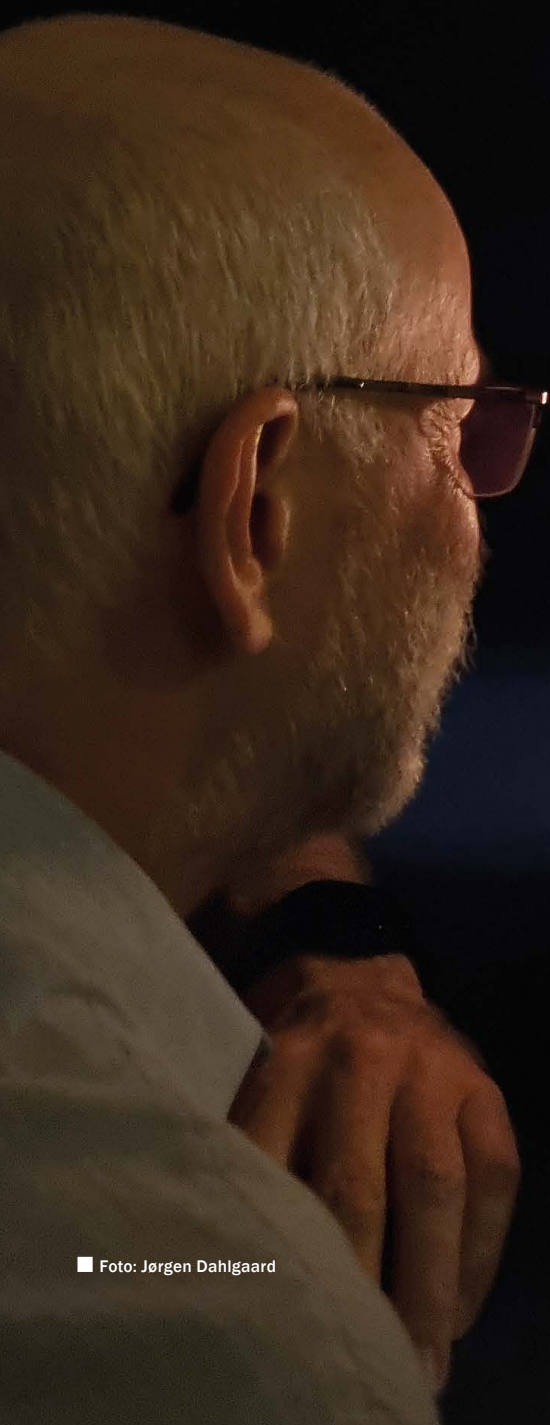


Candela

– lyset der er lysets målestok

Candela, som er SI-enheden for lysintensitet, er en underlig basisenhed. Den kan nemlig udtrykkes ved hjælp af andre SI-enheder, den har en meget snæver og kryptisk definition, og så er det den eneste SI-enhed, som tager udgangspunkt i menneskets sanser.

■ Af Hans Buhl



■ Foto: Jørgen Dahlgaard

»Betegnelsen candela stammer fra såkaldte standardlys, da det er det latinske ord for kæerte eller "stearinlys".«

De fleste har fornemmet, at der er mere lys på en solskinsdag end på en gråvejrsdag. Men de færreste har nok tænkt på, at sollyset kan være op til 1000 gange stærkere end lyset i gråvejr. Det siger noget om, at øjet er ret dårligt til at vurdere lysstyrker.

Denne mangel er en konsekvens af, at øjet har et helt ekstremt stort "måleområde", blandt andet takket være pupillens evne til at lukke mere eller mindre lys ind i øjet. Forholdet i følsomhed fra det lyseste man kan se til det svageste et mørketilvænnet øje kan ænse, er over 1.000.000. Det svarer til, at vi ubesværet brugte den samme målestok til at måle længder på både millimeter og kilometer.

Selvom det menneskelige øje er en dårlig *absolut lysmåler*, er det fremragende til at *sammenligne lysstyrker*. Det udnyttede man allerede i oldtiden til at angive, hvor klart en stjerne lyser. Den græske astronom Hipparchos fandt nemlig på at inddele alle synlige stjerner i seks størrelsesklasser, hvor de klareste stjerner var af første klasse, og de svageste, som kunne ses med det blotte øje, var af sjette klasse. Man kunne nu anbringe en stjerne i den rigtige størrelsesklasse ved at sammenligne lyset fra den med lyset fra en stjerne med kendt lysstyrke. Dette system bruges stadig, om end i stærkt moderniseret og kvantificeret udgave.

Standardlys

I løbet af 1700-tallet lærte man at "måle" en lyskildes lysstyrke ved at sammenligne den med en fast referencelyskilde. En af de første til på denne måde at udnytte øjets evne til at vurdere, om to objekter har samme lysstyrke, var den franske astronom m.v. Pierre Bouguer. Han fandt i 1720'erne på at oplyse to papirskærme med forskellige lyskilder og justere deres afstande til skærmene, indtil disse forekom lige oplyste. Takket være afstandskvadratloven kunne lysmålingen derved omsættes til en simpel afstandsmå-

ling. Ved på denne måde at sammenligne både Månens og Solens lys med et stearinlys lykkedes det ham at vise, at Solens lys var cirka 300.000 gange mere intenst end Månens.

Forskellige, stadig mere avancerede udgaver af denne sammenligningsmetode, blev benyttet til lysmåling i de følgende to århundreder, indtil fotoelektriske detektorer kom frem og muliggjorde objektive målinger.

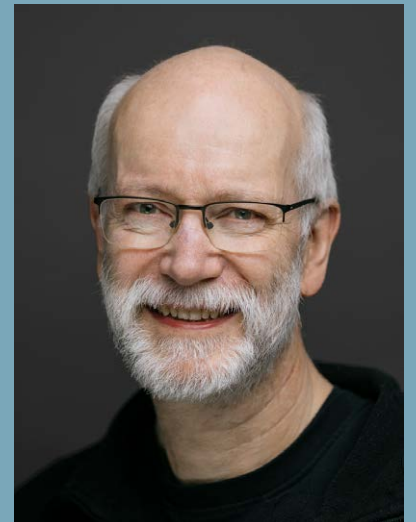
Indtil omkring 1800 var det stort set kun astronomer, der havde brug for at måle lysstyrker, men med fremkomsten af gaslys i begyndelsen af 1800-tallet og ikke mindst det elektriske lys i slutningen af århundredet voksede behovet for at kunne måle lysstyrken af forskellige lyskilder, så man kunne specificere, hvor stærkt de hver især lyste.

Derfor blev der i flere lande defineret standarder for lysstyrke, som typisk var baseret på lysstyrken af flammen fra et såkaldt "standardlys" med en helt bestemt udformning. Den bedst kendte af disse var den engelske standard for lysstyrke: 1 candlepower var lysstyrken fra flammen på et såkaldt spermacet-lys på 2 cm i diameter, der brændte med en hastighed på 7,8 gram i timen. Et spermacet-lys var et "stearinlys" lavet af ren spermacetolie, der stammer fra næsen på kaskelothvaler. Betegnelsen candela stammer fra disse standardlys, da det er det latinske ord for kæerte eller "stearinlys".

I Tyskland, Østrig og Skandinavien brugte man i stedet en såkaldt Hefner-lampe som standardlyskilde. Det var en særlig olielampe, som brændte stoffet amylacetat. Den var specificeret til at lyse med 1 Hefnerkerze, når en væge med en diameter på 8 mm gav en flammehøjde på 40 mm. En Hefnerkerze var cirka 10 % svagere end den engelske candlepower.

Lyset fra glødende platin

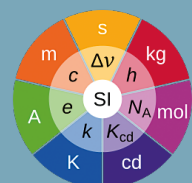
Ud over at det var noget rod med forskellige standarder – der var over ti – var det svært



HANS BUHL

Hans Buhl er samlingsleder og museumsinspektør for videnskabs-historie på Steno Museet/Science Museerne ved Aarhus Universitet. Han er blandt andet optaget af samspillet mellem den videnskabelige og den teknologiske udvikling.

hans.buhl@sm.au.dk



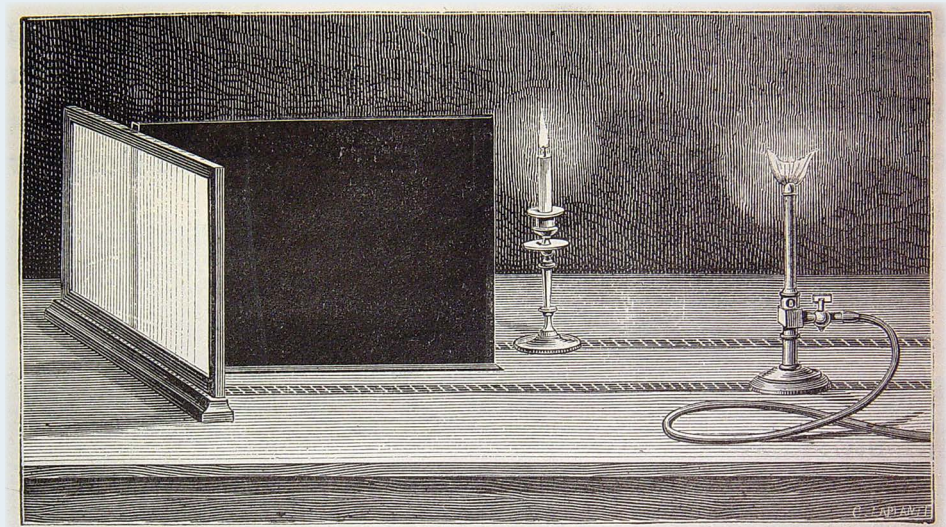
at gøre lysstyrken fra de forskellige standardlys og -lamper stabil nok. For at omgå dette problem udnyttede den franske fysiker og opfinder Jules Violle i starten af 1880'erne det fænomen, at lysstyrken af glødende metal primært afhænger af dets temperatur. Han foreslog således en standard baseret på styrken af det lys, der udsendes af 1 cm^2 platin ved dets smeltepunkt på 1768°C . Platin blev valgt på grund af sit høje smeltepunkt, og fordi det ikke oxiderer. Den resulterende lysstyrkeenhed blev kaldt violle og var cirka 60 gange større end den engelske candlepower.

Ideen var strålende, men det var vanskeligere end forventet at realisere en standard baseret på Violles forslag. Derfor fortsatte man i praksis med at bruge forskellige standardlys, både flammebaserede og efterhånden også specielle glødelamper, som reference ved lysmåling langt op i 1900-tallet.

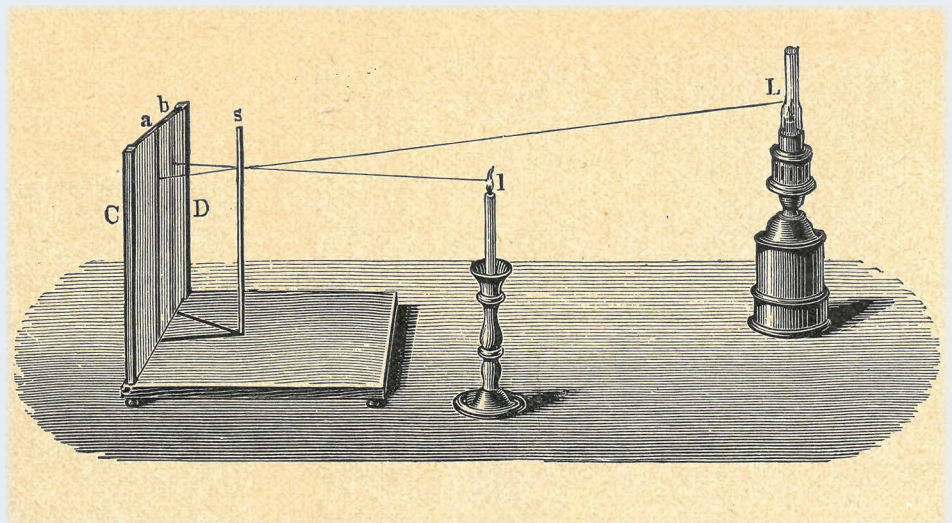
En fælles standard: fra candle til candela

Det første vellykkede forsøg på en harmonisering af området skete i 1909, hvor en række lande blev enige om at definere en "international candle", der svarede til den engelske candlepower. Men som nævnt blev den stadig realiseret ved hjælp af forskellige – mere eller mindre præcise – standardlyskilder.

Omkring 2. Verdenskrig var man blevet så dygtige til at realisere platinmetoden, at Den Internationale Komité for Mål og Vægt (ICPM) i 1946 foreslog, at den internationale candle blev erstattet af en "new candle", som var defineret ved, at den var $1/60$ af lysstyrken fra 1 cm^2 glødende platin ved dets størknings-temperatur. Da Generalkonferencen for Mål og Vægt (CGPM) i 1948 ratificerede denne indstilling, indførte man samtidig navnet candela for enheden. I 1954 blev den gjort til en af basisenhederne i SI-systemet.



Bouguers fotometer fra midten af 1700-tallet til sammenligning af lysstyrker. Det fungerer ved, at to lyskilder oplyser hver sin skærm. Deres afstande til skærmene ændres, indtil begge skærmene er lige kraftigt oplyst. Herefter kan forholdet mellem lysstyrkerne findes ved hjælp af afstandskvadratloven.



I slutningen af 1700-tallet fandt den britiske statsmand og fysiker Grev Rumford på en forbedret udgave af Bouguers fotometer. I stedet for at sammenligne de oplyste flader, som kunne trætte øjnene og føre til fejlvurderinger, fandt han på at lade lyskilderne kaste en skygge. Skyggens "dybde" eller kontrast, afhænger nemlig af lysstyrken. Lyskildernes afstand til skyggegiven blev så justeret, indtil deres skygger var ens.



Et spermacetlys som findes i den naturhistoriske samling på Ribe Katedralskole. Bemærk etikettens sammenligning af forskellige måleenheder for lysstyrke. Foto: Jørgen Baungaard Hansen.



I Steno Museets samling findes et såkaldt Zöllner-fotometer, som blev opfundet af den tyske astrofysiker Johann Karl Friedrich Zöllner omkring 1860.

Instrumentet er beregnet til at blive monteret på en kikkert, hvor det kan bruges til at måle en stjernes tilsyneladende lysstyrke, dvs. lysstyrken set fra Jorden. Det kan blandt andet benyttes til afstandsbestemmelse af stjerner.

Zöllner-fotometrets optik er indrettet således, at man i synsfeltet kan se både den observerede stjerne og en "kunstig" stjerne, som dannes af en lyskilde i instrumentet. Derved har astronomen kunnet sammenligne deres lysstyrker. Lysstyrken af den kunstige stjerne kunne reguleres ved at sende lyset fra lyskilden gennem to polarisationsfiltre, hvoraf det ene kunne roteres. Oprindeligt har referencelyskilden været en gasflamme, men den er senere ændret til en glødelampe.

Fotos: Carsten R. Kjaer / Jørgen Dahlgaard.

På sin vis er candela en overflødig enhed, fordi man indenfor fysikken generelt måler strålingsintensitet i effekt per areal (W/m^2) eller effekt per rumvinkel (W/sr). Det gælder uanset, om der er tale om radiobølger, varmestråling, lys, røntgen eller strålingen fra radioaktive stoffer.

Når man alligevel har valgt at bibeholde enheden candela, skyldes det, at det i praksis er nødvendigt at have et mål for, hvordan det menneskelige øje opfatter lysstyrke. Vi lever i en tid, hvor vi er omgivet af forskellige typer lyskilder og skærme, og derfor er det vigtigt at kunne måle, hvor meget vi oplever, at de lyser.

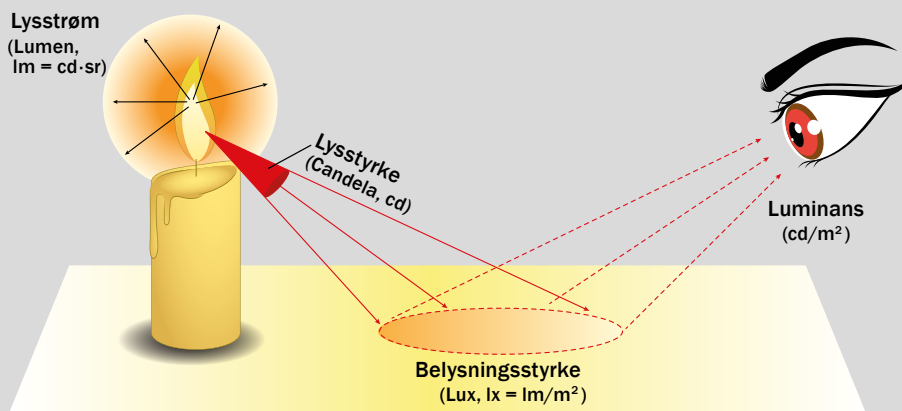
Den menneskelige SI-enhed

Dette antropocentriske aspekt kommer tydeligt frem gennem den nye definition af candela, som blev indført i 1979: »Candela er lysstyrken i en given retning af en kilde, der udsender monokromatisk stråling med frekvensen 540×10^{12} Hz, og som har en strålingsintensitet i den retning på $1/683$ watt per steradian.«

Lys med den nævnte frekvens har en bølglængde på 555 nm svarende til lysegrønt lys, hvilket lige præcis er den farve, hvor det menneskelige øje har sin største følsomhed. Candela måler altså ikke længere den samlede lysstyrke, men lysstyrken af en ganske bestemt farve. Skal der måles ved andre farver, tages der højde for øjets lavere følsomhed ved disse bølglængder.

Det betyder, at selv en kraftig ultraviolet lyskilde vil have en lysstyrke på 0 målt i candela, fordi det menneskelige øje ikke kan se ultraviolet lys. Hvis man derimod forestiller sig, at andre dyrearter – for eksempel bier, der kan se ultraviolet lys, eller slanger, der kan registrere infrarød stråling – skulle lave et belysningsystem, ville deres udgave af en candela se fuldstændig anderledes ud end vores. Dette understreger det atypiske ved enheden candela. Alle andre SI-enheder er således helt uafhængige af biologiske forhold.

Den ”skæve” faktor $1/683$ i ovenstående definition er medtaget for at sikre, at den nye definition præcist svarer til den gamle definition. Endelig er 1 steradian den rumvinkel, der udgør præcis $1/4\pi$ af den fulde rumvinkel rundt om lyskilden.



LYS KAN MÅLES PÅ MANGE MÅDER

En vanskelighed ved lysmåling er, at lys kan karakteriseres på forskellige måder, alt efter hvilke aspekter man vil fremhæve.

Lysstyrke er defineret som en lyskildes intensitet i en bestemt retning, således som øjet opfatter den. Lysstyrke måles i *candela* (cd).

Lysstrøm er derimod et mål for den samlede mængde synligt lys, som en lyskilde udsender. Lysstrøm måles i *lumen* (lm). Denne størrelse er ofte opgivet på LED-pærer for at kunne sammenligne, hvor meget lys de i alt udsender. Ved en retningsbestemt lyskilde (som en lomme-lygte) vil lysstyrken af lyset være højere end fra en rundspredende lyskilde med den samme lysstrøm. Det skyldes, at lyset er fokuseret i en bestemt retning.

Belysningsstyrke, også kaldet *illuminans*, er et udtryk for, hvor meget lys der rammer en given overflade, dvs. lysstrøm per

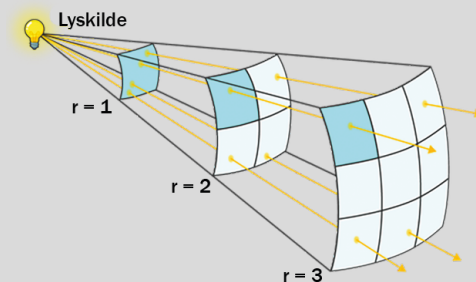
areal. Belysningsstyrke måles i *lux* (lx), der er defineret som *lumen per kvadratmeter* (lm/m^2). Belysningsstyrken er afgørende for, at for eksempel en bogside er belyst nok, til at man kan læse den.

Luminans angiver, hvor meget synligt lys, der udsendes fra en belyst flade i en given retning per areal. Størrelsen er altså et mål for, hvor lys en flade opleves. Luminans har ikke nogen selvstændig enhed, men angives i *candela per kvadratmeter* (cd/m^2).

Opsummerende kan man sige, at **lystrøm** (*lumen*) fortæller, hvor meget lys en pære i alt *udsender* i alle retninger, hvorimod **lysstyrken** (*candela*) angiver, hvor intenst lyset er i én *retning*. Altså hvor koncentreret det er. **Belysningsstyrke** (*lux*) handler om, hvor meget lys der *rammer* en overflade, mens **luminans** er et mål for, hvor oplyst en overflade *ser ud*.

Afstandskvadratloven

Hvis en lyskilde stråler i alle retninger, skal lyset fra den fordeles på en tænkt kugleflade rundt om lyskilden. Jo længere væk man er fra kilden, desto større er kuglen og dermed dens overfladeareal, og desto mindre lys er der pr. arealenhed. Eftersom arealet vokser med radius i anden, falder lysstyrken med en over radius i anden. Dvs. hvis afstanden fordobles, vil lysstyrken falde til en fjerdedel.





I mange praktiske sammenhænge er det mere hensigtsmæssigt at måle illuminansen, dvs. belysningsstyrken (i lux) frem for lysstyrken (i candela). For eksempel når man på en arbejdsplads vil undersøge, om der er lys nok til at udføre de forskellige opgaver godt og sikkert. Et typisk luxmeter måler belysningsstyrken med en fotocelle, som er anbragt under en hvid, gennemsigtig kuppel, så den også måler lys fra siden korrekt. Fotocellen omdanner det indkommende lys til en lille elektrisk strøm, som af instrumentets elektronik omsættes til en belysningsværdi, der vises på skærmen.



Den nye definition af candela i 1979 gjorde det muligt at realisere enheden ved hjælp af kalibrerede optiske strålingsdetektorer. The National Institute of Standards and Technology (NIST) implementerede denne teknik i begyndelsen af 1990'erne ved hjælp af denne siliciumdiode-fotodetektor. Detektoren havde et filter, der efterlignede det menneskelige øjes følsomhed over for forskellige farver. Det var første gang, man i USA realiserede enheden candela ved hjælp af en detektor – og altså ikke var afhængig af forskellige typer lamper som standardlyskilder. Credit: NIST.

Et andet vigtigt aspekt af 1979-definitionen er, at den vender definitionen på hovedet. Før var den *kildebaseret*, idet den tog udgangspunkt i en fysisk lyskilde, for eksempel en flamme eller smeltet platin. Den nye definition er derimod *detektorbaseret*, idet den bygger på en nøjagtig måling af energien i det udsendte lys.

Candela baseret på naturkonstanter

Siden årtusindeskiftet har der været en bestræbelse på at løsrive definitionerne af de basale SI-enheder fra fysiske objekter og målinger og i stedet basere dem på definerede naturkonstanter.

Det har også været tilfældet for candela, som i 2019 fik en ny definition, der primært er rettet mod tekniske eksperter og bestemt ikke er lettere at forstå end de tidligere: »Candela ... er defineret ved at fastsætte den numeriske værdi af lysudbyttet af monokromatisk stråling med frekvensen 540×10^{12} Hz, K_{cd} , til at være 683, når den udtrykkes i enheden $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, som er lig med $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$, eller $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, hvor kilogram, meter og sekund er defineret ud fra h , c og $\Delta\nu_{Cs}$.«

Sagt på mere jævnt dansk har man defineret en konstant, K_{cd} , som kaldes den fotometriske strålingsækvivalent. Den fastlægger forholdet mellem lysstyrke og strålingseffekt og har værdien 683 lumen per watt (lm/W). Den er et udtryk for, hvor stærkt det nævnte grønne lys opleves af det menneskelige øje, når lyset har en given effekt. 1 candela er så defineret som lysstyrken af det grønne lys, når det har en effekt på $1/683$ watt per steradian (W/sr).

Meget belejligt svarer det stort set til lysstyrken af flammen på et stearinlys. Så på en måde er alt ved det gamle, selvom definitionen er blevet ret uforståelig.

Men derfor er det ikke nødvendigvis en god scorereplik at sige: »Her sidder vi så med en strålende SI-enhed foran os«, næste gang du sidder til en hyggelig fest med levende lys på bordet.

Fra flimrende flammer til fintmærkende fotometre

Takket være de stadig mere detaljerede definitioner og ikke mindst udviklingen af avancerede fotometre har lysmåling udviklet sig

fra at være subjektive sammenligninger af forskellige lyskilders styrke til at være objektive, præcise og reproducerbare målinger.

Måling af lysstyrke er dog stadig forbundet med relativ stor usikkerhed i forhold til måling af andre SI-enheder. Vi kan måle tidsrum med en nøjagtighed på en milliardtedel af en milliardtedel af et sekund, mens lysstyrke kun kan måles med en nøjagtighed på cirka en tusindtedel. Derfor arbejdes der ihærdigt på at reducere denne usikkerhed, fordi blandt andet belysningsindustrien har brug for at vide, hvordan dens designændringer omsættes til bedre lyskilder. ■

LITTERATUR

Om SI-systemet:

www.bipm.org/en/publications/si-brochure

Om realiseringen af enheden candela:

www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique

National Institute of Standards and Technology (NIST) om candela:

www.nist.gov/si-redefinition/candela

D.R. Bertenshaw, "The standardisation of light and photometry – A historical review", *Lighting Res. Technol.* 2020, 52: 816–848.

doi.org/10.1177/1477153520904755

Nathaniel R. Greene, "Shedding Light on the Candela", *Phys. Teach.* 2003, 41: 409–414.

doi.org/10.1119/1.1616481

Xiang Chen, "Visual photometry in the early 19th century: A "good" science with "wrong" measurements", i J.

Buchwald and A. Franklin (red.) *Wrong for the Right Reasons*, 2005, 161–83.