

SÄRTRYCK UR:

KOSMOS

ENHETER OCH NATURKONSTANTER

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2020



MÅTTENHETER OCH NATURKONSTANTER

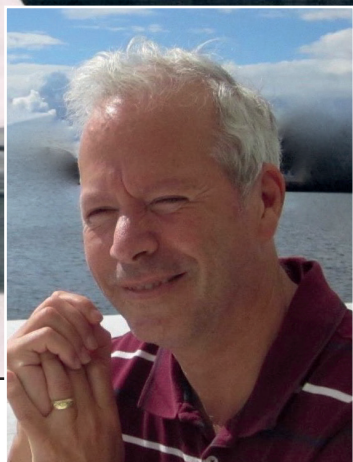
— OM MENINGSFULLA MÅTT
OCH MÄTANDE

© LESLIE PENDRILL



Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Leslie Pendrill

disputerade 1978 i Atomfysik vid University of Reading (UK). Postdokortjänster vid Ecole Normale Supérieure, Paris; Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA), Boulder och Clarendon Laboratory, Oxford följdes 1981 av flytt till Sverige (docent GU 1984, adj prof Uppsala 2004). Under åren 1985 – 2012 var han FoU-chef, Mätteknik-enheten vid SP i Borås och det svenska nationella metrologi-institutet. Ledande roller inkluderar ordförande för EURAMET (www.euramet.org), IUPAP C2 SUNAMCO och ISO/TC12 Storheter och enheter.

Vilka är de aspekter som ledde till förra årets omdefiniering av SI-enheterna i termer av fysikaliska konstanter? Vad menas med meningsfulla måttenheter och mätande? Som en inledning till de följande, mer enhetspecifika uppsatserna i årets Kosmos, ger oss här Leslie Pendrill en inblick i meningsfulla mått och vilken roll mått spelar i dagens samhälle.

*Bilden: 100-års komparation av rikskilogrammet vid Statens provningsanstalt, Borås (författaren längst t. h.)
[Pendrill and Källgren 1988]*

Måttenheter och naturkonstanter – om meningsfulla mått och mätande

Att kommunicera mätinformation

Begreppet ”metrologi”, dvs. kvalitetssäkrad mätning, är ämnet för denna artikel i Kosmos 2020. Fysiken har historiskt sett varit den viktigaste arenan för metrologins utveckling – senast med förra årets revidering av det internationella måttenhetssystemet SI (*Système international d’unités*). Det råder ingen tvekan om att de heroiska precisionsmätningar av olika fundamentala fysikaliska konstanter, vars värden numera utgör grunden för de reviderade SI-måttenheterna, är de noggrannaste någonsin.

SI-systemet har dock beskrivits som som något för alla, ”från Nobelpristagaren till mannen eller kvinnan på gatan”. Förutom att vara ett verktyg i grundläggande forskning, bör SI-systemet även

År	KOSMOS-artikel om metrologi (exempel)
1936	von Friesen: ”Om värdena på c , e/m och h ”
1953	Edlén: ”Den nya meterdefinitionen”
1965	K. Siegbahn: ”Mått och vikt”
1966-67	Frank: ”Atomuren kommer med tiden”
1978 ”att mäta”	Mathiesen: ”Om mått och mätande”
2020	”Måttenheter och naturkonstanter”

Exempel på Kosmos-inlägg om metrologin genom åren.

vara en resurs för grunden för kvantitativa, jämförbara mätvärden på *alla* noggrannhetsnivåer och för *alla* tillämpningsområden inom industrin och samhälle världen över. Därmed är det tänkt att produkter och processer av alla slag kan bli kvalitetssäkrade genom att kvalitetssäkra deras mätning.

Nu, i början av 2000-talet, är det dags att blicka vidare, kanske bortom mätning inte endast inom fysiken, utan även inom ”mjukare” områden som samhällsvetenskaperna, där människan är i fokus och behov, filosofiska överväganden och politik styr. För att möta dagens stora utmaningar (hållbarhet, klimatförändring, hälsa osv.), behövs en grundläggande utredning om en utvidgning av metrologin för att kunna täcka även mindre kvantitativa egenskaper typiska för mätning inom samhällsvetenskap. Oberoende av noggrannhetsnivå eller tillämpningsområde är det framförallt hur väl man lyckas förmedla mätinformation – i termer av *meningsfulla* mått och mätande – som är avgörande.

Senare i artikeln ges en kritisk översikt av det reviderade SI från förra året, som komplement till de mera enhets-specifika inslagen i andra uppsatser av 2020-års Kosmos. Innan dess, i artikelns första del, ges först svar på frågan: Vilka är de speciella aspekter som har lett till omdefinieringen av SI-enheterna i termer av fysikaliska konstanter? Med detta menas inte förbättrad ingenjörskonst eller graden av precision, utan vilken fysik det är som förklarar riktigheten i dessa mått. Man bör till och med kunna svara på frågan vilken roll måttenheterna egentligen spelar. Det är först då, som man kan granska begreppen *meningsfulla* måttenheter och *meningsfullt* mätande.

Kommunikation och jämförbarhet i olika tillämpningar

Ett tydligt exempel på mätning och dess kommunikation ges i berättelsen om Zanzibar-effekten, citerad bl.a. av Mathiesen i Kosmos 1978, och värd att kort återupprepa: en pensionerad sjökaptan på ön Zanzibar ställer sina klockor vid besök hos stadens urmakare, men upptäcker sedermera att urmakaren själv använder sjökaptanens kanonskott klockan 12 varje dag för att ställa sina egna klockor! Sådana cirkulära kalibreringar till lokala referenser är vanligare än man tror. Följdfrågan är då: var kommer de absoluta, ”riktiga” mätreferenserna ifrån?

Jämförbarhet mellan egenskaper hos objekt är sedan ur-

minnes tid avgörande för handeln mellan producenter och konsumenter. Den allra första internationella överenskommelsen blev Meterkonventionen 1875, som tvingade fram krav på rättvisa i global handel. I och med den industriella revolutionen, och tillväxten under 1900-talet, har jämförbarhet blivit en förutsättning för driftskompatibilitet och utbytbarhet mellan delar och system i komplexa produkter av alla slag. Bilar och flygplan sätts ihop med delar tillverkade i olika fabriker över hela världen – se Grimvalls stycke om detta om Mått-Johansson. Kvalitetssäkring av mätning krävs för motsvarande kvalitetssäkring av produkter, som i sin tur leder till minskat spill, energiförbrukning, miljöförstöring osv.. Kvalitetssäkrings-standarder (normer som ISO 9000), som formulerades med början under senare delen av 1900-talet, inkluderar krav på mätkvalitetssäkring i termer av metrologisk spårbarhet, måttenheter och mätosäkerhet, först i industrin och senare även inom andra sektorer. Omkring millennieskiftet tillkom krav på jämförbarhet kopplad till synkronisering av signaler i kommunikationssystem och på internet. Ett par decennier in på 2000-talet har ytterligare tillämpningsområden för metrologi lagts till, i syfte att ge en rättvis och kvalitetssäkrad bas för mätning inom miljö, hälsa, samt sektorer inom farmakologi och andra livsvetenskaper. Att en patient kan förvänta sig likvärdig och rättvis vård oberoende var och av vem den ges kan försäkras genom jämförbarheten som metrologisk spårbarhet tillför. Många av FN:s hållbarhetsmål kräver jämförbarhet och rättvisa för såväl ekonomiskt som mänskligt kapital.

Pålitliga mätresultat eftersträvas, oberoende av om mätningar görs för att ge underlag för beslut om konsistens och reproducerbarhet i resultat av experiment i grundläggande fysik, eller för att visa om en produkt uppfyller vissa specifikationer – s.k. bedömning av överensstämmelse (eng.: *conformity assessment*). Kvalitetssäkring av mätningar, främst i termer av metrologisk spårbarhet genom kalibrering mot mätreferenser, ger jämförbarhet i mätresultat, och säkerställer motsvarande jämförbarhet av föremål och deras egenskaper i många olika tillämpningsområden.

Meningsfull mätinformation

Formen på den mätinformation som behöver förmedlas – mellan avlägsna platser och mellan olika personer – beror på vad som är meningsfullt att kommunicera i respektive tillämpningsområde.

Antalet burkar majs i den lokala stormarknaden vid stängningstid i går var minst 10.	Meningsfull
En burk majs väger minst 10.	Meningslös
En burk majs väger dubbelt så mycket som en annan burk.	Meningsfull
Temperaturen på en burk majs vid stängningstid igår var dubbelt så hög som temperaturen för andra burken.	Meningslös

Tabell 1. Meningsfulla och meningslösa meddelanden om mätning.

Två budskap om mätning som förmedlas med exemplen i Tabell 1 är att:

- mätning handlar mycket om att tillhandahålla tydliga, meningsfulla meddelanden för att kommunicera information om vad (föremål, kvalitetsegenskaper ...) som mäts,
- måttenheter är viktiga för att möjliggöra effektiv kommunikation.

Måttenheter

Maxwell skrev följande om mätning av storheter:

”Preliminary on the Measurement of Quantities.

1. EVERY expression of a Quantity consists of two factors or components. One of these is the name of a certain known quantity of the same kind as the quantity to be expressed, which is taken as a standard of reference. The other component is the number of times the standard is to be taken in order to make up the required quantity. The standard quantity is technically called the Unit, and the number is called the Numerical Value of the quantity...”

Denna ursprungliga text om måttenheter uttryckte Maxwell också matematiskt med ekvationen:

$$Q = \{Q\} \cdot [Q] . \quad (1)$$

I dessa samband kallas referensstorheten [Q] tekniskt av Maxwell för "Enheten" och antalet, storhetens "Numeriska Värde", {Q}.

I letandet efter de referensnormaler som bäst förkroppsligar måttenheter för olika storheter söker man efter situationer, egenskaper och system som bevarar sin mening när mätinformation ska kommuniceras. Fysikaliska symmetrier, konserveringslagar och entropi har sedan länge varit viktiga källor för måttenheter, vilket beskrivs i en kommande sektion. Mot slutet av artikeln, återkommer vi till försök att hitta mått för mänskliga storheter.

Fysikaliska storheter och "sanning"

Den viktigaste vetenskapen för metrologi har historiskt sett varit fysik. Mätning är i sig nödvändigt inom fysiken, även om all fysik naturligtvis inte är mätning. Om mätande kan ses som en nyckelkomponent i ett experiment, så finns alltid en koppling till vetenskaplig sanning: För att citera några fysiker: Feynman skrev: "Experiment är den *enda domaren* av vetenskaplig 'sanning'"; medan Dirac menade att: "Motiveringen för hela systemet beror, förutom på intern konsistens, på överensstämmelsen mellan de slutliga resultaten och experiment."

Letandet efter universella mått – i sann revolutionär anda: "*A tous temps: A tous peuples*" – är kanske fysikens huvudsakliga bidrag till metrologi genom att tillhandahålla absoluta mått (i slutändan de universella fundamentala konstanterna). Samtidigt är det viktigt att göra precisa mätningar, med låg spridning eller liten osäkerhet, genom konstruktion av bättre mätinstrument. Fysikerns känsliga instrument, t.ex. de som användes i slutet av 1800-talet för mätning av små elektriska strömmar i grundläggande undersökningar av fysikaliska samband, kunde även användas inom t.ex. tidig telegrafi, men kunde inte alltid konkurrera med ingenjörens lådinstrument (som amperemetern) när det gäller robusthet och användbarhet i fältmätningar.

När universella och absoluta mått söks, letar man främst bland de fundamentala och universella förhållandena mellan storheter som kan uttryckas matematiskt med ekvationer som utgör naturlagar, eller som definierar nya storheter. Till exempel, en fysikalisk lag som kraftekvationen $F = ma$, som hänför sig till olika storheter, är ett universellt samband tillämpbart på *alla* skalor och föremål – från det mikroskopiska till det kosmologiska (i alla fall där relativistiska och kvantmekaniska effekter är små). Sådana

samband är mer universella än många andra relationer av mer teknisk natur och lokal giltighet, som t.ex. inom sensortekniken, där särskilda relationer ges mellan in- och ut signaler för varje enskild mätsituation och -system.

Olika storheter kan jämföras om de hör till samma typ och ”dimension”. Till exempel hör våglängd och radie båda till storhetstypen ”längd”. Vilken typ en viss storhet hör till är oberoende av och överordnat vilken måttenhet som kopplas till storheterna. Dimensionsanalyser används dels för kontroll av samband, dels för uppbyggnad av samband mellan olika storheter. För att uttrycka en valfri storhet, krävs ett antal basstorheter (i SI är det idag sju stycken) – valda bland de storheter som kan bestämmas noggrannast och som är mest representativa. Det finns vissa likheter mellan val av basstorheter och fysikernas letande efter en ”teori om allt”.

Fysikernas dröm att kunna definiera måttenheterna i termer av ”absoluta”, ”universella” och ”riktiga” mått har funnits länge, där man har letat bland t.ex. de fundamentalkonstanter som kan sägas höra till motsvarande grundläggande storheter. Maxwell skrev 1873:

”Each molecule, therefore, throughout the universe, bears impressed on it the stamp of a metric system as distinctly as does the metre of the Archives at Paris, or the double royal cubit of the Temple of Karnac¹.”

”Jag tror att:

...alla elektroner i universum har samma laddning och massa
 ...alla fotoner rör sig med samma hastighet i den fria rymden
 ... med en given frekvens är en fotons energi unikt definierad
 ...alla protoner har samma laddning och massa
 ...gravitationsattraktionen mellan två kroppar kännetecknas endast av deras massa och inbördes avstånd”

Fysikernas ”trosbekännelse” [enligt Petley]

Dessa funderingar om ”universella” mått leder oss stundvis bortom vardagliga storheter och dimensioner och till mera fundamentala begrepp, som i följande stycke.

1 Tempelkomplex i Egypten som en gång var en del av den antika huvudstaden Thebe.

Måttenheter och ord, symmetri, bevarade storheter och minimerad entropi

I detta avsnitt presenteras måttenheter och relaterade begrepp som entropi och symmetri, samt konserveringslagar som på olika sätt relaterar till effektiv och meningsfull kommunikation av mätinformation.

Mängden information som överförs från mätobjektet till observatören kan vara allt från en enkel signal till allt mer ”meningsfulla” meddelanden. Inom informationsteori beskrivs detta med fyra nivåer av ökande informationsinnehåll avseende, respektive, syntax, semantik, pragmatik och verkningsfullhet. Ett klassiskt exempel som illustrerar olika informationsinnehåll är följande tre meddelanden, som består av ett lika stort antal tecken som trots det förmedlar olika mycket information:

”100110001100”

”agurjerhjjkl”

”this message”

Det är uppenbart för alla som förstår engelska att det tredje meddelandet förmedlar mer information än de två andra meddelandena.

Även avseende mätinformation är det avgörande ”mängden information” som kan *meningsfullt* kommuniceras i ett budskap (Tabell 1). Metrologisk spårbarhet ska ge den mätjämförbarhet som behövs för motsvarande jämförbarhet i olika ting av intresse. Måttenheter utgör således ”igenkännbara” eller ”meningsfulla” meddelanden när mätinformation utbyts mellan personer och mättillfällen, utan att innebörden går förlorad.

Mängden information i ett budskap – som de tre exemplen ovan – kan mätas i termer av entropi som i sig beror på grad av ordning. I mätsammanhang förekommer två distinkta lägen där man söker stationära (minsta eller maximala) värden för entropin:

- de bästa måttenheterna för spårbarhet är de som är förknippade med mest ordning, dvs. minst entropi, i enlighet med principen om minsta verkan²;
- förändringen i entropi vid överföring av mätinformation kan inte minska, (motsvarande termodynamikens andra huvudsats), vilket ger förutsättningar för realistiska uppskattningar av mätosäkerhet (som diskuteras senare).

² Verkan = energi (arbete) gånger tid

Till de mest ordnade systemen (med minst entropi) hör de som har högst ”symmetri” – invarians under förskjutning i varje aktuell dimension – vilket är en förutsättning för att bilda ”meningsfulla” och ”bestående” ord respektive måttenheter. Det är samma aspekt som Maxwell tar upp i sin text om måttenheter, citerad ovan och i ekv. (1). Relationen med måttenheter, $\mathbf{Q} = \{Q\} \cdot [Q]$, vilar på antagandet om måttenhetens invarians när mätningen görs på olika platser. Det skulle vara svårt att använda en linjal för att mäta längd om längden på själva linjalen ändrade sig under mätförflyttningen! En måttenhet ska bevara sin ”mening” under förflyttning på ett sätt som är analogt med ett ord som bevarar sin mening i kommunikation. Betraktar man olika måttenheter och alla slag av system som används för att förverkliga dem, ser man igenkännbara mönster som återspeglar transformationssymmetri och tillhörande låga värden för entropi [se figur 3.4 i Pendrill 2019].

Vi har användning för begrepp som entropi och symmetri i mätningen, inte bara inom fysik utan även inom ett flertal tillämpningsområden, där man nu söker måttenheter utanför teknik och naturvetenskap, t.ex. inom humaniora.

Kvantmekanik, mätning, fundamentala konstanter och symmetrier

Inom kvantmekanik nämns mätning många gånger med hänvisning till det omöjliga i att göra en mätning utan att störa mätobjektet, något som har sin grund i det ändliga värdet hos Plancks konstant. Detta inkluderar Heisenbergs välkända osäkerhetsrelationer och berör även aktuella ämnen i dagens fysik, som kvantsammantrassling och möjligheter att bygga kvantdatorer.

En annan mätteknisk aspekt är hur kvantmekaniken innehåller en beskrivning av mätprocessen som en mall för mätningar mer allmänt. Egentillstånd för en storhet \mathbf{Q} har egenskapen att en mätning av \mathbf{Q} helt säkert kommer att ge egenvärdet q – i sambandet: $Q|q\rangle = q|q\rangle$ – som resultat. Relevant för diskussionen om fundamentala konstanter är att en konstant – som t.ex. elektronens laddning – inom kvantmekanik således kan ses ur två likvärdiga synvinklar, vilka enligt Dirac är:

- antingen som en storhet med ett enda egenvärde,
- eller som ett enkelt tal som visas i ekvationerna.

I linje med vår behandling av måttenheter i samband med symmetri och entropi (ovan), vill vi gärna gå längre än att betrakta en fysikalisk konstant endast som ett ”enkelt tal”. De fundamentala konstanterna avspeglar också grundläggande symmetrier. Enligt Noether är exempelvis elektrisk laddning, e , generator för U(1)-symmetrin för elektromagnetism, där den bevarade storheten är elektrisk ström.

Om man erinrar sig Maxwells klassiska ord i samband med ekv. (1) – att ”bygga upp” en viss mängd och räkna hur många gånger en måttenhet passar in i den uppmätta förskjutningen – är ”förskjutningen” inte specifik i längd, utan i dimensionen av in-tresse. En unitär operator U kan relateras, efter några enkla steg, till egenvärdet, q_{unit} , för en måttenhet genom sambandet:

$$U = \{q_{\text{unit}}\} \cdot [\mathbf{Q}].$$

Innebörden av denna relation kan kopplas till ritningar av skalstreck på en måttstock. Alla ”linjaler” – inte endast för längdmätning, utan för uppmätning av vilken storhet som helst – har streck som visar hur många gånger måttenheten bygger upp en viss uppmätt sträcka, såsom Maxwell beskrev. Ett exempel är Plancks konstant, h , som genom kvantisering ger oss just dessa ”skalstreck”.

Boltzmannkonstanten är ett annat exempel på en fysikalisk konstant som spelar en nyckelroll i det reviderade SI. Genom att kombinera mikroskopiska och makroskopiska studier av helium föreslog Pendrill 1996 ett nytt sätt att uppskatta värdet för Boltzmanns konstant, k_B , som en del av en allmän översyn av tillförlitligheten hos dåtidens optiska och elektriska mätningar av polarisationsegenskaperna för heliumgas. Länken mellan det makroskopiska (gaskonstanten, R , från dielektrisk konstant gasterometri för ^4He) och det mikroskopiska (Boltzmanns konstant) tillhandahölls av relationen: $R = N_A k_B$, där Avogadros konstant, N_A , representerar antalet elementära mikroskopiska föremål som utgör en makroskopisk mängd (se Bengt Nordéns artikel). Förutom experimenten var det främst framtagningen på 1990-talet av otroligt noggranna *ab initio* beräkningar av heliumatomens polariserbarhet som var helt avgörande. Metoden ingår numera i definitionen av temperaturenheten kelvin i det reviderade SI från 2019 (se Matti Krusius och Gösta Enholms artikel).

Fundamentala konstanter, som Plancks konstant, Boltzmanns konstant med flera, dominerar nu definitionerna av måttenheter i

det reviderade SI. Värden för konstanterna hämtas i de flesta fall från minstakvadratanpassningar av olika samband mellan diverse storheter, som görs periodiskt av CODATA Task Force. Efter som detta har en avgörande roll i det reviderade SI återkommer vi till ämnet nedan i en diskussion om mätosäkerheter i avsnittet *Osäkerheter och beslutsrisker*.

Beskrivningar av hur de grundläggande fysikaliska konstanterna nu ingår i definitioner av måttenheter finns i den nya SI, 9:e upplagan av SI-broschyren 2019. Enligt vår beskrivning kan man söka måttenheter mer generellt bland grundläggande symmetrier som beskrivs i termer av minsta entropi.

Tydliga definitioner – mätning, storheter och fysik

Vi frågar oss nu hur väl det nyligen reviderade internationella måttsystemet från SI lyckas förmedla meningsfull mätinformation?

På grund av måttenheternas nyckelroll måste det finnas såväl tydliga definitioner av varje enhet, som beskrivningar av hur varje enhet ”realiseras”, dvs. förverkligas. För att vara praktiskt användbar behöver en enhet inte bara definieras utan måste också kunna realiseras fysiskt för disseminering av metrologisk spårbarhet. Ett flertal olika experiment kan användas för att förverkliga definitionerna – ”*mise en pratique*”. Aktuella definitioner av måttenheterna i det internationella systemet (SI) finns i SI-broschyren.

I det reviderade SI görs en åtskillnad mellan nya definitioner i form av ”explicita konstanter” och definitioner av ”explicita enheter”, som mer liknar de traditionella definitionerna av måttenheter. En utmaning med de explicita konstanterna i det reviderade SI är att dessa definitioner kan uppfattas som något mer abstrakta för den som inte känner till den bakomliggande fysiken.

För att förklara vad vi menar går vi till ett av de första styckena i SI-broschyren, 2.1 *Defining the unit of a quantity*:

”The value of a quantity is generally expressed as the product of a number and a unit.”

dvs. värdet för en storhet uttrycks allmänt som produkten av ett tal och en enhet. Det låter, vid första anblick, som Maxwells ekvation (ekv. 1) uttryckt i ord. Men detta är inte samma sak eftersom Q i vänsterledet i ekv 1 inte är värdet utan storheten i sig. I sin text skrev Maxwell: ”Varje uttryck för en storhet” – *inte* ett storhetsvärde.

I motsvarande SI-broschyraavsnitt, 2.3 *Definitions of the SI units*, hittar man t.ex. den reviderade meterdefinitionen:

”Metern, symbol m, är SI-längdenheten. Den definieras genom att ta det fasta numeriska värdet för ljusets hastighet i vakuum c att vara 299 792 458 när det uttrycks i enheten $m s^{-1}$, där sekunden definieras i termer av cesiumfrekvensen $\Delta\nu_{Cs}$.”

Detta innebär att varje SI-enhet, här metern, definieras i det reviderade SI genom att ”ta ett fixt numeriskt värde för en fundamental konstant som $N...$ ”. Återigen, som i ovanstående uttryck för storhet, insisterar man i det reviderade SI att varje SI-enhet numera definieras genom ett *numeriskt värde*. Men, om man inte ska avvika från Maxwell och hans ekvation (1), är det dock inte tillräckligt att endast ta ett numeriskt värde, utan man måste också definiera vilken *storhet* som ligger till grund för varje enhet. En måttenhet är inte endast ett tal, utan en storhet, och ligger således på helt olika nivåer i hierarkin av storhetsberäkningar!

Vad spelar detta för roll? Oavsett hur spektakulär precisionen är för varje fundamental konstant, så har man misslyckats i sin uppgift att förmedla mätinformation på ett meningsfullt sätt om man inte tydligt kommunicerar till tredje man exakt hur enheten definieras.

Detta blir uppenbart om man gör upp en tabell över begrepp som förväntas inkluderas i terminologin för en måttenhetsdefinition. I det reviderade SI, lämnas flera celler i den explicita konstantdefinitionstabellen (Tabell 2) tomma:

Mått-enhet	Storhets-typ	Storhet	Uttryck, fysikalisk ekvation	Enhets-föremål	Värde på konstanter	Relaterade storheter	Relaterade måttenheter
Meter	Längd	—	—	—	$c = 299792458 \text{ m/s}$	Tid, t	Sekund, s

Tabell 2. *Explicit konstantdefinition: Längdenheten.*

De tomma cellerna i Tabell 2 kommer att fyllas i den mer lättlästa explicitenhetstabellen (3):

Mått-enhet	Storhets-typ	Storhet	Uttryck, fysikalisk ekvation	Enhets-föremål	Värde på konstanter	Relaterade storheter	Relaterade måttenheter
Meter	Längd	Sträcka, l	$l = ct$	Ljussträcka i vakuum	$c = 299792458$ m/s	Tid, t	Sekund, s
Meter	Längd	Våglängd, λ	$\lambda = c/\nu$	Ljusvåglängd i vakuum	$c = 299792458$ m/s	Frekvens, ν	hertz, s^{-1}

Tabell 3: *Explicit enhetsdefinition: Längdenheten.*

Två exempel på lämpliga fysikaliska ekvationer ges i Tabell 3 över definitionerna av explicita enheter. De noggrannaste längdmätningarna kan göras antingen genom löptidsmätning av ljuspulser eller genom interferometri med ljusvågar. Det beror på sammanhang och mätsträcka vilken mätmetod man väljer.

När man motiverade det nya tillvägagångssättet för de s.k. explicita konstantdefinitionerna i det reviderade SI hävdades det att: ”Det står nu en användare fritt att välja lämplig fysikalisk ekvation som kopplar de definierande konstanterna till den storhet som är avsedd att mätas.” [SI Broschyr, 9:e utgåvan, 2.3.2]. Framförallt är det förmodligen grundforskaren, som arbetar dagligen med de fundamentala konstanterna som är den stora vinnaren på revideringen av SI-systemet. Citat:

Nobelpristagaren Ketterle ser denna förändring i mätnormaler som ett pedagogiskt moment och en möjlighet att förklara några grundläggande principer för en bred publik: ”Helst skulle varje gymnasielärare i fysik berätta för sina elever om denna historiska förändring.”³

Valfriheten och den ökade noggrannheten hos grundläggande fysiska konstanter som erbjuds genom explicita konstantdefinitioner måste dock vägas mot en ökad svårighet – särskilt för någon som inte är bekanta med grundläggande fysik – att förmedla mening och förståelse i de aktuella mätningarna. Man kan konstatera

3 'Some may find this new definition (of the kilogram) complicated and difficult to understand, but Wolfgang Ketterle, a Nobel Prize winner and the John D. MacArthur Professor of Physics at MIT, doesn't see it that way. "Conceptually, the definition is very simple," he says.... Ketterle sees this important shift in measurement standards as a teachable moment, an opportunity to explain some basic principles to a wide audience. "Ideally, every high school teacher would tell his or her science class about this historic change," he suggests.' <http://news.mit.edu/2019/kilo-standard-change-0516>

att pedagogisk transparens inte verkar har varit ett primärt övervägande vid revisionen av SI: som officiella definitioner är de (med rätta) mer upptagna med precision än med pedagogik. I försök att pedagogiskt förklara de fundamentala konstanternas roll i de reviderade definitionerna av SI-enheterna har man försökt göra gällande att konstanterna är som ”små frön: varje konstant innehåller i sig allt som bestämmer hur ’trädet’ som ska växa ur fröt ska vara.” Dock behöver man inte vara skicklig trädgårdsmästare för att kunna förstå att det inte räcker med frön. Vad som växer fram beror också på jordmån och odlingssätt! Många slutanvändare av SI-systemet har inte alltid all nödvändig förkunskap för att koppla värdet för en konstant till mättekniken.

I nästa sektion, granskar vi det reviderade SI från 2019 i förhållande till de krav som ställs för de noggrannaste mätningarna i olika tillämpningar. Möjligen kan en sådan granskning enligt tredjepartskrav avslöja konsekvenser av eventuellt dunkelt tänkande.

Mätning och conformity assessment

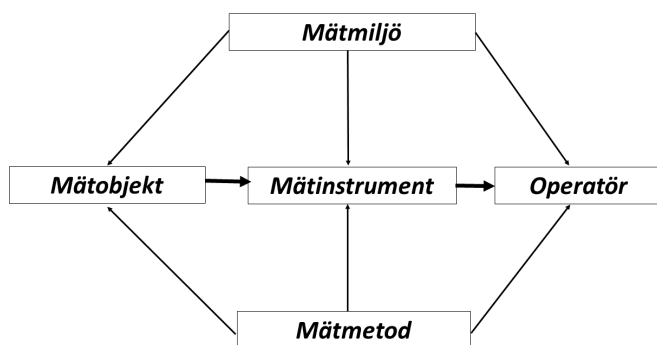
Mätningar görs sällan för sin egen skull, utan för att något föremål – en produkt eller tjänst – behöver bedömas (se vidare i diskussionen ovan: *Kommunikation för jämförbarhet i olika tillämpningar*).

För de olika tillämpningsområdena nämnda i artikelns inledning innebär alla, mer eller mindre, något slags bedömning av överensstämmelse (eng. Conformity Assessment), i syfte att ge:

- A. konsumenten förtroende för att kraven på produkter och tjänster uppfylls,
- B. tillverkaren och leverantören användbara verktyg för att säkerställa produktens kvalitet,
- C. lagstiftare och beslutsfattare hjälp när folkhälsa, säkerhet och ordning, miljöskydd, konsumentskydd och en rättvis handel ska säkerställas.

Mätosäkerhet och beslutsrisker

Nästan inga mätningar är direkta, utan det behövs i de flesta fall hjälp av instrument för att översätta mätinformationen från mätobjekt till en, för människan, begriplig signal. Mätssystemet [figur 1] är således nödvändigt men samtidigt, eftersom det inte är per-



Figur 1. Analys av ett mätsystem bestående av fem element.

fekt, för det med sig större eller mindre mätfel (brus, förvrängning) som måste korrigeras för att ge en tillräckligt ”sann” bild av föremålet som ska bedömas.

Metoden Mätsystemanalys [figur 1] är ett viktigt verktyg när båda aspekterna av metrologi – spårbarhet och osäkerhet – ska tillgodoses inom alla vetenskaper:

- Spårbarheten till metrologiska normaler, som möjliggör jämförbarhet mellan mätningar (och i förlängningen även kompatibilitet mellan produkter och tjänster av alla slag), kan endast fastställas om det går att separera ut de systemfaktorer (t.ex. instrumentfel) som begränsar prestandan av ett mätsystems respons till en signal från mätobjektet – i en process som kallas restitution. Till exempel: man kan inte bestämma massan av en vikt utan att först kalibrera vågen.
- Ofullständig information om mätsystemet leder till osäkerheter vilka i sin tur kan leda till felaktigt beslutsfattande, till exempel godkännande av en felaktig produkt. Formulering av ett prestandamått, dvs. hur väl ett mätsystem utför en bedömning – faktisk mätosäkerhet – verkar kunna behandlas med snarlika (kategoriska) metoder, vare sig det handlar om ”instrument” i vidare mening som frågeformulär, intervjuguider, undersökningar m.m. inom samhällsvetenskap, eller bedömning av hur väl ett mätinstrument visar om ett föremål eller produkt ligger inom eller utanför en specifikationsgräns.

Mätssystemanalys (MSA), illustrerad i figur 1, är en lämplig teknik för hantering av såväl spårbarhet som osäkerhet, utvecklad som den är för kvalitetssäkring av mätning i ”fältet” eller på ”verkstadsgolvet”. Till skillnad från de välkontrollerade förhållandena i mätlaboratoriet används majoriteten av instrumenten (både av traditionellt, tekniska slag och den mänskliga typen i humaniora) i omgivningar som kan ha betydande inflytande på varje element i mätsystemet.

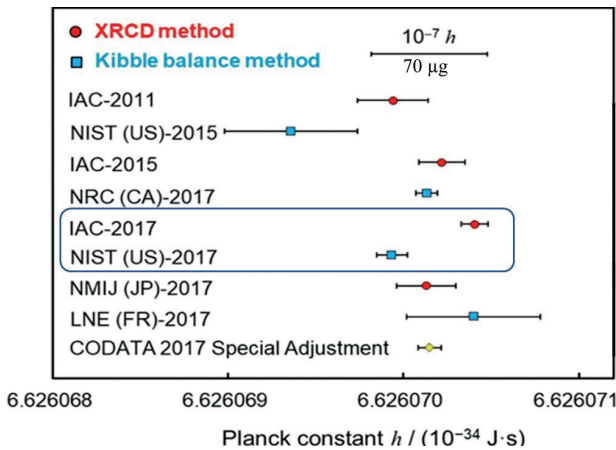
Mätosäkerhet i det reviderade SI

Rekommendationer om utvärdering av mätosäkerheter finns i olika internationella dokument, främst det berömda ”GUM” – guide to the expression of uncertainties in measurement.

I GUM betonas att osäkerheten som anges i ett mätresultat måste matcha det som mäts. Om man t.ex. bildar ett mätresultat genom att ta medelvärdet av en serie upprepade mätningar, är osäkerheten den som hör till medelvärdet, inte till de enskilda resultaten av individuella observationer. Detta beräkningssätt används vid framtagningen av värdet för de fundamentala konstanter med vilka man nu har valt att definiera basenheter i det reviderade SI. Konstantens värde uppskattas som medelvärden av en serie mätningar som har gjorts av olika laboratorier vid olika tillfällen (i den s.k. CODATA-justeringen).

Osäkerheterna i ett medelvärde är i de flesta fall mycket mindre än osäkerheterna i varje enskild observation, eftersom medelvärdets standardavvikelse minskas med roten ur antalet upprepningar (enligt centrala gränsvärdesatsen). Det ligger dock några viktiga antaganden bakom detta som att samtliga individuella observationer hör till en och samma underliggande population och att det bara är slumpen som ger de olika utfallen vid varje enskild mätning. Om man dock har ett icke homogent prov – t.ex. om olika observationer och olika laboratorier har olika ”bias”, p.g.a. att de baseras på olika mätprinciper eller fel – då kommer medelvärdets osäkerhet att vara betydligt större. Feynman har en fin berättelse om detta, som han kallade: ”Kejsarens av Kinas näsa!”. Man skulle bestämma längden på Kejsarens näsa. Problemet var att ingen tilläts se hans höghet. Därför beslöts att man i stället skulle fråga hela den stora kinesiska befolkningen. Detta måste ge ett korrekt värde, eftersom medelvärdet bilades av så många miljoner!

Utifrån de explicita konstantdefinitionerna av exempelvis längdenheten i Tabell 2 är det inte lätt att korrekt uppskatta osäkerheten i sina mätningar. Även om osäkerheten i värdet av varje fundamental konstant som definierar varje måttenhet i det reviderade SI från 2019 är ganska liten då den härrör från ett medelvärde över en serie observationer, är det inte säkert att just dina mätningar kommer att ha så små osäkerheter. Fördelen med explicita enhetsdefinitioner, exemplifierade i Tabell 3, är att det klargörs vilken fysik som ligger till grund för längdmätningen, inte endast värdet på en konstant, och det är osäkerheterna i fysiken som gäller, inte bara i medelvärdet av en fundamental konstant.



Figur 2. Olika uppskattningar av värdet på Plancks konstant (figur kopierad, och modifierad, från AIST [© AIST]).

Ett exempel på detta är att den internationella kilogramprototypen vid BIPM även efter 2019 års fastställande av det reviderade SI fortfarande - och åtminstone några år till - används i en så kallad "konsensus"-mätning av massa. Anledningen till detta (som Abbott har kallat "The IPK [International Prototype Kilogram] strikes back!") är att ytterligare undersökningar erfordras, eftersom osäkerheterna i de enskilda observationerna av Plancks konstant, som ligger till grund för kilogramdefinitionen i det reviderade SI (se Karin Cedergrens artikel), fortfarande visar sig skilja mycket mer (inringning i figur 2, motsvarande cirka 70 μg , dvs. cirka tio gånger osäkerheterna i det "gamla" rikskilogrammet), än den noggrannheten som verkar utlovas av alla siffror angivna i CODATA-medelvärdet av Plancks konstant [figur 2].

Beslutsrisker

Hur god mätosäkerhet behöver man? Frågan avgörs inte av hur bra mätningar som kan göras, utan i första hand av *varför* mätningarna görs! De flesta mätningarna är inte självändamål – se vidare i diskussionen ovan: *Kommunikation för jämförbarhet i olika tillämpningar*.

För att bedöma ett föremål enligt produktspecifikationer behöver ofta motsvarande mätspecifikationer anges. Mätosäkerhet i ett testresultat – en skenbar produktdispersion som härrör från begränsad mätkvalitet – kan vara ett problem vid bedömning av överensstämmelse genom inspektion, eftersom osäkerheten, om den inte tas hänsyn till och blir för stor, kan leda till:

- felaktiga uppskattningar av konsekvenserna av produktfel,
- en ökad risk för att fatta felaktiga beslut, till exempel att döma ut ett överensstämmande föremål (s.k. konsumentrisk, α) eller acceptera ett icke-överensstämmande föremål (s.k. leverantörsrisk, β) när testresultatet är nära en toleransgräns.

På samma sätt som i försöksplanering, när de viktigaste faktorerna som kan påverka produktionen från ”produktion” ska identifieras, kan man vinna mycket om man kan planera sina mätningar proaktivt enligt principen ”fitness for purpose”, som omfattar överväganden – helst innan mätning – av aspekter, som vilken mätförmåga – dvs. mätosäkerhet – som erfordras när man ska testa en produkt eller process med en viss produktionsförmåga.

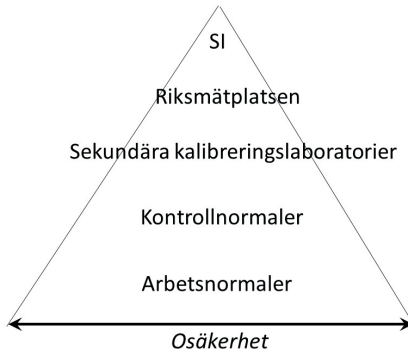
Om vi återigen tar exemplet med den reviderade definitionen av kilogrammet, ska de uppnådda osäkerheterna (se figur 2) jämföras med de minsta osäkerheterna i vägning som dagens industriella vägningar erfordrar (figur 3). Jämför 70 μg i figur 2 med toleransen 500 μg för de noggrannaste vikterna: för att kunna verifiera att en vikt har en massa med högst noggrannhetsklass (E_1), inom en tolerans av 500 μg , erfordras, för att minimera beslutsfel, en maximal mätosäkerhet som är betydligt mindre än toleransen. En tiondel skulle vara 50 μg , vilket är gränsen enligt legal mätteknik. Som synes i figur 2, är detta ännu inte uppnått i det reviderade SI eftersom aktuella osäkerheter är kring 70 μg .

Nominal value*	Class E ₁	Class E ₂	Class F ₁	Class F ₂
1 kg	0.5	1.6	5.0	16

Figur 3 Maximalt tillåtna mätfel vid vägning av ett kilogram inom legal mätteknik [OIML R 111-1: 2004]. https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf (reproducerad med tillstånd av OIML)”

Faktorn en tiondel mellan produktspecifikation och mätspecifikation kan sägas vara godtycklig. Ytterst är det de pragmatiska effekterna av ett viss fel eller osäkerhet, mätt i termer av pengar eller andra effektmått, som är avgörande [sektion *Meningsfull mätinformation*].

Vem bestämmer om våra måttenheter?



Figur 4. Kalibreringshierarki.

En traditionell bild av en kalibreringshierarki [figur 4] var att ett nationellt metrologiskt institut (NMI, ”riksmätplatsen”) i varje land (eller kanske BIPM på internationell nivå) skulle finnas vid spårbarhetspyramidens topp för respektive mätstorhet. Institutet skulle svara för underhåll och vidareutveckling av ”riksnormaler”, tillsammans med sina internationella kollegor och med spetsforskare vid den högsta noggrannhetsnivån, och med regelbundna jämförelser med andra länders normaler. Samtidigt är det viktigt att metrologisk spårbarhet sprids vidare – dissemineras ”neråt” – i hierarkin, till alla lägre noggrannhetsnivåer, så att alla – mer eller mindre direkt – får tillgång till ”riktiga” mått.

I Sverige utser regeringen landets nationella metrologiinstitut (även kallat riksmätplats). Uppdraget, som numera styrs av ett programråd hos VINNOVA (verket för innovation), innebär ansvar för upprätthållandet av SI i Sverige, samt att säkerställa att samhälle och näringsliv har tillgång till spårbara mätningar med högsta möjliga noggrannhet. Den svenska mätplatsorganisationen, som beskrevs av Mathiesen i Kosmos 1978, har förstås genomgått en del förändringar under de över 40 åren sedan det skrevs. Det gamla decentraliserade systemet i Sverige, med flera olika riksmätplatser, ersattes kring millennieskiftet av ett system med en samlad riksmätplats – med de flesta riksnormaler hos RISE i Borås (fd. SP⁴ eller Statens provningsanstalt), med undantag för joniserande strålningsmetrologi, där SSM Solna är en s.k. utsedd mätplats.

Författaren själv deltog (som forskningschef 1985 – 2012) vid komparationerna i Borås av rikskilogrammet som genomförs ungefär var tionde år, samt ersatte 1988 den gamla meterstaven (i platina) med egen-byggda frekvensstabiliserade lasrar vid förnyelse av den svenska riksmetern efter omdefinieringen av SI-metern. Den samlade svenska riksmätplatsen i nuvarande utformning är avsedd att ge ett tydligare ansikte utåt, dels mot kalibreringskunder, dels mot europeiska och internationella nätverk.

Delvis avspeglade införandet av den så kallade nyliberala politiken förändrade åsikter om hur metrologin skulle tillhandahållas från omkring 1980-talet. Det betonades alltmer att ”kunder”, såsom industriella metrologilaboratorier, som det var tänkt, skulle söka det ”bästa erbjudandet” bland en rad NMI:er som ”marknadsaktörer” – en synvinkel som vid millennieskiftet ledde till det ömsesidiga erkännandearrangemanget av Meterkonventionen. En annan aspekt av denna neoliberala förändring i metrologin var den ökade betoningen på mätosäkerhet, till viss del på bekostnad av det mer traditionella grundläggande begreppet ”sanning” förkroppsligad i mätreferenser och normaler. Metrologin var inte längre det som gav unika, monopoliserade värden, utan istället skulle man möjliggöra olika, konkurrerande erbjudanden från vem som helst som kunde övertyga ”marknaden”. Under åren har riksmätplatsverksamheten granskats genom ett antal statliga utredningar, med resultatet att det statliga uppdraget dock finns kvar, som fall av ett ”marknadsmisslyckande”, där det inte har gått

4 <https://www.sp.se/sv/index/information/rmp/sidor/default.aspx>

att hitta en enskild privat aktör villig att stå för resurserna som erfordras för att leverera kvalitetssäkrad mätning på alla noggrannhetsnivåer i spårbarhetshierarkin.

Metrologin har länge haft en stark internationell samverkan, främst genom Meterkonventionen (alltsedan 1875). Under de senaste 40 åren har de europeiska riksmätplatserna och deras nätverk – EURAMET – stärkts samtidigt som regionalt samarbete har ökat. Sedan millennieskiftet har EURAMET fått kraftigt stöd av EU-kommissionen, särskilt under nuvarande och senaste ramprogram, där sammanlagt 1 miljard euro har satsats på ett europeiskt metrologiprogram för forskning och innovation (EMPIR, tidigare EMRP).

Objektiv mätning i fysiken och andra områden framöver

Vad kommer närmast? Efter den omfattande revideringen av SI-systemet härom året, med de flesta SI-enheterna baserade på fundamentala fysikaliska konstanter – till synes en ”zenit” av fysikalisk mätteknik – kan det bli samma vånda som Maxwell uttryckte:

”... the only occupation which will then be left to men of science will be to carry these measurements to another place of decimals ... But we have no right to think thus of the unsearchable riches of creation, or of the untried fertility of those fresh minds into which these riches will continue to be poured.”

De anmärkningsvärda egenskaperna i fysik beskrivna tidigare i denna artikel delas naturligtvis inte nödvändigtvis av andra discipliner, vilket är en nyckelfråga när en enhetlig presentation ska ges av kvalitetssäkrad mätning för såväl humaniora som för naturvetenskap. Begreppet ”fysikavund” har debatterats under senare år:

”Förväntningarna på att all vetenskap kan uppnå fysikliknande, kvantifierbar objektivitet som kan tillåta oss att med precision optimera vitt skilda politiska områden som cancerbehandling, industriell innovation, grundutbildning och miljöskydd, är en fantasi. Här behöver man istället fo-

kusera på att förbättra våra processer för det demokratiska beslutsfattandet”, menar t.ex. Nelson (R Nelson 2015, <https://issues.org/physics-envy-get-over-it/>).

Objektiv mätning i humaniora

Maxwell skrev redan 1873 om samhällseliga mått:

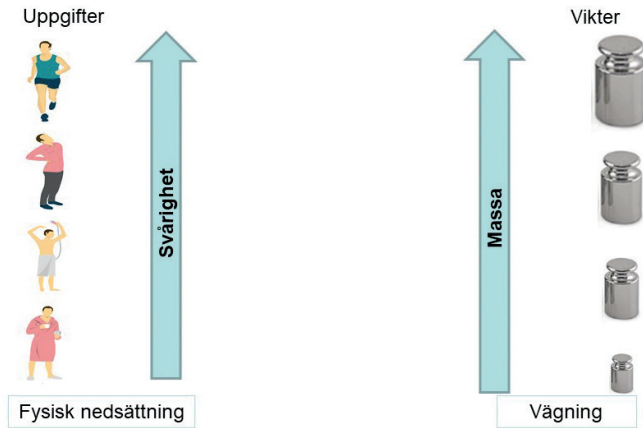
” ...to improve their knowledge of the elements of human nature, in much the same way as an astronomer corrects the elements of a planet ...”

Med dessa viktoriaiska visioner som start har det dock dröjt ändå fram till det nya milleniet innan en metrologi för samhällsvetenskapen har kommit på agendan. Bland tveksamheterna som har uttryckts när man söker efter kvalitetssäkrade mått inom samhällsvetenskaper hittar man farhågor att:

- oberoende referensstandarder som används i metrologi för att säkerställa jämförbarheten mellan olika mätningar skulle vara svåra att fastställa separat från den aktuella mätprocessen, och
- mätosäkerheten skulle ofta vara mycket stor, eftersom varje ny mätuppsättning skulle producera definitioner som avviker från andra.

Som ett led i framtagandet av ett gemensamt språk och kompletterande metoder för samarbete mellan sociologer, fysiker och andra, har vi nyligen föreslagit ett angreppssätt som bör vara tillämpligt på såväl fysikaliska som sociala mätningar. Grundidén är att prestandamått, det vill säga hur väl en bedömning görs, verkar kunna behandlas med snarlika metoder, vare sig det handlar om enkäter, tentamina och så vidare inom humaniora, eller vid bedömning av hur väl ett mätinstrument visar om ett föremål ligger inom eller utanför specifikation. En förenade bild är av ett mätsystem, som i figur 1, där mätinstrumentet utgörs av en människa, alltså den som svarar på enkäten eller tentamensuppgiften. Därefter har två angreppssätt visat sig framgångsrika för att kunna hantera vad som oftast är högst subjektiva mätningar i dessa sammanhang: (i) en transformering av responsdata baserad på s.k. logistisk regression, med en modell av danska statistikern Georg Rasch, som ger separata estimat för en uppgifts grad av svårighet och personens

förmåga att lyckas med uppgiften [figur 5] samt (ii) en formulering av dessa estimat i termer av entropi som mått på ordning (som ovan). En mer ordnad uppgift (lägre entropi) är lättare att utföra, och en mer ordnad person (lägre entropi) har högre förmåga att lösa uppgiften.



Figur 5. En uppsättning uppgifter med ökande grad av svårighet som kan fungera som metrologiska referenser analoga med en uppsättning allt tyngre massanormaler.

Som svar på ovanstående tveksamheter angående objektiva mått i humaniora och samhällsvetenskap skulle vi ge motargument som till exempel att åsikter om konst – t.ex. Mona Lisa av da Vinci – verkar vara rätt så bevarade under århundradena och över olika kulturer. En Rasch-analys av upplevd skönhet eller upplevd lycka (eller andra behagliga mönster och grader av ordning eller symmetri) skulle faktiskt ge (om än brusiga) mått på individuella preferenser för olika personer skilt från den inre förmågan hos Leonardos målning att i sig utstråla skönhet. Objektiviteten hos dessa är kanske inte lika stark som för storheter i den fysiska världen (som naturligtvis skulle existera även utan en mänsklig närvaro), men den är ändå, så att säga, ”fit for purpose” i dess mänskligt baserade sammanhang. ❖

För vidare läsning

- AIST 2019, "Determination of the Planck constant that is to be used as the new definition of the unit of mass, the kilogram", (Translation of AIST press release on October 24, 2017; https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2019/20190625/en20190625.html)
- SI Brochure 2019 *The International System of Units (SI)*, 9e utgåvan, <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- D Février 2012, *Un historique du mètre*, <https://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/metro/aquoisert/metre.html>
- L R Pendrill 2019, "Quality Assured Measurement – Unification across Social and Physical Sciences", *Springer Series in Measurement Science and Technology*
- L R Pendrill and H Källgren 1988 "10th Comparison of Swedish National Kilogram with National Testing Institute Principal Kilogram Standards". *SP Report 1988:38*
- G Rasch 1961, On general laws and the meaning of measurement in psychology, in Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press: Berkeley. p. 321
- SI-guide 2020 SIS, Swedish Standards Institute, av den tekniska kommittén SIS/TK 002 *SIS/SEK Storheter och enheter*