

# Handlingsplan for det metrologiske hovedområde, Længde

17. september 2007

Ref 9441 AK

Rapport nr. DFM-2007-R13

Udarbejdet af

Anders Kühle, Kim Carneiro  
Dansk Fundamental Metrologi A/S

Leonardo de Chiffre, Hans Nørgaard Hansen  
Institut for Produktion og Ledelse, Danmarks Tekniske Universitet

Kristian Eldam  
Teknologisk Institut

**Dansk Fundamental  
Metrologi A/S**

Matematiktorvet 307  
DK-2800 Kgs. Lyngby

Tel +45 4593 1144

Fax +45 4593 1137

[www.dfm.dtu.dk](http://www.dfm.dtu.dk)

# Indhold

1	Sammenfatning og konklusion .....	3
2	Indledning.....	4
3	Beskrivelse af hovedområdet længde.....	5
3.1	Det metrologiske felt <i>Grundlæggende længdemålinger</i> .....	6
3.2	Det metrologiske felt <i>Geometri</i> .....	7
3.3	Mikro/nano.....	10
3.4	Hovedområdets målediscipliner.....	12
4	Behovs- og ressourceopgørelse.....	17
4.1	Behovsopgørelser .....	17
4.2	Ressourceopgørelser.....	18
5	Forslag til indsatsområder .....	21
6	Forslag til etablering af nationale primær- og referencelaboratorier .....	23
7	Økonomiske konsekvenser af forslagene .....	24
8	Appendikser .....	25
8.1	DANAK akkrediteringer indenfor hovedområdet <i>Længde</i> .....	25
8.2	MRA: Appendiks B.....	26
8.3	MRA: Appendiks C.....	27

# 1 Sammenfatning og konklusion

Handlingsplanen beskriver det metrologiske område længde og det udvikling siden sidste plan blev udarbejdet i 1998.

## Udviklingen

Både inden for grundlæggende længdemålinger og inden for sammensatte geometriske målinger har der været en kontinuert udvikling i behovet for større nøjagtighed og for større kompleksitet i målingerne. For eksempel er målinger af fri-form overflader blevet efterspurgt.

Derimod har udviklingen i mikro- og nanoteknologien givet anledning til markant nye behov, hvorfor dette foreslås som et nyt metrologisk felt.

Også inden for opmåling af større emner, for eksempel møllevinger har der været en udvikling, men det skønnes ikke nødvendigt, at etablere nationale målefaciliteter til dette i Danmark

Planen beskriver derfor i detaljer, hvorledes mikro- og nanometrologien kan udvikles, for at understøtte det stigende antal af små innovative virksomheder, der er opstået her.

## Planens forslag.

Inden for hvert af de ti grupper af målestørrelser, som planen opdeler hovedområdet i, gives forslag til udviklingen af dansk metrologi, så de beskrevne behov kan tilfredsstilles. Det bemærkes, planen bygger på en fortsat stærk afhængighed af udenlandske metrologiinstitutter.

De nationale kompetencer inden for hovedområdet findes på Dansk fundament Metrologi, Center for Geometrisk Metrologi, der er tæt tilknyttet til Danmarks Tekniske Universitet, og Teknologisk Institut. De opererer to nationale metrologiinstitutter, benævnt DFM og NGM; og det foreslås at disse to slås sammen til et samlet ét Dansk Primærlaboratorium for Længde DPLL, hvor de begrænsede ressourcer bedre vil kunne udvikles.

## Planens økonomiske konsekvenser

Planens gennemførelse kræver en tilførsel af offentlig finansiering på 3,3 millioner kr. til dækning af omkostningerne ved at drive DPLL samt et engangsbeløb på 15,5 millioner kr. til nyt udstyr.

## 2 Indledning

Denne handlingsplan erstatter end sidste "Handlingsplan for det metrologiske hovedområde længde" fra 1998. Siden denne blev skrevet er der sket en udvikling især mod mindre dimensioner, og flere komplekse måleprincipper kommet til. Der er desuden siden 1998 foregået en konsolidering af de akkrediterede laboratorier, hvis antal er gået fra 11 til 7 i 2007.

I handlingsplanen af 1998 blev det foreslået at NGM blev udpeget som dansk primærlaboratorium for feltet *Geometri*, hvilket er sket, idet DFM på det tidspunkt alene var primærlaboratorium for feltet *Længdemålinger*. Herudover er en stor del af forslagene til indsatsområder blevet realiseret. Nogle er stadig relevante, blandt andet er der stadig behov for forskning i funktionsrelaterede parametre og for at få udbygget sporbare metoder i mikro- og nanometerområdet.

Blandt konkrete indsatsområder fra 1998 planen kan nævnes:

Der er etableret et fokuseret *program for udvikling af industriens kompetence indenfor geometriske produktspecifikationer (GPS)* ved Dansk Standard.

*Akkrediteret prøvning ved koordinatmåling:* NGM er blevet akkrediteret til kalibrering af koordinatmålemaskiner, kugle- og hulplader. Der er blevet udviklet en opto-mekanisk hulplade til kalibrering af optiske koordinatmålemaskiner, og den er blevet testet i forbindelse med en international sammenligningsmåling i CIRP regi.

*Udvikling af model til usikkerhedsbudgettering ved koordinatmåling.* Der er arbejdet med usikkerhedsbestemmelse ved koordinatmåling gennem anvendelse af simulering ligesom der er udviklet metoder baseret på ISO 15530-3. Sidstnævnte er verificeret ved optiske målinger og ved måling af friform.

*Kalibreringsnormaler og metoder til tredimensional kalibrering i mikro- og nanometerområdet:* Der er udviklet metoder til fuld kalibrering af et metrologisk atomic force mikroskop, således at overfladeparametre så som sidevægshældning og –ruhed kan måles sporbart.

Der er gennemført undersøgelser vedr. kalibrering af Skanning Elektron Mikroskop med udvikling af en z-kalibreringsnormal for sporbarhedsetablering i 3D.

*Udvikling af interferometriske metoder til karakterisering af formfejl af måleklodser:* Med de seneste udstyrsopgradering er sådanne målinger mulige, men efterspørgslen fra industrien har været begrænset.

Forskning inden for bølglængdenormaler baseret på atomare og molekylære absorptionsspektre: Dette er iværksat inden for hovedområdet optik (feltet radiometri).

Der er således behov for at tænke disse ind i inddelingen af området. Det danske metrologiske system opdeler hovedområdet *Længde* i de to felter *Længdemålinger* og *Geometri*, se Tabel 2

### 3 Beskrivelse af hovedområdet længde

Feltet *Længdemålinger* beskrives i 3.1 som *Grundlæggende længdemålinger*. Det omfatter de aktiviteter, der vedrører definitionen af meteren, etablering og vedligehold af primærnormaler og andre bølgelængdenormaler gennem stabiliserede lasere, samt videregivelse af sporbarhed fra det primære niveau.

**Tabel 1. Felter og arbejdsgrupper for hovedområdet længde**

DANIAMet	EURAMET	CIPM (arbejdsgrupper) <sup>1</sup>
Grundlæggende længdemålinger	(ingen)	CCL Working Group for the Mise en Pratique (MePWG) CCL-CCTF Frequency Standards Working Group
Geometri	(ingen)	CCL Working Group on Dimensional Metrology (WGDM) - herunder bl.a. Discussion Group on Nanometrology (DG7)

Hovedområdet er opdelt i tre felter, se Tabel 2: *Grundlæggende længdemålinger* som beskrives i afsnit 3.1 og *Geometri* som beskrives i 3.2; som noget nyt er *Mikro/nano* medtaget som felt og beskrevet i afsnit 3.3, idet dette felt adskiller sig fra de to øvrige felter i målemetoder og apparatur. For en given målestørrelse gælder det ofte, at den må angribes med vidt forskellige teknikker afhængig af dimensioner, materiale, eller andre omstændigheder. I afsnit 3.4 opdeles hovedområdet derfor i måledisciplinerne interferometri, hvor måleresultaterne relateres direkte til lysbølgelængder, samt i geometriske målinger, der afspejler brugen af to, et endeligt antal, eller principielt uendelig mange punkter til fastlæggelse af målestørrelsen.

Internationalt sker der også en udvikling inden for *lange afstande*, hvilket dækker over afstande på omkring 1 m, der ikke kan håndteres i en koordinatmålemaskine, til afstande på adskillige tusinde km, som er relevant ved satellitmålinger. Eksempler på en stor dansk industri, der har behov inden for dette område er opmåling af møllevinger; men det skønnes dog ikke, at der her er behov for en indsats på nationalt niveau inden for metrologi.

---

<sup>1</sup>

**Tabel 2. Hovedområdet: Længde**

Felt	Vigtigste målestørrelser	Typisk måleområde	Vigtigste normaler og måleudstyr
<b>Grundlæggende længdemålinger (3.1)</b>	Længde	0,5 mm - 300 mm	Iod-stabiliseret he-ne laser. Måleklodsinterferometer
<b>Geometri (3.2)</b>	Størrelse og afstand (3.2.1)	0,5 mm - 1000 mm 0,01 mm - 20 m 20 mm - 1000 mm 5 mm - 250 mm 1 mm - 500 mm 0 mm - 1000 mm 0 mm - 100 mm	Måleklods Stregmål Step gauge Referencering Referencedorn Abbe maskine Elektromekanisk komparator
	Vinkel(3.2.2)	0 - 90 grader 0 - 360 grader	Retvinkelnormal Vinkelmåleklods Polygon
	Andre geometriske størrelser (3.2.3) form af en linie, uafh. og afh. af reference, form af overflade uafh. og afh. af reference, retning, beliggenhed, cirkulærkast, to-talkast, referencer	10 nm - 100 mm 1 mm - 100 mm 1 mm - 20 mm 0 m <sup>3</sup> - 1 m <sup>3</sup>	Rundhedsnormal Cylindernormal Måleplan Koordinatmålemaskine
	Overfladebeskaffenhed (3.2.4) ruhedsprofil, bølgethedsprofil, primærprofil	20 nm - 25 mm	Ruhedsnormal
	Kanter (3.2.5)	0,05 mm - 20 mm 0,01 mm - 20 mm	Rundingslære Profilprojektor
	Lagtykkelse (3.2.6)	0,01 mm - 1 mm	Kalibreringsfolie
	Gevind (3.2.7)	M1 - M200 M1 - M200 0,05 mm - 2 mm	Gevindring Gevinddorn Gevindmåletråd
	Tandhjul og manganot (3.2.8)	modul 0,4 - 10 mm diam. 5 - 500 mm	Mastertandhjul
<b>Mikro-Nano (3.3)</b>	<i>Gentagelsesafstand</i> <i>Stephøjde</i> <i>Liniebredde</i> <i>Overfladebeskaffenhed</i>	<i>50 nm – 10 µm</i> <i>10 nm – 3 µm</i> <i>50 nm – 30 µm</i> <i>0,2 nm – 500 nm</i>	<i>Scanning probe mikroskop, interferensmikroskop, diffraktionsmikroskop, scanning elektronmikroskopi</i>

### 3.1 Det metrologiske felt *Grundlæggende længdemålinger*

I 1983 vedtog den 17. Generalkonference for Mål og Vægt (CIPM) at definere meteren som *den strækning lyset bevæger sig i det tomme rum på 1/299792458 sekund*. Denne definition er reelt en fastsættelse af lysets

hastighed  $c$ . I praksis realiseres meterdefinitionen gennem bølgelængden af en frekvensstabiliseret laser, idet vakuumbølgelængde ( $\lambda_0$ ) og frekvens ( $f$ ) er relateret til lysets hastighed gennem relationen  $\lambda_0 \cdot f = c$ . Det Internationale Kontor for Mål og Vægt (BIPM) publicerer i *Mise en Pratique* for meterdefinitionen en fortegnelse over atomare- og molekylære absorptionslinier samt retningslinier for konstruktion af lasere stabiliseret til disse linier. Som primærnormal for længde anvendes normalt en laser, der er opbygget i henhold til disse retningslinier. Sporbarhed blev tidligere sikret ved at frekvensen af én laser blev målt med sporbarhed til en tidsnormal (et cæsium ur) ved hjælp af en såkaldt frekvenskæde, hvilket var en meget ressourcetrækkende måling. Sporbarhed for de øvrige primærnormaler, som var konstrueret efter samme retningslinier, blev sikret ved indbyrdes sammenligninger arrangeret af BIPM. De sidste ca. 5 år har det i adskillige laboratorier været muligt at kalibrere en lasers frekvens direkte op imod en tidsnormal via en såkaldt optisk frekvenskam.

Sporbarhed videregives ved interferometrisk kalibrering af måleklodser af stål, hårdmetal eller keramik. I en sådan kalibrering bestemmes længden direkte med lysbølgelængden som enhed. Kun måleklodser af højeste nøjagtighedsklasse (00 eller K) kalibreres interferometrisk. Videregivelse af sporbarhed fra disse sker ved mekaniske sammenligninger.

## 3.2 Det metrologiske felt *Geometri*

Det metrologiske felt Geometri er i det følgende beskrevet ud fra en opdeling af størrelser i overensstemmelse med ISO-standardsystemet for Geometriske Produkt Specifikationer (GPS).

### 3.2.1 Størrelse og afstand

Størrelse og afstand omfatter målestørrelser som diameter, længde, afstand mellem ens-vendte eller modsat vendte flader, indvendige og udvendige mål, etc., og dækker i praksis over området fra brøkdele af mm til km. Af måleudstyr kan nævnes skydelærer, mikrometerskruer, måleure, længdetransducere, linealer, målebånd og laserinterferometre.

Sporbarhed etableres gennem faste normaler som måleklodser, ringe, dorne, spærmål og indstillingsmål. For måleklodser op til 100 mm anvendes elektromekaniske komparatorer, medens længere måleklodser og ringe oftest kalibreres ved vandrette længdemålemaskiner af Abbe typen.

Afstande i forbindelse med landmålingsopgaver bestemmes ved målebånd i forbindelse med triangulering, en fremgangsmåde, som i øvrigt også anvendes til industriel måling i produktion. For afstande på 10-50 km anvendes udstyr baseret på flyvetid af lyspulser, der i princippet giver direkte sporbarhed til meterdefinitionen, men disse metoder har fået mindre betydning efter fremkomsten af det satellitbaserede GPS system.

Der kan spores en tendens til, at der bliver lagt mere vægt på kalibrering til en specifik anvendelse og tilsvarende mindre vægt på generel kalibrering og på den hertil knyttede generelle tolerancesætning med opdeling af

måleudstyr efter klasser. En sådan udvikling forudsætter imidlertid en stadig større opmærksomhed på analyse af måleusikkerheder, såvel i kalibreringssituationer, som ved industrielle brugsmålinger.

### **3.2.2 Vinkel**

Herunder hører de to matematiske begreber, som er knyttet til SI enhedssystemet, nemlig plan vinkel og rumlig vinkel. Af disse er det kun begrebet plan vinkel, som finder udbredt metrologisk anvendelse.

Til måling af plan vinkel er de nøjagtigste og mest stabile normaler vinkelmåleklodser, som dog ikke har stor udbredelse. Der er ingen danske laboratorier, der kalibrerer vinkelmåleklodser, og kun ét akkrediteret laboratorium anvender dem som referencenormaler. Oftest sker vinkelbestemmelse ved hjælp af visende vinkelmåleudstyr eller ved koordinatmåleteknik. I sidstnævnte tilfælde anvendes ofte todimensionale udstyr, som fx målemikroskop.

### **3.2.3 Andre geometriske størrelser**

Størrelserne i denne kategori omfatter geometriske tolerancer som defineret i ISO 1101 og tilknyttede standarder. Kategorien omfatter måling af radius af linie eller flade som f.eks. defineret i forbindelse med rejfninger eller på spåntagende værktøjer.

Linieform omfatter rethed, rundhed og profilform og kan angives både afhængigt og uafhængigt af reference. Disse størrelser måles med dedikerede måleinstrumenter som formtester, rundhedsmåler etc. Rethedsnormaler i form af retskinner udgør de materialiserede normaler for rethed. Indenfor rundhed er de anvendte normaler rundhedsnormaler med minimal rundhedsafvigelse og de såkaldte Flick-normaler til kalibrering af den dynamiske forstærkning.

Overfladeform omfatter planhed, cylindricitet, fladeform og konus og kan ligeledes angives både afhængigt og uafhængigt af reference. Specielle måleindretninger og formtestere er de typiske måleudstyr til bestemmelse af disse geometriske størrelser. Planglas er de hyppigst anvendte normaler indenfor planhed. Normaler indenfor cylindricitet er typisk højpræcisions cylindre eller en kombination af rundhedsnormaler og rethedsnormaler.

Retning er defineret som vinkelrethed, vinkelrigtighed og parallelitet. Disse størrelser måles typisk ved specielle måleindretninger og med omslagsmetoder. Rette vinkler og andre vinkelmål ses ofte i form af vinkelnormaler.

Beliggenhed omfatter position, koaksialitet, koncentricitet og symmetri. Måling af disse størrelser udføres typisk på koordinatmålemaskiner. Kategorien omfatter desuden cirkulært og totalt kast.

Referencer og referencesystemer indgår ligeledes i kategorien og danner forudsætningen for overhovedet at kunne tale om afhængige geometriske størrelser.

Koordinatmålemaskiner anvendes i stigende grad til opmåling af de beskrevne geometriske størrelser.

#### **3.2.4 Overfladebeskaffenhed**

Størrelserne i denne kategori omfatter tolerancer som bl.a. defineres i en række ISO-standarder vedrørende overfladebeskaffenhed i relation til ruhedsprofil, bølgethedsprofil henholdsvis den primære profil samt en standard vedrørende overfladedefekter. En revision af ISO-standarderne på området med udgangspunkt i 3D ruhedsparametre er i gang. Overfladeprofiler kvantificeres ved brug af en række parametre som beskrevet i standarderne ud fra målinger med ruhedsmålere af forskellig art, hvoraf den mest udbredte type er tastinstrumenterne. Der anvendes forskellige fysiske kalibreringsnormaler til brug ved kalibrering af tastrundingsradius, forstærkninger, filtre og parameterberegninger. Ofte anvendes normalerne til en slags totalcheck af apparaterne.

#### **3.2.5 Kanter**

Kanter er defineret i forbindelse med rundinger, rejfninger og grater, og beskrives i en enkelt ISO-standard. Verifikation af kanter foretages typisk ved brug af rundingslærere, på profilprojektorer, og lignende.

#### **3.2.6 Lagtykkelse**

Mange overfladeprocesser er tolerancesat med både en øvre og en nedre grænse for lagtykkelse. Da måleusikkerheden ofte er relativ stor, og da det er tykkelser fra typisk 10 nm til ca. 200  $\mu\text{m}$ , der skal bestemmes, bliver intervallet til rådighed for godkendelse af en overfladebehandling ofte ret snævert.

Måleteknikken formuleres på dette felt til dels materialespecifikt. For eksempel præpareres tværsnit i metalliske og andre faste materialer ved hjælp af traditionelle metallografiske metoder i intervallet 1-200  $\mu\text{m}$ . Tilsvarende gælder, at lagtykkelsen, når de fysiske betingelser i øvrigt taler for det bestemmes ved en række alternative teknikker, som inddrager anden metrologi end den rene længdemåleteknik. Sådanne teknikker omfatter lysmikroskopi, coulometri, gravimetrisk bestemmelse (efter kemisk afstripping), røntgenspektrometri og SEM (Scanning Elektron Mikroskop). For sådanne teknikker er sporbarhedskæderne oftest ret ringe beskrevet.

For polymermaterialer og specielt multilags emballager sker præparationen i en frysemikrotom; og med hensyn til polymermaterialer og specielt multilags emballager sker præparationen i en frysemikrotom og udmåling med samme metoder som ovenfor

Elektronikindustrien kontaktag bliver tyndere og tyndere for eksempel i høreapparat- og headset industrien. Der er et stort behov for at få lagtykkelser opmålt i SEM ind i en velbeskrevet metrologisk sammenhæng.

For måling på emner med ret store plane overflader kan man benytte lagtykkelses-måleapparater med forskelligartede transducerprincipper. For disse er folier af polymert materiale den overvejende forekommende bærer af sporbarhed. Kalibreringsfolier kan kalibreres med måleevne starten-

de fra 0,5  $\mu\text{m}$ . Slid og deformation af folierne er dog et væsentligt problem i praktisk industriel anvendelse.

Lagtykkelsesmåling er nært forbundet med statistiske beslutningsregler, idet hovedparten af overfladeprocesser resulterer i uens lagtykkelse.

### **3.2.7 Gevind**

Gevind er udpræget tredimensional geometri. Ud over de rent metrologiske forhold, er gevind kendetegnet ved, at matematisk bearbejdning af resultaterne er påkrævet, idet de opmålelige størrelser kun indirekte er knyttet til den egentlige funktion af gevindet.

I praktiske industrielle målinger er faste gevindkontrolværktøjer, gevindorne og gevindringer det overvejende måleudstyr. Kalibrering sker ved hjælp af gevindmåletråde, gevindinstillingsnormaler o. lign. hjælpeudstyr på længdemålemaskiner. Optisk koordinatmåling i målemikroskop på projekteret udvendigt gevind er ligeledes en nyttig teknik. Delediameter, flankvinkel og stigning er væsentlige kvalitetsparametre.

### **3.2.8 Tandhjul og manganot**

Tandhjul og manganoter er defineret i internationale og udenlandske nationale standarder, og anvendes i næsten alle former for transmission. Den geometriske karakterisering af disse elementer omfatter profilform, delingsfejl, rundløbsfejl m.m. Opmåling af disse geometriske størrelser foregår typisk på specielle tandhjuls målemaskiner eller koordinatmålemaskiner. Disse vil typisk være udstyret med rundbord. Normaler i form af master-tandhjul er sjældne. Målemaskinen bruges ofte som reference i målingen.

## **3.3 Mikro/nano**

Mikro og nanoområdet dækker over en bred vifte af geometriske målestørrelser, der har det tilfælles at de udmåles med særlige ikke-klassiske metoder som for eksempel atomic force mikroskopi.

### **3.3.1 Mikro elektromekaniske systemer (MEMS)**

Mikro-elektromekaniske systemer dækker over mekaniske devices fabrikeret ved halvleder, tynd- og tykfilmsteknologier og som har typiske kritiske dimensioner i 10-100  $\mu\text{m}$  intervallet integreret med elektroniske komponenter fremstillet ved Silicium-baserede teknologier (litografi, ætsning etc.). Eksempler er mikro-accelerometre (f.eks. til kollisiondetektion) samt en vifte af mikro-elektromekaniske sensorer (f.eks. tryk sensorer). Behovet for geometriske målinger er i 1-100  $\mu\text{m}$  området. I forhold til traditionelle halvleder komponenter, der i det væsentligste er 2 dimensionale har mange MEMS strukturer et højde-bredde forhold, større end 1, hvilket gør dem til 2½D-3D strukturer og gør det vanskeligt at benytte traditionelle overfladekarakteriseringsteknikker. De anvendte fremstillingsprocesser resulterer i lagdelte strukturer, hvor forholdsvis mange detaljer er svært eller umuligt tilgængelige med eksisterende måleprincipper.

### 3.3.2 Mikrofluid systemer

Mikrofluid systemer udgør den væske-håndterende infrastruktur i lab-on-a-chip eller MEMS systemer. Ofte er et antal kanaler og reservoirer ætset i en silicium chip, der enten tjener som master for en sprøjttestøbeform eller benyttes direkte. I andre tilfælde er en sprøjttestøbeform lavet ved komplekse proceskæder, der eksempelvis kan omfatte mikrofræsning, galvanoformgivning, mikrognistbearbejdning, færdige komponenter i polymermaterialer. Typiske Kanalbredder/dybder er under 0,5 mm, og formen af kanalerne kan variere fra rette linier til komplekse geometrier afhængig af kanalens formål. Der er således tale om 2½D og 3D strukturer som kræver karakterisering med 3D metoder eller udvidede 2½D metoder. På universitetsniveau er Danmark langt fremme med design og fremstilling af MEMS og mikro-fluid teknologier, og flere store virksomheder samt mange nye små virksomheder baserer kommende produkter på disse teknologier.

### 3.3.3 Nanopartikler

Både etablerede store danske virksomheder samt nye mindre danske virksomheder udvikler og sælger produkter baseret på nanopartikler. Det er især inden for katalyse og overfladebehandling at disse virksomheder arbejder. Endvidere spiller nanopartikler en uønsket rolle i renrumsmiljøer i f.eks. medicinalindustrien. Egenskaber der kan adresseres med geometrisk måleteknik og som er vigtige at kende er partikel diameter, dispersion, dækningsgrad, agglomeratstørrelse og facon – altså en blanding af 2D og 2½D målestørrelser. En 3D karakterisering af dimension og form af nanopartikler ses som én af de væsentligste udfordringer internationalt. Det skal bemærkes, at der er tale om forskellige karakteriseringer afhængig af, om der er tale om geometriske, fysiske, kemiske, biologiske eller toksikologiske egenskaber.

### 3.3.4 Mikrooptiske komponenter

Mikrooptik omfatter blandt andet chip baserede optiske komponenter (herunder halvleder lasere og fotoniske strukturer), optiske fibre, gitre, mikrolinser, mikrospejle. For mange af disse komponenter er ruhed, strukturhomogenitet, formafvigelse, periode, vinkler mellem mikrostrukturer, liniebredde og eksponeringsdybde afgørende parametre. Der er en vifte af danske virksomheder, der udvikler og producerer mikrooptiske komponenter. Målinger foretages i dag med atomic force mikroskop, optisk målemikroskop, interferensmikroskop, SEM og til dels med konfokalt laserscanning mikroskop. Bortset fra atomic force mikroskop er sporbarhed stort set fraværende.

På grund af denne tekniks begrænsninger hvad angår måletid og målemiljø er der behov for udvikling af nye teknikker, som ikke har de samme begrænsninger. Her kan den nyudviklede metode Optical Diffraction Microscopy blive interessant, idet den er væsentlig hurtigere og mere robust end AFM teknikken. Desuden er den unik, fordi det er muligt at måle på indlejrede og flerlagsstrukturer.

### 3.3.5 Mikromekaniske komponenter

Mikromekaniske komponenter kan karakteriseres ved dimensioner under 2-3 mm og med mindst én kritisk dimension under 1 mm. Eksempler kan

være mikroskruer, mikrofjedre, plastkomponenter etc. Anvendelsesområderne for sådanne komponenter er f.eks. høreapparater, implantater, kirurgisk udstyr samt sensorer. I det hele taget er mikromekaniske komponenter ofte en forudsætning for, at andre mikrokomponenter kan integreres med omverdenen og dermed bringes til at fungere. Verifikation af dimensioner og geometrier af sådanne komponenter er essentiel i forbindelse med processtyring og montageprocesser.

### **3.3.6 Nanostrukturerede overflader**

Nanoimprint litografi (NIL) og efterfølgende lift-off, som er under industriel udvikling, fordrer opmåling af lagtykkelser på 10-1.000 nm. Her vil AFM være velegnet. Her kan AFM anvendes til opmåling af strukturer bredde, pitch og højde. Her vil det være ønskværdigt at kunne opmåle en hel wafer, hvorfor ODM vil blive efterspurgt.

Der arbejdes også med udvikling af surface acoustic wave sensorer (SAW), hvor der ved hjælp af (NIL) stemples op til 1.000 strukturer på en wafer. I industrielle anvendelser af SAW er der behov for at kunne verificere strukturdimensioner med +- 5% både på wafer og på stempel. Yields skal være meget høje og kvaliteten meget ensartet hen over en wafer.

## **3.4 Hovedområdet målediscipliner**

Med udgangspunkt i kompetencer og udstyr er det hensigtsmæssigt at opdele hovedområdet i fire målediscipliner:

*Interferometri*, omfattende målinger, der knytter sig til meterdefinitionen, samt interferometriske målinger hvor optisk kompetence er en central forudsætning

*Afstandsmåling*, omfattende længdemålinger, der i princippet involverer bestemmelse af afstanden mellem to punkter

*Koordinatmåling*, omfattende længdemålinger, der beror på fastlæggelse af koordinater for et endeligt antal punkter

*Overflade- og profilmåling*, der sigter mod karakterisering af overflader mm. ud fra principielt uendelig mange punkter.

De anførte måleevner gælder for danske kalibreringslaboratorier, og svarer til state of the art i international metrologi med mindre andet eksplicit er anført.

### **3.4.1 Interferometri**

Ved en interferometrisk længdemåling sættes længden af måleobjektet direkte i relation til bølgelængden af lys, og interferometri er derfor kontaktleddet mellem meterdefinitionen og de praktiske længdemålinger. Reine interferometriske målinger udføres med et specialiseret måleklodsinterferometer for måleklodser af længder op til 100 mm (undertiden 300 mm). For længere måleklodser anvendes oftest en blandingsteknik, hvor

måleklodsens ender aftastes mekanisk, medens tasternes position monitoreres interferometrisk.

Generelt anvendelige laserinterferometre baseret på helium-neon lasere anvendes i stigende omfang på kalibreringslaboratorier og i industrien. Denne udvikling må forventes at fortsætte efterhånden som billigere interferometre baseret på diodelasere bliver tilgængelige.

De største fejlkilder i forbindelse med interferometri knytter sig ikke til den optiske teknik som sådan, men til den indflydelse temperatur, tryk og luftsammensætning har, dels på måleobjektet, dels på luftens brydningsforhold, og hermed på bølgelængden af den anvendte stråling. Måleevnen er fra 0,02 til 0,04  $\mu\text{m}$ .

### **3.4.2 Afstandsmåling**

Afstandsmåling omfatter længdemåling i form af afstanden mellem to punkter. Dette kan gøres på mange måder, og det er i praksis ofte umuligt at videregive sporbarhed direkte. Aftastningen af de to punkter, mellem hvilke der måles, kan ske mekanisk eller optisk, og transducerne kan være kapacitive, induktive, pneumatisk, mv. Rent optiske teknikker, herunder laserinterferometri, anvendes i stigende grad direkte, og der kan i princippet opnås direkte sporbarhed til meteren uden materielle mellemled. Denne direkte sporbarhed følges ikke nødvendigvis af en stor nøjagtighed, idet omgivelsernes indflydelse på lysets bølgelængde kan være vanskelig at bestemme. Man har dog med de såkaldte laser trackers, som tillader kortlægning af rumlige positioner til kalibrering af målemaskiner og værktøjsmaskiner med dimensioner fra 30 cm til 30 m dokumenteret måleusikkerheder på sub-mikrometer niveau. For ikke-optiske målinger - med eller uden optisk aftastning - kommer sporbarheden dog fortsat fra måleklodser og referencerings, og de største usikkerhedsbidrag knytter sig ofte til formfejl på kalibrerings- eller måleobjektet, til elastiske udbøjninger, og til termisk udvidelse. De pt. gældende måleevner inden for størrelse og afstand er ca 0,06  $\mu\text{m}$  for mekanisk sammenligning af måleklodser, 0,6-0,9  $\mu\text{m}$  for kalibrering af referencerings (international state of the art for referencerings er ca 0,2  $\mu\text{m}$ ), og ca. 0,3  $\mu\text{m}$  for kalibrering af finmåleure og lineære transducere med laserinterferometer.

### **3.4.3 Koordinatmåling**

Koordinatmåling omfatter længdemålinger, der beror på fastlæggelse af koordinater for et endeligt antal punkter. Koordinaterne bestemmes ved en aftastning af emnet i bestemte punkter, og efter databehandling beregnes relevante størrelser. Koordinatmålemaskiner opdeles typisk efter det princip, som selve sensoren opererer efter: mekanisk eller optisk. Ved mekanisk koordinatmåling bringes en tast i kontakt med emnet, hvorimod optiske sensorer er karakteriseret ved at være berøringsløse. Koordinatmåling kan foregå i to eller tre dimensioner. Todimensional koordinatmåling ses ved f.eks. målemikroskoper og profilprojektorer men også mere specialiserede optiske koordinatmålemaskiner måler udelukkende i to koordinater. Den typiske koordinatmålemaskine opererer i tre dimensioner og er udstyret med en mekanisk tast.

Koordinatmåling anvendes til bestemmelse af dimensioner, vinkler og formfejl på emner. Koordinatmålemaskinernes store fleksibilitet gør dem i stand til at håndtere et utal af emnetyper og emnestørrelser. Typiske måleopgaver vil omfatte bestemmelse af geometriske standardelementer (cirkel, kugle, cylinder, plan, linie etc.) og bestemmelse af forskellige indbyrdes forhold mellem disse (afstande, vinkler etc.). Mere komplekse emner som tandhjul og frie flader (f.eks. profil af flyvinge) kan dog også med fordel opmåles på koordinatmålemaskiner.

Sporbarheden ved koordinatmåling sikres ved anvendelse af kalibrerede og sporbare normaler. Disse normaler vil typisk være kugler, måleklodser, step gauges, kugleplader, hulplader og laser interferometre. En verifikation af koordinatmålemaskinen efter internationale standarder sikrer overholdelse af givne specifikationer samtidig med at en sporbarhed etableres for netop de gennemførte målinger. Dækkes en stor del af eller hele koordinatmålemaskinens målevolumen er en sådan sporbarheds-etablering 'generel', men sætter ikke brugeren i stand til at opstille usikkerhedsbudgetter. En egentlig kalibrering af koordinatmålemaskiner skal foregå som en opgavespecifik kalibrering, hvor sporbarheden etableres for hver enkelt måleopgave. Hertil anvendes to anerkendte metoder: substitutionsmetoden og usikkerhedsbudgettering. Ved substitutionsmetoden etableres sporbarheden ved opmåling af et kendt og sporbart kalibreret referenceemne med næsten de samme dimensioner og formfejl som emnet, der skal opmåles. Usikkerhedsberegning forudsætter bl.a. bestemmelse af de parametriske fejl med efterfølgende matematisk modellering af koordinatmålemaskinen. Gennem simulering bestemmes de parametriske fejls indflydelse på den angivne måleopgave, hvilket sætter brugeren i stand til at opstille et formelt usikkerhedsbudget.

Ved koordinatmålemaskiner af portaltypen med målevolumen op til  $1 \text{ m}^3$  er en typisk måleusikkerhed for dimensionsmåling i størrelsesordenen 1-2  $\mu\text{m}$ .

Som følge af optiske teknikkers betydeligt større målehastighed, er der en stærk udvikling mod anvendelse af optiske koordinatmålemaskiner, og en ny generation optiske 3D skannere anvendes nu også til koordinatmåling. For at kunne måle fleksibelt, er de såkaldte multisensor-maskiner ofte forsynet med flere optiske sensorer samt med mekaniske taster. Optiske koordinatmålemaskiner er typisk karakteriseret ved måleusikkerheder, der er en faktor 5-10 i forhold til de mekaniske maskiner men udviklingen går mod en væsentlig nedbringelse af dette forhold. Styring af influensparametre såsom emneoverflade og belysning udgør den største udfordring i forbindelse med optisk koordinatmåling.

En nyskabelse inden for koordinatmåling er emnemåling ved hjælp af røntgen med et strålebunt på få  $\mu\text{m}$ . Fordelene ved røntgen frem for mekanisk 3-koordinat eller optisk måling er, at man kan måle alle steder på emnet – uden at destruere emnet. Herudover kan der foretages ikke-destruktiv måling af færdige emner i emballage samt færdigmonterede emner.

#### **3.4.4 Overflade- og profilmåling**

Overflademåling omfatter længdemålinger, der sigter mod karakterisering af overflader ud fra principielt uendelig mange punkter. Punkterne bestemmes ved en aftastning af emnet langs en linie eller en cirkel, eventuelt ved gentagne parallelle aftastninger. De aftastede punkter udgør et signal som behandles ved filtrering o.lign. til udregning af parametre. Ruhedsmålere, profilometre, rundhedsmålere og formtestere er typiske udstyr til overflademåling. Udstyr til overflademåling er ofte mekaniske eller optiske instrumenter.

Overflademåling anvendes til at bestemme ruhed, rundhed, bølgethed, rethed, planhed, cylindricitet, 3D-ruhed, vinkelrethed, koncentricitet, koaksialitet samt lagtykkelse. Til beskrivelse af overfladeegenskaber anvendes et forholdsvis stort antal parametre, og dette afspejler et behov for detaljeret kendskab til sammenhængen mellem de geometriske egenskaber og funktionsegenskaberne.

Sporbarheden ved overflademåling sikres ved anvendelse af kalibreringsnormaler. Disse normaler vil dels være dybdeindstillingsnormaler og dels parameternormaler. Den nøjagtigste kalibrering af normaler opnås ved brug af særligt følsomme instrumenter anvendt i forbindelse med fejlseparation. Indenfor ruhedsmåling og rundhedsmåling opnås der typisk for de udregnede parametre usikkerheder på 1-8% ved måling på kalibreringsnormaler og på 2-20% på industrielle emner.

Indenfor de seneste år har der udviklet scanning probe instrumenter (specielt atomic force mikroskoper), der giver mulighed for at udmåle overflade topografi i nanometerområdet. Anvendelse af disse instrumenter er i dag ved at bevæge sig fra forskning ud i industrien, herunder medicinalindustrien, der interesserer sig for de funktionelle egenskaber af overflader og membraner. Denne udvikling forventes at fortsætte, og metoder til sporbarhed er udviklet bl.a. gennem EU støttede projekter, ligesom der er indledt arbejde i ISO regi vedrørende standardisering.

#### **3.4.5 Mikro/nano**

Ovennævnte målediscipliner er alle blevet undersøgt og anvendt i forbindelse med mikro/nano området. Mikro/nano området er karakteriseret ved, at der i enkeltprodukter/komponenter ofte er integreret målestørrelser, der spænder over mange dekader på længdeskalaen. F.eks. vil der i et mikrofluid system kunne være væsentlige karakteristiske dimensioner i intervallet 3-5 mm (radius af kanالرundinger), 200-1000  $\mu\text{m}$  (kanalbredde), 10-20  $\mu\text{m}$  (mikrostrukturer til blanding af væsker), 10-50 nm (overfladeruhed af kanalvægge) og 10-20 nm (planparallelitet af makroskopiske dele). Dette stiller endog meget store krav til valg af måleprincip og måleinstrument, og det vil ofte være umuligt at kunne finde én løsning, der dækker alle behov. I mikro/nano området besværliggøres målinger derudover ofte af det såkaldte aspekt forhold (højde/bredde forholdet af en detalie). Det er meget vanskeligt at måle meget høje og smalle strukturer med absolutte dimensioner i  $\mu\text{m}$ -området.

Til måling anvendes p.t. overfladeinstrumenter, specielle koordinatmålemaskiner samt SEM. EU-forskningsprojekter er i gang med det formål at udvikle en ny generation koordinatmålemaskiner med sensorer baseret på AFM teknologi m.v. Disse maskiner forventes at muliggøre ægte 3D målinger med sub-mikrometer opløsning i alle tre retninger samt sub-mikrometer måleusikkerhed. Inden for alle disse måleprincipper er sporbarhedsetablering og kalibrering en stor udfordring.

## 4 Behovs- og ressourceopgørelse

### 4.1 Behovsopgørelser

#### 4.1.1 Industriel anvendelse

Den generelle tendens er at dimensioner bliver mindre og mindre og at overfladeegenskaber og -strukturer på mikro- og nanometer skala bliver mere og mere vigtige for produktets funktion. Ud over at kunne måle de stadig mindre dimensioner er der også behov for at kunne fastlægge sammenhænge mellem dimension, geometri og topografi og andre mikro/nano-egenskaber til funktionalitet. Efterhånden som beregning og fremstilling af friform overflader af både små og store objekter er blevet muligt er behovet for at få karakteriseret disse former øget. Mange optiske komponenter, hvor danske virksomheder er førende, hører til denne kategori. Der er i øvrigt behov for at opbygge viden om røntgenmålemaskiner og vurdere og dokumentere anvendeligheden af disse.

I den globaliserede økonomi bliver kalibrering og sporbarhedsetablering for målinger i mikro/nano området en væsentlig konkurrenceparameter. Der vil derfor være behov for ikke alene måleprincipper/udstyr, der kan foretage de ønskede målinger, men i lige så høj grad metoder (kalibreringsnormaler og -rutiner), der kan sikre sporbarheden.

#### 4.1.2 Legal og anden forskriftsmæssig anvendelse

På det legalmetrologiske område finder disciplinerne indenfor det metrologiske hovedområde længde fortsat kun i begrænset omfang anvendelse.

#### 4.1.3 Kalibrering og prøvning

Fire danske kalibreringslaboratorier behøver det højeste nøjagtighedsniveau. Disse laboratorier leverer sporbarhed til den største del af sporbare længde målinger i dansk industri. Kalibrering i forbindelse med koordinatmålemaskiner udføres for ca. 50 danske kunder og et tilsvarende antal efterspørger relaterede ikke akkrediterede kalibreringer. Kalibrering inden for nano-metrologi meget begrænset, men dog eksisterende og stigende.

#### 4.1.4 Forskning

Forskningsaktiviteter vedrører primært følgende områder:

- Afstandsmåling:

Højpræcisionsmålinger i produktionsmiljø

- Koordinatmåling:

Optisk koordinatmålemaskine til anvendelse i produktionen

Multisensor KMM til mikro/nano området

Kalibreringsnormaler til KMM, herunder friform

Sporbarhedsetablering ved måling af dimension og geometri i mikro/nano området (ikke SPM): 2D og 3D SEM m.m.

- Overflademåling:

Optiske teknikker til overfladekarakterisering som for eksempel ruhed på plast.

Nanometrologi til etablering af sporbarhed.

- Tolerancesætning i mikro/nano området med dertil hørende verifikation af tolerancer
- In-process metrologi løsninger til mikro/nano området

Med den seneste udvikling inden for måling af optiske frekvenser vil forbindelsen til definitionen af meteren i nær fremtid blive etableret gennem frekvensmåling af de nuværende længde primærnormaler med sporbarhed til atomare ure. Selvom det formelt vil ændre status for de nuværende primærnormaler til at være overførselsnormaler, vil det ikke have nogen praktisk betydning for etablering af sporbarhed for længde.

Sammenfattende, så er industriens nuværende behov stort set dækket. Kommende behov inden for mikro- og nanoområdet vil behøve opgradering af udstyr både inden for atomic force mikroskopi og inden for optiske teknikker, herunder SEM og andre typer mikroskoper samt koordinatmålemaskiner til mikro/nano. Kommende behov indenfor produktionen vil kræve opgradering af udstyr til afstands- og koordinatmåling: laser trackers, optiske koordinatmålemaskiner, multisensor koordinatmålemaskiner samt CT-skannere.

## 4.2 Ressourceopgørelser

### 4.2.1 Primær- og referencelaboratorier

*Dansk Fundamental Metrologi A/S (DFM)* er det danske primærlaboratorium for feltet *Længdemålinger*, og er som sådant forpligtet til at realisere meterdefinitionen. Instituttet råder over et antal bølglængdenormaler, der er valideret ved internationale sammenligninger med BIPM deltagelse. Sporbarhed videregives som akkrediteret kalibrering med et semiautomatisk TESA måleklodsinterferometer, og instituttet råder over et antal sæt af referencemåleklodser.

Som dansk primærlaboratorium for længdemålinger deltager DFM i det internationale samarbejde, dels gennem deltagelse i EUROMET, dels gennem bi- eller multilaterale sammenligninger og samarbejdsprojekter. Forskningsaktiviteterne er for tiden koncentreret om at stabilisere lasere til molekyler i hulkernefibre. Herved kan opnås mere robuste og kompakte og billigere normaler, der også kan finde anvendelse i andet længdemåleudstyr, f.eks. til landmåling. Dette arbejde foregår sammen Københavns Universitet, DTU og de to danske virksomheder Koheras A/S og Crystal Fibre A/S.

Herudover råder DFM over to atomic force mikroskoper (AFM), med hvilke der tilbydes prøvning samt akkrediteret kalibrering i mikro- og nanomåleområdet. Forskningsaktiviteterne er for tiden rettet mod at etablere direkte sporbarhed i AFM målingerne, mod at kunne måle med nanometer nøjagtighed over større områder og mod at kunne måle flere kritiske dimensioner samt komplekse størrelser som vinkler af mikro- og nanostrukturer. DFM råder også over et optisk diffraktions mikroskop, der bl.a. kan måle dimensioner af refraktive sub-overflade strukturer. DFM har deltaget i flere internationale sammenligninger og deltager i nanometrologigruppen under BIPM's konsultative komité for længde CCL.

Til vedligehold, videreudvikling og forskning indenfor de nævnte områder, afsætter DFM for øjeblikket ca. 3 mandår/år.

*Nationalt Laboratorium for Geometrisk Måleteknik (NGM)* er det danske, primærlaboratorium for feltet *Geometri*, og er som sådan forpligtet til at etablere sporbarhed på de afledte størrelser indenfor feltet. NGM bygger på et samarbejde mellem Center for Geometrisk Metrologi (CGM) på Danmarks Tekniske Universitet (DTU) og Center for Måling og Kvalitet på Teknologisk Institut (TI).

Til kalibrering og prøvning indenfor koordinatmåling råder CGM over fem koordinatmålemaskiner, samt den nationale normal til etablering af sporbarhed. Til kalibrering og prøvning indenfor overfladekarakterisering råder CGM over mekanisk og optisk ruhedsmåleudstyr, et atomic force mikroskop (AFM), samt den nationale normal for ruhed. Til kalibrering og prøvning indenfor rundhedsmåling råder CGM over en højpræcisions-rundhedsmåler med index bord til spindelfejlseparation samt den nationale normal for rundhed.

CGM har et udbredt internationalt samarbejde i CIRP regi, i NORMET, og bilateralt med bl.a. PTB, Zeiss, NPL, og SP, og centerets referencemålinger er valideret ved internationale sammenligninger. Forskningsaktiviteterne dækker for tiden: Kalibrering af koordinatmålemaskiner, long range AFM-CMM, optisk koordinatmåling, sporbarhed af 3D-SEM, kvalitetssikring af mikroproduktion, mikro/nano-koordinatmålemaskine. CGM deltager gennem IPU i to EU-projekter indenfor koordinatmåling: "Transnational Calibration Expert Service" og "Optical 3D metrology – Automated in-line metrology for quality assurance in the manufacturing industry". I mikro/nano området deltager CGM gennem IPL i forskningsprojektet "Universal and flexible co-ordinate metrology for micro and nano components production" samt i det europæiske Network of Excellence "Multi-material micro manufacture (4M)", hvor metrologi er et særligt fokuspunkt.

Til forskning, udvikling og vedligehold indenfor de nævnte områder afsætter CGM en ressource på ca. 10 mandår/år leveret af en gruppe på i alt 9 ingeniører og 4 teknikere. Inden for mikro/nano området forsker IPL i mikro/nano produktion med en indsats svarende til ca. 20 mandår/år.

TI råder blandt andet over den nationale normal for retvinklethed, måleklodskomparator, Abbe vandret længdemålemaskiner, målemikroskoper, laserinterferometre, målebåndskalibrator og formtestere.

Hos TI findes en ressource af 6 årsværk til akkrediteret kalibrering inden for længde og geometri samt udviklingsprojekter inden for området; men kun en megen beskedent del af disse er viet arbejdet inden for NGM. TI har desuden inden for Centre for Microtechnology and Surface Analysis anselige ressourcer til rådighed til udvikling af metoder til produktion og karakterisering inden for mikro- og nanoområdet.

#### **4.2.2 Akkrediterede kalibreringslaboratorier**

Såvel DFM som NGM udfører akkrediterede kalibreringer indenfor deres respektive kompetenceområder. Indenfor det øvrige udbud af akkrediteret kalibrering på længdeområdet er der i de seneste år sket en koncentration, således at det nu er domineret af få store kalibreringslaboratorier, der dels dækker bredt, dels har styrke til fortsat udbygning af deres kompetence. En fortegnelse over akkrediterede kalibreringslaboratorier indenfor længdeområdet findes i 8.1. Udstyrsmæssigt rådes der over et antal Abbe maskiner, elektromekaniske komparatorer, rundhedsmålere, laser interferometre, optiske og mekaniske koordinatmålemaskiner, etc., og der eksisterer planer for yderligere anskaffelser. Herudover er der et antal akkrediteringer, der dækker specialiserede områder, og som til dels er motiveret af interne behov.

#### **4.2.3 Internationale organisationer**

I den europæiske metrologiorganisation EUROMET deltager Danmark (DFM) i den tekniske komité for længde. I CIPM regi deltager Danmark (DFM) i diskussionsgruppen DG7 om nanometrologi under den konsultative komité for længde (CCL), se indledningen i afsnit 2. For tiden koordinerer DFM en pilot-sammenligning, NANO5, inden for nano metrologi området.

Det gensidige anerkendelsesarrangement (CIPM-MRA – Mutual Recognition Arrangement) blev indgået under Meterkonventionen i 1999. Samtlige 65 lande har nu udstillet deres måletekniske kompetencer i en fælles database, som er udgangspunktet for global anerkendelse af kalibreringscertifikater fra nationale metrologi institutter. Især for et lille land som Danmark er det altafgørende at landets nationale metrologi er internationalt anerkendt. Danmarks anmeldte måleevner og deltagelse i MRA anerkendte sammenligninger inden for hovedområdet længde er resumeret i henholdsvis Appendiks 8.4 og 8.2. Informationen er hentet direkte fra Key Comparison Database (KCDB) på BIPM's hjemmeside.

Inden for standardiseringsorganisationerne ISO, CEN og DS fortsætter arbejdet med at støtte den metrologiske udvikling med veldefinerede specifikationer og målemetoder. Der er siden sidste handlingsplan startet nye initiativer i følgende komitéer og arbejdsgrupper: ISO TC229 Nanotechnologies, TC213 og CEN TC 352 Nanotechnologies og DS 418

## 5 Forslag til indsatsområder

Indsatsområderne er valgt med udgangspunkt i de aktuelle samt de forudsete behov for viden, kompetence og faciliteter inden for hovedområdet længde beskrevet i afsnit 4.1. Indsatsområderne er desuden valgt ud fra en afvejning af fordelene ved at etablere nationale kompetencer og faciliteter skal stå i forhold til de investeringer og ressourcebehov der er krævet samt mulighederne for at få behovene dækket i udlandet. Fælles for alle indsatsområderne er, at formidlingen til danske interessenter skal være effektivt – blandt andet gennem etableringen af ét samlet nationalt primærlaboratorium for længde.

Det etablerede program for udvikling af industriens kompetence indenfor geometriske produktspecifikationer (GPS) ved Dansk Standard bør styrkes og udbredes.

*Mikrocomputertomografi.* Der bør etableres en videnbase omkring disse nye Röntgen-stråle baserede 3D målesystemer. Videnbasen skal omfatte vurdering af måleområde, usikkerhed, kravspecifikation og sikkerhedsrisiko (pga. strålingen). Der bør fokuseres på anvendelsen af teknologien i mikro/nano området, herunder på problematikken omkring sporbarheds-etablering.

*Optisk koordinatmetrologi.* Der bør udvikles instrumenter, metoder og tilhørende kalibreringsnormaler og –procedurer til understøttelse af optisk koordinatmetrologi i industrielle applikationer.

*Multisensorkoordinatmetrologi.* Der bør udvikles instrumenter, metoder og tilhørende kalibreringsnormaler og –procedurer til understøttelse af multisensorkoordinatmetrologi i industrielle applikationer.

*In-process metrologi.* Der bør udvikles metoder til metrologisk understøttelse af fabrikationsprocesser, f.eks. til fræsning af friformoverflader med tolerancer i mikro/nanoområdet.

*Maskinkalibrering ved brug af laser trackers.* Der bør etableres viden og erfaring omkring anvendelse af laser trackers til kalibrering af koordinatmålemaskiner m.m. herunder specielt optiske og multisensor maskiner.

*Mikro/nano – verifikation og tolerance.* Med udgangspunkt i anerkendte metoder til måling og kalibrering i mikro/nanoområdet bør der nu arbejdes med tolerancesætning og verifikation med henblik på specifikation over for underleverandører samt dokumentation fra samme.

*Mikro/nano - 3D kalibrering af mikro KMM.* Udvikling af kalibreringsnormaler og -metoder til mikro koordinatmålemaskiner for blandt andet fri-form overflader.

*2D SEM.* Sporbarhed bør i langt højere grad end nu integreres i SEM målinger. Der bør etableres et samarbejde mellem det danske primærlaboratorium for længde og DTU's nye elektronmikroskopcenter, med henblik på at få metrologien bragt ind i forskningen inden for SEM, således at den i fremtiden bliver en naturlig del af SEM målinger for danske virksomheder.

Endvidere skal der forskes i hvorledes SEM kan integreres i virksomheders produktionsmiljø.

*3D SEM.* Stereo SEM metoden bør udvikles og gøres sporbar.

*Funktionelle overflader.* Arbejdet med at korrelere overfladers funktionelle egenskaber med de strukturelle forhold fortsættes. I denne forbindelse gennemføres arbejde med henblik på at opnå en rationalisering af det store antal af eksisterende ruhedsparametre.

*Udvikling af hurtige optiske teknikker.* Teknikker som interferensmikroskopi, konfokale mikroskopi samt optisk diffraktionsmikroskopi bør bringes ind i metrologiske rammer. Nye relaterede teknikker bør udvikles, for at kunne opnå hurtige sporbare målinger i mikro/nanoområdet.

## 6 Forslag til etablering af nationale primær- og referencelaboratorier

For tiden er hovedområdet længde repræsenteret ved primærlaboratorier for de to felter, nemlig:

Dansk Fundamental Metrologi (DFM) for feltet længde

Nationallaboratorium for feltet Geometriske Målinger (NGM), hvor NGM er et samarbejde mellem Center for Geometrisk Måleteknik ApS (CGM) og Teknologisk Institut.

Der var ved sidste handlingsplan er klar adskillelse mellem kompetencerne på de tre partnere, idet DFM alene beskæftigede sig med interferometriske længdemålinger, mens NGM's partnere fortrinsvis koncentrerede sig om mekaniske målinger. Siden er der imidlertid sket en udvikling, hvor optiske målinger baseret på lasere har fundet indpas i CGM's portefølje og derfor motiverer et tættere samarbejde mellem DFM og CGM; og alle tre parter beskæftiger sig med målinger i mikro-nanoområder, som er foreslået som et ny metrologisk felt. Herudover har TIs aktiviteter ændret karakter væk fra at beskæftige sig med geometrisk metrologi til fortrinsvis at beskæftige sig med produktions- og karakteriseringsmetoder inden for mikro- og nanoteknologi.

Det foreslås derfor, at der skabes et Dansk Primærlaboratorium for Længde, (DPLL) ved sammenlægning af to eksisterende primærlaboratorier DFM og NGM. Herved vil man få bedre muligheder for at dyrke det samarbejde, der er opstået som følge af nye fælles interesser. Samtidigt vil DPLL bedre end tidligere kunne tegne længdemetrologi udadtil, både i Danmark, men i sær i de udenlandske organisationer EURAMET og Meterkonventionen.

DPLL forventes at få en tilsvarende organisation som DPLA, DPLE og DPLEC. Uden at være juridiske personer er disse samarbejder mellem to partner, som har en fælles adresse og kontaktperson samt ledes af en styregruppe. Der udarbejdes en samlet forretningsplan for primærlaboratoriets aktiviteter, og det er det samlede primærlaboratorium, der anmeldes til for eksempel EURAMET og Meterkonventionen. Det er således en lidt strammere organisation end den, der for øjeblikket gælder for NGM.

## 7 Økonomiske konsekvenser af forslagene

**Tabel 3. Den økonomiske dimension af de foreslåede indsatsområder og omorganiseringer inden for længde**

Lab. /område	Omkostninger for primær og referencelaboratorier (Mkr./år)		Offentlig finansiering af omkostninger til primær og reference laboratorier (FIST) (Mkr./år)		Investeringsbehov 2007-2009 (Mkr.)
	2005	Forslag	2005	Forslag	Forslag
DFM - længde	0,3	0,5	0,3	0,3	0,0
DFM – nano	2,6	3,8	1,3	1,9	4,0
NGM/CGM	3,2	3,2	0,0	0,5	11,0
NGM/TI	0,5	1,2	0,3	0,6	0,5

DFMs investeringsbehov svarer til infrastrukturpuljens ansøgning og vedrører et nyt metrologisk SPM.

NGM/CGM investeringsbehov vedrører udover infrastrukturpuljens ansøgning til optiske overflademåleudstyr yderligere et CT-udstyr, laser tracker og en mikro-KMM

Tis investeringsbehov svarer til infrastrukturpuljens ansøgning.

## 8 Appendikser

### 8.1 DANAK akkrediteringer indenfor hovedområdet *Længde*

Akkr.nr.	Titel	Laboratorium
22	Kalibrering af elektrisk måleudstyr, vægte, temperatur- og trykmåleudstyr samt geometrisk måleudstyr. Prøvning af emner af fast materiale.	AREPA Test & Kalibrering A/S
200	Kalibrering af proces-, energi-, VVS- og laboratorieteknisk måleudstyr samt præstationsprøvning (herunder måleure, mikrometerskruer og skydelærere).	Teknologisk Institut
255	Kalibrering af jævnspænding, resistans, længde, masse, optisk effekt og akustik, bestemmelse af elektrolytisk ledningsevne af væsker, udmåling af overfladepografi, bestemmelse af pH samt certificering af referenceopløsninger	Dansk Fundamental Metrologi A/S
273	Kalibrering af ruheds- og rundhedsnormaler, ruhedsmålere, kugleplader samt koordinatmålemaskiner. Prøvning af ruhed og rundhed.	Center for Geometrisk Metrologi
328	Kalibrering af geometrisk måleudstyr og momentmåleudstyr	DSB Produktion, Togkomponenter
333	Kalibrering af elektronisk og fiberoptisk måleudstyr, temperatur-, tryk- og momentmåleudstyr samt masse, vægte og geometrisk måleudstyr.	Bodycote Metech A/S
353	Kalibrering af geometrisk måle- og kontroludstyr samt opmåling af geometrisk form og dimension	UNIMERCO A/S

### 8.2

### 8.3 MRA: Appendiks B

**Tabel 4. Dansk deltagelse i internationale sammenligninger inden for længde optaget i CIPM-MRA**

Lab.	ID, beskrivelse	Type	År	Status
DFM	CCL-S1, Nanometrology: one-dimensional gratings	Suppl.	1999-2000	Approved
DFM	CCL-S2, Nanometrology: step height standards	Suppl.	2000-2002	Approved
DFM	EUROMET.L- K1, Gauge blocks by interferometry	Key	1999-2000	Approved
DFM	EUROMET.L- K1.PREV, Gauge blocks by interferometry	Key	1991-2000	Approved
NGM(TI)	EUROMET.L- K4.2005, Diameter standards	Key	2005-2007	In progress
NGM(TI)	EUROMET.L- K5.2004, Step gauge	Key	2004-2006	In progress
NGM(IPL)	EUROMET.L- K6, Two-dimensional coordinate measuring machine artifacts	Key	2004-2005	In progress
NGM(DTH)	EUROMET.L- S5.a, Roundness	Suppl.	1993-1994	Published
DFM	EUROMET.L- S11, Surface texture measurements	Suppl.	2001-2002	Approved
DFM	BIPM.L- K10, Comparison of the frequencies of Helium-Neon lasers at wavelength 633 nm	Key	1988-2000	Approved
DFM	BIPM.L- K11, Comparison of primary wavelength standards	Key	2004-	On going

Kilde: BIPM Key Comparison Database Appendix B <http://kcdb.bipm.org>

## 8.4 MRA: Appendiks C

**Tabel 5. Kalibrerings- og måleevner optaget for danske laboratorier i KDCB inden for området længde**

Lab.	Beskrivelse	Instrument
NGM	Surface texture. Roughness standard (ISO 5436-1 D), amplitude parameters Rz, 0.2 $\mu\text{m}$ to 100 $\mu\text{m}$	Stylus instrument
NGM	CMM artefacts. Ball/hole plate: centre coordinates,	CMM
NGM	CMM: error of indicated coordinates.	Ball plate
NGM	End standards. Gauge block: central length L, 0.5 mm to 100 mm	Mech. comparison
NGM	Roundness standards. Sphere or hemisphere: roundness, R, 0.01 $\mu\text{m}$ to 1 $\mu\text{m}$	Roundness instrument
NGM	Surface texture. Depth standard (ISO 5436-1 type A): depth H, 0.25 $\mu\text{m}$ to 10 $\mu\text{m}$	Stylus instrument
NGM	Surface texture. Roughness standard (ISO 5436-1 D), amplitude parameters Ra, 0.2 $\mu\text{m}$ to 100 $\mu\text{m}$	Stylus instrument
DFM	End standards. Gauge block: central length L, 0.5 mm to 100 mm	Interferometry
DFM	Line standards. 2-D gratings: pitch, 0.5 $\mu\text{m}$ to 1 $\mu\text{m}$	AFM
DFM	Line standards. 2-D gratings: pitch, 1.001 $\mu\text{m}$ to 12 $\mu\text{m}$	AFM
DFM	Surface texture. Groove or step height standard: step height h, 0.020 $\mu\text{m}$ to 3 $\mu\text{m}$	AFM

Kilde: BIPM Key Comparison Database Appendix C <http://kcdb.bipm.org>

## 8.5 Høring af planen

Planen har været sendt til høring hos de akkrediterede laboratorier inden for hovedområdet samt hos Foreningen for Værkstedsmetrologi. Der har været enkelte kommentarer, som er taget til følge.