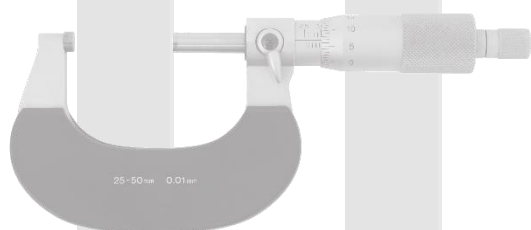


INTRODUKTION TIL MÅLINGER

UNDERVISNINGSELEMENT

A1

—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK



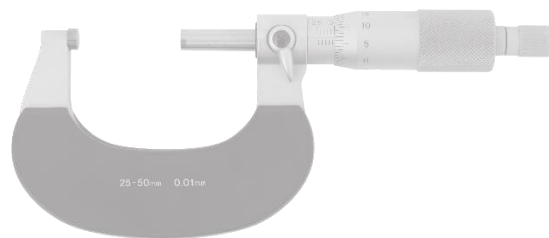
metrologi.dk



INTRODUKTION TIL MÅLINGER

Sabrina Rostgaard Johannsen og Morten Hannibal Madsen, DFM A/S

2. udgave – September 2017, redigeret oktober 2019



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. Materiale er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology.

Læs mere om projektet på www.metrologi.dk.

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

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

Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	2	8.3	Måleusikkerhed fra referencen	31
2	Målinger.....	2	8.4	Måleusikkerhed fra måleudstyret	32
2.1	Måleenheder	3		Boks 11: En procedure for udførelse af målinger bør indeholde	33
	Boks 1: Nedstyrt af rumsonde på grund af enhedsfejl	4	8.5	Måleusikkerhed fra målemetoden	33
3	Referencer	6	8.6	Måleusikkerhed fra målemiljøet	34
3.1	Normaler	6		Boks 12: Et livs kamp mod miljøparametre	35
4	Sporbarhedskæden	10	8.7	Måleusikkerhed fra operatøren	35
	Boks 2: Definition af de 7 grundenheder	10	8.8	Gør usikkerheden mindre	36
	Boks 3: Den danske metrologi organisation	11		Boks 13: Hvordan kan jeg som operatør forbedre mine målinger?	37
	Boks 4: Anskaffelse af F-16 fly	12	9	Opsummering	38
	Boks 5: Eksempel på sammenligning af en primærnormal med en referencenormal.....	13	10	Litteraturliste.....	39
	Boks 6: Eksempel på en sporbarhedskæde for længde.....	14	11	Ordliste.....	40
5	Kalibrering.....	15	12	Læringsudbytte.....	45
5.1	Kalibreringsfaktor	16			
	Boks 7: Eksempler på intervalskalaer	17			
5.2	En skala	17			
5.3	Ét punkts kalibrering	19			
	Boks 8: Sådan udføres en ét-punkts kalibrering.....	19			
5.4	Flere-punkts kalibrering	19			
5.5	Kalibrering hos en akkrediteret aktør	20			
	Boks 9: Sådan udføres en flere-punkts kalibrering 22				
6	Måleusikkerhed.....	23			
7	Måleudstyr.....	26			
7.1	Vedligeholdelse af måleudstyr	27			
7.2	Logbog og kontrolkort.....	29			
	Boks 10: Eksempel på en logbog	29			
8	Kilder til måleusikkerhed	30			
8.1	Måleteknikkens sekstakkede stjerne	30			
8.2	Måleusikkerhed fra måleemnet.....	30			

1 Indledning

Målinger har altid haft en central rolle i vores samfund og er en fast del af vores dagligdag. Forestil dig en hverdag uden målinger. Du vil ikke kunne planlægge din dag uden et ur. Broer vil styrte sammen da de er bygget upræcist. Fly vil styrte ned fordi de ikke ved hvornår brændstoftanken er tom. Læger vil ikke kunne fastslå sygdomme ud fra en blodprøve.



Figur 1: I det antikke Egypten blev Faraos arm benyttet som længdereference. Længdeenheden blev betegnet "cubit"

Helt tilbage til det gamle Egypten har betydningen af målinger været kendt. Bygningen af de store pyramider var ikke mulig uden at sikre at alle målte ens. Egypterne anvendte Faraos arm som reference for alle deres målinger, se Figur 1. Hver bygherre havde en træstok med præcis denne længde. Ved fuldmåne skulle deres træstokke kontrolmåles, og havde den en forkert længde fik bygherren hugget hænderne af [1].

Læren om målinger og målemetoder hedder metrologi. Det kommer af det græske ord *metros*, der betyder *at måle*.

2 Målinger

Målinger har til formål at bestemme talværdien af en *målestørrelse*. En målestørrelse kan f.eks. være

længde, elektrisk spænding eller temperatur. Resultatet af målinger består af en *talværdi* og en *måleenhed*. Mere herom i afsnit 2.

Målinger kræver altid en *reference* at sammenligne med. Spørgsmålet "hvem er højest i klassen?" kan besvares på to måder. 1) Ved at sammenligne højden af alle elever ryg mod ryg. Her anvendes en person som reference for de andre målinger. 2) Eller ved at anvende et målebånd, og aflæse højden af hver enkelt elev på målebåndet. I dette tilfælde er målebåndet en reference (Figur 2). Referencer vil blive uddybet i afsnit 3.

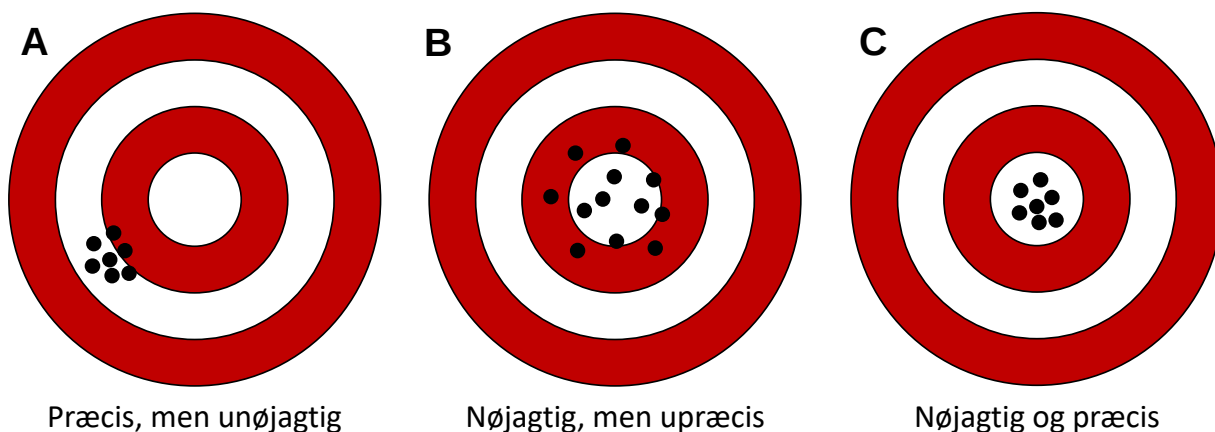
For at sammenligne målingerne af elevernes højde med andre elever som befinder sig udenfor lokalet, kræver det at målebåndet har en velkendt længde. I dette tilfælde vil en reference til *meteren* være det mest hensigtsmæssige at anvende. Når en måling kan føres hele vejen tilbage til en *grundenhed*, som meteren, taler man om *sporbarhed*. Dette vil blive beskrevet nærmere i afsnit 4.

En god måling beskriver den målte størrelse korrekt. I vurderingen af om en måling er god benyttes to begreber: *Præcision* og *nøjagtighed*. Figur 3 illustrerer de to begreber præcision og nøjagtighed ved hjælp af en skydeskive.



Figur 2: Et målebånd kan bruges som en reference.

Præcision er graden af overensstemmelse mellem gentagende målinger foretaget under samme betingelser. Præcision kan også udtrykkes som spredningen af målingerne. På skydeskiven rammer skytten



Figur 3: Forskellen mellem præcision og nøjagtighed illustreret med en skydeskive. (A) Skytten har sat alle skud tæt på hinanden (præcis), men væk fra centrum (unøjagtig). (B) Der er stor spredning på skyttens skud (upræcis), men de er pænt centreret omkring centrum af skydeskiven (nøjagtig). (C) Skytten har ramt centrum (nøjagtig) med alle sine skud (præcis).

samme sted med alle sine skud, men ikke nødvendigvis i midten.

Nøjagtighed er angivelsen af hvor høj grad af overensstemmelse der er mellem målingerne og den sande værdi. Den sande værdi er værdien af målestørrelsen når den er perfekt bestemt. Den sande værdi vil aldrig være mulig at opnå da der altid vil være målefejl. På skydeskiven rammer skytten tæt på midten, men der er lidt større spredning i skuddene.

På (C) rammer skytten både nøjagtigt, idet han rammer nær midten, og præcist idet skuddene ligger samme sted.

Hvis to produkter skal bygges sammen til ét kræver det at de passer sammen. Tænk f.eks. på legoklodser, her er det vigtigt at klodserne passer sammen ellers mister legoklodserne deres funktion. Eller tænk på at pakninger i en motor skal passe i størrelsen så der ikke kommer olielækage.

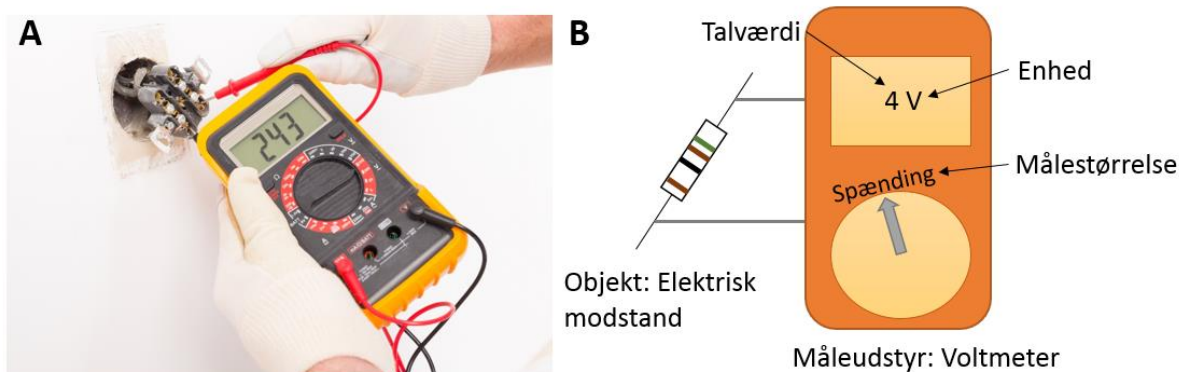
I tilfældet med legoklodserne er det vigtigt at afstanden mellem knopperne på toppen af en klods er placeret således at de passer med hullerne i bunden af en anden legoklods. Dette kræver at man ofte foretager kvalitetskontrol af de producerede emner. Passer knopper og huller ikke sammen, er man nødt til at stoppe produktionen og finde fejlen.

Meget nøjagtige og præcise målinger kan garantere at to produkter vil passe sammen, men er en meget dyr løsning. I stedet kan man anvende *tolerancer* til at styre funktionen af det færdige produkt, men heller ikke mere end det.

Eksempel på tolerance: Hvis der f.eks. er 1 cm at give af når de to produkter skal bygges sammen er der ingen grund til at opmåle dem med 1 mm præcision. I stedet kan man indføre en tolerance for hvor meget produkternes mål må afvige før de ikke længere kan samles. Man går måske lidt på kompromis med præcisionen for at spare tid og penge.

2.1 Måleenheder

Resultatet af en måling angives som en talværdi med en tilhørende *måleenhed*. Enheden volt (V) bruges til at angive spændingen i f.eks. stikkontakter, som i Danmark er 230 V. Uden en måleenhed siger resultatet af en måling ikke noget. Det er derfor vigtigt altid at angive enheder når man har foretaget en måling. På Figur 4 kan ses et eksempel på en måling.



Figur 4: Eksempel på en måling af spænding med et voltmeter. (A) Måling på elinstallation. (B) Skitse af måling af spænding over en modstand. På figuren er angivet de begreber som kendetegner en måling.

Der findes et væld af måleenheder. Historisk set har man benyttet mange forskellige måleenheder til at opmåle den samme målestørrelse, f.eks. kan længde både angives i fod, meter eller sømil. I slutningen af 1700-tallet havde mange byer deres egne måleenheder, og man mener at der blev anvendt over 100.000 forskellige enheder alene i Frankrig.

For at ensrette måleenhederne internationalt, indførte man et fælles system: *SI-enhederne*. SI dækker over den franske betegnelse "Système International d'Unités". På dansk "Det Internationale Enhedssystem".

SI-Systemet indeholder syv *grundenheder* som fremgår af Tabel 1. Grundenhederne er tilstrækkelige til at beskrive alle målinger hvis de kombineres. De nye kombinationsenheder kaldes *afledte enheder* (f.eks. angives hastighed i meter pr. sekund). Eksempler på nogle af de mest anvendte afledte enheder kan ses i Tabel 2, og flere på www.metrologi.dk.

Bemærk at selvom enhederne er blevet standardiseret benytter man stadig ved nogle målestørrelser andre enheder end dem defineret i SI-systemet. I Europa benyttes Celsius (°C) og i USA benyttes Fahrenheit (°F) til at angive temperatur. Sejlere anvender knob til at beskrive hastighed og sømil til afstande. Man skal derfor stadig være opmærksom på hvilke enheder der benyttes når man udveksler produkter eller erfaringer på tværs af grænser og fag.

Boks 1: Nedstyrt af rumsonde på grund af enhedsfejl

Et eksempel på hvor galt det kan gå når man ikke har styr på enhederne stammer fra det amerikanske rumforskningsinstitut NASA. I 1999 mistede NASA en rumsonde til en værdi af 125 millioner dollars, fordi en af leverandørerne havde benyttet engelske enheder mens NASA benyttede SI-enheder [2]. Dette resulterede i at rumsonden missede sin bane omkring Mars og styrtede ned. Et billede af den omtalte rumsonde ses nedenfor.



Målestørrelse	Enhed	Betegnelse
Længde	meter	m
Masse	kilogram	kg
Tid	sekund	s
Elektrisk strøm	ampere	A
Temperatur	kelvin	K
Stofmængde	mol	mol
Lysstyrke	candela	cd

Tabel 1: De syv grundenheder i SI-systemet.

Eksempel på afledt målestørrelse	Enhed	Betegnelse	Udtrykt i grundenheder
Densitet (massefylde)	kilogram pr. kubikmeter	kg/m ³	kg/m ³
Frekvens	hertz	Hz	1/s
Hastighed	meter pr. sekund	m/s	m/s
Kraft	newton	N	(m·kg)/s ²
Tryk	pascal	Pa	kg/(m·s ²)
Energi, arbejde, varme	joule	J	(kg·m ²)/s ²
Effekt	watt	W	(kg·m ²)/s ³
Elektrisk ladning	coulomb	C	s·A
Elektrisk spænding	volt	V	(kg·m ²)/(s ³ ·A)
Elektrisk modstand	ohm	Ω	(m ² ·kg)/(s ³ ·A ²)
Magnetisk induktion/fluxtæthed	tesla	T	kg/(s ² ·A)
Luminans (lystæthed)	candela pr. kvadratmeter	-	cd/m ²

Tabel 2: Eksempler på nogle af de mest anvendte afledte målestørrelser udtrykt både som deres betegnelse og de grundenheder de er en kombination af. En total oversigt over afledte enheder kan fås på www.metrologi.dk/leksikon.

3 Referencer

En måling kan ikke foretages uden en reference. En reference kan være mange forskellige ting. Alt fra en tomme stok, en opløsning med en bestemt pH-værdi eller et andet måleinstrument.

Brugen af en reference gør at man direkte kan sammenligne to målinger som f.eks. foretages på forskelligt udstyr, eller på forskellige tidspunkter. Dette sikrer sammenlignelighed mellem f.eks. kundens måling



Figur 5: Opmåling af et køkken kræver at man anvender en fælles reference.

og leverandørens måling på samme produkt. I princippet kan du lave din egen reference. Du kan, ligesom farao i antikkens Egypten, vælge at måle alt i forhold til din underarm. Det vil dog gøre det svært at sammenligne dine målinger med andre (medmindre du truer dem med at hugge deres hænder af hvis ikke de bruger din reference!).

Eksempel: Hvis du skal have en ny bordplade til dit køkken, så opmåler du dit køkken med en tomme stok (Figur 5). Efterfølgende sender du en tegning med målene på bordpladen til et køkkenfirma. Køkkenfirmaet leverer et par uger senere en bordplade som de har opmålt med deres tomme stok, men desværre passer målene på bordpladen ikke med de længder du opmålte. Hvad er gået galt?

Du forventede at den tomme stok som køkkenfirmaet måler bordpladen op med måler ligesom din tomme stok. Men idet den leverede bordplade ikke svarer til

den bestilte kan det være at de tomme stokke i hver især benytter måler forskelligt. Altså benytter I ikke den samme reference.

En løsning kan være at du låner din tomme stok til køkkenfirmaet, og derved måler I med samme reference. Eller I kan begge bruge en tomme stok der refererer til samme længdeenhed som er accepteret og bestemt internationalt. Det kaldes at tomme stokken er *sporbar*. *Sporbarhed* vil blive beskrevet nærmere i afsnit 4.

En reference skal som et minimum stabilt kunne realisere dens pågældende målestørrelse nøjagtigt og præcist. Hvilket betyder at når referencen benyttes skal den gengive talværdien af den målestørrelse den opbevarer nøjagtigt og præcist hver gang. Det nytter ikke noget at massen af et masselod svinger fra måling til måling, da man således ikke kan stole på de målinger som foretages med loddet. Referencer der anvendes til metrologiske målinger kaldes normaler.

3.1 Normaler

En normal er et materiale, måleinstrument eller må-



Figur 6: Sæt af lodder med forskellig masse. Lodderne kan bruges som normaler indenfor masse. Det vil sige man kan bruge lodderne til at kalibrere en vægt med.

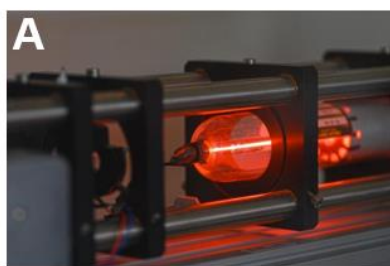
lesystem som benyttes til at definere, realisere eller opbevare én eller flere værdier for en målestørrelse. En normal er en *præcis* og *nøjagtig* reference. Derfor benyttes den til målinger som kræver høj præcision og nøjagtighed. Til målinger i industrien bør man altid anvende en normal som reference.

Nogle eksempler på normaler er masselodder (Figur 6), en opløsning med en bestemt pH-værdi (bufferopløsning) eller en ruhedsnormal. På Tabel 3 er en oversigt over nogle af de mest almindelige normaler, samt hvilken type måling de benyttes til. Derudover indeholder tabellen en liste over de danske *aktører* som har den højeste målekompetence inden for de forskellige måleområder.

En *aktør* er et laboratorium eller en virksomhed der på grund af dets tekniske kompetence, kvalitetsstyringssystem og uvildighed er udpeget til at varetage bestemte typer måling. Udpegningen medfører at disse laboratorier bliver *akkrediterede*.

Hovedområde	Type måling	Eksempler på vigtige normaler	Dansk aktør på feltet
Masse	Masse	Lodder, vægte	DFM
	Kraft og tryk	Krafttransducere (vejeceller), træl/tryk-prøvemaskiner, dynamometre	FORCE technology
	Volumen og densitet	Vand, rummål, volumenbeholdere, vægte	FORCE technology
Elektricitet	Jævnstrøm (DC)	Spændings/strøm-vægte, Josephson-effek, Zener-reference	DFM
	Vekselstrøm (AC)	Kapacitansnormaler	Trescal
	Højfrekvent (HF)	Termiske konvertere, kalorimetre	Trescal
Længde	Længde	Målekodser	DFM
	Geometri	Ruhedsnormaler, ruhedsmåler, dorn, ring	DFM og Teknologisk institut (DTI)
Tid og frekvens	Tid	Atomure	
	Frekvens	Atomure, lasere	
Termometri	Temperatur ved berøring	Gastermometri, termo-elementer, resistans-termometre	Teknologisk institut (DTI)
	Berøringsfri temperaturmåling	Pyrometre	DTU
	Fugtighed	Dugpunktshygrometre, elektroniske hygrometre	DELTA – a part of FORCE / FORCE technology
Ioniserende stråling	Absorberet dosis – industrielle produkter	Kalorimetre, kalibreret strålefelt, dikromat dosimetre	DTU
Fotometri og radiometri	Optisk radiometri	Kryogent radiometer, detektorer, strålingskilder, referencematerialer	DFM
Flow	Gasflow (volumen)	Gasklokker, fortrængningsmålere, turbinemålere	FORCE technology
	Vandflow (volumen, masse og energi)	Volumennormaler, pitotrør, niveaumålere	Teknologisk institut (DTI)
	Flow i andre væsker end vand	Volumennormaler, pitotrør, niveaumålere	FORCE technology
	Anemometry	Anemometre	Teknologisk institut (DTI)
Akustik	Akustiske målinger i gasser	Pistofoner, kondensatormikrofoner	DFM og Brüel & Kjær A/S
	Akustiske målinger i faste stoffer	Accelerometre, krafttransducere, laserinterferometre	Brüel & Kjær A/S
Kemi	Elektrokemi	Primær ledningsevne celle, certificeret ledningsevne referencemateriale	DFM
	pH	Certificeret referencemateriale	DFM

Tabel 3: Udvalgte måletekniske hovedområder og tilhørende typer målinger samt typiske normaler. Derudover er angivet den pågældende danske aktør med højeste målekompetence i Danmark. Det vil sige metrologiinstitutionerne. En fuld liste over måletekniske hovedområder kan findes på www.dfm.dk. For områder (fx tid og frekvens) hvor der ikke er udpeget et metrologiinstitut i Danmark kan DFM kontaktes for information.



Primærnormal



Referencenormal



Arbejdsnormal

Figur 8: Normaler indenfor længde. (A) Primærnormalen indenfor længde er en laser med en veldefineret lys bølglængde. (B) Sæt af måleklodser af høj kvalitet kan anvendes som referencenormal. (C) Måleklodser af lidt lavere kvalitet anvendes som arbejdsnormaler. Fotos: Morten Hannibal Madsen/DFM.

Hvilket betyder at de udfører målinger af høj kvalitet og er objektive.

For at blive akkrediteret skal laboratoriet først ansøge Sikkerhedsstyrelsen om at bliver udpeget. Sikkerhedsstyrelsen vil så vurdere om den pågældende aktør er egnet, og om udpegningen vil passe ind i det samlede metrologisystem i Danmark. Mere herom i afsnit 4 (boks 4).

Normaler kan deles op i klasser alt afhængig af deres kvalitet, præcision og *stabilitet*. Stabiliteten indebærer at den opbevarede målestørrelsen ikke forandres over tid. En måleklods på 10,00 cm, skal gerne blive ved med at være 10,00 cm for at kunne anvendes som normal. De bedste normaler ændrer sig overhovedet ikke over tid. De kaldes *primærnormaler* og beskrives nærmere i afsnit 4.

Normaler opdeles i tre grupper som afspejler hvor gode de er (Figur 8):

- *Primærnormaler* som ikke ændrer sig med tiden, og har den højeste nøjagtighed og præcision der kan opnås. Disse normaler opbevares på de nationale metrologiinstitutioner.
- *Referencenormaler* som anvendes i industrien, og er mindre stabile.

- *Arbejdsnormaler* som benyttes i værkstedet og produktionen.

Stabiliteten af en normal sikres blandt andet ved at fremstille normaler af materialer, som kun påvirkes i begrænset omfang af målemiljøet og ved brug. Dette uddybes i afsnit 8.6.

Eksempel: Indenfor længde skelnes mellem kvalitet og stabilitet af måleklodser ved inddeling i klasser. De bedste klasser (klasse 0) er lavet af materialer som er slidstærke, og har en lav termisk udvidelse. Derudover er de to modsatte ender poleret helt glatte og er parallelle. Derved sikres en præcis afstand mellem de to ender.

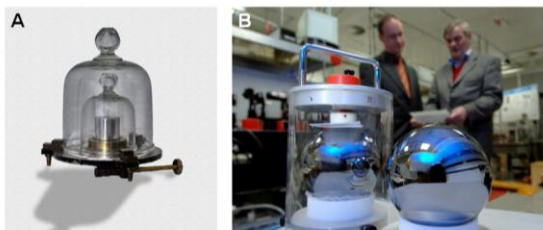
Hvis den måling man skal foretage ikke kræver den højeste præcision behøver man ikke investere i den højeste klasse af måleklodser. I stedet kan man anvende klasse 1 eller klasse 2 måleklodser. De er meget billigere. Det er derfor altid en afvejning mellem hvor høj præcision den pågældende måling kræver og prisen man ønsker at betale.

4 Sporbarhedskæden

Et af de væsentligste spørgsmål at stille når referencer benyttes, er hvordan det kan sikres at en reference måler korrekt? Dette sikres ved at have *sporbarhed* på målinger foretaget med referencen. Sporbarhed er dokumentationen for at en måling gennem en ubrudt kæde af sammenligninger kan føres tilbage til en primærnormal. Det betyder at så længe man kan henvise til at en måling er sporbar, dvs. kan relateres til primærnormalen, så anerkendes målingen som pålidelig og sammenlignelig. Sporbare målinger har altid en usikkerhed tilknyttet.

I eksemplet fra før med bordpladen, er det ikke praktisk at skulle sende sin egen målestok med til køkkenfirmaet. I stedet vil du bede køkkenfirmaet om at være sporbare til primærnormalen for længde (meteren). Ligeledes skal du selv sørge for at købe en tomestok der er sporbar til meteren. Derved sikrer I, at I måler med hensyn til den samme reference.

I praksis sammenligner producenterne ikke deres målinger direkte med den primære længdenormal, men målingen sammenlignes indirekte med primærnormalen gennem *sporbarhedskæden*. Den generelle sporbarhedskæde ses på Figur 10. Fordelen ved at anvende sporbarhedskæden fremfor direkte måling med primærnormalen er, at målinger bliver lettere og billigere at udføre. Ulempen er at usikkerheden stiger for hvert trin man går ned i sporbarhedskæden.



Figur 9: Normaler for kilogram. (A) Den danske kopi af kilograms loddet. (B) Prototypen af det nye kilogram som måske skal erstatte det lod der ligger i Paris. Det er en meget velpoleret siliciumkugle. Foto: Morten Hannibal Madsen/DFM; Susanne Stork/PTB.

Boks 2: Definition af de 7 grundenheder

Meteren er relateret til den strækning som lys tilbage-lægger i løbet af en given tid.

Kilogrammet er defineret som massen af et lod som opbevares i Paris.

Sekundet er relateret til elektronens bevægelse i et caesium-133 atom.

Ampere bestemmes ud fra påvirkningen på to lange parallel ledninger.

Kelvin bestemmes ud fra det absolutte nulpunkt og vands tripelpunkt (hvor gas, væske og fastform faserne eksistere samtidig).

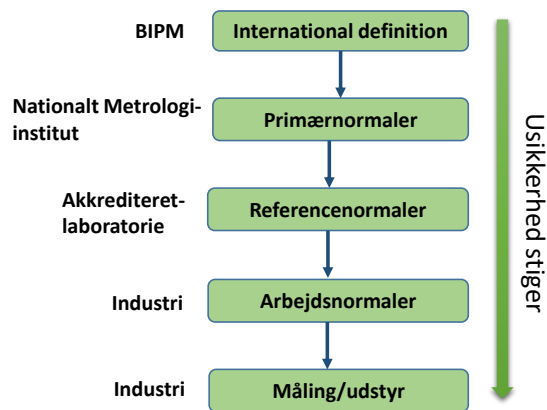
Mol er defineret ud fra antal atomer i 0,012 kg kulstof-12.

Candela er relateret til en lyskilde som udsender lys ved kun én farve og med en bestemt strålingsstyrke.

De fulde definitioner kan findes på www.metrologi.dk/SI-enheder

Sporbarhedskæden starter på højeste niveau med definitionen og etableringen af SI enhederne, som før blev omtalt i Tabel 1.

Den internationale organisation *Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)*, beliggende i Paris, har til formål at vedtage definitionen af de syv grundenheder i SI-systemet. Kun kilogrammet er stadig defineret ud fra et fysisk objekt. Det officielle kilogram opbevares ved BIPM. De resterende seks grundenheder er defineret ud fra naturkonstanter, se boks 2. Fordelen ved at grundenhederne er defineret ud fra naturkonstanter er, at de kan reproducere overalt i verden. Man arbejder derfor også på at omdefinere kilogrammet så det er defineret ud fra naturkonstanter, se Figur 9.



Figur 10: Den generelle sporbarhedskæde. Bemærk at måleusikkerheden stiger jo længere ned i kæden man bevæger sig.

Næste led i sporbarhedskæden er de *nationale metrologiinstitutioner*, som har til formål at realisere primærnormalerne ud fra de vedtagne definitioner. Derved kan hvert enkelt land bringe sporbarhed videre til virksomheder og laboratorier. For lande der ikke har et metrologiinstitut skal virksomheder og laboratorier hente sporbarhed fra udlandet. Det er både dyrt og besværligt.

I Danmark hedder det nationale metrologiinstitut *Dansk Fundamental Metrologi (DFM)*, se boks 4. DFM's rolle er at sikre den metrologiske infrastruktur i Danmark. Det gør at virksomheder kan sikre kvaliteten af deres varer og at de kan eksportere til udlandet.

For at sikre målinger på højeste niveau deltager DFM jævnligt i møder og målesammenligninger med BIPM og andre udenlandske metrologiinstitutioner. Ved en målesammenligning sendes en normal rundt til forskellige metrologiinstitutioner, som alle måler på normalen uden at kende talværdien af den målestørrelse som normalen indeholder. Det kan f.eks. være en 100 Ω elektrisk modstand hvor modstanden måles af alle deltagende metrologiinstitutioner, men metrologiinstitutionerne ved ikke på forhånd at den elektriske modstands modstand er 100 Ω . Først når alle har udført målingen sammenlignes resultaterne. Derved sikres det at alle målinger foretages objektivt.

Boks 3: Den danske metrologi organisation

Den danske metrologi organisation består af flere udpegede aktører som tilsammen afdækker de enkelte felter indenfor metrologien. De aktører som besidder den højeste målekompetence indenfor et felt i Danmark kaldes *metrologiinstitutioner*.

Der kan sagtens være udpeget *akkrediterede laboratorier* indenfor felter hvor der allerede er et metrologiinstitut. De akkrediterede laboratorier får så deres referencenormal sammenlignet med primærnormalen eller referencenormalen på metrologiinstitutionet. De akkrediterede laboratorier har derfor ikke den højeste målekompetence i Danmark, men for mange virksomheder er deres nøjagtighedsniveau tilstrækkeligt.

Den danske metrologi organisation består dog ikke kun af DFM. Som omtalt i Tabel 3 afdækkes de enkelte felter indenfor metrologi i Danmark af flere aktører. I boks 3 beskrives det danske metrologisystem nærmere. Mere herom i afsnit 5.5.

Næste led i sporbarhedskæden er *referencenormaler* som anvendes af industrien. Primærnormaler anvendes til at opmåle referencenormalerne. Ofte anvender akkrediterede laboratorier også referencenormaler, der jævnligt sammenlignes med primærnormaler. I boks 5 er givet et eksempel på en sådan sammenligning indenfor enheden meter.

Boks 4: Anskaffelse af F-16 fly

I 1975 besluttede Folketinget at anskaffe nye jægerfly (F-16) til en på det tidspunkt uhørt samlet pris af 2,4 milliarder kroner. For at retfærdiggøre den høje pris, indgik det i aftalen at der skulle være modkøbsaftale på mindst 58 % af produktionen. Det viste sig dog hurtigt at danske virksomheder ikke kunne leve op til de kvalitetskrav som der blev stillet fra den udenlandske producents side, for at kunne blive underleverandør. Danmark gik derfor glip af store kontrakter, fordi virksomhederne ikke kunne dokumentere sporbarhed på deres målinger. Derfor blev det besluttet at oprette et nationalt metrologiinstitut, og DFM blev grundlagt i 1986.



Danmark var blevet lovet store kontrakter i forbindelse med køb af F-16 fly, men gik glip af disse, da virksomheder ikke kunne dokumentere sporbarhed på deres målinger.

Sporbarheden gives konkret i form af et certifikat fra de akkrediterede laboratorier. Certifikatet angiver resultatet af de målinger der er foretaget på referencenormalen med tilhørende måleusikkerhed. I afsnit 5.5 vil vi se nærmere på de akkrediterede laboratorier.

For at beskytte referencenormaler kan man indføre *arbejdsnormaler* i sporbarhedskæden. Forskellen på en referencenormal og en arbejdsnormal er typisk kvaliteten af normalen og dermed prisen. Dårligere kvalitet resulterer i højere usikkerhed på målinger. Hvis arbejdsnormalen bliver slidt, er det dog lettere og billigere at erstatte den fremfor at erstatte en referencenormal.

Arbejdsnormalen sammenlignes med referencenormalen, og benyttes herefter i de daglige målinger. Hvis der sker skade på arbejdsnormalen under brug, kan man straks undersøge hvor stor en fejl dette giver ved at sammenligne med referencenormalen. Er fejlen for stor i forhold til ens krav, kan arbejdsnormalen kasseres og en ny arbejdsnormal kan indføres.

På Figur 11 ses enden af en måleklods som på grund af forkert håndtering har fået et fingeraftryk den blanke polering. Dette medfører at måleklodsens ikke længere kan benyttes til udmåling af længder og i yderste konsekvens skal måleklodsens derfor kasseres.

Målinger som foretages med arbejdsnormaler er mindre nøjagtige end målingerne der foretages direkte med referencenormalen. Dette er en vigtig pointe ved sporbarhedskæden:

Usikkerheden på målingerne stiger for hvert led man bevæger sig ned i sporbarhedskæden. Det skyldes at der altid vil være en usikkerhed behæftet ved en måling.

Så jo flere målinger/sammenligninger der foretages desto større usikkerhed vil der komme på resultatet. Derudover benyttes mindre præcise målemetoder længere nede i sporbarhedskæden, hvilket også giver en større usikkerhed. Som det fremgår af Figur 10, så stiger usikkerheden for hvert led man bevæger sig ned i sporbarhedskæden.

Sporbarhedskæden er altså en måde hvorpå den enkelte måling kan blive sporbar til den primære SI normal, uden at sammenligne direkte med primærnormalen. Du kan via sporbarhedskæden påvise at din måling er sporbar til en velkendt størrelse.



Figur 11: Overfladen af en gaugeblok med et tydeligt fingeraftryk. Klodsens bør rengøres inden den tages i brug. Er dette ikke muligt, vil det være nødvendigt at kassere den og tage en ny klods i brug.

På Figur 12 og boks 6 ses et eksempel på en sporbarhedskæde for meteren.

Boks 5: Eksempel på sammenligning af en primærnormal med en referencenormal

Meter

Primærnormalen indenfor længde er en laser med en veldefineret lys bølgelængde. Denne benyttes til at måle længden af måleklodser som er referencenormalen. Dette gøres ved at sende laserlyset ind på både måleklodsens top og en flad plade som måleklodsens er monteret på, og dernæst måle det reflekterede lys fra begge flader. Det lys som rammer den flade plade vil skulle rejse to gange så langt som det lys der rammer toppen af måleklodsens, se. Så ud fra forskellen i lysets rejse-længde kan længden af måleklodsens bestemmes. Derved er referencenormalen (måleklods) sammenlignet med primærnormalen (laser).

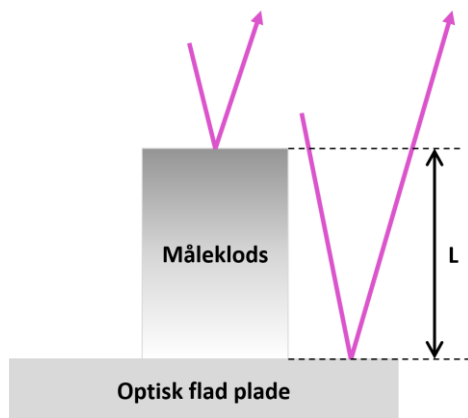
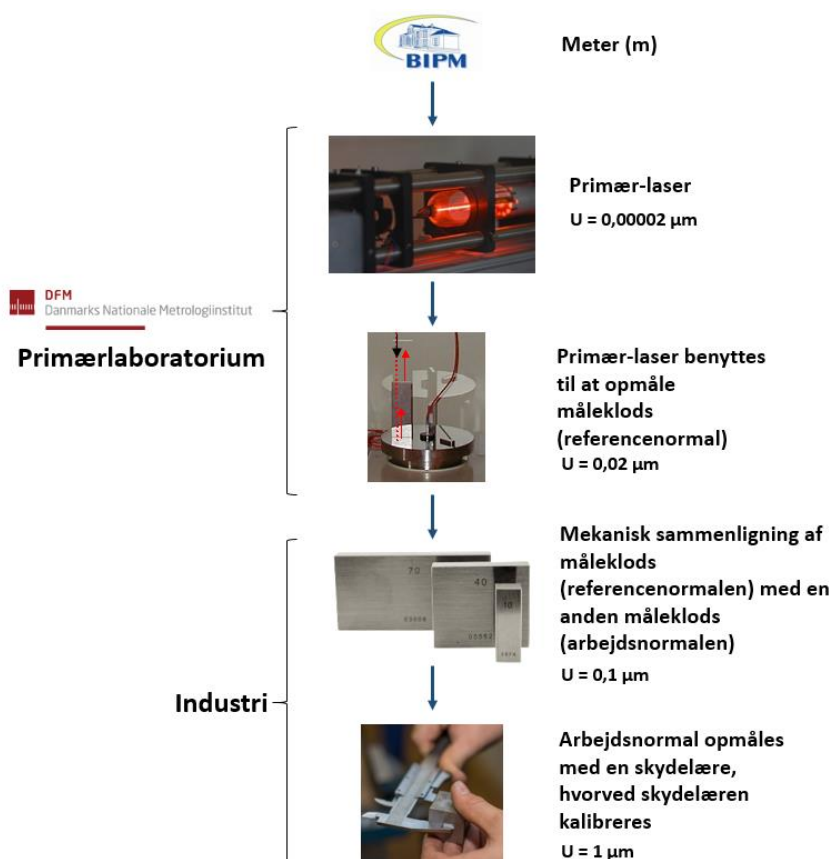


Illustration af laserlys som sendes ind på toppen af en måleklods og på en optisk flad plade, hvorefter lyset reflekteres.



Figur 12: Sporbarhedskæden for målestørrelsen længde. Længde defineres ved hjælp af en laser. De angivne U-værdier er måleusikkerheden på den pågældende kalibrering/måling. Som det ses stiger måleusikkerheden (U) når man bevæger sig ned gennem sporbarhedskæden. Vi vil vende tilbage til måleusikkerheder i afsnit 6.

Boks 6: Eksempel på en sporbarhedskæde for længde

Et eksempel på en sporbarhedskæde for længde ses i Figur 12. Sporbarhedskæden starter ved definitionen af SI enheden for længde som er meter (m).

I 2. og 3. led i kæden er det nationale metrologiinstitut. Her opbevares en laser som fungerer som primærnormalen. Laseren benyttes til at måle længden af måleklosser (referencenormal).

En laser kan benyttes til at måle længden af måleklosserne på grund af lysets natur. Lys kan beskrives som bølger der bevæger sig afsted med lysets hastighed (ca. 300 millioner m/s). Man kender meget præcist lysets hastighed. Derfor benyttes en laser til at definere meteren som hvor langt lys tilbagelægger på en given tid.

De målte måleklosser sammenlignes dernæst med andre måleklosser (arbejdsnormaler), måske af en lavere klasse, ved en mekanisk sammenligning. Dette sker i 4. led.

Herefter benyttes måleklosserne til at fastlægge målepræcisionen af håndværktøjer som en skydelære (5. led). Skydelæren vil således fungere som værkstedets reference, og den benyttes til at opmåle producerede objekter. Derved er sporbarhedskæden sluttet.



5 Kalibrering

De enkelte sammenligninger i sporbarhedskæden kaldes kalibreringer. I eksemplet i boks 6 kalibreres en skydelærer i sidste led af sporbarhedskæden. Men undervejs i sporbarhedskæden er måleklodserne også blevet kalibreret.

En kalibrering er en proces, eller handling, hvor et måleudstyr, målesystem eller en references nøjagtighed og præcision undersøges. Oftest er en kalibrering en sammenligning mellem et udstyr og en reference, som udføres under specifikke forhold. Alt udstyr der skal anvendes til pålidelige målinger skal kalibreres (Figur 13).

En kalibrering består af to trin. Først skal man bestemme måleusikkerheden ud fra målinger af velkendte referencer. Derefter skal denne information behandles så man kan udføre opmåling af ukendte objekter. Derved fastlægges den måleusikkerhed der kan forventes ved benyttelse af det pågældende udstyr. Vi vil vende tilbage til måleusikkerhed i afsnit 6.

Der er flere grunde til at kalibrere sit udstyr:

- Det bestemmer usikkerheden på målinger med udstyret
- Det gør målinger med udstyret troværdige
- Man kan sammenligne sine målinger med andre målinger
- Man kan dokumentere at udstyret måler korrekt
- Der skabes sporbarhed til en primærnormal

Over tid kan måleudstyr eller målesystemer være udsat for *drift*. *Drift* er en løbende ændring i den målte talværdi over tid på grund af ændringer i måleudstyr, målesystem eller reference. For at bestemme denne

drift, og evt. kunne korrigere for den, er det vigtigt at kalibrere sit udstyr løbende.

Temperaturprober er et eksempel på måleudstyr hvor de målte værdier driver med tiden. Dette sker både når temperaturproben bruges ofte, eller hvis den ikke benyttes. Derfor skal en temperaturprobe altid kalibreres inden brug.

For at holde styr på pålideligheden af målinger foretaget med et instrument skal det regelmæssigt kalibreres. Det er den instrumentansvarliges opgave at fastlægge hvor tit måleudstyret eller referencer skal kalibreres. Den instrumentansvarlige skal altså fastsætte et *kalibreringsinterval*.

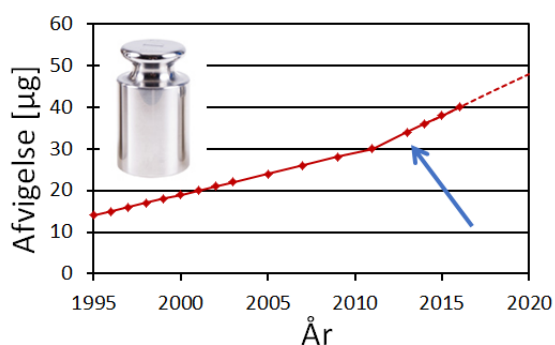
Kalibreringsintervallet noteres i instrumentets *stamkort*. Et stamkort er et dokument der samler grundlæggende information om instrumentet. Et stamkort kan udover kalibreringsinterval indeholde data for placering, indkøber, instrumentansvarlig, placering af manual, acceptgrænser, reparationer, mm.

Kalibreringsintervallet varierer efter hvilket instrument der skal kalibreres. En flowmåler vil typisk skulle kalibreres én gang om året, en temperaturprobe en gang om måneden, en vægt en gang om dagen, mens sensoren på et pH-meter skal kalibreres før hver måling. Normaler vil typisk have længere kalibreringsintervaller end instrumenter. Her snakker vi oftest 1 år og længere tid, da de er meget stabile.

Hvis der ikke er forudgående kendskab til et instrument kan det være svært at fastsætte et kalibreringsinterval. Det er derfor vigtigt at holde særligt øje med stabiliteten af de målinger som man foretager med



Figur 13: Alt udstyr skal kalibreres i forhold til en reference der er sporbar til én af de syv grundenheder.



Figur 14: Ændringen af masse af et lod over en år-række. Fra 1995 til 2003 bliver loddet kalibreret hvert år. Her ses det at afvigelsen fra den nominelle værdi stiger med 1 µg/år. Det bliver derfor besluttet kun at kalibrere loddet hvert andet år. I 2013 viser kalibreringen dog at loddet har taget mere på i vægt end forventet. Derfor sættes kalibreringsintervallet ned til 1 år igen.

nyt udstyr. Der er generelt en tendens til at nyt udstyr driver mere i starten. Man bør derfor føre en *logbog* for alle instrumenter. Mere herom i afsnit 7.2.

Ligeledes har nye normaler større tendens til drift end gamle. Af denne grund er ældre normaler hvor historikken kendes guld værd, da operatøren derved kender normalens drift. Derfor indfører virksomheder ofte en arbejdsnormal for at skåne referencenormalen, og derved sikre lang tids kendskab til referencenormalens stabilitet.

Eksempel: Du har gennem 10 år fået kalibreret et 1 kg masselod hvert år. Ved hver kalibrering er det blevet

1 µg tungere. Du vælger nu at ændre kalibreringsintervallet til 2 år. Samtidig korrigerer du dine målinger med 1 µg/år. På den måde sparer din virksomhed penge og besvær ved at få udført færre kalibreringer. Samtidig får I bedre målinger, da I nu kan korrigere massen af loddet. Bemærk, hvis en kalibrering giver et uventet resultat, kan det være nødvendigt at sætte kalibreringsintervallet ned til f.eks. 1 år igen. Se Figur 14.

Resultatet af en kalibrering kan udtrykkes på mange måder. Det kan være de målte værdier indsættes i en tabel, et diagram, eller en sammenhæng mellem den målte værdi og referenceværdien beregnes. Sammenhængen kan f.eks. udtrykkes som en *kalibreringsfaktor* eller en *skala*. Kalibreringsfaktoren beskrives i afsnit 5.1, og skalaen beskrives i afsnit 5.2, hvor også to kalibreringsmetoder som begge ender ud i etablering af en skala beskrives.

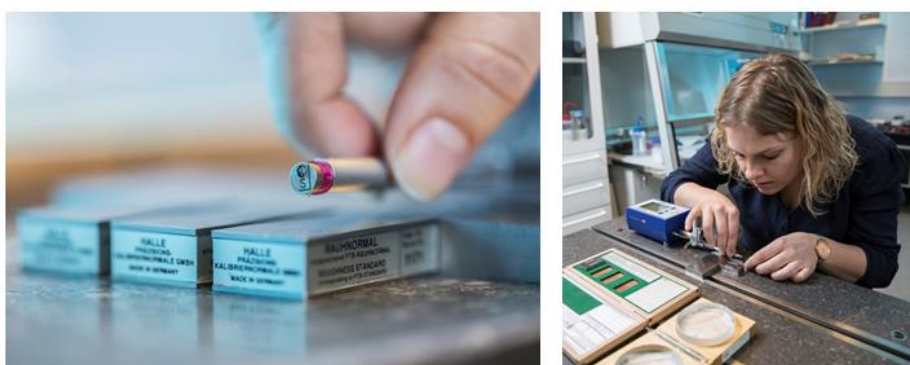
5.1 Kalibreringsfaktor

Kalibreringsfaktoren findes ved at tage forholdet mellem referensens velkendte talværdi og den talværdi man måler på samme reference

Ligning 1:

$$\text{Kalibreringsfaktor} = \frac{\text{Referensens talværdi}}{\text{Målt talværdi}}$$

Kalibreringsfaktoren fortæller således noget om hvor nøjagtigt det benyttede udstyr måler. Hvis kalibreringsfaktoren er lig 1 betyder det at udstyret måler



Figur 15: Kalibrering af en ruhedsmåler ved måling på en ruhedsnormal

samme talværdi som referencens talværdi. Er kalibreringsfaktoren derimod mindre end 1 betyder det at udstyret måler en større værdi end referenceværdien. En kalibreringsfaktor større end 1 betyder at udstyret måler en lavere værdi end referenceværdien.

Eksempel: En ruhedsmåler kalibreres ved måling på en ruhedsnorm med en ruhedsværdi på $R_a = 0,323 \mu\text{m}$ (Figur 15). Målinger viser $R_a = 0,367 \mu\text{m}$. Det giver en kalibreringsfaktor på

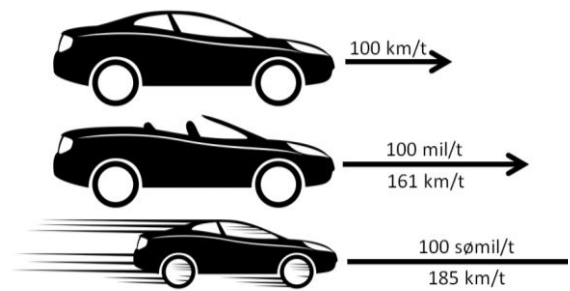
Ligning 2:

$$\text{Kalibreringsfaktor} = \frac{0,323 \mu\text{m}}{0,367 \mu\text{m}} = 0,880$$

Bemærk at kalibreringsfaktoren er enhedsløs. Da den fundne kalibreringsfaktor er mindre end 1 betyder det at ruhedsmåleren måler overflader mere ru end de faktisk er (målt ruhedsværdi > referencens ruhedsværdi). Hvis kalibreringsfaktoren havde været større end 1 havde den målt overfladerne mere glatte end de faktisk er (målt ruhedsværdi < referencens ruhedsværdi).

Kender man kalibreringsfaktoren kan man finde en korrigeret talværdi som er tættere på den faktiske værdi ud fra formlen:

Korrigeret talværdi = Kalibreringsfaktor · Målt talværdi



Figur 16: Indenfor hastighed kan samme talværdi give store forskelle i hvor hurtigt man bevæger sig. Skalaen for meter, mil og sømil er forskellig.

Kalibreringsfaktoren kan benyttes som en korrektion som kan adderes eller multipliceres på den målte talværdi. Det er vigtigt at kalibreringsfaktoren altid angives sammen med en måleusikkerhed.

5.2 En skala

En skala er nødvendig for at kunne sammenligne målinger. En måleskala er et mål for styrken af talværdien foran en enhed. F.eks. er det hurtigere at bevæge sig med 5 sømil/t end 5 km/t (Figur 16). Med temperatur er det endnu mere kompliceret. Her er 50 °C varmere end 50 °F, men -50 °C er koldere end -50 °F.

Boks 7: Eksempler på intervalskalaer



Richterskalaen:

En logaritmisk skala som benyttes til at måle styrken af jordskælv. Dette gøres ved at måle vibrationernes styrke på en seismograf. Richterskalaen er en åben skala, hvilket vil sige at den ikke har noget fast minimum eller maksimum. Men det anses for geofysisk umuligt med jordskælv over 9,5. Det kraftigste jordskælv nogensinde blev målt i Chile i 1960 og nåede en styrke på 9,5. Omkring 6000 mennesker omkom ved dette jordskælv. [3]

Rockwells hårdhedsskala:

Benyttes til at bestemme hårdheden af metaller, eller vedhæftning af tyndfilmsbelægninger til overflader. Hårdheden fastlægges ved at vurdere det indtryk som fås i metallet ved at påtrykke f.eks. en diamantspids ned i overfladen. Dybden af indtrykket fra diamantspidsen omformes dernæst til et hårdhedsnummer. Der findes forskellige Rockwell skalaer som benyttes til materialer med forskellig hårdhed.

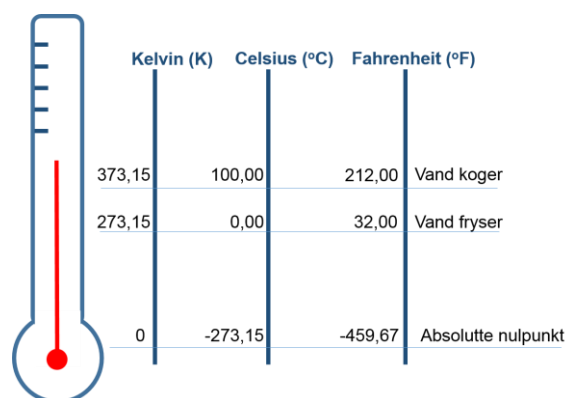


Indenfor måleteknik anvendes både interval- og forholdsskalaer.

- *Intervalskala.* Bruges til kvantitativt at sige noget om forskellen mellem målestørrelser. En intervalskala har ikke et veldefineret nulpunkt. Som eksempler findes Richterskalaen for jordskælv, Rockwells hårdhedsskala, eller en undersøgelse hvor man beder folk om at vurdere smerte på en skala fra 1 til 5 (se boks 7). Simple matematiske beregninger kan udføres på intervalskalaer såsom forskel, gennemsnit, maksimum og minimum.
- *Forholdsskala.* En skala med et veldefineret nulpunkt og fast afstand mellem punkter. Der er samme tidsinterval mellem 0 sekunder til 5 sekunder som mellem 10 sekunder og 15 sekunder.

De fleste måleskaler der anvendes er forholdsskalaer. Med en forholdsskala kan man udføre avancerede matematiske beregninger såsom forhold, procentregning og usikkerhedsberegning.

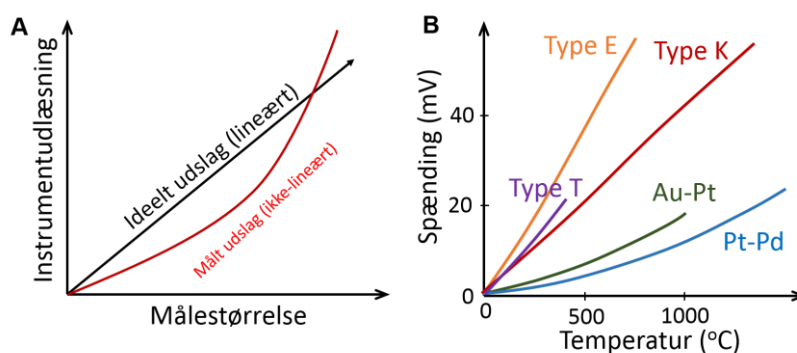
Man kan sagtens anvende en intervalskala til målinger, men man skal passe på med at udføre avancerede matematiske beregninger på den. Celsius ($^{\circ}\text{C}$) og Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) temperaturskalaerne er intervalskalaer. Det betyder at en 5 % temperaturstigning på de to skalaer giver forskellige resultater. En stigning fra 100 $^{\circ}\text{C}$ (212 $^{\circ}\text{F}$) til 105 $^{\circ}\text{C}$ (221 $^{\circ}\text{F}$) svarer til en 5 % stigning på Celsiusskalaen, men kun 4 % stigning på Fahrenheitskalaen, se Figur 17. Dette skyldes at nulpunktet



Figur 17: Udsnit af temperaturskala i kelvin, celsius og fahrenheit til sammenligning. Celsius og fahrenheit skalaerne er intervalskalaer mens kelvin skalaen er en forholdsskala.

på Celsiusskalaen er defineret for frysepunktet af vand, mens nulpunktet for Fahrenheitskalaen er defineret ved frysepunktet for sprit. Faktisk giver det slet ikke mening at snakke om en procentvis stigning på hverken Celsius- eller Fahrenheitskalaen. I stedet skal man anvende Kelvinskalaen. Dette er en forholds skala, og derfor kan man anvende avancerede matematiske beregninger, såsom procentregning.

Det kræver to punkter at etablere en skala. Dog kan forholdsskala etableres ud fra ét velkendt punkt, da man kan vælge 0 som det andet punkt. Til etablering af en skala for masse har man defineret ét lod til at veje præcis 1 kg. Det er det ene punkt på skalaen. Som det andet punkt har man valgt 0. Svarende til at man ikke har et lod på vægten, det vil sige man skal ikke



Figur 18: Instrumentets udlæsning/udslag kan afhænge af i hvilken del af målestørrelsens måleområde man måler i. (A) Udlæsning fra en sensor som har et ikke-lineært udslag sammenlignet med en ideal sensor. (B) Følsomhedskurver for en række forskellige typer af temperaturprober. En temperaturprobes udlæsning ved en given temperatur ses som en spænding.

Boks 8: Sådan udføres en ét-punkts kalibrering

Ét-punkts kalibreringer kan udføres på to måder, med en normal eller et referenceinstrument.

Normal

- 1) Tag en måling med dit instrument af normalen (X)
- 2) Sammenlign din måling med referenceværdien af normalen (R)
- 3) Udregn fejlen på målingen, $F = R - X$
- 4) Læg fejlen F til dine fremtidige målinger

Referenceinstrument

- 1) Udfør en måling med dit instrument (X) og dit referenceinstrument (R) samtidig
- 2) Udregn fejlen på målingen, $F = R - X$
- 3) Læg fejlen F til dine fremtidige målinger

Eksempel

Til brygning af en specialøl, ønsker du at der under brygningen skal holdes en konstant temperatur på 62 °C. Din temperaturprobe er indbygget i kedlen og kan ikke fjernes. Inden brygningen udfører du en ét-punkts kalibrering med et referenceinstrument der er blevet kalibreret på et akkrediteret laboratorium. Du varmer vandet op indtil referenceinstrumentet viser 62 °C. Samtidig aflæser du værdien fra den indbyggede sensor, den viser 65 °C. Fejlen kan nu udregnes til $F = 62\text{ °C} - 65\text{ °C} = -3\text{ °C}$. For dine fremtidige målinger skal du altså trække 3 °C fra den temperatur den indbyggede sensor måler, idet den måler 3 °C for meget.

Bemærk, hvis du ønsker at anvende den indbyggede sensor ved en anden temperatur, f.eks. 52 °C, skal du kalibrere den igen. Du kan nemlig ikke vide om den indbyggede sensor opfører sig på samme måde ved 52 °C som den gør ved 65 °C. Det kunne jo være at sensoren ved 52 °C kun måler 2 °C for meget, og derved er en korrektion på 3 °C for stor.



veje noget. Man kan nu etablere skalaen ved at sige at man skal kunne gå i lige store skridt hele vejen fra 0 til 1 kg.

5.3 Ét punkts kalibrering

Den simpleste kalibrering anvender kun ét kalibreringspunkt. Det vil sige at man kun sammenligner en målt værdi med en referenceværdi ét sted på en skala. En ét-punkts kalibrering kan kun anvendes hvis man: 1) altid måler det samme sted, f.eks. en konstant temperatur, eller 2) man ved at ens skala er lineær, f.eks. har mange temperaturprober et lineært udslag. Hvilket betyder at sensor udlæsningen stiger lineært med temperaturen. Se Figur 18 (A) (sort linje).

I praksis anvendes ét-punkts kalibreringer ofte, da det er en hurtig måde at evaluere sit system på. Det kan f.eks. bruges til at undersøge drift på et instrument. Dog er det vigtigt at huske at ét af de to ovenstående kriterier skal være opfyldt.

Måleteknisk skal man være varsom med at anvende ét-punkts kalibreringer, da det kræver at man gør nogle antagelser om sit system. Har man kalibreret sin temperaturprobe ved 50,0 °C, ved man at den måler rigtigt her. Man kan dog ikke sige noget om korrektheden ved 50,1 °C uden at gøre nogle antagelser om hvorledes skalaen stiger. F.eks. med hvilken hældning den stiger, eller om stigningen f.eks. er lineær, eller ikke-lineær.

I boks 8 er beskrevet hvorledes en ét punkts kalibrering kan udføres.

5.4 Flere-punkts kalibrering

Ideelt set vil en sensor give en udlæsning hvor der er en lineær sammenhæng mellem den sande værdi af den målte målestørrelse og udlæsningen. Se den sorte linje på Figur 18 (A). Når man udfører en vejning, bør vejningen af et 100 gram lod altid give samme udslag på vægten. I praksis kan der dog være forskel om man begynder ved 0 kg eller ved 3 kg. Med en flere-

punkts kalibrering kan man korrigere for et ikke lineært udslag fra vægten, se Figur 18 (A).

Jo mere man presser sit udstyr, f.eks. ved at benytte det i dets yderpunkter, desto vigtigere bliver det at kalibrere det i mange punkter. En temperaturprobe der kan måle op til 1000 °C, kan sagtens være lineær fra 0 °C til 100 °C, men ikke-lineær fra 900 °C til 1000 °C. Man kan ofte vælge at anvende en bestemt type temperaturprobe der er lineær i det område som man ønsker at måle. Se Figur 18 (B).

For at opnå en kalibrering, som kan anvendes i et større måleområde, skal man kalibrere sit udstyr i flere målepunkter. Man bør stadig udføre kalibreringen så tæt som muligt på de værdier man ønsker at måle på. Derved får man den min dste usikkerhed. Ligeledes bør man sørge for at have kalibreringspunkter på begge sider af det forventede målepunkt. Skal man f.eks. måle atmosfærisk tryk omkring 1 atm, er det bedre at få kalibreret udstyret ved 0,95 atm, 1 atm og 1,05 atm, end at få det kalibreret ved 0,90 atm, 0,95 atm og 1 atm.

I boks 9 gennemgås det hvorledes en flere-punkts kalibrering kan udføres.

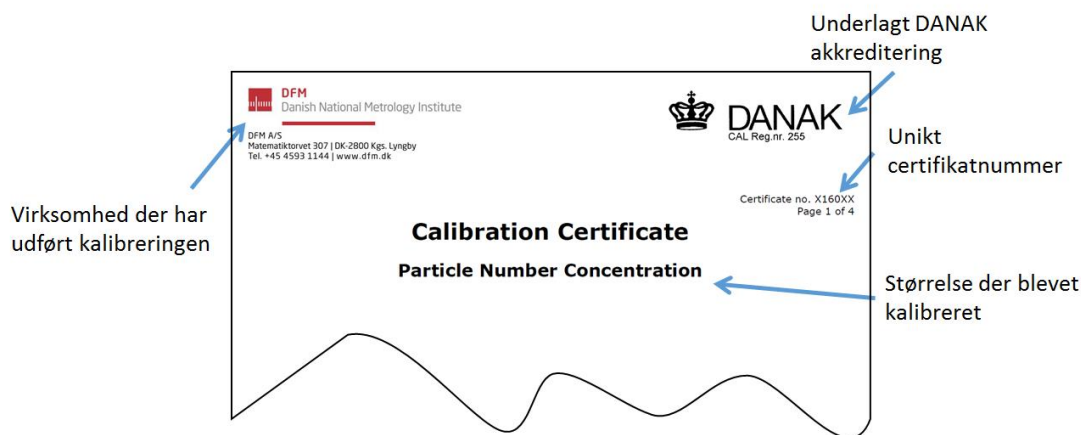
5.5 Kalibrering hos en akkrediteret aktør

Hvis du skal have kalibreret en normal eller noget udstyr hos en aktør, skal du først overveje hvor stor en nøjagtighed og præcision som ønskes på de pågældende målinger. Alt afhængig af hvilken aktør du vælger vil nøjagtigheden være forskellig idet aktørerne befinder sig forskellige steder i sporbarhedskæden. Se Figur 10.

For hvert led man bevæger sig ned i sporbarhedskæden stiger usikkerheden. Du kan som omtalt i afsnit 3 anvende en arbejdsnormal hvilket resulterer i endnu et ekstra led i sporbarhedskæden, og medføre en øget usikkerhed.

En virksomhed kan således få deres referencenormal kalibreret hos enten et akkrediteret laboratorie eller et metrologiinstitut, hvor metrologiinstituttet vil have den mindste usikkerhed.

Hvis virksomheden vælger den lange sporbarhedskæde vil den bestå af fem kalibreringer som alle bidrager til en større og større usikkerhed. Leddene er: BIPM -> Metrologiinstitut -> akkrediteret laboratorium -> industri (referencenormal) -> industri (arbejdsnormal) -> måling. Hvis der er behov for en lille usikkerhed må man således springe ét eller flere led over i kæden.



Figur 19: Eksempel på sidehoved af et kalibreringscertifikat.

Store virksomheder har ofte deres egne reference-normaler som de internt kalibrerer arbejdsnormaler med. Mellemstore virksomheder har kun arbejdsnormaler som de får kalibreret hos en af aktørerne. Små virksomheder får ofte deres udstyr kalibreret direkte hos en aktør, og har således ikke selv nogen normaler. Kalibrering af udstyr og udstedelse af certifikater vil blive beskrevet nærmere i undervisningsmaterialet 'Kalibreringer'. På Figur 19 ses et eksempel på et sidehoved på et kalibreringscertifikat som udstedes i forbindelse med en kalibrering hos en aktør.

Boks 9: Sådan udføres en flere-punkts kalibrering

For at udføre en flere-punkts kalibrering skal man anvende enten et kalibreret referenceinstrument eller flere normaler.

Kalibrering med et referenceinstrument

- 1) Udfør en måling med dit instrument (y) og dit referenceinstrument (x) samtidig
- 2) Gentag 1) for flere målepunkter
- 3) Indtegn dine målte værdier som funktion af værdien fra referenceinstrumentet i et koordinatsystem. Det vil sige målte værdier på y-aksen og referenceværdier på x-aksen.
- 4) Udfør en regression for at finde en funktion som beskriver de indtegnede værdier bedst muligt. Det kan f.eks. være en lineær regression af typen: $y = ax + b$,

Hvor konstanter a og b skal bestemmes. Man kan anvende Excel eller et analyseværktøj til at udføre regressionen.

- 5) Korriger alle dine fremtidige målinger med: $x = (y - b) / a$

Kalibrering med flere normaler

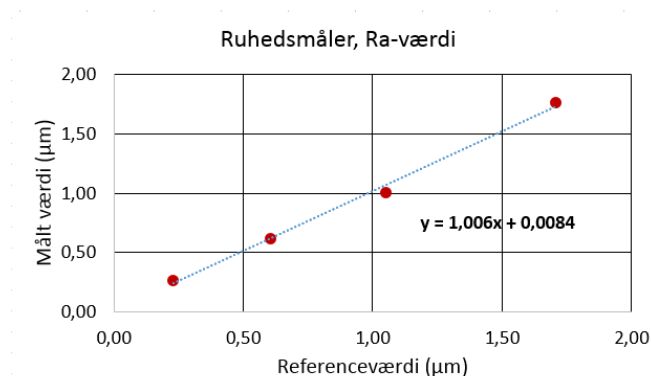
- 1) Tag en måling med dit instrument af normalen (y)
- 2) Sammenlign din måling med referenceværdien af normalen (x)
- 3) Gentag 1) og 2) for flere normaler som har forskellige størrelse talværdi af den givne målestørrelse
- 4) Indtegn de målte værdier som funktion af referenceværdien for normalerne i et koordinatsystem. Det vil sige målte værdier på y-aksen og referenceværdien angivet på normalen på x-aksen.
- 5) Udfør en regression med en funktion som følger værdiernes udvikling bedst muligt. Det kan være en lineær regression af typen: $y = ax + b$,

Hvor konstanter a og b skal bestemmes. Man kan anvende Excel eller et analyseværktøj til at udføre regressionen.

- 6) Korriger alle dine fremtidige målinger med: $x = (y - b) / a$

Eksempel

Du ønsker at bestemme hvor nøjagtigt din ruhedsmåler måler ruheden (målestørrelsen) af en ståloverflade. Derfor måler du på fire ruhedsnormaler hvor du kender deres referenceværdi. Denne referenceværdi er den såkaldte Ra-værdi som fortæller noget om en overflades ruhed. De målte Ra-værdier plottes som funktion af referenceværdierne, se figuren.

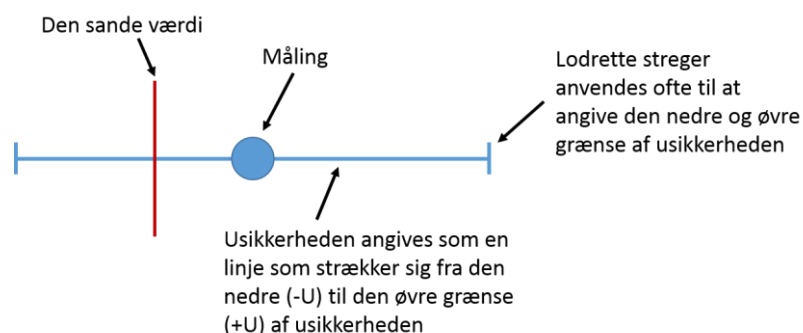


Da det ses at målepunkterne tilnærmeth ligger på en ret linje, kan der udføres en lineær regression. Den fundne ligning, $y = 1,006 \cdot x + 0,008 \mu\text{m}$, kan så efterfølgende bruges til at finde korrektionen på en måling som har en Ra-værdi mellem $0,2 \mu\text{m} - 1,7 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$). I ligningen er: y – den målte værdi og x – referenceværdien.

Hvis du med din ruhedsmåler måler en Ra-værdi på $0,532 \mu\text{m}$ på en ståloverflade, skal du korrigere dine målinger med ligningen:

$$x = \frac{y - b}{a} = \frac{0,532 \mu\text{m} - 0,008 \mu\text{m}}{1,006} = 0,521 \mu\text{m}$$

Den korrigerede værdi (x), er en mere nøjagtig værdi for overfladens ruhed.



Figur 20: Illustration af en grafisk angivelse af en måling (blå cirkel) med en usikkerhed. Den blå linje angiver det interval hvor den sande værdi ligger indenfor.

6 Måleusikkerhed

I ovenstående kapitel blev det forklaret hvordan sporbarhed sikrer pålidelige målinger. Det blev også fremført at usikkerheden på målingen stiger for hvert led man går ned i sporbarhedskæden. I dette afsnit vil selve måleusikkerheden blive diskuteret.

Måleusikkerhed er et resultat af at målinger ikke kan foretages under ideelle og perfekte forhold. Målingerne vil altid være påvirket af forskellige parametre såsom målemiljøet. Det betyder at den målte værdi ikke nødvendigvis er den samme som den sande værdi. For at kompensere for dette, angiver man et interval for ens måling, indenfor hvilket man er næsten sikker på at den sande værdi ligger (Figur 20). Dette interval kan være smalt eller bredt afhængig af størrelsen af måleusikkerheden.

En måling er **altid** behæftet med en måleusikkerhed. Resultatet af en måling skal således altid angives som målingens talværdi og enhed, og med den tilhørende måleusikkerhed. Har du målt længden (L) af en målekloids, kan du angive resultat som

$$L = 12,01 \text{ cm}, U(L) = 0,05 \text{ cm}$$

Hvor $U(L)$ angiver måleusikkerheden på den målte længde L. Dette angiver at målekloidsens sande længde ligger indenfor intervallet 11,96 til 12,06 cm. Ofte ser man også et resultat af en måling opskrevet med sin usikkerhed på en linje, f.eks.:

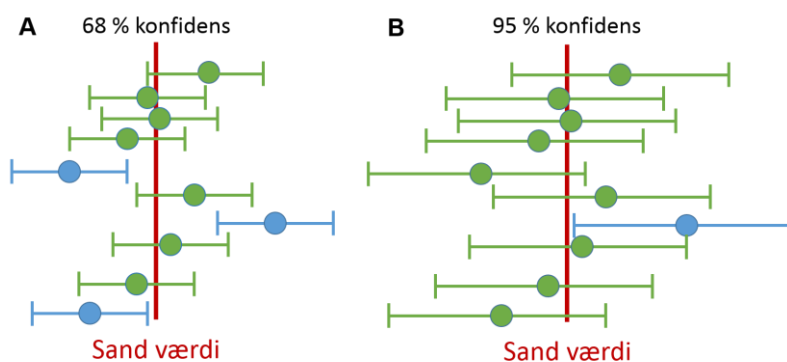
$$L = (12,01 \pm 0,05) \text{ cm}$$

Her skal man dog være meget varsom, da $\pm$ ofte også anvendes til at angive spredning, tolerancer, konfidensgrænser mm. Det anbefales derfor at anvende ovenstående notation med $U(x)$ for at undgå forvirring. Hvis $\pm$ notation anvendes, skal man klart og tydeligt skrive hvilken betydning $\pm$ har i konteksten.

Ofte angiver man en usikkerhed der sikrer at enten 68 % eller 95 % af de målte værdier plus/minus deres usikkerhed overlapper med den sande værdi. I enkelte tilfælde vælger man 99 % eller højere. Dette kaldes et *konfidensinterval*, og vil blive beskrevet detaljeret i undervisningselement A3 "Introduktion til usikkerhedsbudgetter". Et stort konfidensinterval sikrer at den sande værdi med stor sandsynlighed ligger indenfor usikkerheden af målingen, se Figur 21.

På Figur 22 ses et eksempel på en måling af kviksølvindholdet i en tunfisk. Indholdet er målt til 0,8 mg, med en usikkerhed på målingen på 0,5 mg. Det vil sige at det sande indhold af kviksølv i fisken ligger indenfor intervallet 0,3 til 1,3 mg. Den store usikkerhed på målingen medfører at det interval som den sande værdi ligger i er meget bredt.

Den danske grænseværdi for hvor meget kviksølv en spisefisk må indeholde pr. kilo er på 1,0 mg [4]. I tilfældet med tunfisken, vil man altså på baggrund af målingen ikke kunne sige om fiskens indhold af kviksølv overholder grænseværdien. For at være på den sikre side, vil man konkludere at grænseværdien ikke er overholdt. Alternativt kan man undersøge hvordan

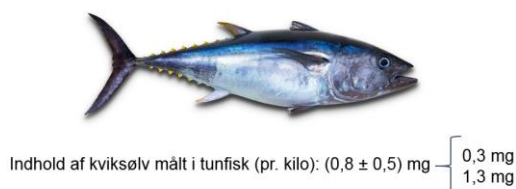


Figur 21: Målinger i forhold til den sande værdi (rød linje). Den sande værdi er et teoretisk udtryk som man aldrig vil kunne måle eksperimentelt. I stedet angiver man et område (usikkerheder) som med en hvis sandsynlighed (konfidens) sikrer at den sande værdi ligger indenfor. (A) Med 68 % konfidens vil ca. 2 ud af 3 målepunkter og tilhørende usikkerhed ikke overlappe med den sande værdi (blå punkter). (B) Med 95 % konfidens vil ca. 1 ud af 20 målepunkter med tilhørende usikkerhed ikke overlappe med den sande værdi (blå punkter).

måleusikkerheden blev så høj, og derefter foretage en ny mere omhyggelig måling.

I undersøgelsen af størrelsen af måleusikkerheden skal man tage højde for at måleusikkerheden stammer fra mange kilder, herunder måleudstyret, måleemnet (omtales i afsnit 8) eller målemetoden. For at kunne foretage pålidelige målinger er det derfor vigtigt at gennemtænke alle de mulige kilder til usikkerhed der kan være. Mere herom i afsnit 8.

For at etablere en fælles måde at håndtere måleusikkerheder på, har den internationale organisation BIPM udarbejdet en vejledning. Vejledningen omtales som GUM, hvilket er en forkortelse for "Guide to expression of uncertainty in measurements". Den danske udgave af vejledningen (DS/ISO 98-3:2008) indeholder desuden gode eksempler.



Figur 22: Kviksølvindholdet i en tunfisk er målt til 0,8 mg med en usikkerhed på 0,5 mg. Det vil sige at indholdet ligger et sted mellem 0,3 og 1,3 mg.

I GUM vejledningen deles usikkerhederne op i to overordnede kategorier. Disse kaldes type A og type B usikkerheder.

Type A usikkerheder kan estimeres ved hjælp af statistiske metoder. F.eks. ved at udføre gentagende målinger og beregne standardafvigelsen. Type A usikkerhedsbidrag kan komme fra repetérbarhed af målinger (afsnit 8.4) og variationer på måleemnet.

Eksempel: Skal man måle antallet af sod-partikler i udstødningsgas vil det variere med tiden. Her kan man tage et gennemsnit af mange målinger for at finde en gennemsnitsværdi. Kun ved at tage uendeligt mange målinger får man det korrekte gennemsnit. Dette er ikke muligt i praksis og derfor giver det et bidrag til usikkerheden.

Type B usikkerheder skal derimod estimeres med andre metoder end statistiske. F.eks. ud fra erfaring med udstyret, fra kalibreringshistorikken eller fra producentens oplysninger. Type B usikkerheder kan være termisk udvidelse, afhængighed af omgivende tryk, opløsning på et instrument, ikke-linearitet på akser i et mikroskop, en rotationsaksel der ikke er perfekt centreret m.fl.

Eksempel: Du skal måle længden af en målekods i rustfrit stål. Klossen er blevet kalibreret ved 20 °C, men du skal bruge den i et lokale der er op til 30 °C. Ved et opslag på internettet finder du at den termiske udvidelse for stål er 10^{-5} K^{-1} (0,00001 K^{-1}). Da en forskel på 10 °C er lig med 10 K, finder du at udvidelsen i dette tilfælde er 10^{-4} (0,0001). Det vil sige at en kods der er kalibreret til 10,000 cm ved 20 °C, vil i det varme lokale være 10,001 cm. Den største fejl fra termisk udvidelse er altså 0,001 cm. Du anvender derfor et usikkerhedsbidrag på 0,001 cm.

Den matematiske måde at håndtere disse usikkerheder på vil blive behandlet i undervisningselement A3 "Introduktion til usikkerhedsbudgetter".

Tidligere delte man usikkerheder op i *tilfældige* og *systematiske usikkerheder*. Der er ikke en enkel overensstemmelse mellem disse tidligere betegnelser og betegnelserne type A og type B usikkerheder. Ydermere kan betegnelsen systematisk usikkerhed være vildledende og bør derfor undgås [5].

7 Måleudstyr

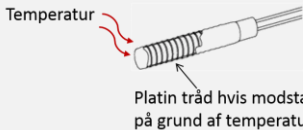
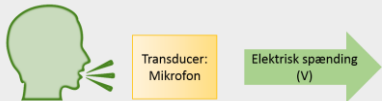
Måleudstyr benyttes til at udføre målinger. I Tabel 4 ses en oversigt over de mest anvendte kategorier af måleinstrumenter, og eksempler på konkret udstyr inden for hver kategori.

Måleinstrumenter har en *opløsning*, som er et udtryk for hvor følsomt instrumentet reagerer på ændringer i den målestørrelse som undersøges. Det vil sige den mindste ændring som et instrument kan registrere.

Man bruger også opløsning om en computerskærm. Opløsningen er her bestemt af hvor mange pixels skærmen har. Jo flere pixels desto bedre opløsning.

En høj opløsning betyder at man skal tæt på skærmen før detaljerne begynder at blive vasket ud.

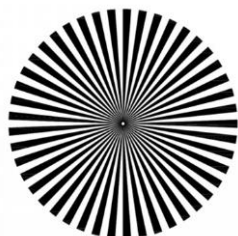
Ideelt set bør man måle opløsningen af ens instrument. Det kan gøres ved enten at måle det op med et bedre instrument eller ved at anvende specielle testemner, som er udviklet netop til dette formål. Det kunne f.eks. være en Siemen stjerne til at måle optisk opløsning med, se Figur 23. Alternativt kan man få et estimat af opløsningen ved at slå op i udstyrets manual. Opløsningen indgår som en parameter i måleusikkerheden. Bemærk: Antallet af cifre på displayet angiver IKKE opløsningen af instrumentet. Det er en

Måleinstrument	Beskrivelse	Eksempel	Illustreret eksempel
Sensor	Føleenhed som påvirkes direkte af målestørrelsen, og reagere på grund af denne påvirkning. Sensoren indgår som et element i et målesystem.	Luftfugtigheds-sensor.	Modstandstermometre: Platin tråd som reagere på temperaturforskelle ved at materialets modstand ændres på en forudsigelig måde. 
Transducer	Føleenhed som omformer en indgangsstørrelse til en anden udgangsstørrelse.	Tryktransducer (tryk omdannes til en elektrisk spænding). pH elektrode. Benyttes ofte i kontrolsystemer.	Mikrofon: Lydbølger omdannes til et elektrisk signal. 
Visende instrument	Viser måleværdien direkte.	Mikrometerskrue. Tommestok.	Lineal: Viser direkte talværdien af målestørrelsen. 
Detektor	Føleenhed som viser tilstedeværelsen af en målestørrelse.	Partikeltæller. Røgalarm.	pH-indikator: Farvestof som skifter farve afhængig af pH'en af en væske. 

Tabel 4: Forskellige måleinstrumenter og eksempler på disse.

udbredt misforståelse at man kan sige hvad opløsningen af et instrument er, ved at se hvornår det sidste tal på displayet ændrer sig.

Hvis et instrument har et display som angiver en målestørrelse med en præcision på 0,001, men støjen fra



Figur 23: Siemen stjerne til at måle optisk opløsning med.

omgivelser såsom elektriske støj er på 0,03. Så kan instrumentet ikke måle med en højere opløsning end 0,03 da alt under dette drukner i støjen. Så selvom displayet angiver målestørrelsen med tre decimaler (0,001) kan den ikke bestemmes så præcist. Derfor er det vigtigt at være kritisk overfor de værdier man aflæser på et udstyrs display.

Manualen indeholder også oplysninger såsom udstyrets *måleområde*. *Måleområdet* angiver den øvre og nedre grænse for hvor udstyret kan måle eller benyttes. En køkkenvægt kan være specificeret til at veje op til 3 kg. Det vil sige at den har et måleområde fra 0 kg til 3 kg.

Kendes udstyrets måleområde, og usikkerheden på målinger foretaget i både øvre og nedre grænse af måleområdet kender man udstyrets *måleevne*.

Ofte vil måleevne ikke fremgå af et instruments manual da usikkerheden på målinger ikke fremgår. Derfor er man nødt til selv at evaluere måleevne for sit udstyret. Det skal bemærkes at hvis måleevnen fremgår af manualen, er den kun gældende under ideelle forhold. Anvendes udstyret i en produktionshal i stedet for et laboratorium, vil måleevnen være dårligere. Bestemmelse af måleevnen gennemgås i undervisningsselement A4.

I manualen kan også fås information om hvilke betingelser instrumentet skal anvendes under for at sikre pålidelige målinger (brugsbetingelserne). Disse betingelser kan f.eks. være et temperaturområde hvor udstyret skal bruges ved, eller vibrationsforhold således at vibrationerne ikke forstyrrer målingen.

7.1 Vedligeholdelse af måleudstyr

For at sikre at måleudstyr bliver ved med at måle nøjagtigt, og ikke forringes med tiden er det nødvendigt at vedligeholde udstyret. Korrekt vedligeholdelse vil også forlænge levetiden af udstyret.

Vedligeholdelse indbefatter både fysisk vedligehold såsom rensning eller smøring. Men også ikke-fysisk vedligehold såsom regelmæssig kalibreringer, opdatering af procedurer og kontrol ved hjælp af logbøger.

Den nødvendige fysiske vedligeholdelse fremgår af udstyrets manual. Ligesom en bil jævnligt skal have skiftet olie, skal udstyr med mekaniske dele jævnligt smøres. Derudover, skal måleudstyr systematisk kalibreres, som omtalt i afsnit 4. Ved at udføre kalibreringer jævnligt kan man opdage om der er opstået fejl som forøger måleusikkerheden og forringer måleevnen.

Ligesom at en referencenormal kan ændre sig med tiden, kan måleudstyr også være udsat for drift. Desuden kan måleudstyr have en nulpunktsfejl. Nulpunktsfejl er en målefejl på nulværdien af målestørrelsen.

Eksempel: Du ønsker at afveje 300 g mel på din køkkenvægt. Se Figur 24. Når du tænder vægten viser displayet 0 g. Da det hurtigt bliver noget svineri at hælde mel direkte på vægten, sætter du en skål på den. Nu viser displayet 250 g. Hælder du mel i skålen indtil displayet viser 300 g, får du alt for lidt mel. Derfor skal



Figur 24: Nulstilling af en vægt er vigtig før brug.

man først korrigere for sin nulpunktsfejl. Det kan gøres ved at trykke tara. Nu viser vægten 0 g igen, og du kan veje 300 g mel af.

Drift og nulpunktsfejl opdages typisk ved en *prøvning* af et instrument før brug.

I en *prøvning* bestemmes én, eller flere egenskaber, for et objekt eller et måleudstyr ved brug af den pågældende måleprocedure. Det skal bemærkes at det engelske ord for prøvning er *test* hvilket ofte anvendes på dansk selvom det ikke er den rette betegnelse.

Eksempel: Du har netop fået et nyt termometer. Før brug vælger du derfor at udføre en prøvning for at undersøge om det har en nulpunktsfejl. Du anvender et glas fyldt med vand og isterninger, da du her ved at



Figur 25: Vand går fra flydende til fast form ved 0 °C (og et tryk 1 atm). Dette kan bruges til at tjekke et termometer for nulpunktsfejl. Termometeret skal vise 0 °C når det sættes ned i et glas med isterninger.

temperaturen er 0 °C. Se Figur 25. Aflæsningen af termometeret siger -0.9 °C. Du kan acceptere en afvigelse på ± 2 °C, og du kan derfor anvende termometeret. Bemærk, det vil være mere måleteknisk korrekt at udføre en kalibrering. Det er dog også meget mere tidskrævende, og derfor anvendes prøvninger ofte.

Måleudstyret vil som regel skulle overholde specifikke krav som f.eks. kan stamme fra målemetoden, eller operatørens krav til måleudstyrets kvalitet. Efter en prøvning vil operatøren således på en objektiv måde have skaffet vidnesbyrd på om måleudstyret overholder disse specifikke krav. Dette kaldes for en *verificering*. I de tilfælde hvor udstyret ikke overholder kravene skal udstyret kalibreres.

Som omtalt skal måleudstyr også regelmæssigt kalibreres. Foreligger der historik på måleudstyret kan kalibreringsintervallet bestemmes ved at studere historikken. På Figur 14 ses et eksempel på en historik på et 1 kg masselod. Hvis udstyret generelt er stabilt kan operatøren vælge et længere kalibreringsinterval, mens et mere svingende udstyr muligvis skal kalibreres oftere. F.eks. skal elektroden i et pH meter kalibreres oftere end en ruhedsmåler, da elektroden er mere påvirket af omgivelserne (Figur 26).

Ud over den periodiske kalibrering, skal man altid overveje om forkert håndtering af måleudstyr medfører at udstyret skal kalibreres en ekstra gang. Hvis man f.eks. taber en skydelærer på gulvet, skal den kalibreres før tid for at sikre at den stadig måler korrekt. Har man varmet en temperaturprobe op til over dens specificerede måleområde, kan den have ændret følsomhed, og skal kalibreres igen. Har en operatør sat fedtfigre på en målekods kan det påvirke målingerne, og den bør kalibreres igen.

Eksempel: Hvis glaselektroden i et pH-meter bliver ridset under en rensning kan det muligvis ændre elektrodens måleegenskaber (Figur 26). Glaselektroden skal så i første omgang igennem en prøvning hvor det verificeres om elektroden måler korrekt. Hvis ikke skal den kalibreres, eller i værste fald kasseres.



Figur 26: En pH glaselektrode skal kalibreres før brug.

7.2 Logbog og kontrolkort

En del af vedligeholdelsen af ethvert udstyr er løbende at evaluere udstyret. Dette kan som nævnt systematiseres ved at bruge en *logbog*. At føre en logbog over et udstyr sikrer at der holdes øje med udstyrets måleevne og tilstand, og ikke mindst at alle operatører har adgang til den nyeste information om

udstyret. En logbog kan være enten en fysisk bog eller et digitalt dokument.

I en logbog noteres typisk følgende:

- Dato og tidspunkt for hvornår udstyret blev benyttet.
- Operatøren.
- Hvad det blev benyttet til.
- Hvilke indstillinger udstyret blev benyttet med.
- Miljøforhold. F.eks. temperatur eller luftfugtighed.
- Eventuelle afvigelser eller problemer med udstyret.
- Dato for vedligeholdelse og vedligeholdelsens art.

I boks 10 ses et eksempel på en logbog for en trykmåler.

Boks 10: Eksempel på en logbog

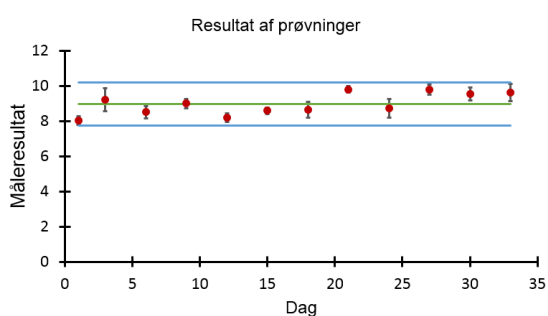
Udstyr	Trykmåler
Fabrikant og type	Wika CPG1000
Serie nr.	26201
Intern ID	TM03
Placering	lokale 307-945
Kalibreringsinterval	2 mdr

Dato	Operatør	Anvendelse	Temperatur (°C)	Status
03-04-2016	PK	Kalibrering	37,5	Ok
06-04-2016	PK	Måle tryk i hovedkammer	37,2	Ok
01-05-2016	U7	Måle tryk i hovedkammer	37,4	Ok
05-05-2016	U7	Måle tryk i hovedkammer	37,3	Ok
20-05-2016	PK	Måle tryk i hovedkammer	37,5	Ok
31-05-2016	PK	Måle tryk i hovedkammer	37,5	Batteri skiftet ellers ok
03-06-2016	PK	Kalibrering	37,4	Ok

For at sikre en systematisk vedligeholdelse af måleudstyr kan man også oprette et *kontrolkort*.

I et kontrolkort noteres resultaterne fra de prøvninger som regelmæssigt foretages. Kontrolkortet benyttes til at vurdere om resultaterne ligger som forventet indenfor nogle fastsatte *acceptgrænser*. Acceptgrænserne bør fremgå af udstyrets stamkort.

På Figur 27 ses et eksempel på et grafisk kontrolkort. På det grafiske kontrolkort er indtegnet måleresultaterne fra prøvninger foretaget på forskellige dage. Ligeledes er indtegnet en linje svarende en referenceværdi (grøn), og to acceptgrænser (blå) som målingerne skal ligge indenfor for at udstyret ikke skal fejle. Da alle de målte værdier for prøvningerne ligger indenfor acceptgrænserne, er det ikke nødvendigt at foretage en ny kalibrering af udstyret.



Figur 27: Eksempel på et kontrolkort hvor prøvningsdag er angivet langs x-aksen, og selve måleresultatet langs y-aksen (røde cirkler). Derudover er referenceværdien (grøn linje) og øvre og nedre acceptgrænser (blå linjer), som angiver det område som målingen skal være indenfor for ikke at fejle.

Hvis udstyr er udsat for overbelastning, forkert behandling, giver mistænkelige resultater, eller er defekt skal det tages ud af brug. Ydermere skal det mærkes tydeligt som værende ude af drift, og adskilles fra andet udstyr for at forhindre at det anvendes. Hvis en efterfølgende reparation eller en ny kalibrering viser at udstyret fungerer korrekt kan udstyret tages tilbage i anvendelse.

8 Kilder til måleusikkerhed

Som omtalt er enhver måling behæftet med en måleusikkerhed. Der er flere kilder som bidrager til måleusikkerheden, og det er vigtigt at kende disse kilder så man kan være opmærksom på dem under en måling.

8.1 Måleteknikkens sekstakkede stjerne

De væsentligste kilder til måleusikkerhed er opsummeret i måleteknikkens sekstakkede stjerne som ses i Figur 28.

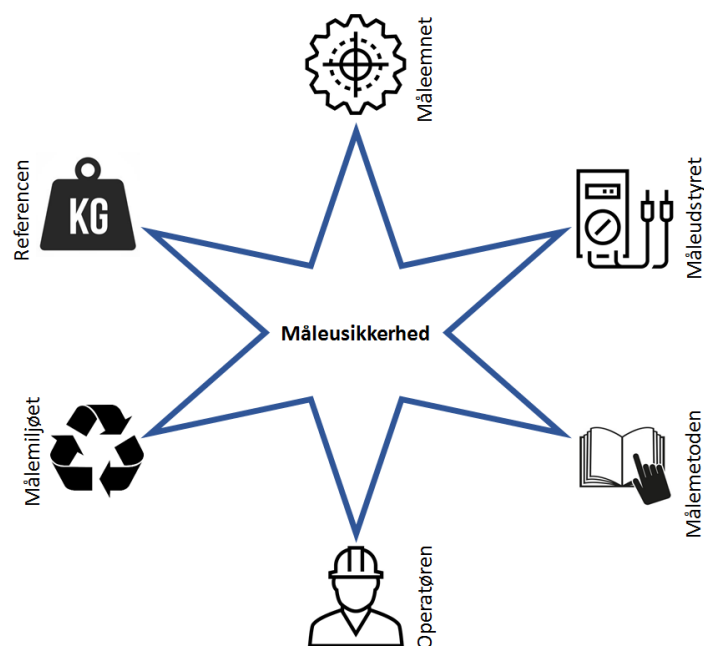
De seks områder er: 1) Måleemnet der skal måles på 2) referencen 3) måleudstyret der anvendes til målingen 4) målemetoden 5) omgivelserne (miljø) og 6) operatøren. Det er meget varierende i hvilket omfang de enkelte kilder bidrager til den samlede måleusikkerhed. Det er derfor vigtigt at man tager disse forhold i betragtning ved en måling.

Bidraget fra de enkelte elementer til måleusikkerheden vil blive gennemgået i de følgende underafsnit 8.2 til 8.7. Alle områderne er vigtige for at sikre gode og pålidelige målinger. I praksis er operatøren oftest den største kilde til fejl i målingerne. Derfor har man et stort ansvar som operatør.

8.2 Måleusikkerhed fra måleemnet

Måleemnet er den størrelse eller det objekt som man ønsker at måle på. Det er vigtigt at vide hvad man måler på, inden man begynder at måle. Det hjælper ikke at have en kalibreret skydelære til rådighed, hvis man skal måle op til et køkken. Ligeledes kommer man ikke langt med et målebånd, hvis man skal måle størrelsen af et gevind. Overvej derfor altid om du har det rigtige måleudstyr til rådighed. Nogle emner vil kræve at man anvender flere forskellige instrumenter til en nøjagtig opmåling.

De emner, eller objekter, man måler på vil aldrig være perfekte. Et eksempel er hvis overfladen af et emne er ujævn så kan det være svært at vurdere præcist



Figur 28: Måleteknikkens sekstakkede stjerne.

hvor stort emnet er. Det vil øge usikkerheden på målingen. Andre emner vil ændre sig med tiden. På Figur 29 ses et emne som kan være særdeles svært at opmåle.

Eksempel: Du er af din urimelige leder blevet sat til at måle diameteren af en elastik med en skydelære. Afhængigt af hvor du måler og hvor hårdt du presser ændrer dit resultat sig. Elastikken (måleemnet) er ikke særlig velegnet til metrologiske målinger og dit usikkerhedsbidrag fra måleemnet bliver derfor stort.



Figur 29: Nogle emner er sværere at måle på end andre.

Inden man påbegynder en måling er det derfor vigtigt at vurdere hvor meget og hvordan emnet bidrager til usikkerheden. I ovenstående eksempel behøver du ikke bruge lang tid på at kalibrere din skydelære, da usikkerheden fra måleemnet vil være meget større end bidraget fra måleudstyret.

8.3 Måleusikkerhed fra referencen

Målinger af en references målestørrelse, f.eks. længden af en måleklods, er altid behæftet med en usikkerhed. Det er ikke muligt at måle et emne op bedre end ens reference tillader. Med andre ord, usikkerheden på en måling af et ukendt emne kan ikke blive mindre end usikkerheden på referencen. Usikkerheden på en reference er arvet fra sporbarhedskæden, idet hver sammenligning som foretages igennem sporbarhedskæden øger usikkerheden.

En reference ændrer sig med tiden på grund af drift eller slid. Drift er et udtryk for at referencen langsomt ændrer sig. Et masselod kan samle støv og derved blive tungere. Hvis man renser et masselod kan man beskadige overfladen og dermed gøre det lettere. Ved jævnligt at få sin reference kalibreret kan man holde øje med driften af den. Drift bør være meget mindre

end usikkerheden. Er den ikke det må man få referencen kalibreret oftere. På Figur 14 ses et eksempel på en sådan drift for et masselod.

Ændringer kan også opstå på grund af slitage, f.eks. slides en ruhedsnormal eller en måleklods ved brug. Når man klemmer en skydelære sammen om en måleklods kan det let lave ridser i overfladen. Det er derfor vigtig at holde øje med tilstanden af referencen. Dette er specielt vigtigt for referencer der er i fysisk kontakt med måleinstrumentet.

For at sikre stabilitet af den længde som måleklodser har, produceres de af et materiale med en lav termisk udvidelse, således at måleklodsernes længde ikke ændres for meget ved forskellige temperaturer. Derudover skal måleklodser være hårde og robuste overfor ridser. Standard måleklodser er lavet af hærdet stål, mens måleklodser af en højere klasse er lavet af wolframkarbid eller kromkarbid, fordi det er hårdere og mere slidstærkt.

Et gitter i silicium, der kan anvendes som reference for mikroskoper, ændrer sig typisk meget lidt. De kan nøjes med at blive kalibreret f.eks. hvert 5 år. En pH-referenceopløsning har kort holdbarhed. Den vil typisk skulle anvendes indenfor 6 måneder.

8.4 Måleusikkerhed fra måleudstyret

Alt måleudstyr har en opløsning som angiver hvor følsomt udstyret kan reagerer på ændringer i den målte målestørrelse. Mere om opløsning i afsnit 7. Opløsningen er en af de bidrag som skal medtages når man vurderer måleudstyrets samlede bidrag til måleusikkerheden.

Ud over måleudstyrets opløsning er det også vigtigt at have kendskab til dets *repetérbarhed* og *reproducerbarhed*.

Repetérbarheden fortæller om graden af overensstemmelse mellem gentagende målinger foretaget over et kort tidsrum og under samme betingelser. Det

vil sige samme omgivelser, samme operatør, samme målemetode og med samme måleudstyr.

Eksempel: En måling af repetérbarheden for en trykmåler (Figur 30) kan bestå i at man gentager en trykmåling 10 gange lige efter hinanden. Efterfølgende kan man så ved hjælp af statistiske metoder beregne spredningen af de 10 målte tryk-værdier. Beregningen af spredning forklares i undervisningselement A3 "Introduktion til usikkerhedsbudgetter". Er spredningen lille har man en god repetérbarhed, og bidraget til den samlede måleusikkerhed er tilsvarende lille.

Reproducerbarhed er derimod graden af overensstemmelse mellem målinger som ikke foretages ved helt samme betingelser og dag-til-dag variationer. Målingerne kan f.eks. foretages på forskellige tidspunkter, eller af forskellige operatører.

Eksempel: Reproducerbarheden af den førromtalte trykmåling bestemmes ved at gentage de 10 målinger dagen efter. Ideelt set bør målinger foretages over minimum to dage og gerne med forskellige operatører. Ligesom med repetérbarheden kan usikkerhedsbidraget fra reproducerbarhed bestemmes ved brug af statistiske metoder som beskrives i undervisningselement A3 "Introduktion til usikkerhedsbudgetter".

Både repetérbarhed og reproducerbarhed skal bestemmes eksperimentelt. De giver begge et bidrag til *usikkerhedsbudgettet*. Et usikkerhedsbudget er en angivelse af den samlede måleusikkerhed på en måling.



Figur 30: Trykmåler.

I usikkerhedsbudgettet indgår således alle komponenter som bidrager med en usikkerhed. Mere herom i undervisningselementet A3 "Introduktion til usikkerhedsbudgetter".

8.5 Måleusikkerhed fra målemetoden

En *målemetode* er en generel beskrivelse af de arbejdsprocesser som benyttes til en måling. Til den samme måling kan man ofte anvende flere forskellige målemetoder for at opnå den ønskede målestørrelse. Målemetoden skal således vælges så den opfylder kundens behov og specifikationer, og dækker de krav som er relevante for målingen.

I princippet burde målemetoden ikke betyde noget for hvilket måleresultat man opnår. Men i praksis kan anvendelsen af forskellige målemetoder til at bestemme samme målestørrelse give resultater som er forskellige. Derfor skal man være opmærksom på at selve målemetoden man benytter også bidrager med en usikkerhed på den måleværdi man aflæser. Forskellige målemetoder kan f.eks. belaste måleemner forskelligt, eller være påvirket af forskellige miljøparametre.

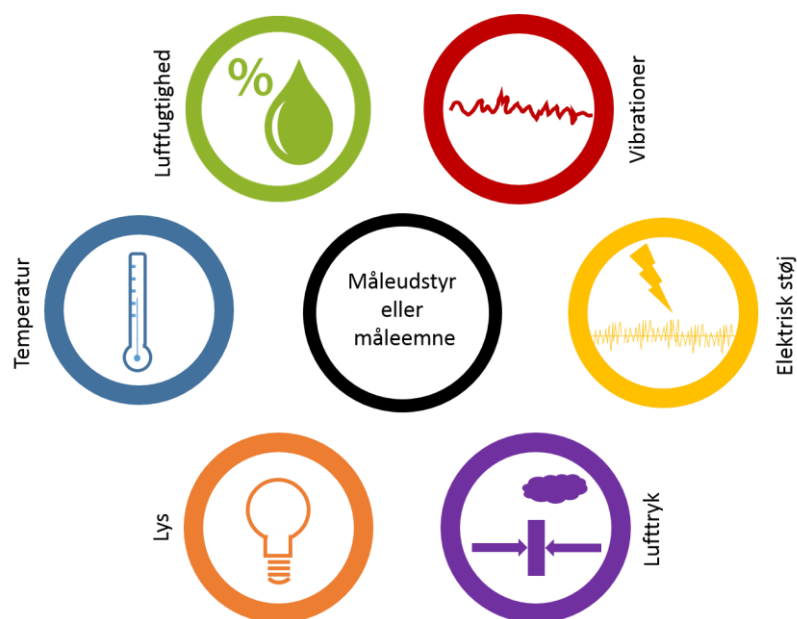
En målemetode dækker også over den efterfølgende dataanalyse. Der kan være flere måder at analysere data på. Den ene metode behøver ikke være mere korrekt end den anden, men det skal klart fremgå hvilken man har anvendt.

Det er tilrådeligt at man, så vidt det er hensigtsmæssigt, anvender målemetoder som er indenfor den gældende udgave af en standard. Disse målemetoder kan komme fra nationale eller internationale standarder, anerkendte tekniske organisationer, såsom Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), eller være specificeret af måleudstyrets fabrikant. Indenfor geometrisk måling anvender man f.eks. de internationale standarder om tolerancer kaldet geometriske produkt specifikationer (GPS). En grundigere introduktion til standarder kan findes i undervisningsmaterialet "Kalibreringer".

Boks 11: En procedure for udførelse af målinger bør indeholde

- Passende identifikation af målemetoden.
- Anvendelsesområde.
- Beskrivelse af emnet der skal kalibreres eller måles.
- Parametre og måleområder der skal bestemmes.
- Hvilket udstyr skal benyttes. Hvad er kravet til dets tekniske ydeevne.
- Hvilke referencenormaler eller referencematerialer skal benyttes.
- Krav til miljøforhold og evt. akklimatisering.
- Beskrivelse af arbejdsgangen, herunder:
 - Håndtering, transport, opbevaring og forbedelse af emner til måling.
 - Kontrol inden påbegyndelse af arbejdsopgaven.
 - Funktionskontrol af udstyr, og hvis det er krævet en kalibrering og justering af udstyr inden brug.
 - Procedure for at registrere observationer og resultater.
 - Nødvendige sikkerhedsforanstaltninger.
- Acceptkriterier.
- Databehandling, herunder præsentation af resultater.
- Usikkerhed, eller metoder til at estimere usikkerheden.
- Validering: undersøgelse og tilvejebringelse af objektiv vidnesbyrd på at de specifikke krav er overholdt.

Hvis det er nødvendigt at anvende en ikke-standardiseret målemetode skal metoden *valideres*. Ved en *validering* skal der gøres rede for at metoden opfylder de krav, som er nødvendige for den påtænkte måling. Det betyder i praksis at man skal gennemføre en undersøgelse af målemetoden. Det kan ske ved at foretage en sammenligning med andre metoder, eller at måle på en kendt referencenormal eller referencemateriale. Derudover skal man bedømme hvilke faktorer der kan have indflydelse på resultaterne opnået med



Figur 31: Typiske miljøparametre som kan påvirke en måling.

målemetoden. Disse faktorer kan være miljøforhold eller operatørpåvirkning.

En procedure tilhørende en given målemetode skal som minimum indeholde information om håndtering af måleudstyr og måleemner, herunder transport, opbevaring og forberedelse af måleemnerne og udstyret. Dette er væsentligt for at sikre reproducerbare målinger. I boks 11 er en mere detaljeret angivelse af hvad en procedure typisk vil indeholde. En mere udførlig gennemgang af procedurer kan findes i modulet "Kalibrering af måleudstyr".

8.6 Måleusikkerhed fra målemiljøet

Måleudstyrets udgangssignal afhænger ikke kun af den undersøgte målestørrelse. Andre fysiske størrelser kan have betydning for den værdi som måles. F.eks. kan måleudstyret være følsomt over for hvilken temperatur målingen foretages ved, eller ved hvilken luftfugtighed målingen er foretaget. En ruhedsmåler er f.eks. følsom overfor vibrationer, en flowmåler er følsom for det barometriske tryk og de fleste materialer ændrer sig med temperaturen.

Disse fysiske størrelser kaldes *miljøparametre*. De har at gøre med de omgivelser som målingen foretages

under. De typiske miljøparametre man skal være opmærksom på er temperatur, luftfugtighed, vibrationer, elektrisk støj, lufttryk og lys. Hvilket er illustreret på Figur 31. Hvordan og hvor meget disse miljøparametre påvirker måleresultatet afhænger af måleudstyret og måleemnet.

Det var længe en stor udfordring at bygge et ur der kunne anvendes på havet. Det skulle være robust overfor søgang og måtte heller ikke blive påvirket af vejret når man sejlede rundt om Jorden. Det tog en mand 26 år at udvikle et ur der kunne klare det barske miljø på havene. Læs mere i anekdote boks 3.

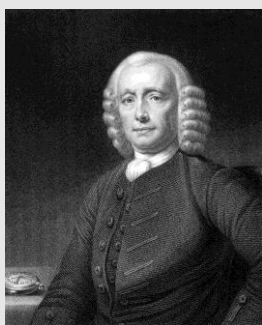
Miljøparametrene vil altid være til stede, men det er op til operatøren at mindske deres bidrag til måleusikkerheden, eller at kompensere for dem i det endelige måleresultat. En ansvarlig operatør er opmærksom på hvilke miljøparametre der påvirker en måling, og vil forsøge at tage højde for dette i analysen af målingen.

Er målingen f.eks. følsom overfor temperaturen kan operatøren efterfølgende korrigere målingen. Det kan gøres hvis man kender den termiske udvidelseskoefficient af måleemnet. Eller man kan etablere et

Boks 12: Et livs kamp mod miljøparametre

I 1700-tallet kunne besætningen på skibene ikke måle længdegraden, altså hvor langt øst eller vest de havde sejlet. Det betød at der hyppigt skete skibbrud hvor mange sømænd mistede livet.

En engelsk tømrer ved navn John Harrison besluttede at forsøge at løse dette problem ved at bygge et præcist ur som sømændene kunne benytte til navigation til søs. Udfordringen var at producere et ur som ikke blev påvirket af de skiftende miljøer som det ville blive udsat for. Uret skulle være upåvirket af både variationer i temperatur, tryk og luftfugtighed, samt kunne fungere om bord på et gyngende skib.



Så det var store udfordringer at skulle løse for John Harrison. Efter flere års arbejde præsenterede han i 1735 den første version af uret. John Harrison fortsatte imidlertid sit arbejde, og først efter 26 års forbedringer havde han udviklet et af navigationshistoriens vigtigste ure, som på en to måneders lang sejltur kun tabte 9 sekunder! [6] Dette opnåede han i en alder af 68 år. Så han brugte det meste af sit liv på at kæmpe med at overvinde miljøparametres påvirkning.



klimastyret rum, for at styre temperaturen, så miljøet er det samme for alle målinger.

8.7 Måleusikkerhed fra operatøren

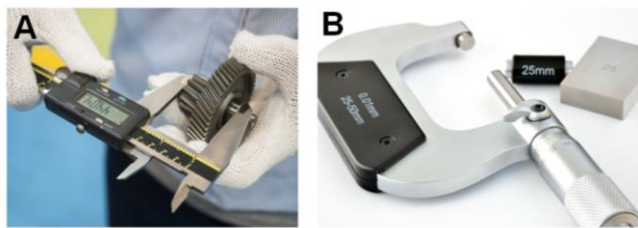
Operatøren har ansvaret for at holde styr på alle bidragene til måleusikkerheden. Er der et område man ikke har styr på, vil det påvirke målingen. Derfor har operatøren et stort ansvar for at opnå pålidelige målinger. I praksis har det vist sig at operatøren er den største kilde til usikkerhed på en måling. Et avanceret instrument til én million kroner måler kun rigtigt, hvis det bliver anvendt korrekt. Får operatøren indstillet den forkert, eller glemmer at tage højde for miljøparametrene, vil målingen give et fejlagtigt resultat.

Ved ikke at udføre målinger korrekt, kan operatøren bidrage til at måleusikkerheden bliver større end den kunne være. Dette kunne være tilfældet hvis en måling udføres ved 25 °C i stedet for 20 °C som det skulle i henhold til proceduren.

Det store problem er dog hvis operatøren begår en fejl uden at det fremgår af usikkerhedsbudgettet. Det kan være at målingen udføres ved en anden temperatur uden at operatøren opdager det. Herved vil der mangle en korrektion til målingen, og den sande værdi ligger ikke indenfor den angivne værdi med usikkerheder.

Generelt vil målefejl der giver type A usikkerheder (afsnit 6) i praksis være lettere at opdage, da spredningen mellem de enkelte målepunkter bliver større end forventet. En undtagelse er hvis man måler på en prøve med stor spredning, og ikke får nok målepunkter med.

Målefejl som giver type B usikkerheder (afsnit 6) er dog mere udfordrende, da de vil give en afvigelse på målingen, som operatøren skal være opmærksom på er til stede. Ofte kan store bidrag fra type B usikkerheder findes ved brug af kritisk sans fra operatørens side. Har man udført 10 målinger der alle giver samme resultat og pludselig får en måling der afviger meget,



Figur 32: Operatøren har det største ansvar for at målingen bliver udført korrekt.

er det en god ide, at stoppe op og overveje om noget har ændret sig. Dernæst kan man udføre målingen igen. Hvis den stadig afviger meget kan man gå tilbage og måle på et emne man har målt på tidligere. Det kan bruges til et hurtigt tjek af udstyret.

Operatøren kan også bidrage med fejl på grund af aflæsningsfejl eller skrivefejl. Derudover kan operatøren udfører målingen sjusket så målingens kvalitet sænkes. Det kan f.eks. være fordi operatøren har for travlt, eller er lidt mere uopmærksom sidst på dagen.

En sammenligning indenfor måling med skydelære (Figur 32 (A)) og mikrometerskruer (Figur 32 (B)) viser at hvis forskellige operatører udfører samme måling vil det resultere i et stort usikkerhedsbidrag. Dette skyldes at de forskellige operatører håndterer udstyret en smule forskelligt. Det kan f.eks. være forskelligt hvor hårdt man trykker med skydelæren. Bidraget fra operatøren overgår faktisk de øvrige usikkerhedsbidrag [7]. For at mindske usikkerhedsbidraget ved at forskellige operatører udfører målingen er det vigtigt at få udarbejdet en grundig målemetode eller en procedure som omtalt i afsnit 8.5.

8.8 Gør usikkerheden mindre

En god operatør er omhyggelig i sin udførsel af målinger. Operatøren er opmærksom på at minimere de forskellige kilder til usikkerhed i måleteknikkens sekstakkede stjerne:

- Overvej hvilke ydre faktorer, herunder miljøparametre, som kan påvirke målingen eller måleud-

styret. Har temperaturen betydning? Luftfugtigheden? Trykket? Kan elektrisk støj eller vibrationer i lokalet påvirke målingen?

- Kræver målingen biologisk sterilitet?
- Overvej hvilken målemetode der er passende til målingen. Måske skal flere målemetoder benyttes for at kunne opnå et tilfredsstillende resultat?
- Er referencen i god stand? Er kalibreringsintervallet for referencen overholdt?
- Fungerer måleudstyret korrekt og er dets kalibreringsinterval overholdt?

For at kunne udføre pålidelige målinger kræver det at operatøren har opnået de rette kompetencer til at kunne betjene udstyret via passende uddannelse eller træning. Desuden skal logbog, stamkort og relevante manualer være lettilgængelige for operatøren som skal benytte udstyret.

I boks 13 er opstillet nogle overvejelser som er nyttige hvis man som operatør vil forbedre sine målinger.

Boks 13: Hvordan kan jeg som operatør forbedre mine målinger?

Det er altid godt at overveje hvilke fejlkilder man som operatør bidrager med. Som Murphys lov siger: "alt hvad der kan gå galt, vil gå galt". Overvej nedenstående punkter for din måleopstilling for at finde ud af hvorledes den kan blive forbedret.

- **Hvordan foregår dataopsamling?**
Manuel aflæsning af tal giver anledning til fejlaflæsninger. Undersøg om dataopsamling kan automatiseres. Eksempel: I stedet for bare at have et termometer hængende, kan man udskifte det med en temperaturlogger. Så behøver man ikke selv at huske at aflæse temperaturen.
- **Er der en god procedure for brug af udstyret?**
Hvis der ikke findes en procedure bør man selv tage initiativ til at få udarbejdet én. En procedure beskriver i detaljer hvordan målinger med instrumentet på bestemte typer af emner skal foretages.
- **Bruger du en checkliste?**
Med en checkliste kan man hver eneste gang sikre at man ikke glemmer vigtige trin under målingen. Der har tidligere været problemer med kirurger der glemte f.eks. sakse i maven på patienter. Ved at have en sygeplejerske til at tælle instrumenterne inden patienter syes sammen, undgår man denne type hændelser. Det står nu på deres checkliste.
- **Er der en logbog for instrumentet?**
En logbog sikrer at brug og hændelser med instrumentet dokumenteres. Hvis der senere opstår et problem, kan man gå tilbage og se hvem der muligvis har været berørt, og derved lettere finde frem til fejlen.
- **Er manualen let tilgængelig?**
Ofte kan manualen hjælpe med at svare på spørgsmål omkring udstyret.
- **Bliver emnet målt på samme måde som når det bruges?**
Måler man på et drejet emne mens det stadig er spændt op, vil resultatet afvige fra når man løsner det. Overvej derfor under hvilke betingelser det er mest relevant at måle på emnet.
- **Vær kritisk!**
Ser noget galt ud, er det sikkert galt. Får du lige pludselig nogle værdier der er meget anderledes end hvad du er vant til at se, så gennemgå alle dine målinger igen. Tjek også om der er usikkerhedsbidrag der har ændret sig.

9 Opsummering

Dette undervisningselement giver en generel introduktion til udførelse af målinger. Noget af det væsentligste for at opnå en god måling er at benytte en reference til sammenligning. Derudover skal et måleresultat altid angives med en måleusikkerhed, da en måling altid er behæftet med en måleusikkerhed.

I måleteknikkens seks-takkede stjerne er de væsentligste kilder til måleusikkerheden beskrevet. Usikkerheden på en måling afhænger af måleudstyret, målemetoden, operatøren, miljøet, referencen og det emne der måles på. Operatøren er dog kilde til den største måleusikkerhed.

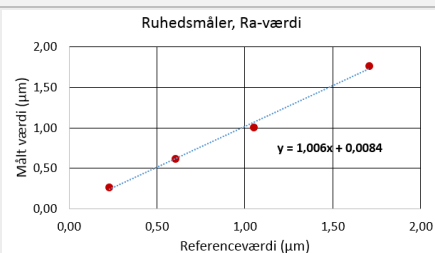
En række vigtige begreber og termer indenfor måleteknik er blevet introduceret. De er samlet i ordlisten forneden (afsnit 11). Desuden er det muligt at finde en samlet oversigt over alle ordene og flere begreber på www.metrologi.dk.

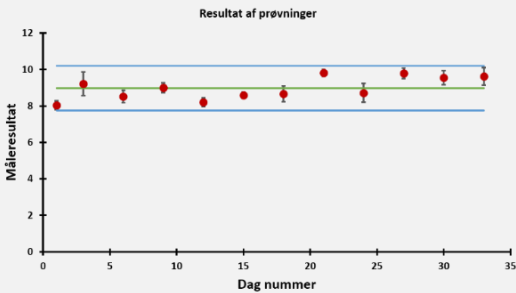
10 Litteraturliste

- [1] Aetherforce: <http://aetherforce.com/the-origin-of-the-royal-egyptian-cubit/>
- [2] CNN: <http://edition.cnn.com/TECH/space/9909/30/mars.metric.02/>
- [3] Illustreret Videnskab: <http://illvid.dk/naturen/naturkatastrofer/jordskaelv-se-videoklip-med-historiens-kraftigste-jordskaelv>
- [4] Politiken: <http://politiken.dk/viden/ECE179945/daasetun-skal-spises-med-maade/>
- [5] Vejledning i at udtrykke måleusikkerhed (GUM), DS/ISO 98-3:2008, 1980.
- [6] Jyllands posten: <http://viden.jp.dk/opfindelser/de20opfindelser/default.asp?cid=137727>
- [7] DANAK akkrediteringsmeddelelse: Måleevne for skydelærer og mikrometerskruer, AML 14, 2010-11-25.

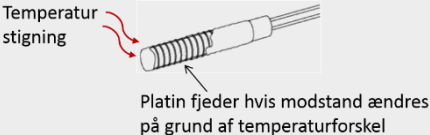
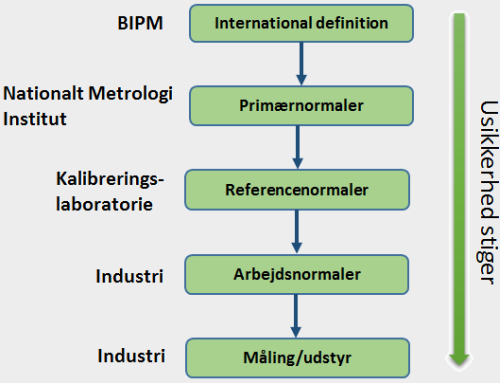
11 Ordliste

Begreb	Forklaring	Afsnit
Afledte enheder	Se SI-enhederne.	2.1
Akkrediteret laboratorium	Laboratorium som akkrediteret kan udfører kalibrering af måleudstyr og normaler. Akkrediterede laboratorier besidder den laveste nøjagtighed i den danske metrologi organisation, og får deres normaler kalibreret hos metrologiinstitutioner.	3.1
Akkreditering	Udpegning som et laboratorium, eller virksomhed, kan søge om hvis de har tilstrækkelig teknisk kompetence indenfor et område og kan udføre uvildige målinger indenfor dette område.	3.1
Aktør	Laboratorium, eller virksomhed, som varetager akkrediteret kalibrering af måleudstyr og normaler indenfor givne områder.	3.1
Arbejdsnormal	Normal som sammenlignes med referencenormaler, og har den laveste nøjagtighed. Benyttes i værksteder og produktion.	3.1 og 4
Dansk Fundamental Metrologi (DFM)	Danmarks national metrologiinstitution som besidder den højeste måleevne indenfor en række metrologi områder.	4
Detektor	Føleenhed som viser tilstedeværelsen af en målestørrelse. Eks. Lakmuspapir	7
Drift	Langsom ændring af en måleværdi eller en egenskab ved et måleudstyr eller en reference over tid.	5 og 8.3
Ét punkts kalibrering	Kalibrering hvor kun ét kalibreringspunkt benyttes. Kan benyttes hvis man altid måler det samme sted på måleskalaen, eller hvis skalaen er lineær.	5.3
Flere-punkts kalibrering	Kalibrering hvor flere kalibreringspunkter indgår så en skala kan beregnes.	5.4
Forholdsskala	En skala med et veldefineret nulpunkt og en fast afstand mellem målepunkter. De fleste måleskalaer er forholdsskalaer.	5.2
Grundenheder	Se SI-enhederne.	2.1
Intervalskala	En skala som kvantitativt fortæller om forskellen i størrelse for en målestørrelse. Intervalskalaen har ikke et veldefineret nulpunkt.	5.2
Kalibrering	Arbejdsproces som udføres under specificerede betingelser hvor formålet er at bestemme en sammenhæng mellem tal-	5



	værdien af en målestørrelse målt med et måleudstyr, et målesystem eller på et materiale, og de tilsvarende talværdier målt på en normal. Begge målinger skal angives med en måleusikkerhed.	
Kalibreringsfaktor	Angiver forholdet mellem en references velkendte talværdi og den talværdi man måler på samme reference. $\text{Kalibreringsfaktor} = \frac{\text{Referencens talværdi}}{\text{Målt talværdi}}$	5.1
Kalibreringsinterval	Tidsinterval mellem to efterfølgende kalibreringer af et måleudstyr eller en reference.	5 og 7.2
Kontrolkort	Benyttes til at sikre systematisk vedligeholdelse af måleudstyr ved at notere resultater fra regelmæssige prøvninger af udstyret. Kontrolkortet anvendes til at vurdere om resultatet ligger indenfor nogle givne acceptgrænser. 	7.2
Logbog	Benyttes til at holde øje med måleudstyr på en systematisk måde ved bl.a. at nedskrive hvornår og under hvilke betingelser måleudstyret blev benyttet. Dette sikrer at der er historik på måleudstyret.	7.2
Miljøparametre	Fysiske størrelser som kan påvirke den talværdi som måles for en given målestørrelse. Det kan f.eks. være størrelser som temperatur, luftfugtighed, vibrationer, elektrisk støj, tryk eller lys. 	8.6
Måleenhed (enhed)	Enhver måling skal angives med en måleenhed. En måleenhed kan f.eks. være volt, meter eller kilogram.	2.1
Måleevne	Angivelse af udstyrets måleområdet og måleusikkerheden på målinger foretaget i øvre og nedre grænser af måleområdet.	7
Målemetode	Generel beskrivelse af de arbejdsprocesser som benyttes til en måling. En målemetode skal som minimum indeholde information om hvorledes måleudstyr og måleemner håndteres, opbevares og forberedes inden en måling.	8.5
Måleemnet	Størrelse/objekt som ønskes opmålt.	8.2
Målemiljøet	De omgivelser (miljø) som målingen foretages i.	8.6

Måleområde	Øvre og nedre grænse for hvor måleudstyret kan måle eller benyttes. Indenfor disse grænser er hensigten at måleudstyrets målefejl ligger indenfor nogle specificerede grænser.	7
Målestørrelse	Den størrelse som bestemmes ved en måling, f.eks. elektrisk spænding eller temperatur.	2
Måleteknikkens sekstakkede stjerne	Opsummering af de seks vigtigste kilder til måleusikkerhed: Måleemnet, referencen, måleudstyret, målemetoden, omgivelserne (miljø) og operatøren. Hvor operatøren er kilde til størst måleusikkerhed.	8
Måleudstyr	Benyttes til at udføre målinger. Der findes forskellige typer af måleudstyr.	7
Måleusikkerhed	Parameter som angives som en del af måleresultatet. Den karakteriserer bl.a. målingernes spredning og andre faktorer som påvirker målingen.	6
Normal	Den reference som realiserer en målestørrelse mest præcist og nøjagtigt. 	3.1
Nulpunktsfejl	Fejl på nulværdien af målestørrelsen.	7.1
Nøjagtighed	Graden af overensstemmelse mellem målingerne og den sande værdi af målestørrelsen.  Præcision Nøjagtighed Nøjagtig og præcis	2
Opløsning	Et udtryk for hvor følsomt et udstyr reagerer på ændringer i en målestørrelse. Opløsningen kan IKKE aflæses som antallet af cifre på udstyrets display.	7
Primærnormal	Normal med den højeste opnåelige nøjagtighed. Benyttes af metrologiinstitutter.	3.1 og 4
Præcision	Graden af overensstemmelse mellem gentagende målinger foretaget under samme betingelser.	2
Prøvning	Bestemmelse af én eller flere egenskaber for et måleemne.	7.1
Reference	Realisere en målestørrelse nøjagtigt og præcist. Muliggør at man direkte kan sammenligne to målinger selvom de foretages under f.eks. forskellige betingelser.	3
Referencenormal	Normal som er sammenlignet med enten primærnormalen eller en anden referencenormal. Benyttes af industrien eller akkrediterede laboratorier.	3.1 og 4
Repetérbarhed	Graden af overensstemmelse mellem gentagende målinger foretaget over et kort tidsrum og under samme betingelser.	8.4
Reproducerbarhed	Graden af overensstemmelse mellem målinger foretaget under ikke helt samme betingelser. F.eks. foretaget på forskellige dage, eller af forskellige operatører.	8.4

Sande værd	Værdien af målestørrelsen opnået under perfekte forhold. Dette kan dog ikke opnås i praksis da en måling altid vil være overlagt med målefejl.	2
Sensor	Føleenhed som påvirkes direkte af målestørrelsen og reagerer tilsvarende på påvirkningen. Sensoren indgår som et element i et målesystem. Eks. Modstandstermometer. 	7
SI-enhederne	Fælles internationalt enhedssystem bestående af syv <i>grundenheder</i> (meter, kilogram, sekund, kelvin, ampere, mol, candela) og kombinationer af disse enheder (<i>afledte enheder</i>).	2.1
Skala	Et angivelse af styrken af talværdien foran en enhed. Altså talværdier af forskellig størrelse.	5.2
Sporbar	Angivelse af om en måling er sammenlignet med primærnormalen gennem sporbarhedskæden. Hvilket giver målingen pålidelighed, og gør den sammenlignelig med andre målinger.	4
Sporbarhedskæden	Ubrudt kæde af sammenligninger hvorigennem en måling kan relateres til den givne primærnormal. Alle led i kæden har tilknyttet en måleusikkerhed. 	4
Stamkort	Dokument der samler grundlæggende information om et instrument. Såsom kalibreringsinterval, placering, indkøber, instrumentansvarlig, placering af manual, acceptgrænser, reparationer mm.	5 og 7.2
Tolerancer	Grænseværdier som angiver et område, som et emne skal ligge indenfor for at opfylde sin funktion.	2 og 6
Transducer	Føleenhed som omformer en indgangsstørrelse til en anden udgangsstørrelse. Eks. Mikrofon.	7
Type A usikkerhed	Kan estimeres ud fra statistiske metoder, f.eks. ved at gentage målinger og beregne standardafvigelsen.	6
Type B usikkerhed	Skal estimeres med andre metoder en statistiske, f.eks. via erfaring med udstyr eller kalibreringshistorik	6

Validering	Fremskaffelse af objektiv vidnesbyrd på at specifikke krav, som skal være opfyldt for at kunne gennemføre en bestemt måling eller benytte et bestemt måleudstyr, er overholdt.	8.5
Verificering	Fremskaffelse af objektiv vidnesbyrd på om et måleudstyr/måleemne overholder specifikke krav.	7.1
Visende instrument	Viser talværdien direkte. Eks. Lineal.	7

12 Læringsudbytte

Læringsudbytte:

I dette undervisningselement indføres kursisten i fundamentale begreber inden for måleteori og opbygger kompetencer til at foretage basale kvalitets vurderinger på måleserier via eksempler i de mest anvendte statistiske begreber og værktøjer.

Den studerende kan:

- Have viden om målemetoder og måleudstyr.
- Forklare hvordan måleusikkerheder for en måling fremkommer.
- Forklare grundlæggende begreber indenfor metrologi.

Læringsspørgsmål:

I dette undervisningselement vil kursisten opnå viden til at kunne besvar følgende spørgsmål.

Hvad er en måling:

- Hvad består en måling af - et tal og en enhed
- Hvad er en enhed
- Hvad er en reference
- Hvorfor er en reference nødvendig til enhver tid
- Hvordan opnås sammenlignelighed - via sammenligning af referencer.
- Hvad er forskellen mellem nøjagtighed og præcision
- Hvad er tolerance

Hvad er sporbarhedskæden:

- Hvad er sporbarhed
- Hvad er SI sporbarhed
- Hvordan opnås SI sporbarhed - via sammenligning af referencer tilbage til den primære SI normal
- Hvad er en normal
- Hvilke typiske normaler findes der
- Hvad er en egnet normal
- Hvordan vurderer man om en normal er egnet

- Hvilke danske aktører findes der?

Hvad er kalibrering:

- Hvad bruges kalibrering til
- Hvordan etableres en skala ud fra en normal
- Hvordan etableres en kalibrering. (f.eks. sæt af masse-lodde)
- Hvordan udføres en kalibrering
- Hvad er 1 punkts kalibrering
- Hvad er flerpunkts kalibrering
- Hvordan evalueres om en kalibrering er succesfuld
- Hvad er et kalibreringsinterval

Hvad er måleusikkerhed:

- Hvad er en fejl/måleusikkerhed
- Hvad er enhver reference behæftet med – en måleusikkerhed.
- Hvorfor vil enhver udført måling være behæftet med en måleusikkerhed
- Hvordan ændrer fejlen på en reference sig over tid
- Hvorfor ændrer referencen sig
- Hvordan instrumenteringen/måleudstyret kan tilføje yderligere til måleusikkerhed
- Hvordan spiller alle disse begreber sammen til at skabe en "måling"

Hvad er instrumenteringer/måleudstyr:

- Hvad er opløsning
- Hvad er repetérbarhed
- Hvad er reproducerbarhed
- Hvordan vedligeholdes et instrument
- Hvad skal man vurdere for at kunne bedømme om et angivet kalibreringsinterval er acceptabelt
- Hvordan læser man en manual
- Hvordan finder man oplysninger om instruments måleevne

- Hvad kan man med rimelighed forvente at få af information om måleevne
- Hvilke informationer er vigtige at kunne tilgå

Grundlæggende kendskab til hvad der influerer målinger:

- Hvad er en miljøparameter
- Hvilke typiske miljø parametre findes
- Hvad er en instrument/måleudstyr parameter
- Hvilke typiske instrument/måleudstyr parametre findes
- Hvad er operatør ansvarlighed
- Hvilke typiske parametre er operatøren ansvarlig for
- Hvilke typiske parametre findes i Standarder/Metode
- Hvad er betydningen af måleemnets indflydelse på usikkerheden

Hvad kan operatøren gøre for at udfører målinger bedst muligt:

- Hvad er good-practice
- Hvordan følger man good-practice guide for instrumentet (eller skrive en)
- Hvordan forholder man sig kritisk til data
- Hvorfor skal man ikke stole blindt på instrumentet