

Mikael Frennberg

Kalibrering av rundhetsnormaler

SP
Swedish National Testing and Research Institute
Mått och Vikt
SP RAPPORT 1991:22



Abstract

Calibration of roundness standards

Roundness measurements have many important applications in industry and science. New quality standards have increased the need to verify and calibrate roundness measurement equipments.

To meet these new requirements the national laboratory for length, the Swedish national testing and research institute (SP), has installed a very precise roundness measuring equipment. This equipment is intended basically for calibration of roundness standards.

This report gives an overview of the system, an evaluation of the accuracy and describes the calibration of the system and the tests that were made.

SP
SP RAPPORT 1991:22
ISBN 91-7848-278-X
ISSN 0284-5172
Borås 1991

**Swedish National Testing and
Research Institute**
SP REPORT 1991:22

Postal Adress:
Box 857, S-501 15 BORÅS, Sweden
Telephone + 46 33 16 50 00
Telex 36252 Testing S
Telefax + 46 33 13 55 02

Innehållsförteckning

	Abstract	2
	Innehållsförteckning	3
	Sammanfattning	4
1	Inledning	5
2	Rundhetsmätning	6
2.1	Definitioner	6
3	Systembeskrivning	8
3.1	Blockschema	8
3.2	Spindel	8
3.3	Pick-up	9
3.4	Signalbehandling	10
3.4.1	Filter	11
4	Spårbarhet	12
4.1	Mätmetoden	12
4.1.1	Felseparering	12
4.2	Kalibrering av pick-up	14
4.2.1	Mätningar	14
4.2.2	Diskussion	17
4.2.3	Osäkerhetsfaktorer vid kalibreringen	19
4.2.4	Dynamiska egenskaper	20
4.3	Reproducerbarhet	20
4.4	Mätosäkerhetsanalys	21
4.4.1	Reproducerbarheten	21
4.4.2	Pick-upens kalibrering	21
4.4.3	Wobbling	22
4.4.4	Sammanlagd osäkerhet	22
5	Polärdiagram	23
6	Referenser	27

Sammanfattning

Rundhetsmätning har många tillämpningar inom tillverkningsteknik och mätteknik. Höjda kvalitetskrav ökar behoven av korrekta rundhetsmätningar. Svensk industri har uttryckt ett behov av att kunna kalibrera normaler för rundhetsmätare vid ett nationellt laboratorium.

För att kunna möta dessa behov, har vi på Riksmätplatsen för längd (SP) installerat en noggrann rundhetsmätare. Denna är försedd med speciell utrustning och programvara för att kunna kalibrera rundhetsnormaler med hög mätnoggrannhet. Efter installationen har vi genomfört ett antal tester på systemet för att kunna dokumentera dess prestanda. Till att börja med har dessa aktiviteter koncentrerats till ovannämnda tillämpning, kalibrering av rundhetsnormaler, där noggrannheten hos systemet utnyttjas till det yttersta.

I denna rapport ges en sammanfattande beskrivning av systemet och den mätnoggrannhet som uppnås, samt av de kvalitetssäkringsåtgärder och tester som utförts.

1 Inledning

Rundhetsmätning är ett centralt begrepp inom både mätteknik och tillverknings-teknik. Många konstruktionselement har en rund geometri som är väsentlig för funktionen. Det är därför i många fall nödvändigt att kunna bestämma avvikelser från en perfekt rund form hos ett mätobjekt, för att kunna avgöra dess lämplighet för sin uppgift.

Ett exempel av speciellt intresse för ett kalibreringslaboratorium är rundhetsmätning på runda inställningsnormaler såsom inställningsringar. Det är nämligen av stor betydelse att ringen är tillräckligt rund för att man på ett meningsfullt sätt skall kunna definiera och mäta en diameter.

En rund kropp kan definieras som en kropp vars tvärsnitt utgör en perfekt cirkel. Avvikelsen från rundhet kan då definieras som skillnaden i avstånd från olika punkter på periferin till centrum punkten.

För att kunna göra en korrekt rundhetsmätning krävs en rund referens att jämföra med. Detta innebär i praktiken att rundhetsmätaren måste kalibreras mot en normal med känd rundhet. Hittills har det varit ett problem att få sådana normaler kalibrerade i Sverige. Därför har vi byggt upp en sådan kalibreringsresurs vid SP (riksmätplatsen för längd).

Projektet har finansierats av SP och Styrelsen för teknisk ackreditering.

2 Rundhetsmätning

En rundhetsmätning relateras till mätobjektets centrumpunkt (som definieras av punkterna på objektets periferi). Centrumpunkten är en teoretisk punkt som inte har någon direkt fysisk motsvarighet. Tyvärr går det inte att mäta rundhetsavvikelser genom att mäta en diametervariation. Det kan lätt visas att det finns geometriska element som har en sådan form att de har en konstant diameter trots att de inte är runda (s k liktjockingar) Se t.ex. [1].

Istället mäts radivariationen hos objektet i förhållande till en av mätutrustningen genererad centrumpunkt. För detta ändamål krävs att mätobjektet eller mätanordningen roterar. Rotationsaxeln måste vara oberoende av mätobjektets mantelyta. Rotationsaxelns centrumlinje bildar en skärningspunkt med det plan som mät-punkterna ligger i. Denna används som referenspunkt för radiemätningarna.

Det som mäts är i praktiken avvikelsen från en rund cirkel som genereras av den roterande rörelsen. Avvikelsen mäts av en pick-up, vars utslag registreras i lämplig längdenhet.

Före mätningen riktas mätobjektet upp så att dess centrumlinje sammanfaller med instrumentets rotationsaxel

2.1 Definitioner

ISO 6318 fastlägger några viktiga definitioner som rör det tidigare beskrivna. Definitionerna utgår från att det finns en roterande axel hos systemet (spindeln) som i varje ögonblick befinner sig i ett definierbart läge. Ser man till hela rörelsen roterar spindeln i genomsnitt kring en axel som kan användas som referensaxel.

"Omedelbar (momentan) rotationsaxel : Centrumlinje kring vilken spindeln på ett instrument effektivt roterar vid varje tillfälle."

"Referensrotationsaxel : Medelvärde för den omedelbara rotationsaxel kring vilken instrumentets spindel roterar."

"Rotationsfel : Skillnad mellan läget för den omedelbara rotationsaxeln och referensrotationsaxeln."

Rotationsfel kan ha radiella, axiella och "vippande" komponenter. Orsaken till rotationsfel står att finna i ofullkomligheter i spindelns lagring.

För att kunna utvärdera mätresultaten från en rundhetsmätning behöver man en cirkel att jämföra med.

"Referenscirkel : Cirkel som på ett definierat sätt inpassas i den avkända profilen och som rundhetsavvikelser och geometriska rundhetsparametrar hänförs till."

Den viktigaste av de referenscirklar som definieras i ISO 6318 är:

"Medelcirkel enligt minsta kvadratmetoden : Cirkel sådan att summan av kvadraterna på avvikelserna från denna cirkel till den avkända profilen (...) är minimum."

Periodiciteten hos rundhetsavvikelsena definieras genom antalet hela våglängder som får plats på ett varv runt mätobjektet. Man kan därigenom dela upp avvikelsena i fourierkomponenter.

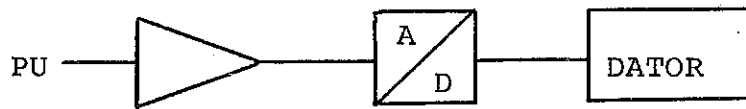
"Svängningar per varv; upr : Antal hela periodiska vågighetsrörelser på arbetsstyckets omkrets."

Mätsystemets "gränshfrekvens" anges i upr.

3 Systembeskrivning

3.1 Blockschema

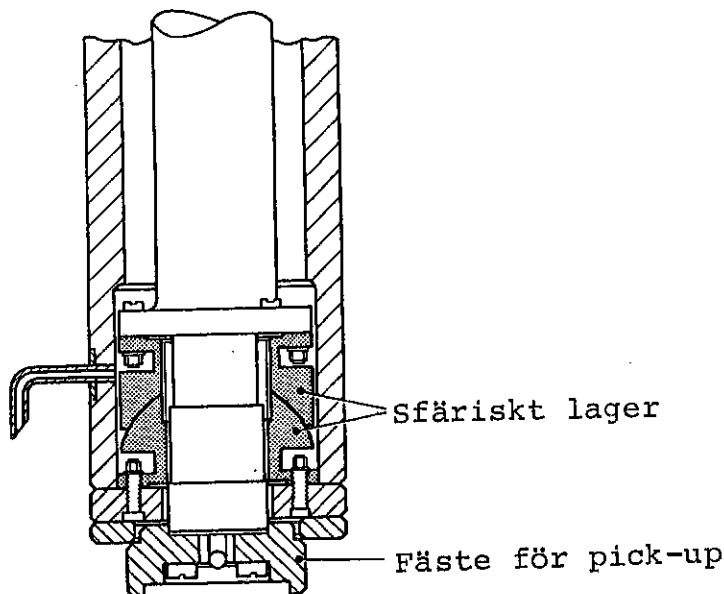
Det system som vi använder för kalibrering av rundhetsnormaler baseras på en Talyrd 73 (Rank Taylor Hobson) med roterande spindel. Mätobjektet är fixerat under mätningen och pick-upen är monterad på spindeln och roterar alltså kring mätobjektet. Signalen från pick-upen förstärks sedan i en analog förstärkare. Slutligen sker en digitalisering och en datorbearbetning. Se figur 1.



Figur 1. Blockschema.

3.2 Spindel

Den roterande spindeln är själva hjärtat i rundhetsmätaren. Det är spindelns noggrannhet som avgör rundhetsmätarens prestanda. Rank Taylor Hobson har en lång erfarenhet av tillverkning av spindlar med mycket hög precision. Spindeln har två lagringar. Det undre lagret har formen av en kula som roterar i en sfärisk skål. Detta lager ligger i tunn olja. När spindeln roterar skapas en mycket tunn oljefilm, som separerar friktionsytorna från varandra ("hydrodynamisk lagring"). Den principiella konstruktionen framgår av figur 2.



Figur 2. Spindelns nedre lagring.

Det övre lagret har till uppgift att stödja spindeln i sidled så att den inte tippar. Det bär ingen last. Det är ett enkelt glidlager som oljas genom att man spolrar över det med en liten mängd olja. Spindeln måste oljas varje dag.

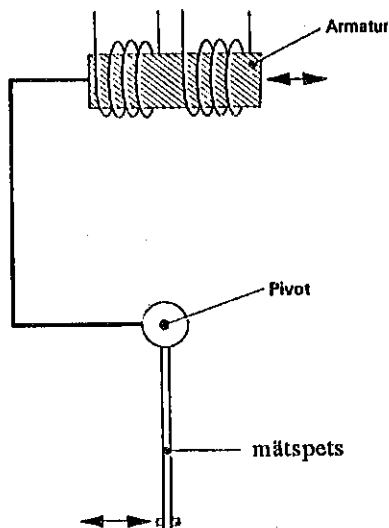
De rundgångsfel som finns hos spindeln kommer att adderas till mätobjektets rundhetsavvikelser. Det är därför viktigt att spindeln har en mycket hög noggrannhet. Under förutsättning att felen är repeterande (systematiska) kan de kompenseras matematiskt. En sådan möjlighet finns inbyggd i mätprogrammen.

3.3 Pick-up

Pick-upen är monterad i en justerbar arm som hänger i spindeln. Man kan lätt justera avståndet mellan centrumpunkten och mätspetsen. På så sätt kan man anpassa mätutrustningen för olika stora mätobjekt. Denna justering påverkar inte referensaxeln. Detta gör att man kan mäta koncentration mellan flera olika delar av ett mätobjekt (under förutsättning att man inte flyttar objektet mellan mätningarna).

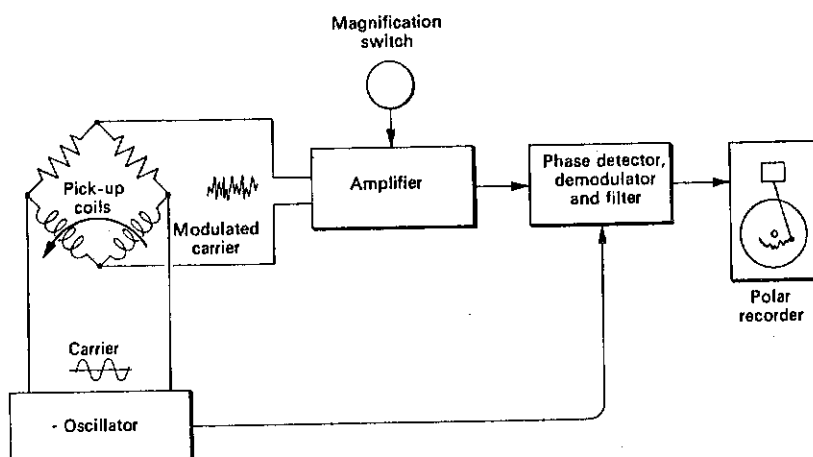
Pick-upen är baserad på principen differentialtransformator med en fyrtrådsanslutning och är försedd med en utbytbar mätspets. Man kan anpassa mätspetsarnas geometri efter mätobjektet.

Figur 3 visar pick-upens principiella konstruktion. Mätarmen vrider sig kring en lagringspunkt (pivot). En järnkärna i differentialtransformatorn (spole med dubbla lindningar) flyttar sig proportionellt mot rörelsen hos mätspetsen.



Figur 3. Pick-upens mekaniska konstruktion.

Spolens lindningar ingår i en bryggkoppling (se fig 4) som ger en utsignal proportionell mot rörelsen. En analog förstärkare förstärker signalen i valbara steg upp till 20000 ggr förstoring. Det finns en polär-skrivare inkopplad som ritar upp en kurva synkront med rotationen hos spindeln. Här finns också en koppling till en A/D-omvandlare.



Figur 4. Pick-upens elektriska konstruktion.

Det finns flera olika typer av mätpetsar. Den vanligaste typen är yx-formad. Den får därigenom hög upplösning i mätriktningen och lägre upplösning (mindre känslig) för variationer tvärs mätriktningen, vilket gör det lättare att få en jämn anliggning mot mätytan.

3.4 Signalbehandling

3.4.1 Filter

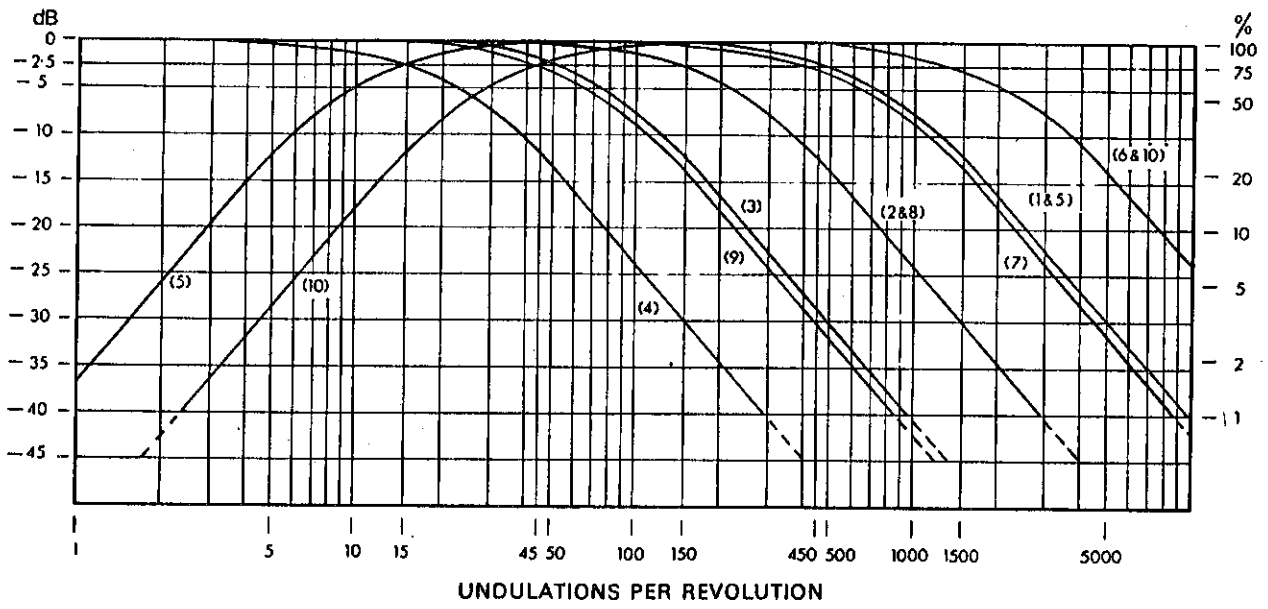
Signalen kan filtreras i den analoga förstärkaren. Filtret tar bort kortvågiga variationer. Därigenom kan man eliminera inverkan av lokala variationer i mätytan för att studera de mera långvågiga formfelen. Brytpunkten hos filtret (-3dB) anges av tillverkaren som det högsta antalet vågor per varv (upr) som mätsystemet registrerar.

Mätsystemet har vissa begränsningar utan filtret inkopplat som beror på mätpetsen och mekanikens snabbhet. Brytpunkten är då 500 upr. De övriga valbara brytfrekvenserna är 150 upr, 50 upr och 15 upr. Det finns också en möjlighet att istället undertrycka långvågiga variationer om man vill studera ytvariationer och filtrera bort stora formfel, som annars kan hindra att man arbetar med en hög förstoring. Då är våglängdsområdet 15 - 500 upr.

Dessa analoga filter är av RC-typ och de inför fäsvridningar, vilket man bör vara observant på. Tillverkaren anger frekvenskurvor för filtren (se fig 5).

Det finns också möjlighet att filtrera signalerna i datorn efter digitalisering. De digitala filtren består i princip av en matematisk funktion som är inprogrammerad. De har liknande egenskaper som de analoga, men innebär en möjlighet att experimentera med olika filter på en mätserie i efterhand.

Filtreringen sker genom att mätserien fouriertransformeras. I frekvensplanet kapas de frekvenskomponenter som ligger över brytpunkten bort, varefter en återtransformering sker. Därigenom får man en mycket brant filtrering. Filtren ger inte upphov till samma fäsvördröjning som de analoga, men kan istället ge en vågig struktur åt rundhetsdiagrammen (ringningar).



- (1) = 1–500 u.p.r.
- (2) = 1–150 u.p.r.
- (3) = 1–50 u.p.r.
- (4) = 1–15 u.p.r.
- (5) = 15–500 u.p.r.

Figur 5. Frekvensgång för analoga filter (RC-filter).

4 Spårbarhet

Primärt behandlas här problemet att åstadkomma spårbarhet för kalibrering av rundhetsnormaler. Spårbarhet vid andra mätningar kan sedan enkelt härledas ur den första.

Vid rundhetsmätning mäts rundhetsavvikelser i förhållande till en genererad referens. Man måste alltså kalibrera denna referens (spindeln). I vårt fall löses detta på matematisk väg genom en metod, som möjliggör att separera spindelns rundgångsfel från mätresultaten. Man kan säga att mätningen görs mot en matematiskt genererad perfekt referens.

Avvikelserna hos mätobjektet från referenscirkeln mäts i någon lämplig längdenhet. Pick-upens utslag måste därför kalibreras spårbart till meterdefinitionen. Det finns flera tänkbara metoder att göra detta, t.ex. med passbitar eller mätmaskin.

4.1 Mätmetoden

Innan jag beskriver kalibreringen av systemet vill jag ge en övergripande beskrivning av metoden för kalibrering av rundhetsnormaler. De normaler som systemet primärt utvecklats för är halvklotformade och tillverkade av polerat glas. De tillverkas med en metod som påminner om slipning av konvexa linser. Normalerna är monterade i en hållare av metall och håller en mycket hög rundhet, ofta är avvikelserna mindre än 20 nm.

Kalibreringen går till på följande sätt. Glasnormalen placeras i rundhetsmätaren på ett indexeringsbord och centreras i förhållande till spindeln. Därefter mäts orundheten i förhållande till spindelns rotationscentrum i detta läge. Mätningen upprepas fyra gånger och medelvärdet beräknas.

Indexeringsbordet vrids sedan ett steg (36°), innebärande att mätobjektet vrids 36° i förhållande till spindeln, och mätproceduren upprepas. Sedan vrids bordet ett steg till osv, tills ett helt varv fullbordats. Sammanlagt intar mätobjektet tio olika positioner och mäts 40 gånger. Slutligen sker en upprepad mätning i den första positionen igen, för att säkerställa repeterbarheten.

De rundgångsfel som spindeln har är till stor del systematiska och för varje steg förflyttas mätobjektets orundheter i förhållande till spindelns fel. Därigenom blir det möjligt att separera spindelns rundgångsfel matematiskt från mätobjektets fel. Resterande mätosäkerheter är att hänföra till tillfälliga variationer hos spindelns rörelse, samt pick-up-systemets bidrag.

4.1.1 Felseparering

Processen för databehandling och separering av spindelfelet från objektets orundhet kan beskrivas på följande sätt. Varje varv består av 512 mätvärden. Spindeln roterar fyra varv och ett medelvärde bildas i varje punkt. Detta minskar inverkan av tillfälliga fluktuationer.

För varje varv görs en kontroll av att mätvärdena bildar en sluten cirkel. Temperaturändringar kan ge upphov till en viss drift som orsakar att mätpunkterna beskriver en spiral istället. Spiralfelet får vara högst 5 nm annars förkastas mätningen och spindeln går ytterligare ett varv.

Med minsta kvadratmetoden anpassas en cirkel till mätresultaten. Mätvärdena omräknas i förhållande till cirkelns centrum i stället för spindelns rotationsaxel. Därigenom elimineras excentriciteten mellan mätobjekt och spindel, som bara beror på mätobjektets position och inte är en egenskap hos objektet.

I syfte att minska mängden data görs sedan en reducering till 50 punkter/varv genom en medelvärdesbildning. I denna process tas hänsyn till ytans krökningsradie med hjälp av ett tredjegradspolynom.

Indexeringsbordet vrids sedan ett steg, och en ny mätserie görs på samma sätt. Hela mätproceduren omfattar tio sådana positioner och resulterar alltså i tio mätserier om 50 värden.

Spindelfelet skall sedan separeras. Tillvägagångssättet är i princip följande. Betrakta tio mätpunkter jämnt fördelade på ett varv. Dessa motsvarar de olika positionerna hos indexeringsbordet. I varje punkt har vi ett mätresultat som sammansätts av spindelns fel (e_s) och mätobjektets orundhet (e_n).

$$e = e_{ni} + e_{si}, \quad i = 1, 10 \quad (1)$$

Hela mätningen kan beskrivas med en matris, där varje rad utgör en mätserie. Varje ny rad motsvarar en ny position hos indexeringsbordet.

$$\begin{bmatrix} e_{n1} + e_{s1} & e_{n2} + e_{s2} & \dots & e_{n10} + e_{s10} \\ e_{n2} + e_{s1} & e_{n3} + e_{s2} & \dots & e_{n1} + e_{s10} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n10} + e_{s1} & e_{n1} + e_{s2} & \dots & e_{n9} + e_{s10} \end{bmatrix}$$

En kolumn motsvarar en viss position hos spindeln. Summan av rundhetsavvikelsena på ett varv runt objektet är noll. Detta följer av att de är bestämda med minsta kvadratmetoden. Medelvärdet av alla matriselementen i den första kolumnen är e_{s1} , dvs spindelfelet i första positionen. Spindelfelet i andra positionen fås ur kolumn 2 osv.

På samma sätt kan man bestämma objektets rundhetsavvikelser genom att förskjuta raderna i matrisen successivt.

$$\begin{bmatrix} e_{n1} + e_{s1} & e_{n2} + e_{s2} & \dots & e_{n10} + e_{s10} \\ e_{n1} + e_{s10} & e_{n2} + e_{s1} & \dots & e_{n10} + e_{s9} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} + e_{s2} & e_{n2} + e_{s3} & \dots & e_{n10} + e_{s1} \end{bmatrix}$$

En kolumn motsvarar nu en viss punkt på objektet. Summan av spindelns rundgångsfel på ett varv är noll. Medelvärdet av alla matriselement i första kolumnen är e_{n1} , dvs mätobjektets rundhetsavvikelse i första punkten. Ur kolumn

2 får man rundhetsavvikelsen i andra punkten osv. Därigenom kan spindelns fel separeras från mätresultaten och man har de absoluta rundhetsavvikelserna hos objektet.

Genom att utvidga matriserna till 50 kolumner, kan man bestämma spindelfelet och mätobjektets avvikelser i femtio punkter. I diagram 3 redovisas resultatet av en mätning på en typisk rundhetsnormal (RTH 540E). Från samma mätning fås en utvärdering av spindelfelet, se diagram 4.

Den omfattande signalbehandling som sker, med medelvärdesbildning i flera led, innebär en kraftig lågpasfiltrering. Metoden är därför olämplig för utvärdering av komponenter över 5 upr. I praktiken innebär dock detta ingen allvarlig begränsning eftersom spindelfelen är lågfrekventa. Vill man studera mera högfrekventa komponenter, kan man göra det med den normala mätmetoden utan felseparation.

4.2 Kalibrering av pick-up

4.2.1 Mätningar

En kalibrering av pick-upens utslag omfattar hela kedjan pick-up - förstärkare - A/D-omvandlare - dator. Den metod som ligger närmast till hands vid kalibrering av givare av denna typ är att använda passbitar. Det är en handfast och enkel metod som i allmänhet ger tillförlitliga och noggranna resultat.

Det visade sig praktiskt vara svårt att kalibrera pick-upen med hjälp av passbitar. Det kräver någon typ av hjälp-fixtur som inte fanns tillgänglig vid kalibreringstillfället. Jag provade att häfta passbitar på ett häftplan för att generera små steg att kalibrera mot, men det visade sig i praktiken vara en oanvändbar metod, bl.a. eftersom pick-upen rör sig i en cirkelrörelse.

I stället valde jag att montera ned pick-upen från rundhetsmätaren och sätta upp den i en mätmaskin. Där var det möjligt att generera små utslag av varierande storlek, vilka kunde bestämmas noggrant med en laser. Upplösningen var 1nm hos mät-systemet.

Ett problem förknippat med denna kalibrering är att det inte går att läsa av pick-upens utslag direkt (annat än på en grov skala på förstärkaren). Det värde datorn läser av är oåtkomligt utifrån. Istället är datorn försedd med en särskild kalibreringsrutin i programmet. Denna bygger på att man genererar ett steg, dvs. man ställer in pick-upen i två olika mätpunkter med känt avstånd. Sedan matar man in stegets storlek i μm . Datorn talar då om avvikelsen i procent. Här finns det då möjlighet att lagra en kalibreringsfaktor (i %) som programmet sedan arbetar med. Faktorn lagras permanent och behöver inte matas in igen förrän man kalibrerar om systemet.

Innan en kalibreringsfaktor lagras talar datorn om hur stort felet är i förhållande till föregående kalibrering och frågar om man vill lagra den nya faktorn. Om det nya värdet verkar felaktigt (orimligt) kan man då låta bli att lagra och göra en ny bestämning. Detta utnyttjade jag för att undersöka hur mycket felet varierar på olika mätområden.

Praktiskt gick mätningen till så att jag ställde in ett lämpligt läge inom pick-upens mätområde, tryckte på inmatningstangenten och noterade laservärdet. Därefter flyttade jag ett bestämt steg (anpassat till mätområdet) och matade in punkt två. Proceduren upprepades sedan baklänges; programmet är gjort för mätsekvensen 1-2-2-1.

En svårighet vid kalibreringen var att repetera inställningen av mätmaskinen exakt andra gången. Det visade sig att jag kunde repetera inställningen inom något tiotal nm. Programmet bildar ett medelvärde av de båda avläsningarna.

Kalibreringsprogrammet har en inbyggd diskriminering mot steg som är mindre än ca 25 % av det valda mätområdet. Detta begränsar kalibreringsmöjligheterna nedåt. Det minsta steg jag kunde använda var 0,5 μm .

Kalibreringsresultaten redovisas i tabell 1 - 4 nedan. Se också diagram 1 - 2. Resultaten för inåtgående resp. utåtgående pick-up-rörelser redovisas separat.

Förstärkning	Steg (μm)	Avvikelse (%)	Variationsvidd (%)	Antal mätn
20 000	0,5	0,2	4,1	4
	1	-0,05	0,5	2
	2	0,6	0,4	2
10 000	1	0,25	1,4	4
	2	0,03	1,4	3
	4	0,2	0,4	2
5000	2	0,55	1,0	4
	4	0,5	0,2	2
	8	0,2	0,4	2
2000	5	0,15	0,3	2
	10	0,4	0	3
	20	-0,73	0,2	3
1000	10	0,13	0,7	3
	20	-0,55	0,3	2
500	20	-0,25	0,7	2
	40	-1,7	0	2
200	50	-1,95	0,1	2
	100	-2,18	0,1	4
100	100	-1,95	0,3	2
	200	-2,2	0	2
	400	-2,5	0	2

Tabell 1. Mätningar gjorda vid kalibrering av pick-upen för invändiga mätningar (internal).

Steg (μm)	Avvikelse (%)
0,5	0,2
1	0,05
2	0,39
4	0,35
5	0,2
8	0,15
10	0,27
20	-0,54
40	-1,7
50	-1,95
100	-2,1
200	-2,2
400	-2,5

Tabell 2. Sammanställning av pick-upens mätfel vid invändiga mätningar (sammandrag av tabell 1).

Förstärkning	Steg (μm)	Avvikelse (%)	Variationsvidd (%)	Antal mättn
20 000	0,5	0,85	0,5	2
	1	-0,14	2,1	5
10 000	2	0,03	1,9	15
5000	4	-0,65	0,3	2
2000	5	-0,3	0,4	2
	10	-1,71	0,5	7
	20	-2,25	0,6	4
1000	20	-1,75	0,1	2
500	40	-2,05	0,1	2
200	100	-2,2	-	1
100	200	-2,2	0	2
	400	-2,5	0	2

Tabell 3. Mätningar gjorda vid kalibrering av pick-upen för utvändiga mätningar (external).

Steg (μm)	Avvikelse (%)
0,5	0,85
1	-0,14
2	0,03
4	-0,65
5	-0,3
10	-1,71
20	-2,08
40	-2,05
100	-2,2
200	-2,2
400	-2,5

Tabell 4. Sammanställning av pick-upens mätfel vid utvändiga mätningar (sammandrag av tabell 3).

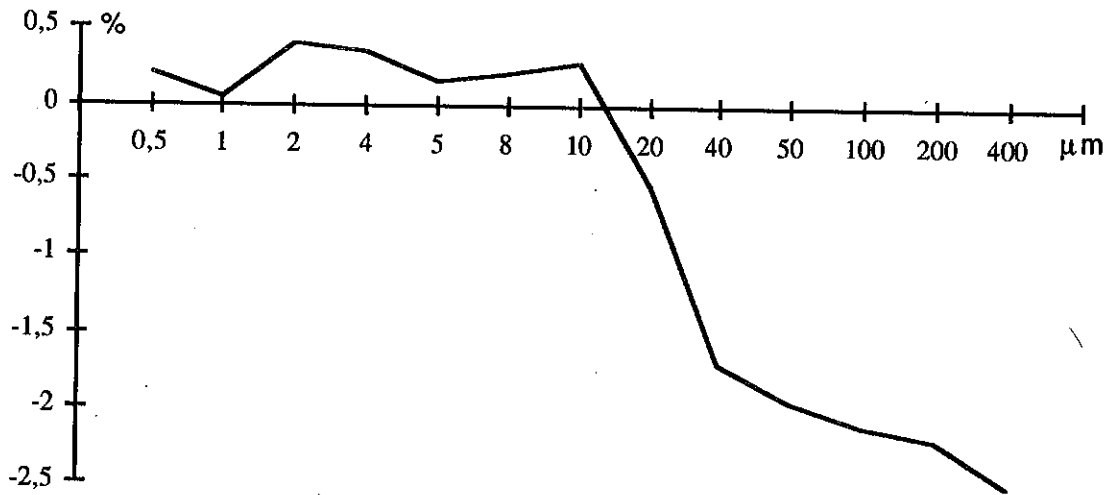


Diagram 1. Pick-upens kalibreringskurva vid invändiga mätningar. Diagrammet visar felet (i %) som funktion av stegets storlek (i μm). Observera att skalan inte är linjär.

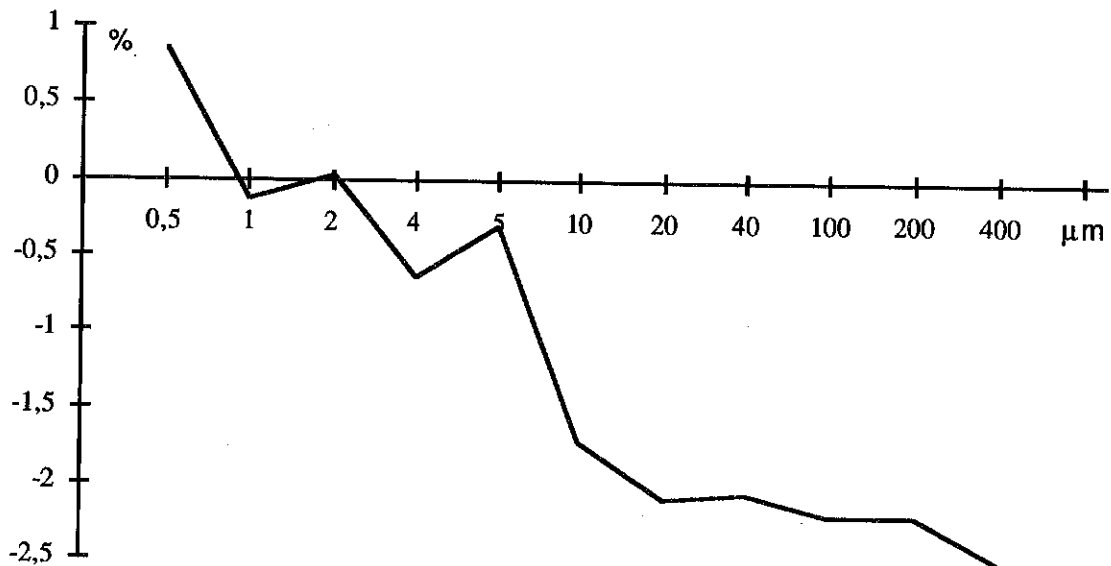


Diagram 2. Pick-upens kalibreringskurva vid utvändiga mätningar. Diagrammet visar felet (i %) som funktion av stegets storlek (i μm). Observera att skalan inte är linjär.

4.2.2 Diskussion

Kalibreringen som beskrivs ovan förutsätter att man först har justerat förstärkningen och balansen i bryggan som pick-upen elektriskt är kopplad till. Detta beskrivs i instruktionsboken avsnitt 11.6 och tas inte upp här. Avsikten med den här beskrivna kalibreringen har varit att få spårbarhet direkt till riksmätplatsens högre längdnormaler (lasern), samt, inte minst viktigt, att undersöka pick-upens beteende över hela mätområdet.

Mätningarna på pick-upen har varit ganska omfattande och tidsödande. Jag var tvungen att göra vissa begränsningar. Mätområdet (vid kalibreringen) begränsas nedåt av programmet till $0,5 \mu\text{m}$. Av tidsskäl har jag också begränsat antalet mätningar vid varje steg. Jag ansåg att det var viktigare att få med så många steg som möjligt för att finna eventuella anomalier än att få ett större statistiskt underlag i varje enskild punkt.

Mätningarna överlappar varandra en hel del i tabell 1, på så sätt att samma steg återkommer flera gånger på olika förstärkningsområden. Därigenom var det möjligt att kontrollera att förstärkaren arbetar med riktiga förstärkningsfaktorer på olika områden. Det var onödigt att ha lika stor överlappning i tabell 3, eftersom omkoppling mellan invändig/utvändig mätning sker mekaniskt i pick-upen och inte påverkar förstärkningsfaktorerna.

De skillnader som finns mellan olika mätområden är små och beror mera på mätosäkerheten än på förstärkaren. Det verkar som om felen i kedjan i första hand är olinjäriteter i pick-upen. Jag har sammanfattat mätresultaten i tabell 2 och 4, vilka ger en uppfattning om linjäriteten. Det är tänkbart att det går att minska denna olinjäritet genom att justera bryggan noggrannare än vad som medges med den metod som finns i instruktionsboken. Detta har inte undersökts.

Eftersom det statistiska underlaget i många punkter är ganska litet är det meningslöst att beräkna en standardavvikelse för varje punkt. För att få ett noggrant mått på repeterbarheten vid kalibreringen gjorde jag 15 mätningar i samma punkt (utvändig mätning, förstoring 10 000, steg $2 \mu\text{m}$) och beräknade standardavvikelsen.

Standardavvikelsen för mätvärdenas fördelning (ej medelvärde) uppgick till ca 0,6 %. Tar man ett enskilt värde bör man med stor sannolikhet hamna inom $\pm 3 s \approx \pm 2 \%$. Med detta resonemang kan man acceptera en variationsvidd på 4 % i kalibreringspunkterna (jfr tabell 1 och 3).

Vid de allra minsta stegen kan noggrannheten begränsas av laserinterferometerns upplösning och olinjäritet. Upplösningen är 1 nm och interferometerns olinjäriteten uppskattas till 5 nm. Ett fel på 5 nm hos lasern motsvarar 1 % vid det minsta steget $0,5 \mu\text{m}$.

Kalibreringen ger en hel del information om systemets statiska egenskaper. De viktigaste slutsatserna kan sammanfattas: Systemet har god repeterbarhet ($< 1 \%$) och stabilitet, även över flera veckors mätningar. Olinjäriteten hos pick-upen är inom 2,5 % av utslaget. Möjligen kan detta förbättras genom trimning, men det viktigaste är att pick-upen har en jämn, kontinuerlig kurva.

Det är rimligt att uppnå en mät noggrannhet kring 1 %, om detta behövs för precisionsmätningar. Då måste pick-upen kalibreras vid aktuellt utslag för att minska inverkan av olinjäriteten.

En viktig observation jag gjorde vid kalibreringen var att pick-upen är temperaturkänslig. Om man har tagit i den med händerna måste den tempereras en god stund innan man får repeterbara resultat. När man arbetar med systemet praktiskt bör man därför bara vidröra rattarna och inte själva huset till pick-upen. Detta för att slippa lång temperering efter varje justering.

Vid mätning på rundhetsnormaler av högsta noggrannhetsklass är avvikelserna från perfekt rund form bara något tiotal nanometer. Som framgår ovan är det inte möjligt att med den beskrivna "direkta" metoden kalibrera pick-upen för så små utslag. Man kan därför fråga sig om kalibreringen överhuvudtaget är giltig för dessa mätningar.

För att besvara den frågan måste man klargöra några praktiska detaljer kring mätningarna. Upplösningen är 2,5 nm och begränsas av digitaliseringen. Vid ett mätutslag på 10 nm måste olinjäriteten vara mer än 25 % för att synas. Det är inte sannolikt att pick-upen i sig bidrar med så stort fel, utan man kan utgå från att alla fel i pick-upen "trunkeras" av den elektroniska upplösningen. Kalibreringsresultaten på 0,5 μm -steget visar att systemet har god stabilitet och repeterbarhet på några nanometer.

Vidare måste man tänka på att mätningarna (rådata) i sig har större magnitud än den verkliga orundheten hos objektet. Detta beror på att det inte är praktiskt möjligt att centrera mätobjektet exakt i förhållande till spindeln. Det verkliga utslaget hos pick-upen under mätningarna kommer därför att vara i storleksordningen 0,1-1 μm . Excentriciteten separeras sedan i datorn genom en anpassning till medelcirkeln med minsta kvadratmetoden.

4.2.3 Osäkerhetsfaktorer vid kalibreringen

Vid kalibreringen av pick-upen finns bl a följande osäkerhetsfaktorer att ta hänsyn till: mätmaskinens osäkerhet, lasern, uppriktningsnoggrannheten, fenomen vid kontaktpunkten, temperaturfluktuationer och elektriskt brus.

Mätmaskinen genererar en rörelse mot pick-upen. Felet i denna rörelse (rakhetsfel och andra geometriska problem hos maskinen) bedöms som helt försumbara vid dessa små rörelser. Felet i laservåglängden är mindre än 1 ppm och kan också försummas. Likaså bedöms uppriktningsfelen (cosinusfel) vara försumbara. Av erfarenhet vet vi att systemet (mätmaskin + laser) har en mätosäkerhet som är högst ett par ppm vid andra typer av mekanisk mätning som utföres.

Däremot måste man ta hänsyn till begränsningar i interferometern vid de minsta mätningarna. Upplösningen är som nämnts 1 nm, men olinjäriteten i interferometern kan vara större. Jag uppskattar olinjäriteten till högst 5 nm [2]. För det minsta steget i kalibreringen (0,5 μm) motsvarar det 1 %, vilket inte är helt försumbart. För de större stegen kan detta felbidrag däremot försummas.

I kontaktpunkten mellan mätmaskinens mätspets (plan, 8 mm diameter) och pick-upens mätspets som är svagt rundad uppkommer ett "avrullningsfel" när maskinens rörelse överförs till pick-upen. Kontaktpunkten flyttar sig något. Om mätspetsens rundning har en avvikelse från perfekt form introduceras här ett fel.

Mätspetsens avrundning är gjord med en radie som är anpassad till mätspetsens längd (räknad från pivotpunkten). Mindre oregelbundenheter i ytan kommer att ge upphov till lika stora fel i mätresultatet. Kalibreringen har gjorts i olika punkter genom att läget i förhållande till mätmaskinen har flyttats något mellan varje mätning. De oregelbundenheter som finns bidrar därmed till oreperbarheten i mätningarna.

Det kan också finnas "makroskopiska" formfel i mätspetsens rundning. Dessa kommer att resultera i en ändring i den effektiva hävarmslängden. Sådana fel bidrar till olinjäriteten hos pick-upen.

Spridningen i mätningarna beror på temperaturfluktuationer, mekaniska vibrationer, elektriskt brus m.m. Standardavvikelsen uppgår till 0,6 % som beskrivits tidigare. Den totala mätosäkerheten vid kalibreringen uppskattar jag till 1 %.

4.2.4 Dynamiska egenskaper

Kalibreringen av pick-upen har gjorts statistiskt och säger ingenting om de dynamiska egenskaperna hos systemet. De dynamiska egenskaperna hänger samman med frekvensgången hos mätsystemet. Mätsystemet undertrycker högre frekvenser både på grund av oföljsamhet i mekaniken och fördröjning i signalbehandlingen.

Jag har inte genomfört några mätningar på detta utan förlitar mig på tillverkarens uppgifter. I bruksanvisningen ger tillverkaren en kurva för frekvensgången. Enligt denna kurva är amplitudfelet inom 1 % upp till 50 upr; därefter ökar det och är vid 100 upr ungefär 5 %.

Vid de flesta normala rundhetsmätningar är det de lägsta frekvenskomponenterna upp till ca 10 upr som är mest intressanta. Vid kalibrering av rundhetsnormaler är det komponenter upp till 5 upr som är intressanta.

4.3 Reproducerbarhet

Reproducerbarheten hos mätmetoden (kalibrering av rundhetsnormaler) har utvärderats genom ett stort antal mätningar på ett och samma objekt (hemisfär 634E). Objektet har mätts vid flera olika tillfällen av två olika operatörer under en period av några månader. Vid några tillfällen har objektet inte rörts mellan mätningarna (repetierbarhetsprov), i övriga fall har vi plockat bort objektet mellan mätningarna. Mätobjektets orientering i förhållande till indexeringsbordet har också varierats.

Repetierbarheten är inom 1nm och påverkas av temperaturfluktuationer, brus, instabilitet i instrumentet m m. Emellertid är denna siffra inte så viktig utan det är reproducerbarheten som är intressant för en utvärdering av metodens noggrannhet. En bidragande orsak till att reproducerbarheten ger ett större tal är att man inte kan definiera lägena för mätpunkterna helt exakt. Startläget kan återfinnas inom ca 0,5 mm av omkretsen med den metod vi använder.

Reproducerbarheten har utvärderats på följande sätt. Arton mätningar har utförts enligt ovan och plottats i ett och samma diagram. Från dessa mätningar har de yttersta respektive innersta mätpunkterna sammanbundits med linjer (bandgränserna) och redovisas i diagram 5.

För att få ett kvantitativt mått på reproducerbarheten har jag använt det totala rundhetsvärdet (topp-till-dal) i varje mätning (se tabell 5) och från dessa arton värden beräknat standardavvikelsen. Den uppgick till 1,6 nm.

Mätning nr	Topp (nm)	Dal (nm)	T + D (nm)
1	9	11	20
2	8	11	19
3	7	8	15
4	8	8	16
5	8	8	16
6	8	8	16
7	7	8	15
8	7	8	15
9	8	8	16
10	8	9	17
11	8	9	17
12	9	9	18
13	9	10	19
14	7	8	15
15	8	9	17
16	8	9	17
17	8	8	16
18	7	7	14

Tabell 5. Reproducerbarhetsprov på hemissfär nr 540E. Mätvärdena visar största topp och största dal samt totala orundheten.

Varje mätning ger också värden på spindelns rundgångsfel. Dessa värden har jag också plottat och bandgränserna redovisas i diagram 6. Från detta diagram kan man bilda sig en uppfattning om hur väl spindelns reproducerar sitt rundgångsfel. Man kan också se rundgångsfelets storlek (ca 15 nm topp-till-dal).

4.4 Mätosäkerhetsanalys

Här följer en sammanställning av de faktorer som bidrar till mätosäkerheten vid kalibrering av rundhetsnormaler med den ovan beskrivna metoden.

4.4.1 Reproducerbarheten

De tester som redovisats ovan indikerar en reproducerbarhet inom 1,6 nm (en standardavvikelse). Detta inkluderar olika tillfälliga bidrag, som instabilitet, temperaturvariationer, brus etc vid normal drift.

$$u_1 = 1,6 \text{ nm}$$

4.4.2 Pick-upens kalibrering

Vid den använda förstärkningen har pick-up-systemet inklusive förstärkare en noggrannhet inom 1%. Det största utslaget vid mätning är $\pm 1 \mu\text{m}$. Eftersom mätningen sker i 10 olika positioner kommer förstärkningsfelet att "randomiseras" inom intervallet $\pm 10 \text{ nm}$. Med antagande om en rektangulär fördelning och beaktande av att mätresultatet är ett medelvärde av mätningar i 10 positioner fås

$$u_2 = 10/\sqrt{30} \text{ nm} = 1,8 \text{ nm}$$

4.4.3 Wobbling

Indexeringsbordet har en viss icke korrigerad lutning relativt spindelaxeln. Denna har mätts upp till 0,02 mm vid radien 25 mm, dvs vid rundhetsnormalens periferi. Detta ger upphov till en viss osäkerhet i spårningen hos mätspetsen. Mätningarna kommer inte att utföras i ett enda spår, utan inom ett band med bredden 0,02 mm.

Om man antar att orundheten hos mätobjektet är ungefär lika stor i alla riktningar längs ytan, vilket är rimligt med hänsyn till tillverkningsmetoden, kan man beräkna inverkan av detta fel. Orundheten har en långvågig karaktär och överstiger sällan 20 nm mellan två närliggande mätpunkter. Objektets omkrets är 157 mm och antalet mätpunkter är 50. Avståndet mellan två punkter är 3,14 mm.

Formfelet har alltså en lutningskoefficient på ca 6 nm/mm. Tvärs över ett band på 0,02 mm är då orundheten ungefär 0,1 nm vilket anses försumbart.

4.4.4 Sammanlagd osäkerhet

Den sammanlagda mätosäkerheten blir

$$\pm 2(u_1^2 + u_2^2)^{1/2} = \pm 5 \text{ nm},$$

där faktorn 2 har valts i enlighet med CIPMs rekommendation INC-1(1980). Observera att denna mätosäkerhet enbart hänför sig till den beskrivna mätmetoden med felseparation och inte är en generell mätosäkerhet för alla typer av mätningar med instrumentet.

5 Polärdiagram

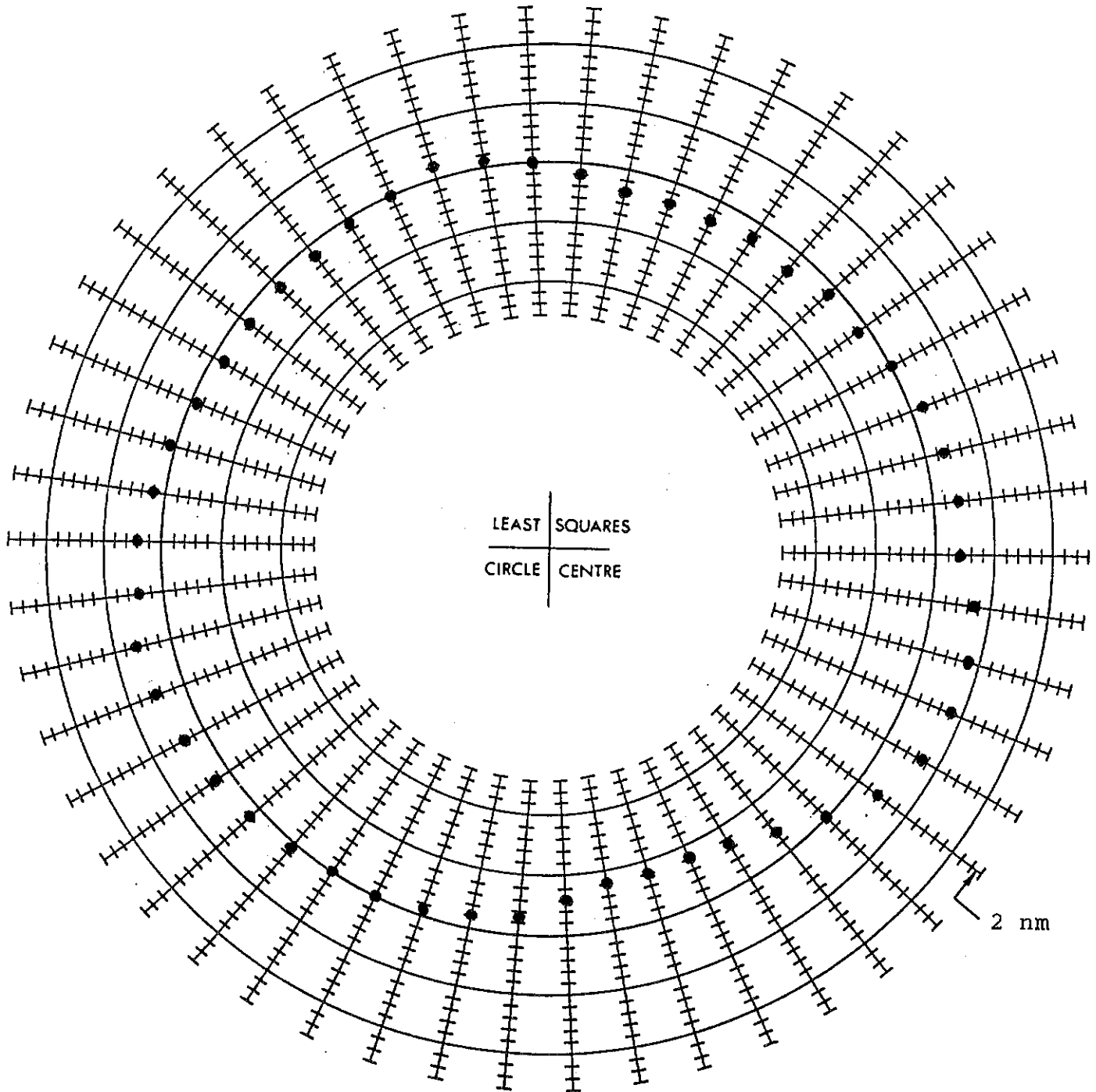


Diagram 3. Mätresultat från mätning av en rundhetsnormal (RTH 540E).

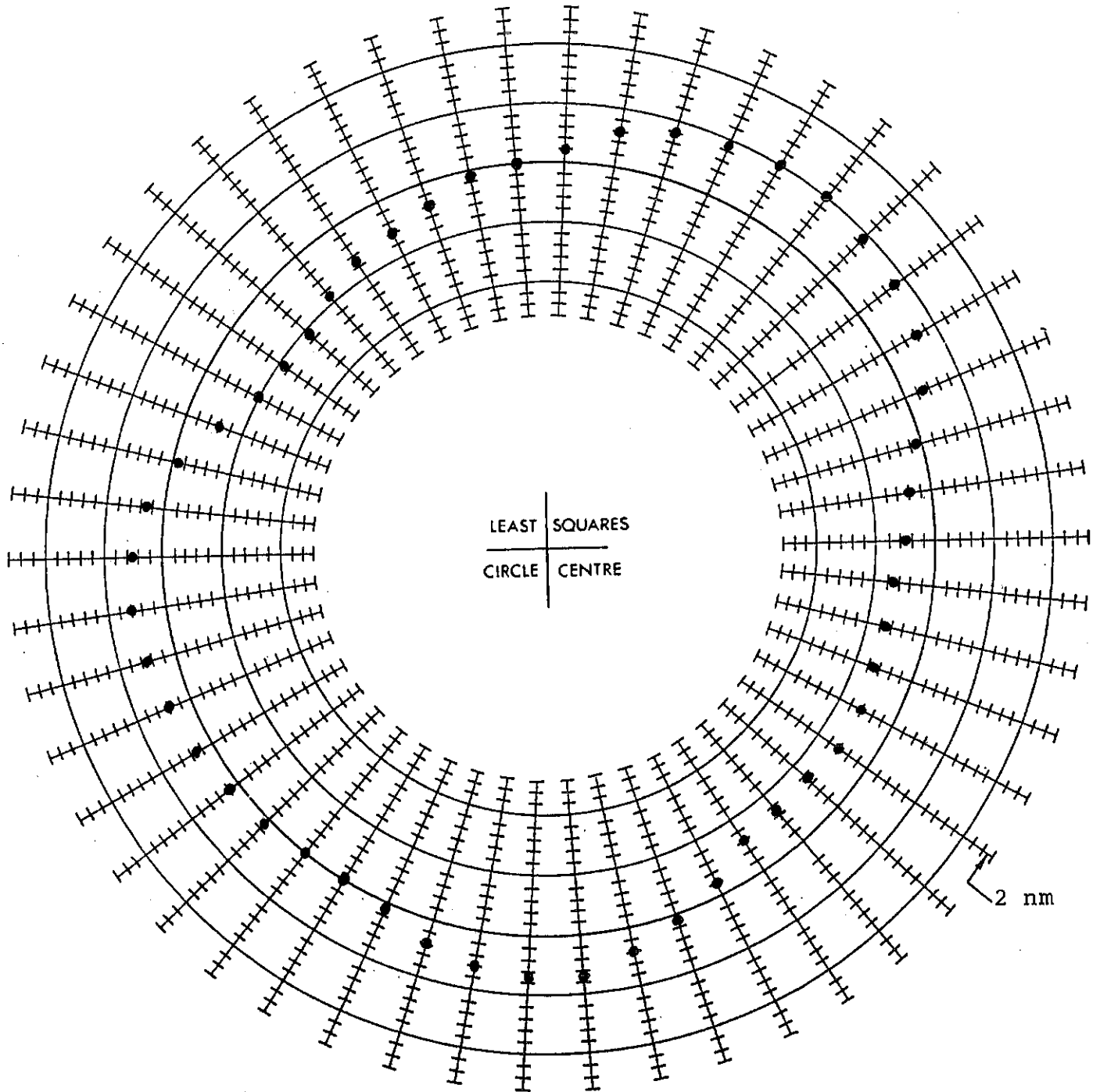


Diagram 4. Spindelns rundgångsfel vid mätningen.

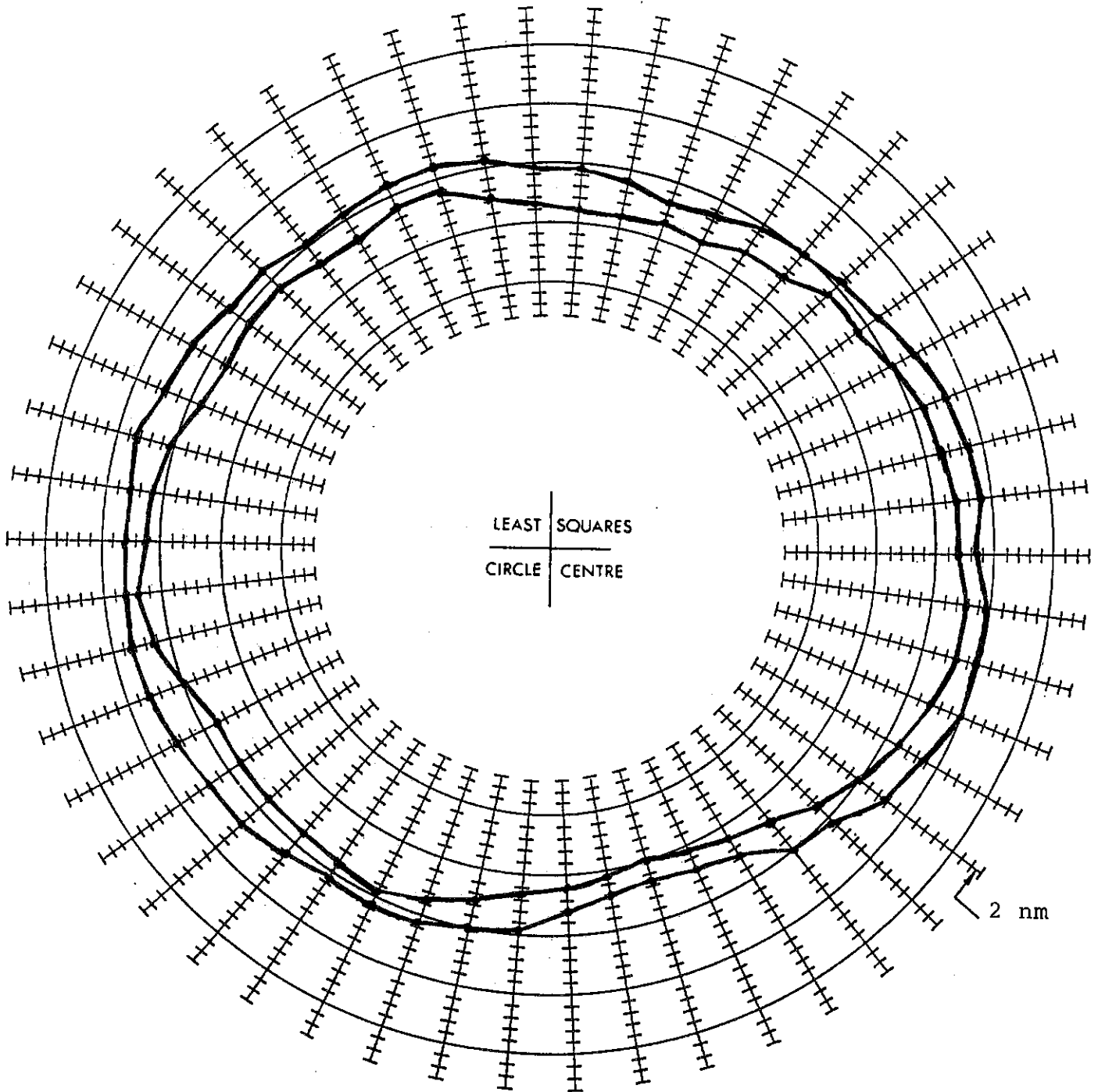


Diagram 5. Variationsområde (reproducerbarhet) för mätresultatet vid 18 mätningar på rundhetsnormalen (RTH 540E).

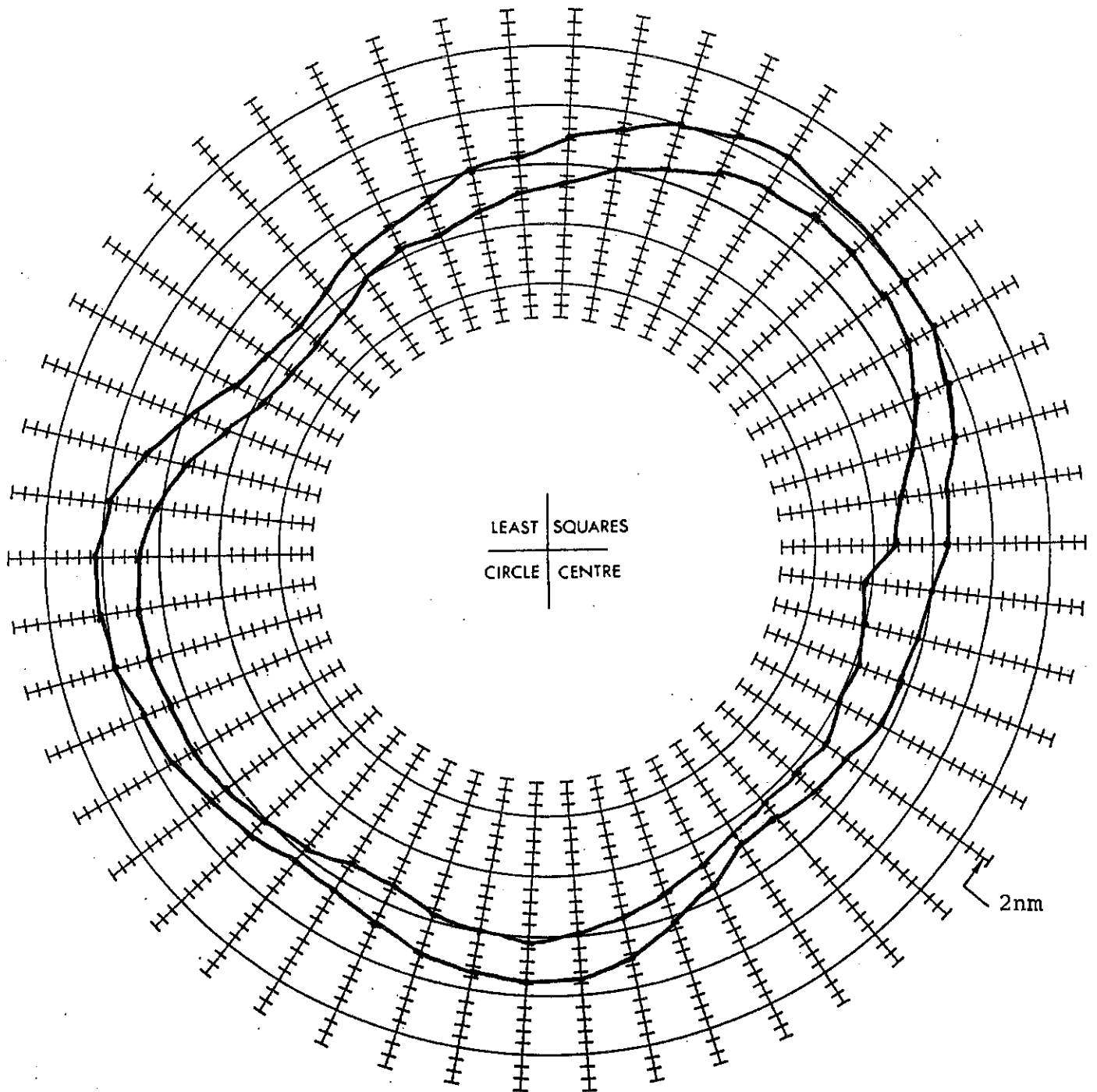


Diagram 6. Variationsområde (reproducerbarhet) för spindelfelet vid 18 mätningar.

6 Referenser

1. H. Dagnall:

Let's talk roundness.

Rank Taylor Hobson Ltd, Leicester, England. (1976)

2. Charles Steinmetz:

Accuracy In Laser Interferometer Measurement Systems.

Lasers & Optronics Juni 1988.

