

Fra Fysikkens Verden

NR. 4 – 2024
86. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



Verdens akseleratorlaboratorium
CERN 70 år

Les også om:

■ Protonterapi

■ De Broglies ligning

■ Solkraftindustrien anno 2024

■ Micro:bit

NR. 4 – 2024

86. ÅRGANG

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap
www.norskfysisk.no

Redaktør:

Professor emeritus Øyvind Grøn
OsloMet – Storbyuniversitetet og UiO
oyvind.gron.no@gmail.com

Professor emeritus Carl Angell
UiO
carl.angell@fys.uio.no

Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm
maria.hammerstrom@astro.uio.no

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia, Institutt for fysikk, UiT
Professor Ellen K. Henriksen, Fysisk institutt, UiO
Førsteamanuensis Trygve Buanes, Institutt for datateknologi,
elektroteknologi og realfag, HVL

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Forsidebilde:

CERN/CMS Collaboration

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

Abonnere:

Fra Fysikkens Verden kommer ut fire ganger årlig.
Abonnement tegnes på følgende postadresse
eller e-post:

Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo

E-post: nfs.styret@gmail.com

Årsabonnement: 200 kr. (studenter 100 kr.)
Bankgiro: 7878.06.03258

Retningslinjer for bidragsytere

Fra Fysikkens Verden (FFV) utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høyskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og biblioteker ved videregående skoler.

Frist: Bladet gis ut fire ganger i året: mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er: 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er for tiden 1200.

Formål: Formålet med *FFV* er å gi informasjon om aktuelle tema og hendiger innen fysikk, og å bygge bro mellom forskere, fysikklærere, studenter og andre interesserte. Ikke minst ønsker *FFV* å være til hjelp for elever og lærere i videregående skole og andre undervisningsinstitusjoner. Dette krever at artikler og annet stoff er skrevet på norsk og på en lett forståelig måte. Faguttrykk må defineres. En verbal form er oftest å foretrekke fremfor matematikk. Men det må brukes standard begreper og enheter. Matematikken må være forståelig for fysikkstudenter. Artiklene i *FFV* skal primært gi informasjon til dem som er utenfor det aktuelle fagfeltet. Artikler som bare forstås av en liten faggruppe har ingen plass i bladet. Alt stoff blir vurdert redaksjonelt, og redaksjonen forbeholder seg rett til å foreta mindre endringer.

Filformat: Manuskripter leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiserbar. De skal levers elektronisk som e-post, og i et rent tekstformat (for eksempel Word), slik at redaksjonen kan redigere teksten direkte. Dersom manuskriptet inneholder matematiske ligninger, skal manuskriptet også leveres som PDF.

Lengde: Artikler bør ikke være lengre enn seks sider med trykt tekst og figurer. Større avsnitt i teksten bør markeres med undertitler. Unngå fotnoter. Referanser kreves ikke, men det er ønskelig med en liste over lett tilgjengelig tilleggsstoff.

Småstykker: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møtetreferater og lignenede mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

Illustrasjoner: Legg mye omtanke i figurer, ettersom de er en viktig del av en artikkel. All figurtekst skal være på norsk. Figurene bør være av god oppløsning. Figurer og tabeller skal være referert i den løpende teksten. Hvis forfatterne selv ikke har laget figurene, skal opprinnelsen oppgis. Forfatterne må selv innhente tillatelse til bruk av slike illustrasjoner.

Korrektur: Forfatterne får tilsendt korrektur når layout er satt opp som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrekturane.

Innhold

Fra redaktørene Øyvind G. Grøn	91
Artikler	
De Broglies ligning <i>Jonas Persson</i>	93
Protonterapi – meir skånsam stråleterapi <i>K. Smeland Ytre-Hauge, A. Havsgård Handeland og E. Malinen</i>	96
CERN 70 år – verdens akseleratorlaboratorium <i>Erik Adli</i>	101
Solkraftindustrien anno 2024 <i>Erik Stensrud Marstein</i>	112
Skolefysikk	
Kraftsensorer og vekter med micro:bit	
Del I – Lag en enkel elektronisk vekt <i>N.Kr. Rossing, E. Inge Romijn og T. Smevik</i>	118
Personomtaler	
Nye doktorer	125
Småstoff	
Bokanmeldelse: <i>Fysikk 1</i> av Einar Rasmussen og Camilla Helvig <i>Carl Angell</i>	126

FRA REDAKTØRENE

I dette nummeret av *FFV* har vi et bredt fokus. Bladet innledes med en historisk artikkel om de Broglies ligning for materiebølgelengden. Det var et arbeid publisert i 1922 som blant annet inspirerte Schrödinger i hans arbeid med å utlede bølgeformalismen for kvanteteorien. Det neste temaet er protonterapi – et eksempel på hvordan partikkelfysikk utnyttes i utvikling av utstyr for å behandle kreft.

Deretter kommer en oversiktsartikkel der vi feirer 70-årsjubiléet til CERN. Dette store, internasjonale forskningslaboratoriet, med blant annet verdens kraftigste partikkelakselerator, produserer en enorm mengde observasjonsdata der forskere i mange land, inkludert Norge, deltar i analysen av dataene. CERN tar også imot skoleklasser, og flere

norske lærer-ildsjeler har tatt med seg sine klasser til CERN, til stor inspirasjon for sine elever.

I disse tider med global oppvarming er det viktig å produsere elektrisk strøm uten samtidig å forårsake utslipp av drivhusgassen CO_2 . I denne sammenheng er solenergi en stadig mer aktuell energikilde. Jorda mottar rundt 1,4 kilowatt på hver kvadratmeter som vender mot sola – totalt omtrent ti tusen ganger den energien som i dag omdannes til elektrisitet. Potensialet er enormt. I dette nummeret får vi en oversikt over dagens status for solkraftindustrien.

Til slutt har vi en artikkel i serien om skolefysikk, denne gangen om hvordan man kan lage en elektronisk vekt. Skolelaboratoriet lever!



Øyvind G. Grøn



Carl Angell

Bidragstyperne til denne utgaven

Erik Adli

Professor i fysikk ved Universitet i Oslo, seksjon for høyenergifyssikk

Adli jobber med utvikling og anvendelser av partikkelakseleratorer. Han er leder for de norske akseleratorfysikkaktiviteter i det norske senteret for CERN-relatert forskning, NorCC. Han har tilbrakt store deler av karrieren ved CERN, og ved Stanford Linear Accelerator Center i California. Han har gitt en rekke omvisninger og foredrag til elever, studenter og andre besøkende på CERN.

Andreas Havsgård Handeland

Doktorgradstudent innen medisinsk fysikk ved Haukeland Universitetssykehus

Spesialisering i bivirkninger som følger av strålebehandling. I doktorgraden utforskes den biologiske effekten av protonbehandling.

Eirik Malinen

Seksjonsleder, Institutt for kreftforskning, Oslo Universitetssykehus. Professor II, Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

Har bakgrunn innen biofysikk, og forsker bredt på strålebehandling av kreft med fotoner og protoner.

Erik Stensrud Marstein

Marstein Sjefsforsker i solkraft ved Institutt for Energiteknikk (IFE) og professor II, Universitetet i Oslo

Han er i tillegg direktør i forskningssentrene FME SUSOLTECH og det nyopprettede FME SOLAR – Norsk forskningssenter for solkraft. Han har forsket på solkraft i mer enn 20 år

og har mer enn 150 publikasjoner innen solcelleteknologi og -materialer og design, drift, vedlikehold og integrasjon av solkraftverk.

Jonas Persson

Førsteamanuensis, Institutt for Fysikk, NTNU

Forskningsbakgrunn i atomfysikk, kjernefysikk, fysikkdidaktikk og fysikkhistorie. Har jobbet med utvikling av laboratorier innen fysikk og tatt i bruk nye tekniske hjelpemidler. Han har blant annet jobbet med videoanalyse og hvordan implementere smarttelefoner som måleinstrumenter i fysikk. I prosjektet Video for Quality er produksjonsprinsipper for undervisningsvideoer utviklet og implementert ved NTNU og andre universiteter rundt om i verden. Har skrevet lærebok i optikk og er medforfatter av boken Fysikkdidaktikk. I tillegg er det skrevet en rekke kompendier. Har jobbet med popularisering av astronomi gjennom utstillinger, foredrag og omreisende planetarier og har bidratt med norrøn og samiske stjernebilder i Stellarium. I over 25 år har jeg demonstrert fysikk med livet som innsats med «Fysikk for Fakirer».

Elisabeth Inge Romijn

Førsteamanuensis, Institutt for lærerutdanning, NTNU

Er utdannet siv.ing. i fysikk, og har en doktorgrad innen biofysikk, etterfulgt av praktisk-pedagogisk utdanning (PPU). Hun har erfaring med å undervise programmering som del av matematikk og naturfag for lærer- og barnehage-lærerstudenter. I tillegg er hun del av en forskningsgruppe som blant annet undersøker hvordan programmering

kan anvendes som et praktisk verktøy innen naturfagundervisning.

Nils Kr. Rossing

Dosent emeritus i naturfagdidaktikk, tilknyttet Skolelaboratoriet for MNT, Institutt for fysikk, NTNU

Er utdannelse siv.ing. i fysikalsk elektronikk fra NTH. Har jobbet med oppdragsforskning ved SINTEF, senere ved lærerutdanningen ved NTNU og som prosjektleder ved Vitensenteret i Trondheim. Fra 1998 har han utviklet og holdt lærerkurs, utviklet læremidler og skrevet lærebøker innen STEM-fagene. Han har også utviklet og bygget interaktive utstillinger ved Vitensenteret i Trondheim.

Kristian Smeland Ytre-Hauge

Professor, Gruppeleder i medisinsk fysikk, Institutt for fysikk og teknologi, UiB

Forsker primært på protonterapi og strålebiologi relatert til stråleterapi. Eg har spesielt fokus på Monte Carlo-simuleringar for medisinsk bruk av ioniserende stråling.

Torunn Smevik

Førsteamanuensis, Institutt for lærerutdanning, NTNU

Er utdannet siv.ing. i eksperimentell fysikk og programmerte mye både før og underveis i doktorgraden i akustikk. Da hun kom tilbake til universitet etter 10 år i skolen, falt det derfor naturlig å forske på innføringa av programmering i flere fag i skolen. Hun leder i dag ei forskningsgruppe ved ILU som fokuserer på hvordan programmering kan brukes til å utforske naturfaglige fenomen gjennom hele skoleløpet.

De Broglies ligning

Jonas Persson Førsteamanuensis, Institutt for fysikk NTNU

De fleste fysikklærebøker blir de Broglie presentert med bølgelengden til en partikkel gitt ved:

$$\lambda = h/p. \quad (1)$$

Men du finner sjelden en dypere diskusjon om opprinnelsen til ligningen, den presenteres mer som noe innlysende. Samtidig presenteres den som en av inspirasjonene for Schrödinger og bølgeformuleringen av kvantemekanikken. I år er det 100 år siden de Broglies utledning av ligningen, men samtidig er ikke ligningen som presenteres til stede i noen av hans tidlige artikler eller dr.-avhandlingen. Det er bemerkelsesverdig å merke seg at denne ligningen ble presentert av Compton i et sammendrag av en presentasjon den 1. desember 1923 i Chicago [1]. Compton hevdet imidlertid aldri at han var den første til å presentere den, og hans utledning var ikke like robust.

Den enkle beskrivelsen av hvordan man kommer frem til (1) er basert på at naturen er symmetrisk, så når Einstein viste at fotoner har bevegelsesmengde (som er en klassisk partikkelegenskap), bør partikler ha tilsvarende bølge-egenskaper (bølgelengde). Man skulle da tro at de Broglie resonerte på samme måte. Dette er ikke helt riktig, da han hadde en tilnærming som var basert på energi og Einsteins relativitetsteori, men også på Rayleighs arbeid med lyd.

De Broglies utledning

Omtalen her følger delvis de Broglies artikkel i *Philosophical Magazine* [2], men uten de Broglies diskusjon om svartlegemestråling.

De Broglie søkte etter en enhetlig teori for alle fysiske objekter. Elektroner, protoner og lyskvantener så han på som energikvanter (kvanteobjekter) som alle måtte følge lignende ligninger. Elektronet er da preget av sin hvilemasse og med det en hvileenergi $E_0 = m_0 c^2$. I klassisk elektronteori er massen en konsekvens av det elektromagnetiske feltet. Energien og hvileenergien (hvilemassen) til elektronet må da sees på som spredt i rommet og ikke konsentrert i ett punkt.

Hypotesen var å knytte en frekvens til hvert kvant. Med andre ord er hvileenergien til elektronet relatert til en «riktig» frekvens f_0 , som de Broglie ga en generell tolkning til å gjelde for alle kvanteobjekter:

$$m_0 c^2 = hf_0. \quad (2)$$

Hvis vi kobler denne frekvensen til et bilde av kvanteobjektet, kan vi se det som en utvidet pulserende udelelig energi, der alle deler pulserer i fase.

Men dette gjelder en gjenstand i ro. De Broglie betraktet nå en partikkel i bevegelse med hastigheten v i forhold til en observatør i hvile. Observatøren ser en økt frekvens som en konsekvens av at massen til objektet har økt fra m_0 til $m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$.

Frekvensen som observatøren ser, vil da være som følger:

$$f_p = \frac{f_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3)$$

Men ifølge Lorentz-transformasjonen bør frekvensen avta:

$$f_L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (4)$$

Dette presenterer et dilemma, enten er antagelsen feil eller så er det noe grunnleggende bak den.

Som de Broglie skriver i sin dr.-avhandling [3]: «*The two frequencies are essentially different since the factor is not shown in the same way. There is here a difficulty that intrigued me for a long time; I managed to overcome it by demonstrating the following theorem, which I will call the phases harmony theorem*».

De Broglie foreslo at et objekt i bevegelse sammenfaller med en bølge med høyere frekvens enn de to ovenfor, og at fasen mellom bølgene må bevares. For at dette skal være mulig, må det ha hastigheten $V_p = c^2/v$. Siden dette er høyere enn lysets hastighet, kan det ikke transportere energi, og det er grunnen til at de Broglie kalte det en fasebølge og senere en «pilotbølge».

Med et trinn som kan være vanskelig å akseptere, valgte de Broglie å håndtere en gruppe fasebølger som har nesten samme hastighet. Basert på Rayleighs arbeid med lyd og spesielt levitasjon, foreslo han at en gruppe fasebølger danner en bølge med en hastighet som han kaller gruppehastighet.

En generell formel som gir gruppehastigheten for et antall fasebølger med en gjennomsnittshastighet V_p er:

$$\frac{1}{V_g} = \frac{d(f/V_p)}{df}. \quad (5)$$

Bruker vi

$$f_p = \frac{1}{h} \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (6)$$

► De Broglies ligning

får vi det, får vi objektets gruppehastighet $V_g = v$, det vill si objektets hastighet. Eller med de Broglies egne ord: «*The velocity of the moving body is the energy velocity of a group of waves...*».

De Broglie brukte funnene sine innen optikk og lysutbredelse i artikkelen sin [1], men gikk ikke lenger enn det. Ligningen som han er kjent for (1) er ikke inkludert. Vi kan imidlertid se at bølgelengden (materiebølgelengden eller de Broglie-bølgelengden) assosiert med fasebølgene kan oppnås fra hastigheten og frekvensen:

$$\lambda = \frac{V_p}{f_p} = \frac{c^2}{v} \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{f_0}. \quad (7)$$

Med (2) får vi:

$$\lambda = h \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{m_0 v}. \quad (8)$$

Men bevegelsesmengden er $p = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ og det gir:

$$\lambda = h/p. \quad (9)$$

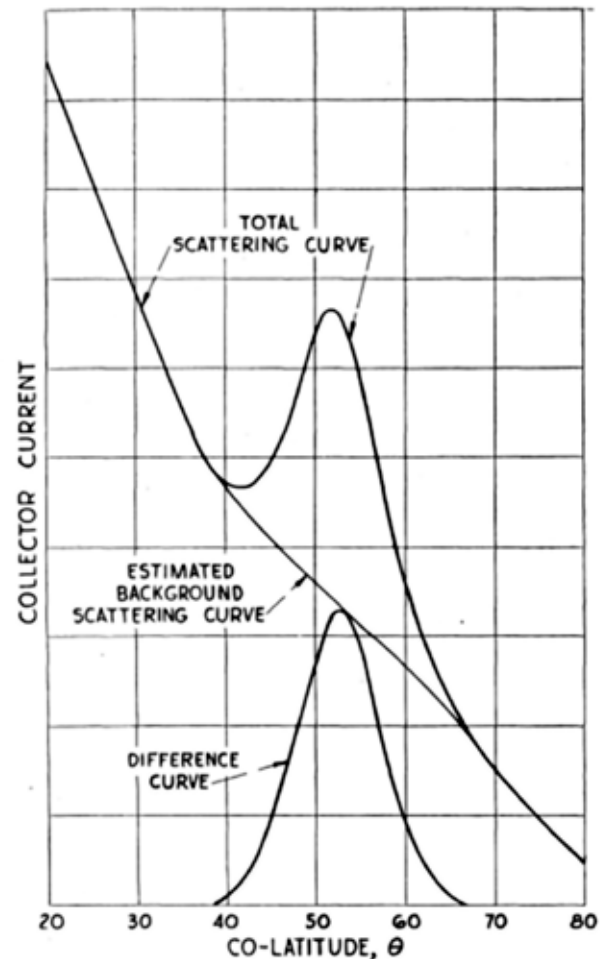
Det vil si at de Broglie-bølgelengden eller materiebølgelengden vi får, kommer fra fasebølgene, noe som kan virke rart. Det er verdt å merke seg en rekke forskjellige aspekter ved fasebølgene.

- De er en konstruksjon med det eneste målet å danne en gruppebølge.
- De har en frekvens som ikke følger Lorentz-transformasjonen.
- De er i utgangspunktet et uendelig antall og med uendelig utstrekning.
- De har en hastighet som er høyere enn lyset.
- De kan ikke overføre energi individuelt, men kan superposisjoneres.

Med andre ord, de Broglies arbeid var ganske vanskelig å forstå, og argumentasjonen er rar. Men man kan ikke undervurdere betydningen. Aksepten kom kanskje først og fremst fra Albert Einstein, hovedsakelig for bruken av hans relativitetsteori. Men det var eksperimentelle bevis fra C. Davisson og L.H. Germer [4] og G.P. Thomson og A. Reid [5] i 1927, som bekreftet de Broglies ligning (1).

Eksperimentelle bevis

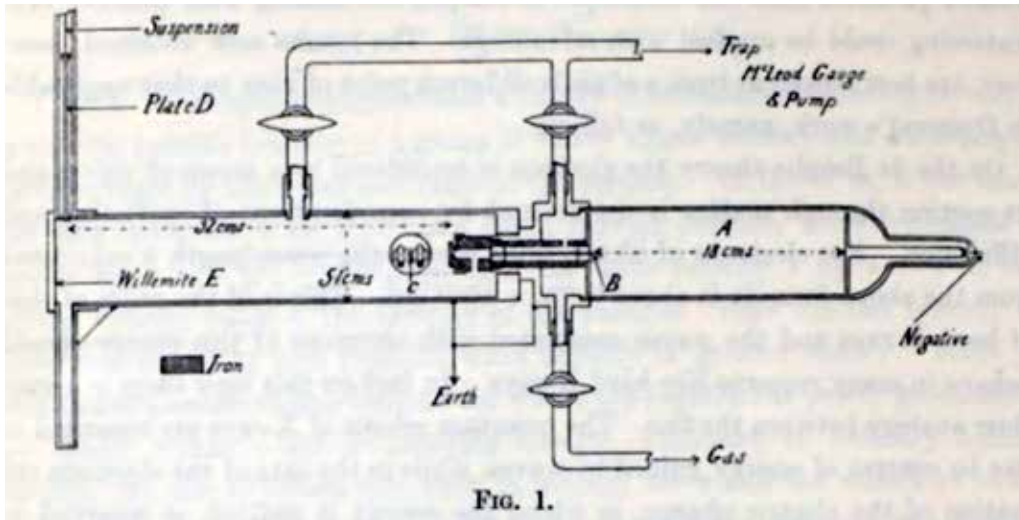
Det første eksperimentet som bekreftet de Broglies resultater, ble utført av C. Davisson og L.H. Germer [6] ved Bell labs i et eksperiment der en elektronstråle rettet mot en Ni-krystall viste diffraksjon. Dette korresponderte med arbeidet til von Laue et al. [7] med røntgenstråler 15 år tidligere. Davisson og Germer studerte elektronspredning fra krystal-



Figur 1. Spredning av elektroner med diffraksjonsmaksima. Fra [4].

ler og observerte distinkte topper i visse vinkler for forskjellige energier til elektronene (Figur 1). Ved å bruke samme metode som von Laue brukte for røntgenstråler, bekreftet de de Broglies funn. Det er verdt å merke seg at oppdagelsen deres var en tilfeldighet. Deres opprinnelige prøve var polykrystallinsk, men på grunn av en vakuullekkasje ble prøven oksidert. Da de varmet opp prøven i hydrogen, ble det dannet en enkelt krystall, noe som gjorde oppdagelsen mulig.

I Aberdeen utførte G.P. Thomson og A. Reid [5] eksperimenter med katodestrålerør med sikte på å teste de Broglies teori. Dymond [8] hadde i 1926 publisert resultater som pekte på gyldigheten av de Broglies teori. Eksperimentet ble designet på samme måte som med røntgenstråler, med tynne filmer av gull og aluminium, i utgangspunktet i pulverform. Akselererte elektroner fra katoden treffer filmen (C i Figur 2) og spres ved diffraksjon til en fotografisk plate (D i Figur 2). Da dette ble utviklet, ble det oppnådd et klart diffraksjonsmønster (Figur 3). Thompsons omhyggelige beregninger overbeviste ham om gyldigheten av de Broglies teori. Eller som han skriver i sammendraget: «*The sizes of the patterns agree to 5 per cent, with those predicted on*



Figur 2. Thompsons eksperiment. Fra [5].



FIG. 4.—Gold.

Figur 3. Fotografisk plot av diffraksjon i gull. Fra [5].

the de Broglie theory of wave mechanics, regarding the phenomenon as one of diffraction of the phase waves associated with the electrons».

1924–1929

Mottakelsen av de Broglies arbeid var relativt kjølig. Komiteen som evaluerte doktorgradsavhandlingen hans, henvendte seg til Einstein som var begeistret for den. Det er verdt å merke seg at det var få artikler (31 ifølge Google Scholar) som siterte de Broglie før han mottok Nobelprisen i 1929 for sitt arbeid. Unntaket var Erwin Schrödinger som brukte resultatene i sitt arbeid til å utvikle bølgeformuleringen av kvantemekanikk. Selv om de Broglie hadde blitt nominert 3 ganger (av samme person) før 1929, mottok han 12 nominasjoner (alene eller sammen

med andre) det året han ble tildelt Nobelprisen. Ut fra nominasjonene var det både de eksperimentelle resultatene og bølgemeknikken som var motivasjonen, så på den måten var det godt begrunnet.

De Broglie i lærebøker

Når du ser på lærebøker, er det ingen jeg har sett i som engang diskuterer de Broglies utledning. I stedet brukes vanligvis symmetriargumentet om at hvis lys kan oppføre seg som en partikkel, så kan en partikkel oppføre seg som en bølge. Måten de Broglie kom frem til sitt resultat, selv om han ikke skrev ut ligningen i sine verker fra 1924/25, gir svaret på å ikke behandle den i lærebøker. Både fordi bruk av relativitetsteori, men hovedsakelig fordi forutsetningene og bruken av fasebølger er konseptuelt svært vanskelig å forstå. Det er imidlertid klart at de Broglie var en del av inspirasjonen til Schrödingers utvikling av bølgemekanikk og med den en av kvantemekanikkens gudfedre. ■

Referanser

- [1] A.H. Compton. *Phys. Rev.* 23, 118 (1924).
- [2] L.D. Broglie. XXXV. «A Tentative Theory of Light Quanta». *Philosophical Magazine Letters* (1924), 86(7), s. 411–423.
- [3] www.researchgate.net/profile/Hirokazu-Nishimura/publication/348662075_Research_on_the_theory_of_quanta/links/6009ba1e92851c13fe2a7b0e/Research-on-the-theory-of-quanta.pdf
- [4] C. Davisson & L.H. Germer. «Diffraction of electrons by a crystal of nickel». *Physical Review* (1927), 30(6), 705.
- [5] G.P. Thomson & A. Reid. «Diffraction of cathode rays by a thin film». *Nature* (1927), 119(3007), 890-890.
- [6] C. Davisson & L.H. Germer. «Diffraction of electrons by a crystal of nickel». *Physical Review* (1927), 30(6), 705.
- [7] W. Friedrich, P. Knipping & M. Laue. *Sitzungsber. K. Bayer. Akad. Wiss. Math. Phys. Kl* (1912), s. 303–322.
- [8] E.G. Dymond. «Scattering of Electrons in Helium». *Nature* (1926), 118 (2966), s. 336–337.

Protonterapi

– Meir skånsam stråleterapi

Kreftbehandling har kome langt dei siste hundre åra, og no overlever rundt 75 % av alle kreftpasientar sin sjukdom. Likevel slit mange med biverknader i ettertid som følgje av behandlinga dei har vore gjennom. Om lag halvparten av norske kreftpasientar får stråleterapi. I dag blir stråleterapi i hovudsak gitt med fotonstråling (høgenergetisk røntgenstråling), men i 2025 vil ein ny epoke starte med innføringa av protonterapi i Noreg med behandlingssenter i Bergen og Oslo.

Kristian Smeland Ytre-Hauge Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen

Andreas Havsgård Handeland Seksjon for kreftbehandling og medisinsk fysikk, Haukeland Universitetssjukehus

Eirik Malinen Seksjon for Strålebiologi, Oslo Universitetssjukehus

Fordelen med å nytta protona til kreftbehandling vart postulert allereie i 1946 da Robert R. Wilson foreslo å utnytte at protona gjev frå seg ein stor del av energien sin like før dei stoppar [1]. Dette gjer det mogleg å avgrense energiavsetjinga til eit lite område i større grad enn med fotonstråling (Figur 2).

Energiavsetjinga til protonet forklarast i stor grad av Coulombinteraksjonar med atomære elektron. Kvar individuelle interaksjon gir lite energitap for protonet, men protona vil gå gjennom svært mange av desse prosessane før det til slutt stoppar. Dette energitapet kan kvantifiserast av den lineære energioverføringa (LET frå engelsk *linear energy transfer*) til protonet. Dette vart beskrive av Bethe i 1930 [2]



Figur 1. Protonbygget som snart står ferdig i Bergen.

Illustrasjon: Arkitema Architects

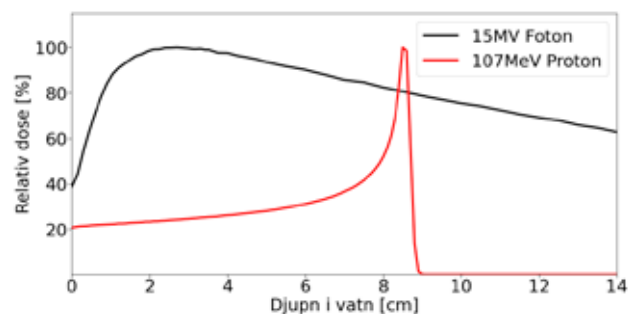
og vidareutvikla av Bloch [3, 4] for å gi Bethe-Bloch likninga vist under med forklaringar i Tabell 1:

$$-\frac{dE}{ds} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right).$$

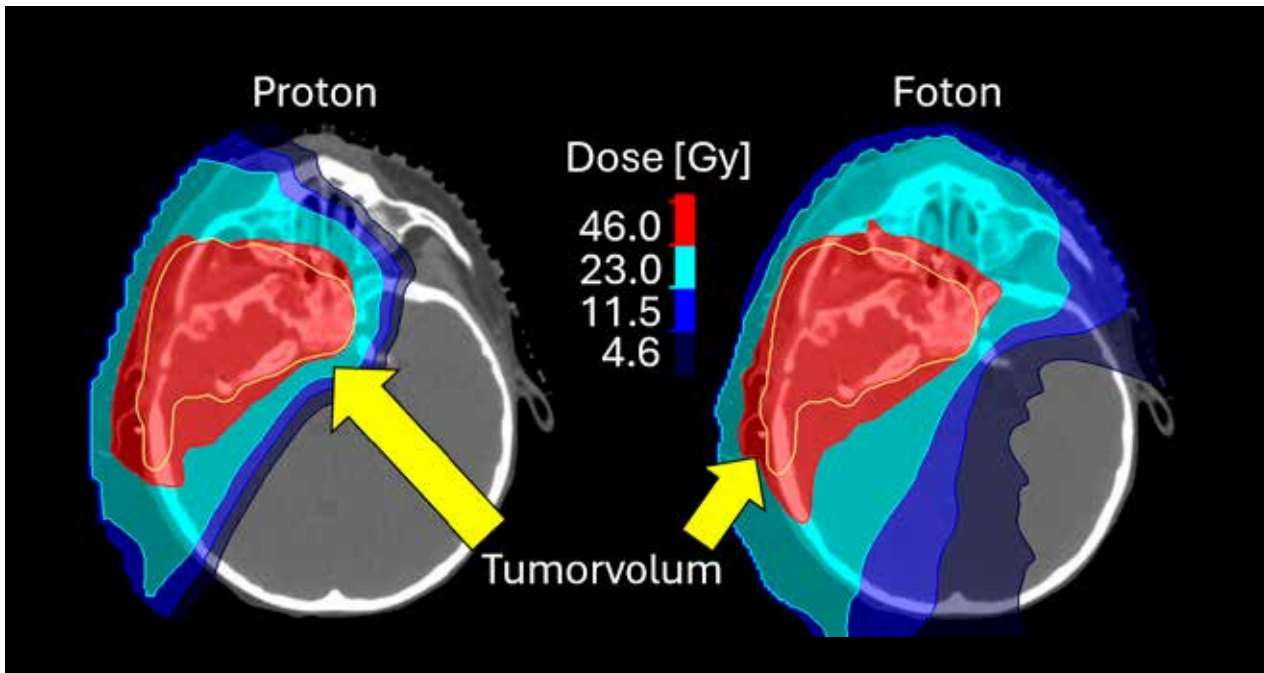
Formelen gir energitap per lengdeining, til dømes i [MeV/cm]. Det som gir protona si karakteristiske djupndosekurve er energitapet sin omvendte proporsjonalitet til protonets hastigheit v^2 som fører til høg energiavsetjing i området der protonet stoppar heilt opp. Dette området kallast ein *Bragg peak*.

Energiavsetjinga beskrivast vanlegvis gjennom absorbert dose (D) som er gitt i eininga Gray [J/Kg] og definert som energiavsetning per masse:

$$D = \frac{\Delta E}{m}.$$



Figur 2. Dosefordeling for ein 15 MV fotonstråle (svart) og ei 107 MeV protonstråle (raud) i vatn.



Figur 3. Dosefordeling for proton og foton på CT-bilete av ein hovud-hals svulst. Tumorum volum er vist i gult.

Tabell 1. Variablar i Bethe-Bloch likninga.

Symbol	Variabel
N_A	Avogadros tal
r_e	Elektronradius
m_e	Elektronmassen
c	Lyshastigheit i vakuum
z	Partikkelladning (protonladning)
ρ	Tettleik til materien
Z	Materiens atomnummer
A	Materiens nukleontal
β	v/c , partikkelhastigheit (proton) over lyshastigheit
γ	Lorentzfaktoren, $1/\sqrt{1 - \beta^2}$
W_{\max}	Maksimal energioverføring per kollisjon
I	Ioniseringspotensial
δ	Tettleikkorreksjon
C	Skalkorreksjon

Ved å utnytte *Bragg peak'en* til protonet kan ein spara friskt vev og konsentrera dosen i tumor i større grad (Figur 3).

Strålebiologi

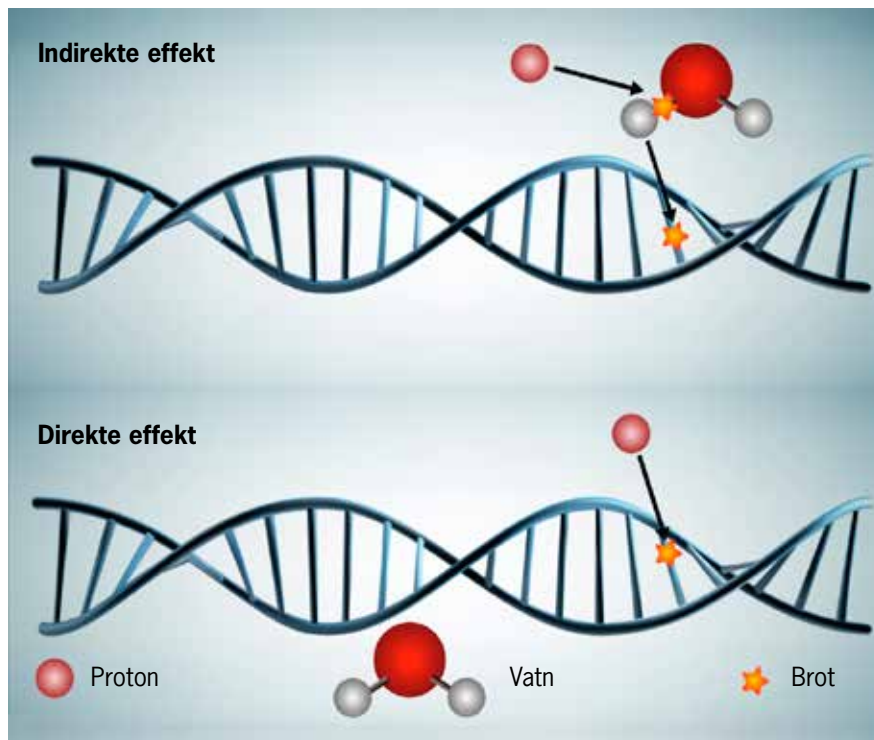
For å beskrive verknaden av protonstrålinga på kroppen må ein sjå på kva som skjer når cellene i kroppen blir bestrålt. I stråleterapi ynskjer me å bestråla kreftcellene og stoppa dei frå å kunne voksa og spreia seg vidare. Dette skjer enten gjennom ein direkte effekt eller via ein indirekte effekt (Figur 4). I direkte effekt bryt strålinga trådane i DNA-et direkte. I indirekte effekt derimot vil strålinga interagere med vatn og andre molekyl i kroppen og frigi såkalla frie radikalar som deretter kan bryte opp DNA-et via kjemiske prosessar. Både direkte og indirekte effekt er vanlege for protonterapi.

Ein ofte brukt modell for å beskriva stråleindusert skade i celler er den lineær-kvadratiske modellen (LQ-modellen, frå engelsk *linear quadratic*) som er tilpassa eksperiment av bestrålte cellekulturar. Der beskrivast overlevande celler som ein funksjon av eit lineært og eit kvadratisk ledd som vist under:

$$SF = e^{-(\alpha D + \beta D^2)},$$

kor SF (kort for *survival fraction*) er delen av celler som overlever etter bestråling, D er levert dose, og α og β er tilpassa parametrar som er spesifikke for den bestrålte celletypen.

Figur 4. Ved indirekte effekt protonet bryt protonet bandet mellom oksygenatomet og hydrogenatomet i eit vatnmolekyl og frigjer eit fritt radikal. Dette bryt deretter opp eit av banda i DNA-strukturen. Ved direkte effekt bryt protonet opp DNA-strukturen direkte. Bilete: revidert frå Colourbox.com



Bestråling av cellekulturar lar oss òg samanlikna forskjellige typar stråling ved å sjå kor høg dose ein treng av dei to stråletypene for å oppnå like stor del av overlevande celler. Då får me ein faktor som vert kalla relativ biologisk effektivitet (RBE) og som er definert mellom fotondose (D_{foton}) og protondose (D_{proton}) som:

$$RBE_{\text{proton}} = \frac{D_{\text{foton}}}{D_{\text{proton}}}$$

Frå dyreeksperiment har denne faktoren blitt approksimert til 1.1. I klinikken nyttas denne skaleringsfaktoren på 1.1 som eit konservativt estimat på effektiviteten til protonstråling. Med andre ord, i behandling gir ein om lag 9 % lågare absorbert dose med protonterapi samanlikna med fotonterapi [5]. Likevel er dette ein forenkling då ein veit frå celleeksperiment at proton RBE-en er avhengig av blant anna forholdet mellom α og β frå LQ-modellen som er eit mål på strålesensitiviteten til ein celletype, i tillegg til protonet sin LET. Ein fotonstråle har nærmast konstant LET medan proton LET aukar etter kvart som protona blir bremsa opp, som beskrive av Bethe-Bloch likninga, med eit maksimum rett bak *Bragg peaken* (Figur 5).

Å finne betre estimat for RBE-verdien er eit svært sentralt forskingsstema, og norske forskingsmiljø har over mange år bidratt i dette arbeidet både gjennom utvikling av nye modellar [7, 8] og strålebiologiske (prekliniske) eksperiment [9, 10]. Nyleg vart ein RBE-modell publisert frå Bergen som er tilpassa eit betydeleg større datasett enn tidlegare modellar [7]

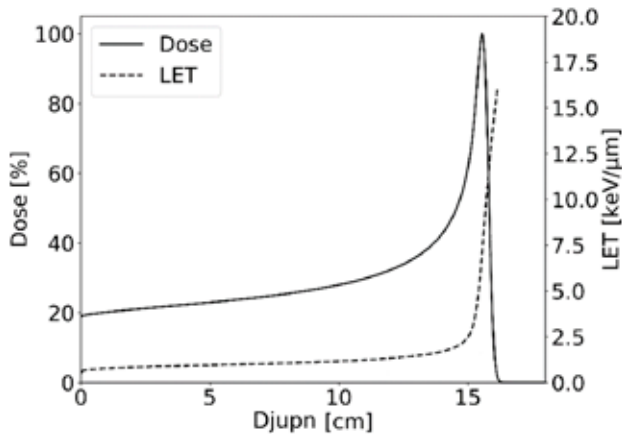
og korleis RBE frå denne modellen varierar med LET og α/β er vist i Figur 6.

I tillegg er det viktig med preklinisk forskning med store datasett og kontrollerte forhold for å samanlikna proton og fotonstråling, og det er det gjort ein del av i Oslo i samarbeid med protonseneteret i Aarhus [9, 10] og som no snart kan utførast i sin heilskap i Oslo.

Stråleterapi gjennom tidene

Etter at Wilhelm Röntgen oppdaga røntgenstrålane i 1895, vert dette fort nytta til kreftbehandling. 1900-åra var prega av store teknologiske framsteg som gjorde det mogleg å produsera røntgenstrålar med høgare og høgare energi og dermed behandla djupare sitjande kreftformer. Samstundes vert det eksperimentert med andre former for stråling. Etter at Robert R. Wilson sin idé om protonterapi tok form i 1946 tok det berre nokre år før den første behandlinga vart gjennomført i 1954. Utviklinga stagnerte etter dette, blant anna fordi protonterapi avhenger av å akselerera proton til høge hastigheter som syklotronen vert nytta til. Syklotronar er derimot kostbare å halde i drift og vanskeleg å nytta seg av på stor skala samanlikna med fotonterapi. På 1990-talet gjenoppstod interessa for protonterapi og utviklinga skaut verkeleg fart. Per juni 2024 var det 119 protonseneter i drift og 32 under konstruksjon [11] [12].

I protonterapi vert først protonet akselert i ein syklotron og deretter vert den tynne protonstrålen styrt mot tumorvolumet ved hjelp av magnetar,



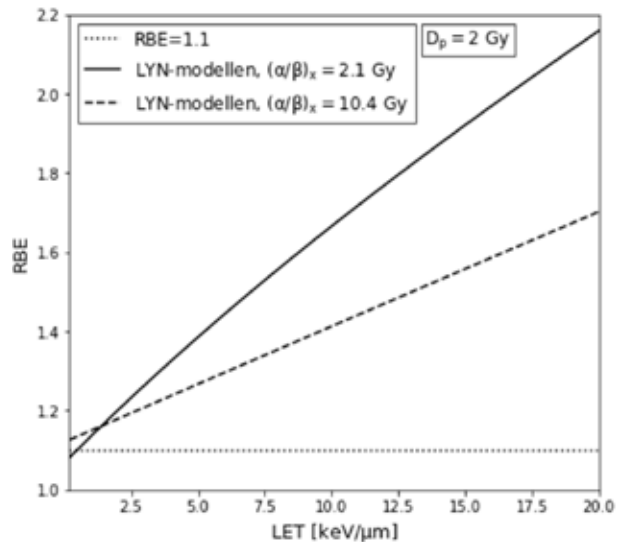
Figur 5. LET og protondose i vatn. Modifisert figur frå [6] med tillatelse.

som vist i Figur 7. Behandlinga gis lagvis (i form av energilag), og dosen blir levert punkt for punkt i eit to-dimensjonalt plan før ein går vidare til eit nytt lag og repeterer prosessen.

Klinisk perspektiv

Dei fysiske prinsippa støtter i alle fall at protonterapi kan gi kliniske fordelar i form av redusert risiko for biverknader, men kva er det ein ser på pasientar som faktisk er blitt behandla? For å testa at ei ny form for behandling fungerer slik som den er tenkt er det vanleg å utføre kliniske, kontrollerte studiar. Det som er rekna som gullstandarden er såkalla randomiserte kliniske studiar. Då samanliknar ein ei ny form for behandling (her protonterapi) med det som er standardbehandling (altså fotonterapi). Randomisert vil seie at det er heilt tilfeldig om ein pasient blir tildelt foton eller proton. På den måten får ein eit objektivt estimat på kvaliteten til den nye behandlingsforma relativt til den gamle.

For samanlikning av proton og foton er det få publiserte randomiserte studiar, men det blir gjort mykje forskning i dag for å stadfesta fordelane med protonterapi. Nokon finn færre og mindre alvorlege biverknader frå proton samanlikna med foton, men det er behov for meir klinisk forskning. Likevel, under clinicaltrials.gov kan ein finne rundt 350 pågåande studiar innan protonterapi i verda (2024) fordelt på dei fleste vanlege kreftdiagnosane, så arbeid held fram for å skaffe evidens. Potensialet med proton er i utgangspunktet friskvessparing, og me kan derav forårsake mindre biverknader som konsekvens av



Figur 6. RBE-estimert frå ein RBE-modell [7] med aukande LET-verdiar for to forskjellige $(\alpha/\beta)_x$ verdiar. Protondose (D_p) = 2 Gy.

Figur: Erlend Lyngholm

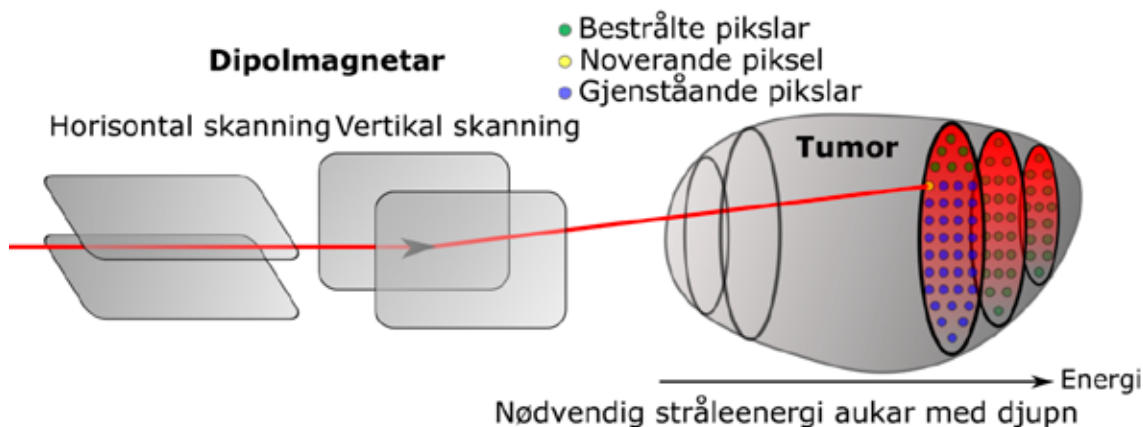
stråling til viktige organ som hjartet, hjernen eller lungene. Men det er òg mogleg å nytte proton til å auke dosen til svulsten, slik at man aukar sjansen for kurering.

Framtidige moglegheiter

Protonterapien har kome ein lang veg sidan 1946, men den er på inga måte ferdig utvikla. Det skjer mange spennande framsteg i protonterapien i dag. I dei to planlagde protonbygga er det sett opp rom med fungerande protonstråler dedikert til protonforskning som vil opne opp mange moglegheiter for vidare framsteg.

Sidan protonet har ei skarp doseavsetjing i form av *Bragg peak'en* er det veldig viktig at denne treff akkurat svulsten og ikkje treff friskt vev eller organ i staden. Men menneskekroppen endrar seg konstant under bestråling; ein trekker saman og utvidar lungene når ein pustar, magesekk og tarmar varierer i størrelse og kreftsvulsten vil òg som oftast krympe under behandlinga. Som vist i Bethe-Bloch-likninga tidlegare, er energiavsetjinga til protonstrålinga avhengig av tettleiken til materien stråla bevegar seg gjennom. Det er dermed viktig å vite med god nøyaktigheit kva slags materie som er kor i pasienten. For å minimere denne usikkerheita er det standard å ta CT-bilete, iblant kvar behandlingdag, for å kontrollere at situasjonen er den same som da ein planla behandlinga. Av og til er det òg nødvendig å lage nye stråleplanar om anatomiske forandringar blir for store. Dette kallas adaptiv stråleterapi. Adaptasjonsprosessen kan vere ganske

► Protonterapi – Meir skånsam stråleterapi



Figur 7. I protonterapi vert protonstrålen sikta inn mot eit og eit av punkta i figuren innan eit av dei raude vertikale laga. Når heile laget er dekkja med riktig dose går ein vidare til neste lag.

omfattande, men mykje forskning og teknologisk utvikling er i dag dedikert til å automatisere og effektivisere denne prosessen.

I tillegg har ein sett frå nyare pre-kliniske eksperiment at korte bestrålingar med høg doserate og høgare doser enn det me brukar i dag, faktisk kan ha ein positiv effekt på friske celler sin evne til å overleve stråling samanlikna med bestrålingar med same dose gitt over lengre tid. Dette kallast for FLASH-effekten og har potensiale til å spare friskt vev i tillegg til å korte ned tida ein treng for behandling. Dette kan dermed også minske behovet for adaptasjon. Men her har me ein lang veg igjen å gå før det kan bli aktuelt som standard pasientbehandling.

Det siste lovande framsteget innan protonterapi me vil nemne er protonbogeterapi eller strålebogeterapi (engelsk: *proton arc therapy*). Der det i dag typisk vert sendt 2–6 protonstrålefelt inn i pasienten frå ulike vinklar går dette forslaget ut på å levere behandlinga i kontinuerlege bogar i staden. Sjølv om det kanskje verkar litt lite intuitivt kan dette faktisk bidra til å minske dosen til friskt vev. Liknande metodikk brukast allereie i strålebehandling med foton.

Avslutningsvis blir 2025 eit særst spennande år for norsk stråleterapi, og eit tverrfagleg samarbeid av medisinske fysikarar, stråleterapeutar, legar, og ingeniørar og fleire i det norske fagmiljøet har gjort mykje grunnarbeid gjennom mange år for å få det til. Samtidig stoppar ikkje utviklinga der, tvert i mot vil dette sette endå meir fart på protonterapiforsking og gje oss evna til å forbetra behandlingstilbodet vidare i tida framover. ■

Referanser

- [1] R.R. Wilson. «Radiological Use of Fast Protons». *Radiology* (1946), 47(5): s. 487–491.
- [2] H. Bethe. «Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie». *Annalen der Physik* (1930), 397(3): s. 325–400.
- [3] F. Bloch. «Bremsvermögen von Atomen mit mehreren Elektronen». *Zeitschrift für Physik* (1933), 81(5): s. 363–376.
- [4] F. Bloch. «Zur Bremsung rasch bewegter Teilchen beim Durchgang durch Materie». *Annalen der Physik* (1933), 408(3): s. 285–320.
- [5] H. Paganetti et al. «Relative biological effectiveness (RBE) values for proton beam therapy». *Int J Radiat Oncol Biol Phys* (2002), 53(2): s. 407–21.
- [6] L.F. Fjæra. «Studies of the linear energy transfer and relative biological effectiveness in proton therapy of pediatric brain tumors.» (2021) University of Bergen.
- [7] E. Lyngholm et al. «An updated variable RBE model for proton therapy». *Physics in Medicine & Biology* (2024).
- [8] E. Rørvik et al. «Exploration and application of phenomenological RBE models for proton therapy». *Phys Med Biol* (2018), 63(18): s. 185013.
- [9] A.M. Rykkelid et al. «Combination of proton- or X-irradiation with anti-PDL1 immunotherapy in two murine oral cancers». *Scientific Reports* (2024), 14(1): s. 11569.
- [10] O. Zlygosteva et al. «Acute normal tissue responses in a murine model following fractionated irradiation of the head and neck with protons or X-rays». *Acta Oncologica* (2023), 62(11): s. 1574–1580.
- [11] PTCOG. «Particle therapy facilities in clinical operation». 2024 [cited 2024 01.11.2024]. Tilgjengelig på: ptcog.site/index.php/facilities-in-operation-public.
- [12] PTCOG. «Particle therapy facilities under construction». 2024 [cited 2024 01.11.2024]. Tilgjengelig fra: ptcog.site/index.php/facilities-under-construction.

70 år | CERN – verdens akseleratorlaboratorium

Erik Adli Fysisk institutt, UiO

CERNs primære funksjon er å levere høy-energetisk- og høy-intensitets-partikkelstråler for partikkel- og kjernefysikk. Disse strålene blir gjort tilgjengelige for forskere fra hele verden. Små og store eksperimenter blir bygget for å studere strålekollisjoner. Det solide europeiske – og etter hvert internasjonale – samarbeidet som understøtter CERN gir muligheter til å bygge unike og stadig mer kraftige og presise partikkelakseleratorer og detektorer. Eksperimentene ved CERN har, kombinert med utvikling av teori, resultert i en stadig økt forståelse av oppbyggingen av de minste bestanddelene vi kjenner, og hvordan disse vekselvirker.

Standardmodellen for partikkelfysikk [1], basert på relativistisk kvantefeltteori, beskriver presist alle elementærpartikler og krefter vi kjenner, med unntak av gravitasjon.

Vi vil i det følgende gi et innblikk i CERNs historie – nødvendigvis i forenklet versjon – ved å fokusere på *partikkelakseleratorene* [2], samt noen få utvalgte eksperimentelle resultater som i dag står som milepæler i fysikkens historie.

1954: Starten

I årene før og under den andre verdenskrigen ble en stor del av ledende europeiske fysikere samlet i



Figur 1. Den første akseleratoren CERN ferdigstilte var Synchrocyclotron, 1957.

Foto: CERN

USA. Europa var tilsvarende ribbet for ekspertise. USA fortsatte den vitenskapelige satsingen etter krigen, og bygget forskningsinstallasjoner for blant annet kjernefysikk [3]. Eksempler er protonsynkrotronene Cosmotron [4] i Brookhaven, New York og Bevatron [5] i Berkeley, California. Cosmotron ble i 1952 den første akseleratoren som gav partikler en kinetisk energi på mer enn 1 GeV. Bevatron oppdaget antiprotonet i 1955.

For å bøte på den europeiske «brain drain», tok ledende forskere, blant annet Pierre Auger, Louis de Broglie og Eduardo Amaldi, initiativet til å etablere et europeisk kjernefysisk forskningslaboratorium, utstyrt med hjelpemidler på høyde med det aller beste i USA [3]. I 1952, under overoppsyn av UNESCO, ble Rådet for europeisk kjernefysisk forskning nedsatt. På fransk het det *Conseil européen pour la recherche nucléaire*, som raskt ledet til akronymet CERN.

I prosessen var flere nordmenn sentralt involvert, spesielt Odd Dahl som senere skulle lede CERNs første protonsynkrotronprosjekt, og Rolf Widerøe [6], som allerede i 1928 hadde demonstrert radiofrekvens-akselerasjon med svingende elektromagnetiske felt, et prinsipp som blir brukt av alle maskinene beskrevet nedenfor. Således

hadde CERN et av sine to akseleratorkontor på Chr. Michelsens institutt i Bergen før medlemslandene i 1953 ble enige om Sveits som vertsland. Året etter ble et bindende samarbeid formelt ratifisert av 12 nasjoner, inkludert Norge, og CERN ble dermed stiftet. I dag har CERN 24 medlemsland, og er – som ved tilblivelsen – dedikert til ikke-militær grunnforskning, med åpen tilgang til alle forskningsresultater.

1957: Synchrocyclotron

Den første akseleratoren CERN ferdigstilte var syklotronen Synchrocyclotron (SC) [2]. I en syklotron avbøyes partikler av et konstant magnetisk dipolfelt, som må dekke hele planet hvor partiklene beveger seg. Baneradius for en ladd partikkel i et gitt magnetfelt er proporsjonal med bevegelsesmengden. Maksimal partikkelenergi begrenses derfor relativt fort av størrelsen på maskinen. SC er en av de kraftigste syklotroner som er blitt bygget. Den maksimale stråleenergien var 600 MeV, og hadde en maksimal baneomkrets på 16 meter, og tilsvarende store dipolmagneter.

Protonstrålen ble brukt til «fast-mål»-eksperimenter. Dette vil si at strålen blir skutt mot et mål (target) som står i ro. Resultatene av kollisjonen



Figur 2. Proton Synchrotron leverte stråler med verdens høyeste stråleenergi, 24 GeV, da den startet opp i 1959.

Foto: CERN

kan så analyseres. For eksempel kan protonstrålen brukes til å produsere pioner. Et resultat som bidro til å sette CERN på verdenskartet, bare året etter oppstarten av SC, var påvisningen av pion-henfall til et elektron og et nøytrino. Elektronisk henfall av pioner er meget sjelden, raten er 104 lavere enn for myonisk henfall [6]. Tidligere eksperimenter hadde kun etablert øvre grenser.

Etter at den neste maskinen, Proton Synchrotron (PS) startet opp, ble SC mer og mer brukt til anvendelser innen kjernefysikk. Maskinen var oppsiktsvekkende nok i virksomhet helt frem til 1990, og den er i dag utstilt (Figur 1) – illustrert med et imponerende multimedia show – for besøkende til CERN.

1959: Proton Synchrotron

I en synkrotron, i motsetning til i en syklotron, er magnetfeltet synkronisert med bevegelsesmengde, slik at baneradius kan holdes konstant når partikler øker energi. Man trenger da kun avbøyingsfelt i et relativt lite område av partikkelbanen, rundt vakuumsrøret. I praksis muliggjør dette vesentlig større baneradius enn for syklotroner. Dette prinsippet ble etablert på 1940-tallet. Flere protonsynkrotroner, som Cosmotron [5], var i drift da CERN ble stiftet.

Odd Dahl, som ledet CERNs synkrotrongruppe, jobbet med Rolf Widerøe og Frank Goward. De var ikke fornøyde med ambisjonen om en synkrotron bygget etter samme prinsipper som Cosmotron og

Bevatron. De ønsket å bygge en maskin for fremtiden, med et nytt, uprøvd fokuseringskonsept, kjent som «sterk fokusering» eller «alternerende gradientfokusering» [8]. Her gjør et sett av kvadrupolmagneter det mulig å få en partikkelstråle fokusert samtidig i det horisontale og vertikale planet. Dette gir en mer kompakt maskin, og mer energi for pengene. Dahl, Goward og Widerøe ble dermed forkjempere for CERNs første proton-synkrotron (PS), som startet akselerasjon av 24 GeV protoner i 1959 [2].

PS har en omkrets på 628 meter og en maksimumenergi på 28 GeV (Figur 2). PS var i en kort periode verdens kraftigste protonakselerator. Maskinen ble absolutt en maskin «for fremtiden» og den er fortsatt i bruk den dag i dag – hele 65 år senere – for fast-mål-eksperimenter og som injektor til LHC.

PS sendte fra starten stråler til en lang rekke fast-mål-eksperimenter ved CERN, inkludert boblekamre. Et viktig resultat kom fra boblekammeret Gargamelle [8]. Her ble nøytrino/antinøytrino-sekundærstråler generert ved å sende protoner fra PS mot et berylliummål, som ga en skur av pioner og kaoner, som så henfalt til nøytrinoer/antinøytrinoer. Variabel avbøying med magnetisk «horn» ble brukt til å velge ut energi og ladning av sekundærstrålene.

Gargamelle-eksperimentet påviste nøytrale partikkelstrømmer i 1973 – vekselvirkninger mediert av Z-bosonet – som postulert av den forente elektrosvake teorien [9].

1971: Intersecting Storage Rings

I studiet av elementærpartikler er massesenterenergien, E_{cm} , for partikkelkollisjoner viktig: Jo høyere E_{cm} , dess tyngre partikler kan produseres og prosesser ved høyere energi kan studeres. Ved f.eks. partikkel-antipartikkel-parproduksjon må E_{cm} tilsvare minst to ganger massen til partiklene. Ved kollisjon av partikler mot faste mål vil E_{cm} kun være en liten del av partikkelenergien, siden kollisjonsproduktet vil anta en stor kinetisk energi i laboratoriet. Hvis for eksempel et 28 GeV-proton treffer et proton som ligger i ro, vil E_{cm} kun være 7 GeV. E_{cm} øker generelt med kvadratroten av partikkelenergien for fast-mål-kollisjoner. Hvis i stedet to partikler med samme energi sendes rett mot hverandre, vil E_{cm} være to ganger pro-

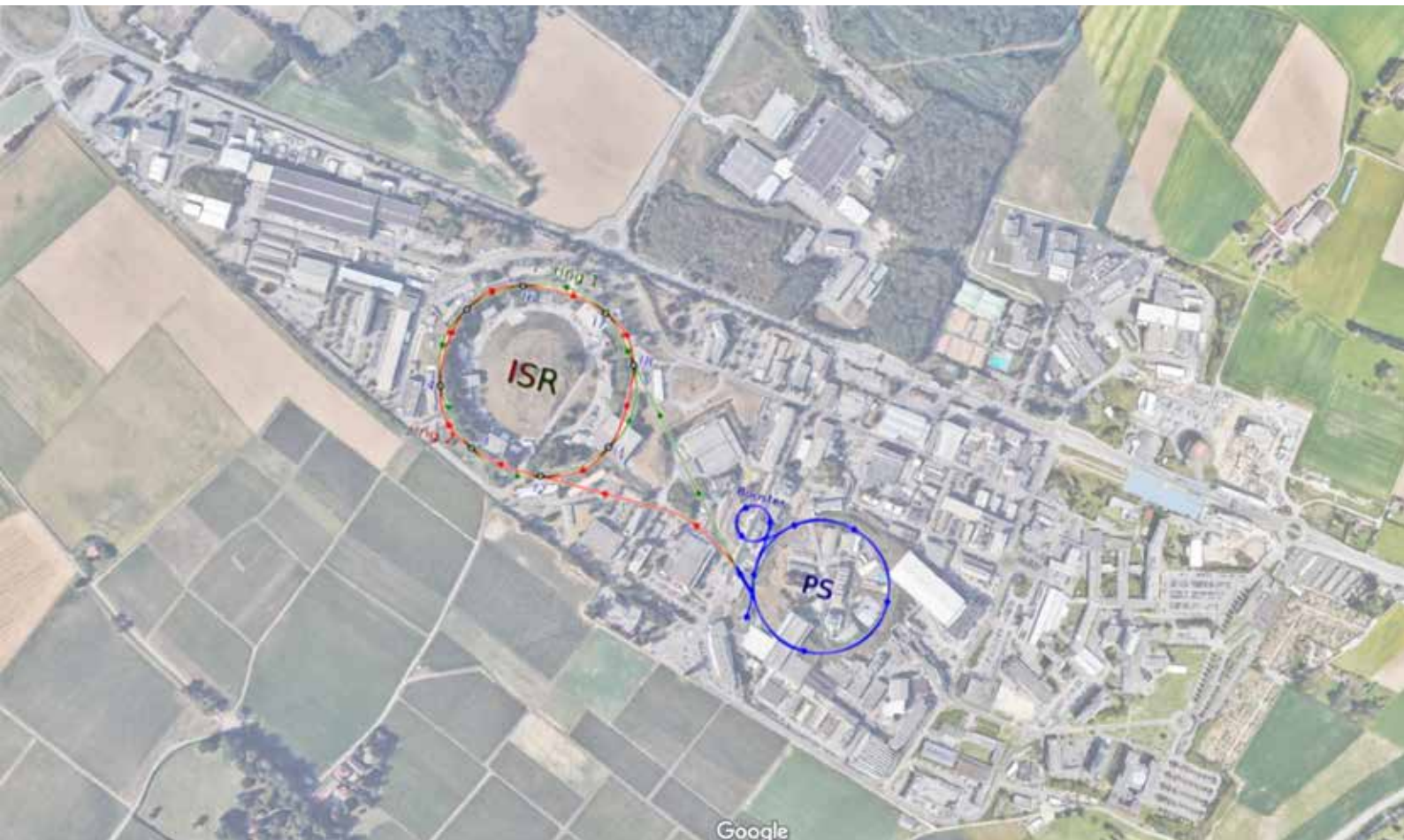
tonenergien, og E_{cm} øker generelt lineært med partikkelenergien. Dette er grunnen til at vi bygger «partikkelknusere». Med «partikkelknuser» – eller *particle collider* på engelsk – mener vi en maskin som kolliderer to partikkelstråler mot hverandre, i motsetning til å sende en partikkelstråle mot et fast-mål. Ideen ble opprinnelig patentert av Rolf Widerøe [10].

Verdens første partikkelknuser startet opp i 1961, Elektron-positronknuseren AdA ved INFN Frascati i Italia. Ti år senere startet CERN opp den første proton-protonknuseren, synkrotronen Intersection Storage Ring (ISR) [2]. Prosjektleder for maskinen var nordmannen Kjell Johnsen. ISR jobbet hånd i hånd med PS. PS akselererte protoner til 28 GeV, disse ble så sendt inn i begge retninger inn i ISR og protonstrålene kunne så bringes til kollisjon ved flere eksperimenter. Omkretsen til ISR var 942 meter, og E_{cm} kom opp i 62 GeV. Figur 3 viser hvordan ISR er koplet til PS.

I en partikkelknuser er det også viktig å oppnå høy kollisjonsrate, eller luminositet. Luminositet er, rundt regnet, hvor mange partikler som kolliderer per sekund, per stråletverrsnitt. Strålene må treffe hverandre nesten rett på, i tillegg til å være veldig tynne. Sett fra et akseleratorståsted var ISR en stor suksess. Maskinen fungerte som ønsket, og kom opp i planlagt luminositet relativt raskt, tross en del skepsis før oppstart [11]. For å oppnå luminositeten demonstrerte ISR nyvinninger innenfor akseleratorfysikk som var essensielle for CERNs fremtidige hadronknusere beskrevet nedenfor. Blant disse var teknikkene «RF-putting» (RF-stacking) og stokastisk kjøling [11]. I RF-putting fyller en PS-strålen flere ganger inn i samme del av ISR-strålebanen, men med litt forskjellig energi, og dermed oppnår man høyere total intensitet. Stokastisk kjøling av partikkelstråler er et avansert feedback-system som måler utslag på partikler fra referansebane og gir små korreksjoner som over tid kan gi en stor økning i strålekvaliteten, og tilsvarende økning i luminositet. ISR ga likeledes verdifull erfaring i detektorutvikling.

1976: Super Proton Synchrotron

I 1976 ble Super Proton Synchrotron (SPS), med en omkrets på 6,9 km, startet opp [2]. I protonsynkrotroner er maksimal oppnåelig bevegelsesmengde, p ,



Figur 3. Intersecting Storage Rings var verdens første hadronknuser, med oppstart i 1971. For å oppnå stor stråleintensitet fyltes maskinen opp fra Proton Synchrotron i flere omganger før kollisjonen.

Grafikk: CERN og Google

gitt av relasjonen $p = eBR$, der B er maksimal styrke på avbøyingsfeltet og R er baneradius. Synkrotronbanen er sirkulær inne i avbøyingsmagnetene (rettlinjet mellom disse). Med ti ganger større radius og mye sterkere magneter gir SPS en stråleenergi opp til 450 GeV. Ringen krysser grensen fra Sveits inn i Frankrike og tilbake.

SPS ble den nye hovedkilden for fast-mål-eksperimenter ved CERN, og brukes i dag fortsatt til en rekke fast-mål-eksperimenter, samt som injektor til LHC. Figur 4 viser størrelsen og plasseringen av SPS (nest største ring). Et viktig norsk bidrag til SPS var de tjuetalls Nord-10-maskinene, produsert av Norsk Data i Oslo, plassert på seks forskjellige steder rundt ringen. Kombinert med CERNs selvutviklede berøringskjerm utgjorde Norsk Data-maskinene ryggraden i det første styringssystemet for akseleratoren [12].

1983: Super Proton–Antiproton Synchrotron

SPS ble konvertert til en proton-antiproton-partikkelknuser, $S\bar{p}\bar{p}S$, med oppstart i 1983, med E_{cm} fra

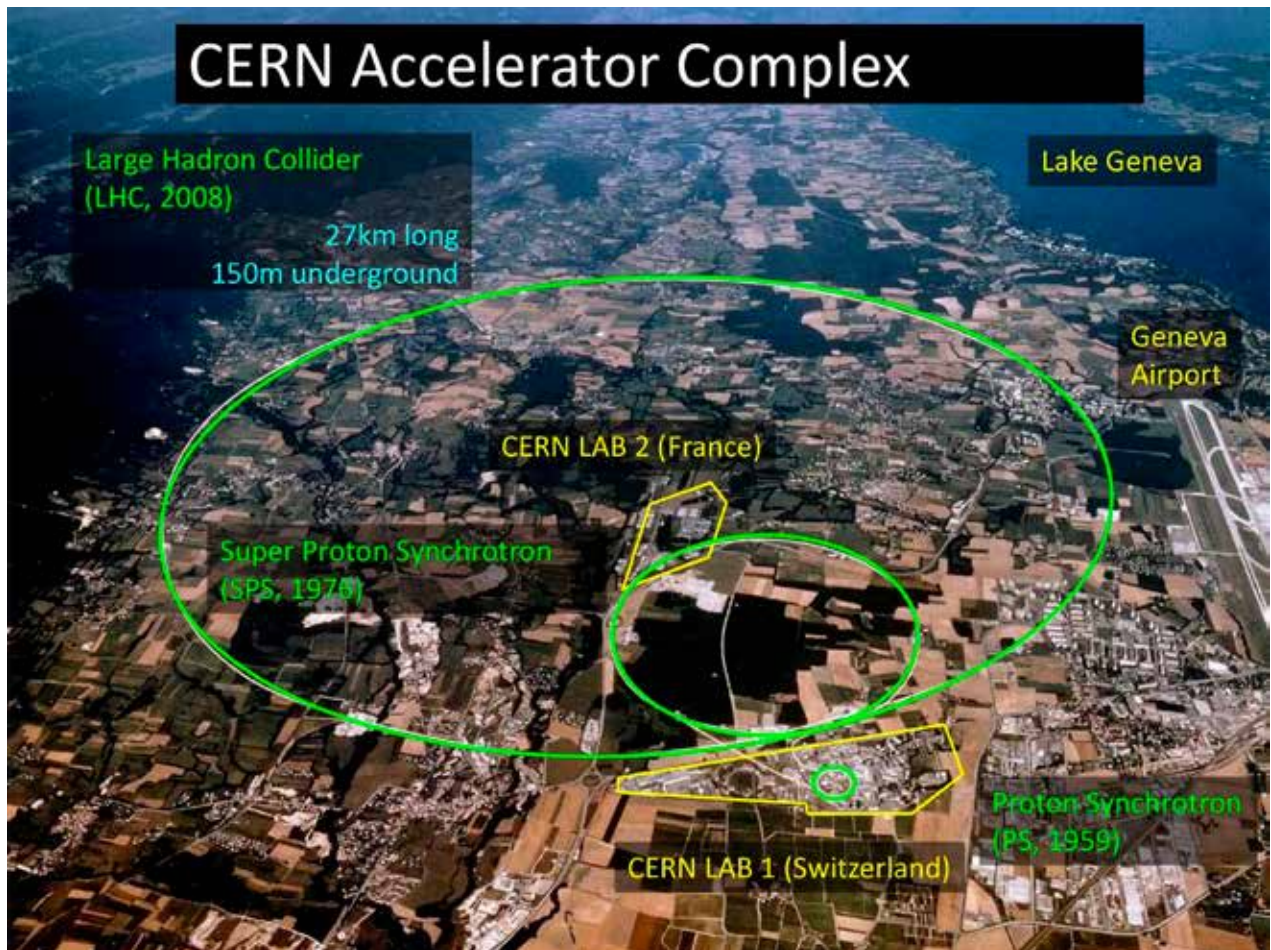
546 GeV i starten, som senere gikk opp til 900 GeV – to ganger SPS-energien [13]. Å oppnå tilstrekkelig luminositet var en stor utfordring. Erfaringene fra ISR ble uvurderlige i planleggingen. For å fremskaffe et tilstrekkelig antall antiprotoner var stokastisk kjøling en nødvendig ingrediens.

Ikke lang tid etter oppstarten ble Z- og W-bosonene oppdaget, som forutsett av den elektrosvake teorien som tidligere var indirekte påvist via nøytrale partikkelstrømmer i boblekammerene. Resultatene var en stor suksess for den elektrosvake teorien.

Oppdagelsen av Z- og W-bosonene førte til Nobelpris i fysikk 1984, som ble gitt til Simon van der Meer, hjernen bak stokastisk kjøling, og til Carlo Rubbia med vekt på hans ideer om hvordan konstruere en partikkelknuser med SPS som utgangspunkt [14].

1989: Large Electron-Positron collider

I 1989 startet Large Electron-Positron collider (LEP) opp. Omkretsen var 27 km [2]. LEP knuste elektron mot positroner – elementærpartikler – i motsetning til SPS som knuste sammensatte hadro-



Figur 4. Super Proton Synchrotron (nest største sirkel) og Large Hadron Collider (største sirkel) ligger under bakken i både Sveits og Frankrike.

Grafikk: CERN

ner. Ulempen med elektron–positronkollisjoner er at disse partiklene er vanskeligere å få opp til høy energi i en synkrotron. Mens stråleenergi i en protonsynkrotron (f.eks. PS, SPS, LHC) er begrenset av magnetteknologi, er det energitap på grunn av synkrotronstråling som begrenser energien i en elektronsynkrotron. Energitap per omløp er proporsjonal med partikkelenergi i fjerde potens. Energitapet for en partikkel går også som én over baneradius i andre potens, og én over massen i fjerde potens. LEP oppnådde en maksimal E_{cm} på 209 GeV, altså lavere enn SPS, tross flere ganger større baneradius.

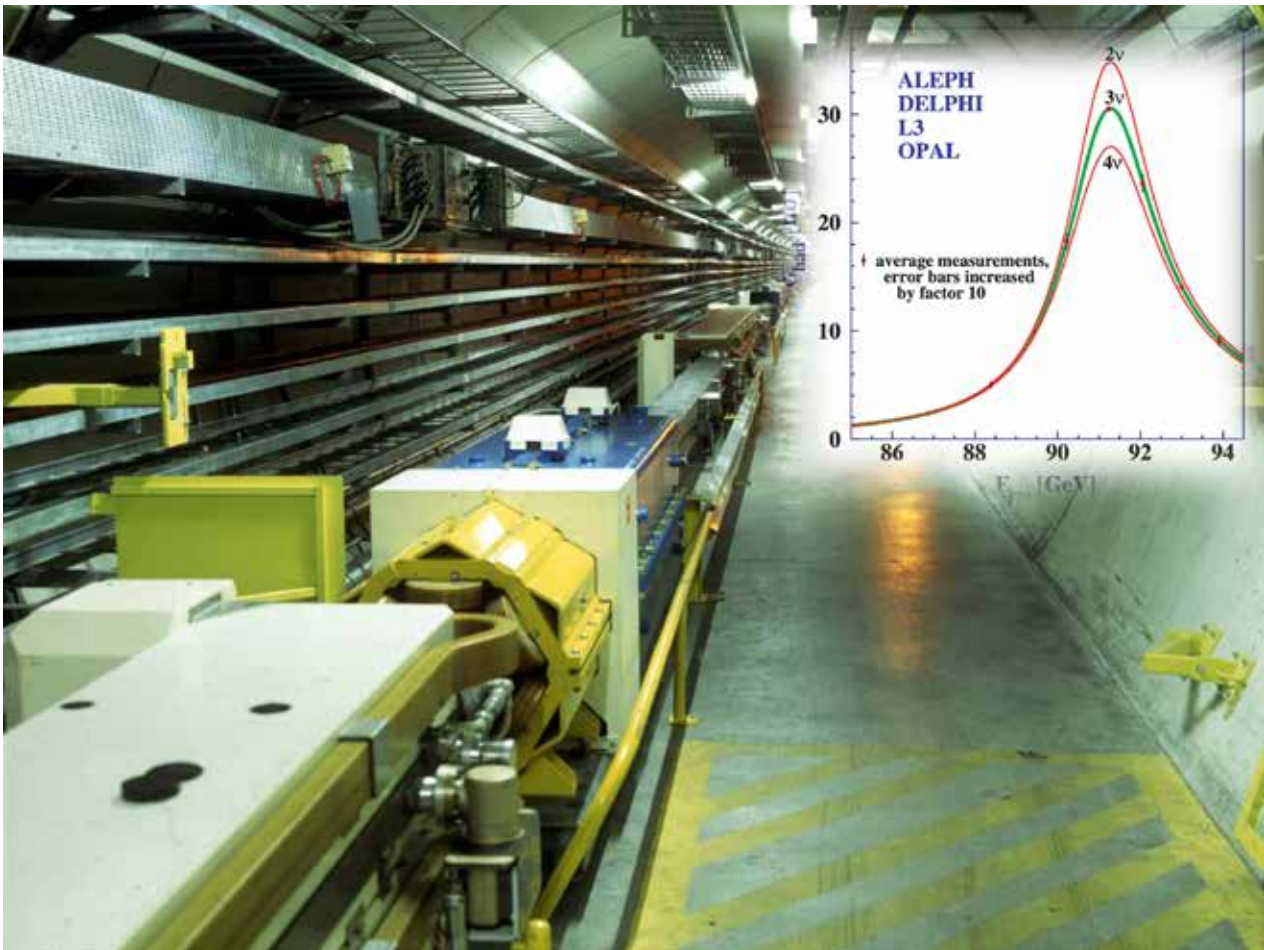
Derimot er det flere fordeler med å kolliderer elementærpartikler framfor hadroner: Initialtilstanden og energien i kollisjonene er kjent, det er mye mindre bakgrunn og hele massesenterenergien kan bidra til partikkelproduksjon. I sum vil leptonkollisjoner kunne gi mer presise målinger. Eksperimentene ved LEP ga derfor en lang rekke komplementære resultater til SPS. Et viktig eksempel er vist i Figur 5: Ved

å variere E_{cm} kunne man meget presist måle vidden av Z-bosonet [15]. Målingene er konsistente med eksistensen av tre nøytrinofamilier.

LEP jaget mot slutten stadig høyere energier. Ved E_{cm} på 209 GeV hadde man måtte fylt opp LEP-ringen til «randen» med akselerasjonsstrukturer for å kompensere energitapet fra synkrotronstråling. LEP-fysikere lurte på dette tidspunkt om de så et hint av Higgs-bosonet i dataene, men det var ikke nok data til å avgjøre dette. I mellomtiden pustet Fermilab i USA – med sin hadronknuser Tevatron med E_{cm} på rundt 2 TeV – CERN i nakken. Det ble bestemt å stenge LEP og bygge LHC så fort som mulig [16].

2008: Large Hadron Collider

The Large Hadron Collider (LHC) ble bygget i samme tunnel som LEP, og kolliderer protoner mot protoner i stedet for elektroner mot positroner [2]. Synkrotronstrålingstap er neglisjertbart for protoner. Protonene kan derfor komme opp i mye høyere



Figur 5. LEP-strålelinjen. Tunnelen er 27 km lang og ligger ca. 100 meter under bakken. LEP muliggjorde elektron-positron-precisionsmålinger. Øverst til høyre vises et viktig resultat fra LEP [15]: Målingene av vidden til Z-bosonet er konsistent med tre og bare tre familier av nøytrinoer.

Foto: CERN

energi enn elektronene/positronene i LEP, med samme baneradius. Maksimal stråleenergi er gitt av et maksimalt avbøyingsfelt på 8,3 T. Dette gir en E_{cm} på 14 TeV. Så sterke magnetfelt krever elektromagneter med superledende vindinger, der magnetpolene er kjølt ned til 1,9 K ved bruk av superflytende helium. En del av tiden knuser LHC også ioner, for eksperimenter i høyenergikjernefysikk.

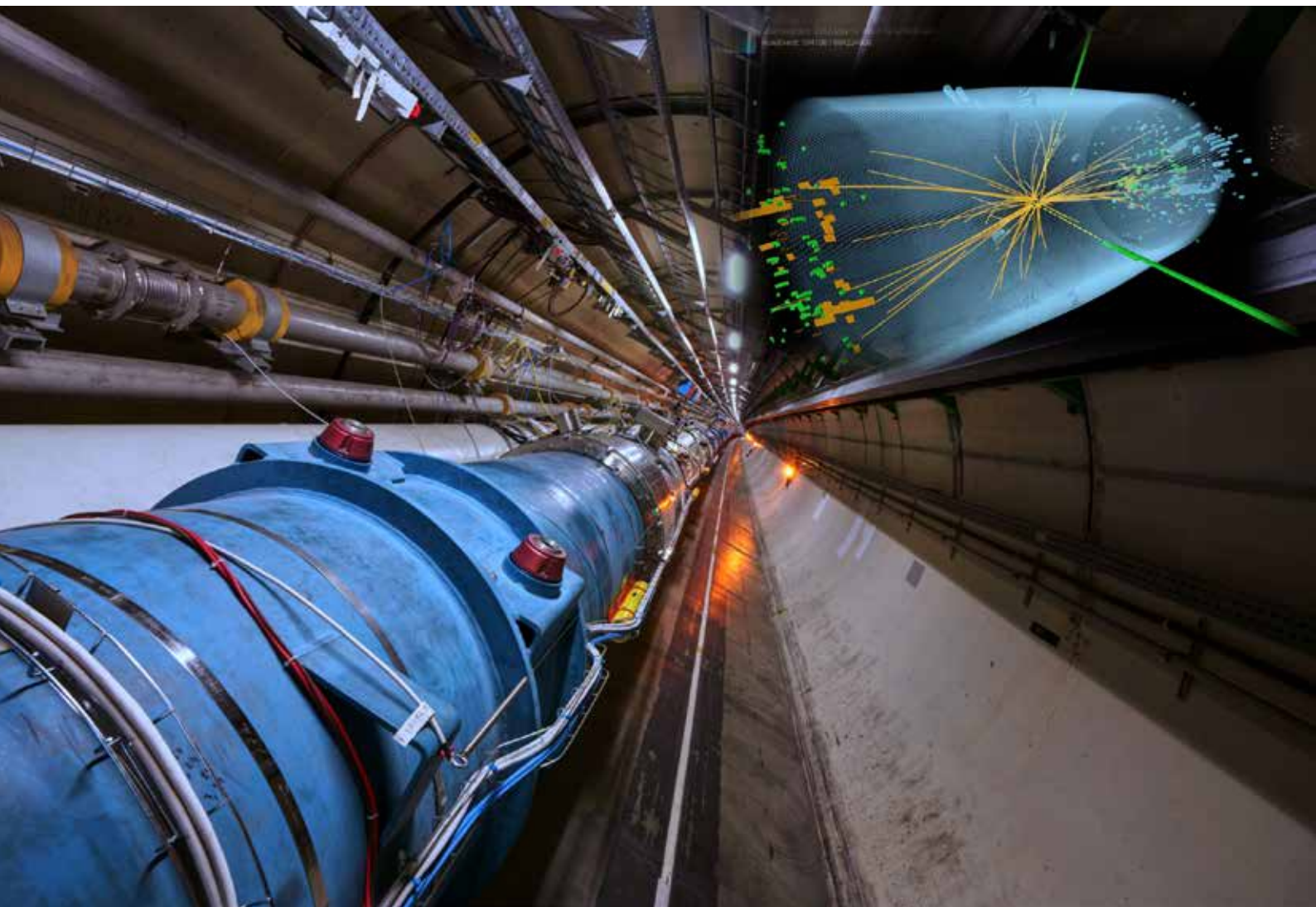
Ideen om LHC ble unnfanget i 1976/77, godkjent i 1994 og ferdigstilt i 2008. Det hører med til historien at LHC i tidligere faser hadde sterk konkurranse fra USA påbegynte protonknuser, Superconducting Super Collider (SSC). Denne var under konstruksjon i Texas inntil den amerikanske kongressen avsluttet prosjektet i 1993, mye på grunn av store kostnadsoverskridelser [17]. SSC ville vært 87 km lang, og gitt E_{cm} på 40 TeV hvis den hadde blitt bygd ferdig. 24 km tunnel var allerede gravd ut ved byggestopp.

Den 27 km lange LHC akseleratoren er verdens største superledende konstruksjon. 1232 femten

meter lange dipolmagneter trengs for å bøye protonene i sirkelbane. En rekke av CERNs mindre akseleratorer brukes som injektorer til LHC, blant annet PS og SPS, for å kunne få så høy stråleintensitet og strålekvalitet som mulig, som igjen gir best mulig luminositet. LHC ble designet for å gi 10 ganger så mye luminositet som SSC, $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$, noe som operatørene har oppnådd med god margin.

Eksperimentene ATLAS og CMS kunngjorde i 2012 oppdagelsen av Higgs-bosonet, og la dermed fram beviset på den postulerte elektrosvake symmetribruddsmekanismen i standardmodellen [18]. LHC ble bygget for å bekrefte – eller avkrefte – denne mekanismen som ble postulert i 1964 av François Englert, Robert Brout og Peter Higgs. Som følge av oppdagelsen fikk Englert og Higgs Nobelprisen i 2013 (Brout døde i 2011) [19]. En av de mange kanalene bosonet kan henfalle i, Higgs til to fotoner, er illustrert Figur i 6.

LHC og eksperimentene vil de neste årene oppgraderes til opptil ti ganger høyere luminositet,



Figur 6. En av de karakteristiske blå 15 meter lange superledende dipolmagnetene i LHC. Tunnelen er den samme som for LEP. Prototyper av disse magnetene kan sees flere steder på CERN campus. Øverst til høyre vises en mulig Higgs-hendelse fra CMS-detektoren, der to høyenergetiske fotoner er påvist [20].

Foto: CERN

noe som vil øke oppdagelsespotensialet vesentlig, og LHC vil etter planen fortsette å knuse protoner til rundt 2040.

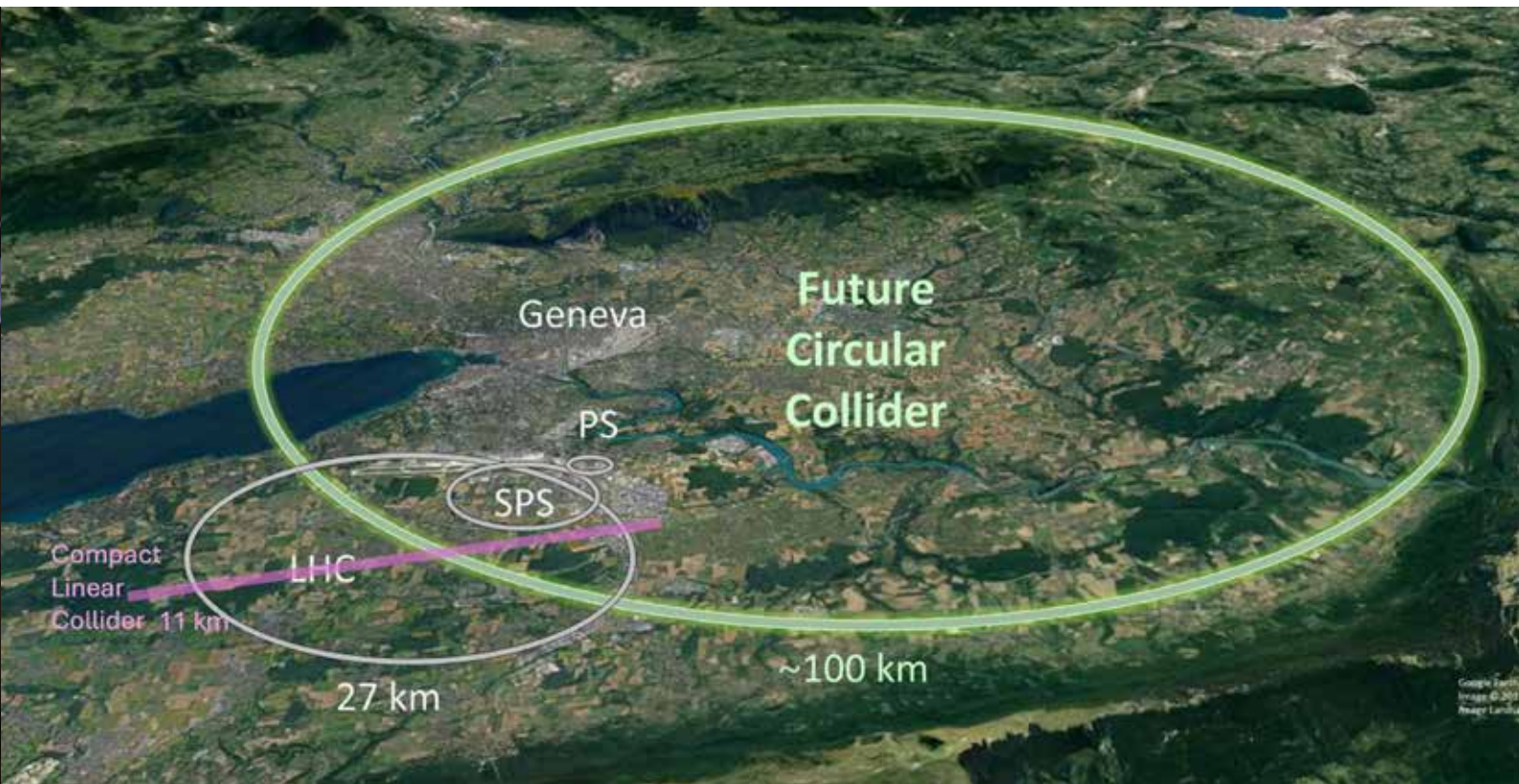
Fremtiden

Akseleratorene vi har beskrevet har vært uvurderlige for å etablere standardmodellen i partikkelfysikk. Alle partikler som inngår i modellen er blitt oppdaget. Det er imidlertid fortsatt mange åpne spørsmål i partikkelfysikken: Hvorfor akkurat tre lepton- og kvarkfamilier? Har mørk materie partikkelnatur? Hva skyldes mangelen på antimaterie i universet?

Det finnes en rekke teoretiske indikasjoner på at standardmodellen ikke er komplett. Dette indikerer at ny fysikk finnes et eller annet sted «der ute». Higgs-feltet har en spesiell rolle i standard-

modellen [21] – feltet eksisterer overalt i universet, Higgs-bosonet vekselvirker med de fleste andre partikler og også med seg selv. Partikkelfysikkmiljøet er enige om at presisjonsmålinger av Higgs-bosonet er den beste veien å gå for å finne ny fysikk. Vi ønsker derfor å bygge en «Higgs-fabrikk» – en elektron-positronkuser – for å produsere så mange Higgs-bosoner som mulig, med så lite bakgrunn som mulig [22].

En Higgs-fabrikk må ha E_{cm} på minst 250 GeV. Dette kan oppnås enten i en synkrotron med meget stor radius (vesentlig større enn LEP), eller i en lang lineær maskin, der lengden bestemmes av styrken på det akselererende felt. Gitt at å planlegge og bygge en stor partikkelkuser er en svært langvarig prosess, cf. tidslinjer for LHC, forsøker fagmiljøet nå å enes om hvordan Higgs-fabrikken skal bygges.



Figur 7. Mulige fremtidige partikkelknusere: Future Circular Collider (den største ringen) og Compact Linear Collider (den rette linjen).

Grafikk: CERN [25]. CLIC er lagt til manuelt av artikkelforfatter

Prosjektet Future Circular Collider (FCC) forslår en synkrotronbasert knuser med 91 km omkrets [23]. FCC vil være basert på kjent teknologi, og akselerator-tunnelen kan i prinsipp gjenbrukes for en hadronmaskin på rundt 100 TeV. Prosjektet Compact Linear Collider (CLIC) foreslår en lineær knuser som kan oppnå lignende E_{cm} med en 11 km lang tunnel med bruk av mer avansert teknologi [24]. De fleste lineære maskiner bruker akselererende felter på ikke mer enn 10 MV/m, mens CLIC vil presse disse grensene ved å bruke over 70 MV/m.

Mulige tunnelbaner for FCC og CLIC er illustrert i Figur 7. Maskinene vil bli bygget under bakken. Hvis medlemslandene frigir tilstrekkelige ressurser kan FCC bli valget for Higgs-fabrikken, mens CLIC eller andre lineære alternativer kan bli aktuelle hvis FCC viser seg å bli for kostbar eller på andre måter for ressurskrevende på grunn av sin størrelse. Det forskes også intenst på alternative, mer kompakte måter å bygge partikkelknusere på, slik som plasma-baserte knusere [2,26] og myonknusere [27].

Utvikling av akselerorteknologi har historisk resultert i meget nyttige anvendelser utover partikkelfysikk. Et godt eksempel er de syklotronbaserte protonterapisenterne som snart starter opp ved

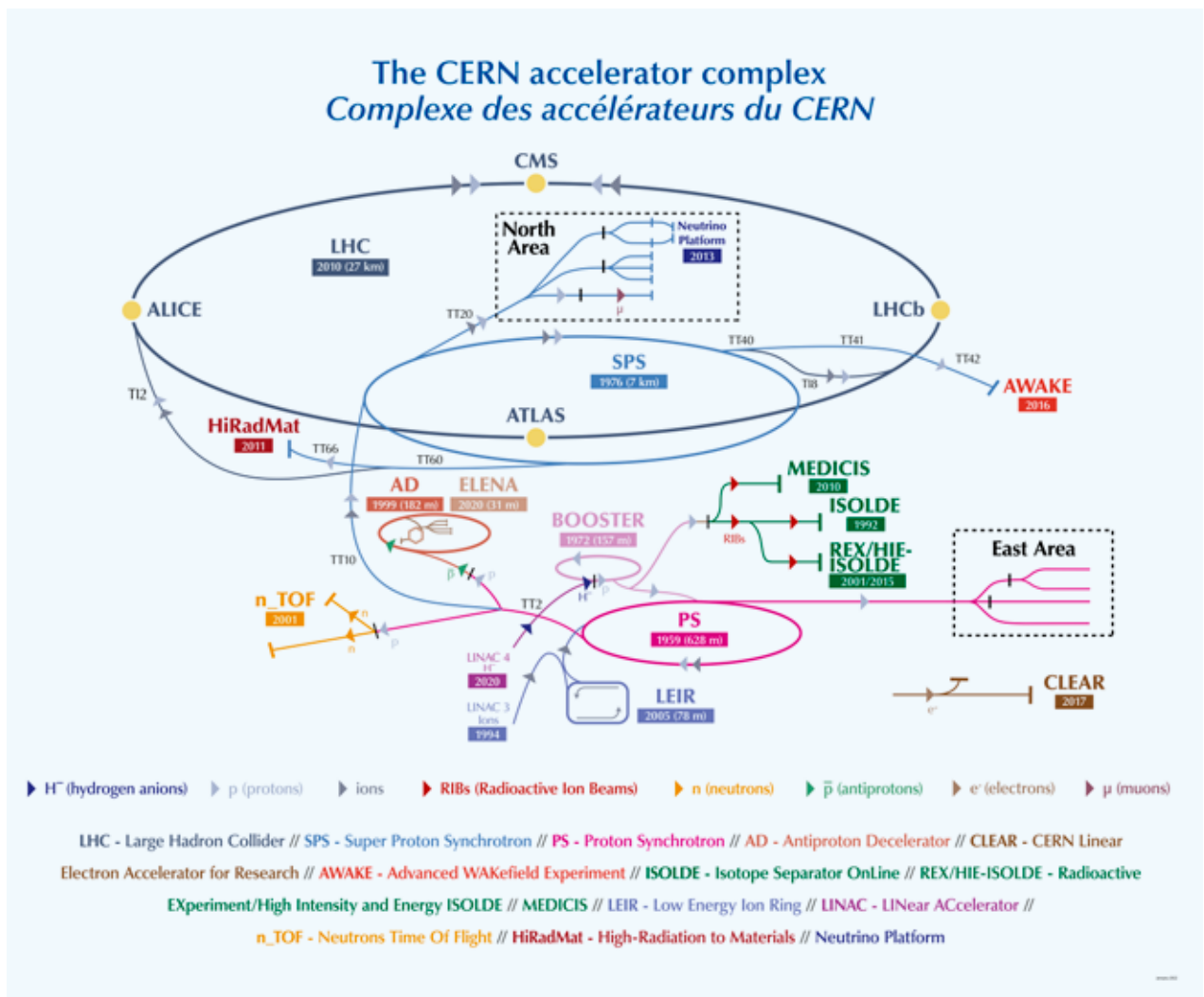
Radiumhospitalet i Oslo og ved Haukeland universitetssjukehus i Bergen [28].

Oppsummering

Vi har gått igjennom CERNs største akseleratorer gjennom historien. I tillegg opererer CERN i dag en rekke mindre maskiner: Antimaterie-deceleratorer AD [2] og ELENA, elektronmaskinen CLEAR, samt LINAC3 og LEIR som akselererer tungioner for LHCs kjernefysikkprogram. I tillegg blir såkalte sekundærstråler av elektroner, pioner og radioaktive isotoper produsert når protonstråler fra CERNs synkrotroner sendes på faste mål. Sekundærstrålene sendes til en rekke mindre eksperimenter, inkludert kjernefysikkinstallasjonen ISOLDE.

Figur 8 (se neste side) gir en oversikt over CERNs samlede akselerator-kompleks, som understreker CERNs rolle som verdens ledende leverandør av høy-energetisk, høy-intensitets partikkelstråler for partikkel- og kjernefysikk.

Spesialister innen de fleste naturvitenskapelige fagfelt – fysikere, ingeniører og teknikere av alle slag, informatikere og andre – kreves for å operere og utvikle denne avanserte maskinparken. Studenter og ansatte fra hele verden tiltrekkes av fagmiljøer



Figur 8. CERNs akseleratorkompleks [29]. CERN leverer høy-energetisk, høy-intensitets partikkelstråler for partikkel- og kjernefysikk ved hjelp av en rekke sirkulære og noen lineære partikkelakseleratorer.

Grafikk: CERN

med verdensledende ekspertise, jobbene på tvers av fag, for å bygge unike maskiner. CERN campus samler rundt ti tusen personer hver dag.

Som medlemsland bidrar Norge med en del av ekspertisen. Dette gir studenter, nyuteksaminerte og erfarne arbeidstakere muligheter til å søke stillinger ved CERN og delta i utviklingen. Norske forskere har vært og er involvert i mange av prosjektene og resultatene ovenfor. Men vi trenger flere nordmenn til å reise til CERN! Er du interessert vil sidene til det norske senteret for CERN-relatert forskning, NorCC, beskrive de mange mulighetene [30]. Du kan også ta kontakt med artikkelforfatteren hvis du vil vite mer. ■

Takk

Artikkelforfatteren takker Alex Read, Steinar Stapnes, Carl A. Lindstrøm og spesielt Jens Vigen på CERN for gjennomlesing og gode innspill.

Kilder

- [1] Are Raklev og Jan Olav Eeg. «Standardmodellen». Store norske leksikon på snl.no. Hentet 21. november 2024 fra <https://snl.no/standardmodellen>.
- [2] Tidslinje for CERN. Linkene på siden gir mer informasjon om CERNs partikkelakseleratorer: <https://timeline.web.cern.ch/timeline-header/89>.
- [3] Odd Dahl og Jan Harald Landro. *Trollmann og rundbrenner*. Gyldendal (1981). ISBN 13: 9788205132269.
- [4] Cosmotron ved Brookhaven National Laboratory: www.bnl.gov/about/history/accelerators.php.
- [5] Bevatron ved Lawrence Berkeley National Laboratory: <https://timeline.web.cern.ch/bevatron-starts-berkeley-california>.
- [6] Aashild Sørheim. *Besatt av en drøm: Historien om Rolf Widerøe*. S.l.: Forlaget historie & kultur (2020). s. 347–349. ISBN 9788283230000.

- [7] F. Fidecaro. «The Discoveries of Rare Pion Decays at the CERN Synchrocyclotron». *60 Years of CERN Experiments and Discoveries* (2015), s. 397–414. https://indico.cern.ch/event/508571/contributions/2283872/attachments/1390021/2117089/SC_PiMuE.pdf.
- [8] Ernest D. Courant, M. Stanley Livingston og Hartland S. Snyder. «The Strong-Focusing Synchrotron—A New High Energy Accelerator». *Phys. Rev.* 88, 1190 (1952). <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.88.1190>.
- [9] D. Haidt. «The Discovery of Weak Neutral Currents». *60 Years of CERN Experiments and Discoveries* (2015), s. 165–184. https://cds.cern.ch/record/2103279/files/9789814644150_0007.pdf.
- [10] Per F. Dahl og Rolf Widerøe. «Progenitor of Particle Accelerators». s. 7. <https://cds.cern.ch/record/237869/files/sscl%20-sr-1186.pdf>.
- [11] M. Cooper (Ed.). «History of Particle Colliders». *IOP*, Januar 2018. ISSN 2516-3353. www.iop.org/sites/default/files/2019-04/newsletter-jan-2018-colliders.pdf.
- [12] K.H. Kissler og R. Rausch. «New Control Architecture for the SPS Accelerator at CERN». 3rd Int. Conf. Accel. Large Exp. Phys. Control Syst. Tsukuba, Japan (1991). <https://inspirehep.net/files/43deb64bb44f605c94cd590a175bd10a>, <https://cerncourier.com/a/the-first-capacitative-touch-screens-at-cern/>.
- [13] R. Schmidt. «Challenges and Goals for Accelerators in the XXI Century». *The CERN SPS proton-antiproton collider* (2016), kapittel 10: s. 153–167. www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814436403_0010.
- [14] The Nobel Prize in Physics 1984. www.nobelprize.org/prizes/physics/1984/summary/.
- [15] S. Schael et al. «Precision electroweak measurements on the Z resonance». *Physics Reports* 427 (2006), s. 257–454. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157305005119.
- [16] «LEP hints at Higgs effect». *CERN Courier*, september 2000. <https://cerncourier.com/a/lep-hints-at-higgs-effect/>.
- [17] The Superconducting Super Collider. https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_Super_Collider.
- [18] L. Bugge, A. Lipniacka, F. Ould-Saada, A.R. Raklev, A.L. Read, L. Smestad og B. Stugu, «Er higgsbosonet funnet ved LHC?». *Fra Fysikkens Verden* 3, 2012. www.norskfysisk.no/filer/FFV/2012/FFV_2012-3.pdf.
- [19] The Nobel Prize in Physics 2013. www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/summary/.
- [20] CMS Experiment. «Observation of a New Particle with a Mass of 125 GeV». CERN (4. juli, 2012). <https://cmsexperiment.web.cern.ch/physics/higgs-boson/observation-new-particle-mass-125-gev>.
- [21] B. Stugu og A. Read. «Er det standardmodellens Higgs-boson vi har funnet?». *Fra Fysikkens Verden* 2, 2022. www.norskfysisk.no/filer/FFV/2022/FFV-2022-2.pdf
- [22] «Targeting a Higgs factory». *CERN Courier* (Jan 2021). <https://cerncourier.com/a/targeting-a-higgs-factory/>.
- [23] The Future Circular Collider (FCC) study. <https://fcc.web.cern.ch/>.
- [24] The Compact Linear Collider (CLIC) study. <https://clic.cern/>.
- [25] Aerial view showing the current ring of the LHC, and a possible FCC location: <https://cds.cern.ch/record/2653532>.
- [26] B. Foster, R.D'Arcy og C.A. Lindstrøm. «A hybrid, asymmetric, linear Higgs factory». *New J. Phys.* 25, 093037 (2023). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/acf395>.
- [27] *Reviews of Accelerator Science and Technology* Vol. 07, s. 137–159 (2014), Muon Colliders. www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S1793626814300072.
- [28] *Forskning.no*, 25. februar 2022. «Nå skal kreftpasienter få protonbehandling i Norge». www.forskning.no/kreft-kreftforeningen-medisinske-metoder/na-skal-kreftpasienter-fa-protonbehandling-i-norge/1983879.
- [29] CERNs akseleratorkompleks. <https://cds.cern.ch/images/CERN-GRAPHICS-2022-001-1/file?size=large>.
- [30] Norsk senter for CERN-relatert forskning (NorCC). «Jobb- og studiemuligheter ved CERN». <https://norway.cern/en/openings-cern>, <https://norway.cern/index.php/en/CERN-for-students>.



Solkraftindustrien anno 2024

Verdens kraftsystem endrer seg så fort at det er vanskelig å henge med i svingene. Selv om dette er nødvendig for at vi skal nå i målene som er satt for klima- og energipolitikken, kommer de raske endringene ikke uten utfordringer. På veien mot et nytt, bærekraftig, billig og pålitelig energisystem vil det være enorme, kommersielle muligheter for de som evner å utvikle relevante løsninger på disse utfordringene i tide. For å få til dette er tilgang til oppdatert kunnskap essensielt: endringstakten er simpelthen enorm. Siden solkraftindustrien har et stort ansvar for endringene som nå pågår, er det fint å kunne gi FFV sine lesere en oppdatering på hva som skjer i dette svært spennende feltet.

Erik Stensrud Marstein Institutt for energiteknikk

Denne artikkelen gir en oppdatering på hvor den globale solkraftindustrien står i dag. Etter en kort presentasjon av solcellen og dens virkemåte, kommer en oppsummering av status for solkraftverk sin rolle i det globale energisystemet. Deretter vil vi se på noen av de teknologiske revolusjonene som har foregått i det stille, og som har fått industrien dit den er i dag. Vi vil selvfølgelig også forsøke

å se litt inn i fremtiden, selv om dette har vist seg å være notorisk vanskelig i dette feltet.

Hva er og hvordan virker en solcelle?

Når vi her snakker om solkraft, begrenser vi oss til å «bare» se på bruken av solceller og solcellepaneler som direkte omdanner energien i sollysets fotoner til elektrisk energi. Teknologien er internasjonalt



Figur 1. Det batteristøttede solkraftverket Kenhardt i Sør-Afrika som eies og driftes av det norske selskapet Scatec var verdens største prosjekt av sitt slag da det ble satt i drift. Kraftverket er utviklet for å være basekraft og leverer 150 MW effekt 16,5 timer om dagen hver eneste dag.

Foto: Scatec

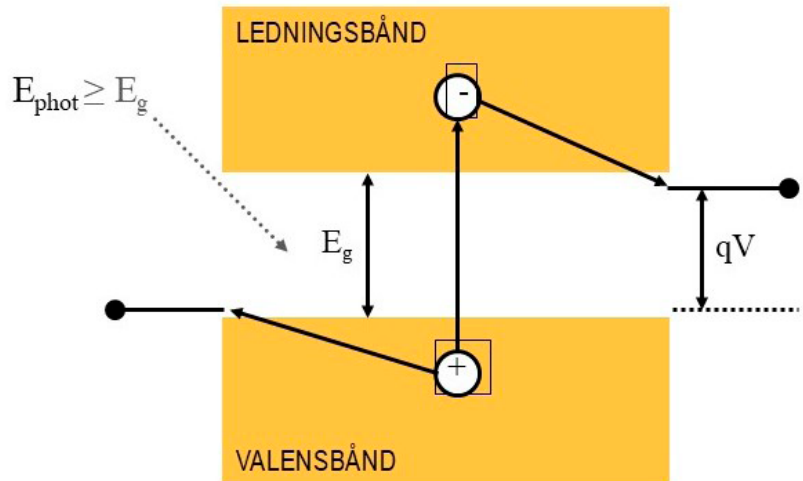
ofte kjent som PV etter initialene til den fotovoltaiske effekten solcellene er basert på. Siden 98 % av solcellene som produseres lages av halvlederen silisium, tar vi utgangspunkt i teknologiene som er basert på dette fantastiske materialet.

Grunnstoffet silisium er i sin normale, krystallinske form en halvleder. De elektroniske egenskapene er til en stor grad bestemt av formen til materialets valensbånd og ledningsbånd og størrelsen på båndgapet som skiller disse to. I en solcelle uten belysning vil elektronene i stor grad fylle opp tilstandene valensbåndet. Ledningsbåndet forblir så godt som tomt. Under belysning vil fotoner med tilstrekkelig energi kunne eksitere elektroner fra valensbåndet over båndgapet og opp til ledningsbåndet. I utgangspunktet gir dette en mengde virrevandrende, eksiterte ladningsbærere uten videre nytte: det blir ingen netto strøm å høste. De nå ledige tilstandene som blir igjen i ledningsbåndet åpner også opp for transport av ladningsbærere. På samme måte som biler kan flytte seg inn i tomrom som skapes i ellers tett trafikk vil de

ledige tilstandene, ofte kjent som «hull», bli en viktig kilde til strøm i valensbåndet. Dersom de eksiterte elektronene og hullene blir utsatt for et elektrisk felt i solcellen, settes de i en netto bevegelse, og vi kan høste strøm fra solcellenes terminaler. Strømmens størrelse bestemmes av mengden eksiterte ladningsbærere som finner frem til terminalene. Spenningen solcellen er i stand til å levere er oppad begrenset til båndgapets størrelse. Hovedtrekkene i solcellens virkemåte er illustrert i Figur 2.

Dessverre vil ladningsbærerne miste en betydelig del av det tilgjengelige potensialet på veien mot terminalene. En grunn til dette er at den økte kinetisk energien ladningsbærerne måtte få på veien gjennom de innebyggede elektriske feltene i solcellen raskt overføres til ionene og setter dem i bevegelse, noe som bare gir oppvarming. En annen grunn til dette er rekombinasjon. Dette er en prosess hvor eksiterte elektroner fra ledningsbåndet faller tilbake til valensbåndet og rekombinerer med hull der. Rekombinasjon reduserer antallet ladningsbærere

Figur 2. Figuren viser en solcelles virkemåte. Et foton med en energi (E_{phot}) høyere enn båndgapsenergien (E_g) eksiterer et elektron over båndgapet og opp til ledningsbåndet. Samtidig eksiteres et hull i valensbåndet. Når de utsettes for et elektrisk felt vil disse ladningsbærerne bevege seg til terminalene hvor de kan produsere strøm med en spenning (V) oppad begrenset av båndgapsenergien. All energi over båndgapsenergien går tapt på veien gjennom termaliseringprosesser.



tilgjengelig for strømproduksjon og samtidig den oppnåelige spenningen. Noen rekombinasjonsprosesser er uunnngåelige. Imidlertid er mange rekombinasjonsprosesser påvirkelige av teknologiske valg.

Et behov for å redusere rekombinasjon ved urenheter og defekter har vært en viktig driver for utviklingen av prosesser for raskt og billig å kunne produsere svært rent silisium. Disse prosessene har vunnet frem og ført til at silisium fullstendig dominerer industrien. I år alene produseres i størrelsesorden 100 milliarder tynne silisiumskiver, også kjent som silisiumwaferer, med svært høy renhet til bruk i solcellepaneler. Den økte materialkvaliteten gjør at de aller fleste eksiterte ladningsbærerne når frem til waferens overflater. Utviklingen av avanserte prosesser for å redusere rekombinasjon ved overflatene har derfor hatt en helt sentral rolle i utviklingen av nye solcellearkitekturer for høyere virkningsgrader.

En vellykket, moderne solcelle kan enkelt oppsummert sies å ha et hjerte bestående av en superren silisiumwafer som gir så lav rekombinasjon som mulig. Denne waferen er påført materialsystemer som bidrar til å skape det nødvendige elektriske feltet som skal til for å drive strømmen, gjør det mulig å plukke opp den produserte strømmen i terminalene, og samtidig gjør overflaterekombinasjonen så lav som mulig.

Solkraftindustrien leder an i det grønne skiftet

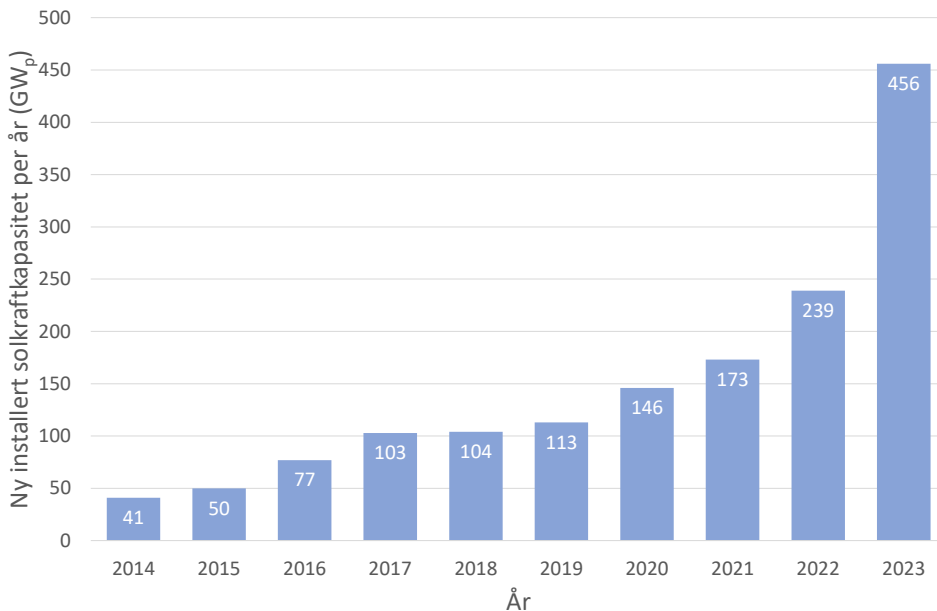
Solkraftindustrien er en industri i enormt rask vekst som setter rekorder for nye installasjoner nesten hvert eneste år. En oversikt over ny installert solkraftkapasitet per år er vist i Figur 3. Som vi kan se ble det i 2023 alene ble det installert solkraftverk med en kapasitet på å levere effekt rett i overkant av 450 gigawatt (GWp) [1]. Til sammenlikning var kraftforsyningen i Norge ved inngangen til 2024 totalt sett på rundt 40 GW. Solkraftutbyggingen i 2023 tilsvarer med andre ord godt over 10 norske kraftforsyninger målt etter effekt. I dagens presse-

bilde kan en annen relevant sammenlikning være kjernekraftindustrien. Ved utgangen av 2023 teller IAEA 413 operative reaktorer med en samlet kapasitet på 371,5 GW. Det ble i 2023 alene installert en større kapasitet for solkraftproduksjon enn verdens akkumulerte kjernekraftproduksjon frem til i dag, fortsatt målt etter effekt. Dette er selvfølgelig interessant, men absolutt ikke hele bildet. Det er også viktig å se på hvor mye energi (kWh) disse solkraftverkene faktisk produserer.

Et enkelt, men svært konservativt estimat for kraftproduksjon er at hvert installerte Wp i snitt produserer rundt regnet 1 kWh. Dette er litt mer enn vi typisk ser på hustak i Norge, men under halvparten av det vi ser i de beste kraftverkene i solrike strøk rundt om i verden i dag. I realiteten er tallet høyere: IEA regner med et globalt snitt på om lag 1,3 kWh/Wp. Flere kraftverk i solrike strøk ligger godt over 2 kWh/Wp. Ved å legge IEA sitt globale snitt til grunn vil solkraftverkene som ble installert i 2023 samlet stå for oppunder 600 TWh, eller fire ganger Norges samlede kraftproduksjon på rundt regnet 150 TWh. Den betydelige forskjellen mellom levert effekt og energi skyldes selvfølgelig at solkraftverk produserer gjennom timene med sollys mens vannkraftverkene som dominerer vår kraftforsyning har langt flere driftstimer.

Allikevel: andelen solkraft i den globale energimiksen målt etter andelen produserte kWh økte fra 6,1 til 8,3% fra 2022 til 2023, altså med over to prosentpoeng på ett eneste år [1,2]. Dette er mye. Og dette er selvsagt ikke slutten.

I år ligger solkraftindustrien an til å slå fjorårets rekord til gangs med nye, forventede installasjoner med en kapasitet på hele 600 GWp. Dette tilsvarer et tilskudd på 15 ganger Norges kraftforsyning, som samlet kommer til å produsere rundt 800 TWh, eller mer enn fem ganger så mye energi som Norge produserer. Dette gjør at det internasjonale energibyrået IEA anslår at investeringene i



Figur 3. Ny installert solkraftkapasitet per år [1].

solkraftverk i år blir større enn de samlede investeringene i all annen kraftproduksjon basert på alle andre teknologier til sammen [3].

Den raske veksten har ledet til at solkraftverk i dag spiller en helt sentral rolle i kraftforsyningen mange land. I Spania, Nederland og Hellas er mer enn 20 % av den samlede kraftproduksjonen (kWh) nå basert på solkraft. I hele 20 land, inkludert enorme Kina, er solkraftens andel i kraftmiksen på minst 10 % [1].

Dette har kommet fort! Da jeg begynte å jobbe i dette feltet i 2003 hadde verden akkurat nådd en akkumulert kapasitet på 1 GW_p. I 2022 ble den samlede kapasiteten til solkraftverkene 1 TW_p, og allerede i år vil vi nå 2 TW_p. Nær halvparten av alle verdens solkraftverk har blitt installert i 2023 og 2024 alene. Med den forventede veksten vil solkraftandelen i den globale energimiksen (kWh) nå 11 % før nyttår. Om bare et par år tror jeg vi vil se at solkraftindustrien øker sin andel med 5 prosentpoeng i året. Dette endrer energilandskapet fullstendig. Kraftoverskudd på dagtid blir en realitet i store deler av verden, og utfordringen blir å finne de beste måtene å få tak i kraft når solen ikke skinner.

Det internasjonale energibyrået antar at fornybar energi skal om lag tredobles innen 2030 og at nye solkraftverk kommer til å stå for 80 % av denne økningen [4]. For ordens skyld er det fristende å påpeke at dette er et byrå som erfaringsmessig grovt undervurderer veksten i solkraft.

Silisiumsolcellen og de stille revolusjonene

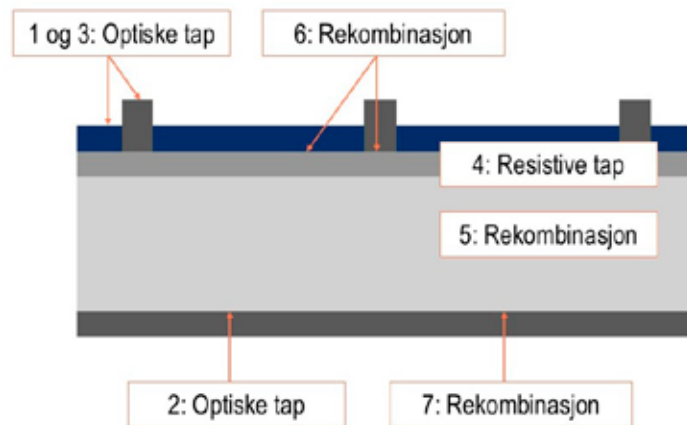
Hva er det som har skjedd som har gjort det mulig for denne industrien å bli så enormt konkurransedyktig? Utviklingen av stadig bedre silisiumbaserte solceller har en stor del av skylden. Det er i år akkurat 70 år siden den første moderne silisiumsolcellen så dagens lys på Bell labs. Dette er en fødselsdag det

virkelig er verdt å feire! I utgangspunktet var dette en laboratoriesolcelle med en virkningsgrad på beskjedne 6 %, men mange av løsningene og prinsippene fra den gang har vist seg å tåle tidens tann godt. Teoretisk sett kan en perfekt silisiumsolcelle nå en virkningsgrad på i overkant av 29 %. Solcelleutviklingen har i stor grad fokusert på å komme så nær denne grensen som mulig ved å redusere effekten av de viktigste tapsmekanismene. Disse er vist i Figur 4 og er 1) optiske tap på solcellens forside, 2) optiske tap på solcellens bakside, 3) optiske tap forbundet med forsidekontaktene, 4) resistive tap i wafer, emitter, kontakter og over grenseflater, 5) rekombinasjonstap i wafer, 6) overflaterrekombinasjon på solcellens forside og 7) overflaterrekombinasjon på solcellens bakside. I de siste tiårene på 1900-tallet ble flere solcellearkitekturer med et potensiale for virkningsgrader på langt over 20 % utviklet.

Utviklingen av den såkalte Aluminum Back Surface Field (Al BSF) teknologien gjorde det mulig å produsere effektive silisiumbaserte solceller raskt til en relativt billig penge, og denne arkitekturen ble dermed bærebjelken for solkraftindustrien et godt stykke inn i dette årtusenet. Arkitekturen var basert på en enkelt skalerbar løsning for å redusere rekombinasjonstap ved solcellenes bakside. Utfordringen var at solcellearkitekturen hadde en virkningsgradsbegrensning på rundt 20 %.

Revolusjon 1: Fra Al BSF til PERC

Begrensningen på 20 % gjorde det interessant å se på alternativer. Forskningsgruppen til professor Martin Green ved University of New South Wales (UNSW) innså at det var mulig å sikte betydelig høyere og demonstrerte allerede på 1980-tallet konseptet Passivated Emitter Rear Contact (PERC) ved å lage en solcelle med en virkningsgrad på nesten 23 %.



Figur 4. Figuren viser de viktigste tapsmekanismene i en solcelle. Forsiden/solsiden vender oppover i figuren.

Industrien skjønte etter hvert at denne solcellen krever få justeringer i produksjonslinjene fra Al BSF, men reduserer både optiske og rekombinasjonsrelaterte tap i solcellen betraktelig. Da de første større solcelleprodusentene begynte å legge om til PERC så fulgte nesten hele industrien etter, og denne ble på revolusjonerende kort tid dominerende i industrien. I årene som fulgte kom ulike videreutviklinger av denne arkitekturen, og en solcelle med arkitekturen PERL (Passivated Emitter Rear Locally diffused) fra UNSW ble den første silisiumbaserte solcellen til å nå 25 %, og en rekord den klarte å holde i 15 år.

Revolusjon 2: Fra multi- til monokrystallinske silisiumwafere

Som følge av overgangen fra Al BSF til PERC ble solcellenes virkningsgrader stadig mer følsomme for materialkvaliteten. Mens wafere laget av multi-krySTALLINSK silisium hadde vært markedsledende på starten av 2000-tallet, og ikke medførte for store tap i Al BSF-solcellene, så førte innfasingen av PERC til et svært brått skifte. For å realisere virkningsgradspotensialet i denne arkitekturen kreves wafere som gir svært lave rekombinasjonsrater. KrySTALLFEIL i de multikrySTALLINSKE waferne, spesielt dislokasjoner, medførte rekombinasjonsrater det var vanskelig å håndtere. I dag er så godt som all produksjon i solkraftindustrien basert på monokrySTALLINSK silisium av svært høy kvalitet. Det er verdt å nevne at Norge er vertskap for bedriften Norsun i Årdal som har den eneste produksjonslinjen for slike wafere til bruk i solceller i Europa.

Revolusjon 3: Fra bor til galliumdoping

Det elektriske feltet i solceller bygges som oftest inn ved å produsere wafere med et overskudd av hull (p-type materiale) og deretter drive inn grunnstoffer fra forsiden med et overskudd av elektroner (n-type materiale). Etter en reorganisering av de mobile ladningsbærerne står de faste ladningene fra de nå blottlagte ionene igjen og skaper et elektrisk felt nær overflaten. Dette området er godt kjent for

mange av FFV sine lesere som p-n-overgangen.

Det var lenge vanlig å tilsette grunnstoffet bor (B) til silisiumsmelten for å oppnå overskuddet av hull. Etter hvert som materialkvaliteten i silisiumwaferene ble bedre, oppdaget man at bor vekselvirket med oksygen på en måte som ga økt rekombinasjon under belysning, et fenomen kjent som lysindusert degradasjon (LID). Raskt endret produsentene sine prosesser og erstattet bor med gallium (Ga).

Revolusjon 4: Tosidige solcellepaneler

En hendig bieffekt av PERC-solcellen var muligheten for å trykke fingerkontakter på begge sider av solcellen som slapp det aller meste av sollyset gjennom. I Al BSF-solcellen ble hele baksiden dekket av et lystett aluminiumslag. Dermed ledet PERC-gjennombruddet også til en annen svært viktig revolusjon: rask vekst i produksjonen og bruken av tosidige solcellepaneler. Disse koster ikke vesentlig mer å produsere enn ensidige solcellepaneler, men kan oppnå en betydelig boost i produksjon ved å fange opp lys også fra solcellenes bakside.

Mot høyere virkningsgrader

Selv om PERC-solcellen har vært svært vellykket, slutter virkningsgradsracet selvfølgelig ikke med den. Tre konkurrerende arkitekturer sloss i dag om å bli den neste store teknologien: TopCon, heterojunction og interdigitated back contact. Alle tre har enda bedre optiske egenskaper og enda lavere rekombinasjonstap ved overflatene enn PERC, og alle tre har demonstrert virkningsgrader over 25 % i industrielle produksjonslinjer. Da TopCon krever minst endringer på dagens produksjonslinjer, er det fristende å spå at den vil kunne spille en viktig rolle fremover.

Når det er sagt: virkningsgradsgrensen for silisiumsolcellen er en fundamental begrensning knyttet til solspekterets bredde og solcellens fargeblindhet. Sollyset består av fotoner med et stort spekter av energier. En solcelle nyttiggjør seg av fotonene med tilstrekkelig energi til å eksitere ladningsbærere over båndgapet. Dessverre vil solcellen få like stor nytte



Figur 5. Solkraftverket Mendubim i Brasil eies og driftes av de norske selskapene Scatec, Equinor og Hydro REIN.

Foto: Scatec

ut av alle disse fotonene, båndgapet setter en øverste grense for tilgjengelig spenning. Dette bidrar sterkt til den lave teoretiske virkningsgradsgrensen. Det finnes imidlertid flere konsepter som kan gjøre det bedre. Et eksempel er tandemsolceller: arkitekturer der flere solceller ligger i optisk serie etter hverandre. I en tandemsolcelle vil hver del høste sin del av solspekteret i en solcelle med et mer egnet båndgap. Denne typen solceller har derfor betydelig høyere teoretiske virkningsgradsgrenser. Tandemsolceller er et forskningsfelt det skjer mye i for tiden, spesielt knyttet til tandemsolceller basert på perovskittsolceller i kombinasjon med silisium. Dette konseptet har demonstrert virkningsgrader godt over 30 %, men utfordringen er knyttet til pålitelighet. Står man fritt til å velge materialer og har råd til å fokusere sollyset nærmere verdensrekorden seg 50 %.

Batteristøttede solkraftverk

Gjennom mørke vintre, på tunge gråværsdager og gjennom nettene, er det lite sollys å hente. En hovedutfordring fremover er å sikre samfunn og industri tilgang til billig, bærekraftig og pålitelig kraftproduksjon uansett tid på døgnet og året. Dette betyr at vi selvfølgelig vil se at solkraft vil spille på lag med andre komplementære og/eller kontrollerbare kraftkilder. En betydelig revolusjon i denne sammenhengen er at vi nå ser at solkraftverk i stadig større grad utrustes med batterisystemer. Batteristøttede solkraftverk vinner allerede frem i direkte konkurranse om å levere basekraft, altså effekt hele eller store deler av døgnet. Et godt eksempel er prosjektet Kenhardt som

er utviklet og eies av det norske selskapet Scatec og som er i drift i Sør-Afrika. Dette anlegget er vist i Figur 1. Dette kraftverket leverer 150 MWp effekt 16,5 timer hver eneste dag og konkurrerte svært godt med alle andre teknologier på pris. Med batteripriser i fortsatt fall vil denne typen løsninger bli stadig mer utbredt og påvirke spillerrommet for alternative kraftverk ytterligere. Døgkontinuerlig drift er økonomisk sett innen rekkevidde i solrike strøk. I vår del av verden vil selvfølgelig sesongvariasjon være en viktig utfordring fremover.

Hva vil så skje fremover? Det er all grunn til å tro på videre vekst. Produksjonskapasiteten langs verdikjeden for solcellepaneler er nesten dobbelt så stor som den reelle produksjonen i dag. Det faktum at solkraft er raskt på vei til å bli den billigste kilden til energi i nesten hele verden før 2030, gjør vekst sannsynlig [5]. Flere av verdens ledende miljøer innen feltet tror på en fremtid med en vanvittig mengde solkraft tilgjengelig, noe som vil lede til et svært betydelig energioverskudd [6]. Dette blir fortsatt et spennende felt å følge med på fremover! ■

Referanser

- [1] Trends in PV applications 2024, IEA 2024
- [2] Trends in PV applications 2023, IEA 2023
- [3] Energy Investments 2024, IEA 2024
- [4] Renewables 2024, IEA 2024
- [5] F.J.M.M. Nijse et al. «The momentum of the solar energy transition.» *Nature Communications* (2023) 14:6542.
- [6] N.M. Haegel et al. «Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option.» *Science* (2023) 380:6640.

Kraftsensorer og vekter med micro:bit

Del I – Lag en enkel elektronisk vekt

Nils Kr. Rossing Institutt for fysikk, NTNU

Elisabeth Inge Romijn og Torunn Smevik Institutt for lærerutdanning, NTNU

I del 1 av artikkelen skal vi se hvordan vi kan lage en enkel, men overraskende nøyaktig vekt ved hjelp av vektstangprinsippet. Til dette trenger vi en sensor, litt elektronikk og en micro:bit [1]. Vi ser for oss bygging og programmering av vekta som et framtidig undervisningsopplegg. Men før vi beskriver den elektroniske vekta, skal vi se på et par tradisjonelle vekter. Det er alltid interessant å studere tidligere metoder, da virkemåten ofte er mer intuitiv og lettere å forstå.

Vi kan grovt sett inndele tradisjonelle vekter i fjærvekter og balansevekter. Fjærvekter utnytter at en stålfjær endrer lengde avhengig av kraften som drar i fjæra. Ved å utnytte tyngdekrafta kan vi også bruke en fjærvekt til å finne massen til en gjenstand, da det ifølge Newtons lov er en lineær sammenheng mellom massen og den krafta som drar massen til jorda. Vi er imidlertid avhengig av at det er en lineær sammenheng mellom krafta og forlengelsen av fjæra.

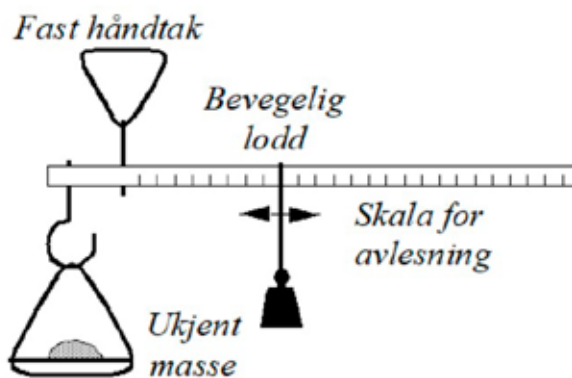
Balansevekter, der den tradisjonelle skålvekta er mest kjent, benytter seg av sammenligning mellom en ukjent og en kjent masse. Balansevekter benytter vektstangprinsippet. Hos den tradisjonelle

skålvekta henges den kjente og den ukjente massen på hver side av en vektstang som balanserer om midtpunktet. Så fyller man på med lodd med kjent masse til det oppnås likevekt.

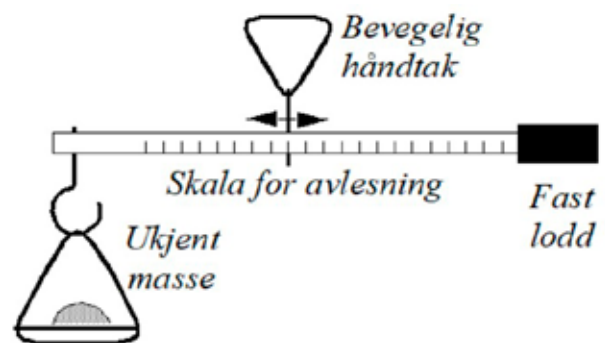
Figur 1 viser en **besmanvekt** [2]. Man henger det man ønsker å veie på kroken til venstre og flytter loddet til høyre langs vektarmen til man oppnår likevekt. En skala på vektarmen der loddet havner, viser vekta til massen på kroken. Fordelen med en slik vekt er at man slipper å ha med et utvalg med lodd med kjent masse. Den er derfor lett å ta med seg.

Bismervekta er en lignende type vekt (se Figur 2), som tidligere var mye brukt i Norge og Sverige. Den nordiske varianten hadde gjerne et fast lodd på den ene siden av vektarmen, mens det som skulle veies ble hengt i en krok på den andre siden. Ved å flytte et bevegelig håndtak, oppnådde man balanse. Den ukjente vekta ble avlest på en skala der håndtaket endte opp. Bismervekta var bedre egnet til å veie tyngre ting med god nøyaktighet, for eksempel slakt.

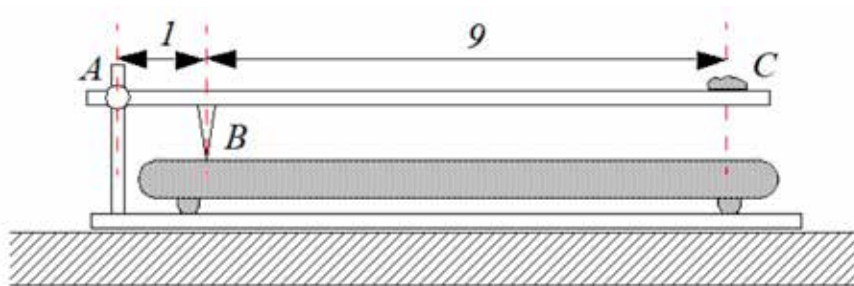
I tillegg fantes mange andre varianter, som for eksempel vippevekter, robervalvekter, mekanisk plattformvekter og sikkert enda flere som elevene



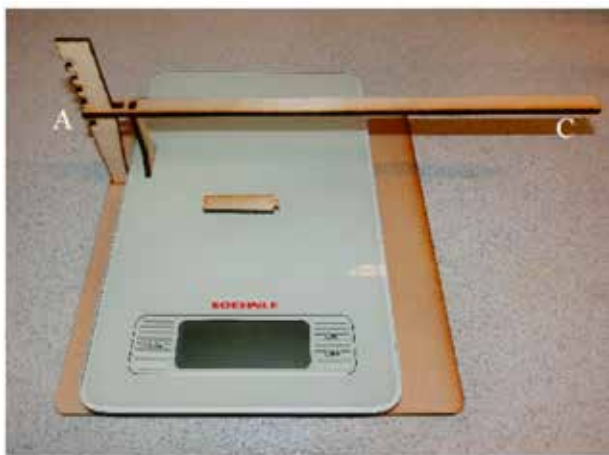
Figur 1. Besmanvekt.



Figur 2. Bismervekt.



Figur 3. Tegningen av modifisert kjøkkenvekt.



Figur 4. Kjøkkenvekt med forlenget arm.

selv kan finne ut av og beskrive.

Felles for alle disse vektene er at de er rent mekaniske og krever at de brukes i et tyngdefelt.

Før vi går over til å se på elektroniske vekter, skal vi presentere en liten problemstilling som elever og lesere kan bryne seg på, og som handler om å bestemme massen til en gjenstand i vektløs tilstand:

Du befinner deg i vektløs tilstand i et romskip. Du møter et romvesen fra en fjerntliggende planet. Etter å ha lært hverandres språk, ønsker du å vite hvilken enhet de har for masse. Du får et lodd med enhetsmassen deres. Du funderer en stund på hvordan du i vektløs tilstand, skal måle denne massen med de enkle midlene du har til rådighet. Så får du en idé.

Du tar fram en beholder med delestreker for volum som kan fylles helt eller delvis med vann. Du finner fram vann, en snor, en tusj og gjenstanden du skal finne massen til. Hvordan vil du gå fram for å bestemme enhetsmassen til din romkamerat? [3]

I vinter kom en nær kollega og kjemiker inn til meg på kontoret på Skolelaboratoriet ved NTNU med et smil på lur:

«Du Nils Kr. for øyeblikket holder jeg et videreutdanningkurs i grunnleggende kjemi for lærere. Jeg vil gjerne at de skal være istand til å gjøre enkle forsøk mellom samlingene, men også at elevene deres kan gjøre enkle forsøk hjemme. Da bør de kunne måle opp masser med en nøyaktighet på 0,1 gram og vanlige kjøkkenvekter har gjerne en oppløsning på 1 gram. Hva tror du om følgende: Om vi laget en enkel innretning som de kunne få med seg hjem, og som økte oppløsningen på kjøkkenvekta med en faktor 10. Jeg har en ide.»

Så tegnet han opp følgende på tavla på kontoret mitt:

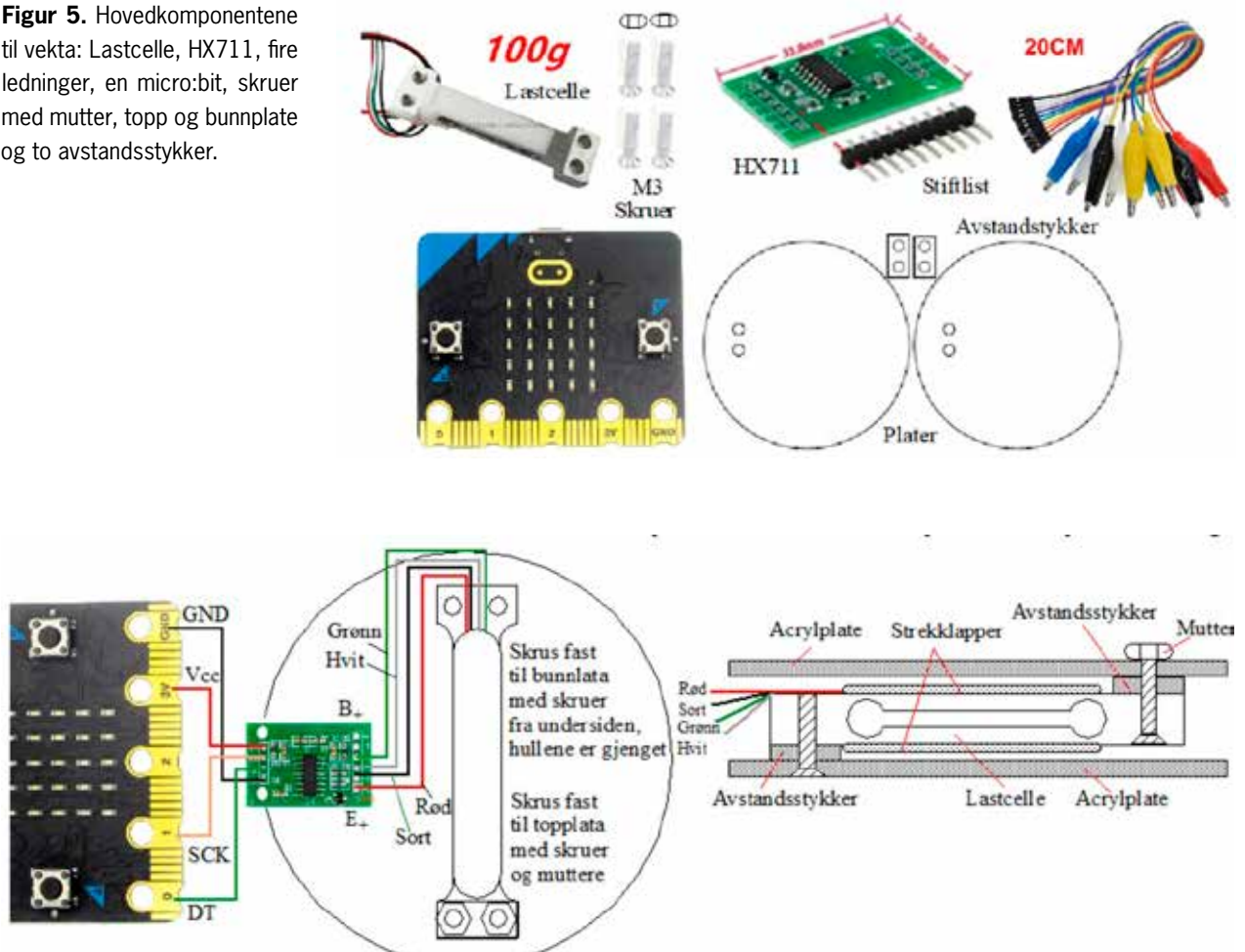
«En arm som svinger lett om et punkt A støtter seg på en kjøkkenvekt i et punkt B. Kjøkkenvekta har en oppløsning på 1 gram. Massen som skal bestemmes legges på armen ved C. Siden armen til C er 10 ganger så lang som armen til støttepunktet B (se Figur 3), vil ett gram ved C gi et utslag på 10 gram på vekta og vi har økt vektas oppløsning med en faktor 10. Tror du dette vil fungere? Kanskje vi kan laserkutte delene i et billig materiale og sende med lærerne?»

Det var fristende å prøve ut en slik løsning, og etter et par timer var prototypen klar for testing på en billig vekt brukt til dosering av kaffe (se Figur 4).

I prinsippet fungerte den modifiserte vekta som tiltenkt. Det viste seg imidlertid at nøyaktigheten ikke ble helt som forventet da det var vanskelig å lage et enkelt omdreiningpunkt (A) som gjorde at vekta gikk tilbake til utgangspunktet etter en veiing, dermed fikk vi forskjellig resultat fra måling til måling. Vi kunne nok ha oppnådd bedre nøyak-

► Kraftsensorer og vekter med micro:bit

Figur 5. Hovedkomponentene til vekta: Lastcelle, HX711, fire ledninger, en micro:bit, skruer med mutter, topp og bunnplate og to avstandstykker.



Figur 6. Oppbyggingen av den vesle vekta (0,05–100 gram).

tighet ved å forbedre omdreiningpunktet, men vi lot det være da vi fant en annen løsning: En enkel elektronisk vekt som også bruker en vektstang. I stedet for å balansere vektstanga mot en kjent masse, måler vi nedbøyningen av vektstanga ved hjelp av følsomme sensorer.

En liten hjemmelaget elektronisk vekt (0–100 g)

Som for mekaniske vekter finnes det også en rekke ulike prinsipper for elektroniske vekter. Her skal vi se nærmere på en vekt som benytter lastcelle-prinsippet (eng. *Strain Gauge*) for å måle krefter og bestemme masse. Dette er den desidert mest brukte metoden, og skyldes kombinasjonen av høy nøyaktighet, enkel implementering, relativt lave kostnader og holdbarhet. Lastceller finnes i alt fra personvekter og kjøkkenvekter til industrielle anvendelser.

Et søk på nettet ga en oppskrift på en særdeles enkel vekt som besto av to sirkulære plater av akryl, et par avstandstykker i samme materiale, en billig lastcelle, en elektronisk krets (HX711), og noen skruer og muttere [4]. Vi valgte å bruke en micro:bit

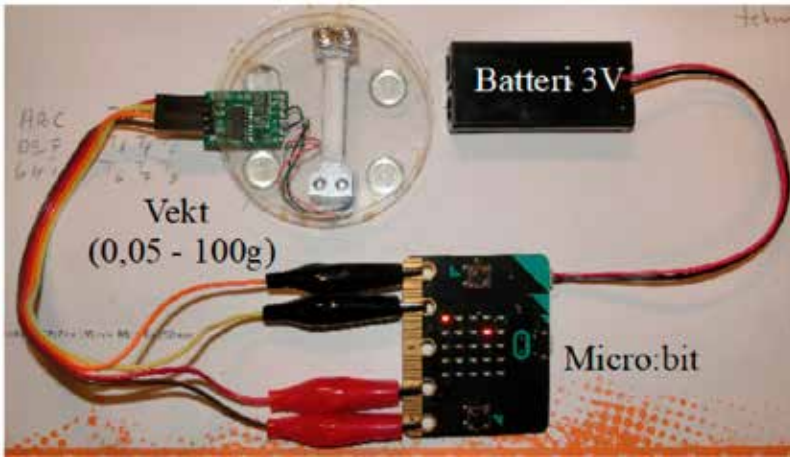
og krokodilleledninger for å lese av lastcella og vise resultatet på displayet til micro:biten (se Figur 5). Spennning får vekta fra micro:biten som igjen får den fra batteriet eller via USB-kabelen fra PC'en om den er tilkoblet. Koblings skjema og et sidesnitt av den mekaniske oppbyggingen av vekta er vist på Figur 6.

De mekaniske delene kan enten laserkuttet i akryl eller finer, eller skjæres ut i tykk kartong.

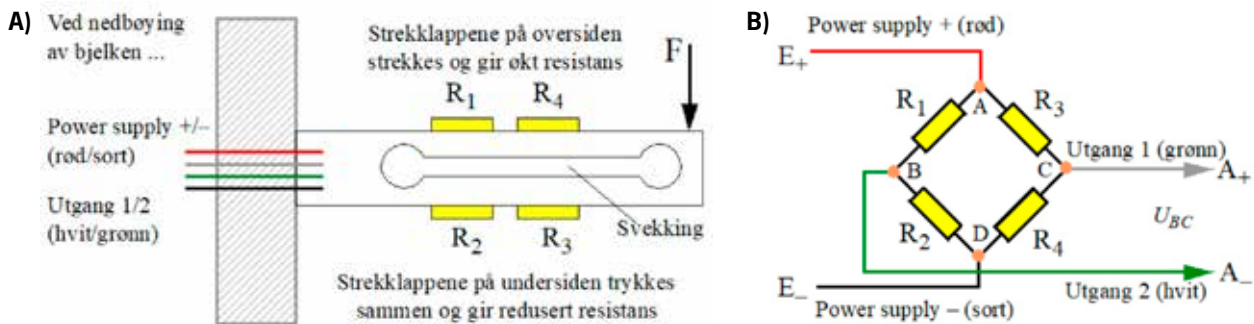
Figur 7 viser den ferdige vekta koblet til en micro:bit med batteri. Fire plastføtter er limt på undersiden. Det er brukt muttere på to av skruene da lastcellen bare er gjenget opp på den ene siden.

Virkemåte og programmering

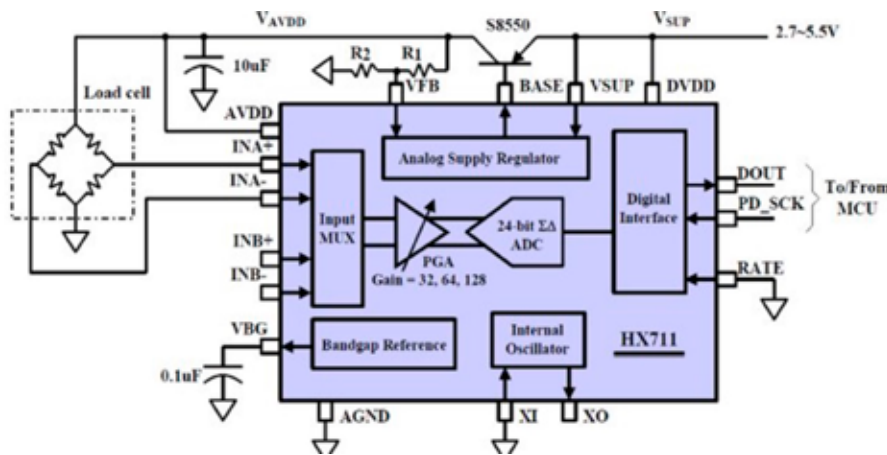
Lastcellen består av en aluminiumbjelke som er svekket av en langsgående spalt slik at det oppstår en svak bøyning når bjelken belastes, som vist på Figur 8A. På over- og undersiden er det limt fast strekkklapper som registrerer nedbøyningen av bjelken. Når en strekkklapp strekkes, øker resistansen, når den trykkes sammen, reduseres resistansen. Avhengig av bjelkens utforming og størrelsen på



Figur 7. Fysisk oppkobling av vekta med micro:bit med batteri.



Figur 8. A) Skisse av lastcellen med strekkklapper og langsgående svekking. Ved nedbøying av bjelken, vil strekkklappene på oversiden strekkes og gi økt resistans og strekkklappene på undersiden trykkes sammen og gi redusert resistans. B) Strekkklappene er koblet opp som en Weatstones målebro som omdanner endringen i resistans til en endring i spenning, U_{BC} .



Figur 9. Blokkdiagram over kretsen HX711.

svekkingen, så er den tilpasset ulike belastninger. En stiv bjelke vil passe for større vekter. Bjelken kan i tillegg være tykkere og større, eller hullet kan være mindre og dermed utgjøre en mindre svekking. En slik bjelke vi derfor kreve en større kraft for å bøyes og dermed være egnet for å måle større masser.

I alt er det plassert fire strekkklapper, to på undersiden og to på oversiden av bjelken, se tegning på Figur 8A. Disse er koblet i en brokobling som vist

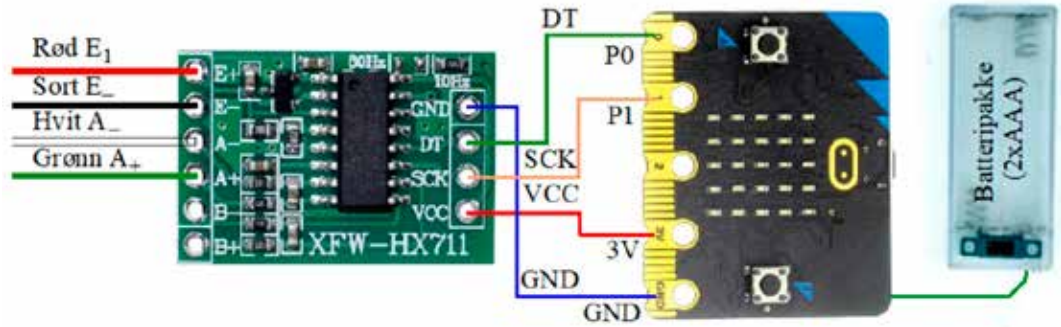
på Figur 8B.

Når bjelken bøyes ned så vil resistansen i R_1 og R_4 øke (strekkes), mens resistansen i R_2 og R_3 reduseres (trykkes sammen), slik at spenningen i punkt B reduseres, samtidig som spenningen i punkt C øker. Dersom bjelken bøyes oppover (kraften F peker oppover, se Figur 8A), så vil det motsatte skje.

Den elektroniske kretsen HX711 inneholder en spenningsforsterker og en analog til digital-omfor-

► Kraftsensorer og vekter med micro:bit

Figur 10. Oppkobling av HX711 og micro:bit med batteripakke.



Figur 11. Programmet for vekta med forklaringer.



Figur 12. Beregning og avrunding av den målte massen.

mer (ADC), som gjør om spenningen fra målebroa U_{BC} til et digitalt tall. Den leverer også en stabil spenning (E_- og E_+) til målebroa (se Figur 9). [5]

Det digitale signalet fra AD-omformerer (DT, SCK) sendes til portene $P0$ og $P1$ hos micro:biten, som vi har valgt som mottakere av signalet fra HX711 (se Figur 10). $P0$ og $P1$ velges i programmet som vi nå skal skrive.

Programmet

Figur 11 viser programmet. For tydeligere å se oppbyggingen av utregningen, har vi plukket ut denne blokken og ringet inn de ulike leddene (se Figur 12). Utregningen kan også uttrykkes slik:

$$\text{Vekt} = (\text{avrund til nærmeste heltall (målt verdi} \times 100) / 100) (1)$$

For å lese ut data fra HX711 bruker vi biblioteket *myHX711*, som vi henter fra de offisielle bibliotekene ved hjelp av blokken «Utvidelser». De gule blokkene i programmet er hentet fra dette biblioteket (se Figur 13).

Som det framgår av programkoden, så viser vi dataene på mikro:biten LED-display, hovedsakelig for å forenkle oppkoblingen og fordi tiden det tar å vise måleresultatene er ukritiske.

Vi har videre avrundet resultatet slik at displayet viser to siffer etter komma. Dette gjør vi ved å multiplisere måleresultatet (vekt) med 100, runde av resultatet og dele den avrundete verdien med 100.

Kalibrering av vekta

1. Før kalibrering, settes «scale» i programmet til 1.

Tabell 1. Vektas linearitet og nøyaktighet.

Vekt i gram	Målet verdi	Abs. avvik	Avvik i %
0	-0,07	-0,07	
10	9,97	-0,03	0,3 %
20	20,04	+0,04	0,2 %
50	50,11	+0,11	0,22 %
100	99,86	-0,14	0,14 %



Figur 13. Bibliotek for bruk av HX711, finnes under utvidelser under MakeCode.

2. *Nullpunktjustering:* Ved påslag eller når vi trykker på resetknappen på micro:biten, vil vekta automatisk nullpunktjusteres. Displayet vil likevel kunne vise en verdi fra 0–1000. Dette er offset-verdien ved 0 vekt som vil variere noe over tid, og som betyr at vekta bør nullpunktjusteres med jevne mellomrom.
3. Sett et kjent kalibrert lodd på vekta, og les av verdien på displayet, *målt verdi*. Dette er gjerne et meget stort tall.
4. Beregn korreksjonsfaktoren, «scale», fra ligning 2 og sett den beregnete verdien inn i programmet

I eksempelet under har vi brukt et kalibrert lodd på 50 gram og funnet målt verdi til 821500.

Vi vet da at korreksjonsfaktoren: «scale» blir:

$$\begin{aligned} \text{scale} &= \text{målt verdi} / \text{massen av kalibrert lodd} \quad (2) \\ &= 821500 / 50,0 \text{ g} = 16425 \text{ g}^{-1} \end{aligned}$$

I dette eksempelet settes «scale» til 16425. Etter at vi har satt inn verdien for «scale», sjekker vi at vekta viser riktig verdi og er tilstrekkelig lineær i det aktuelle måleområdet (0–100 g). Dersom vekta viser negativ masse, endres fortegnet til «scale».

Sjekk av vektas linearitet og nøyaktighet

Vi velger å teste vekta for vekter fra 0 til 100 gram for å studere linearitet og avvik fra riktig vekt. Vi antar at settet med standardvekter er korrekt inn

til nærmeste hele tidels gram:

Vi ser at i dette tilfellet så holder vi oss innenfor et maksimalt avvik på 0,3 % i området 0–100 gram. Se Tabell 1. Dette er én måling og ingen statistisk middelvei. Målingen sier heller ingen ting om endring over tid.

Vi har også undersøkt om vi får større avvik dersom vi setter loddene ute på kantene av topplata. Resultatene viser at vi får litt avvik, men ikke mye.

Konklusjon

Vi har klart å lage en vekt for mindre enn 40 kr (når vi holder micro:biten utenfor) som synes å ha en nøyaktighet på bedre enn +/-0,5 gram over et område på fra 0–100 gram. Vekta er ikke vanskeligere å bygge enn at elevene selv kan bygge og programmere den i løpet av en dobbelttime, dersom de behersker grunnleggende programmering av micro:bit.

I del 2 av artikkelen skal vi bygge en kraftsensor som har større bruksområde i fysikkundervisningen.

Forslag til videre utforsking

Her er andre forslag til hva man kan bruke vekta til:

- Undersøke hvordan måleverdien av et kalibrert lodd endres over tid
- Måle små mengder kjemikalier i kjemifaget
- Måle fordampning fra en petriskål med vann som funksjon av tiden og luftfuktigheten
- Måle vekta av planter som gror for å se hvordan den endrer seg med tiden

Komponenter

Komponentene er billige å få kjøpt hos Aliexpress. Til tross for prisen er det ikke erfart problemer av noen art med de komponentene vi har brukt.

- **Lastcelle 0–100 gram** (15,77 kr): www.aliexpress.com/item/1005003116262442.html
- **HX711** (4,42 kr): www.aliexpress.com/item/1005005997201240.html
- **Krokodilleledninger** (16,57 kr): www.aliexpress.com/item/1005004241553152.html
- **Skruer m/mutter M3 med senkehode** (6,08 kr): Clas Ohlson
- **Litt dobbeltsidig tape for å feste HX711**: Biltema
- **Micro:bit m/batteripakke** (229 kr, inkl. mva.): <https://n00b.no/collections/microbit-startpakker/products/bbc-micro-bit-v1-5-startpakke>

Prisene gjelder for ulike antall ved innkjøp og kan variere fra dag til dag. Se den enkelte nettadresse. I dag har de fleste skoler micro:bit slik at den utgjør ingen ekstra kostnad.

Måling av masse i vektløs tilstand

Og så var det dette med å måle massen til en gjenstand i vektløs tilstand.

Eksempelet er hentet fra Andy Weiers bok: *Project hail Mary*, fra 2021 [2]. Her møter vi den særdeles kreativ gymnaslæreren Ryland Grace, som mot sin vilje blir sendt ut i rommet på en årelang ferd, for å berge sola fra å bli tappet for energi. Framme ved målet møter han romvesenet Rocky og lar seg utfordre til å bestemme enhetsmassen til Rockys sivilisasjon.

Han løser veieproblemet med å binde hyssingen mellom beholderen og den ukjente gjenstanden. Beholderen fyller han delvis med vann i en mengde som han tror tilsvarer massen til den ukjente gjenstanden. Så setter han et tusjmerke på hyssingen, midt mellom beholderen og hyssingen, og setter hele systemet i rotasjon i lufta inne i romskipet. Systemet vil strekke seg ut og rotere om sitt samlede tyngdepunkt. Han justerer så mengden vann i beholderen til sentrum av rotasjonen faller sammen med midtpunktet på hyssingen. Da vet han at massen av vannet (pluss beholderen) er lik massen av gjenstanden. Massen til vannet finner han ved å måle volumet av vannet.

Så kan man diskutere feilkilder og utfordringer, og hvilke forutsetninger som må være på plass for at dette skal fungere. Dessverre er det vanskelig å gjenta forsøket i klasserommet. ■

Referanser

- [1] En micro:bit er en liten programmerbar datamaskin utviklet for å gjøre det enkelt for barn og nybegynnere å lære programmering og elektronikk. Den har en rekke innebygde sensorer, LED-display, knapper, og kommunikasjonsfunksjoner som kan styres ved hjelp av enkel kode. Micro:bit brukes ofte i utdanning for å lage interaktive prosjekter og lære grunnleggende programmering.
- [2] <https://se.dreamstime.com/arkivfoto-isolerad-antik-asiatisk-besman-image33840250>.
- [3] Eksempelet er hentet fra Andy Weiers bok: *Project hail Mary*, Penguin Books, 2021, side
- [4] www.aliexpress.com/item/1005007091430906.html
- [5] www.aliexpress.com/item/1005005287878385.html

Husk å melde adresseendring til
nfs.styret@gmail.com



Jon André Ottesen

Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo

PhD-avhandling: «Improved Brain Tumor Diagnostics Using Deep Learning on Magnetic Resonance Imaging»

Veiledere: Dr. Endre Grøvik, prof. Atle Bjørnerud, dr. Kyrre Eeg Emblem, prof. Anne Helene Schistad Solberg

I den stadig endrende kliniske hverdagen, er effektivt tidsbruk kritisk. Kunstig intelligens har vist lovende resultater innen automatisering av tidskrevende kliniske oppgaver, forbedre bildekvaliteten i MR og å redusere avbildningstiden under MR, alt dette for å forbedre den kliniske evalueringen av hjernekreft. I denne oppgaven blir kunstig intelligens-baserte metoder utviklet og evaluert for segmentering, og deteksjon av hjernemetastaser og rekonstruksjon av høyt akselererte MRI-opptak.

Likt som tidligere arbeid innenfor fagfeltet har metodene utviklet i denne avhandlingen vist evnen til å kunne nøyaktig segmentere og detektere hjernemetastaser fra MR-bilder tatt med varierende antall sekvenser og forskjellige kliniske protokoller fra to forskjellige sykehus. Segmenteringen av

hjernemetastaser ble videre bygget på med «semi-supervised» segmentering hvor det ble vist at ekstra ikke-annotert data kunne forbedre den automatiske segmenteringen og deteksjonen av hjernemetaster. Utover segmentering har vi utviklet en kunstig intelligens-basert modell for rekonstruksjon av MRI tatt under reseksjonskirurgi av hjernetumor. Ekspertene som evaluerte bildene var positive, men metoden krever ytterligere forbedringer grunnet de vanskelige forholdene under en såkalt intraoperativ MRI.

Resultatene i denne oppgaven tilsier at kunstig intelligens kan bli brukt for å segmentere og detektere hjernemetastaser, samt rekonstruere MRI under høyst uortodokse og vanskelige forhold.



Jiawei Cao

Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo

PhD-avhandling: «Luminosity considerations for plasma-based linear colliders; Plasma acceleration of positrons and muons»

Veiledere: Prof. Erik Adli, prof. Sébastien Corde og dr. Spencer Gessner

Partikkelknusere er viktige instrumenter for å forstå de minste bestanddelene i universet. Å akselerere partikler og kolliderer dem med høy energi gjør det mulig å studere prosessene ved universets begynnelse. Plasmaakseleratorer gir, sammenlignet med konvensjonelle, en mer effektiv måte å akselerere partikler på. Mens akselerasjon av elektroner i plasmaer har vært grundig studert, er akselerasjon av andre partikler ved hjelp av plasma ennå ikke godt forstått.

I denne avhandlingen utføres det for første gang kvantitative studier for akselerasjon av myoner i plasma. Resultatene viser at akselerasjon av myoner ved hjelp av

plasma er mulig innenfor et gitt sett av parametere, begrenset av myonenergi og buntlengde. Videre har akselerasjon av høy-kvalitets positronbunter i plasmaer vist seg å være utfordrende tidligere. Relevante metoder for positronakselerasjon i plasmaer blir vurdert, og et rammeverk etableres for å sammenligne disse metodene. En universell 'grense' på grunn av plasma-elektronbevegelse innenfor den akselererte positronbunten finnes for de fleste metoder. Heldigvis kan en slik grense overvinnes eller unngås. Plasmaakseleratorer har en viktig rolle å spille i markedet for å bygge neste generasjons partikkelknusere.

Bokanmeldelse

Einar Rasmussen og Camilla Helvig: *Fysikk 1*

Folkens Forlag, 2022
156 sider

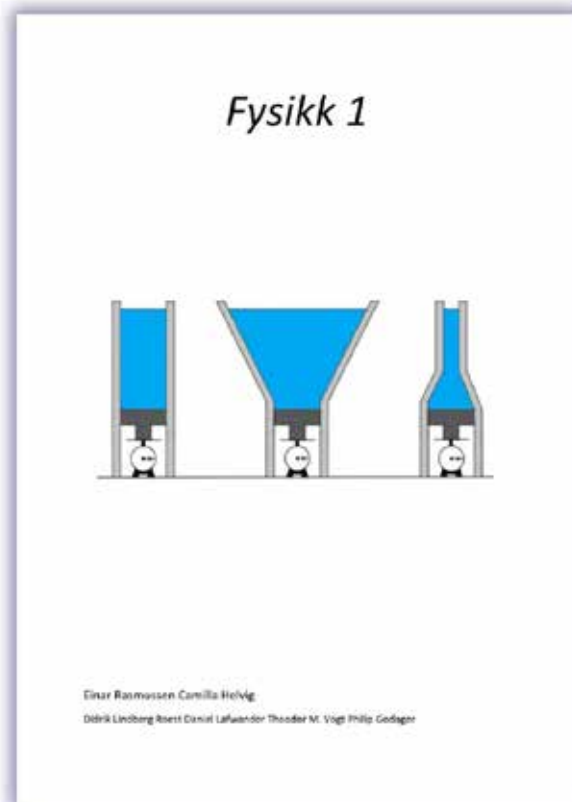
Fysikk 1 er en meget kortfattet lærebok i fysikk for elever i VG2. Forfatterne sier at målet med boka har vært å sammenfatte gjennomprøvde undervisningsopplegg i fysikk 1 til en klar og tydelig fysikkbok der fysikken blir forklart på en presis måte. Elever ved Nadderud og Eikeli videregående skole har jobbet med boka og gitt tilbakemeldinger til forfatterne.

Boka har 11 kapitler som skal dekke læreplanmålene i fysikk 1 (LK20). Så vidt jeg kan forstå, er dette ikke en innføringsbok i fysikk. Til det er den for kortfattet. Fysikk handler om mer enn å kunne regne oppgaver. Fysikkfaget i skolen bør gi elevene kunnskap om den verden vi lever i, – fra det minste til det største. Mange elever er opptatt av de store spørsmålene om hvordan verden henger sammen, og de bør få anledning til å undre seg over og prøve å forstå verden i et naturvitenskapelig perspektiv. Fysikk er ikke bare produkter som begreper, lover og teorier, men også kjennetegnet av metodene som brukes, for eksempel eksperimentenes plass i fysikkfaget. Fysikk 1 i videregående skole er et muntlig fag. Det betyr at til eksamen skal elevene kunne gjøre rede for fysiske fenomener både kvalitativt og kvantitativt. *Fysikk 1* legger i all hovedsak vekt på det kvantitative gjennom regneeksempler og regneoppgaver.

Noen av kompetansemålene etter fysikk 1, er ikke dekket i denne boka. Det gjelder først og fremst målet om at elevene skal kunne planlegge og gjennomføre forsøk. Og målene knyttet til å bruke og lage modeller eller å kunne vurdere og argumentere om problemstillinger knyttet til energi og klima, er i liten grad med.

Når det er sagt, tror jeg boka vil være meget god som repetisjonsbok. Den kompakte formen gjør at det blir enkelt å finne fram til sentrale begreper og definisjoner. Det er mange gode eksempler og oppgaver. I tillegg til fasit bak i boka, finnes det fullstendige løsningsforslag til alle oppgavene på forlagets nettsider.

Språket i boka er godt. Men det mangler en del korrektur. Enheter skal ikke skrives i kursiv, men det skal størrelser. Dessuten skrives enheten



newton med liten n, mens navnet til Newton selvsagt skrives med stor N. Når vi bruker forkortelser, skal enheter oppkalt etter en person skrives med stor bokstav (N, J, W, K osv.).

De fleste kapitlene i boka introduserer kapitlets tema med definisjoner av begrepene som så skal brukes i regneeksempler og regneoppgaver. Det er altså svært lite forklarende tekst, og det er ingen «diskusjon» av kompliserte begreper.

De fire første kapitlene handler om klassisk mekanikk, altså bevegelsesligninger, krefter, mekanisk energi, og impuls. Å forstå sammenhengen mellom ligninger og grafer er viktig i fysikk, og her er det noen gode eksempler på tegning av grafer for retlinjet bevegelse.

Fra didaktisk forskning vet vi at kraftbegrepet er vanskelig for mange elever. Her blir imidlertid begrepene kraft, masse, tyngde og tregghet, samt Newtons tre lover meget kort introdusert etterfulgt av eksempler og regneoppgaver. Jeg savner en mer utdypende problematisering av kraftbegrepet.

Energibegrepet er også utfordrende for mange, og noen omtale eller diskusjon om energibegrepets kompleksitet, finnes ikke. Imidlertid blir arbeid definert, og med utgangspunkt i Newtons 2. lov, blir endring i kinetisk energi utledet.

Impulsloven ble omtalt i kapitlet om krefter. Senere utledes bevaring av bevegelsesmengde i et støt. Dessuten defineres elastisk og uelastisk støt. Skjeve støt omtales også, selv om det ikke er et kompetansemål i fysikk 1. Mekanikken i fysikk 1 handler i hovedsak om retlinjet bevegelse.

Det er ikke så mange henvisninger til hverdagslige fenomener i boka, men i avsnittet om friksjon er både skismøring og billøpet Formel 1 brukt som eksempler, om man vil betegne skigåing og Formel 1 som hverdagslige!

Termofysikk behandles i kapittel 5. En rekke begreper omtales og defineres ganske kortfattet. Termofysikkens 1. og 2. lov blir presentert. Og som i alle kapitlene, gode eksempler og mange oppgaver.

Kapittel 6 er om elektrisitet. Dette er også et kortfattet kapittel. Vi blir imidlertid presentert for alle de grunnleggende begrepene og definisjonene. Det er mange eksempler og oppgaver. Noen av kretsoppgavene inneholder to batterier, og det er nok vanskelig for mange elever. Men det er fint å ta med noe ekstra utfordringer, særlig her hvor regneoppgaver er så sentralt. For å være litt pirkete: Vi bruker *motstand* om selve den fysiske gjenstanden, og en motstand har en *resistans*. Det er f.eks. resistansen i en leder som endrer seg med temperaturen (og ikke motstanden).

Bølger, lys og stråling som behandles i kapittel 7, har mer forklarende tekst enn i de foregående kapitlene. De mest grunnleggende begrepene blir definert og forklart. Brytning, refleksjon og interferens blir forholdsvis grundig behandlet. Interferensformelen blir også utledet illustrert med en fin figur. Det er litt overraskende at dette har fått så mye oppmerksomhet da for eksempel interferensformelen ikke hører med til kompetansemålene i fysikk 1. Kompetansemålene er imidlertid ganske vagt formulert, så det er til en viss grad lærebokforfattere (og lærere!) som må tolke hva kompetansemålene skal inneholde. Men jeg tror ikke utledning av interferensformelen er tenkt som «pensum» i fysikk 1.

Elektromagnetisk stråling og fotoner blir beskrevet i et kort avsnitt. Forsøket på å illustrere et foton som en slags partikkel med en indre bølgenatur, er problematisk. I læreplanen, riktignok til fysikk 2, omtales fotoner som kvanteobjekter. Det er et forsøk på å ikke beskrive et foton som både bølge og partikkel, men som et kvanteobjekt som hverken er en klassisk bølge eller en klassisk partikkel. Det er jo umulig å illustrere et kvanteobjekt med en konkret klassisk figur, men hvis forfatterne hadde brukt en tilnærming der de la mer vekt på at dette er modeller av virkeligheten, og ikke selve virkeligheten, ville figurene kanskje fungere bedre. Det er fristende å henvise til diskusjonen om bølge-partikkeldualisme og lysets natur i de foregående utgaver av *Fra Fysikkens Verden*. At elektromagnetisk stråling ikke består av sammenhengende bølger, som forfatterne skriver, er vel ikke riktig.

I kapitlene 8 og 9 blir vi presentert for atom- og kjernefysikk. Dessverre er de historiske betraktningene om Planck, Einstein og Bohr og deres bidrag til utviklingen av kvantefysikken, preget av en rekke historiske myter, som vi for øvrig finner i en rekke lærebøker i mange land. I nr. 1/2023 av *FFV* gjør Reidun Renstrøm rede for flere av disse mytene og forklarer hvordan historien faktisk utviklet seg. Bohrs atommodell blir imidlertid beskrevet etterfulgt av eksempler og oppgaver.

Kjernefysikken blir kortfattet beskrevet, og de grunnleggende begrepene blir definert og forklart. Videre blir blant annet, radioaktivitet (inkludert halveringstid), masse-energi-loven, fisjon og fusjon kort presentert.

Kapitlet om astrofysikk har naturlig nok mer forklarende tekst enn de fleste andre kapitlene. Men teksten er likevel stort sett meget kortfattet. Derimot blir to fusjonsreaksjoner i stjerner ganske grundig gjennomgått. I tråd med læreplanen får vi en grei gjennomgang av stjerners fødsel, liv og død. Det er et par trykkfeil: gassmolekyler er blitt til luftmolekyler et sted på s. 130, og på s. 134 fusjonerer helium til hydrogen.

Bokas siste kapittel behandler numeriske metoder og programmering. Det består bare av noen få oppgaver, og løsningene kan en finne på forlagets nettsider.

For meg fremstår denne boka som temmelig instrumentell. Med det mener jeg at den fremstiller fysikkfaget som om det består av en rekke definisjoner som kan brukes til å regne oppgaver. Men som antydning innledningsvis, fysikk er så mye mer. I boka *Fysikkdidaktikk* står det [1]: «Fysikk handler om å forstå og fortolke den fysiske virkeligheten – alt fra hverdagsfenomener til menneskets plass i universet. (...) Fysikken gir oss viktige innsikter om virkeligheten vi lever i. Den setter oss i stand til fantastiske ting som å sende mennesker ut i verdensrommet, konstruere superdatamaskiner og bruke stråling til å kurere kreft».

Fysikk 1 har ingen av disse perspektivene. Men hvis en vil ha lett tilgang til en rekke definisjoner av begreper i fysikk med dertil illustrerende eksempler og gode oppgaver, er dette en fin bok. Dessuten, hvis en så kortfattet lærebok faktisk kunne føre til at lærerne fikk mer frihet til og bedre tid til å krydre undervisningen med øvelser, prosjekter, utforsking osv. (som forfatterne skriver i forordet), ville jo det være en fin ting.

Carl Angell

Referanse

- [1] Carl Angell, Berit Bungum, Ellen Karoline Henriksen, Stein Dankert Kolstø, Rolf Jonas Persson og Reidun Renstrøm. *Fysikkdidaktikk*. Cappelen Damm Akademisk 2019 (ISBN 978-82-02-62335-7) s. 452.

RETURADRESSE:
FRA FYSIKKENS VERDEN
FYSISK INSTITUTT, UNIVERSITETET I OSLO
BOKS 1048 BLINDERN
0316 OSLO
NORGE

ISSN-0015-9247

Styret i Norsk Fysisk Selskap

President

Professor Sunniva Siem, Fysisk institutt, UiO, Kjerne- og energifysikk
sunniva.siem@fys.uio.no

Visepresident

Forsker Hilde Nesse, Institutt for fysikk og teknologi, UiB
Birkelandsenteret for romforskning
hilde.nesse@uib.no

Styremedlemmer

Rom-, plasma- og klimafysikk: Førsteamanuensis Audun Theodorsen, Institutt for fysikk og teknologi, UiT

Subatomær fysikk og astrofysikk: Professor Håvard Helstrup, Institutt for datateknologi, elektroteknologi og realfag, HVL

Industri- og energifysikk: Professor Jon Samseth, Institutt for produktdesign, OsloMet

Akustikk og optikk: Professor Torbjørn Skauli, Institutt for teknologisystemer, UiO

Biofysikk og medisinsk fysikk: Professor Pawel Sikorski, Institutt for fysikk, NTNU

Kondenserte fasers fysikk med atomfysikk: Professor Luiza Angheluta-Bauer, Fysisk institutt, UiO

Leder av Norsk Fysikklærerforening: Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs.

Vara

Professor Magnus Borstad Lilledahl, Institutt for fysikk, NTNU

Adresse

Norsk Fysisk Selskap
Fysisk institutt, UiO
Boks 1048 Blindern
0316 Oslo

Sekretær

Stipendiat Andreas Halkjelsvik Mjøs, Fysisk institutt, UiO
E-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258
Org.nr.: 940 340 829

www.norskfysisk.no

Bedriftsmedlemmer

Vi takker for støtten fra
våre bedriftsmedlemmer:



UNIVERSITETET
I OSLO



UNIVERSITETET I BERGEN



UiT Norges
arktiske universitet

