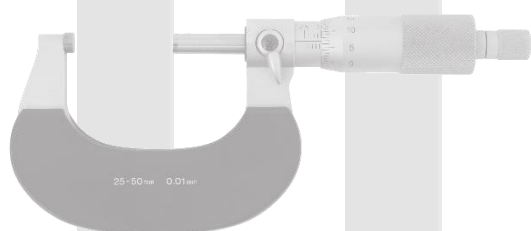


# KALIBRERING AF KOORDI- NATMÅLEMASKINER

UNDERVISNINGSELEMENT

# G5

—  
UNDERVISNING  
I MÅLETEKNIK

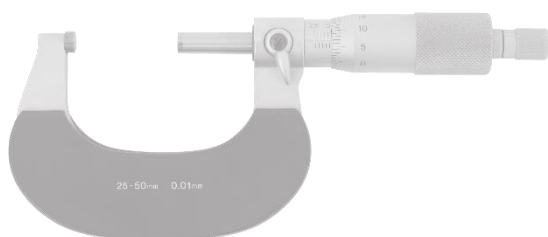




# KALIBRERING AF KOORDINATMÅLEMASKINER

Sabrina R. Johannsen, DFM A/S

1. udgave – September 2018



*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](http://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.*

## Indhold

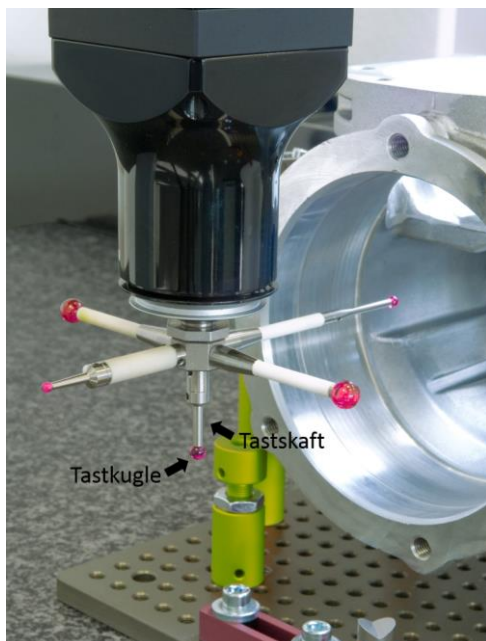
<b>1 Indledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Koordinatmålemaskinen</b> .....	<b>2</b>
2.1 Måleprincip .....	2
2.2 Automatiserede korrektioner .....	3
2.2.1 Kalibrering af tast .....	3
2.2.2 Temperatur kompensation .....	3
2.2.3 Kompensation for fejl i føring.....	4
2.2.4 Transformation af koordinatsystemet .....	5
<b>3 Verifikation af KMM</b> .....	<b>5</b>
3.1 Verifikation af længdemåling.....	5
3.2 Normaler .....	6
3.2.1 Normaler i én dimension.....	6
3.2.2 Normaler i to dimensioner .....	7
3.2.3 Normaler i tre dimensioner .....	8
3.3 ISO GPS standarder om verifikation .....	8
3.4 Vedligehold af KMM .....	8
<b>4 Måleusikkerhed ved måling med KMM</b> .....	<b>8</b>
4.1 MPE angivet fra producent .....	9
4.2 Evaluering af måleusikkerhed for måling med KMM .....	9
4.3 Sporbar måling med KMM.....	11
<b>5 Opsummering</b> .....	<b>13</b>
<b>6 Ordliste</b> .....	<b>14</b>
<b>7 Litteraturliste</b> .....	<b>15</b>
<b>8 Læringsudbytte</b> .....	<b>16</b>

# 1 Indledning

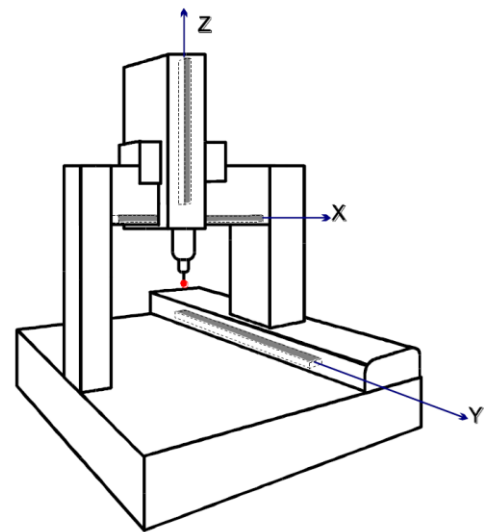
Trekoordinatmålemaskiner (KMM) benyttes til at opmåle rumlige emner i to eller tre dimensioner. Den kan måle en bred vifte af geometriske egenskaber såsom: størrelse, længde, diameter, vinkler, positioner, koncentricitet, parallelitet, rundhed, cylindricitet osv. KMM'ens styrke er at den kan benyttes til at måle komplekse dele så mål- og formafvigelser kan bestemmes.

En del industrier benytter KMM til geometrisk tolerance verificering blandt andet bilindustri, luftfart, vindmølle, sprøjttestøberier og mekanisk præcisions industri.

KMM er et avanceret stykke måleudstyr som benyttes i industrien til høj-præcisions målinger, men kompleksiteten af udstyret gør ligeledes at man kan drages til fejlfortolkning af måleresultater hvis man ikke har det rette kendskab til KMM. Dette kompendie vil give en introduktion til nogle af de målefejl der kan opstå med KMM, og hvordan de kan minimeres ved kalibrering og efterfølgende korrektion.



Figur 1: Mekanisk/taktisk tastsystem med markering af tastkugle og tastskaft.



Figur 2: Illustration af en KMM med målestokke placeret langs x,y,z akserne (skalaakser) [6].

Kompendiet omhandler udelukkende trekoordinatmålemaskiner med mekanisk tasthoved. Et mekanisk tasthoved har mekaniske antastningssystemer hvor én eller flere *tastkugler* benyttes til at opmåle måleemnet ved kontakt. Kompendiets fokus er på verifikation og kalibrering af KMM, og på hvilke ISO standarder der beskriver dette. Kompendiet er udarbejdet på baggrund af anden mere uddybende litteratur [1].

Kompendiet er opbygget som følger: I afsnit 2 beskrives nogle af de korrektioner som selve KMM automatisk foretager. I afsnit 3 gennemgås hvordan ydeevnen af KMM kan verificeres og hvilke normaler der kan benyttes til dette. I afsnit 4 diskuteres kilder til målesusikkerhed og hvordan man kan opnå sporbare målinger med KMM.

Koordinatmålemaskinens opbygning og forskellige typer af koordinatmålemaskiner er omhyggeligt behandlet i anden litteratur [2, 3, 1]. Derfor omtales KMM's måleprincip kun kort, og vægten vil blive lagt på de korrektioner som påføres KMM inden en måling.

## 2 Koordinatmålemaskinen

### 2.1 Måleprincip

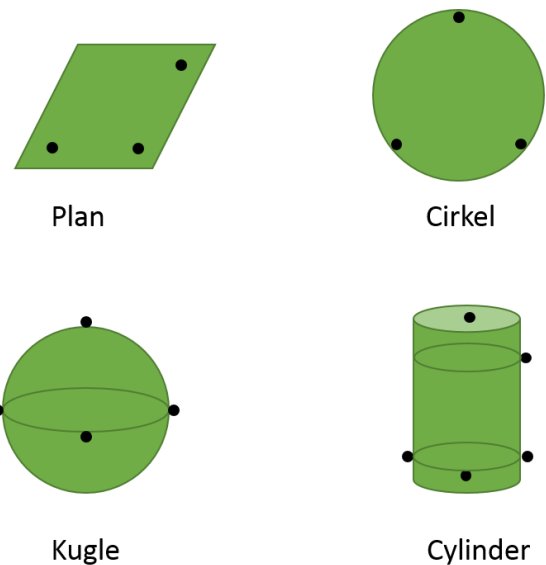
Princippet bag koordinatmåling er at opsamle enkelte målepunkter på overfladen af et måleemne. De målte punkter repræsenteres ved hjælp af dets koordinater (positioner) i rummet  $(x,y,z)$  (kartesisk koordinat-system).

En KMM med mekanisk tasthoved (taktil) benytter en *tast* til kontaktmåling. Den del af tasten som berører emnet har form som en kugle og benævnes *tastkuglen*. Tastkuglen er monteret for enden af et *tastskift*, se Figur 1. Tastkuglen bringes i kontakt med emnets overflade hvorved målepunkter i rummet  $(x,y,z)$  opsamles med høj præcision. Dette kaldes for en *antastning* af emnet.

Tasten føres langs lineære akser i et kartesisk koordinatsystem, se Figur 2. På akserne er placeret målestokke så maskinens positioner kan omsættes til længder og vinkler. Operatøren styrer bevægelsen af tasten via software på en computer. Tasten kan føres i et trekoordinatsystem. Den kan styres manuelt eller ved brug af automatiske måleprogrammer (CNC-programmer). Koordinaterne/positionerne på overfladen af emnet giver dog ikke direkte information om emnets diameter, vinkler eller form. Punkterne skal først kombineres ved brug af matematiske algoritmer hvorved den geometriske form som overfladen har fremkommer. Antallet af punkter som er nødvendige

*Tabel 1: Liste over typiske geometriske elementer, og antallet af målepunkter som der teoretisk skal til for at kunne beskrive elementet. Derudover ses også de anbefalede antal målepunkter.*

Element	Teoretisk mindste antal punkter	Anbefalet mindste antal punkter
Punkt	1	$\geq 1$
Plan	3	4
Cirkel	3	4
Kugle	4	6
Cylinder	5	8
Kegle	6	12
Torus	7	12

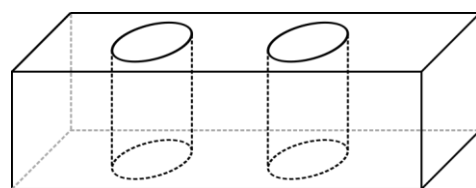


*Figur 3: Fordeling af det teoretisk mindste antal punkter der skal til for at kunne beskrive fire geometriske elementer.*

for at kunne opbygge, og derved definere, et bestemt *geometrisk element* afhænger af det pågældende geometriske element. På Figur 3 ses eksempler på geometriske elementer og placering af målepunkter så et element kan opbygges.

På Tabel 1 er et overblik over de hyppigste geometriske elementer, og det mindste antal punkter som skal til for at kunne opbygge elementet. Dog er det teoretiske minimale antal punkter ikke tilstrækkelige til at beskriver virkelige emner idet disse har *formfejl*, og derved ikke er perfekte. Derfor angiver tabellen også det anbefalede mindste antal punkter ved praktisk opmåling af emner.

En *formfejl* fremkommer under produktionen af emnet som et resultat af f.eks. udbøjninger på føringen af maskinen eller begrænsninger i maskinens geometriske nøjagtighed.



*Figur 4: Eksempel på et måleemne opbygget af 6 planer (kassen), og to huller i form af cylindere.*

Et måleemne kan opbygges ved kombination af de geometriske elementer i Tabel 1. Et eksempel på et måleemne opbygget af geometriske elementer ses på Figur 4. KMM benyttes så til at opmåle disse geometriske elementer, og derved fås en fuldstændig opmåling og beskrivelse af emnet. KMM's software indeholder de algoritmer som skal bruges til beregning af de tilordnede geometriske elementer og til evaluering af resultatet.

Emner som er for komplekse til at beskrive med de geometriske elementer, kan dog med visse typer af KMM opmåles som såkaldte *frie flader*.

## 2.2 Automatiserede korrektioner

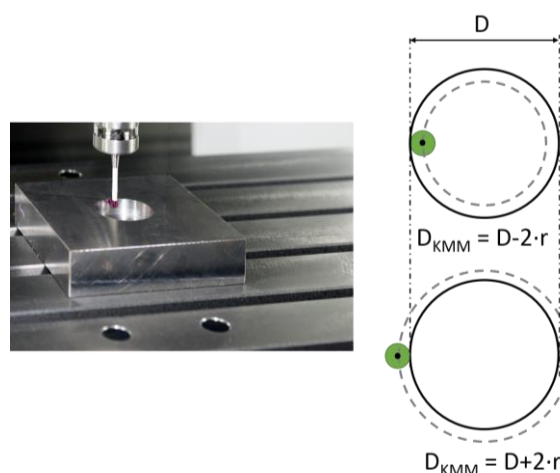
KMM er computerstyrede hvilket giver mulighed for en del automatisering af måleprocesserne. For eksempel kan korrektioner foretages direkte af KMM. Dette forbedrer nøjagtigheden af målingerne. Desuden gør det måleprocessen hurtigere, hvilket muliggør opmåling af komplekse emner. Automatiseringen har dog den ulempe at operatøren ikke ved med sikkerhed hvordan der korrigeres for fejl, og i hvor høj grad disse resulterer i usikkerheder på målingen.

Forudsætningen for brug af en KMM er, at maskinens fejl elimineres så godt som muligt, hvilket opnås gennem kalibrering af maskinen. Blandt andet skal 21 maskinfejl bestemmes, og der skal korrigeres for dem enten manuelt offline eller ved brug af automatisk software.

I dette afsnit gennemgås nogle af de automatiske korrektioner som en KMM kan foretage.

### 2.2.1 Kalibrering af tast

KMM's styresystem refererer til centrum af tastkuglen ved en antastning. Derfor skal positionen af tastkuglens centrum kendes. Ydermere skal radius af tastkuglen kendes for at kunne måle et punkt på emneoverfladen, idet kontaktpunktet og centrum af kuglen ikke er ved den samme position, se Figur 5. Det betyder at tastradius enten skal lægges til eller trækkes fra måledata afhængig af om målepunktet er



Figur 5: Illustration af vigtigheden af tastradius korrektion. Den grønne cirkel repræsenterer tværsnittet af tastkuglen, hvor centrum er markeret med en sort cirkel.  $r$  er radius af kugletasten.  $D$  er den nominelle diameter af cirklen, mens  $D_{KMM}$  er den diameter som KMM måler hvis der ikke korrigeres for radius af kugletasten.

indeni eller udenpå emnet. På Figur 5 fremgår det at en indre diameter vil blive målt som værende mindre end den nominelle diameter:  $D_{KMM} = D - 2 \cdot r$ , hvor  $r$  er radius af kugletasten. En ydre diameter vil derimod blive målt med en KMM til at have en større diameter end den nominelle:  $D_{KMM} = D + 2 \cdot r$ .

Kalibrering af tasten er derfor nødvendigt for at man kan udføre målinger med KMM. Både tastradius og koordinaterne for centrum af kuglen skal bestemmes. Kalibreringen foregår oftest automatisk ved brug af en CNC målerutine som opmåler kalibreringskugle med kendt diameter og lille formfejl ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ), se Figur 7. Efter kalibreringen korrigeres der automatisk for tastens radius.

Ved en tast-kalibrering kan tastskaftets grad af afbøjning ved kontakt med måleemnet også undersøges. Det testes ved at antaste ved forskellig påført målekraft (0,1 – 1 N) og registrere graden af afbøjning.

### 2.2.2 Temperatur kompensation

Temperaturen af måleemnet har betydning for dets termiske udvidelse, og emnets længde kan således variere afhængig af hvilken temperatur emnet har.



Figur 7: Kalibrering af tast imod kalibreringskugle.

Ved at placere temperatursensorer på måleemnet kan KMM logge temperaturen af måleemnet samtidig med det opmåles. Derved kan operatøren efterfølgende korrigere for temperaturforskelle. KMM kan også automatisk kompensere for temperaturen af måleemnet, hvilket kræver at maskinen kender måleemnets termiske udvidelseskoefficient.

KMM tager også højde for temperaturen af selve maskinen idet der er temperatursensorer på skalaakserne.

Det skal dog understreges at man altid skal efterlade det fikserede emne til akklimatisering inden en måling foretages. Håndtering af emnet vil medfører opvarmning af emnet.

### 2.2.3 Kompensation for fejl i føring

Fejl i føringen af de bevægende dele i KMM, herunder fejl i akseføring langs målestokkene på akserne, er uundgåelige. Det kan dreje sig om geometriske føringsfejl som rethed, rulning og kipning.

Ved bevægelse langs en lineær akse findes fejlbidrag fra tre rotatoriske-, to translatoriske- og én positioneringsfejl:

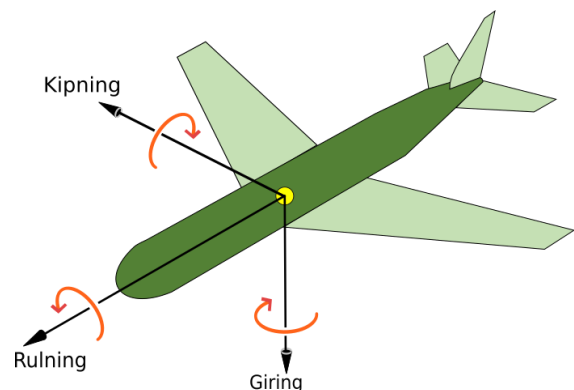
**Rotationsfejl** – (1) vippe i bevægelsesretning op/ned (*kipning* på dansk, *pitch* på engelsk), (2) slingren i bevægelsesretning frem/tilbage (*giring* på dansk, *yaw* på engelsk)), og (3) dreje rundt om egen akse (*rulning* på dansk, *roll* på engelsk). Se Figur 6.

**Translationsfejl** – lineær fejl vinkelret på akse. Dvs. at f.eks. z-aksen ikke går igennem punktet (0,0) i *x,y*-planet.

**Positionsfejl** – fejl i positionering på selve akse. Kan fremkomme ved fejl i selve målestokken eller den relative placering mellem målestok og bevægelsesakse.

Disse fejl forekommer på alle tre akser og derved fås 18 maskinfejl på grund af akseføring. Derudover kommer tre vinkelrethedsfejl mellem de tre akser. Vinkelrethedsfejl betyder at der ikke er præcis 90° mellem hver akse. I alt er der således 21 maskinfejl for en brotype KMM [1].

Ved fremstilling af KMM forsøger producenten at minimere disse fejl. Ligeledes kan softwaren kompensere for fejlene i føringen, men der kan forekomme resterende føringsfejl. De 21 maskinfejl kan undersøges og afdækkes ved en tidskrævende (1 uge) kalibrering ved brug af en hulplade/kugleplade [4]. Det er derfor en relativt dyr kalibrering set i forhold til at maskinfejl kun står for en lille del af de fejl der er overlejret i en måling [1]. Der er således andre faktorer som bidrager mere til målefejl end maskinfejlene.



Figur 6: Illustration af begreberne kipning (*pitch*), giring (*yaw*) og rulning (*roll*) ved brug af et fly.

Original illustration: By Auawise and Jrvz. CC BY-SA 3.0. Wikimedia Commons.



### 2.2.4 Transformation af koordinatsystemet

En fordel ved arbejdet med KMM er at operatøren har mulighed for at definere et andet tre-koordinatsystem end det der er indbygget i KMM. Derved slipper man for at skulle lave en nøjagtig og tidskrævende opretning af måleemnet i forhold til det indbyggede koordinatsystem. KMMs computer sørger selv for at transformere mellem sit eget koordinatsystem og det operatøren har valgt.

Den største nøjagtighed opnås dog ved måling langs akserne. Derfor er det i nogle tilfælde besværet værd at lave en god opretning af emnet langs akserne.

## 3 Verifikation af KMM

Det er vanskeligt at opnå fuld kalibrering af en KMM, så den kan benyttes til en vilkårlig måleopgave. For simple geometriske elementer er det muligt at benytte en reference med lignende geometri til kalibrering i forhold til den specifikke opgave. F.eks. kan en hulplade benyttes til kalibrering af KMM inden opmåling af et cirkulært hul i et emne.

Dette afsnit omhandler derfor ikke kalibrering af KMM, men *verifikation* af KMM. Ved en *verifikation* opnås et objektivi vidnesbyrd på at KMM opfylder specifikke krav til dens ydeevne. Verifikation af KMMs

ydeevne foregår i enkelte punkter i dens måleområde.

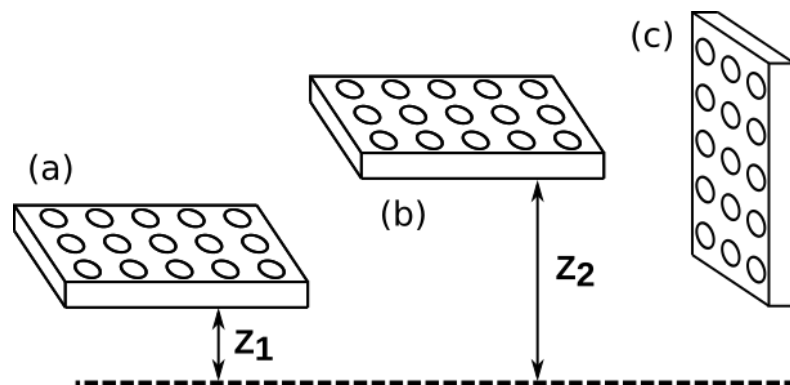
Verifikation af KMMs ydeevne, såsom nøjagtighed og måleområde opnås ved hjælp af prøvning. I ISO 10360 serien er beskrevet forskellige godkendelses- og verifikationsprøvnings af KMM [3]. Det kunne f.eks. være verifikation i forbindelse med måling af lineære dimensioner (ISO 10360-2). Dog medfører udførelsen af prøvningerne beskrevet i ISO 10360 serien ikke at man opnår sporbarhed på sine målinger.

Til verifikation af KMM benyttes kalibrerede referencer og normaler som er sporbare til SI-systemets længdeenhed, meteren. Verifikationen foretages blandt andet for at fastslå om KMM kan måle indenfor dens angivne *maximum permissible error*<sup>1</sup> (MPE) under de af producenten specificerede forhold. MPE angiver den maksimale tilladte målefejl for KMM.

### 3.1 Verifikation af længdemåling

Standarden ISO 10360-2 omhandler verifikationsprøvning af KMM til måling af lineære dimensioner. Standarden beskriver prøvninger til at verificere KMMs evne til måling af længde.

Den specificerer blandt andet at den længste reference som benyttes i verifikationen skal være på mindst 66 % af den maksimale bevægelse som KMM kan udføre på de tre akser. Derudover skal de valgte



Figur 8: Det er vigtigt at KMMs ydeevne verificeres i hele dens målevolumen (x,y,z) eller som minimum i den del af målevolumenet som benyttes til måling. Ovenfor ses metoder til at udføre verifikationen i forskellige områder af målevolumenet ved bl.a. at hæve hulpladen (a) og (b), eller ved at rotere den (c).

<sup>1</sup> På dansk maksimalt tilladte fejl

prøvelængder være fordelt jævnt på KMMs længdeinterval. Ydermere er det væsentligt at KMM afprøves i punkter fordelt i hele maskinens målevolumen ( $x,y,z$ ). Det kan sikres ved at opmåle normalen både liggende og stående. Eller ved at hæve normalen til en anden  $z$ -højde ved brug af et lille bord, se Figur 8.

ISO 10360-2 beskriver også en måleprocedure som skal benyttes til verifikationen:

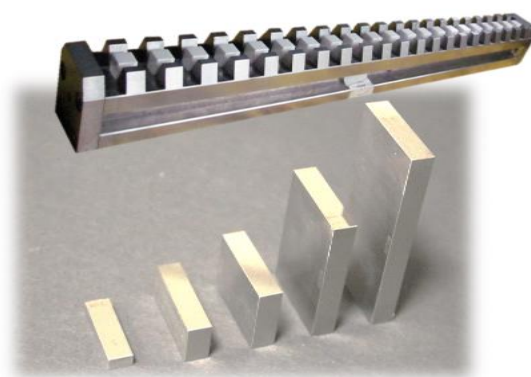
- Tastsystemet skal kalibreres op imod den kalibreringskugle som KMM producenten har leveret sammen med KMM.
- Opretnings metoden af normalen som benyttes til verifikationen skal være den samme som benyttes ved måling på måleemner.
- Benyt fem forskellige kalibrerede prøvelængder, som hver måles tre gange.

De fem prøvelængder måles i syv forskellige rumlige positioner i maskinens målevolumen. Dette giver i alt  $5 \cdot 3 \cdot 7 = 105$  målinger.

Formålet med ovenstående måleprocedure er at undersøge tre fejl ved KMM (1) geometriske og termiske fejl ved måling mellem to endepunkter på en længde, (2) fejl i størrelsen af tastkugle, og (3) repetérbarhedsproblemer.

### 3.2 Normaler

Normaler til verifikation og kalibrering af KMM kan være én-, to- eller tredimensionale. På Figur 9 ses eksempler på sådanne normaler.

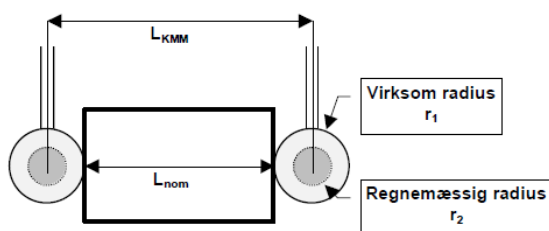


Figur 9: Eksempler på normaler til kalibrering af KMM i én dimension. Øverst: step gauge. Nederst: Måleklodser.

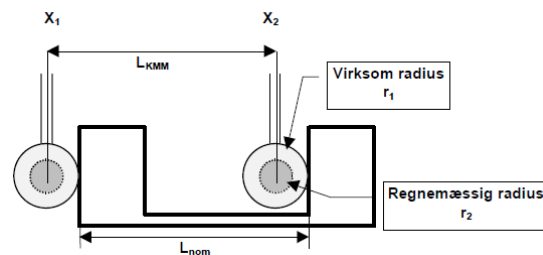
#### 3.2.1 Normaler i én dimension

Der findes en del forskellige normaler til verifikation af en KMM's evne til at måle i én dimension. Herunder nævnes et par eksempler:

**Måleklodser** har to plane blankpolerede parallelle sider, hvor afstanden mellem planerne udgør måleklodsens længdemål. Måleklodserne kan kombineres så forskellige længder kan opnås, og de giver mulighed for en lav usikkerhed på kalibreringen/verifikation. Fordelen ved måleklodser er, at de er let tilgængelige og har alsidige anvendelsesmuligheder. Benyttelse af måleklodser til 1D verifikation stiller dog store krav til opretningen af måleklodsens i forhold til KMM, idet en lille hældning kan resultere i en forskel i den målte længde. Ydermere har fejl i tastkalibrering, og således fejl i tastkorrektion, en direkte betydning for den målte længde. Måleklodsens



Figur 10: Måling af længden af en måleklods med KMM. Bemærk der er modsat antastningsretning [5].



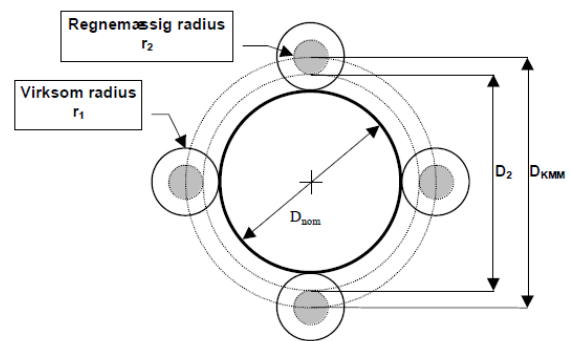
Figur 11: Måling af længden mellem to klodser på en step gauge. Bemærk længden kan antastes i modsat eller samme retning [5].

antastes med tastkuglen fra to modsatte retninger, se Figur 10. KMM vil måle længden af klodsen som  $L_{KMM} = L_{nom} + 2r$ , hvor  $r$  er radius af tastkuglen og  $L_{nom}$  er den nominelle længde af måleklodsen. Hvis der er fejl i tastkorrektionen kan KMM benytte en forkert radius, hvilket vil resultere i at længden af måleklodsen opmåles forkert. I Figur 10 ses at tastradius korrigeres til at være mindre end det faktisk er ( $r_1 > r_2$ ), hvilket vil betyde at måleklodsen fremstår længere end den er.

**Step gauge** er en skinne med klodser monteret langs en akse. Den giver mulighed for at udføre verifikation ved flere forskellige længder i en kompakt løsning. Dog er usikkerheden på step gaugens prøvelængder højere end for måleklodser ( $\sim 0,20 \mu\text{m} + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$ ) [1]. Step gaugen anvendes primært i forbindelse med KMM, og er ligesom måleklodserne følsom overfor opretningen. Step gaugen har den fordel at det er muligt at antaste klodserne i samme antastningsretning, se Figur 11. Dette betyder at fejl i tastkorrektionen ingen betydning har. KMM vil beregne længden mellem punkterne  $X_1$  og  $X_2$ , hvilket svarer til  $L_{KMM} = X_1 - X_2$ . Kontaktpunkterne befinder sig ved  $X_1 + r$  og  $X_2 + r$ . Dvs. den nominelle længde er  $L_{nom} = (X_1 + r) - (X_2 + r) = X_1 - X_2$ . Således har tastradius ingen betydning for den udregnede længde.



Figur 12: Eksempel på normal i to dimensioner: Hulplade med 25 huller med en centrum-centrum afstand på 20 mm. Denne model er designet af DTU/CGM og kaldes en optomekanisk hulplade da den kan benyttes til både at kalibrere taktile og op-



Figur 13: Måling af centrum af en cirkel/kugle på en kuglestang eller pladenormal er ikke påvirket af fejl i tastkorrektionen (tastkugle-radius) [5].

En **kuglestang** består af kugler placeret langs en akse i form af en stang eller på en ramme. I det måleenderne er et 3D element er denne normal ikke så følsom overfor fejl i opretningen af emnet.

### 3.2.2 Normaler i to dimensioner

**Pladenormaler** har et todimensionalt mønster og kan bruges til kalibrering i to dimensioner. Mønstret er oftest opbygget af cirkulære huller eller kugler. Disse kaldes henholdsvis **hulplader** eller **kugleplader**. Hullerne/kuglerne sidder oftest i et kvadratisk mønster med en fast indbyrdes afstand  $L$  mellem elementerne langs  $x$ - og  $y$ -aksen. Det muliggør at man kan opmåle mange forskellige kombinationer af længden  $L$  i to dimensioner. På Figur 12 ses et eksempel på en hulplade, hvor  $L$  er afstanden mellem to hullers centrum.

Fordelen ved pladenormaler med cirkler og kugler er at disse elementer kan fremstilles med høj præcision, og koordinaterne af centrum ikke påvirkes af fejl i tastkorrektionen. Dette fremgår af Figur 13, hvor en cirkel ses, der antastes i fire positioner. Bemærk at tværsnittet igennem en kugle har form som en cirkel. Så koordinatet  $(x, y, z)$  for centrum af cirkelhul og kugle kan findes ved samme antastnings-strategi (dog vil man også antaste oven på en kugle). Det ses fra figuren at en fejl i kugletast-radius vil resultere i at man vil opmåle forskellige diametre af cirklen, men centrum af cirklen vil være den samme. Derved vil afstanden fra cirkelcentrum til cirkelcentrum i en hul-/kugleplade ikke være påvirket af fejl i tastkorrektionen.

Hulplader skal oprettes rumligt inden kalibreringen kan foretages, hvilket kan være tidskrævende. Dette er mindre væsentligt for kugleplader på grund af kuglernes 3D form.

### 3.2.3 Normaler i tre dimensioner

Der findes 3D normaler til kalibrering af KMM f.eks. **tetraeder**, men oftest vil man blot benytte 1D eller 2D normaler i forskellige opstillinger, som på Figur 8.

## 3.3 ISO GPS standarder om verifikation

ISO 10360 serien behandler verifikationsprøvning af KMMs ydeevne. For taktile KMM har følgende dele relevans:

**ISO 10360-1:** Ordliste

**ISO 10360-2:** Verifikationsprøvning for lineære dimensioner.

**ISO 10360-3:** Verifikationsprøvning ved brug af rotationsbord til at bestemme om KMM er i stand til at måle indenfor den angivne MPE. Ved prøvningen bestemmes center koordinaterne for to kugler monteret på rotationsbordet i forskellige vinkler.

**ISO 10360-4:** Verifikationsprøvning ved brug af skanningsmetode, hvor skanningsfejl for den skannende tast bestemmes.

**ISO 10360-5:** Verifikationsprøvning af både enkelt- og multi-antastningssystemer, til bestemmelse af antastningsfejl. Ved prøvningen antastes en kalibreringskugle (ikke den leveret af KMM producenten) i 25 tilfældige punkter.

## 3.4 Vedligehold af KMM

KMM skal jævnligt prøves for at sikre at maskinens stabilitet og ydeevne er som forventet. Især er det vigtigt at tjekke KMM straks efter enhver begivenhed som kan påvirke dens ydeevne.

Verifikationsprøvningerne beskrevet i ISO 10360 serien er omfattende og tidskrævende, så disse verifikationer udføres normalt ikke så tit. I stedet kan man indføre mindre *foreløbige prøvninger* som ud-

føres før måling på ukendte måleemner. Disse prøvninger kan udføres på 3D/2D referencer såsom hul- og kugleplader, kuglebarer eller tetraeder. Derudover kan man også få fremstillet specielle referencer som har samme egenskaber som dem der ønskes målt på måleemnet. Det er vigtigt at en sådan specialreference er stabil, mekanisk robust og har en god overfladebehandling som sikrer en lav måleusikkerhed. Ydermere er det vigtigt at referencerne består af et materiale som har lignende termisk udvidelseskoefficient som de måleemner der typisk måles med KMM.

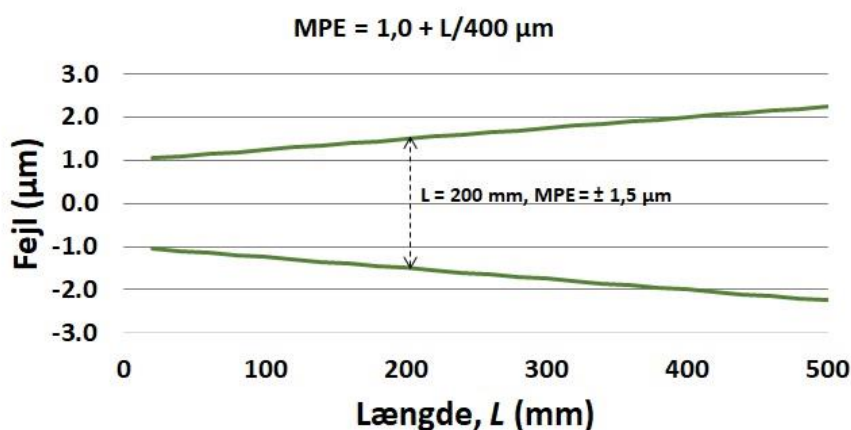
## 4 Måleusikkerhed ved måling med KMM

Indtil nu har vi primært set på fejl og usikkerheder forbundet med selve KMM. Men der er også andre kilder som bidrager til usikkerheden på en måling foretaget med en KMM.

Selve måleemnet bidrager med en måleusikkerhed. Endda kan forskellige karakteristika for et måleemne have forskellige usikkerheder. F.eks. kunne højde af en cylinder og dens diameter have forskellig usikkerhed. Derfor arbejder man med *opgavespecifik usikkerhed* når man skal vurdere usikkerheden for målinger foretaget med KMM (ISO 15530 serien) [5].

Den opgavespecifikke måleusikkerhed tager højde for de kilder til usikkerhed som kan opstå når man betragter hele måleprocessen. Herunder kan nævnes følgende kilder til usikkerhed (fra ISO 15530-1):

- KMM (føring, tastkonfiguration, software)
- Antastningssystemet (stabilitet)
- Antastnings-strategi (antal og position af målepunkter, deformation pga. målekraft)
- Måleemne (position og orientering, termisk udvidelseskoefficient, porøsitet/deformitet)
- Emnefiksering/fastspænding (deformation/skævvridning af emne)
- Kontaminering
- Miljø (temperatur, vibrationer, fugtighed)



Figur 14: KMM producenter angiver MPE i én dimension ved brug af en formel, hvor man ved indsættelse af længden  $L$  finder den maksimale fejl som kan forventes for den pågældende længde. Ovenstående formel angiver f.eks. at der ved måling af en længde på 200 mm, maksimalt vil være en fejl på  $\pm 1,5 \mu\text{m}$  som skyldes instrumentet.

#### 4.1 MPE angivet fra producent

Producenten angiver KMM's præcision med den maksimale fejl MPE, som omtalt i afsnit 3. MPE angives i én dimension for at kunne fremvise en så lille MPE som muligt. Det er vigtigt ikke at forveksle MPE med måleusikkerheden for KMM. MPE angiver kun den maksimale fejl fra selve KMM, og er mere et mål for kvaliteten af KMM. MPE angives som nedenfor

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

Hvor det typisk er underforstået at længden  $L$  skal indsættes i mm, og MPE fås ud i enheden  $\mu\text{m}$ .

MPE kunne f.eks. være angivet som nedenfor

$$MPE = \pm(1,0 + L/400)\mu\text{m}$$

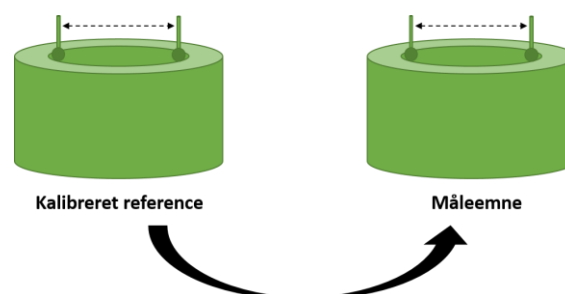
Formlen angiver hvilken maksimal fejl som kan forventes ved en given længde. På Figur 14 ses en graf med indtegnet fejl (MPE) og længde ved brug af formelen. Det ses at jo større  $L$  des større bliver den forventede fejl på  $L$ .

KMM producenterne benytter forskellige symboler for angivelse af MPE såsom  $MPE_E$  eller  $E_D$ .

#### 4.2 Evaluering af måleusikkerhed for måling med KMM

Opstilling af usikkerhedsbudgetter til estimering af usikkerheden på målinger foretaget med en KMM er ofte meget kompliceret og tidskrævende. Derfor er en simplificeret eksperimentel metode til estimering af måleusikkerheden beskrevet i ISO 15530-3. Metoden består i at udfører gentagende målinger på en kalibreret reference eller normal, under samme måleforhold som forholdene for selve måleemnet. Det vil sige ved samme temperatur, fiksering, håndtering osv. Ud fra de gentagne målinger på den kalibrerede reference estimeres og beregnes usikkerheden.

Brugen af denne metode til at estimere usikkerheden på måling af et ukendt måleemne er baseret på en *substitutionsmetode*, se Figur 15. Det vil sige at den



Figur 15: Substitution mellem måleemne og kalibrerede reference. Målestørrelsen på den kalibrerede reference skal være den samme som på måleemner. Her er målestørrelsen den indre diameter af en hul cylinder.

Tabel 2: Krav til lighed mellem måleemne og kalibreret reference i forhold til overførsel af usikkerhed (oversat fra ISO 15530-3).

Emne	Krav
Geometrisk funktion	<i>Dimension:</i> Større end 250 mm: Identisk indenfor 10 % Mindre end 250 mm: Identisk indenfor 25 mm <i>Vinkel:</i> Identisk indenfor $\pm 5^\circ$
Formfejl og overfladebeskaffenhed (ruhed)	Lignende for de funktionelle egenskaber
Materiale (f.eks. termisk udvidelseskoefficient, elasticitet, hårdhed)	Lignende for de funktionelle egenskaber
Antastnings-strategi	Identisk
Antastningssystem	Identisk

kalibrerede reference substitueres med måleemnet hvorved begge målinger foretages under lignende måleforhold, og derved kan usikkerheden evalueret for referencen overføres til måleemnet. Det forudsætter dog at måleforholdene er nogenlunde ens i begge tilfælde. Derfor kræves følgende ligheder ved måling på den kalibrerede reference og den faktiske måling:

- Lignende dimension og geometri af den faktiske målings måleemne og den kalibrerede reference (f.eks. position og orientering)
- Samme måleprocedure ved evaluering af måleusikkerhed vha. referencen og den faktiske måling
- Samme målemiljø, inkl. variationer, under evaluering af måleusikkerhed og den faktiske måling (f.eks. temperatur, akklimatiseringstid)

Ydermere opstiller ISO 15530-3 mere specifikke krav til ligheden mellem måleemne og kalibreret reference. Disse fremgår af Tabel 2.

Usikkerheden evalueres ved at foretage målinger på den kalibrerede reference, og den estimerede usikkerheden benyttes dernæst ved måling på selve måleemnet.

Forud for målingerne på den kalibrerede reference skal KMM opstartes i overensstemmelse med producentens angivelser i manualen. Det involverer blandt andet valg af tastsystem, kalibrering af tastkugler og sikring af stabile termiske forhold, herunder akklimatisering af reference.

En måling er defineret i ISO 15530-3 som bestående af (1) håndtering af emnet og (2) én eller flere målinger på emnet. Dette kaldes en *målecyklus*. En

Tabel 3: Liste over bidrag til usikkerhedsbudget og eksempler på kilder til usikkerhed jf. ISO 15530-3.

Bidrag til usikkerhed	Eksempler på kilder til usikkerhed (input)
Kalibrering af reference, $u(kal)$	Usikkerhed fra kalibreringen som fremgår af kalibreringscertifikatet.
Måleprocedure, $u(p)$	Geometrisk fejl ved KMM, temperatur af KMM og emne, drift i KMM, håndtering og fiksering, systematiske fejl ved antastnings-system, repetérbarhed osv.
Systematiske fejl, $u(b)$	Usikkerhed fra systematiske fejl ved måleprocessen estimeres ved måling på den kalibrerede reference. Dvs. kilderne nævnt under $u(p)$ bidrager ligeledes her, og usikkerheden fra variation i termiske udvidelse.
Variation i materiale og fremstilling (måleemne), $u(w)$	Variation i termisk udvidelse, formfejl, ruhed, elasticitet og plasticitet for måleemnet.

målecyklus for den kalibrerede reference skal indeholde de samme handlinger som foregår i den faktiske måling.

For at opnå en tilpas mængde målinger til evaluering af usikkerheden, skal der foretages minimum 20 målecyklusser på én kalibreret reference. Dog kan man godt måle flere kalibrerede referencer indenfor en cyklus.

I evalueringen af usikkerheden på den kalibrerede reference medtages usikkerheden fra følgende kilder:

- Måleproceduren
- Kalibrering af referencen
- Variationer i det faktiske måleemne (formfejl, termisk udvidelse, overfladebeskaffenhed)
- Målemiljø og variation af dette

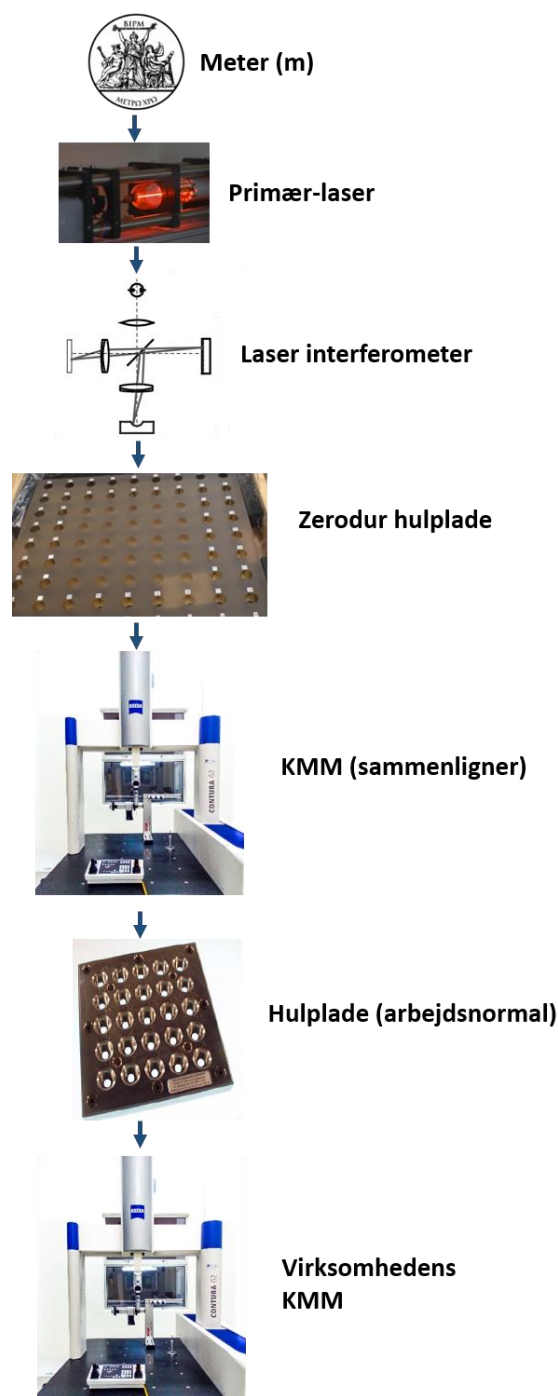
I ISO 15530-3 er listet fire bidrag til usikkerhed som skal medtages i usikkerhedsbudgettet for måling med KMM. De fremgår af Tabel 3.

I tilfælde af forskelle i måleforhold, variation i form eller variation i termisk udvidelse osv. mellem måleemnet og den kalibrerede reference, skal der tages højde for dette ved at tilføje et yderligere bidrag til usikkerheden.

Begrænsningen ved metoden beskrevet i ISO 15530-3 er: (1) at det skal være muligt at kunne fremstille en reference med en lignende egenskab/dimension som den der ønskes målt på måleemnet, (2) referencen skal være tilpas stabil og nøjagtig så en lille kalibreringsusikkerhed fås. Den største ulempe er dog at det hurtigt kan blive dyrt at anskaffe sig en sådan reference. Omkostningerne kan være acceptable hvis der er tale om masseproducerede serielle emner, men når der produceres få emner med forskellig form og dimension er det pludselig er meget stor omkostning at anskaffe referencer til hvert enkelt emne.

### 4.3 Sporbar måling med KMM

Opnåelse af fuld sporbarhed på målinger foretaget med KMM er vanskeligt. Ved at undersøge KMM's ydeevne som beskrevet i ISO 10360 serien vil forskellige aspekter af KMM blive prøvet (afsnit 3). Disse prøvninger foretages dog kun i enkelte punkter eller



Figur 16: Eksempel på sporbarhedskæde for en KMM til opnåelse af sporbar x,y koordinatmåling.

positioner i målevolumen. Derved opnås ikke en fuld kalibrering af KMM, så den vil kunne benyttes sporbart til en hvilken som helst måleopgave.

I ISO 15530 serien beskrives metoder til at opnå sporbarhed på specifikke måleopgaver ved benyttelse af

bestemte metoder (afsnit 4). Der er således ikke tale om en fuld sporbarhed som gælder alle måleopgaver udført på en KMM, men kun opgavespecifikke målinger.

Målinger udført med KMM af forskellige laboratorier eller virksomheder på mere komplekse måleemner kan derfor ende med forskellige resultater, og med meget varierende usikkerhed på grund af kompleksiteten i at etablere de sporbare målinger.

På Figur 16 ses et eksempel på en sporbarhedskæde som etablerer sporbarhed til  $x,y$  koordinater målt med en KMM.

Sporbarhedskæden starter med SI-enheden meter, den realiseres ved brug af en HeNe-laser som kaldes for *primær-laseren*. Primær-laseren sammenlignes med en anden sekundær laser som benyttes i et laser interferometer. Et laser interferometer kan benyttes til at måle længder ved brug af laserlys. Dette uddybes ikke nærmere her.

Laser interferometeret benyttes til at opmåle afstanden mellem centrum af hullerne i en Zerodur hulplade (referencenormal). Zerodur hulpladen er lavet af materialet zerodur som er et glas-keramisk materiale. Zerodur er kendetegnet ved at have en meget lav termisk udvidelseskoefficient, hvilket gør materialet termisk stabilt, hvilket er en klar fordel til brug i længdemåling. Derudover er det kemisk stabilt, hvilket vil sige at det ikke så let reagere med f.eks. luft.

Den kalibrerede Zerodur hulplade sammenlignes ved brug af en KMM med en hulplade, som er virksomhedens arbejdsnormal. Det foregår ved en sammenligning af afstanden mellem to huller i hulpladen og Zerodur hulpladen. Dette gøres for et vist antal huller i både  $x$ - og  $y$ -retningen.

Til slut benyttes hulpladen hvis centrum-centrum hulf afstand er kalibreret til at kalibrere virksomhedens KMM. Derved er der opnået sporbarhed på  $x,y$ -koordinaterne.



## 5 Opsumming

KMM er et alsidigt og fleksibelt måleudstyr som kan benyttes til opmåling af et væld af måleemner. Samtidig er KMM et avancereret måleudstyr som kræver at man bruger KMM og evaluerer måleresultaterne med en god kritisk sans.

I kompendiet er forskellige kilder til målefejl og usikkerhed belyst, så man kan være opmærksom på dem og vide hvorfor der kompenseres for disse fejl. De fleste maskinfejl kompenseres der automatisk for. Men det er stadig vigtigt at have kendskab til disse. De resterende kilder til usikkerhed kommer fra andre kilder end maskinen, f.eks. måleemnet eller målemiljøet. Det er vigtigt at forsøge at identificere og bestemme usikkerheden fra disse kilder.

Kalibrering og verifikation af KMM er behandlet ifølge ISO standarderne for KMM'er. Derudover er en diskussion af de vanskeligheder der er forbundet med at opnå fuld sporbarhed på KMM.

## 6 Ordliste

Begreb	Forklaring	Afsnit
<b>CNC-programmer</b>	Computerprogram som kan styre en KMM eller et stykke værktøj langs flere akser.	2.1
<b>Emne eller måleemne</b>	Det der skal opmåles. Kan ofte deles op i et antal <i>geometriske elementer</i> .	1 og 2
<b>Føring</b>	Det at bevæge en tast langs en forud defineret kurve i rummet.	2.1
<b>Formfejl</b>	Afvigelse mellem et <i>geometrisk element</i> og dets tilnærmede matematiske beskrivelse. F.eks. fejl i planhed, rundhed eller rethed.	2.1
<b>Geometrisk element</b>	Del af <i>emne</i> som kan tilnærmes med en simpel matematisk beskrivelse. F.eks. en kugle eller en cylinder.	2.1
<b>KMM</b>	KoordinatMåleMaskine: Benyttes til at opmåle emner i tre dimensioner	Afsnit 1
<b>Måleusikkerhed</b>	Samlet vurdering af usikkerheden på en specifik måling. Heri indgår blandt andet påvirkning fra måleudstyret ( <i>maskinfejl</i> ), <i>målemnet</i> (f.eks. <i>formfejl</i> ) og miljøparametre (temperatur, vibrationer, etc...). Måleusikkerheden kan bestemmes ved opstilling af et <i>usikkerhedsbudget</i> eller ved hjælp af <i>substitutionsmetoden</i> .	4
<b>Maskinfejl</b>	Målefejl som skyldes KMM. F.eks. fejl i <i>føring</i> eller manglende korrektion for radius af <i>tastkuglen</i> . Maskinfejl skal så vidt muligt elimineres ved kalibrering.	2.2
<b>MPE</b>	'Maximum Permissible Error' eller 'maksimalt tilladelig fejl'. Denne angives af producenten af KMM og udtrykker den nøjagtighed man kan forvente af maskinen når der så vidt muligt er korrigeret for maskinfejl. Ved beregning af <i>måleusikkerhed</i> skal man dog også tage højde for påvirkninger fra andre kilder.	3 og 4.1
<b>Normal</b>	Normaler bruges til at <i>verificere</i> en KMMs måleevne. En normal er kendetegnet ved at have en velbestemt geometri (længde, diameter, etc...).	3.2
<b>Primærnormal</b>	<i>Normal</i> med den højest opnåelige nøjagtighed. Primærnormalen for længdemåling er en laser fastlåst til en bestemt bølgelængde.	4.3 Se også Undervisnings-element A1
<b>Sporbarhed</b>	Angivelse af om en måling er sammenlignet med <i>primærnormalen</i> . Typisk er der ikke tale om en direkte sammenligning, men om en veldokumenteret kæde af sammenligninger kaldet sporbarheds-kæden.	4.3
<b>Substitutionsmetoden</b>	Eksperimentel metode til bestemmelse af <i>måleusikkerhed</i> .	4.2
<b>Taktil måling</b>	Måling som omfatter at måleinstrumentet er i berøring med emnet. I modsætning til f.eks. optisk måling.	1
<b>Tast</b>	Samlet betegnelse for <i>tastskaft</i> og <i>tastkugle</i> .	2.1
<b>Tastkugle</b>	Den del af tasten som er i direkte berøring med emnet.	2.1
<b>Tastshoved</b>	Trykfølsom anordning med en eller flere <i>taster</i> .	1 og 2
<b>Tastskaft</b>	Den del af tasthovedet hvor tastkuglen er monteret.	2.1
<b>Temperaturkorrektion</b>	Længdemål angives som regel som målt ved en temperatur på 20 °C. Hvis målingen foretages ved en anden temperatur skal der korrigeres for emnets udvidelse.	2.2
<b>Usikkerhedsbudget</b>	Regnskab opstillet til beregning af den samlede <i>måleusikkerhed</i> ved en måling med flere usikkerhedskilder.	Se undervisnings-element A3
<b>Verifikation/Verificering</b>	Fremskafning af objektive vidnesbyrd på om et måleinstrument eller <i>måleemne</i> overholder specifikke krav.	4 Se også undervisnings-element A1

## 7 Litteraturliste

- [1] L. De Chiffre, H. N. Hansen, J. L. Andreasen, E. Savio og S. Carmignato, Geometrical Metrology and Machine Testing, Lyngby: Polyteknisk forlag, 2015.
- [2] J. Meinertz og V. Loll, Måleteknik, Praxis, 2018.
- [3] DS/EN ISO 10360-serien, Godkendelses- og reverifikationsprøvning af koordinatmålemaskiner.
- [4] DS/CEN ISO/TS 15530-serien, Koordinatmålemaskiner - Teknikker til bestemmelse af måleusikkerhed.
- [5] B. N. Brandt og M. K. L. Knudsen, »Kvalitetssikring ved 3D koordinatmåling,« DTU, Lyngby, 1996.

## 8 Læringsudbytte

Dette undervisningselement omhandler kalibrering af koordinatmålemaskiner som benyttes til geometrisk opmåling af emner. Efter at have gennemgået dette undervisningselement vil den studerende have opnået:

1. Kritisk tilgang til måling med koordinatmålemaskiner
2. Kendskab til målefejl ved brug af koordinatmålemaskiner
3. Viden om hvordan en koordinatmålemaskine verificeres og kalibreres
4. At kunne identificere de største kilder til usikkerhed på en måling foretaget med en koordinatmålemaskine
5. Kendskab til relevante ISO GPS-standarder
6. Kendskab til hvordan sporbarhed opnås for koordinatmålemaskiner
7. Kunne forklare muligheder og begrænsninger ved målinger foretaget med en koordinatmålemaskine