

Kapitel 1

Verkstadsteknisk mätteknik

Med mätning¹ avses att bestämma en längd, en vinkel, en yta, en tid eller en massa efter någon viss enhet. Det är alltså en jämförelse mellan två storheter, där den ena är bestämd på förhand (måtenheten) och den andra är den storhet som ska bestämmas, det så kallade mätobjektet. Storleken på mätobjektet anges av det antal enheter som ingår i denna storhet.

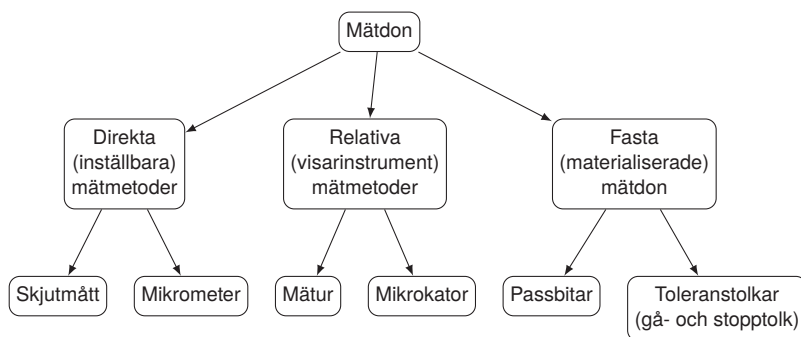
De geometriska grundformer som måste beaktas inom mättekniken är rakhet, planhet, parallellitet, vinkelställning, rundhet och cylindricitet, och dessutom ingår även mätning av ytjämnhet. Mätning utförs med hjälp av ett mätdon, även kallat mätinstrument. Ur praktisk verkstadssynpunkt kan mätdon delas in i tre huvudgrupper: direkta (inställbara) mätdon, relativa (visande) mätdon samt fasta (materialiserade) mätdon. Se figur 1.1 för en översikt av grupperingen.

De direkta (inställbara) mätdonen används för absolutmätning, där ett mått avläses direkt på instrumentet inom ett visst mätområde. Skjutmått och mikrometer är typiska exempel som ger ett absolut värde utan att ett referensmått behöver användas vid varje enskild mätning. Detta skiljer sig från de relativa (visande) mätdonen, som används vid relativmätning där ett mått bestäms i förhållande till ett annat, en så kallad likare. Likarens exakta storlek behöver inte vara känd, eftersom det är skillnaden som uppmäts. Måtur och mikrokatorer är vanliga instrument för denna typ av mätning.

¹Mätteknik eller metrologi är läran om mätning.

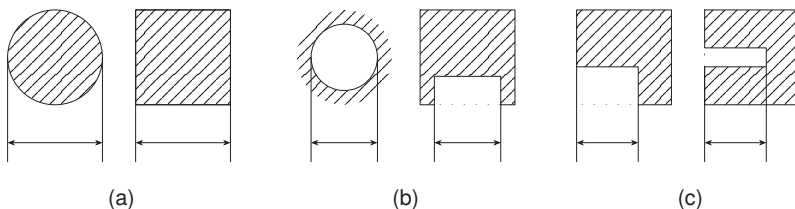
Det är viktigt att skilja relativmätning från toleransmätning. Relativmätning jämför två mått med varandra, medan toleransmätning syftar till att fastställa om ett mått ligger inom eller utanför ett specificerat toleransområde. Toleransmätning ger alltså inte ett numeriskt mätvärde, utan enbart ett ja/nej-resultat. Fasta mätton, såsom gå- och stopptolkar samt passbitar, används för denna typ av kontroll.

Det finns även mer avancerade mätmetoder baserade på ljusvågor, vilka ofta kategoriseras separat som optiska eller övriga mätton. Dessa mätmetoder behandlas inte vidare i denna bok.



Figur 1.1 Översikt och exempel över olika grupper av mätton.

Varje enskilt mätton är mer eller mindre lämpat för att mäta under en specifik situation, eller under specifika omständigheter. Ett begrepp som används inom mätteknik och kvalitetskontroll för att beskriva detta är **mätfall**. Inom verkstadsmättekniken är vanligt förekommande mätfall mätning av från-, mot- samt likvända ytor. Se figur 1.2 för en överblick.



Figur 1.2 Tre vanligt förekommande mätfall. (a) Frånvända ytor, (b) motvända ytor, och (c) likvända ytor.

1.1 Direkta mätmetoder – inställbara mätdon

De vanligaste ställbara mätverktygen i verkstäder är skjutmättet och mikrometerskruven, eller enbart mikrometer. På grund av sina olika konstruktioner har de olika möjligheter till upplösning. Mikrometern följer något som kallas Abbes² komparatorprincip medan skjutmättet vid in- och utvändig mätning inte gör det.

Abbes komparatorprincip. För att undvika vinkel- och hävarmsfel ska: *ett mätinstrument konstrueras så att den uppmätta sträckan är den rätlinjiga fortsättningen av mätskalan.*

Mätning som sker med stålskala, måttband eller tumstock kan därför anses uppfylla Abbes komparatorprincip. Även om måttskalan inte är ställbar i samma mening som ett skjutmått eller en mikrometer, där måttet avläses mellan en fast och en rörlig mätyta, kan de ändå betraktas som inställbara i vidare bemärkelse, eftersom de möjliggör ett bestämmande av en storlek inom skalans mätområde.

1.1.1 Skjutmått

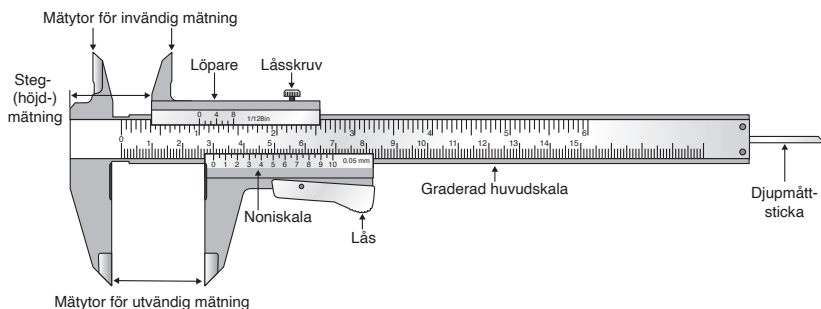
Konstruktionen av ett skjutmått möjliggör mätning av fyra olika mätfall: mellan fränvända ytor, mellan motvända ytor, mellan likvända ytor samt mätning av avstånd till och läge för hål. Detta gör skjutmättet till ett mycket användbart mätverktyg för dimensionsbestämning där toleranskraven inte är alltför snäva.

Konstruktionen består av ett fast anslag och ett rörligt anslag, den så kallade löparen. Det fasta anslaget är försett med en inristad huvudskala indelad i millimeter³. Det rörliga anslaget kan förskjutas längs huvudskalan och låsas med en låsklämma eller låsskruv. På den rörliga delen finns vanligen en finare delskala för förbättrad avläsningsnoggrannhet, den så kallade nonieskalan. För vanliga skjutmått ger detta en avläsningsnoggrannhet på 1/10 mm eller 1/20 mm, men det finns även precisionsskjutmått med en noggrannhet ned till 1/50 mm. Se figur 1.3 för ett skjutmått och dess ingående delar.

Nonieskala. Den skala som används för att dela in huvudskalan i finare steg kallas nonieskala, uppkallad efter den portugisiska matematikern

²Ernst Abbe (1840–1905) var en tysk fysiker och optikkonstruktör som lade grunden för modern optisk mätteknik. Han utvecklade Abbes komparatorprincip och var dessutom medgrundare till optikföretaget Carl Zeiss, där han även införde vetenskapliga metoder i konstruktionen av optiska instrument.

³Det finns skjutmått med centimeterindelning på huvudskalan, men i mekaniska verkstäder anges alla mått i millimeter.



Figur 1.3 Skjutmått med dubbla skalor, mm och tum. Nonieskalan för detta skjutmått har en upplösning på 0,02 mm.

Pedro Nunes (1502–1578). Nunes, vars namn latiniserades till Nonius, var verksam i Coimbra, en av Portugals äldsta universitetsstäder. Nonieskalan är konstruerad så att dess totala längd är något kortare än huvudskalans motsvarande längd, vilket gör att markeringarna förskjuts ett bestämt mått i förhållande till huvudskalan.

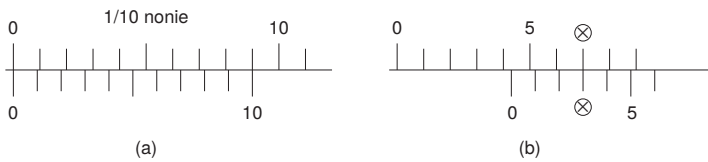
En vanlig nonieskala med 10 delstreck har till exempel en total längd på 9 mm, vilket innebär att avståndet mellan varje delstreck är 9/10 mm. Det tionde noniestrecket sammanfaller då med huvudskalans nionde millimeterstreck, se figur 1.4(a). För en nonieskala med 20 delstreck är totallängden 19 mm, vilket innebär att det tjugonde strecket sammanfaller med det nittonde millimeterstrecket på huvudskalan, och så vidare.

I figur 1.4(b) illustreras en inställd skala för en tänkt mått dimension. Noniens nollstreck ligger någonstans mellan 4 och 5 mm, vilket utan nonieskalan endast skulle kunna uppskattas. För att bestämma den mer precisa avläsningen söker man det streck på nonieskalan som sammanfaller exakt med ett streck på huvudskalan. Detta värde adderas sedan till huvudmättet. I vårt exempel blir det

$$4,0 \text{ mm} + 3/10 \text{ mm} = 4,3 \text{ mm}$$

Hade nonieskalan varit uppdelat på 20 delar skulle tillägget blivit 3/20 mm.

Abbes komparatorprincip. En nackdel med skjutmättet är att det inte alltid uppfyller Abbes komparatorprincip, eftersom ut- och invändig mätning sker parallellt vid sidan av mätskalan. Ett undantag är djupmätning, där skjutmättet uppfyller principen. I figur 1.5 illustreras ett



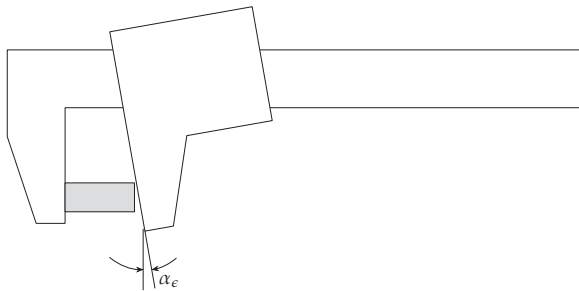
Figur 1.4 (a) Nonieskala med indelningen 1/10 mm. (b) Nonieskalans tredje delstreck sammanfaller med huvudskalan, varför vi kan avläsa måttet 4,3 mm.

skjutmått där det finns ett litet glapp mellan det rörliga och det fasta anslaget. Felet som uppstår kan uttryckas som

$$\varepsilon = d \tan \alpha_{\varepsilon} \approx d \alpha_{\varepsilon} \quad (1.1)$$

där d är det parallella avståndet mellan huvudskalan och den punkt där mätningen sker, och α_{ε} är den vinkeländring som orsakas av glappet. Detta förklarar varför ett skjutmått är svårt att tillverka med högre känslighet än 1/20 mm. Det finns alltså ett inbyggt "fel" i skjutmåttets konstruktion som gör att mätnoggrannheten begränsas.

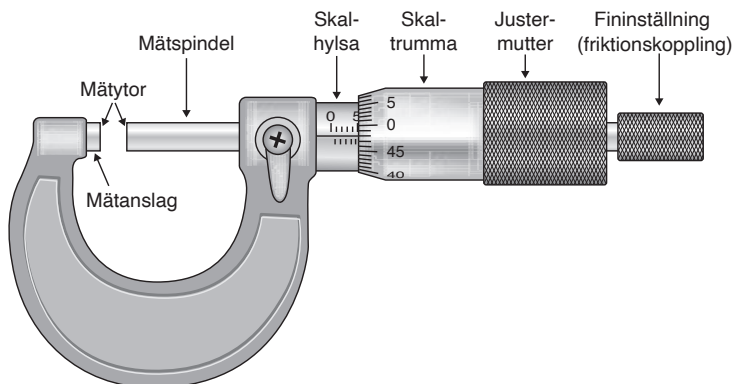
I dag är digitala skjutmått vanliga. De är ofta försedda med en display som visar värden med två decimaler (t.ex. 12,37 mm) och uppges ha en noggrannhet på 0,01 mm. Med tanke på Abbes komparatorprincip bör man dock fråga sig om detta alltid är realistiskt, eftersom det ställer mycket höga krav på slipning och parallellitet hos mätytorna samt en helt glappfri rörelse mellan skena och löpare. Ett skjutmått som är kalibrerat möjliggör givetvis mätning med den tolerans som är specificerad.



Figur 1.5 Vinkelavvikelse α_{ε} på grund av glapp mellan skena och löpare för ett skjutmått.

1.1.2 Mikrometerskruv

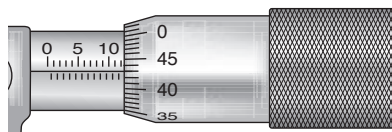
Mikrometerskruv, eller mikrometer, består i sin vanligaste form av en kraftig stålbygel där den ena sidan har ett fast anslag och den andra sidan ett parallellt rörligt anslag. Inställningen sker med hjälp av en fingängad skruv, därav namnet mikrometerskruv. Även benämningen bygelmätarskruv förekommer. Se figur 1.6 för de ingående delarna.



Figur 1.6 Mikrometerskruv med ett mätintervall på 0-25 mm försedd med dubbla nonieskalor: en på trumman och en på hylsan. Detta resulterar i en upplösning på 0,001 mm.

Den vanligaste gängstigningen är 0,5 mm, vilket innebär att när trumman roteras ett helt varv förändras avståndet mellan måttorna med 0,5 mm. Mättrumman är vanligtvis försedd med 50 delstreck, vilket ger en avläsningsnoggrannhet på $0,5/50$ mm. Mikrometerskraven kan dessutom vara utrustad med en extra nonieskala som delar in trummans delstreck i tiondelar. Då blir avläsningsnoggrannheten 0,001 mm.

Den axiella skalan, eller huvudskalan, är i regel indelad i hela millimetrar, men kompletteras ofta med en andra skala förskjuten $1/2$ mm på motstående sida. Detta gör det enkelt att avgöra om avläsningen avser hela eller halva millimetrar. Se figur 1.7 för en mikrometerskruv som är inställd på 12,43 mm.



Figur 1.7 Huvud- och nonieskala för en mikrometer.

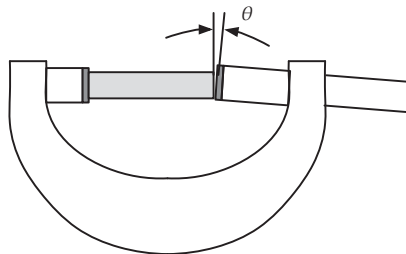
Figur 1.6 visar en mikrometer med ett mätintervall på 0–25 mm. För att mäta större dimensioner än 25 mm finns mikrometrar med större byglar, men mätomfånget är fortfarande ofta 25 mm. En mikrometer med nästa bygelstorlek har således mätområdet 25–50 mm, därefter 50–75 mm och så vidare.

Att mätområdet begränsats till 25 mm är dels av praktiska skäl, dels på grund av krav på noggrannhet och tillförlitlighet i mikrometerskruvens mätning. Vid kalibrering av en mikrometer måste därför både mätyornas planhet och parallellitet kontrolleras, liksom eventuella stigningsfel i gängan.

En fördel med mikrometerskruvens konstruktion är att den uppfyller Abbes komparatorprincip, då mätning sker *i den rätlinjiga fortsättningen av mätskalan*. Figur 1.8 visar illustrativt en mikrometer med snedställda mätytor. Matematiskt blir felet

$$\varepsilon = L \cdot (1 - \cos \alpha_\varepsilon) \approx L \frac{\alpha_\varepsilon^2}{2} \quad (1.2)$$

vilket är ett fel av andra ordningen. Detta gör att mätfelet blir litet även vid relativt stora vinkelutslag och förklarar varför mätnoggrannheten generellt hos en mikrometerskruv är högre än hos ett skjutmått.



Figur 1.8 Vinkelavvikelse α_ε på grund av glapp mellan in- och utvändiga gänga för en mikrometerskruv.

Tänk på att figurerna 1.5 och 1.8 illustrerar samma fenomen som uppstår när mätning inte sker mellan två helt parallella ytor, till exempel på grund av att arbetsstycket hålls snett mellan mätytorna eller att någon av kontaktytorna är smutsig eller skadad. För att minimera denna typ av fel är det därför viktigt att mätytorna hålls rena och parallella samt att arbetsstycket placeras korrekt vid mätningen. Allt detta syftar till att få en god mätnoggrannhet.

Med **mätnoggrannhet** menas att samtliga felkällor ska beaktas. Utöver de nämnda felkällorna måste även mättrycket tas i beaktande. På grund av mikrometerskruvens konstruktion uppstår ett betydande tryck vid mätytorna även vid små fingerkrafter på justermuttern. Mikrometern är därför oftast utrustad med en friktionskoppling som skapar ett konstant mättryck. Detta reducerar mätavvikelsen till ett minimum. Två "klick" vid vridning på friktionsknoppen indikerar att ett konstant mättryck har uppnåtts. Se avsnitt 1.4.2 *Känslighet, noggrannhet, korrektion & mättryck* för mer information.

1.2 Relativa mätmetoder – visarinstrument

I huvudsak används visande mätdon vid relativ mätning. **Relativ mätning** innebär att man bestämmer ett föremåls avvikelse från ett referensmått, exempelvis ett basmått från en likare, och är således en jämförande mätning. Förutom diameter- och längdavvikelser kan även avvikelser i planhet, orundhet och kastning (excentricitet) hos rotationskroppar fastställas. I allmänhet kan avvikelser på 1/100 mm, och i många fall ned mot 1/5000 mm, konstateras, beroende på mätinstrumentets upplösning.

Mäturet eller mätklockan är, tack vare sitt relativt stora mätomfång (upp till 30 mm) och sin robusta konstruktion, ett mycket användbart och allmänt spritt mätverktyg. Typiskt sett har ett mätur en upplösning på 1/100 mm, där mätkolvens rörelse överförs mekaniskt via en kuggstång och en kugghjulsutväxling till en visare eller till en digital display.

Figur 1.9 visar ett analogt mätur. Här är visartavlan indelad i 100 delstreck för 1 mm kolvförflyttning, vilket motsvarar 1/100 mm, samt en ytterligare varvskala med 15 delstreck som anger vilket varv visaren befinner sig på. Skalringen är vridbar, vilket underlättar nollställning.

Vid användning spänns mäturets skaft i ett stativ eller en mätfixtur, alternativt kan fästörat på baksidan utnyttjas. I figur 1.9 visas ett mätur med linjärt arbetande mätkolv, men mätur med vippindikator, där den linjära rörelsen ersätts av en vinkelrörelse, är också vanligt förekommande. Detta instrument används för att mäta kast hos axlar eller för att, till exempel, kontrollera parallellitet hos ett objekt i förhållande till en referensyta.

Mikrokatorn uppfanns av civilingenjör H. Abrahamsson vid Aktiebolaget C. E. Johansson i Eskilstuna under början av 1930-talet och producerades fram till början av 2000-talet. Konstruktionen är så enkel



Figur 1.9 Mätur med linjärt arbetande mätkolv.

och samtidigt så genomtänkt att mikrokatorn av många anses vara ett av de mest sofistikerade mekaniska längdmätinstrument som någonsin utvecklats. Utväxlingsanordningen består av ett vridet rektangulärt metallband, infäst i båda ändarna. När bandet sträcks vrider det sig kring en axel genom bandets centrumlinje. Utväxlingen beror på bandets vridning, dess dimensioner och material, och ett korrekt dimensionerat band ger inom ett stort vinkelområde en vridning som är direkt proportionell mot sträckningen. Eftersom konstruktionen saknar kugghjul och glidande mekaniska överföringar får mikrokatorn mycket små vändfel.

Vändsprång uppstår när ett mätinstrument visar olika värden beroende på om mätkolven är på väg inåt eller utåt, vilket ger upphov till en så kallad **hystereskurva**. I ett traditionellt mätur orsakar kugghjulsutväxlingen alltid ett visst glapp, medan mikrokatorns mekanism är praktiskt taget friktionsfri och i det närmaste fri från vändsprång.

Figur 1.10 visar en mikrokatorklocka fastspänd i ett stativ. Den ursprungliga konstruktionen med vridet metallband används mer sällan i dag, men det finns fortfarande analoga precisionskomparatorer på marknaden. I moderna konstruktioner har metallbandet ofta ersatts av hävarmar eller vippmekanismer, och instrumenten kan fås med både analog och digital avläsning.

Digitala precisionsinstrument använder ofta induktiva, kapacitiva eller optiska givare, men mekaniska instrument har fortfarande vissa praktiska

fördelar. De kräver ingen elektronik eller strömförsörjning och är ofta robusta och driftsäkra även i krävande miljöer.

Mikrokatorer har vanligtvis ett mycket lågt mättryck, ofta inom intervallet 200–300 g, vilket är lågt jämfört med traditionella mätur. Det gör att kontaktrycket kan hållas nere och minskar risken för elastisk deformation i arbetsstycke och mätpunkt, vilket annars kan påverka mätresultatet genom systematiska mätfel. Vanliga modeller har ett mätområde på $\pm 50 \mu\text{m}$ från basmättet, med en upplösning på $1/1000 \text{ mm}$. Det finns även instrument med upplösningar ned till $0,5 \mu\text{m}$.



Figur 1.10 Mikrokator från C. E. Johansson. Siffrorna anger tusendels millimeter, varför passbitskombinationen visar en avvikelse på $20 \mu\text{m}$ från basmättet.

1.3 Fasta mätton

Långt innan den mekaniska industrin hade standardiserat måttsystemet och börjat tillverka ändamålsenliga inställbara mått användes i stor utsträckning fasta mått. Varje verkstad hade sin egen uppsättning, liksom Carl Gustafs Stads Gevärsfaktori i Eskilstuna där C. E. Johansson (1864–1943) arbetade som vapeninspektör. Tolkarna som användes för att kontrollera gevärskomponenterna var specifikt tillverkade för varje enskild detalj, och varje gång en modell förnyades eller en del modifierades krävdes en ny tillverkning. Därtill slets tolkarna med tiden, vilket gjorde det mycket svårt att upprätthålla en jämn och konsekvent kvalitet i produktionen.

Johansson såg därför fram emot ett studiebesök vid Mauserverken i Tyskland, där han hoppades finna ett mer rationellt system. Till hans förvåning använde fabriken flera tusen olika passbitar för måttinställning. Efter en tids analyserande insåg Johansson att endast 102 bitar skulle kunna generera omkring 20 000 olika dimensioner mellan 1 mm och 201 mm med steg om 0,01 mm.

Den första satsen passbitar tillverkade han 1896, med hjälp av sin frus ombyggda symaskin och en modifierad Brown & Sharpemikrometer – försedd med en större skaltrumma för 1 μm upplösning samt en dödvikt för konstant mättryck. Måttsatsen började säljas på världsmarknaden 1907 och blev en omedelbar framgång. Redan 1929 hade en miljon passbitar tillverkats och sålts världen över.

Johansson tillverkade inte enbart passbitar i millimetersystemet utan även i tum. När han påbörjade tillverkningen var definitionen av 1 tum inte densamma i Storbritannien som i USA, utan det fanns en liten men reell skillnad mellan dem. I Storbritannien definierades en tum som 25,399 977 mm vid 62 °F (16,67 °C), medan den i USA definierades som 25,400 0508 mm vid 68 °F (20 °C).

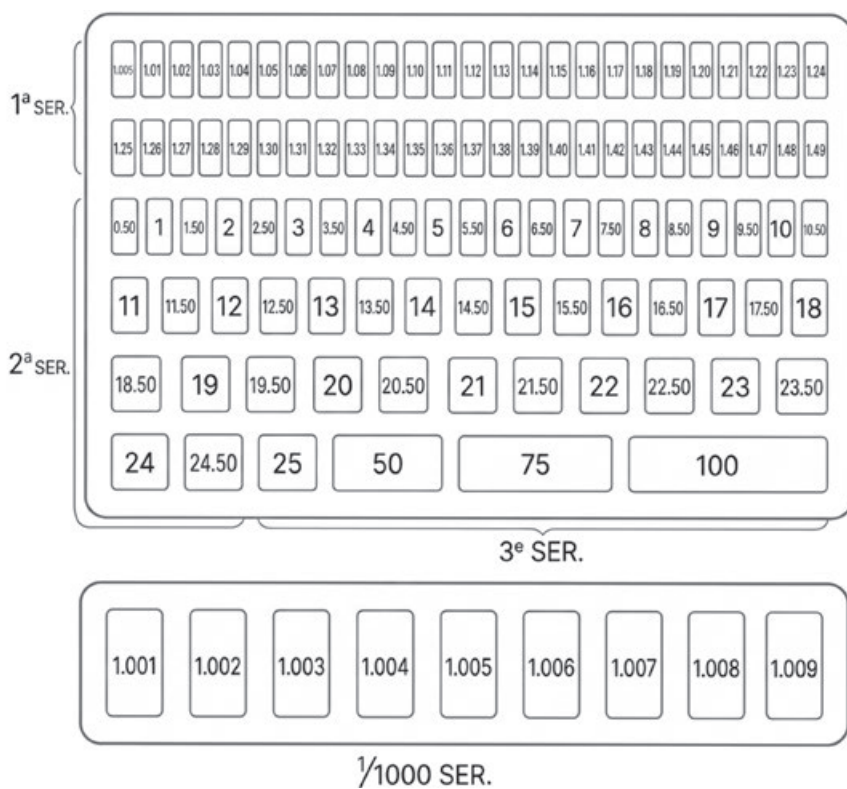
Johansson resonerade att det vore till stor fördel om en gemensam, internationellt överenskommen definition kunde användas, och utformade därför sina måttsatsers tumdimensioner så att 1 tum motsvarade exakt 25,4 mm vid 20 °C. Denna definition kom senare att antas internationellt och utgör än i dag den officiella definitionen av den engelska tummen.

Utöver att tillverka passbitssatser och mikrokatorer tillverkade C. E. Johansson i Eskilstuna även toleransmätverktyg för mätning av standardiserade spel och grepp inom det mättekniska området. Dessa instrument utvecklades för att säkerställa att maskindelar uppfyllde de då framväxande internationella toleranssystemen, och användes därför både vid verkstadskontroll och vid kalibrering av mätutrustning. Johanssons toleransmätverktyg kom att få stort genomslag inom precisionsindustrin eftersom de möjliggjorde snabb, repeterbar och spårbar kontroll av passningsförhållanden i en tid då standardiseringen av toleranser fortfarande var under utveckling.

1.3.1 Passbitar

Passbitarna är rektangulära med två planparallella mätytor. Detta skiljer dem från övriga mätverktyg som vanligen har linje- eller punktberöring vid mätning. Tack vare de större kontaktytorna påverkas mätningen i betydligt mindre utsträckning av mättrycket.

Kombinationsmåtsatsen består av ett antal serier. I den stora satsen innehåller 1:a serien 49 passbitar med intervall om 0,01 mm från 1,01, 1,02, ... 1,49 mm samt en extra passbit på 1,005 mm. 2:a serien innehåller 49 passbitar med intervall om 0,5 mm från 0,50, 1,00, 1,50 ... 24,50 mm. 3:e serien omfattar passbitarna 25, 50, 75, 100 mm. För att kunna framställa mått i 1/1000 mm kan måtsatsen kompletteras med ytterligare en serie bestående av 9 passbitar om 1,001, 1,002, 1,003 ... 1,009 mm. Se figur 1.11.



Figur 1.11 C. E. Johanssons stora kombinationsmåtsats, samt Kompletterande måtsats med steg i 1/1000 mm.

För att skapa ett måttvärde fogas passbitarna samman genom en glidande och vridande rörelse. Som ett resultat av passbitarnas mycket höga ytjämnhet och planhet kommer bitarna att vidhäfta varandra genom de så kallade **adhesionskrafterna**. Den exakta mekanismen bakom adhesionen

är svår att fullständigt analysera, men anses bestå av flera samverkande fenomen. Den primära kraften tros vara intermolekylär attraktion mellan de två ytorna. Därutöver kan även ytspänningen i den tunna oljefilm⁴ som finns mellan bitarna, samt en möjlig tryckskillnad mellan den inneslutna luftvolymen och omgivningen, bidra som sekundära effekter. Om sammanfogningen utförs korrekt är felet på grund av oljefilmen mellan passbitarna cirka 10 nm.

Noggrannhetsgrader. Passbitar används både för de mest krävande kontrollmätningarna och för dagligt bruk i verkstaden. Det är därför inte nödvändigt att använda passbitar av samma noggrannhet i verkstaden som de som används som normala kontrollmått i mätlaboratoriet. Noggrannhetsklasserna benämns **K**, **0**, **1** och **2**, där klass **K** används som normmått vid kalibrering och där klass **2** avser passbitar för inställning och justering där viss förslitning kan förekomma.

Om märkning förekommer på passbitarna används följande symboler:

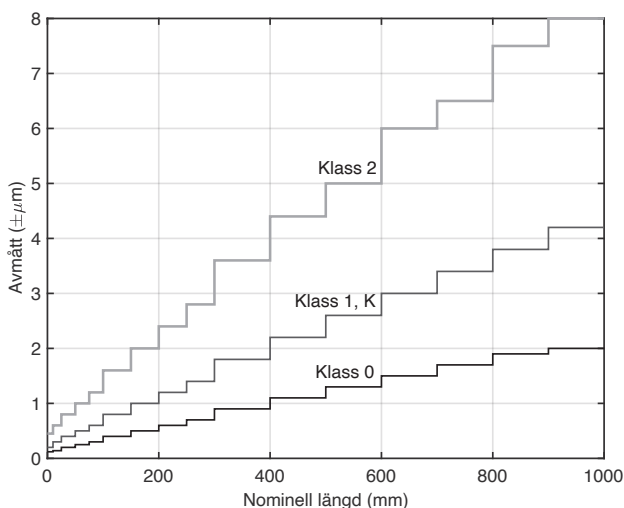
- Kalibreringsklass K: K
- Toleransklass 0: 0
- Toleransklass 1: -
- Toleransklass 2: =

Passbitar tillverkas vanligen i härdat stål med en hårdhet på cirka 800 HV. På senare tid förekommer även passbitar tillverkade i hårdmetall eller kvarts. Dessa material har avsevärt högre hårdhet men är samtidigt sprödare, vilket innebär att de lättare skadas om de tappas eller hanteras ovarsamt. En ytterligare nackdel är att deras längdutvidgningskoefficient skiljer sig från stålets. Detta innebär att temperaturskillnaden mellan passbiten och mätobjektet måste hållas ännu mindre än vid användning av stålpassenheter, särskilt om mätobjektet är tillverkat av stål.

Progressiv tolerans. Passbitar är tillverkade med så kallad progressiv tolerans. Det innebär att toleransstorleken beror på basmåtts längd. Passbitar i kalibreringsklass K ska uppfylla toleranskraven för klass 1 vad gäller gränsavmåtten från nominell längd, men har samtidigt särskilt snäva toleranser för planhet och längdvariationer. Se figur 1.12 för ett diagram över gränsavmåtten. För ytterligare information hänvisas till standarden *ISO 3650:1998*.

⁴Passbitarna är lätt inoljade för att motstå korrosion samt underlätta sammanfogning.

Som exempel kan nämnas att en 100 mm passbit i toleransklass 0 har en tolerans på $\pm 0,3 \mu\text{m}$. Om denna passbit kombineras med en 20 mm passbit med toleransen $\pm 0,14 \mu\text{m}$, en 70 mm passbit med $\pm 0,14 \mu\text{m}$, samt en 10 mm passbit, får den sammanlagda avvikelsen inte överskrida 0,001 mm. Detta krav uppfylls. Den progressiva toleransen var av mycket stor betydelse för C. E. Johansson när han inledde massproduktionen av passbitssatser.



Figur 1.12 Diagram som visar progressiv tolerans för passbitar enligt standarden *ISO 3650:1998*.

1.3.2 Toleransmätverktyg

Ett snabbt sätt att kontrollera om ett tillverkat objekt uppfyller toleransgränserna är att använda så kallade toleranstolkar. **Toleranstolkar** förekommer alltid parvis och består av en gå- och en stopptolk, vilka tillsammans kontrollerar toleransområdets två gränsmått. Toleranstolkar används främst vid kontroll av hål och axlar.

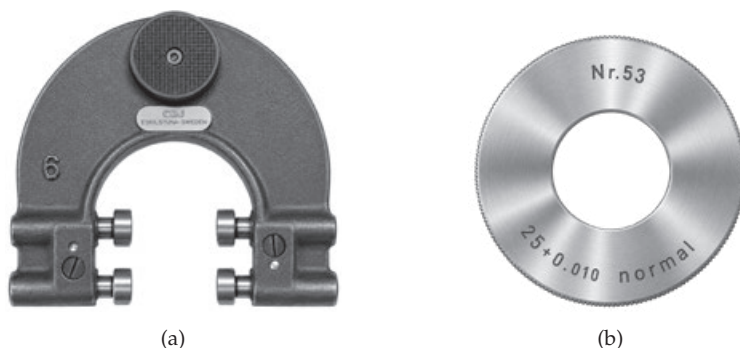
Normaltolkar används för att ställa in eller kalibrera absolutmätande don, både för relativ och direkt måttbestämning. **Referenstolkar** används för inställning och kontroll av toleranstolkar.

Tolkarna kan inte utformas hur som helst, utan måste uppfylla en princip som kallas **Taylors princip**⁵. Den innebär att:

- **gåtolken** ska kontrollera samtliga relevanta mått samtidigt, och
- **stopptolken** ska kontrollera varje enskilt mått för sig.

Hak- och ringtolk. I figur 1.13(a) visas ett toleranshakmått med en gå- och en stoppsida med plana mätklackar. Eftersom avståndet mellan det yttre paret av mätklackar kontrollerar maximåttet (gåtolken), och avståndet mellan det inre paret kontrollerar minimåttet (stopptolken), kan båda toleransgränserna för axeln kontrolleras med en och samma rörelse. Utformningen innebär att stoppsidan på haktolken uppfyller Taylors princip, medan gåsidan inte gör det. En gåtolk som fullt ut följer Taylors princip vid kontroll av axlar skulle behöva vara utformad som en ring med samma längd som axeln, vilket av praktiska skäl sällan är möjligt.

En vanlig variant är **ringtolken**, se figur 1.13(b). Eftersom den vanligtvis är kortare än axeln uppfyller den inte alltid Taylors princip till fullo. Den går att använda för att kontrollera om axeln är liktjock⁶ genom att dras längs axeln. Däremot kontrollerar den inte rakhetsfel i samma utsträckning. En ringtolk kontrollerar därför inte bara diametern, utan även rundheten hos axeln vid samma kontrolltillfälle.



Figur 1.13 Tolkar som används vid kontrollmätning. (a) Toleranshakmått med gå- och stoppsida med plana mätklackar, (b) ringtolk.

⁵Efter engelsmannen Frederick Winslow Taylor, grundare av taylorismen.

⁶Se avsnitt 1.4.1 *Mätytornas antal* för definition.

Det ska dock tilläggas att objektets utformning inte alltid möjliggör kontroll med ringtolk; föreställ er en vevaxel där lagerbanorna ska kontrolleras. Av praktiska skäl används därför oftast en haktolk för kontroll av gåsidan, även om Taylors princip då inte uppfylls.

Det bör också understrykas att det på senare tid har gjorts viktiga förändringar i standarden *SS-EN ISO 286*, som behandlar ISO:s tolerans- och passningssystem. Genom att enbart ange till exempel $\varnothing 25h7$ menar man att en axel med en diameter på 25 mm är definierad med tvåpunktsmätning. Detta gör att ett toleranshaksnitt kan användas på både gå- och stoppsidan, och även att exempelvis skjutmått eller mikrometer är tillåtna. Tidigare gällde Taylors princip.

Om man i dag vill att kravet på perfekt form vid maximalt materialmått (maxmått för axel och minimimått för hål) ska gälla för ett storleksmått (diameter och breddmått) måste *enveloppkrav* (E) anges på ritningen, vilket innebär samma sak som Taylors princip.

Håltolk. Figur 1.14 visar en cylinderformad håltolk utformad med en gå- och en stoppsida. För att tolken på gåsidan ska uppfylla Taylors princip måste den vara cylinderformad och vara minst lika lång som hålet. Skulle hålet vara djupare än längden på cylindern på tolken, kan den inte kontrollera rakheten fullt ut, och andra mätmetoder måste tillgripas.

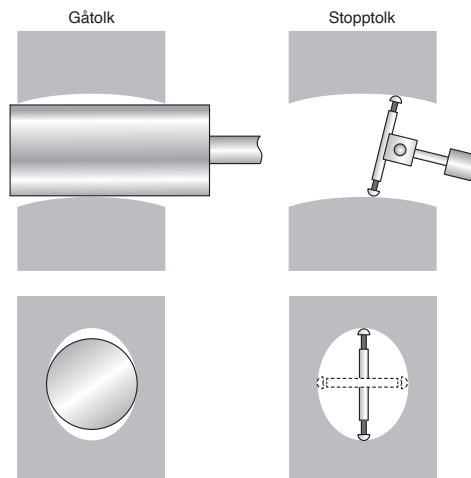
För att tolken ska uppfylla Taylors princip på stoppsidan ska varje enskilt mått kontrolleras för sig. Det gör att en cylinderformad tolk inte uppfyller principen utan att en pinntolk måste användas (tänk er ett ovalt hål som kontrolleras med ett cylinderformat föremål; den går inte igenom om det minsta måttet är mindre än diametern på cylindern).



Figur 1.14 Håltolk med en gå- och en stoppsida.

Det gör att en tolk som är avsedd att kontrollera bearbetningssidan av ett hål (att hålet är tillräckligt stort) – gåtolken – ska vara cylinderformad och ha en längd som motsvarar hålets. En ytberöring uppstår då längs hela hålets mantelyta, vilket gör att alla mått kontrolleras samtidigt. För kontroll av kassationssidan (att hålet inte är för stort) – stopptolken –

måste tolken vara utformad som en kort stav med sfäriska ändtytor, vilket möjliggör punktberöring mellan ändtygorna och hålväggen. För axlar används motsvarande princip, där en ringtolk tjänar som gåtolk och en haktolk som stopptolk. I figur 1.15 visas ett exempel på hur en gå- och stopptolk måste vara utformad för att uppfylla Taylors princip.



Figur 1.15 Illustration av ett hål som är både krumt och ovalt. Enligt Taylors princip ska gåtolken kontrollera samtliga mått samtidigt och är därför cylinderformad. Stopptolken ska däremot kontrollera måtten punktvis, vilket gör att en flacktolk eller pinntolk används. Om stopptolken i stället hade varit cylinderformad hade den troligen fastnat i hålet, vilket hade lett till att ett felaktigt hål blivit godkänt.

1.4 Källor till mätosäkerhet

Alldeles oavsett vilken mätmetod man väljer kommer mätresultatet inte att vara exakt. Det erhållna värdet innehåller nämligen alltid fel som i huvudsak kan härledas till fyra olika felgrupper:

- **Fel på grund av yttre förhållanden** uppstår till exempel genom temperaturavvikelser mellan mätidon och mätobjekt, luftfuktighet, ljusförhållanden, otillräckligt rengjorda ytor och vibrationer.
- **Handhavandefel** är starkt kopplade till operatörens kvalifikation, noggrannhet och arbetssätt. Hit hör även synrubbingar, känselbortfall, domningar i fingrarna, och liknande faktorer.

- **Fel på mätodon** beror på konstruktion, tillverkningsnoggrannhet, slitage och materialval. Detta kan yttra sig som glapp i överföringsmekanismer, för svagt spända fjädrar, delningsfel i gångor, och andra mekaniska avvikelser.
- **Fel på grund av arbetsstyckets kvalitet** kan nästan uteslutande härledas till arbetsstyckets yta. Hit räknas ytjämnhet, ytform och ytstruktur.

Vidare skiljer man mellan **systematiska fel**, som återkommer med samma storlek och riktning, och **tillfälliga fel**, vars storlek och riktning varierar mellan mätningar. Mätresultatets tillförlitlighet beror därför inte enbart på valet av mätinstrument, utan också på hur mätningen utförs: vilket mättryck som uppstår mellan mätobjektets yta och mätinstrumentet, temperaturen hos mätobjektet, och andra påverkande faktorer.

Nedan presenteras ett resonemang kring antalet mätytor som behövs för att mäta ett runt objekt, följt av en förklaring av begreppen känslighet, noggrannhet, korrektion och mättryck.

1.4.1 Mätyornas antal

Inom mättekniken talar man i allmänhet om tre olika beröringsformer mellan mätobjektet och mätverktyget: punktberöring, linjeberöring och ytberöring. Vid **punktberöring** är mätytorna sfäriska eller spetsiga, och används för utvändig eller invändig mätning av cylindriska eller parallella ytor. En nackdel är att punktmätning kan skapa ett högt lokalt kontaktryck mellan mätinstrumentet och objektet, vilket kan påverka mätresultatet. En fördel är att metoden är känslig för lokala ojämnheter, vilket effektivt kan avslöja om toleransen har överskridits. Vid **linjeberöring** är mätytorna planparallella. Detta är den vanligaste beröringsformen vid utvändig mätning av cylindrar. Den ger ett lägre lokalt kontaktryck även vid punktberöring och är därför mindre känslig för varierande mättryck. Vid **ytberöring** kommer hela mäytan i kontakt med objektet, såsom vid användning av mätningar för axlar, tolkar för hål eller hakmått för plana ytor.

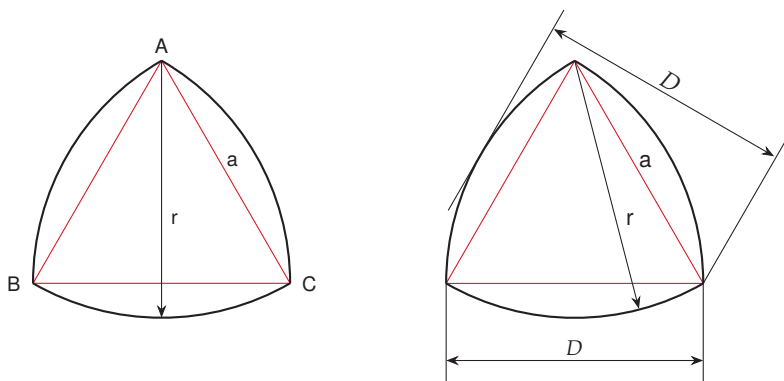
Mätyornas antal har stor betydelse för möjligheten att bestämma en axels orundhet. Mäter man en axel med en mätning (se avsnitt 1.3.2 *Toleransmätverktyg* för mer information) bestäms axelns mått endast under förutsättning att ringen kan föras över axeln utan spel och att axeln har en ideal geometrisk form. Om axeln i stället är orund, exempelvis oval, kommer ringen att kunna passera så länge axelns största diameter inte överstiger ringens innerdiameter. På motsvarande sätt kan en tolk

föras in i ett borrhål endast om tolken inte är större än hålets minsta diameter. Detta innebär att ytberörande mätverktyg inte kan avslöja en axels eller ett håls orundhet. För att kunna bestämma orundhet krävs därför minst två mätytor, antingen med punktberörande eller linjeberörande mätinstrument.

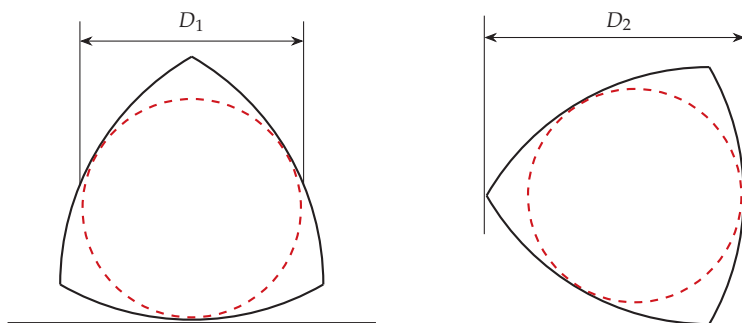
I sin enklaste form kan orundhet i ett hål lätt upptäckas med en flacktolk eller mellan två spetsar, och för en axel med ett hakmått eller en mikrometerskruv. Denna typ av orundhet uppstår ofta vid glapp i lager, fjädring i maskinen eller i verktyget, vilket ger upphov till en periodvis tryckväxling som i sin tur resulterar i en elliptisk form. Ett vanligt uttryck för att beskriva denna orundhet är **ovalitet**. En annan typ av orundhet, benämnd **liktjocking**, kan uppstå vid slipning av axlar med ojämnt fördelad massa, såsom vevaxlar, eller vid periodiskt återkommande vibrationer i maskinens drivning. Den kännetecknas av att axeln får flera återkommande toppar och dalar längs omkretsen, vilket skiljer den från den tvåtoppsstruktur som kännetecknar ovalitet.

Ett liktjockt objekt har samma diameter runt om – likt en cirkel – men axelns mittpunkt vandrar. Den enklaste formen av ett sådant objekt är ett tresidigt bågpolygon, vilket kan beskrivas utifrån en liksidig triangel med böjda sidor. Konstruktionen görs genom att utgå från spetsen A i en liksidig triangel ABC med sidlängden a , och därefter rita en cirkelbåge med radien $r = a$ från spetsen B till spetsen C . Därefter upprepas samma konstruktion för de övriga två hörnen tills alla bågar är dragna. Resultatet blir ett objekt som har konstant avstånd mellan alla parallella tangenter – det vill säga ett *liktjockt* objekt. Se figur 1.16(a) för en illustration. Om detta objekt, trots sin varierande form, uppmäts mellan två parallella mätytor skulle man alltså få uppfattningen att det är runt, vilket uppenbarligen inte stämmer, se figur 1.16(b). Det är därför omöjligt att fastställa ett föremåls geometriska form med endast två mätpunkter.

För att kunna bestämma ett objekts geometriska form placerar man det på ett plan, varefter mätning sker mellan två spetsar som är placerade ungefär halvvägs upp från planet, se figur 1.17(a). Inför nästa mätning vrids objektet ett bestämt antal grader runt sin axel, se figur 1.17(b). Om objektet är en liktjocking kommer de uppmätta diametrarna att variera med rotationsläget, vilket inte skulle vara fallet om den tredje beröringspunkten – planet – saknades. *Detta visar att en tredje mätpunkt är nödvändig för att kunna fastställa en cylinders rundhet.* Ett motsvarande förhållande gäller vid invändig mätning, där även här en trepunktsmätning krävs för att kunna bestämma ett håls rundhet.



Figur 1.16 Tresidig bågpolygon ger formen för en liktjocking. Avståndet mellan bågarna är alltid detsamma, men det är uppenbart att objektet inte är runt. Geometrin är känd under Reuleaux triangel.



Figur 1.17 Liktjocking upplagd på ett plan där olika diametrar D_1 och D_2 uppmäts om objektet vrids. För ett runt objekt blir $D_1 = D_2$.

Matematisk beskrivning av liktjocking. Låt oss utgå från liktjockings matematiska beskrivning i polära koordinater uttryckt som en Fourierserie (detta fungerar eftersom radien är en sluten kurva med en periodicitet på 2π)

$$r(\varphi) = c_0 + c_1 \cos(n\varphi + \alpha_1) + c_2 \cos(2n\varphi + \alpha_2) + \dots \quad (1.3)$$

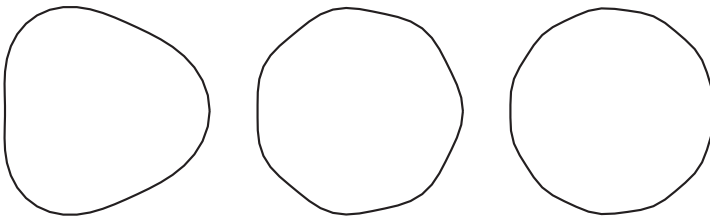
där r är radien och φ är vinkeln i radianer. Använd de två första termerna, och sätt att $c_0 = D/2$ samt $c_1 = C/2$ där D är diametern på objektet och C hur mycket vi förskjuter mittpunkten. Eftersom fasförskjutningen är godtycklig väljer vi $\alpha_1 = \pi/2$ och erhåller

$$r(\varphi) = \frac{D}{2} + \frac{C}{2} \sin(n\varphi), \quad n \in \{\text{udda heltal}\} \quad (1.4)$$

där heltalet n är antal hörn för liktjockingen. Att det alltid är udda kommer från antagandet att avståndet mellan två ändpunkter på ett halvt varv är konstant $r(\varphi) + r(\varphi + \pi) = D$. Vidare måste villkoret

$$\frac{D}{C} > n^2 + 1 \quad (1.5)$$

vara uppfyllt för att liktjockingen ska vara konvex. Se figur 1.18 för exempel på liktjockingar skapade med hjälp av ekvation (1.4).



Figur 1.18 Liktjocking med $n = 3, 7$ och 11 med en diameter $D = 10$ mm. För C är villkoret i ekvation (1.5) använt.

1.4.2 Känslighet, noggrannhet, korrektion & mättryck

I mätsammanhang skiljer man vanligen mellan mätinstrument som används för att kontrollera de produkter som tillverkas i verkstaden, så kallade **arbetsmått**, och de instrument som används för att kontrollera, eller kalibrera, dessa arbetsmått, så kallade **kontrollmått**. De har i regel högre avläsningsnoggrannhet och känslighet än arbetsmått, och deras konstruktion kan därför skilja sig något. Tillverkningen sker dessutom med en högre grad av precision än för arbetsmåtten.

Känsligheten, eller precisionskänsligheten, hos ett mätinstrument bestäms av dess upplösning. För att öka känsligheten delas huvudskalan upp i en nonieskala. Samma typ av instrument, exempelvis en mikrometer, kan därför förekomma med olika upplösning på nonieskalan och därmed olika känslighet, vilket ställer varierande krav på bland annat parallellitet, glapp i överföringsmekanismen och friktion i lagringen.

En exakt **mätnoggrannhet** kan endast uppnås när instrumentets inre felaktigheter, **korrektioner**, har bestämts. För att fastställa dessa fel måste en serie kalibreringsmätningar utföras, varpå ett medelvärde av avvikelserna beräknas. Denna korrektion måste sedan algebraiskt adderas till (eller subtraheras från) mätresultatet vid användning av instrumentet, för att erhålla det verkliga måttet. Detta kallas **inställningskorrektion**.

En annan felkälla som påverkar mätresultatet är **mättrycket**. Det är det tryck som krävs för att erhålla god kontakt mellan mätpetsar eller mätytor på instrumentet och mätobjektet, men även för att undanröja inverkan av eventuella luft- eller vätskeskikt mellan mätföremålet och instrumentets mätkolv. En konsekvens av mättrycket är att en – om än liten – elastisk deformation uppstår i mätobjektet.

Om mätytorna är parallella och kontakten sker genom yt- eller linjeberöring blir det lokala trycket i regel litet, och påverkan på mätresultatet kan oftast försummas. Däremot kan mättrycket få större betydelse vid punktberöring, eftersom ett mycket stort lokalt tryck då kan uppstå.

Den deformation d som uppstår i en plan yta när en sfärisk kropp trycks ned med en kraft F kan beräknas enligt⁷

$$d = 1.23 \left(\frac{F^2}{E^2 R} \right)^{1/3} \quad (1.6)$$

om vi antar att båda kropparna har samma materialegenskaper, ett tvärkontraktionstal $\nu = 0.3$ samt elasticitetsmodul E . Se figur 1.19 för en illustration av hur stor deformationen blir för ett material med $E = 210\,000$ MPa.

Det avlästa felet ska adderas till det uppmätta värdet. En kula som har en verklig diameter på 5 mm, men mäts mellan två plana ytor, får därför den uppmätta diametern

$$5 \text{ mm} + 3,5 \cdot 2 \text{ } \mu\text{m} = 5,007 \text{ mm}$$

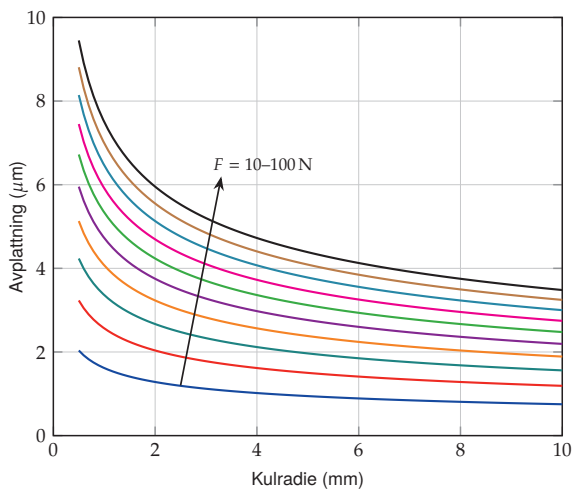
om mätkraften är 55 N. Det omvända gäller naturligtvis också om objektet är plant men mätpetsarna är sfäriska.

Fysiska förhållanden såsom atmosfärstryck, temperatur och luftfuktighet påverkar också mätresultatet. Referenstemperaturen är satt till 20 °C, trycket till 1 atm och den relativa luftfuktigheten bör ligga mellan 35 % och 55 %. Atmosfärstrycket och luftfuktigheten har i regel liten betydelse vid mekanisk mätning, men kan påverka resultatet vid optiska mätmetoder. Temperaturen har däremot en påtaglig inverkan på mätresultatet.

För de flesta material kan längdutvidgningen ΔL approximeras som linjär inom ett litet temperaturintervall ΔT enligt

$$\Delta L = \kappa L_0 \Delta T \quad (1.7)$$

⁷Problemet löstes av Heinrich Hertz år 1882.



Figur 1.19 Nomogram för bestämning av mätfelet på grund av deformation. Avser mätning mellan sfäriska kroppar och plana mätytor av stål.

där κ är längdutvidgningskoefficienten och L_0 är objektets ursprungliga längd. För stål är κ i storleksordningen $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, och för aluminium cirka $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Se tabell 1.1 för längdutvidgningskoefficienter för vanligt förekommande material.

Temperaturutjämning. För att beräkna tiden det tar för ett objekt att anta omgivningens temperatur kan lösningen till värmeledningsekvationen användas. Detta kräver korrekta randvillkor, och den exakta lösningen beror i allmänhet på objektets geometri samt på ytans beskaffenhet.

Om vi antar att objektet ligger fritt på ett isolerande underlag (t.ex. ett träbord) och att värmeöverföringen domineras av naturlig konvektion, kan tiden det tar för att uppnå en temperaturutjämning approximeras med

$$t = \frac{mc_p}{A\eta} \ln \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T} \right) = \tau \ln \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T} \right) \quad (1.8)$$

där m är objektets massa, c_p dess specifika värmekapacitet vid konstant tryck, A den fria mantelytan och η värmeövergångstalet. För naturlig konvektion i luft antas ofta $\eta \approx 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. ΔT_0 är den initiala temperaturskillnaden mellan objektet och luften, medan ΔT är den kvarvarande temperaturskillnad som accepteras. Parametern $\tau = mc_p/(A\eta)$ utgör systemets tidskonstant.

Tabell 1.1 Temperaturutvidgningskoefficienten $\kappa = \kappa_0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ för vanligt förekommande material.

Material	κ_0	Material	κ_0
Aluminium	24	Järn och stål	12
Al–Cu-legering (Dural)	24	Gjutjärn	10
Al–Si-legering (Silumin)	19	Smidesjärn	12
Magnesium	25	Stålgjutgods	14
Elektron	25	Rostfritt stål	10–18
Koppar	16	Nickel	13
Aluminiumbrons	18	Invar (36% Ni) ⁸	1,6
Fosforbrons	17	Krom	7
Mässing	18	Kromstål	10
Bly	29	Titan	8,6
Bakelit	30	Diamant	1,2
Polyeten (PE)	100–200	Kvarts	0,3–0,5
Naturgummi	60–80	Porslin	3
Hårdgummi	77	Sodakalkglas	8–9
Gips	25	Hårdmetall kromkarbid	10
Granit (diabas)	8,3	Hårdmetall volframkarbid	5,5

Mätnoggrannhet. Genom att beakta samtliga felkällor – instrumentets utförande, användning, formändring, temperatur, mättryck, med mera – kan man bestämma ett värde på mätnoggrannheten. Detta värde är direkt avgörande för hur tillförlitligt mätresultatet blir.

1.4.3 Tillfälliga och systematiska fel

Utöver de systematiska fel som kan uppstå vid en mätning förekommer även tillfälliga eller slumpmässiga mätfel. Ett sätt att uppskatta storleken på dessa fel är att utföra en mätserie bestående av ett antal oberoende mätningar av samma objekt under identiska förhållanden. Baserat på dessa mätningar, eller genom ett antagande om mätvärdenas fördelning, kan olika statistiska mått bestämmas. Här är centralvärdesmättet – oftast det aritmetiska medelvärdet – och spridningsmättet – oftast standardavvikelsen – centrala, eftersom de sammanfattar datamaterialets tyngdpunkt (centralvärdet) och variabilitet (spridningen).

Enligt den centrala gränsvärdesatsen kommer summan, eller medelvärdet, av ett stort antal oberoende och identiskt fördelade slumpvariabler

⁸Invar är en legering av järn och nickel med små mängder kol och krom. Materialet har en mycket låg längdutvidgningskoefficient och används därför i precisionsmätinstrument. Invar utvecklades 1896 av den schweiziske fysikern Charles Édouard Guillaume, som 1920 tilldelades Nobelpriset i fysik för sina upptäckter om nickellegeringars egenskaper.

att approximativt följa en normalfördelning när antalet observationer ökar. Därför är normalfördelningen, även kallad Gaussfördelningen, den vanligast förekommande sannolikhetsfördelningen för mätdata. Beroende på om man har tillgång till hela populationen (oändligt många mätningar) eller endast ett stickprov skiljer sig uttrycken för fördelningen något. Eftersom antalet mätningar i praktiken ofta är begränsat används standardavvikelsen för ett stickprov.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.9)$$

där n är antalet mätningar och $\bar{x}$ är stickprovets aritmetiska medelvärde för de enskilda mätvärdena x_i .

I ekvation (1.9) har $n-1$ ersatt n , som används om man har data för en hel population. På samma sätt har det "sanna" medelvärdet, det så kallade väntevärdet μ , ersatts av stickprovets medelvärde $\bar{x}$ och i stället för populationsstandardavvikelsen σ använder vi stickprovsstandardavvikelsen s . Anledningen till att $n-1$ används är att stickprovets medelvärde introducerar en viss osäkerhet. Denna osäkerhet kompenserar vi för genom att använda $n-1$ i stället för n , en justering som kallas Bessels korrigering.

Notera att standardavvikelsen inte är ett mått på det maximala felvärdet, utan snarare ett kvalitetsmått på mätningen. En mätserie med en standardavvikelse på exakt noll indikerar att inga tillfälliga mätfel förekommer. Om mätvärdena däremot varierar kraftigt runt medelvärdet blir standardavvikelsen större. Standardavvikelsen är alltså ett mått på spridningen av mätvärdena runt medelvärdet och inte ett direkt mått på det maximala felet för en enskild mätning. En enskild mätning kan avvika mer eller mindre än vad standardavvikelsen antyder, men standardavvikelsen ger – statistiskt sett – en uppfattning om mätningens kvalitet.

Utifrån standardavvikelsen kan vi göra sannolikhetsbaserade uttalanden om *enskilda mätvärden*. Med cirka 68 % sannolikhet ligger en enskild mätning inom intervallet $\pm s$ från medelvärdet, med cirka 95,5 % sannolikhet inom $\pm 2s$, och med cirka 99,7 % sannolikhet inom $\pm 3s$.

För medelvärdet av mätserien får vi däremot **standardfelet**, eller mer korrekt *standardmätosäkerheten för medelvärdet*, som ges av

$$s_e = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1.10)$$

Detta är ett mått på hur mycket stickprovsmedelvärde $\bar{x}$ kan förväntas avvika från det sanna medelvärde μ . Det slutliga mätresultatet, med hänsyn till tillfälliga fel, kan därför skrivas

$$x = \bar{x} \pm ks_e \quad (1.11)$$

där k är täckningsfaktorn, som vanligtvis väljs till 2 eller 3 beroende på önskad konfidensnivå.

Systematiska fel uppstår när det finns en konstant avvikelse mellan det uppmätta och det förväntade eller accepterat sanna värdet. Detta kan bero på fel i mätinstrumentet, kalibrering, eller fel i avläsningen av operatören.

Det systematiska felet skattas genom att man beräknar skillnaden mellan ett medelvärde av en mätserie och det sanna värdet,

$$u_{sys} = \bar{x} - x_{sant} \quad (1.12)$$

där ett positivt fel innebär att det uppmätta värdet är högre än det sanna värdet och ett negativt fel att det uppmätta värdet är lägre.

1.5 Beräkning av mätosäkerhet

En metod som både tar hänsyn till tillfälliga mätfel och systematiska fel är den så kallade GUM-metoden (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) som är framtagen av den internationella byrån för mått och vikt (BIPM). I stället för mätfel, som bygger på att man vet det sanna värdet och därmed vet exakt hur stort mätfelet är vid en mätning, använder man sig i stället av begreppet mätosäkerhet, som bygger på statistiska antaganden.

GUM-metoden bygger på att man delar upp den totala mätosäkerheten i två olika grupper

1. **Typ A-osäkerhet** (u_A) är den statistiska osäkerheten och uppskattas genom upprepade mätningar, såsom beskrivet i avsnitt 1.4.3 *Tillfälliga och systematiska fel*.
2. **Typ B-osäkerhet** (u_B) måste bestämmas med hjälp av skattningar av mätosäkerheten och beror utöver på val av mätmetod på tidigare erfarenheter.

Exempel: Diametern på en axel har uppmätts med en mikrometer. För att bedöma tillförlitligheten i mätningarna upprepas samma mätning 13 gånger under identiska förhållanden. Mätresultaten som operatören erhöll var

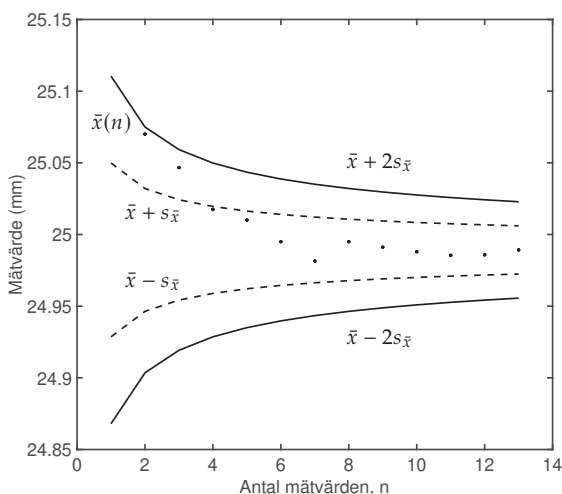
1	2	3	4	5	6	7
25,08	25,06	25,00	24,93	24,98	24,92	24,90
8	9	10	11	12	13	
25,09	24,96	24,96	24,96	24,99	25,03	

Medelvärdet blir $\bar{x} = 24,99$ mm och standardavvikelsen $s = 0,061$ mm.

Det innebär att sannolikheten är ca 68 % att få ett resultat inom intervallet $25,00 \pm 0,061$ mm, med ca 95,5 % sannolikhet inom $25,00 \pm 0,12$ mm, och med ca 99,7 % sannolikhet inom $25,00 \pm 0,18$ mm.

Osäkerheten för samtliga mätning blir däremot $s_{\bar{x}} = \pm 0,061/\sqrt{13} = \pm 0,017$ mm.

Figuren nedan visar hur standardfelet (för täckningsgrad $k = 1$ och 2) ändrar sig med antal mätvärden, samt hur det förhåller sig till medelvärdet uträknat som funktion av antal mätvärden.



Typ A-osäkerheten skattas med hjälp av standardavvikelsen, se ekvation (1.9). Om flera mätningar genomförs ska standardfelet skattas enligt ekvation (1.10). För att denna skattning ska vara meningsfull krävs att antalet repeterade mätningar är tillräckligt stort.

Skattning av typ B-osäkerheten är i allmänhet svårare. Ett vanligt tillvägagångssätt är då att anta en sannolikhetsfördelning för osäkerheten. Här är en normalfördelning inte alltid lämplig. För diskreta mätresultat, såsom de som erhålls från digitala mätinstrument, är i stället en rektangelfördelning ofta mer ändamålsenlig. Se figur 1.20 för ett exempel på en likformig sannolikhetsfördelning.

En annan vanlig fördelning inom mättekniken är triangelfördelningen. Den kan användas när det är rimligt att anta att huvuddelen av värdena är koncentrerade kring fördelningens mitt. Ett exempel där triangelfördelning kan vara lämplig är massmätning med våg, där mätresultatet kan påverkas av hur vikten är placerad på vågplattan.

För att kunna skatta osäkerheten måste vi veta variansen för olika fördelningar. Variansen av en kontinuerlig funktion ges av

$$\sigma^2 = \int_{-a}^a (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (1.13)$$

där $f(x)$ är täthetsfunktionen. För en symmetrisk rektangelfördelning blir osäkerheten således

$$u_B^2 = \sigma^2 = \int_{-a}^a x^2 \frac{1}{2a} dx = \frac{a^2}{3} \quad (1.14)$$

och för en triangelfördelning blir osäkerheten

$$u_B^2 = \frac{a^2}{6} \quad (1.15)$$

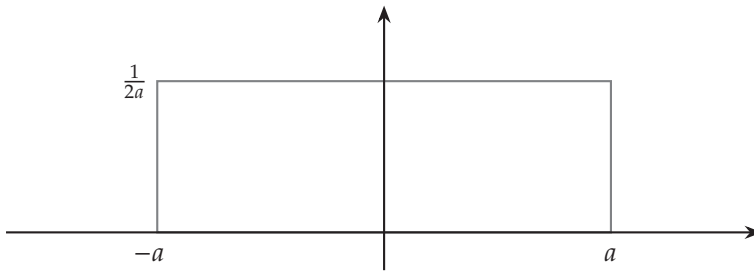
för intervallet $[-a, a]$.

Nu när vi kan skatta båda grupperna som slumpvariabler kan den sammansatta osäkerheten beräknas till

$$u = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \dots + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots} \quad (1.16)$$

om osäkerheterna kan antas vara oberoende (inga kovarianser) av varandra. Typ-A-osäkerheten beräknas enligt ekvation (1.10), så att

$$u_A^2 = \frac{s^2}{n} \quad (1.17)$$



Figur 1.20 Likformig sannolikhetsfördelning.

Det slutgiltiga mätresultatet anges därefter som

$$x = \bar{x} \pm U = \bar{x} \pm ku \quad (1.18)$$

där U är den utvidgade mätosäkerheten. Denna ska avrundas uppåt till närmaste tillåtna värde med högst två värdesiffror. Exempelvis ska $U = 0,0411$ mm rapporteras som $U = 0,042$ mm.

Mätresultatet $\bar{x}$ ska avrundas till samma decimalposition som den utvidgade osäkerheten. Om till exempel $U = 0,042$ mm och $\bar{x} = 50,0417$ mm ska resultatet rapporteras som

$$x = 50,042 \pm 0,042 \text{ mm}$$

Vid behandling av mätosäkerhet finns två centrala begrepp att känna till:

- **Repeterbarhet** är graden av överensstämmelse mellan upprepade mätningar av samma objekt under oförändrade förhållanden, det vill säga med samma mätmetod, mätinstrument, operatör och på samma plats.
- **Reproducerbarhet** är graden av överensstämmelse mellan mätningar av samma mätobjekt utförda under varierande förhållanden, exempelvis med olika operatörer, olika mätinstrument eller på olika platser.

Exempel: I exemplet ovan mättes axeln med en mikrometerskruv vars upplösning är 0,01 mm. Mellan axeln och mätinstrumentet finns det en temperaturskillnad som uppgår till en osäkerhet på $\pm 0,02$ mm och operatörens hantering kan uppskattas till en osäkerhet på $\pm 0,008$ mm.

Genom att anta en osäkerhetsfördelning kan typ B-osäkerheten beräknas

- Instrument: $u_{B1} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} \mu\text{m}$ - antag rektangelfördelning
- Temperatur: $u_{B2} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} \mu\text{m}$ - antag rektangelfördelning
- Operatör: $u_{B3} = \frac{0,008}{\sqrt{3}} \mu\text{m}$ - antag rektangelfördelning

Den totala slumpmässiga osäkerheten kan nu skattas till

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} = 21 \mu\text{m}$$

och axelns diameter kan anges med mätresultatet

$$d = 24,99 \pm 0,042 \text{ mm} \quad (k = 2)$$

för en täckningsgrad på 2. Notera att axeln är angiven med både ett systematiskt fel och ett slumpmässigt fel. Det systematiska felet blir

$$u_{sys} = 24,99 - 25,00 = -0,01 \text{ mm}$$

som måste adderas till ett enskilt mätresultat.

1.6 Ytjämnhetsmätning

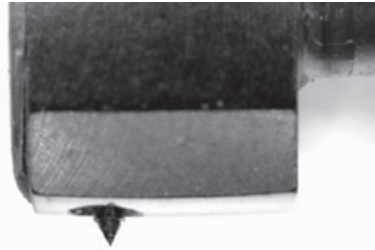
Vid tillverkning kommer en yta alltid att avvika, mer eller mindre, från den geometriskt perfekta formen. En axel blir t.ex. aldrig helt perfekt rund, och en plan yta avviker alltid något från en ideal plan form. Olika typer av formavvikelser har olika betydelse för den färdiga produktens funktion. Därför skiljer man mellan **formavvikelser**, **vågighet** och **ytjämnhet**. Var gränsen går mellan ytjämnhet och formegenskaper bestäms med hjälp av olika Gaussfilter, som används för att separera ytans variationer efter våglängd.

Det absolut vanligaste sättet att mäta ytjämnhet är genom **linjeprofilmätning**. Med denna metod används ett släpnålsinstrument som registrerar ytprofilen längs en linje, vilken utgör snittet mellan ytan och ett plan. Mätningen ska utföras i den riktning som ger maximalt ytjämnhetsvärde, vilket i normalfallet innebär vinkelrätt mot bearbetningsriktningen.

Andra metoder för att mäta ytjämnhet bygger på optiska principer, till exempel med hjälp av ljus eller genom mikroskopisk analys av ytan i två dimensioner. Dessa metoder kräver ofta kostsam utrustning och hög teknisk kompetens.

1.6.1 Linjeprofilmätning

Linjeprofilmätning utförs med en mätspets som i normalfallet är tillverkad av diamant eller annat mycket hårt material, med en nosvinkel på 90° . För att undvika repbildning samt för att filtrera bort de allra minsta ytavvikelserna har spetsen en nosradie på $2\text{ }\mu\text{m}$, $5\text{ }\mu\text{m}$ eller $10\text{ }\mu\text{m}$ som standard. Nosradien ska anpassas till ytans finhet; grövre ytavvikelser tillåter en större nosradie. Se figur 1.21 för en illustration av en mätspets.



Figur 1.21 Mätspets för linjeprofilmätning.

Det vanligaste sättet att omvandla mätspetsens rörelse till en elektrisk signal är genom induktion. Mätspetsen är monterad på en hävarm, i vars andra ände en mätspole är placerad. Mätspolen reagerar på hävarmens rörelse och genererar en elektrisk signal proportionell mot ytans profilvariationer.

Den av mätspetsen registrerade ytan kan beskrivas med hjälp av tre profiler:

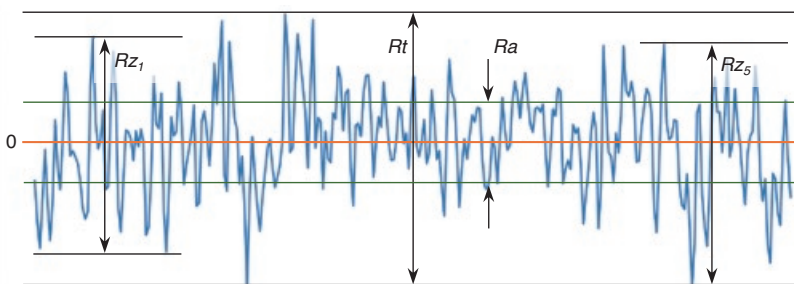
- den primära profilen (P-profilen),
- vågighetsprofilen (W-profilen),
- ytjämnhetsprofilen (R-profilen).

Den primära profilen – P-profilen är en övergripande profil som beskriver ytans form efter att de högsta frekvenserna har filtrerats bort. Detta sker dels genom valet av mätspetsens nosradie, dels genom elektronisk lågpåssfiltrering med kortvågscut-off λ_s . Profilen innehåller således bidrag från ytjämnhet **R** (Rauheit), vågighet **W** (Welligkeit) samt mindre formavvikelser. P-profilen utvärderas över en utvärderingslängd l_n .

Vågighetsprofilen – W-profilen är den profil som återstår efter att ytjämnheten har filterats bort från den primära profilen med hjälp av cut-off-våglängden λ_c , samt efter att de allra längsta våglängderna har filterats bort med hjälp av långvågscut-off λ_f .

Ytjämnhetsprofilen – R-profilen erhålls ur den primära profilen efter att vågigheten (W-profilen) har filterats bort. R-profilen innehåller således de profilkomponenter som ligger mellan cut-off-våglängderna λ_s och λ_c . Utvärderingen sker över en utvärderingslängd l_n , som normalt består av fem referenslängder l_r , om inget annat anges. Vissa mätinstrument inkluderar även en start- och stoppsträcka, vilket innebär att den totala mätsträckan är något längre än utvärderingslängden.

Se figur 1.22 för exempel på hur en primärprofil, som innehåller ytjämnhet samt vågighet, har delats upp till en ytjämnhetsprofil samt en vågighetsprofil efter att passerat ett delningsfilter.



Figur 1.22 Exempel på ytjämnhetsprofil efter applicering av delningsfiltret λ_c som resulterar i en vågighetsprofil – R-profilen – samt en ytjämnhetsprofil – W-profilen.

Hur lång är då en referenslängd? Det beror på ytans karaktär. Referenslängden motsvarar cut-off-våglängden λ_c och kan variera från 0,08 mm till 8 mm. För de ytjämnheter som är vanligast inom industrin ligger värdena ofta i ett intervall där $\lambda_c = 0,8$ mm, vilket innebär att utvärderingslängden l_n typiskt är 4 mm. Se tabell 1.2 för en översikt över ytparametrar.

Tabell 1.2 Mätförutsättningar enligt *SS-EN ISO 4288* och *SS-EN ISO 3274*.

Ickeperiodiska ytor		Periodiska ytor			
Slipade, Polerade, Läppade, Eroderade		Svarvade, Frästa, Hyvlade	Max mätspets- radie	Referens- längd	utvärde- ringslängd
Rt, Rz (μm)	Ra (μm)	RSm (mm)	r_{tip} (μm)	$\lambda_c = l_r$ (mm)	l_n (mm)
0,025...0,1	0,006...0,02	0,013...0,04	2	0,08	0,4
0,1...0,5	0,02...0,1	0,04...0,13	2	0,25	1,25
0,5...10	0,1...2	0,13...0,4	2*	0,8	4
10...50	2...10	0,4...1,3	5	2,5	12,5
50...200	10...80	1,3...4	10	8	40

* För ytor med $Rz > 3 \mu\text{m}$ eller $Ra > 0,5 \mu\text{m}$ kan vanligtvis $r_{\text{tip}} = 5 \mu\text{m}$ användas utan signifikanta skillnader i mätresultatet.

Följande ytjämnhetsparametrar definieras för R-profilen i förhållande till en beräknad medellinje och är oberoende av någon på ritningen angiven referensyta:

- **Aritmetisk medelytavvikelse – Ra:** Den aritmetiska medelvärdesbildningen av de absoluta avvikelserna $Z(x)$ från medellinjen inom utvärderingslängden l_n :

$$Ra = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |Z(x)| dx \quad (1.19)$$

Parametern Ra gör ingen åtskillnad mellan toppar och dalar och är relativt okänslig för enstaka extrema avvikelser. Av denna anledning bör Ra aldrig anges ensamt utan kompletteras med minst en parameter som beskriver topp- eller dalhöjd.

- **Total profilhöjd – Rt:** Skillnaden mellan den högsta profiltoppen och den djupaste profildalen inom hela utvärderingslängden l_n

$$Rt = Z_{p,\text{max}} - Z_{v,\text{min}} \quad (1.20)$$

- **Enskild profilhöjd – Rz_i**

Skillnaden mellan den högsta profiltoppen och den djupaste profildalen inom den i :te referenslängden l_r .

- **Medelprofilhöjd – R_z :** Det aritmetiska medelvärdet av de enskilda profilhöjderna inom utvärderingslängden

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{z_i} \quad (1.21)$$

- **Maximal enskild profilhöjd – $R_{z_{\max}}$:** Det största enskilda värdet av R_{z_i} inom utvärderingslängden

$$R_{z_{\max}} = \max(R_{z_1}, \dots, R_{z_n}) \quad (1.22)$$

- **Enskild profiltopp höjd – R_{p_i} :** Det största positiva avståndet från medellinjen till profiltoppen inom den i :te referenslängden.
- **Medelprofiltopp höjd – R_p :** Det aritmetiska medelvärdet av de enskilda profiltopp höjderna

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{p_i} \quad (1.23)$$

- **Maximal enskild profiltopp höjd – $R_{p_{\max}}$:** Det största enskilda värdet av R_{p_i} inom utvärderingslängden

$$R_{p_{\max}} = \max(R_{p_1}, \dots, R_{p_n}) \quad (1.24)$$

- **Enskild profildalshöjd – R_{v_i} :** Det största negativa avståndet från medellinjen till profildalen inom den i :te referenslängden.
- **Medelprofildalshöjd – R_v :** Det aritmetiska medelvärdet av de enskilda profildalshöjderna

$$R_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{v_i} \quad (1.25)$$

- **Maximal enskild profildalshöjd – $R_{v_{\max}}$:** Det största enskilda värdet av R_{v_i} inom utvärderingslängden

$$R_{v_{\max}} = \max(R_{v_1}, \dots, R_{v_n}) \quad (1.26)$$

Medellinjen definieras som den linje, belägen på höjden R_m , kring vilken profilen $Z(x)$ fördelar sig så att arean av alla toppar (positiva avvikelser

från Rm) är lika stor som arean av alla dalar (negativa avvikelser från Rm) inom utvärderingslängden l_n . Medellinjen uppfyller därmed villkoret

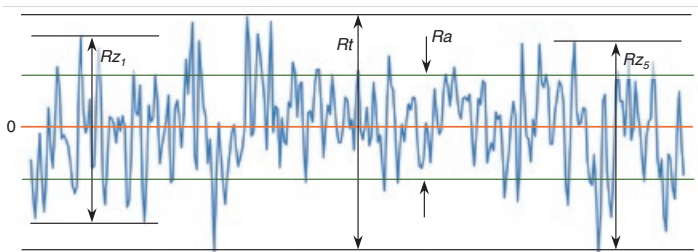
$$\frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} (Z(x) - Rm) dx = 0 \quad (1.27)$$

vilket ger

$$Rm = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} Z(x) dx \quad (1.28)$$

dvs. Rm är det aritmetiska medelvärde av profilens Z -värden inom utvärderingslängden.

Samtliga ovanstående parametrar avser ytjämnhetsprofilen och inleds med bokstaven R . Se figur 1.23 för hur de olika parametrarna är definierade. Parametrar som baseras på primärprofilen eller vågighetsprofilen inleds med P respektive W , exempelvis Pt , Wt eller Wz .



Figur 1.23 Hur den aritmetiska medelytavvikelsen Ra , totala profilhöjden Rt samt enskilda profilhöjd Rz_i förhåller sig till ytjämnhetsprofilen.

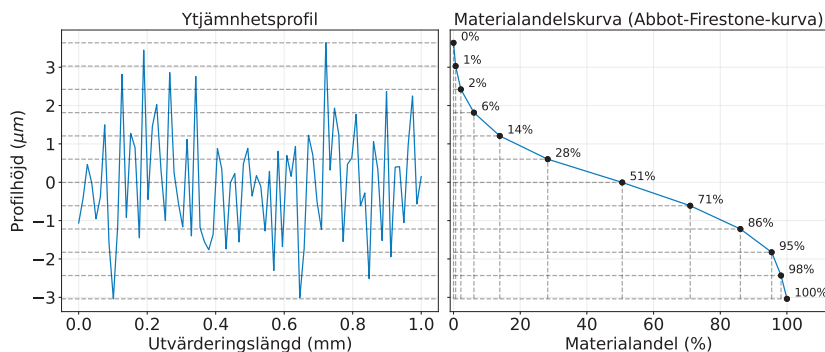
Materialandelskurva (bärighetskurva) Materialandelskurvan beskriver fördelningen av material i en ytjämnhetsprofil och används för att kvantitativt beskriva hur bärande eller ojämn en yta är. Kurvan visar sambandet mellan en vald snittnivå c och andelen material i profilen vid denna nivå.

För en given snittnivå c definieras materialandelen som förhållandet mellan materiallängden $Rml(c)$ och utvärderingslängden l_n

$$Rmc(c) = \frac{Rml(c)}{l_n} \quad (1.29)$$

där $Rml(c)$ är **materiallängdsfunktionen**, dvs. den sammanlagda längden av de profilsegment som ligger ovanför snittnivån c inom utvärderingslängden.

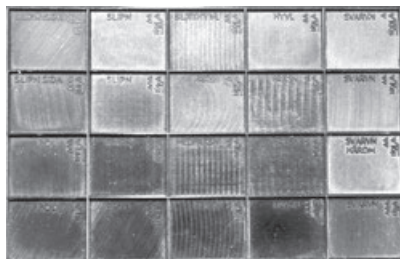
Materialandelskurvan erhåller man genom att variera snittnivån c från den högsta profiltoppen till den djupaste profildalen och beräkna materialandelen för varje nivå. Ett illustrativt exempel på en materialandelskurva visas i figur 1.24. Materialandelskurvan benämns även **Abbott-Firestone-kurva** och utgör grunden för flera funktionsrelaterade ytparametrar, såsom bärighetsparametrarna.



Figur 1.24 Normaliserad ytjämnhetsprofil samt materialandelskurva utvärderad för 12 olika snittnivåer c (streckade horisontella linjer).

1.6.2 Ytjämnhetslikare

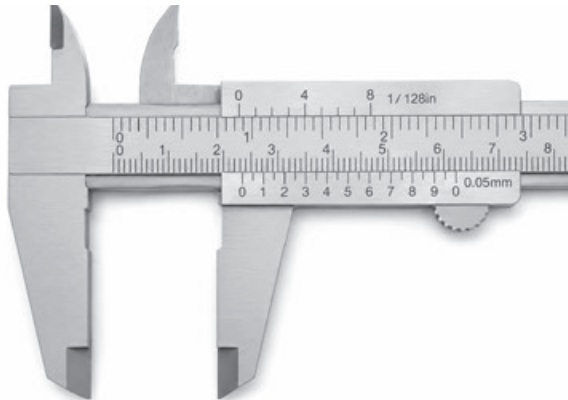
En mycket enkel och snabb metod för att uppskatta en ytas ytjämnhet är att använda en så kallad ytjämnhetslikare, även benämnd ytnormal. Genom att visuellt jämföra, eller genom att med fingerspetsen, lätt beröra, det bearbetade arbetsstycket mot en tillverkad normal kan man få en uppfattning om detaljens ytjämnhet. Metoden ger dock inget kvantitativt ytjämnhetsvärde, utan endast en kvalitativ bedömning. För att jämförelsen ska bli så tillförlitlig som möjligt är det viktigt att bearbetningsmetoden hos normalen överensstämmer med den metod som använts för detaljen. Därför finns ytjämnhetslikare i satser som representerar olika tillverkningsmetoder och ytjämnhetsnivåer. I figur 1.25 visas ett exempel på en enkel ytjämnhetslikare tillverkad i bakelit.



Figur 1.25 Mätspets för linjeprofilmätning.

1.7 Övningsuppgifter

1. Mätdon kan delas in i fasta och visande mätdon. Mätmetoder kan även delas in i direkta och indirekta mätmetoder. Beskriv vad som menas med dessa fyra begrepp och ge gärna ett exempel på varje.
2. Figurerna nedan visar ett skjutmått samt en mikrometer med nonieskala.
 - (a) Vilket är mätresultatet för skjutmåttet och mikrometern?
 - (b) Med vilken noggrannhet kan skjutmåttet och mikrometern avläsas?



3. Vad menas med Abbes komparatorprincip? Ge exempel på mätdon som uppfyller principen.

4. I figur 1.10 visas en mikrokator. Om mätdonet kalibreras (nollställes) mot ett referensobjekt som är 30 mm, hur stora detaljer kan då kontrolleras med hjälp av mätdonet? Ange avmåtten (minimimått samt maximimått) för detaljen.
5. Passbitar tillverkas med olika noggrannhetsgrader. Varför, och i vilka sammanhang används de olika graderna?
6. Passbitar är uppbyggda enligt principen om progressiv tolerans. Vad innebär detta, och vilka fördelar ger det vid uppbyggnad av olika mått?
7. Måttet 99,983 mm ska kombineras av **minsta möjliga antal** passbitar ur C. E. Johanssons stora måttsats M1. Vilka passbitar ska väljas? (Tips: börja med den sista siffran i måttet, siffran 3 i detta fall.)

Antal bitar	Intervall mellan mått (mm)	Mått (mm)
9	0,001	1,001; 1,002; 1,009
49	0,01	1,01; 1,02; 1,49
49	0,5	0,5; 1; 24,5
4	25	25; 50; 75; 100

8. Skissa en haktolk och markera gåsidan respektive stoppsidan.
 - (a) För vilka typer av detaljer eller geometrier används en haktolk?
 - (b) Uppfyller haktolken Taylors princip? Motivera ditt svar.
 - (c) Hur borde tolken vara utformad för att uppfylla Taylors princip?
 - (d) Vilka fördelar respektive nackdelar finns det med att använda en haktolk jämfört med en mikrometer?
9. En detalj med dimensionstoleransen 90F8 (se Bilaga A) ska kontrolleras med en fast gränstolk. Tolken ska före användning kontrolleras med ett mätverktyg som kalibrerats mot passbitar ur C. E. Johanssons måttsats M1.

Skissa hur tolken kan utformas och ange dess vardagliga benämning. Vilka kombinationer av passbitar ska användas för att kontrollera tolken?

Gåsida:

Stoppsida:

10. En detalj med dimensionstoleransen 90f8 (se Bilaga A) ska kontrolleras med en fast gränstolk. Tolken ska före användning kontrolleras med ett mätverktyg som kalibrerats mot passbitar ur C. E. Johanssons måttsats M1.
- Skissa hur tolken kan utformas och ange dess vardagliga benämning. Vilka kombinationer av passbitar ska användas för att kontrollera tolken?
- Gåsida:
- Stoppsida:
11. Vilka miljöfaktorer bör hållas under kontroll vid noggrann längdmätning? Motivera kort varför de är viktiga.
12. I figur 1.18 visas ett liktjockt objekt.
- (a) Vad kännetecknar ett liktjockt objekt?
 - (b) Varför kan ett liktjockt objekt vara svårt att upptäcka med en vanlig tvåpunktsmätning?
 - (c) Ge exempel på en tillverkningsprocess eller ett bearbetningsfel som kan ge upphov till liktjockhet.
13. En stålaxel kontrollmäts med hjälp av ett verkstadsskjutmått som har noggrannhet $\pm 0,05$ mm. Verkstadsskjutmåttet har temperaturen 20 °C och visar 165,50 mm.
- (a) Behöver man kompensera för temperaturskillnaden mellan axeln och skjutmåttet om stålaxeln har en temperatur på 28 °C?
 - (b) Vilken temperatur måste axeln ha för att man ska behöva kompensera för temperaturskillnaden?
14. En stålkomponent med ett hål har tillverkats till 100H6. I detta hål ska en axel monteras. Axeldiametern har tillverkats till måttet 100m6. För att få ihop den hålade komponenten och axeln utan att pressa ihop komponenterna tänker man utnyttja en temperaturskillnad mellan komponenterna. Hur stor behöver denna temperaturskillnad vara för att man ska få in axeln utan presskraft?
15. Ett cylindriskt stålämne med diametern 80 mm och längden 200 mm har precis svarvats och har därför en temperatur på 35 °C. För att säkerställa att måttoleranserna vid den efterföljande slipningen uppfylls måste ämnet först svalna. Ämnet placeras stående på ett

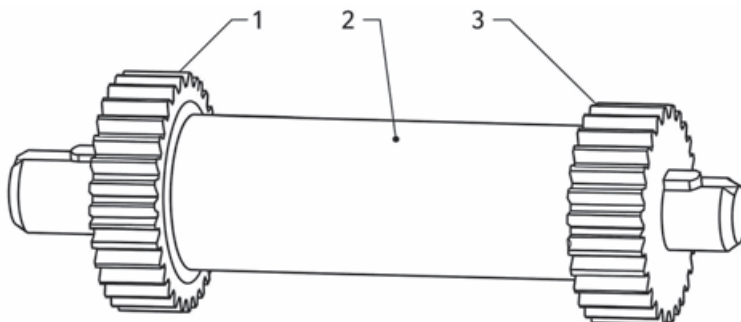
värmeisolerande underlag, så att värmeöverföring endast sker från mantelytan och den övre cirkulära ändytan genom naturlig konvektion. Temperaturen i verkstaden är $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hur lång tid tar det innan stålämnet har svalnat till $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ och kan slipas?

Antag att värmeöverföringen sker genom naturlig konvektion med värmeövergångstalet $\eta = 5\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Stålet har densiteten $7850\text{ kg}/\text{m}^3$ och den specifika värmekapaciteten $460\text{ J}/(\text{kgK})$.

16. En konstruktion består av tre komponenter som monteras samman enligt figur.

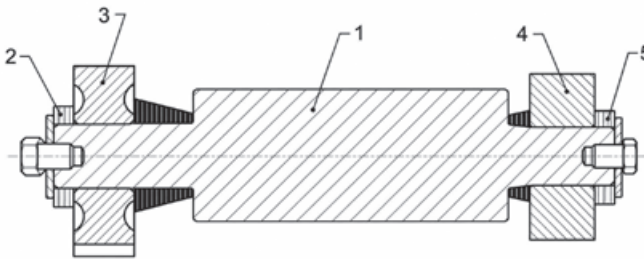
- Detalj 1, stora kugghjulet, har bredden $30^{+0.05}_{-0.15}\text{ mm}$
- Detalj 2, axeln, har längden på mittdelen $180^{+0.05}_{-0.1}\text{ mm}$
- Detalj 3, lilla kugghjulet, har bredden $35^{+0}_{-0.15}\text{ mm}$



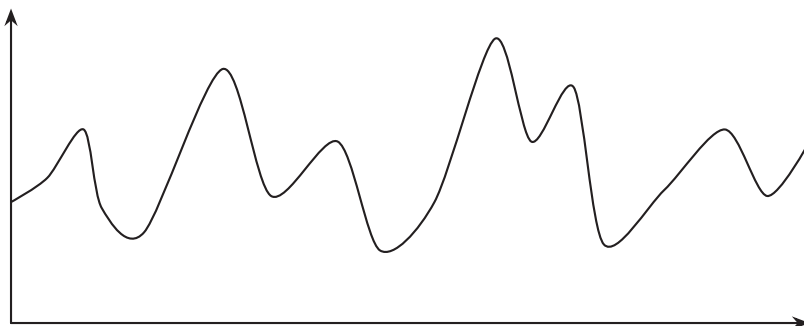
- Mellan vilka mått ligger det sammansatta måttet mellan utsidorna av kugghjulen (Ange basmått, övre och undre avmått)?
- Vilket mått är troligast?

17. En konstruktion har monterats samman enligt figur nedan.

- Hur stort avstånd är det mellan insidorna på kugghjulen? (Ange basmått, övre- och undre avmått)
- Om det antas (för var och en av detaljerna) att utfallet vid tillverkningen är rektangelfördelat inom toleransområdet, vilket medelvärde skulle då avståndet få?
- Inom vilka gränser kan man med 95 % säkerhet tro att medelvärdet ligger?



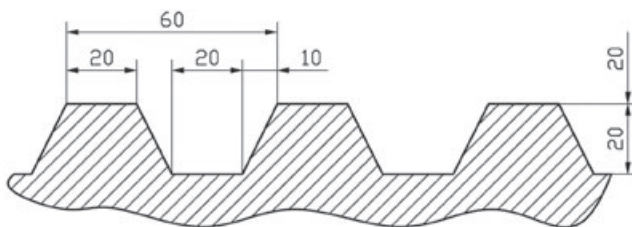
- Detalj 1, axel, totallängd $320^{+0.25}_{-0.15}$ mm
 - Detalj 2, distansbricka, tjocklek $10^{+0.2}_{+0.1}$ mm
 - Detalj 3, stora kugghjulet, tjocklek $30^{+0.05}_{-0.15}$ mm
 - Detalj 4, lilla kugghjulet, tjocklek $35^{+0.0}_{-0.15}$ mm
 - Detalj 5, distansbricka, tjocklek $15^{+0.1}_{+0.0}$ mm
18. Vad menas med begreppen utvärderingslängd och referenslängd vid ytjämnhetsmätning? Hur många referenslängder innehåller en utvärderingslängd som standard?
19. En ytjämnhetsmätning har utförts med ett släpnålsinstrument. Ytjämnhetskurvan för en referenslängd, l_r , syns i figuren nedan. Ett antal definitioner går nu att markera ut. Markera i figuren följande definitioner schematiskt (dvs. inga exakta uträkningar behövs. Markera bara definitionerna så att dessa går att förstå):
- Topp- och bottenlinje
 - Meddellinje
 - R_a - värdet



20. Följande ytjämnhetsprofil har erhållits efter en ytjämnhetsmätning. Måtten är i μm :

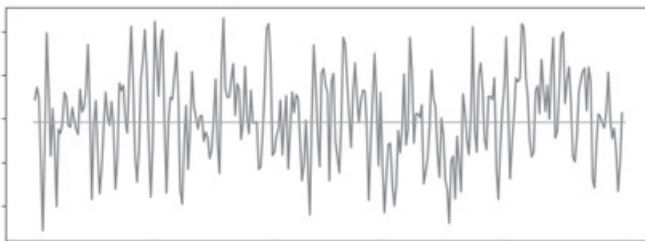
Beräkna:

- var medellinjen ligger positionerad,
- vilket R_t -värde kurvan (profilen) har,
- vilket R_a -värde kurvan (profilen) har,
- vilken bärighet kurvan har utefter medellinjen (R_{mr}).

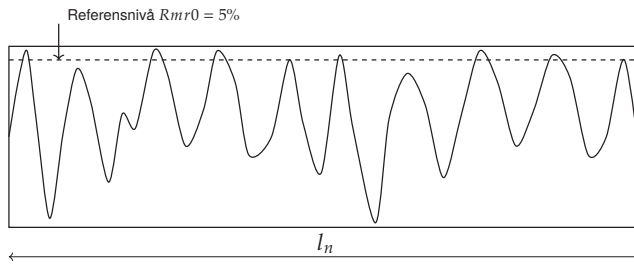


21. Ytjämnheten har mätts på en utvärderingslängd l_n , bestående av fem referenslängder l_r (dela in ytjämnhetskurvan i fem lika stora delar). Använd skalan $2\text{ mm} = 1\text{ }\mu\text{m}$. Markera och ange värdet för:

- R_{zi}
- $R_{z1\text{max}}$ (R_{max})
- R_z
- R_t



22. Beräkna materialandelen R_{mr} (bärigheten) för snittnivåerna: $c = 1; 3$ och 5 mikrometer. Utgå från referensnivån $R_{mr0} = 5\%$. Skala: 5 mm på papperet motsvarar $1\text{ }\mu\text{m}$. Skissa även en Abbot-kurva (materialandelskurva) för ytjämnhetsprofilkurvan och markera $R_{mr}(1)$, $R_{mr}(3)$ och $R_{mr}(5)$.



23. En profilkurvas referenslängd som är uppdelad i 10 stycken delar visas nedan. **Beräkna och räkna ut medellinjen.**

Tips: Rita till en y-axel ett delningsavstånd till vänster om punkten A. Drag sedan normaler mot x-axeln i delningspunkterna. Välj skala och för in x-värdena samt y-värdena (skärningapunkt med profilkurvan) i en tabell. Beräkna sedermera x^2 samt xy och dess summa. Nu kan vi lösa ut a och b från nedanstående ekvationer.

$$n \cdot a + b \cdot \Sigma x - \Sigma y = 0$$

$$a \cdot \Sigma x + b \Sigma x^2 - \Sigma xy = 0$$

n = antal normaler

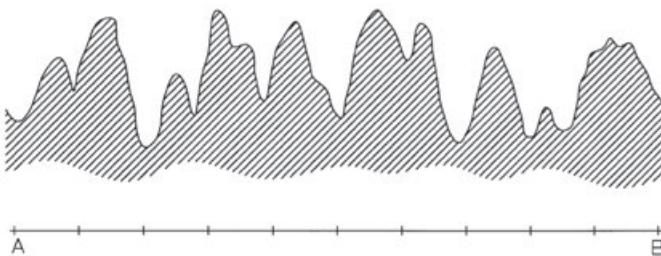
x = abscissan⁹ för normalen

y = ordinatan¹⁰ för normalens skärningspunkt med profilkurvan

a = medellinjens avstånd från x-axeln för $x = 0$

b = tangens för medellinjens vinkel mot x-axeln

Måttet a avläses på y-axeln och medellinjen dras genom den erhållna punkten med vinkeln $b = \tan(\beta)$ mot x-axeln.



⁹x-värdet.

¹⁰y-värdet.

