

Bredningskompensering

– att automatiskt kompensera för bredningsvariationer
vid varmvalsning av stång

Per Erik Ruberth

Handledare: Tatu Räsänen, Fundia Special Bar AB

Examinator: Lars Nielsen, ISY, Linköpings universitet

Copyright

The publishers will keep this document online on the Internet – or its possible replacement – for a period of 25 years starting from the date of publication barring exceptional circumstances.

The online availability of the document implies permanent permission for anyone to read, to download, or to print out single copies for his/hers own use and to use it unchanged for non-commercial research and educational purpose. Subsequent transfers of copyright cannot revoke this permission. All other uses of the document are conditional upon the consent of the copyright owner. The publisher has taken technical and administrative measures to assure authenticity, security and accessibility.

According to intellectual property law the author has the right to be mentioned when his/her work is accessed as described above and to be protected against infringement.

For additional information about the Linköping University Electronic Press and its procedures for publication and for assurance of document integrity, please refer to its www home page: <http://www.ep.liu.se/>.

Upphovsrätt

Detta dokument hålls tillgängligt på Internet – eller dess framtida ersättare – under 25 år från publiceringsdatum under förutsättning att inga extraordinära omständigheter uppstår.

Tillgång till dokumentet innebär tillstånd för var och en att läsa, ladda ner, skriva ut enstaka kopior för enskilt bruk och att använda det oförändrat för ickekommersiell forskning och för undervisning. Överföring av upphovsrätten vid en senare tidpunkt kan inte upphäva detta tillstånd. All annan användning av dokumentet kräver upphovsmannens medgivande. För att garantera äktheten, säkerheten och tillgängligheten finns lösningar av teknisk och administrativ art.

Upphovsmannens ideella rätt innefattar rätt att bli nämnd som upphovsman i den omfattning som god sed kräver vid användning av dokumentet på ovan beskrivna sätt samt skydd mot att dokumentet ändras eller presenteras i sådan form eller i sådant sammanhang som är kränkande för upphovsmannens litterära eller konstnärliga anseende eller egenart.

För ytterligare information om Linköping University Electronic Press se förlagets hemsida <http://www.ep.liu.se/>.

Abstract

Having a stable spread is important in order to obtain accurate dimensions when rolling high-quality steel bars. This thesis describes an attempt to design a simple but adequate active system to reduce the spread variations at Fundia's mid-section mill in Boxholm, Sweden.

Introducing closed loop control is far too complex to be considered in this case, and thus we are forced to use an open loop approach. From the available literature, it is obvious that temperature is the single most important aspect to take into account. However, the literature does not provide the means to accurately enough determine how temperature variations will affect spread in our specific situation.

Instead, we have to depend on an investigation. Fortunately, this investigation showed that the width disturbance is approximately proportional to the temperature throughout the interesting interval. This enables us to base the system on a "compensation factor", set by the operator.

Such a control system was then designed, installed, and tested, showing very promising results.

Sammanfattning

Att ha en stabil bredning är viktigt för att uppnå noggranna dimensioner vid valsning av stångstål av hög kvalitet. Det här examensarbetet handlar om ett försök att konstruera ett enkelt, men ändå tillfredsställande, aktivt system för att reducera variationerna i bredning i Fundias mediumvalsverk i Boxholm.

Att införa ett återkopplat reglersystem anses vara alltför komplext för att komma i fråga, så vi leds till att utnyttja framkoppling. Baserat på tillgänglig litteratur är det tydligt att temperaturen är den enskilt viktigaste faktorn att ta hänsyn till. Dock ger litteraturen inte någon metod som med tillräcklig precision förutsäger hur temperaturen kommer att påverka bredningen i vårt specifika fall.

I stället får vi lita till en undersökning. Som tur är visar den att breddavvikelsen är approximativt proportionell mot temperaturen över hela det intressanta intervallet. Det gör det möjligt att basera systemet på en ”kompenseringsgrad”, som kan justeras av operatören.

Ett sådant system konstruerades, installerades och testades, och det uppvisade mycket lovande resultat.

Innehåll

1 Förord	1
2 Om valsning	2
2.1 Företaget.....	2
2.2 Något om varmvalsning	2
2.3 Speciellt om rundkant.....	5
3 Uppgift	6
3.1 Problemet	6
3.2 Uppgiften.....	6
4 Teoristudium	7
4.1 Bakgrund	7
4.2 Vad beror bredningen på?	7
4.3 Värdet av teorin	8
4.4 Annan temperaturpåverkan	9
4.5 Slutsatser	9
5 Modellsökandet	10
5.1 Modellens syfte	10
5.2 Möjligheter	10
5.3 Framkoppling	11
5.4 En bra framkopplingslänk	12
5.5 Slutsatser	13
5.6 Nästa steg	13
6 Pilottest	14
6.1 Syfte	14
6.2 Metod	14
6.3 Genomförandet.....	15
6.4 Resultat.....	15
7 Temperaturmätning	16
7.1 Varför strålningspyrometer?	16
7.2 Placering.....	16
7.3 Miljöproblemen.....	17
7.4 Montage.....	17
7.5 Processor	18
7.6 Vårt val.....	18

8 Undersökningen.....	19
8.1 Syfte	19
8.2 Bakgrund	19
8.3 Metod	19
8.4 Genomförande	19
8.5 Resultat.....	20
8.6 Slutsatser	22
9 Systemutveckling	23
9.1 Systemets principer - vad det gör	23
9.2 Maskinvarukonfiguration	23
9.3 Grundidén för programvaran.....	25
10 Funktionstester	26
10.1 Bänktester.....	26
10.2 Installationstester.....	26
10.3 Verifiering	26
11 Systemverifiering.....	27
11.1 Kontrollmätningar	27
11.2 Potential.....	29
12 Slutord	30
12.1 Utestående tekniska aspekter.....	30
12.2 Övriga svårigheter	30
12.3 Resultat.....	30
13 Referenser & litteratur	31
13.1 Referenser.....	31
13.2 Litteratur.....	31
Bilaga 1: Mer om systemutvecklingen.....	32
Utvecklingsmiljö	32
Programspråk	33
Programmets utformning.....	33

1 Förord

Syftet med ett examensarbete är att, som det heter, ”visa att den studerande kan använda sina under studietiden förvärvade kunskaper vid lösning av en förelagd uppgift med anknytning till utbildningen”.

I det här arbetet har verkligen ett brett spektrum av dessa kunskaper kommit till användning, allt från termodynamik med Plancks strålningslag via en hel del reglerteknik och systemdesign till rena användbarhetsaspekter. Det är nog detta som jag såhär i efterhand upplever som mest positivt med arbetet.

Uppläggningsen på den här rapporten följer en klassiskt logisk linje för arbetet: Först bakgrundsinformation och problemformulering, sedan undersökningar och studier, följt av lösningens framtagning och avslutat med en verifiering av resultatet. Tyvärr är verkligheten inte alltid logisk, så i praktiken har momentens kronologiska ordning varit mera flytande. Likväl har arbetet alltid hämtat sin struktur ur den logiska linjen, så därför blir det också linjen i denna rapport.

Förordet till ett examensarbete brukar också vara en plats för tack, och det här är inget undantag. Tack går alltså till min handledare och examinator på Tekniska Högskolan, professor Lars Nielsen, och till min handledare på Fundia, Tatu Räsänen. Men framför allt vill jag rikta mitt tack till all personal ”i själva verket”, som den skämtsamma benämningen på produktionslokalerna lyder. De har utan klagomål stått ut med att besvara konstiga frågor och att recensera mer eller mindre välbetänkta idéer. Där vill jag speciellt nämna dels alla ställare, och dels Börje Karlsson som gett ovärderligt stöd till projektet.

2 Om valsning

Eftersom jag skulle tro att många läsare är obekanta med hur valsverk i allmänhet och speciellt då det aktuella verket, Fundias mediumvalsverk i Boxholm, fungerar, är det en hel del begrepp vi måste reda ut redan inledningsvis. Först kommer ett par korta rader om företaget. Sedan går vi in på ämnet varmvalsning, där exemplen är hämtade från vårt valsverk. Sist tittar vi lite noggrannare på de förhållanden som gäller vid valsning av fjäderstål i profilutförandet rundkant, vilket är det som det här arbetet fokuserar på.

2.1 Företaget

Fundia Special Bar AB ingår i Fundia-koncernen som är en nordisk stålkoncern. Företaget tillverkar stångstål, ofta i något mer speciella utföranden och kvaliteter än det gängse handelsstålet, därav namnet. Man har verksamhet på två orter; Boxholm, där man har ett medium- och ett finvalsverk, och Smedjebacken, där man också har ett medium- och ett finvalsverk¹ samt ett elektrostålverk.

Driftsformen för vårt verk är tvåskift, och årligen produceras ca 55 000 ton valsade stålprodukter. Av det utgör ca 10 % den typ av produkter som det här arbetet fokuserar på.

2.2 Något om varmvalsning

Då följer en introduktion till varmvalsning. Det blir naturligtvis ingen uttömmande genomgång, utan den begränsas till sådant som återkommer senare i rapporten.

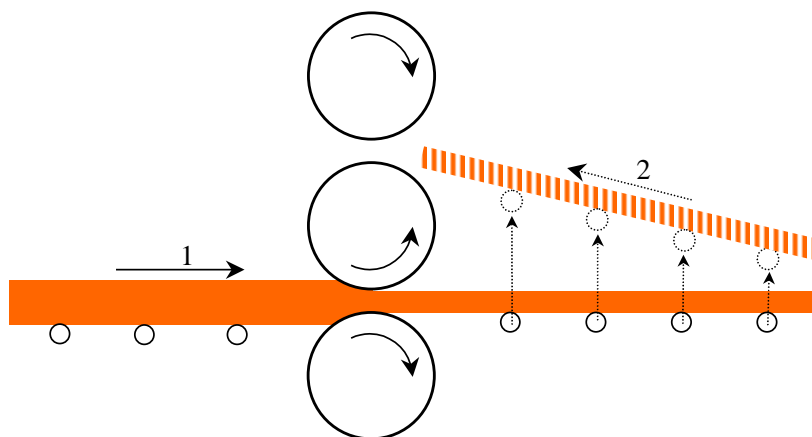
2.2.1 Valsparet

Vi börjar med de centrala enheterna i ett valsverk, *valsparen*. De består av två eller flera roterande *valsar* som det uppvärmda arbetsstycket, *hetan*, bearbetas mellan. Avståndet mellan valsarna, *spelet*, kan justeras via något spelningsmaskineri.

Varje passage av hetan genom ett valspar kallas ett *stick*, och det åtgår i vårt fall ett tjugotal stick för att komma till slutprodukten. För varje stick minskar tjockleken och därmed tvärsnittsarean på hetan, som i stället blir i motsvarande grad längre. För att styra hetan till rätt väg in i och ut ur paret finns vickbord, olika rännor, trattar, in- och utledare och annat, men det behöver vi inte gå närmare in på.

Två eller flera valsar var det. Med två valsar har man ett *duo-par*. Det kan vara antingen horisontellt eller vertikalt monterat, och alltså bearbeta antingen över- och undersidorna eller kanterna på hetan. Med tre valsar får man ett *trio-par*(!). Fördelen med ett sådant är att man kan köra igenom hetan åt båda hållen utan att reversera valsarnas rotation, som visas i Figur 1.

¹ Detta verk lades sedermera ned.



Figur 1. Trio-par med vickbord.

Den sista typen vi stöter på här är *universal-paret*. Där har man byggt på ett horisontellt stick (i vårt fall det ena i ett trio-par) med ett vertikalt duo-par. Det resulterar i ett förhållandevis väldefinierat rektangulärt tvärsnitt hos hetan efter sticket.

2.2.2 Vårt verk

För resten av den generella beskrivningen utgår vi från Figur 2, som visar layouten hos det aktuella verket.

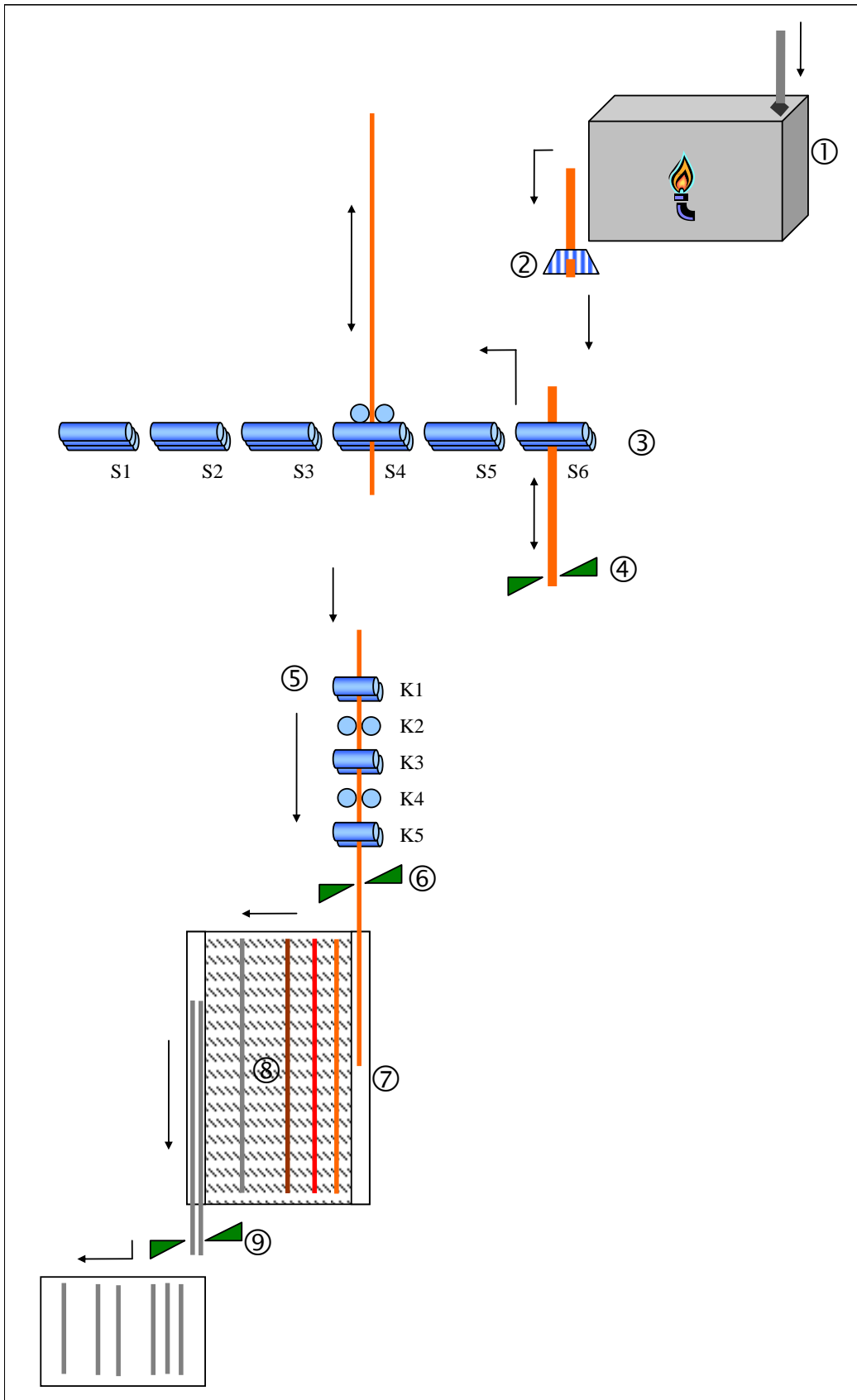
Processflödet ser ut som följer. Utgångsmaterialet är (oftast) stränggjutna *ämnen*, som är 4-6 m långa och har kvadratisk tvärsnitt på 115-165 mm. De värms upp i en ugn (1) så att de vid valsningens början har en temperatur omkring 1150 °C. Vid de temperaturerna oxiderar ytan snabbt och bildar ett *glödskalet*. Det kan ge upphov till ytdefekter under valsningen, så innan man börjar valsa passerar hetan en kraftig högtryckstvätt, skalspolningen (2), som tar bort det mesta glödskalet. (Därutöver finns flera spolmunstycken senare i processen.)

I vårt verk börjar valsningen i ”*sträckan*” (3) som består av trio-paren S1 tom S6, där S4 är ett universalpar. Om man utgår från stora ämnen kan hetan så småningom bli för lång för att hanteras i sträckan. Då kan man använda *delningssaxen* (4) för att dela hetan i två delar som valsas färdigt separat.

Slutfasen av valsningen sker i en kontinuerlig valssträcka, ”*konti*” (5). Där är valsparen alltså uppställda efter varandra, och hetan, som är i ingrepp i flera (alla) valspar samtidigt, går bara igenom denna sträcka en gång. Konti består av fem duo-par, K1 tom K5, som kan vridas till både horisontellt och vertikalt läge.

Efter konti är hetan nästan alltid för lång att hantera, så här finns ytterligare en (*varm*)*sax* (6). Den delar hetan i delar lagom långa (20-35 m) för *svalbädden* (8). Innan svalbäddslängderna kommer dit passerar de ”*sträcken*” (7). Där sträcks svalbäddslängderna ut något under första delen av avsvälningen för att de ska bli rakare. Sedan matas de sakta på tvären över svalbädden. Under tiden svalnar de från de ca 850 °C de höll vid valsningens slut till ett par hundra grader.

Sista stegen i processen är att i *kallsaxen* (9) klippa upp svalbäddslängderna i färdiga stänger i den längd kunden önskar (ofta ca 6 m), göra en visuell inspektion, ”*syning*”, och till sist lägga stängerna i *buntar*.

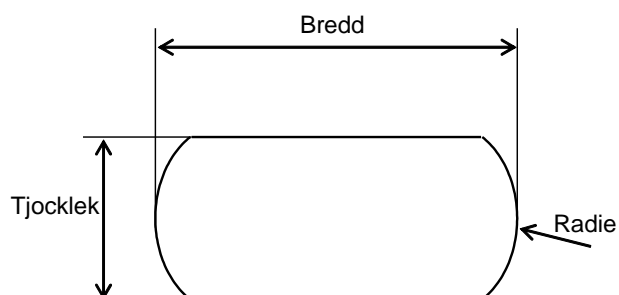


Figur 2. Verkets layout.

Produktionen sker (naturligtvis) satsvis, där varje omgång kallas en *post*, och har samma dimension, stålsort och kund.

2.3 Speciellt om rundkant

Det här arbetet handlar om ett fenomen som är speciellt tydligt vid valsning av olika sorters fjäderstål. Detta stål valsas oftast till en tvärsnittsprofil som kallas rundkant.



Figur 3. Tvärsnittets utseende hos rundkant.

För att valsa dessa profiler gör man på följande sätt. Först förvalsar man ämnet med ett antal stick i S6. Vid behov delar man hetan i delningssaxen efter något av dessa stick. Därefter har man eventuellt något stick i S5 och sedan ett antal i S4, där det sista alltid går genom universalen. Sedan fortsätter man genom konti. Där är paren K1, K3 och K5 horisontellt monterade och försedda med plana valsar. K2 och K4 är kantpar och alltså vertikalt monterade. Valsarna här är försedda med spår för att åstadkomma den rätta rundningen på kanterna, samtidigt som de justerar bredden.

3 Uppgift

3.1 Problemet

Själva grundvalen för valsning är ju att man med hjälp av valsar deformerar utgångsmaterialet. Som nämnts tidigare blir hetan längre för varje stick samtidigt som tjockleken minskar. Detta är emellertid inte hela sanningen. Vid valsning med t.ex. planvalsar blir också hetan lite bredare, den undergår s.k. bredning. Detta fenomen gör det svårt att åstadkomma rätt bredd på den färdiga produkten.

Bredningen utgör *i sig* inget stort problem. Om vi betraktar bredningen som uppkommer i sista sticket vid valsning av rundkant (d.v.s. i K5), så kan man ju ganska enkelt kompensera för denna t.ex. genom att minska bredden ut från föregående kantpar (K4). Eftersom varje stick är beroende av de föregående kan en sådan kompensering nödvändiggöra ytterligare justeringar i andra par, men det problemet är också hanterbart. Det är i själva verket en del av personalens, i första hand ställarens, som yrkestiteln lyder, yrkesskicklighet att kunna göra just dessa justeringar.

Problemet utgörs i stället av att bredningen av olika anledningar *varierar*, både längs hetan och mellan olika hetor. Speciellt blir hetan i princip alltid bredare i slutet än i början. Det kan då vara svårt att hålla den färdiga produktens bredd inom givna toleransgränser. Fenomenet har visat sig vara speciellt tydligt vid valsning av fjäderstål i profilutförandet rundkant, och särskilt då de plattare dimensionerna (med bredd större än ca 10 gånger tjockleken). Då är i extrema fall hetor alltför smala i början och alltför breda i slutet, jämfört med den accepterade breddtoleransen.

3.2 Uppgiften

Med denna bakgrund låter sig uppgiften ganska enkelt beskrivas. Den är att konstruera, implementera och testa ett system som kompenserar för denna bredningsvariation. Målet med systemet är att nå en tillfredsställande minskning av breddvariationerna med så enkla medel som möjligt. Det sista låter kanske lite diffust, men det kommer att visa sig räcka för alla viktiga designöverväganden.

4 Teoristudium

Det finns förstås många som genom tiderna studerat bredning. Fenomenet har ju varit känt åtminstone så länge man använt valsning som bearbetningsmetod. Sålunda finns det ett antal modeller som man kan använda för att beräkna den förväntade bredningen. Dessa metoder visar sig dock bara ha ett begränsat värde i detta sammanhang.

Därutöver visar sig också avsvalningsförloppet påverka den färdiga dimensionen.

4.1 Bakgrund

Det fanns till för några år sedan i princip två olika metoder för att konstruera matematiska modeller för hur bredningen fungerar. Antingen kunde man genom undersökningar och statistik ta fram approximativa funktioner. Eller också härledde man med hjälp av mekanikens lagar, mer eller mindre välgrundade antaganden och olika förenklingar sin modell. Trots omfattande ansträngningar hade man inte lyckats åstadkomma någon riktigt bra allmängiltig modell för dessa beräkningar [1].

I takt med att datortekniken utvecklats har med start på sjuttioalet emellertid FEM (finita elementmetoder) och andra beräkningsintensiva metoder seglat upp som användbara kandidater. Det är dock fortfarande orealistiskt att använda denna typ av beräkningar i ett system som både är såpass litet som det kan bli fråga om här, och som dessutom ska arbeta i någon form av realtid. Ett möjligt användningsområde skulle kunna vara att bekräfta giltigheten i andra enklare modeller, men värdet av detta är mycket tveksamt. Den bästa av sådana bekräftelser erhålls ju genom de mätningar i själva verket som ändå måste genomföras.

Återstår alltså att gå tillbaka till modeller skapade med de gamla metoderna, och undersöka vad de kan bidra med.

4.2 Vad beror bredningen på?

Det finns flera olika faktorer som påverkar bredningen. De som nämns i litteraturen är ofta

- Reduktion (tvärsnittsareans minskning)
- Valsdiameter
- Friktion
- Temperatur
- In- och utgångsdimension
- Stålsort
- Hastighet

Vilka faktorer som är viktigast av dessa råder det på sätt och vis delade meningar om. Många, t.ex. British Steel [2], hänvisar till friktionen som den viktigaste parametern, medan andra struntar i den och i stället pekar på valsdiametern och ingångsdimensionen som viktigast. De skilda uppfattningarna kan till stor del förklaras med att man har olika utgångspunkter, vilket gör att man betraktar olika parametrar som konstanta och/eller oviktiga.

Låt oss som exempel bara nämna ett par av modellerna. Ett tidigt arbete som många fortfarande refererar till är ett från 1927 av Ekelund [3]. Han kommer genom ett till större delen teoretiskt resonemang fram till att

$$b_2 = -2m(h_1 + h_2) \cdot \frac{x_0}{b_1} + \sqrt{4m^2(h_1 + h_2)^2 \cdot \left(\frac{x_0}{b_1}\right)^2 + b_1^2 + 4mx_0(3h_1 - h_2)}$$

där b_1 , h_1 , b_2 och h_2 är tjocklek respektive bredd före och efter sticket. x_0 beräknas ur geometrin och m ur geometrin och friktionen. Där kommer även temperaturen in, eftersom friktionen beror av den. Modellen tar ingen hänsyn till stålsort eller hastighet.

En vanligt förekommande empirisk modell är konstruerad av Wusatowski [3] Sven Ekelund: *Några dynamiska förhållanden vid valsning*; Meddelande nr 19 från Bergshögskolan, Jernkontorets Annaler 1927, Almqvist & Wiksells boktryckeri-A.-B., Uppsala 1927.

[4] och har följande utseende:

$$b_2/b_1 = abcd \left(h_1/h_2\right)^{10^{-1,269}(b_1/h_1)(h_1/D)^{0,556}}$$

Här är a , b , c , och d korrektionsfaktorer för temperatur, hastighet, stålsort och valstyp. D är valsdiametern.

Om man skärskådar de parametrar som används i modellerna inser man att det primärt bara är temperaturen som kan variera inom en post. Det finns alltså anledning att tro att breddvariationen i allt väsentligt kan hänföras till temperaturvariationer hos hetan. Detta blir en viktig utgångspunkt i det fortsatta arbetet.

4.3 Värdet av teorin

Spontant kan man ju nu tycka att problemet är ganska enkelt. Någon av de många existerande modellerna borde ju fungera tillfredsställande för att beskriva bredningen i de aktuella fallen. Då är det ju bara att sätta in ett antal konstanter och en uppmätt temperatur, så har man en färdig funktion för bredden. Men så enkelt är det inte.

De här modellerna är nämligen utformade för att beräkna just bredningen, som är i storleksordningen ett antal procent. De är därmed alltför grova instrument för att användas på de små breddvariationer vi intresserar oss för. För att kunna utgöra ett relevant underlag måste modellen ha en precision på några promille, och det har de *inte*. Ekelund redovisar tillsammans med sin modell en undersökning där avvikelsen mellan det beräknade värdet och uppmätt *medelbredd* är i storleksordningen fem procent, vilket han betraktar som ett tämligen gott resultat. Av experimentet att döma siktar modellen in sig på större tjocklekar än de som är aktuella i vårt fall, men modellens princip ska ändå gälla även för oss.

Wusatowskis modell innebär också problem. Visserligen tar den hänsyn till temperatur, men då i form av en tabell. Tabellen är väldigt enkel, $a=1.005$ för 750-900 °C och $a=1.0$ för högre temperaturer, så den kan inte ge oss något användbart resultat.

Ytterligare en anledning till att denna typ av modeller är av begränsat värde är att vi här inte bara har att ta hänsyn till bredningen i *ett* stick. Även om vi betraktar dimensionen ut från sista sticket i universalen som approximativt konstant, vilket är en rimlig och naturlig avgränsning av problemområdet, återstår tre stick med mellanliggande kantning i konti. Det innebär att en liten avvikelse i första sticket fortplantas på ett okänt sätt.

Det största värdet ligger i stället i att parametrarna som påverkar bredningen kan fastställas. Som det visat sig har temperaturen en avgörande betydelse, medan övriga parametrar är väsentligen konstanta för en given dimension och stålsort.

4.4 Annan temperaturpåverkan

Temperaturvariationerna påverkar bredden på ytterligare två sätt.

Det ena är att ju kallare materialet blir, desto mer "tungbearbetat" blir det. Detta får till följd att valsarna böjs isär något. Vid valsning av plåt, och speciellt då kallvalsning, är denna effekt högst påtaglig. Översatt till våra förhållanden skulle det innebära att kantparens valsar böjs isär, med ökad bredd som följd. Effekten bedöms dock tills vidare vara försumbar eftersom både temperaturvariationen och den i kantparet bearbetade ytan i detta sammanhang är liten.

Det andra sättet kommer in *efter* att materialet valsats. Under avsvälningen krymper naturligtvis materialet (typiskt med en faktor omkring $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), vilket inte är något problem i sig. Men eftersom materialet startar avsvälningen vid olika temperatur, men vid samma (nominella) dimension, krymper det olika mycket. Hur stor variationen blir beror förutom på initial temperaturvariation också på starttemperatur, stålsort och hur fort temperaturen sjunker, speciellt vid fasövergångar.

Ett överslag ger vid handen att denna effekt ger en variation på omkring en tiondels millimeter, vilket kan vara i storleksordningen 20 % av breddvariationen!

4.5 Slutsatser

Av detta resonemang drar jag följande slutsatser:

- Temperaturen är den ojämförligt viktigaste orsaken till bredningsvariationen.
- En undersökning i själva verket med syfte att hitta en modell för bredningen är helt nödvändig.

Eftersom temperaturen dessutom verkar vara den enda relevanta parametern som påverkar bredningen förefaller det som en god idé att genomföra en undersökning där man försöker relatera valsningstemperaturen till färdig bredd.

5 Modellsökandet

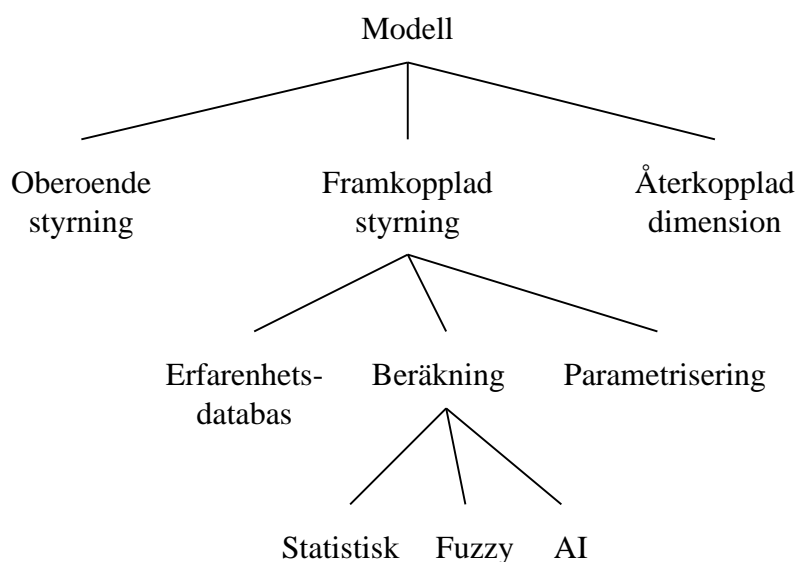
Ett regelsystem kan bygga på många olika principer. Här utreds vilka modeller som kan komma i fråga i detta projekt.

5.1 Modellens syfte

Syftet med modellen är att på något sätt beräkna en lämplig bredningskompensering, givet vissa indata. Vilka dessa indata är beror delvis på vilken typ av modell man till slut använder. Det är också omvänt så att de tillgängliga indata avgör vilka modeller som kan bli aktuella.

5.2 Möjligheter

Det finns en uppsjö olika tänkbara angreppssätt. För att skapa lite struktur bland dessa har jag delat upp dem som i Figur 4.



Figur 4. Möjliga modellers relation.

Först gäller det att avgöra vilken struktur man vill, eller snarare kan, ha på systemet.

5.2.1 Återkoppling

Normalt är ju återkoppling standardlösningen på alla regler tekniska problem, d.v.s. man mäter kontinuerligt resultatet av processen och justerar tills man är nöjd.

Att kontinuerligt mäta dimensionerna hos en förbipasserande heta har sina sidor. Om man valsar plåt eller band är problemet enklare, eftersom man då har en mycket väldefinierad bredd och en likaledes väldefinierad tjocklek. Till exempel kan bredden då ganska enkelt mätas med någon optisk metod. För stång blir problemet att hetans läge och vinkel spelar in på resultatet. Det finns utrustningar som löser detta, t.ex. genom att låta en kamera rotera runt hetan. Dessa utrustningar är oftast avsedda att användas på runt material, och i första hand som kvalitetskontroll. Men man kan i princip använda dom på andra "konvexa" tvärsnitt om man bara är intresserad av vissa mått, som i vårt fall bredden. Det förekommer valsverk som, åtminstone på experimentstadiet, använder denna typ av system för valsspaltsreglering.

I det här fallet är emellertid inte återkoppling lämplig. Framst är detta en kostnadsfråga. En dimensionsmätare som i realtid mäter på en het stång är, vilket kanske redan framgått, en mycket kostsam sak. Det gäller både anskaffning och drift/underhåll. En sådan lösning faller alltså på vårt krav på 'så enkla medel som möjligt'.

5.2.2 Oberoende styrning

En modell som styr processen oberoende av omgivningen, t.ex. en modell av typen "spela ihop 0,2 mm efter 10 sekunder och ytterligare 0,1 mm efter 15", kan vara till viss nytta. Den systematiska skillnaden i bredd mellan för- och slutände på hetan kan på detta sätt elimineras eller åtminstone kraftigt reduceras. Denna modell har emellertid en allvarlig begränsning i just det faktum att den inte anpassar sig till variationer i processen. Därmed kan ett system som bygger på en sådan modell inte minska spridningen mellan hetorna. Det har inte heller några förutsättningar att kompensera för lokala avvikelser inom en heta. Eftersom tidigare erfarenheter antyder att spridningen är en väl så stor del i problemet innebär detta att man i princip inte kan uppnå den önskade kvalitetshöjningen med denna modell.

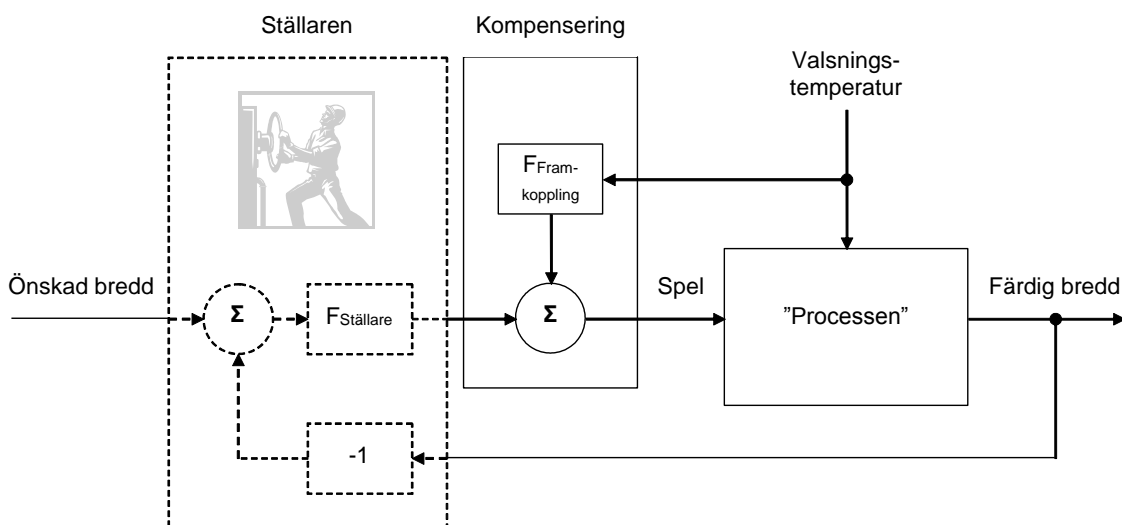
Återstår alltså möjligheten att utnyttja någon form av framkoppling.

5.3 Framkoppling

Framkoppling är en teknik för att eliminera inverkan av yttre störningar på ett system. Den kan man använda om man kan mäta störningen och dessutom vet hur den påverkar systemet. Till exempel kan man låta uppvärmningssystemet för ett hus dra på lite extra om man märker att utetemperaturen faller.

I vårt fall har genomgången av teorier för bredning visat att hetans temperatur borde vara den i sammanhanget särklassigt viktigaste störningen. Temperatur är dessutom en av de saker det är realistiskt att mäta. Därför koncentrerar jag mig i första hand på en modell som framkopplar temperaturen.

Om man nu som inbiten reglertekniker känner ett i det närmaste fysiskt obehag vid tanken på att inte ha någon återkoppling kan man betrakta operatören, ställaren, som en form av sådan. Denne mäter då och då resulterande dimension manuellt och skruvar lite på systemet för att få önskat resultat. Vi får då följande bild av vårt reglersystem (Figur 5):



Figur 5. Reglersystemet.

I praktiken kommer det även att ingå en kaskadkoppling i reglersystemet, nämligen regleringen av spelet. Den återkommer vi till senare.

Man skulle naturligtvis kunna tänka sig använda andra processparametrar för att kvantifiera störningen. En möjlighet är att mäta effekten hos motorn som driver valsparret, en annan är att mäta valskraften, t.ex. med en trådtöjningsgivare. I båda fallen får man en uppfattning om hur ”trögt” bearbetningen går. Eftersom detta enligt teorin är nära kopplat till bredningen borde man kunna beräkna en spelkompensering även utgående från en sådan mätsignal. Tills vidare betraktar jag detta som alternativa eller kompletterande mätmetoder, som man kan återkomma till om temperaturmätning skulle visa sig vara otillfredsställande.

5.4 En bra framkopplingslänk

Nästa steg är att hitta en funktion som omvandlar den uppmätta temperaturen till en lämplig spelkompensering, det som är $F_{\text{Framkoppling}}$ i figuren. Funktionen utseende kommer rimligen att variera beroende på vad som valsas för stunden.

I Figur 4 skiljs på tre olika metoder för att avgöra funktionens utseende.

- **Erfarenhetsdatabas.** Principen är att man för varje produkt konstruerar en funktion som sedan lagras i en databas.
- **Beräkning.** Med utgångspunkt från olika parametrar, såsom bredd, tjocklek och stålsort, och själva temperaturen beräknas spelkompenseringen. Beräkningen kan ske med olika metoder, t.ex. statistiska approximationer, någon fuzzy-algoritm eller något AI-system.
- **Parametrisering.** En ”principiell” funktion tas fram, och denna anpassas sedan till aktuella förhållanden via en eller ett par parametrar som operatören anger.

Som vanligt finns det både för- och nackdelar med de olika metoderna.

Om vi börjar med förutsättningar för att metoderna ska kunna fungera, så krävs det för de första två att det för varje produkt verkligen finns ett bestående samband mellan temperatur- och bredningsvariationen. Om det i stället är så att sambandet skiljer sig från gång till gång som produkten tillverkas kan dessa modeller inte enkelt anpassas till förhållandena just denna gång. Parameterlösningen däremot går lätt att justera efter hand. För att kunna använda denna krävs emellertid att det går att hitta en tillräckligt bra principiell funktion. Frågan är vilket som ger största felet, variationerna från gång till gång eller avvikelsen hos den principiella funktionen.

Från operatörens sida kan man tänka sig tre krav på systemet som spelar in redan vid valet av modell. Systemet ska vara

- Kontrollerbart
- Anpassningsbart
- Enkelt att hantera

Med kontrollerbart menar jag att operatören måste känna att denne har kontroll över systemet. Det ska inte bli en liten burk som på okända grunder gör något som inte går att påverka. Anpassningsbart är det om det med enkla medel går att använda på nya produkter.

Egentligen handlar det om att göra ett *användbart* system. En av Löwgrens riktlinjer [5] för ett användbart system är just att låta användaren ha kontroll över systemet. Därmed är en black-box-modell väldigt sällan en bra idé. En annan princip han nämner är vikten av feedback, d.v.s. att användaren ska kunna se när denne gjort något, och då även vad.

Både kravet på kontroller- och anpassningsbarhet kan uppfyllas med en parameterlösning. Den är dessutom enkel att implementera, och kräver förhoppningsvis inte några kompletterande undersökningar för att få operativ.

Om man tvingas välja en annan metod måste man ge avkall på åtminstone kravet på kontrollerbarhet, eftersom dessa metoder inte enkelt låter sig modifieras av en ”vanlig” användare. De blir i stället en typisk black-box. En variant är förstås att använda en kombination av metoder, och då kan man kanske komma runt detta.

5.5 Slutsatser

Den principiellt bästa lösningen verkar vara en parameterlösning. Med den kan man, förutsatt att den fungerar, uppnå samtliga uppställda krav på systemet. Om detta visar sig omöjligt krävs ytterligare undersökningar för att avgöra vad som kan fungera.

5.6 Nästa steg

Nästa steg blir att undersöka om det verkligen finns ett klart samband mellan hetans temperatur och dimensionen hos det färdiga materialet. Allt teoretiserande hittills förutsätter existensen av ett sådant samband, som åtminstone gäller genom en hel post.

Vidare undersöks om det då finns någon principiell funktion som tillräckligt väl beskriver bredningen. I så fall kommer systemet att byggas på denna princip. I annat fall kan förhoppningsvis undersökningen utvisa hur en bättre modell kan utformas.

6 Pilottest

För att få ett grepp på hur stor variationen i bredning är och vilket temperaturområde och -fall som är aktuellt genomfördes i detta skede ett pilottest. Minst lika viktigt är att prova och utveckla mätmetoderna i sig. Därefter går det förhoppningsvis lätt att genomföra de undersökningar som krävs för utformning och validering av kompenseringssystemet.

6.1 Syfte

Det finns två syften med denna testserie. Det ena är att undersöka hur stor breddvariationen verkligen är. Detta spelar sedermera in vid val av utrustning. Dessutom är det intressant att i efterhand kunna avgöra om, och hur mycket, kompenseringen minskar breddvariationerna.

Det andra, och betydligt viktigare, syftet är att utveckla metoden, så att de kommande testserierna går bra.

Dessutom behövs för nästa steg, val av temperaturmätare, en uppfattning om de temperaturområden och -fall som är aktuella. Detta är kanske egentligen inte en del av denna undersökning, men får hänga med på ett hörn i alla fall. I senare undersökningar, när temperaturmätningen är ordnad på ett tillfredsställande sätt, ska ju naturligtvis breddvariationen korreleras till temperaturvariationen.

6.2 Metod

Att stålet krymper när det svalnar är ett problem. Enklarest vore att mäta bredden på det helt kalla materialet, men då får man flera andra problem. Eftersom materialet då ligger i buntar är det svårt att komma åt de enskilda stängerna. Dessutom kan man inte avgöra var i hetan stängen hör hemma.

Vår ansats blir därför att mäta bredden i anslutning till kallsaxen, ett mått (kanske flera och ta medelvärde, om man hinner) per färdiglängd. Då blir det absoluta måttet inte helt korrekt, eftersom materialet inte är helt kallt ännu. Däremot bör den relativa förändringen bli hyggligt korrekt, eftersom temperaturen är måttlig samtidigt som det går någorlunda fort att klippa upp en svalbäddslängd.

För själva mätningen används ett elektroniskt skjutmått.

Temperaturmätningarna sker mera informellt. Intressanta mätningar är:

- Hur hög är typiskt temperaturen på väg in i konti?
- Hur mycket faller typiskt temperaturen på väg in i konti?
- Hur mycket faller typiskt temperaturen genom konti?
- Hur hög är typiskt temperaturen på väg ut ur konti?
- Hur mycket faller typiskt temperaturen på väg ut ur konti?
- Hur påverkar användandet av delningsax ovanstående frågor?

Här måste man tolka ”typisk” i vid mening. Temperaturfallet beror starkt av dimensionen.

Mätningen sker med en handhållen strålningspyrometer. Mätvärdena får därmed tas med en nypa salt. Relativt varandra stämmer de nog hyggligt, men de absoluta värdena kan nog skilja en hel del. Emissiviteten (se kapitel 7) är t.ex. inte kontrollerad.

6.3 Genomförandet

Bredden mättes vid kallsax, i hetans förända, mitt och slutända.

Temperaturundersökningen gjordes i två separata delar. Dels undersöktes separat typiska delnings- och ingångstemperaturer, och dels jämfördes utgångstemperaturer och -fall med uppmätt skillnad i bredning. Detta kan också delvis jämföras med befintligt material på uppmätta bredder i för- och slutända.

6.4 Resultat

Inget större avseende kunde fästas vid resultatet av breddmätningen. Det är svårt att hinna med att göra mätningen noggrant, och materialet är fortfarande så varmt att det ger problem för den som mäter. Hursomhelst noterades breddvariationer på upp till som mest ca 1 mm.

Temperaturmätningarna gav ett något mer relevant resultat. Vid delning i sträckan höll under de undersökta posterna den första delen typiskt 975-1000 °C då den gick in i konti och föll omkring 50 °C under vägen in. Andra delen var typiskt 60-70 °C kallare men tappade bara omkring 30 °C under vägen in. Temperaturer ut ur konti undersöktes för material som valsats utan delning. Vanliga temperaturfall låg på 20-50 °C där tunnare material helt naturligt stod för de högre temperaturfallen. Dessa typiska temperaturfall skulle man kunna jämföra med kontrollrapporter för tidigare valsningar. Där finns *en* noggrann mätning av bredden i *någon* för- och slutända för varje post. På detta sätt kan man i alla fall få en uppfattning om hur stora variationer som förekommer och vilka krav detta ställer på utrustningen.

Viktigast är dock att det genom pilottestet har utkristalliserats en mätmetod för en stor kartläggning. Eftersom materialet inte svalnar tillräckligt för att mätas före buntningen *måste* det ske senare, även om det medför en del merarbete. I stället märks de individuella färdiglängderna vid kallsaxen, så att de kan identifieras. Temperaturen kommer att mätas kontinuerligt med strålningspyrometer och loggas med en mätdator. Då kan den sedan korreleras till de punkter på hetan som de olika färdiglängderna kommer ifrån.

7 Temperaturmätning

Första förberedelsen för en större undersökning med syfte att relatera valsningstemperaturen till färdig bredd blir att ordna en tillförlitlig temperaturmätning. Vi vet redan, bl.a. från pilottestet, att storleksordningarna för bredd- och temperaturvariationerna är någon millimeter resp. hundratalet °C. Det ger att vi för att kunna ”kapa tiondelar” på breddvariationen måste kunna mäta temperaturen bättre än på tiotalet grader när. Det visar sig att verktyget för denna mätning är en strålningspyrometer, och i det följande redogörs för varför det är så och hur man bör gå till väga i övrigt.

7.1 Varför strålningspyrometer?

För temperaturmätningen finns det förutom krav angående noggrannhet, repeterbarhet och så vidare, ytterligare ett krav som absolut måste vara uppfyllt. Det är kravet på en kontinuerlig mätning medan hetan passerar.

På grund av rörelsen är det näst intill omöjligt att använda någon typ av termometer som är i direkt kontakt med hetan. Därmed återstår i princip bara strålningen att mäta på. Detta är också standardmetoden för liknande applikationer, så jag ser ingen anledning att söka andra vägar.

7.1.1 Strålningspyrometers funktion

En strålningspyrometer mäter temperaturen via den (infraröda) strålning som sänds ut från mätobjektet. Basen för detta är svartkroppsstrålning och Plancks strålningslag. Därifrån får vi två fenomen som kan utnyttjas för temperaturmätning. I korthet kan man säga att när temperaturen stiger så

- stiger strålningens intensitet för varje given våglängd
- förskjuts fördelningen mot en högre andel kortvågig strålning

Det första fenomenet utnyttjas i standardlösningen, *enfärgspyrometern*. Man mäter helt enkelt strålningens intensitet vid en för temperaturen lämplig våglängd (typiskt 1 μm för vårt temperaturintervall) och omvandlar denna till en temperatur. För att komplicera bilden något är kroppar i allmänhet inte helt ”svarta”, utan sänder bara ut en viss andel av den strålning en helt svart kropp med samma temperatur skulle ha gjort. Denna faktor kallas emissivitet, och måste alltså vara känd för att mätningen ska bli korrekt.

Det andra fenomenet används följaktligen i *tvåfärgspyrometern*. Där jämförs intensiteten vid två olika våglängder, och det är förhållandet mellan dem som omvandlas till en temperatur. Då kan man slippa ifrån ett antal problem. Till exempel kan man strunta i emissiviteten, bara den är lika stor vid de båda våglängderna. Därmed kan man till och med tillåta att den varierar med tiden, orsakat exempelvis av att sikten från pyrometern till mätobjektet ibland delvis skyms av något.

7.2 Placering

För att kunna kompensera för temperatursvariationer i K4 är första ansatsen att mäta temperaturen omedelbart före denna punkt. Miljön mellan paren är dock inte den bästa. Kylvatten, rök och ånga gör att pyrometers funktion störs. Ur denna aspekt vore den avgjort bästa lösningen att placera pyrometern redan före konti.

Det problem som då uppstår är att man inte har kontroll på exakt var hetan befinner sig. Två möjliga lösningar finns, antingen att använda en skannande utrustning som söker av ett större område, eller att kompromissa med miljön. Men då slår åter vårt krav på ”enkla medel” till, och utesluter den skannande lösningen. Den enda rimliga kompromissen blir då att placera pyrometern omedelbart före inledaren till K1, där man precis har återfått kontrollen över exakt var hetan befinner sig, men miljön ännu inte blivit katastrofalt dålig.

7.3 Miljöproblemen

De miljöproblemen vi då har att tampas med består under normal drift i:

- Rök och ånga
- Damm
- Kylvatten
- Glödskal
- Omgivningstemperatur och strålningsvärme

Rök och ånga kan man hantera genom att använda den tvåfärgspyrometer, som beskrivits ovan. Därmed kan man avgöra temperaturen även om strålningen delvis skärmas av rök. Dessutom gör det inte heller så mycket om hetan hamnar lite snett, så att inte hela mätområdet fylls ut.

Damm utgör ett problem eftersom det lägger sig på optiken. Den lösning leverantören förordar är att man försers pyrometern med renblåsning med tryckluft. Man tillhandahåller också speciella munstycken för detta. Denna renblåsning bidrar dessutom till att kyla utrustningen.

Kylvatten från valsarna som rinner ut ovanpå hetan stör naturligtvis mätningen. Även här är tryckluft lösningen. Man monterar ett munstycke som blåser bort vatten från mätytan.

Glödskal är ett generellt problem vid valsning. I det här fallet är problemet med glödskal att det är kallare än själva hetan, vilket naturligtvis ger en felaktig temperaturindikation. Tre olika åtgärder i kombination kan sättas in för att lösa detta. Till att börja med minimeras mängden glödskal genom att mäta på ovansidan, som efter S4-universalen är betydligt renare än kanterna. Sedan väljer man en liten mätyta och får då åtminstone ofta en signal härrörande från en mätyta fri från glödskal. Denna signal låter man sedan gå genom en ”peak picker”, ett filter som rider på topparna genom att begränsa hur fort signalen kan sjunka.

Omgivningstemperaturen får inte vara särskilt hög. I annat fall måste pyrometern förses med kylning. Vi återkommer till detta.

Därutöver måste man beakta att det inte är helt ovanligt att en heta ger sig iväg på ett oväntat sätt. Utrustningen bör vara utförd så att den har rimlig chans att klara en sådan direktträff.

7.4 Montage

Vi har redan tidigare kommit fram till att pyrometern ska mäta ovanifrån omedelbart före inledaren till K1. Då får vi tre problem att lösa:

- Åtkomlighet
- Hög temperatur
- Kraschsäkerhet

En möjlighet som kan bidra till att lösa alla dessa problem är att använda sig av fiberoptik. Då kan man placera själva detektorn med tillhörande elektronik en bit bort, på ett svalare och mera skyddat ställe.

Den optiska delen, som tål högre temperaturer, kan man då montera på en ”arm” in över inledaren. I denna arm kan ljusledaren och tryckluftslangen till renblåsningen av optiken vara någorlunda skyddade. Renblåsningen bör också räcka som kylning, så vi slipper ansluta vattenkylning.

Detta gör det också möjligt att lätt flytta undan pyrometern när man behöver komma åt att byta rännor eller vad det nu kan vara. Samtidigt kan man göra armen eftergivlig, så att den viks undan vid direktträff av en heta. Det ger pyrometern en god chans att klara en krasch. (Man kan aldrig vara helt säker i ett valsverk!) Dessutom är det lite billigare att byta ut en skadad fiberoptik än att byta en hel pyrometer.

För att göra det lättare att rikta in pyrometern när den ska tillbaka på sin plats finns även modeller med integrerat lasersikte.

7.5 Processor

Till pyrometern hör en s k processor, som gör utsignalen mera presentabel. Även denna finns i flera varianter med mer eller mindre sofistikerade funktioner i fråga om visning och signalbehandling.

I vårt fall är detta mindre intressant, eftersom signalen ändå så småningom ska kopplas vidare till ett annat system som kan sköta om sådana saker. Därför bör den enklaste varianten fylla vårt behov. Dessutom råkar den i det här fallet innehålla den ”peak picker” som vi har användning för.

7.6 Vårt val

Baserat på detta landar vi i en tvåfärgspyrometer med fiberoptik och enklaste varianten på processor.

8 Undersökningen

När vi nu ordnat en fungerande temperaturmätning är det dags att genomföra den tidigare konstaterat nödvändiga undersökningen.

8.1 Syfte

Ett primärt syfte med denna testserie är att bekräfta den arbetshypotes som jag hittills kommit fram till, nämligen att variationer i bredningen väsentligen kan hänföras till variationer i temperatur. I så fall får man, givet att processen i övrigt hålls konstant, en (helst injektiv) funktion från temperatur till bredning.

Vidare är syftet att undersöka vilka processmodeller som kan bli aktuella att använda sig av. Resultatet av detta ska, förutsatt att några slutsatser kan dras, ingå i underlaget för val av styrsystem för utrustningen och sedermera också för utveckling av algoritmer.

Om det skulle visa sig att dessa mål inte kan uppnås är det av vikt att denna undersökning ger tillfälle att ytterligare utveckla testmetoderna, så att de fortsatta tester som då blir nödvändiga kan utföras med framgång.

8.2 Bakgrund

De undersökta teorierna för bredning ger inget tydligt svar på hur temperaturen påverkar, speciellt inte som vi här har att göra med tre stick med mellanliggande kantning. Att slutresultatet blir bredare ju kallare materialet är när det valsas vet man av erfarenhet, men frågan är hur mycket bredare.

I sökandet efter en modell för bredningen är förhoppningen att en parameterbaserad lösning är möjlig. Den innebär i korthet att en enkel funktion som styrs med ett fåtal parametrar ska approximera förhållandet mellan temperatur och bredd tillräckligt bra.

8.3 Metod

Testerna går väsentligen ut på att jämföra erhållen färdigdimension med den temperatur stålet valsats vid. På så sätt kan man se om och hur breddavvikelse beror av förändringar i temperatur.

En förutsättning för testerna är därmed en tillförlitlig temperaturmätning, så en viktig förberedelse inför detta test är att trimma in den strålningspyrometer som tillsammans med en mät dator ska logga temperaturen.

Nästa steg är att organisera så att de uppmätta bredderna kan relateras till rätt punkt på de temperaturkurvor som man får ur mät datorn. Detta löses genom att vid kallsaxen märka de enskilda stängerna, så att man i efterhand, åtminstone vid skrivbordet, kan pussla ihop dem till en hel heta igen.

Till sist återstår bara att mäta upp bredden på de enskilda stängerna och sammanställa ett resultat.

8.4 Genomförande

Först togs ett antal poster ut till att vara provposter. Dessa valdes av nödvändighet med stor hänsyn till leveranstid, så att det skulle finnas tid till breddmätning. Trots det gick det att få ett

ganska brett spektrum av dimensioner. Totalt togs ca 25 ton material ut för testet, fördelat på sex olika dimensioner enligt följande tabell:

Post nr	Dimension [mm]			Stålsort	Ämnesdimension [mm fyrkant]	Ämnesvikt [kg/st]	Total vikt [kg]	Anm
	Bredd	Tjocklek	Kant					
0953	140,00	16,00	R20	27M12CB (Borstål)	165	1110	5550	Delning
0958	120,00	11,00	R20	51CrMoV4 (Mo+V-legerat kromfjäderstål)	115	633	3165	
0968	150,00	10,00	R7	DIN55Si7 (Kiselfjäderstål)	165	901	4505	
1028	88,90	15,88	R15	251A58 (Kiselfjäderstål)	165	1267	6335	
1054	100,00	13,00	R20	SAE5160 (Kromfjäderstål)	115	633	3165	
1062	100,00	10,00	R20	SAE5160 (Kromfjäderstål)	105	422	2110	

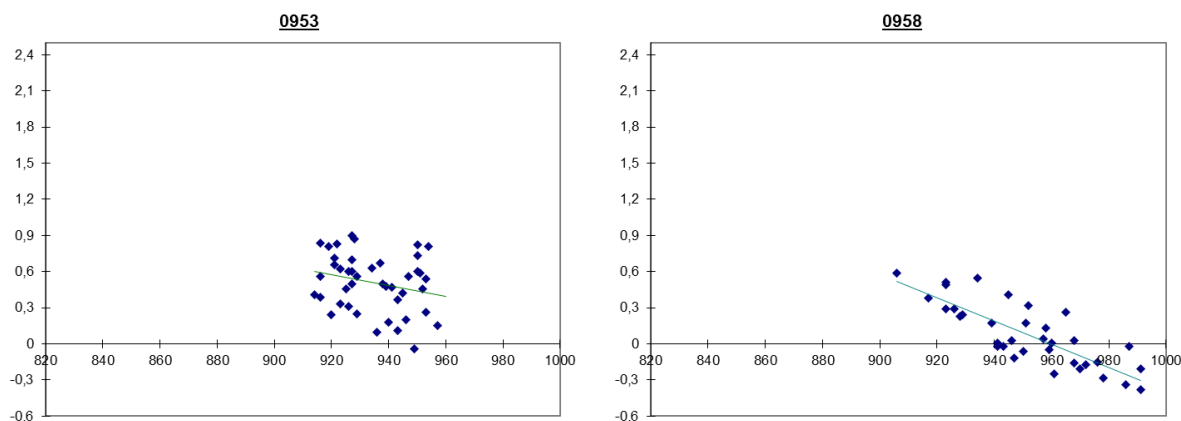
För att minimera risken att driftstörningar skulle störa mätningarna togs provposterna ut som sista delen av en större post. På så sätt kan man t.ex. nästan garanterat köra med samma inställningar genom hela posten.

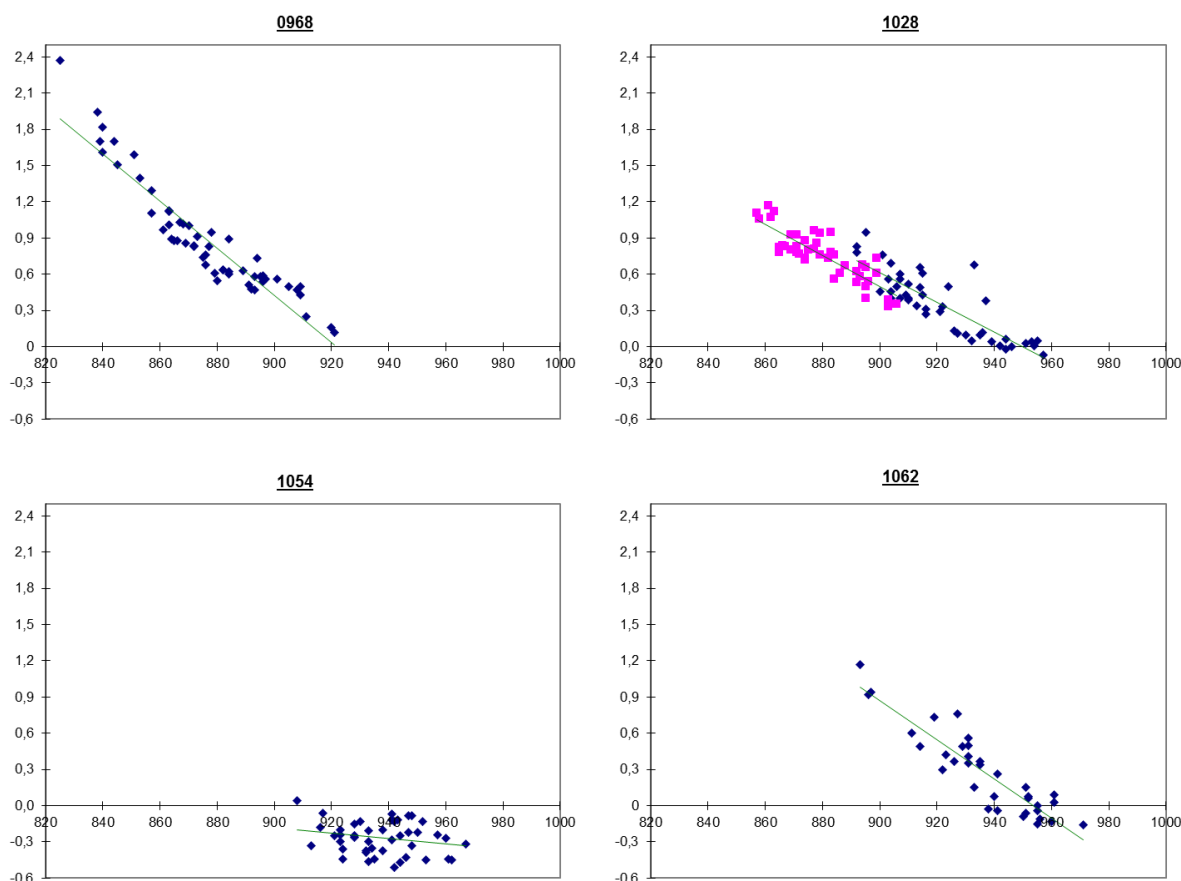
Vid valsningen mättes så temperaturen med strålningspyrometer före K1. Efter lite inledande justeringar verkar den ha fungerat mycket bra. Ett problem är dock att slutänden på hetan rör sig en del fram och tillbaka i sidled. Därmed förändras också temperaturen, eftersom den då mäts lägre ut mot kanten på hetan. Genom att vinkla pyrometern ca 40° ”framåt”, så den var riktad in i inledaren, minskades problemet.

Vid kallsaxen märktes de enskilda stängerna upp, och sedan de buntats och svalnat helt mättes bredden.

8.5 Resultat

Här följer resultatet, post för post, i grafisk form där breddavvikelsen [mm] har plottats mot valsningstemperaturen [°C] vid inledaren till K1.





Figur 6. Breddavvikelser vid olika temperaturer.

Man kan lätt se att såväl temperaturberoendet som spridningen varierar en del mellan posterna. Det som är svårare är att säga är vad denna variation beror på.

Det man av erfarenhet förväntar sig se är att tunnare material ger större breddvariation. Om man jämför posterna 1054, 0958 och 1062 (i den ordningen) som är av jämförbara ståltyper bekräftas att så också är fallet, både i absoluta tal och relativt bredden. Vidare verkar det som kisel fjäderstålet är betydligt mer temperaturkänsligt än kromfjäderstålet. Man kan t.ex. se att kisel fjäderstålet i post 1028 uppvisar ett tydligt temperaturberoende, trots att det valsats till en tjockare dimension än kromfjäderstålet i post 1054, som i det närmaste saknar temperaturberoende. Men undersökningen är för liten för att man ska kunna dra några definitiva slutsatser.

Det man trots allt *kan* säga om temperaturberoendet är att det, i de fall det förekommer, verkar vara approximativt linjärt inom det aktuella temperaturområdet. I diagrammen har också en anpassad rät linje lagts in som referens. Möjligen kan man i post 0968 (som har störst temperaturberoende) se en tendens till avvikelse från den räta linjen, men denna tendens är liten och kan mycket väl vara en slump. Det understryks av post 1028, som valsats med delning och har de båda delarna särskilda i figuren, där vi ser att delarna trots den konsekventa temperaturskillnaden fått i allt väsentligt samma anpassade räta linje, och framför allt med samma lutning.

Post 0953 ska man kanske inte fästa allt för stor vikt vid eftersom materialet där är ett borstål i stället för som i de andra fallen ett fjäderstål. Dessutom var den lite motsträvig och fastnade ofta i S6. Om man bortser från denna post är spridningen i bredd ungefär den samma på

samtliga poster om man räknar bort det linjära temperaturberoendet. Man får med så gott som samtliga mätpunkter om man tar till ett intervall på $\pm 0,4$ mm.

En sak som visade sig i undersökningen var att bredden varierar extra mycket precis i början på hetan. Bredden här är ofta större än förväntat, upp till 0,4 mm extra på bredden är vanligt. Detta bedöms bero på att processen inte är stabil i början på hetan. Därför har dessa mätpunkter strukits ur diagrammen. Emellertid kan man försöka ta hänsyn till detta vid den fortsatta systemutvecklingen.

Ibland kan man se en liknande tendens i slutänden, men den är inte lika vanlig och breddökningen är oftast betydligt mindre.

8.6 Slutsatser

- När spridningen är stor (större än $\pm 0,4$ mm) kan den överskjutande delen helt hänföras till temperaturvariationer.
- En approximation med en rät linje är då fullgod som modell för temperaturberoendet.
- Testerna har inte gett något definitivt svar på vad som påverkar denna linjes lutning.

9 Systemutveckling

Nu har vi tillräckligt på fötterna för att börja konstruera ett system som löser problemet.

Exakt hur man utformar systemet rent tekniskt är av mindre vikt för slutresultatet. Likväl utgör det ändå en högst väsentlig del av detta examensarbete, och ska därmed givetvis också behandlas i denna rapport. Som kompromiss har jag därför tagit med en översiktlig bild av systemets funktion och dess utveckling här, och i stället lagt en mera teknisk beskrivning, främst rörande styrprogramvarans utformning, i bilaga 1.

9.1 Systemets principer - vad det gör

Vi börjar med förutsättningarna. Vi har alltså konstaterat att systemet ska

- Mäta temperaturen före K1 med strålningspyrometer
- Framkoppla temperaturen med en linjär funktion

När vi nu tar steget från teoretiskt resonemang till praktisk handling tillkommer ett antal aspekter som vi måste hantera.

9.1.1 Tidsfördröjning

Eftersom temperaturen inte mäts på exakt samma ställe som kompenseringen sker, måste vi införa en tidsfördröjning på den inkommande temperatursignalen. Hur lång denna fördröjning ska vara varierar med valsningshastigheten, så den måste på något sätt mätas upp. I vårt fall nöjer vi oss med att mäta den tid det tar för hetans början att gå från pyrometern till en fotocell och sedan anta konstant hastighet för hela hetan.

9.1.2 Filtrering

Att låta den måttligt filtrerade signalen från pyrometern gå direkt in i reglersystemet riskerar ge ett ganska oroligt beteende. Ett (i någon mening idealt) sätt att filtrera den ytterligare vore att ta ett medelvärde över ett antal mätpunkter centrerade kring den punkt vars utsignal man för ögonblicket beräknar. I många fall är detta inte möjligt, eftersom denna princip utgör ett icke-kausalt filter (utsignalen beror av framtida insignal). Här går det dock utmärkt, eftersom vi kan utnyttja en del av tidsfördröjningen ovan för denna filtrering.

9.1.3 Parametrar

Vidare får man inte glömma bort att systemet måste hantera inmatning och justering av de parametrar som styr kompenseringen på ett smidigt sätt.

9.1.4 Spelning

Det räcker inte att räkna ut vilket spel man vill ha, det måste bli verklighet också. Dessutom måste man ha möjlighet att köra spelningen manuellt.

9.2 Maskinvarukonfiguration

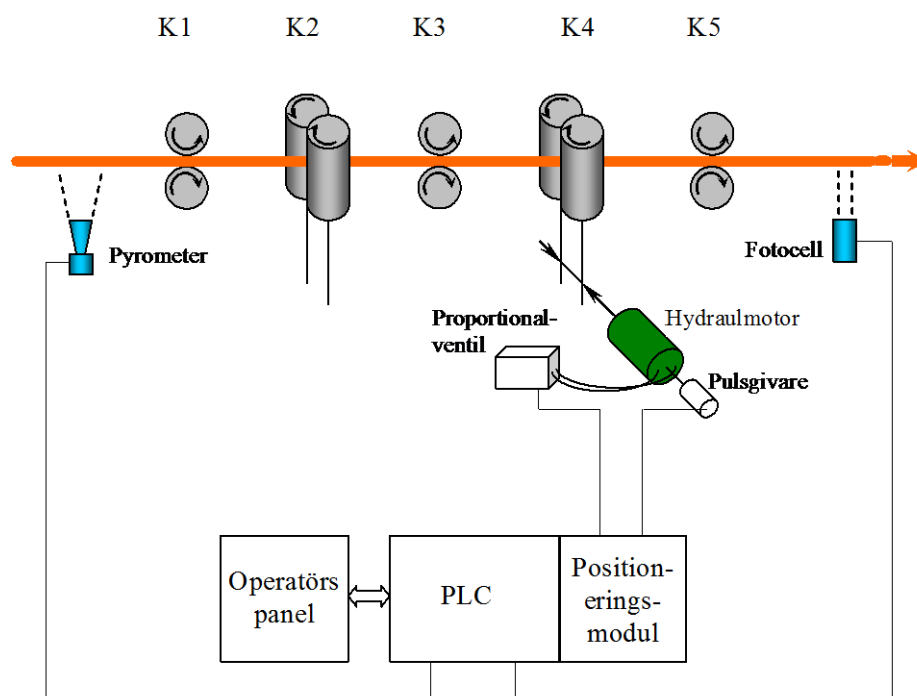
När vi nu fått en ganska klar uppfattning om vad systemet ska hantera blir nästa steg att avgöra vilken maskinell utrustning som krävs för att förverkliga detta.

I centrum kommer det oundvikligen att finnas någon form av programmerbart styrsystem, PLC. I det här valsverket använder man sedan tidigare flera oberoende PLC:er för styrning av

var sin del av processen. Just kontisträckan saknar dock helt sådan utrustning. Därför föll valet på att introducera en ny PLC här i stället för att inordna styrningen under någon annan del av processen, där den inte hör hemma. I övrigt används företrädesvis PLC:er från Siemens, så vi väljer en sådan även här. Den modell vi valde har redan i grundutförande ett antal in- och utgångar, så för den här applikationen fanns inget behov av att komplettera med extra I/O-moduler. Däremot kompletterades PLC:n med en operatörspanel för parametersättningen, och även en speciell positioneringsmodul för att hantera spelningen.

Denna positioneringsmodul utgör i själva verket regulatorn i den inre kretsen i en kaskadreglering av spelet. Utsignalen styr en proportionell hydraulventil kopplad till hydraulmotorn för spelning, och återkopplingen kommer från en pulsgivare på motoraxeln. Regleringen är en P-reglering med vissa bivillkor, t.ex. i fråga om maximal acceleration.

Pyrometern har vi redan diskuterat en hel del. Signalen därifrån är en standardmässig 4-20 mA strömslinga som kopplas direkt till en analog ingång på PLC:n. Vidare kopplar vi också in en redan befintlig fotocell för att mäta tidsfördröjningen. Det ger oss den schematiska bild av systemet som finns i Figur 7.

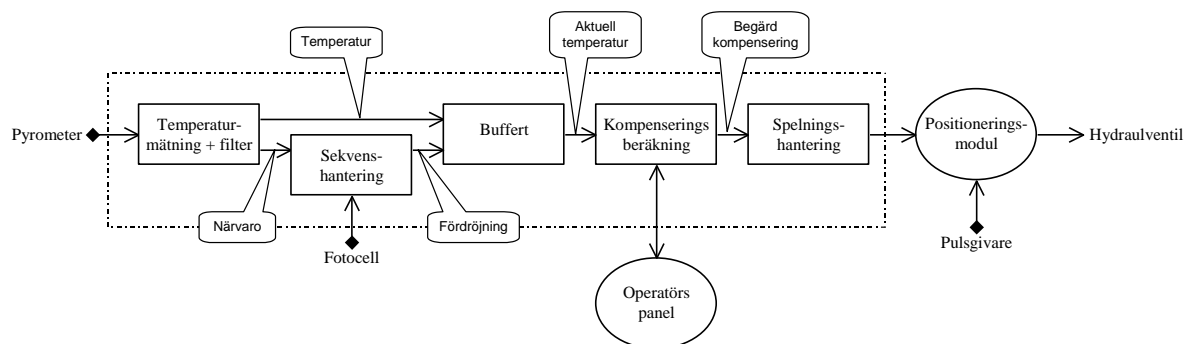


Figur 7. Schematiskt systemutseende.

Som framgår av figuren har vi valt att initialt bara kompensera i K4, som alltså är det sista kantparet. Man skulle naturligtvis också kunna införa en kompensering i K2, men erfaren personal gör bedömningen att det förmodligen inte är nödvändigt. Därför avvaktar vi med detta tills vidare.

9.3 Grundidén för programvaran

Programvaran är baserad på den bild av dataflödet som finns i Figur 8.



Figur 8. Programvarans princip.

Delarna samverkar på följande sätt:

Temperaturmätningen består i att ta in signalen från pyrometern, omvandla till temperatur och sedan filtrera med ett rullande medelvärde. Jag har använt samplingsfrekvensen 10 Hz och medelvärdesbildat över en sekund. Det är de storleksordningar som intuitivt känns rimliga.

Bufferten fördröjer signalen så att avsnittet på hetan som temperaturen hör ihop med kommer fram till kantparet samtidigt som signalen. Hur lång denna fördröjning ska vara mäts i sekvenshanteringen.

Sedan kommer själva beräkningen. Som den tidigare undersökningen visat är temperaturberoendet approximativt linjärt, så här används därför en rät linje för denna beräkning.

Linjen styrs av två parametrar, nominell temperatur [$^{\circ}\text{C}$] (som är den temperatur vid vilken kompenseringen är noll) och kompenseringsgrad [$\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$] (som ger linjens lutning). Dessa parametrar anges på operatörspanelen. Resultatet blir en bredningskompensering som går till spelningshanteringen.

10 Funktionstester

Då är programvaran på plats, och nästa steg är att koppla ihop systemet och se om allt fungerar i praktiken.

10.1 Bänktester

För att få en första bekräftelse på systemets funktion kopplades det upp på en provbänk. Här användes en simulerad temperatursignal, och hydraulmotorn lämnades obelastad.

De här testerna gick ganska bra. Efter lite trimning av parametrar för positioneringen verkade allt fungera som väntat.

10.2 Installationstester

Sedan installerades hela utrustningen på riktigt, och vi kunde börja med tester ”i själva verket”.

Då uppdagades plötsligt problem. Det visade sig att då hydraulmotorn var hårt belastad kunde positioneringsmodulen plötsligt sluta acceptera nya positionskommandon. Varken jag eller ens Siemens själva kom någonsin fram till exakt vad detta berodde på, men jag misstänker att det helt enkelt handlade om att dokumentation som medföljde positioneringsmodulen var bristfällig; vi råkade helt enkelt ut för ett odokumenterat beteende. Genom att inte utnyttja viss funktionalitet kom vi efter mycket experimenterande runt problemet.

Sedan har vi den elektriska miljön i ett valsverk. Jag har tidigare nämnt den besvärliga fysiska miljön med värme och rök, men vi har också att tampas med elektriska störningar. Elmotorer på hundratals kW, switchade motorstyrningar, induktiva laster och långa kablar gör att det finns många källor till störningar. I vårt fall fick vi problem med att svaret från pulsgivaren drabbades av störningar som fick den i positioneringsmodulen inbyggda övervakningen att slå bakut vid flera tillfällen. Sådana intermittenta problem är ofta mycket svåra att isolera och åtgärda. Så småningom visade det sig att man vid installationen missat att dra med skärmningen av pulsgivarsignalen ända fram till positioneringsmodulen, utan terminerat den när man kom in i skåpet, en halvmeter därifrån. Det var tillräckligt för att störningar skulle läcka in.

10.3 Verifiering

När väl dessa problem blivit lösta kunde vi gå vidare med att försöka verifiera att systemet fungerar rent principiellt. Vi började med en obetydlig kompenseringsgrad och ökade stegvis upp till överkompensering för ett antal olika dimensioner. Så långt man kunde observera med blotta ögat fungerade allt som det skulle.

11 Systemverifiering

Efter dessa funktionstester är det så dags att undersöka om vi uppnått den eftersträvade kvalitetsökningen.

Resultatet kan, för att säga det kort, beskrivas som: ”Ganska bra, faktiskt.” Men det finns fortfarande utrymme för förbättringar.

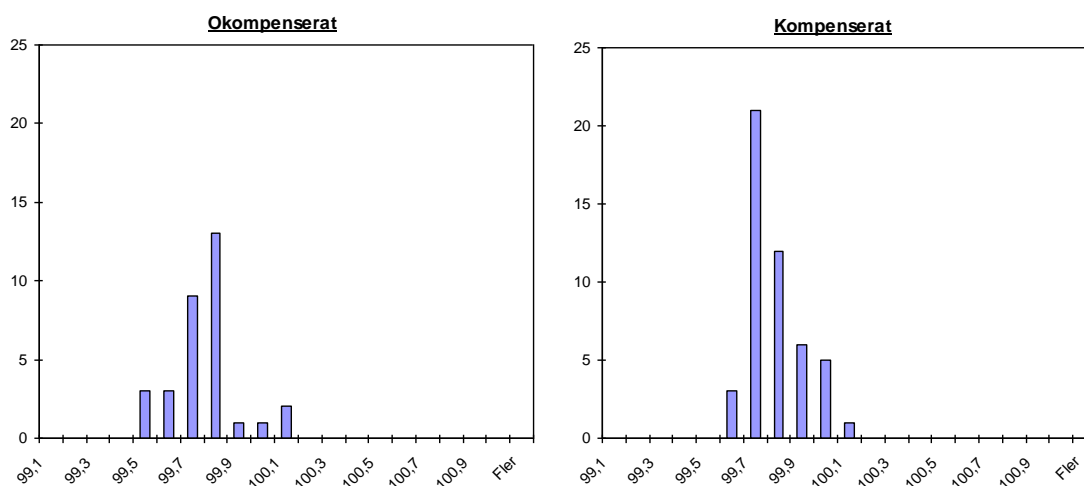
Här redovisas resultatet av de första kontrollmätningarna och en del idéer om vad man kan göra för att förbättra resultat och användbarhet ytterligare.

11.1 Kontrollmätningar

En första omgång kontrollmätningar har genomförts. Det som undersökts är spridningen i bredd bland de färdiga stängerna. Samtidigt har referensmätningar gjorts på material där temperaturkompenseringen inte använts. Tyvärr var det av valsningstekniska skäl inte möjligt att genomföra referensmätningar för alla de undersökta dimensionerna. Det hade också varit önskvärt att ha större mätserier, men valsprogrammet tillät tyvärr inte detta denna gång. Därför är slutsatserna att betrakta som preliminära.

11.1.1 100x12 R12

Vi börjar med att titta på en post där man valsat dimensionen 100x12 mm med kantradien R12 (radie 12 mm) av stålsorten 251A58 (ett kiselfjäderstål) från 422 kg tunga ämnen. Där ser breddfördelningen ut så här:

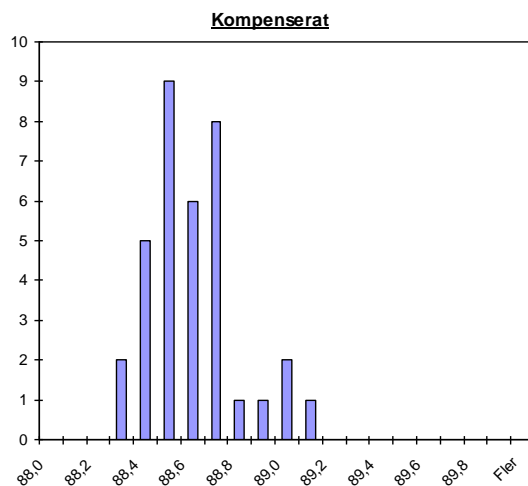


Figur 9. Breddfördelning för 100x12 R12

Här ser vi att man även utan kompensering fått en måttlig spridning. Alla mätningar ligger klart inom toleransgränserna. Det har man det faktum att så små ämnen använts att tacka. Då får man nämligen i motsvarande grad mindre temperaturvariationer, eftersom hetan blir kortare och då går fortare igenom verket. Trots detta har kompenseringen förmått pressa spridningen med nästan en tiondel i vardera änden. Alla dessa (kompenserade) mätningar ligger i intervallet $99,77 \pm 0,26$. Det är att betrakta som bra, speciellt som de undersökningar som låg till grund för projektet bara antydde att man skulle kunna nå $\pm 0,40$.

11.1.2 88,9x14,29 R15

Här har 88,9x14,29 R15 valsats av 251A58 från 633 kg:s ämnen. Här kunde ingen referensmätning genomföras, men här är spridningen för det material som valsats med kompensering:

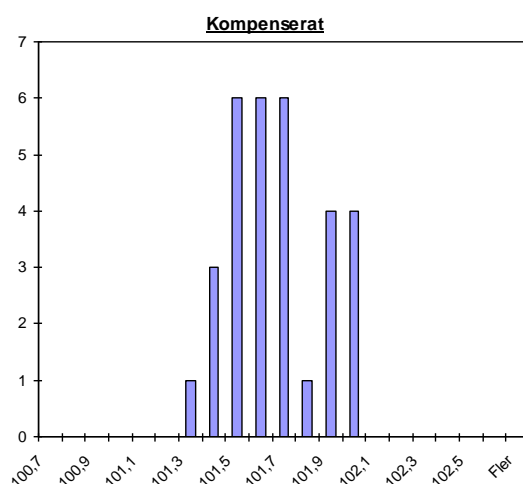


Figur 10. Breddfördelning för 88,9x14,29 R15

Den här posten blev inte riktigt bra rent valsningstekniskt. Man hamnade lite fel och fyllde inte ut radien på profilen riktigt. Det kan man tänka sig skulle ha inverkat menligt även på spridningen, men det verkar inte som om det var något allvarligt problem. Mätningarna ligger i intervallet $88,66 \pm 0,39$. Det får man betrakta som halvbra, men det är svårt att veta säkert utan referensmätning. Den allmänna känslan är att man kunde ha kompenserat lite hårdare.

11.1.3 101,6x14,29 R15

I nästa post har man valsat 101,6x14,29 R15, åter av 251A58 från 633 kg:s ämnen. Spridningsdiagrammet ser då ut så här:



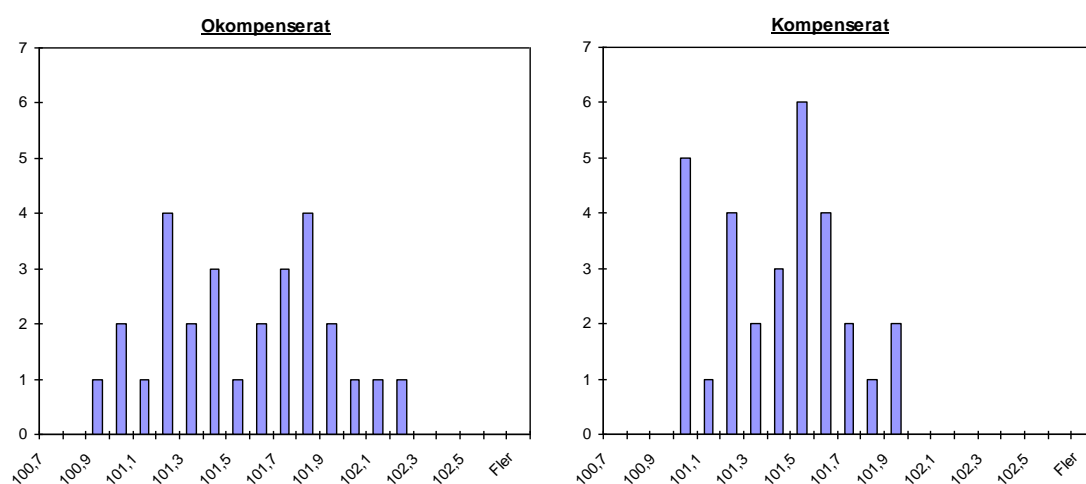
Figur 11. Breddfördelning för 101,6x14,29 R15

Intervallet på mätningarna är här $101,63 \pm 0,34$. Man har alltså hamnat helt rätt i bredd, och har mycket god marginal till toleransgränserna. I själva verket har man bara utnyttjat halva toleransvidden, eftersom den var $\pm 0,70$.

För att ge någon vetenskaplig referens åt dessa mätningar kan man relatera till post 1028 i den ursprungliga undersökningen. Om man där tittar på de båda delarna efter ämnesdelning var för sig, har de motsvarande vikt och stålsort som det som valsats i den här mätningen. Eftersom post 1028 valsades till en tjockare dimension borde spridningen (för respektive del) ha varit mindre där än den var i den här mätningen. Men det är den inte, så kompenseringen har tydligen lyckats minska spridningen. I post 1028 var spridningen ca $\pm 0,5$ för förstadelen och ca $\pm 0,4$ för andradelen. Det borde innebära att vi lyckats minska spridningen med någon tiondel även här.

11.1.4 101,6x14,29 R15

Till sist har vi en post där man utnyttjat ämnesdelning. Färdig dimension var 101,6x14,29 R15, återigen av 251A58 men nu från 1267 kg:s ämnen. Här kunde även en referensmätning genomföras. Då ser diagrammen ut så här:



Figur 12. Breddfördelning för 101,6x14,29 R15 med delning

Här kan man ganska tydligt se att den okompenserade spridningen har två toppar, förmodligen en för vardera delen av ämnet. På diagrammet för det material där kompenseringen använts finns inte denna tydliga tendens. Topparna har gått ihop och man har därmed kapat nästan två tiondelar i vardera änden på spridningen. Förmodligen kunde man ha kompenserat ytterligare lite hårdare och fått ett ännu bättre resultat. Emellertid är de uppnådda $101,38 \pm 0,47$ inte något direkt dåligt resultat om man jämför med den okompenserade spridningen $101,50 \pm 0,67$.

11.2 Potential

Den här undersökningen visar att anläggningen har en klar potential att bli ett bra hjälpmedel för att hålla och minska toleransvidden. När personalen får mer erfarenhet av hur man ställer in kompenseringen för olika produkter och märker hur man bäst mäter på materialet för att justera inställningarna kan man säkerligen få ett ännu bättre resultat än i den här undersökningen.

Det bör naturligtvis så småningom också utföras en mer omfattande undersökning av vilken förbättring man får med utrustningen. Då bör man också fundera på hur sträckningen påverkar bredden. Under den här undersökningen har den frågan aktualiserats eftersom det har varit oväntat stor skillnad mellan måtten i varmt och kallt tillstånd på en del hetor som sträckts, men aldrig på dem som inte sträckts.

12 Slutord

Då har det blivit dags att summera projektet. Hur gick det egentligen?

12.1 Utestående tekniska aspekter

En aspekt som återstår att ta en närmare titt på är olika säkerhetsfrågor. Det handlar då inte bara om personsäkerhet, t.ex. beträffande klämrisk och liknande, utan även om att ett fel på en enskild komponent helst inte ska få ett större haveri till följd. Det finns exempelvis ett antal gränsvärden och liknande parametrar i positioneringsmodulen, vars inställningar bör optimeras för maximal person- och driftsäkerhet. FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) vore en väg att utreda dessa frågeställningar.

12.2 Övriga svårigheter

Ett problem värt att nämna var inte rent tekniskt, utan snarare rent organisatoriskt. Det ingår inte i företagets vanliga rutiner att driva den här typen av utvecklingsprojekt internt, utan de läggs normalt ut som ett helhetsåtagande hos någon leverantör. Projektet kunde därför aldrig luta sig mot någon organisation för att göra prioriteringar och för att få fram resurser, något som den här typen av utveckling behöver för att flyta smärtfritt.

12.3 Resultat

Tekniskt kan man inte annat än beskriva arbetet som framgångsrikt. Även om mätvärdena i sig är preliminära har den framtagna utrustningen visat sig kunna minska bredningsvariationen på ett signifikant sätt. I verifieringen antyds att man faktiskt kan minska toleranserna ned mot de $\pm 0,4$ mm som indikerades i de inledande undersökningarna. Det skulle innebära en minskning med uppemot 40 % jämfört med vad man klarar för de svårare dimensionerna idag, och det skulle vara en oerhörd förbättring. Redan i verifieringen verkar vi ju ha nått närmare 30 %, och då har ändå inte de tacksammaste dimensionerna testats ännu.

Vidare kan man konstatera att som systemet kom att utformas, borde det vara användbart även för en rad andra produkter än de som ursprungligen var i fokus. Detta bör man undersöka vidare i framtiden.

13 Referenser & litteratur

13.1 Referenser

- [1] John A. Schey (Ed): *Metal Deformation Process – Friction and Lubrication*; Marcel Decker Inc., New York 1970.
- [2] British Steel Corporation: *Roll Pass Design*; British Steel Corporation, Sheffield 1975.
- [3] Sven Ekelund: *Några dynamiska förhållanden vid valsning*; Meddelande nr 19 från Bergshögskolan, Jernkontorets Annaler 1927, Almqvist & Wiksells boktryckeri-A.-B., Uppsala 1927.
- [4] Z. Wusatowski: *Hot Rolling: A Study of Draught, Spread and Elongation*; Iron Steel, Vol 28, 1955.
- [5] Jonas Löwgren: *Human-computer interaction*; Studentlitteratur, Lund 1996.

13.2 Litteratur

Jag vill också nämna ytterligare ett par bra källor till kunskap inom aktuella områden, även om de inte direkt refererats här.

- Järnbruksförbundet/Peter Morsing: *Valsningsteknik*; AB Grafiska Gruppen, Stockholm 1982. Beskriver kortfattat men bra alla intressanta aspekter på valsningen som sådan.
- Torkel Glad/Lennart Ljung: *Reglerteknik Grundläggande teori*, Studentlitteratur, Lund 1989. All reglerteknik som använts här (och mer därtill) utförligt förklarad.

Bilaga 1: Mer om systemutvecklingen

Den här bilagan behandlar lite mer detaljerat systemutvecklingen och speciellt programmeringen, och är riktad till de som är speciellt intresserade av detta. Därmed tillåter jag mig också att vara lite mer teknisk, och förutsätta att läsaren är bekant med olika begrepp inom området.

Utvecklingsmiljö

Som en liten introduktion till beskrivningen av utvecklingsmiljön vill jag göra en liten utveckling och berätta ett par detaljer om ett tidigt programmerbart styrsystem som jag haft (det tvivelaktiga) nöjet att arbeta med förut. Jag talar om det gamla ASEA-systemet PROMATIC från början av sjuttioalet. Det systemet är uppbyggt kring standardlogikkretsar (alltså typiskt kretsar ur 4000-serien) och programmerbarheten består i EPROM-kretsar som man plockar ut ur systemet och programmerar i en separat apparat. Inga mikroprocessorer här, inte. En gång när jag läste i manualen till detta system slog det mig att det blockschema jag tittade på egentligen var ett kopplingsschema. (Bara pin- och kretsnumreringen samt spänningsmatningen var utelämnad.) Standardutvecklingsmiljön består som sagt av en separat programmeringsapparat. Där stoppar man i EPROM-kretsarna och knackar tecken för tecken in assemblerkoden som man tagit fram på papper. Översättningen från assembler till hex-kod automatiseras genom att både kommandot och motsvarande hex-kod är tryckta på tangenten. Programmerarmodellen är synnerligen rudimentär. Den är helt enkelt en stackmaskin med maximala stackdjupet ett ord och ordbredden en bit!

Men naturligtvis har det hänt saker sedan dess. I det här projektet har jag använt Siemens egna utvecklingsmiljö STEP 7, och programmerarmodellen i den miljön är i huvudsak en stackmaskin med maximala stackdjupet ett ord och ordbredden en bit!

Nåväl, det finns ju en anledning till denna skenbara brist på utveckling. När man hanterar digitala signaler med logiska regler är det faktiskt ett mycket effektivt alternativ. Dessutom har miljön faktiskt utvecklats på andra punkter. Det har tillkommit en hjälpstack där man kan lagra flyttal för beräkningar och instruktionsuppsättningen har utökats, främst med ordentliga hoppinstruktioner.

Dessutom är programmerarmodellen numera naturligtvis realiserad i en mikroprocessor. Därmed har man också uppnått den största förbättringen, man har fått tillgång till ett OS. Helt plötsligt öppnar sig en ny värld, där man kan använda olika interrupt, och låta kommunikation med andra enheter ske i bakgrunden.

En sådan annan enhet är programmeringsenheten, som nu är en vanlig PC. Där finns naturligtvis "som vanligt" en editor och en kompilator. Men det finns en del annat också.

Det första jag vill nämna är en "projekthanterare" som håller ihop alla enheter som är sammankopplade i verkligheten också i datorn. På Windows-manér använder man en trädstruktur där man på rotnivå har "nätverket" med sammankopplade PLC:er, operatörspaneler och vad det nu kan vara, och under dessa ordnas konfigurering och programkod för respektive enhet in. Man kan också få fram egenskaper och starta editorer på sedvanligt sätt. Ganska trevlig pryl, faktiskt.

Nästa sak att nämna är att det förutom den vanliga texteditorn också finns vad man kallar en "inkrementell editor" som kontinuerligt kontrollerar syntax och kompilerar, varefter man skriver.

Till sist ingår också en debugger. Den har lite intressanta egenskaper utöver de vanliga, som kommer sig av att man i praktiken förfogar över ett multiprocessorsystem (en processor i PLC:n och en i programmeringsenheten/PC:n.) Man kan nämligen inte bara betrakta koden och sätta brytpunkter osv som vanligt, utan man kan köra kontinuerlig visning av resultaten i det betraktade kodavsnitten (huvudloopen exekveras ju normalt om och om igen med några ms mellanrum i den här typen av system) och dessutom *göra ändringar* i koden under gång.

Programspråk

Att till fullo utnyttja hela detta system kräver att man på samma sätt som i PROMATIC:en använder ett assemblerliknande språk, vilket jag därför gjorde. Språket heter SStatement Logic (STL). Om man föredrar det kan man i stället använda ett reläschemat eller ett logikschema, men då tappar man i funktionalitet och (tycker jag) överskådlighet när det gäller den här typen av program.

Organisatoriskt finns i STL tre olika typer av moduler; Funktioner (FC), funktionsblock (FB) och datablock (DB).

Funktioner och funktionsblock har roller som är analogt med t.ex. begreppen funktioner och procedurer i Pascal. De delas i sin tur fritt in i nätverk, en terminologierest från relä- och logikschema. Nätverksindelningen har ingen annan funktion än att tydliggöra strukturen hos programmet.

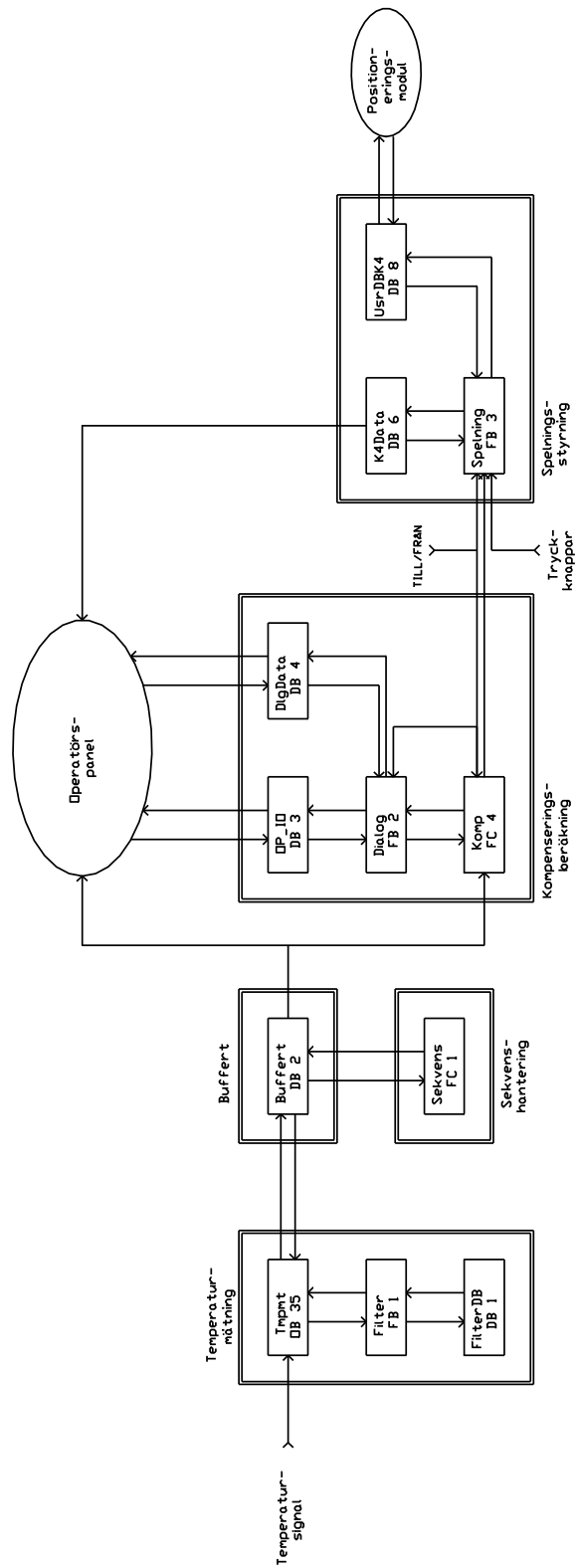
En speciell typ av funktionsblock är organisationsblocken (OB). De anropas automatiskt av OS:et vid specifika tillfällen, och är alltså det som driver programexekveringen.

Ett datablock är helt enkelt en samling data, och påminner alltså mycket om en post (record/struct). Intressant är att man kan koppla instanser av datablock till funktioner/funktionsblock, så att data och beteende länkas samman, och därmed få en rudimentär form av objektorientering. Datablocket kan också användas fristående för kommunikation mellan olika enheter. I det här projektet använder vi denna princip t.ex. för kontakten med operatörspanelen. Då postar man meddelanden och data i datablocket, och sedan sköter OS:et om överföringen.

Programmets utformning

Jag tänkte inte gå in på några detaljer om hur själva programmet realiserats, men en liten översikt ska vi ha.

I Figur 13 finns en utökad version av Figur 8 för att åskådliggöra hur de olika modulerna samverkar. Respektive moduls funktion beskrivs i tabellen som följer.



Figur 13. Programmets modularisering.

Namn	Block	Beskrivning
Tmpmt	OB 35	Läser av temperaturen, skickar den på filtrering i FB 1 och sätter in svaret i bufferten. Sedan uppdateras pekarna i bufferten. OB 35 anropas periodiskt (här med inställd samplingsfrekvens) av operativsystemet
Filter	FB 1	Filtrerar insignalen med ett rullande medelvärde.
FilterDB	DB 1	Instansdatablock för FB 1. Minne för filtret
Buffert	DB 2	Bufferten utgör interfacet mellan den periodiska temperaturmätningen och resten av programmet, som är (så att säga) kontinuerligt. Här lagras signalen i en cyklisk buffert, pekare för insättnings- och uttagspunkt i denna, start- och sluttemperatur för senaste hetan och en närvarobit.
Sekvens	FC 1	Sköter sekvensen av händelser då en heta passerar. Startar tidmätning då hetan kommer till pyrometern; stoppar tidmätning, beräknar och sätter in fördröjning och starttemperatur i DB 2 vid signal från fotocell; sätter in sluttemperatur då hetan passerat pyrometern; nollställer fördröjning då hetan passerat fotocellen.
Komp	FC 4	Beräknar kompenseringen utgående från temperaturen från DB 2 och parametrarna från FB 2. Kompenseringen begränsas till temperaturer över 850 °C, och om systemet är FRÅN så ges resultatet noll.
Dialog	FB 2	Sköter dialogen med användaren på operatörspanelen.
OP_IO	DB 3	Minnesarea för att komma åt de mera avancerade funktionerna hos operatörspanelen.
DlgData	DB 4	Instansdatablock för FB 2. Innehåller aktuell utgångstemperatur och kompenseringsfaktor och de justeringar användaren matat in.
Spelning	FB 3	Hanterar manuell spelning och automatisk positionering samt synkronisering av positionsgivare i positioneringsmodulen via DB 8.
K4Data	DB 6	Instansdatablock för FB 3. Innehåller senaste kompenseringen och ett antal flaggor för aktuell status.
UsrDBK4	DB 8	Minnesarea för att kommunicera med positioneringsmodulen.

(Några hjälpfunktioner och organisationsblock som inte bidrar till överskådligheten har utelämnats här.)