



# Måleteknikk, del I

- Trenger vi et felles referansesystem for måling?
- Hvordan bygge et referansesystem som alle kan akseptere?
- Ref. Laaneots, Mathiesen, kap 1, 8 og 10 +++



# Måling

“Handlinger (operasjoner) som har til formål å bestemme verdien på en størrelse”

Vi vil uttrykke *målestørrelsen*,  $a$ , i et *enhetssystem*,  $x$ , som produktet av en numerisk verdi  $\{a\}_x$  med en *enhet*,  $[a]_x$ :

$$a = \{a\}_x \cdot [a]_x$$

Eksempel: Temperaturen = 30 °C (eller 303,15 K)

**Målestørrelse = Måltall · Målenhet**



# Størrelser og enheter

Målte størrelser har både en dimensjon og en verdi.

Måleenheten  $[a]_x$  gir målestokken for måleverdien  $\{a\}_x$

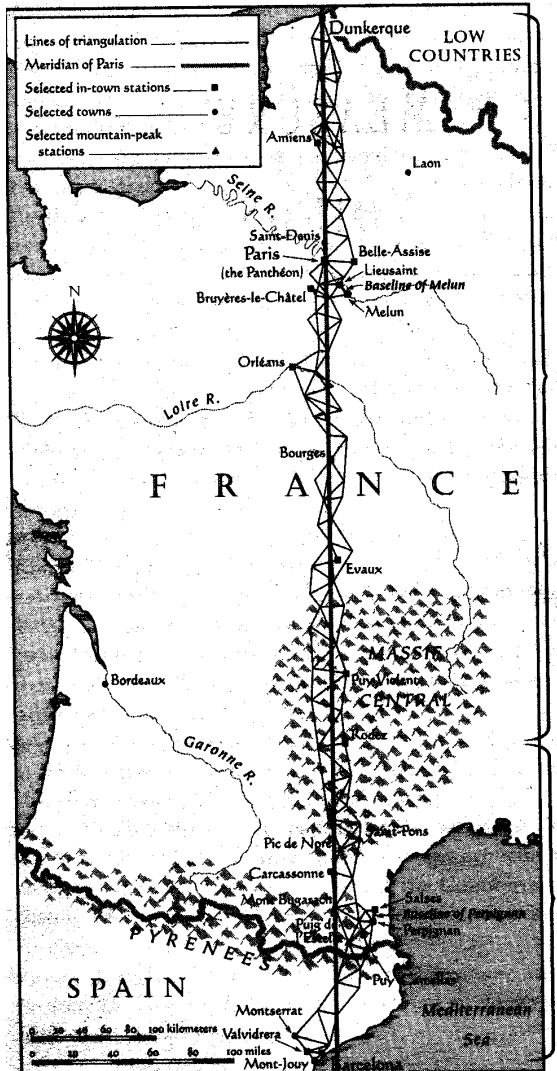
Et annet eksempel:

Størrelsen masse kan måles med måleenheten kilogram. Måleenheten kilogram er en av de 7 grunnenehetene i SI systemet

$$M = \{a\}_x \cdot [a]_x = 5,012 \text{ kg}$$

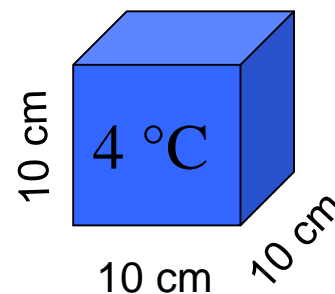
**Målt verdi av en størrelse = Måltall · Målenhet**

# SI-systemet



I 1799 bestemte noen franskmenn seg for følgende:

En meter skulle være 1/10 000 000 del av avstanden mellom Nordpolen og ekvator. Avstanden Dunkerque (Frankrike) - Barcelona (Spania) ble målt. Denne linjen går rett nord-sør, start og slutt er på havnivå og lengden er 1/10 del av avstanden Nordpolen - ekvator og strekningen ligger omtrent midt mellom Nordpolen og ekvator.



Et kilogram var i utgangspunktet lik en liter (kubikk-decimeter) med vann ved 4 °C og 1 atm.



# Meterkonvensjonen

I 1875 signerte de første 17 landene et dokument med enighet om opprettelse av et byrå for internasjonale referanser for lengde og masse (oversatt utdrag av [http://www.bipm.org/utills/en/pdf/metre\\_convention.pdf](http://www.bipm.org/utills/en/pdf/metre_convention.pdf))

## **Artikkel 1**

*De høye Kontraherende Parter forplikter seg til å etablere og vedlikeholde, på deres felles regning, et internasjonalt byrå for mål og vekt, Scientific og permanent, med hovedkvarter i Paris (1).*

## **Artikkel 2**

*Den franske regjeringen vil ta de nødvendige skritt for å lette erverv eller eventuelt bygging av en bygning spesielt tilordnet denne destinasjonen, på vilkår fastsatt av forskrift vedlegg til denne konvensjonen.*

## **Artikkel 3**

*Det internasjonale byrået vil operere under den eksklusive kontroll og tilsyn av en internasjonal komité av mål og vekt, lagt seg under myndighet av en generalkonferansen for mål og vekt, sammensatt av delegater fra alle Kontraherende stater.*



# SI-systemet



- SI systemet vedlikeholdes av BIPM under overvåkning/veiledning av den "International Committee for Weights and Measures (CIPM)" som igjen følger vedtak i en generalkonferanse "General Conference on Weights and Measures (CGPM)"

[http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si\\_brochure\\_8\\_en.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf)



# SI-systemet



- I 1875 ble Meterkonvensjonen signert av 17 nasjoner i Paris. I dag er det 65 medlemmer og alle industriland er representert.
- Det er BIPM som i avtalen er gitt ansvaret for å samordne nasjonale målestandarder for å sikre et enhetlig internasjonale referansesystem for måling.
- Det pågår et kontinuerlig arbeid for å både gi referanser på nye områder og bedre nøyaktigheten.
- Det er også mye fokus på å bygge relasjoner til relevante internasjonale organisasjoner for å øke gjensidig tillitt (bl.a. til OIML, ILAC, ISO, WHO, WMO, NCSLI)



World Health  
Organization





# SI-systemet, sporbarhet

## SI: Système International d'Unités

- 7 grunnenheter som ved konvensjon er sett på som dimensjonelt uavhengige: ***meter, kilogram, sekund, ampere, kelvin, mol, candela***  
(Kan ikke definere en grunnenhet som kombinasjon av andre grunnenheter)
- Avledede enheter som blir formet ved kombinasjon av grunnenheter
- SI-systemet er koherent, dvs avledede enheter blir formet som produkt/brøker av grunnenheter uten mellomfaktorer.





# Grunnenheter i SI (I)

<b>Størrelse:</b>	<b>Enhet:</b>	<b>Definisjon:</b>
Lengde ( <i>l</i> )	meter (m)	En meter er den strekning lyset tilbakelegger i tomt rom i løpet av 1/299 792 458 sekund (17. CGPM – 1983).
Masse ( <i>m</i> )	kilogram (kg)	Et kilogram er massen av den internasjonale kilogramnormal (3. CGPM – 1901)
Tidsintervall ( <i>t</i> )	sekund (s)	1 sekund er 9 192 631 770 perioder av de svingninger som svarer til overgangen mellom de to hyperfinnivåer i grunntilstanden i Cs <sup>133</sup> . (13. CGPM-1967)



## Grunnenheter i SI (II)

<b>Størrelse:</b>	<b>Enhet:</b>	<b>Definisjon:</b>
Elektrisk strøm ( $I$ )	ampere (A)	1 ampere er den konstante strøm som frambringer en gjensidig kraft på 0,2 mikronewton pr. meter leder, når strømmen går gjennom hver av to rettlinjede parallelle, uendelig lange ledere med sirkulært og neglisjerbart lite tverrsnitt, og lederne er anbrakt i en meters innbyrdes avstand i tomt rom. (9. CGPM - 1948).
Termodynamisk temperatur ( $T$ )	kelvin (K)	1 kelvin er brøkdelen $1/273,16$ av den termodynamiske temperaturen for vannets trippelpunkt. (13. CGPM – 1967). Enheten kelvin og dens symbol K brukes også for å uttrykke et temperaturintervall eller en temperaturdifferanse. Foruten termodynamisk temperatur (symbol T), brukes også celsiustemperatur (symbol t) definert ved likningen $t = T - 273,15$ K. Celsiusstemperatur uttrykkes i grad celsius.



## Grunnenheter i SI (III)

<b>Størrelse:</b>	<b>Enhet:</b>	<b>Definisjon:</b>
Lysstyrke ( $I_v$ )	candela (cd)	1 candela er lysstyrken i en gitt retning fra en kilde som emitterer monokromatisk stråling med frekvens $540 \cdot 10^{12}$ hertz med en strålingsintensitet på (1/683 watt per steradian i den retningen). (16. CGPM – 1979).
Stoffmengde ( $n$ )	mol	1 mol er den stoffmengden i et system som inneholder så mange elementære bestanddeler som det er atomer i 0,012 kilogram av karbon 12. (10. CGPM-1954). Når mol benyttes som enhet, må alltid de elementære bestanddeler spesifiseres, og det kan være atomer, molekyler, ioner, elektroner eller andre partikler eller grupper av partikler.

### Revisjon av SI systemet

SI systemet skal knyttes sterkere til naturkonstantene. Mer info finnes på BIPM's hjemmeside: <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/>



# Sporbarhet (VIM 2.43)

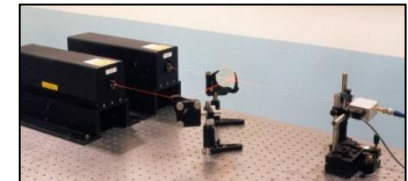
**VIM: Internasjonal ordliste for metrologi**  
(<http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>)

De fundamentale målestørrelsene fremkommer gjennom realisering eller som et referanseobjekt (prototype).

**Masse**                      Massen 1 kg er gitt av masseprototypen i Paris.  
(prototype)



**Lengde**                      Lengden realiseres med en frekvensstabilisert  
laser (rødt lys, c er en naturkonstant)



**Spenning**                      Volt realiseres i et Josephson oppsett.  
(naturkonstanter og frekvens)



**Motstand**                      Resistans realiseres i et kvantisert Hall-effekt  
oppsett. (naturkonstanter)





# Utkast revidert SI system

<b>Størrelse:</b>	<b>Enhet:</b>	<b>Definisjon:</b>
Lengde ( $l$ )	meter (m)	The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum $c$ to be 299 792 458 when expressed in the unit $\text{m s}^{-1}$ , where the second is defined in terms of the caesium frequency $\Delta\nu_{\text{Cs}}$
Masse ( $m$ )	kilogram (kg)	The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant $h$ to be $6.626\,070\,040 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit $\text{J s}$ , which is equal to $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , where the metre and the second are defined in terms of $c$ and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$
Tidsintervall ( $t$ )	sekund (s)	The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , the unperturbed ground-state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to $\text{s}^{-1}$ for periodic phenomena.



## Utkast revidert SI (II)

<b>Størrelse:</b>	<b>Enhet:</b>	<b>Definisjon:</b>
Elektrisk strøm ( <i>I</i> )	ampere (A)	The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge $e$ to be $1.602\,176\,620\,8 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$
Termodynamisk temperatur ( <i>T</i> )	kelvin (K)	The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant $k$ to be $1.380\,648\,52 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit J K <sup>-1</sup> , which is equal to kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> , where the kilogram, metre and second are defined in terms of $h$ , $c$ and $\Delta\nu_{Cs}$



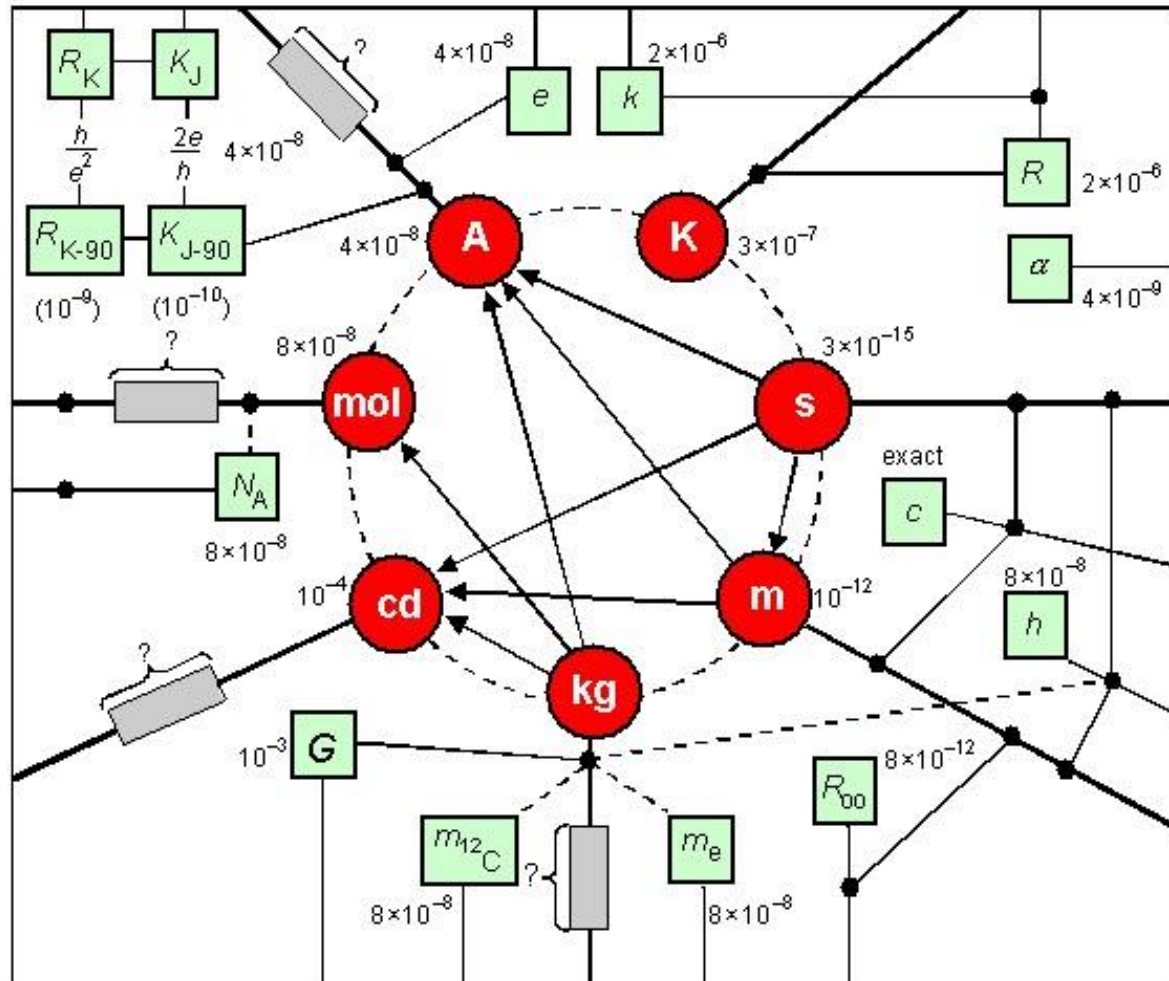
# Utkast revidert SI (III)

<b>Størrelse:</b>	<b>Enhet:</b>	<b>Definisjon:</b>
Lysstyrke ( $I_v$ )	candela (cd)	The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency $540 \times 10^{12}$ Hz, $K_{cd}$ , to be 683 when expressed in the unit $\text{lm W}^{-1}$ , which is equal to $\text{cd sr W}^{-1}$ , or $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3 \text{cd sr}$ , where the kilogram, metre and second are defined in terms of $h$ , $c$ and $\Delta V_{Cs}$
Stoffmengde ( $n$ )	mol	The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance of a specified elementary entity, which may be an atom, molecule, ion, electron, any other particle or a specified group of such particles. It is defined by taking the fixed numerical value of the Avogadro constant $N_A$ to be $6.022\,140\,857 \times 10^{23}$ when expressed in the unit $\text{mol}^{-1}$

## Revisjon av SI systemet

SI systemet skal knyttes sterkere til naturkonstantene. Mer info finnes på BIPM's hjemmeside: <http://www.bipm.org/en/measurement-units/>

# Sammenheng mellom grunnenhetene







# Referanser for SI-systemet

BIPM (Internasjonalt byrå for mål og vekt)

[http://www.bipm.org/en/si/si\\_brochure/](http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/)

NIST (Nasjonalt laboratorium USA)

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

ISO (Internasjonal standardiserings org.)

ISO 80000-1 til -14

[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_tc\\_browse.htm?com\\_mid=46202&published=on](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?com_mid=46202&published=on)



# ***Internasjonalt system for målestørrelser: L M T I Θ N J***

ISQ – Internasjonalt system for størrelser (Ref ISO 80000)

- *L*: Lengde
- *M*: Masse
- *T*: Tid
- *I*: Elektrisk strøm
- $\Theta$ : Termodynamisk temperatur
- *N*: Stoffmengde
- *J*: Lysstyrke

Eksempel: Avledede størrelsene for hastighet kan formuleres som  $L^1T^{-1}$ ,  
frekvens som  $T^{-1}$  og kraft som  $MLT^{-2}$



# International System of Quantities (ISQ)

ISQ er beskrevet enkelt i ISO 80000-1:2009

Base quantities		Enhet (Unit)	
Navn	Symbol	Navn	Symbol
lengde	L	meter	m
masse	M	kilogram	kg
tid	T	sekund	s
Elektrisk strøm	I	ampere	A
Termodynamisk temperatur	$\Theta$	kelvin	K
Stoffmengde	N	mole	mol
Lysstyrke	J	candela	cd

Eksempel: Størrelsen hastighet kan formuleres som  $L^1 T^{-1}$ , størrelsen frekvens:  $T^{-1}$ , størrelsen kraft:  $MLT^{-2}$



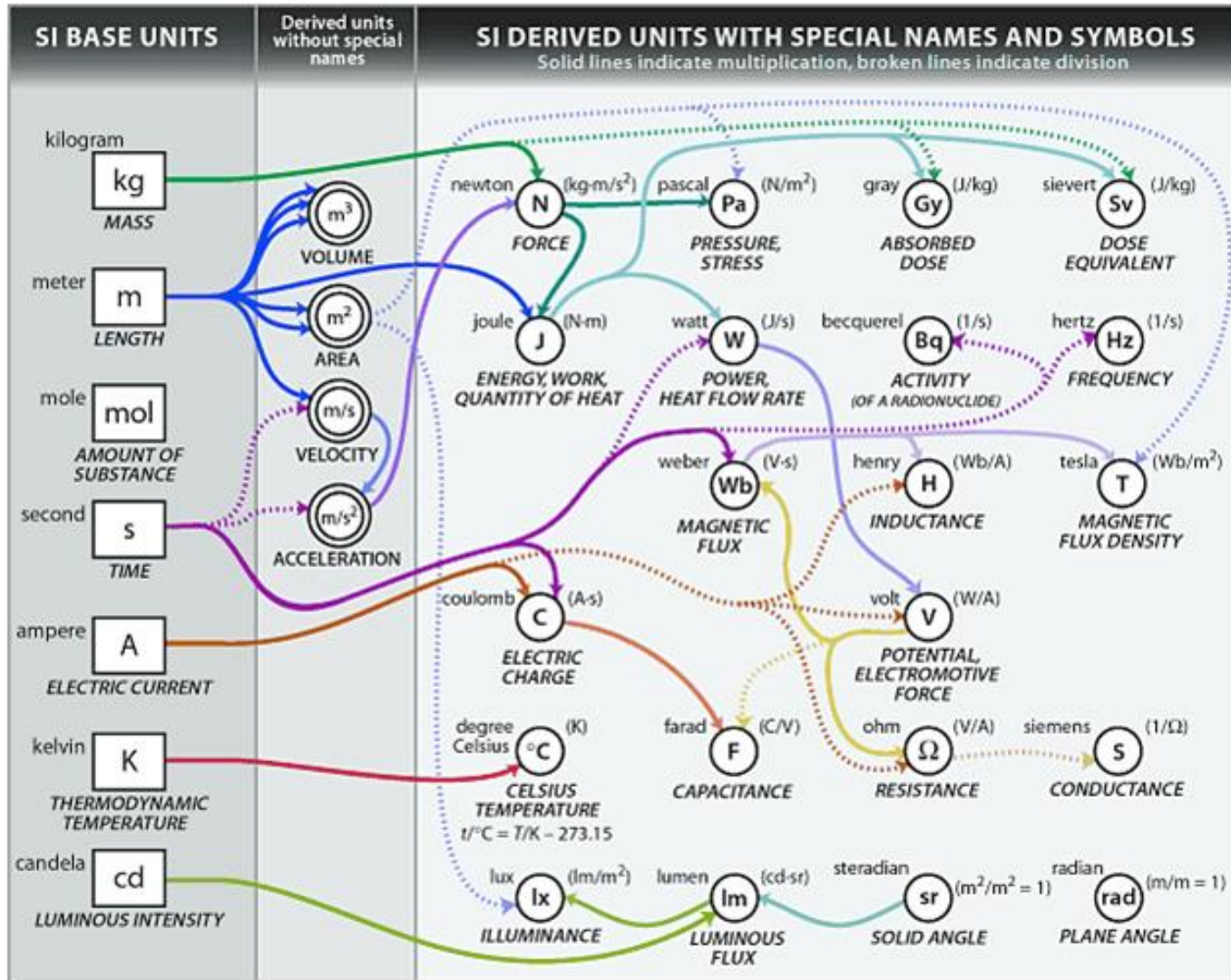
# ISO 80000 serien

ISO 80000: Serie med standarder for størrelser og enheter

Størrelse (Quantity)		Enhet (Unit)	
Navn	Symbol	Navn	Symbol
lengde	L	meter	m
masse	m	kilogram	kg
tid	t	sekund	s
Elektrisk strøm	I	ampere	A
Termodynamisk temperatur	T	kelvin	K
Stoffmengde	n	mole	mol
Lysstyrke	I <sub>v</sub>	candela	cd

- (Se info på [www.standard.no](http://www.standard.no))

# Grunnenheter og avledede enheter





# SI grunnstørrelser og -enheter

Størrelse	Enhet	Symbol
Lengde ( $l$ )	meter	m
Masse ( $m$ )	kilogram (kg)	kg
Tidsintervall ( $t$ )	sekund	s
Elektrisk strøm ( $I$ )	ampere	A
Termodynamisk temperatur ( $T$ )	kelvin	K
Lysstyrke ( $I_v$ )	candela	cd
Stoffmengde	mol	mol

Grunnstørrelsene og -enheten skal være uavhengige.



# Avledede enheter med spesielle navn

(utvalg koherente størrelser)

Avledet enhet	Navn	Symbol	I andre SI- enheter	I SIgrunnenheter
plan vinkel	radian	rad		$m \cdot m^{-1} = 1$
kraft	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
trykk	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energi	joule	J	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
effekt	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
elektrisk spenning	volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
magnetisk fluks	weber	Wb	V · s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
induktans	henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
aktivitet	becquerel	Bq		$s^{-1}$
absorbert dose	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$



# Prefikser

Faktor	Navn	Symbol	Faktor	Navn	Symbol
$10^{24}$	yotta	Y	$10^{-1}$	desi	d
$10^{21}$	zeta	Z	$10^{-2}$	centi	c
$10^{18}$	exa	E	$10^{-3}$	milli	m
$10^{15}$	peta	P	$10^{-6}$	mikro	$\mu$
$10^{12}$	tera	T	$10^{-9}$	nano	n
$10^9$	giga	G	$10^{-12}$	piko	p
$10^6$	mega	M	$10^{-15}$	femto	f
$10^3$	kilo	k	$10^{-18}$	atto	a
$10^2$	hekto	h	$10^{-21}$	zepto	z
$10^1$	deka	da	$10^{-24}$	yokto	y





# Naturkonstanter

(utvalg, Codata, 2006)

Naturkonstant	Symbol	Verdi
von Klitzing konstanten	$R_K$	25 812,807 557 (18) $\Omega$
Josephsonkonstanten	$K_J$	483 597,891(12) $\cdot 10^9$ Hz $\cdot$ V <sup>-1</sup>
Avogadrokonstanten	$N_A$	6,022 141 79(30) $\cdot 10^{23}$ mol <sup>-1</sup>
Gravitasjonskonstanten	$G$	6,674 28(67) $\cdot 10^{-11}$ m <sup>3</sup> $\cdot$ kg <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>
Massen av karbonatomet	$m_{12 C}$	12 $\cdot 10^3$ kg $\cdot$ mol <sup>-1</sup>
Hvilemassen til elektronet	$m_e$	9,109 382 15(45) $\cdot 10^{-31}$ kg
Rydbergkonstanten	$R_\infty$	10 973 731,568 527(73) m <sup>-1</sup>
Planckkonstanten	$h$	6,626 068 96(33) $\cdot 10^{-34}$ J $\cdot$ s
Lysfarten i vakuum	$c_0$	299 792 458 m $\cdot$ s <sup>-1</sup>
Finstrukturkonstanten	$\alpha$	7,297 352 5376(50) $\cdot 10^{-3}$
gasskonstanten	$R$	8,314 472(15) J $\cdot$ mol <sup>-1</sup> $\cdot$ s <sup>-1</sup>
Boltzmannkonstanten	$k$	1,380 6504(24) $\cdot 10^{-23}$ J $\cdot$ K <sup>-1</sup>
elementærladningen	$e$	1,602 176 487(40) $\cdot 10^{-19}$ C



# SI systemet er koherent

SI systemet sies å være et koherent enhetssystem.

Med dette menes det at de avledede enhetene fremkommer som produkt/divisjon enheten uten at det er gitt noen konverteringsfaktor

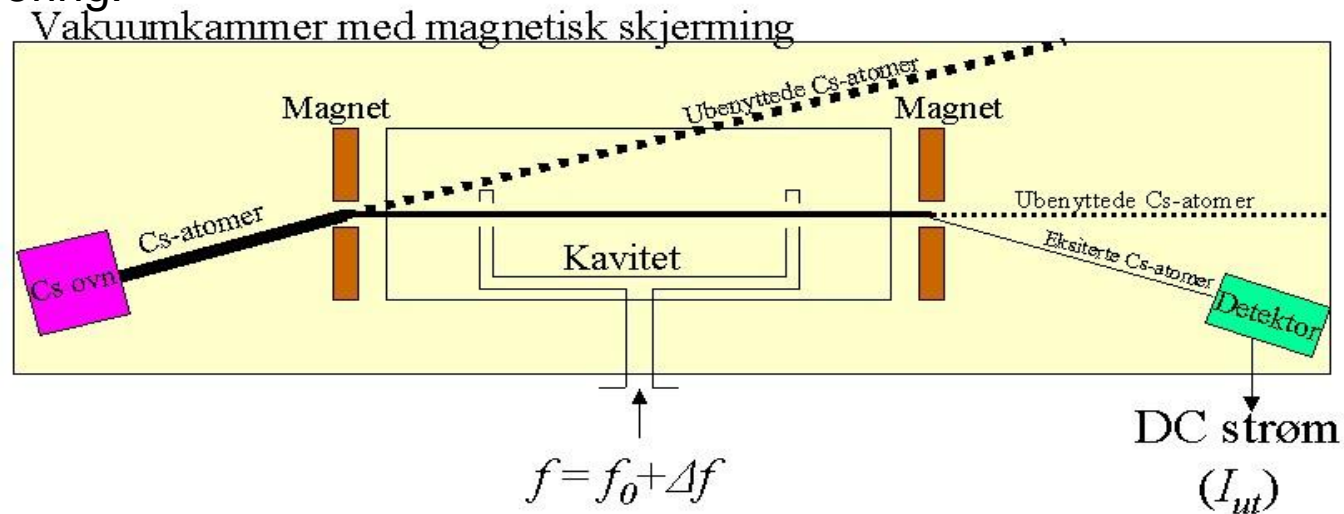
$$Q = \varepsilon \prod_{i=1}^n Q_i^{\alpha_i}$$

# Eksempel, Realisering av sekundet, Cs-klokke

Definisjonen:

1 sekund er 9 192 631 770 perioder av de svingninger som svarer til overgangen mellom de to hyperfinnivåer i grunntilstanden i Cs133. (13. CGPM-1967)

Fysisk realisering:



$$f_0 = 9192631770 \text{ Hz}$$

$$I_{ut} \approx I_0 + I_{Cs} * \sin(\Delta f) / \Delta f$$

Mer info for eksempel her:

[http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_4/4.4\\_zeit\\_und\\_frequenz/pdf/2003\\_Bauch\\_MST\\_CAC\\_VF\\_author\\_version.pdf](http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/pdf/2003_Bauch_MST_CAC_VF_author_version.pdf)



# Eksempel på bruk av SI: Temperatur

1. Definisjonen av kelvin (K) – termodynamisk temperatur:  
”1 kelvin er brøkdelen  $1/273,16$  av den termodynamiske temperaturen for vannets trippelpunkt. (13. CGPM – 1967). Enheten kelvin og dens symbol K brukes også for å uttrykke et temperaturintervall eller en temperaturdifferanse. Foruten termodynamisk temperatur (symbol T), brukes også celsiustemperatur (symbol t) definert ved likningen  $t = T - 273,15 \text{ K}$ . Celsiusstemperatur uttrykkes i grad celsius.”
2. Se mer info på: [http://www.bipm.org/en/si/si\\_brochure/chapter2/2-1/kelvin.html](http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/chapter2/2-1/kelvin.html)
3. Fikspunkter – interpolerende normaler
4. Komparering av brukstermometre med interpolerende normaler



# Fikspunkter

## ITS-90

- Praktisk temperaturskala relateres til termodynamisk temperaturskala
- Definert ved 17 fikspunkt (se utvalg i tabellen)

Termometre som blir benyttet for å fastslå skalaen:

1. 0,65 K til 5,0 K – damptrykk termometre
2. 3,0 K til 24,5561 K – gasstermometre
3. 13,8033 K til 961,78 °C – platina resistans termometre
4. Over 961,78 °C – strålingstermometre

Temperatur, °C	Stoff	Fikspunkt
-248,5939	Ne	Trippelpunkt (TP)
-218,7916	O	TP
-189,3442	Ar	TP
-38,83440	Hg	TP
0,010000	H <sub>2</sub> O	TP
29,76460	Ga	Smeltepunkt (MP)
156,5985	In	Frysepunkt (FP)
231,9280	Sn	FP
419,5270	Zn	FP
660,3230	Al	FP
961,7800	Ag	FP
1064,1800	Au	FP
1084,6200	Cu	FP



# Temperatur, varme og termisk energi

## Termisk energi

- Et stoff kan være i ulike fasetilstander:
  - Fast
  - Flytende
  - Gass
  - Plasma
  - (Og blandinger av disse)
- Tilstanden er relatert til den mengde *termisk energi* stoffet har, i et gitt øyeblikk.

## Temperatur

- På mikroskopisk skala: Temperatur er gjennomsnittet av molekylene kinetiske energi.
- Et termometer måler ikke total kinetisk energi for alle molekyler i objektet, men bare i kontaktpunktet.
  - Måler temperatur, og ikke termisk energi
  - Et kontakttermometeret måler i realiteten sin *egen temperatur*.
- Temperaturen avgjør retningen på varmestrømmen.



# Varmeoverføring - Konduksjon

- Konduksjonsformelen:

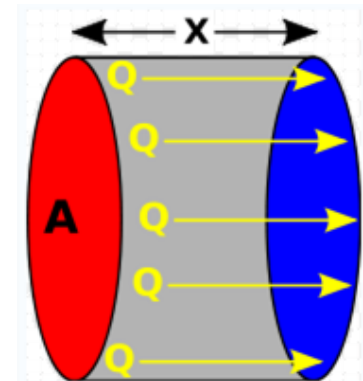
$$q = k \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$

$q$  = varmeoverføring pr tidsenhet

$k$  = termisk ledningsevne

$T_i$  = temperaturen til hvert av de to objektene

$L$  = tykkelsen på materialet (eller lengden av den ledende flaten)



# Varmeoverføring - Konveksjon

- Kompliserte formler, avhengig av trykk, temperaturer, materiale, med mer.
- Forenklet "konduksjonsformel":

$$q = h(T_S - T_\infty)$$

$q$  = varmeoverføring pr tidsenhet

$h$  = varmeoverføringskoeffisient

$T_S$  = overflatetemperaturen til objektet

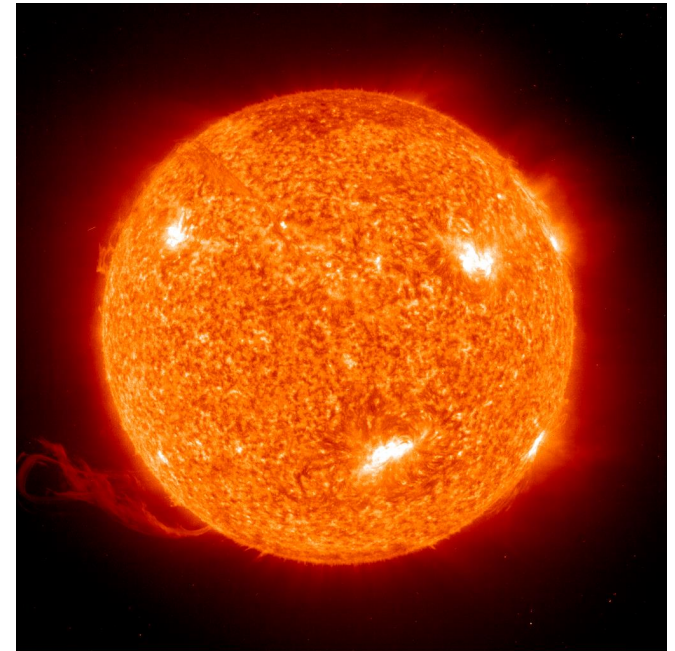
$T_\infty$  = temperaturen til væsken/gassen





# Varmeoverføring - Stråling

- Varmeoverføring skjer også ved elektromagnetiske stråling.
- Alle objekter (med temperatur større enn 0 K) sender ut elektromagnetisk stråling.
- Trenger ikke et *medium* å bre seg i – brer seg også i vakuum
- Strålingsenergien fra et objekt er direkte relatert til bevegelsesenergien til atomer og molekyler på *overflaten* av objektet.



Kilde: astronomi.no



# Varmeoverføring – Stråling (forts.)

## Plancks strålingslov:

- Plancks strålingslov gir den utstrålte energien (for perfekte blackbodyer) ved gitte *bølgelengder* og *temperaturer*:

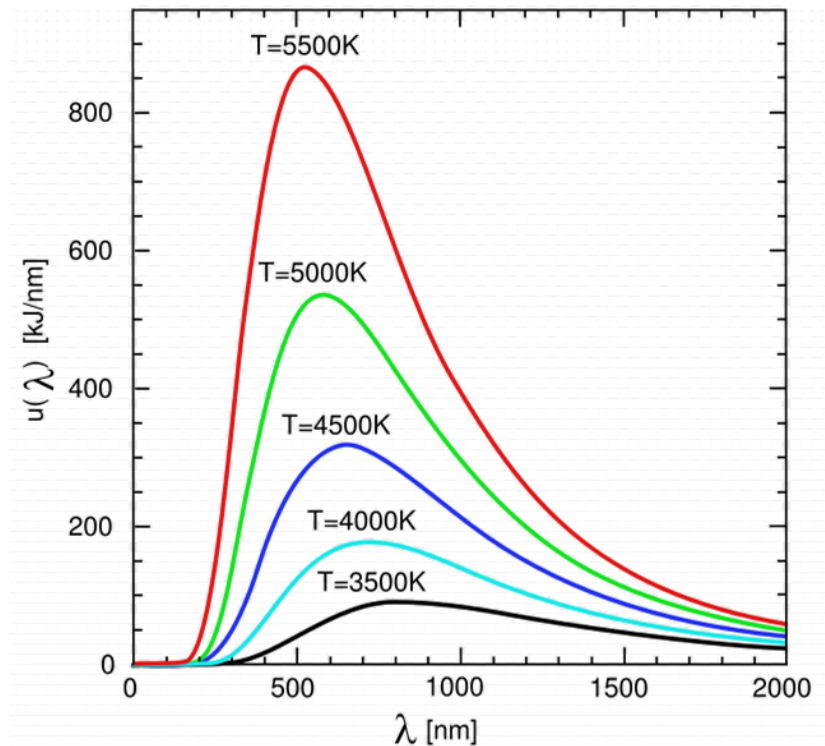
$$L_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

$L_{\lambda}(T)$  = Radians ved bølgelengden  $\lambda$  (m) og temperaturen T (K)

$c_1$  = konstant,  $3,74 \cdot 10^{-16}$  W m<sup>2</sup>

$c_2$  = konstant, 0,01439 m K

- Utstråling fra reelle materialer er også avhengig av emissiviteten





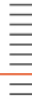
# Instrumenter for å måle temperatur

- Ulike instrumenter benytter ulike måleprinsipper for ulike temperaturområder
- Felles er at temperaturen detekteres/måles *via andre størrelser*.
- Ulike typer temperaturmåleinstrumenter
  - Væske-i-glass termometre (*lengde, volumetrisk utvidelse*)
  - Platina resistans termometre (*elektrisk motstand*)
  - Termoelement (*elektrisk likespenning*)
  - Overflatetermometre (*motstand eller spenning*)
  - Strålingstermometre (*optisk effekt, spektralfordeling*)
  - Støytermometre (*elektrisk støyeffekt*)



# Eksempel: Temperatursensorer

- **Pt-motstandstermometer:** R varierer med T
  - Typer: 25 ohm (presisjon), 100 ohm, 1 kohm
  - Fordeler: Nøyaktig, følsomme, stabile (ved riktig bruk), automatisering
  - Ulemper: Pris, mekanisk følsomme
- **Termoelement:** Spenningsdifferanse når kontakter mellom ulike metall har ulik temperatur
  - Typer: Edelmetall og andre
  - Fordeler: Følsomme, robuste, automatisering, pris
  - Ulemper: Nøyaktighet



# Eksempel: Temperatursensorer (forts.)

- **Væske-i-glass (VIG):** Væske i et lukket volum utvider seg med temperatur
  - Typer: Kvikksølv (på vei ut), sprit m/farge, andre
  - Fordeler: Stabile, enkle, kan være nøyaktige, pris
  - Ulemper: manuell avlesning, mekanisk skjøre
- **Termistorer:** Motstandsending med temperatur
  - Typer: NTC, PTC
  - Fordeler: Følsomme, kompakte, automatisering, pris
  - Ulemper: Nøyaktighet, stabilitet



# Eksempel: Temperatursensorer (forts.)

- **Strålingstermometre:** Spektralfordeling av utstrålt effekt fra objekt er avhengig av temperatur til objektet (Plancks strålingslov): Mer innhold av korte bølgelengder ved høye temperaturer
  - Typer: enkel- eller multibølgelengde
  - Fordeler: Måler på avstand (kontaktfri), rask måling, automatisering
  - Ulemper: Avhengig av emissivitet av objektet, mindre nøyaktighet



# Sporbarhet, masse

1. Den internasjonale 1 kg prototypen ( $\mathcal{K}$ )
2. Den norske 1 kg prototypen (No. 36)
3. 1 kg primærnormaler
4. Hovednormaler 1 mg - 50 kg, krever "etallonering", dvs opp- og nedstegning fra 1 kg -nivået
5. Arbeidsnormaler 1 mg - 500 kg
6. Kundens lodd, vekter





# Masse - begreper

- REELL MASSE
  - Den sanne/virkelige massen til lodd. Oppgis kun i kalibreringsbeviset dersom tettheten er målt og kan dokumenteres.
- KONVENsjONELL MASSE
  - Er masse av et objekt ved gitte referansebetingelser, dvs den massen som man detekterer ved veiing i luft
- NOMINELL MASSE
  - Avrundet verdi omtrent lik normalens verdi. Veldefinerte verdier gjerne basert på standardverdiene 1, 2, 5, 10, 20, 50 .....
- TOLERANSE
  - Den maksimale tillatte feil eller avvik (OIML R111)





# Masse – oppdrift – konvensjonell masse

- Referansebetingelsene er definert til:
  - lufttemperatur:  $t_{ref} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
  - lufttetthet:  $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$
  - loddtetthet:  $\rho_c = 8\,000 \text{ kg/m}^3$
- Sammenheng mellom reell masse  $m$  og konvensjonell masse  $m_c$ :

$$m_c = m \cdot \frac{1 - \frac{\rho_0}{\rho}}{1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}}$$

der  $\rho$  er den virkelige tettheten til loddet



# Vekter

- Vekter indikerer masse mens sensoren vanligvis registrerer kraft
- Det brukes loddnormaler i rustfritt stål for å kalibrere vekter

Drøfting 1: Hvor mye oppdrift (i kg) opplever et 1 kg lodd av stål ( $8000 \text{ kg/m}^3$ ) når tettheten på luft  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ?

Drøfting 2: Hvor mye oppdrift (i kg) opplever et 1 kg lodd av PtIr ( $21500 \text{ kg/m}^3$ )?

Drøfting 3: En vekt kalibreres med 100 kg lodd (stål), og stilles slik at den viser eksakt 100 kg når ståloddene står på. Loddene tas av og en person stiger opp på vekten. Den viser 100 kg. Hvor stor er den relative feilen pga. oppdriften til dette resultatet?

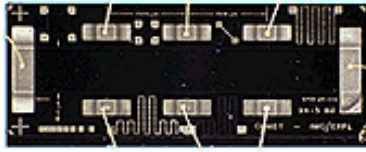


# Sporbarhet – elektriske størrelser

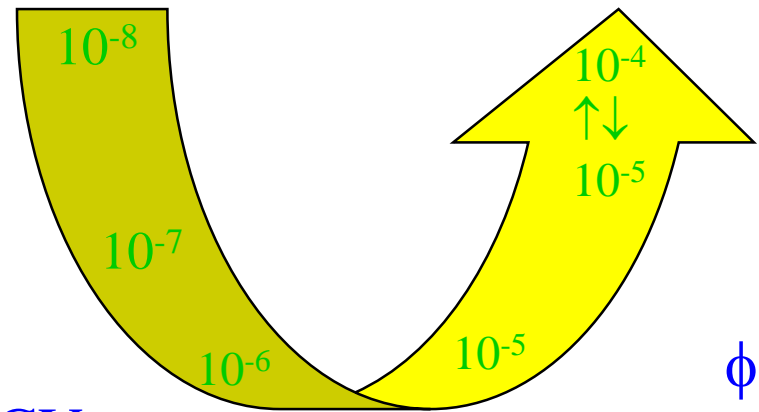
1. Amperedefinisjonen – brukes ikke direkte
2. Josephson-effekten for spenning og kvantisert Hall-effekt for motstand – Ohms lov gir da strøm
3. Kalibrerer motstandsnormaler og spenningsnormaler
4. Vekselstrøm og vekselspenning, gjennom sammenlikning av effekt (termoomvandler) fra vekselstrømsignaler (AC) og likesignaler (DC)
5. Trenger sporbar tid for å måle frekvensforløp/respons samt energi
6. Kapasitans trenger sporbar tid og strøm
7. Induktans trenger sporbar spenning, strøm og tid



V



Ω



E

P

ϕ

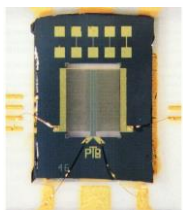


ACV

10Hz-1MHz/1mV-1kV

ACI

10Hz-100kHz/10μA-100A





## Elektrisk strøm - Ampere

- Direkte realisering av definisjonen utføres ikke rutinemessig, relativ usikkerhet er på noen ganger  $10^{-6}$ .
- Den mest praktiske realisering av A er å bruke Ohms lov og å realisere volt og ohm, basert på AC Josephson- effekten og kvantisert Halleffekt. Den relative reproduserbarheten er  $\sim 10^{-10}$  og  $\sim 10^{-9}$  respektivt.
- Linken til SI-enhetene er Josephsonkonstanten  $K_{J-90}$  og von Klitzing konstanten  $R_{K-90}$
- Verdiene av disse er kjent med relative usikkerheter på  $4 \cdot 10^{-7}$  i forhold til SI



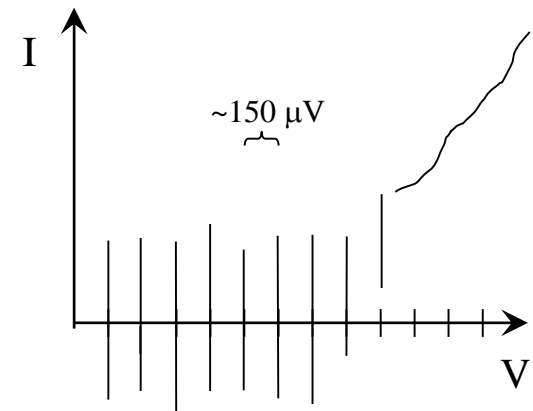
## Josephson effekten

Josephson effekten oppstår når elektron par ("Cooper pairs") tunnelerer fra en superleder gjennom et tynt isolerende lag (nm) til en annen superleder ("SIS-overgang").

Når en slik overgang blir belyst med et mikrobølgefelt med en frekvens  $f$ , oppstår det spenningsprang over overgangen.

Sprangene er proporsjonale med  $f$ .

$$V = n \frac{h}{2e} f = \frac{nf}{K_{J-90}}$$

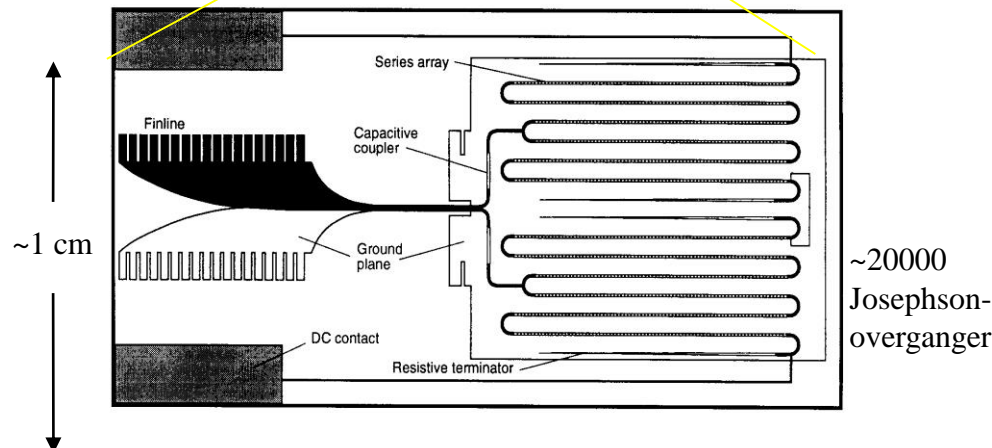
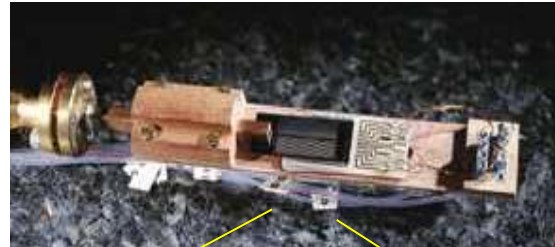


Konstante spenningssteg i en enkel SIS overgangs I-V kurve (strøm –spenning) for  $f = \sim 75$  GHz



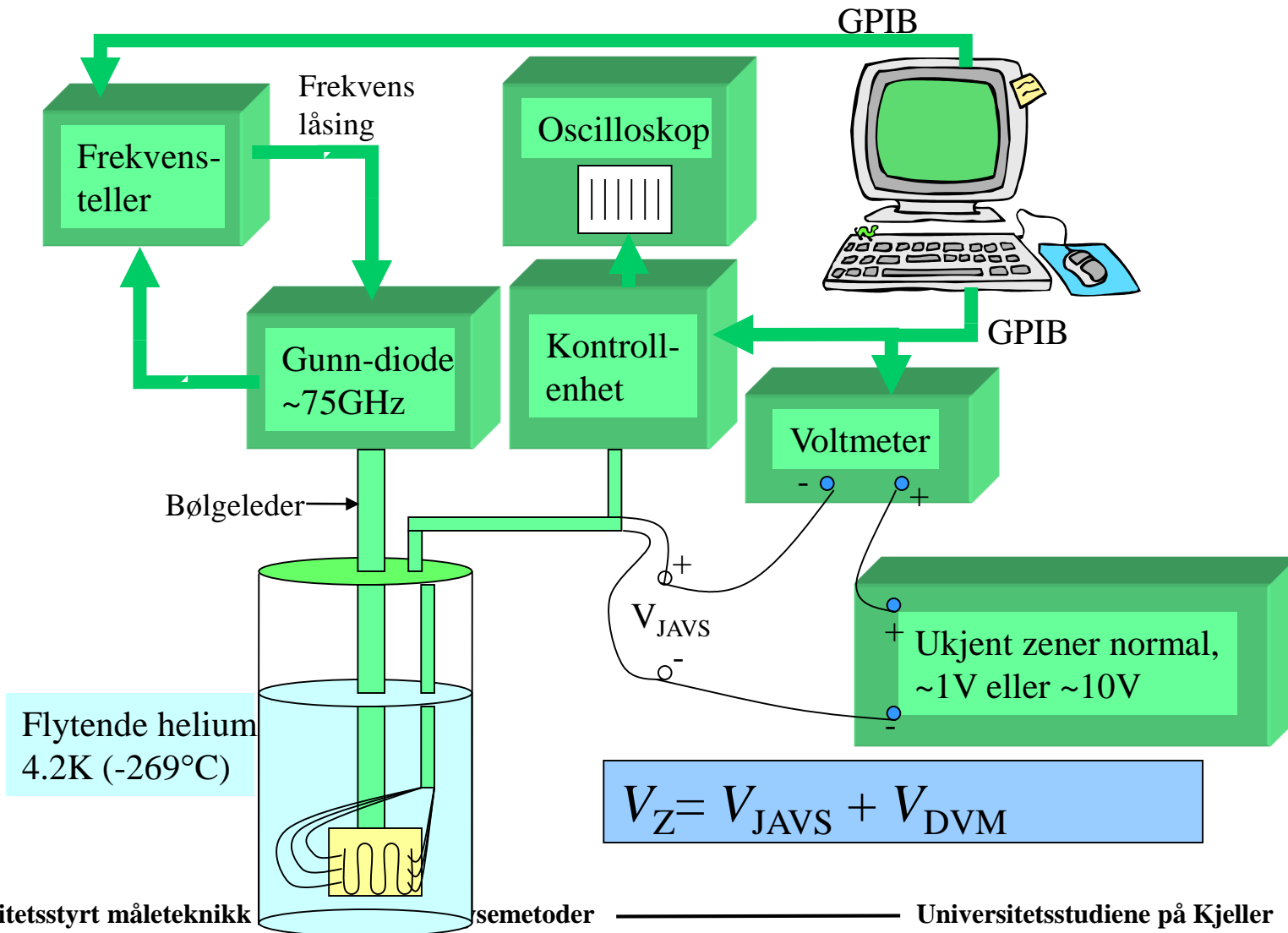
# Realisering av AC Josephsoneffekten

Når opp imot 20000 Josephson overganger koples i serie kan en generere spenninger opp til  $\sim 10\text{V}$ .  
Overgangene er nedkjølt til temperaturen av flytende helium.





# Bestemmelse av verdien til en zener normal





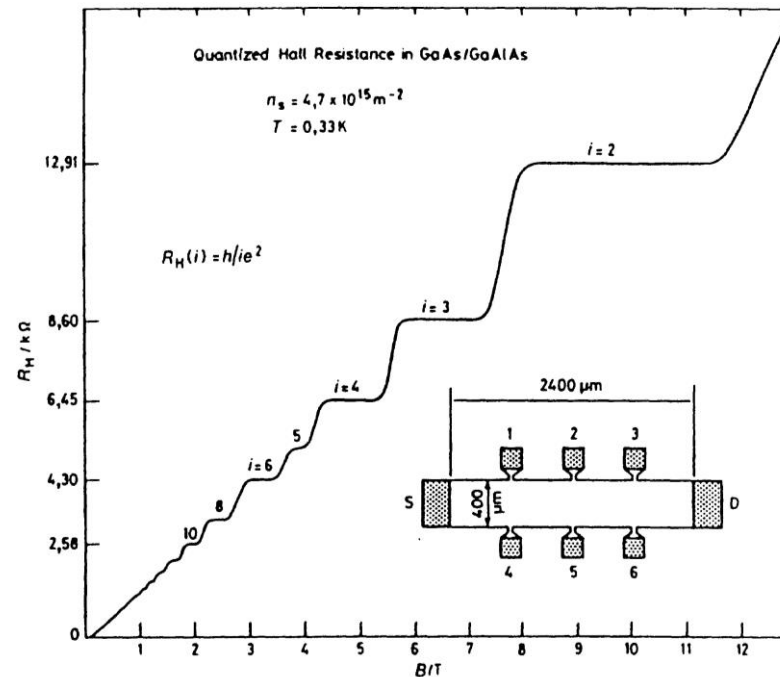


# Kvantisert Halleffekt

Kvantisert Halleffekt oppstår i en todimensjonal elektron-gass når den utsettes for et sterkt magnetfelt. En todimensjonal elektrongass kan realiseres i en grenseflate mellom to halvledere. Resistansen over en slik halvlederstruktur forandrer seg i konstante stepp som funksjon av magnetfeltet.

Hall resistansen er gitt ved:

$$R_H(i) = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_{K-90}}{i}$$

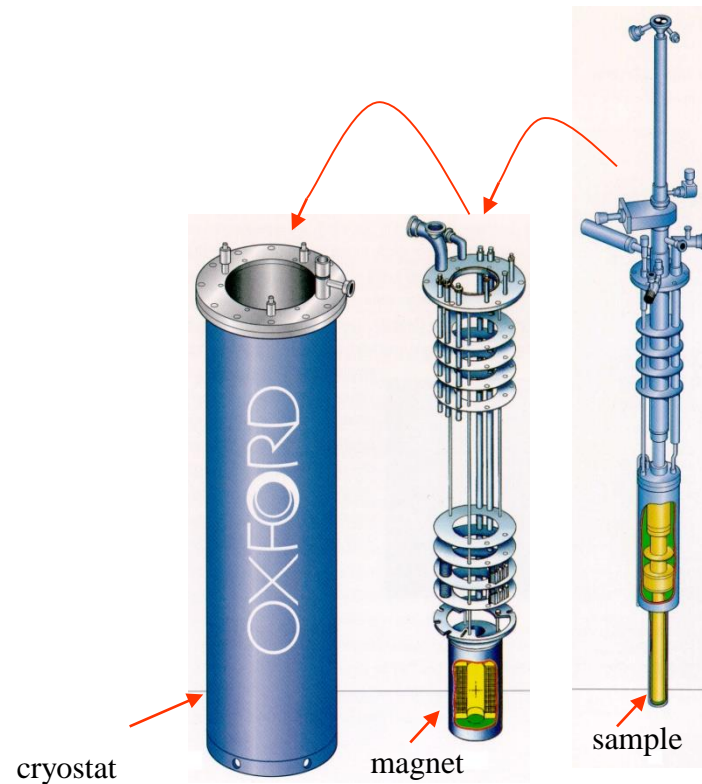


Hall resistansen som funksjon av magnetfelt for en GaAs/GaAlAs overgang

# Realisering av Kvantisert Halleffekt

## Utstyr:

- Superledende magnet, opp til 16T
- Prøvetemperatur  $T \sim 0,3\text{K}$  ved bruk av  $^3\text{He}$
- Kryogen strømkomparator ("CCC") for å kalibrere romtemperatur motstandsnormaler





## AC/DC-overføring -prinsipper

- For vekselstrøm og spenning er det ingen egne SI-enheter
- Vekselstrøm og vekselspenning sammenliknes med respektive DC-størrelser gjennom effektivverdien (RMS).
- Overføringsnormaler består av en varmetråd (resistor) som kan varmes opp hhv med DC-signal og AC-signal. Varmeeffekten detekteres gjennom å lese av temperaturstigningen med et termoelement. Overføringsnormalen er karakterisert ved AC/DC-differansen (her eksempelvis for strøm):

$$\delta = \frac{|I_{AC}| - I_{DC}}{I_{DC}}$$

- Når AC/DC-differansen er kjent, kan AC-størrelsen måles med sporbarhet til tilsvarende DC-størrelse.
- Alternativ metode for RMS-bestemmelse er å sample AC-signalet og beregne en effektivverdi.



# Meter

Lyshastigheten er definert som avstanden lys i vakuum tilbakelegger i løpet av brøkdelen  $1/299\,792\,458$  av et sekund.

Dette gjør at meteren kan realiseres med enhver kilde til elektromagnetisk stråling, dersom frekvensen er kjent.

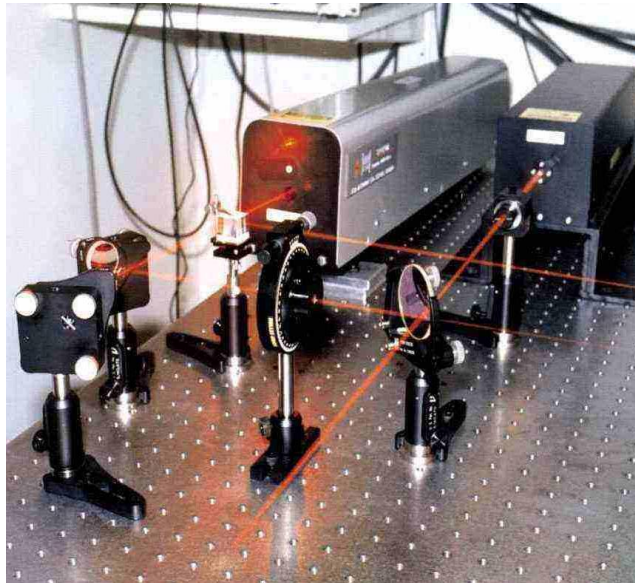
Sammenhengen mellom bølgelengde,  $\lambda$ , frekvens,  $\nu$ , og lyshastigheten,  $c$ , er:

$$\lambda = c / \nu$$

Et vanlig og presist valg er å realisere meteren med Iod-stabiliserte He-Ne lasere med en bølgelengde på cirka 633 nm.



## Meteren – praktisk realisering



Kalibrering av en laser mot den norske primærnormalen for lengde (til høyre)

# Meteren – praktisk anvendelse I

## Kalibrering av passbiter ved bruk av laser interferometri:

Avstanden mellom parallelle plater måles med en rød og en grønn laser, hvis bølgelengder er sporbare til meteren ved bruk av et Michelson interferometer.

Ved å se på faseforskjellen i interferensmønsteret fra bunnplaten og toppen av passbitene kan en beregne lengden. Laserne belyser begge flatene samtidig.



## Kalibrering av lengder opp til 50 meter ved bruk av laser interferometri





## Tid - sekundet

- Realisering av Cs-klokke
- Cs-klokken definerer varigheten på sekundet og er en svært stabil oscillator.
- For nøyaktig tidsskala benyttes middelveien av en rekke Cs-klokker (ca 300 stk), sammenliknet ved hjelp av GPS: Gir Internasjonal Atomtid (TAI)
- Vi ønsker en tidsskala som er like stabil som TAI, men samtidig er mest mulig i fase med jordens rotasjon: Universal Time Coordinated (UTC). Denne er lik TAI, bortsett fra et helt antall skuddsekunder (34 per dd). UTC er 12:00 når solen står rett i sør ved nullmeridianen.
- Se [http://www.bipm.org/en/scientific/tai/time\\_server.html](http://www.bipm.org/en/scientific/tai/time_server.html)





## Volum- og strømningsmåling

- Industrielt svært sentralt å måle volum og strømningsrate av fluider (dvs væsker og gasser).
- Mest nøyaktig metode er gravimetrisk. Dvs veiing av en volumnormal (tank) med aktuelt fluid og deretter tom. Kjenner man fluidets densitet kan volumet av fluidet bestemmes fra veiingen. Sporbarhet altså til masse (kilogrammet).
- På neste trinn i sporbarhetskjeden benyttes ofte volumetrisk kalibrering. Det går ut på å fylle væske fra en (gravimetrisk) kalibrert volumnormal til den ukjente normalen, og lese av differansen.



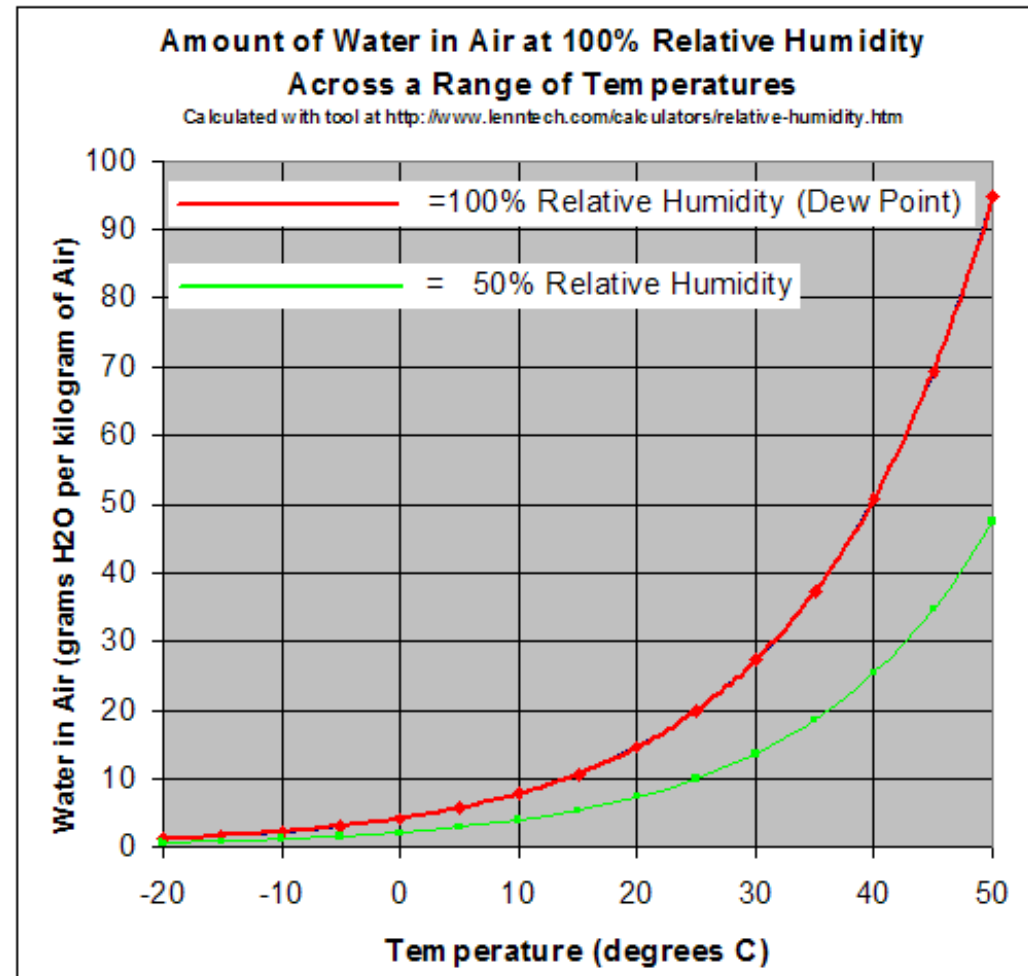




# Hygrometri - fuktighet

Å bestemme relativ fuktighet innebærer hovedsaklig å bestemme innholdet av fuktighet (dvs. vann) i en gass med en kjent temperatur.

Relativ luftfuktighet (angis med % RH) sier hvor stor prosentdel av metningsmengden av vann som finnes i luften (når den relative fuktigheten er 100% betyr det at vann starter å kondensere/rime).





## Hygrometri - II

- Ulike metoder og prinsipper:
  - En basal metode for kalibrering av hygrometere er å lage en luftblanding med kjent masseandel vann tilsatt tørr luft.
  - Fuktighet kan angis som absolutt fuktighet °C dp (grader C duggpunkt) eller som relativ fuktighet.
  - Ulike måleprinsipper måler henholdsvis absolutt og relativ fuktighet. Med kunnskap om temperatur og trykk er det mulig å transformere målinger mellom disse to målestørrelsene.
  - Eksempler på måleprinsipper
    - Duggpunkt (temperaturen der vann kondenserer eller rimer)
    - Kapasitans i et materiale (som varierer med fukt)
    - Kjøleeffekten av fukt som fordamper (psykrometer)

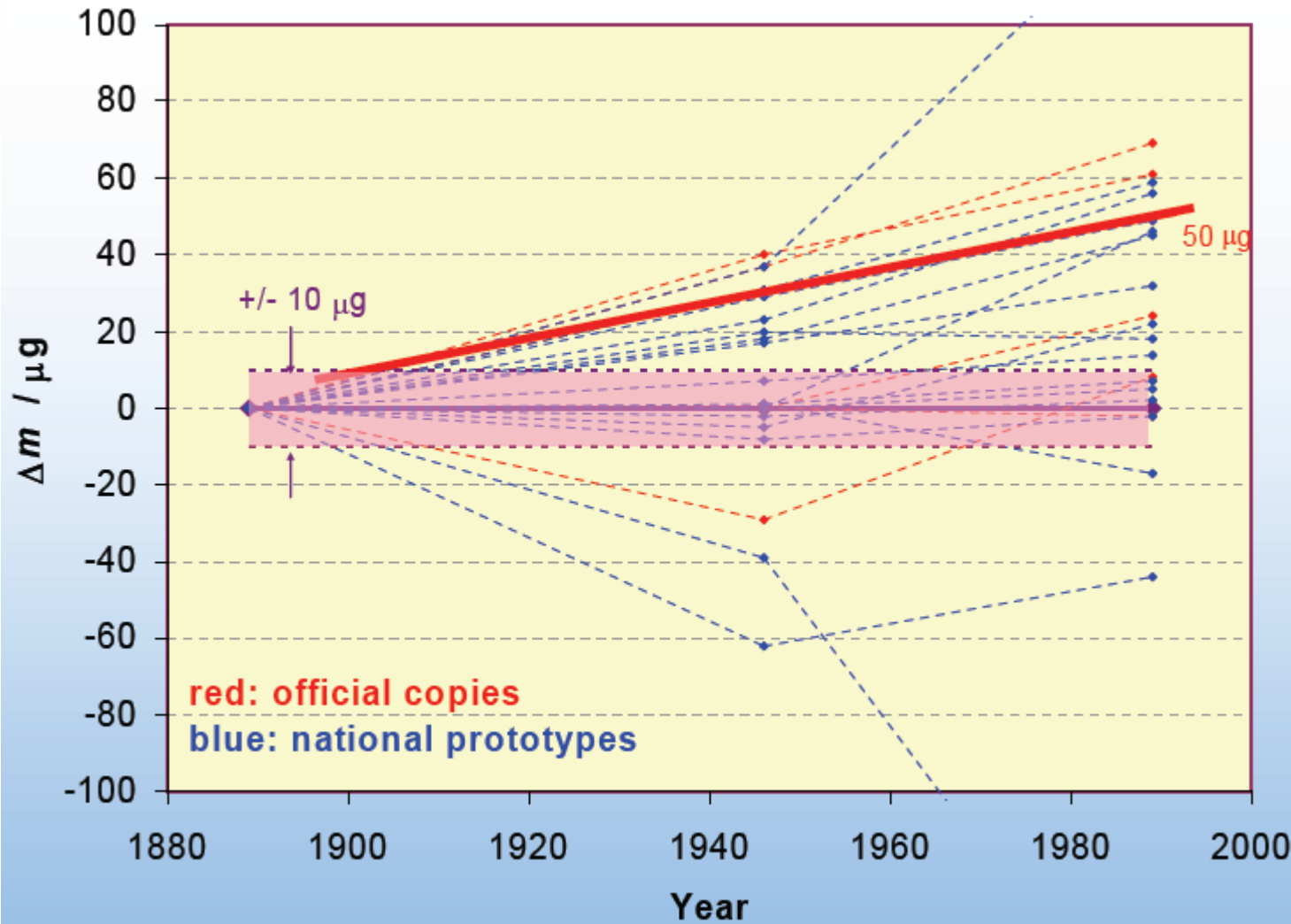


## Problem med dagens SI

- Kilogrammet er ikke konstant
- Amperedefinisjonen er upraktisk og gir større usikkerhet enn å gå via Josephson-effekten og kvantisert Hall-effekt
- Usikkerhet i kobling mellom ITS-90 og termodynamisk temperatur
- Mol-definisjonen er knyttet til kilogramdefinisjonen
- Candela-definisjonen har stor usikkerhet



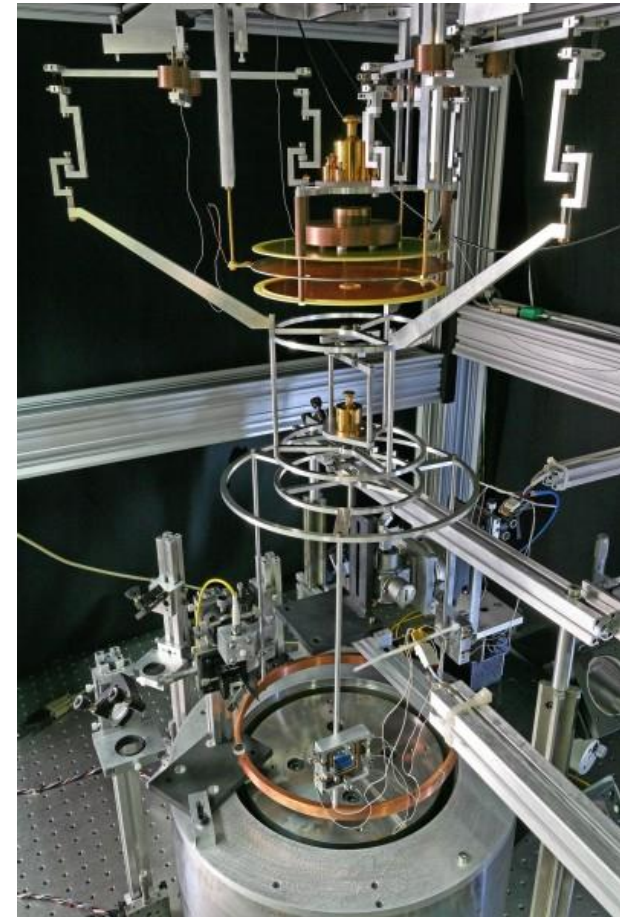
# Endring i kilogramnormaler (M. Stock, BIPM)





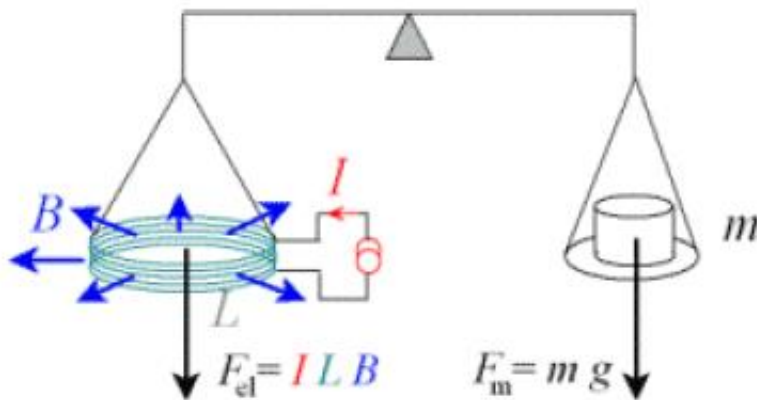
# Watt-vekt som erstatning for "kiloklumpen i Paris"

- Sammenligner elektrisk arbeid med mekanisk arbeid
- Knytter massedefinisjonen til naturkonstanter pluss størrelser som kan måles nøyaktig
- Relativ usikkerhet for de 4 eksperimentene som foregår nå, er frå  $10^{-8}$  til  $10^{-7}$ .

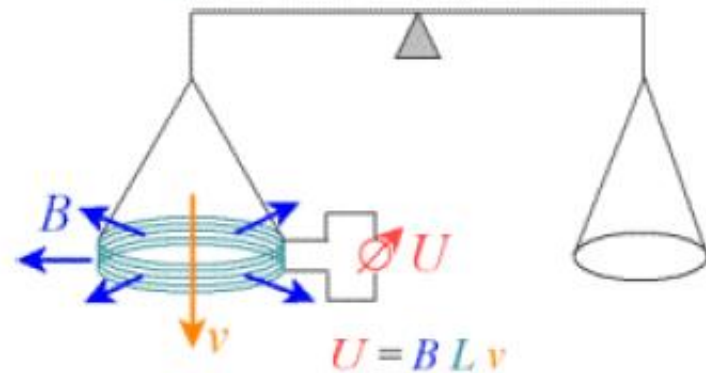


# Watt-vekt

## → Weighing experiment



## → Moving experiment



$$mg = ILB, \text{ og } U = BLv$$

$$\text{Gir: } UI = mgv$$

$$\text{Dvs: } m = UI/gv$$

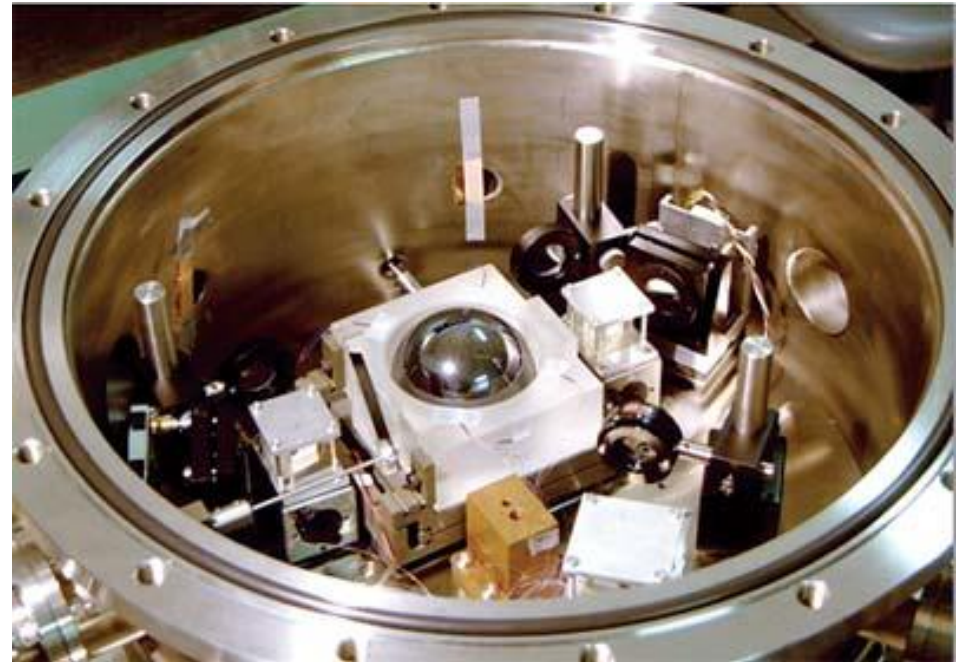
Knytter dermed elektrisk arbeid til mekanisk arbeid, og bestemmer massen med måling av  $g$ ,  $v$ ,  $U$  og  $I$ .

(Illustrasjon: BIPM)





Si-masse: Framstiller en enkrystall av silisium, produserer en nær perfekt kule, måler dimensjonen og gitterkonstanten.





# Forslag til nye definisjoner

4 grunnenheter vil få nye definisjoner:

- **Kilogram**
- **Ampere**
- **Kelvin**
- **Mole**

De nye definisjonene vil være knyttet til faste numeriske verdier for følgende naturkonstanter:

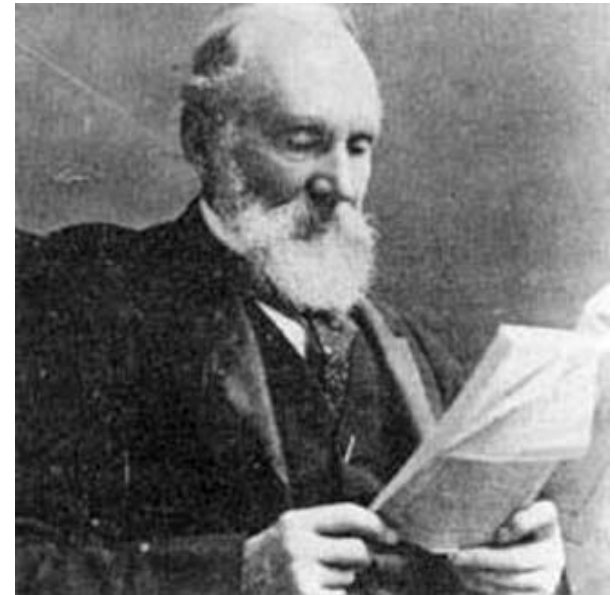
- **Planck konstant ( $h$ )**
- **Elementerladningen ( $e$ )**
- **Boltzmann konstant ( $k_B$ )**
- **Avogadro konstant ( $N_A$ )**



## Vedtak 23.CGPM, 2007

- Spesifiserer trippelpunktet for vann, med isotopblanding:
  - 0,000 155 76 mol  $^2\text{H}$  per mol av  $^1\text{H}$
  - 0,000 379 9 mol  $^{17}\text{O}$  per mol av  $^{16}\text{O}$ , og
  - 0,002 005 2 mol  $^{18}\text{O}$  per mol av  $^{16}\text{O}$

"Vienna Standard Mean Ocean Water"



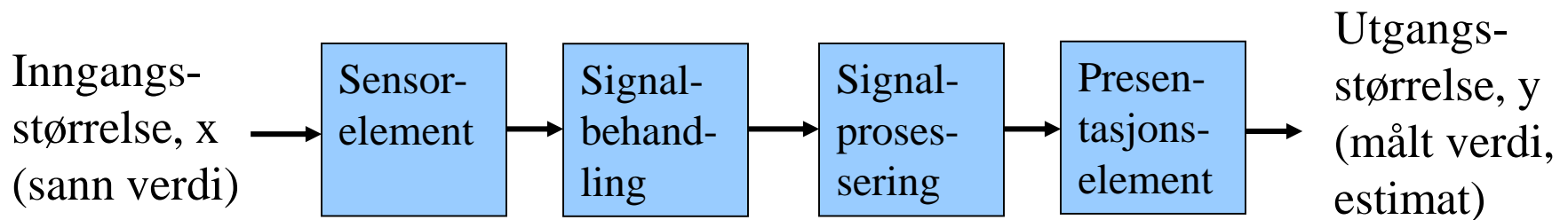
William Thomson (Lord Kelvin)



# Målesystem:

(Kvikk repetisjon)

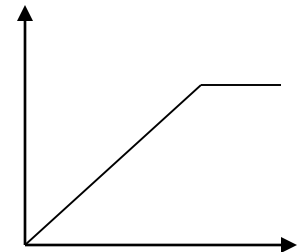
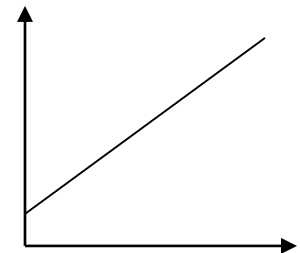
Hovedelementer i et målesystem:





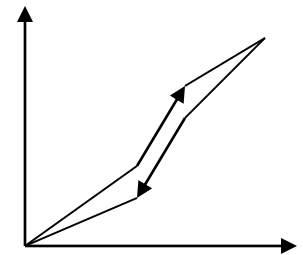
# Sensor - karakteristik

- **Måleområde** (span, range, dynamisk område)
- **Offset** (bias): Utgangssignal er ulik null ved null inngangssignal
- **Forsterkning** (gain): Det må være en kjent forsterkning av inngangssignalet
- **Ulinearitet**: Det er normalt ønskelig med en lineær sammenheng mellom endring i inngangssignal og utgangssignal
- **Metning**: Situasjon der følsomheten er null. Dette kan skje når sensoren feilaktig arbeider utenfor sitt dynamiske område.



## Sensor – karakteristik (forts.)

- **Hysteresese:** Utgangsstørrelsen er ulik ved stigende eller minkende inngangsstørrelse
- **Miljøkrav:** Temperatur, fukt, vibrasjon, EMC, strømforsyning, m.fl.
- **Stabilitet, drift, slitasje, aldring**
- **Pålitelighet, forventet levetid**





## Sensor – karakteristikk (forts.)

- **Inngangsimpedans:** Hvor mye signalet blir belastet av instrumentet.
- **Utgangsimpedans:** Hvor mye elementet kan belastes før signalet blir feil.
- **Frekvensrespons:** Endring av overføringsfunksjon med frekvens på signalet.
- **Støy (i målesystemet):** Variasjon i utgangssignal når inngangssignal er konstant.
- **Oppløsning:** Minste variasjon i inngangssignal som gir endring i utgangssignal.



# Analysemetode - karakteristik

- **Kvantiseringsgrense (LOQ):** Oppløsningen i en analyse. Minste endring i utgangssignal som følge av endring i inngangssignal.
- **Deteksjonsgrense (LOD):** Den nedre grense for konsentrasjon av analytt som metoden virker for. Normalt et visst antall ganger LOQ.
- **Matriks-effekt:** Endring i analyseresultat som følge av mediet analytten analyseres i. Beslektet med "**Recovery**", som betegner lavere eller større gjenfinning av analytt etter behandling.
- **Repeterbarhet og reproduserbarhet (i lab og på tvers av lab)**
- **Bias (offset)**



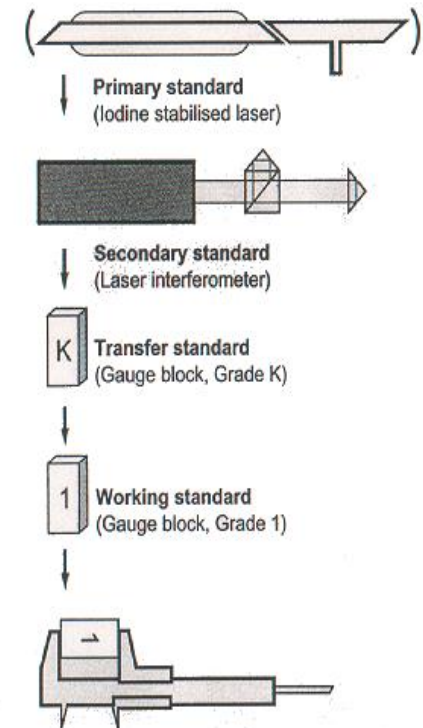
## Måleresultat (VIM 2.9)

Måleresultatet består av en estimert måleverdi og en tilhørende estimert måleusikkerhet som angir et intervall der det er høy sannsynlighet for at "den sanne" verdien til målestørrelsen ligger innenfor.

$$\text{Måleresultat} = \text{Måleverdi} \pm \text{Måleusikkerhet}$$

# Kalibrering (VIM 2.39)

- **Kalibrering:** "Å bestemme verdien av en referanse eller visningen til et instrument i forhold til en referanse" [VIM 6.11]
- En kalibrering sier kun noe om instrumentets egenskaper på det tidspunkt kalibreringen utføres. Kalibreringen dokumenteres gjennom kalibreringsbeviset. Innholdet i et kalibreringsbevis er i stor grad styrt gjennom ISO 17025 (kap 5.10). Hovedelementer i dette kravet tas opp senere i kurset







## Metrologisk sporbarhet (VIM 2.42 og 2.43)

”Den egenskapen ved et måleresultat at det kan føres tilbake til en referanse gjennom en ubrutt kjede av kalibreringer, alle med oppgitt måleusikkerhet”

Referanse: Nasjonal eller internasjonal normal, sertifisert referansemateriale, middelvei av ringtest (SLP).



# Normaler, definisjoner

## Normal

“Gjenstand, måleinstrument, referansemateriale eller målesystem som brukes for å definere, realisere, oppbevare eller reprodusere en måleenhet eller en eller flere verdier av en målestørrelse som skal brukes som referanse” [VIM 6.1]

## Nasjonal normal

“Normal som ved en nasjonal beslutning er anerkjent å skulle tjene som referanse for andre normaler i et land, for den aktuelle målestørrelsen” [VIM 6.3]

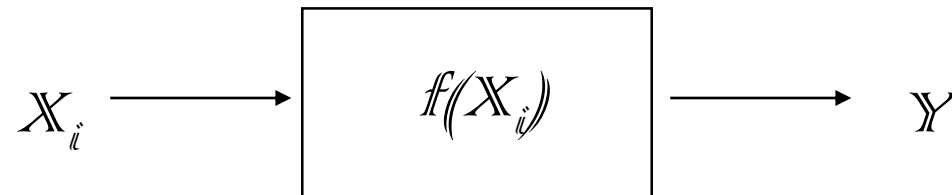


## Målefunksjon (VIM 2.48)

- En matematisk beskrivelse av den spesifikke størrelsen som skal måles som overensstemmer med definisjonen som er knyttet til målemodellen som benyttes
- Detaljeringsnivå i beskrivelsen knyttes til hva man ønsker å oppnå med målingen (f.eks hvor nøyaktig, eller hva måleresultatet skal brukes til), dvs man må ta med alle relevante, signifikante bidrag og effekter



## Målefunksjon (forts.)



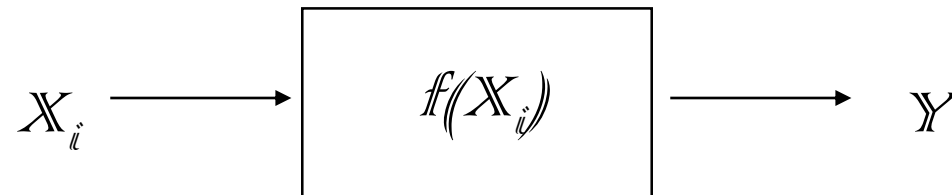
$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$X_i$  = inngangsstørrelse

$Y$  = utgangsstørrelse



## Målefunksjon (forts.)



$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$X_i$  = inngangsstørrelse

$Y$  = utgangsstørrelse



## Målefunksjon (forts.)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$x_i$  = estimat for inngangsstørrelsen

$y$  = estimat for utgangsstørrelsen

# Målefunksjon – oversikt

*(benytter senere denne malen for usikkerhetsanalyse)*

<i>størrelse</i> $X_i$	<i>estimat</i> $x_i$				
$X_1$	$x_1$				
:	:				
:	:				
:	:				
$X_N$	$x_N$				
$Y$	$y$				

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

# Målefunksjon - eksempel

<i>størrelse</i> $X_i$	<i>estimat</i> $x_i$				
$L$	100 m				
$T$	20 s				
$v = L/T$	5 m/s				

Målefunksjon

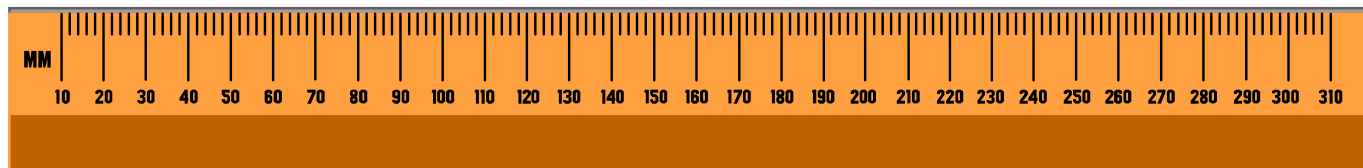
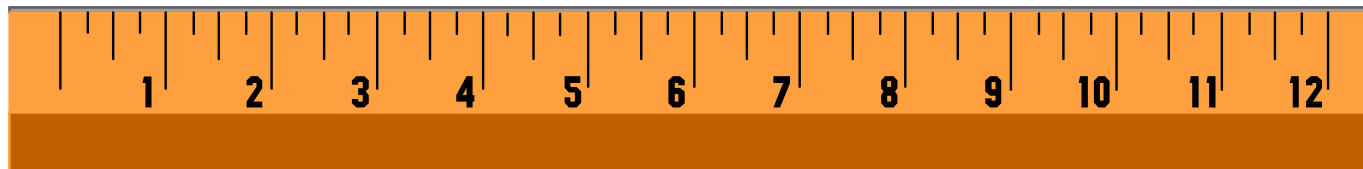






# Eksempel på målefunksjon

- Kalibrering av målbånd
  - Sammenlikner med en målbåndnormal av samme materiale.
  - Differanse mellom normalen og den ukjente bestemmes
- Ofte ønske om å finne ut om avvik er innenfor en nøyaktighetsklasse (Klasse I:  $\pm (0,1 + 0,1L)$  i mm, og L er i m)



- Lengde temperaturutvidelse for stål:  $\frac{\Delta L}{L} = \alpha(T - T_{ref})$      $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$



# Forslag til målefunksjon - målebåndkalibrering

$$l_x = dl + l_n + dl_d + dl_0 - L\alpha_n(t_n - t_{20}) + L\alpha_x(t_x - t_{20})$$

$dl$ : Oppløsning i avlesningen

$l_n$ : Normalens lengde

$dl_d$ : Driften (endringen) i normalen siden sist kalibrering

$dl_0$ : Innstilling av nullpunktet

$L$ : Nominell lengde 50 m

$(t_n - t_{20})$ : Temperaturen på normalen, som avvik fra 20

$(t_x - t_{20})$ : Temperaturen på ukjent bånd, som avvik fra 20

$\alpha_n$ : Temperaturkoeffisient for normalen 11,5  $\mu\text{m}/\text{Km}$

$\alpha_x$ : Temperaturkoeffisient for ukjent bånd, 11,5  $\mu\text{m}/\text{Km}$



# Målefunksjon

- En matematisk beskrivelse av den spesifikke størrelsen som skal måles
- Detaljeringsnivå i beskrivelsen knyttes til hva man ønsker å oppnå med målingen (f.eks hvor nøyaktig, eller hva måleresultatet skal brukes til), dvs man må ta med alle relevante, signifikante bidrag og effekter



## Forslag til målefunksjon - målebåndkalibrering

$$l_x = dl + l_n + dl_d + dl_0 - L\alpha_n(t_n - t_{20}) + L\alpha_x(t_x - t_{20})$$

$dl$ : Oppløsning i avlesningen

$l_n$ : Normalens lengde

$dl_d$ : Driften (endringen) i normalen siden sist kalibrering

$dl_0$ : Innstilling av nullpunktet

$L$ : Nominell lengde 50 m

$(t_n - t_{20})$ : Temperaturen på normalen, som avvik fra 20

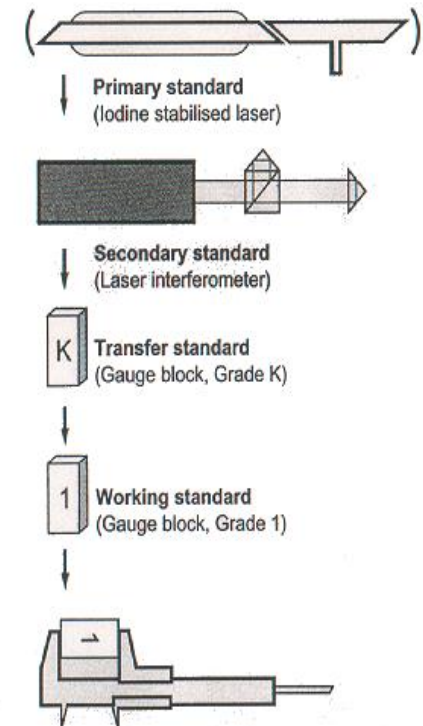
$(t_x - t_{20})$ : Temperaturen på ukjent bånd, som avvik fra 20

$\alpha_n$ : Temperaturkoeffisient for normalen 11,5  $\mu\text{m}/\text{Km}$

$\alpha_x$ : Temperaturkoeffisient for ukjent bånd, 11,5  $\mu\text{m}/\text{Km}$

# Kalibrering

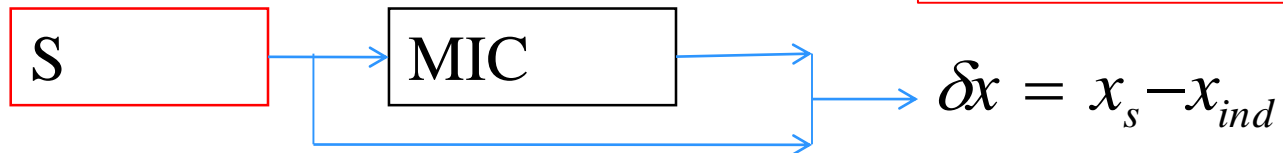
- **Kalibrering:** "Å bestemme verdien av en referanse eller visningen til et instrument i forhold til en referanse" [VIM 6.11]
- En kalibrering sier kun noe om instrumentets egenskaper på det tidspunkt kalibreringen utføres. Kalibreringen dokumenteres gjennom kalibreringsbeviset. Innholdet i et kalibreringsbevis er i stor grad styrt gjennom ISO 17025 (kap 5.10). Hovedelementer i dette kravet tas opp senere i kurset





# Modeller for kalibreringsprosessen

## 1. Direkte kalibrering



S: "Standard" dvs "normal";

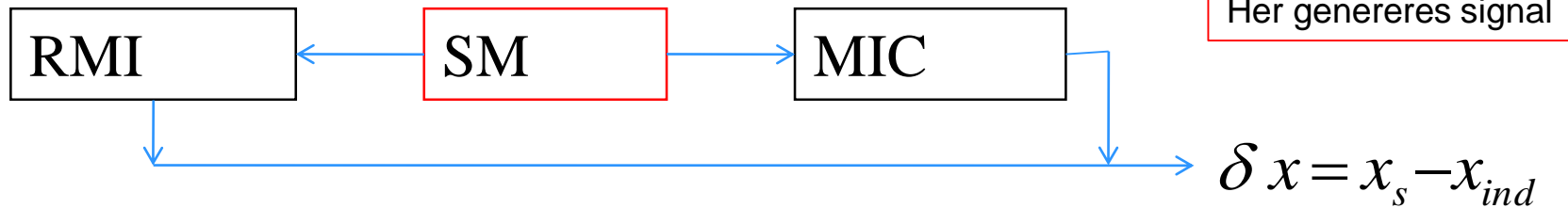
MIC: "Measuring Instrument to be Calibrated")

Typisk for mikrometre, voltmetre, ohmmetre, og ellers når normal er et referansemateriale



## Modeller for kalibreringsprosessen (forts.)

### 2. Simultan observasjon



RMI: "Reference Measuring Instrument" dvs "normal"

SM: "Stabilised Measurand"

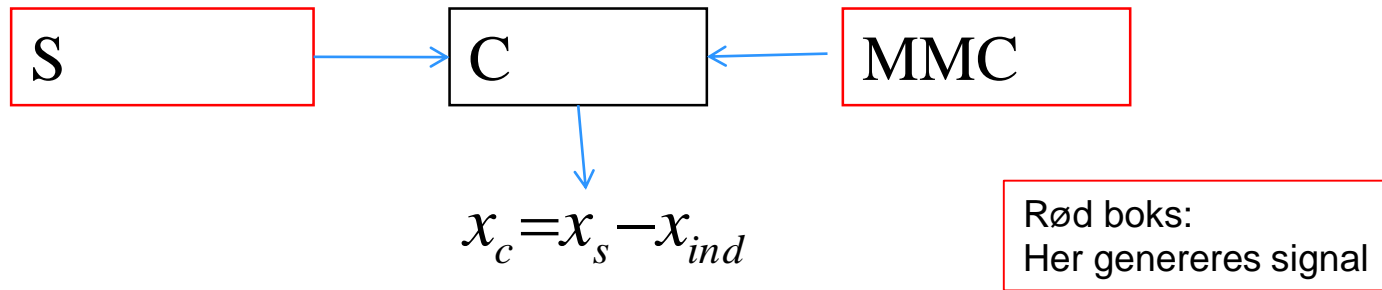
MIC: "Measuring Instrument to be Calibrated"

For eksempel ved temperaturkalibrering i et medium som både referanseinstrumentet og ukjent måler, eller t.d. ei signalkilde som normal og ukjent måler på.



# Modeller for kalibreringsprosessen (forts.)

## 3. Komparering



S: "Standard" dvs "normal"

C: "Calibrator"

MMC: "Material Measure to be Calibrated")

For eksempel ved passbiter, lodd, motstandsnormaler og lignende materialmål





# Hvordan bestemmer vi måleresultatet ?

Når vi måler, for eksempel en temperatur med et termometer er det viktig å være klar over utfordringene i målesituasjonen. Det er mange kilder til feil i måleresultatet, og noen er viktigere enn andre. Hva som er viktig å ta hensyn til kan variere med måleoppgaven, måleinstrumentet, ulike påvirkning og ønsket nøyaktighet.

- Hvilken feil er det i instrumentets visning i dag.
  - Hvilket avvik viser kalibreringsbeviset at instrumentet har?
  - Hvor mye har instrumentet endret seg siden kalibreringen?
- Viser instrumentet den målestørrelsen vi ønsker å måle?
  - Temperatur variere både i rom og tid, og temperaturføler har følsomhet i visse soner av føleren og har termisk treghet.
  - Benyttes en egnet metode for måleoppgaven?
  - Er operatøren opplært og kjent med målemetoden og viktige feilkilder?



# Målemetode

- Som utgangspunkt for **enhver måling eller kalibrering** har vi en målemetode.
- Metoden må beskrives slik at rammebetingelsene defineres på et nivå som gir tilstrekkelige beskyttelse mot alle uønskede feilkilder som er relevante for ”nøyaktigheten” til målingen.
- Når metoden er definert vil det ofte være mulig å definere en målefunksjon som beskriver matematisk hvordan målestørrelsen fremkommer som en funksjon av observasjoner, korreksjoner og avvik. En slik matematisk sammenheng betegner vi **målefunksjon**.



# Hvilke feil er det i dine målinger ?

Instrumentet

Situasjonen

Objektet

Operatøren

Annet



## Måleresultatet og feilbidrag

Vi skal korrigere for kjente systematiske feil, men feilene er ikke helt kjent og det er flere bidrag til feil vi ikke kan korrigere for.

**Måleresultatet er dermed alltid et intervall og ikke en enkelt verdi!**

Normalt oppgir vi derfor måleresultatet med følgende uttrykk:

$$T = t \pm U$$

t: temperaturen korrigert for kjente feil  
U: utvidet usikkerhet.

For eksempel:  $T = 4,25^{\circ}\text{C} \pm 0,17^{\circ}\text{C}$

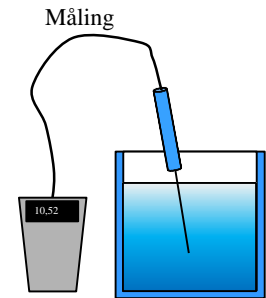


# Målemetode, målefunksjon og måleresultatet

For å finne  $t$  (estimert temperatur), setter vi opp et uttrykk vi betegner målefunksjon.

Målefunksjonen inkluderer alle observasjoner og feilbidrag.

$$t = \bar{t}_{\text{avlesning}} + \Delta t_{\text{oppløsning}} + \Delta t_{\text{kalibrering}} + \Delta t_{\text{drift}} + \dots$$



Knyttet til alle leddene i dette uttrykket (inngangsstørrelsene) er det også knyttet en usikkerhet. Dette gjør at vi skal ta med inngangsstørrelser med stor usikkerhet selv om (den estimerte) verdien er 0.

Usikkerheten i de ulike leddene/inngangsstørrelsene forplanter seg gjennom målefunksjonen til måleresultatet. Det er dermed ikke mulig å kombinere usikkerhetsbidrag uten å kjenne målefunksjonen.



## Eksempel 1

# Målefunksjoner for måling og kalibrering

Vi har gitt et eksempel på målefunksjon for måling for å finne temperaturen  $t$  (estimert temperatur):

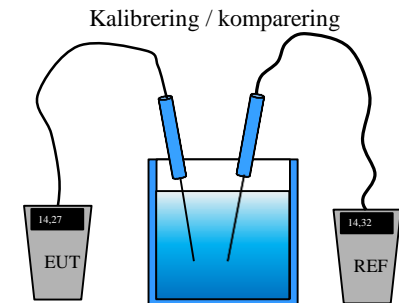
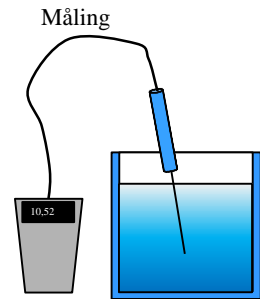
### Måling

$$t = \bar{t}_{avlesning} + \Delta t_{oppløsning} + \Delta t_{kalibrering} + \Delta t_{drift} + \dots$$

Tilsvarende kan vi sette opp en målefunksjon for en kalibrering som består i å sammenligne (komparere) et instrument (Enhet Under Test) med en referanse (REF).

### Kalibrering

$$\Delta t_{avvik} = (\bar{t}_{EUT,avlesn.} + \Delta t_{EUT,oppl.} + \Delta t_{EUT,kal.} + \dots) - (\bar{t}_{REF,avlesn.} + \Delta t_{REF,oppl.} + \Delta t_{REF,kal.} + \dots)$$

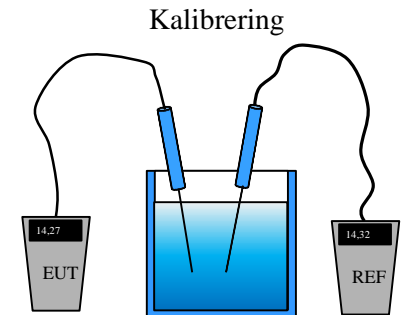




## Eksempel 2

# Ulike målefunksjon for kalibrering

Målefunksjonen speiler konkret målemetoden. Under ser vi hvordan ulike metoder for å observere avviket mellom visningen på et instrument som skal kalibreres mot et referanseinstrument gir ulik målefunksjon.



Metode 1: Vi observerer i samme tidsintervall hvert instrument for seg, og regner så ut et gjennomsnitt av disse observasjonene hver for seg. Vi regner så ut differansen mellom disse to gjennomsnittene.

$$\Delta t_{\text{avvik}} = (\bar{t}_{EUT, \text{avlesn.}} + \Delta t_{EUT, \text{oppl.}} + \Delta t_{EUT, \text{kal.}} + \dots) - (\bar{t}_{REF, \text{avlesn.}} + \Delta t_{REF, \text{oppl.}} + \Delta t_{REF, \text{kal.}} + \dots)$$

Metode 2: Vi observerer i et tidsintervall differansene mellom visning på EUT og REF, og regner så ut et gjennomsnitt av disse observasjonene.

$$\Delta t_{\text{avvik}} = (\overline{t_{EUT, \text{avlesn.}} - t_{REF, \text{avlesn.}}} + \Delta t_{EUT, \text{oppl.}} + \Delta t_{EUT, \text{kal.}} - \Delta t_{REF, \text{oppl.}} - \Delta t_{REF, \text{kal.}} + \dots)$$

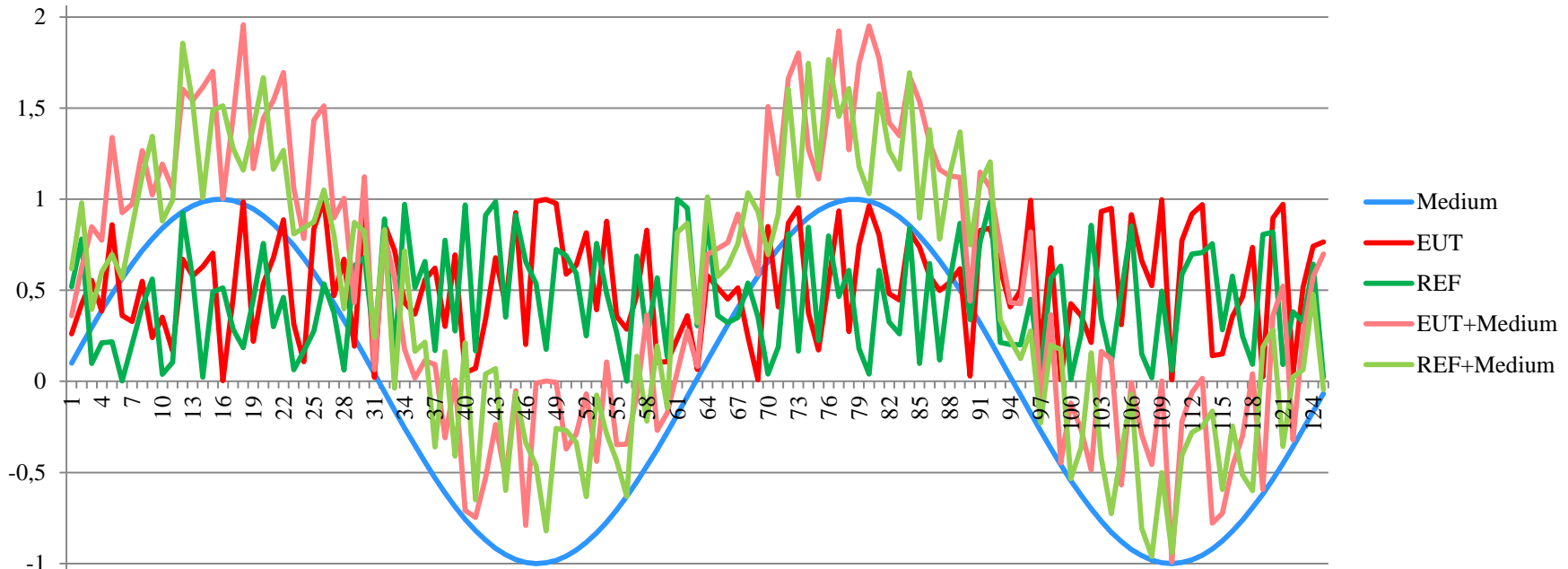
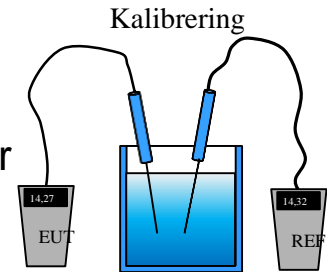
**Hvis det er en betydelig variasjon i kompareringsmediet, bør metode 2 benyttes!**



## Eksempel 2 (forts.)

### Ulike målefunksjon for kalibrering

Vi kan tenke oss at vi har variasjon i de observerte målingene som både er knyttet til tidsvariasjon i temperaturen i mediet vi benytter for sammenligningen og tidsvariasjon i instrumentets visning som vi vil ha selv om mediet har stabil temperatur over tid.



Her ser vi hvordan mediets variasjon kan elimineres ved å ta gjennomsnitt av avvik i stedet for avvik mellom gjennomsnitt.