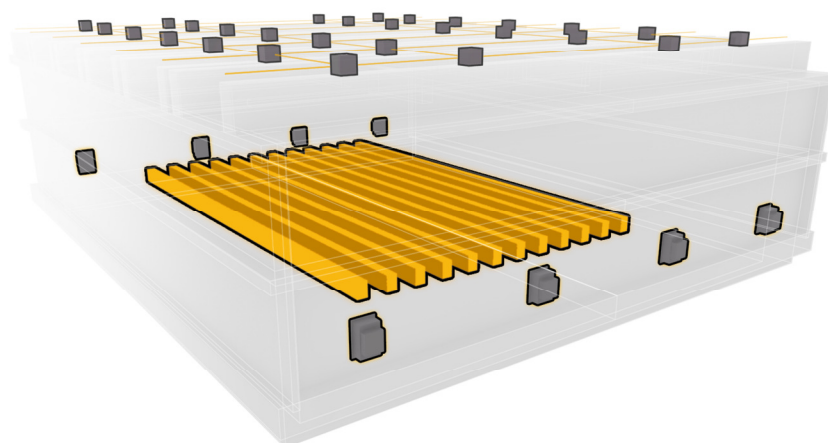




Temperaturoptimering med radarteknik



Författare

Patrik Ottoson och Daniel Andersson, Radarbolaget

Projektdeltagare

Alena Nordqvist, Jernkontoret

Patrik Eriksson och Nina Holmberg, Concordance

Kjell Wallin, Tech Translator

Peter Andersson och Lars Nylöf, Sandvik Materials Technology

Johan Hultberg, Fredrik Blomqvist och Mattias Kéva, Radarbolaget

Anders Jansson, Inlab

Jesper Oppelstrup och Anders Salwén, InnoXinetix

Tommy Johansson, Anders Nelander och Rolf Ragnarsson, FOI

RADARBOLAGET AB

Box 975
S-801 33 Gävle
Sweden

Regementsvägen 29
Phone: +46 (0)26-15 05 30
e-mail: info@radarbolaget.com

URL: www.radarbolaget.com
Org no: 556671-6261
VAT.SE 556671-6261 01



Innehåll

1	Sammanfattning	3
2	Energieffektivisering i stålindustrin med ny radarteknik	3
3	Material	4
3.1	Digital radar	4
3.2	Radarsensor	5
3.2.1	Antennhus	5
3.3	Testtrigg	5
4	Metod	6
4.1	Temperaturbestämning	6
4.2	Radarsignaler och noggrannhet	6
4.2.1	Elektromagnetisk våg	8
4.3	Radar cross section	10
5	Testmätningar	12
5.1	Test	12
5.2	Amplitudnivåer	13
5.3	Noggrannhet	14
5.4	Våglängd och radar cross section	15
6	Kalibrering av stålämnen	16
6.1	Dilatometermätning	16
7	Resultat	17
7.1	Radarsystem på Ugn62	17
7.2	Radarmätning	18
7.3	Operatörsgränssnitt	19
7.4	Het sensor	20
8	Analys och slutsatser	22
8.1	Signalkvalitet och identifiering	22
8.2	Mätnoggrannhet	23
8.3	Temperaturbestämning	23
8.4	Temperaturnoggrannhet	24
8.5	Kalibrering av mätsystem	25
9	Slutsatser	25
10	Diskussion och framtid	26
11	Acknowledgement	28
12	Referenser	28



1 Sammanfattning

Optimerad värmning av stålämnen i värmningsugnar kan ge energieffektiviseringar, minskade koldioxidutsläpp men också bättre stålqualität och mindre behov av legeringsämnen. Digital radar kan användas för att mäta avståndet till stålämnenas ändar i en ugn, det ger längden på expansionen av ämnet. Noggrannheten i en sådan mätning är i absoluta termer 0,68 mm och relativa termer 0,04-0,13 mm. En stor utmaning är att detektera stålämnet i ugnen, en ökad frekvens från 2 GHz till 3,125 GHz förbättrar detektionsförmågan med 53 %. Vid provmätning på ett riktigt stålämne 13C26, i Ugn62 på Sandvik, konstaterades det att ämnets expansion och temperaturmatchning har hög noggrannhet. Det gick att se ämnets fasomvandling mellan austenit och martensit form, och en strukturomvandling som inträffar då ämnet under en tid intagit samma temperatur som ugnen. Projektet har tagit fram en första prototyp för temperaturbestämning av stålämnen i värmningsugnar. Nya sensorer har konstruerats och testats inom projektet. Kriterierna för denna sensor var att den skulle ge hög noggrannhet, robusta signaler och tåla höga omgivnings-temperaturer. Det finns ytterligare potential i att detektera ämnen, öka noggrannheten, förstå stålämnens förändring vid värmning, välja process och processteg samt utveckling av sensorer för varma förhållanden. Resultatet har inte bara påvisat potentialen i ett radarsystem för temperaturoptimering utan även som ett vetenskapligt verktyg för produktutveckling och förbättrad produktkvalitet.

2 Energieffektivisering i stålindustrin med ny radarteknik

Det produceras alltmer stål i världen och i denna produktion åtgår en hel del energi. Värmning av stålämnen i ugnar görs mestadels med gas eller olja. En stor värmningsugn kan kosta tjugo till hundratals miljoner i ren energikostnad. Det finns ett trettiotal sådana ugnar bara i Sverige. Till detta kommer värmning i hundratals mindre värmningsugnar. Efter värmningen ska det mjuka stålet bearbetas eller valsas och produktens slutgiltiga egenskaper skapas. En förutsättning för gott slutresultat är att värmningen inför bearbetningen har skett på ett kontrollerbart och energisnålt sätt. Då det inte är möjligt att direkt mäta temperaturen på eller i stålämnen på ett tillförlitligt sätt är det svårt att också styra ugnarna mot bästa produktkvalitet med minimal energianvändning. De årliga besparingarna kan uppgå till flera miljoner för en enskild ugn genom god temperaturkontroll.

Potentialen för Sverige har angetts till 123 GWh gasol och olja. Vid närmare beräkningar i projektet verkar denna siffra ligga i överkant om den angivna potentialen är 3-6 procent, men det är inte belagt hur stor potentialen egentligen är (se tabell 1). I ett internationellt perspektiv tillverkar Sverige 2-3 promille av allt stål i världen, vilket innebär att den potentiella energieffektiviseringen för världens stålproduktion är stora och kan uppgå till 50 TWh.

	Energi	CO ₂	Kostnad
Ugn	1,9-3,7 GWh	432-864 ton	0,8-1,7 mnkr
Sverige	56-112 GWh	13-26 kton	25-50 mnkr
Världen	22-54 TWh	5-10 Mton	10-20 mdkr

Tabell 1. Besparingar på 3-6 procent jämfört med idag. Driftparametrarna för Sandviks Ugn62 har varit mall. Den förbrukar ca 4 800 ton gasol per år.



En optimerad värmning ger sålunda energieffektiviseringar, minskade koldioxidutsläpp men också bättre stålqualität och mindre behov av legeringsämnen. Det är också viktigt att på sikt förstå förbränningsprocessen och ha en mer flexibel produktionsprocess. Idag uppskattas ämnestemperaturen dels genom gastemperaturmätningar i ugnen, dels genom simuleringsmodeller såsom FOCS (ett system för styrning och optimering av ugnar). Ingen metod mäter eller bestämmer dock i dagsläget ämnestemperatur direkt.

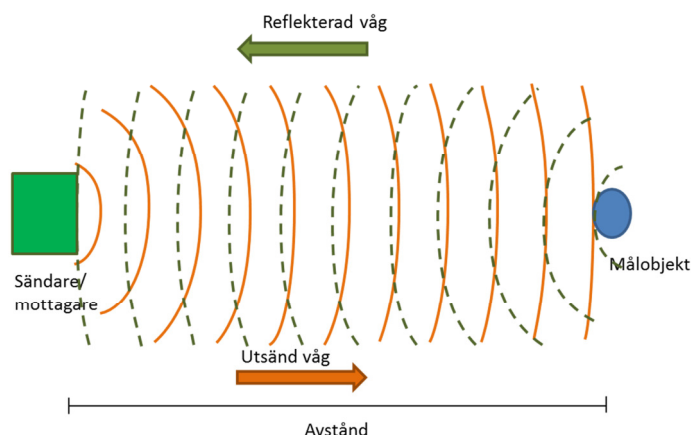
Målet och syftet med projektet TARA III är att bestämma ämnestemperaturen direkt. Det ska ske genom att mäta stålämnenas utvidgningskurva (mätt med dilatometer som funktion av temperatur) och sedan matcha denna utvidgning mot ämnets expansionskurva (mätt med radar som funktion av tid i ugnen). Ämnena kan således ses som stora termometrar. Den önskvärda noggrannheten i en sådan bestämning är 5-10°C. I en förlängning kan ytterligare information, exempelvis återkoppling av valskrafter, användas för att optimera produktionen ytterligare. I projektet används digital radar för att mäta expansionen.

3 Material

3.1 Digital radar

Mätning av stålämnenas expansion görs med en digital radar. Digital radar genererar pulser genom utsändning av en unik pseudokod (PRBS-kod) som senare korreleras och signalbehandlas i en FPGA (Field Programmable Gate Array). Den effektiva samplingsfrekvensen är 80 GHz vilket ger en mätupplösning på 3,75 mm. Antennerna sänder med låg effekt, och är vanligtvis operativa inom 10 meter beroende på mätobjekt och omkringliggande objekt, t.ex. väggar, tak, golv.

En radar mäter time-of-flight, den tid som elektromagnetiska vågor transporteras i olika media såsom luft, keramik och icke elektriska material. Detta kan liknas vid att mäta den tid det tar för ljuset att röra sig mellan två punkter. Dessa vågor kan inte transporteras genom elektriskt ledande material såsom metaller. För icke ledande material gäller att högre dielektricitetskonstanten (hur elektriska fält påverkas av ett material) ger högre reflektion. Radarn genererar en radarlob och mäter avstånden till allt omkringliggande oavsett vinkel, se figur 1. Radarloben kan till viss del fokuseras och kan därigenom mäta riktningen till objektet.



Figur 1. Sändare skickar en våg som reflekteras på målobjekt, mottagare tar emot reflekterad våg.



I mätsammanhang är det viktigt att ta hänsyn till radarupplösningen (det minsta avståndet för identifiering av två olika mål) och den beror på frekvensen och sålunda våglängden. Upplösningen i radarsystemet är en våglängd och i nuvarande testsystem motsvarar det 15 cm. Reflektioner från två mål inom detta område kommer att överlagras och uppfattas som ett mål och i värsta fall som ett mål med dålig signalsignatur, vilket kan påverka exempelvis mätnoggrannhet.

3.2 Radarsensor

Den radarsensor som använts inom projektet består av två antenner (mottagare och sändare) med antennhus. Antennerna är så kallade Vivaldi-antennerna (se figur 2a), och används för att sända ut och ta emot bredbandiga signaler. Centerfrekvensen för frekvensområdet är 2 GHz. Sensorn har också modifierats för att fungera i 3,125 GHz. Dataöverföringshastigheten är den dubbla, det vill säga 4 Gbit/sek respektive 6,25 Gbit/sek. För att överföra dessa data behövs således en höghastighetsswitch, en så kallad Wideband Radar Transceiver, WRT (se figur 2b). Sensorerna är via ett fibernät kopplade till en radarberäkningsenhet, Radar Processing Unit, RPU.



Figur 2. Sensorn består av a) två Vivaldi-antennerna och b) Wideband Radar Transceiver, WRT. c) Utvecklat antennhus för bättre signal, noggrannhet och styrka.

3.2.1 Antennhus

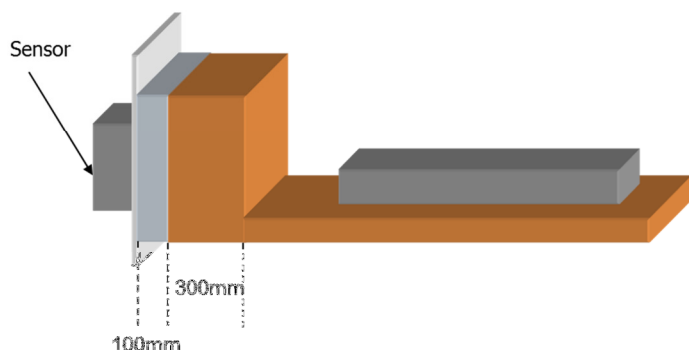
Radarrågen har möjligheten att penetrera icke elektriska material (dielektriska), såsom keramik, teflon och nylon. Därför kan antennerna kapslas för kylning med tryckluft och sättas under övertryck. Kapslingen görs i ett särskilt antennhus. Huset har ytterligare en effekt, nämligen att öka effektiviteten i radarsändningen och mottagningen. Det är en mätteknisk utmaning att mäta små mål (15x15 cm) på andra sidan en 0,4-0,5 meter bred keramisk vägg, vilket ska göras i projektet. Ett väl utformat antennhus med rätt dimensioner (Andersson, 2012) ger en radarsignal som är mer stabil (mindre fasändringar), starkare (högre amplitud) samt tydligare och noggrannare (smalare). Inom ramen för projektet har ett särskilt antennhus utvecklats för att åstadkomma en stabil radarsignal för maximal noggrannhet och styrka (se figur 2c).

3.3 Testrigg

En testrigg har byggts för att simulera Ugn62 på Sandvik (testugnen). Uppställning ser ut enligt figur 3a. En sensor (antennerna och antennhus) har monterats i anslutning till ugnens stålmantel. Ugnsväggen består av ett lättare material (kalciumsilikat, SKAMOL) med lågt brytningsindex och följs av ett tyngre material (Silox 60, Bjuf) med högre brytningsindex. Stålämnet ligger på ugnsgolvet



(härden) där det "värms". Testriggen ser i stort ut som testugnen gällande keramiska material och tjocklekar (se figur 3b). Det finns även fyra keramiska takelement för att simulera valvet på ugnen.



Figur 3. a) Radarsensor i profil på ugn. b) Testrigg.

4 Metod

4.1 Temperaturbestämning

Målet vid värmning av stål är ett erhålla en homogen temperaturfördelning i ämnet. Ett ojämnt temperaturfördelat ämne har olika temperaturer i volymen. Processen för bestämning av stålämnenas temperatur kan ske enligt följande:

- **Kalibrering av systemet**
 1. Stålämnenas utvidgningskurvor bestäms genom mätning med dilatometer där en bit av ämnet hettas upp och volymskillnaden mäts
 2. Radarsystemet kalibreras geometriskt i alla mätpunkter och hänsyn tas till olika väggtjocklekar.
 3. Temperaturkalibreringen görs genom att chargera ämnen med känd temperatur, längd och utvidgningskurva. Temperaturen för ämnet kan i vissa fall mätas i ugnen med en särskild logger, och utvidgningskurvan kan optimeras ytterligare
- **Temperaturbestämning**
 4. Innan ämnet läggs in värmningsugnen mäts dess temperatur och dess längd. Ämnet ska kunna chargeras kallt eller varmt
 5. Radarsystemet mäter expansionen av respektive stålämne vid mätplatserna, tusentals mätningar görs på varje ämne. Dessa mätningar skapar en expansionskurva
 6. Mätt expansionskurva (radar) matchas mot en kalibrerad utvidgningskurva (dilatometer) eller algoritim. Temperaturen kan därigenom bestämmas

4.2 Radarsignaler och noggrannhet

Vid radarmätning måste ofta någon form av anpassad signalbehandling göras eftersom radarsignalerna får olika utseende beroende på mätobjektet. I den generella signalbehandlingen görs följande fem steg:



1. Mätning utan mätobjekt skapar en *referenssignal*
2. Mätning med mätobjekt skapar en *mätsignal*
3. Differensen mellan referenssignal och mätsignal skapar en *målsignal*
4. Identifiering av målområde genom t.ex. Hilbert transform och tröskelvärden
5. Bestämning av målpunkt genom t.ex. minstakvadratanpassning av målsignalen.

I den anpassade signalbehandlingen görs:

- Synkronisering mot en känd hållpunkt, vilket ökar noggrannheten, t.ex. tydlig övergång mellan två media (vägg och luft) eller cross talk (direktsignalen mellan antennerna)
- Filtrering av signalerna för att lättare identifiera målområde ifall signalen är svag eller brusig, t.ex. bandpassfiltrering och faltning
- Analys av signalernas amplitud och övriga beroenden, t.ex. polarisering (vändning av vågen), refraktion (vågens brytning mellan olika ämnen, vilket leder till absorption/energiförluster), diffusion (spridning av vågen) och reflektion (vågens studs mot olika ytor).

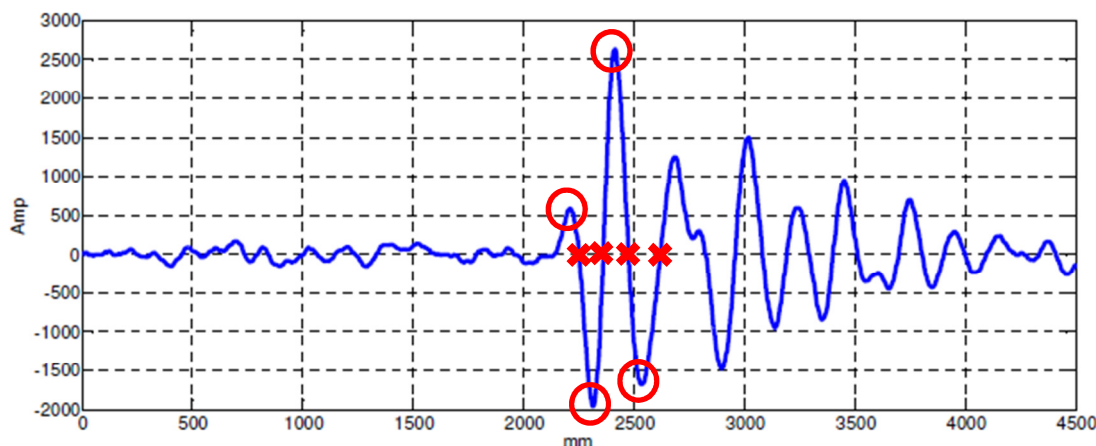
En radarsignal har alltid ett brus, vilket gör att målet kan vara svårt att identifiera. Detta är särskilt känsligt vid svaga signaler. FOI (2013) har påvisat positiva effekter med Pan/Tompkins-metod, vilket också har testats med god framgång i projektet. Metoden består av:

- Låg- och högpasfiltrering, för att ta bort brus
- Derivering, för att få lutningen
- Kvadrering, för att endast få positiva värden och betona högre frekvenser
- Integrering, för att få särdragsinformation
- Tröskeldetektion, för att få fram toppvärdet.

Ett mätsystem har alltid begränsningar gällande mätnoggrannhet och mätupplösning.

Radarsystemets begränsningar har inom projektet utretts av FOI (2013) där de analyserat signalkvaliteten, bruset samt metoder för att hitta målområde och bestämning av målpunkt. Det systematiska bruset är ca 0,5 % av maximal signalnivå. Systematiskt brus skiljer sig från oregelbundet brus (white noise) eftersom det uppträder som överliggande våg med viss frekvens. Brusets uppkomst är okänt, men det kan uppkomma på grund av jitter (störningar i signalen) i elektroniska komponenter, anslutningar och kablar. Dessa störningar påverkar målsignalen amplitudmässigt men även fasen (förskjutningar av vågen), vilket i sin tur begränsar noggrannheten och upplösningen i radarsystemet. Även referenssignalens utseende har en påverkan på målsignalen. Det beror på att när mätobjekt läggs in kommer objektet att skymma vissa detaljer i referensmätning, men det kommer även i liten del att skapas nya reflektioner och förändringar i signalen.

Radarsignalen har ett antal matematiskt gångbara målpunkter som kan användas (se figur 4). Signalen har en topp med flera två-tre sidolobor (toppar och dalar). De matematiskt användbara målpunkter är minima och maxima (där derivatan är noll) samt nollgenomgångarna (maximal derivata). Den mest stabila målpunkten är den högsta toppen, den kan beskrivas som en andragsgruva. Det finns en direkt relation mellan vald målpunkt och mätnoggrannhet.



Figur 4. Differenssignalen ger avståndet till målet.

4.2.1 Elektromagnetisk våg

Radarevågen består av en elektromagnetisk våg med en elektrisk (E) och en magnetisk (H) komponent. Dessa delar oscillerar i rät vinkel mot varandra och mot rörelseriktningen, den har två sålunda två polarisationsriktningar. En elektromagnetisk våg rör sig med ljusets hastighet. Det sker en dämpning av signalens styrka och hastighet genom materialet och det beror på absorption, reflektion och refraktion.

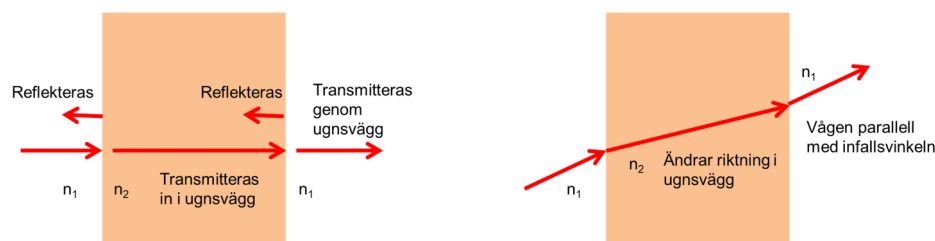
Keramik (Silox 60) har brytningsindex $n=4$ och luft har $n=1$. Enligt Fresnels formel $R = \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right|^2$ reflekteras sålunda en elektromagnetisk våg vid transmittering (övergång) till andra ämnen (se figur 5a). I fallet med radar och ugnsväggar innebär det att radarevågen transmitteras två gånger (före och efter väggen). Det resulterar att 40,96 % av energi passerar väggen (vid varje transmittering sker en förlust om 36 %). Den målreflekterade vågen förlorar också motsvarande energimängd på tillbakavägen, vilket innebär att 16,77 % av ursprunglig utsänd energi träffar mottagaren.

Refraktion är vågens brytning genom material med olika brytningsindex. Enligt Snells formel

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$

bryts en elektromagnetisk våg vid transmittering till andra ämnen (se figur 5b).

Refraktionen gör dels att vågen tar en annan väg än raka linjen mellan sensorn och målet, dels att energin viker bort om vågen transporteras längs en yta eller infaller snett mot den.

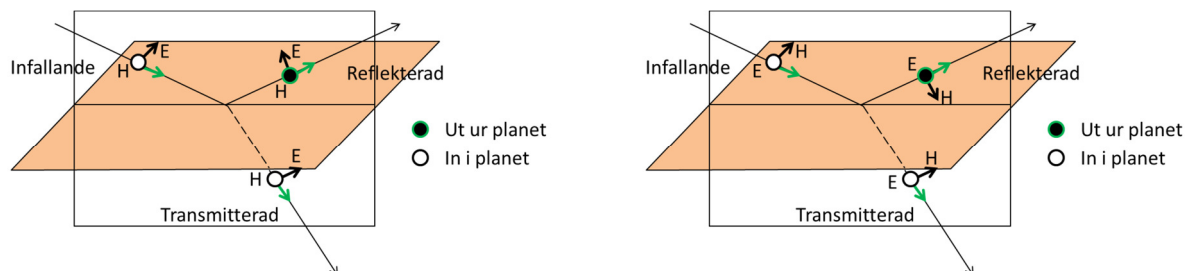


Figur 5. a) Reflektionsförluster vid transmittering. b) Refraktion vid transmittering.

Absorption i material sker på molekyl- och atomnivå. Den beror på våglängd, materialets struktur och den väg vågen ska ta. Materialets absorptionsegenskaper måste testas eftersom detta är svårt att beräkna. I vanliga keramik och tegelstenar är absorption låg för radarevågor.



Polarisationen hos de elektromagnetiska vågorna förändras vid reflektion mellan material med olika brytningsindex (se figur 6). Detta måste beaktas vid placeringen och vridningen av antennerna. En förändrad polarisation genom reflektion (en vridning på 180°) kan skapa interferens (överlagring av vågor) vilket kan ge utsläckning av radarsignalen eller att amplituden blir dubbelt så hög. Interferens kan också förändra signalsignaturen, vilket kan påverka mät noggrannheten.



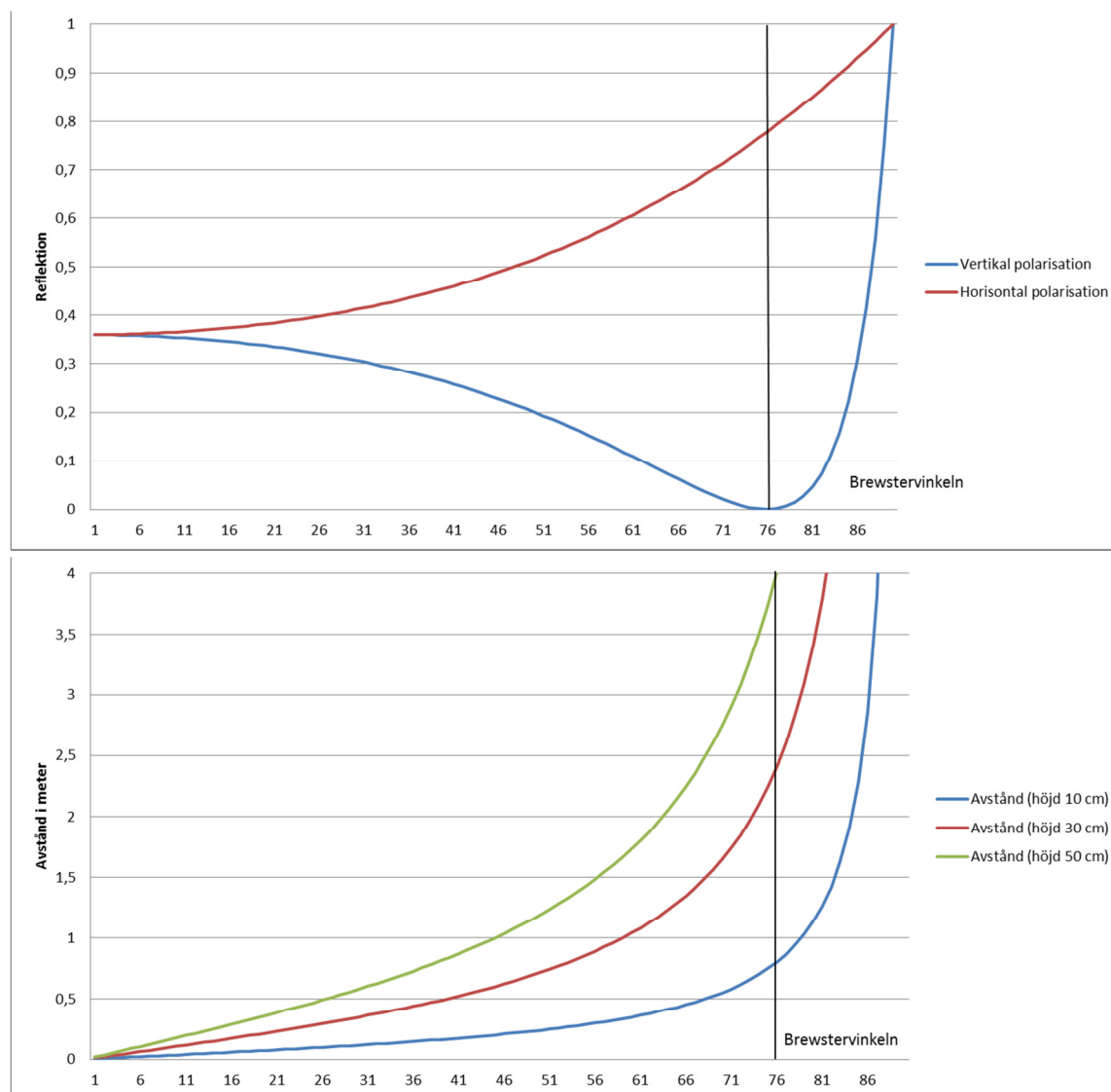
Figur 6. a) Vertikal polarisation för vertikal antennriktning, H polariseras 180° . b) Horisontell polarisation för horisontell antennriktning, E och H polariseras 180° .

Polarisering genom reflektion kan både vara ett problem då signalen släcks ut, men kan också användas som en fördel för att åstadkomma en starkare signal. Vid vertikal polarisering sker en signalförstärkning genom att vågorna (den reflekterade och den direkta) överlagras. I ugnsfallet sker dock en försvagning genom att radarvågen går längs golvet och viker ner i keramiken. Vid horisontal polarisering sker en partiell utsläckning vid överlagring av vågor i och med att polarisationsriktning ändras vid reflektion. I och med att antennerna ligger ovanför varandra inverkar inte golvet lika mycket som i vertikalfallet.

Signalstyrkan påverkas sålunda av

- Reflekerande polarisering och interferens vid studs på ämneskant
- Reflektionsvinklar beroende på hur högt över golvet sensor är placerad
- Refraktion, transmittering och absorption i golvet och väggen.

Beroende på infallsvinkel och polariseringsriktning (vertikal eller horisontal riktning) kommer reflektionsintensiteten jämfört med transmitteringen att variera (se figur 7a). Om antennerna är horisontellt placerade kommer reflektionen successivt öka mot golvet, men vid vertikal placering kommer reflektionen minska till den så kallade Brewstervinkeln varifrån den snabbt ökar igen. Infallsvinkeln mot ugnsgolvet påverkas av antennernas placering och höjd över golvet (se figur 7b). Det är viktigt att förstå att radarvågen bryts och transmitteras olika när den successivt rör sig längs golvet, då det egentligen finns oändligt med träffpunkter. Därför kan man betrakta mittpunkten mellan sensor och mål som en genomsnittlig reflektionspunkt, men i realiteten sker en försvagning av vågen längs hela golvet mot målet.



Figur 7. a) Reflektionsintensitet för olika infallsvinklar 0-90°. Den så kallade Brewstervinkeln inträffar vid $\approx 76^\circ$ för $n_1=1$ och $n_2=4$, där sker ingen reflektion utan allt transmitteras. b) Brewstervinkeln inträffar längre bort vid högre placering av sensorerna.

4.3 Radar cross section

I radarsammanhang påverkar radartvårsnittet (eng. radar cross section) signalstyrkan, det vill säga hur stor yta eller tvärsnitt som radarloben träffar. Radar cross section (RCS) är ett mått på hur detekterbar ett föremål är för radar. En större RCS indikerar att ett föremål är lättare att upptäcka. Ett objekt reflekterar en begränsad mängd av radarenergi. Ett antal olika faktorer bestämmer hur mycket elektromagnetisk energi som reflekteras:

- Material
- Målets storlek
- Relativa storleken av målet i förhållande till våglängd för radarn



- Infallsvinkeln
- Reflekterad vinkel
- Polarisationen hos utsänd och mottagen strålning.

Radar cross section, σ [m^2], definieras som:

$$\sigma = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot S_r}{S_t} \quad \text{Där} \quad S_r \text{ är spridningen av effekttätheten inom området } r \text{ [W/m}^2\text{]} \\ S_t \text{ är effekttäthet som absorberas av målet [W/m}^2\text{]}$$

För en plan direktreflekterande metallyta gäller att S_t är våglängden i kvadrat, λ^2 , och S_r är höjden i kvadrat, h^2 . Radien, r , är ersatt med bredden, w . Därefter måste det tas hänsyn till avståndet till målet, r , där utsänd effekt är P_t och förstärkningen är G_t . A_{eff} är effektiv storlek för den mottagande antennen i kvadratmeter.

$$\sigma = \frac{4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot h^2}{\lambda^2} \quad (\text{radar cross section för plan yta})$$

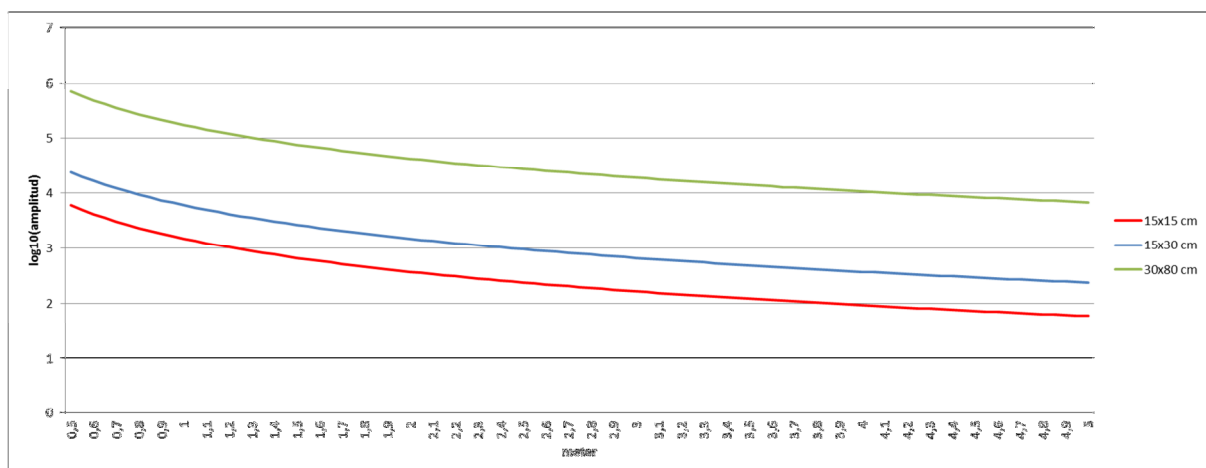
$$P_r = \frac{P_t G_t}{4 \pi r^2} \sigma \frac{1}{4 \pi r^2} A_{eff} \quad (\text{radarekvationen})$$

För att beräkna effekt- och amplitudreduktionen för ökande avstånd kan alla variabler i radarekvationen sättas konstanta förutom r . Därigenom erhålls följande ekvationer:

$$P = \frac{1}{r^4} \quad (\text{effektreduktion})$$

$$y = \sqrt{\frac{1}{r^4}} \quad (\text{amplitudreduktion})$$

Utifrån ovanstående formler kan amplitudnivåerna beräknas (se figur 8). Amplitudnivån påverkas av avståndet ($1/r^4$) och arean för stålänns ände (i kvadrat). Om amplitudnivån understiger radarsystemets brusnivå blir det svårt att identifiera målsignalen. Enligt formeln för radar cross section för plan yta påverkar även våglängden RCS. Radarbolagets antenner kan användas för olika våglängder. I tabell 2 redovisas radar cross section för olika ämnen och våglängder.



Figur 8. Beräknade amplitudnivåer (10-logaritmen) för olika ämnen i fri rymd (inte igenom vägg och längs golv).



Area/våglängd	2 GHz, $\lambda=15$ cm	4 GHz, $\lambda=7,5$ cm	6 GHz, $\lambda=5$ cm
15x15 cm	0,28 m ²	1,13 m ²	2,55 m ²
15x30 cm	1,13 m ²	4,53 m ²	10,19 m ²
30x80 cm	32,21 m ²	128,85 m ²	289,93 m ²
100x100 cm	559,28 m ²	2 237,12 m ²	5 033,51 m ²

Tabell 2. Beräknade radar cross section för olika ytstorlekar (ändarna på stålämnen) och för olika våglängder.

Radarbolaget har en radar som består av två olika antenner för sändning och mottagning. Direktsignalen (cross talk) mellan dessa två antenner påverkar amplituden på målet (jämför med att fotografera ett flygplan med solen som bakgrund eller himlen som bakgrund, med solen som bakgrund syns inte flygplanet). Målets amplitud beror sålunda på:

- Avståndet till mål (växer kvartiskt, r^4)
- Arean för målet (växer kvadratisk av ytan)
- Våglängden (växer kvadratisk)
- Cross talk (direktsignalen).

Signal-brus-förhållandet kommer att påverka möjligheten att identifiera ett mål (stålämne). Det finns två sätt att hantera signal-brus-förhållandet, både genom att höja signalens amplitud och minska brusets nivå. Fler mätningar, medelvärdesbildning och bättre signalbehandling kan göra det möjligt att identifiera mål vid lägre amplitudnivåer. Radarn skickar ut en PRBS-kod, en unik kod, som korreleras. Vid testerna i testtriggen var kodlängden 1023 bitar. Längre kodlängder ger bättre och stabilare radarsignaler.

5 Testmätningar

5.1 Test

Det finns två frågor, av yttersta vikt för ugnsmätning och temperaturbestämning, som måste besvaras:

- Hur väl kan ett mål (ändan av ett stålämne) synas?
- Vilken noggrannhet har radarmätningarna (relativt och absolut)?

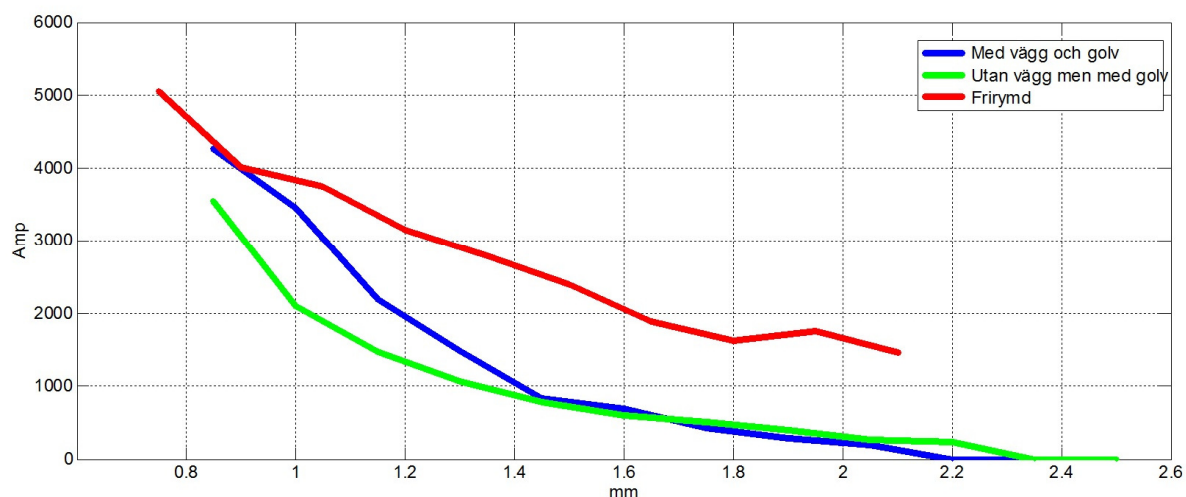
En testtrigg för verifiering och tester har byggts inom projektet. Figur 9 visar uppställning för amplitudmätning. Uppställning för noggrannhetsbestämning överensstämmer med figur 9a. Den består av motsvarande tegelsten som finns i värmningsugnar (Silox 60). Ett stålämne med dimensionen 15x15 cm har använts. Förflyttningar av ämnet har både gjorts grovt genom manuell förflyttning och fint genom förflyttning av ämnet med en särskild linjärenhet med en noggrannhet på 0,1-0,2 mm (maskinell förflyttning).



Figur 9. a) Mätning med vägg och golv. b) Mätning i fri rymd, utan golv och vägg. c) Mätning utan vägg men med golv.

5.2 Amplitudnivåer

Amplitudnivåer har mätts i testriggen (se figur 10). Enligt figur 8 ska amplituden (för fri rymd) bli en fjärdedel mindre med avståndet. Det visar i mätningarna att den teoretiska modellen inte är direkt tillämplig på den radar som använts i projektet. Det går att se att de mätta värden snarare halveras med avståndet. Det finns tydliga skillnader om det skett en dämpning genom vägg eller längs golv. Vid dämpning av signalen faller amplituden snabbare med avståndet, mer än i den teoretiska modellen ($1/r^4$). Detta beror på reflektions- och refraktionsförluster. Det är särskilt intressant att notera att signalen för ett mål nära väggen (0,8 m) ger lika hög amplitud med vägg och golv som utan, men att den blir lägre utan vägg men med golv. Detta fenomen beror på att väggen minskar cross talk (direktsignalen) vilket gör målsignalen förhållandesvis högre.



Figur 10. Uppmätta amplitudnivåer för ett litet ämne (15x15 cm) genomfört i fri rymd (utan vägg och golv), med vägg och golv samt utan vägg och med golv.

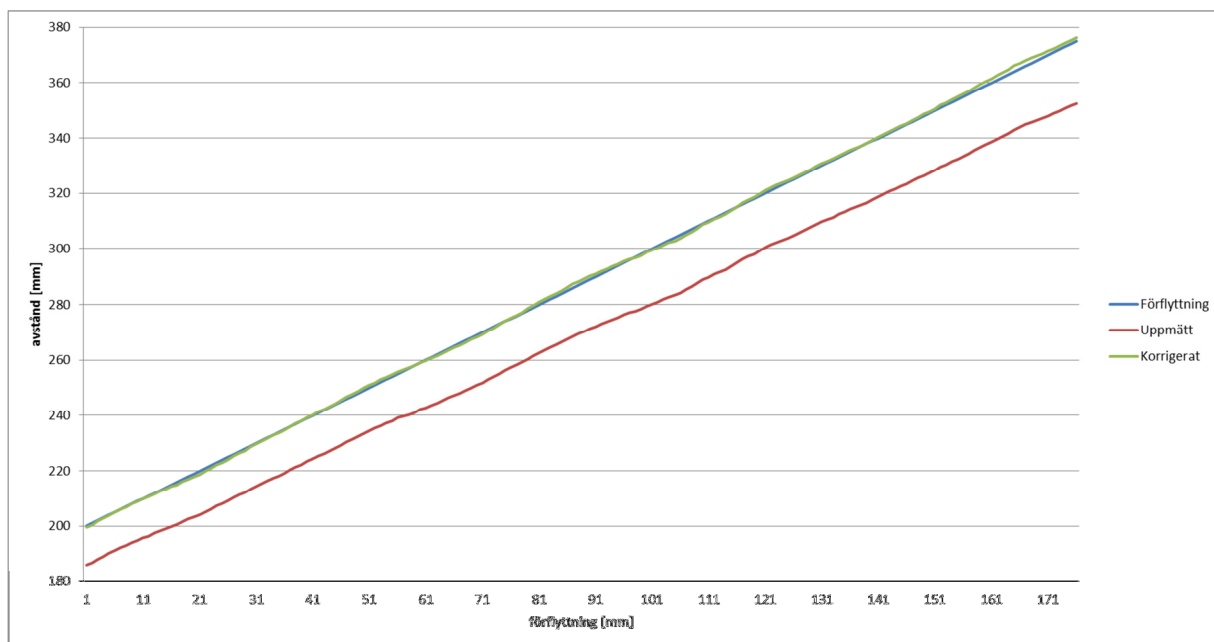


5.3 Noggrannhet

Noggrannhet i ett mätsystem är uppdelat i relativ noggrannhet (precision) och absolut noggrannhet. Den relativa noggrannheten är ofta kopplad till repeterbar noggrannhet, vilket betyder att det ska vara samma noggrannhet under samma förutsättningar (samma längd, konstellation och mätobjekt). Den relativa noggrannheten är ofta högre än den absoluta noggrannheten, och det beror på att absolut noggrannhet kräver ett definierat referenssystem och att sensorernas absoluta positioner är kända. Det finns ett antal kända faktorer som påverkar noggrannheten i Radarbolagets digitala radar. Dessa är:

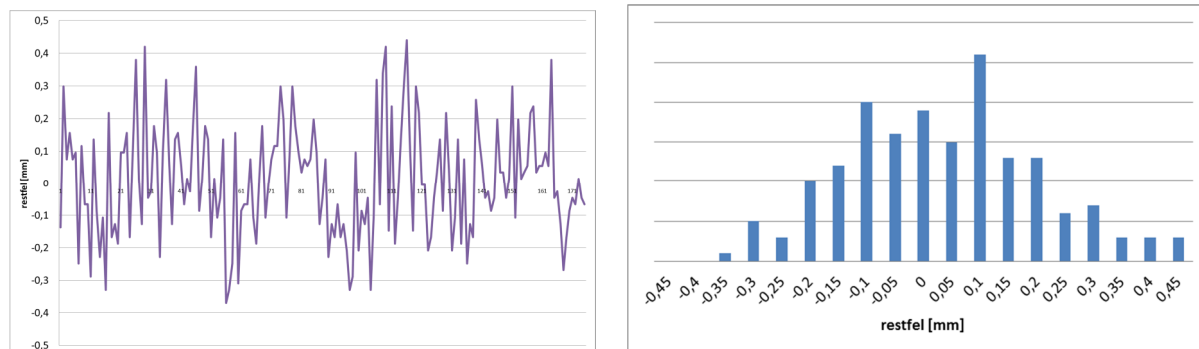
- Frekvens i interna klockan på radarberäkningsenheten (samplingsklockans hastighet)
- Brus (systematisk och "white noise")
- Signalbehandling
- Miljöfaktorer (värme, vägg tjocklekar)
- Målets utseende (stålämnenas egenskaper och placering).

Det systematiska bruset har en direkt påverkan på radarsystemets absoluta noggrannhet (FOI, 2013). Radarsignalen "rider" ovanpå bruset vilket kan fasförskjuta signalen (den förändras eftersom signalen blir en summa av två eller flera överlagrade signaler). Radarsignalen har en mätupplösning på 3,75 mm, och med avancerad signalbehandling går det att uppnå en upplösning på 0,1-0,2 mm. I testmätningen förflyttades ett stålämne successivt 1 mm. Detta avstånd måste korrigeras eftersom antennerna inte sitter exakt framför ämnet (se figur 11).

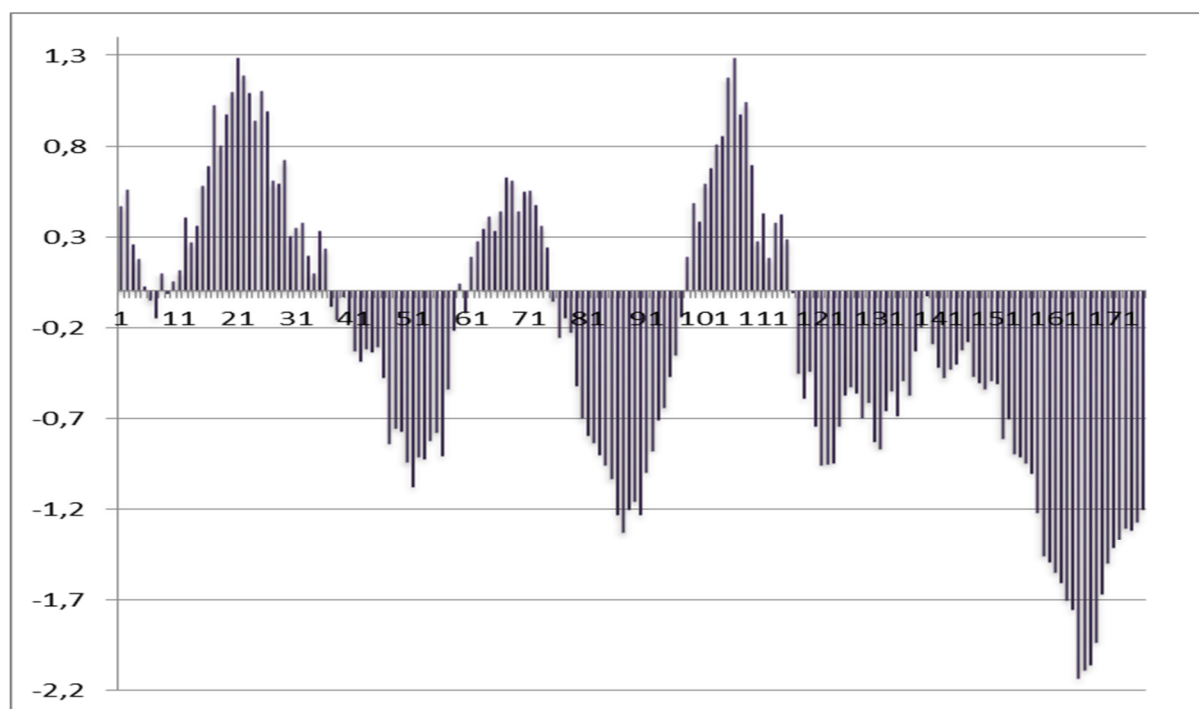


Figur 11. Förflyttning och mätning av stålämne i testrigg.

Det systematiska brusets effekt på noggrannheten kan ses i figur 12-13. Den relativa noggrannheten (medelfel) är 0,13 mm (FOI, 2013) medan den absoluta noggrannheten är 0,68 mm.



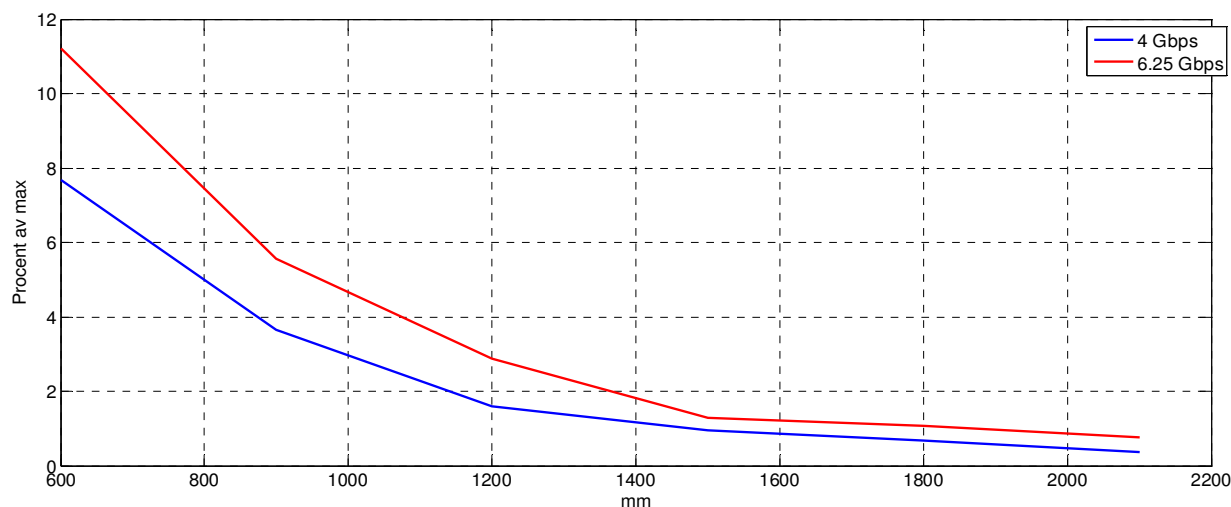
Figur 12. Relativ noggrannhet a) restfelen vid relativ förflyttning. b) fördelning av restfelen



Figur 13. Absolut noggrannhet kan uppskattas från restfelen[mm] vid olika avstånd.

5.4 Våglängd och radar cross section

Enligt ekvationen för radar cross section (RCS) beror dess storlek, vid mätning av fyrkantiga ytor, av våglängden. Om frekvensen ökar och våglängden minskar påverkas RCS omvänt kvadratisk. Den teoretiska skillnaden i RCS mellan 2 GHz och 3,125 GHz är 2,44 gånger (amplituden är kvadratroten ur RCS, det vill säga 1,56). Det innebär att ett stålämne med ändarean 15x15 cm kommer att upplevas som om det var 22,5x0,22,5 cm (om den högre frekvensen används), det vill säga väsentligt större i radarsammanhang. I figur 14 och i tabell 3 redovisas skillnaden mellan praktiska mätningar gjorda med två olika frekvenser, 2 GHz och 3,125 GHz. Den maximala amplituden varierar mellan de två frekvenserna (18 920 respektive 21 920). Det går att konstatera att amplitudskillnaden (med hänsyn taget till maximal amplitud) mellan de två olika frekvenserna är 1,46-2,13 (i genomsnitt 1,53 eller 53 %). Det är relativt nära det teoretiska värdet på 1,56.



Figur 14. Amplitudreduktionen för två olika frekvenser och våglängder. Kurvan redovisar värdena i förhållande till maximal amplitud.

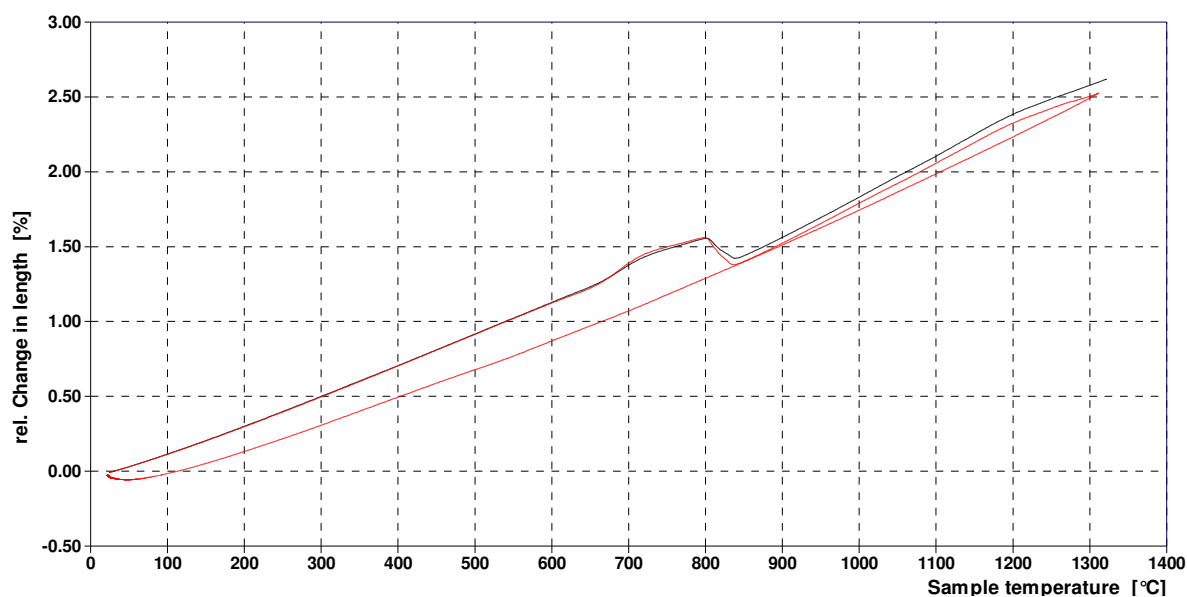
	600 mm	900 mm	1 200 mm	1 500 mm	1 800 mm	2 100 mm
2 GHz	1452	690,1	302,2	180,7	130,5	68
3,125 GHz	2459	1218	630,2	284,4	238,1	168,8

Tabell 3. Amplitudnivåer för två olika frekvenser och våglängder.

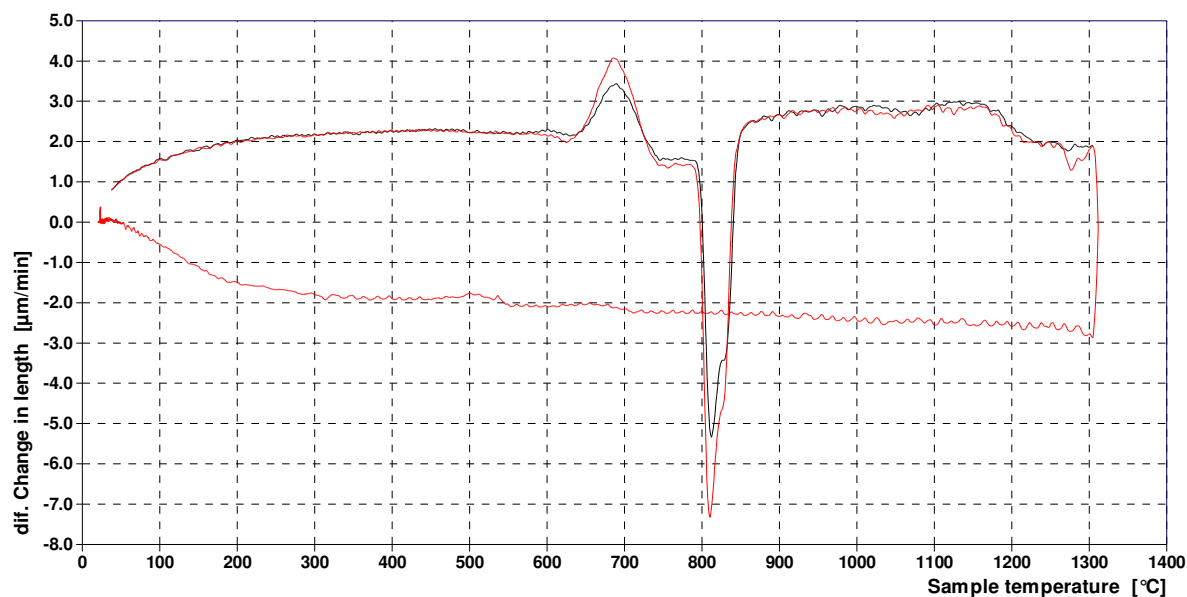
6 Kalibrering av stålämnen

6.1 Dilatometermätning

Sandvik Material Technology (SMT) har genomfört dilatometermätning på stålämnet 13C26 (Nylöf, 2013). En dilatometer (DIL802) är ett vetenskapligt instrument som mäter volymförändringar orsakade av en fysisk eller kemisk process, i detta fall en temperaturförändring. Vid mätning stoppas en metallbit in i en kammare där den hettas upp. Upplösningen i Sandviks dilatometer (DIL802) är 10 nm i längd och 0,05°C i temperatur. Ämnet har en tydlig fasomvandling vid 830°C (se figur 15). Fasomvandlingen är metallens omvandling mellan austenit och martensit form. I samma dilatometermätning syns fasomvandlingen tydligare om y-axeln representerar längdutvidgning per minut (se figur 16). Då syns även någon form av strukturförändring vid 1 140°C då utvidgningshastigheten minskar vid denna temperatur. Det är viktigt att utgå från en dilatometermätning där stålämnets bearbetats på samma sätt.



Figur 15. Dilatometermätning av två stålämnen av typ 13C26, uppvärmning (två kurvor) och nedkylning (en kurva). Grafen visar relativ längdutvidgning och temperatur.



Figur 16. Dilatometermätning av två stålämnen av typ 13C26, uppvärmning (två kurvor) och nedkylning (en kurva). Grafen visar relativ längdutvidgning per minut och temperatur.

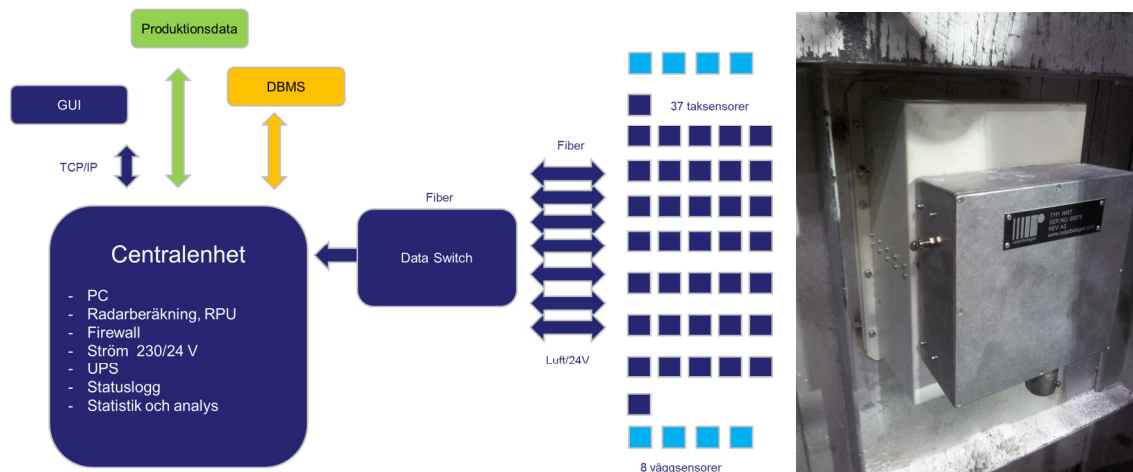
7 Resultat

7.1 Radarsystem på Ugn62

Ugn62 på Sandvik Material Technology (SMT) har använts för skarp mätning och test. I dagsläget finns 37 sensorer som övervakar processerna i ugnen från valvet (tak). I projektet installerades ytterligare 8 sensorer på ugnens väggar (se figur 17b). Radarsystemet består av totalt 45



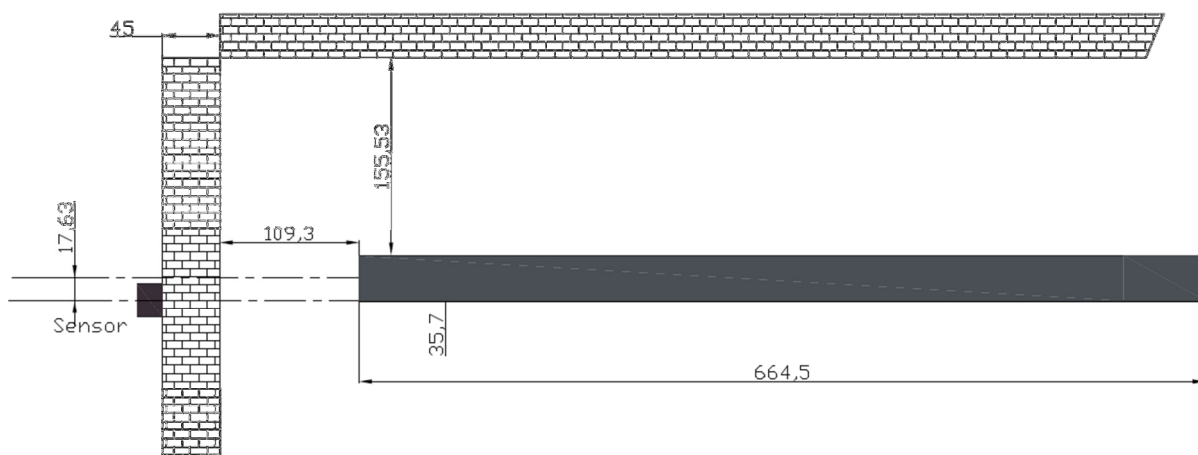
Samverkande sensorer som mäter i ca 120 mätpunkter tack vare att sensorerna är adresserbara och kan kombineras med varandra (1 st sändaren kan ofta kommunicera med 4 st mottagare). Systemet är också uppkopplat mot Sandviks produktionssystem, varifrån initiallängd och -temperatur erhålls. Alla data lagras i ett databassystem och kan visualiseras via ett grafiskt gränssnitt (systemskiss presenteras i figur 17a).



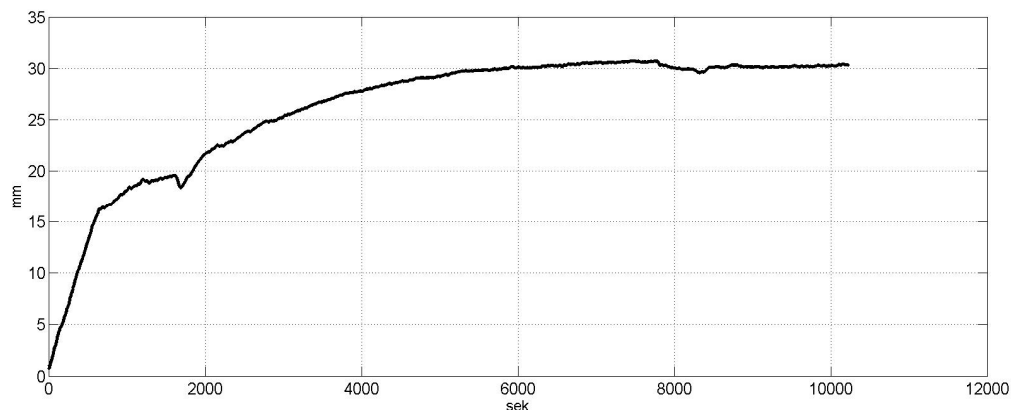
Figur 17. a) Systemskiss över radarsystem på Ugn62. b) Väggsensor på Ugn62.

7.2 Radarmätning

Det genomfördes ett test av med väggsensorerna på Ugn62. Provämet var av typen 13C26 med ändstorleken 145x357 mm och ämnet var 6 645 mm långt (mått på placering i ugnen enligt figur 18). Mätningen genomfördes endast från ena sidan på grund av att det tilldelade testämnet var för kort för att mäta från båda hållen. Under hela mätningen låg ämnet helt stilla och mättes vid första sensorparet. I figur 19 redovisas längden till ämnet vilket motsvarar ämnets halva expansionen.



Figur 18. Sensor, ämne och Ugn62 vid mätning.

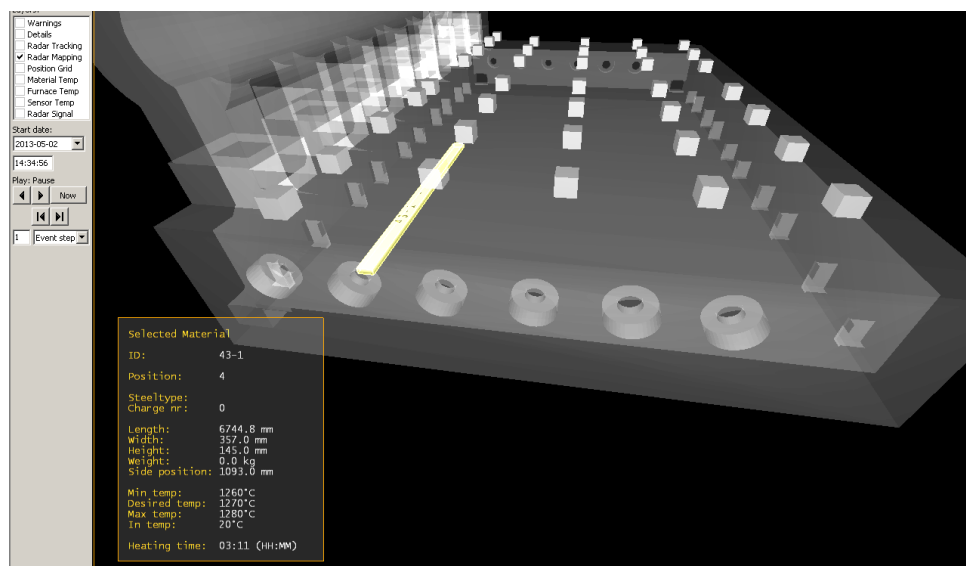


Figur 19. Mätning med radar av 13C26.

Ämnet vid testet var kallt (20°C) vid inläggning i Ugn62, så kallad kallchargering genomfördes. Operatören hade vissa problem vid inläggningen av ämnet. Det tog cirka 30 min innan ämnet låg på plats. Det innebär att ämnet var några hundra grader varmt och temperaturen var också ojämnt fördelad när mätningen påbörjades. Därför redovisar kurvan, i figuren 19, inte startpunkten då ämnet var rumstempererat. Expansionen var sålunda något större än vad grafen redovisar. Ugnen hade en temperatur på 1 235-1 240°C, en temperatur som ämnet nådde i slutet (den plana delen av kurvan).

7.3 Operatörsgränssnitt

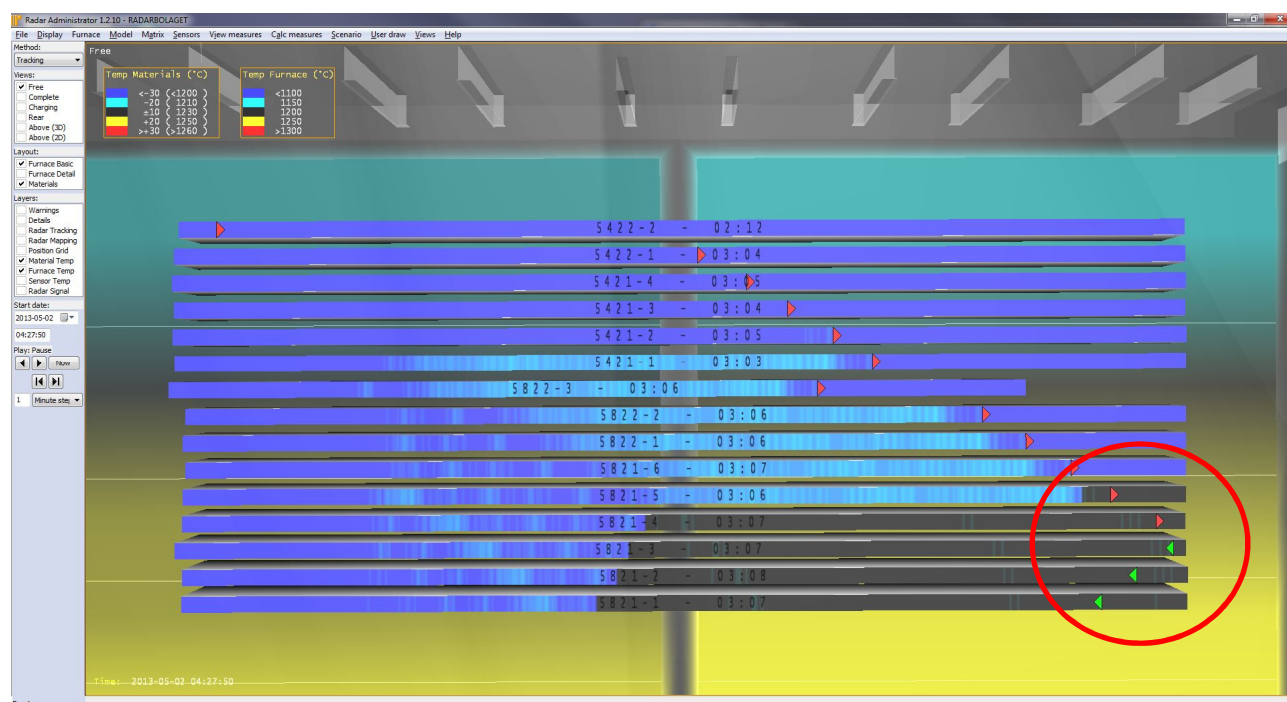
Radarsystemet har ett grafiskt operatörsgränssnitt där ugnen kan visualiseras i tre eller två dimensioner. I gränssnittet kan alla data från radarsensorerna redovisas, exempelvis radarföljning, upphöjning av ämnen samt positionering och detektion vid inläggning. Även Sandviks produktionsdata, såsom ugnstemperatur, mått och ämnespositioner, redovisas i systemet. I figur 20 redovisas operatörsgränssnittet såsom det såg ut vid testmätningen av 13C26 (enligt ovan).



Figur 20. Operatörsgränssnitt med tredimensionell ugnsmo-
dell.



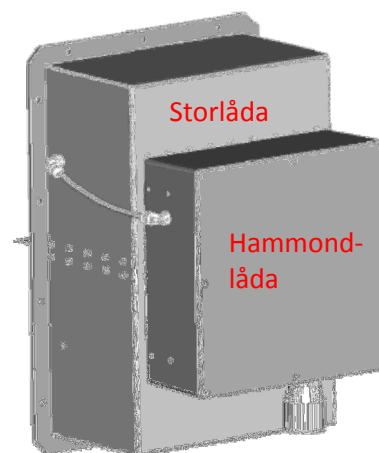
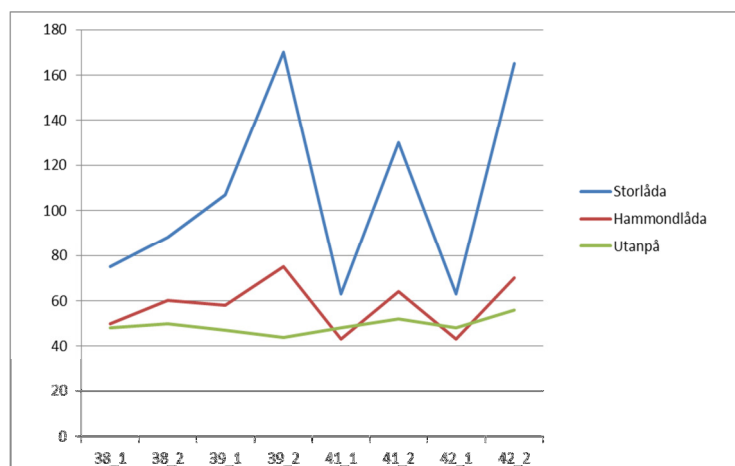
Visualisering av temperaturutvidgningen är tänkt att fungera som en "klarknapp" då individuella ämnen uppnått sin "färdigtemperatur". I takt med att ämnet mäts och utvidgas räknas detta om till en temperatur (se figur 21). När det inte längre utvidgar sig är ämnet i princip genomvarmt. I verkligheten kan inte ett ämne tas ut direkt även om det har nått optimal temperatur, det kan ligga andra ämnen före. Därför kommer visualiseringen mer att fungera som en indikator, men kan naturligtvis varna operatören för att inte ta ut ämnet för tidigt, om det fortfarande expanderar.



Figur 21. Visualisering av ämnens temperaturutvidgning. Röd pil på ämnena indikerar icke genomvarmt material och det motsatta för grön pil.

7.4 Het sensor

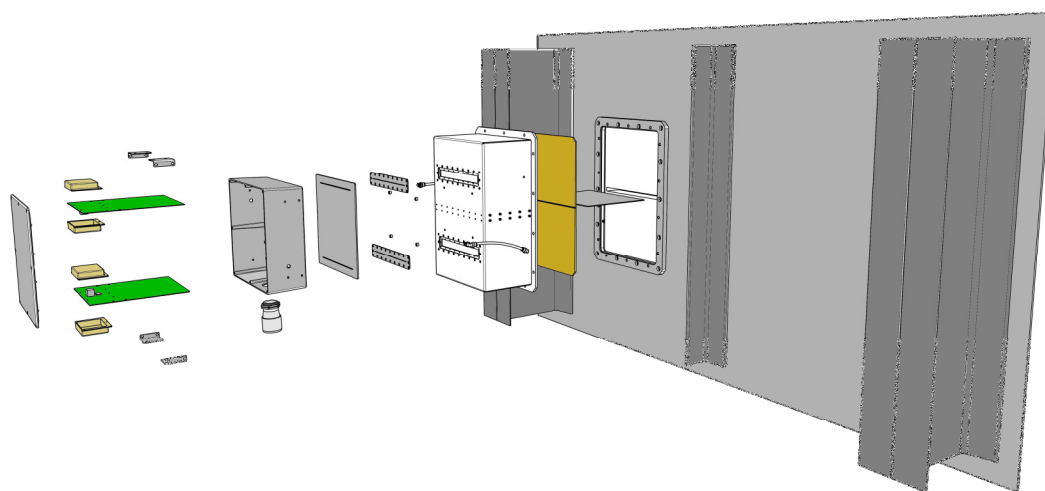
En av de ständigt återkommande utmaningarna vid mätningar vid värmningsugnar inom stålindustrin är de höga temperaturerna. Värmen kommer inifrån ugnen samt från brännare och rökkanaler. Vanligtvis fungerar elektronik upp till 60-80°C. Därför krävs någon form av kylning, och i detta fall används tryckluftskylning. Isolering fungerar inte eftersom värmningsugnen konstant avger värme. Antennhusen är utformade så att de mindre känsliga antennbladen placeras i en låda när ugnen medan elektronik, kablar och kontaktdon finns i en annan låda. Före kylning var temperaturen i storlådorna 100-200°C. Efter luftkylning varierade temperaturen mellan 63-165°C för storlådan där antennbladen finns och 43-75°C för Hammondlådan där antennelektronik, kablar och kontaktdon var monterade (se figur 22).



Position	38_1	38_2	39_1	39_2	41_1	41_2	42_1	42_2
Storlåda	75	88	107	170	63	130	63	165
Hammondlåda	50	60	58	75	43	64	43	70
Utanpå	48	50	47	44	48	52	48	56

Figur 22. Temperatur i olika lådor för väggsensorerna efter kylning.

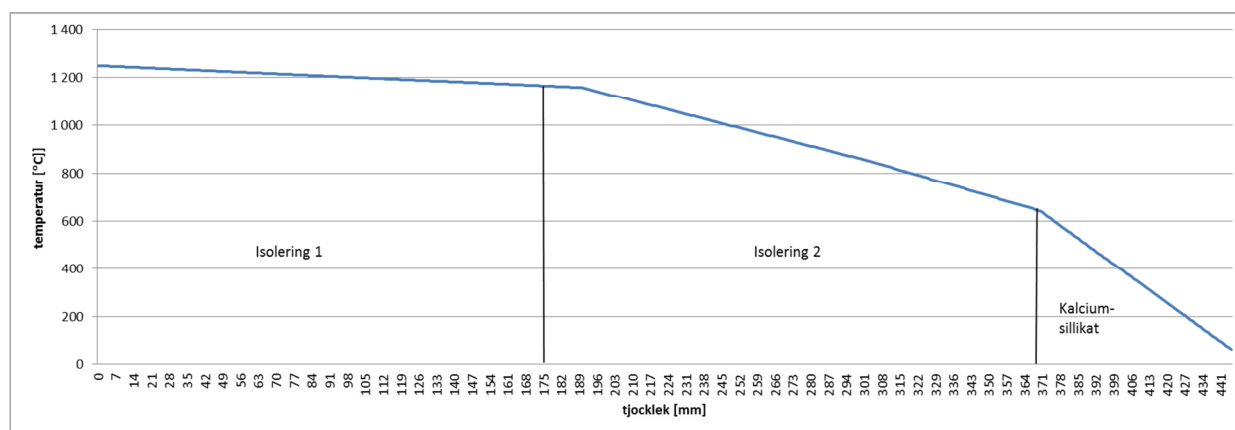
Tryckluft kan i vissa fall vara komplicerat och dyrt att dra fram, särskilt om stora lådor ska kylas. Det skulle vara en stor fördel om elektroniken behövde mindre kylning. Därför har en het sensor designats och konstruerats. Den består dels av existerande antennhus där antennblad och antennelektronik, kontaktdon och kontaktdon hålls åtskilda, dels av nya antenner. De nya PCB-antennbladen (Printed Circuit Board) är konstruerade i ett material som kallas AD-85N, som klarar temperaturer upp till 200°C. Elektronik, kontaktdon och kablar är särskilt anpassade för högre temperaturer, i detta fall maximalt 80°C. Elektronik och kontaktdon kommer dessutom att kapslas, isoleras och luftkylas (se figur 23). Fördelen med att endast kyla elektronik och kontaktdon är stora då utrymmet är några få kubikcentimetrar jämfört med flera kubikdecimetrar.



Figur 23. Design av het sensor. Elektronik på de gröna antennbladen kan kapslas in och isoleras.



Antennen för het sensor kommer att ha samma storlek och radaregenskaper som den befintliga antennen (befintligt substrat heter AD-450). AD-85N-antennen kommer att vara något dyrare. Den nya AD-85N kan certifieras, testas och märkas på liknande sätt som den gamla AD-450-antennen. Dessutom kan samma antennhus och anslutningar användas oberoende av antenntyp. Det är dock konstruktionen för hela sensorn som är viktigt, antenn, antennhus, kylning, skärmning och isolering. Den starkast bidragande orsaken till värmen i sensorn och antennhuset är värmen från ugnen. Därför kan sensorn behöva kompletteras med ett extra isoleringsskikt av exempelvis kalciumsilikat (figur 24 redovisar temperaturgradienterna för Ugn62). Det betyder att Ugn62:s tredje isoleringsskikt byts ut mot en högvärdigare isolering, exempelvis kalciumsilikat.



Figur 24. Temperaturgradienterna i Ugn62 (y: °C och x: mm isolering). Det är tre isoleringsskikt i Ugn62. Yttertemperaturen kan sänkas till 65 °C om isolering med kalciumsilikat används.

8 Analys och slutsatser

8.1 Signalkvalitet och identifiering

Identifiering av mål är direkt kopplat till amplituden för radarsignalen. Är den för låg är det inte möjligt att hitta målet, den drunknar i bruset. Signalbehandlingen blir också svårare med lägre signalnivåer eftersom den kan vara fasvriden under inverkan av bruset. Flera saker påverkar signalen:

- Reflektion, refraktion, polarisation och absorption av radarvågen försvagar den när den dels penetrerar väggen, dels transporteras längs ugnsgolv. Högre placering av antennerna kan förändra signalstorleken.
- Radar cross section (radartvärsnittet) och amplituden skapar en fysisk begränsning att upptäcka målet (stålämnet) i radarsignalen. Denna enhet beror på utsänd effekt, avståndet, area, våglängd och cross talk (direktsignalen).

Även om det vore möjligt att placera antennerna högre är det inte att föredra eftersom geometrin blir mer komplicerad. Det införs också en osäkerhet om vad som mäts (kant eller reflekterad yta) och vilken väg vågen tagit (snett genom väggen, olika brytning och reflektioner). Därför är nuvarande antennplacering att föredra då den skickar radarvågen, i princip, rakt fram. Det finns följande möjliga förbättringar av signalen:

- Öka radar cross section genom kortare våglängd (högre frekvens)



- Minska cross talk genom bättre fysisk utrustning, exempelvis någon form av interferensfilter eller annan skärningslösning mellan antennerna
- Minska systematiskt brus
- Öka kodlängden för stabilare signaler och minskat signal-brus-förhållande
- Öka signal-brus-förhållande genom medelvärdesbildning och bättre signalbehandling.

Amplitudens reduktion vid reflektion, refraktion, absorption, målets storlek och ökande längder är en viktig faktor för konstruktion av ett radarsystem. Vid installation behövs en korrekt ekvation som beskriver den faktiska reduktionen.

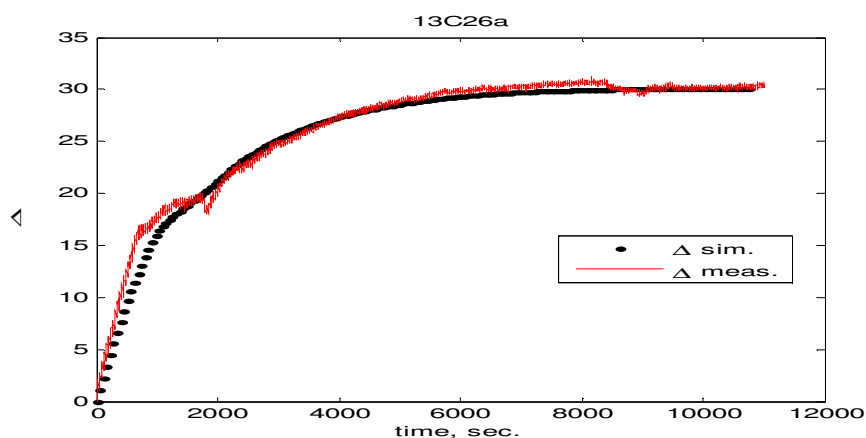
8.2 Mätnoggrannhet

Radarsystemets mätnoggrannhet motsvarar förväntade storheter och är 0,68 mm. Den relativa noggrannheten är 0,13 mm (FOI, 2013). Det är därigenom möjligt att, utifrån mätnoggrannheten, bestämma en temperaturförändring på 5-10°C. Trots detta torde det vara möjligt att förbättra den absoluta noggrannheten med en faktor 2-3, vilket motsvarar en absolut noggrannhet om 0,2-0,4 mm. Motsvarande faktor gäller också den relativa noggrannheten (0,05-0,1 mm). Det kan göras genom:

- Minskning av systematiskt brus
- Minskning av termiskt brus i elektronikkomponenterna genom bättre kylning och stabilare komponenter, exempelvis med het sensor
- Förbättring av signalkvaliteten
- Medelvärdesbildning av mätvärdena och använda mer avancerad statistisk analys.

8.3 Temperaturbestämning

Ugnstemperaturen varierade under mätningen från 1 235-1 240°C. När ämnet lades in ugnen var temperaturen 1 200°C. Temperaturmätningar är gjorda cirka 1,5 meter ovanför ämnet, därav finns en osäkerhet i temperaturen vid ämnet. Enligt Salwén och Oppelstrup (2013a-b) går det att anpassa mätningarna från figur 25 med en simulerad utvidgningskurva för 13C26. Därigenom går det att konstatera att ämnet var ungefär 200°C i början av mätningen. Enligt figuren ökar expansionen alltför snabbt i början, och det kan bero på att ämnet kallchargerades vilket innebär att ämnet reste sig 70-100 mm och ämnet därefter snabbt "sätter" sig. Denna sättning sker i intervallet 1200-1800 sek.



Figur 25. Referensmätning och simulering för 13C26 och matchning av kurvor.



Enligt Oppelstrup och Salwén (2013a-b) har mätningen en varians på 0,04 mm. Mätningarna från ena sidan visar en expansion på 30 mm. Beräknat från båda sidorna, under förutsättning att ämnet utvidgar sig lika i båda riktningarna, borde den totala expansionen bli 60 mm. Enligt Oppelstrup och Salwén (2013a-b) borde expansionen ha varit 159 mm. Denna diskrepans kan förklaras med problemen vid chargering som bidrog till att

- Mätningarna påbörjades när ämnet redan var 200°C, det tog 30 min innan ämnet låg på plats
- Ämnet var ojämnt temperaturfördelat vilket kan ha förskjutet ämnets expansionsmittpunkt
- Ämnets position inte kontrollerades, därigenom är det möjligt att mätningen inte gjordes rakt fram utan att radarn mätte ett snett avstånd till ena kanten.

Diskrepansen kan också härröra till att det finns skillnader mellan dilatometermätningar och radarmätningar i ugnen, exempelvis stora och små utvidgas olika.

Vid 8 500 sek (se figur 19) går det att notera att ämnet minskar 1-2 mm. Det är osäkert vad detta beror på. En teori enligt Nylöf på Sandvik är att det sker en strukturomvandling i stålämnet vid konstant temperatur. Vid en strukturomvandling förändras kornstorleken i ämnet och dess bindingar vilket kan leda till minskad volym. Detta skulle kunna vara en indikation på att ämnet är genomvarmt.

8.4 Temperaturnoggrannhet

I figur 19 och 24 går det att tydligt se ämnets fasomvandling, som sker efter cirka 2 000 sek (30 min). Om fasomvandlingspunkten för respektive legering är väl bestämd är detta en bra punkt att använda som referenspunkt där temperaturen är känd. Alla ämnen har dock inte en sådan tydlig fasomvandling som 13C26. Det finns en tydlig anomali på expansionskurvan efter 8 500 sek (se figur 19). Denna anomali bör utredas vidare.

Temperaturbestämningen för stålämnen kommer att påverkas av hur väl alla mätningarna är gjorda, det vill säga radarmätningar och bestämning av respektive ämnets utvidgningskurva (dilatometer). Total noggrannhet för temperaturbestämning kan beräknas enligt medelfelets fortplantningslag:

$$S_{total} = \sqrt{S_{radarmätning}^2 + S_{dilatometermätning}^2 + S_{matchning}^2}$$

Matchning mellan expansionskurva (radar) och utvidgningskurva (dilatometer) är svår att uppskatta, men torde inte vara några problem. Utmaningen ligger i att det inte görs någon kontinuerlig mätning av ett ämne då det hela tiden förflyttas framåt och att det inte finns sensorer i varje stegbalksposition. Fyra mätpositioner finns idag. Det är viktigt att bestämma en lämplig metod för temperaturbestämning. Det finns två olika huvudprinciper att göra mätningarna för temperaturbestämningen på:

1. Mäta expansionen av ämnet och bestämma temperaturen
 - under *hela färden* genom ugnen, hela expansionskurvan erhålls
 - i *slutet* av ugnen, endast slutet av expansionskurvan erhålls
2. Mäta om expansionen är avslutad, ingen temperatur bestäms i absoluta termer
 - i *slutet* av ugnen, ett delavärde erhålls.

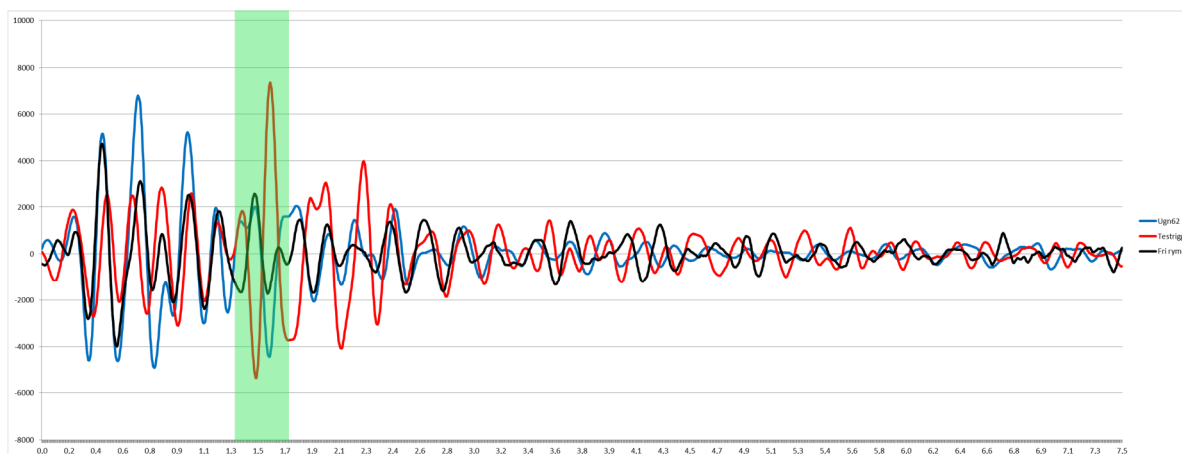


Genom att endast förlita sig på deltamätningen (skillnadsmätningen) utifrån radarmätningen undviks osäkerheten i bestämningen av utvidgningskurvan och matchningsalgoritmen. Detta ska dock vägas mot att förstå processerna bättre och erhålla ett verkligt temperaturvärde. Verkliga expansionsmätningar i ugnen skulle dock kunna användas som expansionskurva. Då skulle osäkerheten i olika metoder undvikas, det vill säga dilatometermätning och radarmätning. Det kan finnas skillnader hur en liten metallbit på några gram beter sig jämfört med ett flera meter långt och flera ton tungt stålämne beter sig.

8.5 Kalibrering av mätsystem

Radarsystemet måste kalibreras för att kunna ge jämförbara mätvärden vid olika sensorplaceringar. Ugnsväggen kommer inte att vara exakt lika tjock vid alla mätpunkter. Dessutom kan väggen ha olika dielektricitetskonstanter. Därför är det viktigt att kalibrera systemet. Det finns i princip två möjligheter:

1. Använda övergången mellan innervägg och atmosfär som referenspunkt (se figur 26)
2. Använda ett kalibreringsämne
 - som inte utvidgas nämnvärt genom snabb förflyttning till alla sensorspositioner
 - som är genomvarmt, ämnet expanderar inte längre
 - där expansionen är känd och kopplad till ugnstemperaturen och tiden.



Figur 26. Reflektionen från övergång mellan vägg och luft syns i mätning från testtrigg.

I testmätningar från Ugn62 framgår inte övergången mellan vägg och luft lika tydligt som från testtriggen. Det kan bero på reflektionsförluster vid övergång mellan olika isoleringar. Genom att kalibrera med ett kalibreringsämne erhålls en korrekt målsignatur och det ger direkt rätt relation till målet (stålämnet), vilket förmodligen är den bästa metoden.

9 Slutsatser

Projektet och förstudien skulle ge svar på om det var möjligt att bestämma temperaturen utgående från ett stålärnes expansion. Prototypen till ett system för temperaturbestämning har testats på en testtrigg och på verklig expansion av stålämne i Ugn62 på Sandvik. Följande slutsatser kan dras:



1. Ämnet kan identifieras på andra sidan av väggen, även om det i dagsläget finns vissa begränsningar med ämnen med låg radar cross section som ligger på ett ugnsgolv (hård)
2. Mätnoggrannheten är tillräcklig (absolut 0,68 mm), den relativa noggrannheten mycket hög (0,04-0,13 mm)
3. Stålämnets expansion kan tydligt mätas med radarsensorerna som är placerade på väggen, resultatet visar fler detaljer och var noggrannare än förväntat
4. Processen för temperaturbestämning håller i alla enskilda delar, det vill säga kalibrering, initialdata och mätning. Temperaturmatchning har gjorts av Oppelstrup och Salwén (2013a-b) i simulator. I vissa delar kan den föreslagna processen troligtvis förenklas
5. Värmen är en utmaning för avancerad mätelektronik. Nuvarande sensorer fungerar bra i värmen med luftkylning. En het sensor är designad och konstruerad som behöver mindre kylning.

Dessa fem slutsatser är "Go-No Go" för ett efterföljande projekt. Alla punkter har en potential att bli bättre. Resultatet från expansionsmätningen är så pass detaljerad och visar med tydlighet fasomvandlingen, men även en strukturomvandling. Detta skulle kunna leda till andra användningsområden är temperaturoptimering, exempelvis produktutveckling och förbättrad produktkvalitet.

10 Diskussion och framtid

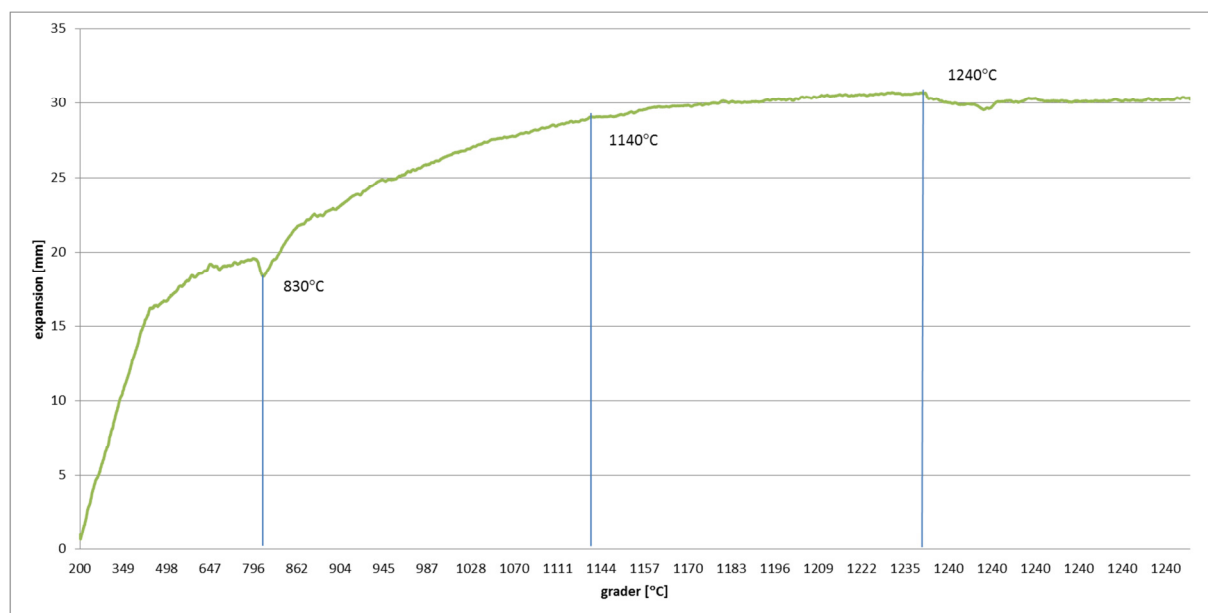
I ett framtida projekt är det viktigt att *förbättra identifieringen* av stålämnet. Detta är särskilt viktigt för ämnen med låg radar cross section som ligger på ett keramiskt golv (hård). För stora ämnen och för ugnar där ämnet inte ligger på golvet kommer signal-brus-förhållandet att vara tillräckligt högt. Högre frekvens och kortare våglängd är den metod som enklast kan ge bättre resultat, vilket också har visats. Målfrekvensen är 6 GHz, vilket ökar amplituden och detekterbarheten 3 gånger jämfört med dagens 2 GHz-radar. Detta kräver viss omkonstruktion av radarsensorerna (snabbare FPGA-processor, bättre kontakter och kablar samt omprogrammering av FPGA-kod). Fördelen med högre frekvenser är dessutom att de blir lättare att certifiera enligt ETSI (European Telecommunications Standards Institute) och att antennerna blir väsentligt mindre (en fjärdedel av dagens storlek). Mindre antenner blir enklare att placera i trånga miljöer.

Noggrannheten är tillräckligt bra idag för bestämning av temperaturen på 5-10°C. Det finns dock potential att ytterligare förbättra noggrannheten. Den största potentialen är att reducera det så kallade systematiska bruset, som framför allt påverkar den absoluta noggrannheten. Det är okänt vad detta beror på, vilket bör utredas vidare. Därutöver går det att förbättra signal-brus-förhållande genom olika signalbehandlingsmetoder.

Vid projektet mättes *expansionen (radar) och utvidgningen (dilatometer)* av stålämnet 13C26. Kurvan påvisar med tydlighet fasomvandlingen av ämnet. Det verkar också finnas andra intermetalliska faser som går att utläsa ur mätningen, särskilt en indikerad strukturomvandling vid 8 500 sek (se figur 19). Det är viktigt att gå vidare och undersöka vad som faktiskt mäts. Därför måste de genomförda mätningarna på Ugn62 repeteras med befintlig utrustning. I genomförd mätning i projektet var stålämnets längd begränsad på grund av att kylbädden inte kunde hantera långa stålämnen. Mätning måste göras på långa ämnen från båda hållen för att bekräfta expansionen och dess egenskaper.



En algoritm för *temperaturmatchning* måste utvecklas för att direkt avläsa medeltemperaturen i stålämnet från expansionskurvan mätt med radar. Figur 27 redovisar en ungefärlig koppling mellan expansionen (radarmätning) och temperaturen. Nuvarande dilatometermätningar (utvidgning) och radarmätningar (expansion) har olika enheter: temperatur respektive tid. I och med att stålämnet genomgår olika faser är matchningen av temperatur och tid inte helt trivial. Därtill kommer att värmningen i dilatometern och värmningsugnen inte är lika. Temperaturmatchning måste således studeras vidare.



Figur 27. Ungefärligt matchad expansionskurva (radar) mot utvidgningskurva (dilatometer).

Processen är det som skapar ett mätsystem för temperaturbestämning. Denna del av projektet har bekräftats del för del, men inte i sin helhet. Det finns inget som tyder på processen inte ska fungera. De ligger stora utmaningarna i kalibrering av radarsystemet. Detta måste utredas vidare.

Den *heta sensorn* är designad och konstruerad. Den bör tillverkas och testas för att därigenom optimera mätsystemet ytterligare. Mätsystemet blir därigenom mindre känslig för värme och mindre beroende av tryckluftkylning.

Projektet har påvisat möjligheterna att mäta och bestämma temperaturen på 5-10°C. Det är dock inte säkert att absoluta temperaturer är viktigt för systemet. Det kan lika väl vara expansionskurvans egenskaper vid vissa temperaturer/punkter, exempelvis lokala minima som påvisar struktur-omvandlingar i ämnet. Implementation av ett system skulle då bli enklare. Mätningarna har också visat radarsystemets relativa noggrannhet är extremet hög 0,04-0,13 mm. Därför visar radarsystemet expansionskurvan med en större detaljrikedom och noggrannhet än förväntat (Oppelstrup och Salwén, 2013a-b). Detta påvisar inte bara potentialen att ta fram ett radarsystem för temperaturoptimering utan det kan leda till ett vetenskapligt verktyg för produktutveckling och förbättrad produktkvalitet.



11 Acknowledgement

Projektet har kunnat genomföras genom ekonomiskt stöd från Energimyndigheten. Projektet har förvaltats och styrts av Jernkontoret. Concordance och Tech Translator har varit projektledare. Radarbolaget har genomfört större delen av det praktiska arbetet. Sandvik har tillgängliggjort sin Ugn62 för installation och tester samt genomfört ämnesmätningar i dilatometer. SSAB i Borlänge har bidragit med viktiga indata. FOI och InnoXinetix har varit viktiga underleverantörer för att styrka radarmätningarnas noggrannhet respektive systemets möjlighet till temperaturmatchning. Inlab har varit en viktig leverantör av mekaniska lösningar.

12 Referenser

- [Andersson, 2012] D. Andersson, Optimera bredd och höjd på skärm, 2012
- [FOI, 2013] T. Johansson, Expertstöd till Radarbolaget, 2013
- [Oppelstrup och Salwén, 2013a] J. Oppelstrup och A. Salwén, Referensmätningar maj 2013, 2013
- [Oppelstrup och Salwén, 2013b] J. Oppelstrup och A. Salwén, Referensmätningar 13C26, 2013
- [Nylöf, 2013] L. Nylöf, Dilatometermätningar - Längdutvidgning 13C26, 2013
- [Larsen och Trombley, 2013] R. Larsen och K. Trombley, Thermophysical properties of two martenitic stainless steel, 2013

Radarspecifika referenser finns medtagna i (FOI, 2013).