable electricity</b>                                 |                                                                                   |
| • Electricity from wind (2015)                                              | 88 TWh <sub>el</sub> /yr (Percentage for steel preheating for HR: <b>12.5 %</b> ) |
| • Electricity from PV (2015)                                                | 39 TWh <sub>el</sub> /yr (Percentage for steel preheating for HR: <b>28.2 %</b> ) |

Figur 5 Scenario utbyte av bränslen i ugnar mot elektriskt värmda ugnar, (Pfeifer, 2017)

Några ytterligare utmaningar att överväga för konvertering till elvärme med resistiva element är:

- Val av ugnsatmosfär. För närvarande används avgaser från gaseldningen. Atmosfärer i en elektrisk uppvärmd ugn måste ta hänsyn till både elektriska värmeelement och oxidskalbildning på uppvärmda varor.
- Tillräcklig konvektion i ugnen för uppvärmning i lågtemperaturområden för att uppnå tillräckliga uppvärmningshastigheter i detta temperaturområde.
- Temperaturjämnhet under uppvärmning för att undvika förvrängning eller överhettning av uppvärmda varor.

I följande avsnitt beskrivs olika typer av värmeelement som anses vara potentiella kandidater för el konvertering av värmningsugnar.

### Typer av värmeelement

#### Värmeelement av kiselkarbid

En vanlig typ av keramiska värmeelement är baserade på kiselkarbid. Kiselkarbidvärmeelement ger ökade drifttemperaturer jämfört med metalliska värmeelement och de används idag vid smältning av glas och icke-järnmetaller, värmebehandling av metaller, floatglasproduktion, tillverkning av keramik och elektronikkomponenter. Kiselkarbidelement skyddas genom bildning av ett skyddande ytskikt av kiseldioxid (SiO<sub>2</sub>) vid höga temperaturer i oxiderande atmosfärer. Kanthal tillverkar värmeelement av kiselkarbid med varumärket Kanthal® Global®.

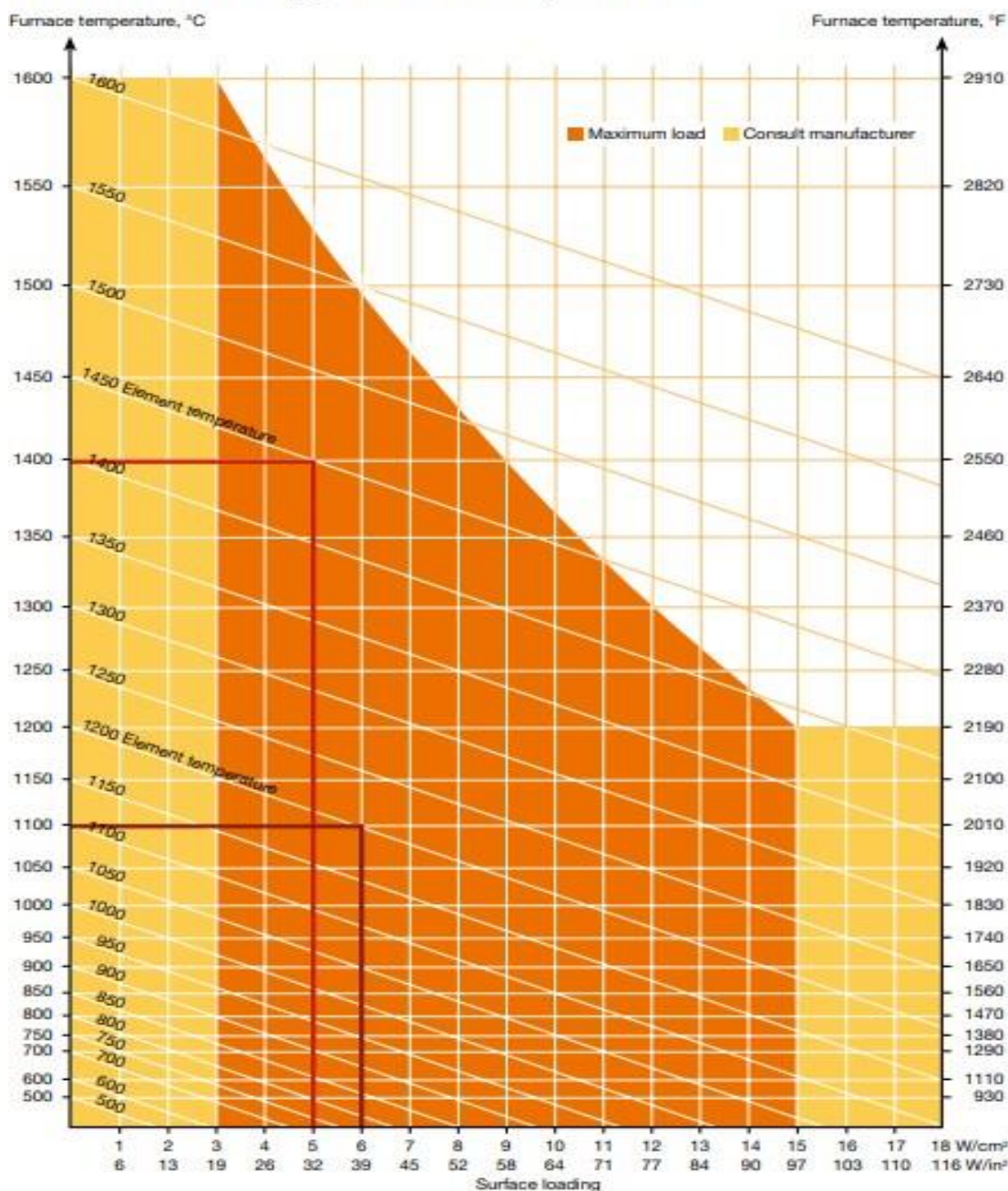
Kanthal® Global® SD (SiC)-element tillverkas i re-kristalliserad alfa-kiselkarbid och har designats för att maximera prestanda inom det bredaste utbudet av högtemperaturutrustning. Kanthal Global SD-element används i applikationer som sträcker sig i temperaturer från under 600°C upp till 1600°C i både luft och kontrollerad atmosfär, även om typen av atmosfär som används avgör det högsta rekommenderade elementets temperatur. Kanthal Global SD-element kan monteras antingen vertikalt eller horisontellt, och eftersom materialet förblir styvt, även vid maximala drifttemperaturer, krävs inga speciella stöd. Kanthal Global SD-element kommer också att acceptera betydligt högre elektriska belastningar än metalliska element samtidigt som de bibehåller överlägsen prestanda i både kontinuerliga och intermittenta värmeprocesser. Dessa faktorer kan resultera i avsevärda besparingar i ugnskonstruktionskostnader och underhållet förenklas avsevärt. Element kan normalt bytas ut snabbt, även när ugnen är varm, för att minimera stilleståndstiden. Kanthal Global SD-element finns i form av rundsektionsstavar eller rör, i diametrar från 10 mm–55 mm (0,39–2,17 tum). För raka element är den maximala totala längden på elementet 3300 mm med en varm zon på 2400 mm. För flerbenselement (U-form) är den maximala totala längden 2100 mm med en varm zon på 1400 mm.



*Figur 6 Vanliga exempel på Kanthal Global SD (SiC) värmeelement*

En utgångspunkt för design av ett värmesystem baserat på Kanthal Global SD baseras normalt på rekommendationer av elementbelastningar (eleffekt per ytenhet) som kan användas för den aktuella ugnstemperaturen. Designriktlinjerna visas i Figur 7 nedan.

Recommended element loadings for Kanthal Globar SD operated in air



Figur 7 Rekommenderade elementladdningar för Kanthal Globar SD drivs i luft. Från Kanthal® Globar® SD handbok för värmeelement av kiselkarbid)

Som framgår av diagrammet i Figur 7 ovan för återuppvärmning av ugnar som arbetar med ugnstemperaturer i området 1150-1300°C är den maximala yteffekt (elektrisk effekt per ytenhet av elementytan) cirka 12 W/cm<sup>2</sup> med motsvarande elementtemperatur mellan 1400-1450°C enligt diagrammet ovan. Detta kan översättas till väggeffekt (elektrisk effekt per ytenhet av ugnsvägg eller tak).

Typiska installationer arbetar med väggeffekt runt 75kW/m<sup>2</sup> i detta temperaturområde, även om det teoretiskt är möjligt att designa för

väggeffekt över 100kW/m<sup>2</sup>. Värmeelementets temperatur är proportionell mot elementets yteffekt och därför kommer användning av hög yteffekt i allmänhet att resultera i en kortare elementlivslängd och ökad risk för tidigt brott.

Diagrammet i Figur 8 gäller för element som verkar i luft. För elvärme i ämnesvärmningsugnar kan flera olika atmosfärer vara aktuella. Detta kan ha en betydande inverkan på vilka elementtemperaturer som är möjliga.

**Maximum element temperature in various atmospheres**

| Atmosphere          | Maximum element temperature<br>°C °F |      | Comments                                  |
|---------------------|--------------------------------------|------|-------------------------------------------|
| Clean dry air       | 1625                                 | 2950 | 1500°C (2730°F) for 3-piece construction  |
| Pure oxygen         | 1500                                 | 2730 | Faster oxidation than in air              |
| Nitrogen            | 1350                                 | 2460 | Forms silicon nitride at >1350°C (2460°F) |
| Dry hydrogen        | 1200                                 | 2190 | Oxidizes in wet hydrogen                  |
| Dry exothermic gas  | 1400                                 | 2550 | Very dependent on composition             |
| Dry endothermic gas | 1250                                 | 2280 | Very dependent on composition             |
| Vacuum              | 1200                                 | 2190 | Generally for short term use only         |

*Figur 8 Maximala rekommenderade elementtemperaturer för Kanthal Global SD-element i olika atmosfärer (endast riktvärden).*

#### Molybdendisilicid (MoSi<sub>2</sub>) värmeelement

En alternativ typ av keramiska värmeelement är baserade på molybdendisilicid (MoSi<sub>2</sub>). Dessa kan arbeta vid mycket höga temperaturer (upp till 1850°C) i oxiderande atmosfärer. Dessa typer av värmeelement används ofta inom glasindustrin, keramik industrin och vid tillverkning av elektroniska komponenter. De flesta molybdendisilicidelement skyddas genom bildning av ett skyddande ytskikt av kiseldioxid (SiO<sub>2</sub>) vid höga temperaturer i oxiderande atmosfärer även om det finns versioner legerade med aluminium som bildar en aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) skyddande ytoxid. Kanthal tillverkar molybdendisilicidelement med varumärket Kanthal® Super.



*Figur 9 Exempel på Kanthals super värmande element*



6

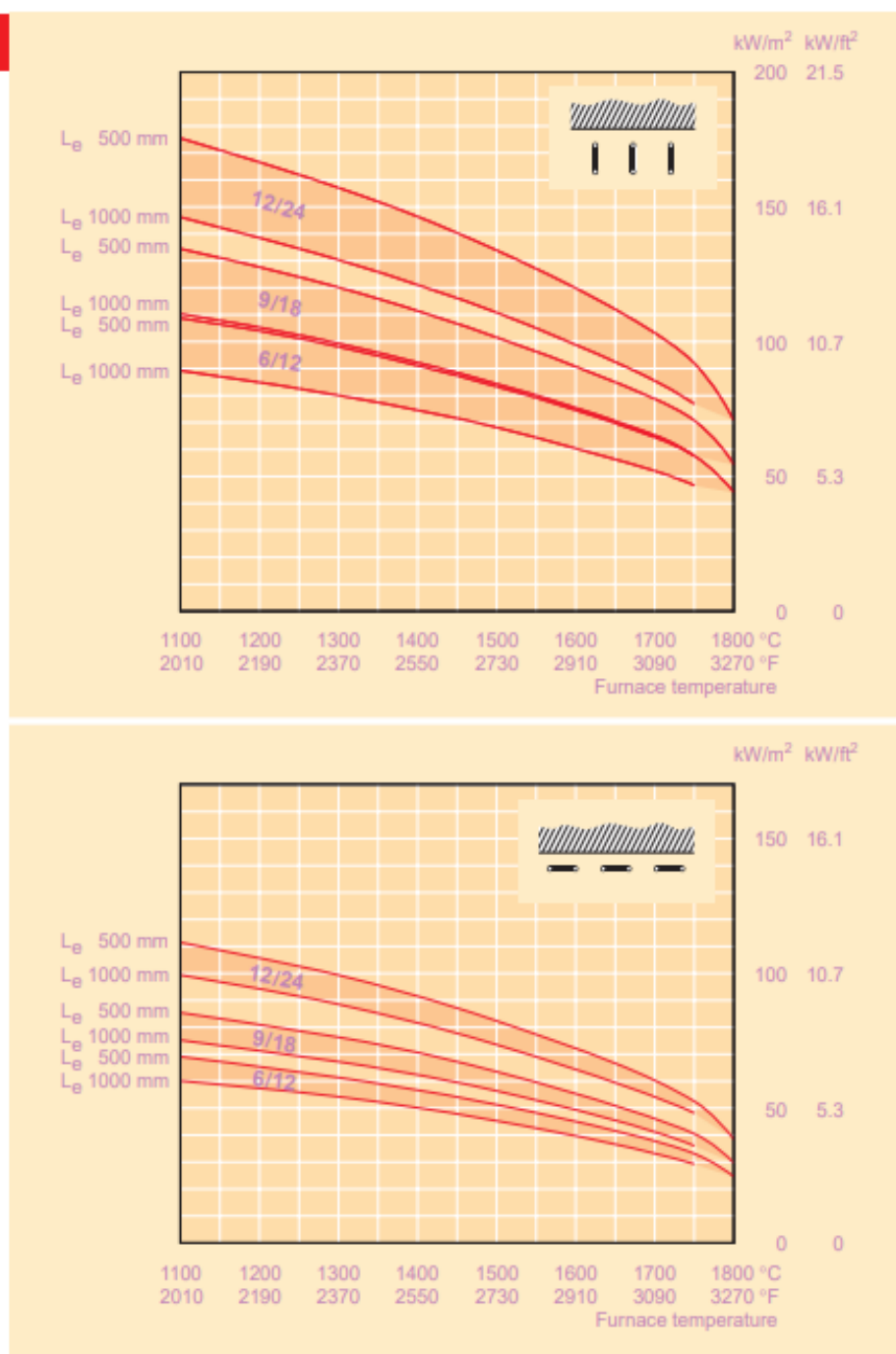


Fig. 29 Maximum recommended wall loading as a function of the furnace temperature for different element diameters and mode of installation.

Figur 10 Maximal rekommenderad vägg infästningsbelastning som funktion av temperatur för olika diametrar av element

## Elektriska värmeelement av metallisk typ

Inom industriell elektrisk värmning i stål- och metallindustrin används vanligtvis värmeelement som tillverkas av metalliska material. Dessa kan vara av järnbaserade ferritiska legeringar av FeCrAl-typ eller nickelbaserade austenitiska legeringar. FeCrAl-legeringarna har en högre maximal användningstemperatur jämfört med de nickelbaserade legeringarna vilket medger att högre yteffekter och högre temperatur på värmeelement av FeCrAl-typ kan användas. Den maximala elementtemperaturen som kan användas på ett värmeelement av FeCrAl-typ är uppemot 1400°C. Detta förutsätter ett elementmaterial av hög kvalitet och en korrekt design av värmeelementen. Värmeelementens livslängd vid dessa höga temperaturer blir också begränsad.

I vanligt förekommande installationer av elektriskt värmda ugnar så används element av FeCrAl-typ i ugnar upp till ugnstemperaturer på ca. 1200°C. Vid användning av nickelbaserade element så är det vanligt med ugnstemperaturer upp till ca. 1025°C.

De elektriska värmeelementen tillverkas vanligen från tråd eller bandmaterial genom spiralisering eller böckning.



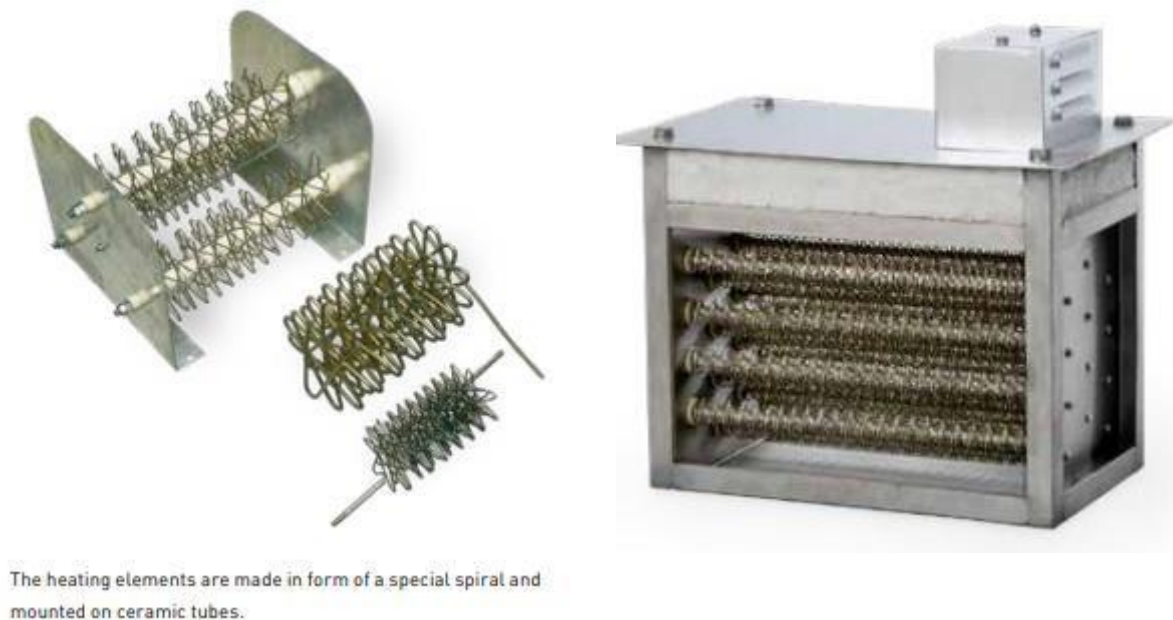
*Figur 11 Exempel på metalliskt värmeelement tillverkad av böckad tråd av FeCrAl-typ. (Kanthal® Fibrothal TM modul)*



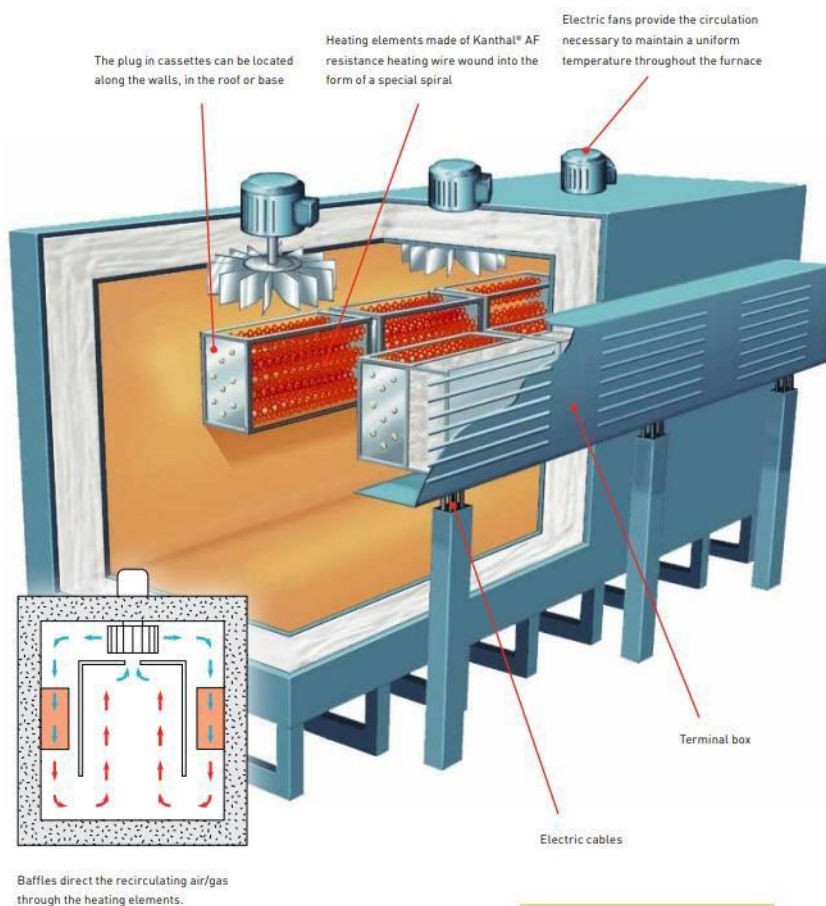


*Figur 12 Exempel på metalliskt värmeelement monterat i skyddande strålningsrör (Kanthal® Tubothal® heating element)*

För elektrisk ämnesvärmning så begränsas användningen för metalliska värmeelement av höga effektbehov samt de höga ugnstemperaturer som förekommer, främst i de sista delarna av en ämnesvärmningsugn. I de inledande delarna av en ämnesvärmningsugn där ämnestemperaturen är låg skulle metalliska värmeelement kunna erbjuda ett alternativ. Särskilda elementdesigner finns tillgängliga för att skapa stor konvektion i ugnsatmosfären med god temperaturjämnhet och minska risken för formförändringar i det värmda godset, att det “slår” sig. Sådana ugnsgdesigner används exempelvis vid varmbearbetning av aluminium som kräver lägre värmningstemperaturer (ca 600°C). Exempel på sådana designer av element och ugnar visas i Figur 13 nedan.



*Figur 13 Värmeelement av porcupine-typ avsedda att skapa stor konvektion och värma ugnsatmosfärer upp till max ca. 800°C*

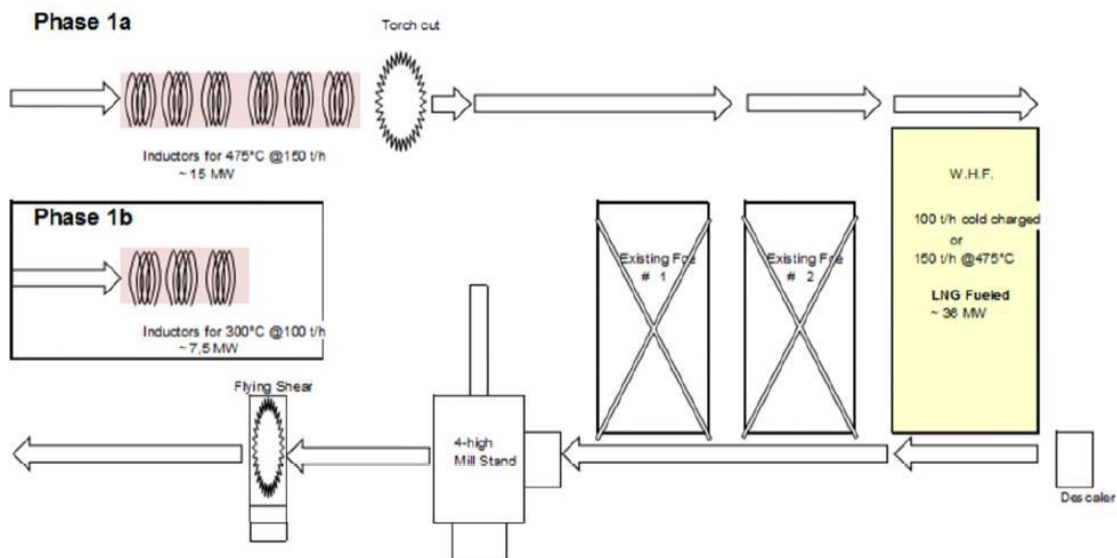


*Figur 14 Exempel på ugnsdessign med porcupine element och fläktar för god konvektion, temperaturjämnhet och värmeöverföring.*

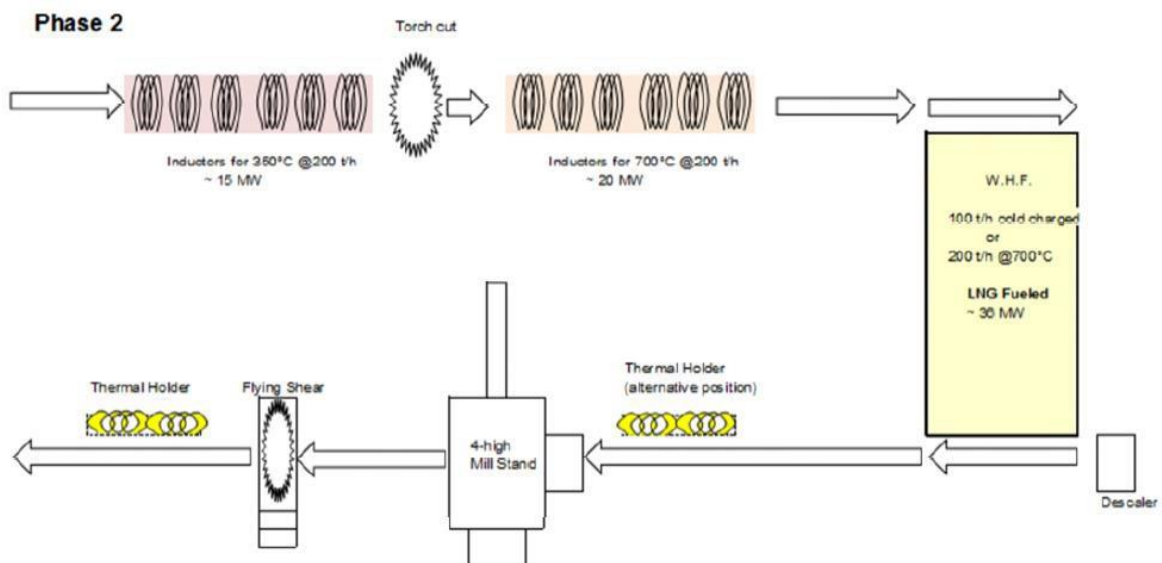
#### 4.1.2 Induktionsvärmning

Induktionsvärmning kan användas som en snabb och flexibel värmekälla. Den mest fördelaktiga induktionsuppvärmningen är där den höga effekttätheten som kan uppnås kan användas. Komplettering före eller efter en ugn är en av de möjliga tillämpningarna (M, 2021).

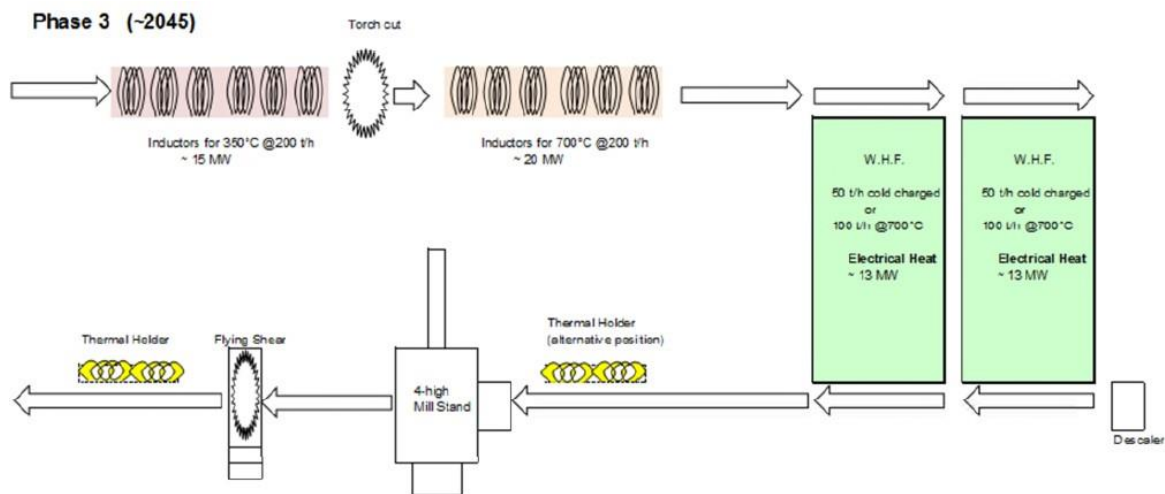
Figurerna nedan är exempel på hur en sådan komplettering kan utföras med utgångspunkt i en studie som gjordes för SSAB Oxelösund av SMS Group, ref Bilaga 3.



Figur 15 Fas 1a ("Phase 1a") Förvärmning av ämnen via induktion. Fas 1b visar på en förvärmning med mindre kapacitet som kan anpassas behovet och i senare faser byggas ut för att uppnå kapaciteten i Fas 1a.



Figur 16 Fas 2 visar förvärmning med ytterligare ett set induktionselement, installerad i serie för att på så vis öka produktionsvolymen.



Figur 17 Fas 3 visar en potentiell framtid där fossila bränslen ej längre används i värmningsprocessen (helelektrifiering) och är ersatta med resistiva element i kombination med induktionsförvärmning.

Induktionsuppvärmningstekniken bygger på att växelström matas från generatoren till en spole (induktor). Induktionsuppvärmning är ett sätt att överföra termisk energi i metaller på ett effektivt, flexibelt och snabbt sätt. Enligt Lenz lag skapas ett magnetfält inuti en induktionsspole om den utsätts för högfrekvent växelström (AC), magnetfältet inducerar i sin tur höga strömnivåer inuti ett metallföremål som placerats i spolen. Sådan ström kommer snabbt att värma eller smälta metallföremålet på grund av Joule-effekten; Värmen som alstras i ett objekt är proportionellt mot objektets elektriska motstånd (resistans). Då stål har mycket högre elektrisk resistivitet jämfört med koppar eller aluminium kan det induktionsuppvärmas mycket mer effektivt. Dessutom är

induktionsuppvärmningsprocessen mer effektiv om metallobjektets form är regelbunden (till exempel rektangulära ämnen, kvadratisk göt eller rund stång) samt om utformningen av induktionsspolen motsvarar objektets och dess induktiva koppling till objektet (skäligt avstånd mellan spole och objekt). (Opezzo)

Kolstål (som är ett ferromagnetiskt material upp till Curie-punkten) kan förvärmas mycket effektivt på grund av sina magnetiska egenskaper. Därför är induktionsförvärmning av kolstålsämnen under Curiepunkten en mycket effektiv process, med motsvarande låg energiförbrukning och låga driftkostnader.

Däremot, när ferromagnetiska material överstiger Curie-punkten förlorar de sina magnetiska egenskaper med den direkta konsekvensen att penetrationsdjupet blir anmärkningsvärt högre och induktionsvärmeeffektiviteten minskar. Detta liknar förhållandena för

austenitiskt rostfritt stål som med induktion värms mindre effektivt jämfört med kolstål (eftersom material i austenitiska rostfria stål är icke-magnetiska vid rumstemperatur och således inte har någon Curie-punkt). Trots detta kan ferromagnetiskt material ovanför Curie-punkten och austenitiska material värmas även induktionsteknik. (Opezzo)

En framträdande egenskap vid induktionsvärmning är att höga effekter kan överföras under kort tid, detta möjliggör att tekniken kan användas för snabb uppvärmning. Genom att rikta magnetfält kan systemet anpassas för att optimera värmningen. Inträngningsdjupet (1–20 mm) i ämnet är i relation till ämnets magnetiska egenskaper samt frekvensen på strömmen i spolen och kan i viss mån styras. Tekniken är generellt energieffektiv men förluster uppkommer då induktorns spole behöver kylas, speciellt vid värmning till höga temperaturer.

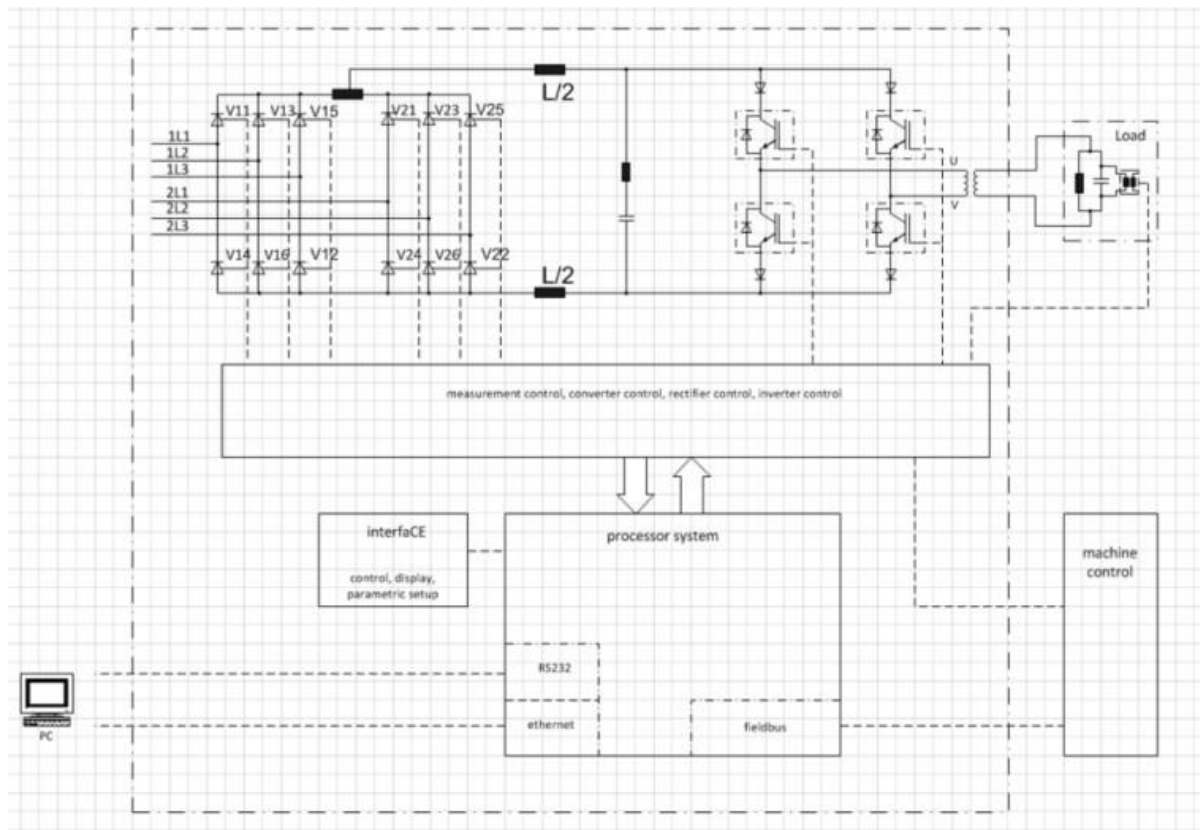
Induktionsvärmning kräver utrustning så som sofistikerade nätaggregat och frekvensomvandlare samt robusta, effektiva och pålitliga induktionsspolar. Robust, effektiv och pålitlig ämnestransport genom induktionsspolorna är viktigt. Detta i kombination med noggranna sensorer (så som pyrometrar och doppler laserhastighetsmätare) och sofistikerad mjukvara som kan garantera exakt och effektiv uppvärmningsprocess i kombination med den 100% tillförlitligheten som krävs för att säkerställa kontinuerlig drift av valsverk nedströms.

Viktiga parametrar vad gäller teknisk utformning av induktionssystem är också konstruktionen runt spolar och värmningssteget. Det beror på att det ovannämnda Lenz lag inte bara gäller för det som skall värmas upp (stålämnen som passerar genom induktionsspolorna), men även för alla metalldelar som är nödvändiga för att bygga själva induktionssystemet. Såsom induktionsspolorna, rullar, lager, växelmotorer etcetera. Alla dessa föremål kan nås av ett induktionsflöde och således bli uppvärmda. (Opezzo)

Typiska huvudkomponenterna i ett induktionsvärmningssystem består generellt av nedanstående:

## 1. Frekvensomformare

Frekvensomformare är avsedda för varvtalsstyrning av olika elmotordrifter. Omvandlarens utgång ska vara ansluten till en last i form av en parallellresonanskrets. Omvandlarens arbetsfrekvens bestäms av resonansfrekvensen för resonanskretsen. Omvandlarenhetens växelriktare är lastkommuterad. Dess klockfrekvens är härledd från resonanskretsens egenfrekvens med hjälp av en fastlåst slinga (Phase Locked Loop, PLL). Ut strömmen och utspänningen från omvandlaren är fas till fas.



Figur 18 Exempel blockdiagram av frekvensomformare (enbart för referens)

Figur 18 förklarar funktionsprincipen för frekvensomformaren. Omvandlarens ingång matas via en omvandlartransformator eller via ledningsreaktorer. En effektbrytare har installerats för att koppla bort frekvensomformaren från elnätet. Vid normal drift slås omvandlaren på/av via en strömkontaktor. DC- länkspänningen och omvandlarens utspänning ställs in via en fullt kontrollerad likriktare. När strömmen stängs av styrs likriktaren så att energin som finns i DC länken matas tillbaka till elnätet. Först då öppnas effektkontaktern.

Den induktiva likströmlänken innefattar väsentligen en reaktor. Reaktorn begränsar rippel av DC länkströmmen och gör att omriktaren beter sig som en strömkälla mot lasten. Vid ett fel begränsar reaktorn strömökningen i DC-länken.

Växelriktaren innefattar en eller flera transistorbryggor. Strömmen som matas in från DC-länken är ansluten till växelriktarens utgång med alternerande polaritet. Den resulterande fyrkantvågsutgången AC matar resonanskretsen och levererar den energi som krävs. Spänningen som genereras i resonanskretsen är praktiskt taget sinusformad.

När anläggningen är ur drift och vid eventuell frost måste omvandlaren skyddas för att undvika frostsador.



## 2. Kondensatorskåp

Kondensatorskåpet innehåller kondensatorerna för den parallella resonanskretsen. Den ansluts på ena sidan via en kabelföljare till utgången på transformatorskåpet. På andra sidan via en solid samlingsskena och en snabbväxlingsenhet till induktorn. Kondensatorerna och interna samlingsskenor är vattenkylda.

Temperaturen på kondensatorerna övervakas via termoelement i höljet till varje kondensator. Vattenflödet genom kondensatorskåpet övervakas av flödesmätare.

### Generell karaktäristik

- Utrustad med vattenkylda kondensatorer.
- Vattenkylda samlingsskenor.
- Intern vattendistribution.



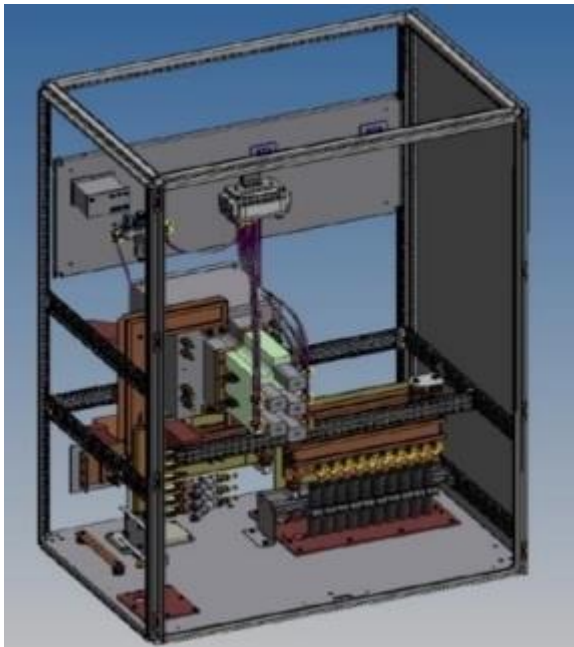
*Figur 19 Exempel på ett kondensatorskåp*

### 3. Mellanfrekvenstransformatorskåp

För effektanpassning vid olika ämnesbredder behövs fem steg av mellanfrekvensspänning för den oscillerande kretsen. I detta skåp finns även samlingsskenor & anslutningsenhet till mellanfrekvenskablar. Skåpet består generellt av:

#### Generell karaktäristik

- MF-transformator.
- Samlingsskenor.
- Anslutningsenhet för MF-kablar och koaxialkablar.
- Stålskåp.



*Figur 20 Exempel illustration layout mellanfrekvenstransformatorskåp*

### 4. Induktor

Induktorn transporterar den elektriska energin från omvandlaren till materialet. Den inneslutna spolen, lamineringarna och frontplåtarna kräver stora mängder vattenkylning och flödes hastigheten övervakas av flödesmätare. Designen av dessa induktorer måste ske på ett sätt så att korrekt funktionalitet under valsverksförhållanden säkerställs.





*Figur 21*

*Exempel på induktor*

#### Generell karaktäristik

- Specialdesignade induktorer för integration i valsverk.
- Sluten design.
- Vattenkylda kopparlindningar.
- Med järnkärna för koncentration av elektromagnetiska fält.
- Monterad på induktoröverföringsvagnar.

#### 5. MF (Mellanfrekvens) strömkablar

Specialdesignade koaxialkablar för strömanslutningen mellan omvandlare och kondensatorskåp.

#### 6. Huvudstyrskåp

#### Generell karaktäristik

- Styrskåp med exempelvis, Siemens PLC.
- Tryckknappar, strömbrytare och indikeringslampor.
- Drift på plats med mobil panel.
- Visualisering integrerad i lokalt operativt HMI-system.
- Försörjning och styrning av drivenheter.
- Hastighetssignalgränssnitt till driftautomationssystem.
- UPS-anslutning från överliggande UPS-försörjning.



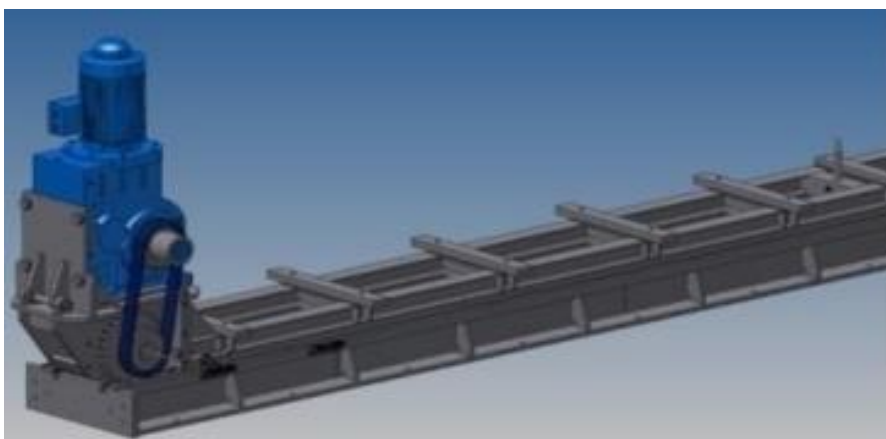
*Figur 22 Exempel styrskåp*

## 7. Induktor överföringsvagn

Stålbasram för att stötta induktorer och kondensatorskåp, monterad på stödräms, förankrad i fundament samt driven av kuggstång och växelriktad motor.

### Generell karaktäristik

- Rörlig induktorenhet som möjliggör rörelse in/ut ur valsverkets mittlinje.
- Överföringsvagn/stålbasram som stöd för induktorer och kondensatorskåp.
- Monterad på stödräms, fixerad i fundament.
- Driven kuggstång.
- NC (Numeric Control) styrd axel.
- Körhastighet max. 150 mm/sek.
- Stålskenor för induktoröverföringsvagnen.

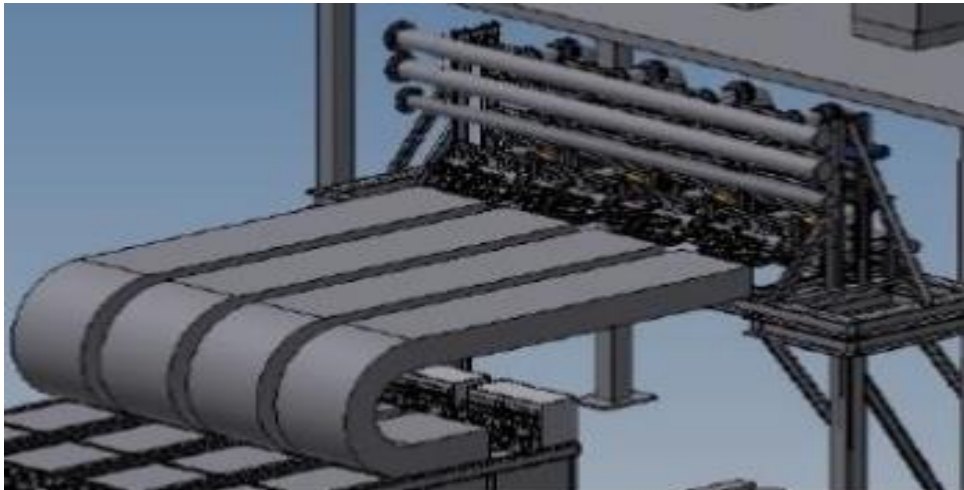


*Figur 23 Exempel illustration på överföringsvagn*

## 8. Kabeldragkedja

### Generell karaktäristik

- För MF-kablar och kylvattenslangar integrerade i en flexibel ram.
- Monterad på induktoröverföringsvagnar.



*Figur 24 Enbart för referens*

#### 9. Kylarenhet för elektriska komponenter

Vatten-vatten-kylningsutrustning för kylning av de elektriska komponenterna induktionsvärmesystemet - förutom induktorerna. Kylaren är installerad på en gemensam basram som även innehåller:

- Pump
- Standby pump
- Värmeväxlare
- Vattentank
- Ventiler och kopplingar
- Regleranordning som säkerställer en konstant vattentemperatur



*Figur 25 Exempel på kylarenhet*

## 10. Kylarenehet för induktorer

Vatten-vatten-kylningsutrustning för kylning av induktorer. Kylaren är installerad på en gemensam basram som även innehåller:

- Pump
- Standby pump
- Värmeväxlare
- Vattentank
- Ventiler och kopplingar
- Regleranordning som säkerställer en konstant vattentemperatur

## 11. Extra Kylare ("Chiller" om nödvändigt)

I tillfälle arbetsvattentemperaturen är mellan 32°C och 35°C behövs en extra kylenhet för kylning av omvandlarna. Kylaren består huvudsakligen av:

- Vattenkyld kondensor
- Plattvärmeväxlare
- Vattentank
- Pumpar

## 12. Nivå 1 automationssystem

Huvudstyrningen för den induktiva värmaren är anordnad i ett styrskåp. Effekten för modulerna beräknas i nivå 1-kontrollen och distribueras därefter till dessa.

Värmemodulerna kan flyttas oberoende av varandra. Rörelsen genomförs av en växelriktad motor.

### 13. Drift och visualisering

Drift och visualisering av den induktiva värmeutrustningen kan som tidigare nämnt ske via ett lokalt HMI-system (Human Machine Interface) och är vidare integrerad med valsverkets överliggande styrsystem/huvudenhet för drift. (M, 2021)

Vissa system gör det möjligt att via HMI'n (Human Machine Interface) ställa in den erforderliga metallföremålsstorleken, materialkvaliteten, återuppvärmnings-temperaturen samt produktivitet (produktivitet som krävs av valsverkets produktion och/eller förbränningsugn nedströms) och automatiskt kan stålämnet köras med lämplig genomströmningshastighet, medan induktionssystemet reglerar till den efterfrågade återuppvärmningstemperaturen. (Opezzo)

#### 4.1.3 Plasmabrännare

I en plasmabrännare omvandlas elektrisk energi till energi som bärs av en het gas. Olika gaser kan nyttjas och forceras genom en spänningssatt dysa, då uppstår en elektrisk urladdning mellan elektroderna och gasen uppnår aggregationstillståndet plasma. Detta leder till extremt höga temperaturer då molekylernas beståndsdelar skiljs åt och elektronerna rör sig fritt från kärnan. De flesta gaser kan upphettas till detta tillstånd, vilket ger stora möjligheter att designa processer efter gasens användningsområde. Dagens tillämpningar och applikationer med termisk plasma är inriktade på de metallurgiska processerna, där plasmageneratorer används för att ersätta andra el-baserade värmekällor. Som värmningsmetod annat än högintensiv punktvärmning är tekniken relativt utforskat.

De främsta fördelarna med plasmabrännare jämfört med andra alternativ är den höga temperaturen i plasmastrålen, plasmans höga energitäthet och möjligheten att använda olika plasmagaser beroende på önskad applikation. Att ersätta fossilbränslebrännare med plasmabrännare kan också leda till lägre driftskostnader och utsläpp av växthusgaser. Andra fördelar inkluderar kontrollerad processkemi, små installationsstorlekar och snabba start- och avstängningsfunktioner. Plasmabrännare är relativt lätta att installera i en befintlig ugn utan att behöva modifiera den.

Strömeffektiviteten för de termiska plasmabrännarna ligger i intervallet 75-95 % beroende på typen av plasmabrännare. DC-plasmabrännare har vanligtvis en lägre verkningsgrad än AC-plasmabrännare på grund av energiförlusten i ACDC-likriktaren.

Några generella utmaningar är processens NO<sub>x</sub>-bildning, systemeffektivitet och underhållskostnader, men även design och uppskalning i nästa steg.

Plasmatekniken har potential att implementeras i både nya och befintliga ugnar. Tekniken bedöms passa bäst i värmningsprocesser där hög temperaturer >1000oC eller viss atmosfär eftersträvas. En recirkulation av gaser är fördelaktigt för att minimera NO<sub>x</sub>-utsläpp och minska kostnaden för gas. Användning av N<sub>2</sub> (kvävgas) och CO<sub>2</sub> som energibärare ger lägre gasflöden än gasol/luft- förbränning, vilket bör beaktas vid både nykonstruktion och ombyggnad.

Sammanfattningsvis kan sägas om

Plasmabrännare: Fördelar:

- Höga driftstemperaturer
- Hög uppvärmningshastighet
- Flexibla processgaser

Utmaningar:

- Betydande mängd energiförlust på grund av plasmakylning
- Energiförlust i likriktaren vid DC-plasmabrännare
- NO<sub>x</sub>-utsläpp i närvaro av luft
- Ytterligare elproduktion och nätkapacitet när den appliceras på storskaliga ugnar (Tarantino, 2021)

## 4.2. Viktiga förutsättningar vid val av elektrisk värmning

Vid val av elektrisk värmning är följande förutsättningar viktiga att fastställa:

- temperatur som materialet skall värmas till
- vilket effektbehov som finns (storlek på ämne och genomlöphastighet)
- lokala förutsättningar vad gäller utrustningens storlek (platsbehov), kylkapacitet i form av kylvatten, kraftöverföring (ställverk och lokala nätkapaciteter)
- ugnens körmönster, tex ifall man har värmningskurvor med hålltider osv.
- mix av material som genomgår ugnen (Dimensionsförändringar)
- materialens legeringskomposition

### 4.2.1 Viktiga förhållanden beträffande resistiva elektriska värmeelement

Resistiva elektriska värmeelement i kombination med gasvärmning

En tekniskt intressant frågeställning är om resistiva elektriska värmeelement kan användas i kombination med gasvärmning. Detta kräver att elementen används i existerande ugnsatmosfär d.v.s. förbränningsgaser från gasbrännare. Detta är tekniskt intressant då man behåller nuvarande ugnsatmosfär med känd inverkan på det värmda godset. Det är också en flexibel lösning där gas och elvärmning kan

delvis ersätta varandra. Dock torde underhåll och styrning av ugnen bli mer komplicerat med två olika värmningssystem i drift samtidigt.

En huvudfrågeställning är om de material som används i de resistiva värmeelementen kan operera i de förbränningsgaser som utgör gasatmosfären i ugnen utan korrosionsproblem.

Metalliska värmeelementsmaterialen av FeCrAl-typ har viss användning som konstruktionsmaterial i gasbrännare för exempelvis brännarytor och strålningsrör för gaseldning. Dessa legeringar är beprövade i användning där de utsätts för förbränningsgaser. Som framgått av tidigare diskussion så är metalliska element troligen inte aktuella i de delar av en värmningsugn där temperaturen är som högst. De kan dock vara ett alternativ nedströms i ugnen där temperaturerna är lägre.

För de keramiska värmeelementmaterialen är erfarenheter av exponering och drift i förbränningsgaser klart mer begränsade. I nuläget finns enstaka försök med positiva indikationer men ingen fullskalig installation. En sådan installation skulle behöva föregås av applikationsnära försök, testning och validering för att begränsa den tekniska risken.

Temperaturvariationer vid ugnschargering

I elektriskt värmda ugnar kan värmeelementen utsättas för kraftiga temperaturvariationer. Exempel på detta är element i ingångszoner på ugnar som kyla då ett ”kallt” ämne transporteras in i ugnen. Ett annat exempel är batchugnar då ugnsluckor öppnas och ugnen chargeras med gods vid låg temperatur för värmning. Sådana temperaturvariationer innebär en viss påfrestning på värmeelementen då kraftiga termiska gradienter och medföljande mekaniska spänningar kan resultera i avsprättning av skyddande oxid, samt deformation och formförändring av värmeelementen. Då resistiva värmeelement använts i stor skala under lång tid är det en relativt välkänd problematik. Genom att arbeta med ugnskonstruktion, styrsystem och körsätt för ugnen så kan man minska de temperaturvariationer som elementen utsätts för. Exempel på sådana åtgärder är:

- Materialval och design i infodring, exempelvis ger en infodring av ugnstegel en stor termisk massa i ugnen och minskar de temperaturvariationer som elementen utsätts för.
- Styrsystem för ugnar kan utvecklas och modifieras för att minska temperaturvariationer vid chargering. Exempelvis kan avstängning och pådrag på elementen ske gradvis för att ge ett för elementen mildare förlopp.
- Praktiskt körsätt och hantering är en viktig faktor då korrekt handhavande av ugn, luckor och gods vid chargering erfarenhetsmässigt är mycket viktigt för en god driftssäkerhet och livslängd. Exempelvis kan ugnsluckor öppnas i etapper för att minska snabba



temperatursänkningar.

Effekterna av temperaturvariationer vid charging och i ingångszoner på ugnar är relativt etablerad och välkänd från existerande ugnar. Det bedöms ändå som ett område med god potential för teknisk utveckling vad gäller design av ugnar och värmeelement, styrsystem och ev. materialutveckling för värmeelement.

Vibrationer, underhåll och yttre påverkan

Då ugnar för ämnesvärmning opererar i en industriell miljö där det potentiellt förekommer vibrationer och i undantagsfall yttre åverkan är det en vanligt förekommande frågeställning vilken inverkan det har på de resistiva värmeelementen. Användning av elektriska värmeelement är en etablerad teknik i stål- och metallindustrin och erfarenheter från användningen indikerar att korrekt utformade värmelösningar fungerar väl under normala driftförhållanden.

Vid drifttemperatur har värmeelement av metallisk (FeCrAl) typ och molybdendisilicid typ viss duktilitet. Vid låg temperatur såsom vid underhållsstopp är duktiliteten mycket begränsad och erfarenhetsmässigt är det vanligare med haverier av värmeelement i samband med underhållsstopp.

Elementen behöver också skyddas från yttre åverkan i samband med underhåll av ugnen. Förfarande och handhavande vid nedstängning och underhåll innebär erfarenhetsmässigt en risk för haverier av värmeelement. Detta är också ett område där det bedöms finnas potential för förbättringar inom design och rutiner.

#### 4.2.2. Induktionsvärmning SSAB Borlänges stegbalksugn

Vidare och med hänsyn tagen till fallstudien SSAB Borlänges stegbalksugn har följande sammanställning gjorts för att lista viktiga val vad gäller elektriska värmningssystem baserad på induktionsvärmning.

- Hög effekttäthet – Induktion
  - För att det skall vara lönsamt att titta på induktionsvärmare bör det finnas krav på högeffekttäthet. Enklare och mer ekonomiska lösningar finns tillgängliga för värmning där effekttätheten inte behöver vara hög i förhållande till yta för placering. Exempel på detta är elektriska strålningsrör eller trådvärmeelement. (M, 2021)
  - För fallstudien SSAB Borlänge, finns det begränsningar i form av tillgänglig yta före och efter ugn där ca 72 MW installerad effekt behöver finnas tillgängligt för att värma materialet till 550 °C. Ytan för att kunna tillsätta energin är begränsad till ca 20 meter och induktionssystemets längd beräknas till ca 18 meter. Värmning av platta ämne/material genom induktion har redan använts före och efter en ugn samt fristående från rumstemperatur till 1200 °C. Speciellt fristående system används endast för



att starta och testa, eller för att ladda en del av produktionen parallellt med konventionell ugn. Vid 600t/h finns det ingen fristående induktiv värmare som kan täcka hela kapaciteten med utgångspunkt SSAB Borlänges stegbalksugn och därmed är detta ytterligare en motivationsfaktor till ett hybrid system. (M, 2021).

- Longitudinellt flöde är den mest använda tekniken inom induktionsvärmning. Detta oberoende om formen är fyrkantig, rund eller platt. En nyckelparameter i ett induktionsuppvärmningssystem är det elektromagnetiska penetrationsdjupet av de strömmar som induceras i ett metallföremål. Eftersom materialparametern är en av konstanterna, är den enda kvarvarande parametern för att ändra penetrationsdjupet den elektromagnetiska frekvensen. En hög frekvens resulterar i ett mycket tunt penetrationsdjup där hela kraften induceras med god elektrisk verkningsgrad. En lägre frekvens påskyndar uppvärmningen till en jämn temperaturfördelning. Val av rätt frekvens är således viktigt i alla uppvärmningsapplikationer.

Strömmarna som induceras i ett metallföremål har som nämnts tidigare ett penetrationsdjup (in i föremålet, med början från dess yttre yta) som beror på den frekvens som valts för det specifika induktionssystemet. Ju högre frekvens, desto tunnare penetrationsdjup samt omvänt ju lägre frekvens desto tjockare är penetrationsdjupet. Därför är de högsta frekvenserna lämpliga för att återuppvärma de minsta metallföremålen, medan de lägsta frekvenserna är lämpliga för att återuppvärma de största metallföremålen. I tillfälle en för hög frekvens väljs kan återuppvärmningsprocessen vara för mycket på ytan och inte tillräckligt djupt ner till materialkärnan, något som kan krävas av valsningsprocessen nedströms.

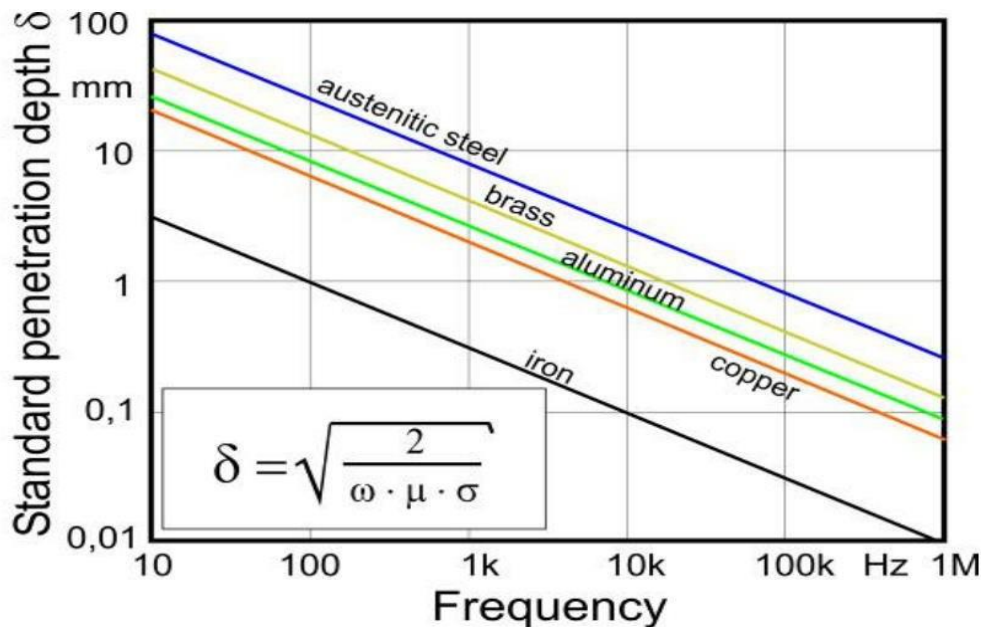
Om en för låg frekvens väljs, kommer de inducerade strömmarna att överlappa i mitten av metallföremålet, vilket resulterar i strömavbrott och i sin tur att effektiviteten i återuppvärmningsprocessen minskar kraftigt.

Frekvensomvandlarna kommer fortfarande dra el, dock kommer den termiska energin som injiceras i metallföremålet att vara mycket låg.

Rekommendationen är därmed att frekvensen bör väljas efter materialets minsta storlek.

Tumregeln för runda och fyrkantiga ämnen är att välja det elektromagnetiska inträngningsdjupet enligt 25 % av den minsta storleken av material som kommer att produceras.

Tumregeln för platta ämnen är att välja det elektromagnetiska inträngningsdjupet enligt 40 % av den tunnaste materialtjockleken.



Figur 26 Exempel på penetrationsdjup

För magnetiska egenskaper skulle dessa villkor kunna uppfyllas för nästan alla materialstorlekar (svart kurva för järn i **Figur 26**). Men för austenitiska kvaliteter eller ferritiskt material över Curie-temperaturen växer de nödvändiga frekvenserna och samtidigt priset per MW effekt som en konsekvens av att verkningsgraden reduceras.

Sammanfattningsvis är valet av rätt frekvens för ett induktionssystem ganska komplicerat, samtidigt som det är grundläggande för att återuppvärmningsprocessen ska bli framgångsrik. (Opezzo)

För att lösa detta problem för icke-järnmetaller eller kolstål över 700°C finns det andra tekniker som kan appliceras; tvärgående flödesuppvärmning.

- **Tvärflödesinduktor (transverse flux inductor):** Rostfria material kan liknas vid kolstål över curie temperatur. Den tvärgående flödesuppvärmningen är tillämplig på alla tunna ämnen som inte är järnhaltiga, som aluminium, koppar, rostfritt stål vid alla temperaturer eller ferritiska ämnen över 700°C. Induktordesignen skiljer sig helt från en longitudinell flödesinduktor och även uppvärmningsmönstret. Till skillnad från spiralformade spolar kan spolen här separeras i två delar och placeras på vardera sida av ämnet som skall värmas. Förändringen i magnetfältet gör det möjligt att uppnå hög effekt på liten yta.

Longitudinellflödesuppvärmning av ämnen är enhetligt över bredden, förutom vid kanterna. Anpassning av uppvärmning vid kanterna skulle kunna hanteras av frekvensen/tjockleken för longitudinellt flöde.

Tvärflödesuppvärmning medför kraftig överhettning av kanter och detta måste beaktas och undvikas för att uppnå en jämn temperatur över hela bredden. Tvärflödesinduktorer måste anpassas till olika ämnesbredder genom att spolarna, sköldarna eller koncentratorerna flyttas efter faktisk

bredd av ämnen. (Langejuergen, 2021- 2022)

För fallet SSAB Borlänge anses den longitudinella flödestekniken vara det mest lämpliga för medel- till stora tjocka ämnen.

Tvärflödesinduktortekniken är lämplig för mycket tunnare plåtar såsom 10 mm eller tunnare. Därför skulle det vara ett olämpligt/felaktigt tillvägagångssätt att använda tvärflödesteknik för uppvärmning av stålplattor så tjocka som 220 mm, för fallet SSAB Borlänge. (Opezzo., 2021-2022)

#### 4.2.3. Verkningsgrader med utgångspunkt: fall SSAB Borlänge

Enligt Figur 27 framgår verkningsgrad med utgångspunkt från temperatur under 700°C och nominell vidd på ämnet för värmning där 100% motsvarar fullt nyttjande av spolen med en marginal på 15 mm.

Bästa elektromagnetiska kopplingen uppnås när det inte finns något avstånd mellan spolen och materialet. I detta fall penetrerar 100 % av det magnetiska flödet materialet som ska värmas. Detta är dock praktiskt ej genomförbart då elektrisk och termisk isolering är obligatoriskt. Ett säkerhetsavstånd för materialtoleranser och materialdeformation behöver läggas till. En annan aspekt är variationen i materialdimensioner som avses produceras. (M, 2021).

Då spolen inte nyttjas fullt (största dimension för värmning) avtar verkningsgraden enligt Figur 27. Som en konsekvens av detta minskar också överförd energi till materialet och behovet av kylvatten ökar.

Utgångspunkt för vattenkonsumtion vid induktionsvärmning är att slutna kylsystem rekommenderas (omvandlare, kondensator, samlingsskenor) med ingångstemperatur lägre än 28-32°C. Flödet dimensioneras enligt cirka 17m<sup>3</sup>/h per installerad MW maximalt återflödestemperatur <40°C.

Den maximala temperaturen för vattnet som kyler strömförsörjningen (frekvensomvandlare) är ganska begränsad eftersom komponenterna som används inuti strömförsörjningen försämrats snabbt med temperaturen; induktionsspolarna är känsliga för höga temperaturer och följaktligen kan den maximala temperaturen för vattnet som kyler induktionsspolarna vara lite högre (60°C).

Den maximala temperaturen för vattnet som kyler induktionssystemen är låg och därför används de inte särskilt ofta som "spillvärme" på grund av den resulterande låga verkningsgraden kopplad till den låga temperaturen. (Opezzo)

| magnetic material and $T < 700^{\circ}\text{C}$ |               |                       |      |               |                 |                            |
|-------------------------------------------------|---------------|-----------------------|------|---------------|-----------------|----------------------------|
| max. total power                                | nominal width | max. elec. efficiency | loss | heating power | available power | eff. electrical efficiency |
| [kW]                                            | [%]           | [%]                   | [kW] | [kW]          | [kW]            | [%]                        |
| 4500                                            | 100           | 85                    | 675  | 3825          | 4500            | 85,0                       |
| 4500                                            | 95            | 85                    | 675  | 3634          | 4309            | 84,3                       |
| 4500                                            | 90            | 85                    | 675  | 3443          | 4118            | 83,6                       |
| 4500                                            | 85            | 85                    | 675  | 3251          | 3926            | 82,8                       |
| 4500                                            | 80            | 85                    | 675  | 3060          | 3735            | 81,9                       |
| 4500                                            | 75            | 85                    | 675  | 2869          | 3544            | 81,0                       |
| 4500                                            | 70            | 85                    | 675  | 2678          | 3353            | 79,9                       |
| 4500                                            | 65            | 85                    | 675  | 2486          | 3161            | 78,6                       |
| 4500                                            | 60            | 85                    | 675  | 2295          | 2970            | 77,3                       |
| 4500                                            | 55            | 85                    | 675  | 2104          | 2779            | 75,7                       |
| 4500                                            | 50            | 85                    | 675  | 1913          | 2588            | 73,9                       |

Figur 27 Verkningsgrader med utgångspunkt i fallet SSAB Borlänge

Utförda temperatursimuleringar för fallet SSAB Borlänge, framgår i Figur 28 - Figur 30. De visar att varje topp markerar en passage genom spole där orange markering är yttemperatur, blå är vid ämnets kärna och grön markering är entalpin som beskriver hur mycket energi som har absorberats av ämnet. Förhållandet mellan yttemperatur och kärntemperatur styr i vilken omfattning energi kan tillföras (effekt). I det simulerade "case 1" nyttjas 4 moduler nära full effekt där hänsyn tas till förhållandet mellan yttemperatur kärntemperatur.

Med hänsyn tagen till detta finns en viss begränsning i form av vilken temperatur en material kan värmas till eftersom värmespridningen i materialet gör att stora dimensioner behöver en "soaking" tid vilket innebär att för mindre material kan en fullständig bearbetningstemperatur uppnås.

## Temperature Simulations

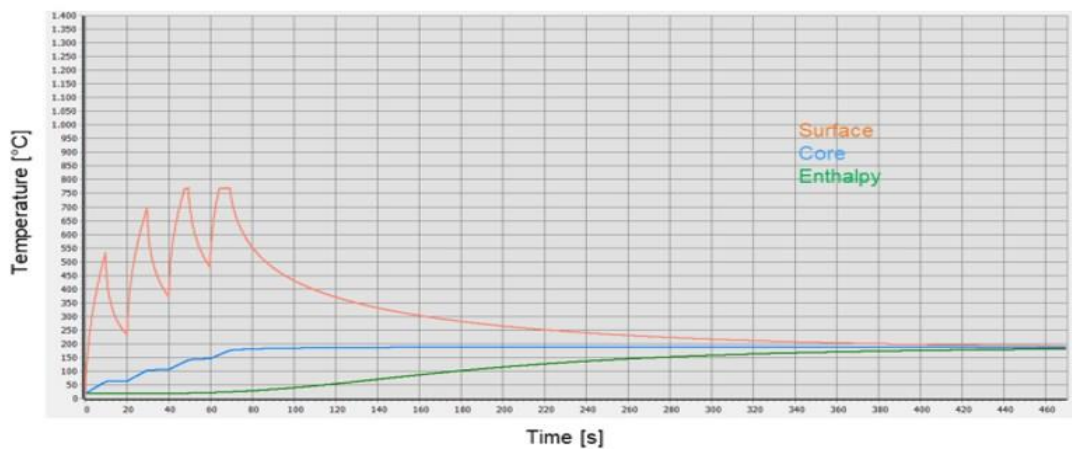
### Boundary Conditions:

- Bar thickness: 220 mm
- Bar width: 1600 mm
- Throughput: 600 t/h

### 1) Simulation 20°C → 155°C (Enthalpy)

#### Result:

- 4 Modules
- 4500kW, each
- Total power 18 MW

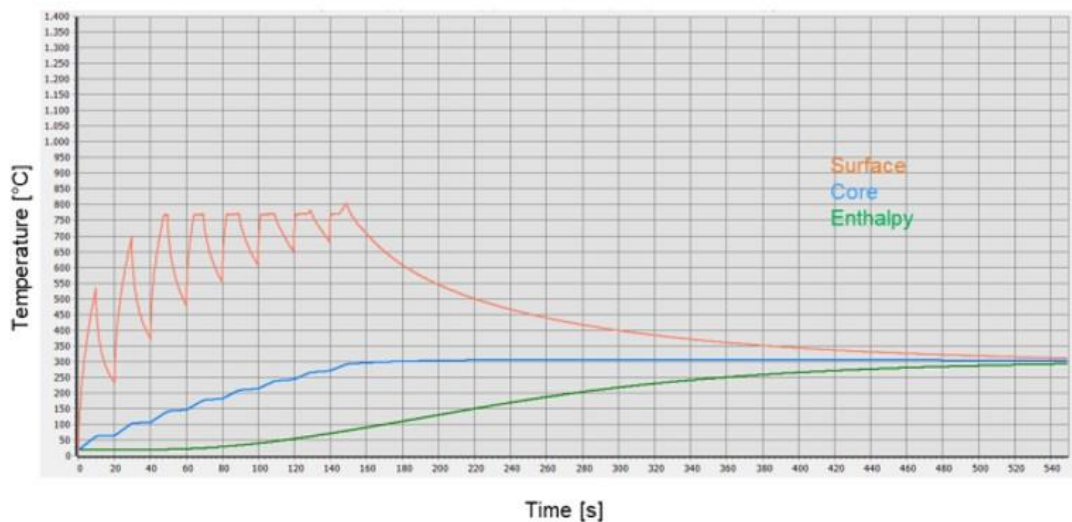


Figur 28 1) temperatur simulering 155 C

### 2) Simulation 20°C → 310°C (Enthalpy)

#### Result:

- 8 Modules
- 4500kW, each
- Total power 36 MW

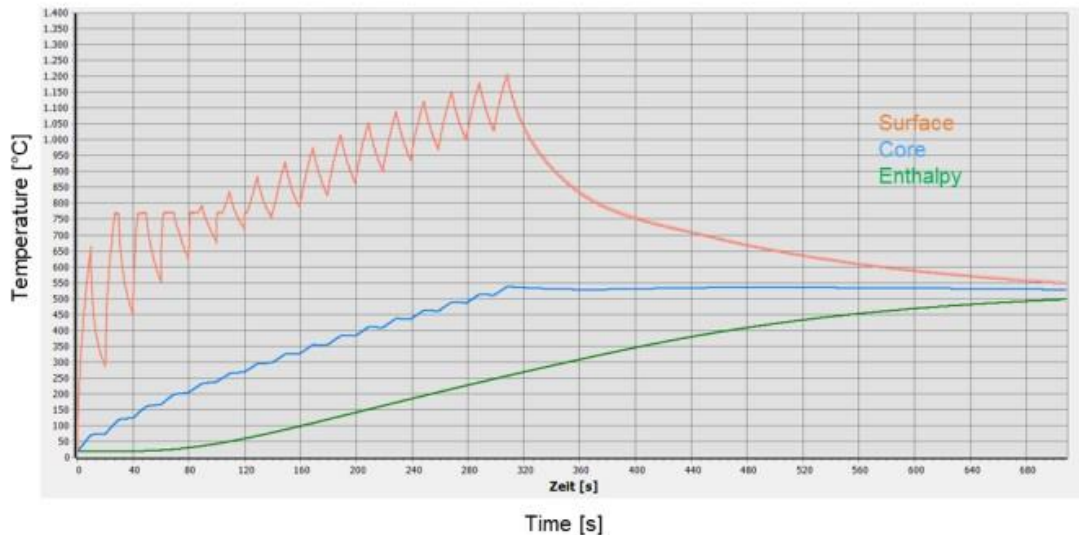


Figur 29 2) temperatur simulering 310 C

### 3) Simulation 20°C → 550°C (Enthalpy)

#### Result:

- 16 Modules
- 4500kW, each
- Total power 72 MW



Figur 30 3) temperatur simulering 550 C

#### 4.2.4. Frekvens i förhållande till materialets tjocklek

Som nämnts i tidigare avsnitt, måste det elektromagnetiska inträngningsdjupet väljas efter ämnets dimension. Eftersom inträngningsdjupet ( $\delta$ ) är litet för kolstål under 700°C, på grund av den höga magnetiska permeabiliteten, måste det väljas enligt:

$$\text{Tjocklek} > 2,5 \cdot \delta$$

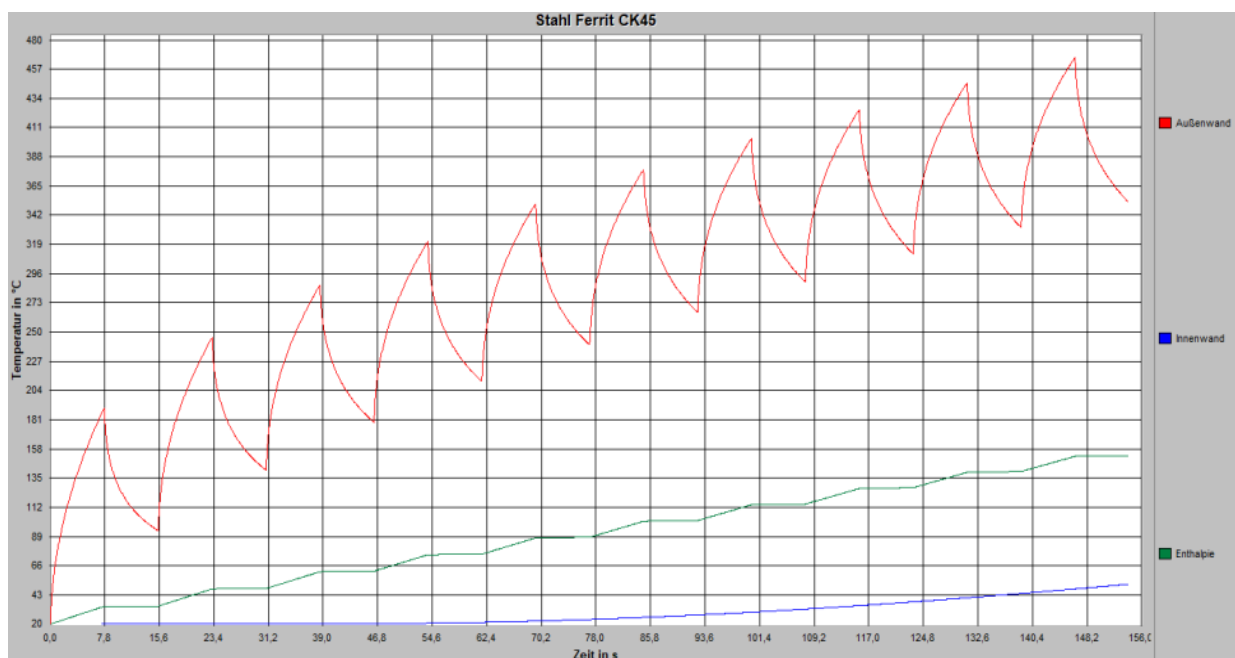
För ett ämne med 220mm tjocklek blir detta teoretiskt ca. 10Hz. Men i praktiken, för tjocklekar över 25 mm, skulle en 1-2kHz lösning kunna vara att föredra på grund av tillgängligheten av standardiserade komponenter och effektkraven för ett sådant system. I tillfälle tjockleken är under 25 mm krävs högre frekvenser för en god elektrisk verkningsgrad för temperaturer över 700°C. Begränsningen i frekvens är spänningsnivån som krävs för att driva induktorn på ett säkert sätt till önskad frekvens. För den inducerade effekten är strömmen runt materialet viktig. Strömmen drivs av en elektrisk spänning.

Vidare är resistensen i ämnet en kombination av aktiv resistens och reaktiv resistens. Det reaktiva motståndet växer med frekvensen och samtidigt spänningen, för att få samma ström. I praktiken är denna begränsning mellan 2kV och 4kV. I fallet för SSAB Borlänges stegbalksug, är en tjocklek på 15 mm den nedre gränsen för induktiv uppvärmning med 10-20 kHz. (M, 2021).

Olika material är mer eller mindre känsliga för sprickbildning, det finns en generell regel där hänsyn tas till skillnaden mellan yttemperatur och

temperatur i ämnens mitt. En av indikatorerna på hur sprickkänsligt materialet är kopplas till andel krom i materialet. Generellt används en gräns på 400° mellan ytemperatur och kärntemperatur, där sprickkänsligt material ej skall överskrida denna gräns. Utformningen av spolar och möjlighet till tillförd effekt påverkas av detta vilket i sin tur påverkar vilken längd värmningsutrustningen måste ha för att uppnå en viss medeltemperatur. (M, 2021)

För att tydligt åskådliggöra detta kan ett diagram där materialtemperaturen och kärntemperaturen simuleras tas fram, för exempel se Figur 31. Diagrammet brukar presenteras med tid på X-axel och temperatur på Y-axel. Materialets ytemperatur (röd markering) ökar i takt med att materialet passerar spolar (förutsätter framdrivningssystem). Relationen mellan röd kurva – ytemperatur och blå – centrumtemperatur i kombination med materialets egenskaper sätter förutsättningarna för längden på systemet.



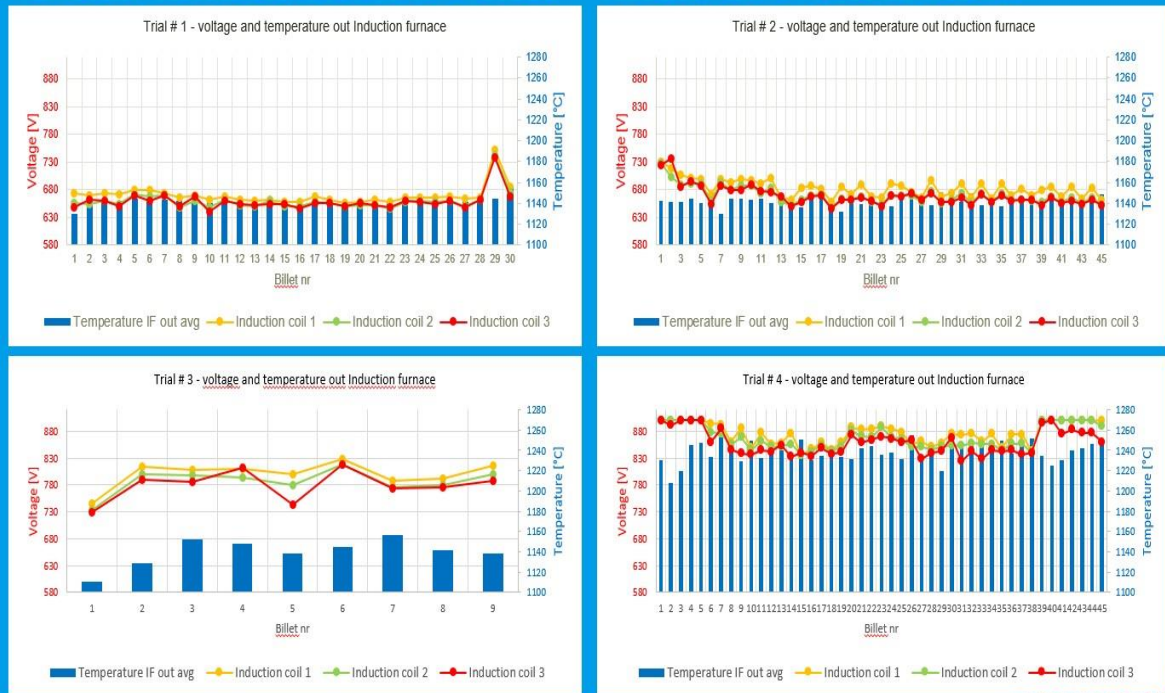
*Figur 31 Ytemperatur och kärntemperatur vid ämnespassage genom spolar i ett induktions uppvärmningssystem*

Under perioden för detta projekt har prestandatestet av installerade induktiva element (3 spolar, leverantör: DANIELI) genomförts hos Outokumpu Fagersta (ref. Bilaga F).

I dessa tester har reglering av temperaturen skett med hjälp av spänningsnivåerna där ström och frekvens varit konstant och de uppmätta temperaturerna visar det utgående temperaturen på ämnena. Dessa prestanda tester har utförts på ett antal sätt (4) utifrån behov och diskussioner emellan Outokumpu och leverantören.



# Performance test results – induction furnace



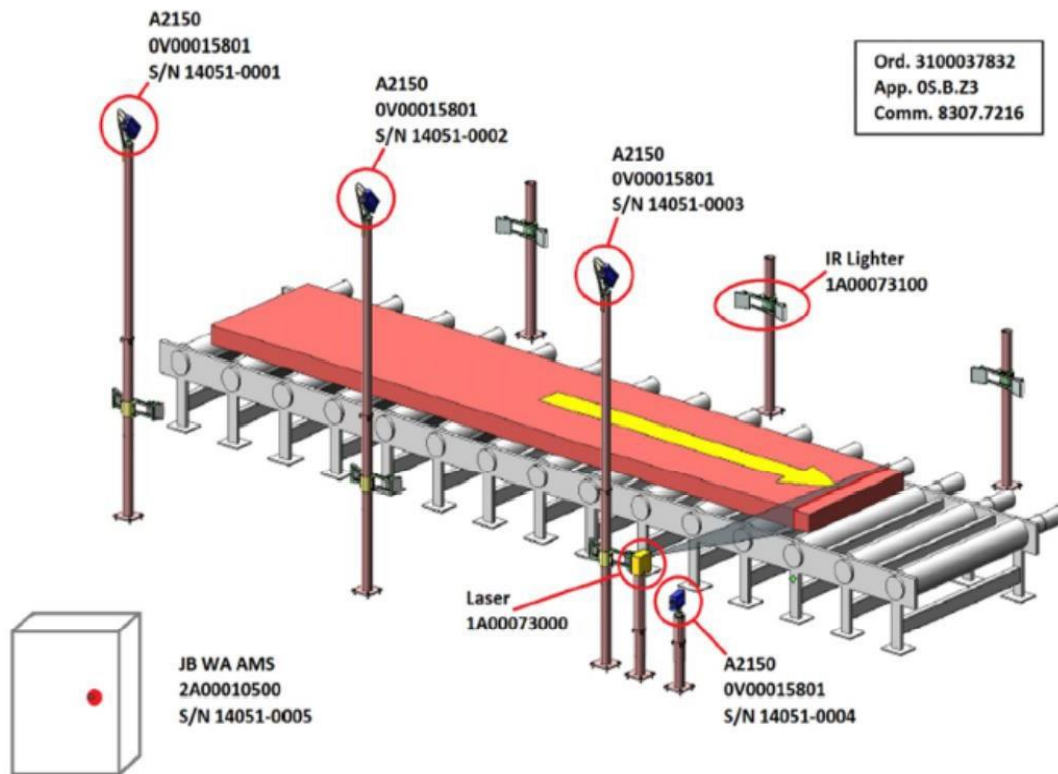
11 | March 28, 2022



Testerna uppvisar att;

- det valda systemet kan värma ämnen upp till 1250°C (max 900 V).
- störningar i produktion påverkar temperaturen och induktionsspänningen. Detta kan ses på tex. "Trial 1" ämne 29 där en störning i produktionen påverkat resultaten. Det har ej mätts på ingående temperatur utan enbart utgående.
- ämnen med mindre dimensioner (under 123 mm) har en hög induktorspänning men med låg uppmätt temperatur – en del beror på;
  - lägre effektivitet än det ämne som systemet skall vara optimerat för (150 mm)
  - felriktad pyrometer, processas varierande ämnesdimensioner så bör styrande pyrometrar vara fler eller av typ linjescanner eller värmekamera.





### *Reference scheme in measuring area – reference project*

*Figur 32 Ämnestransport med detekterande utrustning för hastighet och temperaturmätning*

Vidare har det observerats att värmningen är en känslig process. Vad gäller induktionsvärmning gäller det att materialet skall vara så stilla som möjligt i höjdlid, så att värmeöverföringen inte påverkas. Därmed är ett rollsystem högst lämpligt, där rullarna är tillverkade av icke-magnetiskt material så att de inte påverkas av magnetfält. Även genomlöpshastigheten kräver noggrann avvägning. I tillfälle det går för långsamt riskerar det att smälta ytan, och om det går för snabbt blir temperaturskillnaderna i ämnet stora mellan yta och kärna. Då kan det vara fördelaktigt att använda sig av en utjämningsugn.

Under curietemperaturen kan hög elektrisk verkningsgrad uppnås med upp till 85% mot 100% av den nominella bredden. Denna effektivitet minskar med produktion av mindre materialdimensioner. En uppskattning och översikt finns i Figur 33.

| <b>magnetic material and T &lt; 700°C</b> |               |                       |      |               |                 |                            |
|-------------------------------------------|---------------|-----------------------|------|---------------|-----------------|----------------------------|
| max. total power                          | nominal width | max. elec. efficiency | loss | heating power | available power | eff. electrical efficiency |
| [kW]                                      | [%]           | [%]                   | [kW] | [kW]          | [kW]            | [%]                        |
| 4500                                      | 100           | 85                    | 675  | 3825          | 4500            | 85,0                       |
| 4500                                      | 95            | 85                    | 675  | 3634          | 4309            | 84,3                       |
| 4500                                      | 90            | 85                    | 675  | 3443          | 4118            | 83,6                       |
| 4500                                      | 85            | 85                    | 675  | 3251          | 3926            | 82,8                       |
| 4500                                      | 80            | 85                    | 675  | 3060          | 3735            | 81,9                       |
| 4500                                      | 75            | 85                    | 675  | 2869          | 3544            | 81,0                       |
| 4500                                      | 70            | 85                    | 675  | 2678          | 3353            | 79,9                       |
| 4500                                      | 65            | 85                    | 675  | 2486          | 3161            | 78,6                       |
| 4500                                      | 60            | 85                    | 675  | 2295          | 2970            | 77,3                       |
| 4500                                      | 55            | 85                    | 675  | 2104          | 2779            | 75,7                       |
| 4500                                      | 50            | 85                    | 675  | 1913          | 2588            | 73,9                       |
| <b>non magnetic or T &gt; 700°C</b>       |               |                       |      |               |                 |                            |
| max. total power                          | nominal width | max. elec. efficiency | loss | heating power | available power | eff. electrical efficiency |
| [kW]                                      | [%]           | [%]                   | [kW] | [kW]          | [kW]            | [%]                        |
| 4500                                      | 100           | 65                    | 1575 | 2925          | 4500            | 65,0                       |
| 4500                                      | 95            | 65                    | 1575 | 2779          | 4354            | 63,8                       |
| 4500                                      | 90            | 65                    | 1575 | 2633          | 4208            | 62,6                       |
| 4500                                      | 85            | 65                    | 1575 | 2486          | 4061            | 61,2                       |
| 4500                                      | 80            | 65                    | 1575 | 2340          | 3915            | 59,8                       |
| 4500                                      | 75            | 65                    | 1575 | 2194          | 3769            | 58,2                       |
| 4500                                      | 70            | 65                    | 1575 | 2048          | 3623            | 56,5                       |
| 4500                                      | 65            | 65                    | 1575 | 1901          | 3476            | 54,7                       |
| 4500                                      | 60            | 65                    | 1575 | 1755          | 3330            | 52,7                       |
| 4500                                      | 55            | 65                    | 1575 | 1609          | 3184            | 50,5                       |
| 4500                                      | 50            | 65                    | 1575 | 1463          | 3038            | 48,1                       |

Figur 33 Verkningsgrad

#### 4.3 Presentation av prestanda elektriska värmningssystem kopplat till zoner, temperaturer, ugnsdimensioner och material

Ugnsdimensioner och utformning på ugnarna skiljer sig beroende på typ av värmning, temperatur, genomflöde av material samt tillgänglig plats. Ugnarna brukar dock ha en indelning i olika zoner som skiljer sig från ilägg till uttag. Zonerna kan användas för att optimera värmningen då temperaturen kan styras separat för respektive zon. Utformningen av ugnen styrs också av materialtransportsystemet där stegbalkar, pusher, vagnar eller rullar är vanligast. Hänsyn vid utformning tas också till vilket typ av värmningssystem som skall tillföra energi till ugnen. Då gas eller flytande bränsle används och värmen kommer från kemisk reaktion med oxidant behöver hänsyn tas till ämnens placering i ugnen i relation

till brännarnas placering. Detta för att undvika direktkontakt med varmaste delen av flammen som kan leda till oönskade strukturförändringar i materialet.

Vad gäller elektriska system är utformningen på ugnarna intressant av flera orsaker. Då möjligheten för en helt ny ugn finns kan avstånd till ämnen från värmekällan, materialtransportsystem samt zondelning optimeras för elektriska systemet. Vid kemisk reaktion är också volymen i ugnen viktig för att få en fullständig reaktion samt även en strålande atmosfär. Detta ger möjlighet för elektriska system att ta mindre plats i anspråk ställt mot bränsleeldade ugnar. För att veta mer om förutsättningarna kring detta har följande sammanställning gjorts.

Kolstål, som är ett ferromagnetiskt material upp till Curiepunkten, kan förvärmas effektivt på grund av sådana specifika egenskaper hos detta material. Därför resulterar induktionsförvärmning av kolstålämnen under Curiepunkten (enligt fallet för SSAB Borlänge stegbalksugn) i en mycket effektiv process, med motsvarande låg energiförbrukning och låga driftskostnader. (Opezzo)

#### **4.4. Glödskalbildning och kontrollerad atmosfär i ugnar**

Oxidbildningen under värmning av ämnen är starkt beroende på materialtyp. Rostfria stålsorter bildar i allmänhet ett tunt och skyddande oxidskikt medan kolstål bildar tjocka (ett par millimeter) järnoxider.

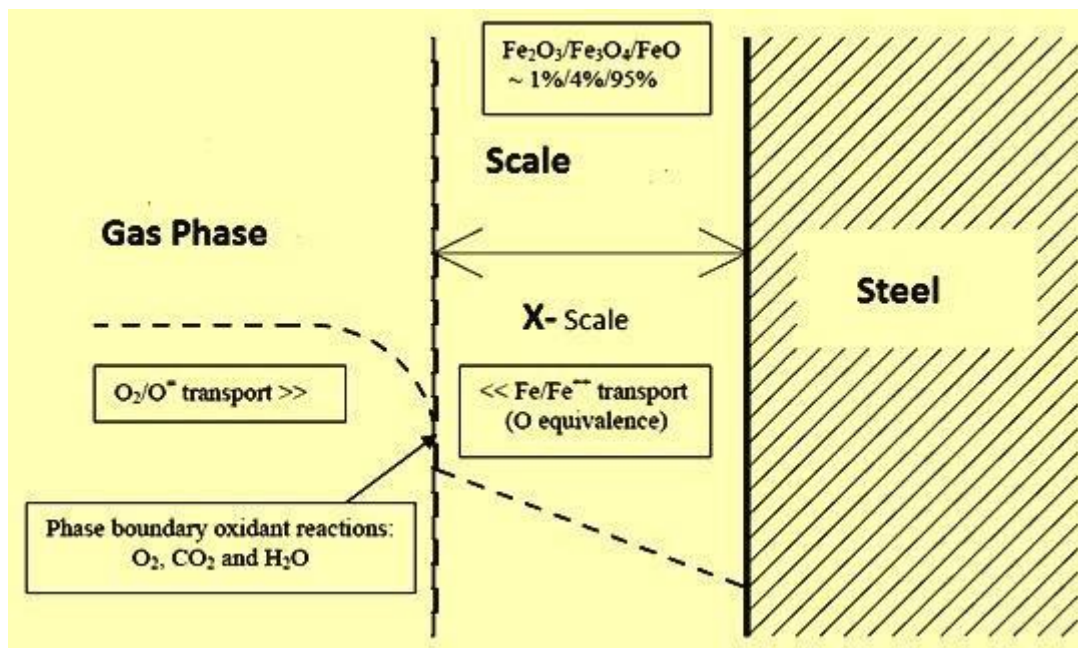
För kolstål kan bildandet av glödskal inför valsning ha både för och nackdelar. Fördelarna består i att bildande av glödskal kan minska eller eliminera yt-defekter från t.ex. gjutning, en viss värme tillförs stålet under den exoterma oxidationsprocessen och kan stå för 2-3% av totala värmetillförseln. Glödskal kan också ha en isolerande effekt och minska värmeförlusterna vid transport av ämnen från värmning till valsverk. Nackdelarna är minskat materialutbyte<sup>1</sup>, hantering av

---

<sup>1</sup> 1-3% av ämnesvikten är normalt bortfall men kan i vissa fall gå upp mot 5%.

fallande glödskal i processer under och efter värmning. En betydande farhåga kan också vara starkt vidhäftande glödskal som ej kan spolas bort före valsning.

På kolstål består glödskal vanligtvis av tre oxider, FeO (wüstit), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetit) och Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Hematit). Grundmekanismen för högtemperaturoxidation av stål anges i Figur 34. Oxidationsmekanismen beror av (i) transporten av oxidant (O) från gasfasen, (ii) fasgränsreaktion(er) vid gränssnittet gas/glödskal och (iii) diffusionen av Fe-kationer till gränssnittet gas/glödskal.



Figur 34 Mekanism för oxidering av stål vid hög temperatur, källa <https://www.ispatguru.com/scale-formation-in-reheating-furnace/>.

För rostfria stål så består glödskalet oftast av Me<sub>3</sub>O<sub>4</sub> spineller där det ingår ämnen som Cr, Mn, och Fe. Vid höga temperaturer och långa värmningstiden så kan även rena Fe-oxider bildas. För värmning av rostfria stål är oxidbildningen i stort sett försumbar upp till 600-700°C.

Oxiderande atmosfär innehållande fritt och/eller bundet syre (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) påverkar såväl oxidationshastighet som glödskalsformation. För kolstål gäller att vid låga temperaturer (<900°C) verkar syrgashalten ha väldigt liten påverkan på oxidationshastigheten. Vid temperaturer över 1100°C ökar oxidationen med 50% vid en syrehaltsökning från 0.3% till 3%, däremot så har ytterligare förhöjda syrehalter över 3% låg påverkan. För rostfria stål så har vattenhalten i atmosfären en större inverkan än syrehalten. Höga vattenhalter kan påskynda nedbrytningen av den skyddande kromoxiden till förmån för snabbväxande järnoxid. Låga syrehalter nära 0% ska också undvikas för rostfritt, medan syrehalter

mellan 3- 20% uppvisar likartad oxidtillväxt.

En starkt förenklad bild över glödskaalsbildning är att den är exponentiellt ökande med temperaturen och paraboliskt ökande med tiden, dvs tillväxthastigheten är omvänt proportionellt med tjockleken av glödskalet ( $dx/dt=K_p/x$  där  $K_p$  är den paraboliska hastighetskonstanten)

Sist men inte minst inverkar stålets komposition och legeringsämnen bildandet och form av oxid. Ökad halt av kol minskar oxidationsbenägenheten liksom att hög andel av krom och aluminium kan, genom bildande av skyddande lager av krom respektive aluminiumoxid, reducera oxidationshastigheten. Andra legeringsämnen så som kisel kan påskynda oxideringen vid höga temperaturer genom dess bildande av Fayalite. Fayaliten smälter vid 1170°C och oxidationshastigheten ökar genom förhöjd acceleration av diffusionsprocessen genom den smälta fasen. På liknande sätt kan molybden i rostfria stål bilda  $MoO_3$  som har en låg smältpunkt och kan skapa så kallad katastrofoxidation.

Givet detta är det med andra ord svårt att i specifika termer beskriva konsekvensen av inverkan av elektrisk värmning på glödskaalbildningen utan att också beskriva förutsättningarna.

Det mest naturliga scenariot för el värmning är att värmning äger rum i vanlig atmosfärisk luft. Oxidation i hög temperatur och hög syrehalt (21%) ger för kolstål ett jämförelsevis med en atmosfär motsvarande förbränning med naturgas ( $O_2$  2-3%) ett relativt tjockt och poröst glödskaal. Kan man genom snabbare värmning, läs induktion, korta ner tiden speciellt vid höga temperaturer så kan den relativa glödskaalsmängden minskas men porositeten bestå. Med andra ord bör en hel-elektrifierad lösning i luftatmosfär inte innebära försvårad avspolning av glödskaal eller negativ inverkan på efterkommande yt-kvalité och valsning. Ett annat scenario är att förvärma ämnen med induktion före befintlig ugn, likaledes här förväntas ingen större inverkan på vare sig glödskaalsmängd eller vidhäftning fås på grund av det extra värmningssteget.

För rostfria stål är oxidbildningen väldigt långsam under 700°C, så en förvärmning med induktion skulle således kunna minska den totala uppvärmningstiden och därmed även minska den oxid som skulle bildas i efterföljande värmningssteg.

Vid introduktion av en kontrollerad atmosfär under elektrisk ämnesvärmning medför detta en möjlighet att helt eller delvis eliminera bildandet av glödskaal. En annan potentiell fördel är att undvika eller reducera ytavkolning av ämnet för en mer homogen kolhalt men även förhindra oxidation och materialförluster på grund av kraftig beläggingsbildning som sker i standardförbränningsugnar där metallföremålen (som ska återuppvärmas) vistas i flera timmar vid hög temperatur.

För att detta ska vara möjligt ur ett ekonomiskt perspektiv ställs det b.l.a.

högre krav på ugnstäthet än nuvarande ugnar som normalt används vid konventionell ämnesvärmning. Ett sätt att reducera glödskalbildning kan vara att endast inertera ugnen vid högre temperaturer där oxidation är som kraftigast. Beroende på efterföljande processteg kan fördelen med inert atmosfär, t.ex. kvävgas under värmning diskuteras. I fallet ämnet ska varmvalsas vid hög temperatur och exponeras för luft under själva valsningen är det troligtvis mer relevant att endast begränsa glödskalbildning när temperaturen överstiger 800 – 900 °C.

Om ugnen är tät är det även möjligt att erhålla en reducerande atmosfär genom inblandning av upp till 5% vätgas utan extra krav på säkerhetsövervakning. Detta gör det möjligt att få helt oxidfria ämnen efter värmning om ingående andel oxid på ämnet inte är alltför hög. Det kan vara lämpligt t ex. vid olika former av glödning för att eliminera eller reducera efterföljande processteg eller ytdefekter relaterad till förekomst av ytoxid. Det ställer dock högre krav på ugnstäthet, gascirkulation och kylning efter genomförd värmning för att uppnå full effekt.

Användandet av inerta gaser kan medföra höga kostnaderna samt eventuellt tung påverkan i kraftigt ökande driftskostnader. Dock för att komma ner under t ex 0.3% O<sub>2</sub> i ugnens varma del behöver gasförbrukningen inte påverka driftskostnaderna nämnvärt. Erfarenheter från Linde visar att 50 m<sup>3</sup>/h N<sub>2</sub> kan vara tillräckligt och då uppvisas en kostnadseffektivitet, i tillfälle ugnen är tät.

Vissa leverantörer indikerar och rekommenderar ej inert atmosfär under normala omständigheter för induktionssystem. (Opezzo)

Vice versa, påverkar ingen defekt eller beläggning induktionsuppvärmningen så länge den inte är ledande eller magnetisk. Emulsion, vatten, organiska beläggningar innebär ej problem för induktiv uppvärmning. I tillfälle materialet avdunstar inuti induktorerna måste ett kraftfullt avgassystem övervägas för att undvika kondens i induktorerna. (Langejuergen, 2021-2022)

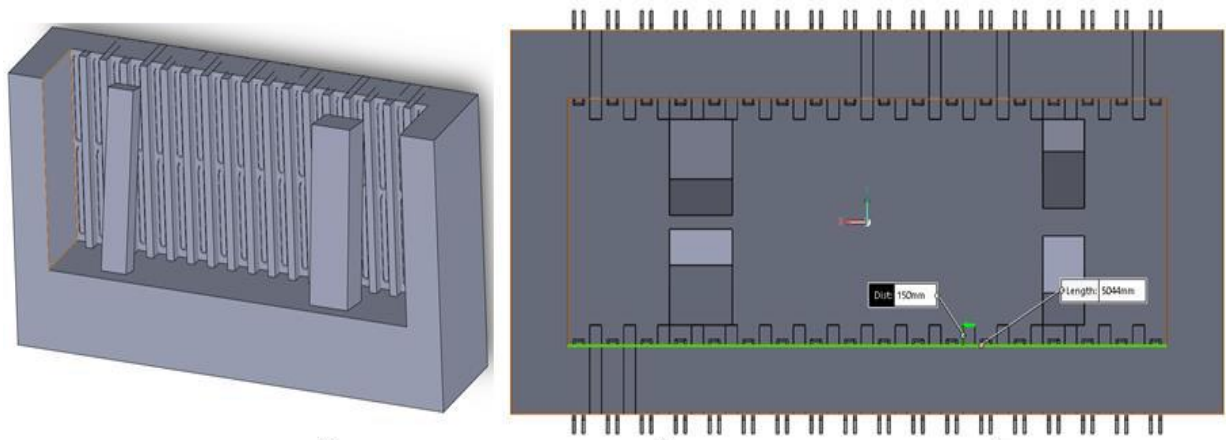
#### **4.5. Övergripande ekonomisk kalkyl för att skifta gas till el**

En av de deltagande företagen i projektet har gjort en konceptstudie för elektrifiering av sina gropugnar. Denna konceptstudie återfinns med detaljer i Bilaga B och inkluderar även en övergripande ekonomisk kalkyl för elektrifieringen.

Uddeholms gropugnar används inför valsning och har en kapacitet på 30 ton, där upp till 15 st. göt åt gången á ca 1-2,5 ton lastas. Ugnarna körs i upp till 1 300 °C med en hålltid på 5 – 30 timmar och värms med en naturgasbrännare på 3 MW, placerad på ena kortändan. Göten lyfts i med travers och göttång för att sen placeras lutandes mot ugnarnas långsidor, vilket redan idag riskerar att orsaka skador på kanter och infodring vid i och urluft av göt, ref Figur 35.

Förslaget vid elektrifiering är att placera resistiva värmeelement av typen Super KS1800 (Kanthal) på båda långsidor med en total effekt på 1,5

MW. Elementen placeras i 186 mm breda spalter med 100 mm gjutgods däremellan som skydd för elementen samt stöd för göten.



*Figur 35 Uddeholm gropugn*

CAPEX för denna konvertering väntas i denna konceptstudie uppgå till ca. 1,4 miljoner SEK för element samt montage, 1,25 miljoner SEK för om murning, 390 tusen SEK för ugnstransformator och ytterligare 300 tusen SEK oförutsett (ca 10%) vilket ger en total CAPEX på cirka 3,34 miljoner SEK med en återbetalning på 1,6 år.

Gällande OPEX så väntas kostnaderna för byte av element öka med 1,2 miljoner SEK/ år och energikostnaderna minska drastiskt för byte av energislag från naturgas till el. Antaganden gjordes om långsiktig kostnad för naturgas på 800 SEK / MWh och kostnad för el till 500 SEK / MWh, samtidigt som eluppvärmningen väntas vara 50 % effektivare. Detta skulle ge en årlig besparing på ca 2,88 miljoner SEK / år i energikostnad.

Utöver det räknas kostnaden för utsläppsrätter minska med 990 tusen SEK per år. Totalt väntas OPEX bli cirka 2,670 miljoner SEK lägre efter elektrifiering jämfört med innan.

Vad gäller elektrifieringen anses det i denna konceptstudie att de största riskerna och tillkommande kostnaderna kommer just utav elementen som är (jämfört med en naturgasbrännare) sköra, vilket riskerar att orsaka återkommande brott och därmed höga kostnader för utbyte och stopp i produktionen. Slutsatsen av denna konceptstudie är att fördelarna med elektrifiering är stora men att det finns en del praktiska aspekter som måste utredas vidare innan genomförande är möjligt för just en gropugn, nämligen:

- Placering element – Huruvida placeringen är rimlig och möjliggörandet av underhåll och utbyte av element.
- Livslängd element – Hur ofta dessa måste bytas.
- Påverkan från göt - Påverkan från stålet vid lastning och lossning

ur ugnen samt hur göten placeras.

- Effekt in i ugnen - Beräkning visar att det är tillräckligt, men vidare verifiering av detta behövs.

Sammanfattningsvis så har konceptet med elektrifiering av en gropugn stor teoretisk potential, speciellt efter den kraftiga ökningen i naturgaspriser som skett senaste tiden. Besparingarna genom ökad energieffektivitet samt skillnad i kostnad för elektricitet jämfört med LNG ger väldigt stora besparingar men gällande det praktiska så befarar Uddeholm, ett av deltagande företag i projektet, att det kan uppstå problem. Utöver det tillkommer fördelar med minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp, bättre arbetsmiljö, jämnare temperatur samt inga NO<sub>x</sub>-utsläpp.

Vad gäller kostnaden för implementering av induktionsuppvärmningssystem baserat på fallet SSAB Borlänges stegbalksugn, har det i mars år 2022 beräknats ligga på omkring 350 – 500 tusen Euro / MW (effekt).

#### **4.6. Styrsystemet för induktionsvärmning**

För kontinuerlig uppvärmning av ämnen och stänger är den mest använda reglermetoden en konstant temperatur vid utgången. Då beräknar styrningen den nödvändiga effekten enligt uppmätt ingångstemperatur (med hjälp av exempelvis optiska pyrometrar), materialdimensioner och hastighet så att temperaturen vid utgången är konstant över materialets längd.

En annan möjlig reglermetod är en konstant temperaturskillnad mellan ingång och utgång. Detta reglerläge beräknar effekten enligt materialdimensionen och hastigheten på ett sätt så att temperaturskillnaden är konstant över materialets längd. I detta fall kvarstår en temperaturskillnad mellan huvud och svans av materialet. (Langejuergen, 2021-2022)

Å andra sidan kan det vara problematisk om man enbart detekterar yttemperaturen på metallföremålet i början och i slutet av processen och förlitar sig enbart på den parametern för att leverera induktionseffekten till metallföremålet som ska återuppvärmas. Eftersom induktionsenergin injiceras långt djupt in i metallföremålet (inte bara överförs från dess yta), lagras och döljs en anmärkningsvärd mängd värmeenergi under metallföremålets yta, vilket inte helt enkelt lätt kan upptäckas från ytan av materialet. Att försumma dessa i styrsystemet kan skapa funktionsfel såsom metallföremål som smälter ned inuti induktionsspolarna, dålig uppvärmningsnoggrannhet, allvarliga och oförutsägbara temperatursvängningar hos induktionsuppvärmda metallföremål, kall kärna av metallföremål, etc. (Opezzo., 2021-2022)



#### 4.6.1. Möjligheter med effektregering för att undvika effekttoppar

I dagens elnät med utökad elanvändning i kombination med en högre andel vindkraft blir det mer utmanande att hålla rätt frekvens. Detta är sammankopplat med lokala "effektbrister" och har gett upphov till att SvK(svenska kraftnät AB) infört ett antal stödtjänster, frekvenshållningsreserv, som stora elanvändare kan delta i.

Den stödtjänst som verkar passa el-konverterade ugnar med modern styr- och reglerutrustning lämpligast heter FCR-D. I dag har Ovako sju stycken ugnar som är kvalificerade i systemet, men avsikten är att ytterligare minst fem ugnar skall aktiveras. I detta system är det möjligt att utan drift/kvalitets störningar snabbt reducera 5-10MW beroende företagets produktionssituation. Behovet av denna tjänst verkar öka, och tjänsten beskrivs nedan mer detaljerat nedan:

**Frekvenshållningsreserv stördrift, nedreglering, s.k. FCR-D ned,** vilket är en förkortning av beteckningen på engelska: downwards Frequency Containment Reserve – Disturbance .

Frekvenshållningsreserver (FCR) har till uppgift att stabilisera frekvensen vid frekvensavvikelser och är grundläggande för att kunna hålla balansen. De aktiveras automatiskt om frekvensen ändras inom det frekvensområde de ska stötta. FCR handlas upp i förväg för varje ögonblick under dygnet.

Det finns flera olika FCR-produkter. FCR-D ned är en av två frekvensreserver som används vid störning.

Om FCR-D ned:

- FCR-D ned avser endast nedreglering.
- Minsta bud storlek: 0,1 MW
- Aktivering: Automatisk linjär aktivering i frekvensintervallet 50,1-50,5 Hz
- Aktiveringstid: 50% inom 5 sekunder och 100 % inom 30 sekunder
- Volymkrav för Sverige: Upp till ca 565 MW.
- Uthållighet: Minst 20 minuter
- Generella krav (gäller alla stödtjänster)
- Godkänd förkvalificering
- Realtidsmätning
- Elektronisk kommunikation

Upphandlingsplan för FCR-D ned 2022

Då FCR-D ned är en ny produkt för 2022, är den aktuella upphandlingsplanen lägre än volymkravet. Upphandlingsplanen uppdateras kvartalsvis.

Under kvartal 1, 2022 upphandlades en fast volym på 75 MW för samtliga timmar.

Under kvartal 2, 2022 upphandlas en fast volym på 120 MW för samtliga

timmar. Volymen är satt utifrån en bedömning av vilket utbud som finns tillgänglig under perioden.

Handel och prissättning av FCR-D ned

FCR-D ned upphandlas för nedreglering. Upphandling sker två och en dag innan drift.

Majoriteten av kapaciteten upphandlas två dagar innan drift (D-2), resterande dagen innan (D-1).

Kapacitetsersättning

Avropade kapacitetsbud för FCR-D ned ersätts till angivet pris, så kallat "pay-as-bid". Medelpris per MW publiceras via svenska kraftnäts stödsystem Mimer.

Krav för att leverera FCR-D ned

För att leverera stödtjänster behöver kraven i gällande balansansvarsavtal med tillhörande bilagor uppfyllas.

Förkvalificering

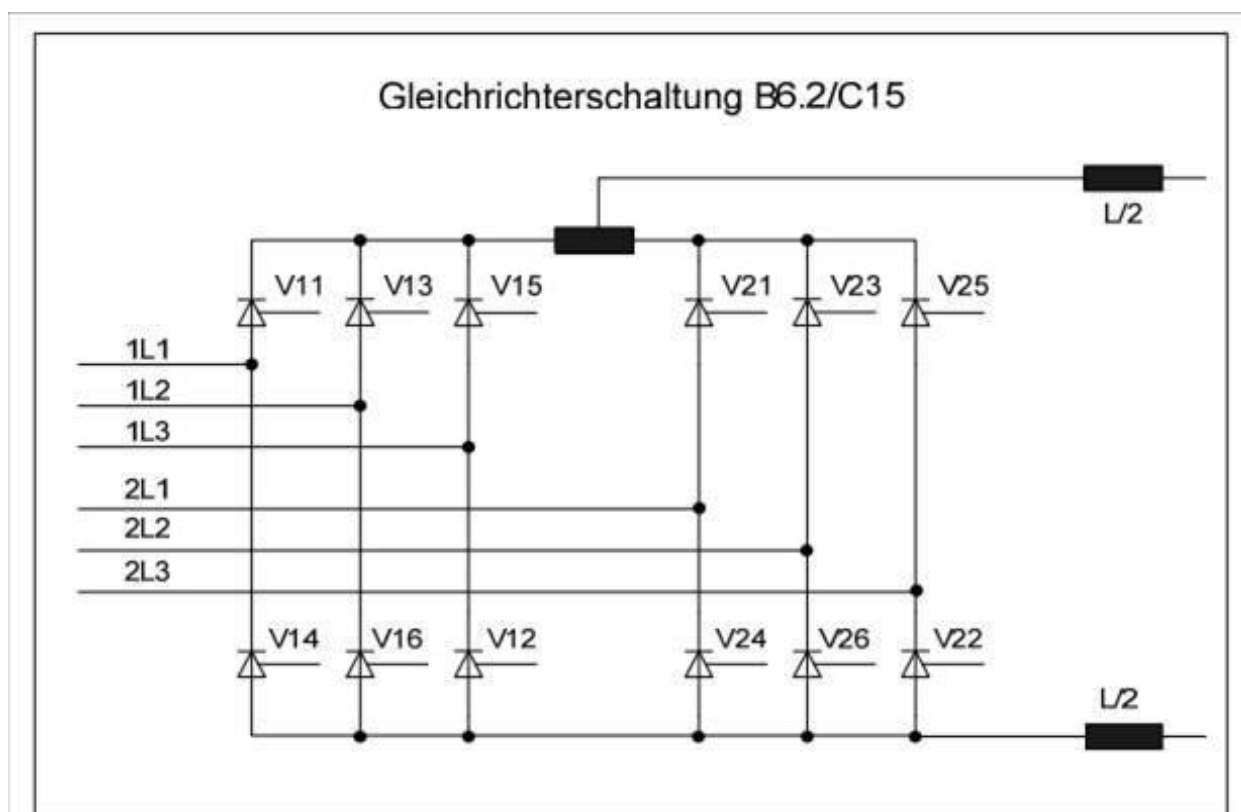
För att få delta på marknaden för FCR-D ned ska en aktör först visa att de tekniska kraven för FCR-D ned är uppfyllda. Det görs via en förkvalificering med godkänt resultat. Förkvalificeringar för FCR-D ned (och övriga stödtjänster) sker löpande. Enheter eller grupper som tillhandahåller FCR ska bedömas på nytt åtminstone vart femte år, om de tekniska kraven, uthållighetskraven eller utrustningen har ändrats, om den utrustning som rör aktivering av FCR moderniseras.

#### 4.6.2 Störningar som elektrisk värmning kan påföra elnätet

Vid en ökad elektrifiering ställs även höga krav på distributionen av elkraft samt vikten av att ha tillgång till tillräcklig effekt till ett rimligt pris. Nätavtalet styr vilka effekter som kan tas ut och hur effektuttaget ser ut över tid (energi) påverkar vilka kostnader som företaget betalar till nätägaren. Det är därför viktigt att ta hänsyn till eventuella effekter nya elektriska drifter kan tänkas påföra industrierna.

Olika typer av elektriska värmningssystem kan påverka internt samt externt ut på nätet, via tex. flicker, övertoner, fasbelastning, effektoppar.

Vid höga effektnivåer använder vissa leverantörer omriktare som är utrustade med en fullt kontrollerad 12-puls likriktarenhet, se Figur 36. (M, 2021)



Figur 36 Schema för en kontrollerad 12-puls likriktare

|             |     |     |     |     |     |     |     |      |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Användning: | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 100% |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|

| order nr.: |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5          |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 7          |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 11         | 8,9 | 8,9 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,9 | 8,9 | 8,8 |
| 13         | 3,9 | 4,8 | 5,4 | 5,9 | 6   | 5,9 | 5,9 | 6,1 |
| 17         |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 19         |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 23         | 3,3 | 3,6 | 3,6 | 3,7 | 3,6 | 3,6 | 3,7 | 3,6 |
| 25         | 2,2 | 2,6 | 2,8 | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   |
| 29         |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 31         |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 35         | 1,8 | 2   | 2   | 2,1 | 2   | 2   | 2   | 2   |
| 37         | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,7 |
| 41         |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 43         |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 47         | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| 49         | 0,9 | 1   | 1   | 1,1 | 1   | 1,1 | 1,1 | 1   |

Figur 37 Övertoner beroende på spänningsutnyttjandet

Dessa enheter anses vara mycket jämna med avseende på det elektriska nätet, med mycket mild harmonisk nivå och total frånvaro av linjespänningsnotching, något som ej kräver specifik, komplexa och dyra övertonsfilter som ska installeras uppströms.

Med utgångspunkt i fallet SSAB Borlänges stegbalksugn och den relativt höga märkeffekten induktionssystem bör eventuella distorsioner som påförs elnätet studeras noggrant då de kan orsaka mycket allvarliga missöden om de försummas. En sådan lösning kan vara VIP® systemet som levereras av Inductotherm. (Opezzo., 2021-2022)

#### 4.7. Simulering

Att simulera en fullständig process av induktionsuppvärmning är komplext och för att minimera beräkningstid krävs ofta förenklingar. Låt oss börja med att studera fysiken, processen och vilken indata som krävs.

En spole med växelström genererar ett magnetfält. När ett ämne placeras inom magnetfältet induceras virvelströmmar. På grund av ämnets resistans utvecklas virvelströmmarna till förluster och dessa förluster leder till den önskade uppvärmning.

Spolen har en viss geometrisk form, den har ett antal varv och är oftast gjord i koppar. Dessutom har växelströmmen en viss frekvens och strömstyrka eller spänning. En hög frekvens innebär att inträngningsdjupet är litet (ämnet värms mest på ytan). Så för att förutspå magnetfältet och slutligen ämnets temperatur måste all information om spolen vara tillgängliga. För att simulera en spole krävs typiskt följande indata:

- Frekvens [Hz]
- Strömstyrka [A] eller spänning [V]
- Geometri
  - Tvärsnitt – Rektangulärt, cirkulärt, alternativt area
  - Antal varv
  - Lindningarna kan var cirkulära, rektangulära eller annan utformning. Avståndet mellan de olika varven kan också variera
- Elektrisk konduktivitet [S/m]

Spolarna kyls oftast med vatten för att inte bli för varma under processen. Det är möjligt att simulera denna kylning, men eftersom projektet framför allt fokuserar på själva uppvärmningen av ämnet är kylningen av spolen av mindre vikt.

För att förutspå temperaturen i ämnet krävs en ganska stor mängd

information. Det mest uppenbara är kanske geometrin som typiskt kan vara av rektangulärt, rektangulärt med avrundade hörn eller cirkulärt tvärsnitt av olika dimensioner och längder. Baserat på geometrin så ser virvelströmmarna annorlunda ut och det är ju dessa som värmer upp ämnet. Ett ämne kan vara magnetisk eller icke-magnetiskt och detta påverkar uppvärmningen avsevärt. Parametrar som krävs för att simulera ett icke-magnetiskt material är typiskt:

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

Dessa materialparametrar är dessutom temperaturberoende. Så för att simulera ett förlopp av induktionsuppvärmning (magnetfält-värme) krävs stöd för så kallat starkt kopplad multifysik. Virvelströmmarna (förlusterna) i ämnet ändras med temperaturen och ämnets övriga materialegenskaper ändras också med temperaturen.

Ett magnetiskt material värms snabbare än ett icke-magnetiskt material. Då ämnet når Curietemperatur ändras dess egenskaper radikalt och detta måste simuleringen hantera. Dessutom måste materialets egenskaper typiskt specificeras med en BH- kurva. Så för att på ett korrekt sätt simulera uppvärmningen måste materialparametrarna studeras ingående och även dess temperaturberoende.

Det uppvärmda ämnet kyls av omgivningen. Därför måste omgivningen och dess geometri specificeras. För att fullständigt simulera omgivningen och ämnets temperatur måste mjukvaran kunna hantera värmeöverföring genom ledning, konvektion och strålning. Dessutom kan det ibland krävas simulering av strålning mellan ytor (till exempel om ett ämne befinner sig inuti en varm ugn). Om ett uppvärmt ämne befinner sig i luft med lägre temperatur så skapas naturlig konvektion och detta kan simuleras med CFD (Computational Fluid Dynamics) eller förenklade randvillkor.

Vidare så är det väldigt olika tidsskalor på den elektromagnetiska simuleringen som är ca 100Hz-1MHz och uppvärmningen som är i minuter. Därför måste spolarna simuleras i frekvensdomänen, men temperaturen i tidsdomänen. Att simulera den elektromagnetiska delen i tidsdomänen skulle kräva enorma datorresurser.

Det är avsevärt mycket enklare att simulera induktionsuppvärmning av stillastående objekt än rörliga, men inom stålindustrin förs ämnet genom ugnen varvid matningshastigheten är en viktig parameter. Därför måste simuleringsmjukvaran stödja rörliga nät (moving mesh) för både elektromagnetism och värmeöverföring.

Vid en hög frekvens blir inträngningsdjupet litet. För att nå korrekta resultat måste det finita elementnätets storlek på kanterna vara tillräckligt litet för att lösa upp virvelströmmarna på ett korrekt sätt.

#### 4.7.1 Mjukvaror lämpliga för simulering induktion

Det finns en mängd mjukvaror som har stöd för induktionsuppvärmning. De större utvecklarna med generella verktyg är till exempel Ansys (USA), COMSOL (Sverige), Siemens (Tyskland), Dassault (Frankrike) och JMAG (Japan). Vissa bolag är mer fokuserade på den elektromagnetiska delen, men har visst stöd för multifysik. Att välja en mjukvara är inget enkelt val av flera olika aspekter. Ett generellt verktyg gör det möjligt att simulera en stor mängd liknande problem utan extra kostnad och det går att bygga ut simuleringarna med mer funktionalitet när kunskapsnivån förbättras. Specialiserade verktyg som till exempel ELTA (Ryssland) och CENOS (Lettland) har fördelen att det är enkelt att komma i gång med och troligtvis innehåller mjukvarorna det mesta som normalanvändaren behöver för att simulera induktionsuppvärmning i stålindustrin. Å andra sidan kan det krävas nära kontakter med mjukvaruleverantören för att få tillgång till önskad ny funktionalitet och detta kan vara kostsamt. Sammanfattningsvis är det troligtvis ett bättre val att använda ett generellt verktyg om man planerar att använda mjukvaran långsiktigt, men det är ett bättre val med en specialiserad mjukvara om det finns begränsad tid/resurser för att lära sig en generell mjukvara.

##### COMSOL Multiphysics® 6.0

COMSOL Multiphysics är en svensktutvecklad mjukvara. COMSOL har idag cirka 20 kontor runt om i världen, men huvuddelen av utvecklingen sker i Stockholm. Bolaget omsätter drygt en miljard kronor och har ca 500 anställda. COMSOL Multiphysics är en generell mjukvara för att simulera fysikaliska system och multifysik. Mjukvarans exceptionella möjlighet att simulera kopplad multifysik har gjort den så framgångsrik. Mjukvaran använder i princip enbart finita elementmetoden och kan lösa problem i 1D, 2D, och 3D eller en kombination av dessa. COMSOL Multiphysics kan integreras med de flesta CAD- mjukvarorna, eller så byggs geometrin med inbyggda verktyg.

Bas paketet COMSOL Multiphysics innehåller en mängd funktionalitet för att simulera till exempel värmeöverföring, linjär hållfasthet, laminärt flöde och har funktionalitet för att lösa en stor mängd olika problem. Bas paketet kan utökas med diverse olika moduler. För att simulera induktionsuppvärmning krävs AC/DC Module vilket till exempel innehåller möjligheten att simulera växelström i frekvensdomänen vilket är en nödvändighet enligt avsnittet ovan. Vidare kan Heat Transfer Module användas för att simulera naturlig konvektion, strålning mellan ytor samt mycket mer. Alla moduler kan kombineras med bas paketet. Om man till exempel skulle vilja simulera termomekaniska spänningar och deformationer i ämnet kan man lägga till Structural Mechanics Module och önskar man göra avancerade optimeringar krävs Optimization Module. Material Library innehåller en stor mängd

materialdata med temperaturberoende egenskaper. En relativ ny produkt är Metal Processing Module som på ett mycket exakt sätt kan simulera fasövergångar.

COMSOL Multiphysics är en generell mjukvara som kan vara relativt svår att använda för en nybörjare, men den innefattar i princip all funktionalitet man kan önska sig och mer därtill. Med bas paketet följer även Application Builder, en produkt där användare kan skapa så kallade simuleringsappar som är specialiserade gränssnitt för att lösa en viss typ av problem. Under projektet ELROS har företaget Deflexional AB skapat en simuleringsapp som simulerar en process där ett ämne transporteras genom tre induktionsugnar med en viss hastighet och detta projekt påvisar att det med relativt få medel går att skapa mjukvara som är anpassad precis efter behoven, men samtidigt möjliggör det för alla ingående företag/partners att vidareutveckla eller modifiera den befintliga modellen om man har tillgång till COMSOL Multiphysics och de extra produkter som används av modellen.

Med det extra tillägget COMSOL Compiler kan användare av COMSOL Multiphysics skapa fristående applikationer (EXE-filer), som kan köras helt fritt av andra utan betalning. Detta gör att en duktig användare av COMSOL Multiphysics kan utveckla mjukvara till andra som inte har erfarenhet av simuleringar. Utvecklingen av en specialiserad mjukvara är således oberoende av andra mjukvaruföretag som är specialiserade på verktyg för induktionsuppvärmning.

COMSOL erbjuder olika licensalternativ. En NSL (Named Single User License) kan installeras på upp till 3 olika datorer, med begränsningen att licensen endast kan användas av en och samma person. En CPU (CPU-locked Single User License) kan endast installeras på en specifik dator, men ha flera användare. Med en FNL (Floating Network License) kan licensen installeras på ett nätverk. Med en licens/nyckel kan företaget utföra obegränsat antal installationer, men om man enbart har en licens kan endast en person åt gången använda licensen. Det är möjligt att kombinera antalet licenser, så till exempel kan företaget ha 3 COMSOL Multiphysics och enbart 1 AC/DC Module om så önskas. En FNL kan köras på obegränsat antal noder/kärnor på ett kluster och en NSL/CPU kan använda obegränsat antal kärnor, men stödjer inte kluster. En FNL kostar dubbelt så mycket som en CPU/FNL. Licenser kan köpas som årliga, eller eviga. En årlig licens fungerar under exakt ett år från start och en evig licens har obegränsat slutdatum. Både alternativen inkluderar 12 månaders underhåll vid nyköp, det vill säga fri tillgång till produktuppdateringar, nya versioner och teknisk support. En evig licens kan årligen förnyas för 20% av det dåvarande nypriset för att få tillgång till de senaste versioner och support, men detta är inget krav.

Priserna nedan är för en årlig NSL/CPU. För en evig NSL/CPU är priset det dubbla. Samtidigt är priset för en FNL det dubbla jämför med en NSL/CPU.

Den minimala uppsättningen av produkter för att simulera induktionsuppvärmning är:

COMSOL Multiphysics - 54 975 SEK

AC/DC Module – 32 475 SEK

Övriga produkter av intresse:

Heat Transfer Module – 37 475 SEK

Structural Mechanics Module – 27 475 SEK

Material Library – 127 475 SEK

Optimization Module – 22 475 SEK

COMSOL Compiler – 69 950 SEK

ELTA 7.0

ELTA är ett simuleringsprogram designat speciellt för induktionsvärmning, men även andra relativt enkla värmeöverföringsfall baserat på strålning och konvektion kan simuleras. Man kan alltså simulera komplexa förlopp inkluderande flera steg av uppvärmning, varmhållning kylning och släckning.

En stor databas med olika material finns fördefinierade, man kan också ange egendefinierade materialdata.

Programmet finns med både 1d och 2d lösare (finit differensmetod). Man kan sätta upp processen som antingen en batch värmning eller med kontinuerlig rörelse genom spolarna. Såväl omslutande spolar som ovanpåliggande spolar (transfer-flux) hanteras i programmet.

Vad vi funnit unikt inom sfären av kommersiella specifika program är ELTAS möjligheter att specificera design av induktorn. Allt från termisk isolation och vattenkylning av spolar till olika konfiguration av ingående elektriska kretsar. Programmet beräknar dock inte spolarnas och isoleringen termiska förlopp med t.ex. multifysik men specifikationerna bidrar till beskrivning av systemets energibalans.

Definition av induktionsprocessen är flexibel. Man kan välja mellan angiven ström-, spänning- eller effektnivå, men även var i kretsen den valda storheten definieras. Detta gör att programmet verkar väldigt flexibelt för simulering av olika ändamål.

Programmet kostade år 2019 7000\$ inklusive ett års support. En provmånad utnyttjades inom ramen av projektet och erfarenheten från denna kan sammanfattas i följande punkter:

- Låg tröskel att komma in i programmet, menyer och GUI självförklarande.
- Många fördefinierade simuleringsexempel ingår och man kan hitta något som liknar det man själv önskar simulera.
- Resultatredovisning bra, det som programmet själv redovisar i form av 2D bilder och tid-parameterförlopp räcker i många stycken men det går också att exportera resultatparametrar för användning i andra mjukvaror om så önskas. En trevlig sak var att det också genereras en simuleringsrapport, där hela definitionen av uppsättningen



av processen ingår samt ett urval av de resultat, diagram eller figurer man önskar.

- Saknar till viss del flexibilitet för dynamiska förlopp, t.ex. förändrad matningshastighet.

[Home \(nsgsoft.com\)](http://nsgsoft.com)

## CENOS

Cenos är ytterligare ett kommersiellt program specifikt framtaget för induktionsvärmning.

Cenos är baserat på finita elementmetoden. Designat för låg och medium frekvensinduktion med både elektromagnetisk och termisk kopplade algoritmer.

Geometrier kan hämtas direkt från olika CAD format och stöd finns för automatisk som maskindelning. Har en diger materialdatabas för alla tänkbara metaller, men också möjligt att addera egna material. Full 3D, 2D samt axial symmetrisk simulering.

Som fysik kan frekvens, ström, spänning eller effekt väljas. Olinjära funktionaliteter såsom B-H kurva samt curie-temperatur kan specificeras. Fasberäkningar (austenit, ferrit, martensit etc.) kan göras genom förenklade materialparametrar utifrån TTT diagram.

Resultat kan visas både grafiskt samt exporteras i filformat för annan visualisering.

Flera tillverkare av induktionsutrustning samt typisk användare av värmning/härdningsförlopp anges använda sig av programmet.

Det verkar inte som CENOS kan beräkna hela multifysiken, bl.a. täcks inte spolens termiska fysik.

<https://www.cenos-platform.com/>

### 4.7.2 Resultat simulering utförda i projektet

Beräkning av kvalitativ energiförbrukning med hjälp av komplex modell Steeltemp

En simuleringsmiljö, baserat på Steeltemps komplexa modell och Matlab, blev utvecklat under projektet. En utförlig beskrivning av metodiken finns i Bilaga G.

Simuleringsmiljön skapade förutsättningar för att snabbt kunna simulera kvalitativa förändringar av bl.a. energiförbrukning för olika förhållanden. Steeltempmodellen över ugnarna är sedan länge väl utredd och verifierad så det bör anses att simuleringsresultaten har relativ hög verklighetsförankring.

De ugnar som simulerades var SSAB Borlänges omvärmningsugnar 301 och 302, merparten av resultaten av simuleringarna finns i Bilaga 1.

## Induktionsuppvärmning - simulering med COMSOL Multiphysics

Under projektet har induktionsuppvärmning undersökts närmare genom modellering och simulering med COMSOL Multiphysics. De material/ämnen som i detta projekt ansågs som relevanta för närmare studier är;

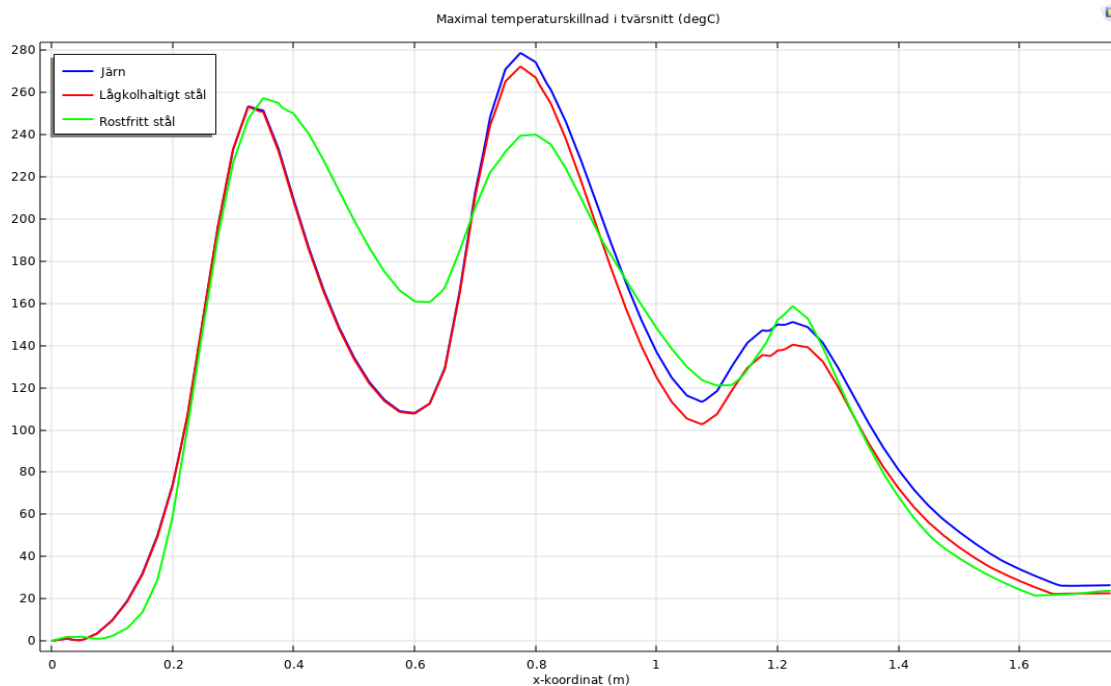
- Järn
- Lågkolhaltigt stål 1020 (Low Carbon Steel 1020)
- Rostfritt stål 430 (Stainless Steel 430)

Uppvärmningen har studerats genom att i modellen mata ämnena genom en induktionsugn med tre spolar.

De erhållna simuleringsresultaten har visat sig vara beroende av;

- materialegenskaperna, då metallers egenskaper är starkt temperaturberoende och induktionsugnar skapar stora temperaturskillnader.
- Curietemperaturen.
- BH-kurvor som kan göras beroende av temperaturen med enkla formuleringar.
- Spolarnas frekvens som har en stor inverkan på hur materialet värms upp.
- Ämnets geometriska tvärsnitt

Figur 38 visar resultatet för de tre olika materialen där alla materialparametrar är temperaturberoende. Resultatet från denna simulering kan användas för att avgöra vilken den maximala tillförda effekten kan vara med utgångspunkt från ämnets egenskaper. Då ofta begränsningen finns i maximala temperaturskillnaden i materialet (yttemperatur ställt mot innertemperatur).



*Figur 38 Visualisering maximal temperaturskillnad i tvärsnittet längs med ämnet*

Den framtagna modelluppsättningen och simuleringarna framgår i sin helhet i Bilaga E till denna rapport.

Modellen ska ses som ett test för modellerings förfarandet 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. Modellen är dock tillgänglig och utgör en bra grund för vidare utveckling inom området genom att bidra till andra framtida samt pågående projekt, såsom exempelvis ELROS projektet.

## 5. Diskussion

Projektet har identifierat vilka värmningsprocesser som de deltagande företagen själva bedömer som mest relevanta för sina processer.

Det har visat sig att även för höga temperaturer är det möjligt att ersätta fossila bränslen, där man tidigare inte trott att det kan gå genom exempelvis förvärmning eller eftervärmning. Det har bedömts att förvärmning i en process är där ett elektriskt uppvärmningssystem kan lämpa sig väl, detta specifikt med åtanke i det fall som studerats i denna rapport. Motiveringen till detta är främst att det går att kombinera ihop med befintliga värmningssystem men att man då kan sänka andelen energi som kommer från ett fossilt bränsle med hjälp av ett sådant förvärmningssteg.

De simuleringar som utförts under detta projekt för att analysera energiförbrukningen för fallet SSAB Borlänges stegbalksugn har visat att olika kombinationer med existerande ugnar (ergo ingen helelektrifiering) ger olika energibesparingar och därmed CO<sub>2</sub> reduktion, som högst 35%. Påverkat av användandet av framställd syrgas kan ha en ytterligare positiv inverkan på CO<sub>2</sub> reduktionen. En av de viktiga uppgifterna framöver blir därmed att hitta den mest lovande kombinationen av olika tekniker för att sedan beräkna den ekonomiska och miljömässiga nyttan samt optimera dessa för varje konverterings fall.

Det har även konstaterats i denna rapport att verkningsgraden i ett induktivt uppvärmningssystem är varierande mot ämnesbredden (och spolens storlek) och sänks även när man når curietemperaturer och uppöver. Det är viktigt att beakta att de angivna verkningsgrader som man får när man ställer frågan till leverantörer av utrustning oftast är angivna fram till spolen och för att få en helhetsbild av verkningsgraden bör kringutrustning såsom exempelvis transformatorer och högspänningsställverk beaktas.

Inom projektets ramar har det även begärts in priser för induktionsvärmning för det studerade fallet, SSAB Borlänges stegbalksugn. Prisbilden för induktiv värmning är högt ställd mot traditionell värmning men det finns potential och bör ses på i ett helhetsperspektiv, med exempelvis i åtanke att det kan bidra till en ökad kapacitet och en högre genomslöpnings (throughput) i processen. En stark förutsättning för att sådana relativt stora investeringar skall kunna möjliggöras är att med god säkerhet ha tillgång till fossilfritt producerad energi så att investeringen i processen fortsättningsvis kan vara konkurrenskraftig för produktionen med reduktion i CO<sub>2</sub> utsläpp som ett huvudargument.

Beträffande resistiv värmning, har denna rapport gått med frågeställningar till en ledande aktör inom området; Kanthal, för att på så vis få svara på frågeställningar kring möjligheter och begränsningar med tekniken. Det har visat sig att det även finns resistiva element som kan lämpa sig för värmning i höga temperaturer. Men ett alternativt användningsområde för resistiva element är även att förvärma

förbränningsluft till brännarna och på så sätt spara bränsle. Rent generellt kan man säga att fördelarna jämfört med i ugn direktstrålande element är att elementen kan arbeta i betydligt lägre omgivningstemperatur och att syrefattig atmosfär i ugn fortfarande kan erhållas så länge tillräcklig bränsleluft-kvot kan uppnås. Nackdelarna är ökade tryckförluster i förbränningsluftssystemet och förmodad ökad NO<sub>x</sub> bildning.

Ett svenskt företag Nycast har specialiserat sig på gas/luft-värmarsystem, och genomfört tester i Swerims fluidbed reaktor. Över 95% verkningsgrad från el till luft uppges uppnås. Detta är ett område som har potential att bidra positivt till omställningen och bör studeras vidare.

Det finns goda möjligheter på marknaden att simulera induktiv värmning, från proprietära programvaror som induktionsugnsleverantörerna använder sig av till mjukvaror såsom COMSOL Multiphysics. Med hänsyn till de möjligheter som finns har resultaten som framkommit genom simuleringar under denna studie visat sig vara mycket intressanta och användbara för framtida projekt, men även i andra pågående projekt som exempelvis ELROS, något som möjliggör det att komma längre i annan forskning. Med utgångspunkt i detta vore det rimligt att testa utfallet av simuleringarna i en fysisk miljö i framtiden.

## **6. Publikationslista**

Samforsk Seminarium –

Metalliska Material

Powerpoint presentation,

ref. Bilaga I.

## 7. Referenser, källor

Langejuergen, M. (2021-2022). *Bilaga D*. SMS.

Opezzo., G. (2021-2022). *Bilaga C*. Inductotherm.

Pfeifer, H. (2017). *Industrial Furnaces - Status and Research Challenges*. Energy Procedia.

Tarantino, N. (2021). *PLATIS - Plasmateknik i stålindustrins ugnar*. Stockholm: Jernkontoret.

## **8. Bilagor**

Bilaga A – Förfrågningsunderlag SSAB Borlänge

Bilaga B – Uddeholm

Bilaga C – Inductotherm\_EJ SPRIDNING

Bilaga D – SMS\_EJ SPRIDNING

Bilaga E – Deflexional

Bilaga F – Outokumpu\_EJ SPRIDNING

Bilaga G – Simuleringar SSAB

Bilaga H – N/A

Bilaga I – Samforsk Seminarium

Bilaga 1 – Fallstudie SSAB Borlänge. Värmning före varmvalsning









## **The Swedish Steel Producers' Association**

Since its foundation back in 1747, Jernkontoret has been owned jointly by the Swedish steel companies. Jernkontoret represents Sweden's steel industry on issues that relate to trade policy, research and education, standardisation, energy and the environment as well as transport issues. Jernkontoret also manages the joint Nordic research in the steel industry. In addition, Jernkontoret draws up statistical information relating to the industry and carries on research into the history of mining and metallurgy.