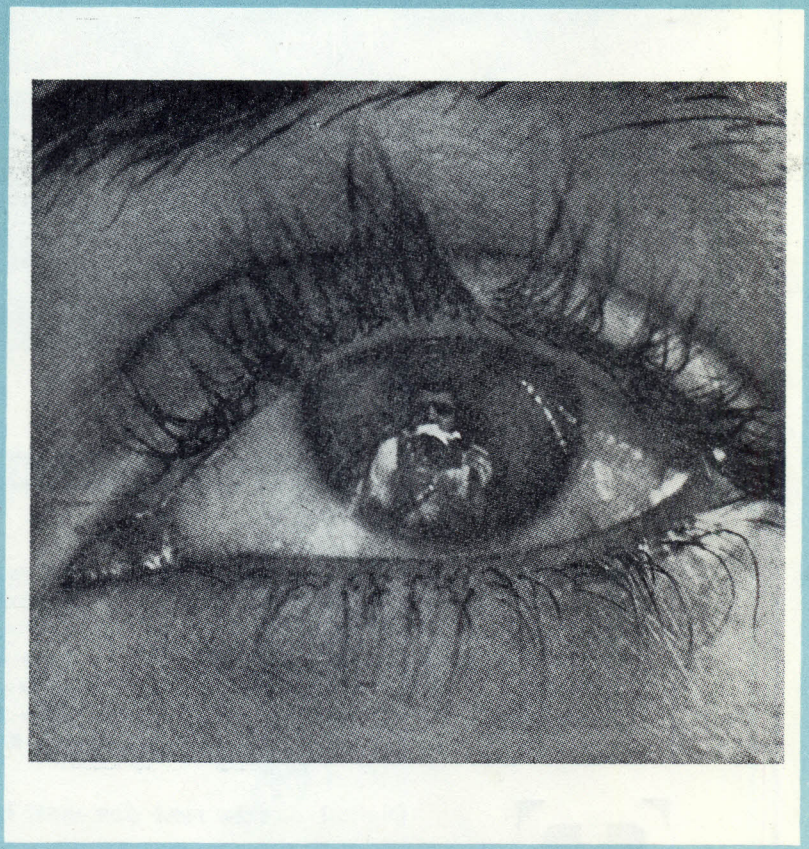
Fra Fysikkens Verden

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

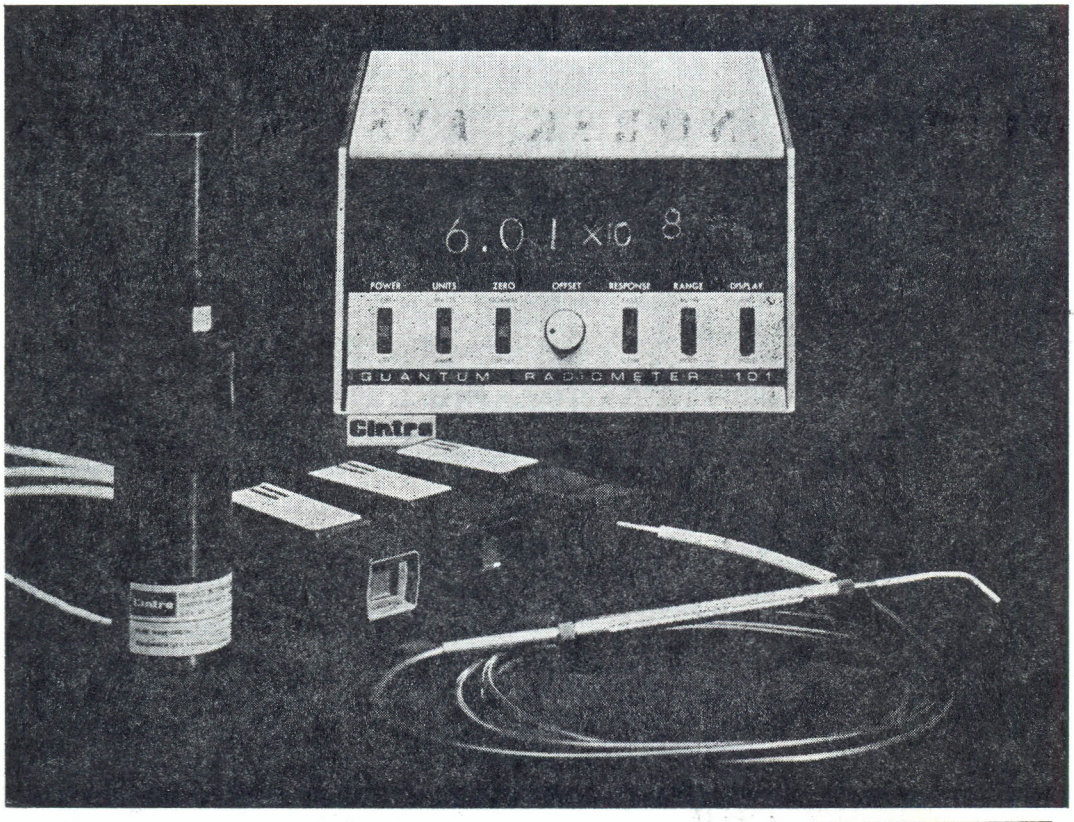
INNHOLD

Hvordan behandler nerveceller sanse-informasjon?	73
NORSAR seismologiske anlegg	80
Hva er en god linse?	88
Bøker	87, 96



Hva er en god linse? (Se artikkel s. 88)

Nr. 4 - 1969
31. årgang



Skal de måle

STRÅLINGSENERGI

Cintra

Physics International Company

Fra:

- Små gjenstander
- Store gjenstander
- Fjerne gjenstander (F. eks. stjerner)
- Mikroskopiske gjenstander (F. eks. mikrober)
- Svake kilder
- Sterke kilder

I:

- UV, synlig, infrarødt eller termisk
- Absolutte enheter
- Relative enheter
- Smale spektralbånd
- Brede spektralbånd
- Korte intervaller
- – – Kontinuerlig

Digitalt direkte med den mest komplette linje av instrumenter fra noen fabrikant

CINTRA er navnet

RØDLAND & RELLSMO A.S.

Forskningsinstrumenter

ADR.: LØRENVN. 6, OSLO 5
TLF.: 15 03 90
TELEGRAMADRESSE: DAVINOR

Fra Fysikkens Verden

Utgiver: NORSK FYSISK SELSKAP

Nr. 4 - 1969

Redaktør: HAAKON OLSEN

31. årgang

Hvordan behandler nerveceller sanseinformasjon?

Lars Walløe

Biofysikk er en relativt ung gren av fysikken, i alle fall i Norge. Faget er delt i flere disipliner, strålingsbiofysikk er kanskje den displinen som har vært dyrket lengst her hjemme. En annen sentral disiplin er studiet av de elektriske egenskapene til levende celler og vev. Disiplinen kan kalles elektrobiofysisk. Vi har i dag gode holdepunkter for at cellene i sanseorganer transformerer fysiske stimuli til elektriske signaler. Stimulus kan være mekanisk (trykk- og berøringssans), kjemisk (lukt og smak), lys (syn) eller andre. De elektriske signalene vandrer fra nervecelle til nervecelle gjennom nettverk av celler inn til sentralnervesystemet. De gir av og til opphav til bevisste opplevelser, og av og til opphav til nye signaler som vandrer ut til effektororganer (som muskulatur) og setter disse i funksjon. Signalene forandres ved hver eneste overføring fra en nervecelle til en annen i dette nettverket. Elektrobiofysikk i vid forstand omfatter også studiet av behandlingen av sanseinformasjon i nervesystemet. Det er denne grenen av biofysikken denne artikkelen skal fortelle litt om. Jeg vil også forsøke å gi noen smakebiter av den forskningen som drives på dette feltet i Norge.

De første holdepunktene for at informasjonen i nervene er kodet i elektriske signaler stammer fra Galvani's klassiske observasjoner på froskelår i 1786. På midten av 1800-tallet var denne oppfatningen alminnelig godtatt. Helmholtz målte ledningshastigheten for elektriske pulser i en nerve i 1850. Han fant at signalet gikk med en hastighet omkring 25 m/s. Han hadde dermed vist at ledningsmekanismen måtte være en helt annen enn ledning i f. eks. en kobbertråd.

Helmholtz var interessert i sanseorganenes funksjon i en lang periode av sitt vitenskapeliv. En rekke av de andre store fysikere i forrige århundre var også engasjert i disse problemene: Young, Faraday, Maxwell, Mach og Nernst for å nevne noen, og de leverte til dels geniale gjetninger om enkelte faser i informasjonsoverføringen. Disse forskerne hadde 2 typer observasjoner å bygge på:

1) De kjente anatomien til transducermekanismene relativt godt (fra egne eller andres undersøkelser).
2) De samlet inn systematiske kunnskaper om de bevisste opplevelsene som ledsager forskjellige typer stimuli. På et slikt grunnlag satte f. eks. Young fram en hypotese om transducermekanismene ved farvesansning og Helmholtz en for tonediskrimineringen i øret, som begge i hovedtrekkene har vist seg å være riktige.

De elektriske signalene i nerveceller er små og vanskelige å registrere, og skikkelige registreringer ble først gjort etter at radiorør og katodestråleoscilloskop ble deler av registreringsapparaturen, dvs. i 20-årene.

Ledningsmekanismene.

La fig. 1 representere en nervecelle. Cellen har en lang utløper, axon, som ender på en eller flere andre celler. To slike nerveterminaler er tegnet i kontakt med nervecellen i fig. 1. Kontaktområdene kalles synapser. Nervecellen

Dr. med., cand. real. Lars Walløe er førsteamanuensis i fysikk ved Universitetet i Oslo.

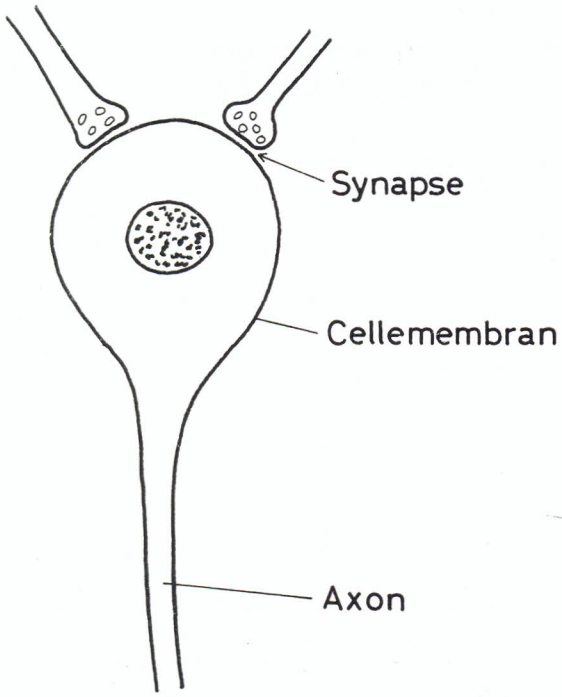


Fig. 1. Skjematisk tegning av en nervecelle og kontaktområder mellom nerveceller.

er omgitt av en lipidmembran. Det er mulig å stikke tynne elektroder gjennom denne membranen og måle potensialet til cellens innhold i forhold til væsken utenfor. Spenningsforskjellen er ca. 70 mV, innsiden er negativ når cellen er i hvile. Nervesignalene er korte reverseringer nå cellen er i hvile. Nervesignalene er korte reverseringer av dette potensialet. Innsiden blir positiv i ca. 2 ms. Dette signalet brer seg ut over overflaten til cellen med den hastigheten Helmholtz målte, og dette nervesignalet eller nerveimpulsen kan også registreres med elektroder utenfor cellen.

De fysiske og kjemiske mekanismene bak hvilemembranpotensialet og aksjonspotensialet er i hovedtrekkene forklart av britiske biofysikere: Hodgkin, Huxley og Katz. De 2 første fikk en Nobelpris for sin innsats. Jeg skal forsøke å gi en kvalitativ antydning av hva teorien går ut på:

De viktigste ionene i de vandige løsningene innenfor og utenfor cellemembranen er Na^+, K^+ og Cl^- Disse ionene er skjevt fordelt over membranen. Det er en stor K^+-konsentrasjon inne i cellen og en liten K^+-konsentrasjon på utsiden, en liten Na^+-konsentrasjon inne i cellen og en stor Na^+-konsentrasjon i væsken utenfor cellen. For enkelthes skyld kan vi tenke oss at vi starter i en situasjon der det ikke er noen spenningsforskjell mellom utside og innside. Hvis membranen bare er permeabel for K^+ vil K^+ diffundere ut langs konsentrasjonsgradienten. Ionene bærer med seg ladning og vil bygge opp et membranpotensial. Utsiden blir positiv. Det elektriske feltet som blir dannet vil bremse ionene og vi vil ende opp med en termodynamisk likevekt der nettotransporten av K^+ ville være 0. Membranpotensialet ville da være gitt ved Nernst's formel anvendt på K^+konsentrasjonene inne i og utenfor cellen.

Bernstein, som var elev av Nernst, gjettet i 1902 at dette var forklaringen på hvilemembranpotensialet. Cellemembranen er imidlertid også permeabel for Na^+ og Cl^-, og bildet er litt mer komplisert.

Fig. 2 viser Hodgkins modell av de elektriske egenskapene til cellemembranen. Figuren viser at Hodgkin postulerte at de tre ionene gikk gjennom membranen gjennom hver sine ledere, koblet i parallell. Mer konkret: at det er egne porer for hvert ioneslag. Tettheten av porer som kan slippe Na^+-ioner gjennom, vil bestemme konduktansen for Na^+ og tilsvarende for de andre ionene. Et kalium-konsentrasjonsbatteri som er entydet på tegningen, vil forsøke å holde membranpotensialet nær kaliums likevektspotensial. Natriumkonsentrasjonene forsøker å holde membranen nær natriums likevektspotensial, som svarer til en positiv innside på ca. 40 mV, siden natriumkonsentrasjonen er større på utsiden av cellen.

Når membranen er i hvile er konduktansen for natrium mye mindre enn konduktansen for kalium, og potensialet blir derfor liggende nær kaliums likevektspotensial, slik det er antydet i fig. 3.

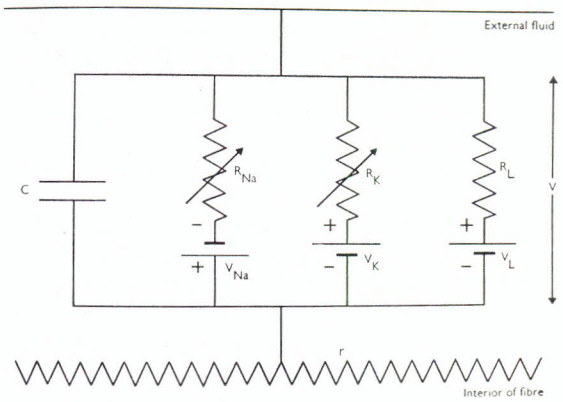


Fig. 2. Hodgkin's modell av et lite område av overflatemembranen til en nervecelle.

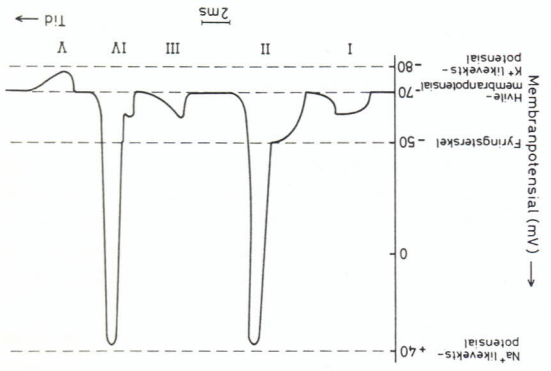


Fig. 3. Membranpotensialet som funksjon av tiden under forskjellige påvirkninger av nervecellen.

I Hodgkin's og Huxley's modell er både natrium- og kaliumkonduktansen avhengig av potensialet over membranen. Dette er antydet i fig. 2 ved at de tilsvarende motstandene er variable. Hodgkin og Huxley har postulert et sett med kjemiske reaksjoner i membranen rundt porene som kan forklare konduktansforandringene. Hovedtrekkene i denne kvantitative modellen er at både natrium- og kaliumkonduktansene øker ved depolarisering av cellen, men at forandringene i natriumkonduktansen etter en påtrykket endring i membranpotensialet kommer raskere enn forandringene i kaliumkonduktansen. Det som vil skje etter at cellen er blitt depolarisert, f. eks. ved at det blir sendt en strømpuls inn gjennom elektroden, er følgende:

I. Hvis depolariseringen er liten, får vi bare små endringer i konduktansene, og etterat strømpulsen er slutt vil membranpotensialet vende eksponentielt tilbake til hvileverdien (fig. 3, I).

II. a) Hvis depolariseringen er større, vil konduktansen for natrium øke merkbart. Natrium vil strømme inn og depolarisere cellen ytterligere. Denne prosessen vil så gjenta seg: Etterhvert som natriumioner strømmer inn og bringer med seg positiv ladning vil cellen depolariseres, og konduktansen for natrium øker ytterligere, og vi ender opp med et membranpotensial som ligger nær natriums likevektspotensial (fig. 3, II).

b) Kaliumkonduktansen øker deretter på grunn av depolariseringen. Kalium strømmer ut og membranen repolariseres (fig. 3, II).

I Hodgkin og Huxley's modell vil vi få utløst et nerveaksjonspotensial, hvis depolariseringen når opp over en bestemt terskelverdi (ca. 50 mV), slik det er antydet i figuren.

Den strømmen som går inn gjennom membranen under depolariseringen går ut til sidene og depolariserer membranen her til terskel. Signalet brer seg altså ut over celleoverflaten med en hastighet som er bestemt av hastigheten til de kjemiske reaksjonene i membranen og kabelegenskapene til cellen, dvs. den indre motstand i cellen og kapasiteten til cellemembranen (fig. 2). Motstanden i væsken utenfor cellen er så liten at man kan se bort fra den. Nervesignalet svekkes altså ikke underveis, men genereres på nytt på ethvert punkt på cellemembranen. De natrium- og kaliumionene som etter hvert lekker henholdsvis inn og ut av cellen, pumpes etter hvert aktivt tilbake av en pumpemekanisme som krever energi.

Hvordan depolariseres den første nervecellen i en kjede, dvs. sansecellen, til fyringsterskelen? Det er overbevisende vist av Katz at signalkodingen skjer i to trinn: Et fysisk stimulus transformeres først til en innadrettet strøm over cellemembranen. Den depolariseringen som følger kan fyre cellen en eller flere ganger og derved gi opphav til et tog av nerveimpulser i nerven. Den første prosessen kalles

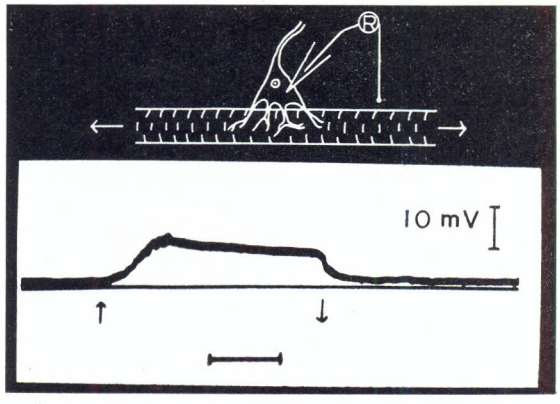


Fig. 4. *Øverst*: Tegning av en sansecelle (strekkreceptor) fra kreps. Sansecellen sitter festet til en muskelfiber som blir strukket når krepsen bøyer halen (piler). Axonet er tegnet oppover. En elektrode er stukket inn i cellen på tegningen.
Nederst: Membranpotensialet til denne sansecellen som funksjon av tiden under et kort strekk av muskelfiberen. Muskelfiberen strekkes ved den første pilen og slippes tilbake ved den andre.

gjerne transducermekanismen til cellen, den andre for codermekanismen.

Fig 4 viser et sanseorgan som også er studert en del i Oslo. Det er en strekkreseptor fra en kreps som normalt fyrer nerveimpulser når den muskelfiberen som den sitter på strekkes. Den nederste delen av figuren viser membranpotensialet under et kort strekk. Aksjonspotensial-mekanismen er blokkert i dette forsøket. Vi ser at cellen blir depolarisert under strekket. Dette reseptorpotensialet kommer i stand ved at natriumkonduktansen til cellen øker og natriumioner strømmer inn. Reseptorpotensialet øker i amplityde med økende stimulus. Hvis ikke spike-mekanismen var blokkert i dette forsøket, ville cellen ha fyrt aksjonspotensialer på toppen av depolariseringen. Fyringsfrekvensen øker med økende natriumstrøm inn i cellen. I en bestemt nervecelle er den ladningsmengden som skal til for å fyre et nerveaksjonspotensial, omtrent konstant. Informasjon om intensiteten til det signalet som treffer cellen, kodes derfor i en frekvenskode.

Hvordan overføres signalet fra en nervecelle til en annen gjennom synapsene (som er kontaktområdene mellom celler)?

De forestillingene vi har om de prosessene som foregår, stammer fra Eccles:

a) Fra den presynaptiske terminalen frigjøres et kjemisk stoff som diffunderer over spalten mellom de to cellene (fig. 1) og binder seg til bestemte mottager-proteiner. Bindingskomplekset kan øke konduktansen for natrium, kalium og klor over cellemembranen. I en litt forenklet modell kan vi tenke oss at konduktansen for natrium øker hvis ett transmittorstoff bindes til membranen, og at konduktansen for kalium øker i den postsynaptiske cellen hvis et annet transmittorstoff bindes til membranen Hvis natriumkonduktansen øker vil den post-synaptiske cellen depolariseres, og vi kan observere et raskt eksitatorisk postsynaptisk potensial (EPSP) (fig. 3, III). Ett slikt EPSP er vanligvis ikke tilstrekkelig til å bringe cellen opp til fyringsterskelen. For å få en fyring ut av denne cellen må altså flere impulser fra flere nervefibre treffe denne cellen omtrent samtidig (fig. 3, IV). Ofte er tallet så stort som flere hundre fibre. Hvis kaliumkonduktansen derimot øker vil kalium-ioner strømme ut og bringe med seg positiv ladning. Cellen vil altså hyperpolariseres til et nivå nærmere kaliums likevektspotensial, og andre eksitatoriske potensialer vil ha vanskeligere for å fyre cellen (fig. 3, V). Dette kalles inhibisjon.

Spørsmålet om nevecellen skal fyre nerveimpulser, er altså dels avhengig av størrelsen av EPSP'ene i forhold til fyringsterskelen, dels avhengig av hvor mange eksitatoriske og inhibitoriske impulser som treffer cellen i et lite tidsrom.

Behandlingen av sanseinformasjon i cellene oppover i nettverket vil altså være avhengig av koblingsmønsteret. Imidlertid har det vist seg at to koblingsmønstre går igjen fra sanseorgan til sanseorgan hos forskjellige dyr. Disse mønstrene kan kalles lateral summasjon og lateral inhibisjon.

Summasjon av eksitasjon.

5 lyskvanter som treffer netthinnen under bestemte betingelser oppfattes som et lysglimt av forsøkspersonen. Effekten er den samme om kvantene treffer i et lite punkt eller over en flate som inneholder opp til 500 sanseceller. Dette forsøket viser for det første at ett lyskvant må være tilstrekkelig til å eksitere en sansecelle, for under disse forsøksbetingelsene er det liten sannsynlighet for at flere lyskvanter skal treffe *én* celle. For det andre viser forsøket at eksitasjon fra omtrent fem første ordens celler (sanseceller) må treffe en annen ordens celle omtrent samtidig for at eksitasjonen skal slippe videre inn til sentralnervesystemet og gi opphav til opplevelsen av et lysglimt.

Forsøket viser også at eksitasjon fra ca. 500 sanseceller må konvergere på én nervecelle av høyere orden i nettverket. Disse forsøkene er senere supplert med forsøk på dyr, der det er satt elektroder inn i de forskjellige cellene i nettverket. Disse forsøkene bekrefter at at eksitasjon fra mange sanseceller konvergerer på nerveceller av høyere orden oppover i kjeden.

Jan Jansen og jeg har nylig utført en tilsvarende undersøkelse av et annet sansesystem. I skjelettmuskler finnes sanseorganer som registrerer muskelens lengde. Første ordens nervecelle transporterer informasjonen om muskellengden inn til ryggmargen (fig. 5). En annen ordens nervecelle transporterer informasjonen videre opp til lillehjernen. Det var kjent at fyringsfrekvensen i hver første orden snervecelle øker lineært med muskel-

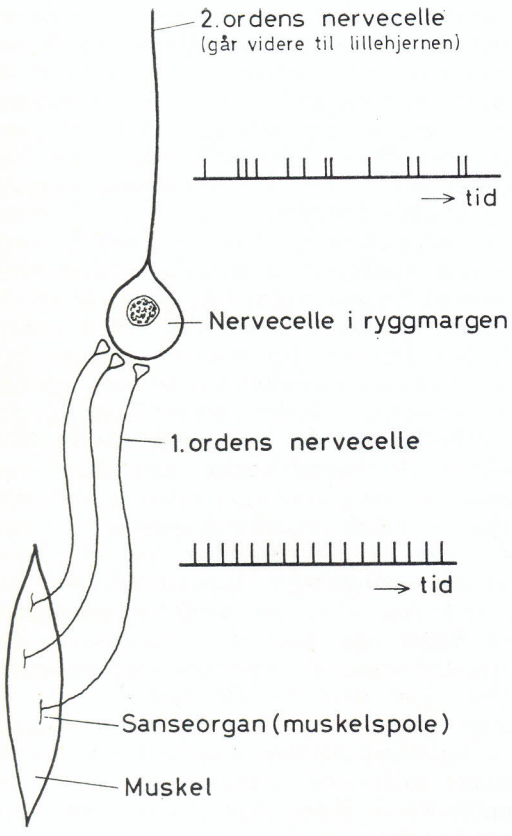


Fig. 5. Skjematisk tegning av informasjonsveien fra sanseorganer i muskler til lillehjernen.

lengden. Jansen viste at fyringsfrekvensen i annen ordens nervecelle også økte lineært med muskellengden over omtrent det samme frekvensområde. Disse nerveaksjonspotensialene ble registrert med elektroder utenfor nervefibrene. De to impulstogene var for øvrig svært forskjellige. Vi kunne beskrive dem med forskjellige statistiske parametre. Impulstoget i første ordens nervecelle er svært regelmessig slik det er antydet i fig. 5. Impulstoget i annen ordens nervecelle er svært uregelmessig og med serieavhengighet mellom nabointervaller i impulstoget. Det var ikke kjent:

a) hvor mange 1. ordens fibre som konvergerer på hver 2. ordens.
b) hvilke elektriske egenskaper den 2. ordens nervecelle har. Denne cellen er nemlig svært liten, og det hadde ikke vært mulig å registrere skikkelig intracellulært fra denne cellen.

Vårt problem var om det var mulig å forklare impulstoget i 2. ordens nervecelle fra input på cellen og synaptiske mekanismer av den typen Hodgkin-Huxley og Eccles har postulert. Intuitivt trodde vi ikke det ville være mulig, fordi vi hadde serieavhengighet mellom nabointervaller, og vi skjønte ikke hvordan Eccles' modell kunne lage en slik serieavhengighet.

Den angrepsmåten som ga resultater, var å se på summasjonen av EPSPer som en stokastisk prosess, og å simulere denne prosessen på en regnemaskin (formulert i SIMULA). Det viste seg at den simulerte modellen kunne lage et output-impulstog som var identisk med det eksperimentelt observerte (vurdert ved hjelp av de statistiske parametrene vi brukte), men bare for ett bestemt sett av to viktige parametre i modellen. Mellom 12 og 17 første ordens fibre måtte konvergere på hver annen ordens celle, og spenningsamplityden til EPSP-ene måtte være stor (dvs. omtrent halvparten) i forhold til spenningsforskjellen mellom fyringsterskelen og hvilemembranpotensialet. Under disse forholdene fikk vi også en negativ seriekorrelasjon av riktig størrelse. Den skyldes svevning mellom de regelmessige impulstogene i inputkanalene i systemet vårt. Senere har det lykkes professor Lundberg i Göteborg å registrere intracellulært i cellene, og det viste seg at forutsigelsene stemte.

En slik summasjon er vanlig i mange sansesystemer. Det organismen oppnår er at den informasjon som når sentralnervesystemet gir et gjennomsnitt av stimuluspåvirkningen over et område. Dessuten filtreres støy relativt effektivt fra signalet.

Det andre koblingsmønsteret som går igjen fra sanseorgan til sanseorgan, er lateral inhibisjon.

Igjen stammer de fundamentale idéene fra en av de store fysikerne i forrige århundre, i dette tilfelle Ernst Mach.

Fig. 6 illustrerer de observasjonene Mach gjorde i årene 1865–1868. Han lot lysmengden som ble kastet fra en flate mot netthinnen variere på tvers av flaten langs den rettlinjede kurven som er vist på figuren. Den lysintensiteten Mach subjektivt oppfattet, varierte imidlertid på en annen måte over flaten. Han observerte et lyst bånd ved grensen av den lyse flaten og et mørkt bånd ved grensen av den mørke flaten. Denne subjektive opplevelsen er tegnet inn på figuren. Disse båndene kalles gjerne Mach-bånd. Effekten er å øke kontrasten. Mach postulerte at denne effekten skyldtes at sansecellene i netthinnen var av-

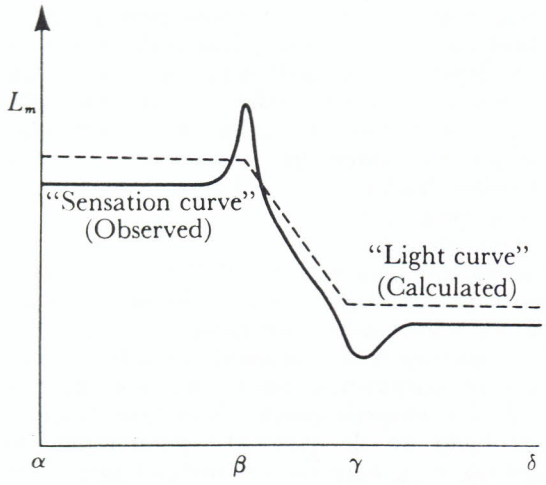


Fig. 6. Lysintensiteten som kastes tilbake fra en belyst flate (målt med fysiske instrumenter) og den subjektivt oppfattede lysintensiteten som funksjon av avstanden over flaten.

hengige av hverandre. Han viste at effekten kunne forklares hvis nabocellene hemmer hverandre, og hvis denne hemningen avtar som en bestemt funksjon av avstanden mellom de to cellene i netthinnen.

Hvis hudoverflaten vår berøres med et diffust stimulus slik som vist nederst på figur 7, oppleves berøringen som berøring i ett punkt, slik det er antydet øverst i fig. 7. Figuren er von Békésy's tegning av hvordan dette fenomenet kan tenkes å bli forklart ved lateral inhibisjon. Békésy fikk Nobelprisen for sine undersøkelser av ørets mekaniske apparat. Békésy hadde behov for en mekanisme som kunne gi økt lateral kontrast i hørebanene for å kunne forklare menneskers evne til tonediskriminering. Han fant frem til Mach's arbeider som i mellomtiden hadde vært glemt.

At disse subjektive fenomenene (fra syn. hudsans og hørsel) virkelig kan forklares ved lateral inhibisjon mellom nerveceller, ble vist av Hartline og Ratliff, som er professorer i biofysikk ved Rockefeller University. Hartline fikk Nobelprisen i 1967 for disse undersøkelsene.

Fig. 8 er fra en av Hartline og Ratliff's arbeider. De undersøkte et sammensatt øye (slik som bier og fluer har). Et enkelt øye blir belyst og nerveaksjonspotensialene i nerven blir registrert. Hvis naboøyne blir belyst, hemmes aksjonspotensialene fra det første øyet slik figuren viser. Hartline bestemte hvordan effekten avtok som funksjon av avstanden mellom øynene, og hvordan den ble summert fra flere øyne. Senere er tilsvarende elektriske registreringer gjort i en mengde andre sansesystemer. Fenomenet er utbredt og finnes f. eks. i de nervenettene som leder informasjon fra øret og hud, slik Békésy postulerte.

Foreløpig har jeg bare gjort rede for hvordan nervecellene vil behandle stimuli som ikke varierer med tiden. En interessant oppgave er å studere hvordan nervecellene vil svare på stimuli som varierer som funksjon av tiden. For små amplityder av stimulus er systemene tilnærmet lineære, og vi kan derfor få en tilnærmet fullstendig beskrivelse ved å undersøke hvordan systemet reagerer på step-input eller på et sinusmodulert inputsignal, og siden informasjonen er kodet i en pulskode går det an å bruke metoder fra signalstatistikk til å beskrive de forandringene som skjer med signalet på vei gjennom et nettverk av nerveceller. En enkelt eksitatorisk synapse vil f. eks. virke som et low-pass-filter, og vil filtrere bort sinus-svingninger i inputsignalet som har en frekvens, dvs. en moduleringsfrekvens, som ligger opp mot den gjennomsnittlige fyringsfrekvensen til den postsynaptiske nervecellen. For lave moduleringsfrekvenser vil mange systemer ha tilnærmet konstant gain, dvs. forholdet mellom amplityden i outputsignalet målt som impulser pr. sekund og amplityden i input-signalet, vil være omtrent konstant.

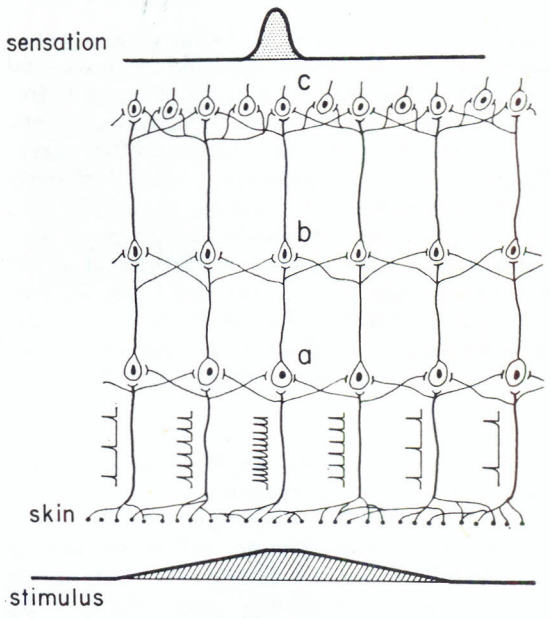


Fig. 7. Békésy's skjematiske tegning av hvordan lateral inhibisjon kan tenkes å gi skarp lokalisasjon av et diffust stimulus.

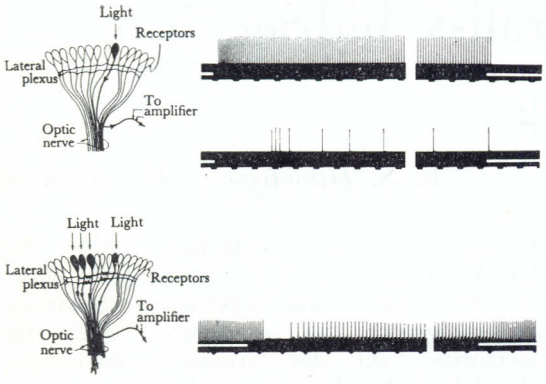


Fig. 8. *Øverst*: Ett enkelt øye blir belyst. Nerveimpulsene i nerven fra øyet er registrert ved to forskjellige lysintensiteter (som funksjon av tiden). Øverst høy intensitet, nedenfor lavere intensitet.
Nederst: Under den første delen av registreringen blir dette ene øyet belyst alene. Senere blir naboøynene også belyst.

Hvis vi har systemer med inhibisjon, f. eks. lateral inhibisjon, blir bildet met komplisert. Hartline og Ratliff har f. eks. vist at transferfunksjonen for det sammensatte øyet som de har undersøkt, mest ligner på transferfunksjonen for et band-pass-filter. Hvis intensiteten til det lyset som treffer øyet varierer sinusformet med en frekvens mellom 0.1 og 10 pr. sekund vil amplityden i outputsignalet (dvs. fyringsfrekvensen) være forsterket i forhold til den amplityden de kunne registrere når bare ett enkelt øye ble belyst, dvs. når det ikke var inhibisjon tilstede. For lavere og høyere frekvenser hadde øyet redusert gain. En tilsvarende transferfunksjon er påvist ved subjektive målinger på menneskeøyne.

Til slutt noen mer spekulative betraktninger: I visse sammenhenger kan det være naturlig å se på sentralnervesystemet som en mekanisme som treffer beslutninger. Mekanismen «sampler» tog av nerveimpulser i nervene som kommer fra sanseorganene og treffer beslutninger på grunnlag av disse «samplene». Ofte greier sentralnervesystemet å treffe de riktige beslutningene etter svært kort tid, 200 msek. eller mindre. Tenk f. eks. på en idrettsmann på startstreken. Det kan være vanskelig å skjønne at de uregelmessige fyringstogene i nervecellene kan greie å overbringe tilstrekkelig informasjon i løpet av den korte tiden som står til rådighet. Biofysikere har nylig begynt å nærme seg også dette problemet. De metodene man har forsøkt å anvende er informasjonsteori og statistisk desisjonsteori. De resultatene man har oppnådd, er kanskje ikke revolusjonerende, men de foreløpige resultater har i alle fall begynt å kaste lys over de problemene man står overfor.

Jeg håper jeg har greidd å gi en liten oversikt over elektrobiofysikkens arbeidsfelt. Det er talent og ikke kapital som er de bedrensende faktorene i denne forskningen i dag. Apparaturen er ikke urimelig dyr. Det er også mitt inntrykk at det er vanskelig å gjøre god forskning i dette feltet uten god skolering i fysikk og matematikk. De som har ydet vesentlige bidrag har alle hatt denne bakgrunnen. Det er mitt håp at samarbeidet mellom biologer og fysikere på dette feltet kan bli langt sterkere også i Norge.

Fordrag holdt ved Norsk Fysisk Selskaps årsmøte i Trondheim 12. mai 1969.

LITTERATUR:

G. von Békésy: Sensory Inhibition. Princeton University Press, 1967.
A. L. Hodgkin: The Conduction of the Nervous Impulse. Liverpool University Press, 1964.
B. Katz: Nerve, Muscle and Synapse. McGraw-Hill, 1966.
F. Ratliff: Mach Bands: Quantitative Studies on Neural Networks in the Retina. Holden Day, Inc., 1965.

NORSAR — et seismografisk bidrag til internasjonal avspenning

E. S. Husebye og O. Steinert

Innledning

Et av de store politiske problemer i vår tid er spørsmålet om stans i prøver med kjenefysiske våpen. Allerede ved nedrustningskonferansen i Génève i 1958 undersøkte man muligheten for å etablere en kontrollordning som også kunne omfatte underjordiske prøver, men det manglende kjennskap til de seismiske problemstillinger gjorde en effektiv kontroll av en slik prøvestansavtale ugjennomførlig på det daværende tidspunkt. Den begrensede prøvestansavtale av 1963 som i dag er tiltrådt av en rekke stater, berører ikke kjernefysiske eksplosjoner under jorden.

En konsekvens av dette var at arbeidet med å utvikle metoder til å registrere og analysere seismiske bølger generert av underjordiske eksplosjoner ble gitt høy prioritet. USA og England iverksatte storstilte forskningsprogram for å løse disse problemer — noe som har medført en hel fornyelse av den seismologiske vitenskap.

Som et ledd i denne utvikling fremmet USA i 1967 et forslag overfor norske myndigheter om bygging av et stort seismisk anlegg i Norge. Hensikten med anlegget var dels å bidra med data til den deteksjonsseismologiske forskning, dels å ha et kontrollinstrument ved en eventuell utvidelse av prøvestansavtalen av 1963. Etter en del forhåndsundersøkelser i felten ga det norske Storting sin tilslutning til opprettelsen av anlegget i mai 1968 — NORSAR var født.

NORSAR — the Norwegian Seismic Array* — vil fullt utbygd bestå av omkring 200 seismometre plassert i et bestemt mønster i et område på Østlandet beliggende omkring Mjøsa. Registreringsinstrumentene er samlet i 22 underanlegg — de såkalte subarrays — som hver har en diameter på vel 8 km. Det totale anlegg vil omfatte et område med ca 110 km diameter (se Fig. 1). Hver subarray består av 9 eller 10 seismometre og en elektronisk enhet for dataakvisisjon. Den sistnevnte enhet avleser de kontinuerlig registrerte analog-signaler og modulerer disse for overføring via det ordinære telefonnett til NORSAR's datasenter på Kjeller. Dette er underlagt og drives av Kjeller-institusjonenes regneanlegg (KIRA). Det eksisterer i dag bare ett seismisk anlegg av NORSAR's dimensjoner — den såkalte LASA (Large Aperture Seismic Array) i Montana, USA. Dette ble tatt i bruk høsten 1965.

På amerikansk side er Advanced Research Project Agency (ARPA) ansvarlig for utbyggingen av NORSAR, mens den norske hovedkontraktor er Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Anlegget vil etter planen være fullt operativt medio 1970, men alt nå mottar datasenteret informasjon ved hjelp av det såkalte delvis utbygde markanlegg.

Seismologisk bakgrunn

Før vi fortsetter med den videre omtale av NORSAR, er det nødvendig å gi en kort innføring i de seismiske problemstillinger som ligger til grunn for byggingen av dette anlegg.

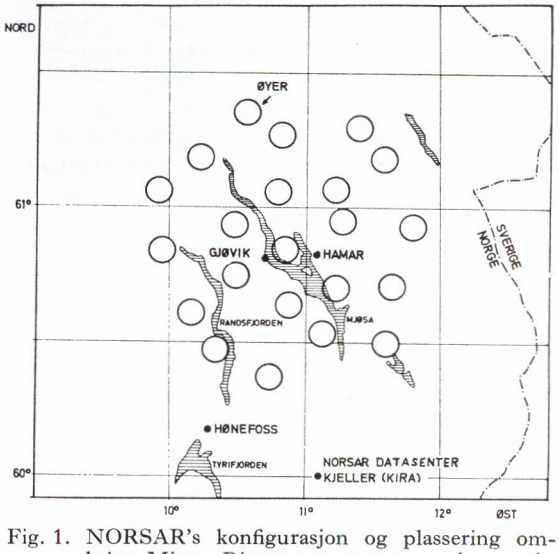


Fig. 1. NORSAR's konfigurasjon og plassering omkring Mjøsa. Ringene representerer de respektive subarrays.

* Seismisk array er betegnelsen på et stort antall seismiske måleinstrumenter som er plassert innen et område med diameter mindre enn ca 200 km.

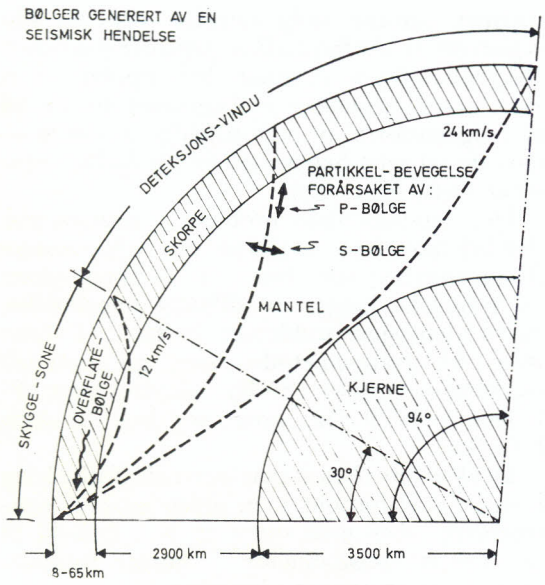


Fig. 2. Jordens oppbygning. Noen eksempler på bølgebaner og partikkelbevegelser for seismiske bølger er inntegnet.

Problemet med påvisning av kjernefysiske eksplosjoner under jorden har tre aspekter:

Deteksjon — Har noe hendt?
Lokalisering — Hvor hendte det?
Identifikasjon — Hva har hendt?

De seismiske eller elastiske bølger som genereres ved plutselig forskyvning av større masser i jorden, gjennomtrenger hele jordens indre — forutsatt at den utløste energien er stor nok. Vi skjelner mellom fire hovedtyper av seismiske bølger — dels slike som forplanter seg gjennom jordens indre — longitudinale eller P-bølger og transversale eller S-bølger, dels slike som følger jordens aller øverste skikt. De sistnevnte bølger betegnes overflatebølger, og man skjelner her mellom Rayleigh- og Lovebølger.

På grunn av eksistensen av diverse inhomogeniteter i jordens oppbygning, er seismisk bølgeforplantning et meget komplisert fenomen som omfatter både refleksjoner, refraksjon og diffraksjon av bølger i elastiske media.

En grov oppdeling av klodens indre omfatter følgende soner: en ytre skorpe (ca 30 km tykk), mantelen som har en tykkelse på omkring 2900 km, og en kjerne hvis ytre del er flytende mens den indre sannsynligvis er fast. Hastighetsvariasjoner for P-bølgen i jordens øvre mantel skaper store problemer ved deteksjon og identifikasjon av seismiske hendelser. Årsaken er at P-bølgene i dette område er sammensatt av flere P-faser som har tilnærmet samme gangtid, men forskjellige bølgebaner. Tilsvarende problematiske er de P-bølger som når ned til jordens kjerne eller penetrerer denne. Kort sagt, ved deteksjon av seismiske hendelser arbeider man fortrinnsvis med bølger generert i avstandsintervallet 30°–94° (3000–10 000 km) fra observasjonsstedet — det såkalte deteksjonsvindu (se Fig. 2).

Jordskjelvenes dyp fordeler seg fra overflaten og ned til ca 700 km. De aller fleste av disse, eller ca 70 %, er imidlertid grunne skjelv med dyp mellom 0–50 km og med en sterk konsentrasjon i grenseflaten mellom skorpen og mantelen. På den annen side er de underjordiske kjernefysiske eksplosjoner begrenset til noen få kilometers dyp. Den nevnte forskjell betraktes imidlertid enda ikke som et verdifullt identifikasjonskriterium på grunn av manglende presisjon i dybdebestemmelsen av grunne skjelv.

De eksisterende identifikasjonskriteria er ikke tilfredsstillende. Siden nøkkelen til identifikasjonproblemet ligger i de seismiske bølgers genereringsmekanisme, arbeider man med å finne bedre matematiske metoder til beskrivelse av dette fenomen og til bestemmelse av de felles karakteristika for jordskjelv innen et lite område. Preliminære resultater viser at bølgeform, bølgefaser, energifordeling mellom de respektive bølgetyper etc., fremviser markante regionale variasjoner.

Etablering av effektive identifikasjonskriteria er basert på to forutsetninger — kunnskap om hva som skjer ved genereringen av de seismiske bølger, og hvorledes de originale bølgeimpulser deformeres ved refleksjon og transmisjon gjennom de geologiske strukturer i kildens umiddelbare nærhet.

Ved antennelse av en kjernefysisk bombe plassert i et underjordisk hulrom, genereres «plastiske» bølger. I en avstand av et par hundre meter fra kilden fortsetter disse som elastiske, dvs. seismiske bølger. Det fenomen som betegnes jordskjelv oppstår når to blokker i jorden beveger seg i forhold til hverandre. En skjematisk fremstilling av de nevnte genereringsmekanismer for seismiske bølger er vist i Fig. 3.

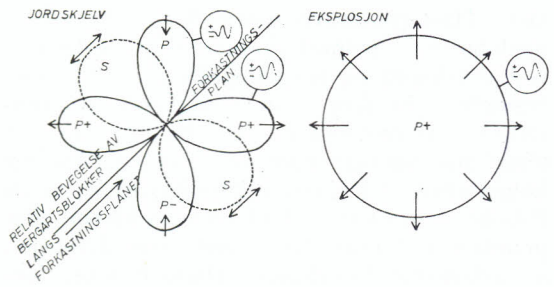


Fig. 3. Skjematisk fremstilling av seismiske genereringsmekanismer for jordskjelv og eksplosjoner. Legg merke til at eksplosjoner i det ideelle tilfelle kun genererer P-bølger og dessuten gir et symmetrisk bølgemønster.

Bestemmelse av magnitude* basert på de seismiske bølgers amplituder representerer et viktig identifikasjonskriterium fordi energifordelingen mellom de respektive seismiske bølgetyper er forskjellig for kjernefysiske eksplosjoner og jordskjelv. Et annet kriterium som tillegges vekt, er den markante P-bølgeform som karakteriserer underjordiske eksplosjoner.

The Norwegian Seismic Array — NORSAR

Som nevnt i innledningen, fant opptakten til NORSAR sted i mai 1967. Alt i slutten av dette år var første fase fullført — tre eksperimentelle underanlegg plassert henholdsvis på Øyerfjellet ved Lillehammer, i Faldalen og i Trysil, kom i drift. Av disse vil bare Øyer-arrayen inngå som en integrert del av det endelige NORSAR-anlegg. Annen og siste fase som blant annet omfatter oppbygging av et datasenter, installasjone av seismometre i borehull og etablering av transmisjonslinjer, ble påbegynt i 1968 og vil være fullført omkring årsskiftet 1969/1970.

Utformingen av NORSAR er i det vesentligste fastlagt, og kan sies å representere summen av erfaringer innvunnet ved drift av LASA og andre eksperimentelle arrays.

Før vi behandler hvordan man rent teknisk har løst de omfattende problemer med innsamling, transmisjon og analyse av de seismiske registreringer, vil det være fruktbart å se på de ideer som ligger til grunn for etablering av seismiske arrays.

Forutsetningen for anvendelse av arrays er at de markerte seismiske bølger generert av en kunstig eller naturlig hendelse, vil gi tilnærmet samme bølgemønstre når de blir registrert av de forskjellige sensorer i arrayen. Bakgrunnsstøyen derimot, hvis opphav er et stort antall hendelser av begrenset styrke, vil gi bølgemønstre av mer tilfeldig utseende — dvs. de vil med hensyn på de forskjellige sensorer være ukorrelerte.

Det fundamentale problem i seismologisk deteksjonsanalyse utgjøres av mikroseismer (bakgrunnstøy) som består av et konglomerat av seismiske bølger av tilfeldig opprinnelse. Selve deteksjonsproblemet består i å finne frem til analysemetoder som gir optimalt signal/støy-forhold (SNR). Høyfrekvente P-bølger (0.8–5.0 Hz) egner seg best til dette formål.

Det kan lett vises at den teoretiske forbedring i signal/støy-forhold i en array med N seismometre, øker med roten av N i forhold til det enkelte seismometer — under forutsetning av at støyen er ukorrelert.

Grunnlaget for deteksjon og all videre analyse av array-data, er den såkalte beamformings-prosedyre. Prinsippet for denne operasjon er svært enkelt. En addisjon av seismometerregistreringer av et signal som kommer vertikalt inn fra jordens indre, vil medføre en forbedring i signal/støy-forholdet i overensstemmelse med det tidligere nevnte. Kommer signalene inn på skrå nedenfra, introduserer man tidsforsinkelser slik at signalene er i fase før summeringen foretas (se Fig. 4). Billedlig kan vi fremstille beamformingsprosessen som om vi «ser» med arrayen i en bestemt retning — dvs. vi danner en stråle (beam) som er rettet mot et bestemt punkt i NORSAR'S deteksjonsvindu. I praksis opererer man med flere sett av tidsforsinkelser,

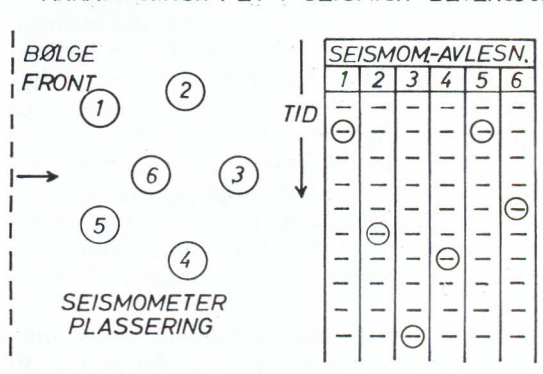


Fig. 4. De forskjellige seismometre vil registrere bølgefronten på forskjellig tidspunkt. En beam dannes ved summasjon av samhørende amplitudeverdier.

* Magnitude er en seismisk enhet som angir styrken på jordskjelv. De aller største jordskjelv som er observert har hatt en magnitude på ca 8,5 og de minste ca 3,0.

slik at man oppnår adekvat dekning av samtlige områder av deteksjonsseismologisk interesse.

Som for en antenne vil arrayens respons gjennomløpe maxima og minima — det dannes en hovedlobe og flere sidelober — når vi ved bruk av tidsforsinkelser styrer arrayen mer og mer til siden for det punkt hvorfra signalet kommer. Størrelsen på lobene, deres form og skarphet, og dermed det område på jordoverflaten som dekkes av en beam, avhenger av arrayens diameter, antall sensorer og deres innbyrdes plassering innen arrayen. Et omfattende arbeid har derfor vært nedlagt i optimaliseringen av NORSAR's sensor-konfigurasjon.

Et viktig ledd i analysen av array-data utgjøres av filtreringsprosessene. Prinsippet her er at de deler av de seismiske registreringer som ikke er relevante under en bestemt del av analysen, elimineres ved bruk av digitale filtre. Disse filtre kan inkorporeres på forskjellige trinn av dataprosesseringen.

Registrering og transmisjon av data til NORSAR's datasenter

De viktigste ledd i NORSAR's tekniske utrustning er registreringsinstrumentene — seismometrene. Konstruksjon av seismometrene er tilpasset de bølgetyper man ønsker å registrere. De kortperiodiske svingninger (0.5–3.0 sekunder) domineres av P-bølger som karakteriseres av partikkelbevegelser normalt på bølgefronten. De kortperiodiske seismometrene er derfor konstruert slik at de kun registrerer de vertikale komponenter av jordbunnsbevegelsene. For de langperiodiske seismometre er forholdene annerledes. Disse sensorer registrerer alle typer av seismiske bølger, og det benyttes derfor tre instrumenter som måler henholdsvis nord/syd-, øst/vest- og vertikal komponentene av jordbunnsbevegelsene.

For å redusere en del av bakgrunnsstøyen som genereres lokalt — f. eks. av trær i bevegelse — er seismometrene plassert i borehull fra 3 til 15 m dype. NORSAR's seismometre er som tidligere nevnt plassert i 22 grupper og hver av disse består av 6 eller 7 kortperiodiske og et sett av tre langperiodiske instrumenter. Det eneste unntak er Øyer subarray som inneholder 12 kortperiodiske sensorer.

Hovedtrekkene i dataoverføring fra det enkelte seismometer til datasenteret er som følger:

Fra seismometeret føres de registrerte jordbunnsbevegelser på kabel opp til toppen av borehullet. Sinalene sendes videre via jordkabel til subarrayens senter som foruten de langperiodiske sensorer også inneholder en større elektronisk enhet — i det følgende betegnet SLEM (Short and Long Period Electronic Module). Her blir de registrerte bølger fra samtlige seismometre i subarrayen multiplekset, avlest og deretter digitalisert. De kort- og langperiodiske sensorer avleses henholdsvis 20 ganger og 1 gang pr. sekund.

De nå digitaliserte registreringer omformes til et format med større informasjonspakking, og dataene moduleres på en form som tillater transmisjon over det vanlige telefonnett til datasenteret på Kjeller.

Samplingen, dvs. avtasting av registreringene, multipleksing og digitalisering må skje synkront ved samtlige subarrays for å unngå introduksjon av kunstige faseforskjeller mellom disse. Det sendes derfor ut synkroniseringssignaler fra datasenteret til alle subarrays. Datasenteret selv mottar tidspulser fra eksterne kilder.

Av praktiske og økonomiske grunner kontrolleres seismometre, transmisjonslinjer og det elektroniske utstyr i subarrayene fra datasenteret. Testingen skjer ved generering av spesielle signaler i den omtalte SLEM når bestemte kommandopulser mottas fra datasenteret. Testsignalene kan styres inn på forskjellige punkter langs transmisjonsveien, og etter mottagelse og analyse av dataene i datasenteret kan de elektroniske enheters virkemåte og transmisjonssystemets signaldempings- og faseforskyvningsegenskaper kontrolleres. Eksempelvis vil seismometrenes frekvens-karakteristikk kunne kontrolleres ved bruk av rene sinus-bølger eller firkantpulstog.

På grunn av sin større ustabilitet er det ønskelig at de langperiodiske seismometrene kan både testes og kalibreres fra detasentret. Justeringene vil bli foretatt ved start- og stoppsignaler til små elektromotorer som er bygget inn i disse instrumenter. For å kunne kontrollere påliteligheten av de mottatte data etter transmisjonen vil SLEM eller den tilsvarende enhet i data senteret generere et bit-mønster for en fiksert blokk av data. Dette mønster føyes til datablokken og blir kontrollert ved mottagelse i den andre enden av kommunikasjonskanalen.

Av det foregående fremgår det at forbindelsen mellom de respektive subarrays og data-

senteret er toveis. De seismiske registreringer transmitteres til datasenteret, mens blant annet synkroniseringssignaler og kommandopulser sendes motsatt vei. Ved NORSAR vil man trenge en telefonkanal med en transmisjonskapasitet på 2400 baud for hver subarray (1 binært siffer pr. sek = 1 baud). Den fullt utbygde array vil kreve en kapasitet på 50 000–60 00 baud. Dette tilsvarer maksimal ytelse av ca 1200 fjernskrivere. Transmisjon av et slikt datavolum er uten sidestykke i Norden.

NORSAR's datasenter

NORSAR's primære oppgave er ved kontinuerlig overvåking å påvise flest mulige seismiske events som ligger innenfor arrayens deteksjonsvindu. Et nødvendig krav må da være at deteksjonsanalysen kan foregå i sann tid («on-line»). Den videre analyse som omfatter identifisering og en mer nøyaktig lokalisering, baserer seg på et langt mindre materiale og kan derfor tillates utført «off-line».

Det omfattende datavolum som registreres av NORSAR, stiller store krav til datasenteret som skal motta, analysere og lagre de seismiske data.

Den endelige regnemaskinutrustning ved NORSAR's datasenter, vil bestå av to identiske IBM-maskiner — System/360 model 40, hver med en hurtighetshukommelse på 256K bytes. I begge prosessorer er det innlagt mikroprogrammerte instruksjoner for produktsummasjoner, foldingssummasjoner og andre tidskrevende spesialoperasjoner som inngår i analyseprosessene. Dette betyr at begge prosessorer er «special-purpose»-maskiner hvis regnehastigheter med hensyn til disse operasjoner, er økt med en faktor mellom 5 og 8 i forhold til en tilsvarende standardmaskin.

Alle innkommende data registreres på magnettape, og datasenterets lager på 10 000 tapes muliggjør oppbevaring av samtlige data som blir registrert i løpet av et år.

Dataregistreringen, resultatutskrifter, etc., medfører at den perifere utstyrsbestykning må være tilsvarende omfattende. Den endelige utrustning vil omfatte 12 magnetbåndstasjoner, 4 platestasjoner, 2 linjeskrivere, 2 kort-leser/punch og plotter.

Mens den ene prosessor kontinuerlig — året rundt — vil være tilkoblet måleområdet for mottagelse av data og utførelse av deteksjonsanalysen, tar den andre prosessor seg av «off-line»-oppgavene. Disse omfatter videre-behandling av de data fra foregående dag som under deteksjonsanalysen ble funnet å inneholde hendelser av interesse. Resultater vil også her bli lagret på magnettape og utskriving av seismiske bulletiner vil bli foretatt.

Begge prosessorer har tilgang til alle båndstasjoner og har forøvrig en identisk utrustning av perifert utstyr. Den «off-line»-arbeidende prosessor vil derfor til enhver tid kunne erstatte den «on-line»-arbeidende, hvis denne av en eller annen grunn skulle falle ut.

En sentral rolle spiller den enhet hvorfra man overvåker arrayen og fra hvilken man har anledning til å gripe inn i analyseprosessen. Til tross for det avanserte, automatiske prosesseringssystem som utvikles for analyse av NORSAR's data, vil det fortsatt være behov for visuell inspeksjon av de seismiske registreringer. Enheten er av den grunn utstyrt med en skjerm hvorpå man kan projisere deler av de originale seismiske data eller resultater oppnådd under analyseprosessen. Til hjelp ved analysen av selve hendelsen vil enheten ennvidere ha en skjerm hvor det overvåkete område av kloden er inntegnet, og hvor detekterte hendelser vil bli avbildet med en lysintensitet proporsjonal med hendelsens styrke (se Fig. 5).

En annen viktig enhet som i realiteten er en regnemaskin i seg selv, vil virke som mellomledd mellom datasenterets maskinutrustning og arrayen. Dens oppgaver vil bli blant annet være å kontrollere de innkomne data, foreta en prosessering og lagre dataene på magnettape.

På det nåværende tidspunkt er NORSAR's datasenter utstyrt med kun en prosessor med tilhørende utstyr som anvendes til en begrenset datainnsamling fra anlegget i dets nåværende form. Imidlertid vil flere subarrays bli tilkoblet i løpet av høsten 1969.

Deteksjonsanalysen

Som tidligere nevnt foregår analysen av de seismiske data i to trinn. Første fase er deteksjonsprosesseringen som foregår i sann tid. Annen fase er event-prosesseringen som foretas «off-line». Vi skal i det følgende gi en kort beskrivelse av disse prosesser, og omtale noen av de problemer som er relevante i denne forbindelse.

Problemet med å detektere seismiske hendelser samt gi en grov lokalisering av dem, er løst på følgende måte:

For hver av de 22 subarrays dannes det hvert 0.1 sekund 5–6 subarray beams.

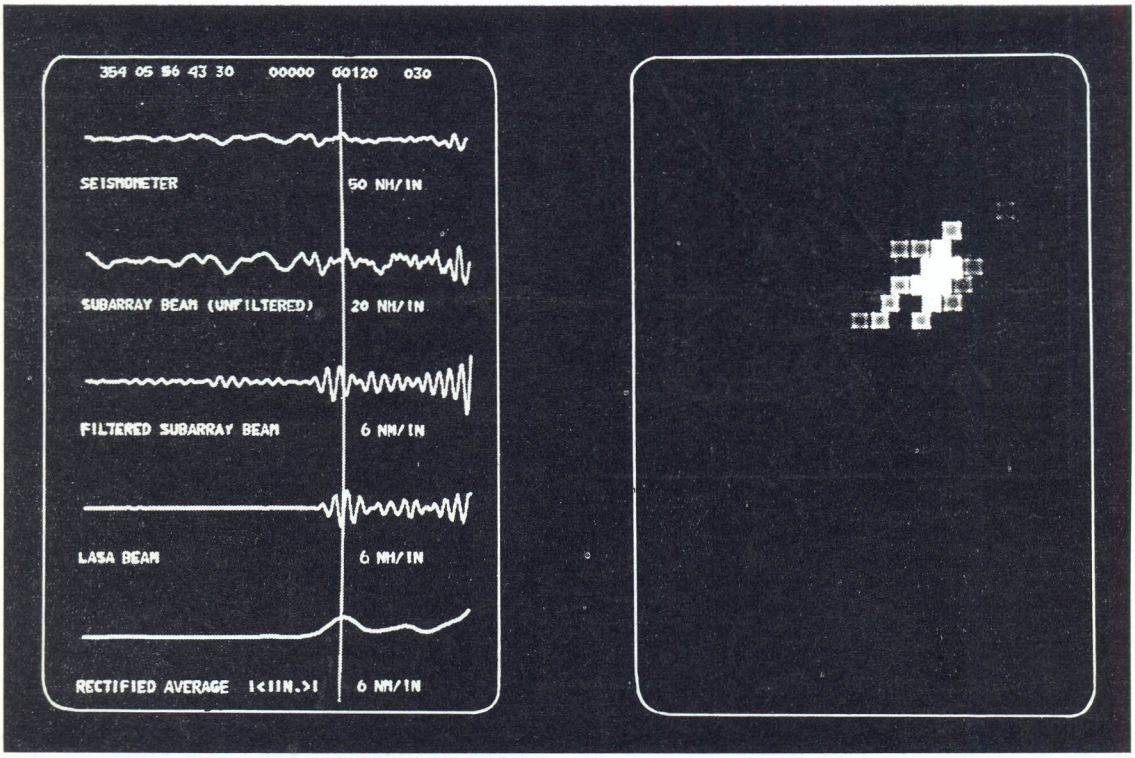


Fig. 5. Eksempel på bruk av display-utstyr som skal installeres i NORSAR's datasenter. Venstre del av figuren viser en P-bølge fra et jordskjelv ved Japan som er registrert av LASA: a) en LASA sensor, b) LASA subarray beam (ufiltrert), c) LASA subarray beam (filtrert), d) fullstendig LASA beam, e) variasjoner i bølgestyrken av LASA beamen. Tallrekken øverst til venstre inneholder tidsinformasjon om P-bølgens ankomsttid til LASA — altså dag, time, minutt, sekund og tiendedelssekund. Følgende målestokker er anvendt: trasenes lengder er 30 sekunder, de vertikale skalaer er gitt i nanometre (10^{-9} meter) pr. tomme (nm/in). Den høyre del av figuren viser beam-intensiteten som en funksjon av geografisk bredde og lengde.

En del av bakgrunnsstøyen fjernes ved å båndpassfiltrere samtlige subarray beams. Det må her påpekes at forbedringen i SNR er den samme enten filtreringen foretas før eller etter dannelsen av disse.

Basert på de filtrerte subarray beams dannes ca 350 array beams hvert 0.2 sekund. For å oppnå homogen overvåking i NORSAR's deteksjonsvindu, trengs det ca 900 array beams. Med andre ord, liten vekt er tillagt områder som er uinteressante fra et deteksjonsseismologisk synspunkt.

Et mål for energien i de respektive array beams finnes ved å bestemme middelverdien over to på hverandre følgende «vinduer» av lengder henholdsvis 1.8 og 5.4 sekunder.

En seismisk hendelse er detektert når forholdet mellom effekten i en beam i de nevnte «vinduer» overskrider en fiksert terskelverdi.

Resultatet av deteksjonsanalysen, dvs. antall hendelser, tidspunktene de ble registrert av NORSAR, kildenes geografiske posisjoner og andre relevante data, lagres på en spesiell deteksjonstape. Utførelsen av denne prosedyre er ikke en statisk operasjon, men må til en hver tid ta hensyn til endringer som kan influere på resultatet. Det kan være nødvendig å kontrollere de parametre som inngår, endre koeffisienter som definerer de digitale filtre, når støyen skifter karakter, etc. Andre problemer som naturlig reiser seg, er størrelsen av de «vinduer» hvormed man detekterer en hendelse, at terskelverdien for en deteksjon må sees i relasjon til antall falske deteksjoner som kan tolereres, osv.

Event-analysen

Dette er siste ledd i den rutinemessige analyse av de seismiske registreringer fra NOR-

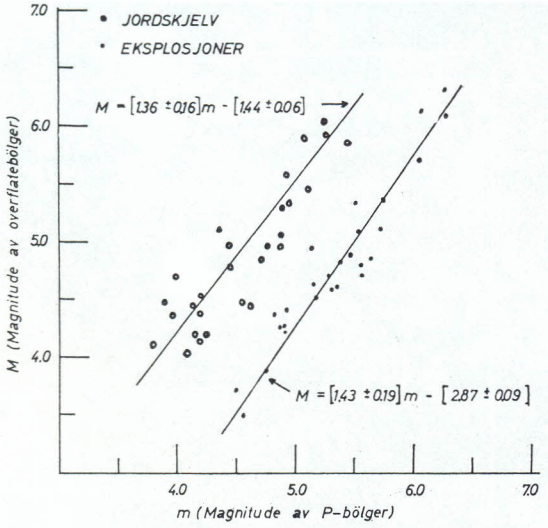


Fig. 6. Et eksempel på separasjon av kjernefysiske eksplosjoner og jordskjelv ved bruk av magnitudekriteriet for P-bølger/overflatebølger. Den nedre begrensning her som svarer til hendelser med magnitude ca 4.5, skyldes nåværende problemer med å observere overflatebølger generert av små eksplosjoner.

SAR, og samtidig den vanskeligste. Ønskemålet er komplett, automatisert analyse av alle seismiske bølger generert av den detekterte hendelse, og aller viktigst — en korrekt klassifikasjon av kilden. Disse problemer som ennå ikke er tilfredsstillende løst, representerer både en seismologisk og datateknisk utfordring.

Selve analysen baserer seg på rådata og den nevnte logg over detekterte hendelser. Nødvendigheten av å anvende de originale registreringer skyldes at en del av den informasjon som trengs under klassifikasjonsanalysen er, gått tapt under deteksjonsprosesseringen. Første ledd i event-analysen er en mer nøyaktig bestemmelse av hendelsestidspunktet, geografisk posisjon, dybde og magnitude. Lokaliseringsprosessen kan foregå visuelt, dvs. et stort antall beams konsentreres rundt den preliminære posisjon beregnet under deteksjonsanalysen, og styrken av de respektive beams projiseres på den ene av overvåkingsenhetens skjermer.

Spesielle tidskorreksjoner og bølgefrontens hastighet over arrayen beregnes og lagres permanent sammen med andre relevante data. Slik informasjon vil forenkle analysen av senere jordskjelv fra samme region.

Større hendelser genererer i tillegg til den primære P-bølge, også S-bølger og sekundære faser av P-bølgen. En maskinell identifikasjon er vanskelig da disse bølger ankommer etter P-fasen og ofte er maskert av det man betegner signalgenerert støy. En fremgangsmåte her er å anvende beamformingsprosessering slik den er beskrevet i det foregående og samholde resultatet av denne med hastighetene av de senere bølgefaser.

Den mest interessante løsning er imidlertid konstruksjon av digitale filtre som fremhever spesielle karakteristika ved de sekundære bølger. De langperiodiske sensorer som hver har tre komponenter, kan brukes til å skjelne mellom typer av seismiske bølger på grunn av de eksisterende forskjeller i partikkelbevegelsene de genererer.

Spesielle identifikasjonskriteria for å skjelne mellom kjernefysiske eksplosjoner og jordskjelv, inngår enda ikke som en del av NORSAR's programutrustning. Grunnen til dette er selvsagt at dette problemkompleks enda ikke er løst på en tilfredsstillende måte. Preliminære resultater av den intense forskning som foregår på dette område, skal kort omtales.

Den geografiske posisjon og dybden av den detekterte hendelse vil i de aller fleste tilfeller utelukke muligheten av at en kjernefysisk eksplosjon foreligger. Et annet kriterium bygger på forskjellen i den seismiske energifordeling mellom P- og overflatebølger for jordskjelv og eksplosjoner. Denne metode anses å ha en nedre grense ved magnitude ca 4.5 (se Fig. 6).

Et tredje kriterium utnytter det faktum at P-bølger generert av eksplosjoner, inneholder mer seismisk energi i de høyere frekvensbånd enn tilsvarende bølger fra jordskjelv. Et moment i denne forbindelse, er det relativt komplekse P-bølgemønster som karakteriserer jordskjelv. For optimal utnyttelse av de nevnte klassifikasjonskriteria må de parametre som karakteriserer disse, samholdes med NORSAR's registreringer fra de respektive seismiske genereringsområder.

Bare for de aller største hendelser er det mulig å gi et entydig svar på spørsmålet om en kjernefysisk eksplosjon har forekommet, og dette medfører at samtlige klassifikasjonskriteria må vurderes på bakgrunn av statistisk desisjonsteori.

Betydningen av NORSAR

NORSAR er primært et seismisk deteksjons- og identifikasjonsinstrument. Resultatet av event-analysen vil bli distribuert i form av bulletiner til seismologiske institusjoner og interesserte organisasjoner. Tapekopier av

NORSAR-data for bruk i forskningsøyemed vil bli tilsendt på bestilling. Imidlertid er dette en statisk tilstand, nemlig datakollektørens, og vi er lite tjent med at NORSAR bare fyller denne rolle. Skal dette anlegget bli et aktivum for Norge både på det tekniske og det rent vitenskapelige plan, må det satses på forskning for optimal utnyttelse av NORSAR. I det foregående er det skissert en rekke problemer, og deres løsning er på ingen måte et rent seismologisk anliggende. Det kan her nevnes at forplantning av elastiske bølger i lagdelte media representerer fysisk-matematiske problemstillinger. Det samme gjelder beskrivelse av genereringsmekanismer.

Deteksjonsprosesseringen byr på interessante datatekniske problemer. Det er her ønskelig å øke hastigheten av analysen slik at flere beams kan dannes. Et fremtidig prosjekt er direkte kommunikasjon med LASA i USA via transatlantisk kabel, som et middel til å effektivisere event-analysen. En generell formulering av dette problem er å betrakte samtlige seismologiske observatorier som ledd i én global array.

På kort sikt vil de primære oppgaver for datasenterets faste stab og det utenlandske personell som midlertidig oppholder seg der, bestå i å gjøre NORSAR operasjonsdyktig og å forberede norsk drift av dette sofistikerte anlegg medio 1970 i regi av Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd.

I fremtiden håper vi å kunne skape et kreativt forskningsmiljø rundt NORSAR. Alt nå har vi et godt samarbeid med Jordskjelvstasjonen i Bergen og dessuten god kontakt med tilsvarende institusjoner i Norden og England. Det er også kommet forespørsler om NORSAR fra andre land, slik at mulighetene for å etablere et internasjonalt seismologisk forskningssentrum på Kjeller er de beste.

Bøker

Øgrim–Ormestad–Lunde: Rom — Stoff — Tid. Fysikk for gymnaset. Øvingsoppgaver. J. W. Cappelens Forlag, Oslo 1969. 119 sider, pris ikke oppgitt.

Øgrim–Ormestad–Lunde: Rom – Stoff — Tid. Fysikk for gymnaset. Eksamensoppgaver. J. W. Cappelens Forlag, Oslo 1969. 11 sider, pris ikke oppgitt.

I tillegg til de øvingsoppgavene som allerede finnes i lærebøkene Rom — Stoff — Tid, har Øgrim, Ormestad og Lunde nå utarbeidet en egen samling med øvingsoppgaver. Ved at man i tillegg til regneoppgavene også har en rekke teorispørsmål, vil elevene få en meget god mulighet for en solid innarbeidelse av pensum. I forordet sier forfatterne at de fleste av oppgavene er laget spesielt til dette formålet. Noen få er tilpasninger av norske og utenlandske eksamensoppgaver. Man burde vel ha gjort oppmerksom på hvor disse er hentet fra. Man har i noen regneoppgaver ført opp både bokstaver og tall, slik at det er muligheter for å komme frem til et bokstavsvar som man så kan sette tallene inn i. Dette har som bekjent åpenbare fordeler, og jeg synes dette burde ha vært gjennomført konsekvent. Nå er det faktisk slik at man innen en og samme oppgave har brukt bokstaver for noen størrelser og ikke for andre. Det er vanskelig å se hvilke retningslinjer man her har fulgt. Ellers ser oppgavene greie og klare ut, og de skulle gi elevene muligheter for å lære meget fysikk.

Eksamensoppgaveheftet inneholder i tillegg til eksamensoppgavene også oppgavene til juletentamen 1967 og påsketentamen 1968. Disse tentamenene var felles for de klassene som brukte RST-bøkene. De siste oppgavene i heftet er eksamensoppgavene våren 1969.

K. J. Knutsen.

Moesta, H.: Chemisorption Ionisation in Metall-Metall-Systemen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York. Mit 102 Abbildungen. VIII, 232 Seiten Gr.-8°. 1968. Gebunden DM 58,—, US$ 14,50.

Den del av fysikken som antydes i bokens tittel er av stor betydning, både vitenskapelig og teknologisk. Forfatteren nevner i forordet termionske energiformere og jonerakettdrift som aktuelle tekniske områder, og har ellers i boken vist at vår teoretiske viten om hvordan overflatetilstander modifiseres ved absorpsjon, ennu er langt fra fullstendig.

Utgangspunktet for behandlingen av stoffet er hele tiden termodynamiske betraktninger. Dette har gitt anmelderen en følelse av å skjønne hva forfatteren ønsker å komme frem til, når de teoretiske arbeider drøftes. De eksperimentelle arbeider som beskrives, gir en utmerket oversikt over de ytterst raffinerte metoder som anvendes i moderne overflatekjemi og -fysikk, lavenergielektrondiffraksjon, feltjonemikroskopi, jone- og atomstrålemetoder og fotoelektriske undersøkelser.

Boken kan sterkt anbefales for dem som er interessert i overflater, også fordi den er meget velskrevet med et lett språk. Forøvrig er trykk og innbinding utmerket.

Jens Trætteberg.

Hva er en god linse?

— Om kvalitetskriteria og testing

Bjørn Brekke

Når en skal forsøke å kvalitetsvurdere en linse som for eksempel et kameraobjektiv, er det naturlige utgangspunkt å la den avbilde et eller annet objekt, og det nærmestliggende kvalitetskriterium er likheten mellom bilde og objekt. Jo mer bildet ligner den opprinnelige scene, desto bedre vil en si at linsen er. Skal imidlertid en slik sammenligning kunne gjøres objektivt, fordres i første omgang to ting:

1. At objektet er kjent (dvs. eksakt analyserbart).
2. At en behersker en metode til å undersøke bildet med tilstrekkelig nøyaktighet.

Et annet uttrykk for samme kvalitetskriterium er følgende: En linses godhet er bestemt av den informasjonsmengde den er i stand til å overføre fra objekt- til billedplan. Denne formuleringen er også bedre i pakt med moderne opptikks vokabular. Tidligere var det alminnelig antatt at overføringskapasiteten var bestemt av linsens såkalte oppløsningsevne, dette populære tall som angir avstanden mellom de to nærmestliggende punkter en er i stand til å skjelne fra hverandre i bildet. Bakgrunnen for en slik antakelse er ganske enkelt at jo flere detaljer linsen kan gjengi, desto bedre rekonstruksjon av objektet vil en oppnå. Etterhvert er det blitt klart at en slik anskuelse bare er delvis holdbar. Oppløsningen er bare en av flere billedparametre, så en klassifikasjon av linser etter et enkelt tall kan ofte være direkte misvisende. To kameraobjektiver med samme klassiske oppløsningsgrense kan gi bilder av meget forskjellig karakter.

Like viktig er det å huske at en bestemmelse av oppløsningsevne alltid vil være subjektiv, en kilde til usikkerhet som ytterligere aksentueres av at resultatet sterkt avhenger av detektorsystemet. Således vil en vanlig fotografisk film bestemme en betydelig dårligere oppløsningsevne for en bestemt linse enn det menneskelige øye vil gjøre. Denne usikkerheten er meget påtagelig i de klassiske oppløsningskriteria, hvorav det eksisterer minst 8. I virkeligheten er hvert enkelt av disse en rent hypotetisk eller empirisk regel som har vist seg hensiktsmessig for en bestemt type instrumenter. Mangfoldigheten av kriteria viser hvor stor vekt begrepet oppløsningsevne er blitt tillagt, men også at det er et problem som er vanskelig å behandle. Lord Rayleigh, som står for det minst spissfindige og derfor også det hyppigst anvendte oppløsningskriterium, hadde et nøkternt forhold til sitt valg av definisjon: «Denne regel er hensiktsmessig på grunn av sin enkelhet, og den er tilstrekkelig nøyaktig når en tar i betraktning den uunngåelige usikkerhet med hensyn til hva som egentlig er ment med oppløsning». Rayleigh postulerte at to spektrallinjer er optisk adskilt når lysmaksimum i den enes bilde ikke faller nærmere lysmaksimum i den andres bilde enn halve bredden av det sentrale lysmaksimum. Denne regelen er rimelig i spektroskopien, og kan anvendes med fordel til endel fotografiske formål, men gir et langtfra realistisk bilde av for eksempel vanlig visuell oppløsning.

Det er således et primært mål for optiske kvalitetsundersøkelser å få etablert objektive testmetoder som er i stand til å gi de nødvendige opplysninger om systemet som skal undersøkes. Her ser det ut som moderne opptikks metoder kan føre atskillig lenger enn de klassiske kvalitetskriteria. Man har muliggjort en enklere teoretisk behandling av optiske systemer, men samtidig er beskrivelsen blitt mer fullstendig, slik at det nå er mulig å utnytte flere egenskaper hos optiske elementer enn tidligere. Denne utviklingen har sammenheng med at man har funnet å kunne betrakte optiske systemer som lineære signaloverførere, analoge til lineære elektriske transmisjonskanaler. At systemet er lineært, vil si at utgangssignalet alltid kan finnes via lineære operasjoner når inngangen er kjent. Analogien med elektriske systemer er klar straks en bytter ut den endimensjonale variable *tid* i et elektrisk signal med koordinatene i planet normalt på aksen i det optiske system. Det optiske signal er altså todimen-

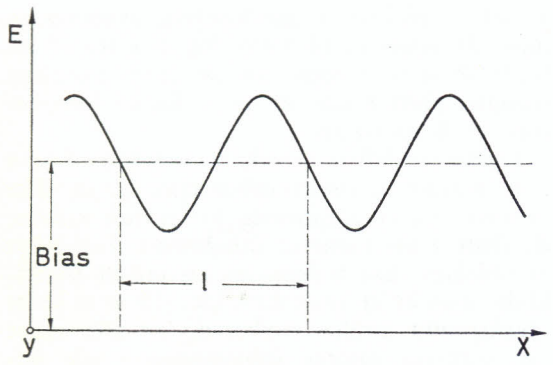


Fig. 1. Modulert sinussignal.

sjonalt, men hvis en for enkelhets skyld bare betrakter den ene av akseretningene kan en sette opp følgende til sammenligning mellom de to signaltypene (se fig. 1):

A. Elektrisk signal.

Symbol	*Størrelse*
E =	spenningsamplitude (V)
$x = t$ =	tid (sek)
$l = T$ =	periode (sek)
$f = \frac{1}{T}$ =	frekvens (perioder/sek)
$= 2\pi f$ =	vinkelfrekvens (rad/sek)

B. Optisk signal.

Symbol	*Størrelse*
E =	Lysfordeling i planet
x =	koordinat i planet (mm)
l =	periode (mm)
$f = \frac{1}{l}$ =	frekvens (perioder/mm) = (linjer/mm)
$= 2\pi f$ =	vinkelfrekvens (rad/mm)

Dessuten er det viktig å være klar over at også faseforskyvning i det optiske signal er en fysikalsk og høyst målbar størrelse. Den fremtrer som en lateral forskyvning av signalet i den akseretning en betrakter.

Det ble nevnt at et naturlig mål for en linses godhet finnes ved sammenligning av objekt og bilde. Skal imidlertid linsen kunne benyttes til flere og ulike avbildningsformål er det nødvendig å generalisere denne metoden slik at det er nok å teste linsen en gang for alle, for deretter å kunne anvende resultatet på vilkårlige objekter. Bakgrunnen for moderne optikks signalbehandling er at et hvert bilde lar seg Fourieroppløse, dvs. at lysets fordeling i planet kan uttrykkes som en sum av elementære sinus eller cosinusfunksjoner av varierende frekvens, amplitude, fase og retning i planet. At en slik dekomponering av kompliserte bilder faktisk er mulig, vil fremgå av et enkelt modellforsøk: Det koherente system i fig. 2a består av en ideell punktkilde P og en kollimerende linse (1). Som inngangssignal i et overføringssystem introduseres i lysveien et objekt med transmisjonsfunksjon T. Den plane bølgefronten vil diffrakteres i objektet, det vil si spaltes i en sum av nye, plane bølgefronter med varierende intensitet og retning θ i rommet. Objektet, som for eksempel kan være et svertningsmønster på fotografisk film (dias), vil vi i første omgang tenke oss som et enkelt gitter bestående av parallelle striper (vekslende blank og svart film). Dette har en transmisjonsfunksjon som vist øverst i fig. 3. Fouriermessig er det en enkel funksjon som lar seg beskrive ved en uendelig rekke cosinusledd med økende frekvens:

$$T(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\left(\cos\frac{2\pi}{l}x - \frac{1}{3}\cos\frac{6\pi}{l}x + \frac{1}{5}\cos\frac{10\pi}{l}x - \ldots.\right)$$

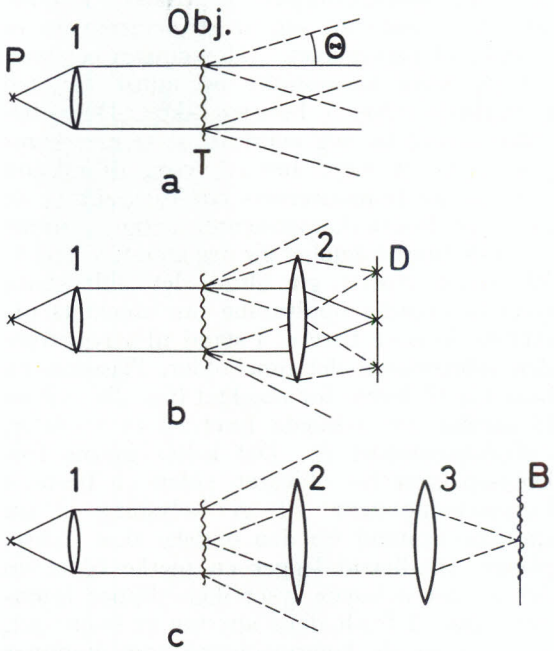


Fig. 2. Demonstrasjon av romfrekvensbegrepet.

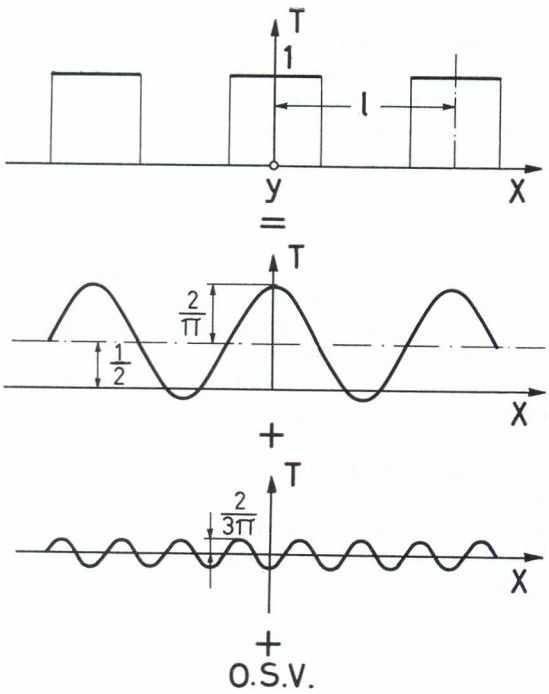


Fig. 3. Fourieroppløsning av en enkel gitterfunksjon.

De tre første ledd er skissert i fig. 3. Hver av de harmoniske i rekken gir opphav til en ny bølgefront med karakteristisk retning θ i rommet, (se fig. 4), og i tillegg er avbøyningen symmetrisk om et plan bestemt av den optiske akse og striperetningen i gitteret. I disse figurene tenker en seg at striperetningen er normal til papirplanet. Avbøyningen er størst for de høye harmoniske og minst for den grunnharmoniske i Fourierrekken. Disse betraktningene lar seg overføre på et mer komplisert objekt. Også her vil lysets diffraksjon avhenge av transparentets struktur, slik at de groveste Fourierkomponenter avbøyer minst mens de fineste detaljer gir den største vinkel θ. På denne måten gir alltid det diffrakterte lyset fullstendig opplysning om objektets utseende, hvis en bare er i stand til å registrere den informasjon det inneholder. Plasseres en linse (2) til høyre for objektet (fig. 2b), vil en få samlet det avbøyde lyset til et mønster, diffraksjonsbildet D. Det kalles gjerne frekvensspektret for objektet, siden en bestemt Fourierkomponent vil gi belysning i sin spesielle avstand fra den optiske akse i dette planet. Imidlertid legger en merke til at en del av det avbøyde lyset ikke slipper igjennom linse 2 fordi dens apertur er begrenset, og dette er de komponentene som stammer fra de fineste detaljene. Hvis en vil ha et bilde av selve objektet (transparentet), plasseres en linse (3) lenger ut til høyre (fig. 2c), men i det bilde B som oppnås, vil de tapte detaljene mangle. Derfor kan en si at linsen fungerer som et lavpassfilter.

Denne modellen, som kun var tatt med for å demonstrere romfrekvensbegrepet, lar seg ikke anvende på et alminnelig fotografisk system, da dette i sin natur er inkoherent. Det betyr at objektet ikke belyses av en enkelt punktkilde, men av en utstrakt kilde, slik at et hvert objektpunkt stråler uavhengig av alle andre og emitterer samme informasjon i alle retninger. Derfor kan en heller ikke visualisere noe frekvensspektrum i et slikt system. Likevel har linsen funksjon som et lavpassfilter for romfrekvensen, men frekvensbegrensningen i dette tilfellet skyldes diffraksjon i linsens egen apertur. Denne effekten forårsaker delvis utvisking av høyere stripefrekvenser, og over en viss grense er all informasjon tapt. Diffraksjon i objektivaperturen er selvsagt også tilstede i et koherent belyst system, den vil bare ikke være avgjørende for frekvensgrensen. I tillegg til diffraksjonen er linsen i større eller mindre grad beheftet med aberrasjoner som også medvirker til å feilfordele lyset i billedplanet. Har aberrasjonene mindre virkning enn diffraksjonen, sies linsen å være diffraksjonsbegrenset. Vanligvis er det ikke tilfelle, slik at det er aberrasjonene som bestemmer linsens filterkarakteristikk.

Som lineært invariant system er linsen ifølge teorien fullstendig karakterisert ved sin impulsrespons. I optisk forstand er impulsresponsen linsens gjengivelse av en ideell punktkilde, og vil således generelt være et diffraksjonsmønster overlagret eventuelle aberrasjonseffekter. Matematisk sett foregår avbildningen som en foldning av objektet med overføringslinsens impulsrespons:

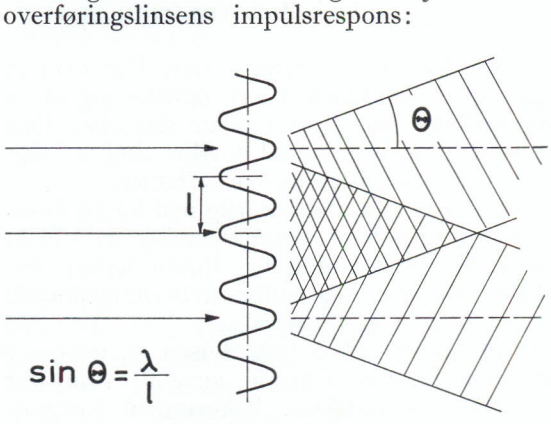


Fig. 4. Karakteristisk avbøyning i et «sinusgitter».

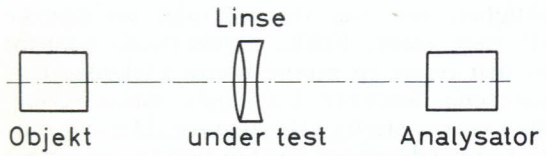


Fig. 5. Prinsipp for måling av en linses transferfunksjon.

$$b(x, y) = \int_{\text{obj.}} \int h(x - x', y - y') \, o(x', y') dx' dy'$$

hvor b og o står for bilde og objekt, (x', y') og (x, y) er koordinatene i henholdsvis objekt og bilde, mens h er impulsresponsen. En analyse av impulsresponsen er i praksis meget vanskelig fordi det her er tale om en intensitetsfordeling variert over 10–100 mikrometer. Elektriske signaloverføringssystemer lar seg alltid enklest analysere i frekvensplanet, og det er derfor naturlig å prøve å overføre disse metoder til optikken. Den optiske frekvensrespons eller transferfunksjon, som er den Fouriertransformerte av impulsresponsene, er meget lettere målbar enn impulsresponsen selv, og det vil derfor være en fordel å kunne referere avbildningsparametrene til transferfunksjonen heller enn til dens transformerte. Denne funksjonen vil, som en forstår, være en fremstilling av den før omtalte filterkarakteristikk. I frekvensplanet transformeres avbildningsligningen over til en enkel multiplikasjon:

$$B(\omega_x, \omega_y) = H(\omega_x, \omega_y) \cdot 0(\omega_x, \omega_y)$$

B og b er transformasjonspar, osv.

Prinsippet for måling av transferfunksjonen er skissert i fig. 5. Objektet er en sinusformet lysfordeling med kjent amplitude og modulasjon, av den type som er vist i fig. 1. Mønsteret, som av praktiske grunner vil være endimensjonalt (dvs. variere bare langs den ene av akseretningene i planet), kan for eksempel fremstilles som et svertningsmønster på fotografisk film. Bildet som linsen danner analyseres med hensyn på modulasjon, f. eks. med et fotomultiplikatorsystem, samtidig som frekvensen i objektet varieres fra null til en maksimalverdi. Transferfunksjonen er generelt en kompleks størrelse:

$$H(\omega_x, \omega_y) = H(\omega_x, \omega_y) \, e^{j\varphi(\omega_x, \omega_y)}$$

Forholdet mellom modulasjon i bilde og objekt utgjør modul i funksjonen. Dersom det lar seg arrangere en tilfredsstillende referanse, vil også den *romlige* faseforskyvning kunne registreres, men i alminnelighet er det modulasjonsfunksjonen som har størst interesse.

Så langt har en oppnådd en teoretisk sett fullstendig beskrivelse av linsens avbildningsegenskaper, men vel å merke bare i *en* bestemt retning i planet. Siden linsen ikke er ideell, og dens feil heller ikke vil være rotasjonssymmetriske, vil asimutvinkelen i planet inngå som en naturlig parameter. For en fleksibelt anvendbar linse er det også en rekke andre parametre det generelt må tas hensyn til. Samlet har en:

1. Lysets bølgelengde.
2. Asimutvinkel.
3. Objektets vinkelplassering ut fra optisk akse.
4. Fokuseringsgraden i billedrommet.
5. Apertur.
6. Forhold objekt-/billedavstand.

Tilstrekkelig variasjon av et så stort antall parametre ville imidlertid føre til et utall målinger. Dessuten ville datamengden blitt altfor uoversiktlig til å kunne utnyttes i praksis, så selv forsøk på en tilnærmelsesvis fullstendig linsebeskrivelse er uhensiktsmessig. Av disse grunner vil en på forhånd spesifisere linsens anvendelse så nøye at antall parametervariasjoner reduseres til et minimum. For de fleste praktiske formål, og med rimelige krav til nøyaktighet, vil det være nok med størrelsesorden 10 målinger eller mindre.

Den ideelle linsen har, som antydet, en transferfunksjon som i sin helhet er bestemt av aperturens diffraksjonsbegrensning. Siden dette er en restriksjon som følger av lysets endelige bølgelengde, er en linse med bedre respons ikke fysikalsk realiserbar, men også fremstillingen av virkelig diffraksjonsbegrensede objektiver er i praksis umulig. Fig. 6 viser en sammenligning av transferfunksjonene for en diffraksjonsbegrenset og en aberrasjonsbegrenset linse ved forskjellige aperturer. En legger merke til at avviket mellom ideell og praktisk respons er størst ved stor apertur. Dette er naturlig nok fordi aberrasjonskorreksjoner blir vanskeligere når aperturen øker. Hensikten med å ta opp transferfunksjonskurvene for en linse er senere å kunne vite hvordan linsen, brukt i en bestemt sammenheng, vil forme det aktuelle bilde, eller om en vil, overføre et gitt signal. Å anvende

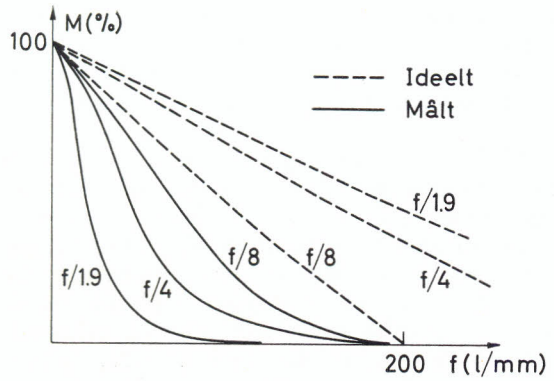


Fig. 6. Transferfunksjonskurver for en aberrasjonsbegrenset linse ved tre aperturer sammenlignet med ideelle (diffraksjonsbegrensede) kurver. (*f* langs aksen står for frekvens).

testresultatene i praksis er imidlertid ikke så enkelt som teorien kan gi inntrykk av. For det første er et komplisert bilde ikke så lett å Fourieranalysere, og for det andre er en sterkt avhengig av det menneskelige øyet i vurdering av bildets kvalitet. Øyet er i så måte et meget ubehagelig instrument å ha med å gjøre, siden analysen foregår i den enkelte persons hjerne. Men det er ikke bare vanskelig å vurdere et ferdig bildes kvalitative egenskaper. I like stor grad byr det på problemer å spesifisere sine krav til den linse som forutsettes å danne et bilde med spesielle egenskaper, eller med andre ord å skissere den transferfunksjonskurve som gir det ønskede bilde. Disse problemstillingene, å evaluere et bilde på bakgrunn av transferfunksjonskurven, eller omvendt, er naturligvis to sider av samme sak. Likevel er det i virkeligheten, av de grunner som er nevnt foran, vanskeligst å overføre billedkvalitet til en frekvenskurve. Analyserbarheten avhenger selvsagt av hvilken type bilder en har med å gjøre. Det som vi i alminnelighet tenker på som fotografier, vanlige amatørbilder, er så å si umulig å kvalitetsvurdere objektivt, fordi det ikke finnes billedkvalitetskriteria som er eksakte nok. En står overfor to problemer:

1. Å bestemme det riktige (beste) bilde.
2. Å Fourieranalysere bildet.

Punkt 1 er ikke realiserbart når det gjelder for eksempel landskapsbilder og portretter, fordi diffuse begreper som smak og behag nødvendigvis må spille inn og umuliggjøre en objektiv vurdering. Et «riktig» bilde eksisterer ikke i slike tilfeller. Punkt 2 kan en tenke seg er mulig med en viss grad av nøyaktighet, selv om de praktiske problemene vil være store. Enkle, regelmessige mønstre av den typen en gjerne møter i teknisk sammenheng, kommer i en helt annen stilling vis a vis transferfunksjonskurven. Det subjektive kvalitetsbegrepet har falt bort, og som regel er slike bilder overkommelige rent Fouriermessig. Jo enklere bildet er i sin struktur, desto lettere er det å anvende Fourieranalysen og derved transferfunksjonen i praksis. Som enkleste tilfelle kan en tenke seg at linsen forutsettes å skulle avbilde et regelmessig stripemønster av den typen som er omtalt foran (se fig. 3). Med funksjonens Fourierrekke i tankene er det relativt lett ut fra transferfunksjonen å danne seg et inntrykk av hvor godt linsen vil gjengi linjene. Jo raskere linsens transferfunksjon går mot null, jo mer vil bildet nærme seg til en sinusfunksjon, fordi flere av de høyere harmoniske faller ut.

Når dette er sagt, er det også antydet at det finnes en oppløsningsgrense, men i virkeligheten er det nødvendig å operere med flere slike, avhengig av hvilken metode en bruker til å registrere bildet. For eksempel vil opptak på fotografisk film vanligvis kreve en modulasjon på ca. 10 %, mens det menneskelige øye faktisk er i stand til å skjelne helt ned til 1–2 %. Når en da tar i betraktning at transferfunksjonskurven har en tendens til å flate ut i området under 10 %, er det klart at det ikke er realistisk å angi noe absolutt tall for linsens oppløsningsevne. Det er interessant å legge merke til hvor ulike to linser kan være selv om de fotografisk har samme oppløsningsgrense. Fig. 7 viser to slike frekvensresponser *a* og *b*. Fotografier tatt av samme scene med disse linsene vil gi et meget forskjellig inntrykk, fordi linse *a* gjengir med

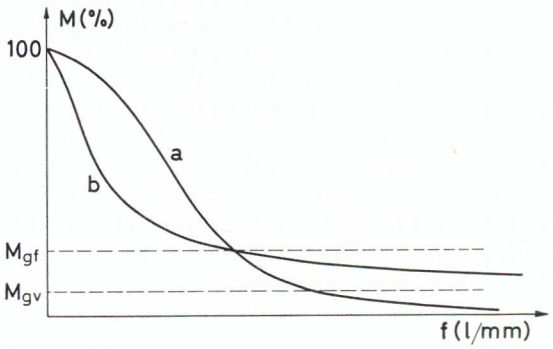


Fig. 7. To ulike linser. *a* har større kantskarphet enn *b*. Fotografisk har de samme oppløsningsgrense (M_{gf}). Visuelt har *b* større oppløsningsevne enn *a* (M_{gv}).

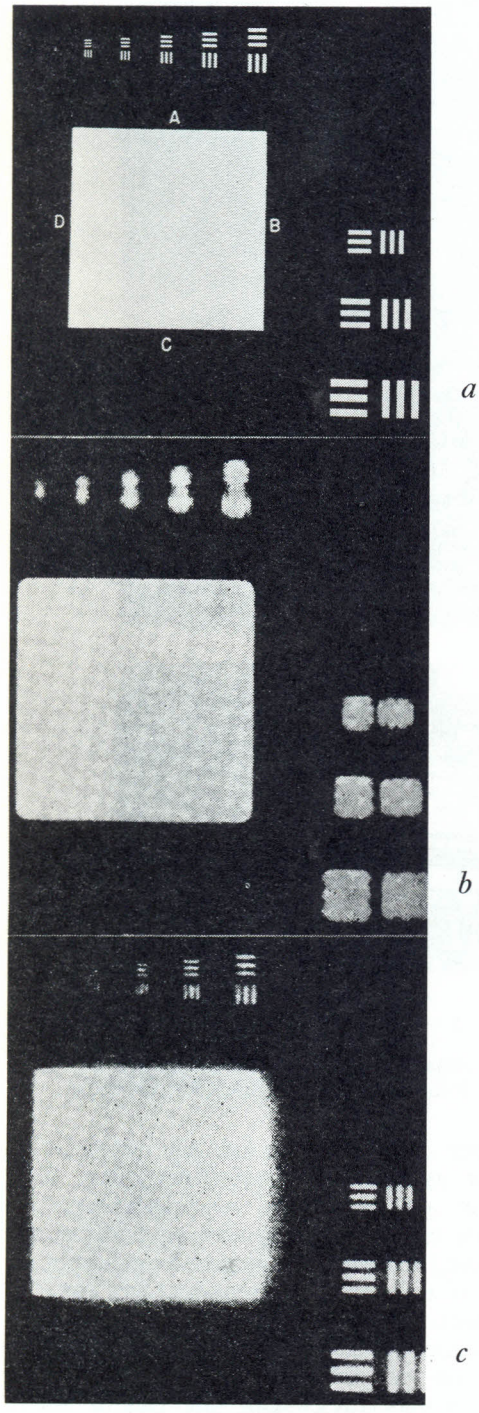


Fig. 8. *a*) viser det benyttede testmønster, et skarpt avgrenset felt og stripegrupper for kontroll av oppløsningen. *b*) er mønsteret sett gjennom linse *a* (fig. 7). *c*) er mønsteret sett gjennom linse *b* (fig. 7).

bedre kantskarphet enn *b*. Det er rimelig at denne egenskapen er bestemt av forholdsvis lave frekvenser: Grenselinjen mellom mørke og lyse partier i et komplisert bilde har alltid sammenheng med de grovere trekk i mønsteret, og en slik overgang eller kant vil ikke synes skarp med mindre de lavere harmoniske i Fourierrekken er gjengitt med tilstrekkelig modulasjon. Følgen er at bildet tatt med linse *b* vil synes uskarpt i forhold til det første, og vil av de fleste bedømmes som mindre bra. Oppløsningsgrensen, bestemt av modulasjonsgrensen M_{gf}, er likevel den samme i de to bildene. Karaktertrekkene hos de visuelle bilder gitt av de samme linsene vil imidlertid være vesentlig annerledes. Den visuelle oppløsning (bestemt av grensen M_{gv}) er svært ulik, og det fører til at linse *b* avslører langt flere detaljer i objektet enn *a*. I tillegg til dette er effekten hos de lave frekvenser beholdt, og det vil nå faktisk herske usikkerhet med hensyn til hvilket bilde som er «best». Noen ville fortrekke *b*, fordi dette er mer detaljrikt, om enn med lav kontrast i detaljene. Andre vil fremdeles si at *b* er uskarpt, og derfor velge *a*. En undersøkelse angående dette blant en tilfeldig utvalgt gruppe menmesker, viste at ca. 50 % valgte bilde *a*. Dette resultatet forteller ganske klart at en visuell oppløsningstest av konvensjonell type ville ført til galt resultat for denne gruppens vedkommende. Fig. 8 illustrerer tydelig den fundamentale forskjell mellom de to linsenes egenskaper ved visuell betraktning. En må her tenke seg at fotografiene er laget med et system som har samme modulasjonsgrense som øyet. Det samme gjelder forøvrig fig. 9. 8*a* er en kopi av det benyttede testmønsteret. 8*b* viser hvordan linse *a* gjengir mønsteret, med dårlig oppløsning, men med skarpe kanter i det hvite feltet. Linse *b* danner bildet i 8*c*. Her er forholdet motsatt, med en rekke strekmønstre oppløst, men med diffuse kanter i det hvite kvadratet. Fig. 9*a* og *b* er eksempler på de samme effekter i mer kompliserte bilder, hvor *a* refererer til linse *a* og *b* til linse *b*. Det er tydelig at bilde *a* virker skarpest i de grovere trekk, mens *b* er mer diffust. Hvis en derimot studerer detaljene, for eksempel i kronens ornamenter, er mønsterets detaljer klarere i *a*. Siden en del av effekten har lett for å bli borte i trykken, har en i bildene 9*c* og *d* gjengitt detaljutsnitt fra dette område av bildet. Det kan imidlertid være interessant å øke betraktningsavstanden fra

Fig. 9. Keiser Henrik 2. (973–1024) med briller. (Glassmaleri i Strassburg).
a) Gjengitt av linse *a*: God skarphet i grove detaljer.
b) Gjengitt av linse *b*: Oppløsningen bedre enn i *a*, men kantskarpheten er dårligere.
c) og *d*) er detaljer fra henholdsvis *a*) og *b*) for å vise forskjellen i oppløsning.
(Bildene er trykket med tillatelse av «Zeiss Information», Carl Zeiss, Oberkochen).

vanlig leseavstand (20 cm) til 1–2 meter. Da er en ikke lenger i tvil om at bilde *b* er det beste. Det viser hvor lite det hjelper med høy oppløsning hvis den ikke kan utnyttes.

En konklusjon på de forutgående betraktninger vil være at den informasjon en er i stand til å trekke ut av transferfunksjonen foreløpig er begrenset, men at dette skyldes svakheter ved våre registreringssystemer og ikke mangel på informasjon i kurven. Det er neppe realistisk å anta at en vil bli i stand til å manipulere med detaljene i frekvensspektret, i alle fall når det gjelder kompliserte bilder, men mange av de grovere trekk er en allerede i stand til å overføre til visuelle begreper. For det første kan alle oppløsningsgrenser avledes av transferfunksjonen, da i form av de tilsvarende modulasjonsgrenser. Foruten om detaljgjengivelse og kontrasten i detaljene, forteller kurven om kantskarpheten (kontrast i de grovere komponenter, engelsk: acutance). Videre får en opplysning om falsk oppløsning (inversering av kontrasten, slik at mørke og lyse felter byttes om).

Når transferfunksjonen må ansees for å være et bedre kvalitetskriterium enn noen andre eksisterende sådanne, er det i første rekke fordi den bygger på en enhetlig, enkel teori, er et objektivt mål og er forholdsvis enkel å bestemme. En bør i denne forbindelse

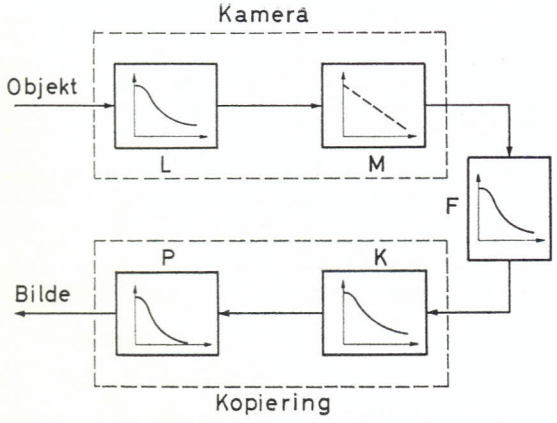


Fig. 10. Blokkdiagram av den fullstendige avbildningsprosess.
Bokstavforklaringer:
L = Linsens transferfunksjon.
M = Mekaniske forstyrrelser i kamera.
F = Film (inkludert kjemisk prosess).
K = Kopieringsapparatets funksjon.
P = Fotopapirets transferfunksjon.

være klar over at de konvensjonelle linsetestmetodene er i den grad subjektive at de krever meget godt trenede observatører for i det hele tatt å kunne gi anvendbare resultater, og selv da er de bare egnet til ren sammenligning av linser. Noen absolutte tall for avbildningsegenskapene kan de ikke gi. Derimot kan resultatene av mange slike tester avledes kvantitativt av transferfunksjonen.

Det er av vesentlig betydning at transferfunksjonen lar seg anvende direkte i linsekonstruksjon. Frekvenskarakteristikken lar seg uttrykke teoretisk som en superposisjon av aberrasjons- og diffraksjonsfunksjoner, og begge disse størrelsene kan kontrolleres. Tidligere var korreksjonsmulighetene begrenset av det omfattende beregningsarbeidet, men i dag har regnemaskiner overtatt og produserer konstruksjonsdata på kort tid og med stor nøyaktighet. Sammensatte objektiver lar seg derved konstruere med en nøyaktighet som bare er begrenset av monteringsusikkerheten.

Den foreløpige praktiske grense for reproduserbarheten av transferfunksjonskurvene tatt opp på to ulike systemer er $\pm$ 2 %, på samme apparatur $\pm$ 1 %. En vanlig måleusikkerhet er $\pm$ 5 % med relativt god apparatur. Denne forholdsvis store margin beror ikke på prinsippet eller de optiske og elektroniske deler, men skyldes derimot vesentlig mekaniske svakheter i systemet. Kravene som stilles til de mekaniske komponenters bearbeidelse og stabilitet er meget store, hvilket bl. a. medfører at apparatet blir tungt og får store dimensjoner. Ved Institutt for Almen fysikk, NTH, finnes et system av høy klasse som måler med nøyaktigheten $\pm$ 5 %. Man har ikke mulighet for å måle faseleddet i transferfunksjonen, men dette har sjelden noen interesse. Nøyaktigheten er tilstrekkelig stor for de fleste formål. En undersøkelse har vist at i et komplisert bilde behøves det lokale modulasjonsvariasjoner på ca. 10 % i transferfunksjonskurven for at øyet skal registrere forandringen.

En har i det foregående bare enkelt omtalt den fotograferende linses transferfunksjon. Imidlertid skal en også huske at det bilde en iakttaker oppfatter også er påvirket og gjerne degradert av hans eget øye, som har sin spesielle trasferfunksjon. Også prosessen fra kameraobjektiv til iakttakeren må generelt oppdeles i flere delprosesser, siden de enkelte ledd i billedproduksjonen kan varieres uavhengig av de andre. For å illustrere dette viser fig. 10 et blokkdiagram av hele avbildningsprosessen. Det endelige bilde finnes ved å multiplisere sammen de enkelte frekvensfunksjoner.

LITTERATUR:

[1] *Stickland, A. C.* (ed.): «Reports on Progress in Physics». Vol. XXX, part I: K. Rosenhauer, K. Rosenbruch: «The Measurement of the Optical Transfer Functions of Lenses.» Inst. of Phys. and Phys. Soc., London 1967.

[2] *Ingelstam, Djurle, Sjøgren:* «Contrast-Transmission Functions Determined Experimentally for Assymmetrical Images and for the Combination of Lens and Photographic Emulsion.» J. Opt. Soc. Am. *46*, 707–714 (1956).

[3] *Dow Smith, F.:* «Optical Image Evaluation and the Transfer Function.» Applied Optics *2*, 335–350 (1963).

[4] *Perrin, F. H.:* «Methods of Appraising Photographic Systems.» Part II. J. of the SMPTE *69*, 239–249 (1960).

[5] *Higgins, G. C., Perrin, F. H.:* «The Evaluation of Optical Images.» Phot. Sci. Eng. *2*, 66–76 (1958).

[6] *Biedermann, K.:* «Ermittlung des Zusammenhanges zwischen der subjektiven Güte und den physikalischen Eigenschaften des photographischen Bildes.» Phot. Korr. *103*, 5–14, 25–31, 41–48, (1967).

[7] *Heynacher, E., Köber, F.:* «Auflösungsvermögen und Kontrastwiedergabe.» Zeiss Informationen Nr. 51 1964, s. 29–32.

Bøker

Kosmos 1968.

Svenska Fysikersamfundets årbok Kosmos er nå kommet med bindet for 1968 i vanlig delikat utførelse og med en rekke leseverdige artikler. Her skal ikke alle titler og forfattere ramses opp, men noen av de bidrag vi har festet oss mest ved, skal nevnes.

Kjernefysikk og faste stoffers fysikk er de best representerte fagområder, men en rekke andre felter blir også dekket. Blant de mer klassisk betonte temaer kan nevnes solens spektrum. Bengt Edlen gjør rede for resultater av nye rakettmålinger. Høyenergifysikken er representert med D. Wm. Dupens beskrivelse av en 3 kilometers lineær akselerator ved Stanford-universitetet og målinger utført med denne. Gunnar Holte gir i lettlest form et tilbakeblikk på reaktorens utvikling gjennom 25 år og framtidsperspektivene. Av de mest lettleste artikler er også S. G. Nilssons «Hur ser atomens kärna ut?» Den som måtte tro at man er ferdig med utforskningen av atomkjernen, blir her rokket i sin tro.

Tre artikler — som ikke er de lettest tilgjengelige — er viet spesielle effekter og metoder innenfor faststofffysikken. Alt i alt inneholder boken 13 artikler, og der burde finnes noe for enhver lesers smak.

Njål Hole.

W. M. Gibson: Basic electricity, Penguin Books, 1965. 190 sider.

Jeg spår at denne boka vil danne skole når det gjelder framstillingen av magnetismen i universitetsundervisningen.

I mange år har vi hørt at magnetisme kan betraktes som en relativistisk korreksjon til elektrostatikken. Likevel er det først i de siste ca. 10 åra at man har begynt å ta dette alvårlig i undervisningen. I Gibsons bok ser jeg det for første gang konsekvent gjennomført på den mest elementære universitetsnivå, og jeg tror det er gjennomført på en pedagogisk vellykket måte.

I min studenttid lærte vi først om magnetpoler og dipoler og magnetfeltene rundt dem. Sammenhengen med elektriske strømmer kom så som et overraskende og nesten uavhengig fenomen. I de siste ca. 20 åra har det vært vanligere å starte framstillingen med kraften mellom strømførende ledere eller kraften på elektroner eller ioner som strømmer forbi permanent- eller elektromagneter. Denne framstillingsformen er det vel riktig å betrakte bare som et overgangsfenomen, nå som vi ser, at det lar seg gjøre å starte på det helt fundamentale plan, slik som i Gibsons bok.

Det dreier seg her om en liten og forholdsvis elementær bok. Den behandler derfor ikke alle sider av dette fenomenet, men de eksemplene og den oppbyningen som er valgt, virker svært overbevisende. Jeg tror at studenter som leser denne boka vil sitte igjen med mer fundamentale og klarere bilder av sammenhengene mellom Colombkraft, Lorentzkraft, magnetisk induksjon etc., enn man før kunne regne med. Den relativitetsteori studentene trenger å sette seg inn i på forhånd, er ikke mer enn det som nå er vanlig i første års universitetsstudium.

Basic electricity er en framstilling av elektrisitetslæra, og ikke bare av magnetisme, som en kanskje kan få inntrykk av ved å lese det jeg hittil har skrevet. Jeg har ikke lest alle kapitler like grundig, men jeg sitter igjen med praktisk talt bare positive inntrykk, og jeg vil derfor anbefale faglærerne å være oppmerksom på boka.

Noe kan man nok kritisere i boka, men på det faglige og pedagogiske plan er det ikke mye. Den bruker SI-systemet konsekvent, men den har det til felles med praktisk talt alle britiske bøker et verken bruken av enheter eller forklaringene av overgangene mellom SI og CGS-systemene holder formelle mål. Dette er likevel pirk.

Otto Øgrim.

Kronmüller, Helmut: Nachwirkung in Ferromagnetika. 329 sider, pris DM 62.—. Springer Tracts in Natural Philosophy, Vol. 12, 1968.

Moderne sambandsutstyr og datamaskiner stiller store krav til langtidsstabiliteten av permanente magnetar. Denne boka tar difor for seg eit emne som er av teknisk interesse; og ikkje mindre viktig i faststofffysikken. På norsk kan ein vel omsette «Nachwirkung» med ettervirkning, på engelsk og fransk er termane «time (eller after) effect» og «trainage».

I teknikken er magnetisk ettervirkning eit uønskt fenomen, i fysikken derimot eit kjærkome hjelpemiddel til undersøking av gitterfeil i krystallar. Når det gjeld rørsla av gitterfeil er dette eit av dei beste hjelpemiddela ein har. Denne bruken av magnetisk ettervirkning byggjer på samanhengen mellom magnetisk og mekanisk ettervirkning. Den er av heller ny dato, men grunnlaget vart lagt i førre hundreåret. Ewing og lord Raleigh viste då at ved forandring av det ytre magnetfeltet vil ein brøkdel av magnetiseringa nå jamvektsverdien først etter ei viss tid. Sidan vart det påvist at det er ein sterk samanheng mellom magnetisk og mekanisk ettervirkning. Ei mekanisk forandring eller deformasjon av gitteret medfører ei forandring av elektronstrukturen, og dermed av dei magnetiske eigenskapane, i og omkring det deformerte området.

Det er først og fremst undersøkinga av gitterfeil i metall som blir behandla i denne boka. I første delen gir forfattaren ei fenomenologisk innføring i dei grunnleggande eigenskapane ved magnetisk ettervirkning, og ei framstilling av dei målemetodene som blir brukte ved den eksperimentelle påvisninga av fenomenet. Deretter blir det gitt ei meir eksakt teoretisk behandling, bl. a. ved hjelp av gruppeteori, der vekselvirkningsenergien mellom spontan magnetisering og gitterfeil spelar ei fundamental rolle. Vidare får ein ved termodynamikk eit uttrykk for stabiliseringsenergien og eit generelt apparat til å bestemme dei tre typene av ettervirkning: orienterings-, diffusjons- og kombinert ettervirkning. I siste delen blir dette apparatet brukt på konkrete tilfelle.

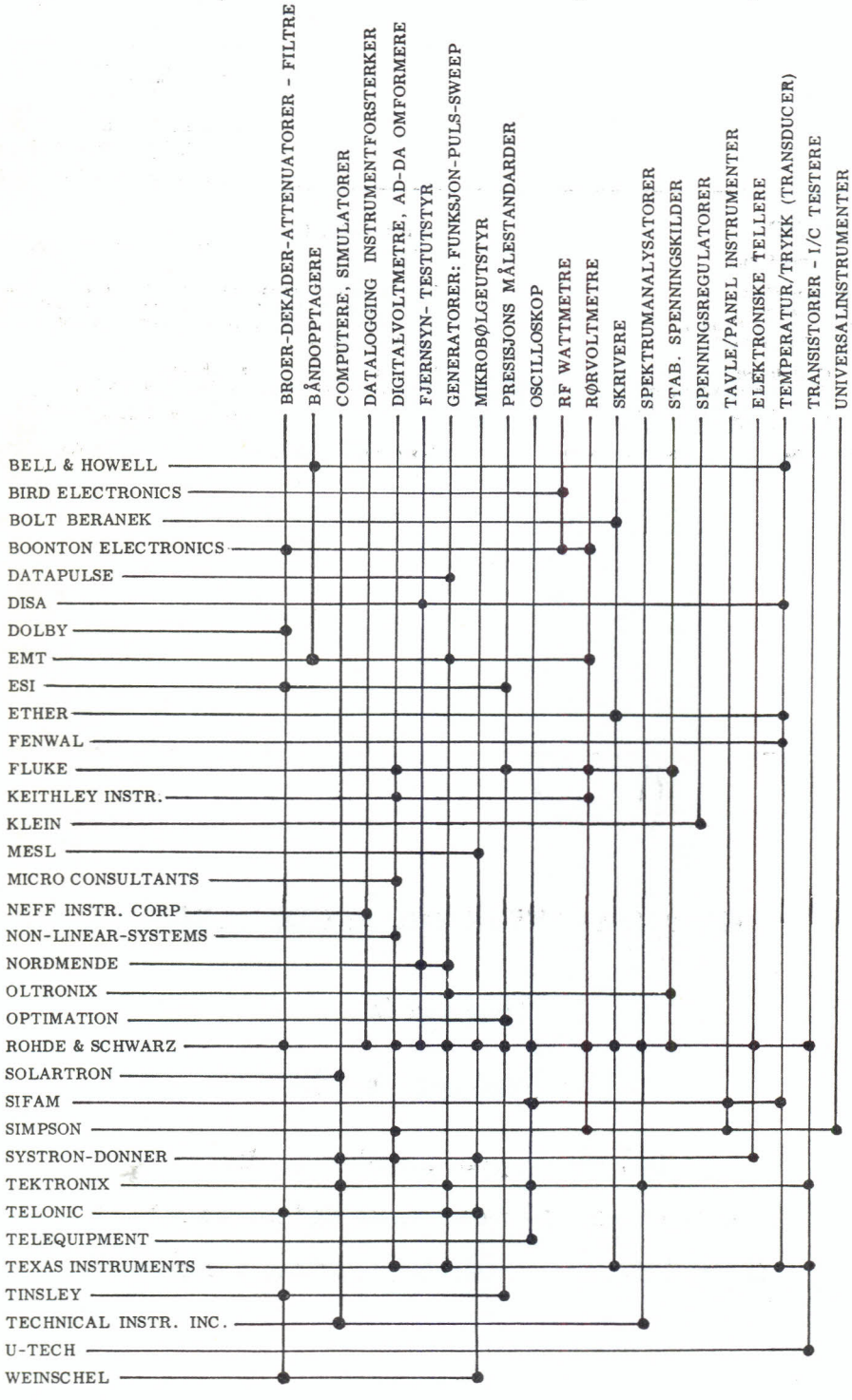
Forfattaren arbeider ved Max Planck Institut für Metallforschung i Stuttgart og er ein av dei store ekspertane på emnet. Boka er klar og velskriven.

Tormod Riste.

NB: Årsregistret kommer i neste hefte

Instrumentprogram

Vennligst kontakt oss hvis De ønsker tilsendt kataloger eller datablader.



M & CO

MORGENSTIERNE & CO A/S

INGENIØRFIRMA

KONGHELLEGT. 3-5 —— OSLO 5 —— TELEFON 37 29 40

Fra Fysikkens Verden

Redaktør:
Professor dr. Haakon Olsen, N.L.H.T.

Redaksjonskomite:
Rektor Finn Berntsen, Strinda Høg. Almenskole, Trondheim.
Universitetslektor Wilhelm Løchstøer, Universitetet, Blindern.
Dr. philos. Tormod Riste, Institutt for Atomenergi, Kjeller.
Professor Steingrim Skavlem, Universitetet i Bergen.
Dr. techn. Helge Øverås, CERN Genéve.

Norsk Fysisk Selskap

Formann: Dr. philos Tormod Riste

Styre: Dosent Arnfinn Graue
Professor H. Sørum
Professor dr. Nicolai Norman
Cand. real. Gunnar Kvifte

Selskapets sekretær: Gerd Jarrett.
Nøytronfysikkavdelingen,
Institutt for Atomenergi,
Boks 40, 2007 Kjeller

Postgirokonto: 88388 Bankgirokonto: 8601 - 236880

Teknisk medarbeider og
Annonser: Lab.ing. H. Torgersen, N. T. H.

Fra Fysikkens Verden utkommer kvartalsvis. Abonnement kan tegnes gjennom postverket eller direkte fra ekspedisjonen. Årsabonnement kr. 15,—. Årsabonnement for studenter og skoleelever kr. 10,—.

Sekretær: K. Slundgård
Ekspedisjonens adresse: Fra Fysikkens Verden,
Fysisk Institutt, N. L. H. T.,
7000 — Trondheim.

Postgirokonto: 10472 Bankgirokonto: 8601-236545

GYMNASIASTER OG STUDENTER!

Dere kan få

Fra Fysikkens Verden

til redusert pris: kr. 10,— pr. år.

Abonnement kan tegnes enten ved postverket
eller ved direkte henvendelse, se adressen ovenfor.

Aktietrykkeriet i Trondhjem