

# Sporbar eller på slump?

Metrologi står på to ben - forsvinder det ene, falder det hele. Det ene ben er sporbarhed og det andet er måleusikkerhed.

Af Mikkel Bo Nielsen,  
Teknologisk Institut, Århus

Ingeniøren nede fra udviklingsafdelingen kommer storsmilende færende ind og proklamerer glædeligt: »Det er blevet to grader bedre end før, vi lavede forbedringen«.

Chefen for udviklingen lyser op og kan lettet tage en beslutning om at lave designet om.

Den materialeansvarlige udfører indgangskontrol af de materialer, der benyttes i produktionen, for herved at kontrollere, at leverandøren lever op til de udstukne specifikationer. Han har haft lidt ballade med leverandøren om, hvem af dem der egentlig målte rigtigt, og så fægtter han samtidig med de produktansvarlige, for en gang imellem må store og værdifulde batches kasseres, fordi materialerne alligevel fejler.

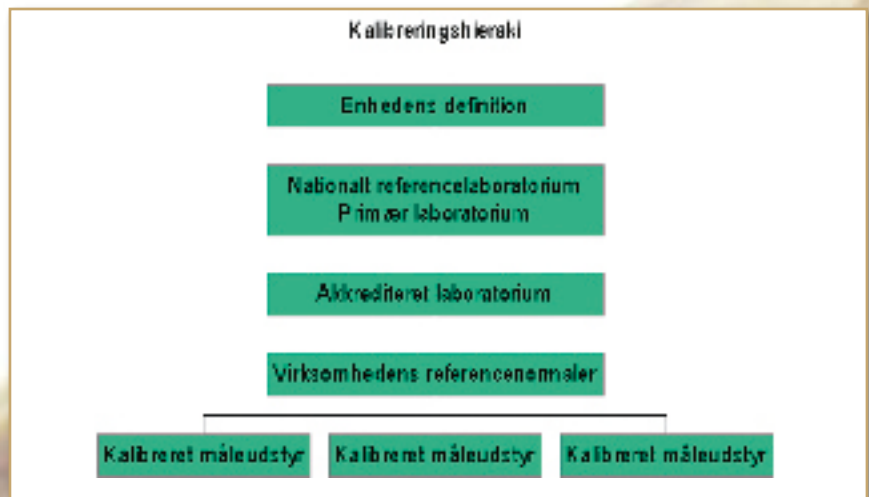
I det førstnævnte tilfælde blev temperaturdifferensen målt med ikke kalibrerede termopar type K og med rette kunne man spørge: »Kan der overhovedet måles en temperaturdifferens på to grader?«

I det andet eksempel kunne det være en vældig god idé at afstemme en måleprocedure med leverandøren, og at det relevante udstyr var kalibreret - derudover kunne det jo godt være, at man skulle arbejde på at få nedbragt sine måleusikkerheder for derved at kunne kræve mindre tolerancer af leverandøren og herved minimere kostbart spild.

## Metrologiens to ben

Løsningerne til eksemplerne har deres fundament i virksomhedens metrologi. Metrologi står på to ben - forsvinder det ene, falder det hele. Det ene ben er *sporbarhed* og det andet er *måleusikkerhed*.

Sporbarhed sikrer, at udstyrets visning kan relateres til den fysiske definition af temperatur - sidst revideret i 1990 og internationalt vedtaget. At opnå sporbarhed kræver en ubrudt kæde af sammenlignende

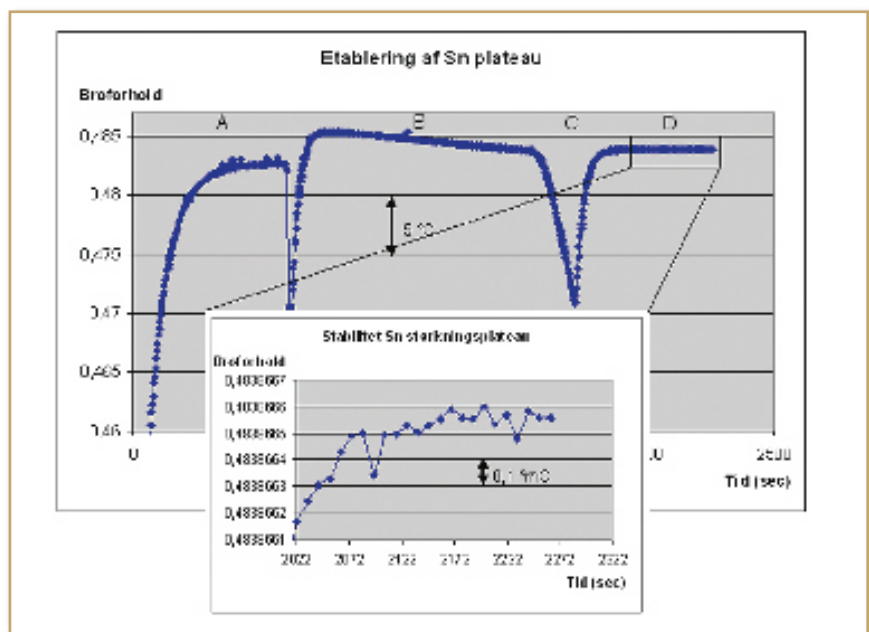


Figur 1. Kalibreringshierarkiet fra den internationalt vedtagne enheds definition og Referencelaboratoriet til slutbrugeren, som benytter trinnet i hierarkiet, der modsvarer den kalibreringsusikkerhed, man har brug for.

målinger op imod en højere standard med tilhørende mindre usikkerhed.

Måleusikkerheden giver os et kvan-

titativt mål for kvaliteten af en måling og er en forudsætning for, at målinger kan sammenlignes og altså, at de besidder sporbarhed. Beg-



Figur 1a: Sn etablering og stabilitet.

Sn Fikspunktet smeltes ved 430°C, herefter indstilles miljøet til en temperatur lige over størkningstemperaturen, og cellen løftes op af ovnen, hvorved underafkøling observeres indtil størkningen starter. I indsettet ses temperaturstabiliteten over 10 minutter, hvor spredningen er under 0,5 mK. Ovnen er selvsagt under størkningstemperaturen under brug af fikspunktet.



Ultrapræcist »state of the art« termometer, der kalibreres i fikspunktslaboratoriet. Den officielle betegnelse er Standard Platinum Resistans Termometre (SPRT).

ge dele opnås direkte eller indirekte gennem en kalibrering af udstyret.

### Kalibreringshierarki og -usikkerhed

Moderne metrologi har arbejdet med sporbarhedsbegrebet i ca. 100 år, og selvsagt er systemet særdeles velordnet og optimeret i forhold til at sikre brugerne en tilstrækkelig må-

leusikkerhed. For at opnå dette er der defineret et kalibreringshierarki - se figur 1. For hvert kalibreringstrin forøges kalibreringsusikkerheden for eksempelvis temperatur med en faktor tre, og for således at sikre en slutbruger - fx en kalibreret temperaturføler i processen -1°C måleusikkerhed skal virksomhedens referencenormal som minimum have en

kalibreringsusikkerhed på 0,3°C. Dette betyder i den sidste ende, at referencelaboratoriet således skal kunne realisere temperaturdefinitionen med en måleusikkerhed 30 mK. I dette simple overslag er der kun medtaget kalibreringsusikkerheden i usikkerhedsbudgettet for slutbrugers instrument, men her vil også indgå andre bidrag fra drift, aflæs- ►

Stof	Tildelt Ege vægttemperatur/°C
Kvikksølv	38,8344
Vand	0,01
Gallium	29,7646
Indium	156,5985
Tin	231,928
Zink	419,527
Aluminium	660,323

Tabel 1. De definerende stoffer i den Internationale Temperaturskala fra 1990, også kaldet ITS-90.

ning osv., hvilket presser kravet til kalibreringsusikkerheden yderligere ned.

### Krav til overholdt usikkerhed

Det nationale referencelaboratorium for Temperatur ligger ved Teknologisk Institut, Industri og Energi i Århus og kalibrerer i intervallet -38°C til 660°C. Sekundærlaboratoriet for temperatur samme steds - et »akkrediteret laboratorium« i figur 1 - dækker dog intervallet -80°C til +1150°C. Referencelaboratoriet leverer typiske måleusikkerheder på 1-8 mK, hvilket som før nævnt sikrer, at slutbrugerne kan forvente mindst 0,1°C måleusikkerhed, hvis man vel og mærke sørger for, at målemiljøerne kan give valide data dvs. placerer følerne de rigtige steder. Endvidere skal målemiljøerne være velkarakteriserede og repræsentative. Det er vigtigt at vurdere, om der er brug for en sådan nøjagtighed.

### Er referencelaboratoriet pålideligt?

Den kritiske læser vil nu måske kigge lidt på figur 1 og tænke: »Hvem kontrollerer så referencelaboratorierne?« Dette er et udmærket spørgsmål, for hvorledes sikres det, at realiseringen af størrelsen virkelig repræsenterer definitionen af størrelsens skala - mere konkret; hvorledes sikres det, at Det Nationale Referencelaboratorium for Temperatur i deres kalibreringer finder den temperatur, som man internationalt er blevet enige om. For at besvare dette kan vi ganske kort tage et kig på, hvorledes temperaturskalaen er defineret.

Historisk var det Fahrenheit der kastede det første guldkorn i sporbarhedssystemet: Fikspunkter! Man måtte sikre sig, at der var nogle alment gyldige temperaturer, der med stor nøjagtighed kunne etableres og reproducere. Smeltepunktet for is og andre stoffer er sådanne temperaturer, og af disse mange mulighe-

der har man valgt de forskellige stoffer, som kan ses i tabel 1.

I figur 1a er vist etableringen af et Tin (Sn) fikspunkt med et udsnit af temperaturstabiliteten over 10 minutter på selve størkningsplateauet. En kalibrering i Referencelaboratoriet foregår nu ved, at termometrene

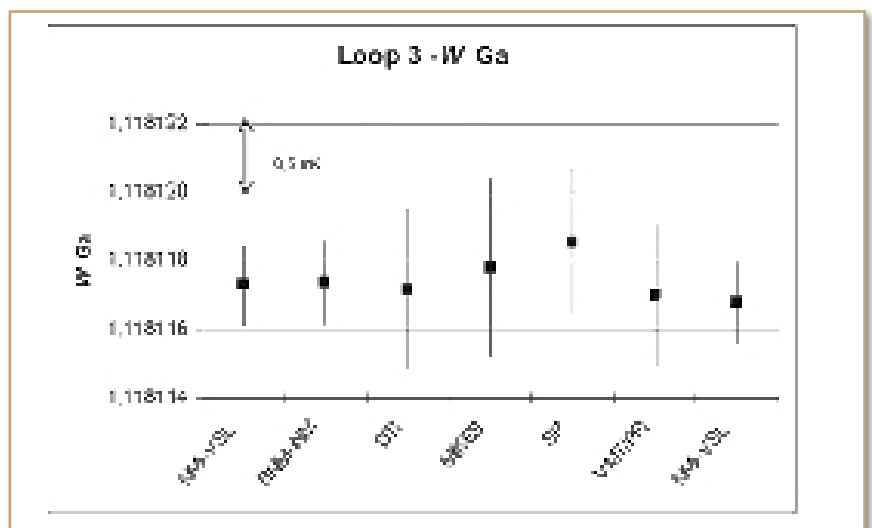
duren indsnævres spørgsmålet om kontrollen af Referencelaboratoriet til, at de forskellige fikspunkter og proceduren for kalibreringen skal kontrolleres. Dette gøres med jævne mellemrum via såkaldte ringkalibreringer eller præstationsprøvnin-

**Måleusikkerheden er meget vigtig, da den er udtryk for målingens kvalitet, dvs. at målinger med oplyste måleusikkerheder kan sammenlignes og først på den baggrund kan der træffes pålidelige beslutninger.**

sænkes ned i de forskellige fikspunkter, herved måles en veldefineret og internationalt vedtaget temperatur. Aflæsningen af termometret relateres nu til denne temperatur via noget lidt mere langhåret matematik, som ikke vil blive gennemgået her. Med denne viden om temperaturdefinitionen og kalibreringsproce-

### Præstationsprøvnin- ger og ringkalibreringer en nødvendighed

En ringkalibrering kan have mange forskellige udformninger, eksempelvis kan udstyr sendes rundt til forskellige laboratorier for at blive kalibreret, som om det var kundeudstyr. Resultatet af dette skal meget gerne være, at kalibreringsresultatet for



Figur 2. Resultat af præstationsprøvnin-  
gen organiseret af EUROMET, den europæiske sammenslutning af nationale referencelaboratorier. Figuren er taget fra det internationale forskningstidskrift: Metrologia, 2007, 44, Tech. Suppl., 03001.

udstyret fra forskellige laboratorier er identiske. Et andet setup er, at kalibreringsudstyret bliver målt op, sendt til et andet laboratorium for at blive genmålt og sammenlignet med andre laboratoriers udstyr. Sådanne ringkalibreringer afslører med mellemrum udstyr, der ikke lever op til tolerancetærsklerne. Laboratoriebiblen ISO 17025 for prøvning og kalibreringslaboratorier kræver forebyggende handlinger for at forebygge afvigelser. Sådanne forebyggende handlinger kan f.eks. være trend- og risikoanalyse samt resultater af præstationsprøvninger - hvilket en ringkalibrering er. Trend- og risikoanalyse er i langt de fleste tilfælde svære at udføre og en analyse af den art udtaler sig mere om sandsynligheden for, at det går galt end om at opdage fejlen, hvis den er opstået. Derfor er præstationsprøvninger og ringkalibreringer en nødvendighed for alle, der kalibrerer udstyr til internt brug eller for eksterne kunder.

## Konkret præstationsprøvning på gennemsnittet

Teknologisk Instituts Referencelaboratorium for Temperatur deltager flere gange om året i sådanne præstationsprøvninger. Et eksempel på et resultat af en præstationsprøvning er vist i *figur 2*, hvor fikspunktet er af Galium ( $29,7646^{\circ}\text{C}$ ). Her ligger Teknologisk Institut, TI på gennemsnittet med en usikkerhed, som er sammenlignelig med resten af resultaterne. Samlet set varierer temperaturen mellem disse deltagere i præstationsprøvningen ikke mere end  $0,5^{\circ}\text{mC}$  i Europa og spredningen af resultaterne er inden for  $1,5^{\circ}\text{mC}$ .

Tænk over hvilke problemer man må have haft før i tiden ved sammenligning af målinger, og hvilke problemer vi kan have med at sammenligne gamle og nutidige målinger. Udover at deltage i præstationsprøv-



*Kalibrering af Standard Platinum Resistans Termometre (SPRT) med en usikkerhed på 1-8 mK kræver omhyggelighed, tålmodighed planlægning. Her ses en række tøndelignende ovne på Teknologisk Institut indeholdende fikspunkterne for indium (In), tin (Sn) og zink (Zn) i forgrunden, samt målebrog og forfatteren i baggrunden med et SPRT.*

ninger har Teknologisk også de senere år udbudt ringkalibreringer og præstationsprøvninger i nationalt, skandinavisk og europæisk regi. Disse henvender sig specielt til sekundærlaboratorier og virksomhedslaboratorier, som ofte agerer uden form for sparring.

## Vurder om det er sand temperatur

Et af metrologiens mantraer er: Hvad vi ikke kan måle, kan vi ikke kontrollere, forbedre og udvikle. Intuition er en fantastisk ting i mange henseender, men bliver nu en gang kun skærpet af at blive kontrolleret af målinger. Specielt med temperatur er man så vant til at blive

bombarderet med værdier, så man hele tiden går med en følelse af »hvor svært kan det være«, samt at der er direkte sammenhæng mellem visning og den sande temperatur med meget stor nøjagtighed.

Imidlertid håber jeg, at læseren ved næste vejrudsigt, badevandsstemperaturoversigt, kig på vejrstationen hjemme i stuen, culottestegens temperatur eller barnets sygdom stopper ganske kort op og vurderer om det egentlig er en sand temperatur, der er tale om og hvad mon for en måleusikkerhed, den er associeret med. Som før beskrevet er det altså ikke helt nemt at få en måleusikkerhed på  $1^{\circ}\text{C}$ .



## Måleusikkerhed er vigtig af tre grunde

Hvorfor er måleusikkerhederne SÅ vigtige - jeg møder mange, der mere ser usikkerhedsbudgetterne som en besværlig proces, overflødigt papirarbejde og et nødvendigt onde i en evt. certificering af produktet, men jeg vil i det følgende gøre op med disse efter min mening fejlagtige opfattelser, men først understrege at måleusikkerheder er vigtige, fordi:

1. De udtaler sig om målingens kvalitet på en kvantitativ vis uden mulighed for fortolkning.
2. Vi ikke kan sammenligne to værdier, og om deres forskel er signifikant, uden at have en viden om måleusikkerheden.
3. Vi ikke kan lave troværdige beslutninger på baggrund af målinger, medmindre vi kvantitativt kan beskrive, hvor præcis målingen er.

## Usikkerhedsbudgettet er nyttigt

Det første spørgsmål jeg altid møder er, at usikkerhedsbudgetter er en langhåret affære, men der eksisterer udmærkede kommercielle værktøjer til både at håndtere en udstyrsdatabase og til at beregne usikkerhedsbudgetter. GUM workbench er et af dem og med et par dages kursus, bør man være klædt på til at beregne sit eget usikkerhedsbudget i et regnearksprogram.

Et usikkerhedsbudget er ligesom husholdningsbudgettet, det viser om koken bruger uforholdsvist mange penge på sko eller måske bedre, om bilen bør udskiftes. Et usikkerhedsbudget viser hvilke faktorer, der giver anledning til den samlede usikkerhed for målingen, og herved får man, udover en viden om den samlede usikkerhed, en viden om, hvor man bør sætte ind for at hente en mindre samlet usikkerhed. Ved simple konverteringer til tiendedele grader i forhold til omkostning giver det med det samme et indblik i, hvor meget en forbedring vil koste. Dette kan så sammenholdes med den re-

duktion i omkostningerne ved ombehandling, spild og reklamation, der kan opnås.

## Usikkerhedsbudgettet som beslutningsgrundlag

Et usikkerhedsbudget kan selvfølgelig også være medvirkende til, at man finder ud af, at man »overmåler« - altså måler bedre, end der er brug for. Det kan medvirke til formindskede omkostninger i forbindelse med nyinstallering og geninstallering, ligesom man med den rette dokumentation vil kunne spare omkostninger ved at forlænge kalibreringsintervallerne og ikke mindst den nedetid, som proceslinjen i den forbindelse ofte kan være udsat for.

Jævnlig kalibreringer og efterfølgende opdatering af usikkerhedsbudgetter giver både en god føling med - og en højnet eller genskabt tillid til instrumentet. Dette giver således et stabilt grundlag for at træffe den rigtige beslutning i forhold til målingen, uanset om man er på produktionslinjen, står med en automationsløsning, designer et nyt setup, udfører de interne kalibreringer, har med ekstern kalibrering at gøre, eller om man er ansvarlig for temperaturstandarder i Danmark.

### Mini CV

Forfatteren er fysiker fra Aarhus Universitet, 2003, og ansvarlig for det Nationale Referencelaboratorium for Temperatur i Danmark. Han afholder årlige kurser på Teknologisk Institut og tilpassede virksomhedskurser inden for laboratoriedrift, usikkerhedsberegning, måleteknik og temperaturmåling - samt yder konsulentbistand i forbindelse med kvalitetssikring af målinger og laboratoriepraksis samt design og validering af måleopstillinger.