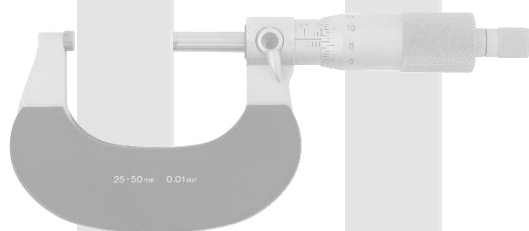


GEOMETRISK MÅLING

UNDERVISNINGSELEMENT

G1

—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK

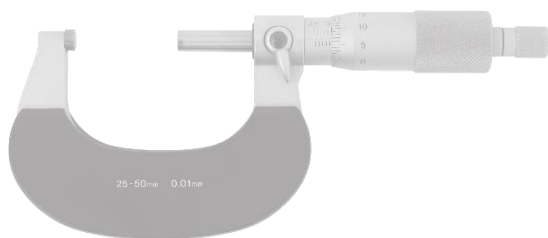


metrologi.dk

GEOMETRISK MÅLING

Sabrina R. Johannsen, DFM A/S Sparring med Morten Røn Andersen FOSS Analytical A/S

1. udgave – Oktober 2017



Copyright © 2017 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug, uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2018. Materiale er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology.

Læs mere om projektet på www.metrologi.dk.

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisnings materialet eller i indholdet på websitet, samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	1	6 Tolerancer på geometriske målinger	22
2 Geometrisk måling i industrien	2	7 Opsummering.....	24
3 Håndholdt måleudstyr	3	8 Ordliste	25
4 Usikkerhedsbudget for måling med håndholdt måleudstyr	14	9 Litteraturliste	27
5 Geometrisk Produktspecifikationer	21	10 Appendix.....	28
		11 Læringsudbytte	29

1 Indledning

Geometri er et område indenfor matematik, som omhandler form og størrelse af figurer. Geometrisk måling drejer sig om beskrivelse og måling af blandt andet form og størrelse af et objekt. Dette objekt kunne f.eks. være at måle diameteren af et hjulaksel.

Geometriske målinger er knyttet til meteren (m) i SI enhedssystemet da det er længder som måles. Ved en geometrisk måling opmåles f.eks. dimensionen eller formen af et objekt. Målingerne benyttes til at beskrive eller forklare et emne til andre.

Det er vigtigt at kende til geometrien af emner da geometrien påvirker emnets egenskab. For eksempel betyder formen, dimensionerne og overfladen af et gear meget for dets funktion. Gærets støj og slidtage er parametre som afhænger af dets dimensioner og overflade.

Geometrisk måling beskæftiger sig med måling af blandt andet

- Dimension (f.eks. længde, diameter, dybde)

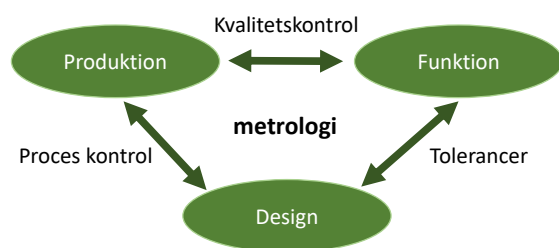
- Form (f.eks. rethed, planhed, rundhed, cylindricitet)
- Lokation (f.eks. position, symmetri, vinkelrethed)
- Overfladebeskaffenhed/overfladetopografi (f.eks. ruhed, defekter, bølgethed, se kompendie G3 – Ruhed)

Indenfor geometrisk måling benyttes både håndholdt måleudstyr, og måleudstyr som styres automatisk via software. Derudover findes også en del kontrolværktøjer som benyttes ved udgangskontrol til enten at kassere eller acceptere et emne. Kontrolværktøjer benyttes således ikke til at opmåle emnet, men udelukkende til at bestemme om emnet overholder en given dimension. F.eks. kan kontrolværktøjer benyttes til at tjekke om et huls størst mulige indskrevne diameter er som ønsket.

I Tabel 1 findes en oversigt over målemetoder og måleudstyr som anvendes til geometrisk måling.

Tabel 1: Eksempler på målemetode og måleudstyr inddelt efter måleteknik og antal dimensioner de kan opmåle.

	Én dimension (1D)	To dimensioner (2D)	Tre dimensioner (3D)
Kontakt	Stållineal, skydelære, mikrometerskrue, måleur	Ruhedsmåler, tast profilometer, rundhedstester	Koordinatmålemaskine, formtester
Optisk	Laser afstandsmåler, laser interferometer	Optisk profilometer	Konfokal mikroskopi, interferometri, fokus variation, optiske skannere
Andre	-	Skanning elektron mikroskopi	CT skannere



Figur 1: Geometrisk måling bygger bro mellem design, produktion og den endelige funktion af et produkt.

I dette kompendie vil det mest anvendte håndholdte måleudstyr indenfor geometri blive introduceret. Det drejer sig om skydelæren, mikrometerskruen, måleuret og kontrolværktøj. Fokus er således på måleudstyr som måler én dimension, og er i kontakt med emnet.

Der vil blive lagt vægt på udstyrets muligheder og begrænsninger. Måleudstyret gennemgås i afsnit 3. Afsnit 4 giver et gennemregnet eksempel på, hvordan man kan opstille et usikkerhedsbudget for en måling foretaget med håndholdt måleudstyr. I afsnit 5 vil de geometriske produktspecifikater (GPS) kort blive behandlet, og i afsnit 6 omtales tolerancer kort. I næste afsnit vil vi starte med at se på geometrisk måling i industrien.

2 Geometrisk måling i industrien

Målinger giver mulighed for at lave analyser af egenskaben af et produkt, og til at kunne optimere designet af produktet. Med geometriske målinger kan man f.eks. undersøge virkningsgraden af prototyper, hvilket kan danne grundlag for om en prototype skal sættes i produktion eller ej. Geometrisk måling danner således grundlaget for de beslutninger som tages i design, produktion og funktionsfaserne.

På Figur 1 ses kæden mellem design, produktion og slutproduktets funktion.

Funktionen af et produkt hænger sammen med det man ønsker produktet skal bruges til. Med andre ord produktets egenskab. En ønsket funktion kan f.eks. være at overfladen har en bestemt æstetisk finish, eller at teflon ringen har den rette diameter så den slutter tæt om en samling af to rør.

Funktionaliteten af et produkt afhænger af

- 1) De geometriske egenskaber (form, dimension osv.)
- 2) Materialeegenskaber (hårdhed, styrke, skørhed osv.)

I produktionen af et produkt udføres kvalitetskontrol på det færdige produkt eller en komponent af produktet, som det fremgår af Figur 1. Kvalitetskontrollen kan bestå af en række geometriske målinger på dimensioner som er kritiske for produktets endelige funktion. Denne kontrol kan resultere i procesoptimering eller produktoptimering hvor produktet sendes tilbage til re-design.

I design-/konstruktionsfasen udformes specifikationerne for produktet, herunder *tolerancer* for de enkelte geometrier. Det kan være tolerancer for størrelsen af huldiametre eller gevind. Tolerancerne angives i form af øvre og nedre tolerancegrænser for f.eks. dimensioner, form og overfladebeskaffenhed. Er disse tolerancer overholdt, forventes det at produktet får den ønskede funktion. Er tolerancerne derimod ikke overholdt vil produktet ikke have den tiltænkte funktion og må kasseres.

Det er vigtigt at produktionen resulterer i at produktet opnår den tiltænkte funktionalitet. Dette verificeres ved hjælp af geometriske målinger. Geometriske målinger er således bindeleddet mellem design, produktion og funktion.

For at sikre at de personer, som er involveret i de tre faser på Figur 1, taler samme tekniske sprog er de *geometriske produktspecifikationer* (GPS) indført. F.eks. er det vigtigt at de er enige om hvordan de *tekniske tegninger* af produktet skal udformes og forstås.

En *teknisk tegning* er et formelt dokument som giver de nødvendige oplysninger der skal til for at kunne



Figur 2: Eksempel på en måling i ét punkt udført med et måleur.

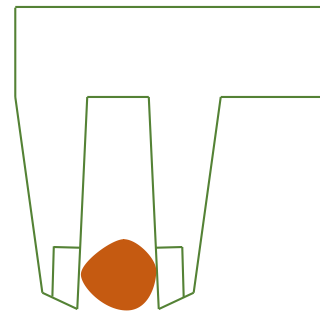
producere det designede emne. Emnet defineres altså på den tekniske tegning.

Tegningen viser produktet med perfekt geometri og uden vinkelfejl. Dog vil produktet i den virkelige verden have geometriske afvigelser og vinkelfejl. De geometriske målinger bruges til at bestemme hvor store disse afvigelse og fejl er. Derved kan man fastslå om produktet kan overholde de opstillede tolerancer.

Ved verifikation af et produkt eller en komponent skal man indtænke både tekniske og økonomiske betragtninger. Det er vigtigt at overveje hvor stor en måleusikkerhed som kan accepteres på målingen, og hvor dyr målingen er at udføre. Man skal også overveje hvor dyrt emnet er, og hvad konsekvensen af at acceptere emnet er, hvis det ikke lever op til forventningerne. Alle disse ting skal holdes op imod hinanden i verificeringsprocessen.

3 Håndholdt måleudstyr

Som omtalt i indledningen vil dette afsnit behandle skydelære, mikrometerskrue, måleur og fast kontrolværktøj.



Figur 3: Skydelære måler toppunkts-diameter af cylinder idet kæbernes flader har kontakt med de to højeste punkter på cylinderen.

Målinger udført med sådant måleudstyr er baseret på måling i enkelte punkter. Det vil sige at man f.eks. måler afstanden fra ét kontaktpunkt til ét andet.

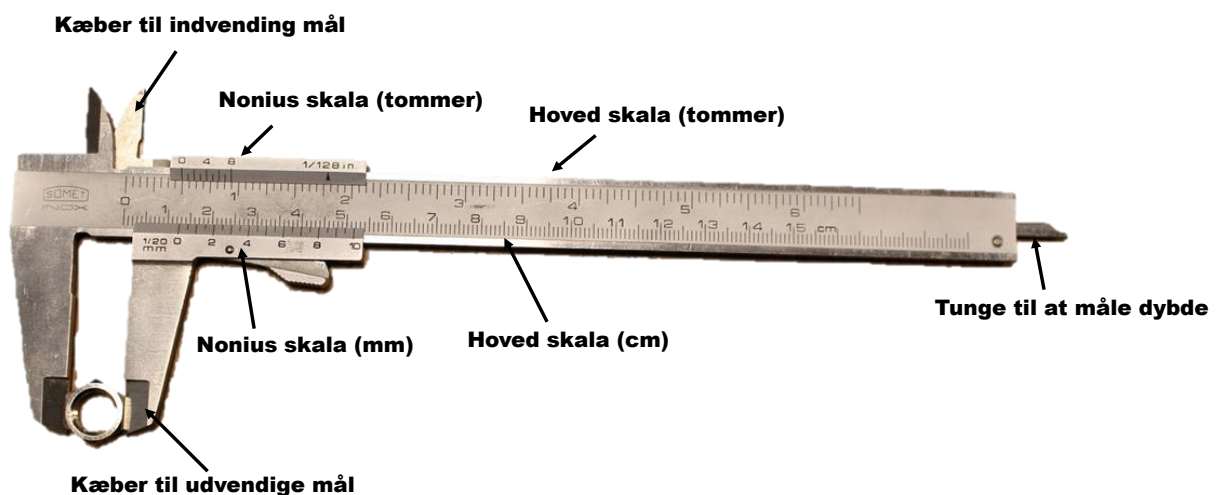
På Figur 2 ses et eksempel på en måling med et måleur, hvor højden af cylinder måles i ét kontaktpunkt. Men hvis cylinderens overflade ikke er helt plan vil man måle forskellige højder når måleuret sættes til at måle på forskellige positioner på cylinderen. Det er derfor vigtigt at være opmærksom på dette når man foretager måling med skydelære, mikrometerskruer eller måleure.

I den følgende vil måleprincippet for en skydelære, mikrometerskrue, måleur og fast kontrolværktøj gennemgås. Derudover vil muligheder og begrænsninger i brugen af udstyret blive diskuteret, og ikke mindst hvordan udstyret skal kalibreres. For at sikre pålidelige målinger er det vigtigt at kende sit måleudstyr godt.

Det er ligeledes en god vane at kende til hvilke standarder der beskæftiger sig med brugen af udstyret. Disse standarder kan f.eks. beskrive den korrekte brug af udstyret eller hvilke fejlkilder man skal være opmærksom på ved brug. Derfor er nogle udvalgte standarder nævnt for hvert måleudstyr.

3.1 Skydelære

I det følgende afsnit beskrives måleprincip, muligheder og begrænsninger samt kalibrering af skydelærer.



Figur 5: Skydelære med forklaring af de enkelte dele. Bemærk at skydelæren har to skalaer med forskellig måleenhed. Henholdsvis tommer og millimeter.

3.1.1 Måleprincip

En skydelære benyttes til at måle længder ved hjælp af kontaktpunkter. Det betyder at hvis man f.eks. skal måle diameteren af en cylinder vil man måle en lokal toppunkts-diameter. De to målepunkter som skydelæren har kontakt med vil være de højeste punkter på cylinderen, se Figur 3.

Kontakten mellem emnet og skydelæren foregår ved skydelærens *kæber*, se Figur 4. Skydelæren har to sæt kæber. Det ene benyttes til at tage udvendige mål. F.eks. ydre diameter af en cylinder. Det andet sæt benyttes til at måle indvendige mål. F.eks. indre diameter af en hul cylinder. Desuden har skydelæren en

tunge for enden, som løber i en fure, der kan benyttes til at måle dybder.

Skydelæren har en lineal hvor en skyder kan bevæge sig langs linealen. Afstanden mellem kæberne aflæses dels på hoved skalaen og på skyderens skala, som kaldes for *nonius*.

På Figur 5 ses hvordan man aflæser de to skalaer på en skydelære. Den analoge skydelære benyttes dog stort set ikke i dag. I stedet benyttes de digitale skydelærer, som viser afstanden mellem kæberne på et digitalt display.



Opløsning 0,05 mm

1) Hovedskala-aflæsning 12,00 mm

2) Nonuisskala-aflæsning 0,65 mm

Skydelære-aflæsning 12,65 mm

Figur 4: Aflæsning af skalaerne på en skydelære.

3.1.2 Muligheder og begrænsninger ved skydelæren

Skydelæren benyttes ofte som en hurtig kontrol af kritiske dimensioner på et emne. Skydelæren er gode til at måle indre og ydre diameter af rør og ringe. Dog skal man altid være opmærksom på at diameteren kun måles i to punkter, hvilket giver en mindre nøjagtighed i forhold til at måle den i flere punkter.

Opløsningen for en skydelære, som udtrykker den mindste ændring som kan aflæses på en skydelære, fås ned til 1 μm for digitale skydelærer, 0,02 mm for

skydelærer med ur, og 0,05 mm for analoge skydelærer. En skydelære er derfor mere nøjagtig til længdemålinger end en stållineal. En stållineal har en opløsning på 1 mm. Dog er det ikke muligt at måle lange emner med en skydelære da en skydelæres måleområde typisk er på 0-150 mm.

Man skal være opmærksom på at selvom skydelærens opløsning er helt ned til 1 μm , kan man ikke forvente at skydelæren nødvendigvis vil måle et emne med denne præcision.



Figur 7: Måleklodssæt.

Boks 1: Abbes princip

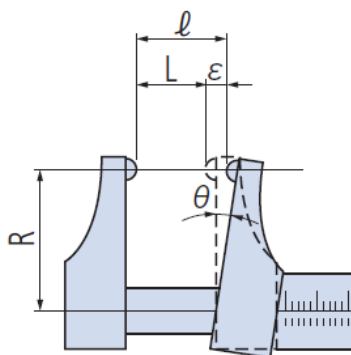
Abbes princip lyder som følger:

”Maksimal nøjagtighed opnås når reference skalaen og måleemnets akse flugter”

Dette er tilfældet når man måler med en mikrometer-skrue, hvor skalaen er på linje med der hvor der er kontakt med måleemnet. Skydelæren overholder dog ikke Abbes princip. Her er måleskalaen placeret under kontaktpunkterne på måleemnet. Hvis der er en lille vinkel momentum, altså en lille variation i vinklen θ , vil det give en forskydning som ikke fremgår af måleskalaen. På Figur 6 ses at en lille variation i vinklen θ gør at længden L bliver en smule større. Fejlen på grund af at Abbes princip ikke er overholdt bliver således

$$\varepsilon = \ell - L$$

Vinklen θ kan opstå på grund af fejl i spindel-ret-heden, fejl i spindelføringen eller variation i den påførte kraft under måling [4].



Figur 6: Illustration af Abbes princip på en skydelære. Figur lånt fra Mitutoyo materiale [4].

Derudover er det vigtigt at bemærke at nøjagtigheden af målinger foretaget med en skydelære i høj grad afhænger af hvordan skydelæren benyttes. Man skal især være opmærksom på at følgende faktorer kan resultere i fejlagtige målinger:

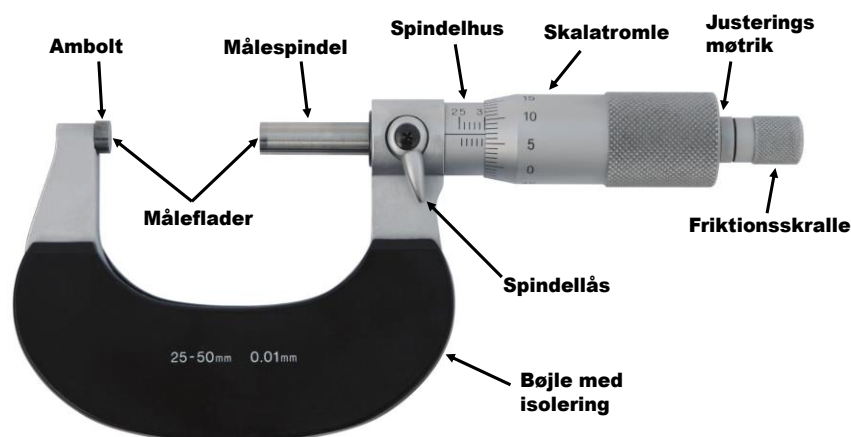
- De to flader man opmåler ikke er helt parallelle. Se boks 1.
- Den målekraft man påfører emnet ikke er jævn og varierer fra måling til måling. Dette skal man især være opmærksom på når man måler ved spidsen eller bunden af kæberne.
- Temperaturforskel mellem skydelære og emne kan medføre forskelle i den termisk udvidelse. Specielt hvis emnet som opmåles er af andet materiale end rustfrit stål. Skydelærer er nemlig lavet af rustfrit stål.

Før brug af en skydelære at det vigtigt at tjekke at der ikke er nulpunktsfejl. Det kan kontrolleres ved at lukke kæberne og tjekke at nonius skalaen (eller displayet) viser nul. Tjek desuden at skyderen går jævnt uden slør.

3.1.3 Kalibrering af en skydelære

Længdemåleudstyr kalibreres ved at lade udstyret måle på en reference med kendt geometri. Referencemålingen skal foretages under samme målemiljø og procedure som målingen på det ukendte emne.

Referencen som benyttes til at kalibrere skydelærer er måleklodser. Måleklodserne sikrer sporbarhed til



Figur 8: Mikrometerskrue med forklaring af de enkelte dele.

meteren hvis de er kalibreret på et akkrediteret laboratorium. Måleklodser er lavet af enten stål, hårdmetal eller keramik, så man sikrer at de er slidstærke.

Måleklodser fås i sæt med forskellig længde, se Figur 7. Til en kalibrering vælges den måleklods vis længde kommer tættest på længden af det ukendte emne. Derved kendes kalibreringsfaktoren i det givne længdeområde. Kalibreringsfaktoren gennemgås i kompendiet "A1 – introduktion til målinger" [1].

I stedet for kun at benytte én måleklods, kan man vælge at opmåle flere klodser af forskellig længde. Derved vil skydelæren være kalibreret over et større måleområde. Fordelen ved en sådan flerpunktskalibrering er at det muliggør at kan måle på emner med flere dimensioner sporbart. Dette er dog under antagelse af at der er en lineær sammenhæng mellem de målte længder af klodserne og deres nominelle længder.

Måleklodser benyttes også til at kalibrere dybdemåleren (tungen), mens måleringe/kontrolringe kan benyttes til at kontrollere de indvendige kæber.

3.1.4 Relevante ISO standarder

Følgende ISO standarder omhandler brug af skydelære ISO 13385-1 og ISO 13385-2.

3.2 Mikrometerskrue

I dette afsnit vil måleprincip, muligheder og begrænsninger samt kalibrering af mikrometerskruer blive beskrevet.

3.2.1 Måleprincip

Mikrometerskruen eller blot mikrometer benyttes til at måle længder via to måleflader. Måleudstyret består af en metalbøjle hvor der i den ene ende er en *målespindel*, som kan bevæge sig med en meget præcis stigning i et præcisionslebet gevind, se Figur 8. I den anden ende er en *ambolt*, som ikke er bevægelig. Målespindlen og ambolten udgør de to måleflader.

Metalbøjlen er tyk og tung og ofte lavet af stål med en lav termisk udvidelseskoefficient. Dette er for at undgå en betydelig opvarmning af mikrometerskruen når den holdes i hånden. Metalbøjlen kan være isoleret for at mindske opvarmning.

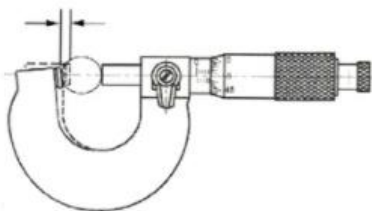
Måleemnet placeres mellem de to måleflader, hvorefter tromlen drejes indtil der er let kontakt med emnet fra både målespindel og ambolt. *Friktionsskrallen* (moment) benyttes så til at sikre at den samme målekraft påtrykkes hver gang. Nogle friktionsskraller angiver at den rette kraft er opnået ved en klik-lyd, eller

Boks 2: Hookes lov

Hookes lov lyder som følger:

”Størrelsen af den kraft som påtrykkes en fjeder bestemmer hvor meget fjederen sammenpresses”

Det betyder at ændringen i fjederen er proportional med den påtrykte kraft. Den metalbue, som er en del af en mikrometerskrue, opfører sig faktisk som en fjeder. Når der er kontakt mellem måleemnet og ambolt og målspindel, så påføres en kraft på måleemnet og kontaktpunkterne på mikrometerskruen. Denne kraft giver anledning til en fjeder-lignende opførsel, se Figur 9. Ved at benytte en konstant påtrykt målekraft sikres det at den samme fjeder opførsel fås, hvilket sikrer reproduktibiliteten. Til at sikre en konstant målekraft benyttes friktionsskrallen på mikrometerskruen.

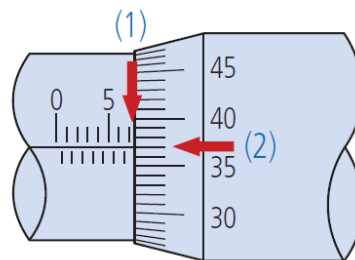


Figur 9: Illustration af fjeder-lignende opførsel af metalbue ved kraftpåvirkning mellem måleemne og kontaktpunkter på mikrometerskrue. Kilde: <https://www.mahr.com/en-in/Services/Production-metrology/Know-how/Gaging-Tips/Basics-of-Measurement-Gaging-Tips/?ContentID=18996&Overview=0>

en øget friktion i skruen. Vigtigheden af en konstant påtrykt kraft uddybes i boks 2.

Skalaerne på spindelhuset og skalatromlen bevæger sig i forhold til hinanden når der drejes på tromlen. Ligesom på skydelæren aflæses måleværdien således på to skalaer, se Figur 10.

Nulpunktsfejl på mikrometerskruen kan justeres ved at benytte justeringsmøtrikken som drejer hele spindelhuset. Slør i målspindel kan minimeres med efterspændingsmøtrikken. Efterspændingsmøtrikken kommer til synes når skalatromlen skrues helt tilbage. Ofte medfølger der specialværktøj fra producenten som skal benyttes til efterspændingen.



Opløsning 0,01 mm

1) Hovedskala-aflæsning	7 mm
2) Nonuisskala-aflæsning	0,37 mm
Mikrometerskrue-aflæsning	7,37 mm

Figur 10: Aflæsning af skalaen på en mikrometerskrue. Figur lånt fra Mitutoyo materiale [4].

Ambolten og målspindelens ender kan udskiftes med specialiserede hoveder som kan benyttes til bestemte måleopgaver. Det kan f.eks. være i form af et hoved til måling af perioden i et gevind, eller pladehoveder til at måle diameter inde i smalle riller. For eksempler se referencerne [2, 3].

Der findes mikrometerskrue til måling af udvendige-, indvendige- og dybdemål [3]. Aflæsning på en indvendig mikrometerskrue fungerer på samme måde som for en udvendig mikrometerskrue (Figur 10).

3.2.2 Muligheder og begrænsninger ved mikrometerskruen

Mikrometerskrue har en opløsning på typisk 0,01 mm. De fås med måleintervaller af størrelsen 25 mm, f.eks. i et måleområde på 0 – 25 mm eller 50 – 75 mm. Måleområdet kan gå op til 2000 mm. For digitale mikrometerskrue er opløsningen nede på 0,001 mm. Mikrometerskrue har således en bedre opløsning end skydelæren. Men en mikrometerskrue er sværere at håndtere, og det kræver lidt mere øvelse at få gode og pålidelige målinger.

Hvis mikrometerskruen benyttes til at måle, f.eks. diameteren af en kugle, vil målefladerne berøre kuglen i ét punkt på hver side. Det medfører, at den påførte

kraft på emnet vil være meget stor i disse punkter. En tilsvarende måling på en rektangulær klods, vil ikke påføres en tilsvarende stor kraft fra målefladerne, da kontaktområdet består af hele flader, og ikke kun ét punkt. Forskellen i påført kraft gør at emnerne deformeres en smule forskelligt, hvilket man skal være opmærksom på hvis man ønsker at udfører præcise målinger med en mikrometerskrue.

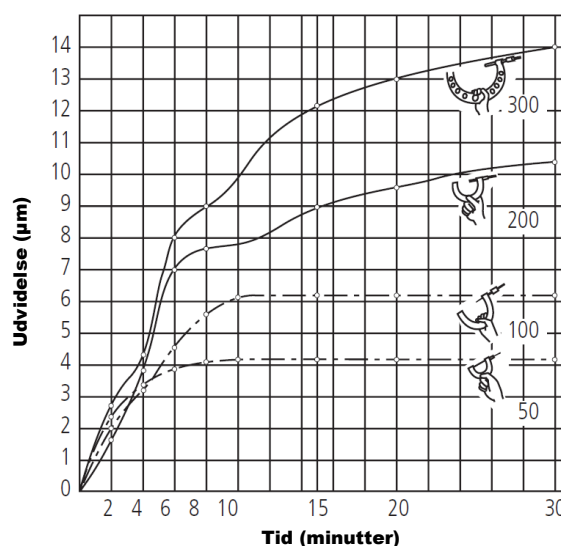
Før en måling er det vigtigt at tjekke at mikrometerskruen bevæger sig jævnt og uden slør. Derudover bør man sikre sig at 0 på skalatromle står overfor 0 på spindelhuset når mikrometerskruen er skruet sammen ved brug af friktionsskrallen.

Ved måling holdes metalbuen med den ene hånd mens man kan justere tromlen med den anden. Dog skal man være opmærksom på at man ved håndtering af mikrometerskruen opvarmer buen, hvilket resulterer i udvidelse af buen og derved målefejl. Dette fremgår af Figur 11 hvor det ses at jo længere tid buen holdes i hænderne jo mere udvides buen. Efter kun få minutter ses allerede en udvidelse på nogle mikrometer. Det er derfor vigtigt at minimere kontakttiden med buen. Opvarmning kan også mindskes ved brug af bomuldshandsker, isolerende materiale omkring buen eller at benytte et stativ.

Det fremgår desuden af Figur 11 at størrelsen af mikrometerskruen også afgør hvor følsom den er overfor opvarmning.

Ved benyttelse af et stativ til ophæng af mikrometerskruen, skal man dog være opmærksom på at ophængningsmetoden, orientering af mikrometerskruen og antallet af støttepunkter påvirker måleværdien. Det er derfor vigtigt at benytte samme ophængning hvis måleværdier skal kunne sammenlignes.

Efter måling er det vigtigt at øge gabet mellem målespindel og ambolt, så måleemnet kan tages ud uden at ridse målefladerne. Hvis målefladerne ridses kan det medføre nulpunktsfejl eller at planheden og paralleliteten mellem de to måleflader beskadiges. Et beskidt eller støvet emne kan også være årsag til at målefladerne ridses.



Figur 11: Mikrometer buens termiske udvidelse på grund af varmeoverførsel fra hænder til buen over tid. Udvidelsen vil resultere i målefejl. Figur lånt fra Mitutoyo materiale [4].

3.2.3 Kalibrering af en mikrometerskrue

Før kalibrering skal mikrometerskruens målespindel og ambolt renses med linsepapir eller andet ikke-fnuggende papir. Hvis der er olie rester på målefladerne kan alkohol påføres linsepapiret. Målefladerne renses ved at lukke målespindlen til 0, og lade linsepapiret glide mellem ambolt og målespindel.

For at sikre pålidelige målinger med en mikrometerskrue skal den kalibreres jævnligt. Før kalibreringen er det vigtigt at kontrollere ambolten og målespindlens parallelitet og planhed.

Planhed

Planheden af ambolten og målespindlen kan kontrolleres ved at benytte et *planglas*. Et *planglas* er en tyk glasplade hvor mindst én af siderne er slebet til en

meget høj grad af planhed (ned til $0,1 \mu\text{m}$ planhed), se Figur 12 (a).

dem på Figur 13 (a), det skyldes at dagslys indeholder forskellige farver (forskellige bølgelængder).

(a)



(b)



Figur 12: (a) Planglas. (b) Planparallelglas holdes mellem ambolt og målespindel på mikrometerskrue.

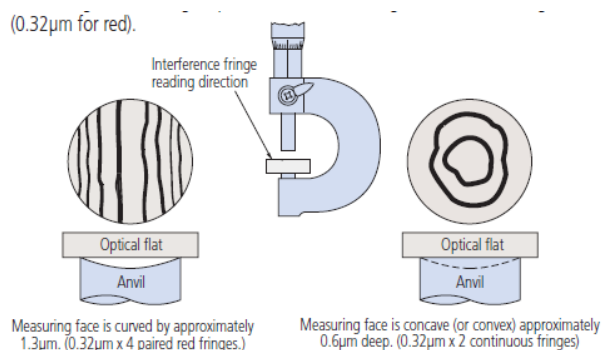
Hvis man ønsker at måle planheden af amboltens holdes planglasset imod amboltens blanke metal måleflade, se Figur 12 (b). Man vil derved observere at der opstår et mønster af striber, se Figur 13 (a). Striberne opstår på grund af det lys som kastes tilbage fra både amboltens måleflade og undersiden af planglasset. Det tilbagekastede lys interfererer. *Interferens* opstår når to lysstråler påvirker hinanden. De to lysstråler kan enten forstærke hinanden eller svække hinanden. Derfor ses interferensen som mørke og lyse striber.

Det observerede interferensmønster fortæller noget om formen af amboltens måleflade. Hvis målefladen er plan vil striberne være rette og parallelle og have samme indbyrdes afstand. Er målefladen ikke plan vil der ses bøjninger på striberne. På Figur 13 (b) ses et eksempel på en bøjet ambolt. Det ses ved at stribernes indbyrdes afstand mindskes tættere på kanten af amboltens. På samme figur ses at en konkav eller konvex flade vil ses som ringe.

Hvis lyset der falder på kontaktfladen mellem ambolt og planglas er dagslys vil man få farvede striber som

Parallelitet

Paralleliteten mellem de to måleflader på ambolt og målespindel kan kontrolleres ved at bruge et *planparallelglas*. Et planparallelglas er som navnet antyder



Figur 13: (a) Lysstriber på amboltens overflade på grund af interferens. Forskellige farver fremkommer fordi det indkomne lys er hvidt. (b) Eksempler på interferens striber som fortæller om formen af amboltens flade. Figur lånt fra Mitutoyo materiale [4].



Figur 14: Planparallelglas af forskellig tykkelse til kontrol af mikrometerskrues parallelitet.

både plant og de to flader af glasset er parallelle. Ofte fås planparallelglas i sæt med glas af forskellige tykkelse, det muliggør at man kan tjekke paralleliteten ved hver $\frac{1}{4}$ rotation af målespindlen. Se Figur 14. Planparallelglas kan også benyttes til at kontrollere planheden.

Planparallelglasset vrides på amboltens måleflade, hvorefter målespindlen spændes til der er kontakt. Friktionsskrallen benyttes for at sikre den rette målekraft.

Når hvidt lys falder på målefladerne ses røde striber. Ved at tælle antallet af røde striber først på ambolten og dernæst på målespindlen, kan paralleliteten bestemmes som forskellen mellem antallet af røde striber. Hver rød stribe angiver en højdeforskel på $0,32 \mu\text{m}$. Så hvis der som på Figur 13 (a) er fire røde striber vil det svare til at planet hælder med $4 \cdot 0,32 \mu\text{m} = 1,3 \mu\text{m}$.

Spindelfejl

For at kontrollere om der er fejl i målespindelens bevægelse benyttes måleklodser. Fejl i målespindelen vil betyde at den måleværdi som aflæses på mikrometerskruen ikke er korrekt. Det er derfor vigtigt at bestemme denne spindelfejl.

Der findes forskellige sæt af måleklodser med varierende måleområde, så man kan vælge det sæt som passer med mikrometerskruens måleområde.

Det vigtigt at mikrometerskruen kalibreres i skæve længder, således så der ikke kun måles ved samme tromlerotation. Spindelfejlen skal kontrolleres i forskellige rotationspunkter. Der findes specielle måleklodssæt som kan benyttes til kalibrering af mikrometerskrue.

Før kalibrering af en mikrometerskrue med måleklodserne er det vigtigt at mikrometerskrue og måleklodser efterlades i samme lokale for at deres temperatur kan stabilisere sig og være nogenlunde ens. Stabilisering af temperaturen kan tage flere timer.

3.2.4 Relevante ISO standarder

Følgende ISO standarder omhandler opbygningen af en udvendig mikrometerskrue ISO 3611. Dog findes der ikke i ISO standarden beskrevet mulige fejlkilder og krav for brug af en mikrometerskrue. I stedet er dette beskrevet i den tyske standard DIN 863.

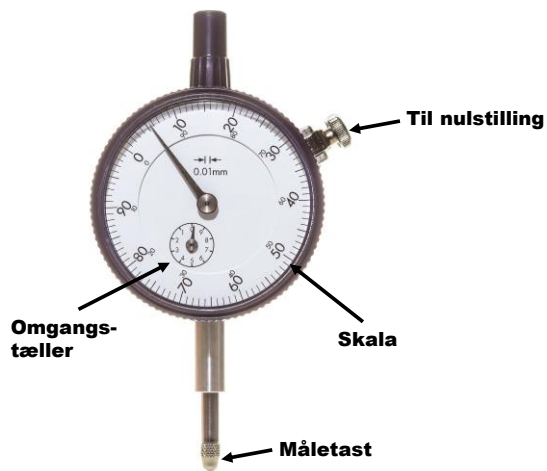
3.3 Måleur

I afsnittet beskrives måleprincip, muligheder og begrænsninger og kalibrering af måleure.

3.3.1 Måleprincip

Et måleur benyttes oftest i en orientering hvor dens måletast peger nedad, se Figur 15. Måletasten føres i kontakt med måleemnet ved at dette placeres under måletasten. Måletastens bevægelse overføres ved hjælp af en fjeder til en skala, hvorfra måleværdien kan aflæses. For at sikre stabilitet under måling skal måleuret monteres i et stativ. Derudover minimere en granitplade effekter fra vibrationer, som kan påvirke måletasten, se Figur 16.

Et måleur kan benyttes sammen med en normal med en kendt længde. Oftest vil denne normal være en måleklods. Måleuret kan så nulstilles på måleklodsen, hvorefter måleemnet placeres under måletasten. Udlæsningen på måleurets skala viser så forskellen mellem længden af måleklods og måleemne.



Figur 15: Måleur med betegnelser.

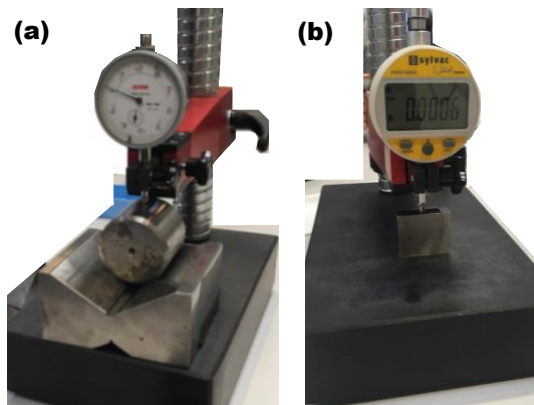
Måleuret kan også benyttes til direkte at måle længden af emner uden sammenligning med en normal. Hvis måleuret benyttes på denne måde er det vigtigt at man sikre sig at tasten står vinkelret på emnet. Hvis tasten ikke er vinkelret på emnet vil det resultere i målefejl.

Der findes både analoge og digitale måleure. De analoge måleure nulstilles ved at en låse-skrue løsnes. Derefter kan selve skala-skiven drejes til den ønskede position, og låse-skruen fastspændes igen. De digitale nulstilles ved at trykke på en knap.

3.3.2 Muligheder og begrænsninger ved måleuret

Et måleur er et hurtigt værktøj til at bestemme om en ring eller cylinders form er rund, eller om der er formfejl. Dette gøres ved at måletasten sænkes til kontakt med den runde overflade, hvorefter emnet drejes en hel omgang, se Figur 16 (a). Det maksimale udsving på måleurets skala afspejler afvigelsen fra rundhed.

Bestemmelse af rundhed med en skydelære og mikrometerskrue kan give problemer, idet man ved måling



Figur 16: Måleur monteret på stativ og på granitblok. (a) analog måleur måler formafvigelse på solid cylinder. (b) digital måleur måler nulstilles ved hjælp af en måleklods.

af en konstant diameter ikke nødvendigvis vil opdage formafvigelser.

I forhold til skydelærer har nogle måleure en bedre opløsning idet de fås med en opløsning på $0,5 \mu\text{m}$. Dog fås der også måleure med en tilsvarende opløsning som digitale skydelærer på $0,01 \text{ mm}$.

Måleure fås med forskellige måleområder, som kan gå helt op til 80 mm .

Ved opmåling af et emnes dimension med måleur, skal man være opmærksom på, at dimensionen måles relativ til det plan som emnet står på. Det vil sige emnet måles relativ til den granitblok den er placeret på. Det er således vigtigt at granitblokken er plan.

En begrænsning ved et måleur er, at det ikke er muligt at afgøre om et emne er plan. Hvis det emne man måler på ikke er helt plan vil man ikke opdage det ved måling et måleur. Man kunne derfor fejlagtigt tro at længden af emnet var forkert, men i virkeligheden skyldes det at emner ikke er plan. Man skal derfor være opmærksom på om det opmålte emne har plane flader inden måleuret benyttes til opmåling.

3.3.3 Kalibrering af et måleur



Figur 17: Forskellige kontrolværktøj, såsom glatte dorne, gevinddorne, gevindring og indstillingsringe. Foto: Kyocera-unimerco. Gengivet med tilladelse.

Måleuret kalibreres altid før brug idet det er forskelle eller afvigelser der måles. Til kalibreringen benyttes en måleklods som har en længde tæt på dimensionen af det ukendte emne. Det ukendte emnes dimension skal derfor først bestemmes med en skydelære eller mikrometerskrue, inden måleuret kan benyttes.

3.3.4 Relevante ISO standarder

Standarden ISO 463 omhandler mekaniske måleure.

3.4 Fast kontrolværktøj

En hurtig og enkel verifikation af, om kritiske dimensioner på emner overholder angivne specifikationer kan foretages med *kontrol- og toleranceværktøj*. Denne type værktøj er designet til kun at verificere om et emnes karakteristika er indenfor eller udenfor de opstillede tolerancegrænser/specifikationsgrænser.

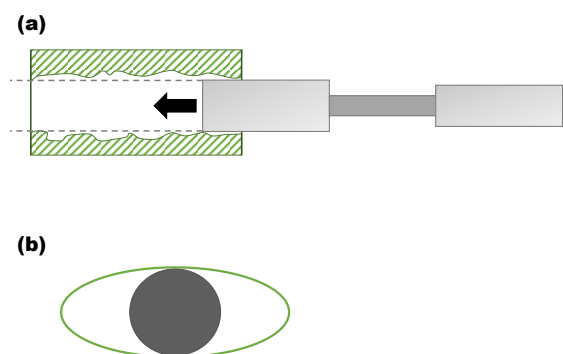
Kontrolværktøj har én geometrisk dimension som kan benyttes til at afgøre om en karakteristisk dimension på et emne er i overensstemmelse med specifikationen.

Kontrolværktøjer kan være glatte dorne, kontrolgrafler, gevinddorne eller gevindringe, se Figur 17. Kontrolværktøjer kan f.eks. eftergive dimensionstolerancer eller gevindtolerancer. Kontrolværktøjer fås

således i en variation af størrelsen så man kan finde den rette størrelse til den pågældende specifikation.

På Figur 18 (a) ses en illustration af verifikation af en hulstørrelse ved brug af en glat dorn. Nogle dorne er udformet som dobbeltdorne, hvilket vil sige at den har en godside og en fejlside. Godsidens er fremstillet så den har tolerancens mindste mål. Hvis godsidens kan passere igennem uhindret accepteres emnet. Fejlsiden har tolerancens maksimale mål, hvis fejlsiden kan passere igennem kasseres emnet.

Kontrolværktøj siger ikke noget om et emnes form. F.eks. vil man ikke kunne fastlægge om en cylinders tværsnit er rund eller oval. På Figur 18 (b) ses tværsnittet af en cylinder. Cylinderens form er mere oval end rund, men dette kan ikke afgøres med dornen. Som det fremgår, vil dornen kun fortælle noget om den størst mulige indskrevne diameter for en perfekt cirkel. Hvis cylinderen skulle benyttes til vand transport, er form en afgørende parameter i forhold til volumen og hastighed af det vand som transporteres i cylinderen. I tilfældet på figuren, kunne det resultere i at cylinderen accepteres idet dornen passer, men på grund af den ovale form ville volumen være større end ventet og man vil få et helt andet vand flow.



Figur 18: (a) Tolerance verifikation af et hul med en glat dorn. I dette tilfælde accepteres emnet. (b)

3.5 Vedligehold af håndholdt måleudstyr

Lige så vigtigt som det er, at benytte måleudstyr korrekt, er det at sikre et ordentlig vedligehold af udstyret.

ret. Hvis måleudstyr ikke kalibreres regelmæssigt eller håndteres ordentligt kan det give upålidelige og fejlbehæftede målinger. Nedenfor er beskrevet nogle generelle retningslinjer for behandling og vedligehold af håndholdt måleudstyr.

Generelt skal man undgå ukorrekt påvirkning fra hårde objekter, eller at tabe udstyret på gulvet. Det kan medføre at udstyret bliver skævt.

Måleudstyret skal renses for støv og skidt med en tør blød klud eller linsepapir. Husk at rense indersiden af kæberne på en skydelære, og målefladerne på mikrometerskruen. Dette kan f.eks. gøres ved at lade kæberne gribe om et stykke rent linsepapir. Fjern desuden olie eller vand rester fra udstyret for at undgå rust. Dernæst kan man påføre anti-korrosions olie.

Ved opbevaring af håndholdt måleudstyr undgås høje temperaturer, lave temperaturer og høj luftfugtighed.

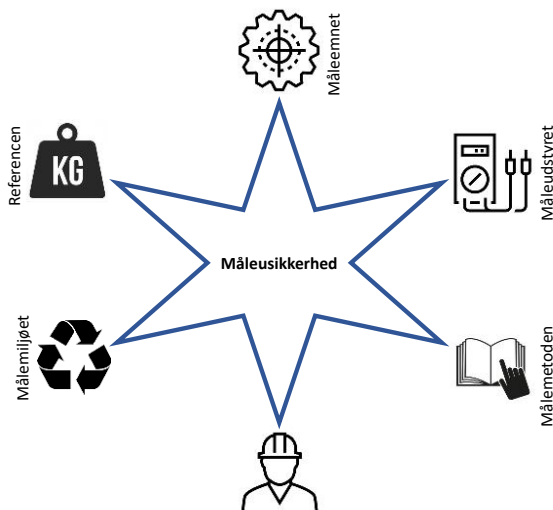
Efterlad ikke en skydelære eller mikrometerskrue med helt lukkede kæber under opbevaring.

4 Usikkerhedsbudget for måling med håndholdt måleudstyr

I dette afsnit vil vi se på et eksempel på et usikkerhedsbudget for måling med en skydelære. Dette gøres ved at tage udgangspunkt i måleteknikkens sekstakkede stjerne.

De største kilder til måleusikkerhed på geometrisk måling er (1) temperaturpåvirkning idet materialer ændre volumen ved temperaturændringer, samt (2) kraftpåvirkning ved målingen, som kan ændre formen.

Der er dog også andre kilder til usikkerhed som man skal tage i betragtning når et usikkerhedsbudget udarbejdes. Til at identificere de andre kilder kan man benytte måleteknikkens sekstakkede stjerne, Figur 19 (se kompendiet "A1 – Introduktion til målinger" [1]).



Figur 19: Måleteknikkens sekstakkede stjerne, hvor de seks væsentligste kilder til måleusikkerhed fremgår.

4.1 Usikkerhedsbudget for en skydelære

I det følgende eksempel vil vi opstille et usikkerhedsbudget for måling af diameteren af en plastikring med en skydelære. Eksemplet er venligst udlånt fra kilde [4]. Til at vurdere kilderne til måleusikkerhed anvendes måleteknikkens femtakkede stjerne.

Tabel 2: Resultater fra måling af diameteren af en plastikring med en skydelære. Kun de første syv målinger vises her, de resterende kan findes i appendix.

Måling nr.	Diameter (mm)
1	46,59
2	46,56
3	46,55
4	46,54
5	46,59
6	46,58
7	46,56
...	...
Middelværdi	46,561

Diameteren af ringen måles 25 gange med en skydelære på forskellige positioner rundt på ringen. Resultaterne fremgår af Tabel 2. Den *nominelle* diameter er 46,6 mm. Den nominelle diameter er den pålydende diameter. I dette tilfælde er det den diameter som fremgår af specifikationerne fra leverandøren.

Der vurderes at være følgende kilder til måleusikkerhed på målingen:

4.1.1 Reference

Inden måling af ringen kalibreres skydelæren med en måleklods med en længde på 50 mm, idet denne længde ligger tæt på den nominelle diameter af ringen. En klasse 02 måleklods med et kalibreringscertifikat fra et akkrediteret laboratorium benyttes. Kalibreringscertifikatet viser at måleklodsens længde afviger med $\pm 0,8 \mu\text{m}$ fra den nominelle længde på 50 mm. Det betyder at måleklodsens har en længde i området fra

49,9992 til 50,0008 mm. Dette er en type B usikkerhed, idet vi ikke kan behandle den med statistiske metoder. Fordelingen på en type B usikkerhed er som regel ikke kendt.

Vi vælger at benytte en rektangulær fordeling til at bestemme måleusikkerheden, se Figur 20 (b). Usikkerheden fra referencen er så givet ved

Ligning 1:

$$u_{\text{ref}} = \frac{|a_1 - a_2|}{2\sqrt{3}} = \frac{0,8 \mu\text{m} - (-0,8 \mu\text{m})}{2\sqrt{3}} = 0,46 \mu\text{m}$$

De lodrette streger (hårde parentes) betyder at man altid skal tage den numeriske værdi. Det betyder at talværdien altid har et positivt fortegn, også selvom resultatet af udregningen måske givet et tal med et negativt fortegn, så ændres dette til et positivt.

4.1.2 Målemiljø

Som tidligere nævnt er temperaturen en kilde til usikkerhed i geometriske målinger da materiale udvider eller trækker sig sammen når der sker ændringer i temperaturen. Så for at sikre præcise længdemålinger har man i ISO 1 derfor defineret en *standard reference temperatur* på 20 °C (293 K)¹. Hvis man foretager sine målinger ved standard reference temperaturen, så muliggør det at man kan sammenligne målinger.

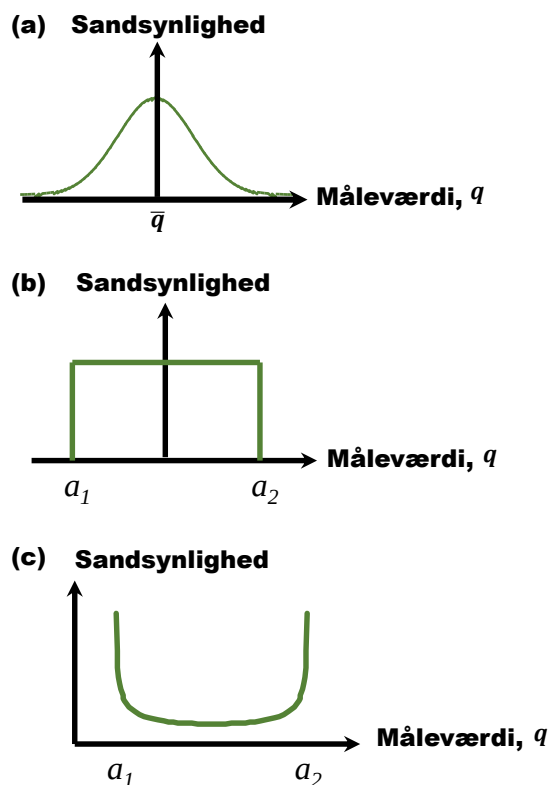
Det følgende lægger sig op ad den *tekniske standard ISO/TR 16015* som omhandler de fejl der kan komme af termisk indflydelse på længdemåling.

I dette eksempel udføres målingerne ved 25 °C. Idet temperaturen er 5 °C varmere end standard reference temperaturen vil der være en termisk udvidelse af materialerne, se Figur 21.

Forskellen i termisk udvidelse mellem skydelære og ring vil give anledning til en *systematisk fejl* [5]. Afhængig af hvor stor fejlen er, kan man vælge at kompensere for den. Dog skal man altid have omkostninger med i overvejelserne når man beslutter om der skal kompenseres eller ej. For at kunne foretage denne beslutning på et velovervejet grundlag, udregnes hvor meget forskellen i termisk udvidelse betyder for måling af diameteren.

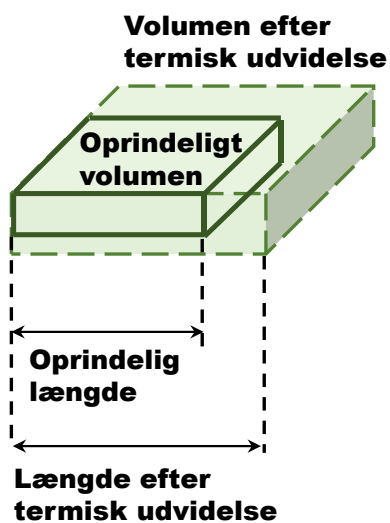
Kompensation for temperatur

For at kompensere for den termiske volumenændring skal man kende den *termiske udvidelseskoefficient*, α for ringen og skydelæren. Den termiske udvidelseskoefficient fortæller hvor meget materialets længde ændrer sig pr. ændring i temperatur.



Figur 20: Sandsynlighedsfordeling for (a) en normalfordeling, (b) en rektangulær fordeling og (c) en u-formet fordeling.

¹ Selvom SI-enheden for temperatur er kelvin (K), så benyttes enheden Celcius grader (°C) i de ISO standarder som omhandler geometriske produkt specifikationer (GPS).



Figur 21: Illustration af termisk udvidelse i tre dimensioner (LxBxD) på grund af en temperaturstigning.

Hvis emnet og skydelæren er lavet af samme materiale behøver man ikke kompensere for temperaturudvidelsen. Det er fordi skydelæren udvider sig præcis lige så meget som det man måler på.

I dette tilfælde oplyser producenten at det rustfri stål, som skydelæren består af, udvider sig med $11 \mu\text{m}$ pr. $^{\circ}\text{C}$ over en længde på 1 m. Endvidere vides, fra leverandøren af plastikringen, at den plasttype som ringen består af udvider sig med $99 \mu\text{m}$ pr. $^{\circ}\text{C}$ over en længde på 1 m.

Den længdeændring som temperaturforskellen på 5°C er årsag til kan beregnes ud fra følgende formel

Ligning 2:

$$\Delta_{\text{Forskel}} = \Delta_{\text{Ring}} - \Delta_{\text{Skydelære}}$$

Hvor

Ligning 3:

$$\Delta_n = \alpha \cdot L \cdot (T - 20^{\circ}\text{C})$$

Hvor α er den termiske udvidelseskoefficient, L er længden og T temperaturen som der måles ved. Ud fra de to ligninger kan det ses, at hvis α for ringen og skydelæren var nogenlunde ens, ville fejlen på den målte længde være ubetydelig.

De kendte værdier fra vores eksempel indsættes og følgende udvidelser fås

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{skydelære}} &= 11 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{m} \cdot \left(\frac{46,6}{1000}\right) \text{m} \cdot (25^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) \\ &= 2,56 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{Ring}} &= 99 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{m} \cdot \left(\frac{46,6}{1000}\right) \text{m} \cdot (25^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) \\ &= 23,07 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Forskellen i udvidelse er så

$$\Delta_{\text{Forskel}} = 23,07 \mu\text{m} - 2,56 \mu\text{m} = 20,50 \mu\text{m}$$

På en diameter på $46,6 \text{ mm}$ udgør fejlen fra forskel i termisk udvidelse således $0,05\%$. Om fejlen skal kompenseres eller ej afhænger af de krav der er til præcisionen af ringens diameter. I det følgende eksempel vil vi kompensere for den termiske forskel idet materialerne er så forskellige.

En stor del af de emner som opmåles med håndholdt måleudstyr vil være af lignende materiale som måleudstyret. Det betyder at emnerne og måleudstyret har lignende termisk udvidelseskoefficient, og derved en lille forskel i termisk udvidelse.

Derfor vil mange virksomheder, som arbejder med tolerancer på $1/10$ af en mm eller på små emner, ikke tage højde for forskellen i termisk udvidelse mellem emne og måleudstyr [5]. Fejlen på målingen er så lille i disse tilfælde så virksomhederne stadig får gode og pålidelige målinger som kan benyttes til verificering. Omkostningerne ved at kompensere for temperaturen enten ved at foretage beregningerne i Ligning 2 og Ligning 3, eller måle i et temperaturkontrolleret lokale ved 20°C , er for store i forhold til de tolerancer virksomheden behøver.

Men bliver (1) tolerancerne mindre, (2) emnerne større, eller (3) afviger materialet af emnet fra måleudstyret, vil denne fejl bliver tilsvarende større, og der skal kompenseres for den.

Måleusikkerhed fra temperatur

Målingerne foretages i et temperaturstyret lokale hvor temperaturen holdes på 25 ± 4 °C. Denne usikkerhed på temperaturen kan ikke behandles med statistiske metoder (type B).

For at estimere usikkerheden beregnes den termiske udvidelse en temperaturforskel på ± 4 °C vil give anledning til. Derved findes den maksimale udvidelse vi kan forvente.

Da emnet og skydelæren har forskellige termiske udvidelseskoefficienter benyttes forskellen

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \alpha(\text{ring}) - \alpha(\text{skydelære}) \\ &= (99 - 11) \mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m} = 88 \mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}\end{aligned}$$

En lidt omskrevet Ligning 3 benyttes til at finde den termiske udvidelse

Ligning 4:

$$\Delta_{\text{temp}} = \Delta\alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

Hvor ΔT er temperaturforskellen på ± 4 °C.

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{temp}} &= 88 \mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m} \cdot \left(\frac{46,6}{1000}\right) \text{m} \cdot (\pm 4 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ &= \pm 16,40 \mu\text{m}\end{aligned}$$

Vi ved at temperaturen kan variere fra 21 til 29 °C, så det vil være passende at benyttes en rektangulær fordeling til at bestemme måleusikkerheden, se Figur 20 (b). Usikkerheden for en rektangulær fordeling beregnes ved brug af Ligning 1

$$\begin{aligned}u_{\text{temp}} &= \frac{|a_1 - a_2|}{2\sqrt{3}} = \frac{16,40 \mu\text{m} - (-16,40 \mu\text{m})}{2\sqrt{3}} \\ &= 9,47 \mu\text{m}\end{aligned}$$

4.1.3 Operatør

Operatøren er en erfaren bruger af skydelærer, og måler diameteren af ringen med stor omhyggelighed. Operatøren er opmærksom på at påføre en så lille kraft som muligt ved måling på ringen for ikke at deformere den, se boks 3. Dog kan det ikke undgås at operatøren påfører en lille kraft på ringen således så

dens form deformeres en smule. Det resulterer i en målbar forskel i den målte diameter, og derved til en måleusikkerhed.

Boks 3: Hertz' formel

Hertz udviklede formler der bestemmer hvor meget materialer deformeres når de påføres en kraft i et kontaktpunkt. F.eks. når skydelærens kæber påfører en målekraft på et måleemne ved kontakt.

Hvordan formlerne ser ud, afhænger af formen af emnerne som deformeres. Der er f.eks. forskel på hvordan en kugleskal eller en cylinder deformeres. Derudover afhænger størrelsen af deformationen af hvilket materiale der er tale om. Plast vil typisk deformeres mere end stål. Derfor er deformationen ofte lille når man arbejder med stål, mens effekten bør overvejes når man måler på plastemner.

Kraften som skydelæren påfører ringen måles med et dynamometer som kan benyttes til kraftmåling. Den påførte kraft måles til $F = 10$ N. Hvor N er enheden for kraft kaldet newton, $(\text{m}\cdot\text{kg})/\text{s}^2$. Målingen af kraftpåvirkningen gentages, og herfra vides at kraften som påtrykkes variere med ± 3 N.

Kompensation for påført kraft

Den påførte kraft på ringen er i gennemsnit 10 N. Denne påvirkning resulterer i en systematisk fejl på den målte diameter. Den systematiske fejl kan korrigeres ved at beregne hvor meget ringens diameter deformeres ved en kraftpåvirkning på 10 N.

Ved blandt andet kendskab til plastmaterialets modstand overfor deformation og ring diameteren, kan man beregne hvor stor en deformation af diameteren man kan forvente for hver enhed påtrykt N. I dette tilfælde findes følgende værdi

Ligning 5:

$$\delta_{\text{kraft}} = F \cdot 4,25 \mu\text{m}/\text{N}$$

Hvor F er benævnelsen for kraft, og δ er den lille deformation som kommer på grund af kraftpåvirkningen.

Ved at indsætte $F = 10 \text{ N}$, fås

$$\delta_{\text{kraft}} = 10 \text{ N} \cdot 4,25 \text{ } \mu\text{m}/\text{N} = 42,5 \text{ } \mu\text{m}$$

Kraftpåvirkningen fra skydelæren resulterer således i en deformation af ringen på $42,5 \text{ } \mu\text{m}$.

Måleusikkerhed fra påført kraft

Kraftpåvirkningen fra operatøren varierer med $10 \pm 3 \text{ N}$, dog er fordelingen af den påtrykte kraft ikke normalfordelt som i Figur 20 (a). Vi kan således ikke behandle denne kilde til måleusikkerhed med statistiske metoder, og derfor betegnes den som en type B måleusikkerhed. Vi vil behandle usikkerheden som rektangulær fordelt, med følgende grænser

$$\delta^+ = 3 \text{ N} \cdot 4,25 \text{ } \mu\text{m}/\text{N} = 12,75 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\delta^- = -3 \text{ N} \cdot 4,25 \text{ } \mu\text{m}/\text{N} = -12,75 \text{ } \mu\text{m}$$

$$u_{\text{kraft}} = \frac{|\delta^+ - \delta^-|}{2\sqrt{3}} = \frac{12,75 \text{ } \mu\text{m} - (-12,75 \text{ } \mu\text{m})}{2\sqrt{3}} = 7,36 \text{ } \mu\text{m}$$

4.1.4 Målemetode

Operatøren vælger at holde både skydelære og ring i hænderne under målingerne. Desuden bærer han ingen bomuldshandsker. Denne målemetode medfører at operatørens varme hænder opvarmer skydelære og plastikring. Da varmes ledes forskelligt i skydelære og plastring medfører det, at der er en forskel i temperatur mellem skydelære og ring på $6 \text{ }^\circ\text{C}$. Dette resulterer i en lille forskel i deres termiske udvidelse/sammentrækning.

Det vides ikke om det er skydelæren eller ringen som har den højeste temperatur. Derfor er det svært at forudsige hvordan objekterne vil ændre sig i forhold til hinanden. For at estimere ændringen benyttes en gennemsnitlig termisk udvidelseskoefficient for ring og skydelære. Den findes nedenfor

$$\begin{aligned}\alpha(\text{middel}) &= \frac{\alpha(\text{ring}) + \alpha(\text{skydelære})}{2} \\ &= \frac{99 \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m} + 11 \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}}{2} \\ &= 55 \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

Derved er den gennemsnitlige termiske udvidelseskoefficient $\alpha(\text{middel})$ fundet. Således kan vi beregne ændringen på grund af temperaturforskellen (Ligning 4 bruges)

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{temp}} &= \alpha \cdot L \cdot \Delta T = 55 \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m} \cdot \left(\frac{46,6}{1000}\right) \text{ m} \cdot (\pm 6^\circ\text{C}) \\ &= \pm 15,38 \text{ } \mu\text{m}\end{aligned}$$

Temperaturforskellen er enten på $+6 \text{ }^\circ\text{C}$ eller $-6 \text{ }^\circ\text{C}$, afhængig af om man ser forskellen i forhold til den varme eller kolde af de to objekter. Sandsynligheden for at temperaturforskellen er i ydergrænserne ($\pm 6 \text{ }^\circ\text{C}$) er større end at den findes i midten. Til at beskrive en sådan fordeling benyttes en U-formet fordeling, se Figur 20 (c).

Usikkerheden for en U-formet fordeling er

$$u_{\text{temp forskel}} = \frac{|a_2 - a_1|}{2\sqrt{2}} = \frac{|-15,38 \text{ } \mu\text{m} - 15,38 \text{ } \mu\text{m}|}{2\sqrt{2}} = 10,88 \text{ } \mu\text{m}$$

4.1.5 Måleemne

Ringens vil ikke være perfekt rund. Afvigelsen fra at være perfekt rund kaldes for *formfejl*. Der vil således forekomme formfejl i ringens *rundhed*. Rundhed er et mål for variationen i radius ved forskellige positioner langs ringen, se Figur 22.

Ringens diameter måles ved forskellige positioner rundt på ringet. Det betyder at formfejlen vil være indeholdt i den spredning som vil forekomme i de målte diametre. Angivet i 1. række i Tabel 3.

4.1.6 Måleudstyr

En digital skydelære benyttes til målingerne. Skydelærens opløsning er på $0,01 \text{ mm}$ og dens *Maximum*

Permissible Error er på $\pm(15 + L/50 \text{ mm})\mu\text{m}$. Maximum permissible Error (MPE) er den maksimale målefejl som tillades for et måleudstyr eller en måling. MPE angives nogle gange som en konstant del A , og som en del B der afhænger af målelængden, L

$$\text{MPE} = \pm(A + L/B)$$

Hvor L har enheden mm og MPE kommer ud i μm . Det ses af udtrykket, at MPE bliver større når længden L bliver større.

MPE for et måleudstyr kan normalt findes i kataloger fra producenten af det pågældende måleudstyr.

I dette eksempel er længden vi skal måle på $\sim 47 \text{ mm}$. Så MPE er

$$\begin{aligned}\text{MPE} &= \pm \left(15 + \frac{L}{50 \text{ mm}} \right) \mu\text{m} = \pm \left(15 + \frac{47 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} \right) \mu\text{m} \\ &= \pm 15,94 \mu\text{m}\end{aligned}$$

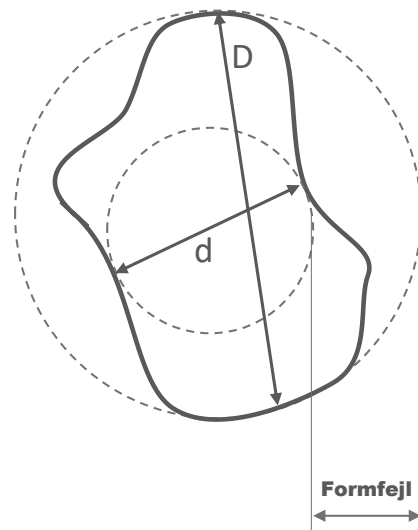
MPE angiver den maksimale målefejl der kan forventes. Den faktiske målefejl kan lægge i intervallet fra $-15,94 \mu\text{m}$ til $+15,94 \mu\text{m}$. Derfor anvendes en rektangulært fordeling med grænserne $\pm 15,94 \mu\text{m}$,

$$u_{\text{MPE}} = \frac{15,94 \mu\text{m} - (-15,94 \mu\text{m})}{2\sqrt{3}} = 9,20 \mu\text{m}$$

4.1.7 Usikkerhedsbudgettet

Alle kilderne til usikkerhed samles nu i usikkerhedsbudgettet, se Tabel 3. Bemærk at alle værdierne er indsat i enheden mm. De enkelte søjler i usikkerhedsbudgettet har følgende betydning:

1. søjle er en beskrivelse af kilden til usikkerhed.
2. søjle viser den pågældende sandsynlighedsfordeling.
3. søjle viser måleværdien (1. række diameteren, og 3. og 4. række korrektionen på grund af henholdsvis måling ved anden temperatur end standard reference temperaturen, og den påførte kraft fra skydelæren).
4. søjle viser den beregnede usikkerhed for hver kilde.



Figur 22: Påvirkning fra formfejl på den lokale diameter på en ring. D angiver maksimum diameter og d angiver minimum diameter.

5. søjle fortæller hvor meget den enkelte kilde bidrager til usikkerheden på outputstørrelsen (diameteren).

Ud over de kilder som er diskuteret foroven, er også indført usikkerheden fra repetérbarheden for målingen. Den fremgår af 1. række. Den er beregnet ved at bestemme standardafvigelsen, og dernæst standardusikkerheden idet målingerne er normalfordelt. En gennemgang af dette kan læses i A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter. Repetérbarheden indeholder i dette tilfælde også måleusikkerheden fra formfejlen.

Det endelige resultat for den korrigerede diameter af ringen er således

$$D = 46,54 \pm 0,04 \text{ mm}$$

Det fremgår af usikkerhedsbudgettet at den største kilde til usikkerhed kommer fra temperaturstyringen (miljø), den påførte kraft under målingen (operatør) og temperaturforskellen mellem emne og skydelære (målemetode). Så ud fra usikkerhedsbudgettet kan vi se at hvis man kunne mindske temperaturforskellen mellem ring og skydelære ville man kunne mindske usikkerheden. Det kunne måske opnås ved at benytte

bomuldshandsker, så man minimerer opvarmningen på grund af berøring.

4.2 Usikkerhedsbudget for en mikrometerskrue

Et usikkerhedsbudget for en mikrometerskrue kan opbygges på en tilsvarende måde som for skydelæren ved at benytte måleteknikkens femtaktede stjerne.

Opgave: Prøv selv at opstille et usikkerhedsbudget for måling af diameteren af en cylinder med en mikrometerskrue. Nogle af de kilder til usikkerhed som er beskrevet for skydelæren, kan også benyttes i mikrometerskruens usikkerhedsbudget. Men derudover vil der også være nye kilder til usikkerhed, f.eks. paralleliteten mellem ambolt og målespindel. Overvej også om måleværdien skal korrigeres på grund af disse kilder.

Tabel 3: Usikkerhedsbudget for måling af diameteren af en plastring med en skydelære. Bemærk at alle værdier er angivet i mm. Usikkerhedsbudget template fra metrologi.dk er benyttet.

metrologi.dk Usikkerhedsbudget

Felter med blå skrift udfyldes af brugeren

Diameter af plastring

i	Målestørrelse (enhed)	Fordeling	x_i	$u(x_i)$	$u_i(y)$
1	Diameter af ring (mm)	Normal	46.561	0.00418	0.00418
2	Reference - måleklods, u(ref) (mm)	Rectangular	0	0.00046	0.00046
3	Miljø - målt ved 25 °C, u(temp) (mm)	Rectangular	0.0205	0.00947	0.00947
4	Operator - påført kraft, u(kraft) (mm)	Rectangular	-0.0425	0.00736	0.00736
5	Målemetode- Temp.forskel, u(temp forskel) (mm)	U-shaped	0	0.01088	0.01088
6	Måleudstyr - MPE, u(MPE) (mm)	Rectangular	0	0.0092	0.0092
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
y	Kompenseret diameter af ring (mm)	Normal	46.539	0.0190932	

DFM-GUM ver. 2.2a

Conf. level =	95.45%	k =	2.0000
Result =	46.539	U =	0.038

Model: $Y = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6$

5 Geometrisk Produktspecifikationer

I dette afsnit gives en kort introduktion til tanken bag de geometriske produktspecifikationer (GPS). For en mere dybdegående introduktion til GPS henvises til anden litteratur [6, 7].

Som omtalt tidligere afhænger et emnes funktionelle egenskab af dets geometriske udformning og materialet. GPS beskæftiger sig med de geometriske karakteristika af et emne. Ideen er at ved at angive GPS specifikationer på en teknisk tegning vil man kunne styre emnets funktion. Designeren/konstruktøren kan således ved at benytte GPS-sproget udtrykke krav til emnets geometri. Derved kan konstruktøren sikre at emnet får den funktion som det er tiltænkt.

De angivne GPS-specifikationer på en tegning fortæller ikke noget om hvilken metode der skal benyttes til

at fremstille geometrien. GPS opstiller udelukkende krav til det færdige emne. Det er ikke fremstillingsmetoden som definerer emnets resulterende funktion.

For at holde styr på alle standarderne indenfor GPS indsættes de i en såkaldt *GPS matrix* bestående af rækker og kolonner. Mere herom i næste afsnit.

5.1 GPS matrixmodel

ISO 14638 beskriver GPS matrixsystemet eller *matrixmodellen*. Matrixmodellen består af en matrix af rækker og kolonner, se Tabel 4.

Der er ni rækker som hver betegner én *geometrisk egenskabskategori*. En geometrisk egenskabskategori indeholder alle ISO standarder som relaterer til den bestemte geometriske egenskab, f.eks. størrelse eller form.

Tabel 4: ISO GPS standardernes matrixmodel. Kædeleddene (A til G) er angivet med den engelske betegnelse i parentes og en forklarende tekst på dansk.

	Kædeled (chain links)						
	A	B	C	D	E	F	G
	Definerer symboler og brug af disse til tegningsangivelse (Symbols and indications)	Teoretisk definition af tolerancer og karakteristika (Feature requirements)	Definerer tolerancer og karakteristika på det virkelige emne (Feature properties)	Definerer krav til sammenligning mellem specifikation og verifikation (Conformance and non-conformance)	Målte værdier af karakteristika for virkelige emne (Measurement)	Definerer krav til måleudstyr benyttet til målingen (Measurement equipment)	Definerer krav for kalibrering af måleudstyr (Calibration)
Størrelse						•	
Afstand							
Form							
Orientation							
Lokation							
Kast							
Overfladebeskaffenhed: Profil							
Overfladebeskaffenhed: Areal							
Overfladeufuldkommenhed							

Kolonnerne A til G betegner kæder af standarder, og hver kolonne beskrives som et *kædeled*.

De enkelte standarder indføres i matrixmodellen under den geometriske egenskab de tilhører og under det kædeled de tilhører. En standard som omhandler krav til måleudstyr som benyttes til at måle egenskaben størrelse vil være placeret i kolonne F og række "Størrelse" som angivet på Tabel 4 med en fyldt cirkel. Dog kan en standard sagtens omhandle flere egenskaber eller høre ind under flere kædeled. En standards placering i GPS matrixmodellen er angivet i bilaget til den pågældende standard.

Som det ses af Tabel 4 omhandler kædeled A til C de specifikationer som defineres af designeren/konstruktøren. Mens kædeled E til G omhandler verifikationen af det producerede emne (målingen). Kædeled D omhandler regler for bestemmelse af overensstemmelse eller ikke-overensstemmelse mellem specifikationer og verifikation.

Kædeleddene skal sikre at der er sporbarhed hele vejen fra design til produktion til verifikation af produktet. Hvis hver kædeled indeholder de nødvendige oplysninger, sikres en utvetydig og fuldstændig specifikation, således så man har bevis for at slutproduktet opfylder specifikationen.

Alle standarderne indenfor GPS er grupperet i enten fundamentale standarder, generelle standarder og komplementære standarder.

Fundamentale standarder definerer de grundlæggende regler og principper som benyttes inden for alle geometriske egenskabskategorier og kædeled.

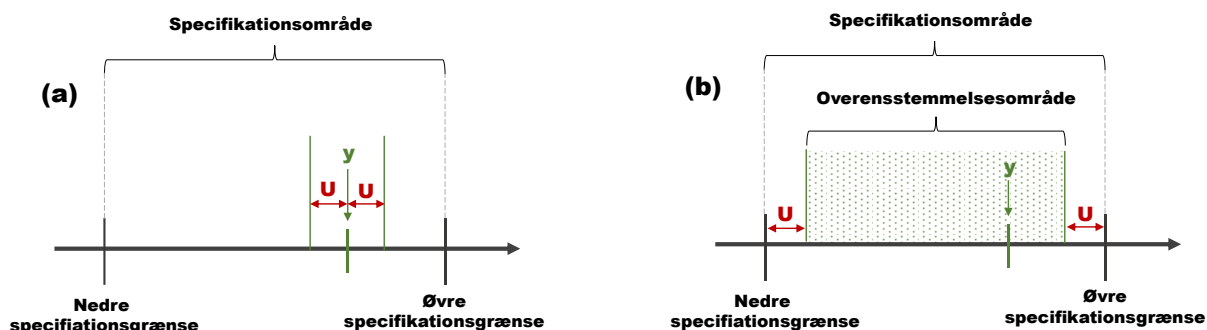
Generelle standarder gælder for en eller flere geometriske egenskabskategorier, og en eller flere kædeled.

Komplementære standarder omhandler specifikke produktionsprocesser eller specifikke maskindele.

Der er en del standarder i GPS matrixmodellen som beskæftiger sig med tolerancer. I næste afsnit behandles tolerancer på geometriske målinger kort.

6 Tolerancer på geometriske målinger

Konstruktøren specificerer dimensioner og tolerancer for en komponent således at den får den ønskede funktion. Geometrisk måling har så til formål at fastlægge om dimensionen af den producerede komponent ligger indenfor tolerancen.



Figur 23: ISO 14253-1 regler for overensstemmelse mellem specifikation og måleværdien y . (a) Måleværdien y og dens ekspanderede måleusikkerhed U ligger indenfor specifikationsområdet. (b) Måleresultat y ligger indenfor specifikationsområdet, som er reduceret med den ekspanderede usikkerhed U på begge sider. Det reducerede område kaldes overensstemmelsesområdet.

Der er adskillige ISO GPS standarder som beskæftiger sig med opstilling og definition af tolerancer på emners karakteristika. De er gennemgået i stor grundighed i reference [6], og derfor vil vi ikke beskæftige os yderligere med tolerancer i dette kompendie.

Dog skal det bemærkes at den såkaldte *gyldne tommelfingerregel* som angiver at måleudstyr skal have en opløsning som er 1/10 bedre end den tolerance den skal verificere, er blevet erstattet med ISO 14253-1. Denne standard siger, at ved verifikation af om en kritisk dimension er i overensstemmelse med specifikationen, skal der tages højde for den estimerede måleusikkerhed. På Figur 23 ses reglerne for at vise at der er overensstemmelse med en specifikation.

På Figur 23 (a) fremgår det at måleværdien og dens ekspanderede usikkerhed ligger indenfor specifikationsområdet. Derved er der overensstemmelse.

På Figur 23 (b) ses at den ekspanderede usikkerhed er tilføjet ved begge specifikationsgrænser, således så området med overensstemmelse er reduceret. Som det ses ligger måleværdien indenfor dette overensstemmelsesområde, og derved er der overensstemmelse.

Hvis man i stedet skal vise at der ikke er overensstemmelse mellem specifikation og emnet, kan det gøres på følgende måder:

- a) Både måleværdien og dens ekspanderede usikkerhed skal ligge udenfor specifikationsområdet.
- b) Den ekspanderede måleusikkerhed tilføjes på ydersiden af grænserne, så området med overensstemmelse udvides. Hvis måleværdien så ligger udenfor det udvidede specifikationsområde vil der ikke være overensstemmelse.

7 Opsummering

Geometrisk måling er bindeleddet mellem design, produktion og funktion. Geometrisk måling benyttes til at verificere om der er overensstemmelse mellem de specifikationer som konstruktøren har udformet og det producerede emne. Er der overensstemmelse er produktets funktion sikret og emnet kan sælges.

I dette kompendie er skydelæren, mikrometerskruen, måleuret og faste kontrolværktøjer beskrevet. Disse måleudstyr benyttes alle til én-dimensionale målinger. For at sikre at måleudstyret bliver ved med at levere pålidelige målinger er det uhyre vigtigt at vedligeholde udstyret korrekt, og ikke mindst at kalibrere det jævnligt. Derudover er det betydeligt at kende til de begrænsninger og muligheder som det enkelte udstyr har.

Sprog, koncept og principper indenfor geometrisk måling er fastlagt i de geometriske produktspecifikationer. Det sikrer en klar og utvetydig kommunikation fra design til produktion. En del af denne kommunikation omfatter definering af tolerancer som sikre funktionaliteten af produktet eller komponenten.

8 Ordliste

Begreb	Forklaring	Afsnit
Formfejl	Mål for hvor meget et objekt afgiver fra dets tiltænkte form.	3.1.5
Geometrisk produktspecifikation (GPS)	Definere de koncepter, principper og sprog som benyttes indenfor geometrisk måling.	4
Interferens	Lysstrålers vekselvirkning med hinanden som resultere i at strålerne enten forstærker eller udslukker hinanden afhængig af om de er i fase eller modfase.	3.2.4
Matrixmodellen	Matrice af rækker og kolonner hvori GPS standarder er placeret.	4.1
Maximum permissible error (MPE)	Den maksimale målefejl som er tilladt for en given måling, måleudstyr eller målesystem. MPE angives ofte i specifikationer for måleudstyr.	3.1.5
Planglas	Tyk glasplade hvor mindst én af siderne er slebet til en meget høj grad af planhed.	3.2.4
Planparallel glas	Tyk glasplade hvor begge sider af glasset har en høj grad af planhed og de to flader af glasset er parallelle.	3.2.4
Rundhed	Mål for hvor tæt et objekts form tilnærmer sig en perfekt cirkel. Dette kan f.eks. måles ved variationen i radius ved forskellige positioner langs en ring.	3.1.5
Spindelfejl	Fejl i målespindelens bevægelse hos en mikrometerskrue.	3.2.4
Standard reference temperatur	Defineret i ISO 1 til at være 20 °C (293 K), således så målinger foretages ved sammen termiske udvidelse.	3.1.5
Systematisk fejl	Påvirkes en måleemne af en systematisk effekt, f.eks. på termisk udvidelse pga. temperaturen, vil det resultere i en systematisk fejl som der skal korrigeres for.	3.1.5
Termiske udvidelseskoefficient, α	Angiver hvor meget materialets længde ændre sig på grund af ændring i temperatur.	3.1.5
Tolerance	Nedre og øvre grænser for en geometrisk måling.	5

Tak

Et stort tak til Leonardo De Chiffre fra DTU mekanik for hans bidrag til dette kompendie. Mange af eksemplerne i dette kompendie er lånt fra bogen "Geometrical metrology and machine testing" af Leonardo De Chiffre mfl. [4].

9 Litteraturliste

- [1] S. R. Johannsen og M. H. Madsen, Introduktion til målinger, metrologi.dk, 2017.
- [2] Quick Guide to Precision Measuring Instruments No. E11003 (2), Japan: Mitutoyo Corporation, 2012.
- [3] J. E. Frylund, »Fagteori,« Praxis - Erhvervsskolernes Forlag, [Online]. Available: <http://www.fagteori.dk/maaling/maalevaerktoej.aspx>.
- [4] L. De Chiffre, H. N. Hansen, J. L. Andreasen, E. Savio og S. Carmignato, Geometrical Metrology and Machine Testing, Polyteknisk forlag, 2015.
- [5] »DS/ISO/TR 16015:2006: Geometrisk produktspecifikationer - Systematiske fejl og bidrag til måleusikkerhed i længdemålinger grundet termisk indflydelse«.
- [6] H. S. Nielsen, GPS bogen, Dansk Standard og Erhvervsskolernes Forlag, 2010.
- [7] GPS bog - Vejledning i anvendelse, FVM (Foreningen for Værkstedsteknisk Metrologi).

10 Appendix

Måling nr.	Diameter (mm)
1	46,59
2	46,56
3	46,55
4	46,54
5	46,59
6	46,58
7	46,56
8	46,56
9	46,55
10	46,60
11	46,55
12	46,54
13	46,56
14	46,57
15	46,53
16	46,54
17	46,57
18	46,57
19	46,54
20	46,55
21	46,53
22	46,55
23	46,59
24	46,56
25	46,60

Måling af diameteren af en plastik ring med en skydelære. Målingen er gentaget 25 gange.

11 Læringsudbytte

Dette undervisningselement fokuserer på det håndholdte måleudstyr som typisk benyttes indenfor geometrisk måling. Efter at have gennemgået dette undervisningselement vil den studerende have opnået:

1. Forståelse for hvordan geometrisk måling kan være med til at afgøre kvalitet og funktionalitet af et produkt.
2. Kunne udvælge det rette håndholdte udstyr at benytte til en given måling.
3. Forstå princippet bag det mest anvendte håndholdte måleudstyr indenfor geometrisk måling.
4. Kunne forklare muligheder og begrænsninger ved de enkelte håndholdte måleudstyr som skydelære, mikrometerskrue, måleur.
5. Kendskab til vedligehold af geometrisk måleudstyr.
6. Kendskab til Geometrisk Produkt Specifikation (GPS) matrixsystemet og filosofien bag.
7. Have kendskab til tolerancer til kontrolmåling af emner.
8. Kendskab til mulige kilder til måleusikkerhed ved brug af håndholdt måleudstyr.
9. Forstå hvordan der opnås sporbarhed på geometriske målinger, herunder kalibrering af geometrisk udstyr.