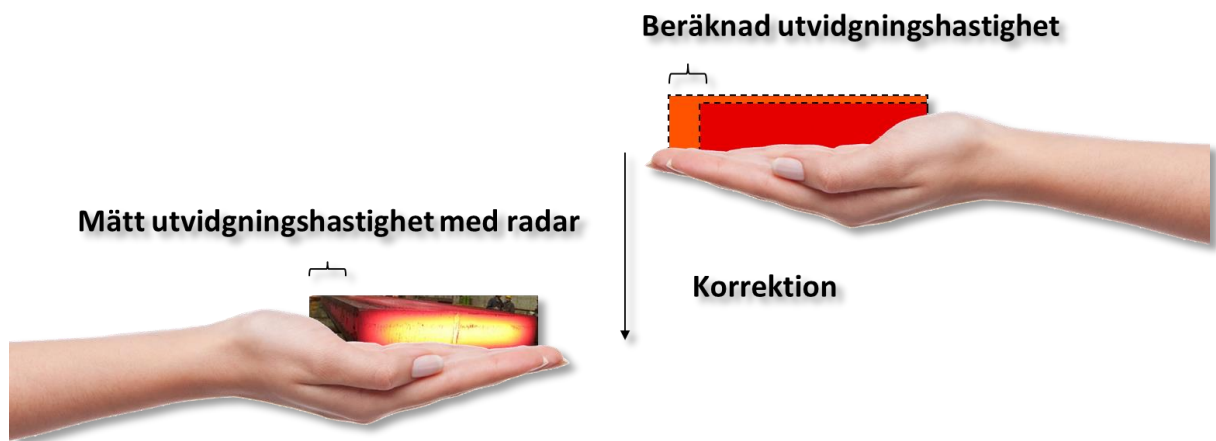


Optimerad energiförbrukning av värmningsugnar med radaravbildning



Författare och resultat

Patrik Ottoson, Daniel Andersson, Radarbolaget

Sofie Högberg, Zhili Song, Sandvik

Tommy Johansson, FOI

Projektdeltagare

Peter Andersson, Mattias Gärdback, Mattias Sandström, Göran Eriksson, Fredrik Sandberg, Sandvik

Jonas Engdal, Daniel Sjögren, SSAB

Ola Ritzén, Tomas Ekman, Aga/Linde Gas

Anders Lugnet, Ovako

Alena Nordqvist, Robert Eriksson, Jernkontoret

Sammanfattning

Optimerad värmning av stålämnen i värmningsugnar kan ge energieffektiviseringar, minskade koldioxidutsläpp och kostnadsbesparingar, men också jämnare och högre stålqualität, minskad kassering samt mindre behov av legeringsämnen. Idag används ugnsstyrningssystem, t.ex. FOCS (Furnace Optimization Control System), för att styra och optimera värmningen av ugnar genom att modellera värmningsprocessen och beräkna stålämnenas temperatur. Dessa system bygger på avancerade matematiska modeller som behöver kalibreras med särskilda loggningsämnen, vari temperaturen mäts med temperaturgivare på olika djup och platser i ämnet.

Genom att betrakta stålämnen i värmningsugnar som stora termometrar kan utvidgningen av ämnena användas för att beräkna deras temperaturer eller bestämma om ämnena är färdigvärmda eller inte. Digital UWB-radar (ultra wideband) kan användas för att mäta utvidgningen av stålämnen i värmningsugnar under 3–8 minuter, varigenom utvidgningshastigheten av ämnena kan bestämmas med en noggrannhet på ungefär 0,1 mm/min.

Ugnsstyrningssystem såsom FOCS kan kompletteras med beräkning av stålämnenas utvidgningshastigheten, genom att använda sambanden mellan stålsorternas utvidgning och temperatur. Dessa samband kan tas fram genom dilatometermätningar (kontrollerad uppvärmning av små stålämnen i en sluten värmningskammare) eller genom beräkningar. Varje stålsort har sin unika utvidgningskurva, men det finns möjlighet att generellt modellera sambanden efter respektive huvudtyp av stål, t.ex. ferritiska, martensitiska, ferrit-austenitiska (duplex), austenitiska och kolstål.

Radarmätningen mäter den verkliga utvidgningshastigheten av stålämnen och dessa mätningar kan jämföras med beräknade utvidgningshastigheterna från ugnsstyrningssystemet. Vid eventuell differens korrigeras ugnsstyrningssystemet för att bättre återspegla verkligheten. Resultatet från radarmätningarna kan användas på tre sätt:

1. att initialt korrigera ugnsstyrningssystemet från mätning av referensämnen
2. att kontinuerligt korrigera ugnsstyrningssystemet från mätning av så kallade indikatorämnen (långa identifierbara ämnen med kända egenskaper)
3. att momentant identifiera när ett stålämne är färdigvärt genom en klarknappsfunktion och öka dragningstakten för enskilda ämnen.

De viktigaste parametrarna som påverkar ugnsstyrningssystemet är specifik värmekapacitet, värmeöverföringskoefficienter, termisk utvidgningskoefficient, ämnesdimension samt felaktig offset i längd, tid och temperatur. De sista parametrarna blir särskilt kritiska om stålämnenas varmchargeras eftersom ämnets yttre- och innetemperatur inte är lika. Längden kan vara svår att mäta i en pågående valsprocess. Felaktig tidsoffset beror på att databaserna inte går i takt med produktionsprocessen. Värmeöverföring och värmestrålning till ett stålämne är till större delen kopplat till ugns Kroppen, brännare och ugnsatmosfär, men påverkas också av om andra stålämnen omger ett ämne eller inte.

Sålunda, radarmätningarna kan användas för att initialt grovjustera ugnsstyrningssystemet och sedan successivt finkalibrera systemet. Radarmätningarna kan också användas kontinuerligt för att styra processen genom förändrad dragningstakt eller temperatur. Därigenom erhålls möjligheter för bättre styrning och optimering av värmningsugnar. På sikt kan ett feedbacksystem införas genom att exempelvis mäta valskrafterna. Därigenom skulle ett kvitto erhållas på att radarmätningarna och ugnsstyrningssystemet bidrar till jämn och hög kvalitet i den slutliga stålprodukten.

Projektet har visat att noggrannheten i radarsystemet är tillräckligt hög för att kunna kalibrera ugnsstyrningssystemet. På SSAB har man idag en väl utvecklad ugnsstyrning med FOCS och tillverkningen är främst fokuserad på stora ämnen och få stålsorter. Där kan ett radarsystem relativt snabbt implementeras och fungera i produktionen. På Sandvik finns behov av att ytterligare utveckla ugnsstyrningen. Tillverkningen på Sandvik är till skillnad från SSAB fokuserad på relativt små ämnen och många stålsorter. Där kan ett radarsystem och bra ugnsstyrning ge stor procentuell effektivisering. Det krävs dock längre tid att implementera och anpassa ett fullt fungerande system på Sandvik.

Målbilden är att kunna övervaka och styra varje enskilt stålämne i flera zoner och platser i ugnen. Det finns dock fysikaliska begränsningar i radartekniken och produktionsprocessen som försvårar detta. Det är exempelvis inte möjligt att mäta två korta stålämnen som ligger på samma position långt från ugnsväggen. En icke-fokuserande radarutrustning klarar inte heller av att urskilja stålämnen som ligger för nära varandra (på mindre än en våglängds avstånd, i detta fall 15 cm). På SSAB kan 90–95% av alla ämnen mätas. På Sandvik kan 25–35% av alla ämnen mätas (gäller Ugn62), vilket främst beror på att ämnena har mindre ändimensioner än på SSAB. I båda fallen är det fullt möjligt att övergripande kalibrera ugnsstyrningssystemet utifrån de mätbara indikatorämnena. På SSAB skulle radarmätningarna kunna användas för kontinuerlig styrning. På Sandvik skulle ett fokuserande radarsystem möjliggöra för mätningar längre in i ugnen och för att urskilja tätt placerade ämnen, vilket kan öka den procentuella andelen indikatorämnena.

Projektet föreslår att detta metodutvecklingsprojekt övergår i två testbäddar och demonstrationsprojekt med full implementering gällande radarsystem, ugnsstyrning, integration med ugnsstyrning, installation av server samt anpassning till operatörssystem för visualisering och övervakning. Demonstrationsprojektet ska då genomföras på SSAB och Sandvik. Under en tvåårsperiod mäts effektiviseringsgraden kontinuerligt och anläggningarna ska förevisas andra svenska stålföretag. Härigenom kan erhållna effektvinster vara en motivation för ökad spridning av utvidgningsmätning med radar och bättre ugnsstyrning för minskade energianvändning och koldioxidutsläpp.

Abstract

Optimized heating of slabs, billets and blooms in heating furnaces can provide energy efficiency, reduced carbon dioxide emissions, and cost savings, but also more uniform and higher steel quality, reduced disposal, and less demand for alloying materials. Today, furnace management systems are used, for example FOCS (Furnace Optimization Control System), to control and optimize furnace heating by modeling the heating process and calculating the steel temperature. These systems are based on advanced mathematical models that need to be calibrated with special logging slabs, where the temperature is measured at different depths and locations in the slab.

By considering slabs in heating furnaces as large thermometers, the expansion of the slabs can be used to calculate their temperatures or determine if the slabs are completely heated or not. Digital ultra-wideband (UWB) radar can be used to measure the expansion of steel substances in heating furnaces for 3-8 minutes, whereby the expansion speed of the slab can be determined at an accuracy of approximately 0.1 mm/min.

Furnace control systems such as FOCS can be extended to calculate the expansion speed of slabs, by using the relationship between steel expansion and temperature. These relationships can be obtained through dilatometer measurements (controlled heating of small steel substances in a small heating chamber) or by calculations. Each steel grade has its unique expansion curve, but it is possible to generally model the expansion speed to respectively main type of steel, e.g. ferritic, martensitic, ferrite-austenitic (duplex), austenitic, and carbon steel.

Radar measurement measures the actual expansion speed of the slabs and these measurements can be compared to the calculated expansion speeds from the furnace control system. In case of differences, the furnace control system is corrected to better reflect the reality. The result of the radar measurements can be used in three ways:

1. To initially correct the furnace control system from measurement of reference slabs,
2. Continuously correct the furnace control system from measurement of so called indicator slabs (long identifiable slabs with known properties),
3. To momentarily identify when a slab is completely heated by a smart button function and increase the discharge rate for individual slabs.

The most important parameters affecting the furnace control system are specific heat, heat transfer parameters, thermal expansion coefficient, slab dimension as well as wrong offset in length, time, and temperature. The last parameters become critical, if the slabs are preheated and rolled, because the outer and inner temperatures of the slabs are not equal. The slab length can be difficult to measure in an ongoing rolling process. Non-synchronized databases cause incorrect time offset. Specific heat and heat transfer are mostly connected to the construction of furnace, burners, and atmosphere, but also connected to the placement of surrounding slabs.

Thus, the radar measurements can be used to initially adjust the furnace control system roughly and then gradually fine-calibrate the system. The radar measurements can also be used continuously to control the process by changing the discharge rate or temperature. This provides opportunities for better control and optimization of heating furnaces. In the long term, a feedback system can be introduced by measuring, for example, the rolling forces. Consequently, this is a check of how the radar measurements and the furnace control system create more uniform and higher quality of the final steel product.

The project has shown that the accuracy of the radar system is high enough to calibrate the furnace control system. At SSAB today, there is a well-developed furnace control with FOCS and the production is mainly focused on large slabs and few steel grades. There, a radar system can be implemented relatively quickly. At Sandvik there is a need to further develop the furnace control. Unlike SSAB, the production at Sandvik is focused on relatively small slabs and many steel grades. There and therefore, radar system and furnace control can provide higher percentage efficiency. However, it takes longer to implement and adapt a fully functional system at Sandvik.

The target image is to be able to monitor and control each individual steel grade in several heating-zones, and places in the furnace. However, there are physical limitations in radar technology and in the production process that complicates this. For example, it is not possible to measure two short steel slabs in the same position. A non-focusing radar device is also unable to distinguish slabs that are too close to each other (in less than one wavelength range, in this case 15 cm). At SSAB, 90-95% of all slabs can be measured. At Sandvik, 25-35% of all slabs can be measured (applies to Ugn62), mainly because of the slabs are smaller at Sandvik than at SSAB. In both cases, it is possible to completely calibrate the furnace control system based on these measurable indicator slabs. At SSAB, the radar measurements could be used for continuous control. At Sandvik, a focusing radar system would make it possible to measure further into the furnace and distinguish closely-placed slabs, which increase the percentage level of indicator slabs.

The project proposes that this method development project is transformed into two test beds and demonstration projects with full implementation of radar systems, furnace control, furnace management, server installation as well as adaptation to operator systems for visualization and monitoring. The demonstration project will then be carried out at SSAB and Sandvik. During a two-year period, the efficiency rate is measured continuously and the implementations will be shown to other Swedish steel companies. In this way, efficiency improvements can be a motivator to increase the dissemination of radar expansion measurement and better furnace control to reduce energy use and carbon oxide emissions.

Innehåll

Sammanfattning	2
Abstract	4
1 Ugnstyper och processer	9
1.1 Sandvik och värmningsugn med hård	9
1.2 SSAB och värmningsugn utan hård.....	11
1.2.1 Underhållsproblem	13
1.2.2 Optimeringsmål	13
1.3 Ovako och ringugn med hård	13
Optimeringsmål	15
2 Energieffektivisering i stålindustrin med ny radarteknik	16
3 Metod och material.....	17
3.1 Radarteknik.....	17
3.2 Digital UWB-radar	17
3.3 Radarsensor	18
3.3.1 Antennhus.....	18
3.4 Testtrigg.....	19
4 Mikrovågors beteende i inneslutna utrymmen	20
4.1 Problemformulering.....	20
4.2 Elektromagnetisk våg	20
4.3 Radar cross section	22
4.4 Simuleringar och interferens	24
4.5 Mätningar och interferens.....	26
4.6 Absorption och värme	29
4.7 Värme och bandgap	31
4.8 Fiber, lösningen	32
5 Radarnoggrannhet	36
5.1 Avståndsmätning med radar	36
5.2 Normalfördelning och standardavvikelse	36
5.3 Faktorer som påverkar noggrannheten	37
5.4 Bestämning av noggrannhet	39
5.5 Ursprunglig noggrannhet (RPU)	40
5.6 Fördelning av noggrannhet.....	41
5.6.1 Grundläggande signalbehandling.....	42
5.7 Låg dynamik i signalen.....	43
5.7.1 Simulering av högre dynamik	45
5.8 Fasskiftsfel och temperaturfel	48

5.8.1	Korrektion av fasskiftsfel (jitter).....	49
5.8.2	Korrektion av temperaturfel	49
5.8.3	Simulering av fasskiftsfel.....	49
5.9	Närfältsmätning	50
5.10	Signalbehandling.....	51
5.11	Numeriska metoder	52
5.12	Fasskiftsupplösningen, översampling	53
5.13	Brus	54
5.14	Mätningar med modifierat radarsystem (RPU + frontend)	55
5.15	Mätningar med nytt radarsystem (DiRP)	56
6	Applicerbar noggrannhet.....	58
6.1	Absolut mätning, en utmaning.....	58
6.2	Relativ mätning, lösningen	59
6.3	Relativ noggrannhet.....	60
6.3.1	Mätnoggrannhet	60
6.3.2	Beräkningsmetod.....	61
6.4	Mätning i ugn på stålämne.....	63
7	Radaravbildning, syntetisk aperturradar	67
7.1	Tät eller gles array	67
7.2	Storlek på apertur och SAR-upplösning.....	68
7.3	Gles array och SAR-upplösning	70
7.4	Gles array på ugn62	72
7.5	Möjlig implementering	73
8	Dimensionsförändring vid värmning av stål	77
8.1	Stålsorter.....	77
8.2	Värmemodell	79
8.2.1	Ingångsparametrar för värmemodellen	80
8.2.2	Termisk längdutvidgning	81
8.2.3	Indata för längdutvidgningsmodellen.....	81
8.3	Relativ längdförändring och dilatometermätning.....	82
8.4	Validering av värmemodell	83
8.4.1	Temperaturmätning med loggningsämne.....	83
8.4.2	Utvidgningsmätning med radar	84
8.4.3	Temperaturmätning med loggningsämne.....	85
8.4.4	Längdmätning med radar	88
8.4.5	Utvidgningshastighet och jämnvarmt.....	89
8.4.6	Applicerbar mätmetod.....	91

8.5	Noggrannhetsanalys av värmemodellen	91
8.5.1	Omgivande temperatur	92
8.5.2	Värmeöverföringsparametrar	93
8.5.3	Termiska materialegenskaper	95
8.5.4	Termisk utvidgningskoefficient	97
8.5.5	Olika dimensioner	99
8.5.6	Material med fastransformation	100
8.6	Ugnstemperatur som indata	101
8.7	Generellt utvidgningssamband	105
8.8	Uppvärmningstid för olika stålsorter	107
8.9	Referensmätning och online-mätning.....	110
9	Temperaturmatchning och live-mätning	112
9.1	Process och implementering	112
9.2	Grovkalibrering	112
9.3	”Klarknapps”-funktion	113
9.4	Anpassning av värmemodell	114
9.5	Indikatorämnena	116
10	Slutsatser och diskussion.....	118
11	Framtid	120
11.1	Framtida effektmål	120
12	Acknowledgement.....	121
13	Interna dokument.....	122

1 Ugnstyper och processer

1.1 Sandvik och värmningsugn med härd

Sandvik Material Technology (SMT) i Sandviken har två större värmningsugnar: Ugn61 och Ugn62. Båda ugnarna är värmningsugnar med härd (golv). Ugn62 är en mellanvärmningsugn där stålämnenas värms efter en första valsning innan de går vidare för stång- eller bandvalsning. Ugn61 är förvärmningsugn. I Ugn62 chargerats (laddas/läggs in) 95 procent av stålämnenas genom varmchargering och mindre än 5 procent genom kallchargering. I denna del skiljer sig Ugn62 från Ugn61 där 80–85 procent kallchargerats och 15–20 procent varmchargerats. Vid chargering av Ugn62 sker laddningen av stålämnenas i en liten lucka i sidoväggen. Uttagning sker på motsatta sidan vid två positioner, en för genomtransport och en för valsning (se figur 1.1).



Figur 1.1. Värmningsugn Ugn62 på Sandvik. Fotot är tagit med ett litet lätt testämne. Luckan till vänster är en inspektionslucka. Chargering i luckan sker längst inne i hörnet.

En mellanvärmningsugn är en nödlösning för att hålla stålämnenas varma under processen, vilket är en mycket ovanlig lösning (en handfull i världen). Därför är ugnen utformad som en "skokartong", utan tydliga värmningszoner. Den har dock fem fiktiva värmningszoner för stegring av temperaturen från ca 1 000°C till ca 1 250°C. Ugnstyper med sidoluckor och härd är dock ganska vanliga. Cirka 50 procent av alla värmningsugnar har sidochargering och 80–90 procent av alla ugnar har en härd. I Ugn61 finns flera faktiska värmningszoner. Ugnsstyrningssystemet FOCS används för att styra Ugn61. Det finns inget ugnsstyrningssystem för Ugn62. Den ugnen styrs enligt tabeller, vilket innebär att dragningstakten ställs in för respektive stålsort. Frammatningen är dock helt automatisk.

Vid chargering matas ett ämne in via en rullbana, därefter läggs ämnet på härd i position 4 (benämning för första positionen) med en särskild lyftarm. Förflyttningen sker sedan med stegbalkar

enligt en fyrkantsvåg. Frammatning av stålämnen sker med stegbalkar där steglängden är 440 mm och lyfthöjden är 120 mm. En förflyttning görs med 3–8 minuters mellanrum beroende på dragningsstakten. Den mest optimala driften är att ha samma chargeringsstakt som uttagningstakt.

Ugn 61 och 62 värms med gasol och rent syre (oxygen). I dagens värmningsprocess måste man ta hänsyn till processhastigheten upp- och nedströms. Ugnen är del av ett system. Det går således inte att ha stora variationer i chargerings- och uttagningshastighet av stålämnen. Processerna upp- och nedströms kan dock förändras och optimeras om exempelvis värmningstiden kan kortas. Flaskhalsen i processen är i vanliga fall Ugn62, men Ugn61 kan emellertid vara en flaskhals. I långsamma stickserier kan steckelvalsningen begränsa processflödet.

Det enda som i dagsläget styr värmningstiderna i Ugn62 är tvärsnittet på ett stålämne. Sandvik har stålämnen i många storlekar men de vanliga sorterna är i storlekarna 350x150 mm, 164x164 mm, 204x204 mm. Längderna varierar från 3 300 mm till 15 300 mm. Ämnen som är kortare än 7 600 mm kan läggas dubbelt i samma position. Värmning av varmchargerade stålämnen görs normalt under 1–1,5 timmar och kallchargerade ämnen under 1,5–3 timmar. Sandvik har ungefär 300 olika stålsorter, vilka är materialprovade genom så kallad Gleeble-test, som bestämmer ämnets duktilitet. Duktiliteten bestämmer vilken temperatur (1 150–1 270°C) som ugnen ska ha vid värmningen. Vid produktion planeras alltid värmningsprocessen och temperaturen enligt arbetsorder så att den ska bli så optimal som möjligt.

Underhåll

Styrning och övervakning av ugnen är viktiga parametrar för att åstadkomma en så effektiv process som möjligt. Ökad effektivitet ger mindre miljöpåverkan. Tillkortakommanden i styrning och övervakning skapar minskad effektivitet, men framför allt kan skador och förslitningar uppstå på ugnen, vilket i sin tur kan skapa oplanerade produktionsstopp, fler planerade produktionsstopp eller ett onödigt stort underhållsbehov.

Vid kallchargering böjs stålämnen ("kröker rygg"), vilket beror på att över- och undersidan av stålämnet värms olika snabbt. Det leder till att ovansidan utvidgas mer än undersidan. Denna böjning leder också till att stålämnet kan förskjutas i sida, vilket beror på att friktionen är olika för respektive kontaktpunkt för stålämnet. Förskjutningen kan skapa stora problem om ämnena åker in i sidoväggen. Sidoförskjutningen är svår att prediktera då orsaken beror på att ena änden fastnar i något på härden. Andra underhållsproblem är relaterade till ansamlingar av glödska på härden. Vid frammatning av stålämnen kan intrycksmärken skapas om det finns glödskaupbyggnad eller keramiska upphöjningar på härden. Dessa upphöjningar kan manglas bort genom att släppa ett tungt ämne på upphöjningarna. De behov av styrning och övervakning som finns är:

- Positionering på rullbana vid chargering och uttagning
- Mätning av uppböjning och sidoförflyttning vid kallchargering
- Mätning av skador på härden (glödska och keramik)
- Mätning av ojämn förflyttning i längdled per sida
- Ämnesföljning.

Det sker i genomsnitt 2 oplanerade underhållsstopp per år à 5–10 dagar per gång. Vid dessa stopp genomförs framför allt underhåll av härden (golvet), men även väggar och tak kan underhållas. Vid de veckovisa produktionsstoppen sker underhåll av produktionskedjan (framför allt uppströms), men inte av ugnen. Ugnen måste dock tomgångsköras (värmas) så länge stoppet varar. Det skulle ta alldeles för lång tid att värma upp en avstängd ugn när produktion startar på nytt.

Optimeringsmål

Ett stålämne anses vara färdigt när det har rätt och utjämnad temperatur. Målbilden är att ha:

- en "grön lampa" på operatörsskärmen när stålämnet är klart att ta ut
- en indikation om att dragningstakten måste förändras (öka eller sänkas)
- en underhållsbild, typ "topografisk karta", för att se förändring av härden
- en tredimensionell visualisering i realtid, som visar vad som händer i ugnen.

Följande mål prioriteras av Sandvik i värmningsprocessen:

1. *Kvalitet*: Ökad noggrannhet i styrning och övervakning kan ge högre stålqualität och förbättrade produkttegenskaper
2. *Temperatur*: Det är viktigt att kunna mäta temperatur med hög noggrannhet
3. *Tid* är viktigt, men optimering på 3 minuter får inte leda till 6 veckors leveransförsening
4. *Kostnaden* är viktig, den måste ställas i en relation till de stora värden som produceras eller alternativkostnader (t.ex. underhållsstopp).

1.2 SSAB och värmningsugn utan härd

SSAB i Borlänge har två ugnar: 301 och 302. Båda ugnarna är ganska lika varandra. De är förvärmningsugnar utan härd (golv). Efter värmning valsas alla ämnen till band. Alla stålämnen på SSAB i Borlänge anländer på godsvagn från Oxelösund, Luleå eller Finland (före detta Rukki). 98 procent av alla stålämnen kallladdas. Det innebär att 2 procent varmladdas, ofta när ämnena är 150–300°C. Vid laddning av ugn 301 och 302 sker laddningen av stålämnen genom frontmatning i en stor lyftbar lucka. Uttagning sker på motsvarande sätt i andra änden av ugnen (se figur 1.2). Inmatning och uttagning görs med inskjutare respektive uttagare. Enligt SSAB matas alltid slabs (stora rektangulära stålämnen) framifrån med anledning av deras stora dimension och tyngd.



Figur 1.2. Värmningsugnar på SSAB.

Ugnarna sätter idag begränsningen för hastigheten i produktionsprocessen. Potentialen för förkortning av värmningstiden är idag okänd även om man emellanåt har försökt öka takten i ugnen. Värmningstiden är 2,5–3 timmar och beror på stålsort. Ofta körs ugnen genom kampanjer, där varje kampanj motsvarar cirka 10 ugnsfyllnader. Eftersom man vill stegra eller sänka ugnens temperatur på ett kontrollerat sätt är det viktigt att värmning av respektive stålsort planeras på ett korrekt sätt, exempelvis ligger den så kallade H-kampanjen alltid före S-kampanjen. Värmningstemperaturen i ugnen varierar mellan 1 170°C och 1 330°C.

SSAB kan producera cirka 1 000 stålsorter. Under år 2013 producerades 259 olika sorter. Skillnaderna mellan de olika stålsorterna är dock små. Tjockleken är ganska konstant och är ca 220 millimeter. Normallängderna är 11 eller 5,5 meter. Längden varierar dock med kundorder, vilket kan medföra udda längder, t.ex. 7–9 meter. Bredden varierar kontinuerligt mellan 650–1 650 mm. Kundens behov styr bredden, det medför att skarvarna kan hamna var som helst i ugnen. Ytterkanterna på hela sjoket (längden till stålämnena) varierar ofta inte mer än 0,5 meter.

SSAB har ett lasermätssystem från LIMAB för uppmätning av bredd före inmatningen av stålämnen. Rent teoretiskt och kanske praktiskt skulle systemet kunna användas för mätning av längden. Idag erhålls längdvärdet från stränggjutningen på ± 50 mm. Kapning av stålämnen görs genom skärbränning från två håll, vilket kan skapa en så kallade skärtrappa. Den får inte överstiga ± 10 mm. Initialtemperatur mäts med pyrometer och så länge ämnet är rumsvarmt så är temperaturfördelningen relativt jämn. Det gäller dock inte förvärmda ämnen där temperaturfördelningen kan vara relativt ojämn.

Vid värmning skapas glödskalet motsvarande 1 procent av den totala vikten. Totalt försvinner 1,8 procent av ingående stål i processen, förutom glödskalet klipps så kallade laxstjärter bort i valsprocessen. Ju längre in i ugnen desto mer glödskalet. Det är ingen större skillnad på stålsorter, utan tillväxten härrör endast från temperatur, syretillförsel och tid i ugnen.

Frammatning av stålämnena sker med stegbalkar (hydraulik) enligt en fyrkantsvåg. Skensystemet kan dock göra att stegningen svajar, vilket skapar en modifierad fyrkantsvåg. Stegningen tar 18–21 sekunder (enligt rapport från Radarbolaget). Ugn 301 och 302 har mellan 7–9 reglerbara zoner, men i praktiken består de av mörkerzon (utan förbränning), förvärmningszon, värmningszon och utjämningszon. Förbränning görs i längdled (longitudinellt) samt från sidan och taket. Idag används olja och LNG-gas.

Det finns inget känt problem med ojämn temperaturfördelning. Det går att reglera ugnen för att eliminera sådana problem. Ojämn temperaturfördelning mäts efter femte sticket (femte valsningen) genom temperaturmätning av stålbandet. Temperaturfördelningen används därefter som feedback för reglering av ugnen. Adaptionkonstanten (skillnaden mellan framände och bakände på ett 100 meter långt band) ska vara 35°C. Avvikelse från denna konstant indikerar ojämn eller otillräcklig värmning. Det sker också manuell feedback genom visuell granskning av ämnets ändar, det bildas en "snok" om det är ojämnt varmt. SSAB mäter valskrafterna, men använder dem inte för feedback. Ugnarna styrs idag med FOCS. Denna ugnsstyrning skulle kunna använda indata från radarmätningar för bättre ugnsstyrning.

Loggningsämnen utrustade med temperaturelement används kontinuerligt för att optimera ugnsstyrningen. Noggrannheten i dessa temperaturelement fungerar stabilt upp till 1 100°C. De blir dock snabbt sämre ju fler mätningar som görs. Felet kan vara upp till 20°C.

1.2.1 Underhållsproblem

Felpositionering i x- och y-led kan göra att stålämnen kroknar eller går av. Problemet uppstår när ämnena ligger på stegbalksståndarna och ämnet sticker ut långt utanför ståndaren. Vid återläggning (efter en uttagning) kan problem uppkomma om ämnet är felpositionerat i längdled, men det sker inte speciellt ofta. Glödskalet ansamlas, men genererar inga skrapmärken, eftersom glödskalet faller ner under stegbalksnivån.

Vid sommarunderhållet byts dåliga keramikelement ut i tak och väggar. Ugnsväggarna består av prefabricerade block om 646x646 mm. Väggtjockleken är 470 mm. Ankarstenen, som håller fast keramikelementen, är placerad i mitten av blocket. Stegbalksisoleringen byts också ut om den är dålig. Om stegbalksisoleringen försvinner kan en ångexplosion inträffa, vilket kan orsaka oplanerade och längre produktionsstopp. De värsta produktionsstoppen är relaterade till skador på eldfast material. Historiskt har längre oplanerade stopp skett två gånger per år, men efter en större ugnsgenomgång är inte detta ett stort problem sedan tre år. Kortare produktionsstopp beror på brister i gastillförsel, trasiga ugnsluckor och att stålämnen går sönder. De veckovisa planerade produktionsstoppen sker ojämn onsdag och jämn torsdag. Ugnen behöver generellt sett inget underhåll, utan det är valsverket som måste underhållas.

1.2.2 Optimeringsmål

Ett stålämne anses vara färdigt när det har nått "rätt" temperatur. Det är dock osäkert om det idag är jämnvarmt (troligtvis inte). Det är FOCS som styr. För vissa stålsorter, t.ex. M-kampanjen, är ämnena färdiga 50 minuter efter att ämnet uppnått 1 220°C. Feedback genom temperaturmätning anger om stålämnen är färdiga. SSAB har sämst koll på värmningsprocessen i mitten av ugnen i värmningszonen. Det beror på att ämnestemperatur stiger brant i denna zon. Optimering kan göras av ugnsparmetrarna, det är dock viktigt att detta görs försiktigt och successivt.

Följande mål prioriteras i värmningsprocessen:

1. Kvalitet (temperatur ger kvalitet och tid ger temperatur)
2. Energiförbrukning och miljö är viktigare än kostnaden (pengar). Erhålls inte miljöcertifikat får inte produktionen fortsätta
3. Tid är i princip ointressant idag (år 2014) med nuvarande konjunkturläge.

1.3 Ovako och ringugn med härd

Ovako i Hofors har en ringugn där cylinderformade ämnen värms, se figur 1.3. Bränslet är gasol. Ugnen har en härd med urfasning för ämnena. Efter värmning görs det rör av ämnena. Ämnena har en diameter på 110–210 mm, det finns nio olika dimensioner. På sikt kommer det endast att finnas tre olika dimensioner: 170, 190 och 210 mm. Dessa ämnen produceras i 10–20 olika stålsorter.



Figur 1.3. Ringugn.

Alla stålämnen kallladdas via en sidolucka. Ugnen har bra kapacitet och den har högre kapacitet än vad som efterfrågas. Beläggningen är dock hög, nära 100 procent. Ugnen är generellt sett ingen flaskhals. När ämnena är av större storlek, 210 mm i diameter, utgör dock ugnen en flaskhals. Värmningsprocessen av stora ämnen tar då längre tid än övriga processer. Eftersom ugnen inte är en flaskhals så innebär det att potentialen att spara energi är begränsad. Ugnen styrs helt automatiskt med FOCS (Furnace Optimization Control System). Ugnen har tre värmningszoner: 0-mörkerzon, 1-värmningszon och 2-hållzon. Zon 1 och 2 har lika många brännare, det är i dessa zoner som energin tillförs.

Värmningstiden är 75–150 min, mindre ämnen värms kortare tid och större ämnen längre tid. Varje ämne värms stegvis 30–60 sekunder i varje position. Det finns totalt 150 positioner. Ämnena värms till 1 160–1 200°C. Det finns inget feedbacksystem för ringugnen. Temperaturen mäts inte inför chargering. Stålämnen har en längd på 1,6–3,02 meter, där det angivna längdmåttet i produktionsdatasystemet har en noggrannhet på ± 10 cm. Ugnen är 3,15–3,20 meter bred. Höjden är 1,60 meter.

Underhållsproblem

Eftersom ämnena kallladdas kan ämnena resa eller böja sig, vilket i sig kan leda till att ämnena lämnar sitt spår (fördjupning i härden). Vid uttagningen kan därför ett ämne missas, vilket leder till att ämnet blandas med andra ämnen (ämnet tar ett varv till). Om detta händer blandas kundorderna med varandra och det blir det en logisk utmaning att reda ut felet. I vanliga fall övervakar en operatör uttagningen, vilket minimerar risken för hopblandning av kundorder. Övervakning görs med kamera. Vid värmning av kolstål skapas stora mängder glödska, men Ovako har dock inga problem med detta i ugnen.

De längsta ämnena är 3,02 meter samtidigt som ugnen är 3,15–3,20. Under värmningen växer ämnet ca 6 centimeter, vilket innebär att marginalen inte är speciellt stor. Ämnena böjer sig ibland och kommer ur sitt läge. Dessa två orsaker kan leda till att ämnet åker in och skadar ugnsväggarna. Det sker en gång vartannat år och leder till oplanerade produktionsstopp.

Planerade produktionsstopp görs någon enstaka timme under vardagar. Längre stopp sker från lördag klockan 13.00 till söndag klockan 14.00. Vid produktionsstoppen sänks temperaturen till 900°C. Det spar mycket energi. Oplanerade stopp sker företrädesvis uppströms vid valsverket. När dessa stopp sker måste alla ämnen i processen sorteras om och läggas på plats igen. Detta är mycket tidskrävande.

Optimeringsmål

Rörvalsning fungerar bra om kunderna är nöjda med levererad produkt. Rent tekniskt innebär det att ämnet ska ha en temperatur som är lämplig för att göra rör med hög kvalitet, men det behöver inte nödvändigtvis betyda att ämnet är genomvarmt.

Följande mål prioriteras i värmningsprocessen:

1. Kvalitet (nöjdhet hos kund)
2. Energiförbrukning och miljö. Optimerad förbränning ger bra energivärden, och för att nå dit krävs mycket mätning och uppföljning.
3. Tid är viktig eftersom energiförbrukningen och värmningskostnaderna kan sänkas.

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 hundratal miljoner i ren energikostnad. Det finns ett trettiotal sådana ugnar bara i Sverige. Till detta kommer värmning i hundratal mindre värmningsugnar. Efter värmningen ska stålet bearbetas varvid 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 stålämnena 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 2.1). 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.

Tabell 2.1. *Besparingar på 3–6 procent jämfört med idag. Driftparametrarna för Sandviks Ugn62 har varit mall. Den förbrukar ca 4 800 ton gasol per år.*

	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

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. IR-mätare mäter relativ värmestrålning, men i en värmningsugn finns många fler strålningskällor än bara stålämnet, t.ex. flammorna från brännarna, väggar, golv, härd, andra stålämnen. Dessutom kan stålämnets ytegenskaper påverka (t.ex. matt eller blankt stål) strålningen olika.

Målet och syftet med projektet var 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.

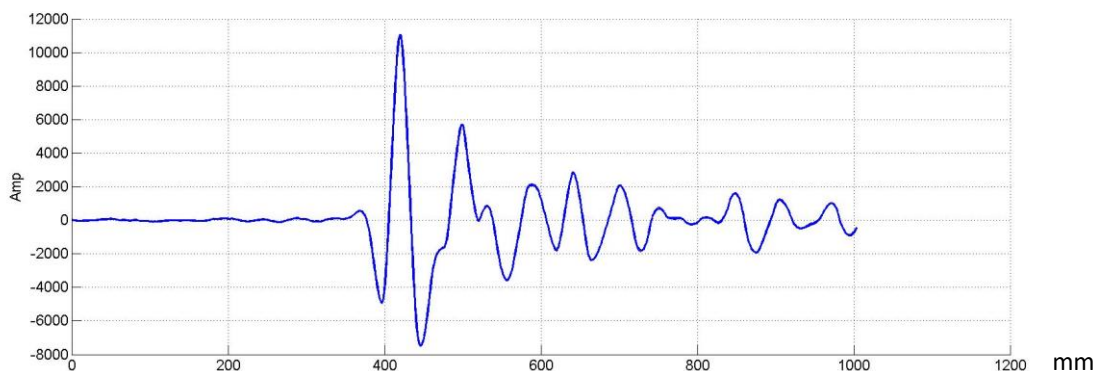
3 Metod och material

3.1 Radarteknik

Radarteknik baseras på en radiosändare som skickar ut en radiovåg i en eller flera frekvenser. Ett smalbandigt radarsystem skickar ut en radiovåg med en eller några få frekvenser. Ett UWB- eller bredbandigt radarsystem skickar ut en radiovåg bestående av ett brett frekvensspektrum. Bredbandigheten kan skapas genom frekvenssvepning med FMCW (frequency modulated continuous wave), generering av en bredbandig puls eller genom att skicka ut en PRBS-kod (pseudo random binary sequence).

Det finns olika sätt att bestämma längden till ett objekt:

- I ett FMCW-system analyseras inkommande frekvens. Är frekvenssvepningshastigheten känd så kan avståndet bestämmas med hög noggrannhet. Detta system kan få låg noggrannhet om radiovågen går olika vägar (multipath), eftersom frekvenserna blandas.
- Vid pulsgenerering skickas pulsen direkt och avståndet bestäms såsom avståndet till pulsen. Dessa system är analoga.
- Vid sändning av en PRBS-kod genereras den bredbandiga pulsen genom korrelation av en intern samt en utsänd/reflekterad kod. Korrelationsvärdena representerar signalen, se figur 3.1. Avståndet till pulsen anger avståndet till objekt.



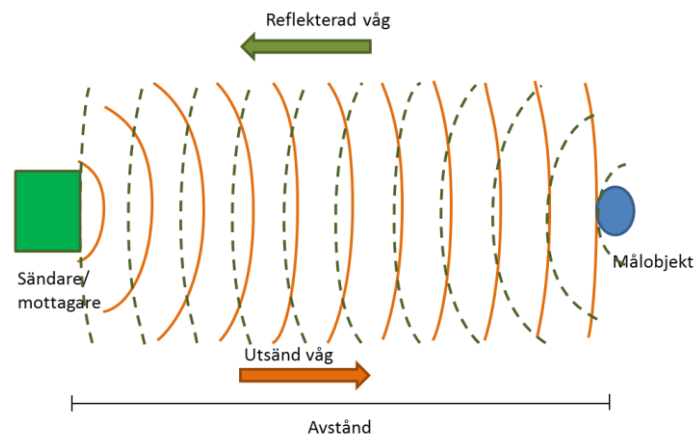
Figur 3.1. Bredbandig radiosignal. Avståndet till ett objekt är avståndet från 0 till pulsen. Delar av pulsen (nollgenomgång och toppar) är mycket stabil, vilket möjliggör hög noggrannhet.

3.2 Digital UWB-radar

Mätning av stålämnenas utvidgning 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 samplingsupplösning på 3,75 mm (avståndet mellan varje punkt i radarsignalen). Genom interpolation kan ännu högre mätupplösning erhållas. Antennerna sänder med låg effekt, och är vanligtvis operativa inom 35 meter beroende på mätobjekt och omkringliggande objekt, t.ex. väggar, tak, golv.

En UWB-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 alla omkringliggande objekt oavsett vinkel, se figur 3.2. Det radarsystem som använts i projektet har en öppningsvinkel på ca 100°.



Figur 3.2. 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 radarsystem 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 exempelvis påverka mät noggrannheten.

3.3 Radarsensor

Den radarsensor som använts inom projektet består av två antenner (mottagare och sändare) med antennhus. Antennerna är så kallade Vivaldi-antenn (se figur 3.3a), 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 3.3b). Sensorerna är via ett fibernät kopplade till en radarberäkningsenhet, Radar Processing Unit, RPU. I projektet har en ny radarberäkningsenhet, Digital Radar Processor, DiRP, utvecklats.



Figur 3.3. Äldre sensorn bestående av a) två Vivaldi-antenn och b) Wideband Radar Transceiver, WRT. c) Utvecklat antennhus för bättre signal, noggrannhet och styrka.

3.3.1 Antennhus

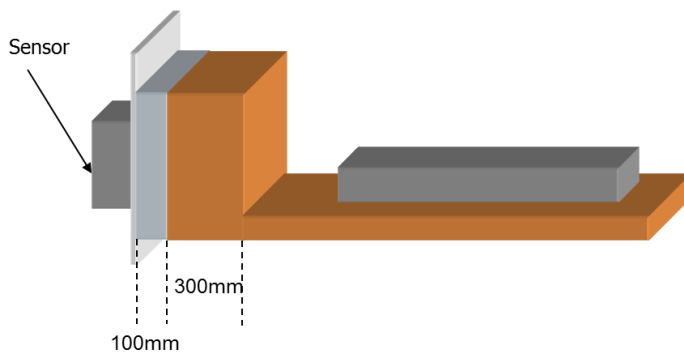
Radarens har möjligheten att penetrera icke elektriska material (dielektriska), såsom keramik, teflon och nylon. Därför kan antennerna inkapslas för kylning med tryckluft och sättas under

övertryck. Kapslingen görs i ett särskilt antennhus. Huset har ytterligare en effekt, nämligen att öka effekten i radarsändningen och mottagningen genom att minska radarloben. 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 stabil (mindre fasändringar), stark (högre amplitud) och tydlig (smal signal). Inom ramen för projektet har ett särskilt antennhus utvecklats för att åstadkomma en stabil radarsignal för optimal styrka (se figur 3.3c).

3.4 Testrigg

En testrigg har byggts för att simulera Ugn62 på Sandvik (testugnen). Uppställning ser ut enligt figur 3.4a. En sensor (antennerna och antennhus) har monterats i anslutning till ugnens stålmantel.

Ugnsväggen består av ett lättare keramiskt 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 3.4b). Det finns även fyra keramiska takelement för att simulera valvet på ugnen.



Figur 3.4. a) Radarsensor i profil på ugn. b) Testrigg.

4 Mikrovågor beteende i inneslutna utrymmen

4.1 Problemformulering

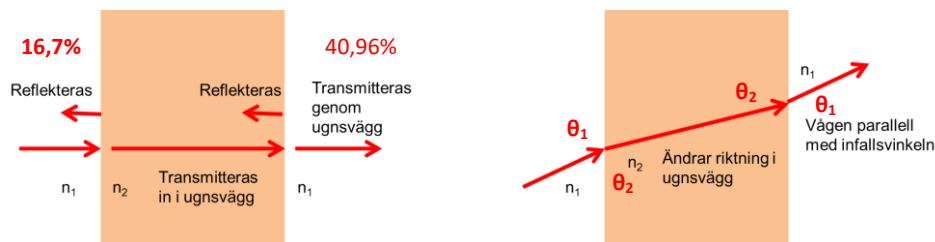
Vid en föregående förstudie identifierades ett problem vid mätning genom keramiska väggar. Signalen blev oväntat låg vid mätning genom ugn. En hypotes och trolig orsak till problemet ansågs vara interferensfenomen, reflektion, absorption eller vridning av radarsignalen. Projektet genomförde därför simuleringar och mätningar för att identifiera problemet i ett försök att eliminera det.

4.2 Elektromagnetisk våg

Radarvågen 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 sålunda två polarisationsriktningar. En elektromagnetisk våg rör sig med ljusets hastighet. Det sker en dämpning av signalens styrka och hastighet genom materialet, vilket beror på absorption. Det kan också uppkomma 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 4.1a). I fallet med radar och ugnsväggar innebär det att radarvågen transmittteras två gånger (före och efter väggen). Det resulterar att 40,96 % av energi passerar väggen (vid varje transmittering sker en förlust om 36 %). Den målreflekterande vågen förlorar också motsvarande energimängd på tillbakavägen, vilket innebär att 16,77 % av ursprunglig utsänd energi träffar mottagaren.

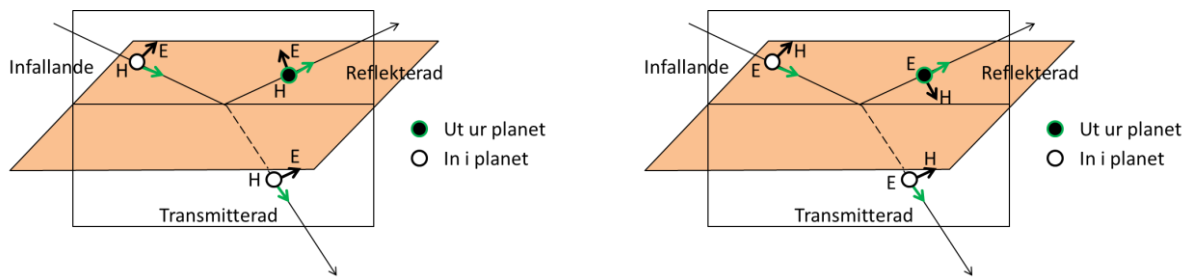
Refraktion är detsamma som vågens brytning genom material med olika brytningsindex. Enligt Snells formel $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$ bryts en elektromagnetisk våg vid transmittering till andra ämnen (se figur 4.1b). Refraktionen gör dels att vågen tar en annan väg än raka linjen mellan sensorn och målet, dels att energin viker bort om vågen transporteras längs en yta eller infaller snett mot den.



Figur 4.1. 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 radarvågor.

Polarisationen hos de elektromagnetiska vågorna förändras vid reflektion mellan material med olika brytningsindex (se figur 4.2). 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.



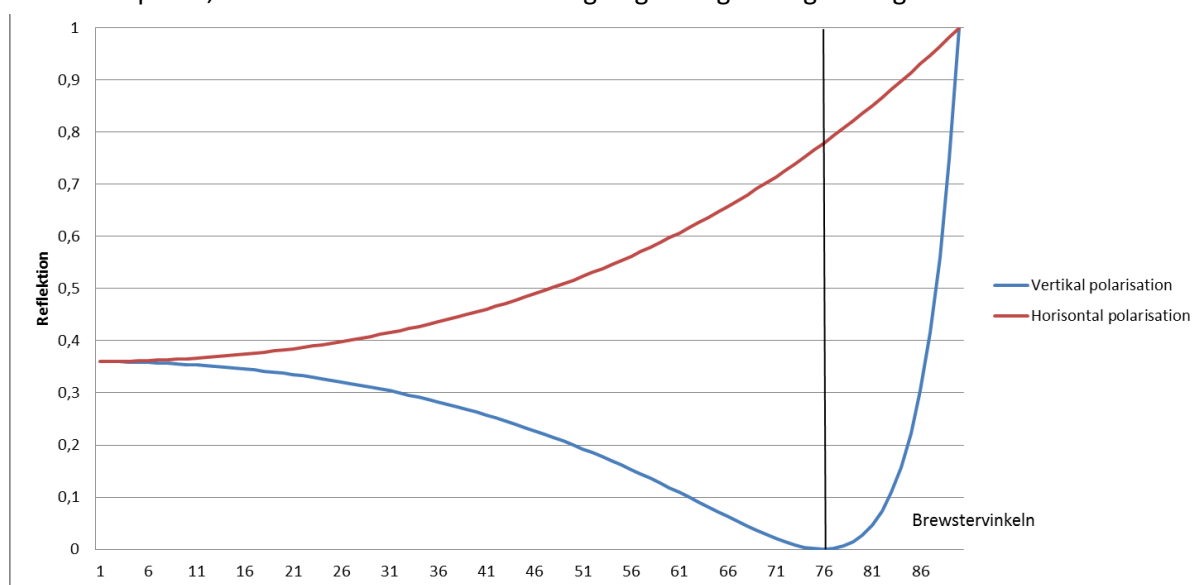
Figur 4.2. a) Vertikal polarisation för vertikal antenneriktning, H polariseras 180° . b) Horisontell polarisation för horisontell antenneriktning, E och H polariseras 180° .

Polarisering genom reflektion kan både vara ett problem då signalen släcks ut, men det 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.

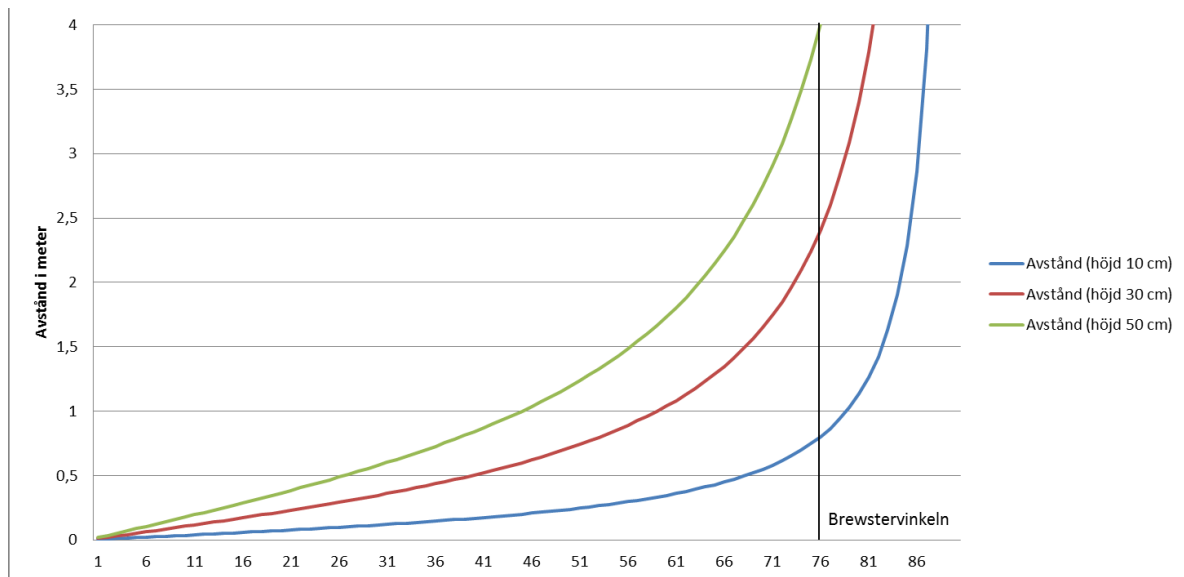
Signalstyrkan påverkas sålunda av

- Reflekterande polarisering och interferens vid reflektion på ämneskanten
- Reflektionsvinklar beror på hur högt över golvet sensor är placerad
- Refraktion, transmittering och absorption i golv och vägg.

Beroende på infallsvinkel och polariseringsriktning (vertikal eller horisontal riktning) kommer reflektionsintensiteten jämfört med transmitteringen att variera (se figur 4.3a). 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 4.3b). Det är dock viktigt att förstå att radarvågen inte kan jämföras med en laserstråle, då radarsignalen 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 4.3. a) Reflektionsintensitet (0-1) för olika infallsvinklar $0-90^\circ$. Den så kallade Brewstervinkeln inträffar vid $\approx 76^\circ$ för $n_1=1$ och $n_2=4$, där sker ingen reflektion utan allt transmitteras.



Figur 4.3. b) Brewstervinkeln inträffar längre bort vid högre placering (0-4 m) 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 detekterbart ett föremål är för radarn. 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:

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

För en plan direktreflekterande metallyta gäller att S_t är våglängden i kvadrat, λ^2 , och S_r är höjden i kvadrat, h^2 . Radian, 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.

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

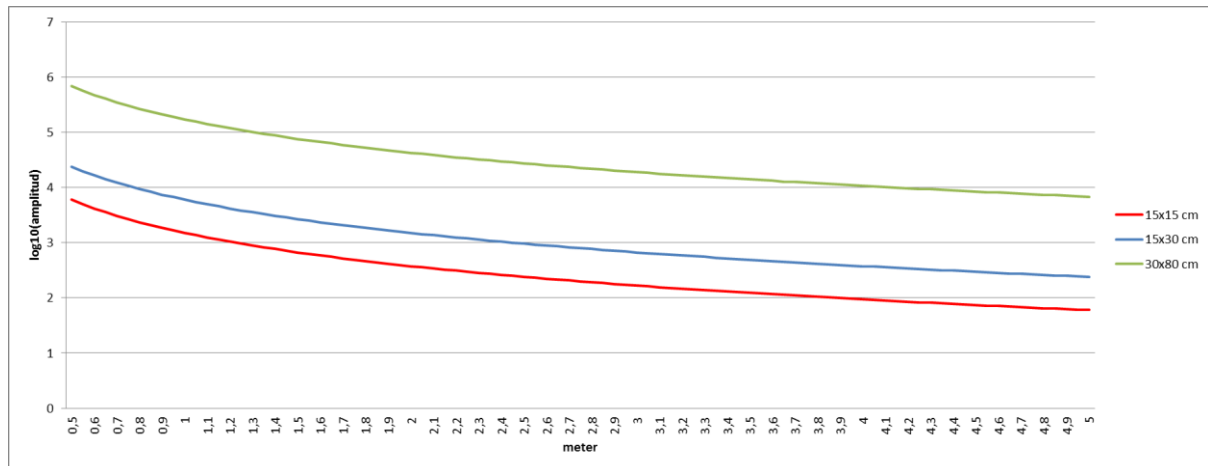
$$P_r = \frac{P_t G_t}{4 \pi r^2} \sigma \frac{1}{4 \pi r^2} A_{eff} \quad (\text{radarekvationen})$$

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

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

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

Utifrån ovanstående formler kan amplitudnivåerna beräknas (se figur 4.4). Amplitudnivån påverkas av avståndet ($1/r^4$) och arean för stålämnets 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 4.1 redovisas radar cross section för olika ämnen och våglängder.



Figur 4.4. Beräknade amplitudnivåer (10-logaritmen) för olika ämnen i fri rymd (inte igenom vägg och längs golv).

Tabell 4.1. Beräknade radar cross section för olika yttorlekar (ändarna på stålämnen) och för olika våglängder.

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

Radarbolaget har en radar som består av två olika antenner för sändning och mottagning. Direktsignalen (cross talk) mellan dessa två antenner påverkar amplituden för målet. 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 testriggen var kodlängden 1023 bitar. Längre kodlängder ger bättre och stabilare radarsignaler, men det resulterar även i längre mättider.

4.4 Simuleringar och interferens

FOI genomförde modellberäkningar av radarvågornas utbredning i värmningsugnar för att studera interferensfenomen. Med en bättre förståelse för utbredning och interferens kan lämpligare antennenpositioner väljas för att därigenom erhålla högre radarsignaler. Beräkningarna har genomförts för horisontell (H) och vertikal (V) polarisation. Avståndet mellan sändar- och mottagarantennerna, h_{dr} , är fixt, 200 mm. Polarisationen ändras genom att vrida antennerna. Vid vertikal polarisation sitter sändar- och mottagarantennerna på samma höjd. Vid horisontell polarisation sitter sändarantennen ovanför mottagarantennen.

För att åskådliggöra effekten av interferens görs beräkningar med och utan golv, i det senare fallet svävar stålämnen i luften. Figur 4.5 visar geometrin med strålgångar utritade. Genom att kombinera antennhöjder, polarisation, väggens permittivitetstal och utsänd frekvens fås totalt 80 olika fall. Ett representativt urval av åtta fall visas här, se figur 4.6, där dämpning ges som funktion av avståndet d , från ugnens inre vägg till stålämnet.

Modellen kan beskrivas som geometrisk optik utvidgat med fysikalisk optik för att få med viktiga diffraktionseffekter. Grunden är strålvägsutbredning men vid reflektion i stålämnet inkluderas flervägsutbredning. För en mer fullständig modell av elektromagnetisk vågutbredning krävs andra, mer avancerade metoder, exempelvis FDTD (finite-difference time-domain). Den använda metoden anses vara tillräckligt god för att få en överblick av interferensfenomenen som kan förväntas uppstå i ugnen.

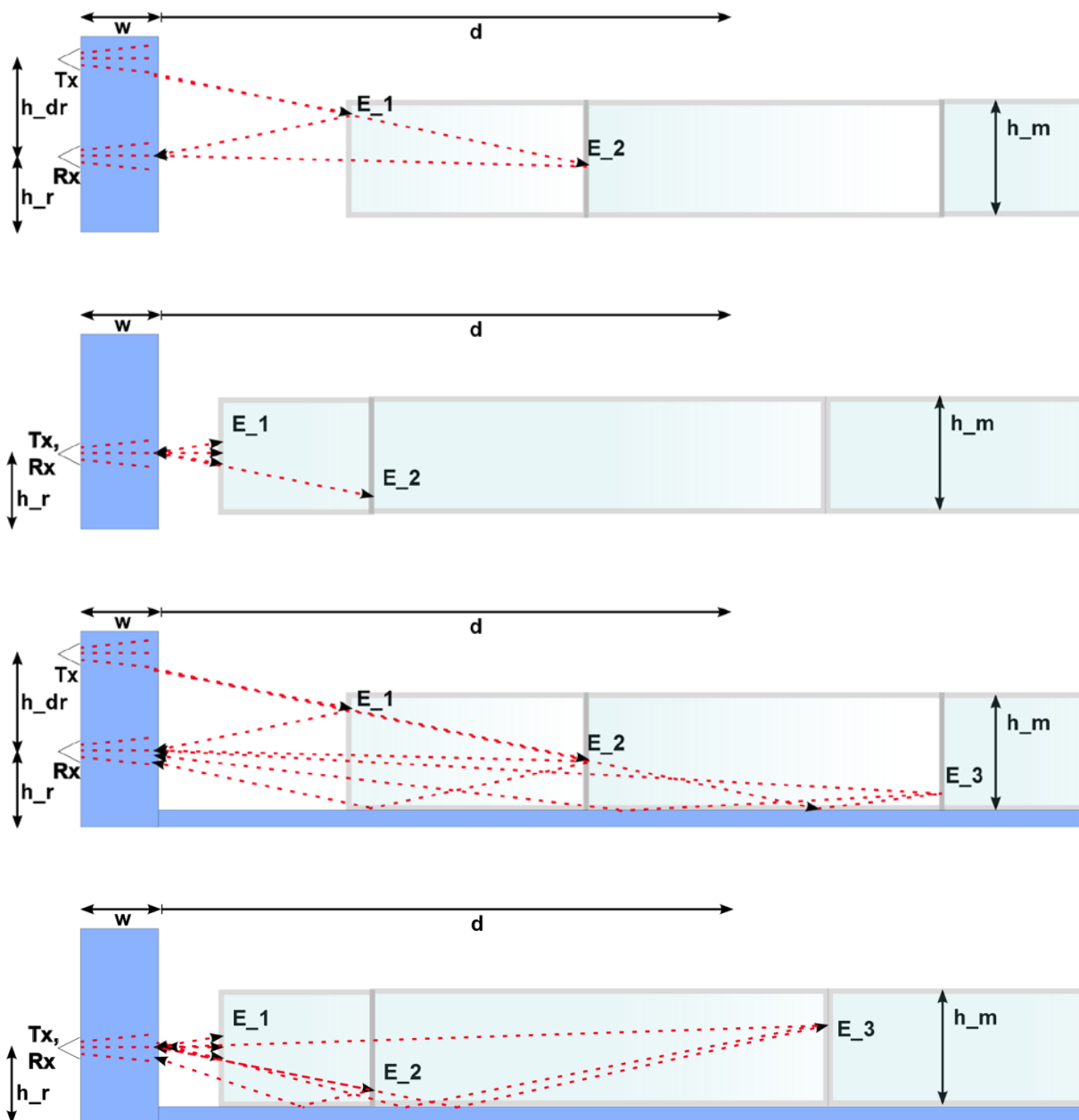
Figur 4.6 visar resultat för vertikal och horisontell polarisation, med och utan golv, för två olika antennhöjder. Stålämnet har i samtliga fall höjden 150 mm, och permittivitetstalet i vägg och golv är 2. I Figur 4.6a befinner sig mottagarantennen alltid 100 mm över golvnivån. I fallet med vertikal polarisation befinner sig sändarantennen på samma höjd som mottagaren. För horisontell polarisation befinner sig sändarantennen högre upp, 300 mm över golvnivån, och är alltså placerad över stålämnets övre kant. I figur 4.6b befinner sig antennerna alltid över stålämnets övre kant, 500 mm eller 700 mm över golvnivån.

Resultaten kan sammanfattas av tre delar: frirymdsdämpning, antennernas placering och interferens mellan direktretur och golvretur.

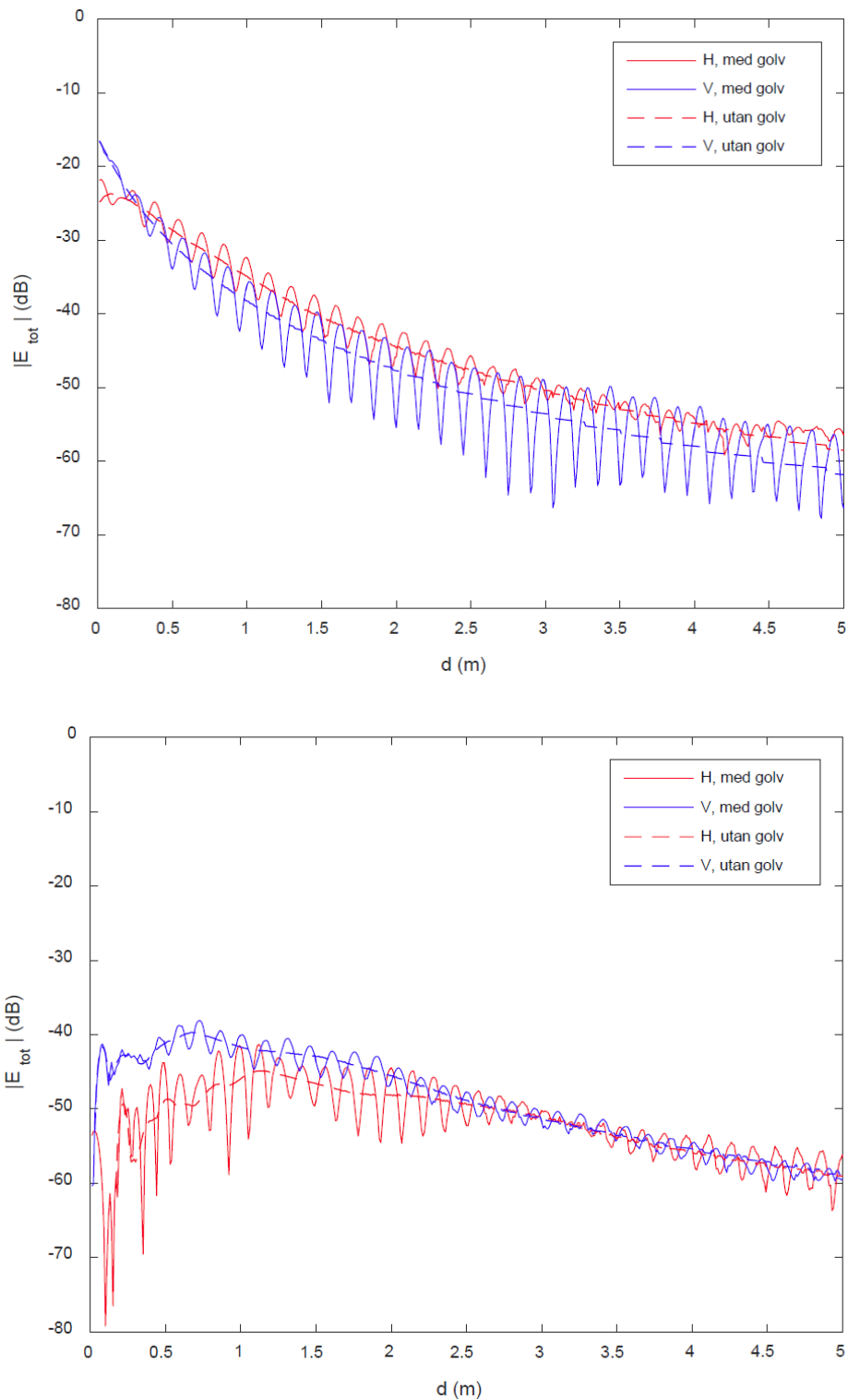
Frirymdsdämpning kan ses i alla kurvor i figur 4.6. Dämpningen är beräknad för vågor som rör sig från radarn, reflekteras i stålämnet (eventuellt via golvet), och tillbaka till radarn. För det enklaste fallet med antennerna på samma höjd (vertikal polarisation) och placerade under stålämnets övre kant är den kortaste väg vågen utbreder sig rakt fram och tillbaka. Det motsvarar dubbla sträckan $d+w$ i figurerna.

På korta avstånd följer dämpningen inte frirymdsfallet utan där kommer antennernas positioner i förhållande till stålämnet att ha större påverkan. Tydligast är det när antennerna är placerade över stålämnets övre kant (se figur 4.6b). Hur högt över golvet som antennerna placeras påverkar resultatet och om de placeras på samma höjd eller inte, dvs. horisontell eller vertikal polarisation. För stora avstånd till stålämnet liknar resultaten för vertikal och horisontell polarisation varandra.

Effekten av interferens mellan direktretur och golvretur kan enklast studeras genom att jämföra fallen med och utan golv. I figur 4.6 är heldragna kurvor fall med golv och streckade kurvor fall utan golv. Skillnaden mellan fallen med och utan golv är tydliga. Interferensens inverkan syns som variationer kring den större dämpningen, vilket beror på ökande avstånd till stålämnet. Effekten är större när antennerna är placerade under stålämnets övre kant, där infallsvinklarna mot golvet blir flackare. Negativ interferens bidrar med en ytterligare dämpning med upp till 12 dB (se figur 4.6a vid $d=3$ m).



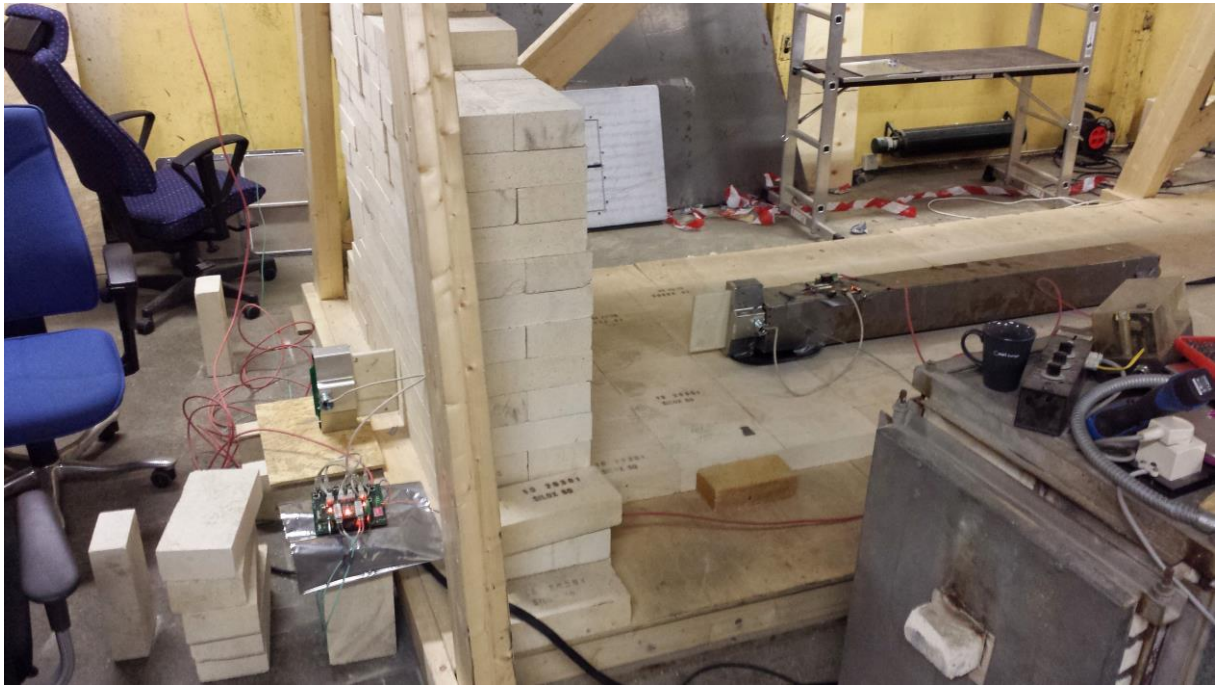
Figur 4.5. Geometri (2D) utan golv (a, b) och med golv (c, d) för horisontell polarisation (a, c) och vertikal polarisation (d). Antennerna är placerade på utsidan av ugnens vägg (blå). Stålämnet (grön med gråa kanter) befinner sig rakt framför antennerna på tre olika avstånd i varje figur.



Figur 4.6. Dämpning som funktion av stålämnets avstånd från väggen, beräkningar med och utan golv, och med a) lågt placerade antenner och b) högt (underst) placerade antenner.

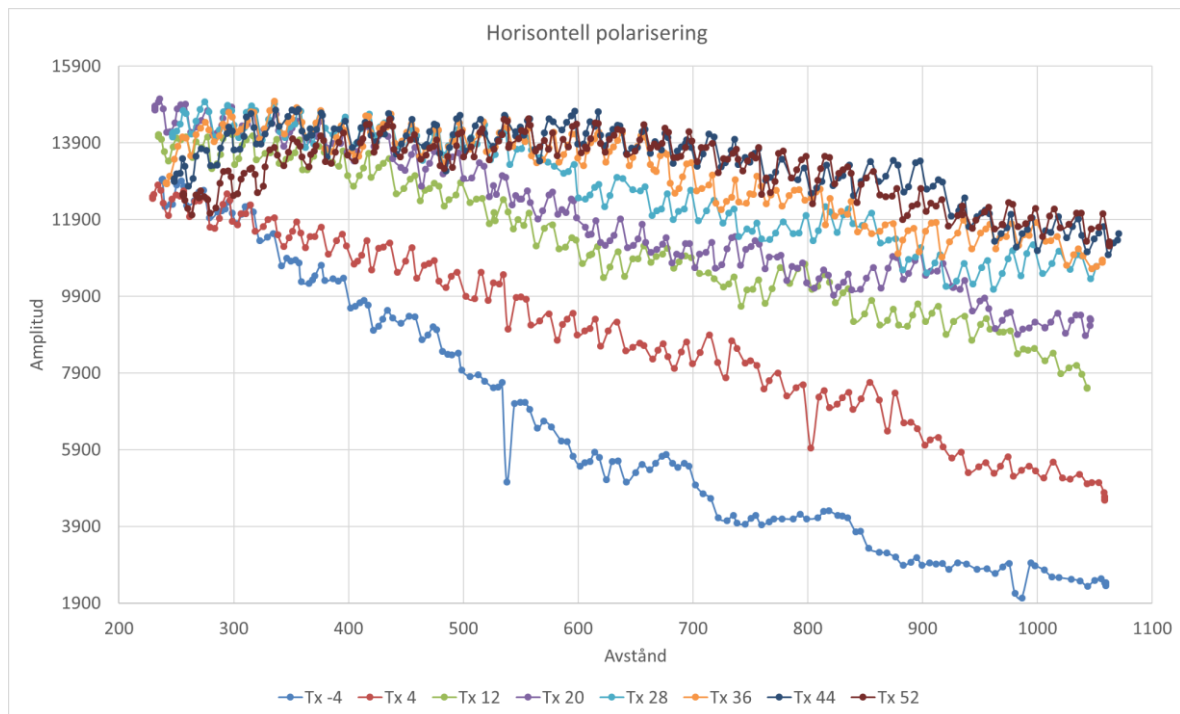
4.5 Mätningar och interferens

FOI:s simuleringar visade inte några oväntade saker. Radarsignalen ska avta med avståndet och målsignalen ska interferera med golvsignalen. Den sistnämnda effekten ska skapa ett vågmönster enligt figur 4.6. Mätningar genomfördes i en särskild rigg med eldfast keramik, se figur 4.7, för att verifiera simuleringarna som gjordes av FOI.

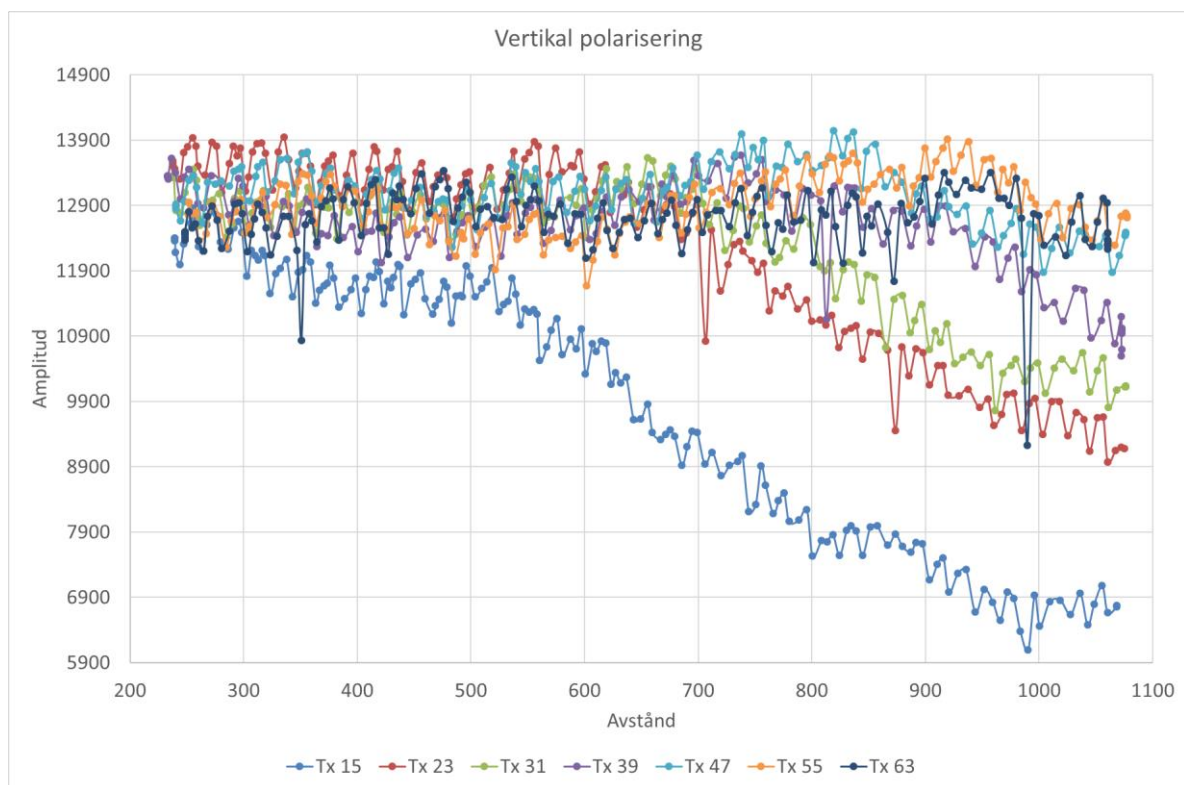


Figur 4.7. Mätning i laboratorium på särskild rigg med eldfast keramik. I detta fall testades länkmätning med vertikal polarisation.

Testerna omfattade mätningar med olika polarisation (vertikal och horisontell). Därutöver testades även olika mätthöjd (horisontellt: från -4 cm till +52 cm, vertikalt: från +15 cm till +63 cm). Det finns möjlighet att placera antennerna på olika sätt på en värmningsugn. I dagsläget är antennerna placerade på Ugn62 med horisontell polarisation och den lägst placerade antennen någon centimeter ovanför härden (ugns golvet). I FOI:s simuleringar antogs radarmätningar (utsändning-reflektion-mottagning). I detta fall gjordes länkmätningar (utsändning-mottagning). Syftet var framför allt få en uppskattning kring interferens och amplitudsänkning med avståndet och om dessa var två fenomen som påverkade radarsignalen drastiskt. Figur 4.8 och 4.9 redovisar mätningar med horisontell respektive vertikal polarisation. Eftersom antennerna är 180x180 mm (bredd x höjd) och 1 mm tjocka så gick det inte att placera dem på exakt i samma höjd för respektive polarisation.



Figur 4.8. Mätning med horisontell polarisation.



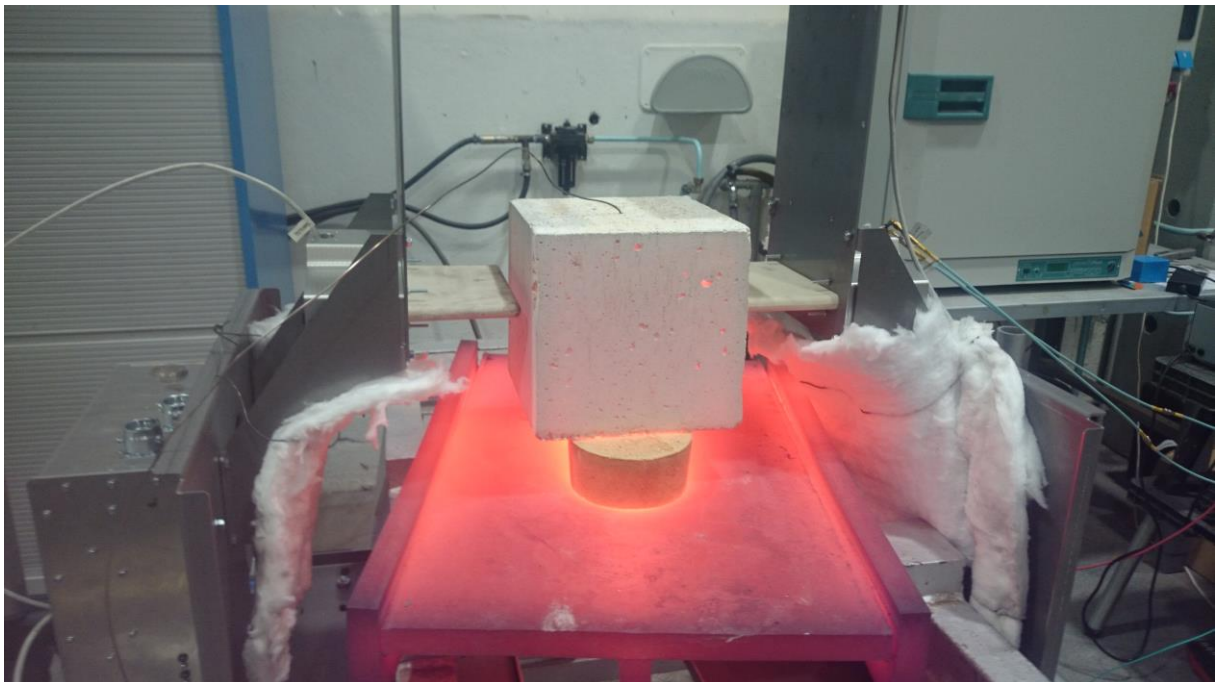
Figur 4.9. Mätning med vertikal polarisation.

I figur 4.8 och 4.9 går det att identifiera ett interferensmönster på samma sätt som vid FOI:s simuleringar. Amplituden avtar inte med samma storlek som i FOI:s simuleringar. Detta beror på att mätningarna gjordes med ett bredbandigt radarsystem och simuleringarna gjordes för ett smalbandigt system. Radarbolagets gamla radarsystem, som användes i detta test, hade inte heller

traditionell amplitudmätning utan i detta fall anges det korrelerade värdet. Därför är dämpningen mindre i de verkliga mätningarna än i simuleringarna. Detta till trots så bevisades inget oväntat som kunde förklara den stora dämpningen som noterats vid mätningar i värmningsugnar. Låga antennplacering ska dock undvikas eftersom interferensen är hög.

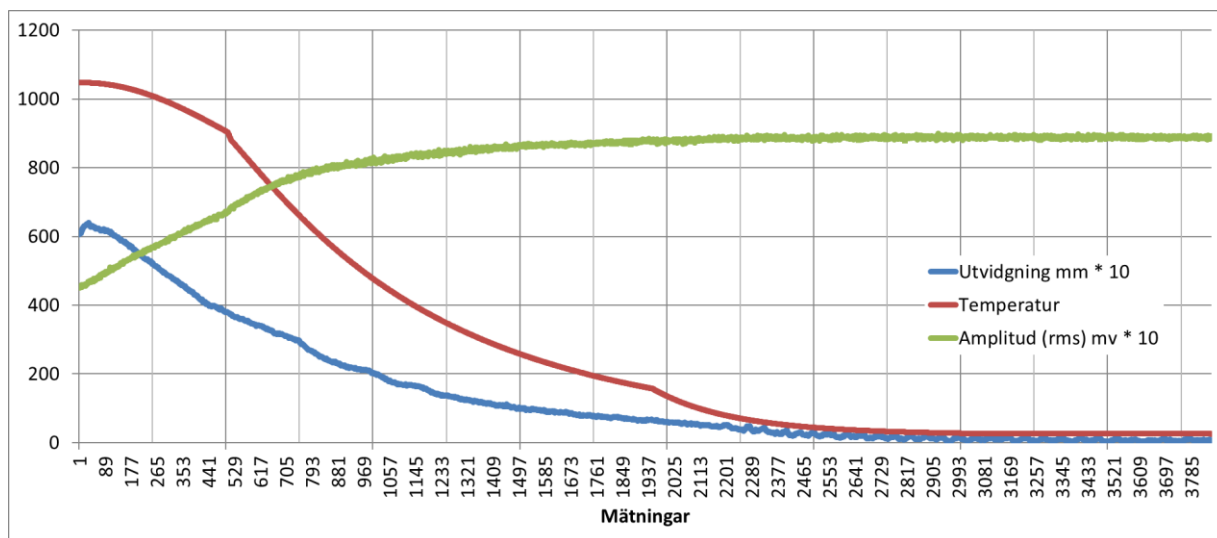
4.6 Absorption och värme

Det visade sig att hypoteser kring interferensfenomen, reflektion eller vridning av radarsignalen hade mycket liten eller förväntad inverkan på radarsignalen. Problemet med radarsignalen kvarstod en bra bit in i projektet. Dämpning på grund av ogynnsamt keramiskt material kvarstod som en möjlig förklaring till de kraftiga dämpningarna i radarsignalen. Därför genomfördes mätningar på ett keramiskt material som var betydligt lättare än den befintliga keramen. Under mätningarna hettades den befintliga och nya keramen upp till $+1\ 200^{\circ}\text{C}$, se figur 4.10. En särskild ram med skyddsplåtar byggdes för att arbetet skulle kunna göras säkert.

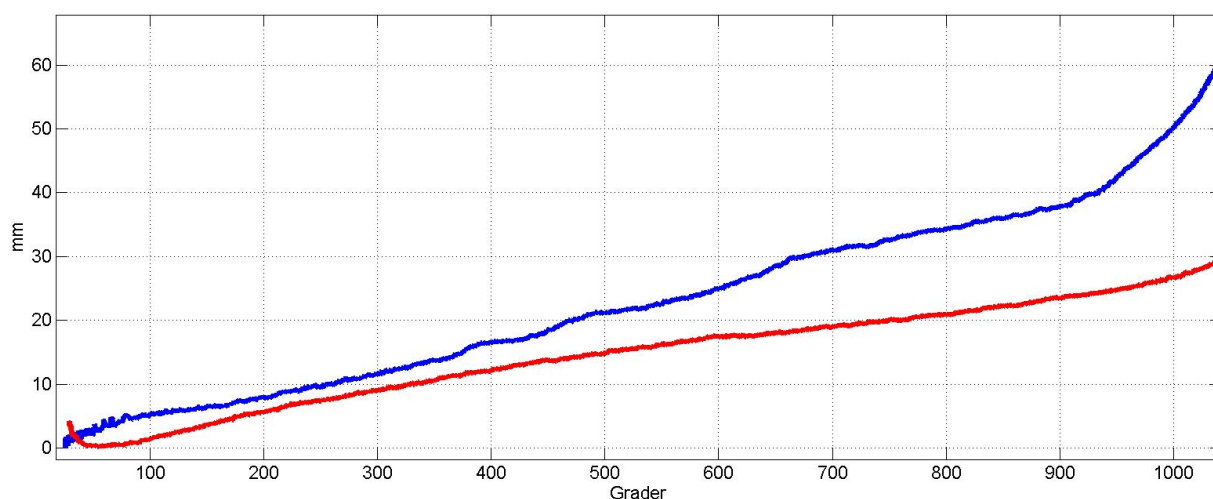


Figur 4.10. Upphettnings och mätning på keram i $+1\ 200^{\circ}\text{C}$.

Inför radarmätningarna omkonstruerades radarsystemet för att kunna mäta amplituden mer tillförlitligt. Amplitud, längdförändring och temperatur mättes vid första försöket på den befintliga keramen (samma sort som används på Ugn62), se figur 4.11. Olyckligtvis kunde inte amplitudmätning göras vid det andra försöket av den lättare keramen. Därför gjordes endast en mätning av längdförändringen. En jämförelse i längdförändringen mellan första och andra försöket redovisas i figur 4.12.



Figur 4.11. Mätdata från första mätningen av befintlig keram.



Figur 4.12. Jämförelse (temperatur och längdförändringen) mellan befintlig tyngre (blå) och lättare keram (röd).

Figur 4.12 indikerade att den nya lättare keramen kunde ha positiva egenskaper.

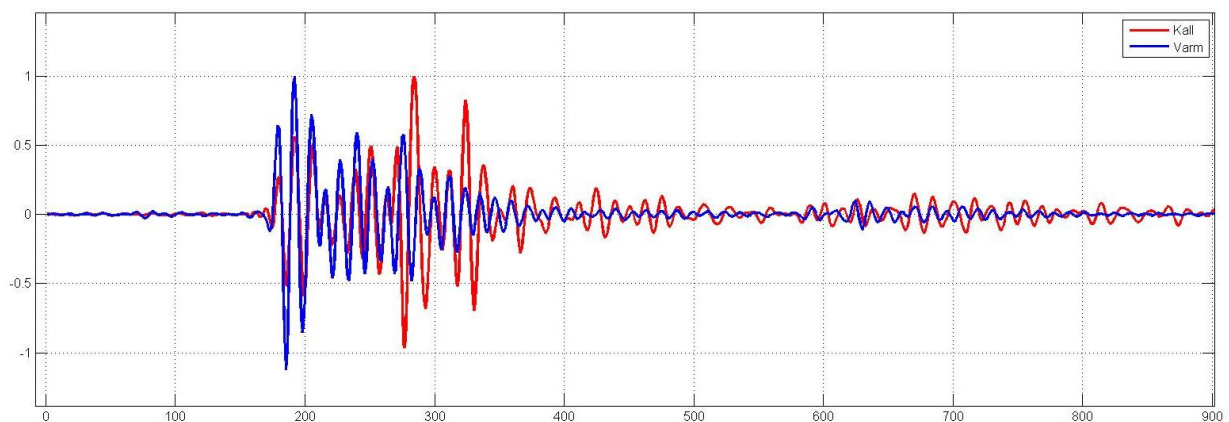
Amplitudmätningarna genomfördes under första försöket signalerade inget särskilt. Faktum var att amplituden bara halverades mellan 20°C och 1 200°C. Utifrån dessa mätningar beslutade Radarbolaget och Sandvik att ersätta den befintliga keramen med den lättare keramen med syfte att underlätta radarmätningarna, se figur 4.13. Befintlig keram ersattes i åtta positioner.

Det gjordes förnyade försök under hösten 2015 med referens- och live-mätningar, men problematiken kvarstod fortfarande. Vid ett längre produktionsstopp under julen 2015 gjordes ytterligare mätningar för att identifiera möjliga problem. Med en enkel stålplåt kunde Radarbolaget konstatera att radarmätningar kunde göras 15 meter in i ugnen, dvs. till andra sidan ugnen. I kall ugn gick mätningarna mycket bra. Radarmätningar genomfördes på tom värmningsugn före och efter uppvärmning av Ugn62, se figur 4.14. I det kalla tillståndet (rött) så går det att konstatera att både fram- och baksida av den keramiska väggen syns tydligt. I varmt tillstånd (blått) försvinner

reflektionen från baksidan av väggen, vilket indikerar att radarsignalen absorberas till stor del. Detta fenomen identifierades även på SSAB:s ugnar.



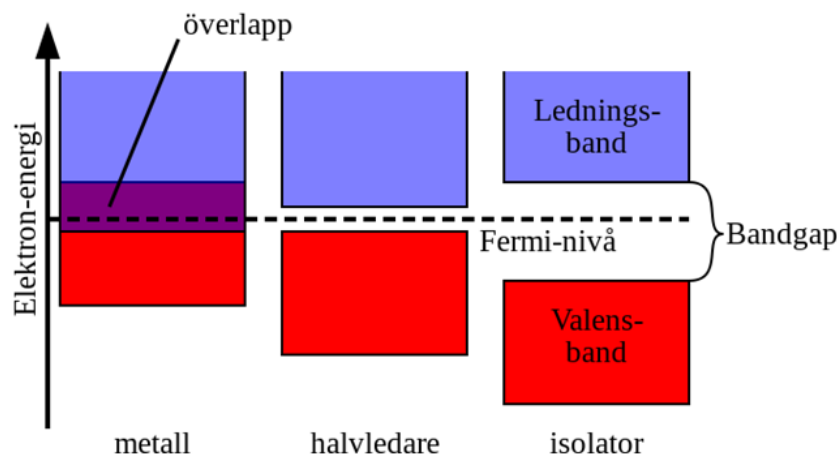
Figur 4.13. Ombyggd ugn (ljusare rektanglar) och provmätning med plåtskiva.



Figur 4.14. Radarsignaler från mätning på tom värmningsugn i kallt (rött) och varmt (blått) tillstånd. Den röda signalen visar tydligt att både framsida och baksida syns, vilket inte görs i den blå signalen.

4.7 Värme och bandgap

Trots att den befintliga keramiken i ugnsväggen byttes ut mot en keram i lättare material så kvarstod problemet med svaga radarsignaler. I lägre temperaturer kunde en viss förstärkning av radarsignalen ses, men i höga ugnstemperaturer $>1\ 100^{\circ}\text{C}$ var radarsignalen inte märkbart bättre än innan. Det gick att göra referensmätningar på stillaliggande stålämnen, men live-mätningar på ett kontinuerligt flöde av stålämnen var svårt att göra på ett bra sätt. Efter idogt sökande kunde inte detta fenomen förklaras. Därför uppsöktes två professorer i fysik, vilka hänvisade till att keramers så kallade bandgap minskar vid höga temperaturer, se figur 4.15.



Figur 4.15. Bandgap för metaller, halvledare och isolatorer.

Bandgapen reglerar hur mycket de fria valenselektronerna kan vandra i materialet. I metaller är bandgapen överlappande vilket gör dem ledande, medan i isolatorer så är bandgapen helt separerade. Om energi eller värme tillförs keramer så blir de halvledande, vilket innebär att de absorberar radarsignaler och radiovågor i stor grad. Eldfast material har mycket stora bandgap, men då värme tillförs minskar de, vilket ökar de fria elektronerna, se tabell 4.2.

Tabell 4.2. Fri elektroner per cm^{-3} för olika eldfasta material vid olika temperaturer.

	1 000 K	1 500 K	2 000 K
MgO	1,07	$1,03 \times 10^7$	$3,61 \times 10^{10}$
NiO	$3,92 \times 10^9$	$2,44 \times 10^{13}$	$2,18 \times 10^{15}$
Al ₂ O ₃	33,42	$1,02 \times 10^8$	$2,01 \times 10^{11}$
Fe ₂ O ₃	$2,31 \times 10^{12}$	$1,71 \times 10^{15}$	$5,3 \times 10^{16}$
SiO ₂	1,071	$1,03 \times 10^7$	$3,61 \times 10^{10}$
UO ₂	$1,16 \times 10^7$	$5,03 \times 10^{11}$	$1,19 \times 10^{14}$

Aluminiumoxid (Al₂O₃) med inslag av kiseloxid (SiO₂) och bindemedlet kalciumoxid (CaO) är vanligt förekommande material i ugnsinfodringar. Enligt tabell 4.2 går det att konstatera upp till 1 000 K (728°C) är de fria elektronerna få för aluminiumoxid och kiseloxid, men vid 1 500 K (1 228°C) är de 7–8 tiopotenser fler. Detta överensstämmer väl med de försök som gjordes på både Sandvik och SSAB. Vid lägre temperaturer så erhöles en högre radarsignal än vid högre temperaturer.

4.8 Fiber, lösningen

De teoretiska värden visade med tydlighet att keramer absorberade radiovågor vid höga temperaturer. Det var orsaken till att bakre sidan av ugnsväggen inte reflekterade så mycket som den borde. I slutänden så leder detta fenomen till att lite energi kommer in i ugnen och lite energi reflekteras tillbaka från stålämnen. Den keramiska isoleringen har goda egenskaper upp till 728°C, men får däröver kraftigt försämrade egenskaper utifrån ett radarperspektiv.

Det finns amorf isoleringsfiber (okristallisk) av exempelvis aluminiumoxid. Denna fiber innehåller mest luft och väger i jämförelse med keramiken mycket lite. Amorf fiber har fördelen att vara förhållandevis ofarlig (jämför kristallin asbest). Det kan också vara så att den amorfa egenskapen, dvs. frånvaro av kristallstruktur, minskar effekten av bandgap och fria valenselektroner. En förnyad undersökning gjordes av keramik och nu även en aluminiumoxidfiber (av märket Saffil). Projektet hade tillgång till en laboratorieugn där värmning och radarmätning kunde ske samtidigt som uppvärmningen. Under uppvärmningen loggades temperatur och radarmätning, se figur 4.16. Ugnen var modifierad och utrustad för radarmätning under uppvärmning (förlängning och amplitud), se figur 4.17.



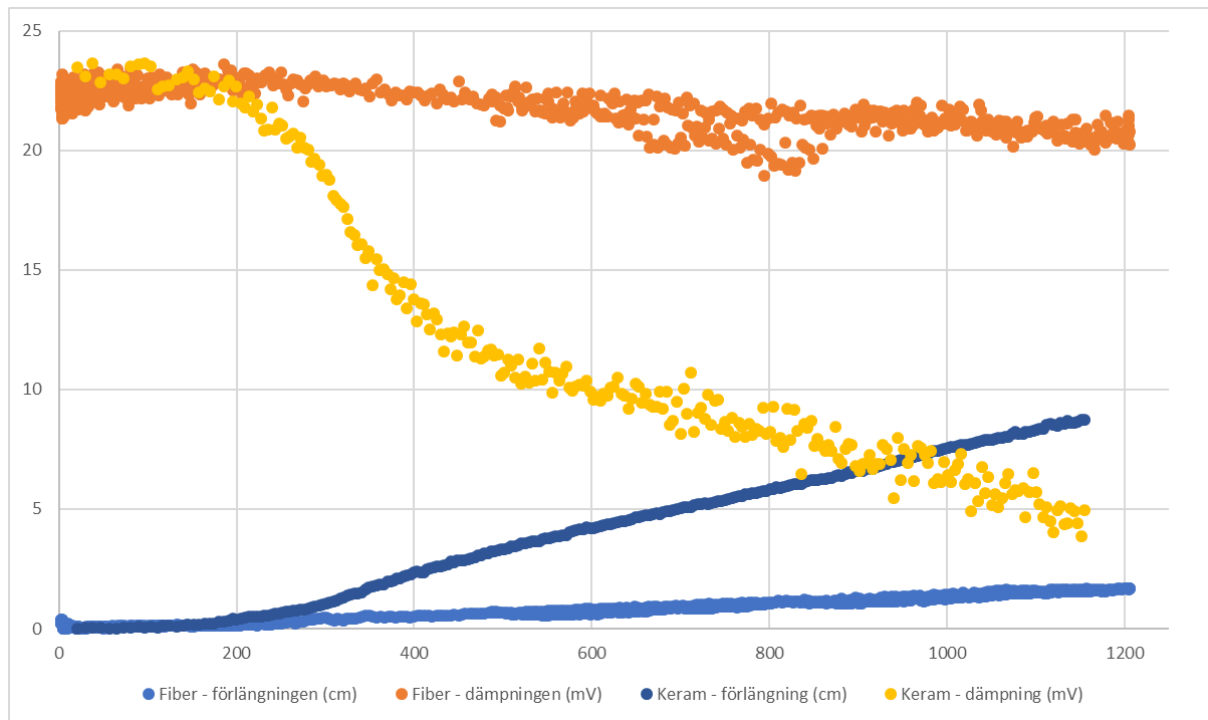
Figur 4.16. Värmning och mätning i laboratorieugn av keramer och Saffil.



Figur 4.17. Laboratorieugn med radarsensorer.

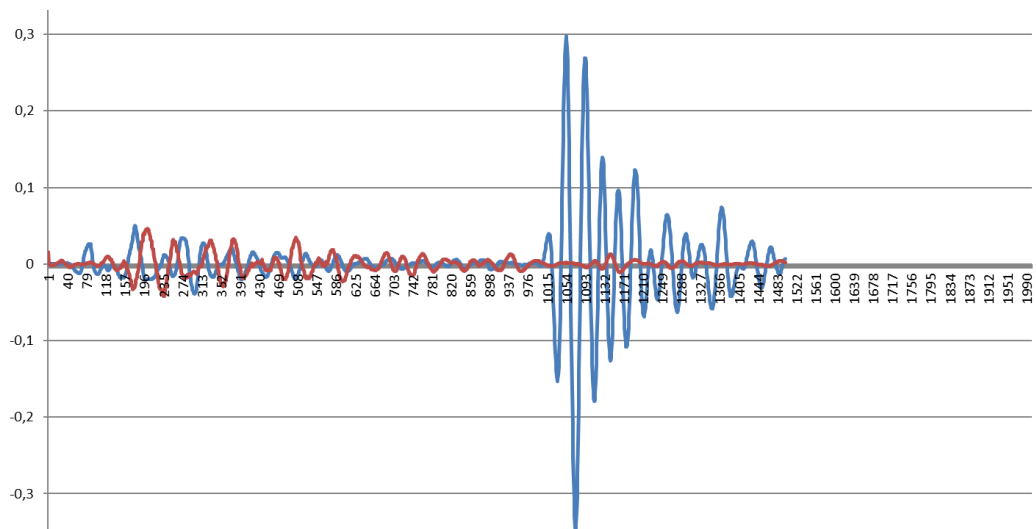
Radarmätningarna visade att det fanns en tydlig skillnad mellan keramen och fibern, se figur 4.18. Mätningarna ska jämföras med varandra. Det finns även en förlängning och amplitudvariation som beror på ugnsisoleringen. Den absoluta förlängningen är också större för keramen än för fibern. Amplituden är dock ett absolut värde och kan jämföras direkt. Fibern mättes både under uppvärmning och nedkylning. Vid höga temperaturer >1 100°C går det att konstatera stora skillnader:

- Förlängning: 8,7 cm för keramen, 1,6 cm för fibern
- Amplitud: 3,8 mV för keramen, 20,3 mV för fibern.



Figur 4.18. Mätningar av fiber och keram.

Försöken i laboratorieugnen visade med tydlighet skillnaden mellan en keram och en fiber. Fibern var väsentligt mycket mer genomsläpplig för radarsignaler än keramen. Därför beslutade Sandvik och Radarbolaget att först tillverka en Saffil-kub för installation och test i så kallade inspektionsluckor (titt-luckor). Om försöket föll väl ut skulle fyra inspektionsluckor och två ordinarie installationsplatser fyllas med Saffil. Det visade sig i radarmätningar i inspektionsluckorna att radarsignalen var 30 gånger högre än tidigare, se figur 4.19.



Figur 4.19. Radarsignal vid mätning på stålämne genom keram (röd) och genom fiber (blå).

Installation av Saffil-fibern gjordes sommaren 2016, se figur 4.20. Mätningarna har fungerat exemplariskt efter denna installation av Saffil.



Figur 4.20. Saffil på Ugn62 på Sandvik.

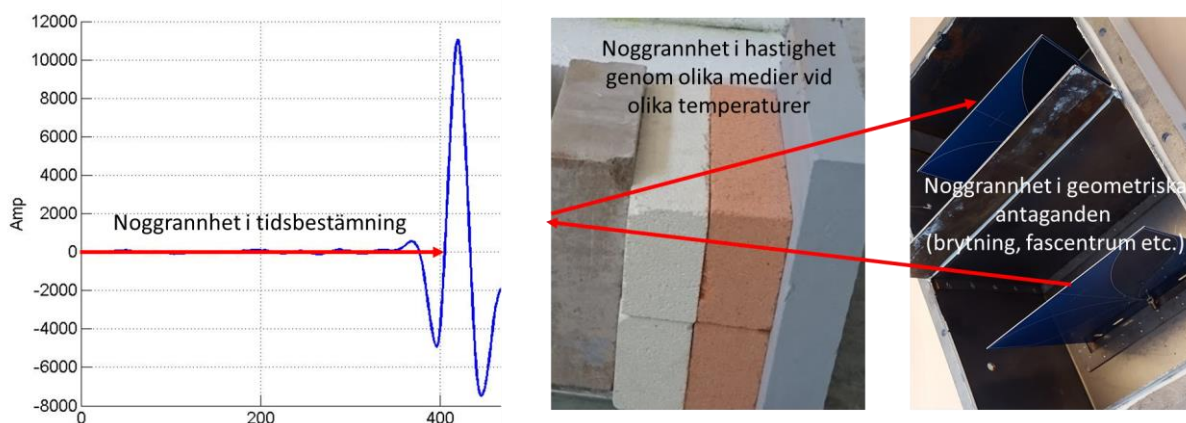
5 Radarnoggrannhet

Målet med detta projekt var att optimera energiförbrukningen vid värmning av stålämnen, vilket kräver hög noggrannhet i bestämning stålämnets temperatur eller färdighetsgrad. Noggrannheten i bestämningen av denna temperatur eller färdighetsgrad påverkas av noggrannheten i avståndsmätning med radar och modelleringen av temperaturen. Detta stycke behandlar noggrannhet utifrån ett generellt perspektiv och radarmätningarna explicit. Noggrannhet i modellering av temperaturen hanteras i stycke 8.

5.1 Avståndsmätning med radar

I det använda radarsystemet mäts tiden som radarvågen har gått från sändaren, via reflektion mot målet, och tillbaka till mottagaren. Ett sådant system kallas time-of-flight. Tiden för en elektromagnetisk våg, som går i "ljusets hastighet", att förflytta sig en millimeter är 3 pikosekunder ($3 \cdot 10^{-12}$ sekunder). Därför måste mätproceduren vara extremt robust och noggrann, vilket ställer stora krav på allt från elektroniska kretsar, dynamik och justeringsmöjligheter till signalbehandling och numeriska metoder.

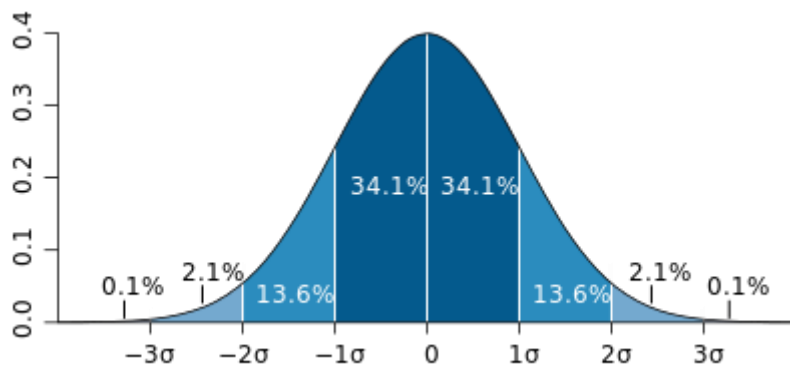
Tiden mellan utsändning, reflektion och mottagning omvandlas därefter till ett avstånd. Omräkningen till ett absolut avstånd kräver vetskap om den elektromagnetiska vågens hastighet och gångväg. I och med att olika medier (t.ex. luft, isoleringsmaterial och keramik) har olika dielektriska egenskaper så färdas den elektromagnetiska vågen olika snabbt i olika medier och bryts på olika sätt. Temperaturen i dessa medier påverkar också den elektromagnetiska vågens hastighet. I varmt solitt material går ofta radarvågen långsammare eftersom molekyler och atomer rör sig lättare. Antennerna (sändare och mottagare) är inte placerade i samma punkt, vilket också påverkar noggrannheten i bestämning av ett radaravstånd. Noggrannhetsbestämning av en radarmätning är sålunda ganska komplex, se figur 5.1.



Figur 5.1. Noggrannhet i radarmätning påverkas av tidsbestämning, avståndsbestämning, medier beskaffenhet och geometriska förhållanden.

5.2 Normalfördelning och standardavvikelse

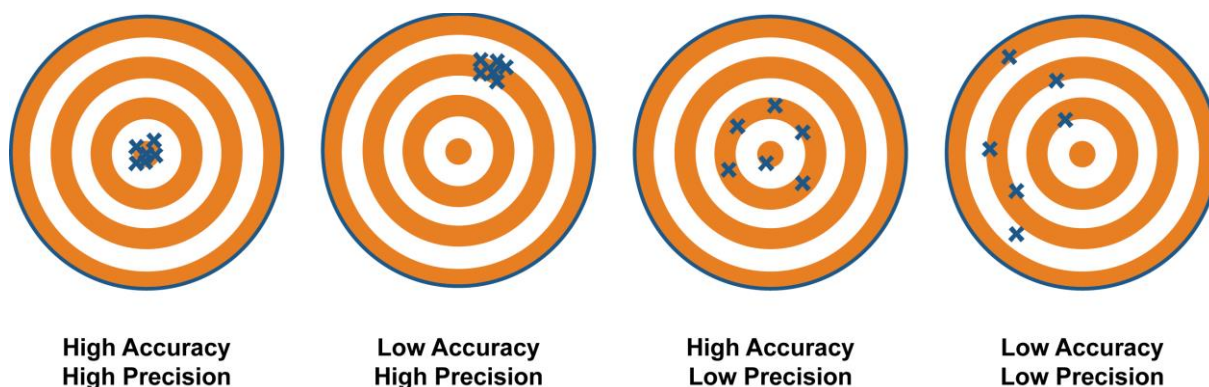
Alla noggrannhetsberäkningar och diskussioner i denna rapport förutsätter att mätningar, variabler och data är normalfördelade. I annat fall, t.ex. vid systematiska fel, har detta särskilt påpekats. I en normalfördelningskurva motsvarar standardavvikelsen 1 sigma ($\pm 1\sigma$), vilket motsvarar 68,2% av felen. Huvuddelen (99,7%) av felen finns inom 3σ , se figur 5.2.



Figur 5.2. Normalfördelningskurva med indelning i olika sigma-intervall.

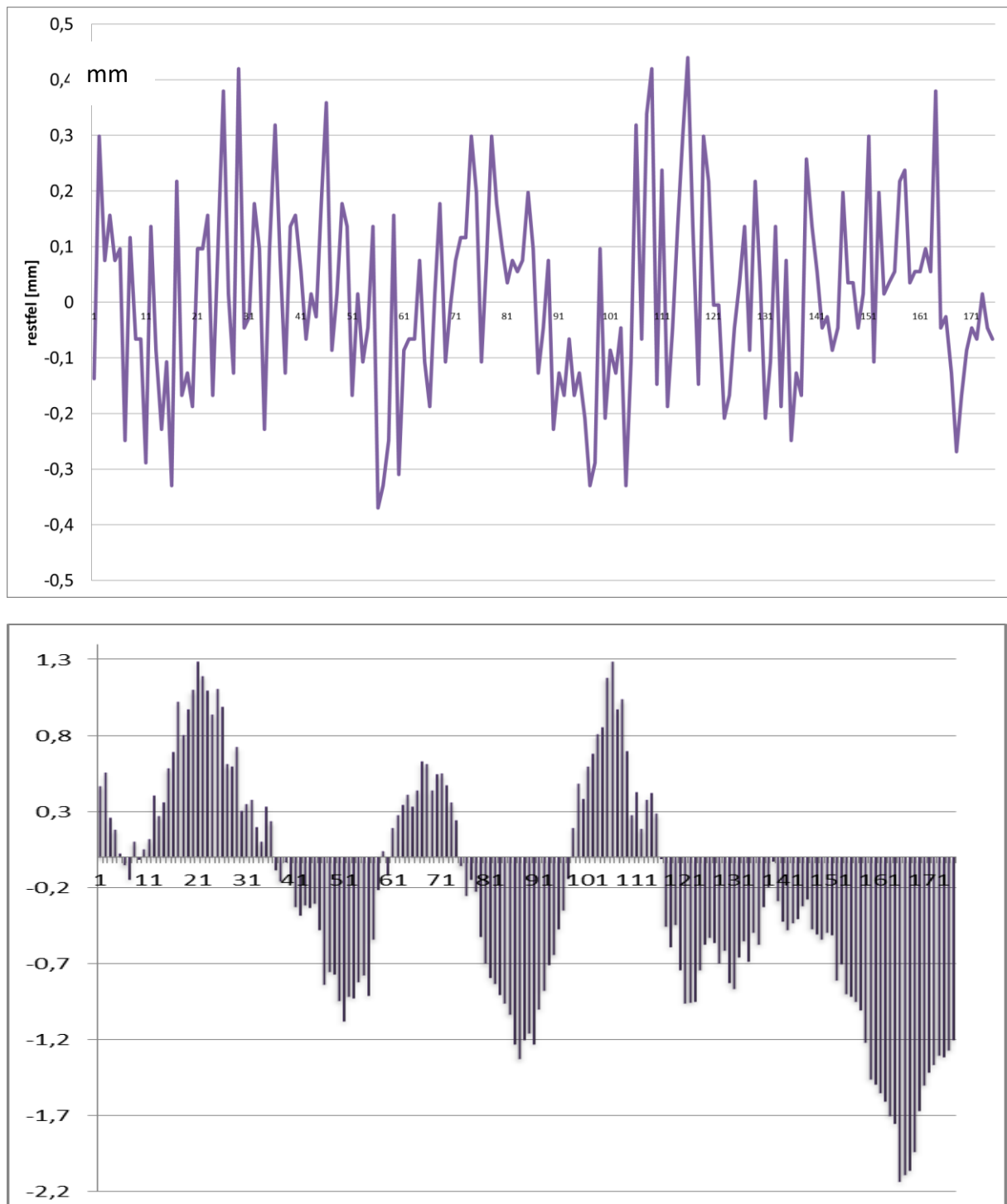
5.3 Faktorer som påverkar noggrannheten

Noggrannhet i ett mätsystem kan delas upp i relativ noggrannhet (precision eller repeterbarhet) och absolut noggrannhet (linjäritet), se figur 5.3. Den relativa noggrannheten är ofta kopplad till repeterbar noggrannhet, vilket betyder att det kommer att vara samma noggrannhet under samma förutsättningar (samma längd, konstellation och mätobjekt). Den relativa noggrannheten är ofta högre än den absoluta noggrannheten, vilket beror på att absolut noggrannhet kräver ett definierat referenssystem och att sensorernas absoluta positioner är kända.



Figur 5.3. Hög och låg noggrannhet (accuracy) jämfört med hög och låg precision (precision).

Enligt (Ottoson och Andersson, 2013) ansåg FOI och KTH att den relativa noggrannheten i Radarbolagets radarsystem år 2013 var $\sigma=0,11\text{--}0,13$ mm och den absoluta noggrannheten var $\sigma=0,68$ mm i genomförd utvidgningsmätning, se figur 5.4.



Figur 5.4. a) Relativ noggrannhet och restfelen vid relativ förflyttning. b) Absolut noggrannhet.

Noggrannheten, som erhöles från förstudien, skulle nästan ha varit tillräcklig för att bestämma temperaturen (1 mm utvidgning motsvarar cirka 10°C förändring för ett 10 m långt ämne) om radarmätningarna var den enda felkällan, men så är inte fallet. Noggrannhetsuppskattningen måste totalt sett ta hänsyn till:

- Noggrannhet i radarsystemet (relativ och absolut)
- Noggrannhet i formel för värmodellering (från ugnsgdata till ämnesutvidgning)
- Skillnader mellan olika mätpunkter (påverkas av olika väggar, golv och temperaturer)

- Objektets storlek (mätobjektets yta)
- Noggrannhet i initiala parametrar såsom längd och temperatur
- Mätobjektets övriga fysikaliska egenskaper (tillväxt av glödskalet och raka/sneda kanter).

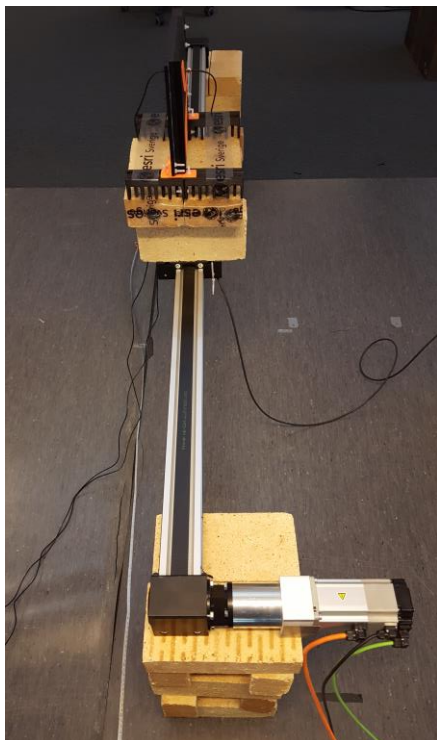
Därutöver kompliceras noggrannhetsbestämningen av att påverkande faktorer kan vara systematiska och inte slumpmässiga och normalfördelade. Det var fallet för radarsystemet, som vid projektstarten alltid hade lägre noggrannhet för vissa längder och bättre för andra (se figur 5.4). Det systematiska felet svängde med hela eller delar av våglängden ($\lambda=15$ cm). Målet med projektet är att, så långt som möjligt, eliminera eller kompensera för de faktorer som påverkar noggrannheten och då särskilt de systematiska felen.

Felen fortplantas med medelfelets fortplantningslag under förutsättning att felen är slumpmässiga och normalfördelade:

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

5.4 Bestämning av noggrannhet

Vid uppmätning av noggrannhet krävs en referensmetod som har högre noggrannhet än radarsystemet. I projektet valdes en linjärenhet som referensmätningssystem, dels för att målet kunde flyttas, dels för att målets position kunde mätas med hög noggrannhet. Linjärenheten (ELZ60 från Bahr) är 2 meter lång med en specificerad upplösning och noggrannhet på 0,1 mm, se figur 5.5a. Den förväntade noggrannheten i ett optimalt radarsystem är ca 0,1 mm. Linjärenheten och radarsystemet har sålunda lika hög noggrannhet. Därför utrustades linjärenheten med en magnetsensor (MSK 5000 från Siko) med en specificerad absolut noggrannhet på $25+10 \times L \mu\text{m}$, se figur 5.5b. Upplösningen är $1 \mu\text{m}$. Repeterbar noggrannhet är $10 \mu\text{m}$. Mätenheten har ett absolut grundfel ($25 \mu\text{m}$) och längdfel ($10 \times L \mu\text{m}$). Det är okänt om mätfelet är systematiskt (förutom längdberoendet) eller är helt stokastiskt.



Figur 5.5. a) Linjärenhet för förflyttning av radarmål. b) Magnetsensor för noggrann positionsbestämning.

5.5 Ursprunglig noggrannhet (RPU)

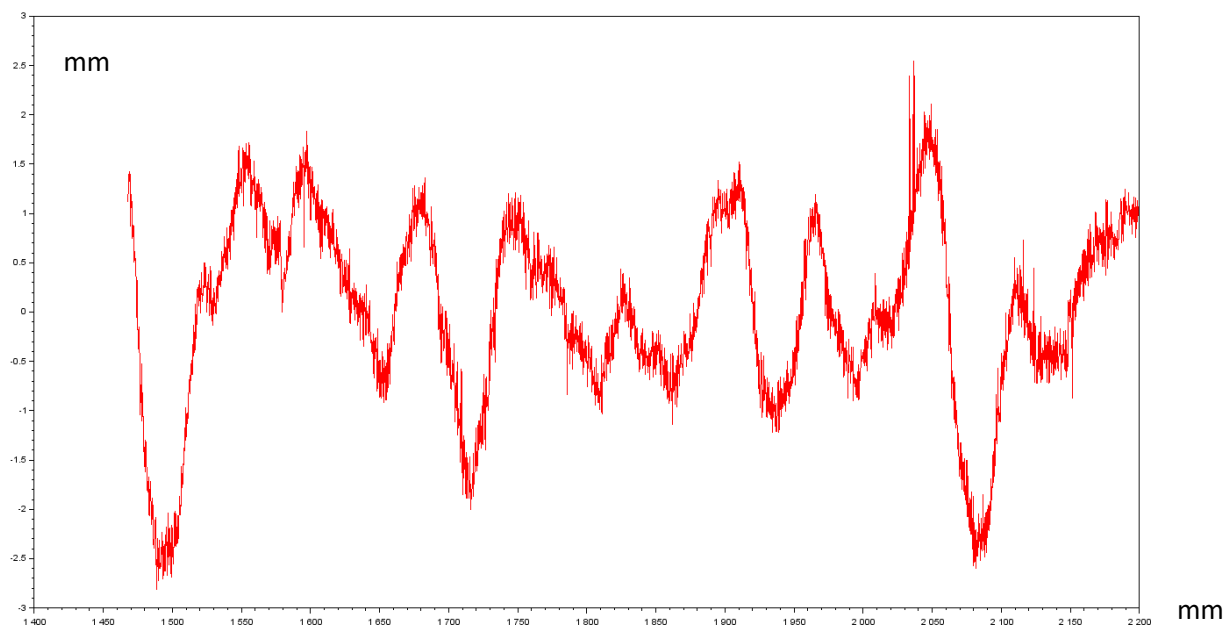
Radarnoggrannheten är uppmätt på liknande sätt i hela rapporten för att det ska kunna göras direkta jämförelser, se figur 5.6. Antennhuset består av en metalllåda från EMG Automation. Industriell fiberisolering (aluminiumoxid) med en tjocklek om 250 mm placerades framför antennerna för att efterlikna en installation på en värmningsugn. Mätobjektet var en vertikal stålplåt med en tjocklek om 1 mm. Stålplåten var upphängd i en linjärenhet med motsvarande egenskaper som i figur 5.5. Stålplåten har den goda egenskapen att den är ett entydigt mål i "en dimension" (ett streck som kan röras mot och bort ifrån radarsensorn). Ett tvådimensionellt objekt, dvs. en yta, är svår att placera på ett repeterbart sätt.

Noggrannheten har uppmäts med den gamla radarsensorn (RPU) under en tidigare förstudie (Ottoson och Andersson, 2013), se figur 5.4. Vid den tidpunkten fanns inte en utrustning för noggrann referensmätning med magnetsensor enligt figur 5.5. Därför gjordes en förnyad uppmätning med den gamla radarsensorn, där referensmätningen gjordes med en magnetsensor med en noggrannhet på 25 μm . Stålplåten förflyttades 1 470–2 200 mm. Figur 5.7 visar skillnaden mellan referensmätning och radarmätning. Det går att se att felet är systematiskt. Resultatet från referensmätning:

- Standardavvikelse (1σ): 0,94 mm
- Maximalt fel: 2,55 mm



Figur 5.6. Mätupställning för mätning i med antennhus med fiberisolering och stålplåt (1 mm).



Figur 5.7. Felkurva vid mätning i radarläge med gammal sensor (RPU). Enheten för x- och y-axeln är mm.

5.6 Fördelning av noggrannhet

Felen i figur 5.7 är synbarligen systematiska. Standardavvikelsen är $\sigma=0,94$ mm och det maximala felet är 2,55 mm. I och med att felen är systematiska och inte stokastiska medför att statistisk felteori och antaganden kring normalfördelning inte är helt tillämpliga på dessa fel. I en olycklig konstellation (en viss längd och i viss position) erhålls alltid maximumfelet medan i en lycklig konstellation så erhålls minimumfelet (brus). Längd och position är i de flesta fall stokastiska, vilket minimerar risken för att exempelvis vissa stålämnen alltid mäts med ett systematiskt fel. I tabell 5.1 följer en beskrivning av fel i radarmätningar, maximumfelets uppskattade storlek och vad som kan göras för att eliminera felen. De är sorterade i storleksordning.

Tabell 5.1. Uppskattning av felkällor i undersökt radarsystem och storleken på dessa.

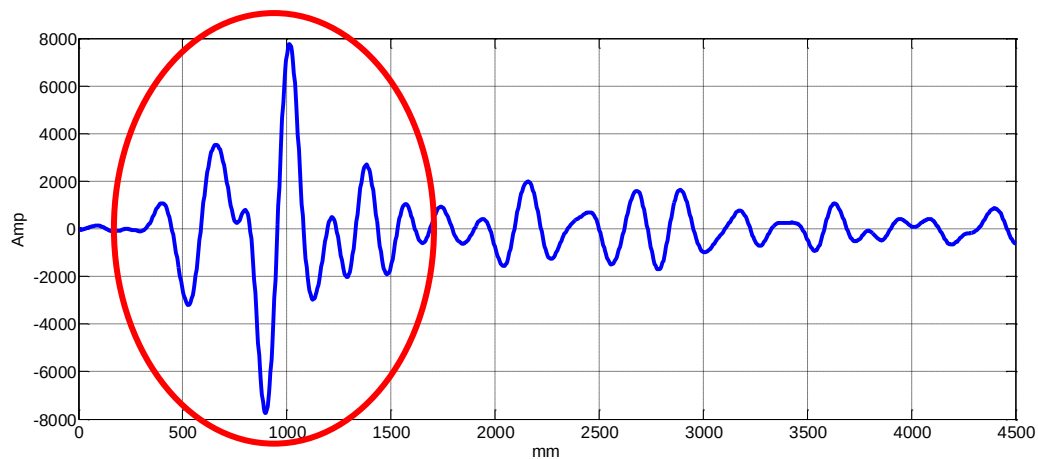
Fel	Tänkbar lösning	Maxfel
Låg dynamik i radarsignalen (kvantiseringsfel)	Högre dynamik skapas genom att fler steg i analog-till-digitalkonvertering av radarsignalen. Ny krets krävs	2 mm
Fel i fasskift för förtätning av radarsignal (jitter)	Samplingspunkternas fasskiftsfel mäts upp och korrigeras. Stabil och justerbar krets för fasskift krävs	1,5 mm
Temperaturvariationer i elektronik	Synkronisera radarsignalen internt i sensor med loopback eller externt med radiosignalen med crosstalk (antenn-till-antenn-signal)	1 mm
Närfältsmätning, radarmätning fungerar dåligt inom närfältsområdet (2 våglängder)	Radarmätning ska göras bortom 5 våglängder, vilket motsvarar 1 500 mm.	1 mm
Signalbehandling	Välj bästa mätpunkt i radarsignalen (andra nollgenomgången)	0,5 mm

Numeriska metoder	Välj interpolationsmetod som bäst kan anpassas till signalen (Catmull-Rom)	0,2 mm
Fasskiftsupplösningen, översampling	Välj fler samplingspunkter	0,2 mm
Brus ("white noise")	Medeltalsberäkning görs (radiostörning minskar i en ugn)	0,1 mm

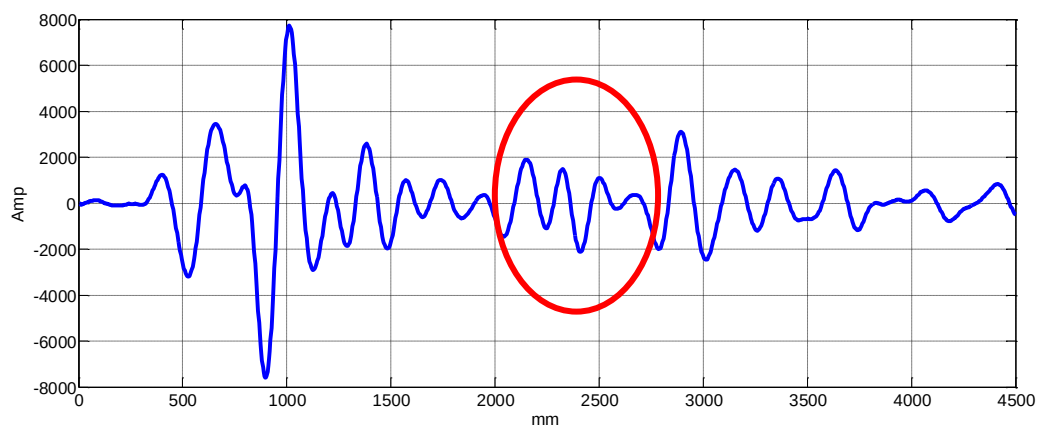
5.6.1 Grundläggande signalbehandling

Vid radarmätning med hög noggrannhet krävs att målet är identifierat i radarsignalen. Det går inte att med hög noggrannhet analysera en råsignal eftersom den består av andra interfererande mål och crosstalk (antenn-till-antenn-interferens). Grundläggande signalbehandling för att erhålla hög noggrannhet görs genom följande tre steg:

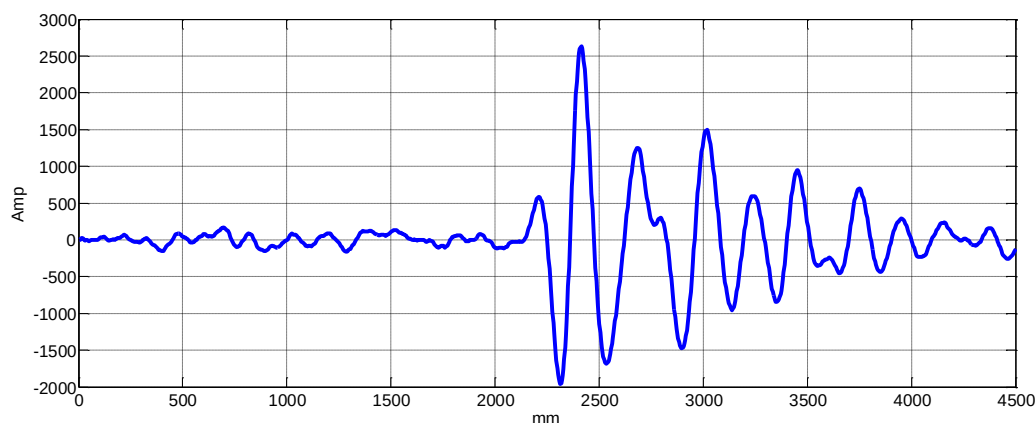
1. Mätning utan mätobjekt skapar en *referenssignal* (se figur 5.8a),
2. Mätning med mätobjekt skapar en *mätsignal* (se figur 5.8b),
3. Subtrahera mätsignal med referenssignal, en *målsignal* erhålls (se figur 5.8c).



Figur 5.8 a) Radarsignalens utseende utan mål (referenssignal). Röd ring markerar crosstalken, där signalen går direkt från sändare till mottagare.



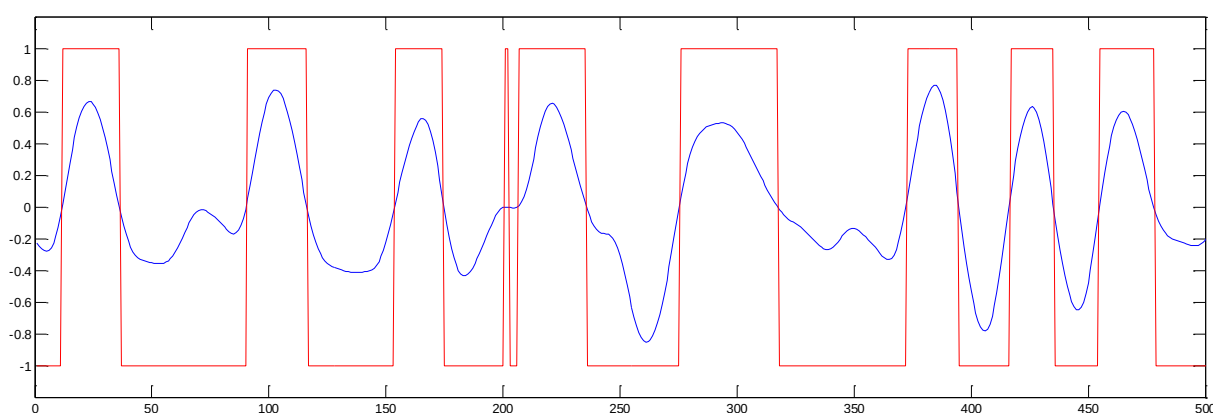
Figur 5.8 b) Radarsignalens utseende med mål (mätsignal). Det är svårt att se signalen, men det är en tydlig skillnad jämfört med figuren ovan.



Figur 5.8 c) Differensen mellan mätningen med plåt samt utan plåt (målsignal). Notera att y-axelns skala har ändrats jämfört med figur 5.8a-b.

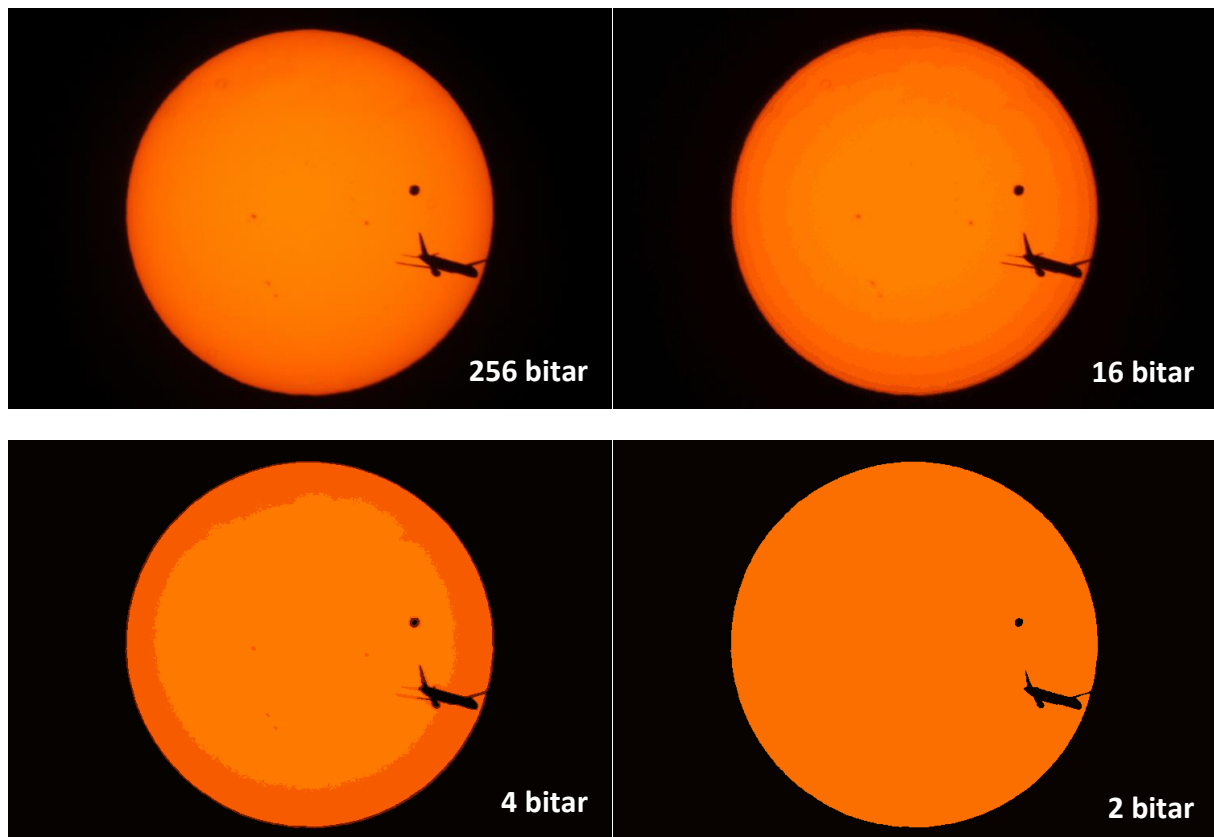
5.7 Låg dynamik i signalen

Radarsystemet skickar ett kontinuerligt kodflöde (pseudo-slumpmässigt flöde av ettor och nollor). När mottagen kod korreleras med motsvarande intern kod skapas själv radarsignalen. Detta är kärnan i radarsystemet för att skapa en koherent signal, det vill säga hur väl en mottagen vågs fas korrelerar med en utsänd vågs fas. Före korrelation görs en omvandling av analog till digital signal med en särskild AD-omvandlare (ADC). Vid projektstarten användes 1-bitars ADC (komparator) för omvandling av den analoga signalen. Det ger antingen en etta (1) eller en nolla (0), se figur 5.9.



Figur 5.9. Analog signal (blå) och signalens utseende (röd) efter komparatorbehandling (1 bitar).

I figur 5.9 går det att se utmaningen med att omvandla en analog signal till en representativ digital signal med en bits upplösning. Så länge omgivningen inte påverkar signalen (liten eller ingen interferens) är detta ett mindre problem, exempelvis när radarn är i länkläget. I radarläge, enligt figur 5.6, påverkas den analoga signalen mellan utsändning och mottagning genom interferens. Den uppstår då radarsignalen reflekteras mot andra mål och omgivningen samt vid antenn-till-antenn interferens (crosstalk). Dessa reflektioner och extra signaler blandas (interfererar) då med målsignalen. Ofta har målsignalen tio till hundra gånger mindre amplitud än dessa extra signaler. Som en dynamikjämförelse går det att se hur planeten Venus och ett flygplan passerar solen med dess solfläckar, se figur 5.10. Om kameran har för få bitar är det svårt att representera flygplanet, solfläckarna och Venus på ett korrekt sätt.

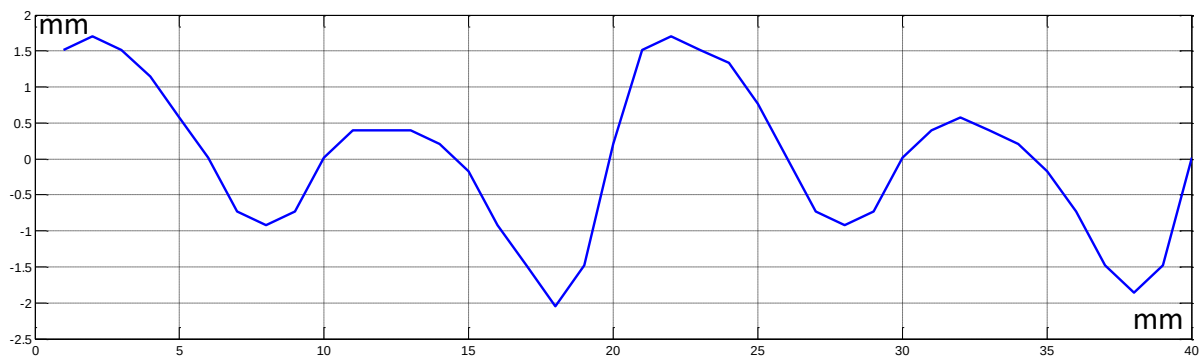


Figur 5.10. a) Ursprungsbild (256 bitars upplösning). b) 16 bitars upplösning. c) 4 bitars upplösning. d) 2 bitars upplösning.

Om inte radarsystemet har tillräckligt många AD-omvandlingssteg (dynamik) så kommer:

- Den digitala signalen inte att representera den analoga signalen fullt ut
- Korrelationen med den digitala ursprungssignalen kommer inte att stämma helt och hållet
- Vid subtraktion av en referenssignal (enbart solen) så blir målen (flygplanet, solfläckarna och Venus) deformerade
- Deformerade mål påverkar signalbehandlingen som i sin tur påverkar noggrannheten.

I projektet har simulering i Simulink och Matlab gjorts för att beräkna den teoretiska påverkan på noggrannheten vid låg dynamik (komparator). I simuleringen förflyttades ett reflekterande mål 40 cm samtidigt som ett större mål (crosstalk) stod still. Våglängden var 15 cm. Det gav ett maximalt fel på ± 2 mm (se figur 5.11). Det går att se hur felet varierar med våglängden ($\lambda=15$ cm) på ett systematiskt sätt. Det systematiska felet har en period med en halv våglängd. I verkligheten finns dock fler mål och störningar som påverkar signalen och noggrannheten.

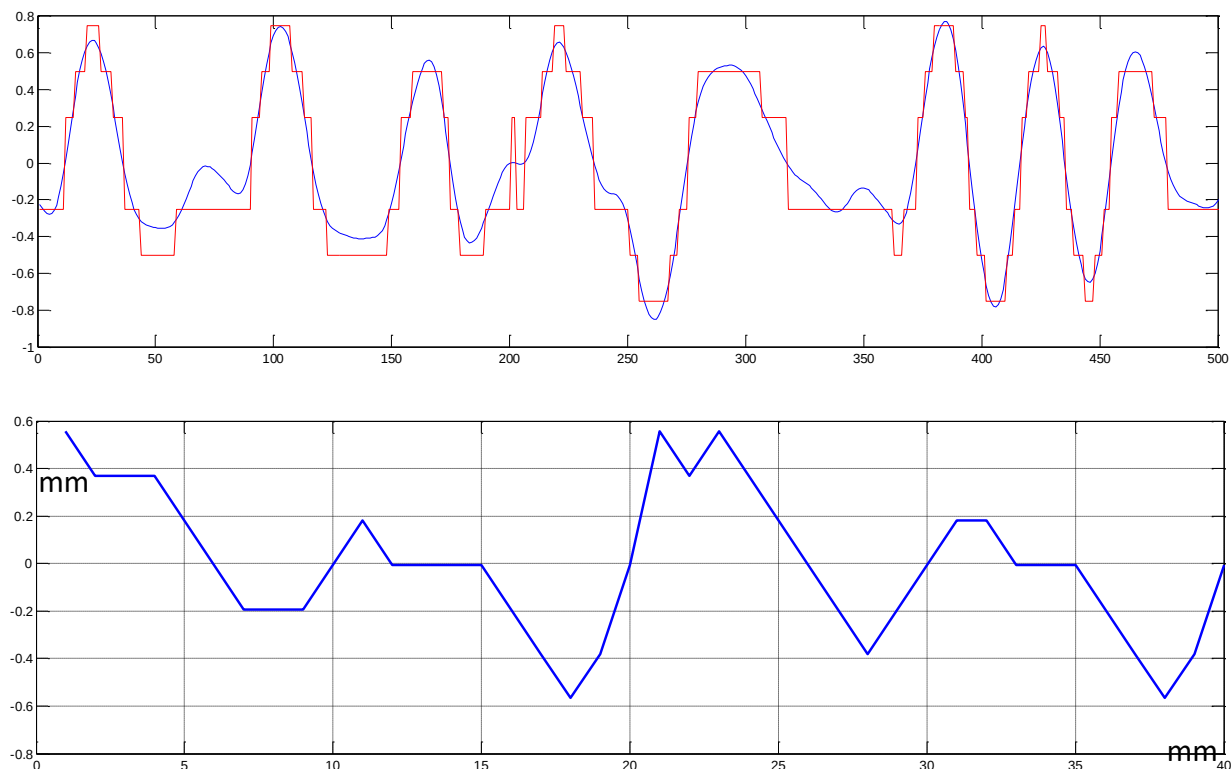


Figur 5.11. Felkurva för en simulerad signal med en-bits-omvandling.

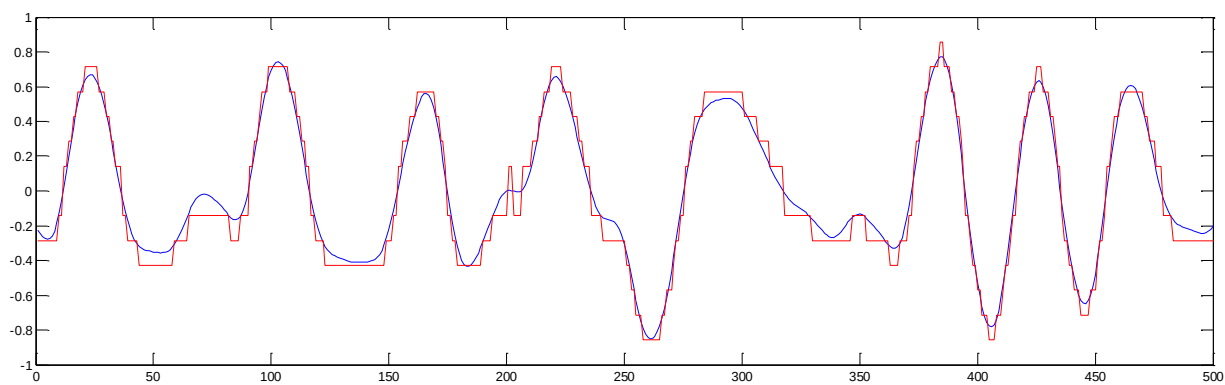
Det simulerade resultatet från figur 5.9 och 5.11 är genererade under perfekta förutsättningar i en dator. Den stora problematiken med låg dynamik är att signalen påverkas starkt av andra mål, särskilt av crosstalk och andra metallföremål.

5.7.1 Simulering av högre dynamik

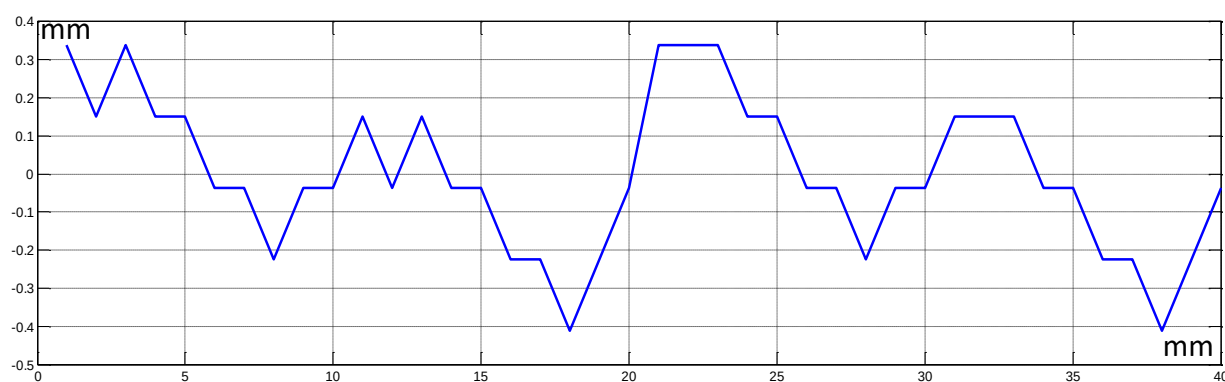
Högre dynamik kan erhållas genom att ersätta befintlig komparator med en flerbitars AD-omvandlare eller att svepa spänningsstyrkan mellan -4 och +4 mV. En AD-omvandlare är mycket långsam i dessa sammanhang. Därför har Radarbolaget valt att implementera AD-omvandlingen genom att svepa spänningsstyrkan i kombination med en snabb komparator. Ju fler steg som sveps vid AD-omvandlingen desto högre blir noggrannheten i längdmätningen, se figur 5.12-14. Redan vid åtta (8) stegs spänningsstyrka ökar noggrannheten med en faktor tre (3) och maxfelet går från 2 mm till 0,6 mm.



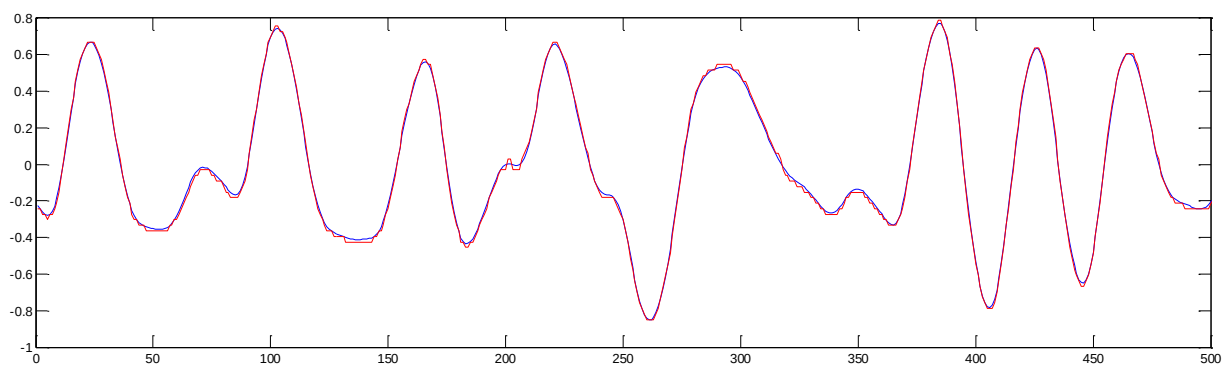
Figur 5.12. a) Signalens utseende (röd) efter AD-omvandling, 8 steg. b) Felkurva (maxfel: $\pm 0,6$ mm).



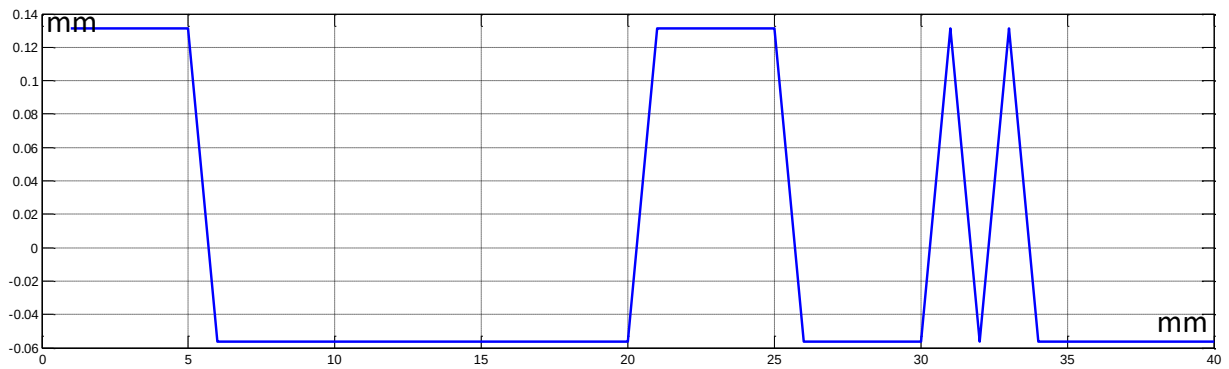
Figur 5.13. a) Signalens utseende (röd) efter AD-omvandling, 16 steg.



Figur 5.13. b) Felkurva (maxfel: $\pm 0,35$ mm).

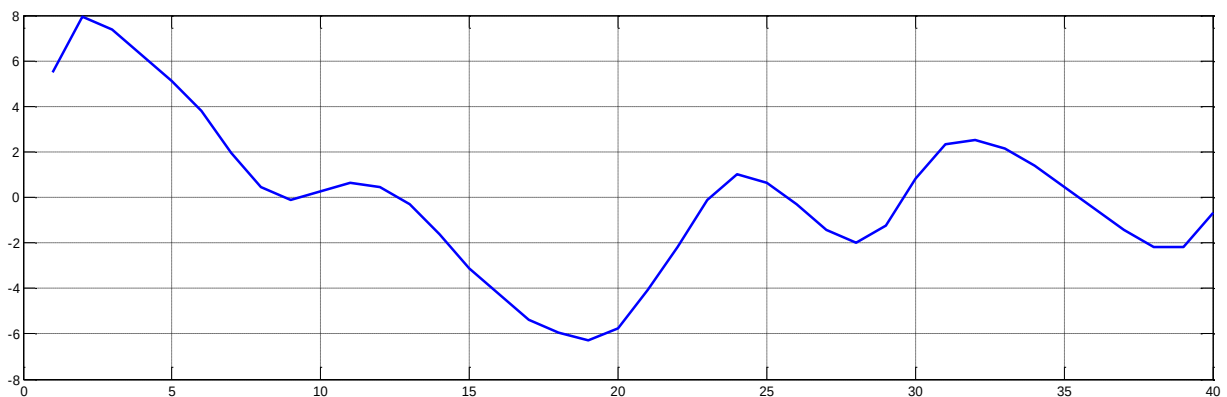


Figur 5.14. a) Signalens utseende (röd) efter AD-omvandling, 80 steg.

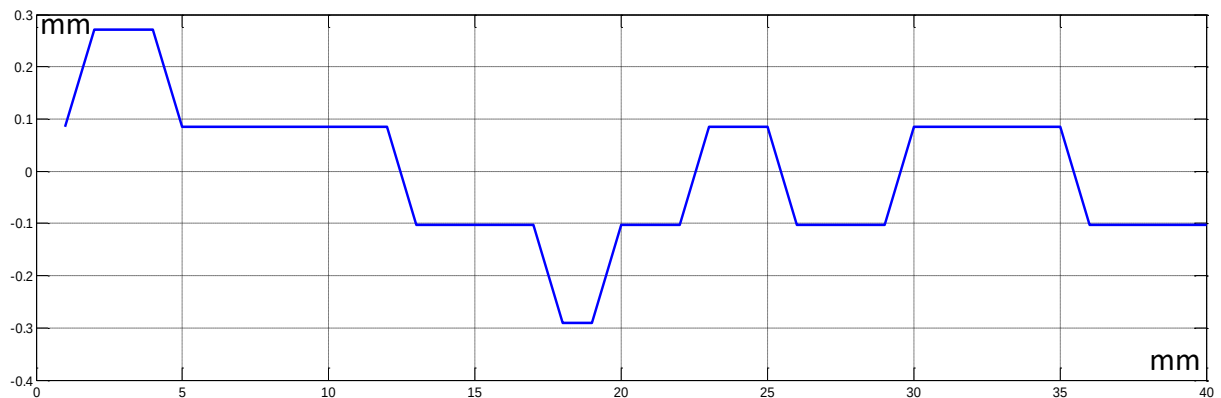


Figur 5.14. b) Felkurva (maxfel: $\pm 0,1$ mm).

För att sätta AD-omvandlingen på prov så placerades ytterligare ett mål framför radarn (nu totalt tre mål inklusive crosstalk). Precis som i figur 5.12-14 är detta en simulering i Simulink. I det verkliga fallet hade detta varit som att placera en stor stillastående metallyta (störande mål) på samma ställe som det verkliga målet (referensmålet). Referensmålet var nu mindre och hade endast 2/3-dels amplitudstyrka jämfört med det störande målet. I figur 5.15 redovisas felkurvan dels för en 1-bits komparator, dels för en AD-omvandlare som sveper i 80 steg. Det maximala felet med komparatorn är 8 mm och med en AD-omvandlare blir det maximala felet $\pm 0,3$ mm.



Figur 5.15. a) Felkurva för 1-bits komparator.



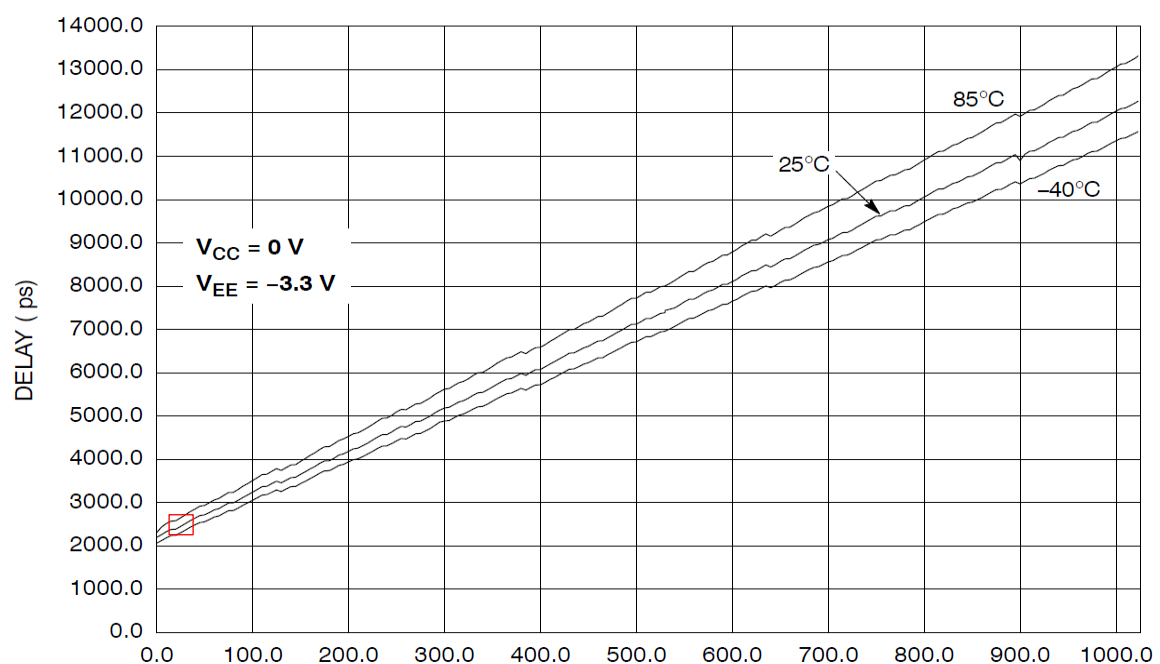
Figur 5.15. b) Felkurva efter AD-omvandling i 80 steg (maxfel: $\pm 0,3$ mm).

Simuleringen visar att en 6–8 bitars AD-omvandlare (64–256 steg) fungerar utmärkt för OPTIR-projektet. Det enda förbehållet med att implementera en AD-omvandlare med successiv approximationsteknik (genom att ändra spänningsnivåer) är att mättiden blir lika mycket längre som antalet spänningsnivåer. Mättiden går från 10–20 ms till 0,5–1 ms. Detta torde inte vara något större problem eftersom stålämnet är stillaliggande under 3–8 minuter mellan varje förflyttning i en värmningsugn, vilket sålunda ger 100–1000 mätningar per stålämne.

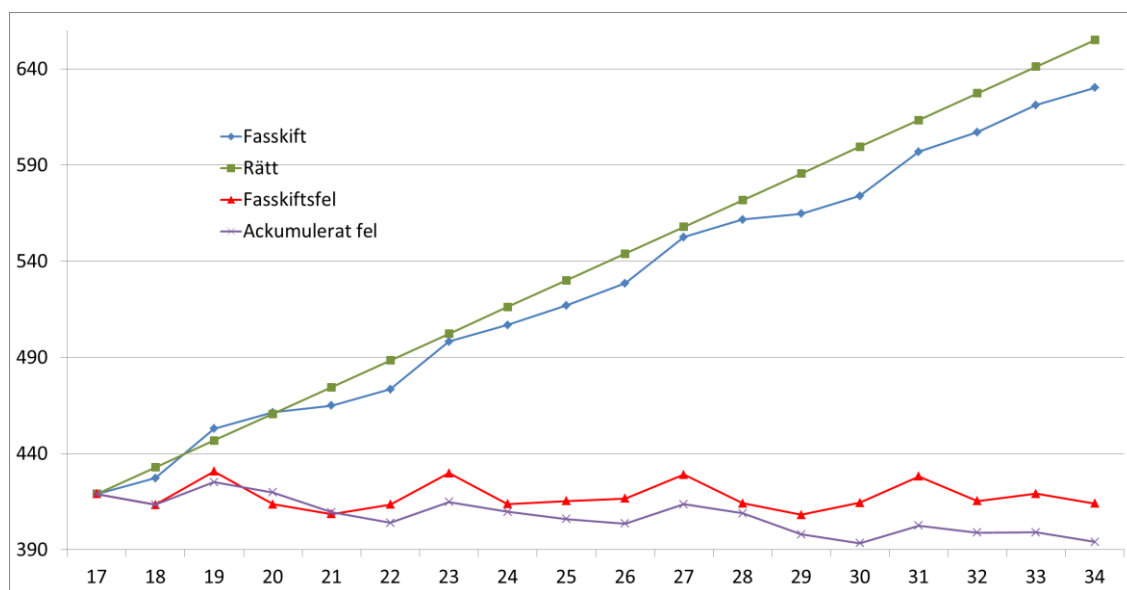
5.8 Fasskiftsfel och temperaturfel

Radarsystemet mäter ett antal fasskift (förtätning av samplingspunkterna sker genom att radarsignalen förskjuts i tiden) genom att använda en fördröjningskrets, så kallad ekvidistant sampling. Syftet med fasskiftet är att översampla signalen och att få fler samplingspunkter i kurvan (radarsignalen). Görs inte denna översampling blir kurvan hackig, vilket i sig minskar noggrannheten. Fördröjningskretsen kan ha en frekvens på 80 GHz, vilket motsvarar ett avstånd mellan varje fasskift på 3,75 mm eller 12,5 ps. Varje halv våglängd ($\lambda/2=7,5$ cm) kan sålunda delas upp i 20 delar. Ju fler punkter en kurva kan representeras av desto bättre bli kurvan representerad och desto högre noggrannhet erhålls.

På grund av att fördröjningskretsen inte är helt linjär och felfri skapas ett så kallat fasskiftsfel. Vid en och samma temperatur är detta fasskiftsfel relativt konstant för respektive fasskift, men ändras temperaturen så kommer kurvan för fasskiftens lutning att förändras, se figur 5.16a. Fasskiftsfelet kan relativt enkelt bestämmas med ett oscilloskop eller genom längdmätning till ett mål då alla andra felkällor är eliminerade, se figur 5.16b. Det är en mycket liten del av kurvan som används för bestämning av fasskiftet (se figur 5.16b), i detta fall 17–34 ord vilket är precis i början av kurvan i figur 5.16a (röd markering). Det finns också ett jitter (se hackigheten i figur 5.16a) på några pikosekunder, som påverkar noggrannheten. Radiovågen förflyttar sig en tiondels millimeter på 0,33 ps, vilket indikerar behovet av att även kunna korrigera jittret. Även om det maximala felet uppgår till 11,7 ps eller motsvarande 3,5 mm, så kommer inte mätfelet att bli så stort. Mätfelet blir ca 1,5 mm.



Figur 5.16. a) Fassfelslutning vid olika temperaturer.



Figur 5.16. b) Teoretiska fasskift med 18 sampelpunkter (grön) och uppmätt fasskift (blå) med oscilloskop. Relativa avvikelser i varje fasskift (röd) visar på maximalt fel på 11,7 ps och de ackumulerade felen (violett) uppgår till -24,9 ps.

5.8.1 Korrektion av fasskiftsfel (jitter)

Om avståndet och tiden mellan två fasskift (samplingpunkter eller subbin) inte är ekvidistant (lika långt) så påverkas sålunda noggrannheten. Felvektorn i figur 5.16b visar på ett maximalt fel (jitter) på 11,7 ps. Korrektion av jitter kan göras genom att:

- Nuvarande fördröjningskrets byts ut till en krets där fasskiftsfelen är mindre och kan justeras. Det skulle resultera i att den blå kurvan i figur 5.16b blir identisk med den gröna.

5.8.2 Korrektion av temperaturfel

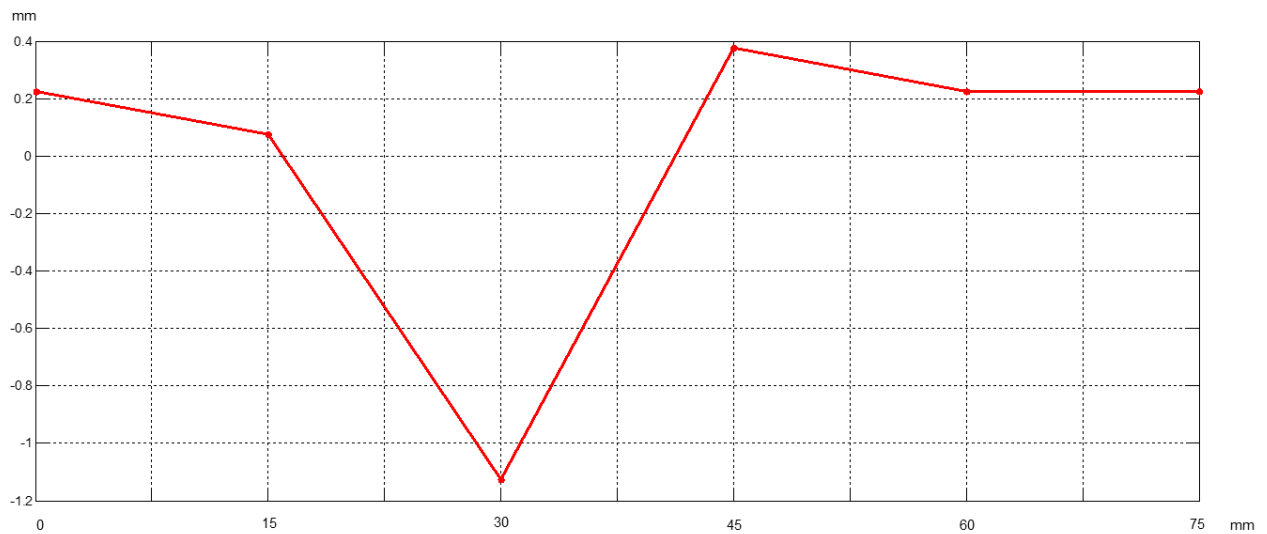
I figur 5.16a går det att se hur fasskiftena förändras vid olika temperaturer. Det sker både en offsetförskjutning i y-led och en förändring av kurvlutningen. Därför måste två korrektioner göras med koppling till temperaturfelet:

- Offsetförskjutningen hanteras genom synkronisering av hela radarsignalen, vilket görs genom en så kallad loopback-signal. Denna signal måste passera den temperaturpåverkade fördröjningskretsen så att synkroniseringen kan göras så sent som möjligt.
- Kurvlutningen ger ett litet tillskott av motsvarande fel som jittret (se ovan). Uppkommande lutningsskillnad för ord 17–34 (se figur 5.16a) är dock liten. Korrektion av detta fasskiftsfel måste göras i realtid genom att successivt förskjuta faserna och mäta upp fasskillnaderna.

5.8.3 Simulering av fasskiftsfel

Fasskiftsfel kommer att påverka den slutgiltiga mät noggrannheten för radarn, vilket i sin tur är ett uttryck för hur noggrant målpunkterna (enligt figur 5.11) är återgivna i radarsignalen. Radarsignalen är ett resultat av samplade korrelationsvärden från utsänd PRBS-kod, som tas emot fasskiftad (tidsförskjutet) med 50 pikosekunder (ps), se figur 5.16a. Inträder ett fel i fasskiftet (tidsförskjutningen) så kommer samplingpunkterna att vara något förskjutna. Samplingpunkterna i radarsignalen kommer då att hamna lite förskjutet relativt varandra i x-led. Enligt figur 5.16b är det

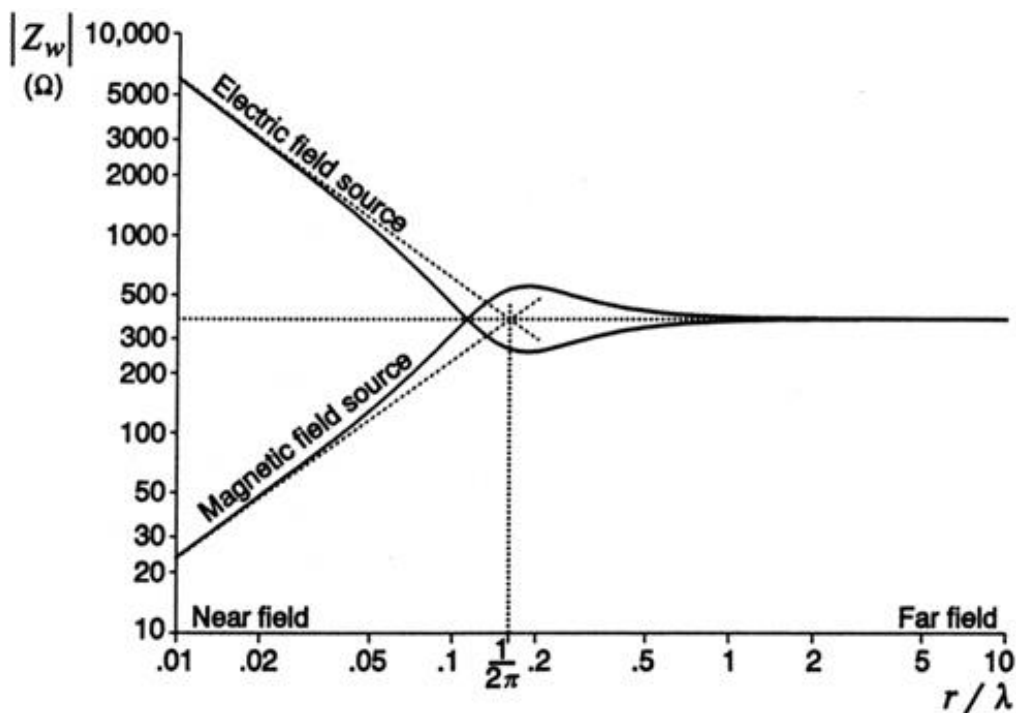
genomsnittliga felet ca 5 ps, vilket motsvarar en förskjutning på 1,5 mm i längd. Vid simulering av dessa fel ger 5 ps ett faktiskt maximalt längdfel på 1,15 mm, se figur 5.17.



Figur 5.17. Simulering av ett 5 ps stort längdfel i fas 2 vid förflyttning av ett föremål 0–75 mm i steg om 15 mm.

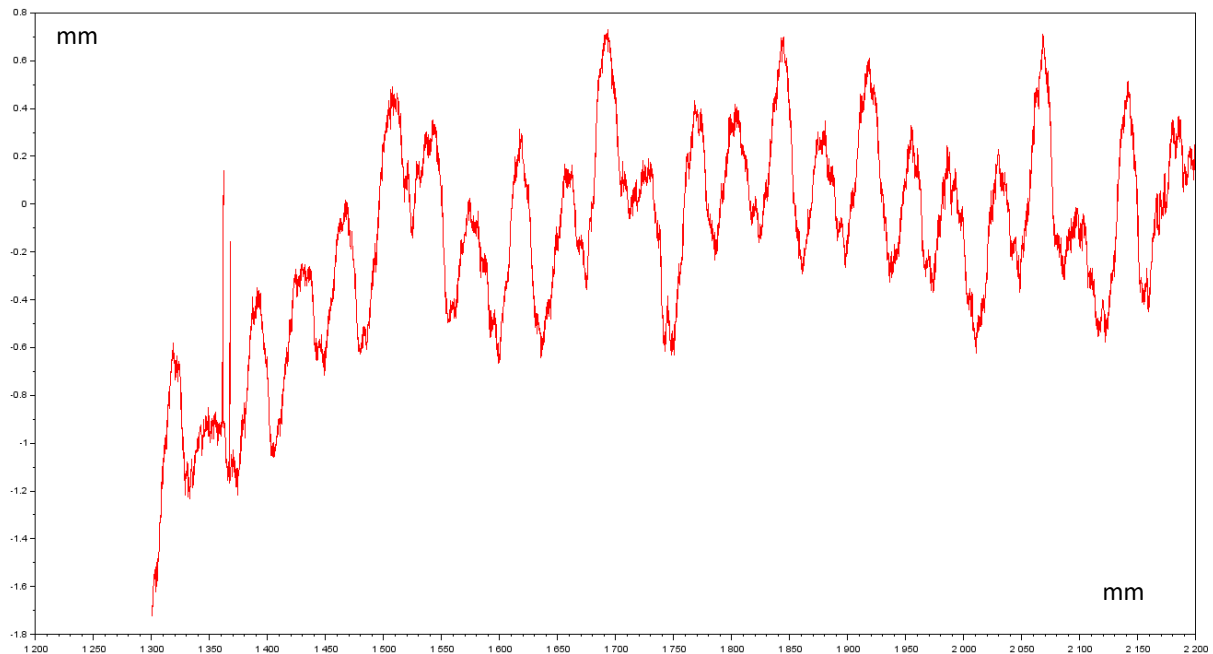
5.9 Närfältsmätning

Det finns fysikaliska skillnader mellan det så kallade närfältet och fjärrfältet till radarn. Närfältet definieras teoretiskt som två våglängder, vilket innebär 300 mm om radarn arbetar i 2 GHz. Bortom närfältet finns fjärrfältet. Övergångszonen är inte skarp eller väldefinierad. Närfältsregionen karaktäriseras av starka induktiva och kapacitiva effekter, vilket skapar störningar i radarmätningen, se figur 5.18.



Figur 5.18. Induktiva (electric field source) och kapacitiva (magnetic field source) effekter inom närfältsområdet.

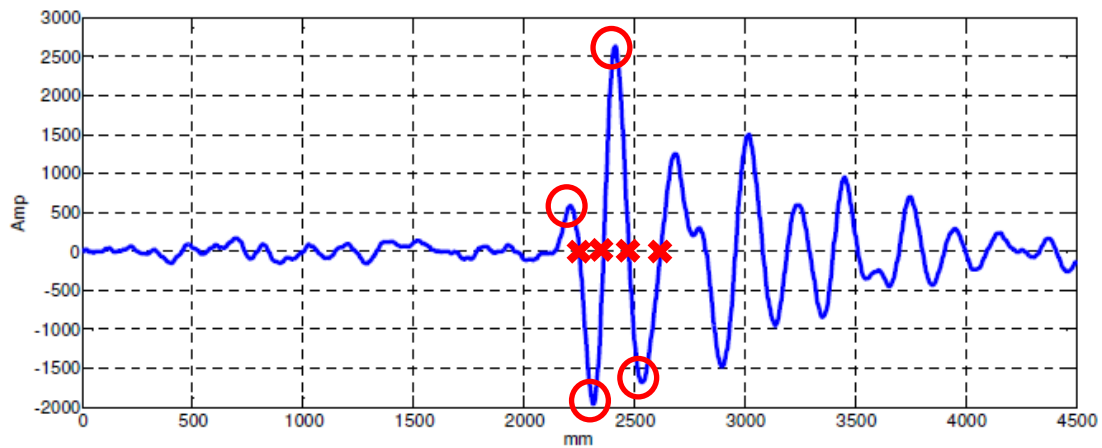
Enligt uppmätningar så finns dessa störningar från 0–1500 mm. I figur 5.19 går det eventuellt att skönja effekten från närfältet mellan 1 300–1 500 mm då mätningarna stiger från -1,8 mm till 0 mm. Även om figur 5.18 visar att närfältet är inom två våglängder så bör radarmätningar, med syfte att åstadkomma hög absolut mätnoggrannhet, göras bortom 5–10 våglängder (1 500–3 000 mm för 2 GHz). För OPTIR-projekt har närfältsfenomenen mindre effekter på mätningarna eftersom relativ utvidgningsmätning görs.



Figur 5.19. Felkurva vid mätning i radarläge inom och bortom närfältsområdet. Närfältet i detta fall är 0–1 500 mm.

5.10 Signalbehandling

Radarsignalen har ett antal matematiskt användbara målpunkter, se figur 5.20. Signalen har en topp med två sidolober (dalar). De matematiskt användbara målpunkter ("point of fidelity") är de minima och maxima där derivatan är noll (ringar) samt nollgenomgångarna (kryss). Vanligtvis ska målpunkten väljas så tidigt som möjligt eftersom interferensen från andra mål inte hunnit påverka huvudmålet. Den första toppen har dock för lite energi och är därför ganska instabil. Det går också att välja ett gravitetscentrum för ett maximum eller ett minimum, vilket motsvarar ett medelvärde för delar av kurvan. Olika sorters mål (plana ytor, tvådimensionella linjer (plåtkanter) eller krökta ytor) ger olika målsignaturer, vilket gör att olika målpunkter kan behöva väljas för optimal noggrannhet. Vanligtvis är det andra nollgenomgången som är den mest stabila målpunkten.



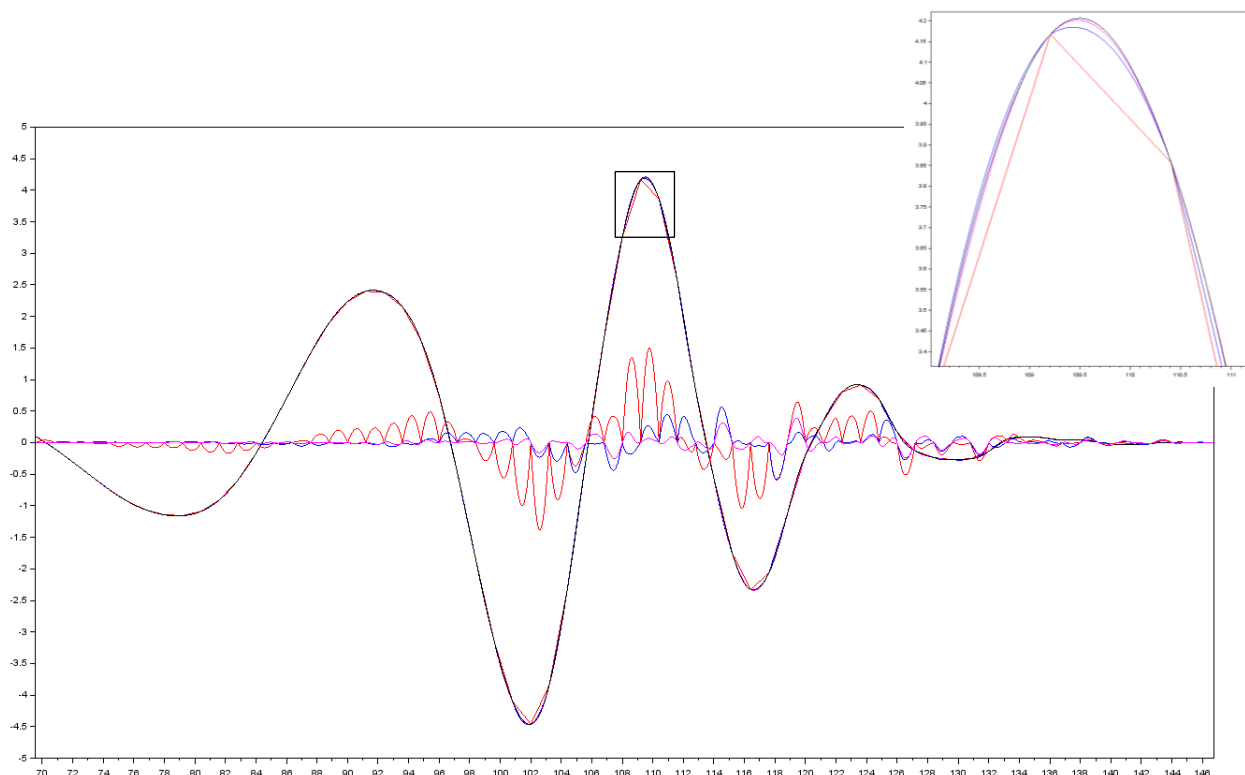
Figur 5.20. Differenssignalen ger avståndet till målet. Olika målpunkter är angivna.

5.11 Numeriska metoder

En radarsignal har en numerisk upplösning på 18 punkter per våglängd. Det motsvarar en mätupplösning på 4,17 mm. Utan interpolation erhålls sålunda ett maxfel på 2,085 mm. Det brukar vara möjligt att möjligt att interpolera data och erhålla en noggrannhet som är 10–100 gånger högre än den ursprungliga upplösningen. Interpolationsmetoden kräver dock god anpassning till de data som ska interpoleras, i detta fall en radarsignal (wavelet). Om en simulerad Daubechies 20-wavelet, som är ganska lik radarsignalen, används går det att numerisk jämföra olika interpolationsmetoder. Aktuella interpolationsmetoder är:

- Linjär interpolation ($f(x) \approx f_0 + p\Delta f_0$, där $p = (x - x_0)/(x_1 - x_0)$ och $\Delta f_0 = f_1 - f_0$),
- Kvadratisk interpolation ($f(x) \approx f_0 + p(p - 1)/2 \cdot \Delta^2 f_0$, där $\Delta^2 f_0 = \Delta f_1 - \Delta f_0$),
- Catmull-Rom-kurva (se en.wikipedia.org/wiki/Centripetal_Catmull%E2%80%93Rom_spline).

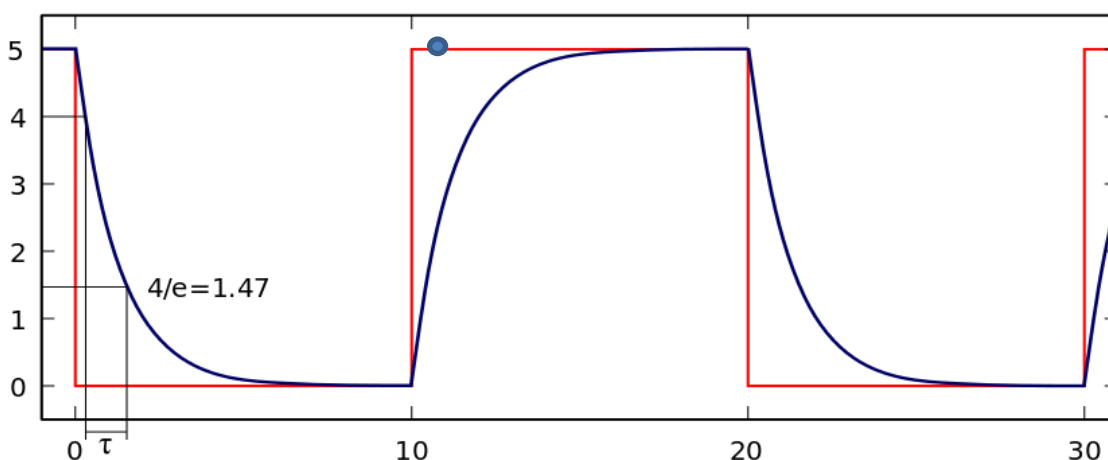
I en jämförelse mellan de tre interpolations går det att se att noggrannheten minskar ifall toppar och dalar används som målpunkter, se figur 5.21. Nollgenomgångarna är mindre känslig för interpolationsfel eftersom kurvan nästan är helt linjär i dessa punkter. Metoden med högst noggrannhet är Catmull-Rom.



Figur 5.21. Jämförelse mellan interpolationsmetoder mot en Daubechies 20-wavelet (svart): linjär (röd), kvadratisk (blå) och Catmull-Rom (magenta). a) Interpolerade punkter för förstörd topp. b) Felkurvor (felen är förstörade 10 gånger).

5.12 Fasskiftsupplösningen, översampling

Fasskiftsupplösningen och översamplingen är en metod att förtäta sampelpunkterna för att bättre representera radarvågen (vågen blir rundare och mindre hackig). I dagsläget används 5–20 sampelpunkter per våglängd. Metoden är i princip en numerisk metod i likhet med interpolationen (se ovan). Till skillnad från matematisk interpolation så är denna "interpolation" stegvis eftersom interpolationspunkten rör sig längs en fyrkantsvåg, se figur 5.22. Om ett radarmål och objekt rör sig inom ett sampel, t.ex. 3,75 mm för f20 punkters översampling, så borde punkten stå helt stilla. I verkligheten är inte flankerna helt vertikala, vilket beror på stigtider och falltider samt deformation då radarvågen har transporterats i luften. Därför kommer rörelser långt (10-20 gånger) under sampelupplösningen att kunna mätas.



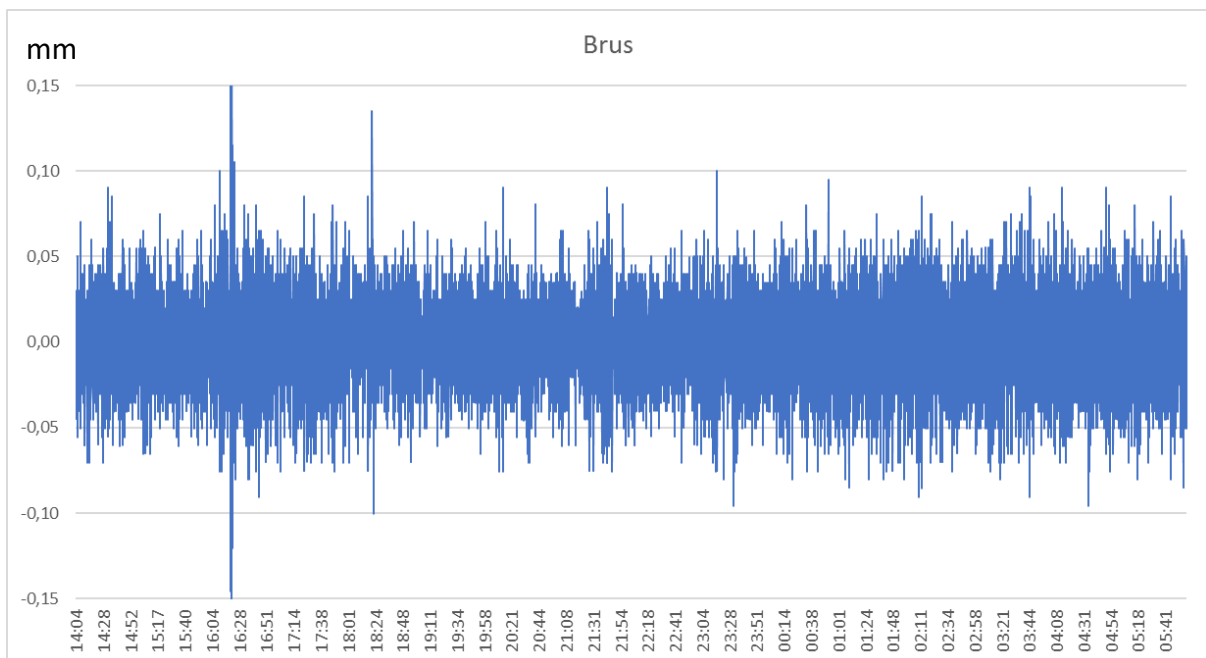
Figur 5.22. Exempel på fyrkantsvåg (röd) med stigtid och falltid (blå). Interpolationspunkt i blått.

I och med att jittret i fördröjningskretsen (fasskiftsfelet) är så pass mycket större än problemen med upplösningen så erhålls bara en liten högre noggrannhet om 20 sampelpunkter används istället för 5 sampelpunkter om exempelvis andra nollgenomgången (se figur 5.20-21) används som målpunkt. Ska det vara någon mening med att öka fasskiftsupplösningen så måste fasskiftsfelen minimeras eller elimineras.

5.13 Brus

Brus beror framför allt på externa radiostörningar och internt jitter i elektroniken. Internt jitter kan exempelvis öka om elektroniken utsätts för högre temperaturer. Brus kan minimeras genom att göra flera mätningar och göra medeltalsbildning av dessa. I ett försök gjordes mätningar på ett stillastående objekt under 173 minuter med 60 medeltalsberäkningar per registreringstillfälle. Bruset från dessa mätningar är utritade i figur 5.22. Bruset är framför allt kopplat till applicerbar noggrannhet, därför återkommer vi till uppskattning av denna storhet senare i rapporten. Resultatet från mätningen:

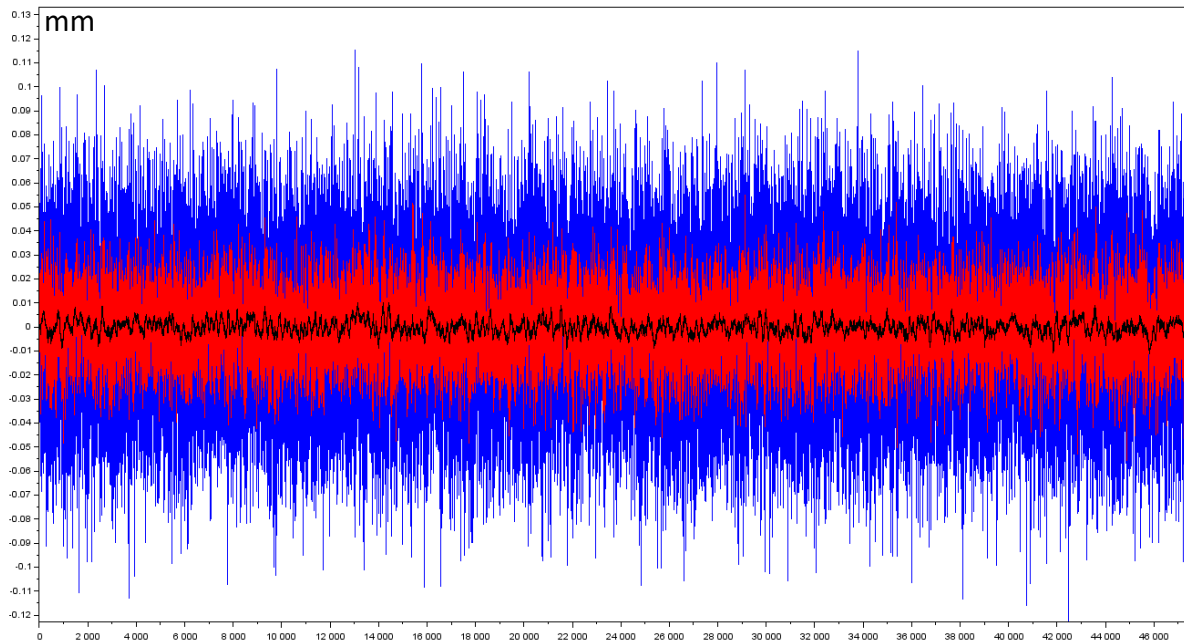
- Standardavvikelse (1σ): 0,03 mm
- Maximalt brus: 0,18 mm



Figur 5.22. Brus under mätning på ett stillastående föremål under 173 minuter.

Bruset kan, som sagt, minskas genom medeltalsbildning. Om standardavvikelsen enligt ovan (figur 5.22) är $\sigma=0,03$ mm och om man önskar minska den till $\sigma=0,003$ mm så kan antalet medeltalsberäkningar, n , härledas ur $s_1 = s_2/\sqrt{n}$ enligt $0,003 = 0,03/\sqrt{n}$. I detta fall blir $n=100$, det behövs sålunda göras en medeltalsbildning per 100 mätningar för att minska bruset med en faktor 10. I figur 5.23 har bruset simulerats, med motsvarande standardavvikelse som från mätta data i figur 5.22. Därefter har 5 och 100 medeltalsberäkningar gjorts för att visa hur brusfelet kan reduceras:

- Standardavvikelse (medeltalsberäkning för 60 mätningar): $\sigma=0,03$ mm
- Standardavvikelse (medeltalsberäkning för 300 mätningar): $\sigma=0,013$ mm
- Standardavvikelse (medeltalsberäkning för 6 000 mätningar): $\sigma=0,003$ mm

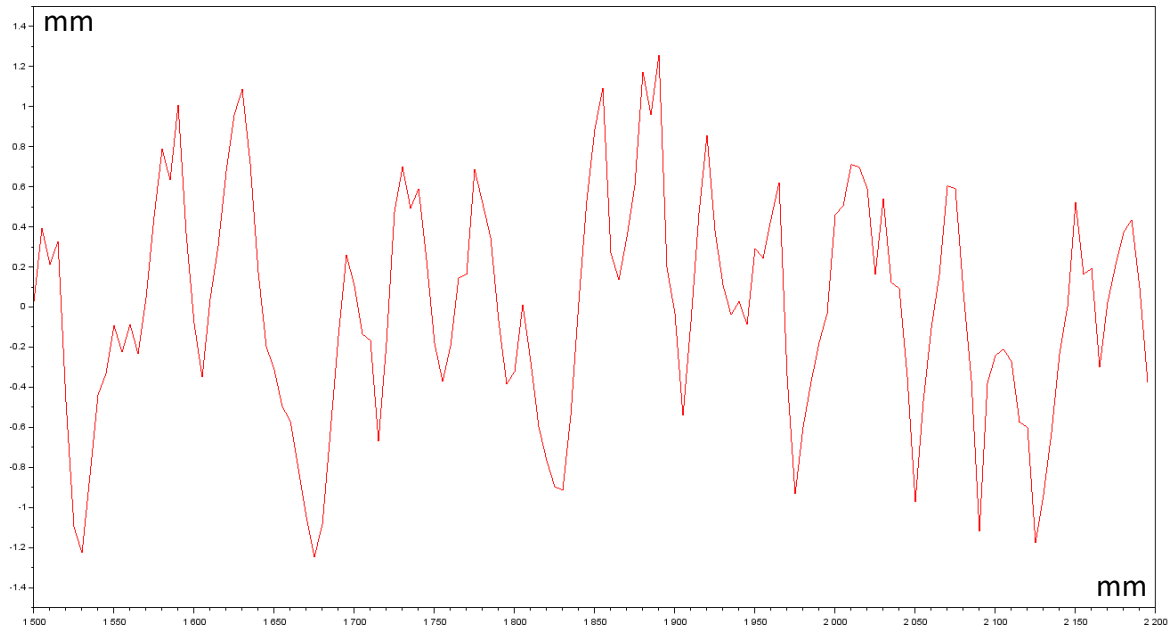


Figur 5.23. Simulerat brus från 60 mätningar (*blå*) ger $\sigma=0,03$ mm, 300 mätningar (*röd*) ger $\sigma=0,013$ och 6 000 mätningar (*svart*) ger $\sigma=0,003$.

5.14 Mätningar med modifierat radarsystem (RPU + frontend)

Inför konstruktion av en noggrannare radarsensor gjordes en temporär lösning där en extern A/D-konverterare applicerades på ett så kallade frontend-kort. Detta kort kopplades in mellan det gamla radarsystemet och antennerna. Denna lösning fick då fler A/D-nivåer, vilket skulle resultera i högre dynamik. Fasskifts-kretsen var densamma som tidigare med sitt jitter (och som inte heller kunde justeras). En förnyad uppmätning med den gamla radarsensorn och frontend-kortet gjordes. Referensmätning gjordes med magnetsensor enligt tidigare. Stålblåten förflyttades 1 500–2 200 mm. Figur 5.24 visar skillnaden mellan referensmätning och radarmätning. De systematiska felen kvarstår fortfarande, men jämfört med den gamla radarsensorn (utan frontend-kort, se figur 5.7) så är felen mindre. Resultatet från referensmätning:

- Standardavvikelse (1σ): 0,55 mm
- Maximalt fel: 1,26 mm

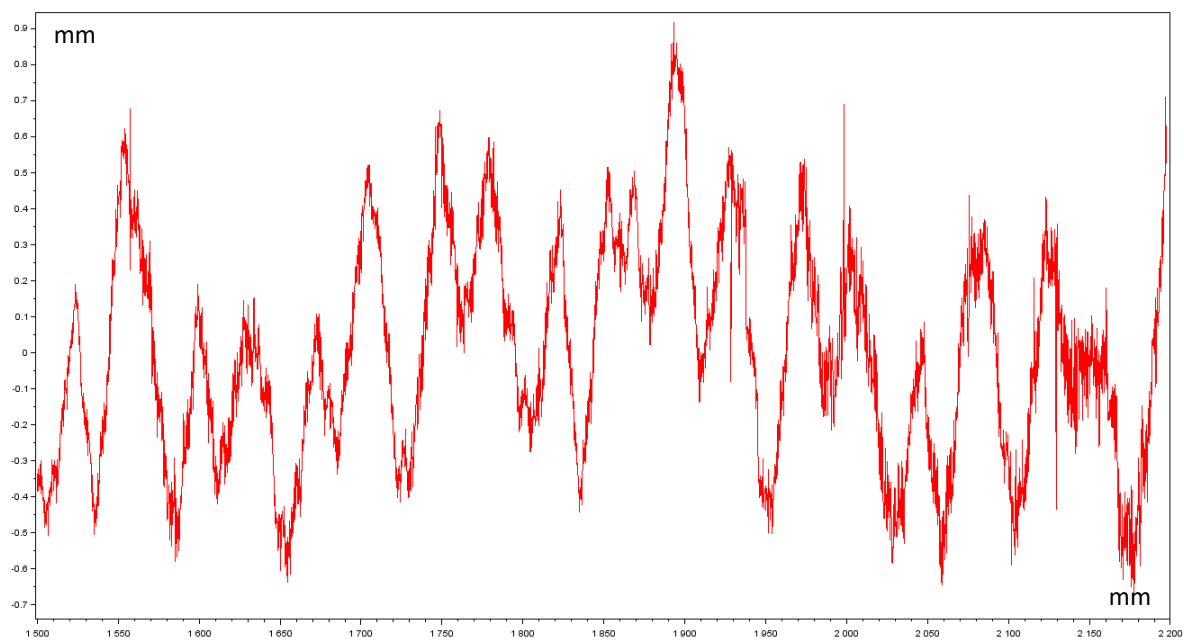


Figur 5.24. Felkurva vid mätning i radarläge med gammal sensor och frontend-kort (RPU+frontend).

5.15 Mätningar med nytt radarsystem (DiRP)

I detta projekt utvecklades ett nytt radarsystem för att matcha den noggrannhet som krävdes för bestämning av stålämnenas färdigrad. Tekniken från den temporära lösningen med extern A/D-konverterare och frontend-kort överfördes till ett eget elektronikkort. Samtidigt byttes fasskift-kretsen till en noggrannare krets. Denna fasskift-krets kunde också korrigeras för eventuella fel. En förnyad uppmätning med den nya radarsensorn gjordes. Referensmätning gjordes med magnetsensor enligt tidigare. Stålplåten förflyttades 1 500–2 200 mm. Figur 5.25 visar skillnaden mellan referensmätning och radarmätning. Det finns fortfarande systematiska fel, men jämfört med den gamla radarsensorn (med och utan frontend-kort, figur 5.7 och 5.24) så är felen mindre. Resultatet från referensmätning:

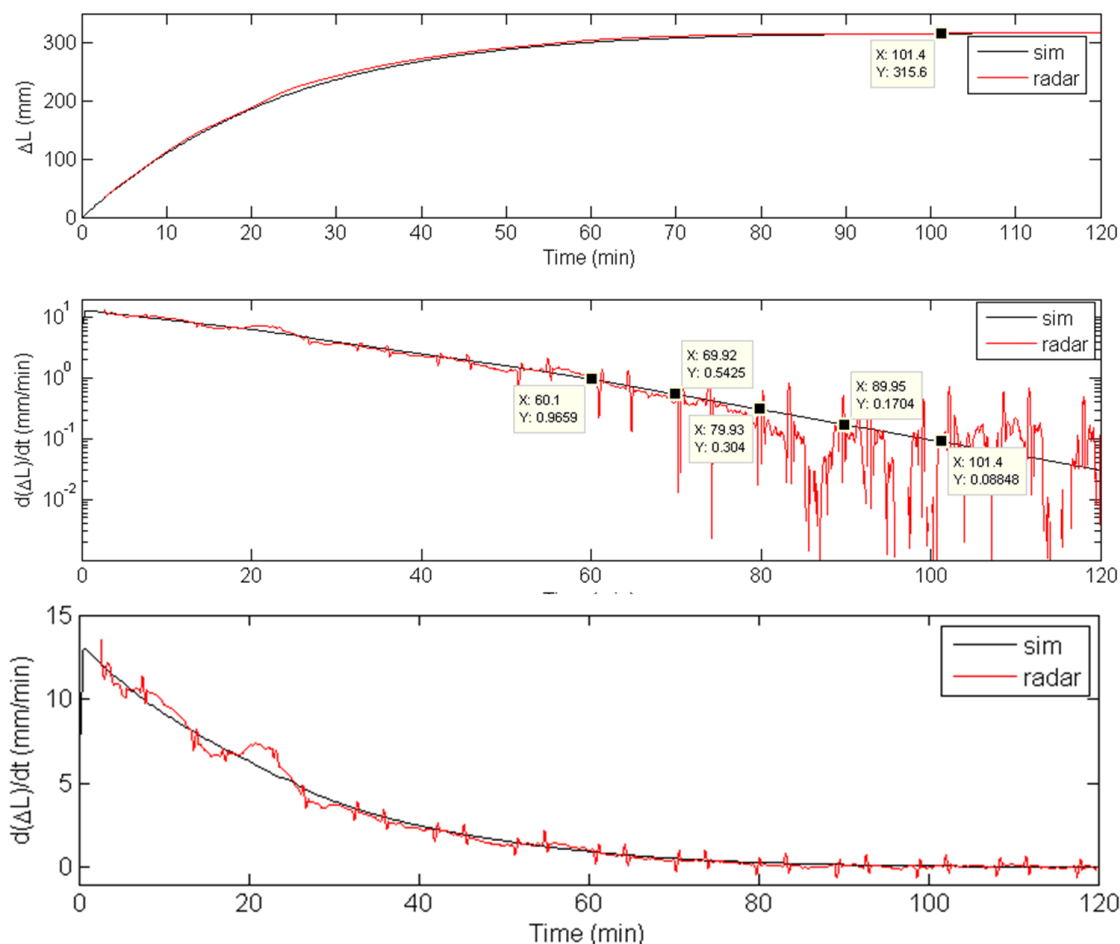
- Standardavvikelse (1σ): 0,30 mm
- Maximalt fel: 0,92 mm



Figur 5.25. Felkurva vid mätning i radarläge med ny sensor (DiRP).

6 Applicerbar noggrannhet

Målet med projektet var att nå en absolut noggrannhet på ± 1 mm. Det angavs inte om 1 sigma (1σ) eller 3 sigma (3σ) avsågs. Enligt figur 5.25 understiger det maximala felet uppsatt mål, vilket visar på att projektmålet har uppnåtts. Vid tidiga mätningar, i projektet, med den gamla radarsensorn på Sandviks Ugn62 kunde det systematiska felet ses som en undulation, se figur 6.1a. Det blir extra tydligt om utvidgningen räknas om till en utvidgningshastighet, se figur 6.1b-c. I en industriell miljö blir mätningarna från en sensor med låg dynamik ännu mer känsliga på grund av att omkringliggande sidomål (t.ex. stegbalkar) interfererar med radarsignalen. Under verkliga omständigheter är skillnaderna mellan figur 5.7 samt figurerna 5.24 och 5.25 ännu större.



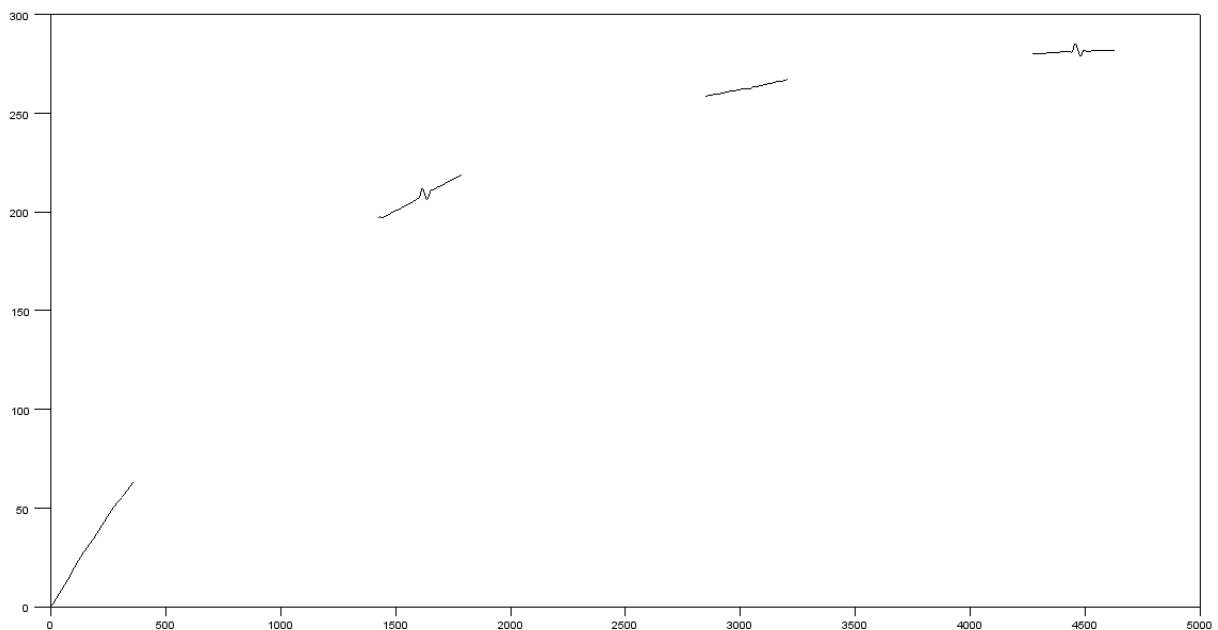
Figur 6.1. a) Mätt utvidgning och simulerad utvidgning. b) Logaritmisk utvidgningshastighet (estimerad mättnoggrannhet är 0,1 mm/min för ett 13,55 m långt stålämne). c) Utvidgningshastighet.

6.1 Absolut mätning, en utmaning

Grundtanken med projektet var att mäta initiallängden och mäta längdförändringen när stålämnet successivt matades fram och värmdes. Den absolut längdförändring skulle då ge temperaturen. Utmaningen i absolut mätning ligger i att:

- bestämma absolut initiallängd med hög noggrannhet,
- bestämma absolut initialtemperatur med hög noggrannhet,
- mäta absolut utvidgning med hög noggrannhet (max ± 1 mm).

Projektet insåg tidigt utmaningarna med absolut mätning. De största utmaningarna var framför allt bestämning av initialtemperatur och mätning av utvidgningen. Vid varmchargering har stålänns yta en lägre temperatur än kärnan och ger då en felaktig initial genomsnittstemperatur att utgå ifrån. Radarsensorerna är placerade bakom ugnsisolering (se figur 4.20), vars egenskaper varierar med ugnens temperatur. I och med att radarmätningarna inte görs kontinuerligt i en position, utan i flera diskreta mätpositioner, se figur 6.2, så måste även detta beaktas. När ugnens temperatur varierar (i olika värmezoner) så påverkar det isoleringens temperatur, vilket leder till att radarsignal går med olika hastighet. Dessutom skulle det vara mycket svårt att bygga exakt lika tjock isolering i alla mätpositioner.



Figur 6.2. Radarmätning i diskreta mätpositioner ("en streckad stig").

Slutsatsen är att absolut mätning med hög noggrannhet mycket utmanande. Problemet reduceras vid kallchargering av stålämnen eftersom temperaturen är konstant och att längden oftast kan mätas enklare. Även om isoleringens egenskaper till stor del skulle kunna reduceras med Saffil-fibern samt att initiala data (temperatur och längd) skulle kunna mätas med högre noggrannhet så kvarstår utmaningen med att kalibrera radarsystemet. Det finns ingen alternativ referensmetod för utvidgningsmätning och kalibrering av stålämnen i ugnar med utanpåliggande isolering.

6.2 Relativ mätning, lösningen

Under kort tid <10 min kan värmningsugnen betraktas som oförändrad och konstant. Även om temperaturen förändras i ugnen, exempelvis 50°C över 15–30 min, så tar det väsentligt längre tid innan temperaturen förändras i väggarna och i isoleringen. Vid normal dragningstakt ligger vanligtvis ett stålämne 3–8 min framför radarsensorn. Under denna korta tid har inte heller någon större avvikande förändring skett med stålämnet, t.ex. glödskalstillväxt.

Förutom att ugnen anses vara förändrad under en kort mätperiod så kan noggrannheten i en radarmätning, se figur 5.23, också förbättras om mätningen görs relativ. En relativ mätning innebär att en längdförändring (utvidgning) över tid mäts, vilket motsvarar utvidgningshastigheten. Enligt beräkningar av värmemodellen (se figur 6.1) så krävs en mät noggrannhet på 0,1 mm/min (läs vidare under stycke 8–9).

6.3 Relativ noggrannhet

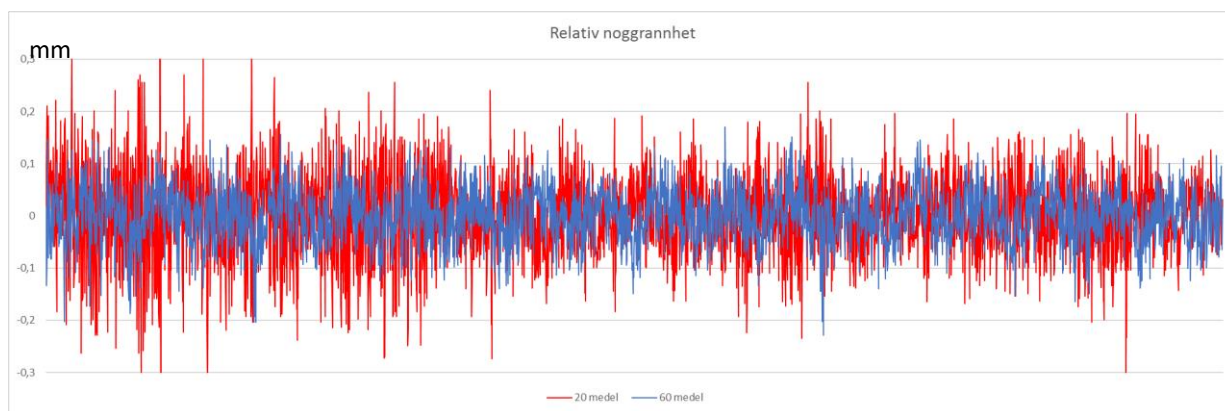
Figur 5.23 visar att det finns ett systematiskt fel som beror på fasskiftsfel. Dessa fel beror på att fasskift-kretsen har ett jitter på några enstaka picosekunder (10^{-12} s). I de flesta fall kommer utvidgningshastigheten att mätas under 3–8 minuter. En noggrannhet på 0,1 mm/min eftersträvas. Noggrannheten för utvidgningshastigheten påverkas av:

- Relativ mätnoggrannhet under mättiden (3–8 minuter)
- Beräkningsmetod av utvidgningshastigheten.

6.3.1 Mätnoggrannhet

Den absolut mätnoggrannheten i längdmätningen är enligt tidigare $\sigma=0,30$ mm ($3\sigma=0,90$ mm). Den relativa noggrannheten är ett uttryck för hur stort utvidgningsfelet är under mättiden. Utvidgningen är begränsad under mättiden till maximalt 3–8 mm (och maximalt 1 mm/min). I de flesta fallen understiger utvidgningshastigheten 0,5 mm/min, vilket motsvarar en maximal utvidgning på 1,5–4 mm under mättiden. De systematiska felen (som beror på fasskift-fel) återkommer med en frekvens om 37,5 mm (vid 2 GHz), vilket är ett avstånd som överstiger en normal utvidgningsmätning med 10–30 gånger. Därför är det intressant att analysera hur stort felet är om det beräknas för ett kort avstånd. Felet kommer sålunda bero på fasskift-fel och brus. Bruset kan elimineras genom många beräkningar och medeltalsbildning. Enligt figur 6.3 uppgår det mätta relativa längdfelet vid olika många medeltalsbildningar till:

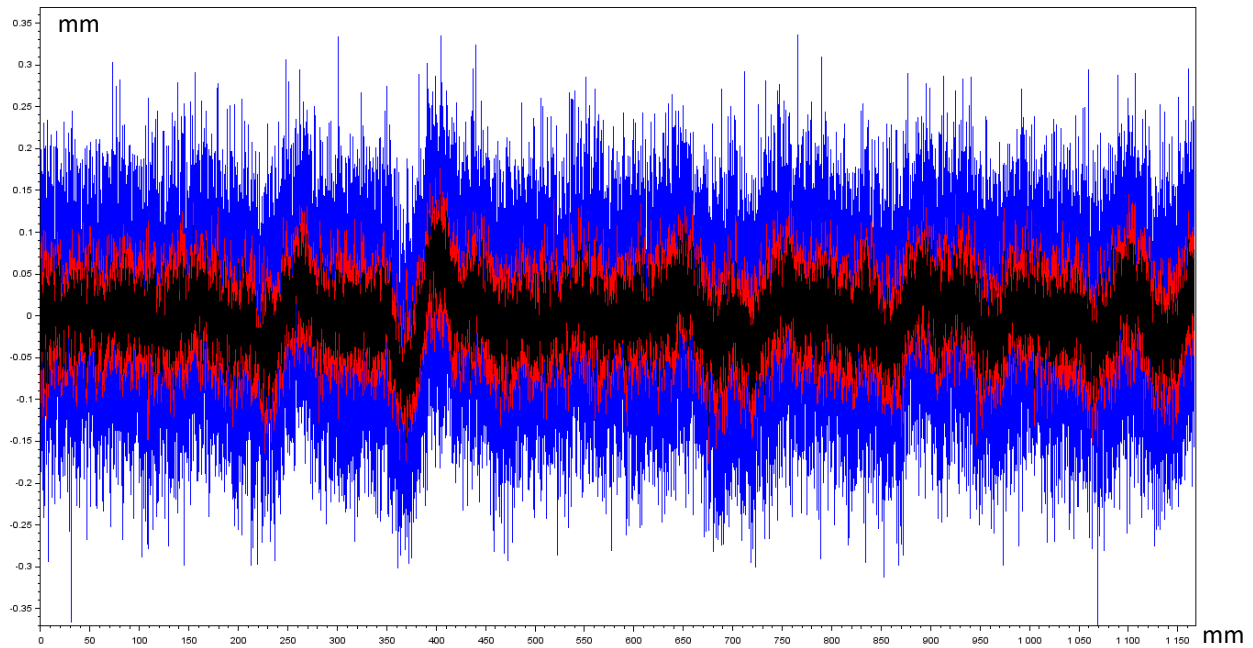
- 20 medel: $\sigma=0,08$ mm (röd)
- 60 medel: $\sigma=0,05$ mm (blå)



Figur 6.3. Mätta relativa fel vid olika medeltalsbildningar (röd=20 medel, blå=60 medel).

Det är fullt möjligt att i den verkliga situationen göra ca 100 mätningar och bilda ett medeltal för dessa mätningar under cirka en sekund. Därigenom kan bruset minska ytterligare. Om man simulerar det normalfördelade mätta bruset och fasskiftsfelen enligt figur 6.3 så kan standardavvikelsen (σ) för olika medeltalsbildningar beräknas till (se figur 6.4):

- 20 medel: $\sigma=0,081$ mm (brus), $\sigma=0,083$ mm (brus och fasskiftsfel)
- 60 medel: $\sigma=0,036$ mm (brus), $\sigma=0,041$ mm (brus och fasskiftsfel)
- 100 medel: $\sigma=0,025$ mm (brus), $\sigma=0,032$ mm (brus och fasskiftsfel)

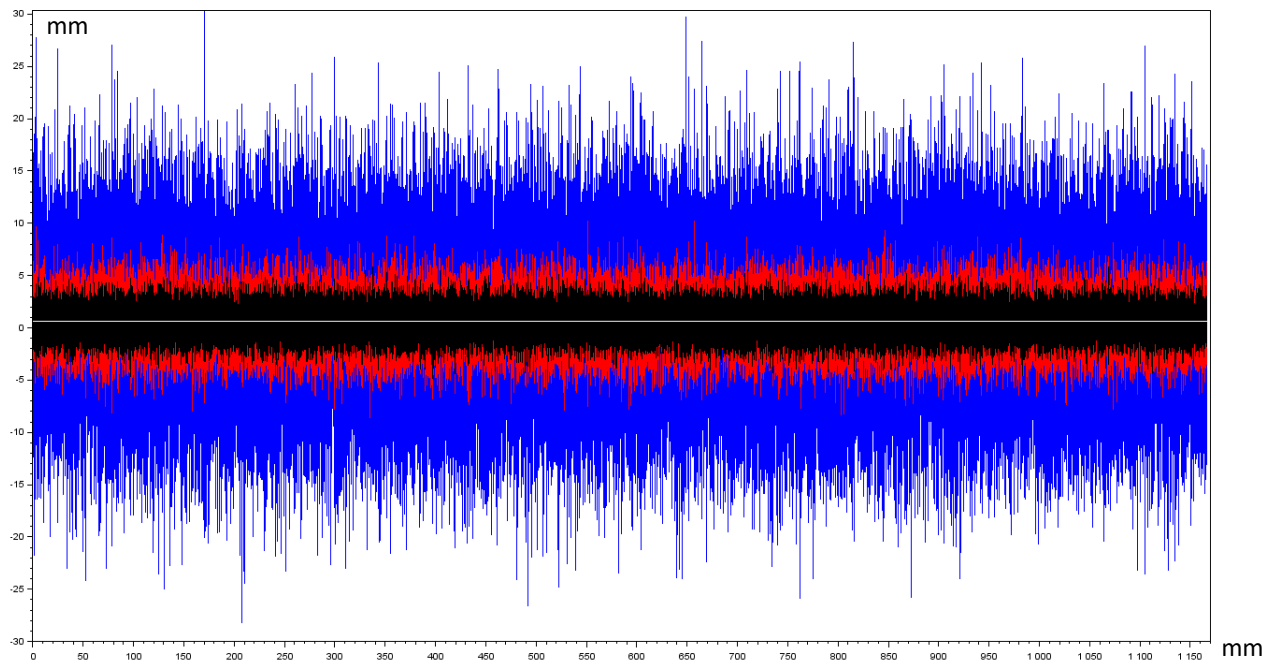


Figur 6.4. Simulerad relativa fel (brus och fasskiftsfel) vid olika medeltalsberäkningar (*blå*=20 medel, *röd*=60 medel, *svart*=100 medel).

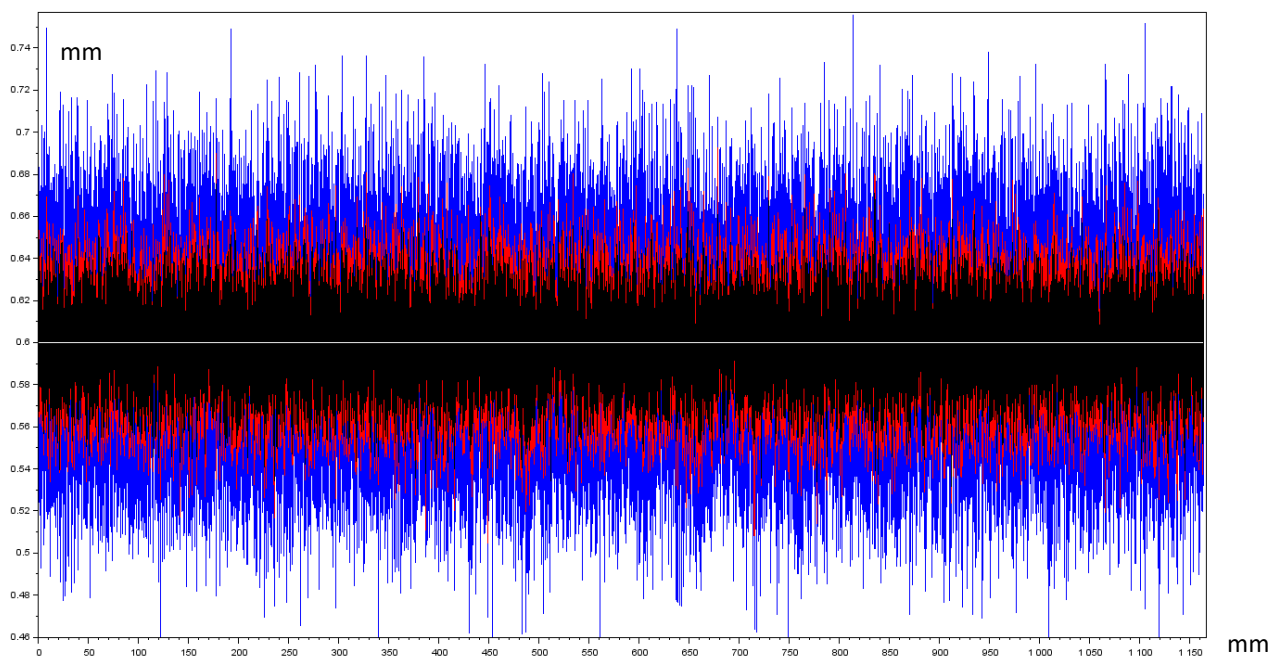
6.3.2 Beräkningsmetod

Utvidgningshastigheten skulle rent teoretiskt kunna mätas med en dopplerradar, där frekvensen ändras med hastigheten. Nu är hastigheten extremt låg (0,1 mm/min), vilket inte ger några betydande frekvensförändringar i en dopplermätning. Hastigheten måste sålunda beräknas utifrån utvidgningen (ΔL) och tiden (Δt). Bruset skapar hastiga variationer, varför diskret derivata (derivatan mellan två enskilda mätningar) kan vara problematisk, se figur 6.5. Medeltalet av de diskreta derivatorna under tre minuter ger ett representativt värde för utvidgningshastigheten, se figur 6.6:

- 20 medel: $\sigma=6,8$ mm/min (utan medel), $\sigma=0,038$ mm/min (med 3 minuters medel)
- 60 medel: $\sigma=1,4$ mm/min (utan medel), $\sigma=0,021$ mm/min (med 3 minuters medel)
- 100 medel: $\sigma=0,7$ mm/min (utan medel), $\sigma=0,017$ mm/min (med 3 minuters medel)



Figur 6.5. Simulerade utvidgningshastigheter beräknade från diskret derivata (blå=20 medel, röd=60 medel, svart=100 medel, vit=sann lutning 0,6 mm/min).



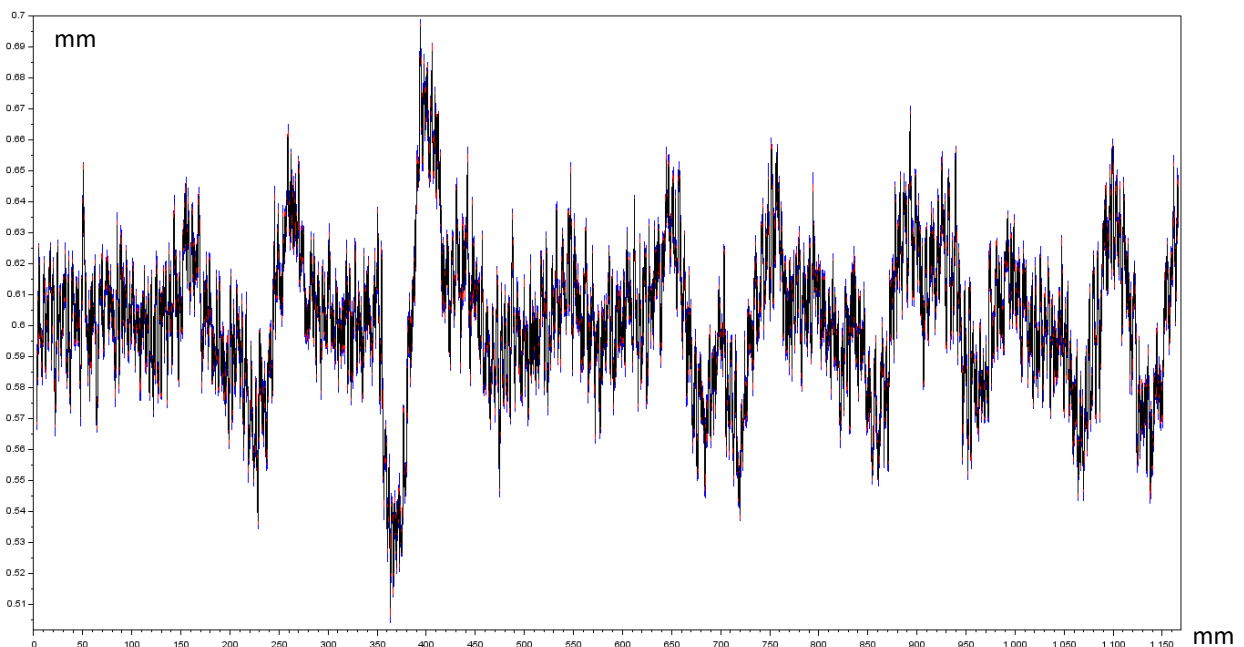
Figur 6.6. Simulerade utvidgningshastigheter beräknade från diskret derivata (blå=20 medel, röd=60 medel, svart=100 medel, vit=sann lutning 0,6 mm/min).

Ett annat sätt att bestämma utvidgningshastigheten är genom en minsta kvadratanpassning, exempelvis med linjär regression $y = a + b \cdot x$. Tidigt i ugnen är hastigheterna höga och snabbt avtagande, där kan en exponentiell ekvation vara att föredra $y = e^{a+b \cdot x}$. Observera att $\ln(y) = \ln(e^{a+b \cdot x}) = a + b \cdot x$, vilket kan vara ett fördelaktigt uttryck vid modellering av exponentiella funktioner. Det är inte speciellt vanligt att ägare till värmningsugnar vill modellera stålämnen som

precis lagts in i ugnen där utvidgningshastigheten är hög, varför linjär regression duger som en bra approximation.

I figur 6.7 har utvidgningshastigheten beräknats utifrån samma simulerade data som användes i figur 6.4. Den sanna simulerade utvidgningshastigheten var 0,6 mm/min och "mätningen" gjordes under 3 minuter. Utvidgningshastigheten störcdes dels av ett brus, dels av fasskiftsfel. Trots att bruset var förhållandevis stort så påverkade det knappt beräkningen av utvidgningshastigheten. Det beror till största delen på att bruset försvinner vid minsta kvadratutjämning av de 180 värdena (3 minuter multiplicerat med 60 sekunder). Den största inverkan hade fasskiftsfelen. Standardavvikelsen för utvidgningshastigheten för de olika brusnivåerna var:

- 20 medel: $\sigma=0,0233$ mm/min (brus och fasskiftsfel)
- 60 medel: $\sigma=0,0232$ mm/min (brus och fasskiftsfel)
- 100 medel: $\sigma=0,0231$ mm/min (brus och fasskiftsfel)



Figur 6.7. Simulerade utvidgningshastigheter beräknade med linjär regression över 3 minuter (röd=20 medel, blå=60 medel, svart=100 medel).

I en jämförelse mellan diskret derivata (se figur 6.6) och minsta kvadratanpassning (se figur 6.7) går det att notera väsentliga skillnader. I båda fallen krävs 50–100 mätningar för att erhålla ett tillförlitligt värde och standardavvikelsen blir ungefär 0,02 mm/min i båda fallen. I och med att den diskreta derivatan endast beräknar hastigheten mellan två intilliggande mätningar så blir den mindre känslig för fasskiftsfelen än minsta kvadratanpassningen. Samtidigt är den diskreta derivatan mer känslig för brus, vilket innebär att den kräver fler mätningar innan den har stabiliserats. Den diskreta derivatan kommer i princip att beräkna genomsnittshastigheten över ett tidsspänn medan minsta kvadratanpassningen kan ge en hastighet vid en specifik tidpunkt.

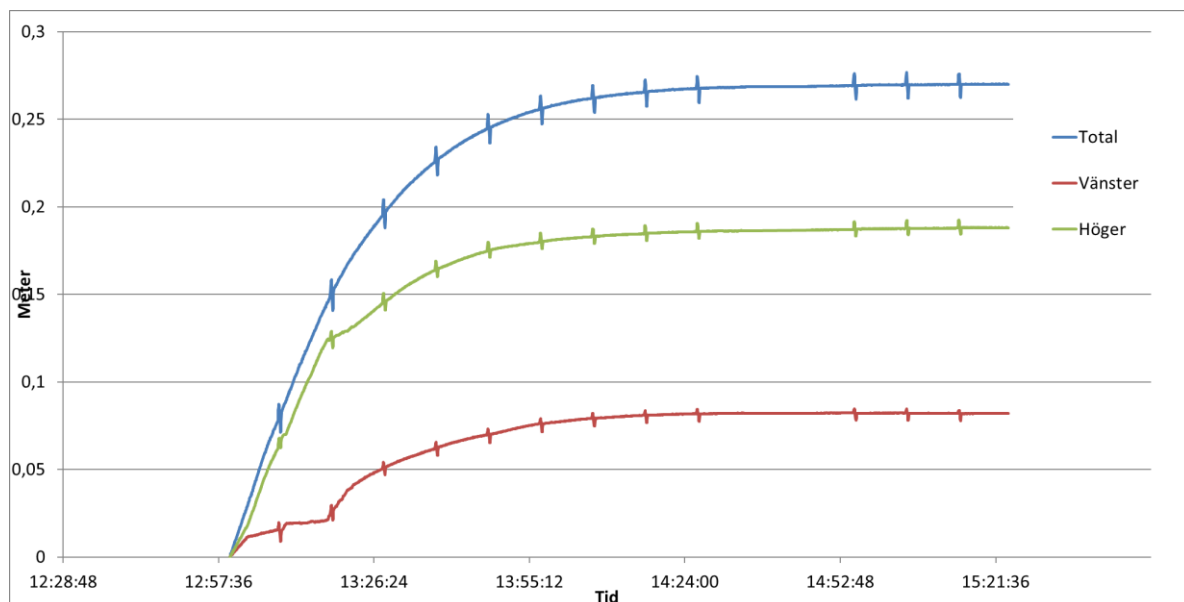
6.4 Mätning i ugn på stålämne

Mätning i laboratorium och simulering torde ge en högre noggrannhet än mätning på ett riktigt stålämne i en ugn. Det går naturligtvis inte helt att verifiera stålämnets utvidgning eller om något

hastigt sker, exempelvis glödsbortfall eller -tillväxt. Den 30 augusti 2016 genomfördes ett försök på ett stillaliggande stålämne under värmning, se figur 6.8–9. Vid mättillfället hade den keramiska ugnsinfordringen ersatts med fiberisolering (Saffil). Mätutrustningen var ett äldre radarsystem med frontend (RPU + frontend), vilket i princip ska ha lika hög noggrannhet som det nya radarsystemet (DiRP). Mätningarna visar vikten vid att mäta från båda sidorna, då friktion och uppböjning skapar olika utvidgning på respektive sida men att den sammanlagda utvidgningen är korrekt. De hastiga rörelserna, som ser ut som spikar i grafen, motsvarar lyften av stålämnena med avsikt att minska friktionen. Radarmätningar blir då både kortare och längre under lyftet.



Figur 6.8. Mätuppställning (sett ovanifrån) med två sensorer, isolering och stålämne.



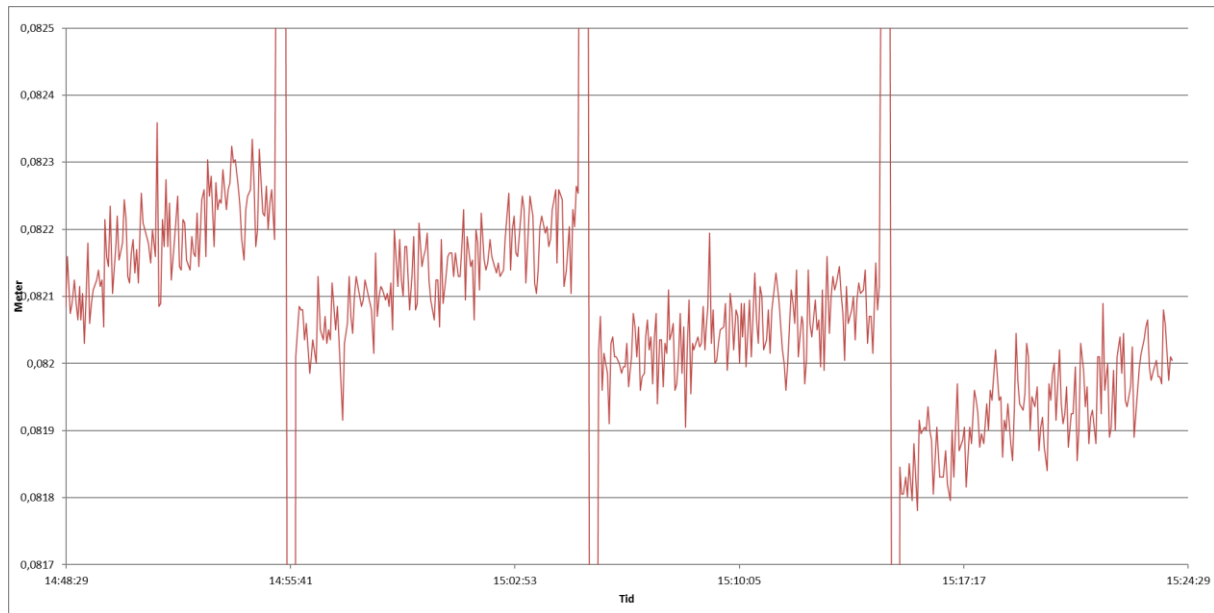
Figur 6.9. Utvidgningsmätning under ca 2,5 timmar.

Enligt figur 6.4 är den uppskattade standardavvikelsen $\sigma=0,03$ mm vid 100 simulerade mätningar och medeltalsbildning av dessa. Detta värde mättes och beräknades under ideala förhållande, nämligen i ett laboratorium genom mätning på en distinkt stålplåtskant. Vid utvidgningsmätning sker mätning från två håll (vänster och höger enligt figur 6.9). Den sammanlagda uppskattade standardavvikelsen ska då under optimala förhållanden vara $s_{total} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$, vilket blir $\sigma_{total}=0,042$ mm.

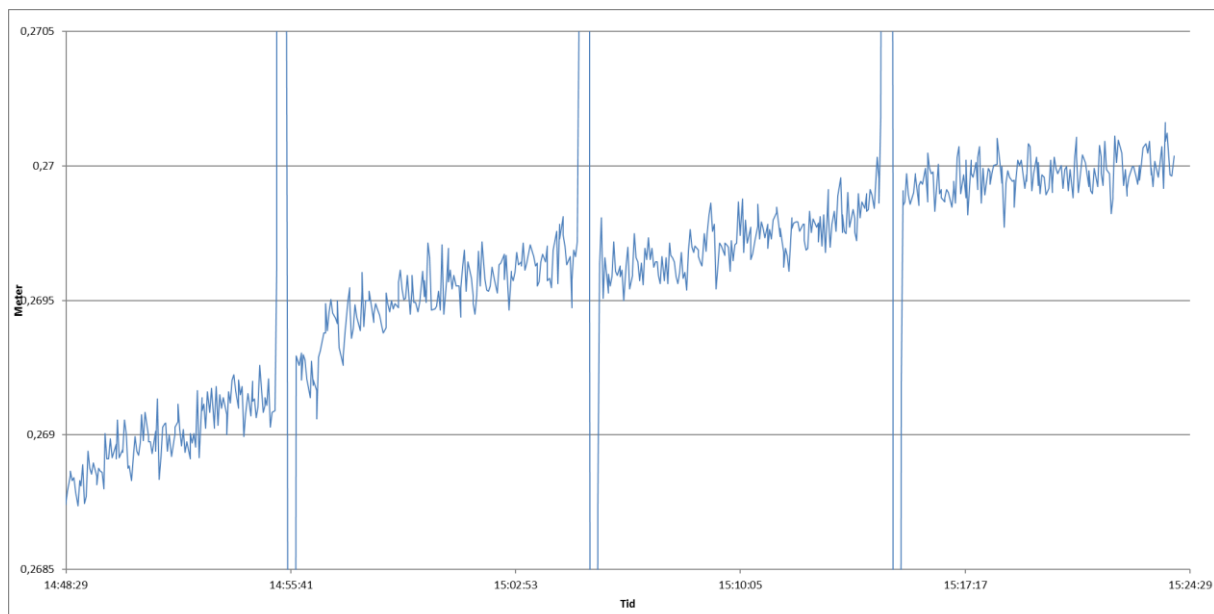
Mätnoggrannheten i en verklig ugnsmätning torde vara lägre än på ett laboratorium eftersom både värmen, isoleringen och mätobjektet torde påverka mätningen till det sämre. Enligt figur 6.9 finns så kallade "joggingar" och hastigheten sjunker ju längre försöket pågår. Därför är det inte helt trivialt att jämföra en verklig mätning med en laboratoriemätning. I laboratoriemätningen är det svårt att åstadkomma en så låg hastighet som i verkligheten. För att göra jämförelsen så lika som möjligt så jämfördes simuleringar och mätningar när stålämnet nästan hade utvidgat sig färdigt. Då torde endast bruset finnas kvar. Den mest jämförbara simuleringen återfinns i figur 5.23 där standardavvikelsen $\sigma=0,013$ mm (den sammanlagda dubbelsidiga uppskattade standardavvikelsen är $\sigma_{total}=0,018$ mm). I och med att ingen rörelse medtogs i denna jämförelse så har inte heller

fasskiftsfelet beaktats. Fasskiftsfelet bidrar med ytterligare 0,017 mm ($0,03 - 0,013 = 0,017$) och ger det totala felet $\sigma_{\text{total}} = 0,024$ mm enligt medelfelets fortplantningslag. Vid beräkning av standardavvikelsen när ämnet inte längre utvidgar sig erhöles följande värden, se figur 6.10–11:

- Vänster: $\sigma = 0,053$ mm
- Höger: $\sigma = 0,046$ mm
- Total: $\sigma = 0,067$ mm



Figur 6.10. Utvidgningsmätning från vänster sida. Notera stålämnet förflyttas något mellan varje "jogging". Avståndet mellan varje streck på y-axeln är 0,1 mm.



Figur 6.11. Utvidgningsmätning, totalt från både mätning från höger och vänster sida. Avståndet mellan varje streck på y-axeln är 0,5 mm.

Det går att konstatera att det verkliga brusfelet vid mätning i ugn är 3–4 gånger högre än på i laboratoriet, vilket är inom rimlighetens gränser. Om man därtill lägger fasskiftsfelet till den totala verkliga mättnoggrannhet erhålls $\sigma_{\text{total}}=0,08\text{--}0,09$ mm (brus och fasskiftsfel). Denna mätning gjordes med ett radarsystem som troligtvis har något sämre mättnoggrannhet än det nya radarsystemet (DiRP). Slutsatsen är att radarsystemet har en relativ mättnoggrannhet som är $<0,1$ mm (1σ). Det innebär att en utvidgningshastighet där utvidgningen mäts under 3 minuter har ett fel på $\sigma<0,03$ mm/min eller $3\sigma<0,09$ mm/min. Detta matchar det krav värmemodellen har på radarmätningarna, vilket beskrivs under stycke 8–9.

7 Radaravbildning, syntetisk aperturradar

Grundtanken med radaravbildning av stålämnen var att ha möjligheten att korrigera utvidgningsmätningarna, som mäts i vanligt radarläge, ifall stålämnena inte låg helt rakt framför radarsensorn. En radarmätning har ingen riktning utan bara ett avstånd. Därutöver fanns också tanken att kunna avbilda stålämnena från sidan för att presentera en "topografisk karta" av ugnsinnehållet. Radaravbildning avser i detta sammanhang syntetisk aperturradar (SAR), vilken är en typ av radaravbildning där ett flertal radarsignaler sammanställs för att producera en radarbild. Antingen så registreras radarsignalerna av en antenn som flyttas i sidled mellan varje mätning eller av flera separata fasta antenner.

Namnet syntetisk apertur syftar till att, med signalbehandlingsalgoritmer, syntetiskt skapa en stor apertur (bländaröppning), eller att skapa en långsträckt stor antenn. Upplösningen i en SAR-bild ges av dimensionen av den syntetiska antennens storlek (baslängd och avstånd till mål) och våglängden. Upplösningen kan uttryckas såsom, se tabell 7.1:

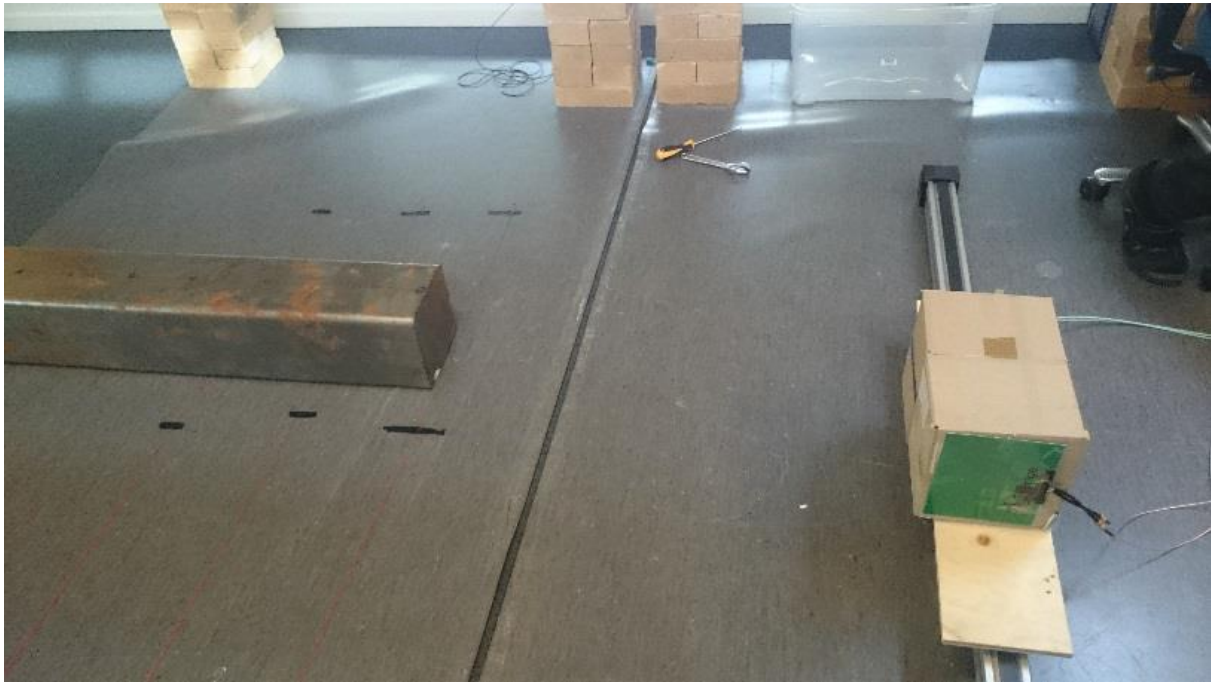
$$\text{upplösning} = \frac{\text{våglängd}}{2 \cdot \text{aperturvinkel}}$$

Tabell 7.1. Upplösning i meter vid olika baslängder (rader) och mätavstånd (kolumner) vid 3 GHz.

	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
0,25	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
0,5	0,03	0,05	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20
0,75	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13
1	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10

7.1 Tät eller gles array

SAR-bilder genereras oftast från radarmätningar gjorda från en flygplattform eller en satellit. Tillämpningarna är inte sällan militära tack vare att radarbilderna kan se igenom grenverk, men även ner under mark om frekvensen är den rätta. Vid en kontinuerlig rörelse, exempelvis med flygplan eller satellit, skapas en tät array av mätningar i förhållande till mätavståndet och baslinjen. Sker mätningarna från glest placerade fixa punkter skapas en gles array. På marken kan en radarsensor förflyttas med exempelvis en linjärenhet, viken skapar en tät array, se figur 7.1. Det är inte helt okomplicerat att placera linjärenheter i industriella miljöer. Det är ofta varmt (>100°C), fuktigt och partikeltäta miljöer. Det kan också vara trångt på exempelvis en värmningsugn eftersom det finns luckor, brännare och andra anordningar placerade på ugnen. Därför kan radarantennerna på en värmningsugn placeras såsom en gles array med fixa avstånd, se figur 7.2.



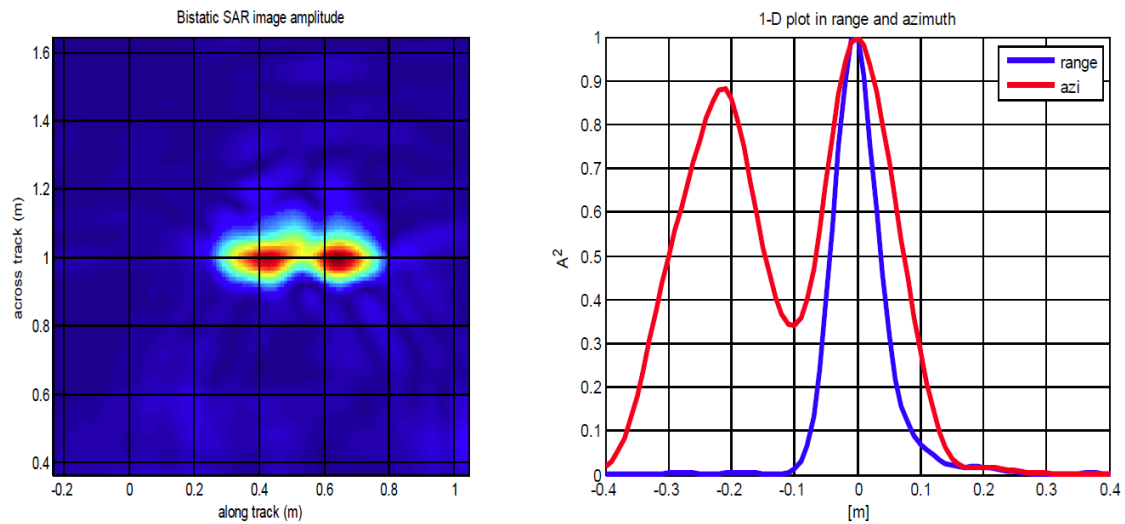
Figur 7.1. Tätt array med två rörliga antenner på linjärenhet.



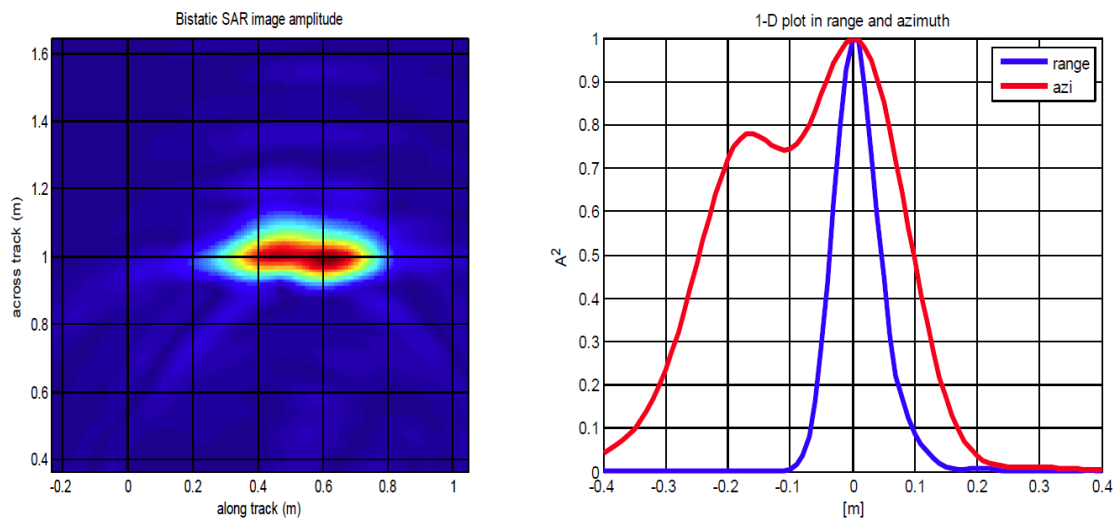
Figur 7.2. Gles array med sex fixerade antenner på en pappskiva.

7.2 Storlek på apertur och SAR-upplösning

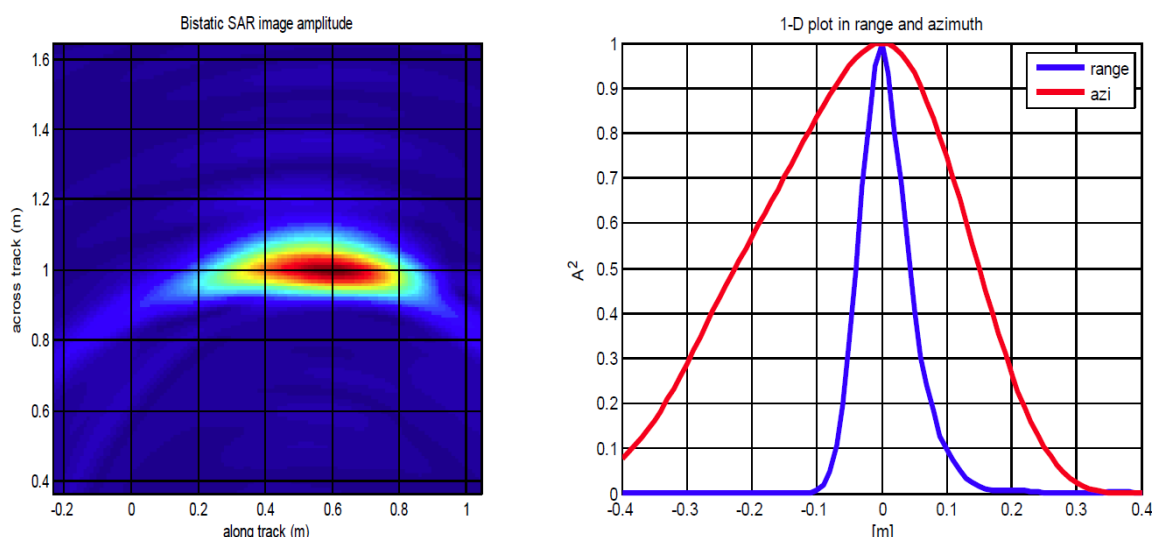
För att undersöka upplösningen i tvärled genomfördes mätningar på två stålämnen. Nu var den fulla aperturen 165 cm. Stålämnena är tillräckligt väl upplösta när hela aperturen används, se figur 7.3a. Det tillgängliga utrymmet på ugnsväggen är dock begränsat till maximalt 40 cm. Med kortare apertur försämrar upplösningen i tvärled. Vidare är dessa mätdata av orealistiskt hög kvalitet, jämfört med ugnsmätningar, då vägg och andra störningar saknas. I figur 7.3b är aperturlängden 56 cm. Stålämnena flyter samman i bilden, men det går att separera dem i tvärled (skillnaden mellan topp och dal bör nog ligga på 0,5 för att åstadkomma ett bra beslutssystem). Med ännu kortare aperturlängd (28 cm) blir det omöjligt att separera stålämnena, se figur 7.3c.



Figur 7.3. a) Resultat från mätning av två stålämnen. Hela aperturen används (165 cm). Utsnittet i avståndsled (blå) och tvärled (röd) tas genom maxamplitud i SAR-bilden.



Figur 7.3. b) Resultat från mätning av två stålämnen. Del av hela aperturen används (56 cm). Utsnittet i avståndsled (blå) och tvärled (röd) tas genom maxamplitud i SAR-bilden.

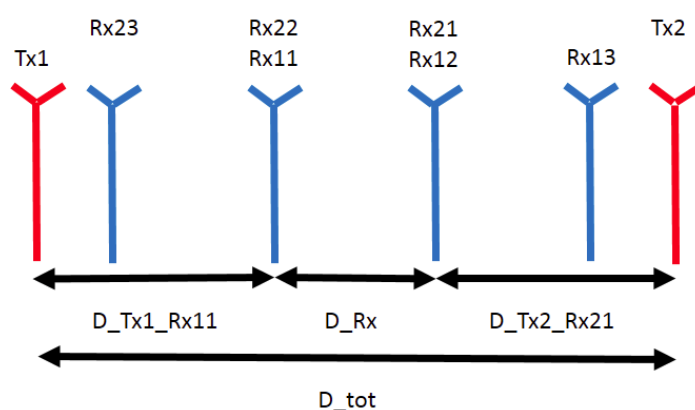


Figur 7.3. c) Resultat från mätning av två stålämnen. Del av hela aperturen används (28 cm). Utsnittet i avståndsled (blå) och tvärlä (röd) tas genom maxamplitud i SAR-bilden.

7.3 Gles array och SAR-upplösning

Det tillgängliga fysiska utrymmet på ugnen tillåter inte en tillräckligt lång SAR-apertur för att kunna göra en högupplöst avbildning, där två stålämnen kan urskiljas från varandra i tvärlä. Det är inte heller trivialt att (med hög positionsnoggrannhet) flytta antennerna längs med ugnsväggen. För att kunna göra en bra SAR-avbildning så skulle stålämnenas förflyttning kunna användas istället. Antalet antenner måste då ökas så att stålämnenas får tillräckligt hög upplösning i tvärlä.

Ett exempel på en array-antennlösning med två sändarantennerna och fyra mottagarantennerna visas i figur 7.4. Gemensamma mottagarelement möjliggör en kompakt array. De två sändarantennerna har tre mottagarelement var. Totalt har arrayen fyra mottagarantennerna, varav två är gemensamma för de två sändarantennerna. Arrayens totala längd är $D_{\text{tot}} = 40$ cm. Avståndet mellan sändarantenn och första mottagarantenn är $D_{\text{Tx1_Rx11}} = D_{\text{Tx2_Rx21}} = 15$ cm. Avstånden mellan mottagarantennerna är $D_{\text{Rx}} = 10$ cm.

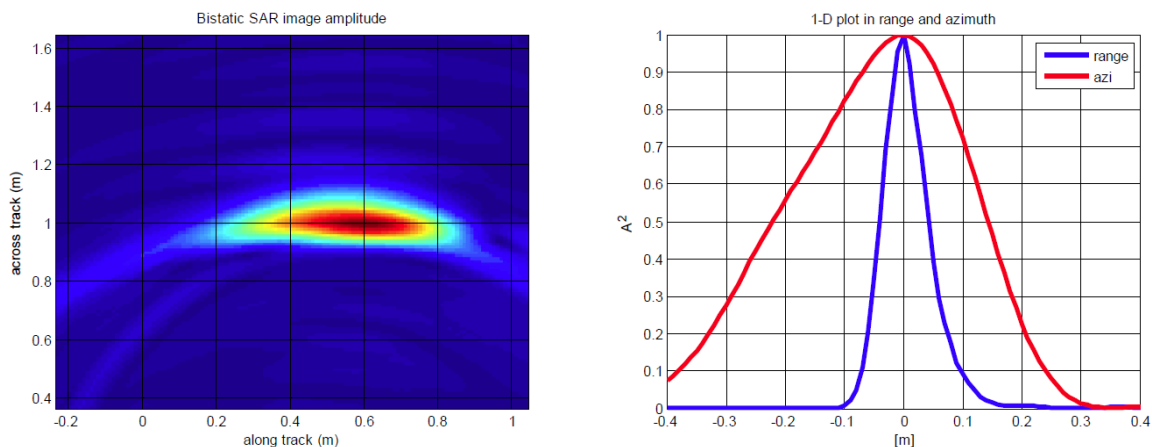


Figur 7.4. Array-antennlösning med fyra mottagare- och två sändarantennerna.

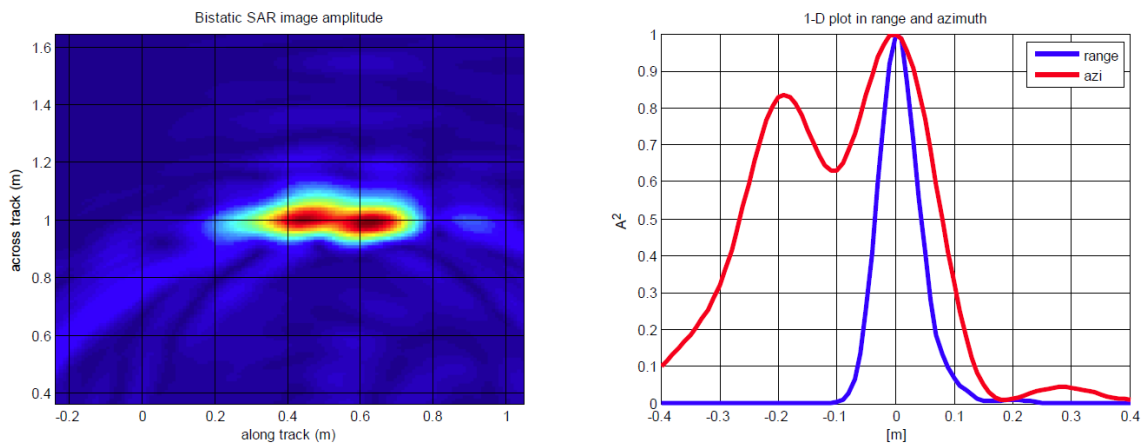
Om stålämnenas förflyttning utnyttjas kan stålämnet mätas ur flera vinklar och positioner. Avbildningsmetoden när antennerna är stationära och målet flyttar på sig kallas ISAR (invers syntetisk aperturradar). I en stegbalksugn lyfts stålämnen upp, flyttas i sidled, och sänks ned igen. Varje

stegbalksförflyttning är väl definierad. Steglängden i simuleringen var 340 mm. Det vinkelräta avståndet från antennerna till stålämnena var 1 m. Tre olika mätningar är simulerade:

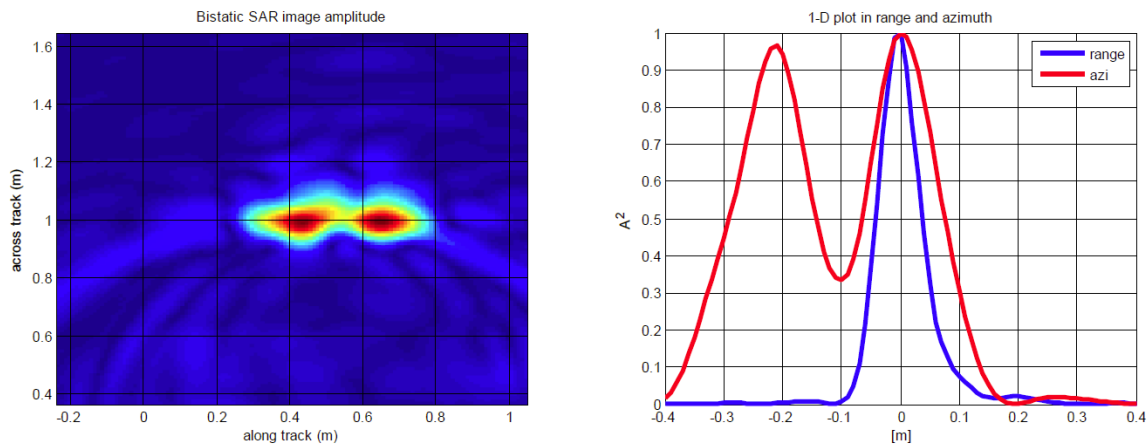
1. Figur 7.5a visar när stålämnet ligger stilla (ingen stegbalksförflyttning). Det går inte att skilja de två stålämnena åt.
2. Figur 7.5b-c visar när stålämnena flyttas ett respektive två steg, och därmed kan belysas i två respektive tre positioner. Därigenom förbättras upplösningen i tvärled. Det går att se stålämnet i minst tre olika positioner med en stationär antenn utan att signalen blir för svag.



Figur 7.5. a) Resultat från mätning av två stålämnena. Simulerad arrayantenn utan stegbalksförflyttning.



Figur 7.5. b) Resultat från mätning av två stålämnena. Simulerad arrayantenn med en stegbalksförflyttning om 340 mm.

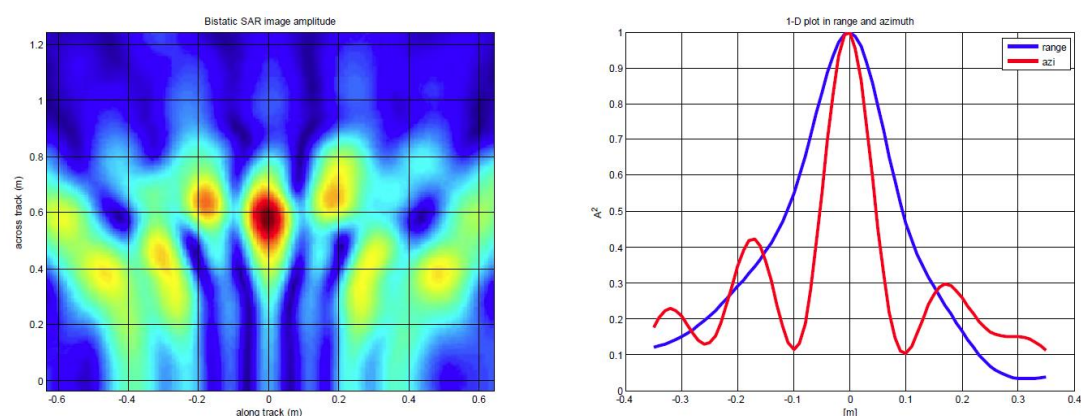


Figur 7.5. c) Resultat från mätning av två stålämnen. Simulerad arrayantenn med två stegbalksförflyttningar om 680 mm.

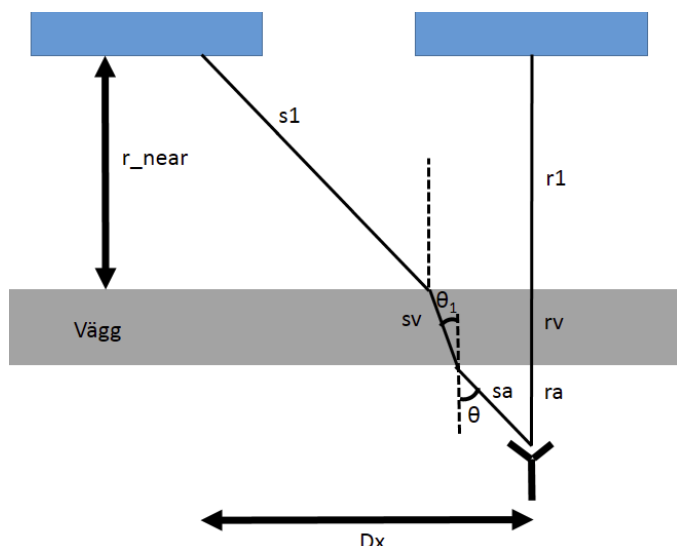
7.4 Gles array på ugn62

Mätningarna i figur 7.3 och 7.5 genomfördes i labbmiljö utan väggisolering. För att ge ökad förståelse för hur riktiga mätningar kan se ut mättes förflyttning och utvidgning på ett stålämne i Ugn62 hos Sandvik. I ugnsmätningarna använde Radarbolaget den befintliga radarenheten med en sändarantenn och en mottagarantenn, dvs. inte så många antenner som i simuleringarna ovan.

Mätningarna utfördes på ett stålämne som flyttades mellan fyra stegbalkspositioner (position 4, 5, 6 och 7). Vid varje förflyttning flyttades stålämnet 340 mm. Stålämnets dimension var 204 x 204 x 13 897 mm. Avståndet från insidan av ugnsväggen till stålämnet var 460 mm. Ugnsväggens tjocklek var 430 mm med en dielektricitetskonstant på ca 3,8. Radarsensorn satt mitt för position 5. För varje stegbalksposition gjordes 60–80 mätningar som i analysen medelvärdesbildades. Radarsignalerna från tre positioner användes sedan för att skapa en SAR-bild, se figur 7.6. Kompensation för fördröjning och brytning i väggmaterialet har beaktats, se figur 7.7. Kompensationen medför att målet fokuseras med en tidsfördröjning, som motsvarar det faktiska avståndet. Stålämnet avbildas tydligt i SAR-bilden, men jämfört med simuleringens resultat och resultat från labbmätningar är sidlobsnivåerna högre. Dock är målet väl synligt och detekterbart.



Figur 7.6. Resultat från mätning av ett stålämne på ugn62 från tre positioner.



Figur 7.7. Modell för utbredning genom vägg.

7.5 Möjlig implementering

SAR-avbildning har en stor potential att göra den endimensionella radarsignalen begriplig. I och med att en vanlig radarsignal inte har en riktning kan den vara svårtolkad. I många fall finns dock målobjektet närmast radarsensorn, vilket underlättar mätningen och tolkningen väsentligt. Radarbolaget och FOI har kommit fram till tre tänkbara lösningar:

- Scanning av sensorer på ugn med linjärenhet. Detta ger bäst resultat, men kan vara svår att installera.
- Gles array med flera sensorer på ugn. Detta är den mest robusta lösningen, men upplösning blir begränsad.
- Gles array med få eller flera sensorer för scanning med hjälp av stegbalksförflyttning. Denna lösning kan ge lika gott resultat som förflyttning med linjärenhet, men det kan vara svårt att erhålla exakta positionsdata från stegbalkarna.

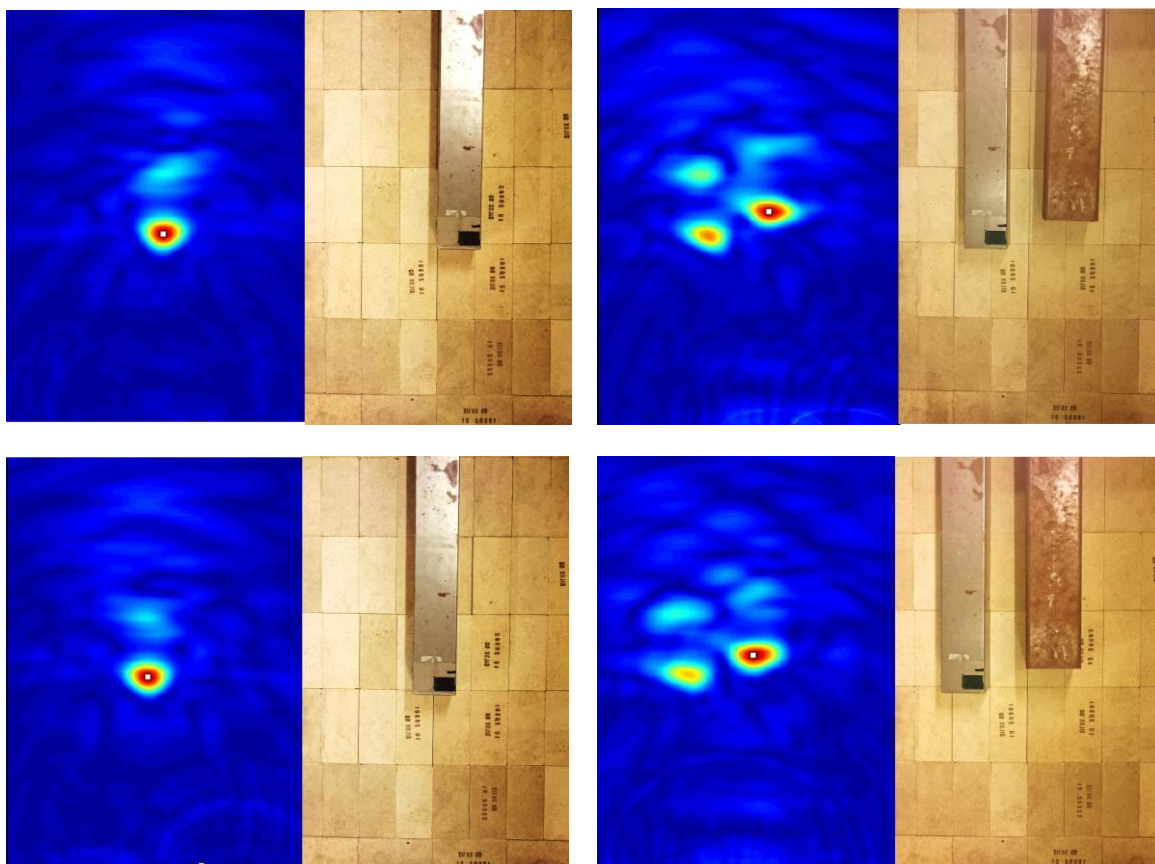
Vid ett labbförsök användes en linjärenhet varpå en sändarantenn och en mottagarantenn placerades 400 mm ifrån varandra. Ett ensamt stålämne låg 800 mm från radarsensorn och två stålämnen låg 800 respektive 900 mm från radarsensorn. Stålämnena förflyttades i steg om 75 respektive 50 mm i sidled. Linjärenheten med antennerna förflyttades kontinuerligt i sidled längs en total sträcka på 900 mm, se figur 7.8. Enligt SAR-beräkningar förflyttades stålämnena enligt tabell 7.2. Om avståndet till ämnet beräknas utifrån sidledes förskjutning (SAR-sidled) och mätt diagonalt mått (radarlängd) så blir avvikelserna i avstånd $-0,2 - +1,5$ mm. Det är dock den relativa längdförändringen (för beräkning av utvidgningshastigheten) som ska användas för korrektion av värmemodellen. Om stålämnet exempelvis utvidgas 2 mm (enligt tabell 7.3) så blir felet för den relativa längdförändringen maximalt $-3,7 \mu\text{m}$, vilket är att betrakta som försumbart i dessa sammanhang.

Tabell 7.2. SAR-beräkningar av ett enskilt stålämne och två stålämnerna i par (mm). *) Position avser stort ämne till höger.

	Känd position	X (SAR-sidled)	Y (SAR-avstånd)	Beräknad position	Differens avstånd
Ett ämne	(92, 800)	84,7	806,8	(84,7; 800,8)	0,8
	(17, 800)	28,6	810,1	(28,6; 799,7)	-0,3
	(-58, 800)	-47,5	803,5	(-47,5; 800,7)	0,7
	(-133, 800)	-123,6	810,1	(-123,6; 801,5)	1,5
Två ämnen*)	(100, 900)	105,7	912,6	(105,7; 899,3)	-0,7
	(50, 900)	52,8	896,1	(52,8; 899,8)	-0,2

Tabell 7.3. SAR-beräkningar av ett enskilt stålämne och två stålämnerna i par efter 2 mm utvidgning (mm). *) Position avser stort ämne till höger.

	Känd position	X (SAR-sidled)	Y (SAR-avstånd)	Beräknad position	Differens längd-utvidgning
Ett ämne	(92, 802)	84,7	806,8	(84,7; 802,8)	-2,0 µm
	(17, 802)	28,6	810,1	(28,6; 801,7)	0,8 µm
	(-58, 802)	-47,5	803,5	(-47,5; 802,7)	-1,7 µm
	(-133, 802)	-123,6	810,1	(-123,6; 803,5)	-3,7 µm
Två ämnen*)	(100, 902)	105,7	912,6	(105,7; 901,3)	1,4 µm
	(50, 902)	52,8	896,1	(52,8; 901,8)	0,4 µm



Figur 7.8. a-b) Förflyttning och SAR-avbildning av ett enskilt ämne 50 mm. c-d) Förflyttning och SAR-avbildning av två ämnen 50 mm.

SAR kräver en installation som är komplicerad och dyr. Därför är det inte rimligt att i ett första skede installera SAR-avbildning för eventuell kompensation av felaktiga längdmätningar. Radarmätningarna måste sålunda förlita sig på produktionsdata, dvs. att produktionsdatabasen kan beskriva ämnets position i förhållande till radarsensorn. Detta kräver också att radarsensorerna är väl inmätta förhållande till de stegbalkspositioner som används.

Dessutom går det att konstatera, då projektet valde att använda utvidgningshastighet framför absolut längdförändring, att SAR inte behövs i samma omfattning som det var tänkt från början. Tabell 7.3 redovisar utvidgningshastigheter för olika teoretiska hastigheter ("faktisk") och hastigheter utifrån icke kompenserat snett mått ("mätt") vid 0–250 mm förskjutning. "Mätningen" gjordes under fiktiva 3 minuter. Den största skillnaden i "mätt" utvidgningshastighet jämfört med "faktisk" hastighet är vid 1 mm/min och 250 mm förskjutning, då är skillnaden maximalt 46 $\mu\text{m}/\text{min}$ (ungefär hälften av de kravställda 0,1 mm/min). Vid 100 mm förskjutning är felen 2–8 $\mu\text{m}/\text{min}$, vilket är helt försumbart, men vid förskjutningar över 150 mm och vid höga hastigheter (tidigt i ugnen) bör kompensation övervägas. Detta är en konsekvens av att ena kateten är så pass mycket längre än den andra, vilket gör att den längsta kateten och hypotenusan förändras ungefär lika mycket vid små förändringar (1–3 mm).

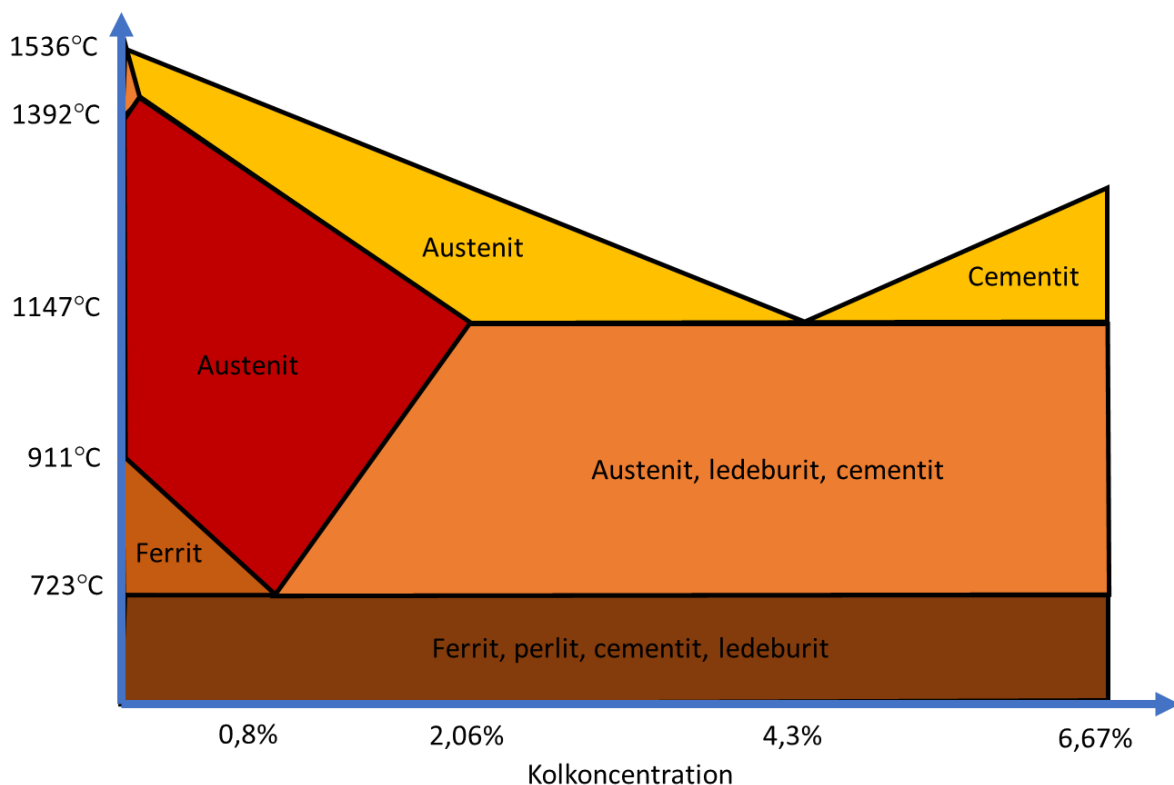
Tabell 7.3. "Faktiska" och "mätta" utvidgningshastigheter utan kompensering av 0–250 mm förskjutning i sida och 800 mm till stålämnet.

mm		0	50	100	150	200	250
mm/min	0,3	0,300	0,299	0,298	0,295	0,291	0,286
	0,4	0,400	0,399	0,397	0,393	0,388	0,382
	0,5	0,500	0,499	0,496	0,491	0,485	0,477
	0,6	0,600	0,599	0,595	0,590	0,582	0,573
	0,7	0,700	0,699	0,695	0,688	0,679	0,668
	0,8	0,800	0,798	0,794	0,786	0,776	0,763
	0,9	0,900	0,898	0,893	0,885	0,873	0,859
	1	1,000	0,998	0,992	0,983	0,970	0,954

8 Dimensionsförändring vid värmning av stål

8.1 Stålsorter

Stål är en härdningsbar legering som till största delen består av järn. Kol är det viktigaste legeringsämnet och ingår alltid i varierande mängd i stål. Stål innehåller även andra ämnen, exempelvis krom, molybden, nickel och vanadin, vilka ger stålet olika egenskaper. Stål med små mängder legeringsämnen utöver kol kallas olegerade stål eller kolstål. Stål som innehåller högre halt legeringsämnen utöver kol kallas legerade stål. När stål värms sker fasomvandlingar, exempelvis så övergår ferrit till austenit vid 910°C, se figur 8.1. Vid denna övergång kan det ske en fasomvandling som kräver mycket energi, vilket leder till att stålet krymper innan utvidgning startar på nytt. Krympningen kan bevittnas i mindre prov vid så kallade dilatometermätningar, men i stora stålämnen och i produktion sker denna krympning som en avtagande utvidgning.

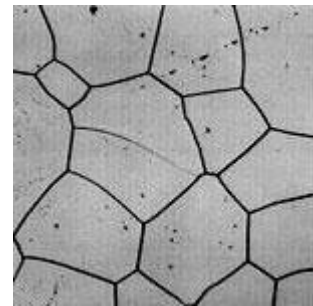


Figur 8.1. Förenklat fasdiagram för olika stålsorter kopplat till koncentration och temperatur.

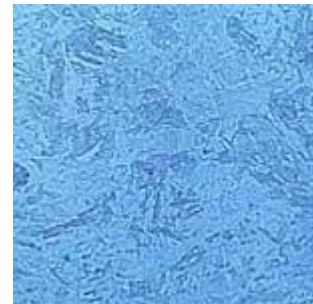
I projektet har framför allt austenitiska, ferritiska och martensitiska stål undersökts samt använts under tester och simuleringar. Figur 8.1 beskriver ett fasdiagram kopplat till mängden kol och temperatur, men stål kan också delas in i grupper kopplat till mängden legeringsämnen. I tabell 8.1 redovisas åtta huvudgrupper av stål.

Tabell 8.1. Huvudgrupper av olika stålsorter och deras egenskaper.

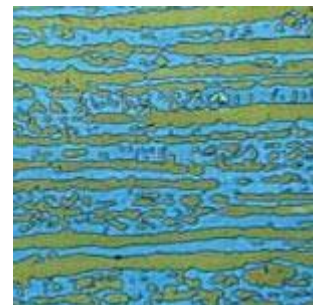
Ferritiska Ferritiska rostfria stål har en kromhalt 12–30 %, kolhalt under 0,12 %. Nickelhalten är mycket låg eftersom nickel annars skulle stabilisera austeniten. Värms stålet övergår strukturen först till γ -austenit vid 910°C och vid 1 400°C till δ -ferrit. Ferritiska stål är magnetiska och kan inte härdas.



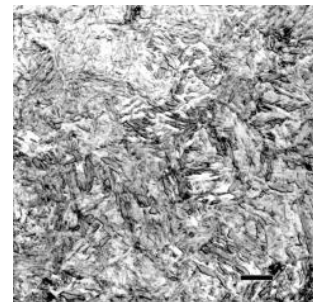
Martensitiska Martensitiska rostfria stål har en kromhalt kring 12–16 %, låg nickelhalt och en kolhalt runt 0,1–1,2 %. Martensitiskt stål bildas genom att stål i austenitisk smält fas kyls så snabbt att vare sig perlitisk eller bainitisk struktur hinner bildas.



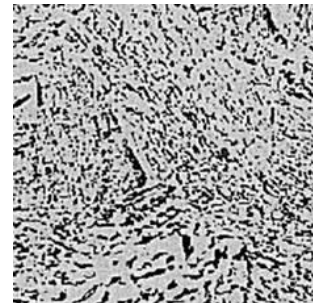
Ferrit-austenitiska Ferrit-austenitiska rostfria stål, även kallat *duplexstål*, innehåller krom (upp till 29 %), nickel (5–8 %), molybden (1–4 %), kol under 0,03 % samt kväve 0,4 %. Duplexa stål är magnetiska och ej härdbara.



Martensit-austenitiskt Martensit-austenitiska rostfria stål består av krom (13–16 %), nickel (5–6 %), molybden (1–2 %) och kol (0,04–0,08 %). De är magnetiska och härdbara.

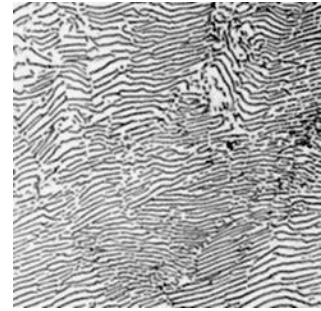


Bainitiska Bainitiska rostfria stål är en struktur som skapas vid kylning av austenit. Bainit består av α -ferrit och cementit. Bainit är hårdare än perlit men inte lika hårt som martensit. Hållfastheten bestäms till stor del av den temperatur som bainiten formas vid. Vanliga legeringsämnen som styr bainitomvandlingen är krom, mangan och molybden. Om kolhalten är hög ökar benägenheten att martensitiskt stål bildas.



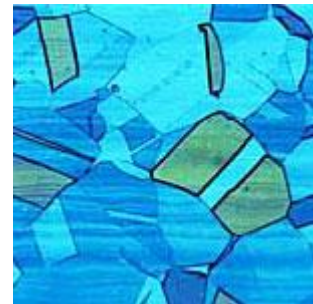
Perlitiskt

Perlitiska rostfria stål är en strukturbeståndsdel i stål som byggs upp av α -ferrit och cementit. Ferriten och järnkarbiden bildar en lamellstruktur.



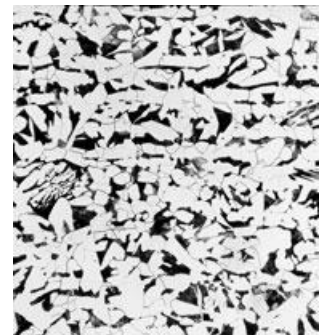
Austenitiska

Austenitiska rostfria stål utgör den största gruppen av rostfria stål och har en γ -struktur. De är omagnetiska och kan inte härdas. Stålen består av krom (12–30 %) och nickel (7–30 %) samt andra metaller, ofta molybden (2–3 %). Kolhalten i dessa stål är mycket låg, i regel under 0,05 %.



Kolstål

Kolstål består av upp till 2,1% kol. Utöver kol är det vanligt att mindre mängder kisel och mangan finns i legeringen. Kolhalten är vanligen 0,01%–0,8%, halten kisel under 0,3% och halten mangan under 0,8%. I samband med att kolhalten stiger blir kolstålet hårdare och starkare med hjälp av värmebehandling, samtidigt som materialet blir mindre duktilt.



8.2 Värmemodell

Den tvådimensionella värmeledningsekvationen i kartesiska koordinater ges av

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

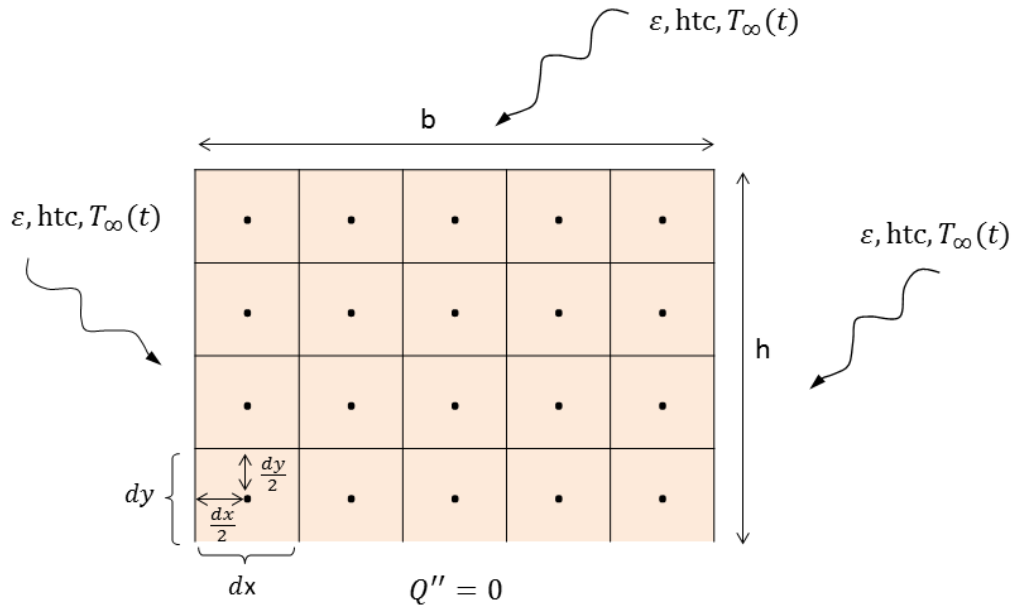
där ρ är densiteten, och där k är temperaturberoende värmeledningsförmåga och C_p är specifik värmekapacitet. Randvillkoren vid en yta $y_{bc} = 0$ ges av

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \text{ och}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h_{tot,y} (T_{\infty} - T(y_{bc}, t))$$

för en isolerad yta respektive en yta med konvektiv värmeöverföring (strömning och strålning). Därutöver kan värmeöverföring genom strålning inkluderas genom att definiera den totala värmeeöverföringskoefficienten (h_{tc}) som $h_{tot,y} = h_{conv,y} + h_{rad,y}$. Värmeöverföringskoefficienten genom strålning skrivs enligt formen $h_{rad,y} = \sigma \epsilon (T_{\infty}^3 + T_{\infty}^2 T_y + T_{\infty} T_y^2 + T_y^3)$, där T_y är temperaturen vid gränslinjen $y = y_{bc}$, och T_{∞} är omkringliggande temperatur.

Tvärsnittet för ett stålämne, avgränsat av bredden b och höjden h , är åtskilda i ett jämnt uppdelat rutnät med elementstorleken $dx = dy$. Ett beräkningsnät är senare tillämpat på cellcentrerade noder i positionerna (X, Y) så att $X = (dx/2, dx/2 + dx, \dots, b-dx/2)$ och $Y = (dy/2, dy/2 + dy, \dots, h-dy/2)$, se figur 8.2.



Figur 8.2. Tvådimensionellt beräkningsnät som visar de cellcentrerade noderna och ytans värmeöverföringsvillkor som används för gränslinjerna.

För den nedre sidan av stålämnet (se figur 8.1) användes villkor för värmeisolering eftersom värmeöverföringen är liten från den delvis kyllda keramiska ugnshärden. För de återstående tre sidorna och gränslinjerna används konvektiva värmeöverföringsvillkor (inklusive strålning).

8.2.1 Ingångsparametrar för värmemodellen

Nödvändiga ingångsparametrar för värmemodellen är:

- produktdimensioner (b och h),
- materialegenskaper ρ , k (t) och C_p (T) för respektive specifika stålsort,
- omgivande ugnstemperatur T_∞ (t) för värmeperioden,
- värmeöverföringsparametrar ε och h_{conv} för viss produkt och vissa driftsförhållanden,
- initial temperaturfördelning i stålämnet (gäller särskilt varmchargerade stålämnen).

Materialegenskaper för standardstål kan återfinnas i litteraturen. Värmeöverföringsparametrarna är beroende av faktorer relaterade till specifik produkt och driftsförhållanden. Emissionen är en funktion av temperatur, ytjämnhet, oxidationsnivå etc. Den konvektiva värmeöverföringskoefficienten är en funktion av gasflödestemperatur och hastighet, typ av gasflöde, flödesegenskaper, orientering av ytan etc. Specifikationen av dessa parametrar kräver kvalificerade gissningar, som måste bekräftas genom temperaturmätningar, för att säkerställa att den predikterade värmeöverföringshastigheten till stålåmnets yta är realistisk. Om mätningarna utförs på olika djup i stålåmnets, kan noggrannheten i materialegenskaperna också bekräftas.

Värmeöverföringsparametrarna är initialt satta till $\varepsilon = 0,8$ (emissivitet) och $h_{conv} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ (konvektiva värmeöverföringskoefficienten). För en grov solid yta är emissiviteten ofta ganska hög, även vid lägre temperaturer, varigenom ett värde på 0,8 är ett realistiskt värde. För forcerad konvektion med gaser (påtvungad rörelse) är de typiska värdena för den konvektiva värmeöverföringskoefficienten i intervallet från 15 till 250 $\text{W/m}^2\text{K}$. De högre värdena erhålls vid högre gashastigheter. Ett värde på 100 $\text{W/m}^2\text{K}$ för den konvektiva värmeöverföringskoefficienten förefaller därför som en realistisk gissning för gasflödena i Ugn62.

För att specificera den omgivande ugnstemperaturen $T_\infty(t)$ i modellen krävs information om den tidsberoende temperaturen i närheten av stålämnet. Eftersom endast en del av stålämnet modelleras anses $T_\infty(t)$ representera ett genomsnitt över hela stålämnets längd. Ugnstemperaturen kan erhållas från fasta termoelement i ugnen.

8.2.2 Termisk längdutvidgning

Längden $l(T)$ på ett stålämne med den initiala längden l_0 som värms från en enhetlig temperatur $T_{0,d}$ till en temperatur T kan härledas ur

$$\frac{l(T)-l_0}{l_0} = \int_{T_{0,d}}^T \alpha(s) ds = \beta(T); \quad \frac{dl(T)}{dT} = l_0 \alpha(T).$$

Längdutvidgningskoefficienten $\alpha(T)$ motsvarar derivatan av $\beta(T)$, som representerar den relativa längdförändringen kopplad till värmningen från $T_{0,d}$ till T . I en dilatometermätning värms ett sampel av ett teststålämne kontrollerat där längden eller volymen kontinuerligt registreras. Det resulterar i $\alpha(T)$ och $\beta(T)$. Ett sampel är oftast kallt (rumstempererat) vid början av dilatometermätningen. Därför representerar $\beta(T)$ den relativa längdförändringen från "kalla omständigheter".

I modellen för termisk längdutvidgning krävs möjligheten att utgå från ett varmchargerat ämne så att beräkningen påbörjas vid en temperatur $T_0 > T_{0,d}$ och en längd $L_0 > \delta_0$, där δ_0 är längden vid rumstemperatur. Vid varmchargering i Ugn62 kan stålämnen läggas in i ugnen vid en temperatur T_0 inom intervallet 900–1 000°C. För att kunna använda dilatometermätta data för $\beta(T)$ och fortfarande erhålla den relativa längdutvidgningen för ett specifikt temperaturintervall så måste bidraget $\beta(T_0)$ subtraheras, vilket representerar värmningen från rumstemperatur till T_0 . I värmmodellen kan medellängden $\overline{L}(t)$ vid tiden t ges av

$$\frac{\overline{L}(t)-L_0}{L_0} \equiv \frac{\Delta \overline{L}(t)}{L_0} = \frac{1}{NL_0^*} \{ \sum_{i=1}^N \beta(T_i) - \beta(T_0) \}.$$

Här är $\beta(T_i)$ den relativa längdförändringen i en nod (X_i, Y_i) , vid en temperatur T_i vid tiden t , och $L_0^* = L_0/\delta_0 = 1 + \beta(T_0)$. Medellängden motsvarar medelsumman för den termiska utvidgningen i varje nod. Därefter kan man beräkna tidsförändringen för $\Delta \overline{L}(t)$, kopplad till den termiska utvidgningshastigheten, genom

$$\frac{\Delta \overline{L}(t_i) - \Delta \overline{L}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} = \frac{d}{dt} (\Delta \overline{L}(t)).$$

Längdutvidgningen kommer att fortsätta tills temperaturen i varje del av stålämnet är i jämvikt med omgivningen. Initialt kommer temperaturen i ett kallt stålämne öka snabbt eftersom det är stora temperaturdifferenser mellan stålämnets yta och ugnens atmosfär. Successivt kommer denna temperaturskillnad att minska och längdutvidgningen genereras mer genom värmeledning av ytvärmen till dess inre. Slutligen kommer längdutvidgningsstakten att gå mot noll när stålämnets temperatur stabiliseras.

8.2.3 Indata för längdutvidgningsmodellen

Nödvändiga ingångsparametrar för längdutvidgningsmodellen är:

- relativ längdförändring $\beta(T)$ för specifik stålsort,
- initial längd L_0 och temperatur T_0 för stålämnet,
- stålämnets längd δ_0 vid rumstemperatur.

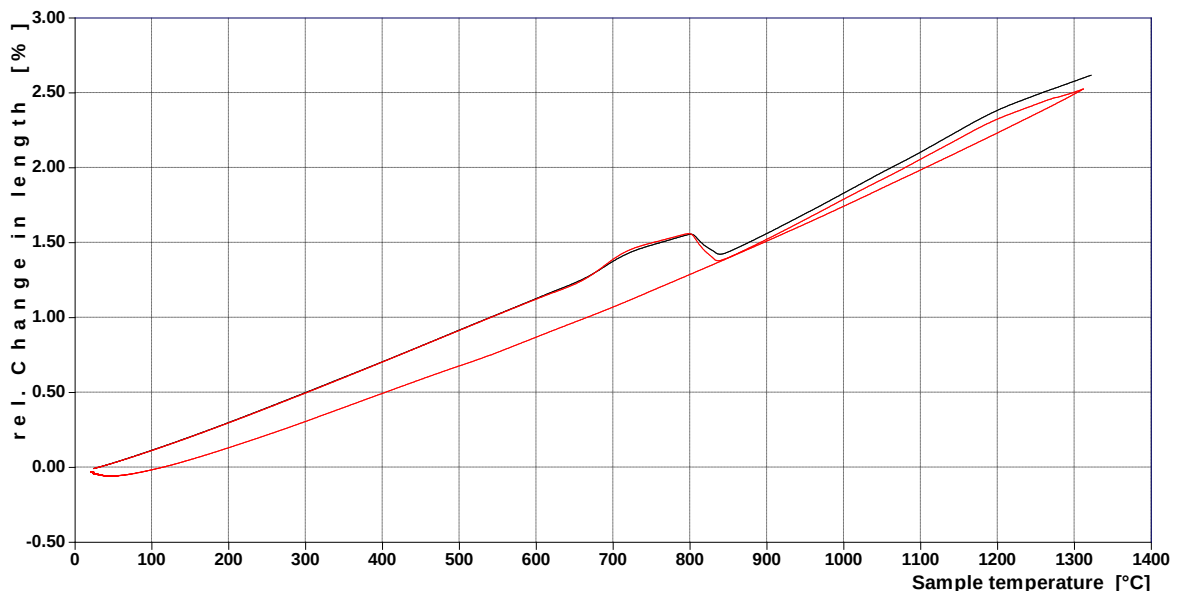
Om man förutsätter att värmningen sker av kallchargerade stålämnen så är T_0 känd och den initiala längden $L_0 = \delta_0$ kan enkelt bestämmas genom längdmätning. Om man förutsätter att värmning sker av varmchargerade stålämnen så är T_0 okänd. Stålämnets ytemperatur och dess variation över ämnets fulla längd kan mätas med en pyrometer. För att prediktera längdutvidgningen och längdförändringen $\beta(T_0)$ av varmchargerade stålämnen så krävs en uppskattning av den initiala längden L_0 och temperaturen T_0 . Ytemperaturen av varmchargerade ämnen är lägre än dess inre temperatur eftersom ämnena har transporterats i fria luften eller valsats före charging. Pyrometermätt temperatur behöver sålunda korrigeras för att så väl som möjligt representera en initial medeltemperatur T_0 .

8.3 Relativ längdförändring och dilatometermätning

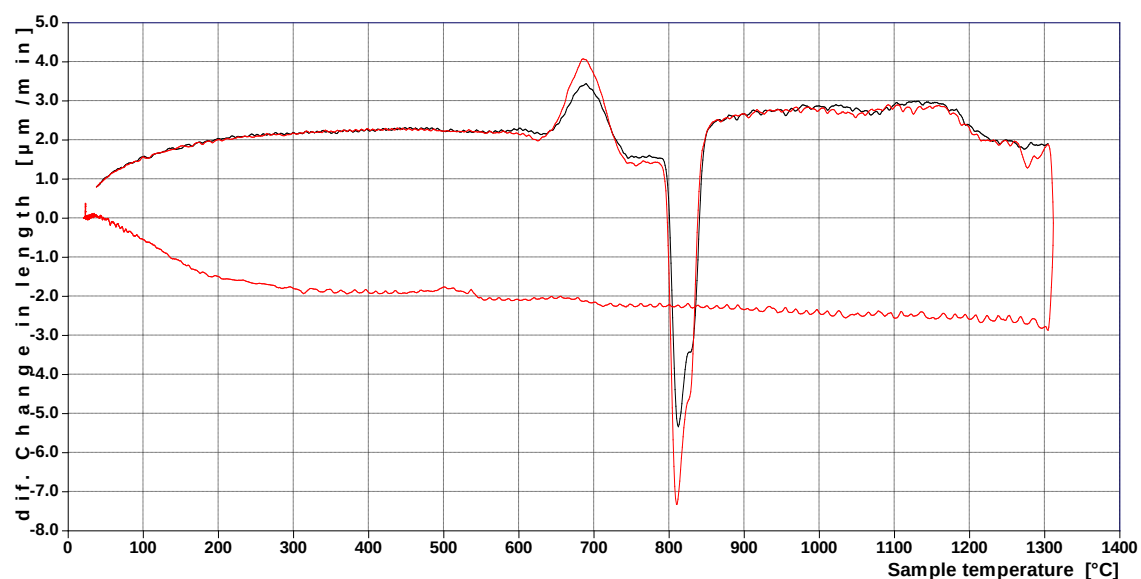
Sandvik har genomfört dilatometermätning på stålämnet 13C26 (Nylöf, 2013). En dilatometer (DIL802) är ett vetenskapligt instrument som mäter volymförändringar orsakade av en fysisk eller kemisk process, i detta fall en temperaturförändring. Vid mätning läggs en metallbit in i en kammare där den successivt hettas upp $+2^\circ\text{C}$ per minut. Upplösningen i Sandviks dilatometer (DIL802) är 10 nm i längd och $0,05^\circ\text{C}$ i temperatur. Ämnet har en tydlig fasomvandling vid 830°C (se figur 8.3).

Fasomvandlingen är metallens omvandling mellan martensit och austenit form. I samma dilatometermätning syns fasomvandlingen tydligare om y-axeln representerar längdutvidgning per minut (se figur 8.4). Då syns även någon form av strukturförändring vid 140°C eftersom utvidgningshastigheten minskar vid denna temperatur. Förhållandet mellan ursprunglig längd, längdförändring och temperaturskillnad uttrycks som den termiska utvidgningskoefficienten $\alpha(T)$, se figur 8.5

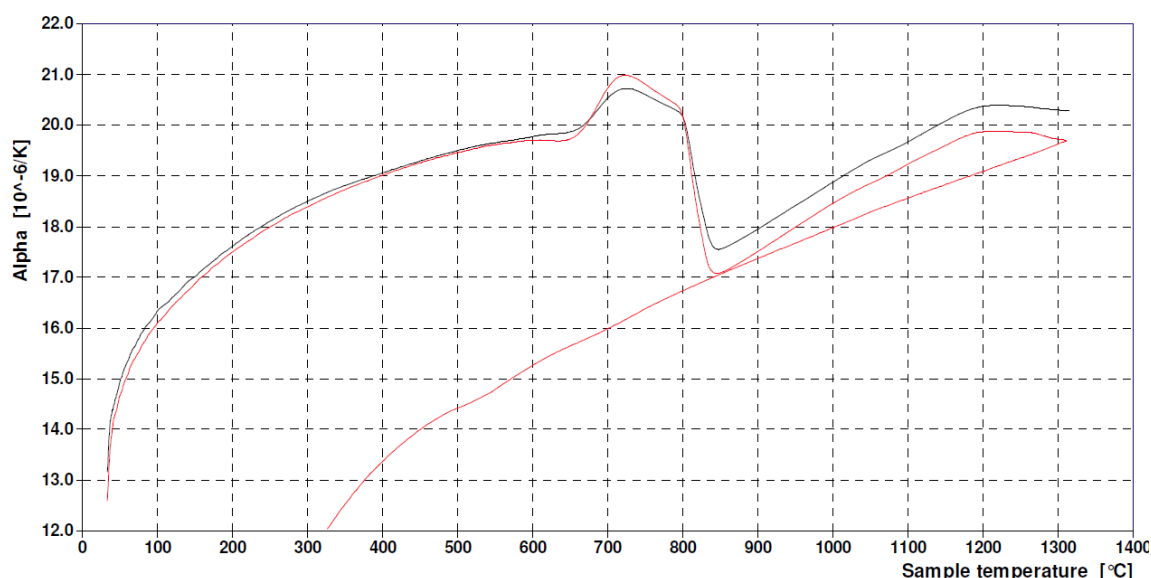
$$\alpha(T) = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}$$



Figur 8.3. Dilatometermätning av två stålämnen av typ 13C26, uppvärmning (två kurvor) och nedkyllning (en kurva). Grafen visar relativ längdutvidgning och temperatur.



Figur 8.4. Dilatometermätning av två stålämnen av typ 13C26, uppvärmning (två kurvor) och nedkylning (en kurva). Grafen visar längdutvidgning per minut (utvidgningshastighet) och temperatur.



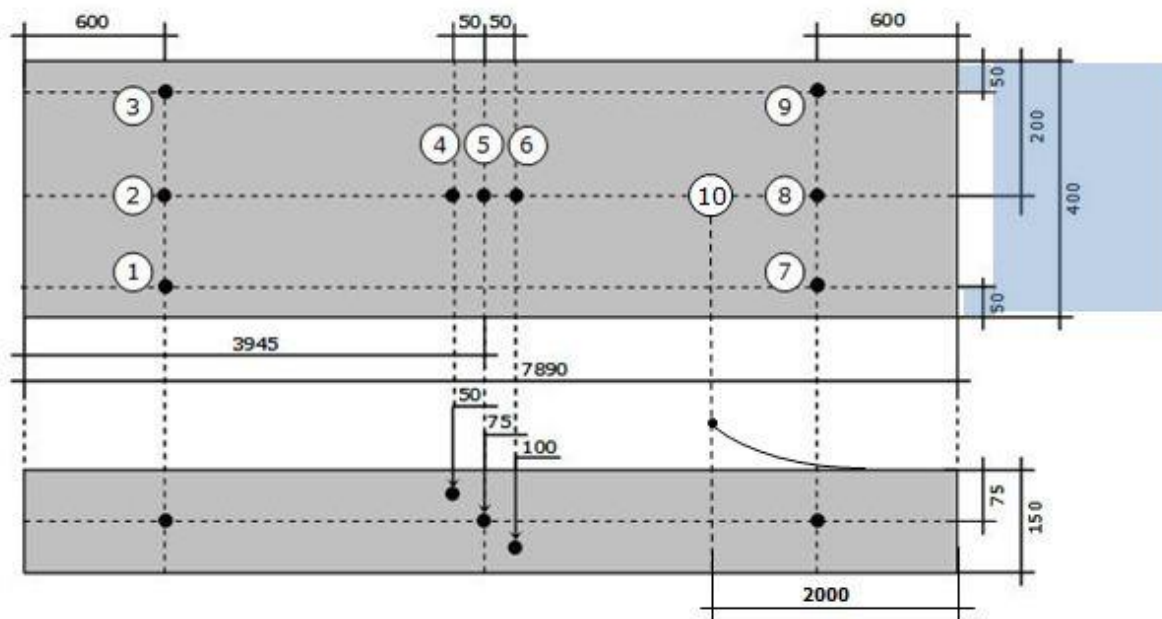
Figur 8.5. Dilatometermätning av två stålämnen av typ 13C26, uppvärmning (två kurvor) och nedkylning (en kurva). Grafen visar termiska utvidgningskoefficienten och temperatur.

8.4 Validering av värmemodell

Validering av värmemodellen genomfördes genom temperaturmätningar på loggningsämne och med radarmätningar på testämne. Denna metod är också tänkt som en första grovkalibrering av en värmemodell vid skarp installation.

8.4.1 Temperaturmätning med loggningsämne

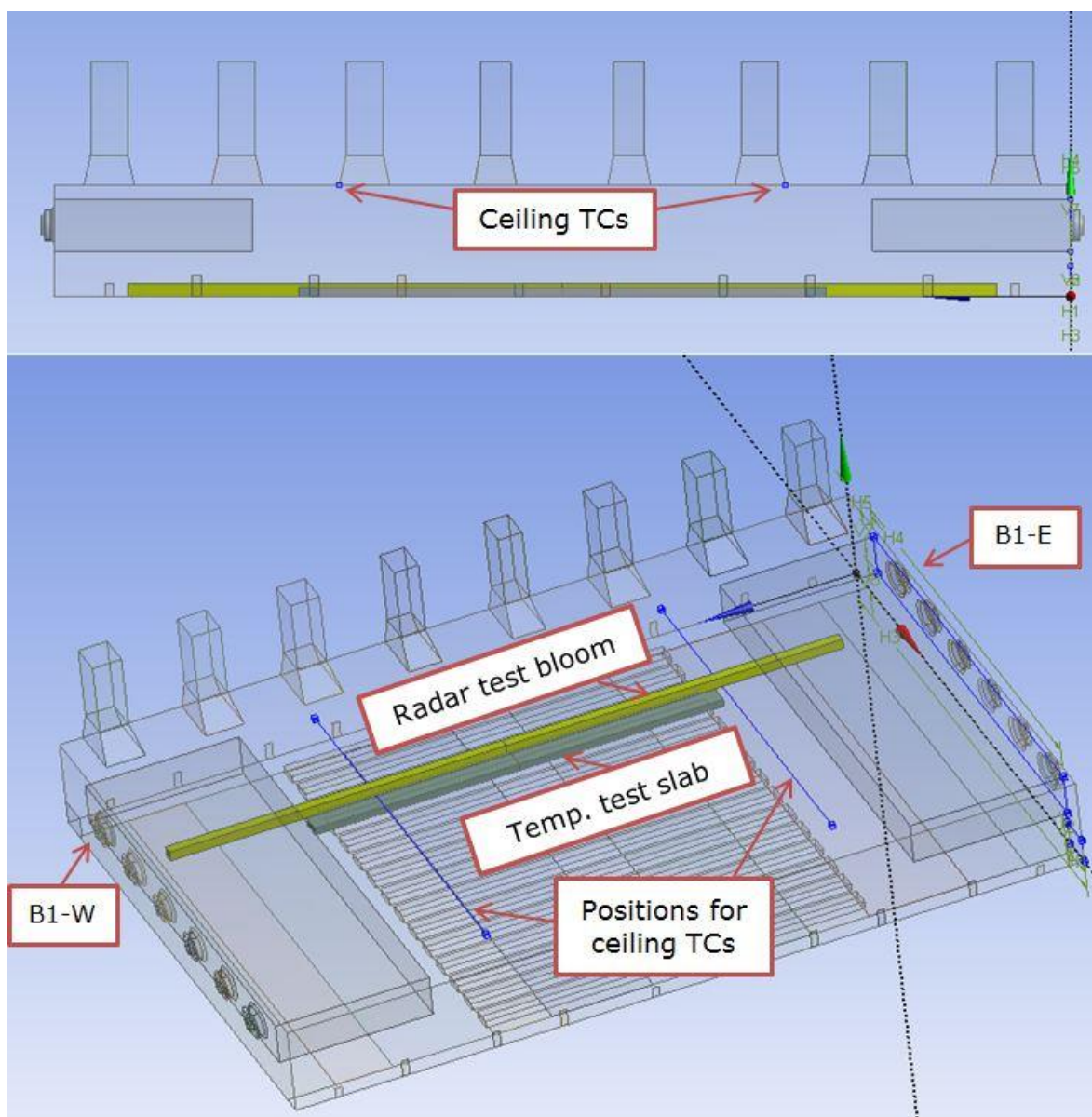
Temperaturmätningar gjordes med en temperaturlogger på ett loggningsämne med tvärsnittet 400x150 mm och längden 7,89 m. Temperaturen mättes i stålämnets inre delar genom montering av termogivare (TC) i 9 borrarade hål enligt figur 8.6. De flesta TC är placerade på halva stålämnets djup, men TC 4 och TC 6 är positionerade på andra djup för att ge information om temperaturfördelningen över stålämnets djup. Därutöver är TC 10 placerad ovanför stålämnet för temperaturmätning av ugsatmosfären.



Figur 8.6. Skiss av loggningsämne för temperaturmätningar. Siffrorna visar positionerna för termogivare samt loggersns skyddslåda (blå markering på höger sida).

8.4.2 Utvidgningsmätning med radar

Mätning av längdutvidgning gjordes, parallellt med temperaturmätning, med en digital radarutrustning på ett separat testämne (inte loggningsämnet), vars tvärsnitt var 201x200 mm och längden 13,55 m, se figur 8.7. Radarsensorerna placerades på varsin sida av ugnen. Sensorerna mätte avståndet till testämnet, där det sammanlagda avståndet från båda sensorerna gav den totala utvidgningen. Det fanns även radarsensorer på ugnsvälv för mätning av testämnets vertikala förskjutning och böjning, vilket uppstår om ett stålämne kallchargeras. Vid kallchargering skapas stora temperaturgradienter över testämnets höjd, vilket orsakar snabbare expansion i de övre delarna av testämnet än i de lägre delarna, som ligger på den "kalla" ugnshärden. Detta leder till en uppböjning av testämnet under de första 10–20 minuterna av värmningsperioden. En konsekvens av den vertikala uppåtrörelsen är att den horisontella längdmätningen (initial) ger ett för lågt värde. På motsvarande sätt kommer längdutvidgningshastigheten att vara för hög när testämnet sträcks ut.



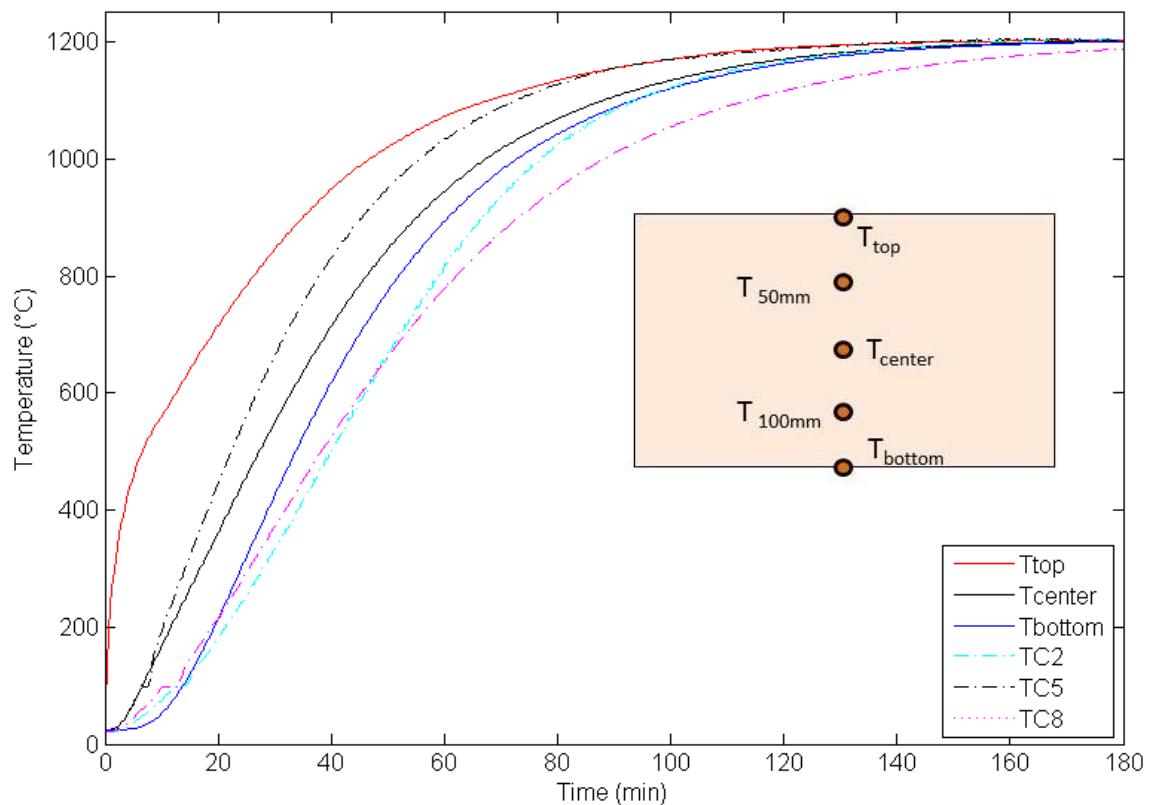
Figur 8.7. Skiss av Ugn62 med loggningsämne och testämne vid en mätning som genomfördes 2014-08-21.

8.4.3 Temperaturmätning med loggningsämne

Värmeöverföringsparametrarna i värmemodellen är initialt satta till $\varepsilon = 0.8$ och $h_{conv} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$. Storleken på dessa parametrar beror på många faktorer och värdena ska väljas så att de överensstämmer med mätningarna. En realistisk omgivningstemperatur för ugnen $T_{\infty}(t)$ måste sättas. $T_{\infty}(t)$ sattes initialt till temperaturen som loggades av TC 10. Loggningen genomfördes under tre timmar, och efter 110 minuter stabiliserades temperaturen till 1205°C . Predikterade temperaturer från värmemodellen redovisas tillsammans med mätta temperaturer, se figur 8.8 och tabell 8.2.

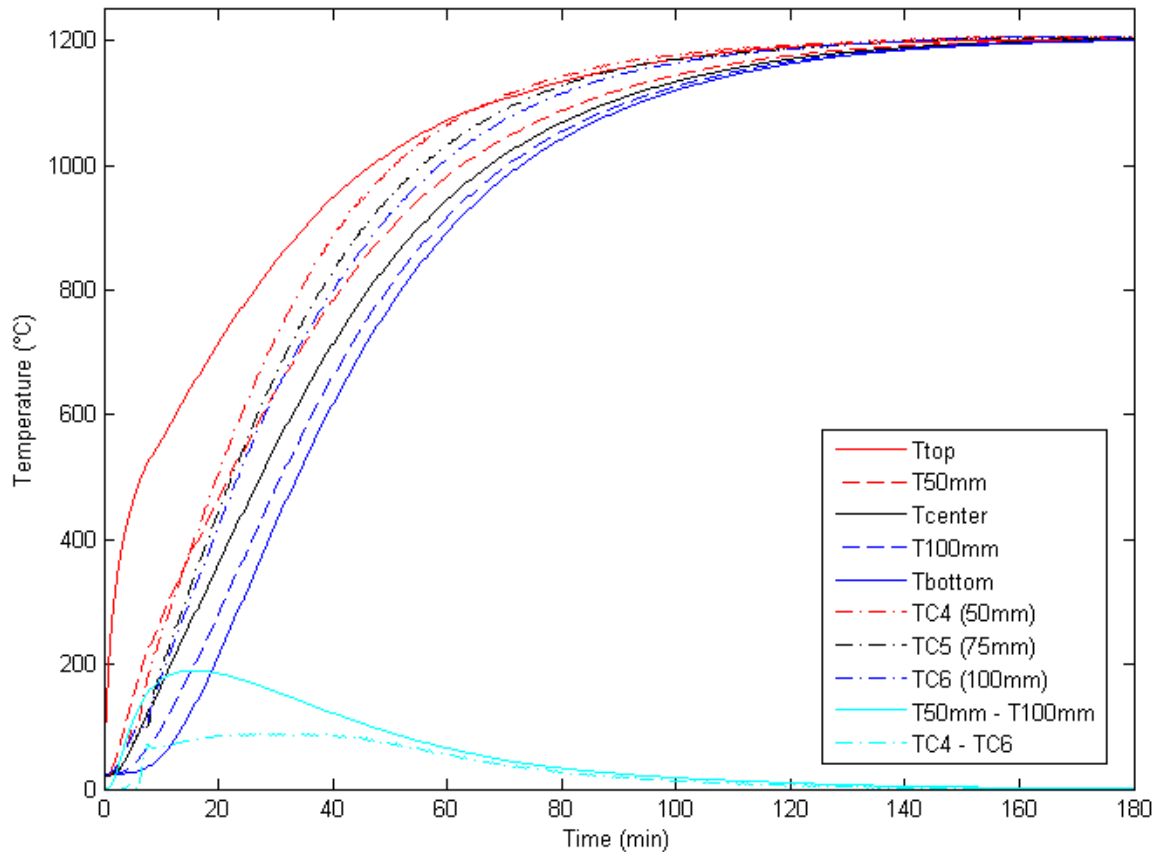
Tabell 8.2. Ugnstemperaturer från TC 10.

t (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
T (°C)	1 100	1 040	1 090	1 130	1 160	1 170	1 180	1 180	1 190	1 195	1 200	1 205



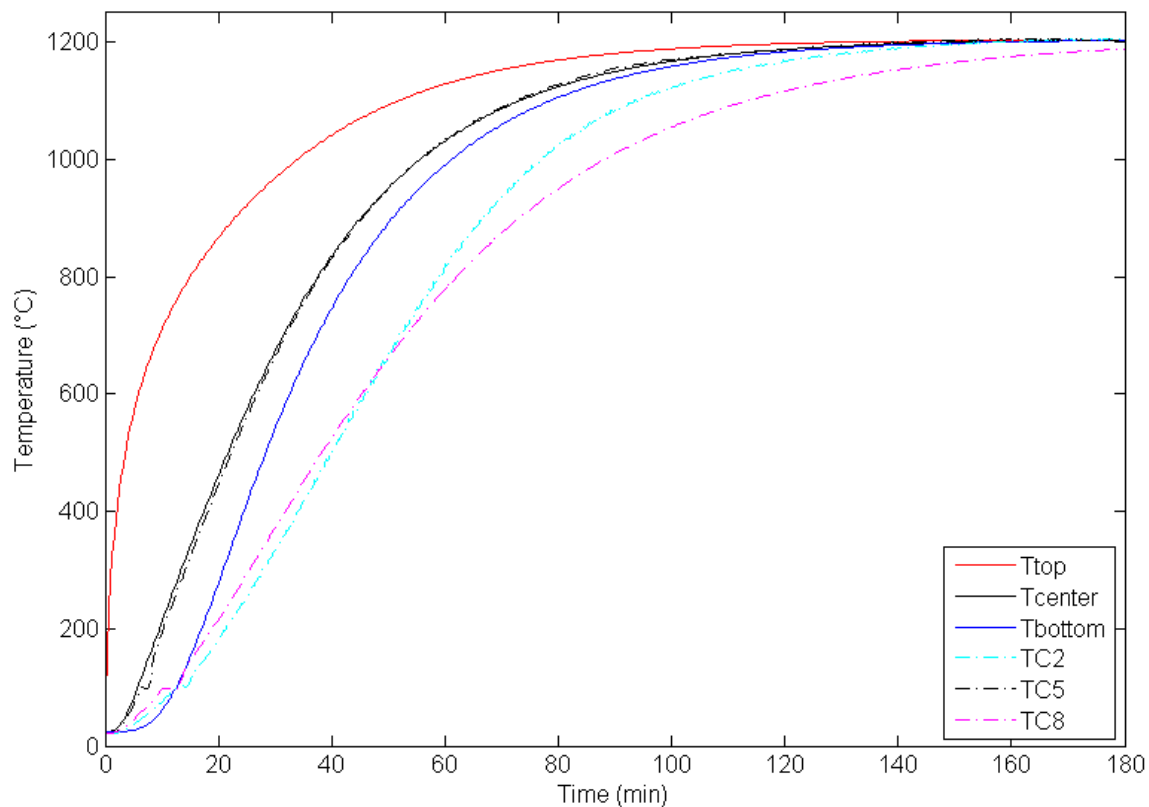
Figur 8.8. Predikterade temperaturer i stålämnet jämfört med mätta temperaturer från TC 2, 5, och 8. Ugnstemperaturen i värmemodellen sattes till loggade temperaturer från TC 10.

Predikterade temperaturer i stålämnet borde matcha mätta temperaturer. I figur 8.8 går det att se att predikterade och mätta temperaturer skiljer sig upp emot 100°C. Även om man förändrar värmeöverföringsparametrar ε och h_{conv} inom ett rimligt intervall så är det svårt att matcha predikterade och mätta data. Genom att jämföra mätta och predikterade temperaturgradienter för 50 till 100 mm djup (TC 4–6) så visar mätningarna en jämnare temperatur än vad värmemodellen beräknar under de första 50 minuterna, se figur 8.9.



Figur 8.9. Mätta och predikterade temperaturer för tre djup (blå, röd, svart). Predikterad temperaturgradient för 50 till 100 mm djup i jämförelse med mätta gradienter TC 4 till 6. TC 10 användes som omgivningstemperatur.

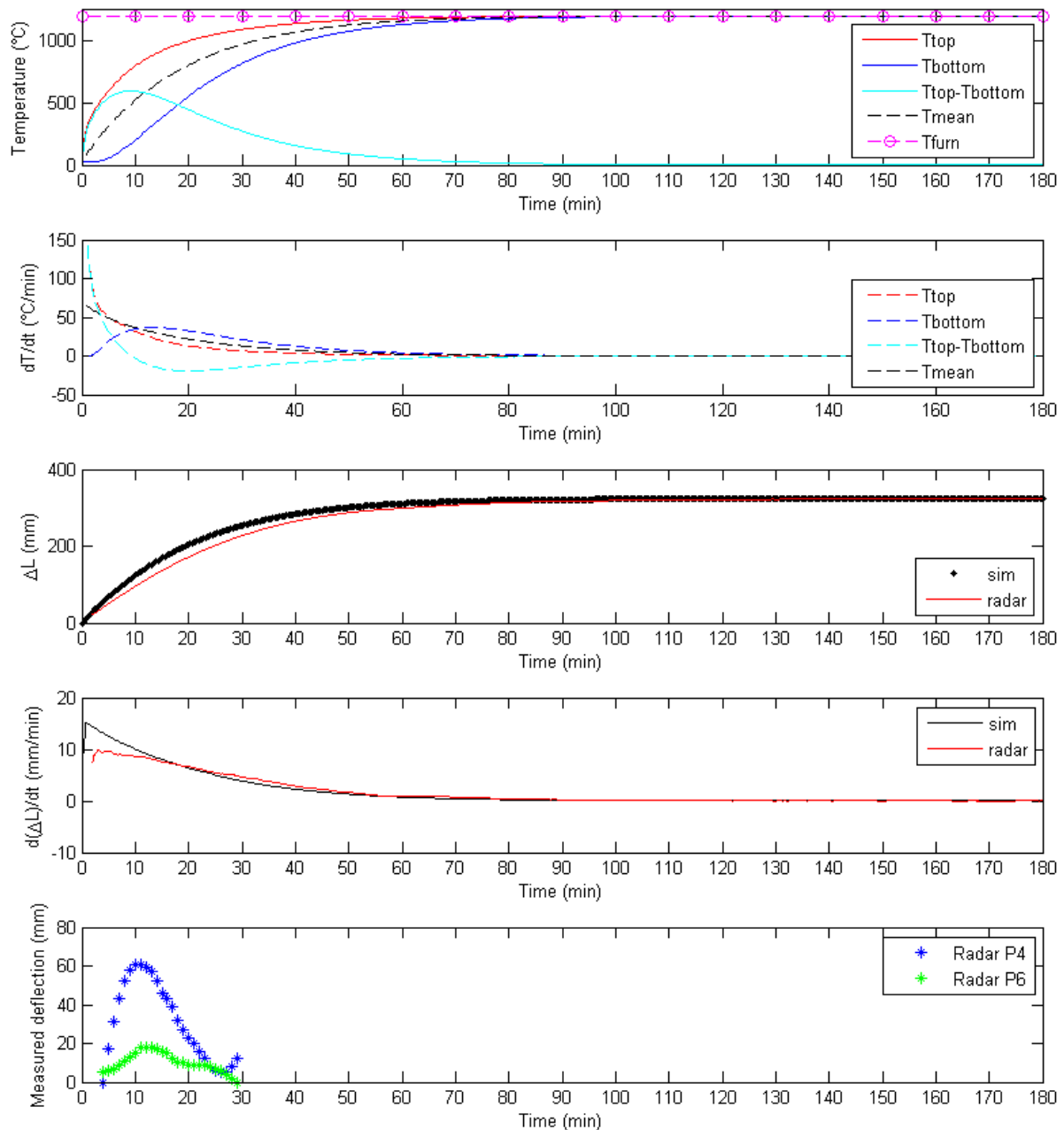
I figur 8.8–9 användes TC 10 som omgivningstemperatur. Om man istället använder en konstant omgivningstemperatur på 1 205°C så erhöles anpassning enligt figur 8.10. Denna temperatur motsvarar angiven temperatur från ugnens termoelement. De initiala värden för värmeöverföringsparametrarna ε och h_{conv} var oförändrade. Figur 8.10 visar att centrumvärdet (TC 5) för predikterad temperatur matchar mätt värde. Det finns dock fortfarande en stor diskrepans mellan topp- och bottenvärdet (TC 2 och TC 8).



Figur 8.10. Jämförelse mellan predikterade och mätta temperaturer för TC 2, 5, och 8. Ugnstemperaturen i värmemodellen sattes till 1 205°C (jämför med figur 8.8).

8.4.4 Längdmätning med radar

Den predikterade längdutvidgningen för stålämnet jämfördes med den radarmätta utvidgningen. Det tog 2–3 minuter från charging tills att stålämnet nådde mätpositionen. Stålämnet värmdes således till en ojämn temperatur $T_{0,radar} > T_0$ och hade en längd $L_{0,radar} > L_{0,model}$ innan radarmätningen kunde påbörjas. Den totala medelutvidgningen var i detta fall 21 mm mindre för mätningen än vad värmemodellen beräknade, vilket kan kopplas till 2 minuters initial uppvärmning. Radardata justerades därför så att $t_{0,radar} = 2$ minuter och $L_{0,radar} = 21$ mm. Resultatet efter denna justering redovisas i figur 8.11.



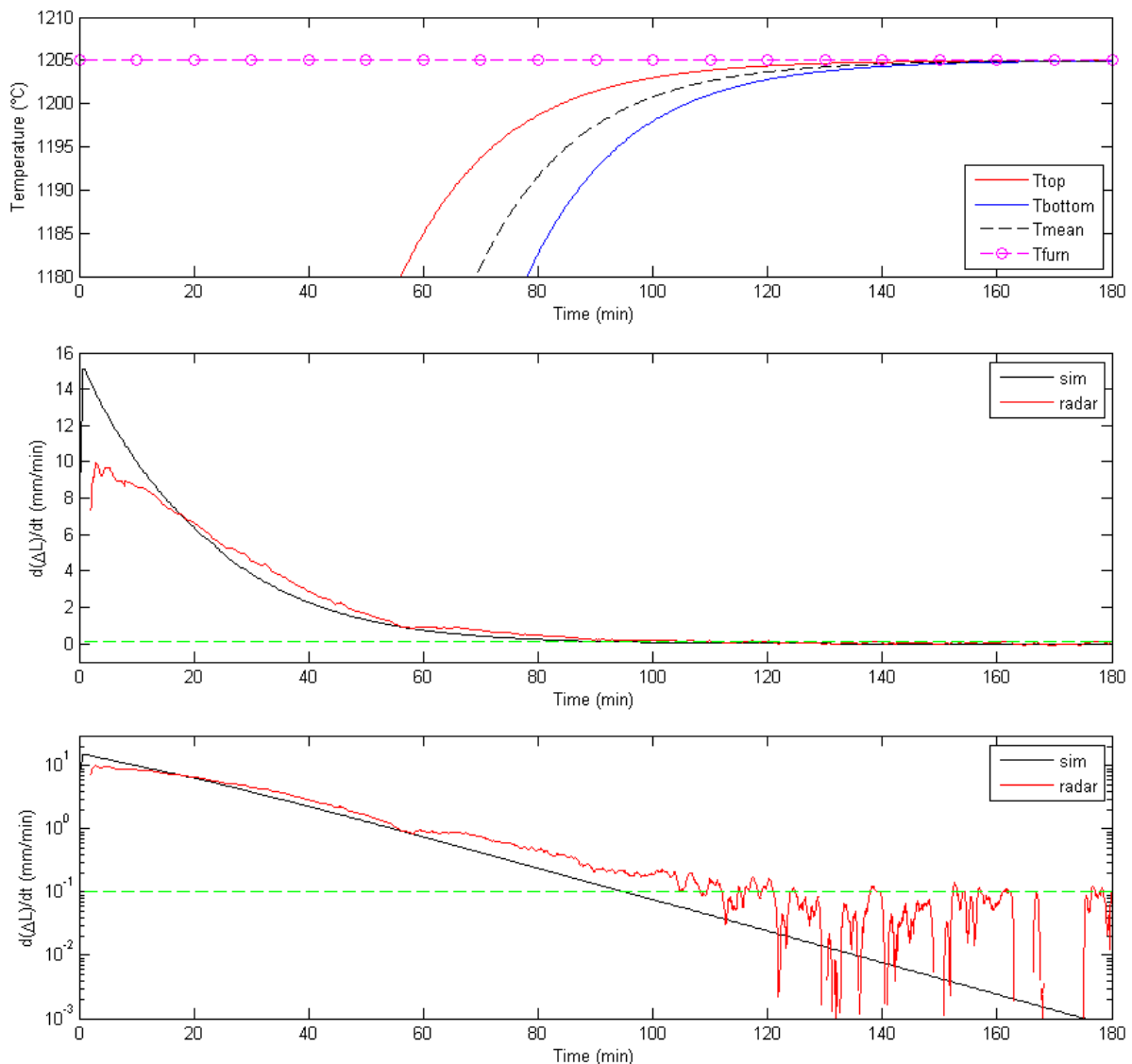
Figur 8.11. a) Predikterad värmningskurva. b) Predikterad värmningshastighetskurva. c) Predikterad och mätt längdutvidgning. d) Predikterad och mätt längdutvidgningshastighet. e) Mätt vertikal uppböjning. Resultaten baseras på en konstant ugnstemperatur på 1 205°C.

Resultaten från värmmodellen och mätningarna visar att mätta utvidgningshastigheter, under de första 15–20 minuterna, är lägre än vad modellen predikterade medan de är högre kort därefter. Denna trend var väntad och är kopplad till uppböjningen. Det går inte att se en fullständig korrelation mellan mätdata (figur 8.11d-e) då effekten från uppböjningen borde ha ändrats efter ungefär 10 minuter.

8.4.5 Utvidgningshastighet och jämnvarmt

Värmmodellen ger en temperaturfördelning över tvärsnittet för stålämnet, varifrån en utvidgningshastighet kan beräknas. Detta samband undersöktes för att sätta upp ett villkor för när stålämnet ansågs jämnvarmt. Det var också intressant att uppskatta vilken noggrannhet som krävdes av radarn för att kunna bestämma om ämnet var jämnvarmt. I figur 8.12 visas predikterad

temperatur i den senare delen av värmningscykeln och under den tid stålämnet når en jämn temperatur. Utvidgningshastighet är också utritad med en logaritmisk skala längs y-axeln för att lättare kunna undersöka brus och noggrannheten i radardata.



Figur 8.12. a) Predikterad temperaturfördelning (1180–1205°C). b) Korrelation mellan predikterad och mätt utvidgningshastighet. c) Logaritmiska skala för korrelation mellan predikterad och mätt utvidgningshastighet.

Värmningshastigheten minskar när stålämnets temperatur närmar sig ugnstemperaturen. Sambandet mellan utvecklingen av en jämn stålänestemperatur och ökningen av utvidgningshastighet redovisas i tabell 8.3. Efter 95 minuter är den predikterade medeltemperaturen 1199°C och temperaturdifferensen ∇T_{bloom} för stålämnets höjd är 6°C. Utvidgningshastigheten $d(\Delta L)/dt$, vid denna temperaturdifferens är 0,1 mm/min. Fortsatt värmning av stålämnet har begränsade effekter på dess temperatur eftersom stålämnet närmar sig den omgivande temperaturen. Från figur 8.12c går det att dra slutsatsen att radarsensorerna kan mäta utvidgningshastigheten vid ungefär 0,1 mm/min innan brusnivån blir för hög. Ett stålämne anses sålunda ha en jämn temperatur då temperaturgradienten är $\nabla T_{bloom} = 6^\circ\text{C}$, vilket motsvarar en utvidgningshastighet $d(\Delta L)/dt = 0,1$ mm/min. Radardata vid 95 minuter visar en utvidgningshastighet på 0,21 mm/min. I radarmätningarna går det att identifiera en "S-formad" kurva, se figur 8.12, med

en dipp vid 60 minuter. Detta orsakades av låg dynamik i radarsystemet, vilket resulterade i ett systematiskt fel. Dessa fel är till stor del eliminerade med den i projektet nyutvecklade radarutrustningen.

Tabell 8.3. Modellresultat från temperaturfördelning i stålämnet och motsvarande utvidgningshastighet vid en konstant omgivningstemperatur på 1205°C.

T_mean (°C)	1 190	1 195	1 199	1 200
t (min)	78,0	85,0	95,2	98,7
∇T_{bloom} (°C)	18	12	6	6
d(ΔL)/dt (mm/min)	0,26	0,18	0,1	0,082

Utvidgningshastigheten är proportionell mot initial längd för stålämnet, L_0 . Begreppet termisk töjningshastighet $\dot{\epsilon}_{th} = 1/L_0 * d(\Delta L)/dt$ eliminerar längdberoendet vid jämn temperatur. Den kritiska utvidgningshastigheten på 0,1 mm/min utgick från längden $L_0 = 13,55$ m. Det motsvarar en termisk töjningshastighet på $\dot{\epsilon}_{th,c} = 7,4 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$. Ett kortare stålämne ger en kortare längdutvidgning, ΔL , vilket också leder till lägre $d(\Delta L)/dt$. Sålunda krävs högre radarnoggrannhet för kortare stålämnen eller längre mättid t . Om stålämnet är 5 m krävs en kritisk utvidgningshastighet på 0,037 mm/min.

8.4.6 Applicerbar mätmetod

Vid ett kalibreringstillfälle kan ett stålämne placeras framför radarsensorerna och mätas under hela uppvärmningen, t.ex. under 110 minuter. Detta kan inte ske i en stegbalksugn under produktion då stålämnet successivt förflyttas framåt. När stålämnet förflyttas framåt kommer mätningar endast att göras på ett fåtal positioner. Utvidgningshastighet mäts då under en kort tid (3–8 minuter) per position. I detta sammanhang är mättiden att betraktas som lång och möjliggör högre noggrannhet i bestämningen av den radarmätta utvidgningshastigheten. Vid exempelvis en mätning under 3 minuter skulle en utvidgningshastighet på 0,03–0,04 mm/min kunna mätas om radarn har en relativ upplösning och noggrannhet i mätningen på 0,1 mm (dubbelsidig). Det är ett teoretiskt värde som beror på längdförändring och

8.5 Noggrannhetsanalys av värmemodellen

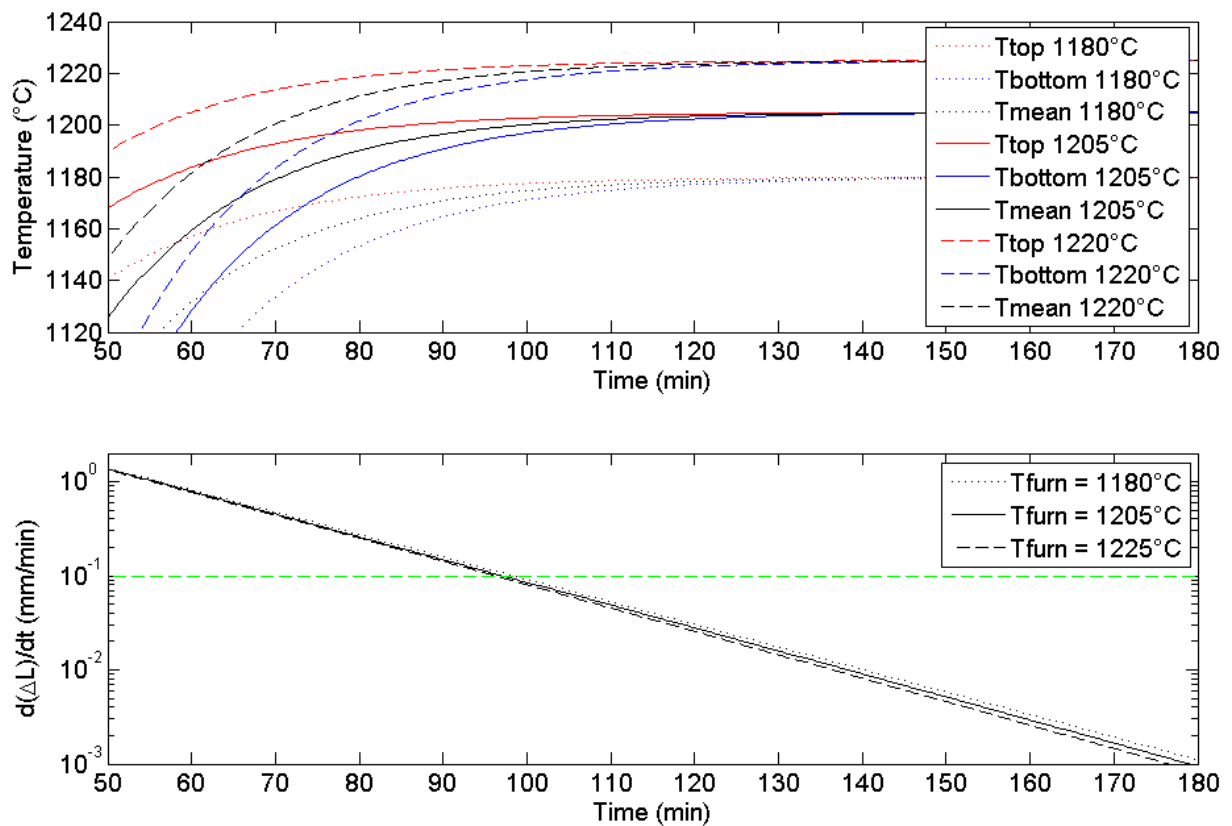
En analys är genomförd för att undersöka noggrannheten för den termiska töjningshastigheten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ utifrån osäkra eller felaktiga indata till värmemodellen. Generaliteten i värmemodellen och den termiska töjningshastigheten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ är testad för olika ämnesdimensioner och ett ämne med stora fastransformationer (13C26, se figur 8.2–3). I nedanstående har en indataparameter ändrats för varje försök. Temperaturdistributionen för modellerat stålämne vid uppnådd töjningshastighet $\dot{\epsilon}_{th,c}$ är kontrollerad för att undersöka temperaturgradienten ∇T_{bloom} (skillnaden mellan kallaste och varmaste punkten). Analysen visar också hur förändringar i materialet eller värmeöverföringsparametrarna påverkar värmningstiden, som krävs för att uppnå en jämn temperatur i stålämnet. Följande parametrar har undersökts:

- Omgivande temperatur,
- Värmeöverföringsparametrar,
- Termiska materialegenskaper,
- Termisk utvidgningskoefficient,
- Olika dimensioner,
- Material med fastransformation.

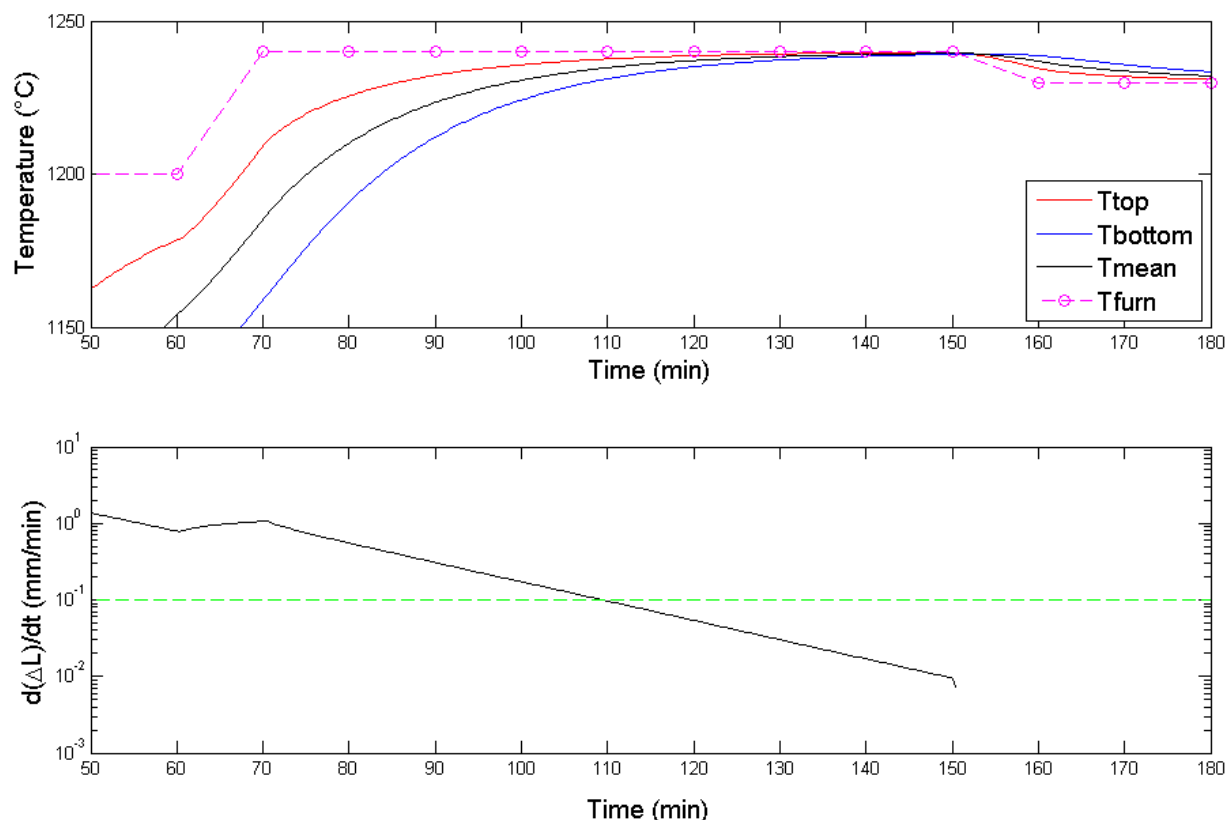
Värdet för töjningshastigheten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ i simuleringarna erhöles från följande indata: $b \times h = 201 \times 200$ mm, $T_{\infty}(t) = \text{const.} = 1\,205^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 0.8$, $h_{conv} = 100\text{ W/m}^2\text{K}$, $\rho = 7\,900\text{ kg/m}^3$, $C_p(T)$ och $k(T)$ från AISI304 [3] och $\theta(T)$ från dilatometerdata för stålsorten 3R12.

8.5.1 Omgivande temperatur

Värdet för omgivande temperatur, som användas i värmemodellen, varieras för att se om den termiska töjningshastigheten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ påverkas. Effekten av osäkerheten i $T_{\infty}(t)$ undersöktes genom att ha konstant respektive tidsberoende fördelning av $T_{\infty}(t)$. I figur 8.13 och tabell 8.4 går det att se händelseförloppet vid konstant T_{∞} inom intervallet $1180\text{--}1220^{\circ}\text{C}$. Det gav liten effekt på temperaturgradienten ∇T_{bloom} vid tiden då temperaturgradienten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ nåddes. I figur 8.14 och tabell 8.5 går det att se händelseförloppet vid tidsberoende $T_{\infty} = 1\,200^{\circ}\text{C}$ för $t = 0\text{--}60$ min, $T_{\infty} = 1\,240^{\circ}\text{C}$ för $t = 60\text{--}150$ min, and $T_{\infty} = 1\,230^{\circ}\text{C}$ för $t = 150\text{--}180$ min. Även här var effekten på temperaturgradienten ∇T_{bloom} liten vid tiden då temperaturgradienten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ nåddes.



Figur 8.13. a) Temperaturfördelning vid olika värmningstider och variationer i T_{∞} . b) Variationer i utvidgningshastighet (logaritmisk).



Figur 8.14. a) Temperaturfördelning vid olika värmningstider och tidsberoende $T_{\infty}(t)$. b) Variationer i utvidningshastighet (logaritmisk).

Tabell 8.4. Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ vid olika T_{∞} .

T_{∞} (°C)	1 180	1 205	1 225
t (min)	96	96.7	98
T _{mean} (°C)	1 173	1 199	1 220
∇T_{bloom} (°C)	8	7	6

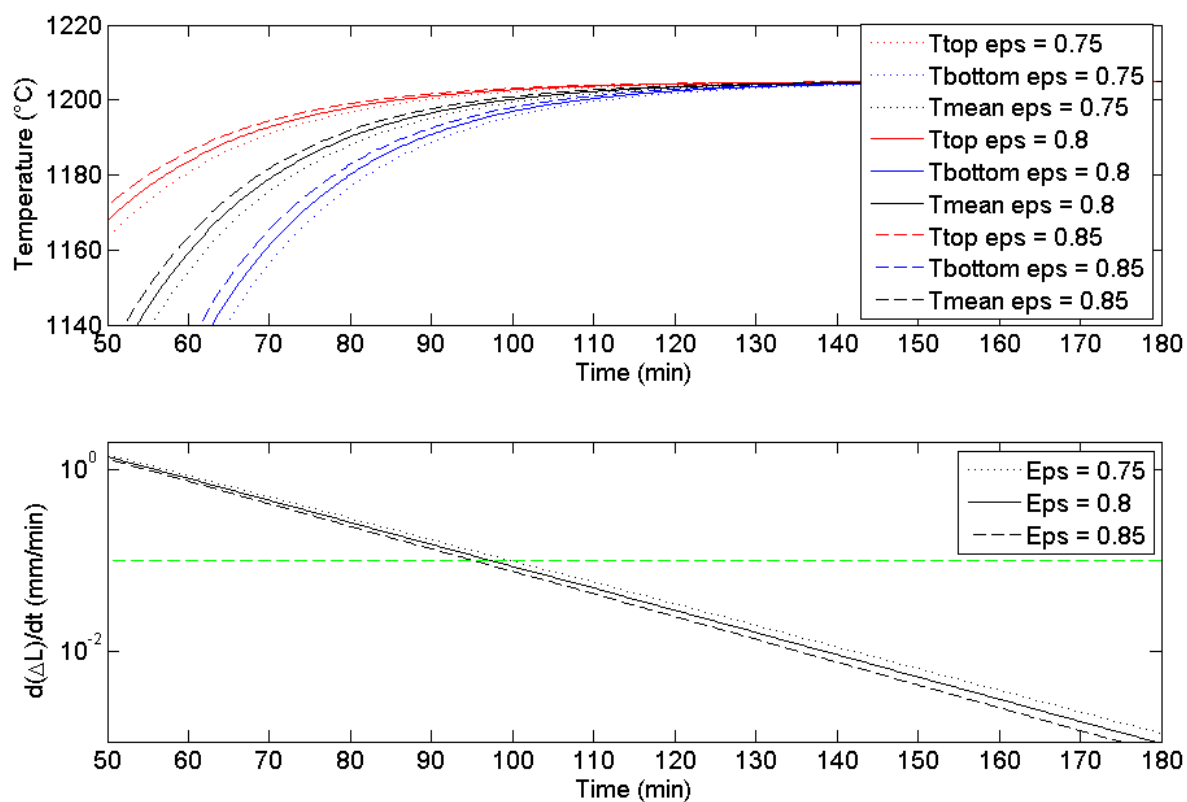
Tabell 8.5. Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ vid tidsberoende $T_{\infty}(t)$.

T_{furn} (°C)	Varierad (1 200–1 240)	1 205
t (min)	109	96.7
T _{mean} (°C)	1 234	1 199
∇T_{bloom} (°C)	6	7

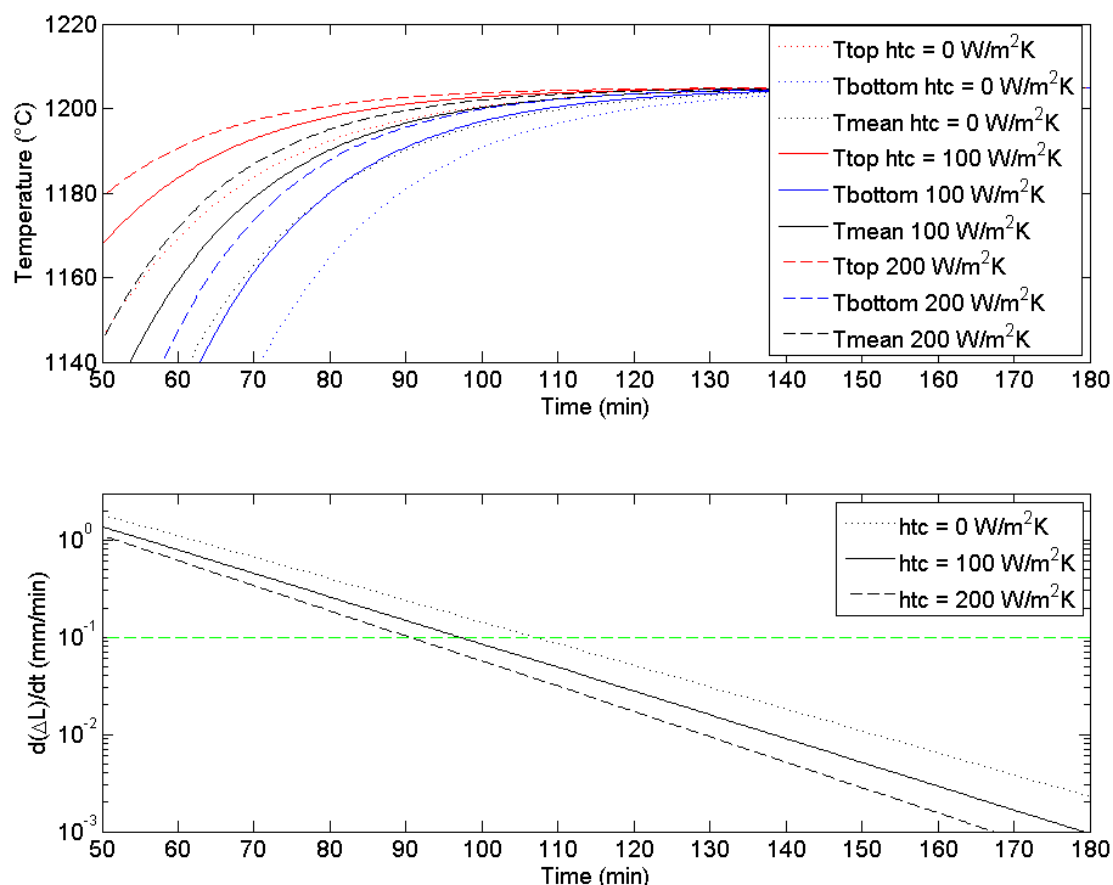
8.5.2 Värmeöverföringsparametrar

Den predikterade värmeöverföringshastigheten från ugnen till stålännets yta beror till stor del på koefficienterna för emissivitet och konvektiv värmeöverföring. I figur 8.15-16 och tabell 8.6–7 går det att se händelseförloppet vid olika ϵ (emissivitet) respektive olika h_{conv} (konvektiv värmeöverföringskoefficient). Lägre emmissivitet ger långsammare värmning av ytan och därigenom längre tid tills en jämn temperatur i stålämnet är uppnådd. Motsvarande gäller för värmeöverföringskoefficienten h_{conv} . Det gav dock liten effekt på temperaturgradienten ∇T_{bloom} vid

tiden då temperaturgradienten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ nåddes. Däremot påverkar variationer i värmeöverföringskoefficienten h_{conv} när temperaturgradienten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ kunde uppnås.



Figur 8.15. a) Temperaturfördelning vid olika emissivitet. b) Variationer i utvidgningshastighet (logaritmisk).



Figur 8.16. a) Temperaturfördelning vid olika värmeöverföringskoefficienter. b) Variationer i utvidgningshastighet (logaritmisk).

Tabell 8.6. Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ beroende på variationer i emissivitet.

ϵ (-)	0,75	0,8	0,85
t (min)	99,3	96,7	94,8
T_mean (°C)	1 199	1 199	1 199
∇T_{bloom} (°C)	7	7	6

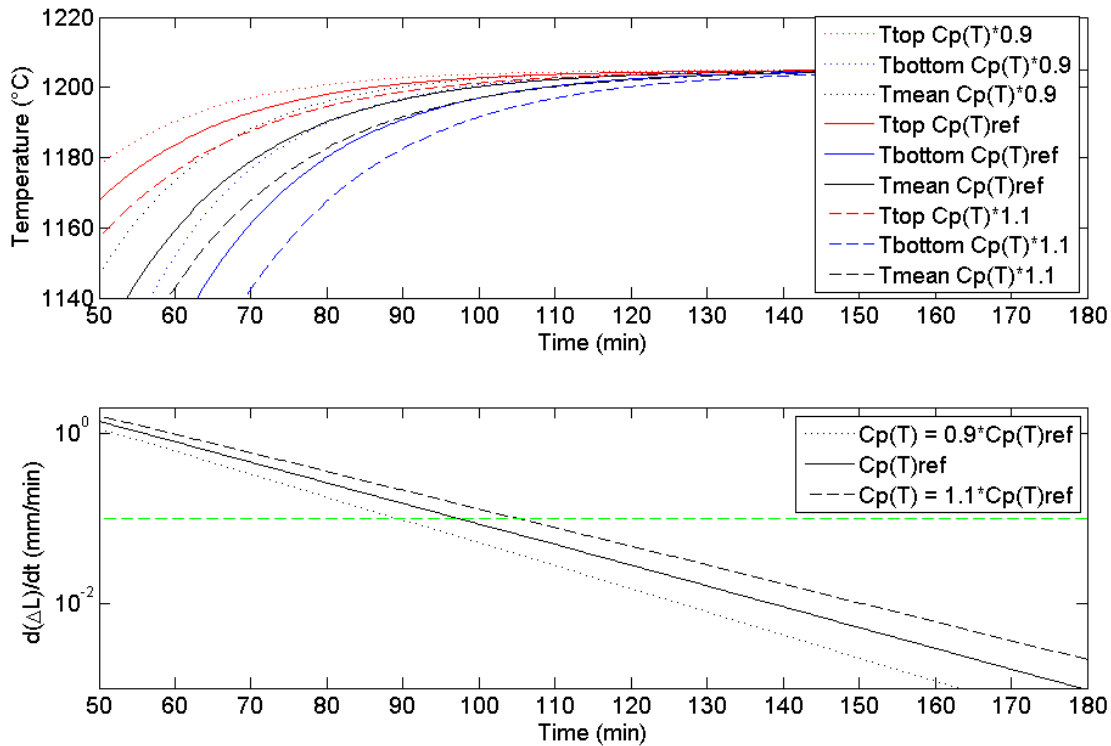
Tabell 8.7. Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ beroende på variationer i konvektiv värmeöverföringskoefficient.

htc (W/m²/K)	0	100	200
t (min)	107	96,7	90
T_mean (°C)	1 199	1 199	1 200
∇T_{bloom} (°C)	7	7	7

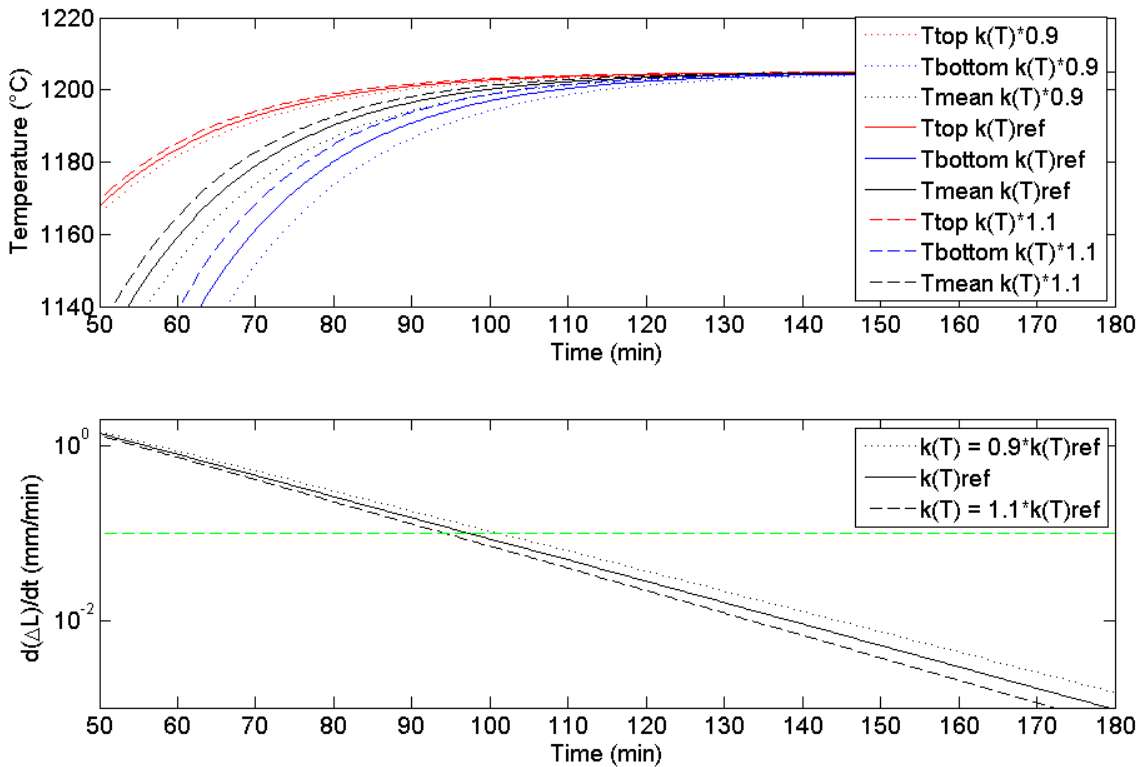
8.5.3 Termiska materialegenskaper

Det finns begränsat med termiska materialegenskaper att tillgå. Därför kan samma materialegenskaper användas för liknande stålsorter. Det finns också en naturlig variation mellan olika göt. I figur 8.17–18 och tabell 8.8–9 går det att se händelseförloppet vid olika C_p (specifik värmekapacitet) respektive olika k (värmeledningsförmåga). Högre specifik värmekapacitet betyder att mer energi krävs för att värma stålämnet, vilket leder till längre värmningstider. Högre värmeledningsförmåga betyder att värmetransporten från ytan till stålämnets inre delar går snabbare, vilket leder till kortare värmningstider. Effekten på temperaturgradienten ∇T_{bloom} vid

tiden då temperaturgradienten $\dot{\varepsilon}_{th,c}$ nåddes är dock liten. Däremot påverka variationer i C_p (specifik värmekapacitet) när temperaturgradienten $\dot{\varepsilon}_{th,c}$ kunde uppnås.



Figur 8.17. a) Temperaturfördelning vid olika specifik värmekapacitet. b) Variationer i utvidgningshastighet (logaritmisk).



Figur 1.18. a) Temperaturfördelning vid olika värmeledningsförmåga. b) Variationer i utvidgningshastighet (logaritmisk).

Tabell 8.8. *Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ beroende på variationer i C_1 då $C_p = C_1 * C_p(T)_{ref}$.*

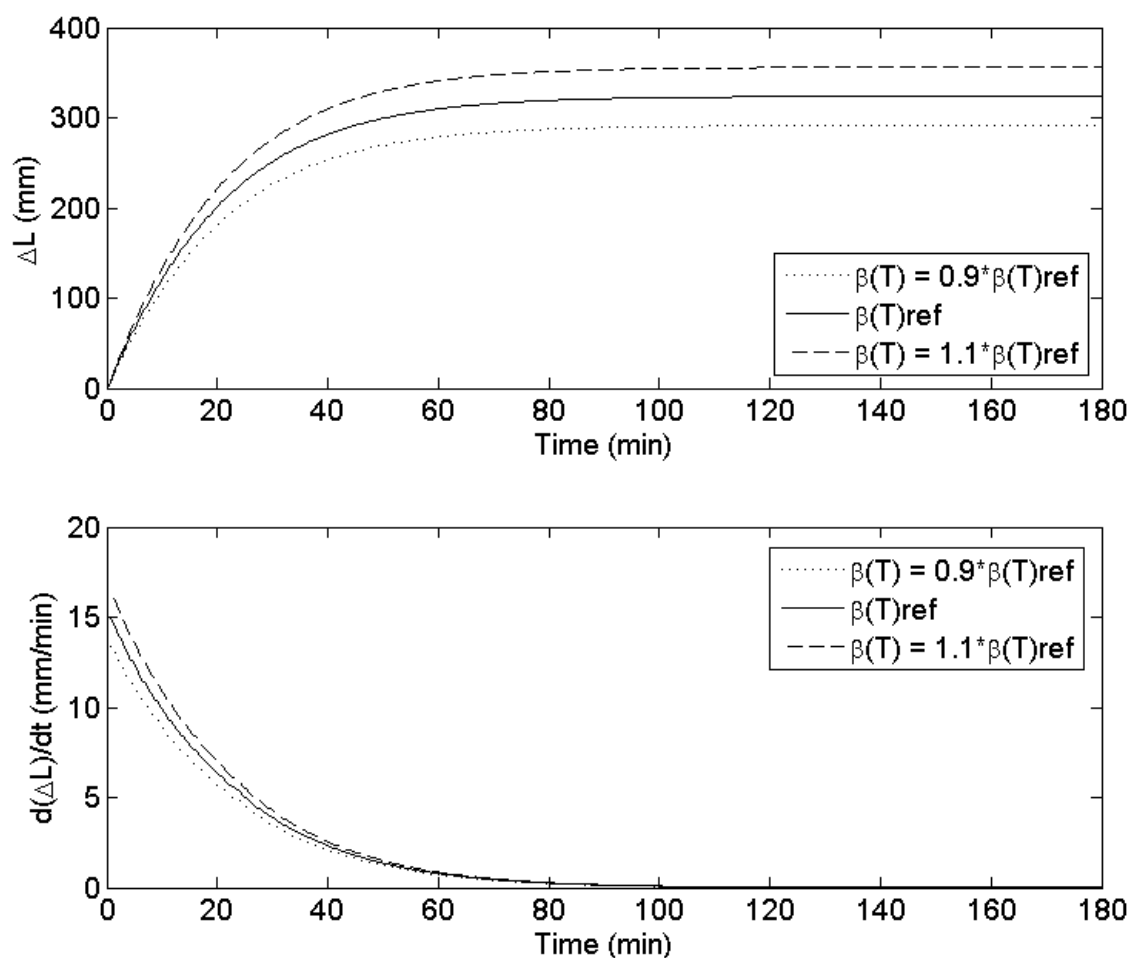
C_1 (-)	0,9	1	1,1
t (min)	89	96,7	105
T_mean (°C)	1 200	1 199	1 199
∇T_{bloom} (°C)	7	7	8

Tabell 8.9. *Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ beroende på variationer i k_1 då $k = k_1 * k(T)_{ref}$.*

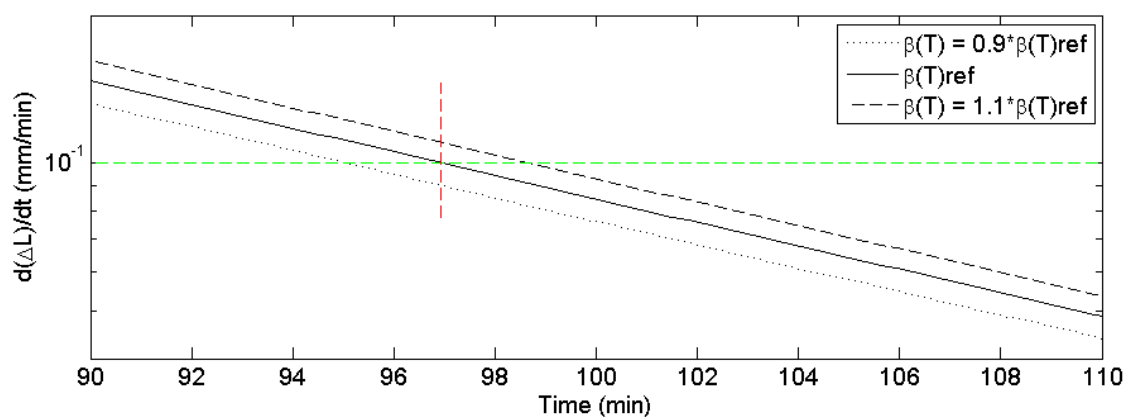
k_1 (-)	0,9	1	1,1
t (min)	101	96,7	94
T_mean (°C)	1 199	1 199	1 200
∇T_{bloom} (°C)	7	7	6

8.5.4 Termisk utvidgningskoefficient

Variationer i termisk utvidgningskoefficient $\alpha(T)$ och relativ längdförändring $\beta(T)$ har undersökts. $\beta(T)$ är skalad till en konstant faktor b_1 så att $\beta(T) = b_1 * \beta(T)_{ref}$. I figur 8.19 och tabell 8.10 går det att se händelseförloppet vid olika relativa längdförändringar $\beta(T)$. Mindre längdförändring $\beta(T)$ gör att temperaturgradienten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ erhålls tidigare, se figur 8.20. Om man anger lägre värden på längdförändring $\beta(T)$ än vad som är möjligt finns det en risk att värmningstiden blir för kort.



Figur 8.19. a) Olika relativa längdförändringar $\beta(T)$. b) Variationer i utvidgningshastighet.



Figur 8.20. Variationer i utvidgningshastighet (logaritmisk).

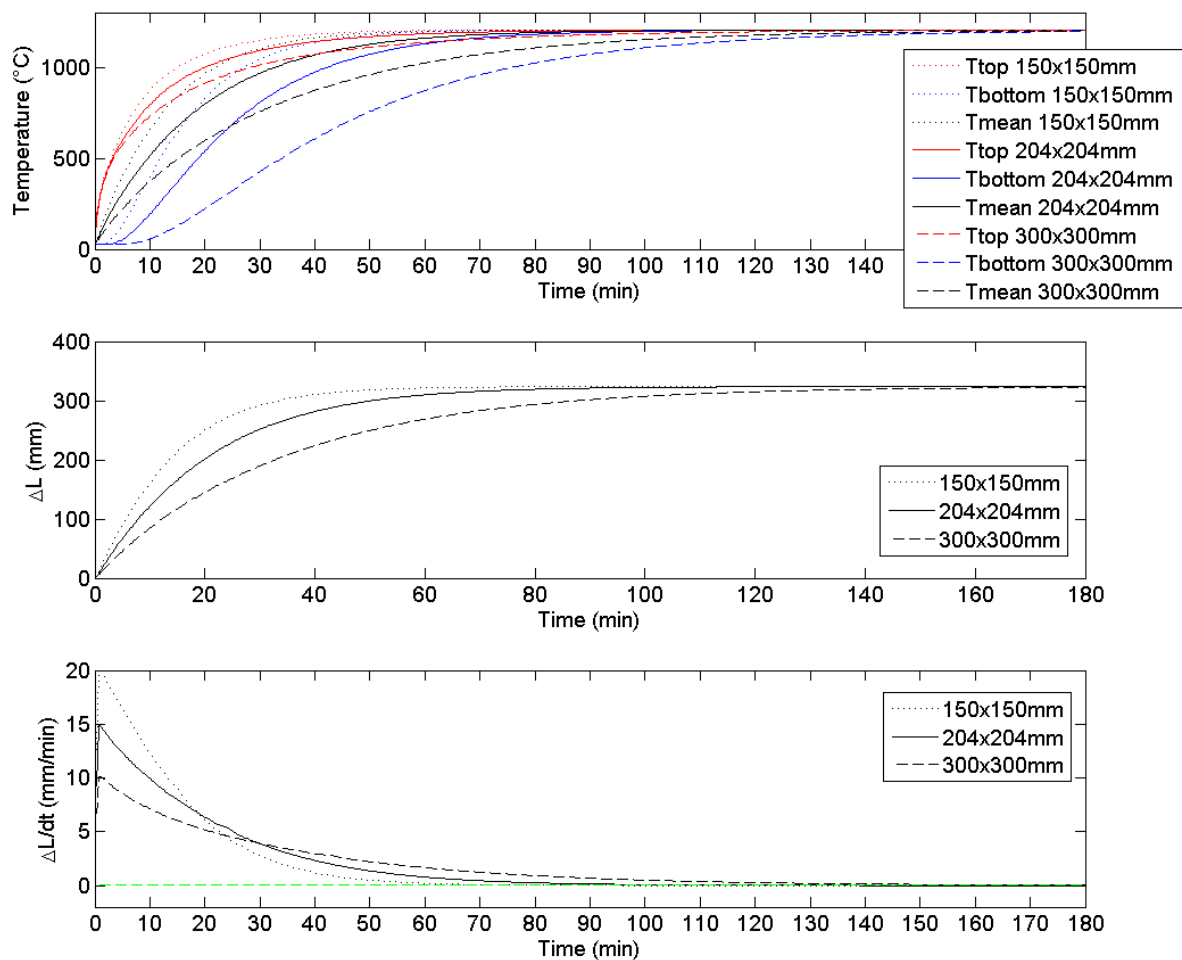
Tabell 8.10. Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ beroende på variationer i den relativa längdförändringen i b_1 då $\beta(T) = b_1 \cdot \beta(T)_{ref}$.

b_1 (-)	0,9	1	1,1
t (min)	95	96.7	98.5
T_mean (°C)	1 199	1 199	1 200
∇T_{bloom} (°C)	8	7	7

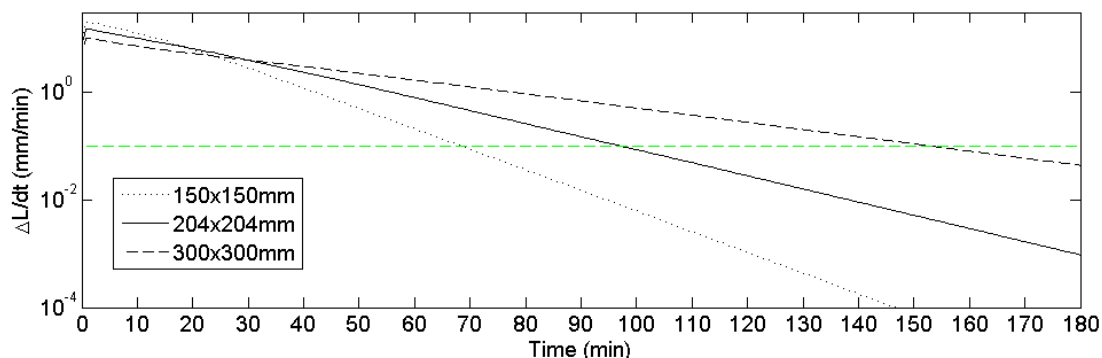
8.5.5 Olika dimensioner

Temperaturgradienten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ baseras på ämnesdimensionen 201x200 mm (varm dimension 204x204 mm). Om värmemodellen matas med ett tvärsnitt för stålämnet på 300x300 mm och granskar temperaturfördelningen för tiden då vi når $\dot{\epsilon}_{th,c}$ finner man att temperaturgradienten $\nabla T_{bloom} = 15^\circ\text{C}$. Stålämnet har sålunda inte nått en jämn temperaturfördelning i detta fall. För ett tunnare stålämne nås en jämn temperatur innan töjningshastigheten har reducerats vid $\dot{\epsilon}_{th,c}$. I figur 8.21–22 och tabell 8.11 går det att se händelseförloppet vid olika tvärsnitt.

Vid tiden då $\dot{\epsilon}_{th,c}$ erhålls är värmningshastigheten för alla tre tvärsnitt densamma ($0,33^\circ\text{C}/\text{min}$), men värmningshistoriken är olika. Det största tvärsnittet värms långsammare eftersom yta-till-mass-förhållandet är mindre. Detta betyder att finare dimensioner har en flackare värmningskurva och en flackare utvidgningshastighetskurva. Vid en given utvidgningshastighet är stålämnets temperatur lägre för ett stålämne med större tvärsnitt. För ett 300x300 mm stort stålämne med en maximal temperaturgradient på $\nabla T_{bloom} = 7^\circ\text{C}$ resulterar i att utvidgningshastigheten reduceras till $d(\Delta L)/dt = 0,05 \text{ mm}/\text{min}$. För ett 150x150 mm stort stålämne med samma temperaturgradient nås redan vid $d(\Delta L)/dt = 0,195 \text{ mm}/\text{min}$.



Figur 8.21. a) Temperaturfördelning vid olika tvärsnitt. b) Variationer i längdförändring. c) Variationer i utvidgningshastighet.



Figur 8.22. Variationer i utvidgningshastighet (logaritmisk).

Tabell 8.11. Temperaturfördelning för $\dot{\epsilon}_{th,c}$ beroende på variationer i olika tvärsnitt.

Bloom side length (mm)	150	204	300
t (min)	68	96,7	153
T _{mean} (°C)	1 201	1 199	1 194
∇T_{bloom} (°C)	4	7	15

8.5.6 Material med fastransformation

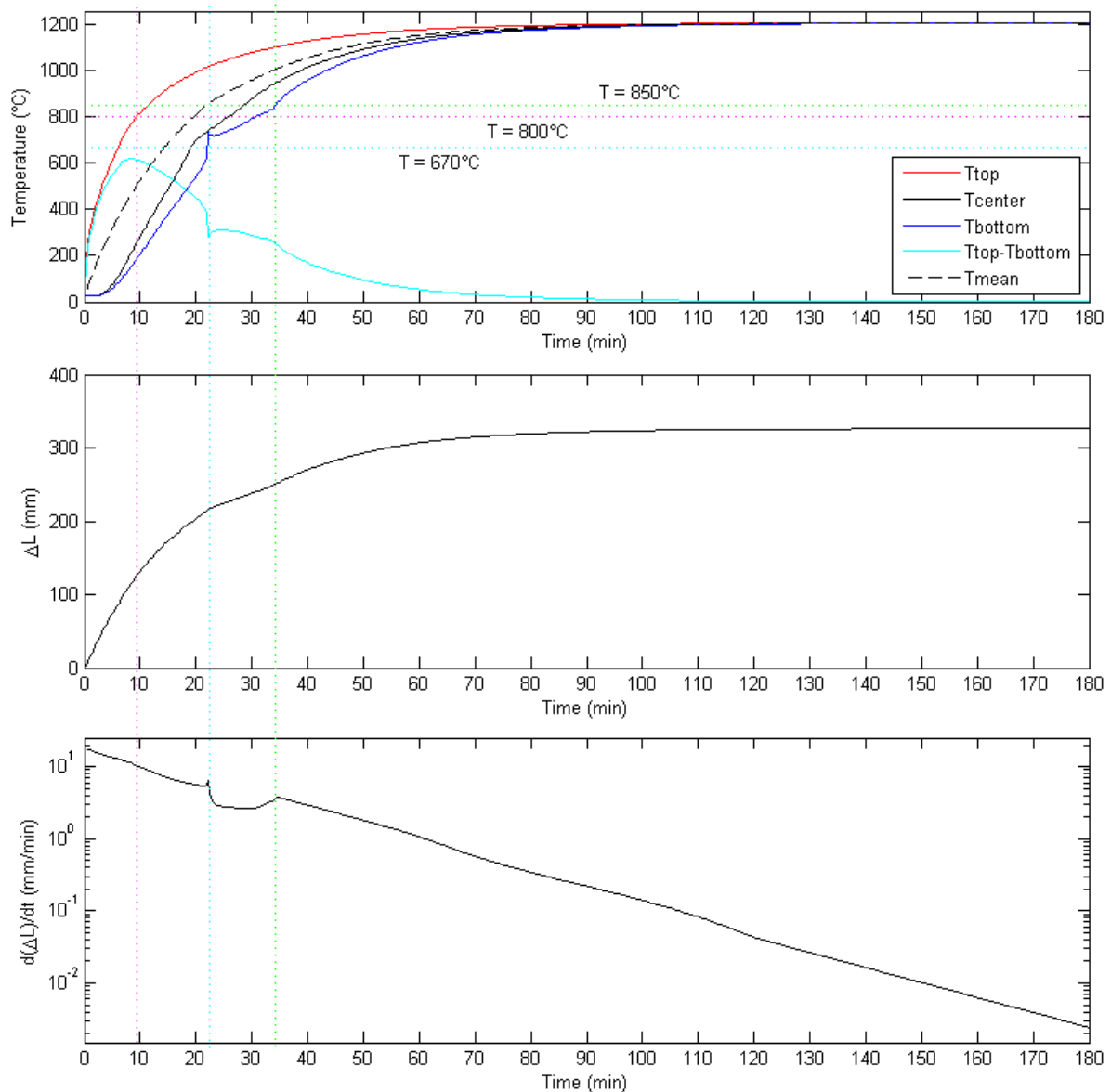
Värmemodellen är anpassad för ett material som genomgår en fasomvandling under värmningen. I detta fall analyserades ett martensitiskt rostfritt kromstål 13C26. Fasomvandlingen kan ses i både $C_p(T)$ och $\beta(T)$, vilket betyder att resultatet i beräknad utvidgning och utvidgningshastighet kommer att vara en kombination av snabba variationer i $\beta(T)$ och snabba förändringar i värmningskurvas toppar i $C_p(T)$.

I figur 8.3–4 (från dilatometermätning) går det att se:

- Exotermisk reaktion vid 670°C: karbidupplösning eller omvandling från austenit till perlit
- Endotermisk reaktion vid 750°C: Curie-övergång
- Endotermisk reaktion vid 820°C: fasomvandling från ferriti till austenit
- Endotermisk reaktion vid 1 180°C: möjlig karbidupplösning.

Förutom den stora toppen i C_p vid 670°C sker det en stor fasomvandling vid 820°C. Inom temperaturintervallet 800–850°C kan stora värden på $C_p(T)$ observeras och en negativ relativ längdförändring.

I figur 8.23 går det att se händelseförloppet då stålämnets yta når 800°C efter 10 minuters värmning och bottenytan passerar 850°C efter 33 minuter. Detta betyder att det tar mer än 20 minuter innan alla delar av stålämnet har passerat genom temperaturintervallet för fasomvandlingen. En minskning av utvidgningshastigheten uppträder under denna tidpunkt och efter att stålämnet nått 850°C påbörjas utvidgningen på nytt. Det är inte lätt att urskilja fasomvandlingen i kurvan för utvidgning, men den framkommer tydligt i kurvan utvidgningshastigheten. Därutöver går det att se hur förändring från exotermisk till endotermisk reaktion (670–750°C) uppträder som en topp och en efterföljande snabb minskning av utvidgningshastigheten.



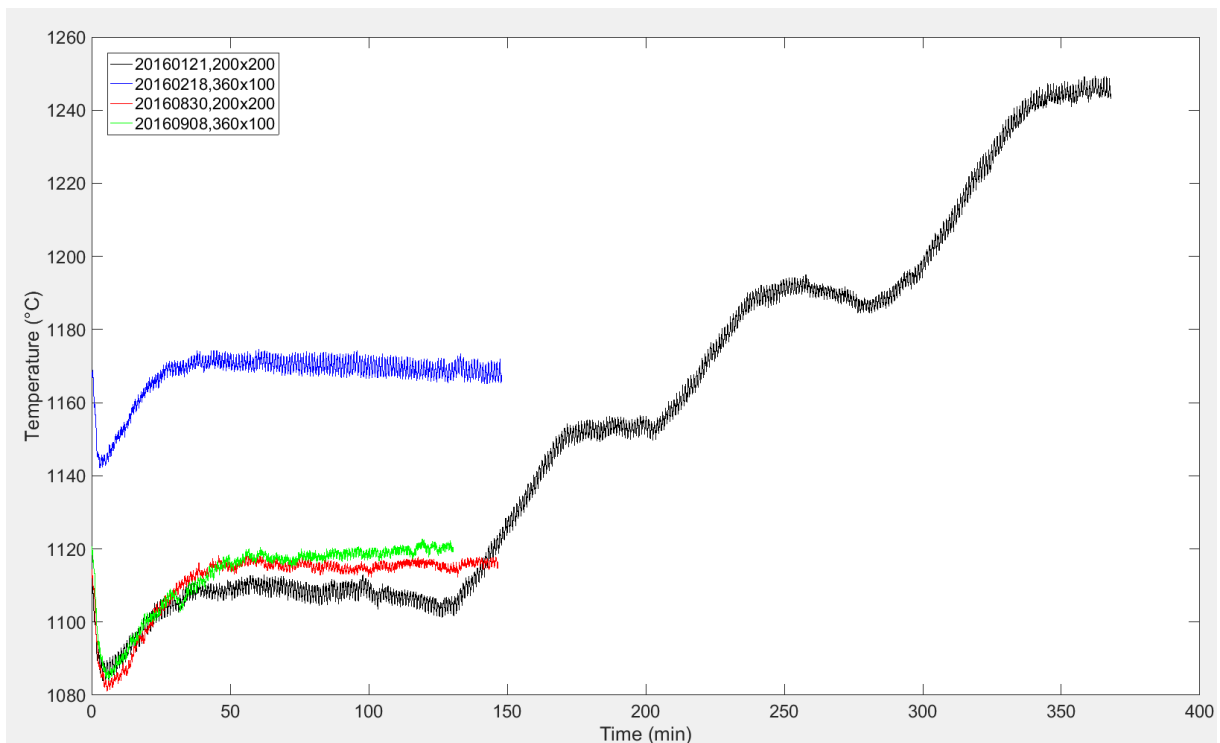
Figur 8.23. a) Temperaturfördelning. b) Utvidgningsförändring. c) Utvidgningshastighet (logaritmisk).

Den kritiska töjningshastigheten $\dot{\epsilon}_{th,c}$ för 3R12 nås då $\nabla T_{bloom} = 6$ för 13C26. Detta innebär att töjningshastigheten fortfarande är giltig även om modellen tillämpas på ett material som har en fasomvandling under uppvärmningen. Försiktighet bör iaktas om data extraheras vid temperaturer nära intervallet för fasomvandlingen eftersom kurvan för utvidgningshastigheten uppvisar betydande förändringar i denna region.

8.6 Ugnstemperatur som indata

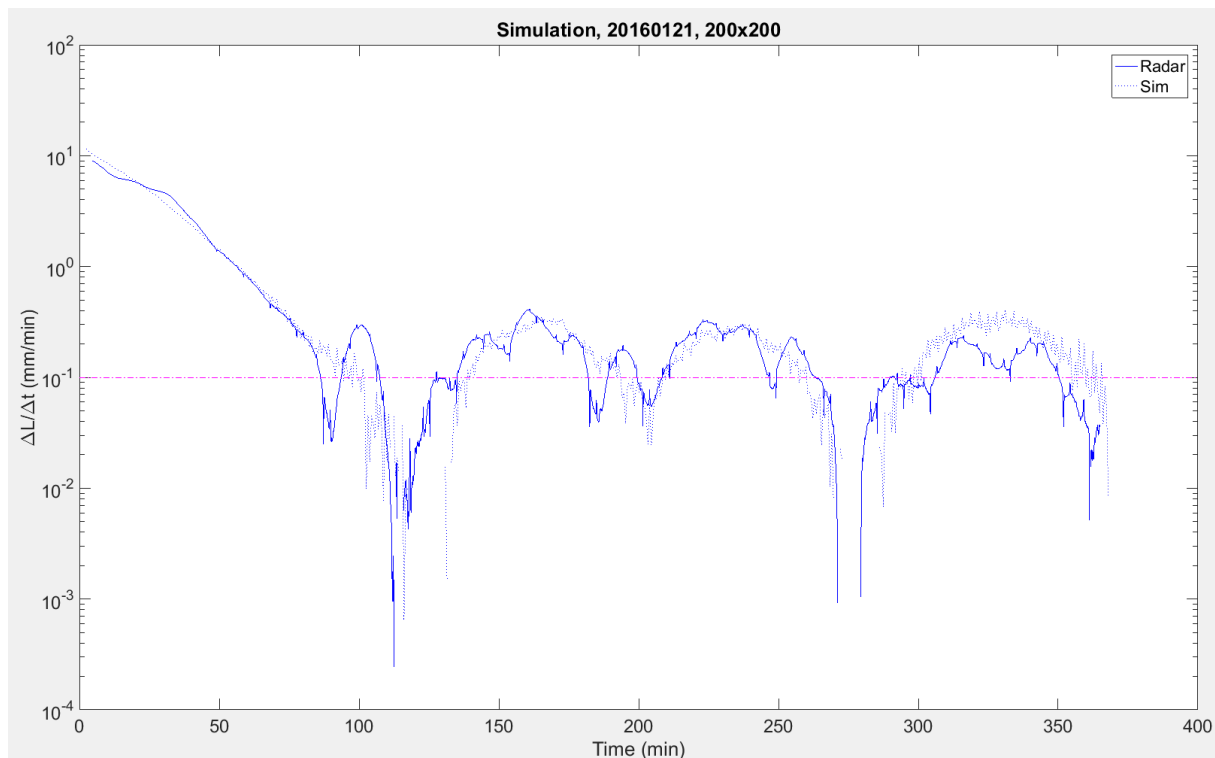
I stycket 8.2–8.5 analyserades predikterade uppvärmningskurvor utifrån temperaturmätningen med ett loggningsämne och medeltemperatur på $1\,205^{\circ}\text{C}$. I verklig produktion används dock ett ugnsgreglersystem (Argus) för att övervaka och reglera ugnstemperaturen. För att visa huruvida Argus-temperatur direkt kan användas som indata till modellen beräknade modellen också utvidgning med Argus-temperatur. Värmeöverföringsparametrarna i modellen var satta till $\epsilon=0.8$ och $h_{conv}=100\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Vid fyra tillfällen genomfördes fyra radarmätningar med ett stillastående stålämne i zon 1. Fyra ämnen med två olika dimensioner, 200x200 mm och 360x100 mm mättes. Temperaturprofiler i de fyra tillfällena visas i figur 8.24. Temperaturen sjunker i början av mätningen i alla fyra fall eftersom ugnsluckan då öppnades för att mata in ämnet. I och med att ämnena låg i zon 1 användes en medeltemperatur av TC1 och TC2 som ugnstemperatur i zon 1. För datumen 2016-02-18, 2016-08-30 och 2016-08-09 sattes ett konstant börvärde för ugnstemperaturen, medan för 2016-01-21 sattes ett stigande börvärde. I figur 8.25 går det att observera en oscillation i temperaturprofilerna, vilket beror på att ugnen har fluktuerande värmning (med oscillerande gaspådrag) och att ugnsmiljö inte var homogen.



Figur 8.24. Temperaturprofiler i zon 1 i ugn 62 vid fyra tillfällen.

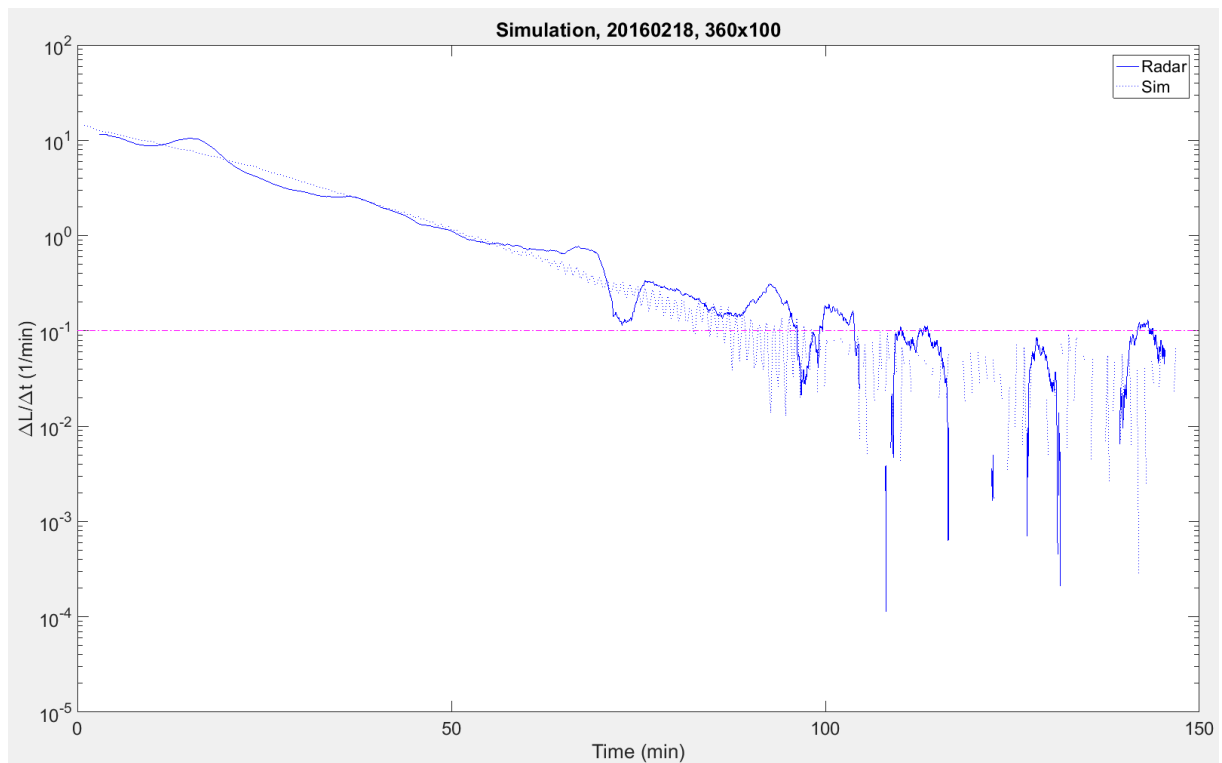
I figur 8.25 visas mätningen från 2016-01-21 med utvidgningshastigheten från radarmätningen och modellen med en stigande ugnstemperatur. Under den första timmen sjunker den simulerade utvidgningshastigheten kontinuerligt beroende på att ämnets temperatur ökar. Radarmätningen visar en snarlik förändring på utvidgningshastigheten inom första timmen. På grund av en stigande temperatur så varierar utvidgningshastigheten senare i figuren. Radarmätningarna och modellen uppvisar dock en likartad trend.



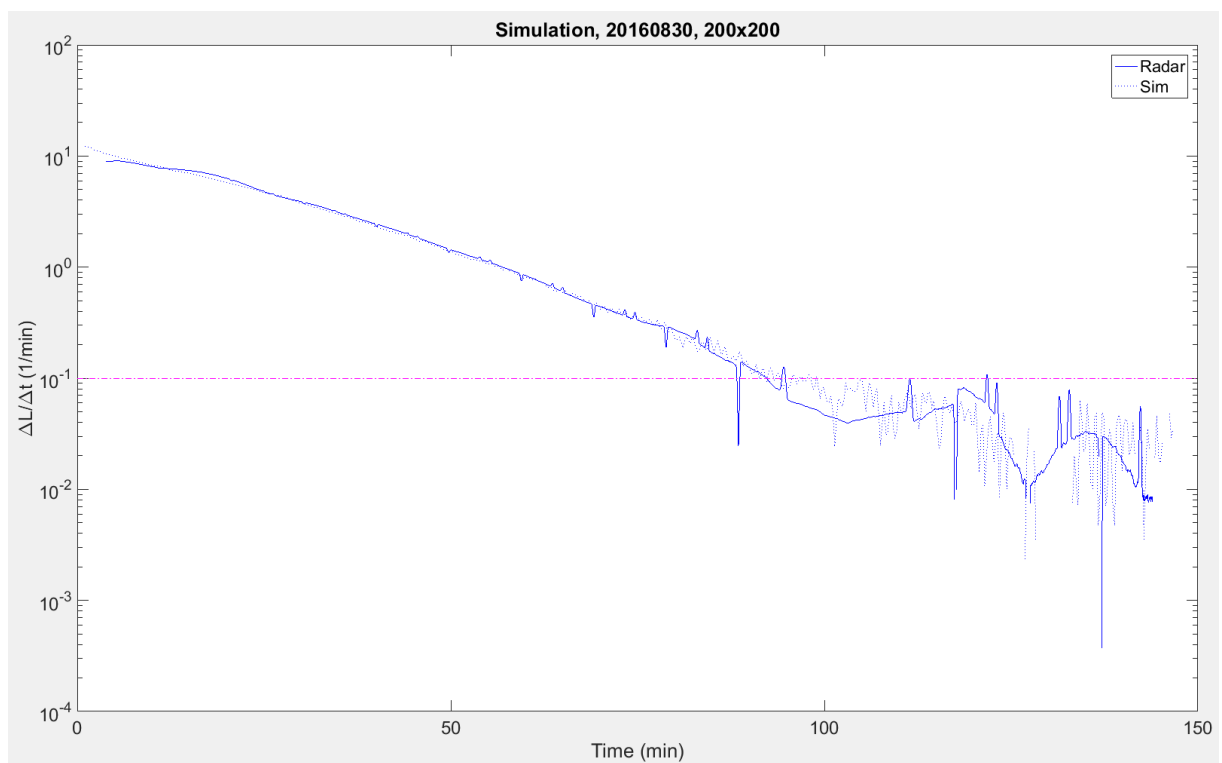
Figur 8.25. Simulerad och radarmätt utvidgningshastighet vid 2016-01-21 (mörkblå=mätt, ljusblå=simulerad). Den rosa kurvan representerar en utvidgningshastighet på 0,1 mm/min.

Figureorna 8.26-28 visar utvidgningshastigheten vid en konstant ugnstemperatur. I dessa fall så användes ett konstant börvärde i Argus-systemet. I alla fyra figurer (8.25-8.28) så följer de simulerade kurvorna ganska bra de radarmätta kurvorna i början. Däremot börjar simulerad kurva oscillera när utvidgningshastigheten närmar sig 0,1 mm/min. Detta beror på att utvidgningshastigheten blir allt långsammare när ämnens temperatur närmar sig ugnstemperaturen och då blir noggrannheten sämre. I sista bilden är den simulerade utvidgningshastigheten lägre än den radarmätta utvidgningshastigheten.

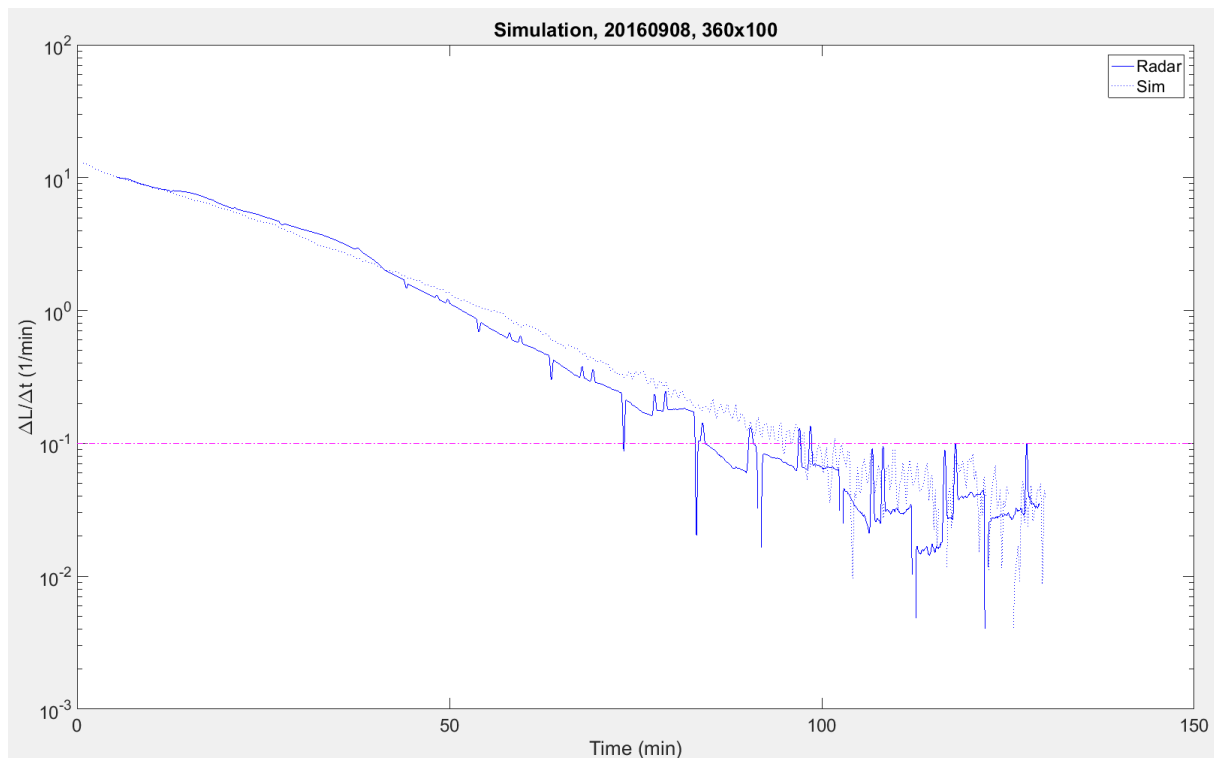
Överlag så visar resultaten att temperaturdata från Argus direkt kan användas som indata till modellen utan att orsaka stora fel. Kurvanpassningen mellan de predikterade och mätta kurvorna kan förbättras med bättre filtrering av radardata och en noggrannare användning av Argus-temperatur.



Figur 8.26. Simulerad och radarmätt utvidgningshastighet med tiden vid 2016-02-18.



Figur 8.27. Simulerad och radarmätt utvidgningshastighet med tiden vid 2016-08-30.



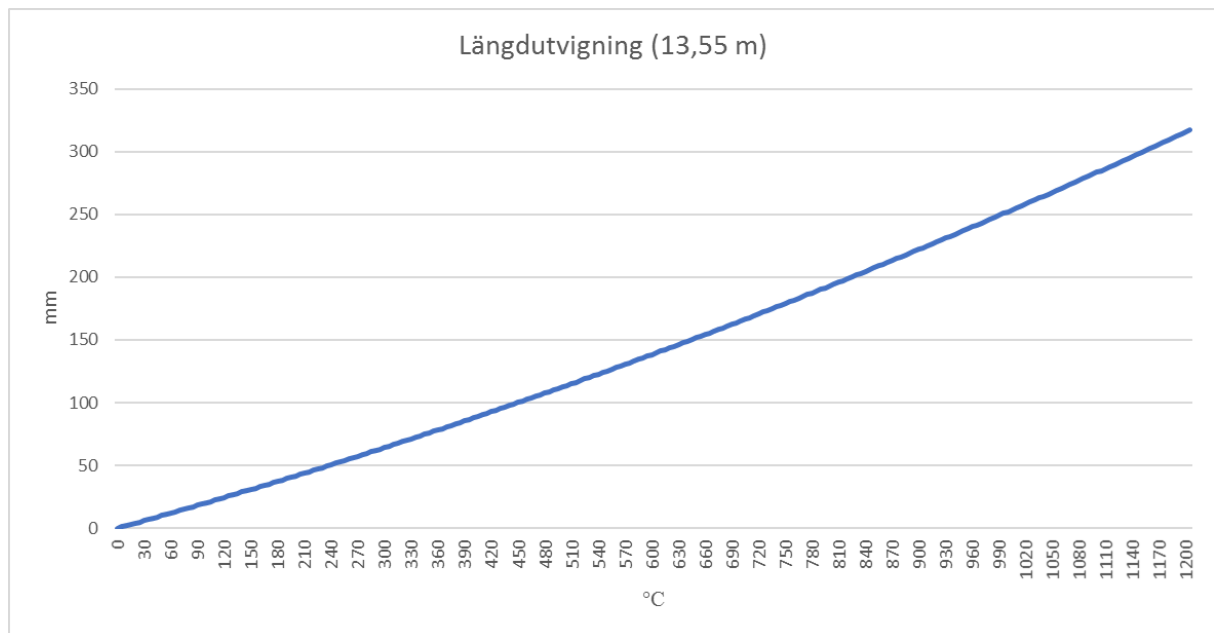
Figur 8.28. Simulerad och radarmätt utvidgningshastighet med tiden vid 2016-09-08.

8.7 Generellt utvidningssamband

Figur 8.23 visar att det går att använda värmemodellen för både martensitiskt 13C26 (med fasomvandling) och austenitiskt stål 3R12 (utan fasomvandling). När den termiska töjningshastigheten på $\dot{\epsilon}_{th,c}$ nås så erhålls $\nabla T_{bloom} = 6$ för respektive stålsort. Utvidgningen är inte ekvivalent vid temperaturen för fasomvandlingen, men både före och efter fasomvandlingen så är utvidgningen relativt lika mellan 3R12 och 13C26. Om man utgår från en stor mängd austenitiska stålsorter så ges den generella formeln för den termiska utvidgningskoefficienten av

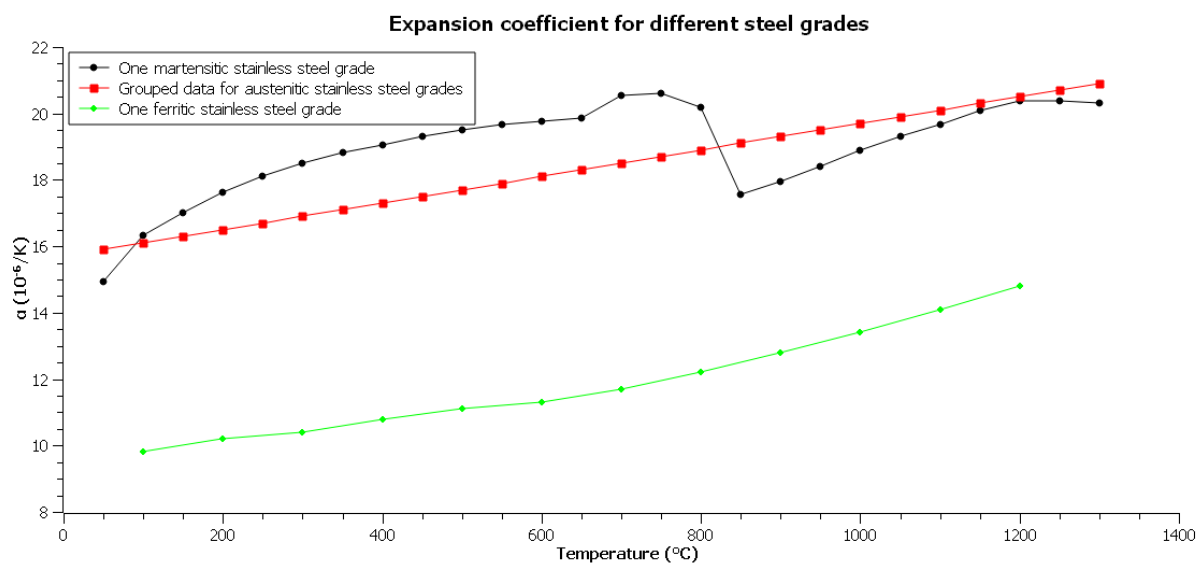
$$\alpha(T) = [15.8 + 0.004 \times (T - 298)] \times 10^{-6} \text{ (1/Kelvin)}$$

Denna formel kan således användas initialt innan grupper av och enskilda stålsorter har mätts upp med dilatometer. Det innebär att ett eventuellt optimeringssystem snabbt kan implementeras. För ökad noggrannhet och optimering av energiförbrukning krävs dock noggrannare uppmätning. Figur 8.29 redovisar längdutvidgningen för ett generellt fiktivt 13,55 m långt stålämne. Grafen i figur 8.29 går inte direkt att jämföra med figur 8.23b eftersom temperatur och tid inte går i samma takt, men utvidgningen når i båda fallen ca 320 mm vid 1 205°C.



Figur 8.29. Längdutvidgning vid olika temperaturer (för ett stålämne som är 13,55 m).

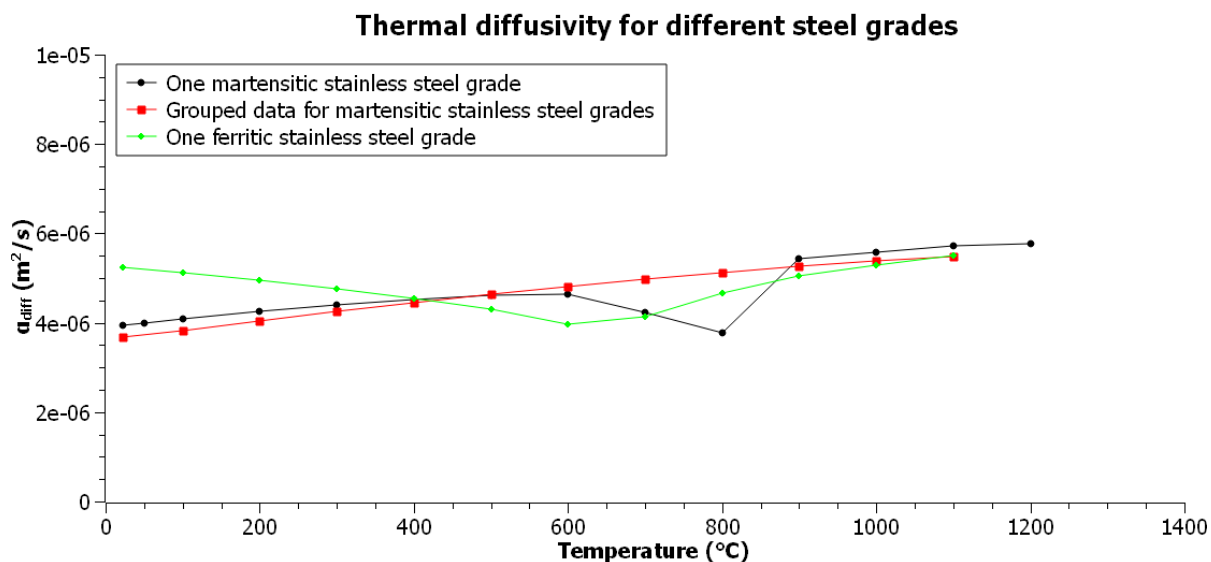
I figur 8.30 visas utvidgningskoefficienten för Sandviks tre stålsorter. För austenitiska stål så följer många stålsorter liknande trend vad gäller värmeegenskaper, vilket inte gör stor skillnad på uppvärmningstid enligt prediktering från modellen. Deras värmeegenskaper kan därför grupperas och representeras med den röda kurvan i figur 8.30. Däremot beter sig martensitiska och ferritiska stålsorter annorlunda. Till exempel, om man granskar den svarta kurvan för en av Sandviks martensitiska stålsorter så sjunker utvidgningskoefficienten vid 800°C på grund av fasomvandling. Den gröna kurvan representerar en av Sandviks ferritiska stålsorter. Den ligger genomgående lägre än de två andra stålsorter och ger mindre utvidgning under uppvärmning. I och med att olika stålsorter ger varierade utvidgningsbeteenden så borde radarmätningarna kunna skilja på material och ha en stor potential att detektera eventuell fasomvandling i ett material.



Figur 8.30. Expansionskoefficienten för Sandviks tre olika stålsorter (austenitiskt=röd, martensitiskt=svart och ferritiskt=grön).

8.8 Uppvärmningstid för olika stålsorter

Material med varierande värmeegenskaper (se figur 8.30) behöver olika uppvärmningstider i en ugn för att nå samma måltemperatur. Det är viktigt att förstå hur stor skillnaden är i uppvärmningstid för stålsorter med olika värmeegenskaper. Tre av Sandviks stålsorter, austenitisk, ferritisk och martensitisk stålsort, undersöktes för att jämföra deras uppvärmningstid i Ugn62, se figur 8.31.



Figur 8.31. Värmediffusivitet för tre stålsorter (austenitiskt=röd, martensitiskt=svart och ferritiskt=grön).

Det som bestämmer värmeöverföring inuti ett material är värmediffusiviteten (m^2/s) som visas i ekvationen nedan. De tre stålsorternas värmediffusiviteter visas i figur 8.31.

$$\alpha_{diff} = \frac{k}{\rho C_p}$$

där k är värmeledningsförmåga ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), ρ är densitet (kg/m^3) och C_p är den specifika värmekapaciteten ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$).

Den ferritiska stålsorten har en högre värmediffusivitet än de andra två vid en lägre temperatur, se figur 8.31. Däremot ligger kurvorna för den ferritiska och martensitiska stålsorten under de grupperade austenitiska stålsorterna mellan 600 och 850°C. De tre kurvorna närmar sig varandra vid en hög temperatur.

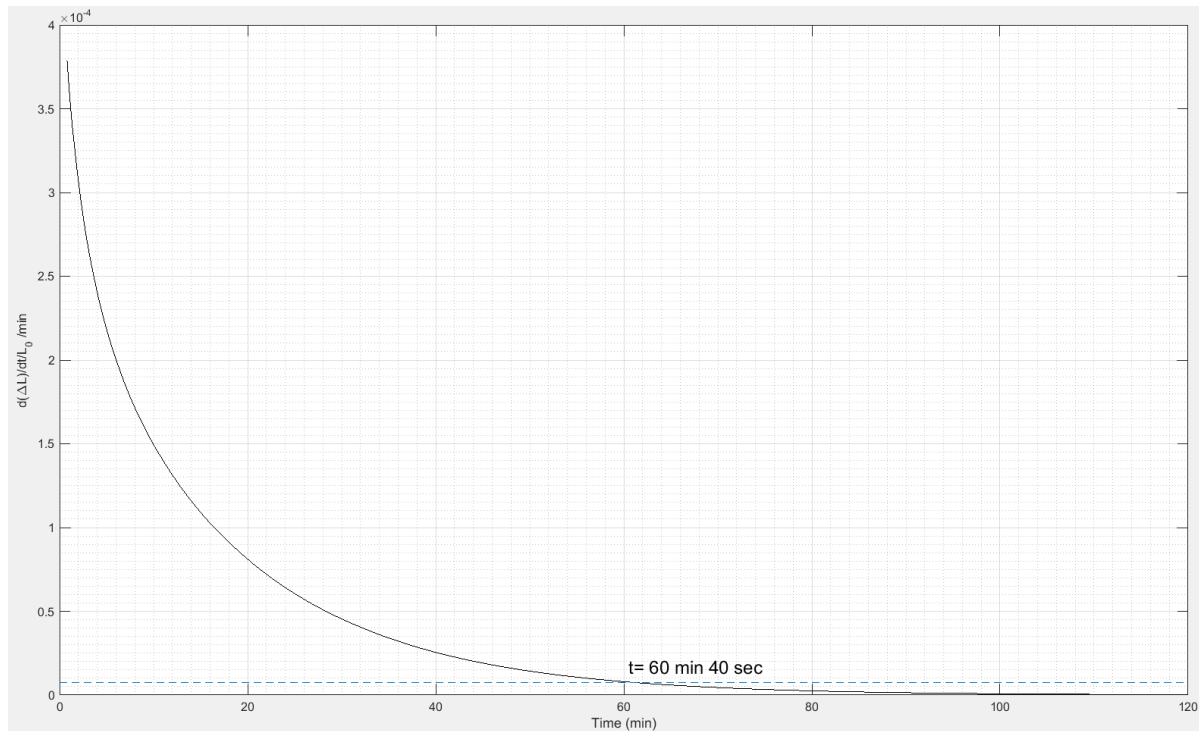
I syfte att jämföra uppvärmningstid för de tre stålsorterna, enligt figur 8.31, så skapades ett fiktivt referensämne. I och med detta så används ett tvådimensionellt fyrkantigt ämne med en dimension på 204x204 mm och en initiallängd på 13 m. Vi ska jämföra två fall av chargering till Ugn62:

- Fall 1: ämnet har en initialtemperatur på 1 000°C (varmchargering i Ugn62)
- Fall 2: ämnet har en initialtemperatur på 25°C (kallchargering i Ugn62)

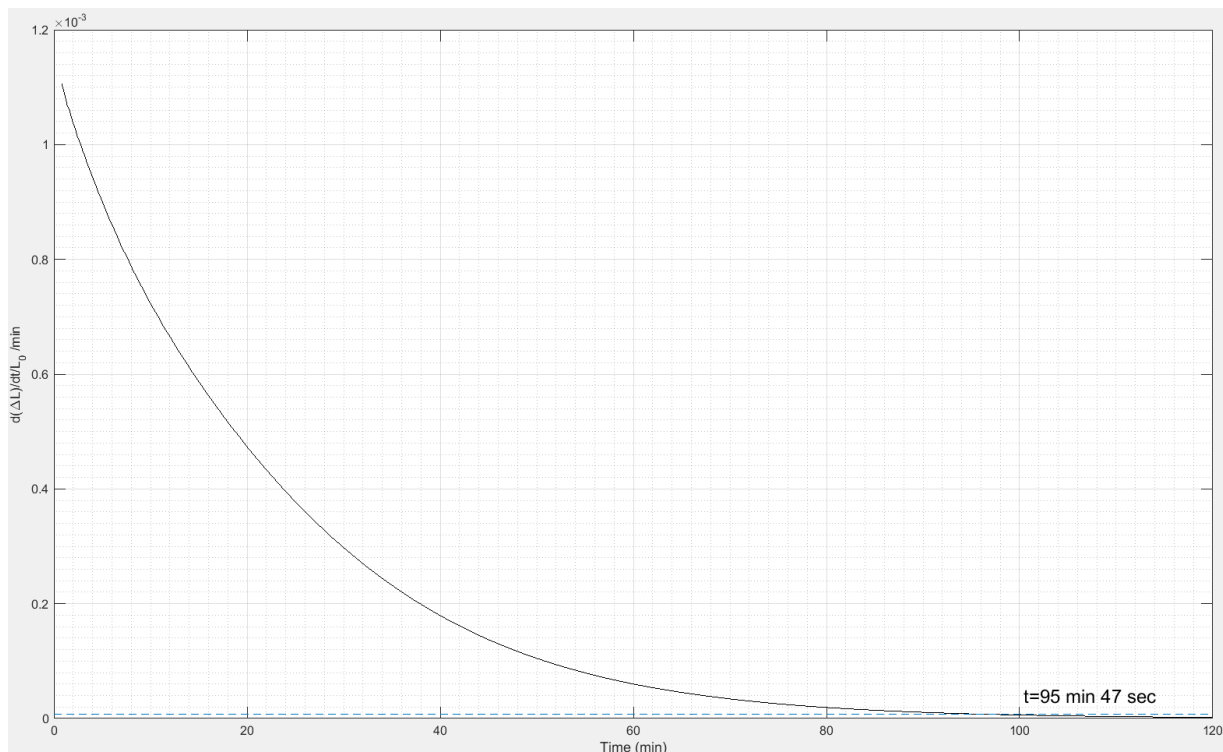
Ugnstemperaturen är homogen och sätts till 1 200°C. Värmeöverföringskoefficienten och emissiviteten sätts till 100 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ respektive 0,8. Uppvärmningstiden beräknas från i början av uppvärmning till den tid när töjningshastigheten har sjunkit till $7,69 \times 10^{-6}$ /min, dvs. 1 mm/min för en

ämneslängd på 13 m. Detta kriterium används eftersom när töjningshastigheten har sjunkit till $7,69 \times 10^{-6}$ /min så betraktas ämnet vara homogent uppvärmt.

Figur 8.32-33 visar uppvärmningskurvor för de grupperade austenitiska stålsorterna med två initialtemperaturer genom ämnet. I både fall 1 och 2 sjunker töjningshastigheten med tiden eftersom ämnets temperatur stegvis närmar sig ugnstemperaturen. Det tar 60 min 40 sek för att nå en homogen temperatur ($7,69 \times 10^{-6}$ /min) om chargingstemperaturen är 1 000°C. Det tar 90 min 47 sek att nå en homogen temperatur om chargingstemperaturen är 25°C. På liknande sätt kan man prediktera uppvärmningstiden för andra stålsorter.



Figur 8.32. Töjningshastighet av de grupperade austenitiska stålsorterna med en initialtemperatur på 1 000°C. Den blå streckade linjen indikerar en töjningshastighet på $7,69 \times 10^{-6}$ /min. Skärningspunkten mellan de två kurvorna anger den tid då uppvärmningen är färdig.



Figur 8.33. Töjningshastighet av de grupperade austenitiska stålsorterna med en initialtemperatur på 25°C. Den blå streckade linjen indikerar en töjningshastighet på $7,69 \times 10^{-6}$ /min. Skärningspunkten mellan de två kurvorna anger den tid då uppvärmningen är färdig.

Tabell 8.11 visar uppvärmningstiderna för olika stålsorter med olika initialtemperaturer för ämnet. För det varmchargerade ämnet med en initialtemperatur på 1 000°C så är uppvärmningstiden för de grupperade austenitiska stålsorterna och den ferritiska stålsorten lika, ca 1 timme. Däremot behöver den martensitiska stålsorten 7 minuter längre tid uppvärmningstid. I det fall där initialtemperaturen är 25°C så har de grupperade austenitiska stålsorterna och den ferritiska stålsorten också likande uppvärmningstid medan den martensitiska stålsorten kräver ytterligare 10 minuter längre tid uppvärmningstid. Dessutom är temperaturskillnaden mellan topp- och bottenytan mindre än 7 grader när töjningshastigheten sjunker till $7,69 \times 10^{-6}$ /min.

Tabell 8.12. Uppvärmningstider för olika stålsorter med två initialtemperaturer på ämnet. Temperaturskillnaden mellan topp- och bottenytan visas också när töjningshastigheten sjunker till $7,69 \times 10^{-6}$ /min.

Stålsort		Uppvärmningstid [hh:mm:ss]	$T_{\text{topp}} - T_{\text{botten}}$ (°C)
Fall 1			
1 000–1 200°C	En martensitisk stålsort	01:07:22	5,83
	Grupperade austenitiska stålsorter	01:00:40	6,55
	En ferritisk stålsort	00:58:53	6,79
Fall 2			
25–1 200°C	En martensitisk stålsort	01:46:31	5,72
	Grupperade austenitiska stålsorter	01:35:47	6,44
	En ferritisk stålsort	01:36:21	6,70

I verklig produktion på Sandvik är stålämnena i Ugn62 varmchargerade med en initialtemperatur på omkring 1 000°C. Detta tyder på att skillnaden på uppvärmningstider för olika varmchargerade

stålsorter borde vara inom 10 minuter. Om man använder en "klarknappsmarkering" där den mätta töjningshastigheten understiger $7,69 \times 10^{-6}$ /min så kommer alla tre stålsorterna vara färdigvärmda.

Sammanfattningsvis så ska modellen och radarn samverka för att bestämma huruvida ett ämne är färdigvärt eller ej. Modellen beräknar temperaturfördelningen i ett ämne och den kritiska töjningshastigheten. Med hjälp av dessa beräkningar och ämnets längd kan radarn mäta storleken på töjningshastigheten eller indikera när töjningshastigheten underskrider det kritiska värdet, vilket möjliggör implementation av en så kallad "klarknappsmarkering".

8.9 Referensmätning och online-mätning

I utvärderingen av modellen har fokus initialt varit på referensmätning av ett stillaliggande stålämne. Ämnet har legat stilla under mätningen, med undantag för så kallade "joggningar" som syftar till att minska friktionen mot ugnshärden och minska spänningarna i ämnet. Referensmätningen ska i en skarp installation användas som en första grovkalibrering av ugnsstyrningssystemet. I och med att ämnet då kallchargeras så kan kalibreringen göras både utifrån absolut utvidgning (se figur 8.11) och relativ utvidgningshastighet (se figur 8.12). Grovkalibrering och referensmätningar genomförts enligt tabell 8.13.

Tabell 8.13. Grovkalibrering kan göras i tre steg, för att successivt öka noggrannhet.

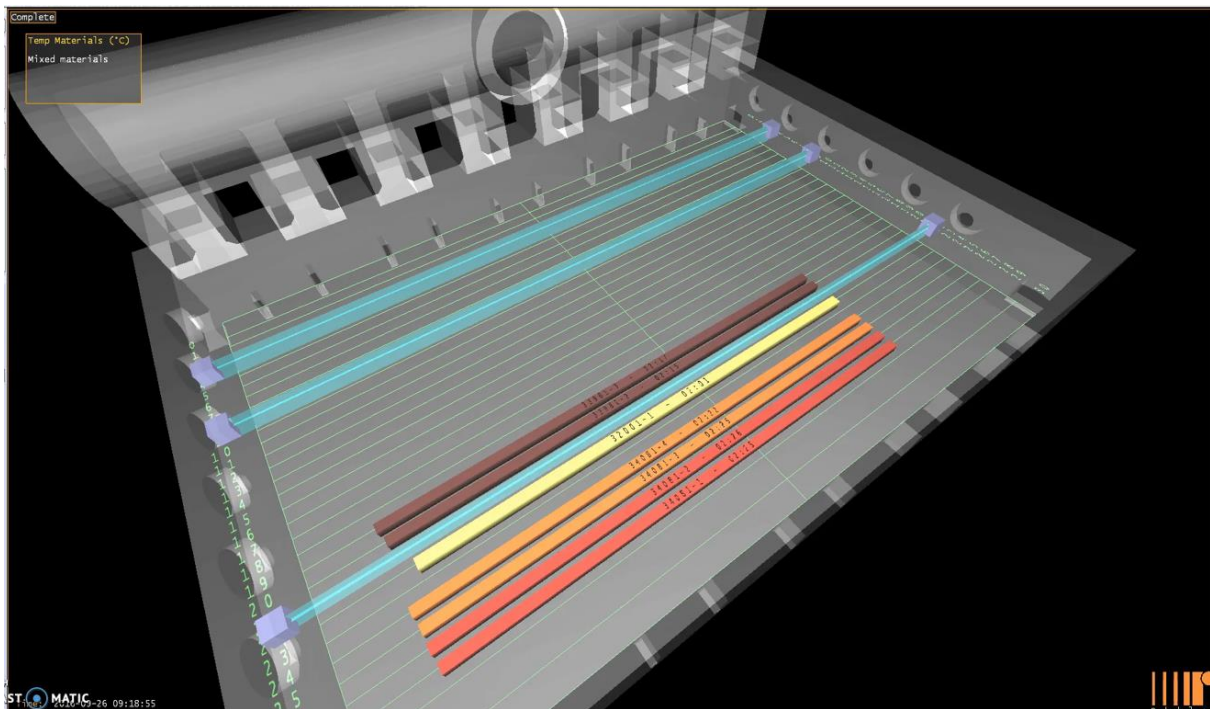
	Åtgärd 1	Åtgärd 2	Åtgärd 3
1. Generellt utvidgningssamband	Implementera generellt utvidgningssamband i värmemodell eller ugnsstyrningssystem (se figur 8.29)	Radarmätning av 2–3 referensämnen i ugn.	Korrigera värmemodell eller ugnsstyrningssystem.
2. Dilatometermätning av 2–3 huvudsorter	Dilatometermät 2–3 stålsorter. Implementera utvidgningssamband i värmemodell eller ugnsstyrningssystem.	Radarmätning av 2–3 referensämnen av respektive stålsort i ugn.	Korrigera värmemodell eller ugnsstyrningssystem
3. Förfinad dilatometermätning	Dilatometermät. Implementera utvidgningssamband i värmemodell eller ugnsstyrningssystem.	Radarmätning av 2–3 referensämnen av respektive stålsort i ugn.	Korrigera värmemodell eller ugnsstyrningssystem

Vid ordinär produktion ligger inte stålämnena stilla såsom vid referensmätning, utan de förflyttas successivt framåt. I varje position ligger ämnena stilla i 3–8 minuter. Radarmätningarna (online-mätningar) kommer sålunda att ske i ett antal diskreta mätpositioner, se figur 6.2. Online-mätningar kan påbörjas efter att ugnsstyrningssystemet har grovkalibrerats enligt steg 2 och 3. Dessa mätningar ska framför allt användas för att styra värmningen genom företrädesvis ökad eller minskad dragningstakt. Värmemodellen kan användas genom att:

1. Om värmemodellen och radarmätningen överensstämmer kan dragningstakten ändras momentant för varje ämne.
2. Värmemodellen kan korrigeras efter en samlad analys av ett antal ämnen. Differensen mellan mätta och beräknade utvidgningshastigheter används för att finkalibrera modellen.

9 Temperaturmatchning och live-mätning

Ugn62 på Sandvik har använts för referensmätningar och live-mätningar. I dagsläget finns 37 sensorer som övervakar processerna i ugnen från valvet (taket). I projektet har åtta sensorhus placerats på ugnens väggar. Sensorhusen på väggarna har utrustats med radarsensorer när mätningar har genomförts. I projektet har fyra laborationssensorer (modifierade RPU:er med frontend-kort) använts för mätningarna, vilket omöjliggjorde live-mätning i alla åtta sensorpositionerna samtidigt. Därför valde projektet att genomföra live-mätningarna i en position i taget och i totalt tre positioner, se figur 9.1.



Figur 9.1. Tredimensionell ugnsmoell över Ugn62 på Sandvik. De tre blå linjerna motsvarar de tre radarpositionerna.

9.1 Process och implementering

Temperaturmatchning och kalibrering av en värmemoellen eller ett ugnsstyrningssystem genom radarmätning kan ske på tre olika sätt (se figur 9.2):

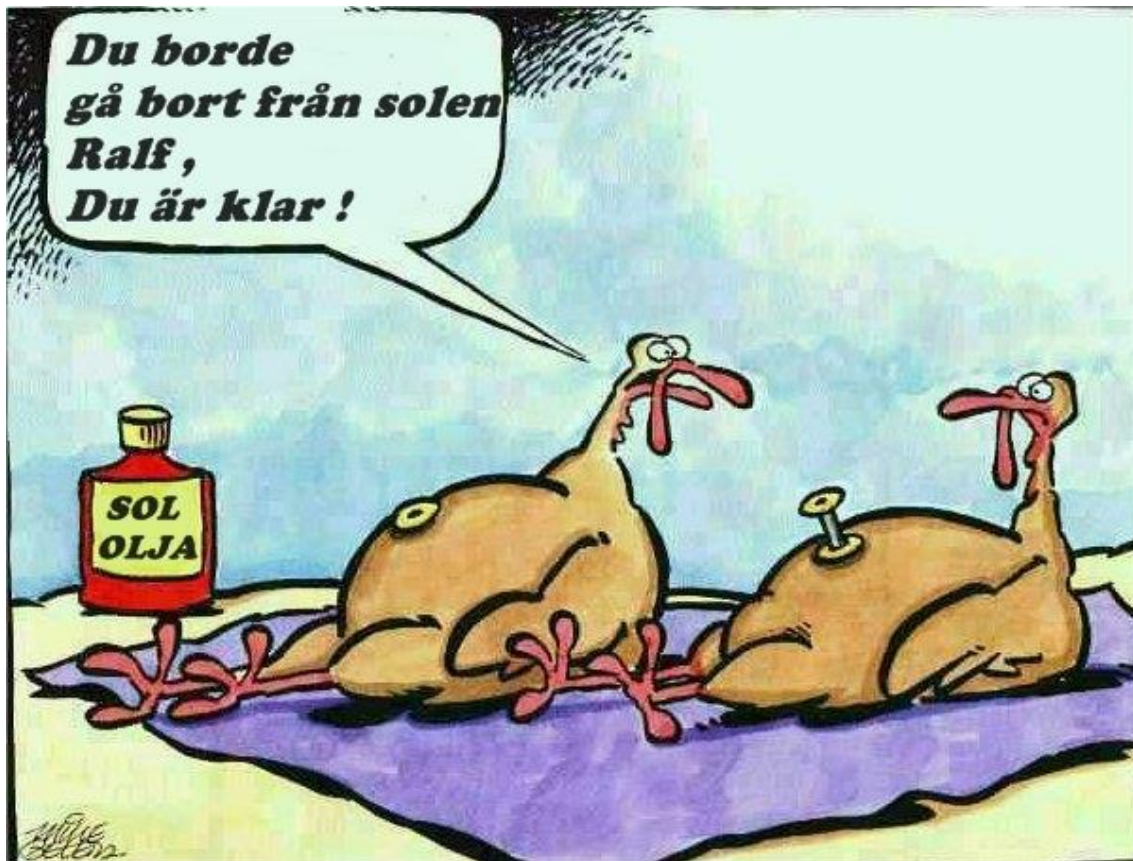
- *Grovkalibrering* av värmemoell och ugnsstyrningssystem genom referensmätning av stillastående stålämne (referensämne),
- *Klarnappsfunktion* fungerar genom att när utvidgningshastigheten närmar sig noll och ugnstemperaturen motsvarar måltemperatur så är ämnet färdigvärt,
- *Finkalibrering* av värmemoell och ugnsstyrningssystem genom kontinuerlig mätning och beräkning av indikatorämnen (långa identifierbara ämnen med kända egenskaper) i produktion.

9.2 Grovkalibrering

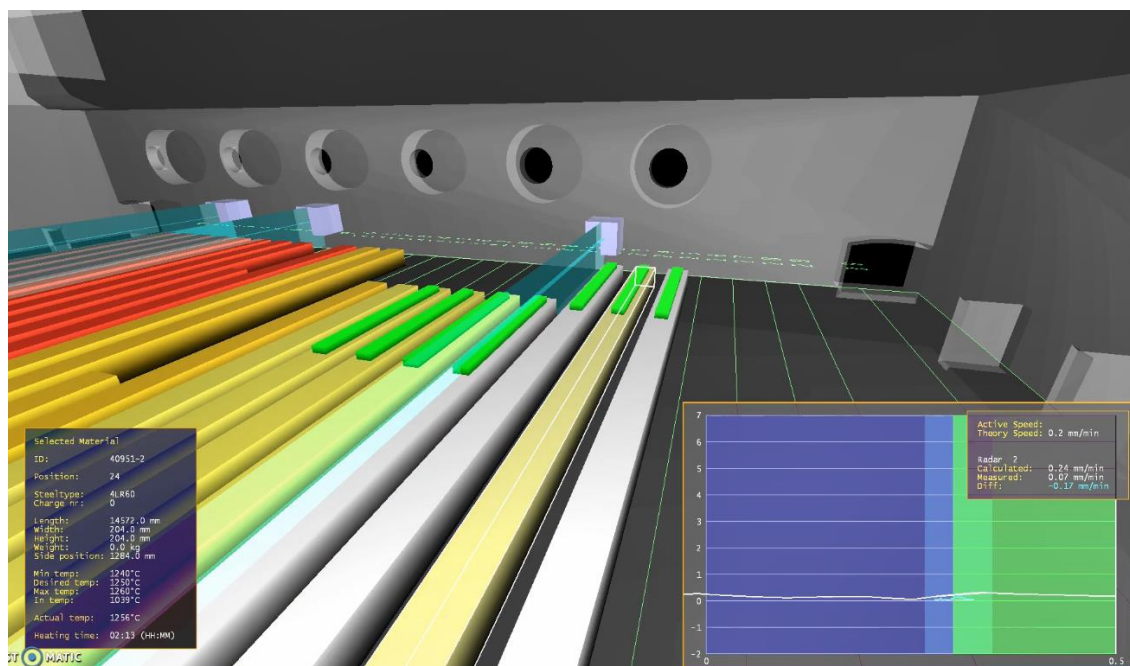
Inför live-mätningarna gjordes fyra kvalificerade referensmätningar (se 8.25-28), vilka användes för att grovkalibrera värmemoellen. Värmeöverföringsparametrarna i modellen sattes till $\epsilon=0,8$ och $h_{conv}=100 \text{ W/m}^2\text{-K}$.

9.3 "Klarknapps"-funktion

"Klarknapps"-funktionen syftar på den knapp som fanns på 1980-talet och som åkte ut då kycklingen uppnådde rätt temperatur och var färdig vid ugnstekning, se figur 9.2. I stålsammanhang har projektet visat att en "klarknapps"-funktion motsvarar färdigvärt stålämne då töjningshastigheten har nått $7,69 \times 10^{-6}$ /min. Det motsvarar 1 mm/min för ett 13 meter långt stålämne, se figur 9.3. När ämnet når $7,69 \times 10^{-6}$ /min så innebär det att temperaturgradienten är $<7^{\circ}\text{C}$ från botten till toppen på ämnet. I figur 9.3 går det att se att det analyserade ämnet ligger 15–20 minuter längre än nödvändigt, vilket visas som en grönmarkering i grafen i nedre högra hörnet.



Figur 9.2. "Klarknapp" vid ugnstekning av kyckling.



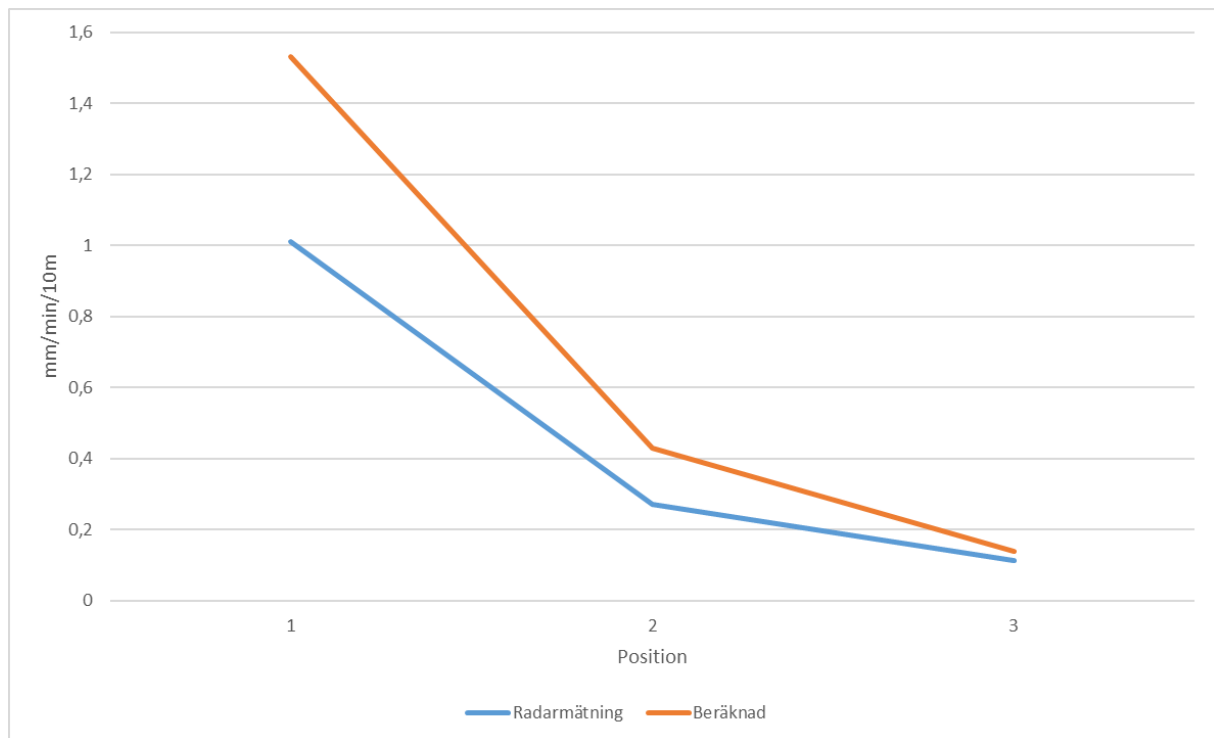
Figur 9.3. "Klarknapps"-funktion vid värmning av stålämnen.

9.4 Anpassning av värmemodell

På Sandvik genomfördes live-mätningar under fyra veckor, vilket resulterade i drygt en veckas mätning i varje mätposition, se figur 9.1. De mätta indikatorämnena är sålunda endast mätta i en position. På grund av att det tog 1–2 timmar att flytta sensorerna så var det inte möjligt att mäta och följa ett indikatorämne med två på varandra följande sensorer. Live-mätningarna syftade till att få statistik för en större grupp av ämnen i respektive position. Därför ansågs inte avsaknaden av mätningar på samma indikatorämne i flera positioner som ett problem.

Värmemodellen tog hänsyn till hur varje stålämne hade värmts och påverkats under tiden fram till respektive radarmätning. Ämnen med samma egenskaper som stålsorten 3R12 valdes ut för att fokusera på en sorts ämne. Dessa ämnen var dessutom långa, över 10 meter, vilket också underlättade analysen från radarmätningen. I respektive position genomfördes mätning på (se figur 9.4):

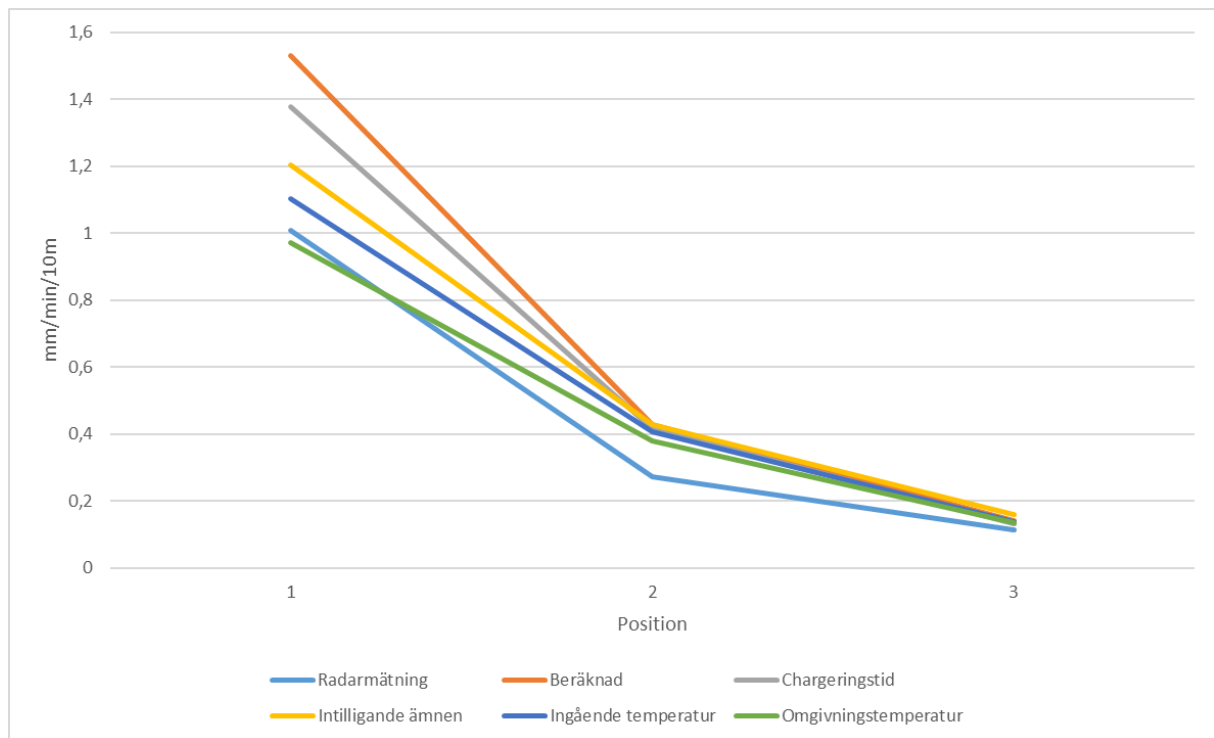
- Position 1: 60 indikatorämnena. Medelutvidgningshastigheten var 1,01 mm/min och beräknad 1,53 mm/min. Standardavvikelse i mätt utvidgningshastighet per 10 m var $\sigma=0,33$ mm/min,
- Position 2: 22 indikatorämnena. Medelutvidgningshastigheten var 0,27 mm/min och beräknad 0,43 mm/min. Standardavvikelse i mätt utvidgningshastighet per 10 m var $\sigma=0,06$ mm/min,
- Position 3: 73 indikatorämnena. Medelutvidgningshastigheten var 0,11 mm/min och beräknad 0,14 mm/min. Standardavvikelse i mätt utvidgningshastighet per 10 m var $\sigma=0,12$ mm/min.



Figur 9.4. Radarmätt (*blå*) och beräknad utvidgningshastighet (*orange*) i mm/min per 10 meter indikatorämne.

Utifrån figur 9.4 så finns en tydlig diskrepans mellan radarmätt och beräknad utvidgningshastighet. Avvikelse var ungefär 50 %. Grundtanken är att betrakta radarmätningen som facit och korrigera ingående parametrar i värmemodellen. Korrektur av parametrarna kan göras automatiskt genom en minsta kvadrat-anpassning med givna randvillkor eller genom manuell korrektion av tänkbara eller fysikaliskt beskrivbara avvikelser. För att erhålla en bra anpassning av värmemodell krävs troligtvis 6–24 månaders inkörning. För att exemplifiera tillvägagångssättet korrigerades antal parametrar manuellt och i följande ordning (se figur 9.5):

- *Chargingstiden* (tiden tills stålämnet nådde sin grundposition) hade ett offset-fel på 60 sekunder. Modellen är dock inte korrigerad för variationer för tid för inläggningen (från lucka till grundposition). Denna tid kan variera.
- *Intelligande ämnen* minskar värmningen av stålämnen. Genom att ta hänsyn till hur många sidor som har intelligande ämnen så blir modellen bättre. Varje intelligande stålämne är satt till att minska värmningen med 30%. Ett stålämne med två intelligande minskar sålunda strålningsvärmen med 60%.
- *Ingående temperatur* är inte jämn i hela ämnet. Varmchargerade har valsats och kapats, vilket gör att kärnan är varmare än skalet. Temperaturmätaren mäter dock skalet. Ingående genomsnittstemperaturer korrigerades +10°C.
- *Omgivande temperatur* erhöles från temperaturgivare i taket. Dessa givare ger bra värden och kalibreras med jämna mellanrum. I denna ugn är brännarna placerade på väggen och värme stiger ju uppåt, vilket troligtvis innebär att temperaturen vid härden (golvet) är något lägre. Därför korrigerades ugnstemperaturen med 1% nedåt (ca 12°C).



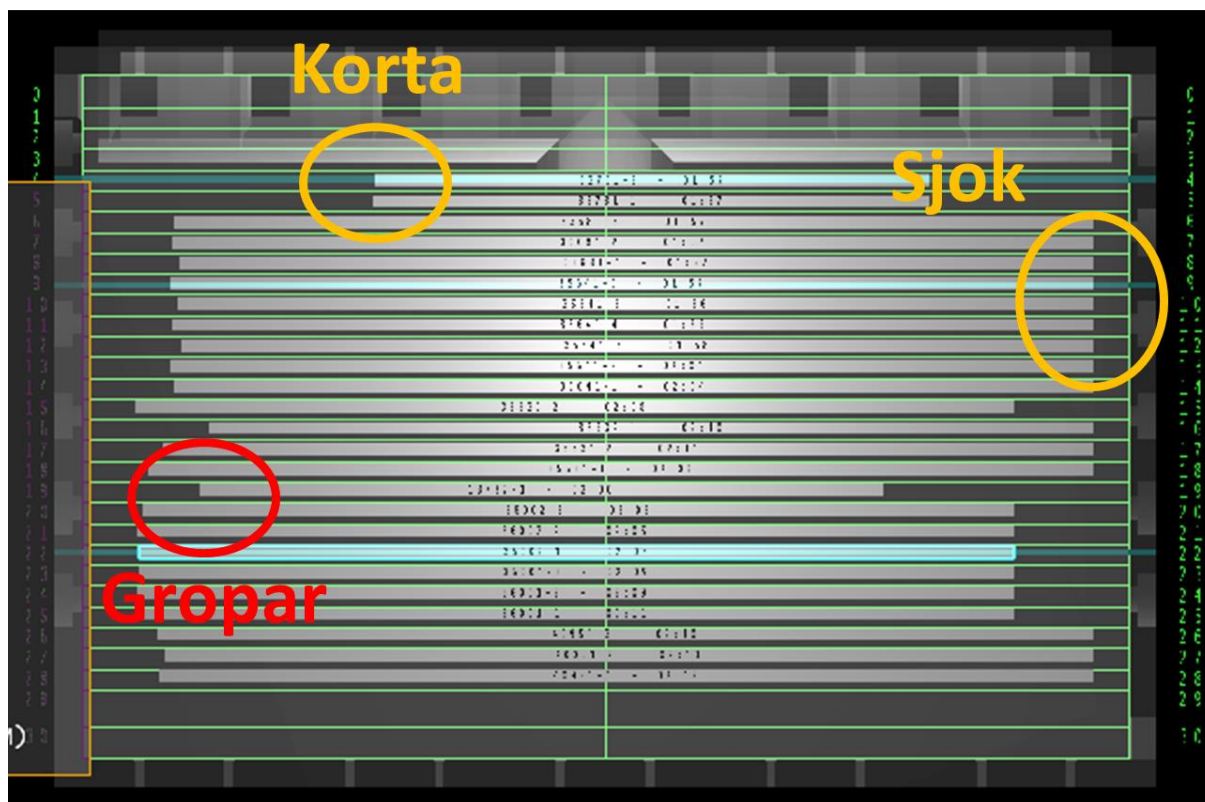
Figur 9.5. Radarmätt (blå) och beräknad utvidgningshastighet (orange) i mm/min per 10 meter indikatorämne. Värmemodellen är successivt aggregerande korrigerad för: chargingtid (grå), intelligande ämnen (gul), ingående temperatur (blå) och omgivningstemperatur (grön).

Vid finkalibrering av värmemodellen har även värmeöverföringsparametern h_{conv} korrigerats mellan 90 och 110 W/m²-K. Skillnaden var dock minimal från grundvärdet på 100 W/m²-K. Det är känt att konvektiv värmeöverföring (h_{conv}) varierar kontinuerligt i ugnen och är olika för olika delar av ugnen. Därför bör en avancerad adaptiv justering av detta värde implementeras på sikt.

Det gick att anpassa värmemodellen efter radarmätningarna. Det var lätt att korrigera position 1, men desto svårare hitta den drivande parametern för position 2. Rent fysikaliskt är det stora skillnader de två positionerna och bör därför inte modelleras med samma parametrar. Vid den exemplifierade anpassningen åstadkoms 5 % avvikelse i position 1 och 25 % avvikelse i position 2. Det krävs, som sagt, omfattande kalibreringsarbete för att åstadkomma en bra anpassning. I position 1 varierar temperaturen mer på grund av lucköppning, vattenkylda rullar och en bakvägg påverkar värmningen. I position 1 finns aldrig mer än ett intelligande ämne.

9.5 Indikatorämnena

Under signalbehandlingen, från live-mätningarna, har det varit en utmaning att detektera korta ämnen och ämnen i grupp. Korta ämnen är i sig inte ett egentligt problem, men om ämnet ligger tillsammans med andra stålämnen och är smala (<0,3 m bredd) så blir det en utmaning att mäta och identifiera respektive ämne. Radarsignalen har ingen riktning, eller snarare en vid öppningsvinkel (ca 100°), vilket gör att signalen kan träffa flera ämnen samtidigt. Signalerna från alla reflekterande stålämnen kommer då att interferera. Om man kan betrakta en grupp med ämnen som likvärdiga (t.ex. samma utvidgningshastighet, ungefär lika långa, samma stålsort) så gör det inte så mycket att signalerna interfererar utan mätt utvidgningshastighet kommer att ge ett bra medelvärde. Den största utmaningen är korta ämnen som ligger mellan två långa ämnen, se figur 9.6 (kallad "Gropar"). De kommer att vara omöjliga att mäta.



Figur 9.6. Ugnskarta från Ugn62 på Sandvik med utmanande ämneskonfigureringar.

Finkalibrering av värmemodellen och ugnsstyrningssystemet kräver inte att varje enskilt ämne mäts. Det räcker om ett antal *indikatorämnen* visar hur modellen och systemet ska korrigeras. Ugn62 på Sandvik är speciell mellanvärmningsugn som är ovanlig. Ämnena i denna ugn är smala, olika långa och inte centrerade. Vid signalbehandling av flera tusen ämnen från live-mätningen på Sandvik var det möjligt att erhålla bra mätvärden från 25–30% av alla stålämnen. På SSAB:s ugn301 uppskattas motsvarande siffra vara 90–95%. En värmningsugn som fungerar utmärkt för utvidgningsmätning och kalibrering har följande karaktäristik:

- Breda, höga och långa stålämnen (0,5–1,5 m breda, >0,2 m höga och änden <1,5 m från innervägg).
- Mättiden är mer än 3 minuter
- Värmningsugnen har ett befintligt ugnsstyrningssystem som kan modifieras till att beräkna utvidgningshastigheten.

10 Slutsatser och diskussion

Projektet har visat att:

- *Mikrovågors beteende:* Heta keramer blir halvledande vid temperaturer över 800°C och absorberar därigenom radarsignalerna. Amorfa fibermaterial kan användas som isolering framför radarsensorerna. Radarsignalen är ca 30 gånger högre med en fiber än med en keram vid temperaturer på 1 200°C.
- *Noggrannhet:* Radarsensorerna kan mäta med en absolut noggrannhet på $\sigma=0,30$ mm och med en relativ noggrannhet på $\sigma=0,032$ mm. Applicerbar noggrannhet vid mätning i ugn och på stålämnen ligger på ca $\sigma=0,067$ mm
- *Radaravbildning och SAR* har undersökts. Det är dock svårt att hitta en inte alltför dyr lösning för installation på värmningsugnar med tillräcklig nytta och noggrannhet. I och med att relativ utvidgningshastighet kom att användas i projektet så minskar behovet att korrigering genom SAR-avbildning då relativa hastighetsskillnaden mellan rakt och snett mått oftast är mindre än 10 μm . Om det fanns möjlighet att skapa en mer riktad och fokuserad radarsignal vore det av större vikt än att använda SAR på värmningsugnar. Fokusering av radarsignalen skulle kunna göras genom att konstruera radarantennar med exempelvis metamaterial eller skapa en sensor med två sändare som skapar ett interferensmönster (motsvarande Young's dubbelspaltexperiment). Högre frekvens skapar också en mer fokuserad radarlob.
- *Värmemodellen* kan bestämma att och när ett stålämne är färdigvärt vilket motsvarar en temperaturgradient på 7°C om radarsensorn har en mätnoggrannhet på $\sigma=0,1$ mm/min. Enligt beräkningar kan utvidgningshastigheten mätas med en noggrannhet på $\sigma=0,023$ mm/min. Den höga noggrannheten erhålls genom relativ mätning under kort tid.
- *Värmemodellen* beräknar utvidgningshastigheten, vilken påverkas av omgivande temperatur, värmeöverföringsparametrar, termiska materialegenskaper, termisk utvidgningskoefficient, olika dimensioner samt material med fastransformation. Modellen är relativt okänslig för avvikelser under 5 procent, vilket i värsta fall motsvarar 5 minuter felaktig värmningstid. Värmningstiden blir successivt mer felaktig vid större avvikelser. Känsligheten är störst för avvikelser i dimensionen, därefter följer temperaturfördelning vid olika specifik värmekapacitet C_p , värmeöverföringskoefficienter h_{tc} samt termisk utvidgningskoefficient $\alpha(T)$ och relativ längdförändring $\beta(T)$.
- *Temperaturmatchning:* Det är möjligt att korrigera värmemodellen eller ugnsstyrningssystemet utifrån radarmätt utvidgningshastighet. Finkalibrering av modellen förväntas ske adaptivt och automatiskt på sikt. Vid användning av värmemodellen ska alla parametrar som påverkar värmningstiden justeras även om avvikelser är några få procent. Det har visat sig att många mätningar och data i databaser kan vara felaktiga, exempelvis offsettider, dimensionsfel (framför längder), felaktig initial temperatur, temperatur i ugnen, variationer i ugnen och värmeöverföringsparametrar. Ett fungerande optimeringssystem kräver att produktionsdata har hög tillförlitlighet.
- *Live-mätning* på Sandviks ugn62 och SSAB:s ugn301 har visat att systemet fungerar bäst och är lättast att implementera om stålämnena är breda, höga och långa (0,5–1,5 m breda, >0,2 m höga och änden <1,5 m från innervägg), mättiden är mer än 3 minuter och att värmningsugnen har ett befintligt ugnsstyrningssystem som kan modifieras till att beräkna utvidgningshastigheten.
- *Implementering* kan ske genom *grovkalibrering* av värmemodell och ugnsstyrningssystem genom referensmätning av stillastående stålämne (referensämne). *Klarknappsfunktionen*

fungerar genom att mäta utvidgningshastigheten och när den närmar sig noll och ugnstemperaturen motsvarar måltemperatur så är ämnet färdigvärt. *Finkalibrering* av värmemodell och ugnsstyrningssystem fungerar genom kontinuerlig mätning, beräkning av stålämnen (indikatorämnena) i produktion samt korrigering utifrån avvikelser mellan mätt och beräknad hastighet.

Ovako deltog i projektet under det första året. Det visades sig dock svårt att implementera radarmättekniken på deras ringugnar, vilket var grundtanken. Orsaken till detta var att stegningstakten i en ringugn är hög <60 sek. Ämnena är också relativt korta, ca 3 meter. Noggrannheten skulle behöva öka med en faktor 2–3 för att vara implementerbar på en ringugn.

11 Framtid

Projektet har visat att det är möjligt att med hög noggrannhet bestämma om ett stålämne är färdigvärt, vilket motsvarar en temperaturgradient på 7°C. Sandvik och SSAB ser möjligheten i att kunna implementera radarsensor för bestämning av utvidgningshastighet, som ska kunna användas för korrektion av en värmemodell eller ett ugnsstyrningssystem. Sandvik och SSAB är beredda att ta metoden vidare till tre referensinstallationer där tre testfall testas.

SSAB har för avsikt att installera radarsensorer på två mätplatser på ugn 301 (fyra radarsensorer). Implementeringen på SSAB beräknas gå snabbt, vilket beror på att radarsensorerna lättare kan mäta de stora stålämnena som värms på SSAB samt att ugnsstyrningssystemet FOCS redan används för ugnsstyrning och optimering av värmning. Installationen kommer snabbt gå över i kalibrering och optimering av ugnsvärmningen. SSAB-installationen blir då snabbt ett "lighthouse project" som kan ge Sandvik och andra aktörer en tydlig vision. Prevas ska stötta SSAB med anpassning, kalibrering och optimering av ugnsstyrningssystemet FOCS. Prevas är en nyckelaktör för att tillsammans med Radarbolaget sprida denna optimeringsmetod till befintliga FOCS-användare. Prevas har också ett samarbete med ABB kring internationell försäljning av FOCS, vilket möjliggör en internationell spridning av optimeringsmetoden.

Sandvik har för avsikt att installera radarsensorer på förvärmningsugn 61 och mellanvärmningsugn 62 på totalt sju (5+2) mätplatser (14 radarsensorer). Implementationen på Sandvik beräknas ta längre tid, vilket beror på att radarsensorerna måste kalibreras mer då stålämnena är relativt små och svår-detekterbara samt att värmningsmodell och ugnsstyrningssystem måste implementeras från en lägre nivå än för SSAB. Effektvinsterna beräknas dock vara högre på Sandvik än på SSAB. Sandvik samarbetar med AGA kring ett modernt ugnsstyrningssystem. AGA:s drivkraft är att optimera förbränningen i värmningsugnar med optimerad syretillförsel (oxygen). Detta ugnsstyrningssystem styrs på ett annorlunda sätt, än t.ex. FOCS, genom att systemet tar hänsyn till ingående och utgående energimängder.

Radarbolaget har för avsikt att anpassa och kalibrera radarsensorerna i implementeringsprojektet så att ugnsstyrningen kan bli så optimal som möjligt. Den stora effekten kopplad till minskad energiförbrukning och minskade utsläpp av växthusgaser åstadkoms genom en nationell och internationell spridning av optimeringsmetoden. Därför har Radarbolaget också för avsikt att förenkla och standardisera radarsensorerna för generisk hopkoppling med valfritt ugnsstyrningssystem. I projektet ingår en förankringskampanj för att träffa internationella stålindustrier och leverantörer med syfte att sprida optimeringsmetoden internationellt.

11.1 Framtida effektmål

Möjliga förbättringar är starkt kopplade till hur eventuell ugnsstyrning är implementerad idag. Den stora potentialen ligger i att ha ett bra ugnsstyrningssystem, som ytterligare kan optimeras med radarmätningar. Effektmålen begränsas till om produktionen sker i låg- eller högkonjunktur. Den stora potentialen ligger framför allt i högkonjunktur. Minskad energiförbrukning måste också vägas mot produktkvalitet och produktivitet. Det är ju möjligt att öka dragningstakten och minska energiförbrukningen, men det kan få som konsekvens att kvaliteten sjunker. I ett framtida referensprojekt är det viktigt att påvisa effektvinster och att tekniska mål kan nås, se tabell 11.1 och 11.2, för att därigenom få stor spridning av tekniken.

Tabell 11.1. Effektvinster vid implementering i olika testfall

	SSAB, ugn 301	Sandvik, ugn 61	Sandvik, ugn 62
Energiförbrukning	0,5–1% (minskad förbrukning per tillverkat ton stål)	5–10% (minskad förbrukning per tillverkat ton stål)	2–3% (minskad förbrukning per tillverkat ton stål)
Produktivitet	2% (ökad dragningstakt)	5–10% (ökad dragningstakt)	0% (ökad dragningstakt)
Kvalitet	1–2% (mindre temperaturspridning mellan ämnen)	1–2% (jämnare valskrafter mellan ämnen)	1–2% (jämnare valskrafter mellan ämnen)

Tabell 11.2. Tekniska mål vid implementering i olika testfall

SSAB, ugn 301	Sandvik, ugn 61	Sandvik, ugn 62
Stålämnernas längdutvidgningshastighet ska mätas med radarteknik. Uppmätt utvidgningshastighet är ett mått på temperaturskillnaden i ugnen och stålämnet i relation till ämnets dimension, sort, värmestrålning och värmeöverföring. Det kan användas för att kvantifiera ämnets värmeinnehåll (J/kg) och temperaturförändring ($\Delta^\circ\text{C}$).		
Genom att anpassa FOCS efter verklig längdutvidgningshastighet så kan temperaturpredikteringen i ugnens första halva göras med högra noggrannhet. Målet är att gå från en osäkerhet om $\pm 100^\circ\text{C}$ till $\pm 50^\circ\text{C}$. Tekniskt mål kan eventuellt verifieras via lådförsök.	En modell och ugnstyrningshastighet ska användas för att optimera värmningsprocessen i fem värmningszoner. Målet är att i respektive zon bestämma stålämnernas temperatur med $\pm 50^\circ\text{C}$ i början av ugnen och $\pm 20^\circ\text{C}$ i slutet av ugnen.	En modell ska användas för att verifiera när ett ämne eller ett sjok av ämnen är färdigvärt. Radarsystemet övervakar ugnens andra halva. Målet är att bestämma när ett ämne är färdigvärt. Ämnena anses färdigvärmda vid en temperaturgradient om $\pm 7^\circ\text{C}$. Motsvarande utvidgningshastighet ska mätas med radar.

12 Acknowledgement

Projektet har kunnat genomföras genom ekonomiskt stöd från Energimyndigheten genom forskningsprogrammet Järn- och stålindustrins energianvändning (JoSEn). Projektet har förvaltats och styrts av Jernkontoret. Radarbolaget har varit projektledare och har även genomfört större delen av det praktiska arbetet. FOI har bidragit med forskning och utveckling kring radaravbildning och simulering mikrovågor. Högskolan i Gävle har bidragit med kompetens och teknisk utrustning. Sandvik har tillgängliggjort sin Ugn62 för installation och tester samt genomfört ämnesmätningar i

dilatometer och utvecklat värmemodellen i projektet. SSAB i Borlänge har tillgängliggjort sina ugnar 301 och 302 för mätning samt genomfört dilatometermätningar. Ovako har bidragit med processkunskap.

13 Interna dokument

Högberg S., Mathematical model for the prediction of bloom temperature and thermal expansion during heating in SB62 (Sandvik 2014)

Ottoson P., Andersson D., Temperaturoptimering med radarteknik (Radarbolaget 2014)

Nylöf L., Dilatometermätningar - Längdutvidgning 13C26 (Sandvik 2013)

Frölind P-O., Johansson T., Ulander L. Mätanalys och simulering av radaravbildning av stålämnen i värmningsugn (FOI 2016)