

KOMMUNIKATIONSFYSIK



Niels Henrik Würtz

Erik Bødtker

Redaktør: Claus Helmann Christensen

Fysikforlaget

Telekommunikation

© Erik Bødtker, Niels Henrik Würtz og Fysikforlaget, 1993.

Redaktør: Claus Helmann Christensen.

Tegninger: Ole Vinther, Erik Bødtker og Jesper Deleurant.

Opsætning: Ole Vinther og Kaj Gregersen.

Sats: Clemens Tryk, Århus.

Tryk: Budolfi Tryk, Aalborg.

ISBN 87-7792-008-2.

Mekanisk, fotografisk eller anden gengivelse af denne bog eller dens enkelte dele er ikke tilladt uden lovlig hjemmel.

Indhold

1. Kommunikation	2
2. Opfindelse af telegraf og telefon	8
3. Telefonen	18
4. Lysledere	28
5. Et verdensomspændende netværk?.....	40

Forord

I dette hæfte behandles kommunikation ud fra et teknisk, et naturvidenskabeligt og et samfundsmæssigt synspunkt. Vi ser på de teknikker, der benyttes til at kode, lagre og overføre information fra et sted til et andet. Da mange af disse teknikker er opfundet i forbindelse med udviklingen af telefonkommunikationen, hentes en stor del af eksemplerne herfra. Vi ser både på den historiske udvikling af kommunikationsteknologien og den nyeste teknologi. Telekommunikation er langt mere end teknologi og naturvidenskab. Erhvervs- og samfundsøkonomiske forhold spiller en afgørende rolle.

Sammen med emnet telekommunikation, behandles vigtige problemstillinger indenfor områderne telefon- og telegrafteknik, analog og digital transmissionsteknik, optiske fibre samt indledende kommunikationsteori.

Målet er at sætte læseren i stand til at følge den offentlige debat om telekommunikationspolitik på en fagligt kvalificeret måde. Via telekommunikationen kommer vi naturligt ind på centrale dele af fysikken som bølger, lys, dele af atomfysikken, digitale og analoge elektriske kredse.

Bogen er beregnet til fysik på obligatorisk niveau og HF tilvalg i fysik.

Indholdet er delt op i 5 kapitler, med hvert sit sigte på beskrivelse af kommunikation. Synsvinklen i de forskellige kapitler er:

Kapitel 1. Brugerens synsvinkel.

Et rids af kommunikationen i øjeblikket med de mange forskellige typer kommunikation, vi kender fra hverdagen.

Kapitel 2. Historisk synsvinkel.

En gennemgang af udviklingen af de forskellige tidlige telegrafer indtil opfindelsen af telefonen.

Kapitel 3. Teknisk synsvinkel på telefonapparatet.

En gennemgang af telefonens elektronik beskrevet på ohms lov niveau med to abonnenter og to telefonapparater forbundet med to ledninger. Det vil sige uden centraler og uden telefonnet.

Kapitel 4. Teknisk synsvinkel på transmission.

En gennemgang af de optiske principper ved brugen af lysledere til overførslen af telefonsamtaler. Herunder teori for lysets brydning for at forklare lyslederens evne til at transmittere lyssignaler. Teori for atomer for at forklare lasernes og detektorernes virkemåde. Og endelig teori for digital og analog transmission.

Kapitel 5. Teknologi og samfundsmæssig synsvinkel.

Telefon og telefonnettet behandles ud fra telefonindustriens synsvinkel. Det indbefatter en teknisk gennemgang af telefonnettet, en beskrivelse af mulighederne i nettet nu og i fremtiden, og et økonomisk rids af telefonindustrien.

Kernestoffet svarende til hele bølgelæren indgår i kapitlerne 3 og 4, og kan helt eller delvis erstatte traditionel gennemgang af emnet. Tilsvarende indgår centrale dele af atomfysikken i kapitel 4 ved beskrivelse af lysfrembringelse og lysdetektion ved lyslederne.

Bogen er tilrettelagt med mulighed for stor progression i fagligt niveau i de enkelte kapitler. Det giver læreren mulighed for at tilrettelægge forløb, der passer til elevernes faglige niveau. For at lette dette arbejde, har vi anbragt en del af teksten i kasser. Det gælder fagligt stof og emner, som er med til at perspektivere. Kasserne kan overspringes, uden at sammenhængen i fremstillingen brydes. Dette kan ske, hvis man kender baggrundsstoffet i forvejen eller læser det efter en anden bog, eller det kan overspringes for at undgå vanskelige matematiske udregninger.

Opgaverne er delt i to grupper. Den ene del af opgaverne er placeret midt i teksten. De er beregnet til at laves samtidig med, at teksten gennemarbejdes for at lette tilegnelsen. Den anden type er anbragt efter hvert kapitel. De er typisk lidt sværere og med lidt større faglige udfordringer. De regnes, når man har fået overblik over det enkelte kapitel. De kan eventuelt stilles som afleveringsopgaver.

Men vær opmærksom på, at der er stor forskel i sværhedsgrad.

For at give det eksperimentelle arbejde vægt, er der i bogen anført et stort antal forslag til eksperimenter. Disse skal opfattes som inspiration, og vi forestiller os på ingen måde, at eleverne laver dem alle. Tværtimod vil vi anbefale, at eleverne er med til at vælge et mindre antal, som man går i dybden med. Specielt vil vi anbefale, at eleverne i så høj grad som muligt deltager i planlægningen af eksperimenterne, og at denne planlægning er en god del af selve øvelsen.

Tak til følgende arbejdsgruppe, hvor bogens grundlag blev lagt:

Ole Ahlgren, Lis Andersen, Finn Christiansen, Eigil Dixen, Lis Hedehus, Lars Kristensen, Henry Nielsen, Marianne Svenningsen, Nina Zangenberg og Niels Henrik Würtz.

Desuden tak til følgende for hjælp med udarbejdelsen af bogen og korrekturlæsning:

Henning Dickow, Arne Rasmussen, Søren Halse, Niels Elbrønd Hansen, Steen Hoffmann, Ove Østergaard og Kai Gregersen.

Tak til Ole Vinther for tegninger og opsætning af bogen.

Beskrivelsen af telefonens udvikling i kapitel 2 er gengivet efter bogen "Skruen uden ende", K. Nielsen, H. Nielsen og H.S. Jensen, Teknisk Forlag, 1990.

Vi takker hermed Teknisk Forlag for tilladelse til at gengive historien om telefonens udvikling i næsten uændret form.

Udgivelsen er støttet af Tele Danmark, som hermed takkes.

December 1993

Erik Bødtker og Niels Henrik Würtz.

Redaktion:

Claus Helmann Christensen

1. Kommunikation

Hvad er det, der er fælles for trommesignaler i junglen, Berlinske Tidenende, munter snak i et frikvarter og radiobølger der sendes ud mod en satellit i verdensrummet?

Det er, at det alt sammen repræsenterer en eller anden form for kommunikation mellem mennesker. Kommunikation er et utroligt vidt begreb. Enhver form for meddelelse fra et levende væsen til et andet er indeholdt i begrebet kommunikation, hvad enten det drejer sig om tale, skrift, lydsignaler, tegn eller andet. Kommunikation er ikke let at definere. En måde kan være at kalde kommunikation for "udveksling af informationer mellem to eller flere parter", eller noget i den retning. Men prøv selv at finde på en bedre definition.

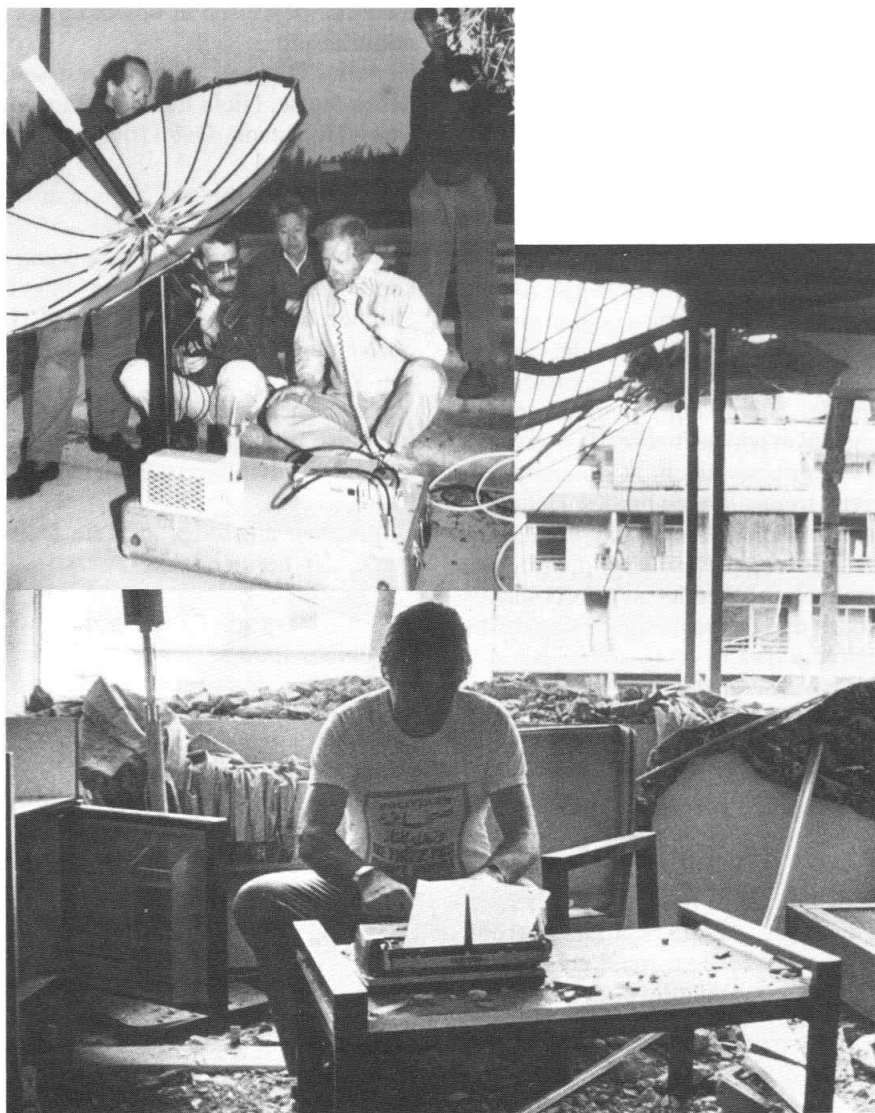
Det, der gør det svært at give en præcis beskrivelse, er nok, at vi til

daglig vælter os rundt i en mængde forskellige typer af kommunikation, uden at vi gør os klart, at der er tale om kommunikation.

Det er vanskeligt at forestille sig et samfund uden forskellige former for organiserede kommunikationssystemer. I biblen fortælles det i 1. Mos., 11, 1-9, at da indbyggerne i Babylon, i deres hovmod, besluttede at bygge et tårn, der rakte helt op til himlen, straffede Gud dem ved at forvirre deres tungemål. Da de ikke længere kunne tale sammen, kiksede byggeprojektet fuldstændigt. Det moderne samfund er ikke mindre følsomt overfor kommunikationssvigt end det bibelske. Ud over talen har menneskene rådgighed over mange andre kommunikationsformer, så som udsendelse af lugte, kropssprog, berøring, kærtegn osv.; men ingen af disse former for kommunikation er så udviklede som

sproget, og ingen af dem kan bruges som erstatning for det, men omvendt går en god del af kommunikationen tabt ved kun at benytte sproget som man gør det ved telefonsamtaler. I det følgende vil vi dog begrænse os til de kommunikationsformer, der som data, sprog, og billede lader sig transmittere.

Den teknologiske udvikling har medført, at den naturlige kommunikation direkte fra individ til individ, er blevet suppleret med "telekommunikation" – det vil sige kommunikation over større afstande. I myter og legender har der gennem årtusinder optrådt personer med overnaturlige evner, som kunne høre ting, der foregik tusinder af kilometer borte eller se tilsvarende langt. Man er kommet langt i den retning. Ved hjælp af teknologien kan vi tale med folk, der bor på den anden side af jorden så let



Figur 1.1 viser et fotografi optaget i 1987 i Beirut. På værelset i et af byens engang fine hoteller sidder en journalist og tilrettelægger sin nyhedsudsendelse. Få øjeblikke senere vil han folde sin transportable jordstation ud og sende budskabet som vist i det lille billede. Signalerne sendes til en geostationær satellit 36.000 km over jordens overflade ude i rummet. Derfra sendes de videre til en jordstation i et sikkert geografisk område, for til sidst at blive transmitteret hjem til TV-selskabet. I TV selskabets redaktionslokale bliver optagelserne redigeret, blandet med reklamer og kommentarer, for derefter at blive udsendt til alverdens TV abonnenter via et verdensdækkende satellit TV net eller via de nationale eller regionale TV selskaber. Til trods for at byen tydeligvis er totalt udbombet, den lokale infrastruktur er fuldstændig ødelagt og pågældende journalist er helt afskåret fra omverdenen, kan alverdens TV abonnenter være øjenvidner til begivenheder der sker i Beirut samtidigt. På den ene side er det godt at verdenssamfundet bliver holdt orienteret om begivenhederne. På den anden side er det fornedrende, at Beiruts befolknings lidelser skal bruges som en slags underholdning blandet med reklamer for havregryn og bleer for økonomisk vinding.

som ingenting, eller vi kan sidde hjemme i lænestolen og se på en fodboldkamp, der er ved at blive spillet i et fremmed land. Da den første amerikaner satte sin fod på Månen, blev det vist samtidigt over hele verden ved en direkte TV transmission. Man kan med en vis ret sige, at den moderne telekommunikation har gjort os alle til troldmænd i myternes forstand.

1.1 Farlige informationer

Som de fleste andre opfindelser påvirker telekommunikationen samfundet i flere retninger samtidig. Billedet er meget sammensat. Ofte kan de positive og de negative sider ikke skelnes klart fra hinanden.

Teknikken giver en hidtil uhørt mulighed for at lave aktualitetsjournalistik. Af samme grund sætter de pågældende journalister livet på spil som aldrig før, netop fordi det nu virkelig betyder noget at være på stedet, når tingene sker.

Er det mest godt eller mest skidt? Er det teknikken der er umenneskelig, eller er det menneskene selv?

1.2 Informationer giver magt

Viden er magt, siger man. Det samme kunne man sige om telekommunikation, for de, der har kontrol med kommunikationsnettet, har stor indflydelse på, hvordan vi opfatter verden omkring os. I den simpleste form sker det ved at sortere informationer inden de udsendes f.eks. via TV og radio, så kun de ting der støtter ens egne interesser kommer ud. Princippet er almindelig kendt fra lande med totalitært styre. Det tredje Tyske Rige, Hitler-Tyskland, havde ligefrem en speciel minister, propagandaminister J. Goebbels, til at tage sig af dette vigtige emne. Ved konsekvent at undertrykke informationer, der er en imod, og fremhæve dem, man synes om, kan man påvirke en hel befolknings virkelighedsopfattelse. Der er masser af eksempler på dette i historien og i samtiden. Man kunne f.eks. i løbet af 30'erne og begyndelsen af 40'erne overbevise det tyske folk om, at tilhængere af den jødiske religion var samfundsnedbrydende og nødvendigvis måtte udryddes.

Det verdensomspændende telekommunikationsnet giver borgerne i frie demokratiske lande adgang til et væld af informationer alle steder fra. Det kan både være personlig information, fra en man kender et eller andet sted på kloden, eller det kan være "masse-



Figur 1.2 Babelstårnet (Gustave Doré)

information", der udsendes fra TV og radiostationer verden over. Her er korrekte informationer, løgn, saglig viden, underholdning og reklamer blandet i én stor pærevælling. Den moderne verdensborger er takket være informationsnettet udsat for daglig påvirkning fra et væld af kilder. Nogle af disse prøver at påvirke os til en bestemt adfærd, som for eksempel til at drikke en bestemt slags læskedrik, der, hvis man skal tro reklamerne, indeholder en hel "livsstil". Andre informationer konfronterer borgerne med påtrængende problemer som sult og krig i fjerne lande. – Problemer, som man kun har beskeden indflydelse på.

Den moderne verdensborger kan, ved hjælp af telekommunikationsnettet, skaffe sig detaljeret viden om den verden han lever i; men samtidig risikerer han at få fordrejet sin virkelighedsopfattelse.

Er det mest godt eller mest skidt? Ingen kender svaret.

1.3 Mange former for kommunikation

Telegraf, telefon, TV, telefax, telex, datatransmission, private forretningsnetværk – der er utallige eksempler på telekommunikationsformer, eller tjenester som det kaldes i fagsproget. Nogle er offentlige som for eksempel telefon- og datatransmissionstjenesten, og kan benyttes af alle (betalende) kunder. Andre er lukkede netværk, der kun benyttes af en begrænset kreds. Det er typisk netværk, der tjener et specielt formål. Ofte har man oven i købet et klart ønske om at forhindre indtrængning af brugere udefra. Eksempler er netværket, der binder forsvarskommandoerne i de enkelte NATO lande sammen, eller DSB's signal- og sikringsanlæg.

De enkelte netværk kan groft set underdeles i to hovedtyper: Fordelingsnetværk med énvejskommunikation og dobbelt-rettede systemer. Det mest kendte eksempel på et dobbelt-rettet system er telefonsystemet. Her kan

der etableres en to-vejs forbindelse mellem to vilkårlige brugere af systemet. Forbindelsen etableres, når der er brug for den, og begge deltagere i kommunikationen kan sende signaler til den anden. Kabel TV er fordelingsnetværk. Her er der en fast forbindelse fra en signalkilde (en antenestation) til en mængde modtagere af TV signaler. Alle kunder modtager uafbrudt de samme 20 – 30 TV signaler. Tilsvarende er fjernsynstransmission gennem luften et eksempel på énvejstransmission.

De mange teletjenester er fremkommet som et resultat af et historisk forløb, og bliver i det store og hele båret af adskilte tekniske installationer. De sidste årtiers udvikling i digitalteknologien har imidlertid betydet, at enhver form for telekommunikation kan foregå på en digital form. Denne digitalisering har generelt medført en forbedret kvalitet i telekommunikationen samtidig med en reduktion i omkostningerne. Digitaliseringen giver imidlertid også en hidtil uhørt mulighed for rationalisering af telekommunikationsnettet. Ved hjælp af digitalteknikken kan forskellige former for kommunikation transmitteres sammen uden risiko for sammenblanding. Det har i årtier været benyttet ved transmission af signaler imellem telefoncentralerne. Her transmitteres telefon, TV og datasignaler på de samme kabler og gennem de samme centraler, uden at man skelner mellem hvilke signaler, det egentlig drejer sig om.

1.4 Tendenser fremover

Udviklingen indenfor telekommunikationsområdet går i retning af et integreret net, der kan understøtte alle kendte teletjenester så som TV, radio, datakommunikation og telefon.

Inden år 2010 regner man med at et sådant net kaldet B-ISDN, der står for Broadband Integrated Services Digital Network eller blot bredbåndnettet, vil have en næsten total udbredelse i teknisk avancerede lande som f.eks. Japan. I dette netværk foregår al telekommunikation via én fysisk forbindelse mellem kunden og telekommunikationscentralen. Denne forbindelse vil sandsynligvis være en optisk fiber, og transmissionskapaciteten vil være så enorm, at ethvert praktisk forekommende kommunikationsbehov kan tilfredsstilles.

De enkelte kunders behov er naturligvis meget forskellige. Nogle vil være tilfredse med at tale i telefon,

medens andre vil ønske at have en billed-telefon. Mange vil ønske at modtage TV og radioprogrammer fra store dele af verden. Store virksomheder vil have behov for hurtig data-transmission mellem firmaets forskellige kontorer osv. Bredbåndnettet vil give langt større fleksibilitet end vi kender nu. Ved hjælp af en standardiseret tilslutning vil kundernes varierende behov kunne tilfredsstilles i det samme netværk.

Problemerne med digitalisering og transmission af de store datamængder i fremtidens net er i det store og hele løst. Tilbage står problemerne med at styre signalerne rundt i nettet, så de ender hos de rette modtagere. Før digitaliseringen klarede dette ved, at der blev skabt en direkte elektrisk forbindelse mellem de abonnenter, der ønsker at tale sammen. Den elektriske forbindelse varede så længe, som samtalen varede. I bredbåndnettet skal alle mulige forskellige typer af telekommunikationstjenester transmitteres og fordeles ad de samme veje uden en direkte elektrisk forbindelse mellem afsender og modtager. Man regner med at løse problemet ved at samle de digitale informationer, der skal sendes fra et sted til et andet, i "pakker" med en elektronisk "modtageradresse" på. Pakkerne sendes afsted i telenettet med den hastighed, som den enkelte tjeneste kræver, og nettet finder ved hjælp af adressen frem til den rigtige modtager. Teknikken minder om nutidens pakkepost, blot med den forskel, at der her ekspederes tusindvis af pakker i sekundet til hver modtager. Metoden indebærer mange fordele. Først og fremmest er transmissionssystemet helt ufølsomt overfor hvilke teletjenester, de enkelte pakker egentlig præsenterer. Enhver teletjeneste kan derfor benytte sig af systemet. De enkelte kunder optager kun plads i nettet i det omfang, de benytter det, og man kan foretage en nuanceret prisberegning. For eksempel kan man lade betalingen for modtagelse af fjernsyn være afhængig af, om kunden vælger at modtage i HD-TV kvalitet (High-Definition TV, som giver en bedre billedkvalitet) eller almindelig TV-kvalitet, eller måske kun vælger at høre lyden, hvis det er en koncertudsendelse, hvilket kræver langt mindre plads. Telefонтaksten afhænger i høj grad af belastningen af nettet. Det betyder, at tjenester, som belaster nettet meget, er dyre. Belastningen kan skyldes, at man ringer langt, eller kræver høj kvalitet.

Opgaver

1. Sanser og kommunikation

Skriv en A-4 side om menneskers og dyrs kommunikation, hvor du beskriver brugen af sanserne ved kommunikationen. Du skal komme ind på så mange forskellige sanser og så mange forskellige måder at bruge dem på som muligt.

Hvilke af de omtalte former for kommunikation kan i øjeblikket sendes gennem telenettet? Og hvilke kan tænkes at kunne det i fremtiden? Udbyg evt. opgaven sammen med dansk- eller biologilæreren. Så kan opgaven måske tælle med flere steder.

2. Krig og interesser

Diskuter hvilke økonomiske, samfundsmæssige og private interesser der kan være i at transmittere levende billeder fra Beirut, mens krigen foregår.

3. Bush og Hussein

I slaget om Kuwait udsendte det amerikanske TV-selskab CNN udsendelser med både Saddam Hussein fra Iraq og George Bush fra USA, hvor de argumenterede for deres synspunkter.

Hvilke interesser har CNN i denne sammenhæng?

4. Fordrejning

Hvilke muligheder ligger der i at anvende TV til at fordreje et budskab?

5. Forbrug

Noter og kommenter dit forbrug af telekommunikation det næste døgn.

Fig. 1.3 Figuren skal illustrere satelliternes kredsløb omkring jorden. En typisk satellit er forsynet med solfangere, som forsyner den med elektricitet. Dette billede er dog lidt snyd, idet det viser den bemandede rumstation Skylab i stedet for en kommunikationssatellit, der befinder sig i en højere bane.



Hvad er information?

At kommunikere er at udveksle informationer. Information er ikke noget særligt håndgribeligt begreb. For at kunne behandle kommunikation matematisk, må man lave en præcis beskrivelse af, hvad information er. Den amerikanske matematiker og kommunikationsteoretiker C.E. Shannon offentliggjorde i 1948 et banebrydende værk herom i "Bell System Technical Journal".

Vi forestiller os en informationskilde, der kan udsende forskellige meddelelser

$$m_1, m_2, m_3, \dots$$

Hver af meddelelserne forekommer med sandsynligheden

$$p_1, p_2, p_3, \dots$$

Summen af sandsynlighederne er 1.

Ifølge Shannon defineres informationsindholdet i de enkelte meddelelser mest hensigtsmæssigt ved:

$$I_k = \log_2 \left(\frac{1}{p_k} \right) \quad \text{bit}$$

Funktionen $\log_2$ betyder 2-talslogaritmen, og den udregnes ved brug af logaritmefunktionen $\log$ på lomme-regneren ved:

$$\log_2(x) = \frac{\log(x)}{\log(2)}$$

Enheden 'bit' kommer af, at man forestiller sig informationen sammensat af et antal mindste informationsenheder kaldet bit.

Det følger af definitionen, at meddelelser, der forekommer sjældent, rummer mere information end dem, der forekommer tit. Det er i god overensstemmelse med den intuitive opfattelse. Forestil dig for eksempel, at du skal på sommerferie på Sicilien. Inden du tager afsted ringer du til vejrtjenesten på stedet for at spørge til vejret. Lad os sige at de har tre mulige vejrmeldinger:

1. Solen skinner fra en skyfri himmel.
2. Det er overskyet.
3. Der er høj sne og det er -18°C .

Melding 1 rummer ikke megen information, da solen normalt skinner på Sicilien om sommeren. Meddelelse 3 derimod beretter om en højst sjælden hændelse, som det er væsentligt at vide, inden du tager afsted på ferie, og rummer derfor megen information.

Sendes flere meddelelser fra informationskilden, er den samlede informationsmængde summen af informationerne i de enkelte meddelelser.

Øvelse 1. De 13 tipstegn

De rigtige 13 tipstegn består af 13 uafhængige meddelelser, der hver for sig kan være 1, x eller 2. Vi antager for nemheds skyld, at 1, x og 2 forekommer med sandsynligheden $1/3$ (hvilket ikke er helt korrekt). Vis at den samlede informationsmængde i de 13 rigtige tegn er

$$I = 13 \cdot \log_2(3) = 20,6 \text{ bit}$$

Hvis sandsynligheden for de enkelte tegn er forskellig fra $1/3$, er den samlede informationsmængde mindre - hvilket passer med, at man i så fald har en forhåndsviden om udfaldet af kampene og modtager lidt mindre ny information, når man modtager resultaterne af kampene.

Øvelse 2. Julesange

Overvej, hvordan informationsindholdet af "Højt fra træets grønne top ..." afhænger af, om modtageren er en dansker eller en ghaneser, der ikke kender til dansk eller til de danske julesange. Overvej, om definitionen på information passer med den intuitive forståelse af begrebet informations-indhold specielt i dette tilfælde.

Signaler.

I et signal bestående af N tegn fra alfabetet

$$s_1, s_2, s_3, \dots, s_M$$

der hver forekommer med sandsynlighederne

$$p_1, p_2, p_3, \dots, p_M$$

vil et bestemt tegn s_i i gennemsnit optræde $p_i \cdot N$ gange.

Hvis vi betragter de enkelte tegn som meddelelser, vil informationsindholdet i et enkelt tegn være $\log_2(1/p_i)$. De Np_i forekomster af tegnet s_i vil derfor bidrage til det samlede informationsindhold i signalet med $N \cdot p_i \cdot \log_2(1/p_i)$. Den samlede mængde information findes ved at addere

$$\begin{aligned} I_{\text{tot}} &= N \cdot p_1 \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p_1} \right) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^M N \cdot p_i \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) \end{aligned}$$

Divideres med antallet af tegn, N , fås middelinformationen pr. tegn

$$H = \frac{I_{\text{total}}}{N} = \sum_{i=1}^M p_i \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right)$$

Middelinholdet af information kaldes også signalkildens entropi. Hvis signalet udsendes med hastigheden r_s tegn per sekund, defineres informationshastigheden som

$$R = r_s \cdot H$$

Eksempel: En signalkilde udsender hvert millisekund et af 5 mulige tegn. Sandsynligheden for de enkelte tegn er henholdsvis $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$ og $1/16$. Signalkildens entropi er

$$H = \sum_{i=1}^5 p_i \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right)$$

$$= 0,5 + 0,5 + 0,375 + 0,25 + 0,25$$

$$= 1,875 \text{ bit/symbol}$$

Informationshastigheden er

$$R = r_s \cdot H$$

$$= 1000 \text{ symbol/sek} \cdot 1,875 \text{ bit/symbol}$$

$$= 1875 \text{ bit/sek}$$

Hvis de enkelte tegn ikke er uafhængige af hinanden, bliver teorien mere kompliceret. Det er for eksempel tilfældet, hvis signalet er en sproglig meddelelse, og tegnene er bogstaver. Bogstavet "b" følger

f.eks. meget sjældent umiddelbart efter "s" i en dansk tekst, medens f.eks. et "n" meget hyppigt følges af et "e". I dette tilfælde gælder additionsreglen ikke. Man kan vise, at signalets entropi i almindelighed falder, når der optræder afhængighed mellem tegnene. Dette skyldes, at de enkelte tegn så indeholder mindre information.

Et kommunikationssystemets evne til at overføre information måles ved systemets informationshastighed. Et moderne digitalt kommunikationssystem benytter binær kodning, hvilket vil sige, at signalerne består af to forskellige tegn, kaldet bit, der hver forekommer med sandsynligheden 1/2. Middelinformationsindholdet pr. tegn i signalet bliver derfor 1 bit/tegn.

Systemets informationshastighed bliver derfor lig med dets bitrate (antallet af udsendte binære symboler pr. sekund).

I praksis bruger man derfor ofte bitraten (enhed bit/sekund) som mål for kapaciteten. De forskellige signal-former kræver forskellig bitrate. Som hovedregel kræver videosignaler langt højere bitrate end lydsignaler, og god billed- eller lyd-kvalitet kræver højere bitrate end dårlig.

Teoretisk kan en optisk fiber, hvor der samtidigt sendes med mange forskellige farver lys, overføre næsten ubegrænsede høje bitrater. Et løst overslag giver en øvre grænse på cirka 45 Tb/s, hvilket vil sige 45.000.000.000.000 bit pr. sekund. Til sammenligning rummer en tyk bog cirka 150 millioner bit. Det vil sige, at i teorien kunne et bibliotek på 300.000 bøger overføres på et sekund! Men dette er dog næppe realistisk med den nuværende teknologi på området. Både for elektriske ledninger og for optiske fibre er det i praksis sender- og modtagerudstyret, der sætter begrænsningen. I førende laboratorier arbejdes i øjeblikket rutinemæssigt med 10 Gb/s (10.000.000.000 bit pr. sekund) systemer, og tallet vokser stadig.

Signaler	Bit pr. sek
Telefon	64.000
HI-FI lyd	500.000
TV	64.000.000
Hi Definition TV	565.000.000
Information	Bit (anslået)
Et TV billede	2.560.000
En A4 side tekst	35.000
En elregning	600

Opgaver

1. Terningekast

Lasse kaser en terning 6 gange, og fortæller resultatet til Marie. Hvor meget information er der i meddelelsen?

Hvor stor er entropien (middelinformationen pr. tegn) i meddelelsen?

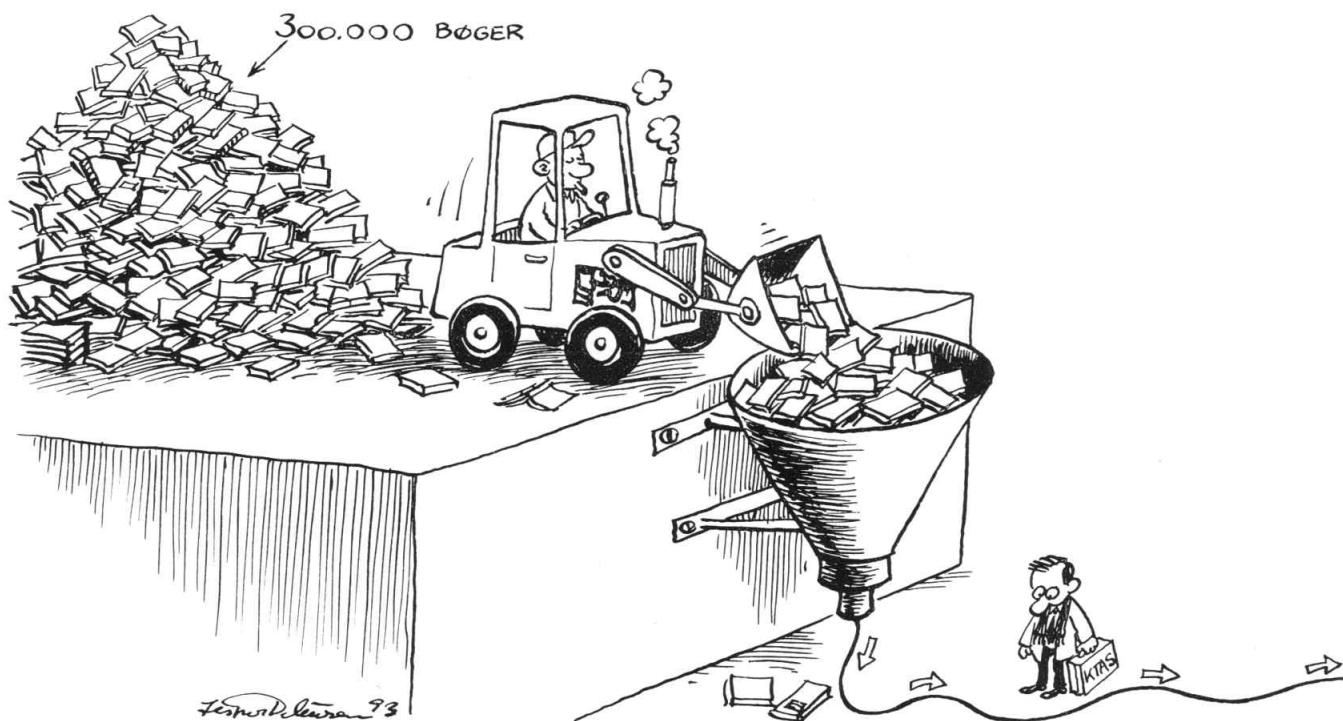
2. Fyrtoiet

Læs følgende tekst højt og tag tid på, hvor lang tid det tager:

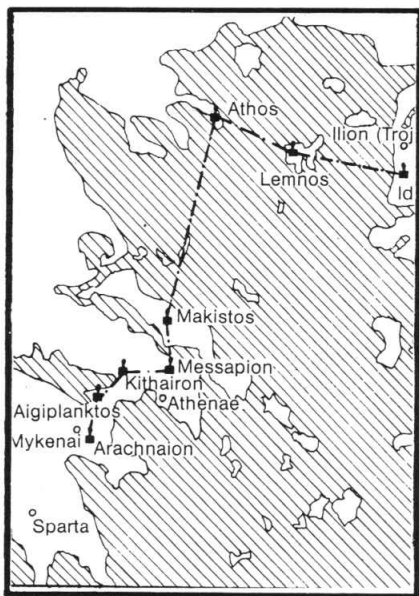
"Der kom en Soldat marcherende henad Landeveien. Een, to. Een to, han havde sit Tonister paa Ryggen og en Sabel ved siden."

Beregn det samlede informationsindhold i teksten. Lav selv en tabel over, hvor stor sandsynligheden er for forekomst af de enkelte bogstaver. Regn både mellemrum, komma og punktum som bogstaver. Beregn derefter entropien og informationshastigheden.

Til computer-kommunikation bruges 8 bit pr. tegn til kodning af almindelig tekst. Hvor mange bit vil computeren bruge til denne tekst? Hvordan står det i forhold til informationsindholdet beregnet ovenfor?



2. Opfindelse af telegraf og telefon



Figur 2.1. Kort over det græske øhav med angivelse af de bålpladser, bavne, der er omtalt i Aischylos' tragedie.

2.1 Bavner og budstikker

Den græske digter Aischylos, der levede i det 5. århundrede før Kristi fødsel, har i tragedien "Agamemnon" skildret, hvorledes budskabet om grækernes erobring af byen Troja i Lilleasien nåede tilbage til det græske moderland – en afstand på mere end 500 km – i løbet af få timer.

Budskabet blev overført imellem specielle højtbeliggende bakketoppe (bavnehøje) ved hjælp af ildsignaler. Naturligvis har vi ikke i dag mulighed for at kontrollere oplysningens sandhedsværdi, men at grækerne kendte og anvendte bavner til visse kommunikationsformål, er hævet over enhver tvivl.

Bavnerne budskab var aftalt på forhånd, men forskellige tegn kunne dog gives. Man kunne f.eks. have to eller flere forskellige bålpladser ved siden af hinanden, eller man kunne dæmpe bålet og lade det blusse op igen én eller flere gange.

Også i Danmark har vi haft bavner, hvilket afspejles i stednavne som "Ejer Bavnehøj" og "Frøbjerg Bavnehøj". Med bavnerne varetog man fjernalarmeringen, mens budstikken, en speciel stok, klarede det tilsvarende lokale problem. For at systemet kunne fungere, måtte bålpladserne altså være under observation, hvilket var de lokale myndigheders ansvar. Disse havde også ansvaret for, at en eventuel meddelelse nåede ud til lokalbefolkningen. I nærheden af bavnerne befandt der sig følgende ryttere, der havde til opgave at ride ud med budstikken. Der fandtes flere af slagsen, men hver af dem havde en speciel betydning, som var kendt af alle. Princippet for udbringelsen var videregivelse: den, der modtog stokken, havde pligt til at give den til den næste mand – og så fremdeles, indtil beskeden var nået ud til alle i det pågældende lokalområde.

2.2 Den optiske telegraf

Omkring 1790 udviklede franskmanden Claude Chappé et optisk telegrafsystem, hvor hvert bogstav og hvert talciffer svarede til en bestemt stilling af en arm med tilhørende indstillelige vinger. Armen anbragtes på toppen af en bygning, en telegrafstation, der naturligvis blev pla-

ceret på et sted, som var særlig synligt i landskabet. Afstanden mellem de enkelte telegrafstationer var i reglen 10-20 km. Den første telegraflinie oprettedes i 1792 mellem Paris og Lille, en strækning på cirka 200 km. Under gunstige vejrforhold kunne man fra dette tidspunkt overføre et enkelt tegn fra Paris til Lille på kun to minutter. Chappes telegraf anvendtes både til civile og militære formål, men systemet var først og fremmest opbygget som et vigtigt led i den militære efterretnings- og kommunikationsvirksomhed. Telegrafstationerne fik derfor stor militær betydning, hvorfor de var under militær bevogtning, og ofte blev udsat for angreb i krigstilfælde.

Danmark fik sin første optiske telegraflinie, der gik fra Helsingør til Kiel, i årene 1800-1801. Den danske telegraf, der var udviklet af søkaptajn Lorens Fisker, var mere avanceret, men til gengæld også mindre robust end den franske Chappes telegraf. Den danske telegraf havde over 40.000 kombinationer, mens den franske kun havde cirka 100. Når Fiskers telegraf gik i gang blev den aflæst med kikkert fra den nærmeste telegrafpost cirka 10 km borte. Det store antal mulige kombinationer bevirkede, at der ofte forekom fejl-aflæsninger, hvorfor den oprindelige meddelelse af og til var forvandlet til ukendelighed, inden den var nået frem til modtageren.

Efter afslutningen af krigen mod England i 1814 nedlagdes den landsdækkende optiske telegraf, men den optiske telegraf ved Storebælt opretholdtes indtil 1866. Den blev drevet af Postvæsenet og havde et klart forretningsmæssigt grundlag. Sejladsen over Bæltet afhang af vind



Figur 2.2. En rytter i fuld galop med en budstikke i den ene hånd. Den mest almindelige budstikke var krigs- og drabsbudstikken (vidjebranden), men også andre budstikker kendtes. Undertiden formgav man budstikken i et letfatteligt symbolsprog, således at f.eks. den kirkelige budstikke udformedes som et kors og tingstokken som en økse. Tegningen er fra Olaus Magnus' Nordensbeskrivelse fra 1555.

og vejr, og det kunne være nyttigt at få sendt meddelelser om vejrforandringer over til den anden side i en fart. Selv om både Chappes og Fiskers telegraf udvidede kommunikationsmulighederne betydeligt, og selv om overførselstiderne var korte, havde de dog deres begrænsninger.

Lange meddelelser optog forholdsvis lang tid af telegrafstationens tid. Men værre var det, at telegrafen kun kunne fungere i dagslys, endda kun i klart dagslys. Systemet var altså ikke pålideligt, og følgelig måtte den optiske telegraf vige for den elektromagnetiske telegraf, da denne var opfundet og udviklet til et pålideligt kommunikationsmiddel i første halvdel af 1800-tallet.

Tanken om at benytte elektriciteten som middel til at sende meddelelser fra et sted til et andet lå snublende nær for mange, der beskæftigede sig med elektricitet i sidste halvdel af 1700-tallet. Så længe man kun kendte til gnidningselektricitet, var det dog umuligt at realisere et pålideligt system. Italieneren Volta's opfindelse af

det elektriske batteri, "voltasøjlen", år 1800, var et vigtigt skridt på vejen. Adskillige telegrafprojekter så i de følgende år dagens lys, dog uden at kunne slå afgørende igennem.

Øvelse 1. Kemisk proces

Hvilken kemisk proces er det, der i Sömmerings telegraf, figur 2.3, giver anledning til boblerne i vandkarret hos modtageren?

2.3 Den elektriske telegraf

Efter at H.C.Ørsted i 1820 havde opdaget, at en elektrisk strøm påvirker en magnetnål i nærheden, skabtes de rette betingelser for en elektrisk telegraf. Flere opfindere blev hurtigt opmærksomme på, at den nyopdagede effekt kunne danne grundlag for en telegraf. I princippet skal man blot trække en isoleret ledning frem og tilbage mellem afsender og modtager, og lade ledningen passere tæt forbi en magnetnål på modtagersiden. Når afsenderen forbinder sine to ledningsender med et batteri, vil magnetnålen hos modtageren slå ud enten til højre eller til venstre afhængigt af, hvordan

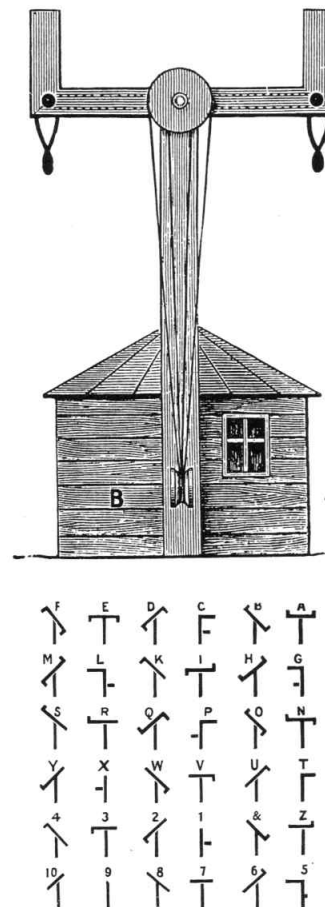
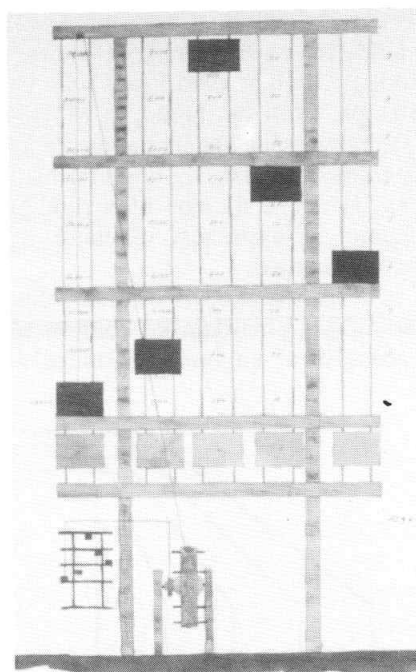
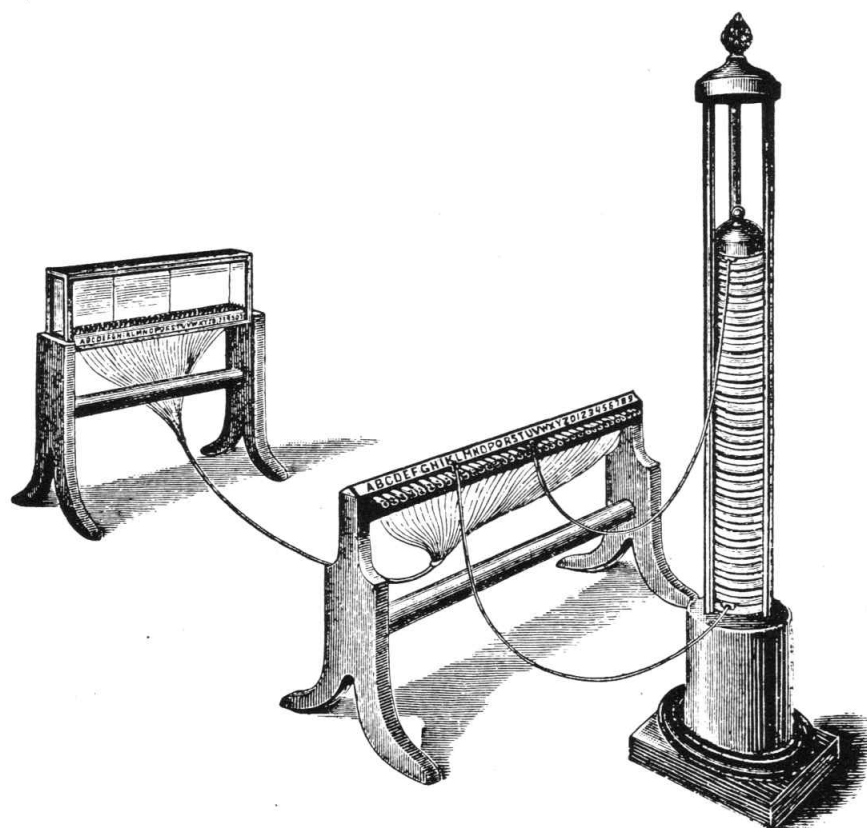


Fig 2.3. Elektrokemisk telegraf fra 1809 konstrueret af den tyske læge Sömmering. Sömmerings telegraf var konstrueret med 35 ledninger, en for hvert bogstav og taltegn, der fra afsenderstationen samledes i en streng. På modtagerstationen gik de enkelte ledninger til hver sin metalspids, der var ført op i et glaskar med vand. Når afsenderen forbandt to af ledningsenderne med voltasøjlen, gik der en elektrisk strøm gennem ledningerne og vandet med det resultat, at det boblede ud for de tegn som afsenderen ønskede at kommunikere til modtageren. Sömmerings telegraf var i stand til at fungere over korte afstande, men viste sig hurtigt at være håbløst uøkonomisk.

Figur 2.4. En model af Chappes telegraf, som illustrerer armens og vingerens anbringelse, samt armens og vingerens stillinger for de forskellige bogstaver.



Figur 2.5. Fiskers telegraf var så høj som Rundetårn. Den bestod af en mast med fem ræer (tværmaster), der var forsynet med i alt 18 klapper. I hvile stod disse klapper i vandret stilling, men ved at trække i de rigtige snore, faldt de ned i lodret stilling.



batteriet er blevet "vendt". Vedtager man nu, at hvert bogstav i alfabetet og hvert tal mellem 0 og 9 skal svare til hver sin bestemte kombination af udslag til højre eller venstre, har man i princippet en elektromagnetisk telegraf. Det krævede altså ikke nogen omfattende naturvidenskabelig baggrund at opfinde en elektromagnetisk telegraf. Det kunne enhver, der havde bare et overfladisk kendskab til den af Ørsted opdagede elektromagnetiske effekt. Det svære var at finde frem til et praktisk design, der var både pålideligt og økonomisk.

Øvelse 2. Strømretning

Angiv strømmens retning på ledningerne i figur 2.6. På figuren ser det ud, som om ledningerne er ført under magnetnålene hos modtageren. Hvis dette er korrekt, hvilken spids (den sorte eller den hvide) er da nordpolen på magnetnålene?

Hvilket bogstav sendes i den viste situation?

Den ide, der i det lange løb skulle gå af med sejren, skyldes i hovedsagen den amerikanske portrætmaler, Samuel Morse. Hans første telegraf stammer fra 1837, men den bedst kendte version, hvor meddelelsen fra afsender til modtager fremkommer som en række prikker og streger på en papirstrimmel hos modtageren, var først færdigudviklet omkring 1842. Meddelelsen var altså i kode (morsekoden), hvilket naturligvis var en ulempe, fordi det betød, at Morse-telegrafen måtte betjenes af en trænet operatør. Det viste sig dog efterhånden, at denne ulempe blev rigeligt opvejet af systemets økonomi og driftssikkerhed.

I 1843 fik Morse bevilget 30.000 dollars af den amerikanske kongres til oprettelse af en søsøgsforbindelse

mellem Washington og Baltimore, en strækning på cirka 60 km. Den blev åbnet i 1844, men fungerede ikke særlig godt de første par år, som følge af mange problemer med isoleringen. Interessen hos almindelige mennesker var heller ikke overvældende i starten, dertil var det simpelthen for dyrt at sende telegrammer via Morses' telegraf. Washington-Baltimore linien gav derfor et stort underskud det første år, og den amerikanske regering var følgelig ikke interesseret i at drive telegraflinien videre. I USA blev det derfor private selskaber, der kom til at sidde på telegraftrafikken. Hvad der i starten så ud til at være en fiasko, blev i løbet af få år vendt til en stor succes. I 1840'erne var man både i USA og Europa i gang med en enorm udbygning af jernbanetrafikken, og telegrafen blev hurtigt et nødvendigt standardudstyr på alle jernbanestationer. Uden telegrafen ville man simpelthen ikke have været i stand til at afvikle den eksplosivt voksende togtrafik uden uacceptable forsinkelser og katastrofer. Desuden indså man også snart i forretningsverdenen, at man ved hjælp af telegrafen kunne tilbyde kunderne en både hurtigere og bedre service. Allerede i 1852 var der i USA udlagt 15000 miles telegrafledning, de fleste tilhørende "Western Union Telegraph Service", det telegraf-selskab som Morse havde stiftet sammen med en række amerikanske investorer.

I de fleste europæiske lande oprettedes omkring 1850 telegraf-selskaber, der fortrinsvis var statsejede. I Danmark skete det i 1854. Verdens første søkabel blev lagt fra Dover til Calais i 1851. Efter fire forgæves forsøg og tolv års anstrengelser, kunne Atlanterhavskablet, der for første gang tillod overførsel af budskaber på brøkdele af sekunder mellem den gamle og den

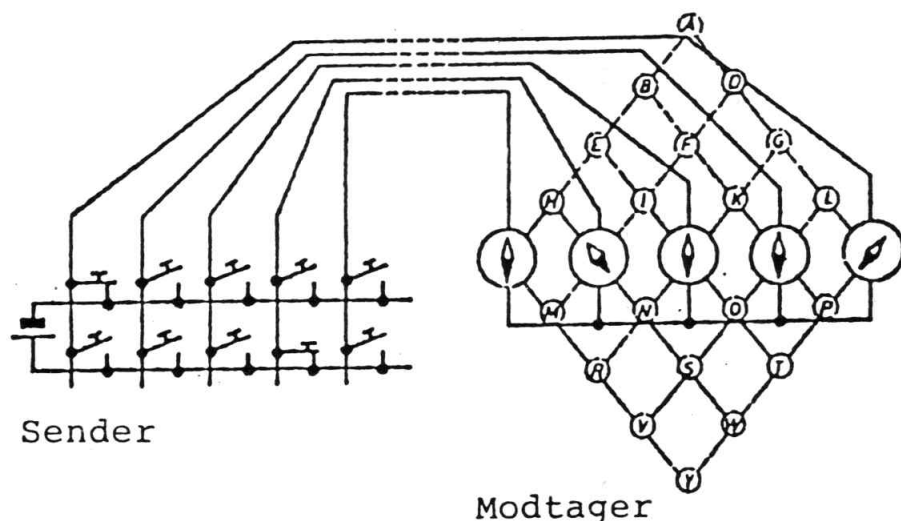
a	---	k	---
b	----	l	----
c	-----	m	-----
ch	-----	n	---
d	----	o	-----
e	---	p	-----
é	-----	q	-----
f	----	r	----
g	----	s	---
h	----	t	---
i	---	u	----
j	----	v	----

Morsealfabetet

Samuel Morse udviklede en telegraf, hvor bogstaver og tal sendes som prikker og streger efter det såkaldte morsealfabet. Til hvert bogstav og tal svarer en bestemt kode opbygget af prikker og streger.

Morsekoden for bogstaverne har en lang række egenskaber, som minder om dem, vi benytter i moderne kommunikation. Hvert bogstav er opbygget af to tegn nemlig en prik og en streg. Mellem prikkerne og stregerne er der et lille ophold og mellem bogstaverne er der et større ophold. I ledningen svarer en prik til en spænding et kort øjeblik og en streg til samme spænding lidt længere tid. Tilsvarende svarer opholdet mellem prikker og streger til en spænding på 0 et øjeblik og opholdet mellem bogstaverne til en spænding på 0 i lidt længere tid. Altså 2 typer spændingsimpulser og to typer ophold.

nye verden, endelig tages i brug i 1866. Fra 1870 var London i telegrafisk forbindelse med Calcutta, det tyske firma Siemens havde anlagt de 18.000 km telegraflinie. Det delvist danske firma Det Store Nordiske Telegraf-selskab arbejdede i Det fjerne Østen under besværlige forhold, men



Figur 2.6. Den første nogenlunde succesfulde elektromagnetiske telegraf, var englænderne Cookes og Wheatstones nåletelegraf fra 1837. Princippet i den var, at afsenderen for at sende et bestemt tegn, skal få to af de fem magnetnåle på modtagerens apparat til at slå ud. Modtageren finder da det afsendte bogstav i skæringspunktet mellem de to nåles retninger. De to opfindere opnåede patent på dette princip, og deres telegraf blev i mange år anvendt af de engelske jernbaneselskaber.

w	----	5	-----
x	-----	6	-----
y	-----	7	-----
ü	-----	8	-----
z	-----	9	-----
æ	-----	0	-----
ø	-----	.	-----
å	-----	?	-----
1	-----	:	-----
2	-----	!	-----
3	-----	;	-----
4	-----	:	-----

Bemærk specielt, at koderne ikke har samme længde. De mest benyttede tegn er korte, mens de sjældne tegn er lange. Tegnet for et "e" og et "t" er henholdsvis en prik og en streg, mens et ":", består af 6 tegn med 3 streger og 3 prikker. Princippet med korte koder til de mest benyttede tegn bevirker, at en typisk tekst transmitteres hurtigere, end hvis alle tegnene havde samme længde. Dette kaldes data-kompression, og det spiller af prismæssige grunde en stor rolle den dag i dag.

Øvelse 3. Hvor mange koder?

Hvor mange forskellige koder kan der dannes med op til 6 prikker og streger?

Hvor mange forskellige koder kan der dannes, når koderne skal have fast længde på 1, 2, 3, 4, 5 og 6 tegn?

Figur 2.7. Princip for morsetelegraphen. A og B er to identiske telegraphstationer, der er forbundet til en metallisk leder. I den viste situation sendes et telegram fra B til A; A fungerer altså som modtager og B som afsender.

I det øjeblik B trykker sin telegraphnøgle ned, etableres der et elektrisk kredsløb fra batteriets positive pol, gennem B's telegraphnøgle, luftledningen, A's telegraphnøgle (der befinder sig i sin normale hvilestilling), trådspolen hos A, og tilbage til batteriet via jordpladerne. Den herved frembragte strøm gør A's spole magnetisk. Herved tiltrækkes et metalanker på den ovenover anbragte vippe, således at skrivestiften på vippens anden ende slår op mod en papirstrimmel, der føres forbi med jævn hastighed. Resultatet bliver derfor en prik eller en streg på papirstrimlen, afhængigt af hvor længe B's telegraphnøgle er trykket ned.

Den trænede telegraphfist behøver dog ikke at se på strimlen. Det er nok at registrere støjen fra skriveren.

færdiggjorde i 1871 forbindelsen fra Vladivostok over Japan og Kina til Hongkong. Da russerne samtidig havde lagt en telegraphlinie gennem Sibirien til Vladivostok, var der fra 1870'erne telegraphisk forbindelse til så godt som alle Jordens lande.

Øvelse 4. Fordele og ulemper

Angiv en række fordele, som morsetelegraphen har i forhold til Cookes og Wheatstones telegraph. Angiv dernæst hvilke ulemper, den eventuelt har?

2.4 Telefonen

På en vis måde var den elektromagnetiske telegraph let at opfinde. Der fandtes optiske telegrapher i forvejen, men de fungerede ikke tilfredsstillende. Følgelig eksisterede der et samfundsskabs behov for et apparat, der var bedre egnet til at overføre signaler fra et sted til et andet. Og som allerede nævnt lå den elektromagnetiske telegraph lige for, da Ørsted havde opdaget elektromagnetismen i 1820. Det eneste, der manglede, var et udviklingsarbejde fra ide til brugbar løsning.

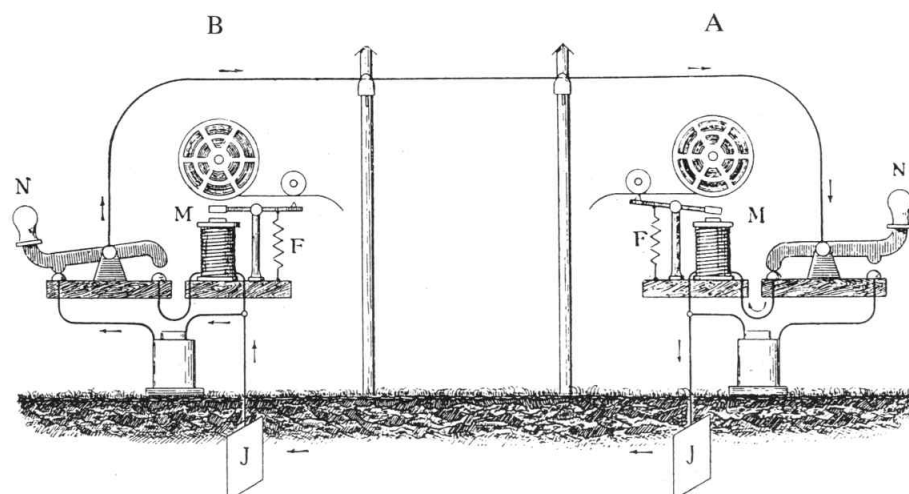
Anderledes forholdt det sig med telefonen. Mennesket havde aldrig før været i stand til at overføre tale over lange afstande, og meget få erkendte dette som et savn. Endnu færre troede det overhovedet ville være muligt. Dette er uden tvivl den egentlige grund til, at en brugbar telefon først så dagens lys i 1876, selv om den i princippet kunne være blevet opfundet kort efter Ørsteds og Faradays fundamentale naturvidenskabelige opdagelser fra henholdsvis 1820 og 1831. Til gengæld blev den i 1876 opfundet to gange. Eller rettere: to mænd nåede dette år ad vidt forskellige veje frem til de principper, hvorefter en te-

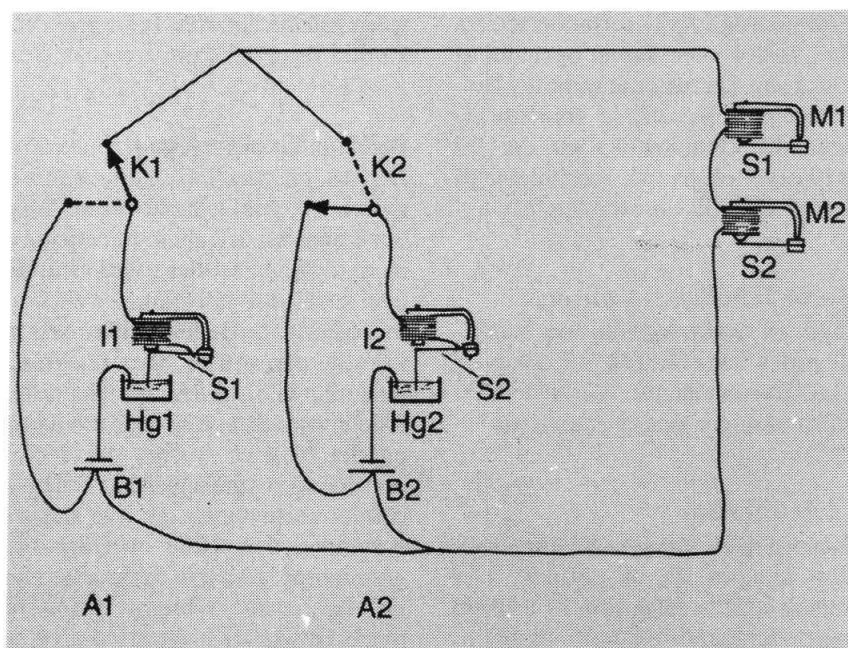
lefon kan konstrueres. I resten af dette kapitel fortælles kort, hvordan dette gik til.

Bells multipleks-telegraph

Den 18. oktober 1872 læste Bell i en avis, at det store telegraphselskab Western Union havde købt rettighederne til en ny opfindelse, der tillod samtidig overførsel af to telegrammer via samme ledning. Opfindelsen blev beskrevet som den største siden telegraphen var kommet til verden, for telegraphrafikken var inde i en rivende udvikling, og det blev et stadigt større økonomisk og organisatorisk problem at etablere alle de mange nye kobberledninger, der skulle overføre telegrammerne. Den nye opfindelse kunne altså spare Western Union for meget betydelige investeringer, og det blev antydnet, at selskabet var parat til at betale millioner af dollars for en multiplekstelegraph, der kunne overføre flere end to telegrammer samtidigt.

Avisartiklen blev den direkte anledning til, at Bell kom igang med de forsøg, der i løbet af tre år skulle føre ham frem til telefonen. Bell havde nemlig tidligere haft en løs ide til, hvordan man måtte kunne realisere en multiplekstelegraph. Han havde bemærket – hvad der var helt almindelig kendt dengang – at erfarne telegraphfister ikke behøvede at se prikkerne og stregerne på telegraphstrimlen, for at kunne oplæse indholdet af et telegram. Det var tilstrækkeligt, at de lyttede til modtageapparatets klappen efterhånden som telegrammet indløb. Men hvis den enkelte telegraphfist nu var trænet i kun at lytte efter en bestemt tone, så måtte det i princippet let kunne lade sig gøre at sende flere forskellige telegrammer gennem en og samme ledning på samme tid. Man skulle bare have det nødvendige antal



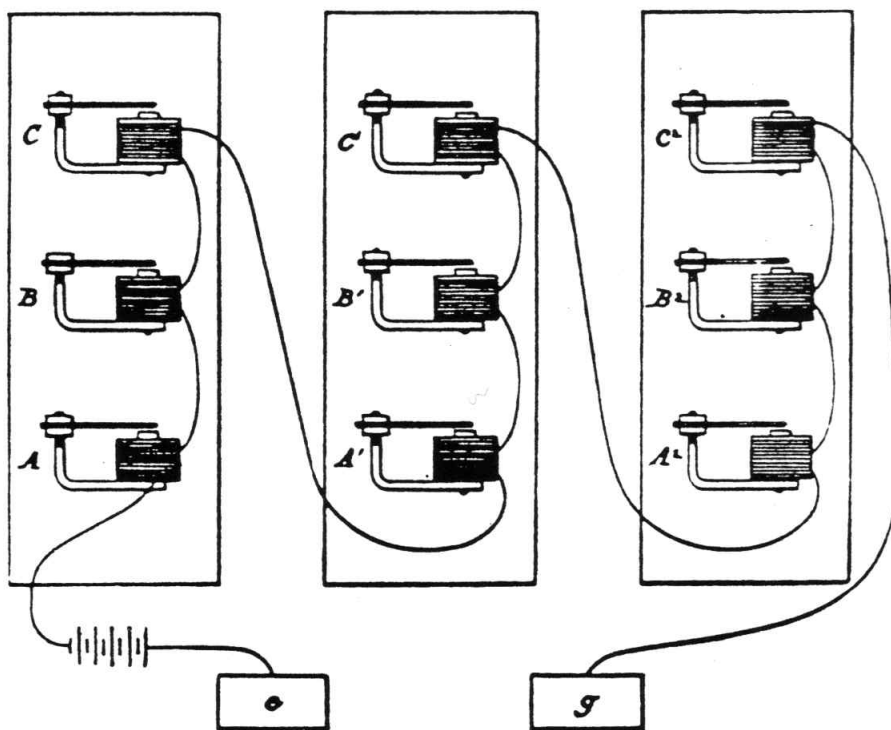


**A. G. BELL.
TELEGRAPHY.**

No. 174,465.

Patented March 7, 1876.

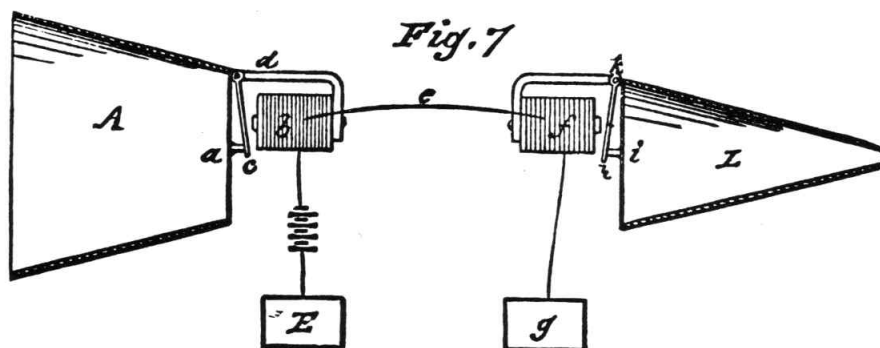
Fig 6.



Figur 2.9. Skitse af Bell og Watsons forsøgsopstilling den 2. juni 1875, da de gjorde den overraskende opdagelse, som på mindre end et år førte til telefonen. De 3 plader hver med 3 spoler og dertilhørende ståltunge er anbragt i hvert sit lokale. Når man knipsede til ene af ståltungerne i det ene værelse, kunne man høre den karakteristiske knips ved den tilsvarende ståltunge i det andet lokale. I dag vil vi sige, at den første fungerer som en mikrofon, og den anden som en højttaler.

Figur 2.10. Principe-tegning af Bells telefon i hans patentansøgning af 14. feb. 1876. Figuren er ledsaget af følgende beskrivelse af dens virkemåde:

"Armaturet c er i sin ene ende løst fastgjort til det udekkelede ben d af elektromagneten b, og dens anden ende fastgjort til centret af en uispændt membran a. En tragt, A, har til formål at koncentrere lydsvingninger på membranen. Når en lyd bliver talt ind i tragten, bliver membranen a sat i svingninger, armaturet c tvinges til at deltage i denne bevægelse, og der bliver således skabt elektriske svingninger i kredsløbet Ebefg. Disse svingninger svarer til de luftvibrationer, der forårsages af lyden - dvs de repræsenteres grafisk ved kurver, der ser ens ud. Den svingende strøm, der passerer gennem elektromagneten f får dennes armatur c til at kopiere bevægelsen af amaturet c. En lyd som den, der blev talt ind i A, kan nu høres komme fra L."



telegrafsendere, der fungerede med hver sin frekvens (tone), og lade dem sende hver sit budskab ud på den samme ledning. Herved ville man ganske vist få et sammenblandet elektrisk signal på ledningen, men de oprindelige budskaber burde kunne filtreres ud fra hinanden igen ved hjælp af passende modtagere, der hver især var afstemt efter den enkelte modtagers tone.

Som så mange andre måtte Bell i løbet af de kommende måneder og år erkende, at vejen fra en god ide til en fungerende model kan være lang og hård. Han havde for lidt tid, han manglede konstant penge og han havde for lidt erfaring med praktisk laboratoriarbejde til, at han rigtig kom nogen vegne. Ved et tilfælde kom han imidlertid i kontakt med en rig sagfører, Gardine Hubbard, der var meget interesseret i multiplekstelegrafi, og som lovede at støtte ham økonomisk. Fra efteråret 1874 fik han derfor bedre tid, og der blev desuden ansat en ung tekniker, Tom Watson, som skulle hjælpe ham med at opbygge det nødvendige forsøgsapparat.

I løbet af foråret 1875 gjorde Bell og Watson betydelige fremskridt, men der var stadigvæk problemer, der skulle løses, og det var under forsøget herpå, at de ganske uventet fik den berømte appelsin i turbanen.

Bell's telefonopfindelse

Den 2. juni 1875 arbejdede Bell og Watson som så ofte før med en multiplekstelegraf. I det lokale, hvor Bell opholdt sig, fandtes tre sendere og tre modtagere. Disse var serieforbundet med tre tilsvarende modtagere, som Watson arbejdede med i et tilstødende lokale. På et tidspunkt var senderne (og dermed også batterierne) koblet ud, og Bell og Watson arbejdede i virkeligheden med et helt simpelt system, som vist i figur 2.9.

En af Watsons ståltunger fungerede ikke, som den skulle. Han knipsede derfor til den med fingrene for at se, om den var i stand til at svinge frit. I samme øjeblik bemærkede Bell, at én af ståltungerne på hans eget modtageapparat vibrerede i takt med Watsons. I en senere redegørelse, har han beskrevet det videre hændelsesforløb således:

“Jeg råbte ud til Mr. Watson, at han skulle knipse sin ståltunge igen. For hver knips kunne jeg høre en tone af samme frekvens, som den der blev skabt af instrumentet i Watson's hæn-

der, og jeg kunne endda genkende den specielle kvalitet eller klangfarve, som svarede til knipset. Disse eksperimenter fjernede øjeblikkeligt tvivlen, der havde været i mit sind siden sommeren 1874, at induktionsstrømme, der genereredes af vibrationen af et armatur foran en elektromagnet, ville være for svage til at producere hørlige effekter, som kunne udnyttes i praksis til multiplekstelegrafi eller taletransmission.”

Som det fremgår af dette citat, havde Bell et år i forvejen været inde på tanken om at overføre lydsvingninger gennem en ledning, men at han på daværende tidspunkt havde anset det for at være umuligt. Nu var det derimod pludselig blevet en realistisk mulighed og fantastiske perspektiver åbnede sig. Det mente Bell i hvert fald, og allerede to dage senere demonstrerede han sin nye opdagelse for Gardiner Hubbard. Men Hubbard var ikke særlig interesseret. Bell måtte for alt i verden se at få sin multipleks-telegraf gjort færdig, og ikke lade sig distrahere af mindre væsentlige ting!

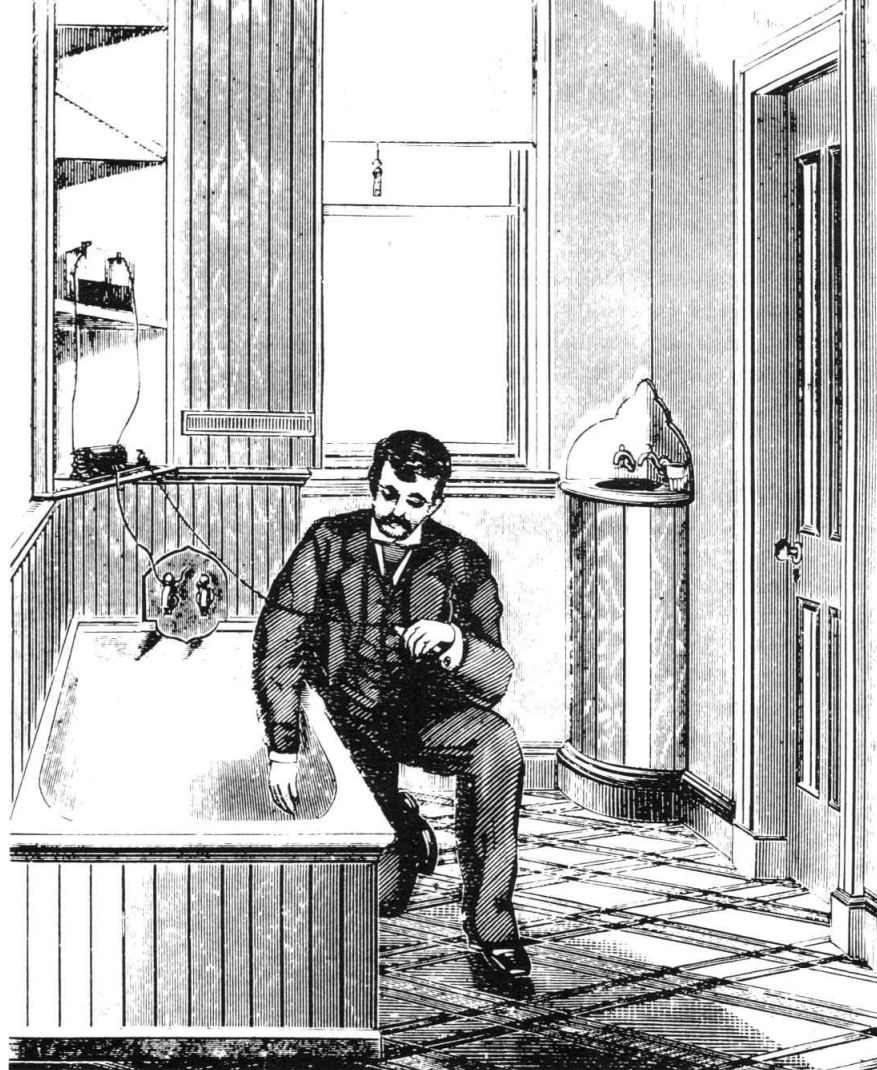
I de følgende par måneder måtte Bell derfor bruge størstedelen af sin tid på den harmoniske telegraf, men fra efteråret 1875 valgte han at koncentrere sig helt og holdent om telefonprojektet. På kort tid lykkedes det ham med assistance af Watson at fremstille en model (se figur 2.10), der som Watson udtrykte det “næsten gjorde det muligt for en person i den ene ende at høre, hvad der blev sagt i den anden ende”. Apparatet fungerede altså ikke helt tilfredsstillende, men Bell mente, det kun drejede sig om børnesygdomme, som sagtens kunne kureres. Det ville bare kræve mere tid. Og måske var tiden knap. I hvert fald bestemte Bell sig til ikke at afvente yderligere forsøg, før han udfærdigede sin patentansøgning. Ansøgningen blev indleveret på patentkontoret 14. februar 1876 – få timer før der indkom en foreløbig ansøgning om et telefonpatent fra en kendt opfinder ved navn Elisha Gray.

Elisha Gray's musikalske badekar
I 1874, da den unge og ukendte Bell for alvor gik igang med sin multiplekstelegraf, var Elisha Gray allerede en kendt og respekteret opfinder, der oven i købet også var godt på vej til at blive velhavende. I tidsrummet 1867 til 1874 havde han haft held til at gøre forskellige opfindelser, herun-



Figur 2.11 Bell indvier den første telefonlinie mellem New York og Chicago i 1892. Alexander Graham Bell (1847 - 1922) blev født i Edinburgh i Skotland, men udvandrede i 1870 sammen med sin familie til Canada. Faderen beskæftigede sig hele livet med studiet af menneskets stemme med henblik på at finde ud af, hvorledes man bedst lærer døve at tale, og Graham Bell var tidligt blevet interesseret i dette familiespeciale. I 1871 blev han ansat som døvstumlærer ved en institution for tale- og hørehæmmede i Boston, USA. Det var, mens han var her, at han i sin fritid arbejdede på det telegrafprojekt, der i 1875/76 kulminerede i verdens første overførsel af tale gennem en ledning.

der et pålideligt elektrisk relæ og en forløber for vore dages fjernskriver, som straks var blevet opkøbt af Western Union. Gray var derfor højt respekteret af Western Unions ledelse. Han blev betragtet som én af dette firmas største telegrafeksperter. I 1874 gjorde Gray den opdagelse, at hans badekar var musikalsk. Opdagelsen satte ham igang med nye interessante telegrafopfindelser, men bragte ham også - som det senere viste sig - på kollisionskurs med Bell.



Figur 2.12. En aften i slutningen af januar 1874 hørte Gray en mærkelig lyd ude i badeværelset. Han gik derud og fandt, at det var hans unge nevø, der var den skyldige. Nevøen morede sig med at tage elektriske stød ved hjælp af Gray's induktionsapparat, hvis primærspole han havde forbundet til et batteri. Ledningen fra den ene af sekundærspolens to poler havde han forbundet med vandhanen, og ledningen fra den anden pol holdt han i hånden. Gray lagde mærke til, at når nevøen lod en hånd glide langs kanten af badekarret, hørtes en lyd med samme tone som den, der kom fra den vibrerende fjeder i induktionsapparatet.

gaden til den anden dåse... De to drenge syntes at tale sammen i et lavt tonefald, og jeg blev øjeblikkelig interesseret. Jeg tog dåsen ud af den ene drengs hånd... og da jeg lagde øret til åbningen, kunne jeg høre drengens stemme fra den anden side af gaden. Jeg talte et øjeblik med drengen, lagde mærke til, hvorledes snoren var fastgjort i dåsernes bund, da pludselig problemet med elektrisk overførsel af tale stod klart for mig!"

Gray's telefonprincip (se figur 2.13) var meget simpelt, og han har måske ikke næret nogen tvivl om, at det ville virke. I hvert fald fremstillede han ikke på dette tidspunkt en fungerende model. Han nøjedes med kort at gøre rede for princippet i et såkaldt "caveat", en foreløbig patentanmeldelse, som han indleverede den 14. februar 1876, altså den samme dag som Bell indleverede sin færdige patentansøgning.

Bell vinder

Få dage senere fik både Bell og Gray besked om, at deres ansøgninger ikke umiddelbart kunne efterkommes, fordi de var i strid med hinanden, og fordi de patentbevilgende myndigheder følgelig først måtte undersøge sagen nærmere. Bell reagerede prompte. Han op søgte den ansvarlige patentsagfører, redegjorde i detaljer for sin ide, og fremlagde dokumentation for, at ideen allerede var undfanget i sommeren 1874. Gray derimod reagerede overhovedet ikke, hvilket umiddelbart kan forekomme temmelig overraskende. Patentlovgivningen foreskrev nemlig, at når et "caveat" var indgivet, skulle det også hurtigst muligt omskrives til en egentlig patentansøgning – i modsat

Gray arbejdede videre med "badekar-mysteriet", og han konkluderede hurtigt, at badekarret fungerede som en slags "modtager", der gengav enhver tone fra "senderen", altså induktionsapparatet. (Den bagvedliggende fysiske årsag er, at gnidningsmodstanden mellem to legemer i kontakt er proportional med strømstyrken gennem dem). Ideen til at konstruere det apparat, han kaldte en musiktelegraf, lå snublende nær. Allerede i sommeren 1874 havde han bygget en telegraf, der var i stand til at overføre 8 toner indenfor en oktav fra sender til modtager – altså en miniature-udgave af vore dages elektriske orgel. Musiktelegrafen var for Gray nærmest et stykke legetøj, men den var også kun det første skridt på vejen. I løbet af foråret 1874 konkluderede Gray, at det ikke alene skulle kunne lade sig gøre at konstruere en multiplekstelegraf, men det burde også være muligt at overføre tale gennem en ledning. Altså at konstruere en telefon - eller en stemmetelegraf, som Gray kaldte den. Tilsyneladende var Gray usikker på, hvilken af disse to ideer han skulle koncentrere sig om først, for det vides, at han diskuterede

sagen med flere Western Union folk. Men disse var til gengæld ikke i tvivl. Selvfølgelig skulle Gray koncentrere sig om multiplekstelegrafen, for det var her den store gevinst var at hente, mente de. Gray bestemte sig til at følge deres råd.

Elisha Gray's telefon

I løbet af efteråret 1875 hørte Gray rygter om, at en vis professor Bell arbejdede på at transmittere tale via elektricitet. Tilsyneladende bekymrede det ham ikke, for han tillagde stadig ikke telefonen nogen videre betydning. På en eller anden måde må hans tanker dog alligevel have kredset om emnet, for pludselig gik han igang med at realisere den. I sine erindringer fortæller han, at han fik ideen til den konkrete udformning af sin telefon en dag i efteråret 1875, da han tilfældigvis så to drenge lege med en "snortelefon", et legetøj der dengang blev lanceret under betegnelsen "de forelskedes telegraf". Han skriver:

"Jeg bemærkede to drenge, der hver havde en konservesdåse i hånden, og at der gik en stram snor fra midten af bunden i den ene dåse tværs over

fald ville det automatisk bortfalde. Når Gray ikke reagerede, var han godt klar over, at Bell ville få telefonpatentet, men tilsyneladende var han ret ligeglad. Hverken han eller hans rådgivere i Western Union syntes, det var en sag, der var umagen værd at få et langvarigt tovtrækkeri om. De koncentrerede sig helt og holdent om at få tildelt de amerikanske patentrettigheder til multiplekstelegrafen.

Ledelsen af Western Union manglede visioner. Dem havde Bell – foruden forståelsen for at skaffe sig publicity. Allerede i maj 1877 indrykkede han en annonce i aviserne for et sæt telefoner, som var udstyret med stålmembraner i stedet for den tidligere membran af skind, og som var i stand til at overføre samtaler over en afstand på op til 20 miles. Bell tilbød sine kunder at leje et sæt for \$ 20 om året, såfremt det var med “social purpose” for øje. Hvis der var tale om “business purpose” var lejen den dobbelte. Annoncen indrømmede, at apparaterne ikke var fuldkomne, men “efter nogle få forsøg, venner øret sig til den mærkelige lyd og man har ikke svært ved at forstå ordene”. Disse primitive telefoner blev en forrygende salgssucces, almindelige aviser skrev begejstret om “legetøjet”, det ansete tidsskrift “Scientific American” bragte i oktober 1877 en længere artikel om opfindelsen, hvori fremtidsperspektiverne blev pointeret, og selv i det mere konservative Europa vakte opfindelsen stor opmærksomhed. For eksempel begyndte firmaet Siemens & Halske i Tyskland allerede at fremstille og markedsføre sine egne telefoner fra efteråret 1877, hvilket de kunne tillade sig at gøre, fordi Bell’s patent ikke gjaldt i Tyskland. Andre

lande og andre firmaer fulgte hurtigt efter.

Naturligvis skulle der en lang række tekniske forbedringer til, før telefonen blev det pålidelige, effektive og selvfølgelige hjælpemiddel, den er idag. Bell’s sendeapparat, der i starten var konstrueret på samme måde som modtagerapparatet, viste sig hurtigt at være utilfredsstillende, og blev erstattet af Edisons langt mere følsomme kulkornsmikrofon (omtales side 21). Mikrofon og (høre)telefon blev integreret i et og samme apparat, hvilket gav et mere kundevenligt design. I stedet for at ledningsforbinde alle telefonere med hinanden blev telefoncentralen hurtigt indført som den eneste fornuftige løsning på problemet. Men selv ved telefonering over lange afstande var støj og forvrængning af signaler en alvorlig forhindring, som først fandt sin endelige løsning efter at det af Lee de Forest opfundne forstærkerrør fra 1906 blev taget i anvendelse fra omkring 1915. Men i takt med den øgede langdistancetrafik kom der tilsvarende problemer med organiseringen af telefoncentralerne. Mere herom i kapitel 5.

Opgaver

1. Hjemmelavet telegraf

Byg din egen telegraf ved hjælp af en morsenøgle, akkumulator og timer. I første omgang kan I starte med én sender og én modtager. Hvis det er for let kan I jo prøve at integrere en sender og en modtager i hver ende ligesom Bells rigtige telegraf figur 2.7.

2. Foredrag om telefonen

Hold et foredrag om de tekniske sider af udviklingen af Bells telefon fra 1876, hvor du demonstrerer principperne. Prøv også at demonstrere principperne eksperimentelt ved hjælp af noget af skolens udstyr.

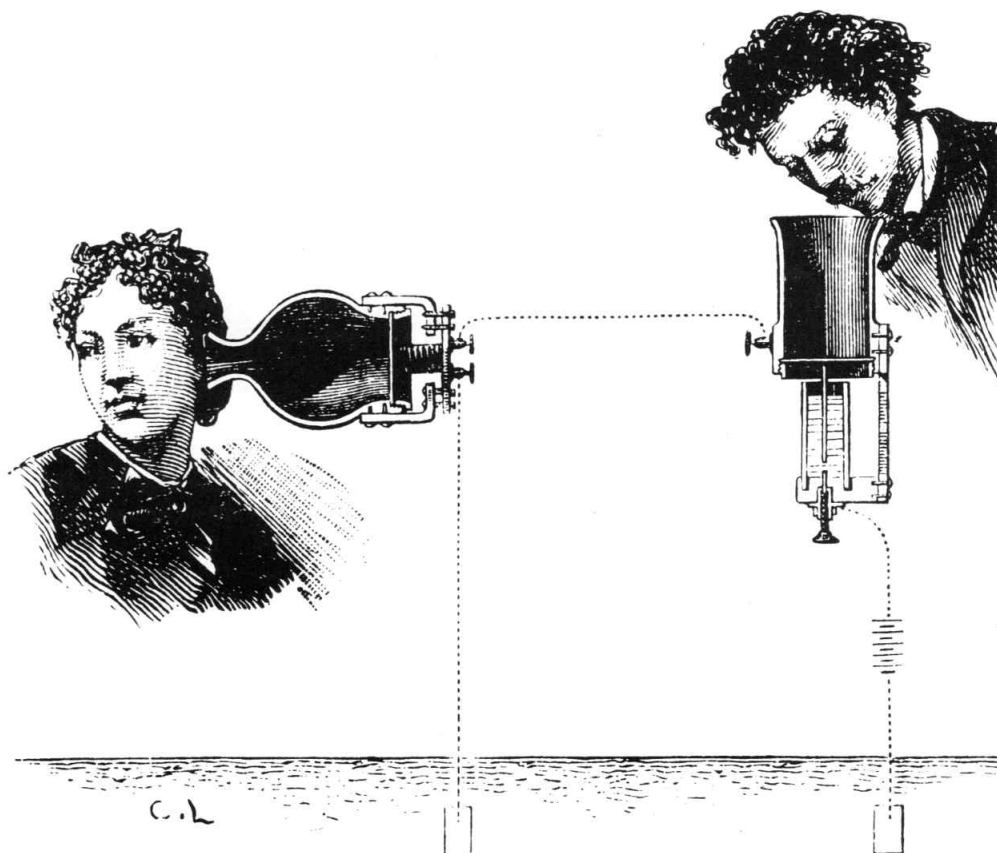
3. Grays telefon

Gør rede for princippet i Grays telefon fra 1876, og forsøg at konstruere en sådan efter anvisningerne i Grays foreløbige patentansøgning.

4. Telefonens betydning

Skriv en A4-side om telefonens betydning og om de forskellige anvendelser siden opfindelsen.

Figur 2.13. Tegning, der illustrerer princippet i Grays telefon fra 1876. A er et metalbæger, hvis bund består af en tynd membran a. På membranen er fastgjort en metalelektrode K, som stikker ned i en beholder med en ledende væske B, og som når ned i nærheden af elektroden V. Når en person taler ned i tragten, bliver membranen sat i svingninger. Herved vil afstanden mellem de to elektroder variere i takt med talen, den elektriske modstand i det viste kredsløb vil altså variere i denne takt, og det samme vil strømmen gennem elektromagneten, der sidder i modtagerapparatet. Membranen i C vil derfor gengive lyden, der er talt ned i A.





New York anno 1890.

Analogt eller digitalt?

Digitalt

Når information sendes som koder, kaldes det for digital kommunikation. F.eks. kan vi opfatte bogstaver som koder. Dermed er en skreven information en digital information. Det at skrive er en digitalisering af talesproget. Koden er alfabetet og reglerne er skriftsproget. Talesproget indeholder sætninger, der består af ord. Ordene skrives med bogstaver ifølge den kollektive vedtagelse kaldet retskrivningen. Alt i alt har vi omformet det talte til det skrevne.

Den anden vej kalder vi for at læse. Her starter vi med bogstaverne og slutter med det sproglige indhold. Til hvert bogstav svarer regler for lyde, så hvis man kender reglerne og møder et ukendt ord i skriftsproget, har man i princippet mulighed for at gætte sig til det tilsvarende ord i talesproget. Den erfarne læser genkender dog ikke de enkelte bogstaver i ordene. Derimod genkender vi hele ord, og denne genkendelse er i høj grad styret af vor erfaring med sætningernes opbygning og forventninger til indholdet.

Morsekoden

Morsealfabetet, hvor hvert bogstav har en kode bestående af op til 6 prikker eller streger, er blot at gå et skridt videre, idet en skreven information omformes til prikker og streger. Hvis man kender koden, kan man skrive og læse morsesignaler.

Analogt

I stedet for de digitale signaler kan vi også sende information analogt som f.eks. ved den traditionelle telefon. I ledningerne sendes et elektrisk signal, der varierer i takt med lydsvingningerne hos den, der taler. Her er der netop ingen forsøg på at lave koder for informationen. Tværtimod forsøger man at omforme selve lydsvingningerne, der indeholder informationen. Omsætningen fra tryk til spænding sker i en mikrofon (se evt. side 21). Den er i princippet lineær, så en fordobling af trykket giver en fordobling af spændingen. I den anden ende omsættes de elektriske variationer igen til trykvariationer i

en højttaler, så de oprindelige lyde genskabes hos modtageren.

Digitalt og analogt historisk

Telegrafien med morsekoder er digital kommunikation. Den blev siden overgået af tale-telefonen, som Bells nye apparat blev kaldt. Her sendes signalet analogt. Med indførelsen af moderne teknologi, som vi omtaler i de følgende kapitler, går man ved telefonen tilbage til digital transmission. Nu sendes talen som koder. Altså digitalt.



Figur 2.15. Billede af en telefon fra den tid, hvor centralerne var manuelt betjente. Det karakteristiske håndsving skulle bruges til at ringe op og ringe af, når man skulle starte og slutte en samtale.

Opkald

Opkaldet fra den ene abonnent til den næste har også undergået store forandringer. Vi springer et øjeblik tilbage til telefonens barndom, hvor Anton ønsker at tale med Bolette. Anton drejer i telefonapparatets håndtag. Det bevirker, at en klokke på den lokale central ringer samtidig med, at Antons klap på centralens omstillingsbord falder ned. Telefonisten tilkaldes af klokken, og ser på klappen, at det er Anton, der ønsker at kalde op. Telefonisten slutter med

en omskifter sit eget telefonapparat til Antons, så hun kan tale med ham. Han beder nu om at måtte tale med Bolette. Det får telefonisten til at ringe til Bolette, og når hun tager røret, etableres forbindelsen mellem Anton og Bolette med en ledning på omstillingsbordet. Samtidig vendes et timeglas for at telefonsamtalens længde kan registreres, og hvis alt går regelret for sig, kobler telefonisten sig ud af samtalen. Efter samtalen lægger både Anton og Bolette røret på, og Anton husker at "ringe af", for at telefonisten kan aflæse antallet af streger på timeglasset svarende til samtalens længde.

Med drejeskivernes indførelse ved de første automatiske centraler blev opkaldet gjort digitalt. Cifrene i telefonnumrene drejes 1 ad gangen. Når skiven selv drejer tilbage, sendes et antal klik til centralen svarende til nummeret. Er tallet 1, sendes 1 klik osv. op til tallet 0, hvor der sendes 10 klik. Selve klikkene er analoge impulser til centralens elektronik, men det afgørende er, at det opfattes som en kode, og så er det digitalt. Problemet med drejeskivens langsommelighed er, at cifrene sendes som en slags morsekode med op til 10 klik, før næste ciffer kan sendes. Med det numeriske tastatur på de hidtil nyeste telefoner er der igen sket et skift. Nu er koden toner, så hver tast har en tonekombination. Tonerne sendes, så længe tasten holdes nede. I praksis er det nok at holde tasten nede 20 ms, før den er registreret på centralen. Igen er det et analogt signal, og igen tolkes det digitalt.

Optisk eller elektrisk

Transmissionen har undergået tilsvarende forandringer. De første telegrafer var optiske i den forstand, at man skulle se signalerne over store afstande. Dette blev udkonkurreret af den elektriske telegraf og siden telefonen, hvor signalerne sendes som elektriske svingninger i ledninger. Siden er man med lysledere og moderne teknologi vendt tilbage til det optiske. Det sker ved at sende signaler som lys i lyslederkabler.

3. Telefonen

Siden Bells patentansøgning i 1876 har telefontjenesten udviklet sig til et verdensomspændende netværk. Telefonnettet er ubetinget den største sammenhængende tekniske indretning i verden. Fra et hvilket som helst telefonapparat i Danmark kan man selv (uden medvirken af en telefonist) ringe til telefonabonnenter i over 150 lande. Selvom der er få telefonapparater pr. indbygger i lande som Den kinesiske Folkerepublik og de fleste afrikanske lande, kan man med en vis ret sige, at størstedelen af verdens befolkning kan "ringe sammen".

Telefonen har, udover at være af stor betydning for verdenssamfundets struktur og de sociale relationer mellem mennesker, vist sig at være den mest lønsomme tekniske opfindelse der er gjort til dato. Ialt bruges ca. 0,5% af verdens samlede omsætning til investeringer i telekommunikation (kilde UTI). Der udførtes i Danmark 4,6 mia. indenlandske samtaler i 1991. Den samlede danske teleomsætning var samme år 17,9 mia. kr. Grunden til telefonens succes er formentlig, at den på en måde forlænger, forstærker eller forbedrer menneskenes naturlige kommunikationsform - samtalen, uden at brugeren behøver føle sig besværet af teknologien. I løbet af de sidste 10 år er der fremkommet en række nye kommunikationsformer, der benytter telefonnettet. Her tænkes for eksempel på datakommunikation via modem, telefax og diverse alarm- og overvågningssystemer. Fælles for disse systemer er, at de betjener sig af tonesignaler, der overføres som om, det var tale. På f.eks. de transatlantiske telefonkabler udgør den form for teletrafik mere end 10% af trafikken – et tal, de fleste forventer vil stige.

3.1 Telefonens opbygning

Siden Bells opfindelse er der ikke sket meget med telefonen funktionelt. Nu som dengang opfylder den vore behov for overførsel af tale over store afstande.

Hos hver af samtalepartnerne befinder der sig en "brugerterminal" dvs. et telefonapparat, der sætter brugeren i forbindelse med telenettet. Mellem telefonerne er der ledninger hvorigen signalerne fra den talende til den lyttende transmitteres. På sin vej passerer signalerne en eller flere telefoncentraler.

Telefonabonnenterne mærker imidlertid intet til det. I det følgende ser vi bort fra selve telefonnettet og alle centralerne, der strukturerer det. Vi vender tilbage til telenettet i kapitel 5.

3.2 Analog transmission

Telefonforbindelsen mellem to abonnenter kan etableres med to telefonapparater, to ledninger og et batteri.

Følger vi talen hos abonnenten i den ene ende, sendes den ind i mikrofonen i røret, hvor den omdannes til et elektrisk signal. Dette sendes som spændingsvariationer gennem ledningerne til modtageren. Undervejs kan der være placeret et antal forstærkere, der sørger for, at signalet kan registreres hos modtageren. Her omsættes de elektriske svingninger igen til trykvariationer via højttaleren i røret hos modtageren.

Øvelse 1. Telefonledning

Abbonentforbindelserne kan være fra 0 til 8 km lange. Installationen er udført med kobbertråd med en resistans på 0,086 Ohm/meter. Telefonapparatet har en samlet modstand på 600 Ohm, og telefoncentralen for-

syner de to ledninger i abonnentforbindelsen med 48 V spændingsforskel gennem en 600 Ohm modstand.

Tegn et elektrisk diagram over forbindelsen med spændingsforsyningen fra centralen, telefonapparatet og de to ledninger til abonnenten.

Beregn den største og den mindste strøm, der kan forekomme i kredsen til de forskellige abonnenter.

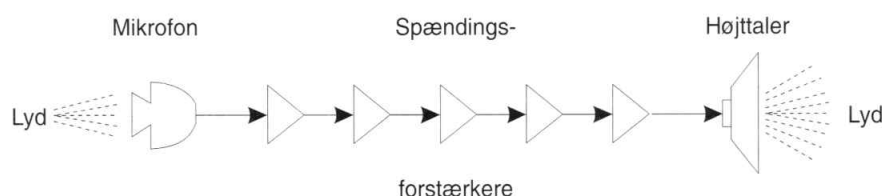
Beregn den største og den mindste elektriske effekt, der afsættes i et telefonapparat.

Telefonen er forlængelsen af den naturlige samtale mellem to personer. Først ser vi lidt nærmere på denne samtale uden telefonen, hvor vi kun taler om lyd, og vi derfor ser bort fra alt det visuelle så som hændernes fakter, mimik etc.

Talen formes hos den talende med munden og overføres gennem luften til øret hos den lyttende. I detalje, formes lydene i talen med stemmebåndene, luften fra lungerne, tungen, ganen og læberne. Stemmebåndene sidder i struben, og er de to bånd, der danner lyden, når luften fra lungerne presses gennem dem. Derved sættes de i svingninger. Stemmelejet bestemmes af, hvor meget båndene strammes, længden og massen. Jo længere, jo tungere og jo slappere stemmebånd, jo dybere bliver talen. Derfor ligger kvinders tale generelt højere. I puberteten vokser specielt drengenes strube, og dermed deres stemmebånd. Stemmen er i overgang.

Lydene formes i mundhulen, hvor tyngens placering og læbernes stilling er afgørende. Mærk selv efter, hvordan udtalen af vokalerne ændrer tungen og læbernes stilling.

Øret hos modtageren er bygget til at modtage lydene i det talte. Det ydre øre opfanger lydende og sender dem til sneglen i det indre øre. Sneglen er udstyret med nervetråde af aftagende længde, hvor hver nervetråd er følsom overfor en bestemt frekvens. Det



Figur 3.1 Lydens rejse fra den talende i den ene ende til den lyttende i den anden ende af forbindelsen.

Lydbølger

Tale kan opfattes som sammensat af enkeltlyde. Lad os derfor betragte en enkelt langtrukket lyd, for eksempel aaaaaa..

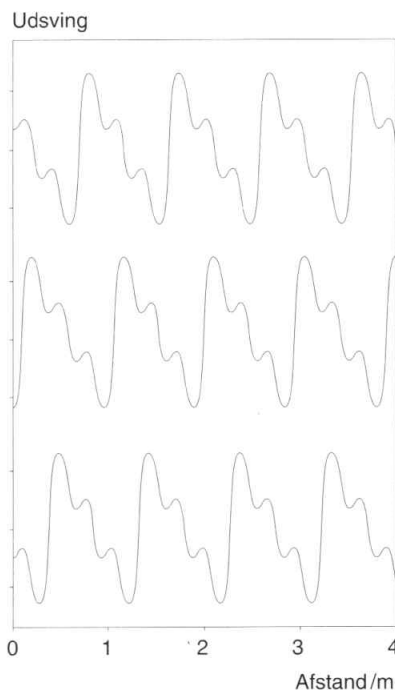
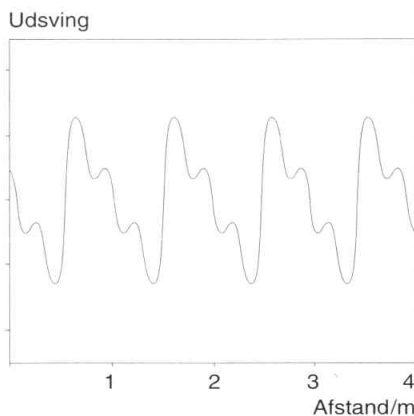
Lyden forplanter sig i luften som trykvariationer, der bevæger sig væk fra afsenderen, som "ringe i vandet" eller rettere sagt, som "ringe i luften". Det sker med en fart af ca. 340 m/s fra afsender til modtager.

Andre lyde, der ikke er langtrukne som i ovennævnte eksempel, vil ikke være periodiske. Det er kun i de situationer, hvor vi har et periodisk signal, at det giver mening at tale om bølgelængde og svingningstid for et signal.

Lyde fra musikinstrumenter har en meget karakteristisk klang i starten under "indsvingningen". Efter dette er det meget ofte et periodisk signal med en veldefineret svingningstid og bølgelængde.

Lydbølger udbreder sig normalt med samme hastighed i alle retninger uanset bølgelængden. Svingningstiderne for lydsvingninger er normalt meget små i forhold til vores almindelige tidsangivelser i sekunder, minutter etc.. Derfor er det ofte mere

Figur 3.2 Et øjebliksbillede af trykvariationerne i rummet mellem afsender og modtager. Den langtrukne lyd giver anledning til et signal, der gentager sig selv i et regelmæssigt periodisk mønster. Det enkelte mønster kaldes en periode, længden af mønstret kaldes signalets bølgelængde og betegnes med L eller λ . Bølgelængden er dermed den mindste afstand signalet skal flyttes frem eller tilbage for at falde sammen med det oprindelige signal. Udsvingets maksimale værdi kaldes amplituden og betegnes A .



Figur 3.3. Lydens bevægelse illustreret ved hjælp af en tegneserie. Serien består af øjebliksbilleder af den samme bølge, men tegnet til en række tidspunkter med 1,0 ms mellem hvert billede. Tiden der tager bølgen at bevæge sig en periode eller en bølgelængde, kaldes svingningstiden T . På figuren er svingningstiden 3,0 ms og med en tid på 1,0 ms mellem hvert billede, svarer det til, at det næste billede i rækken ville falde oven i det første.

bekvemst at angive antallet af svingninger (perioder), der udsendes eller modtages pr. tidsenhed i stedet for svingningstiden.

Antallet af svingninger pr. sekund kaldes frekvensen, og betegnes f . En svingningstid på f.eks. 0,030 sek svarer til, at der modtages 33,3 bølger/sek. Frekvensen siges at være 33,3 Hz, og enheden Hz svarer dermed til bølger/sek.

Generelt er sammenhængen mellem frekvens og svingningstid, T , givet ved:

$$f = \frac{1}{T}$$

Frekvensen for en tone angiver tonehøjden, og må ikke forveksles med lydstyrken. Med klaveret som ek-

sempel svarer frekvensen til tonen, man hører, når en bestemt tangent anslås. Lydstyrken svarer derimod til, hvor hårdt tangenten anslås.

Bølgens fart, v , er den tilbagelagte vej pr. tid. Da svingningstiden T netop er tiden, det tager bølgen at bevæge sig bølgelængden λ , gælder der:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \frac{1}{T} = \lambda \cdot f$$

Øvelse 2. Lyd i øret

Udregn bølgelængden af signalet i eksemplet på figur 3.2, når afstanden fra munden til øret er 4,0 m. Forestil dig munden lige til venstre for figuren og øret lige til højre. Hvor mange perioder rammer øret pr. sek, når lydhastigheden sættes til 340 m/s? Beregn frekvensen.

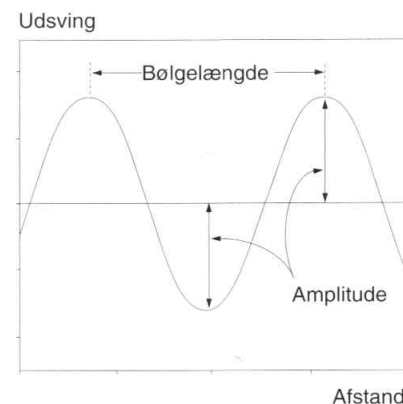
Skitser i et koordinatsystem trykvariationerne inde i øret som funktion af tiden de første 10 ms. Forklar hvorfor denne kurve bliver "spejlvendt" i forhold til figur 3.2.

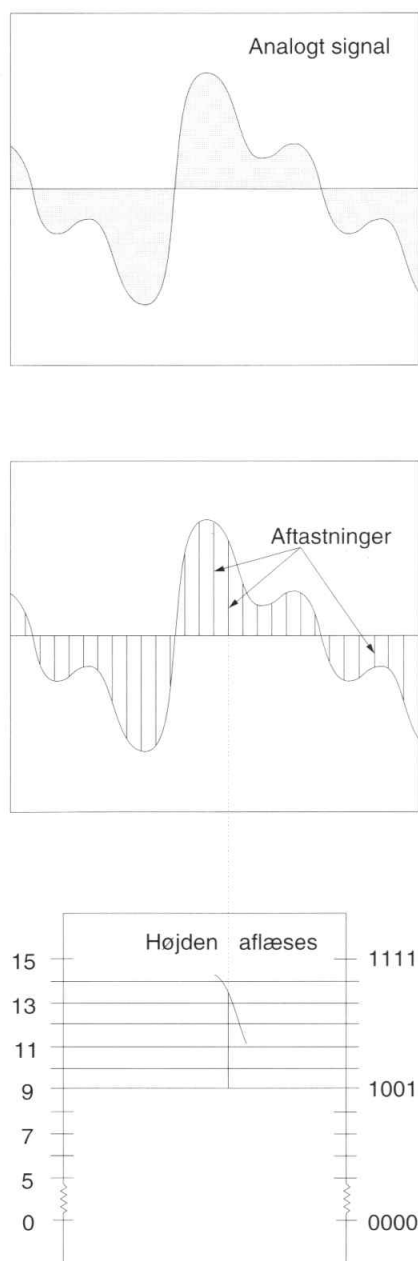
Øvelse 3. Frekvens

Lysbølger bevæger sig med $3,00 \cdot 10^8$ m/s. Bølgelængden for blåt lys er ca. $4,6 \cdot 10^{-7}$ m. Beregn frekvensen for dette lys.

Frekvensen for rødt lys er $4,6 \cdot 10^{14}$ Hz. Hvad er bølgelængden for lyset?

Figur 3.4. Sinusbølge, der illustrerer amplitude og bølgelængde for et periodisk signal. Rene sinusbølger er meget sjældne i praksis ved lyd, men man opfatter undertiden de realistiske signaler som sammensat af sinusbølger. Det er en af grundene til, at fysikere ofte forbinder dem med lyd.





Figur 3.5 Et analogt signal digitaliseres. Det sker ved at måle signal-spændingen mange gange pr. tidsenhed. Hver måling giver et tal. Det er det digitale signal. Hvis spændingerne inddeles i 15 spring, er det digitale tal mellem 0 og 15, der kan skrives binært med 4 bit fra 0000 til 1111.

0 =	0000	8 =	1000
1 =	0001	9 =	1001
2 =	0010	10 =	1010
3 =	0011	11 =	1011
4 =	0100	12 =	1100
5 =	0101	13 =	1101
6 =	0110	14 =	1110
7 =	0111	15 =	1111

Figur 3.6 De første 16 binære tal. I praksis benyttes 256 niveauer.

meget komplicerede nervesignal sendes til talecentret i hjernen, til "forarbejdning".

Telefonen, som skal overføre samtalen over store afstande er "transparent" for brugerne, så de blot taler og lytter i telefonen, som om det var en almindelig samtale. I telefonrøret er der anbragt en mikrofon og en højttaler. Omsætningen er lineær, og en sådan transmission kaldes analog, idet spændingsvariationerne er "analoge" med trykvariationerne. I den anden ende af ledningen omsættes spændingsvariationerne tilbage til trykvariationer i øret på modtageren med en højttaler.

3.3 Digital transmission

I mange tilfælde kan det være hensigtsmæssigt at omforme de analoge signaler til digitale signaler. I et digitalt signal repræsenteres signalet af en række talkoder i stedet for et analogt elektrisk signal. "Digital" kommer fra latin og betyder "vedrørende fingrene". Det hentyder altså til noget med at tælle på fingrene.

I det følgende ser vi på, hvordan det oprindelige analoge lydsignal omformes til et digitalt signal, transmitteres og siden gendannes som et analogt signal. Det lyder, som om man går over åen efter vand, når man først omsætter det analoge signal til et digitalt signal og siden gendanner det igen. Men fordelene er mange:

Transmission af digitale signaler giver billigere tekniske løsninger end transmission af analoge signaler, når der er tale om store transmissionsbehov. Ved at overføre tale med de samme talkoder, der benyttes i edb-verdenen, kan man benytte samme billige teknologi.

Et digitaliseret signal tåler transmission over "dårlige" transmissionskanaler, fordi det kan regenereres, hvis signalkvaliteten bliver for ringe. Lydkvaliteten kan gøres næsten vilkårlig god, hvis man er villig til at betale for det nødvendige udstyr.

Når først signalerne er digitaliserede, er der ingen forskel på, om det er en varmeregning, en telefonsamtale eller et TV-signal, der transmitteres. Telefonselskaberne kan derfor tilbyde deres kunder mange forskellige servicetilbud med kun ét telenetværk.

Omsætningen fra analogt til digitalt signal – også kaldet digitalisering – sker ved at måle den analoge spænding til en række regelmæssige tidspunkter. Selve talkoden af målingen er det digitale signal. Det er praktisk

at anvende det binære talsystem. Det binære talsystem er et positionssystem, som vi kender det fra talsystemet, men med kun 2 forskellige cifre i modsætning til de sædvanlige 10. Se figur 3.6. Til digital telefoni anvendes i øjeblikket 8 cifre, bit, til at repræsentere et tal.

Den faste længde på tallene betyder, at tallene kan transmitteres efter hinanden i bundter af 8 bit. Hos modtageren registreres signalerne tilsvarende i bundter af 8 bit og omsættes til de tilsvarende spændinger med en D/A-omsætter (Digital til Analog). Herved bliver det oprindelige analoge signal genskabt – dog med en lille unøjagtighed i forhold til det oprindelige signal. Målingen af spændingen giver altid et helt tal, og derfor sker der uvægerligt afrundingsfejl under omsætningen mellem det analoge og det digitale signal. Jo færre spændingstrin, man benytter, jo større forskel bliver der mellem det oprindelige og det gengivne signal.

Tilsvarende spiller det en afgørende rolle, hvor tit spændingen måles. Jo hurtigere måling, jo højere frekvenser kan gives. Når lydene igen skal genskabes fra digitale tal til en analog lyd, er det vigtigt, at der er information nok til at genskabe signalet rigtigt. I praksis kan man genskabe en tone, hvis den er målt 2 gange pr. svingning. Det betyder, at måler man 8000 gange pr. sekund, kan man genskabe lyde med frekvenser op til 4000 Hz. Vil man derfor kunne transmittre lyde med stor frekvens i de digitale telefoner, sætter det en nedre grænse for antallet af målinger pr. sek. En hurtig måling med et stort antal cifre giver en nøjagtig gengivelse, men til gengæld giver det et stort antal cifre, bit, som skal transmitteres pr. tidsenhed, hvilket naturligvis fordyrer transmissionen.

Øvelse 4. Digitale telefoner

Digitalisering af telefonsamtaler er fastlagt internationalt. Lyden måles 8000 gange pr. sek. Hver måling skrives med 8 digitale cifre (8 bit).

Med 3 bit kan vi danne tallene fra 0 til 7. Hvor mange forskellige trin kan en måling indeles i med 8 bit?

Hvor mange digitale cifre (bit) skal transmitteres pr. sek fra en enkelt telefonsamtale målt 8000 gange pr. sek med 8 bit ad gangen?

Hvor mange digitale cifre skulle man transmittre pr. sek med en dårlig standard på 3 bits opløsning målt 500 gange pr. sek?

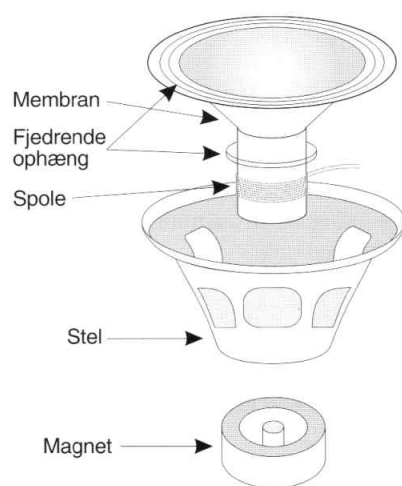
Højtaler og mikrofon

I en højttaler, se figur 3.7, er en elektrisk spole anbragt i et stærkt magnetfelt. En variabel strøm sendes gennem spolen, med det resultat, at denne flytter sig i magnetfeltet i takt med strømmens styrke. For enden af spolen er limet en membran i form af en papskive, som bevæges i takt med spolen. Yderst er papskiven fastgjort til huset med en gummikrans eller et andet bøjeligt materiale, som tillader skiven at svinge. Papskiven sætter luften i bevægelse, og vi har derved fået omdannet de elektriske signaler til den lyd, der forplanter sig videre gennem luften.

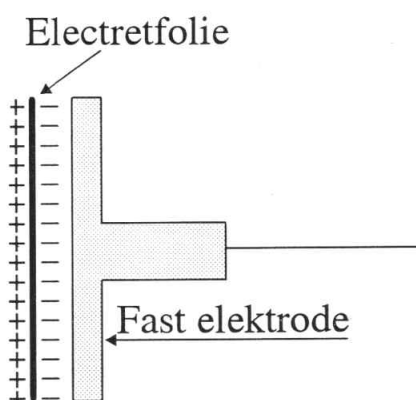
Der er mange måder man kan lave en højttaler på, men fælles for dem er, at en vekselstrøm sætter en membran i svingninger. Disse svingninger skaber derefter trykbølger i luften.

Øvelse 5. Højtaler

En højttaler har typisk en modstand på 6 ohm. Beregn strømstyrken gennem højttaleren, når spændingen fra forstærkeren er 12 volt. Regn som om det er jævnstrøm. Hvor stor effekt afsættes i højttaleren?



Figur 3.7 Skitse af en højttaler, der består af en spole anbragt i et kraftigt magnetfelt. Når strømmen i spolen varierer, sættes spolen i svingninger. Disse svingninger forplanter sig til membranen, der igen danner trykvariationer i luften. Dermed er lyden dannet fra højttaleren.



Figur 3.8 Mikrofonmembranen er her et stykke ganske tyndt electret-folie. Denne specielle plastfolie har den egenskab, at der kan 'fastfryses' en elektrisk ladning på overfladerne af folien. Når folien sættes i bevægelse af lydbølgerne, bevæger ladningen sig med. Elektronerne i den faste plade påvirkes af den bevægede ladning, og giver sig til at svinge i samme takt som membranen. Dette forårsager en elektrisk strøm, der følger membranens bevægelser nøje. Signalet er meget svagt. Der er derfor anbragt en lille forstærker, bestående af en field-effekt transistor inde i mikrofonhuset.

Electret mikrofonen er populær, fordi man kan opnå meget høj kvalitet i lyd-gengivelsen med en ganske billig konstruktion.

En mikrofon er funktionelt set en omvendt højttaler, der omsætter lydens svingninger til elektriske signaler. Man kan da også anvende en højttaler som mikrofon: Ved at tale ind i højttaleren sættes membranen i svingninger, der forplanter sig videre til spolen. Dermed kommer spolen til at bevæge sig i takt med lydsvingningerne, og en bevæget spole i et magnetisk felt inducerer en spændingsvariation. Dette signal kan så forstærkes og bruges som mikrofonens udgangssignal. Denne type mikrofon produceres og sælges i store styktaal under betegnelsen dynamiske mikrofoner. Andre former for højttalere kan normalt også bruges som mikrofoner.

Den almindeligste mikrofontype nu om dage er den såkaldte electret mikrofon, der vises skitseret i figur 3.8.

En anden nyere mikrofontype er interessant, fordi man i den har formået at samle hele mikrofonfunktionen i et element. Mikrofonmembranen er skiftet ud med en krystal, der har den egenskab, at der dannes en spændingsforskel mellem krystallens sider, når krystallen deformeres en smule. Dette fænomen kaldes piezoelektrisk effekt. Effekten benyttes også i nogle grammofoon pick-up typer. Her sætter pladens riller via pick-up'ens nål krystallen i svingninger, så grammofoonens riller omsættes til elektriske signaler.

Al Taletelefoner anvendes meget den oprindelig af Edison angivne Kulkornmikrofon, der, som bemærket, beror paa samme Princip som Mikrofonen. Den almindelig brugte Taletelefon præ-

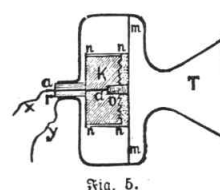


Fig. 5. Den almindelig brugte Taletelefon præ-senterer sig som et Metalhus med Taletragt. Fig. 5 viser i grove Træk dens Indre i Tværsnit. Inden for Taletragten T er der anbragt den ganske tynde Jærnplade m, og bag ved den i kort Afstand derfra findes et chindrist Stykke Kul K, der er furet paa den mod Jærnpladen vendende Endeflade (vca Kuls Tværsnit visende sig som Tallet) og har et dybere Hul o i Midten.

Figur 3.9. Gennem årtier har man i telefoner anvendt en videreudvikling af den kulkornsmikrofon, der i 1877 blev opfundet af den amerikanske opfinder, Thomas Alva Edison. Kulkornsmikrofonen indeholder kulkorn indkapslet i et cylindrerformet metalhus, samt en membran i form af en ledende plade. Mellem membranen og metalhuset er der en fast spændingsforskel, f.eks. fra et batteri, og lydens svingninger sætter kulmembranen i svingninger. Det ene øjeblik presses kulstøvet lidt sammen, modstanden i kulstøvet falder, strømmen stiger. På tilsvarende måde falder strømstyrken i takt med, at trykket på membranen falder. Dermed har vi skabt et signal med en strømstyrke, der svinger i takt med lydsvingningerne.

Øvelse 6. Mænd og kvinder

Vurder frekvensen af de højeste toner, som kan overføres med digitale telefoner, når det kræves, at et signal måles mindst 2 gange pr. svingning, for at det kan genskabes hos modtageren.

Dagens telefoner skærer frekvenser over 3400 Hz væk.

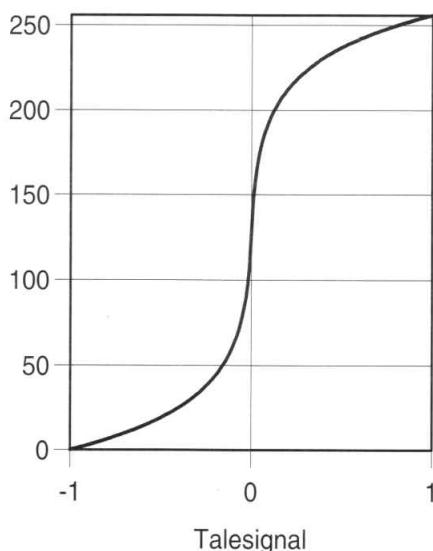
Hvorfor er mænd generelt lettere at kende på stemmen i en telefon end kvinder?

Når spændingsvariationerne fra mikrofonen i telefonen sendes i kode som hele tal, vil der opstå afrundingsfejl. De vil høres som støj hos modtageren. Øret er indrettet, så det let

Figur 3.10 Talesignalet varierer i styrke. Øret er indrettet på at genkende tale i forhold til den øvrige støj. Ved meget svage signaler er øret meget følsomt for støj og ved kraftige signaler er det ikke så afgørende med små afvigelser. Derfor har man indført en speciel skala kaldet A-skalaen. Den inddeler spændingsområdet i små intervaller omkring midten svarende til svage signaler og store spring i enderne.

Dette er et eksempel på datakompression, hvor man forsøger at sende så få bit som muligt, og stadig opretholde den ønskede kvalitet. Omkostningen for telefonselskaberne vokser nemlig i takt med antallet af bit, som skal transporteres i telefonnettet.

Komprimeret signal 256 niveauer



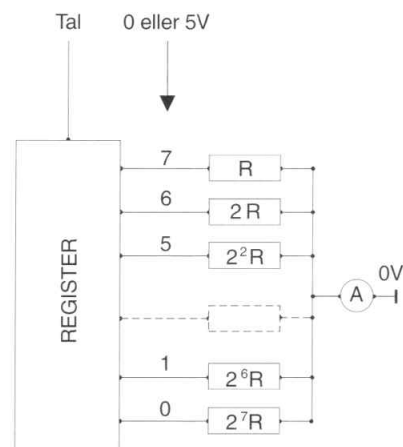
A/D og D/A-omsættere

Der er mange forskellige måder at lave omsættere på, men her vil vi indskrænke os til at se på den simpleste D/A-omsætter, der kan omsætte digitale signaler til analoge. Den er lavet af modstande. Lad os sige, at de digitale signaler er på 8 cifre (8 bit), og lad os vælge spændingen +5 volt og 0 volt til at svare til hhv. 1 og 0. Cifrene samles sammen 8 ad gangen og sendes til hver sin modstand som vist på figur 3.11. Det mest betydende ciffer sendes til den mindste modstand. Gennem modstandene til de mest betydende cifre vil der gå store strømme, hvis talværdien er 1. Ved at vælge talværdierne af modstandene, så dens størrelse falder med en faktor 2 for hver bit vil der på udgangsledningen gå en strøm, der er proportional med størrelsen af det digitale signal. En stor talværdi giver en stor strøm. En lille talværdi giver en lille strøm. Ved realistiske D/A omsættere kommer resultatet dog ud som en analog spænding.

Øvelse 8. D/A-omsætning

Tallet 125 sendes digitalt til D/A-omsætteren vist på figur 3.11. Modstanden R er 10 ohm. Hvad bliver strømstyrken i amperemetret?

Hvad er den tilsvarende strøm, svarende til det digitale tal på 22?



Figur 3.11. Princippet i en simpel D/A-omsætter omformer analoge signaler til digitale. Tallet kommer som en binær digital kode med 8 bit. Hvis bit nummer 0 – den laveste bit – er 1, sættes spændingen på ledning nr. 0 til 5 volt. Ellers 0 volt. Hvis bit nr. 1 er 1 sættes spændingen på ledning nr. 1 til 5 volt osv. Talværdierne af modstandene aftager i takt med bitnumrene således, at modstanden halveres hver gang, og derfor vokser bidragene til den samlede strøm i amperemetret i takt med bittenes placering i de binære tal.

skelner små forskelle ved sagte tale, og kun registrerer store udsving, når der er en kraftig lyd. Øret er nemlig beregnet til at genkende tale i forhold til den øvrige støj. Støjen har størst betydning ved små udsving svarende til sagte tale. Ved kraftige signaler er det ikke så afgørende med lidt støj. Se figur 3.10. Derfor deles spændingsintervallet op i områder af forskellig størrelse, så intervallerne ligger tættest omkring midten. Derved økonomiserer man med de anvendte bit. Med den samme bitrate får vi en tale, som svarer bedre til ørets følsomhed. Omkostningerne for telefonselskaberne er bestemt af hvor meget telefonnettet belastes. Derfor bruger man mange ressourcer på at komprimere signalerne, sådan at de fylder så lidt som muligt, og alligevel indeholder hele den oprindelige information.

Øvelse 7. CD-spillere

Den digitale gramfon – CD-spillere – måler med en opløsning på op til 16 bit på hver af de to stereokanaler og måler de tilsammen 32 bit 44.000 gange pr. sek.

Find en CD og aflæs den samlede spilletid.

Opmål arealet af området med det digitale signal.

Hvor mange tal kan skrives med 16 bit ?

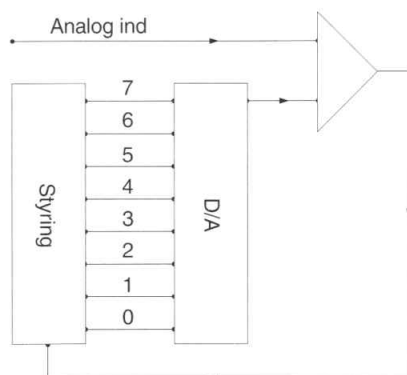
Hvor mange trin deles spændingen op i ved aflæsning af spændingen i lydsignalet med de 16 bit ?

Hvor mange bit skal overføres fra CD-skiven til spilleren pr. sek ?

Hvor mange bit er der ialt på hele CD'en ?

Hvor mange bit er der pr. mm² på en CD ?

Hvor tæt ligger bittene?



Figur 3.12. Princippet i en simpel A/D-omsætter, der laver analoge signaler digitale. Omsætteren består af en D/A omsætter og et sammenligneskredsløb samt lidt logik. Omsætningen foregår ved at prøve sig frem. Den mestbetydende bit sættes forsøgsvis til 1. Gav det for meget, sættes den istedet til 0. Når denne bit er sat rigtigt, undersøges den næste i rækken. Når omsætningen er færdig, er der foretaget 8 sammenligninger af spændingen. Vi har det digitale tal.

En simpel A/D-omsætter indeholder både en D/A-omsætter og et sammenligningskredsløb. Man prøver sig frem og sætter den mest betydende bit til 1? Gav det for meget i forhold til det indkomne analoge signal? Hvis ja, skal den mest betydende bit være 0. Når det højeste ciffer er valgt, prøver vi tilsvarende med det næste ciffer. Med 8 bit deler vi spændingen op i 256 dele fra tallet 0 til tallet 255. Lad os sige, at spændingsintervallet, vi arbejder med, er fra 0 til 5 volt. Så svarer tallet 0 til 0 volt og tallet 255 til 5 volt. Dermed bliver der 5 volt divideret med 255 mellem hvert digitalt tal. Det svarer til et spring på 19,61 mV. Lad os sige, at vi skal omsætte spændingen 3,274 V til et digitalt tal.

Vi starter med at undersøge, om bit nr. 7 - den mest betydende - skal være 0 eller 1. Hvis den er 1, svarer det til tallet 128, som via analogomsætteren giver 2,520 V. Sammenlignekredsen fortæller, at indgangsspændingen er større end dette. Bit nr. 7 sættes derfor til 1. Vi prøver nu bit nr. 6, og sætter den forsøgsvis til 1. Dermed er både bit nr. 6 og 7 sat til 1 svarende til tallet 192, der giver spændingen 3,765V. Nu giver det for meget. Bit nr. 6 er derfor 0.

Øvelse 9 A/D omsætning

Gør den manuelle omsætning af spændingen ovenfor færdig.

enkelt telefonsamtale. Derfor kan man uden de store problemer sende mange telefonsamtaler af sted samtidigt i samme transmissionskanal. Afsendelsen sker efter et meget nøje fastlagt mønster, således at man på modtagercentralen kan adskille bitterne igen fra de enkelte abonnenter. På den måde undgår man sammenblanding af samtalerne, og de enkelte telefonabonnenter mærker intet til, at de har delt ledningen med mange andre. De systemer, der anvendes i Danmark (1993), kan transmittere 565 Mb/s (565 millioner bit pr. sekund). Dette giver plads til cirka 8000 samtidige telefonsamtaler eller 8 TV kanaler i den samme kanal. Inden for en kort årrække vil systemer med 10 Gb/s blive almindelige.

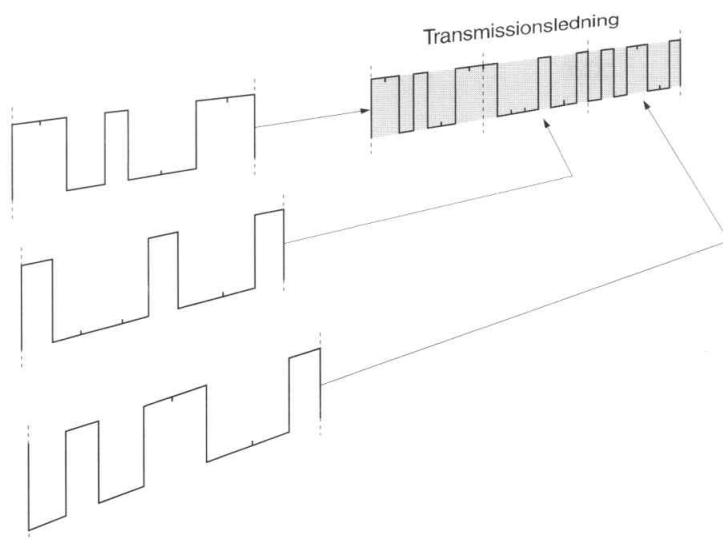
Figur 3.13 Figuren viser et simpelt digitalt multiplekssystem, hvor signalet fra 3 forskellige telefoner aftastes hver for sig og sendes efter hinanden i transmissionsledningen.

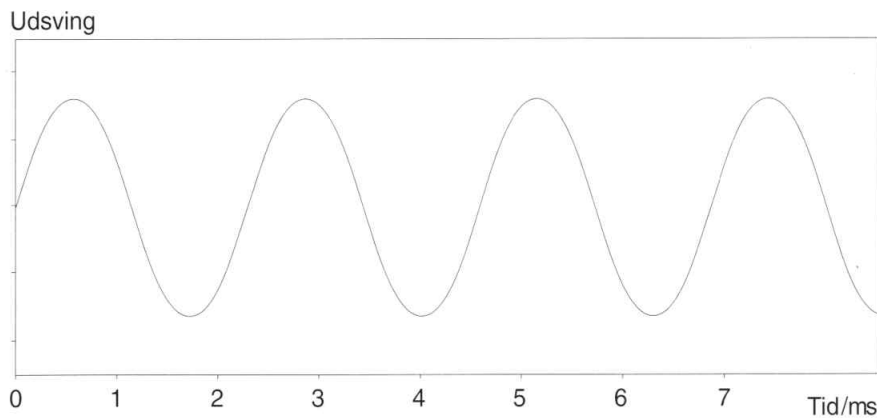
Vi forestiller os, at udstyret modtager 64 kbit fra hver af de 3 telefoner. Enheden modtager signalerne 8 bit ad gangen, og når alle 24 bit er modtaget, sendes de hurtigt efter hinanden i transmissionsledningen.

I den anden ende af transmissionsledningen er der placeret et tilsvarende udstyr, der modtager de flettede signaler og adskiller dem til tre modtagere. I praksis flettes 30 telefonsamtaler. Det giver ca. 2 Mb/s i transmissionskanalen.

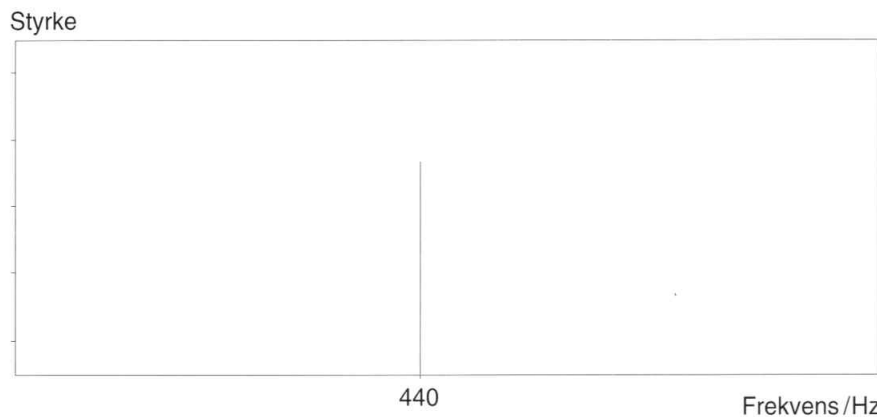
Digital multipleks.

Ved transmission over store afstande, er der en klar økonomisk fordel ved at kode informationsstrømmen, således at der kan sendes mange telefonkanaler via én transmissionsforbindelse. Dette gøres ved en teknik der kaldes digital multipleks. På telefoncentralen (og senere hos abonnenterne) digitaliseres signaler fra de enkelte telefonabonnenter med 8 bits opløsning, som beskrevet ovenfor. Digitaliseringen foregår med meget hurtig elektronik, således at de analoge signaler fra samtlige deltagende abonnenter måles 8000 gange i sekundet. De mange bit sendes derefter, lige så hurtigt som de dannes, afsted over transmissionskanalen tæt efter hinanden. En transmissionskanal har ofte langt højere overførselskapacitet end der kræves til en

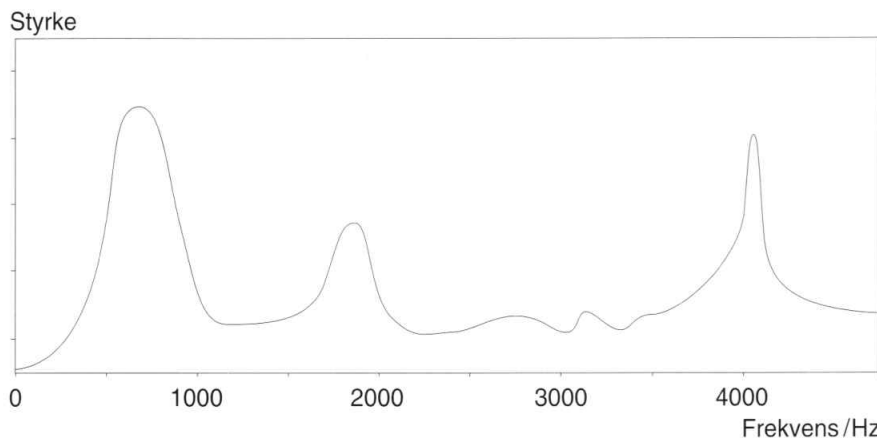




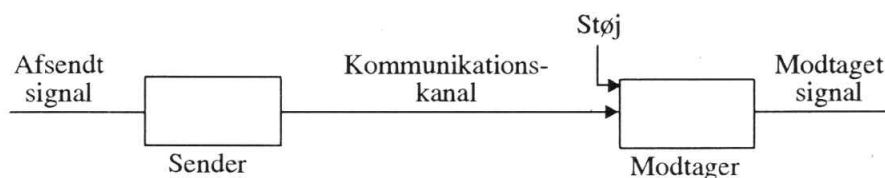
Figur 3.14 En sinussvingning på 440 Hz, hvor vi ser udsvinget som funktion af tiden.



Figur 3.15 Et diagram over svingningen fra figur 3.14. Her er vist styrken af signalet som funktion af frekvensen. Her er der kun én frekvens på 440 Hz.



Figur 3.16 Et realistisk talesignal opdelt efter frekvenser og tegnet som på figur 3.15.



Figur 3.17 En skitse af et kommunikationssystem, med en sender, en kommunikationskanal (som f.eks. en optisk fiber, en elektrisk forbindelse eller en radioforbindelse) og en modtager. Modtageren "ser" ud over det modtagne signal, der kan være dæmpet og forvrænget af kommunikationskanalen, også noget støj.

3.4 Kommunikationsteori

Frekvensspektre

I kassen side 19 beskrev vi bølgeudbredelse som funktion af tiden. Sammensatte bølgefænomener beskrives ofte mere hensigtsmæssigt ved at beskrive sammensætningen af frekvenser i stedet. Figur 3.14 og 3.15 viser forskellen mellem de to præsentationer. Øverst er vist en sinusbølge med frekvensen 440 Hz. Nederst er den tilsvarende frekvensfunktion (også kaldet frekvensspektret) vist. Frekvensspektret er en grafisk afbildning af hvilke rene toner, der findes i signalet. Man ser af figuren, at spektret i dette tilfælde består af én sinusbølge med frekvensen 440 Hz.

I tilfælde af mere komplicerede lyd-signaler, som for eksempel tale, kommer frekvensspektret til at se mere kompliceret ud som vist i figur 3.16. Man kan fortolke dette således, at talesignalet består af en stor samling af sinussvingninger, der er lagt sammen til et kompliceret signal. Franskmanden L. B. Fourier (1768 - 1830) viste, at ethvert praktisk forekommende signal kan opfattes som en sum af (nogle gange uendeligt mange) sinussvingninger.

Øvelse 10. Tastaturtelefoner

En tryknaptelefon benytter et system af tonesignaler til at overføre det kaldte nummer til centralen med. Der benyttes et system bestående af 2x4 forskellige toner (en tone for hver af de vandrette og lodrette rækker i tastaturet. Husk at der er 16 taster på nogle telefoner). Når man trykker på en knap, sendes der to toner afsted, som angiver rækken og søjlen for den pågældende tast. Når '8' trykkes afsendes en 852 Hz og en 1336 Hz tone. Tegn frekvensspektret for dette sammensatte signal. Tegn også det sammensatte signal med det samlede udsving som funktion af tiden ved at beregne funktionsværdier for de to indgående signaler og addere disse. Hvilken af de to repræsentationer er enklest?

Båndbredde.

Figur 3.16 viser spektret for et talesignal. Når talen transmitteres via en telefon bliver den forvrænget. Det har de fleste observeret, og det skyldes, at telefonen ikke er i stand til at transmittre hele spektret. Kun den del, der ligger fra 400 Hz til 3400 Hz, slipper

igennem. Lyden forvrænges, og kommer til at lyde mindre naturligt. Man siger, at telefonen har en båndbredde på 3000 Hz (intervallet fra 400 Hz til 3400 Hz).

Signalet er blevet båndbegrænset. En del af signalet er kastet bort, og det kan ikke uden videre retableres. Der er derved tabt viden om, hvordan det oprindelige signal så ud - og dette kan i almindelighed aldrig mere gendannes præcist i sin oprindelige form. Sagt på en lidt anden måde er der gået information tabt.

Båndbreddebegrebet er helt essentielt for kommunikationssystemer, idet systemets båndbredde sætter den ene af de to fundamentale grænser for hvor meget information, der kan overføres. Den anden fundamentale grænse vil vi diskutere nedenfor.

Øvelse 11. Båndbredde

Et stereoanlæg angives at kunne gengive frekvenser fra 20 Hz til 20 kHz. Hvor stor er båndbredden?

Signal-støjforhold

Figur 3.17 viser en stærkt idealiseret skitse af et kommunikationssystem. Vi har en sender og en modtager, der kommunikerer over en transmissionskanal. Vi har også en støjkilde, der adderes til det transmitterede signal. Selve støjen kommer fra forskellige kilder, som elektrisk indstråling fra omgivelserne og fra elektrisk støj, der dannes af kommunikationssystemets egen elektronik.

Den anden fundamentale begænsning for et kommunikationssystems kapacitet, er forholdet mellem signalets effekt og støjeffekten ved modtageren, kaldet signal-støjforholdet, der fortæller hvor mange gange signalet er kraftigere end støjen. Signal-støjforholdet måles i dB, decibel, og betegnes SNR efter engelsk: Signal to Noise Ratio.

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log \left(\frac{\text{effekt}_{\text{signal}}}{\text{effekt}_{\text{støj}}} \right)$$

Øvelse 12. Decibel

En lærer taler med en effekt på 0,5 W. Eleverne småsnakker og skramler med stolene med en samlet effekt på 0,3 W.

Hvad er signal/støjforholdet?

Hvor meget stiger signal/støjforholdet, hvis støjeffekten halveres?

Det menneskelige øre er skrappt til at genkende tale, der er "forurennet" med støj. For at opnå elementær genkendelse af de talte ord, kræves der derfor kun et lavt SNR. For netop at kunne skelne ord fra støj kræves et signal-støjforhold på fra 0 til 10 dB. 40 dB giver behagelige lytteforhold, og til god gengivelse af musik kræves 60 til 70 dB.

Øvelse 13. Signal-støj-forhold

Et stereoanlæg har et SNR på 70 dB. Bestem forholdet mellem signaleffekten og støjeffekten i rent tal. Beregn støjeffekten når anlægget spiller med en udgangseffekt på 10 W.

Øvelse 14. Kabel-TV

Ved kabel-TV kræves et SNR på 50 dB for at opnå god billedgengivelse. Beregn støjspændingen, når signalspændingen er 50 mV.

Informationskapacitet

Den amerikanske matematiker C.E. Shannon opstillede i 40'erne en matematisk informationsteori. Han benyttede måleenheden bit/sekund for et kommunikationssystems evne til at overføre information. Hvis et system har en informationskapacitet på 3400 b/s betyder det, at det kan transmittre 3400 binære informationsenheder (binære cifre) i sekundet.

For digitale transmissionssystemer kræves teoretisk en båndbredde af transmissionskanalen på mindst halvdelen af den ønskede kapacitet. Eller med andre ord kan informationskapaciteten teoretisk være dobbelt så stor som udstyrets båndbredde. Hvis man ønsker en informationskapacitet på 3400 b/s, skal båndbredden være mindst 1700 Hz. I praksis vil man dog altid vælge noget mere, f.eks. 0,7 gange kapaciteten. I dette tilfælde 2400 Hz.

Hvis signal-støjforholdet er for dårligt ved modtageren, vil modtageren ikke være i stand til med sikkerhed at skelne det digitale signal fra støjen. Derfor bliver nogle af de modtagne bit fejlbehæftede. Med et system som det beskrevet vil et SNR på 15,6 dB resultere i, at 1 ud af hver 10^9 bit i gennemsnit bliver fejlbehæftet. Sagt på en anden måde vil selv et ringe signal-støjforhold kunne give en transmission med meget sjældne fejl. Fejlsandsynligheden for andre SNR er vist i figur 3.18.

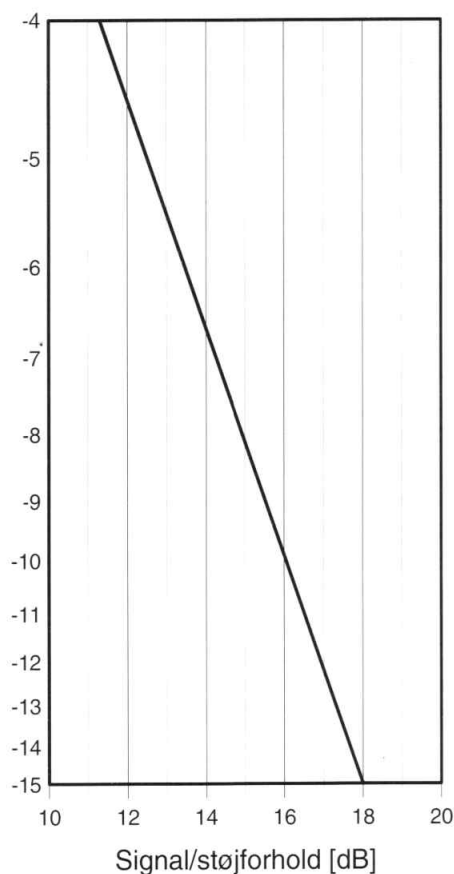
Øvelse 15. Digital transmission

For at transmittre en digitaliseret telefonkanal kræves en kapacitet på 64 Kb/s. Hvad er den teoretiske mindste båndbredde der kræves af transmissionskanalen? For at opnå en god talekvalitet kræves en fejlsandsynlighed på under 10^6 . Hvilket SNR kræves for at opnå dette?

Øvelse 16. Compact Disc

For at gengive HI-FI musik på en CD-spiller, med et SNR på 90 dB, har man valgt at køre med 44.000 afkastninger i sekundet og med 16 bits opløsning på hver af de to stereokanaler. Beregn den nødvendige informationskapacitet ved CD-spillere.

Log(Fejlsandsynlighed)



Figur 3.18 Figuren viser sammenhængen mellem signal-støjforholdet ved modtageren i et digitalt kommunikationssystem og sandsynligheden for, at bittene fejlopfattes. Bemærk, at den lodrette akse er logaritmisk, således at store variationer bliver komprimeret. En lille ændring i signalstøjforholdet kan således medføre, at fejlsandsynligheden ændres flere størrelsesordner.

Opgaver

1. Samtale på computer

Et almindeligt telefonsignal kræver 64.000 bit/s.

Hvor lang en samtale ville man kunne optage på en 120 Mbyte harddisk. (1 byte er 8 bit)?

Hvor lang tid vil det tage at transmittere samtalen digitalt, ved hjælp af et modem (9600 bit/s), til en anden computer?

2. Video på computer

Et fjernsynsbillede kræver 2.560.000 bit, og der sendes 25 billeder i sekundet. Hvor mange sekunders fjernsyn er der plads til på harddisken fra opgave 1.?

Hvor lang tid tager det at sende ét TV billede med modem, der sender med 1200 bit/sek?

3. Lærer og elev

En lærer står ved tavlen og taler monotont med 600 Hz. Hvor mange bølger "hænger i luften" inden talen når Peter på bageste række? Lise sidder på første række. Hvor meget før hører Lise lærerens guldorn end Peter?

4. Vand- og andre bølger

Villy ligger ved stranden og tager solbad. Han ser på pigerne, som går ind og ud ad badebroen og kan ikke lade være med at bemærke, at de tilsyneladende følger med bølgerne på vej ind mod ham. Så ligger han lidt og funderer over, hvor hurtigt de går, pigerne og bølgerne. Han får øje på Lise og tæller, at broen er 52 skridt lang. Der er netop 3 hele bølger på broens længde. Senere måler han på sit ur, at der kommer 14 bølger pr. minut. Han sætter et skridt til 0,6 m. Hvor hurtigt bevæger de sig så? Hvor mange bølger møder pigerne tilsvarende på vej ud ad badebroen?

5. Orgel

Den dybeste og den højeste tone i et orgel er henholdsvis 32 Hz og 16 kHz. Beregn bølgelængderne.

6. Hjortens flugt

Et riffelprojektil bevæger sig med en hastighed af 1800 m/s. Når hjorten at høre det skud, der rammer den?

7. Støj fra CD

Udgangssignalet fra en compact disk har et signal-støjforhold på 90 dB. Beregn støjspændingen når udgangssignalet er på 0,775 V.

8. Koncertstøj

Støjniveauet i en god koncertsal er 25 dB SPL (Sound Pressure level) medens de kraftigste passager er på 110 dB SPL.

Hvad er signal-støjforholdet i dB?

Hvad er signal-støjforholdet i rent tal?

9. Fordobling af støj

I et kommunikationssystem er der et konstant støjniveau. Hvor mange dB ændres signal-støjforholdet hvis signaleffekten fordobles?

10. Lyn og torden

Under et tordenvejr ser man lynet, før man hører braget. Lydens hastighed er ca 340 m/s. Hvordan kan man ved at måle tiden mellem lynet og braget udregne afstanden fra én selv til stedet, hvor lynet kommer fra?

11. Amplitude og bølgelængde

En sinusbølge kan i Dymos-2 laves med følgende model.

Model:

$x := x + dx$

$y := A * \sin(2 * \pi * x / L)$

Værdi:

A := 2.5 // meter

dx := 0.05 // meter

L := 3 // meter

Prøv med forskellige talværdier for L og A, og iagttag hvordan det influerer på kurvens udseende.

12. Bølger i bevægelse

En bølge i bevægelse kan illustreres som en tegneserie af bølger tegnet til forskellige tidspunkter.

Model:

$x := x + dx$

$y := A * \sin(2 * \pi * (x - v * t) / L)$

Værdi:

A := 2 // meter

dx := 0.05 // meter

L := 3 // meter

T0 := 3 // sek

dt := 0.24 // sek

v := L / T0 // meter/sek

For t := 0 to T0 step dt do

$x := 0 [..10]$ // meter

Konstruktionen "For-to-step" sammen med intervallet i den kantede parentes bevirker, at den første kurve tegnes til tiden t = 0 sek. Denne stopper, når x kommer ud over intervalllængden på 10 meter, og næste kurve tegnes med tiden t = dt. Dette

fortsætter indtil t kommer op på værdien T0.

Prøv at ændre de relevante talværdier, og undersøg, om graferne svarer til forventningerne.

13. Stående bølger

Fænomenet stående bølger kan illustreres med to bølger, der bevæger sig mod hinanden. Tag udgangspunkt i model 2) ovenfor, og tilføj en ekstra bølge, som bevæger sig med negativ hastighed. Ret i den, så modeltilstanden får følgende udseende:

Model:

$x := x + dx$

$y1 := A * \sin(2 * \pi * (x - v * t) / L)$

$y2 := A * \sin(2 * \pi * (x + v * t) / L)$

$y := y1 + y2$

Bemærk, at det resulterende udsving ikke flytter sig langs x-aksen. Det "står stille". Bemærk også, at der er punkter på grafen, som ikke bevæger sig, og punkter med et stort udsving. Disse kaldes henholdsvis for knuder og buger. Hvad er afstanden mellem knude og bug og afstanden mellem 2 buger i forhold til bølgelængden? Passer det også, når I vælger en anden talværdi for bølgelængden L?

14. Periodisk signal

Ofte har man et periodisk signal, som ikke er en "ren" sinussvingning. Vi skal nu se et eksempel på det generelle forhold, at ethvert periodisk signal kan opfattes som sammensat af sinus-svingninger med forskellige bølgelængder. Den første har samme bølgelængde som det periodiske signal, den næste har den halve bølgelængde, den næste har en trediedel bølgelængde etc. I musik svarer det til det fænomen, at lyd kan opfattes som sammensat af en grundtone og et antal overtoner. Grundtonen har samme bølgelængde og frekvens som musikken, første overtone har den halve bølgelængde og dermed den dobbelte frekvens, anden overtone har en trediedel bølgelængde og dermed den tredobbelte frekvens.

Model:

$x := x + dx$

$y := 0$

For N := 1 to N0 do

$y := y + \sin(2 * \pi * N * x) / N$

Værdi:

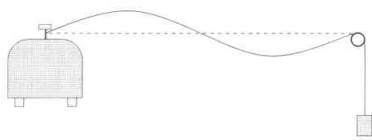
dx := 0.05 // meter

For N0 := 1 to 20 do // antal

$x := 0 [..10]$ // meter

Eksperimenter

1. Snorbølger



Figur 3.19 Snorbølger.

Fænomenet stående bølger er let at demonstrere med en nylon-snor bundet i en vibrator styret af en tonegenerator. For at have en veldefineret snorspænding, er det en god idé at lade snoren løbe hen over en trisse og binde et lod i enden.

Indstil frekvensen af vibratoren, så der er knude i begge ender. Det kræver lidt tålmodighed at indstille den nøjagtigt. Prøv at finde en sammenhæng mellem frekvensen og antallet af buge, når der er stående bølger. Hold afstanden fra vibrator til trisse konstant, og benyt samme lod hele tiden.

Hvilken (matematisk) sammenhæng er der mellem den frekvens, der skal til at lave stående bølger med 1 bug og længden af snoren fra vibrator til trisse, når lodet og dermed snorspændingen er den samme?

2. Guitar

Forbind en mikrofon til et oscilloskop, evt. via en forstærker, så lydsvingningerne kan følges på oscilloskopet.

Læg mærke til, at guitarens klang i meget høj grad afhænger af, hvor og hvordan strengene anslås. Der kommer en hård klang ved at anslå strengen med neglene eller en plektor helt ude i enden af strengen. Tilsvarende kommer der en blød klang ved at anslå strengene blødt på midten af strengene. Prøv jer frem og iagttag samtidig oscilloskopet. Prøv evt. med én streng ad gangen, så er det lettere at se signalet.

Båndet på guitaren, som sidder der, hvor "kroppen" begynder, er specielt derved, at det sidder ud for midtpunktet af strengen. Hvad sker der med strengenes frekvenser ved at holde strengen ned til dette bånd? Det er nok lettest af udregne frekvensen ud fra aflæsning af svingningstiden på oscilloskopet. Man siger, at frekvenserne ligger en oktav over grundtoner-

ne. Hvert bånd repræsenterer en halv tone. Hvor mange halve toner er der på en oktav?

Prøv med et stroboskop at ramme en af strengenes svingninger. Prøv at anslå en blød og en hård tone og se sammenhængen mellem klangfarverne og strengens udsving. Prøv også at holde en finger let på midten af strengen og anslå den blødt med den anden hånd (fageolettone). Hvad sker da med svingningerne i strengen, og hvad sker der med frekvensen og tonehøjden?

Med dataopsamlingsudstyr er det muligt at optage guitarens lyd på computer og analysere det, så spektret kan udregnes.

3. Mikrofon og højttaler

En meget simpel mikrofon kan bygges ved at klistre en lille magnet på en tynd metalplade. Spænd den op i et antal elastikker, så den kan vibrere lidt. Placer en spole med mange vindinger lige under magneten, og afprøv mikrofonen ved at forbinde spolen til et oscilloskop. Hvis signalet ikke er kraftigt nok, kan I prøve med en anslået stemmegaffel på metalpladen. Prøv evt. at sende et signal til "mikrofonen" og se, om den kan bruges som højttaler.

Efterprøv påstanden om, at en almindelig højttaler kan bruges som en mikrofon.

4. Telefonopkald

Forbind et oscilloskop til telefonens to ledninger, så telefonen stadig virker. I telefonstikket er der tre ledninger, men det er kun de to ledninger svarende til de to parallelle ben der benyttes. Øvelsen er ikke helt ufarlig, idet der optræder spændinger på omkring 200 volt, hvis telefonen skulle ringe. Ifølge sikkerhedsreglerne skal læreren derfor tilslutte ledningerne. Iagttag hvad der sker, når I ringer op. Prøv dels en telefon med drejeskive og en med tastatur. Bemærk hvordan tasterne svarer til det lydsignal, man kan høre under opkaldet. Lydene er sammensat af to toner, svarende til tasternes placering vandret og lodret. Drejeskiverne sender blot et antal klik svarende til cifret.

Prøv eventuelt med et oscilloskop at se på telefonsignalet fra et modem, der benyttes ved datatransmission.

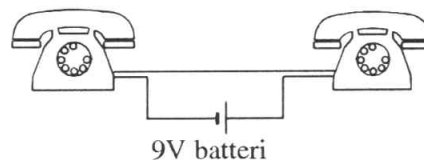
Lærervejledning:

Telefonen forsynes med 48 volt jævnspænding fra centralen, og når der ringes, udsendes et overlejet 120 V

vekselspændingssignal, så undervisningsafdelingens sikkerhedsbestemmelser vedrørende stærkstrøm skal følges. Af sikkerhedsgrunde skal oscilloskopet derfor jordforbindes.

5. Simpelt telefonsystem

Man behøver ingen telefoncentral for at etablere en telefonforbindelse. Prøv at forbinde to telefoner med et 9 V batteri som vist i figur 3.20. Tal og lyt, men forvent ikke, at I kan få selve opkaldet til at virke. Forsøget viser, at hele den elektriske signalbehandling ved samtalerne udføres af selve telefonapparaterne. Centralen er ikke nødvendig her. Den skal kun sørge for strømforsyning, forstærkning undervejs, etablering af forbindelsen mellem de to abonnenter, registrering af prisen og nedlægning af forbindelsen til slut.



Figur 3.20 Simpelt telefonsystem.

4. Lysledere

I flere tusinde år har mennesker sendt meddelelser over lange afstande ved hjælp af lys. Mange forskellige metoder har været benyttet, og nogle af disse er nævnt i kapitel 2. Heraf fremgår også, at optisk transmission blev udkonkurreret af den elektriske telegraf, da denne blev opfundet og udviklet omkring midten af 1800-tallet. Siden blev telefonen opfundet og udkonkurrerede telegrafen.

Men optisk kommunikation er nu tilbage på banen igen. En kombination af en kraftig lyskilde i form af halvlederlasere og udviklingen af lyslederkabler gør den optiske kommunikation interessant på ny.

Årsagen til, at optisk kommunikation via lysledere ser ud til at ville udkonkurrere den elektriske kommunikation, er, at kommunikation ved hjælp af lysledere ganske enkelt er billigere end den tilsvarende elektriske kommunikation. Dette skyldes flere forhold:

Den lave dæmpning, der kan opnås i meget rent glas, betyder, at der kan sendes signaler over længere afstande uden dyrt forstærkerudstyr. Antallet af forstærkere kan formindskes fra én for hver 2-10 km for et traditionelt kabel af kobber til én for hver 100-200 km for optiske fibre.

Mange telefonsamtaler, fjernsynskanaler, data- eller telefax transmissioner kan sendes med en enkelt optisk fiber. Den teoretiske grænse for

den optiske fibers kapacitet er umådelig stor, men med kendt teknologi sætter sender og modtager en grænse på 10 - 100 G bit/sekund (1 Gbit = 10^9 bit og en bit er et enkelt lysglimt i fiberen). Grænsen for kapaciteten ved elektriske kabler er 100 Mbit/s.

Til gengæld er det dyrt udstyr, der skal bruges til fremstilling af fibre. Selve materialet til glasfremstilling er billigt, idet det hovedsageligt består af kvarts, SiO_2 , eller almindeligt sand. Men renheden skal være meget stor. Så stor at der kun må være ét fremmedatom for hver 10^9 siliciumatomer, hvilket er dyrt at opnå.

Det er endvidere besværligt at sammensætte fibre – at splidse dem – hvilket er umuligt at undgå, når fibre skal lægges over længere afstande. Der skal naturligvis også repareres efter et kabelbrud.

4.1 Lys i fiberen

I lyslederens ene ende er påsvejset en halvlederlaser, der forsyner lyslederen med lys. I den anden ende er påsvejset en detektor, der opfanger lyssignalerne. Lyslederen består inderst af en kerne, der skal transmittere lyset, udenom en kappe, der skal sørge for, at lyset bliver inde i kernen og endelig yderst et lag plastic, der skal beskytte lyslederen mod fysisk overlast. Kerne og kappe har tilsammen omkring et hårs tykkelse. Når lyset først er sluppet ind i kernen, kan det

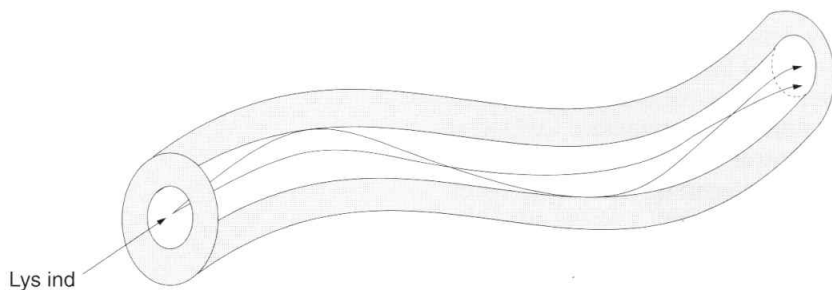
ikke slippe ud igen. For når det rammer overgangen mellem kerne og kappe, bliver det spejlet tilbage ind i kernen. Overgangen mellem kernen og kappen fungerer nemlig som et spejl. Dette fænomen kaldes totalrefleksion og er beskrevet side 30.

For at forstå, hvordan lyset kan bevæge sig gennem fiberen selv når den er bukket rundt i alle mulige facconer, kan man forestille sig en slange, hvor hele den indvendige overflade er spejlblank. Når lyset er sendt afsted i den ene ende, sørger den spejlende overflade for at holde lyset inde i hulrummet. Først når lyset kommer til den anden ende af slangen, slippes det ud.

Tilsvarende har vi i lyslederen, at lyset spejles på kernens overflade, så når lyset først har den rigtige retning i kernen, bliver det der, til det slipper ud i den anden ende. Er der skarpe knæk på lyslederen, virker overfladen af kernen ikke længere spejlende, og vi taber lys. Det er i øvrigt et velkendt fif til aflytning af samtaler transmitteret i en lysleder.

Øvelse 1. En liter glas

Hvor mange km kerne af en lysleder kan man lave af 1 liter glas, når vi sætter kernens radius til $2\text{ }\mu\text{m}$? Hvor mange km kappe kan man tilsvarende lave med 1 liter glas, når vi sætter den samlede diameter af kerne og kappe til $125\text{ }\mu\text{m}$?



Figur 4.1 Et lyslederkabel består af tre dele. Inderst findes kernen, hvori lyset transmitteres. Kernen i de mest moderne lysledere er typisk 1-10 μm i diameter, og den består af en uhyre ren glassort, hvori lyshastigheden er forholdsvis lille. Udenom kernen findes kappen, et andet glaslag, hvori lyshastigheden er lidt større end i kernen, og som typisk er 50-60 μm tyk. Yderst findes et lag plastic, der kun har til formål at beskytte de to sårbare glaslag. Det afgørende princip ved lyslederen er, at når lyset først er kommet ind i kernen, slipper det ikke ud, før end det når lyslederens anden ende. På grund af den lave lyshastighed i kernen virker overgangen mellem kernen og kappen spejlende, så lyset spejles tilbage ind i kernen, når det rammer dens overflade.

4.2 Flere typer lysledere

På figur 4.2 er der vist 3 typer af lysledere. I den første type optræder der en skarp overgang mellem kerne og kappe. Kernen og kappen er lavet af hvert sit glasmateriale, så lyset bevæger sig langsomt i kernen og hurtigt i kappen (hvis det da ellers kunne komme derud). Det er netop denne konstruktion, der gør overfladen af kernen spejlende. Lyset kan løbe igennem fiberen på flere måder og ændrer retning i skarpe knæk, når det siksakker sig afsted.

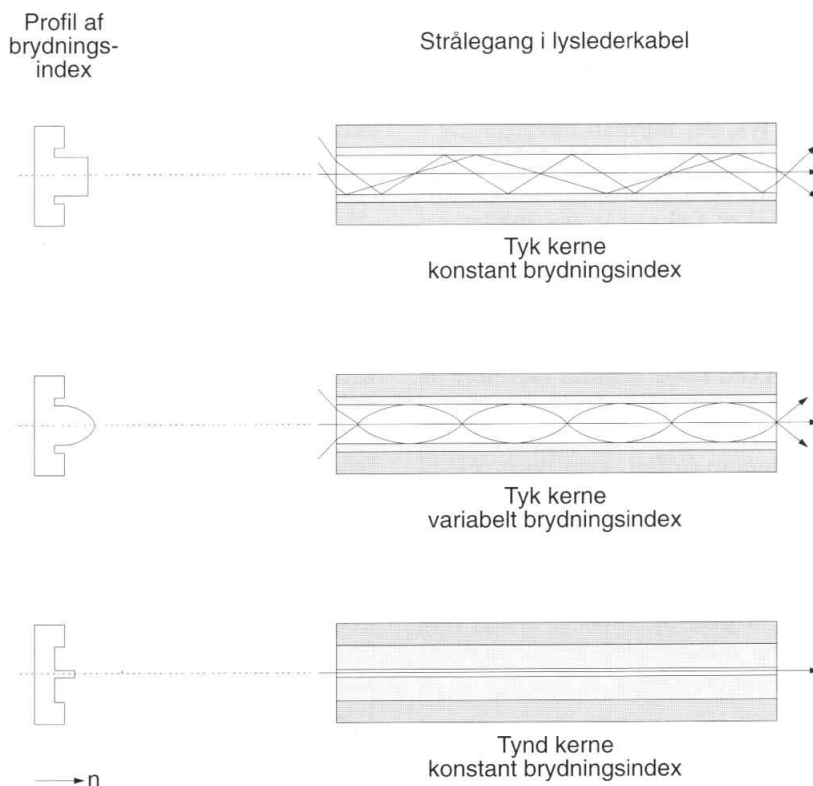
I den anden type varierer glastypen jævnt fra kernens centrum til kappen yderst. I midten bevæger lyset sig langsomt og jo længere vi kommer fra centrum, jo hurtigere bevæger lyset sig. Derved bøjes lyset jævnt tilbage mod kernens centrum, og vi opnår for det første, at lyset holdes inde i fiberen ved at følge en blød kurve i stedet for en takket kurve som ved den første type. Men som det vigtigste opnås, at lyset når frem samtidigt uanset vejen inde i fiberen: Lyset bevæger sig meget "på tværs" af lederen, løber hurtigt, og lyset, der tager den "lige vej" gennem kablet, løber gennem glas med lav fart.

Den tredje type er den nyeste, hvor kernen er så smal, at lyset nærmest kun har en vej igennem fiberen, og lyssignalet når derfor samlet frem til modtageren. Man siger, at der er en meget lille udtværing af signalet i tiden, eller at der er en meget lille dispersion. Netop af denne grund kan man opnå en meget stor regenerationsafstand (afstand mellem forstærkere) med den nye type kabler.

I lysledernes barndom fandtes kun første type. Det betød hurtigt en stor udtværing af signalet, så lyspulserne hurtigt flød sammen. Dermed skulle der være et stort antal regenerators undervejs til at genoprette signalerne. I det danske telenet findes ganske lidt lyslederkabel af type 2 nedlagt i begyndelsen af 80'erne. Størstedelen er af type 3.

4.3 Højeste sendefrekvens

Lyspulser i fiberen udtværes efterhånden på grund af, at lyset i lysbundet, som en lyspuls består af, bevæger sig forskelligt igennem fiberen. Dette fænomen kaldes udtværing eller dispersion. På grund af udtværingen er der en højeste sendefrekvens - en grænsefrekvens - for en optisk fiber. Men hvordan afhænger udtværingen af længden af lyslederen? For den



Figur 4.2 Figuren viser de 3 almindeligste fibertyper. Øverst vises step-index fiberen. Denne fibertype, der historisk set er den ældste, har konstant brydningsindex hen over fiberkernen. Den benyttes ikke længere til telekommunikation, da den har meget høj dispersion (forårsager impulsudtværing). Den finder derimod anvendelse til mange tekniske formål. Den benyttes til lav-hastighedsdatakommunikation over korte afstande (nogle meter) og til transmission af synligt lys. I fly- og bilindustrien benyttes i stigende grad billige step-index fibre fremstillet af plast i stedet for gammeldags kobberledning.

I midten vises den såkaldte gradueret-index fiber. I denne fiber varierer brydningsindexet parabolisk hen over tværsnittet. Dette formindsker impulsudtværingen betydeligt, og denne type har da også været brugt en del i det danske og internationale telenet. Hvad angår transmissionsegenskaberne er denne fibertype blevet overhalet af singlemode

fiberen som omtales nedenfor. Den relativt store kernediameter, 50 - 62.5 μm , gør, at sammenføjning af denne fibertype er en ret ukritisk proces. Fiberen er nu mest anvendt til industriel proceskontrol, hvor fiberens ufølsomhed overfor elektrisk støj, varme og kuldæmpninger osv. gør den bedre egnet end kobberledninger.

Den nederste figur viser singlemode fiberen, som har en snæver kerne med et konstant brydningsindex hen over tværsnittet. Den smalle kerne tillader ikke lyset at "bugte sig". Derfor er udtværingen minimal selv ved store transmissionsafstande. I kombination med det meget lave tab, er denne fibertype et næsten ideelt transmissionsmedium. Singlemode fiberen er derfor den foretrukne fibertype i forbindelse med telekommunikation. Den lille kernediameter gør, at stikforbindelser til singlemode fibre skal fremstilles med brøkdele af en mikrometers nøjagtighed og behandles varsomt, hvis ekstra tab skal undgås.

tredie type er det særligt enkelt. Her har kabellængden og grænsefrekvensen et konstant produkt. Hvis grænsefrekvensen er 500 GHz for 1 km kabel, er den 250 GHz for 2 km og 10 GHz for 50 km kabel uden regenerators undervejs.

For at forstå, at grænsefrekvensen afhænger af længden, kan vi tænke på

transmissionen som en bitstrøm - et tog af bit - der bevæger sig gennem lyslederen. Når bittene begynder at overlappe, kan de ikke adskilles igen. Det kan ske enten ved at der sendes for mange bit ad gangen svarende til en stor frekvens, eller det kan ske ved at de bevæger sig for langt, og er blevet udtværet i længden.

Brydning

Når lys, der normalt bevæger sig i rette linier, møder en overflade mellem to stoffer, skifter det retning. Det sker f.eks. når lys møder en glasoverflade eller en vandoverflade. De fleste har sikkert bemærket, at en stang, som rager op af en vandoverflade, ser ud til at være knækket. Dette skyldes brydning af lyset i vandoverfladen.

Der opstår brydning ved overgangen mellem to stoffer, hvor lyset skifter hastighed. I lufttomt rum bevæger lys sig altid med samme fart på $2,998 \cdot 10^8$ m/s. Den betegnes c . I luft er den lidt mindre med ca. 99,97% af c . I glas og vand er lysets fart endnu mindre med værdier på ca. 60% og ca. 75% af c .

Brydningsindeks

Lysets hastighed har altid en værdi, der er mindre end eller lig c . Af historiske grunde opgiver man ikke den aktuelle lyshastighed som en procentsats af lysets hastighed. Derimod er der tradition for at angive et brydningsindeks, et tal n , som skal divideres op i c for at beregne den

aktuelle hastighed. For vand er brydningsindekset 1,33, hvilket betyder, at lyshastigheden i vand er på $c/1,33 = 2,25 \cdot 10^8$ m/s eller 75% af c . Når lyset skifter hastighed ved overgangen mellem to stoffer, skifter det normalt også udbredelsesretning. Det bliver brudt. Sammenfattende kan man sige, at der bliver lidt kortere mellem bølgerne i stoffet med den lave hastighed. Derved skifter bølgerne retning ved overgangen mellem de to stoffer. Lysets hastighed i stof 1 og stof 2 betegnes v_1 og v_2 . På figur 4.3 er v_2 mindre end v_1 . Linierne AB og CD er bølgefronter, hvilket vil sige, at på disse linier har bølgeudsvinget samme værdi. En sådan front er altid vinkelret på lysets udbredelsesretning. Kaldes den tid, det tager strålen at nå fra B til C for t , er $BC = v_1 \cdot t$. I samme tidsrum løber en stråle fra A til D, og $AD = v_2 \cdot t$. Da $AD < BC$ er den opståede bølgefront DC brudt i forhold til bølgefronterne i det materiale, lyset kom fra. Strålen i stof 2 danner vinklen b med normalen til overfladen. Vinkel b kaldes brydnings-

vinklen. Tilsvarende benævner vi vinklen mellem den indkommende stråle og normalen for indfaldsvinklen, i .

I trekant ABC er vinkel A lig indfaldsvinklen, i , idet de to vinklers ben parvis står vinkelret på hinanden. Tilsvarende er brydningsvinklen, b , lig vinkel C i trekant ACD som vist på figuren. Begge trekanter er retvinklede, fordi bølgefronterne altid står vinkelret på lysets udbredelsesretning. Vi kan derfor finde sinus til i og sinus til b ved at regne på de to trekanter:

$$\sin(i) = \frac{BC}{AC} \quad \text{og} \quad \sin(b) = \frac{AD}{AC}$$

Ved at dividere det første udtryk med det andet får vi

$$\frac{\sin(i)}{\sin(b)} = \frac{\frac{BC}{AC}}{\frac{AD}{AC}} = \frac{BC}{AD} = \frac{v_1 \cdot t}{v_2 \cdot t} = \frac{v_1}{v_2}$$

Forholdet mellem hastighederne kan også udregnes ved brug af de to stoffers brydningsindeks

$$v_1 = \frac{c}{n_1} \quad \text{og} \quad v_2 = \frac{c}{n_2} \quad \Leftrightarrow$$

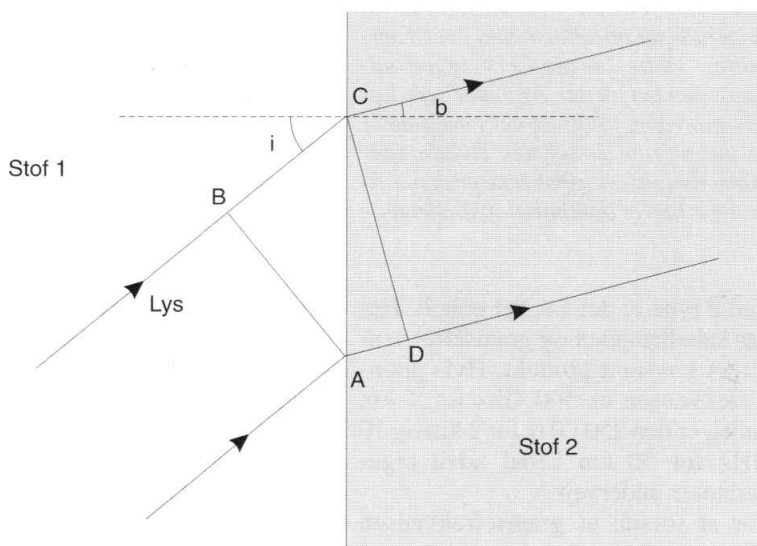
$$\frac{\sin(i)}{\sin(b)} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Bemærk, at n_2 står øverst på brøkstregen.

Totalrefleksion

I de opstillinger, vi har omtalt ovenfor, er der ikke kun en brydning af lysstrålerne, men også en spejling, som vi kalder en refleksion. Står to personer på hver sin side af en glasrude, kan de ikke blot se hinanden gennem ruden men også spejle sig i ruden. Lyset løber ikke blot igennem glasset, men reflekteres også på glasoverfladen. Når lys bevæger sig fra et stof med lille

Figur 4.3 Figuren viser et lysbunt, der ankommer til en plan overflade mellem to stoffer. Indfaldsvinklen i er vinklen mellem lysbuntet og normalen til overfladen (en linje vinkelret på overfladen). Når strålebuntet møder overfladen, vil det først ske i punktet A. Bølgefronten AB er en linje, hvor bølgeudsvinget har samme værdi. Den står altid vinkelret på bevægelsesretningen, og vil derfor ramme først i A. Lyset ved B rammer overfladen lidt senere, og mens dette sker vil en stråle løbe i det nye stof fra punktet A til D. Tiden, det tager lyset at flytte sig fra B til C, er derfor ligeså stor, som tiden det tager lyset at bevæge sig fra A til D. Men da lyset udbreder sig med større hastighed i stof 1 er afstanden BC større end den tilsvarende afstand AD i stof 2.



udbredelseshastighed til et stof med en større udbredelseshastighed, skal vi se, at der bliver mulighed for totalreflektion, hvilket vil sige at lyset spejles uden at der slipper den mindste smule gennem overfladen. Kaldes indfaldsvinklen for i og spejlingsvinklen for s , gælder der, at $i = s$, hvilket hænger sammen med, at lysets hastighed er den samme både før og efter spejlingen i overfladen. Lader vi en lysstråle løbe fra en glassort med et større brydningsindeks ind i en glassort med et mindre brydningsindeks, vil brydningsvinklen b være større end indfaldsvinklen i . Vi kan forøge indfaldsvinklen i indtil brydningsvinklen bliver 90° . Denne grænseværdi for indfaldsvinklen betegnes i_{gr} , da den netop markerer grænsen for at vi kan få lys igennem overfladen. For større indfaldsvinkler end grænsevinklen sker der kun spejling. Dette kaldes totalreflektion, og det er årsagen til, at vi kan holde lyset inde i kernen af en lysleder.

$$\sin(i_{gr}) = \frac{n_2}{n_1}$$

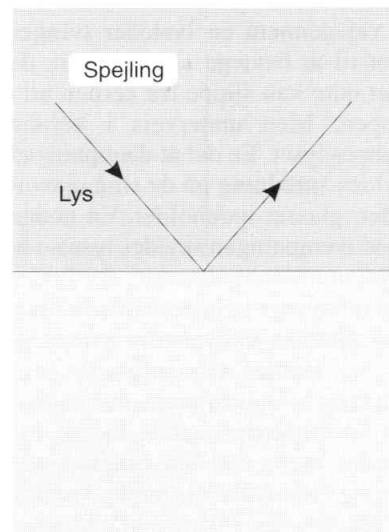
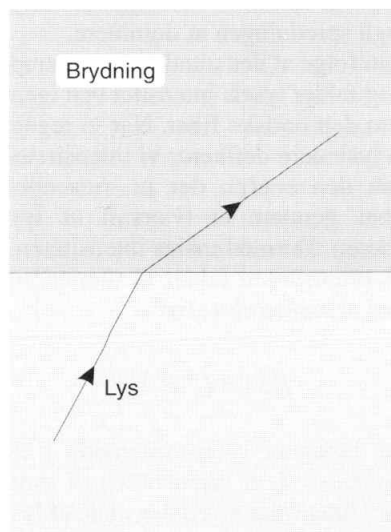
Totalreflektionen betyder, at lyset ikke kan trænge gennem overfladen. Det svarer i brydningsformlen til, at brydningsvinklen ikke kan overstige 90° . Grænsevinklen i_{gr} er den vinkel, hvor lyset på den anden side netop afbøjes langs grænsefladen mellem de to stoffer. Formlen fremkommer derfor ved at sætte brydningsvinklen til 90° i brydningsformlen.

Øvelse 3. Brydningsvinkel

Lys rammer en vandoverflade med indfaldsvinklen 45° . Brydningsforholdet for vand er 1,33. Hvad bliver brydningsvinklen for lyset i vandet?

Numerisk åbning

Det er et problem i starten af lyslederen at få lyset til at bevæge sig i den rigtige retning. Kun lys, som spejles ved totalreflektion på overfladen mellem kernen og kappen transmitteres i lyslederen. Resten tabes. Vi ønsker nu at finde den største indfaldsvinkel v , med hvilken det er muligt at sende lys ind i kernen og netop få totalreflektion mellem kerne og kappe. Brydningsindex i kernen og kappen betegnes hen-



Figur 4.4 Brydning og spejling i en overflade.

holdsvis n_1 og n_2 . Grænsevinklen inde i kernen benævnes i_{gr} . Se figur 4.5.

Først ser vi på brydningen fra luften ind i kernen. Vi indsætter brydningsvinklen, b , der er lig med $90^\circ - i_{gr}$ i brydningsformlen

$$\frac{\sin(v)}{\sin(90^\circ - i_{gr})} = \frac{n_1}{1}$$

hvor n_1 er brydningsindekset i kernen. Vi udnytter omskrivningen af $\sin(90^\circ - x)$

$$\sin(90^\circ - x) = \sqrt{1 - \sin^2(x)}$$

og får

$$\sin(v) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2(i_{gr})}$$

Vi regner på grænsen for totalreflektion mellem kerne med indeks n_1 og kappen med indeks n_2 . Betingelsen for totalreflektion er

$$\sin(i_{gr}) = \frac{n_2}{n_1}$$

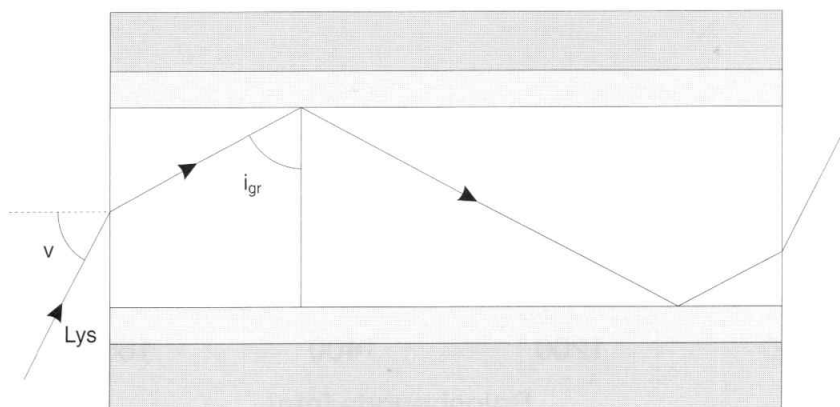
som vi indsætter i formelen for $\sin(v)$ fra før

$$n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Endelig har vi udtrykket for $\sin(v)$, kaldet den numeriske åbning, udtrykt ved n_1 og n_2

$$\sin(v) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Figur 4.5 Strålegang for lys, der sendes ind i kernen under den kritiske indfaldsvinkel v og netop totalreflekteres, når det rammer kappen med den tilhørende grænsevinkel i_{gr} .



4.4 Dæmpning

På vej gennem en lysleder tvinges lyset til at bevæge sig i kernen, da lyset ikke kan slippe fra kernen ud i kappen. Men undervejs i kernen dæmpes lyset. En del af dæmpningen skyldes spredning på de små ujævnheder, glasset indeholder. En anden del af dæmpningen skyldes lysets absorption i fremmedatomer, der findes som urenheder i glasset. Spredningen mod glassets ujævnheder svarer til det, vi kender fra sollysets gennemgang af atmosfærens luftmasser. Det kortbølgede violette og blå lys spredes mere end det langbølgede gule og røde lys. Det spredte violette og blå lys ses som en blå himmel rundt omkring solen, mens det resterende gule og røde lys gør solen gul midt på dagen og rød, når der er en længere vej gennem atmosfæren ved solopgang og solnedgang. Denne form for dæmpning kaldes Rayleigh spredning og er omvendt proportional med bølgelængden i 4. potens. Det gælder således om at bruge lys med stor bølgelængde; altså lys i den røde eller endnu bedre i den infrarøde ende af spektret. Her er der imidlertid et problem med urenheder i glasset, som stammer fra fremstillingen af glas materialet. Specielt vandmolekylerne har været et problem tidligere, for i det infrarøde område vil lyset absorberes i vandmolekyler. Man måtte derfor benytte lys med bølgelængder, som lå udenfor oxygen-brint-bindingens absorptionsområde.

Går man for langt ned i frekvens, rammer man indenfor glasmolekylernes absorptionsområde. Går man

for langt op i frekvens begynder Rayleigh spredningen at dominere.

Som følge af den uundgåelige dæmpning falder lysets intensitet hen igennem den optiske fiber. Når vi regner på lysledere definerer vi intensiteten som den energi, der pr. tidsenhed løber gennem et tværsnit af lyslederen. Dermed måles intensiteten i W. Intensiteten falder eksponentielt med afstanden fra start:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{(-k \cdot x)}$$

$I(x)$ betegner lysets intensitet i afstanden x . I_0 er intensiteten til start, altså intensiteten ved den ende af lyslederen, hvor lyset sendes ind. Konstanten k er en materialekonstant, der afhænger af den anvendte lysleder og af bølgelængden af lyset. Jo større værdi af k , jo kraftigere er dæmpningen. Den aftagende eksponentielle afhængighed betyder, at der er et konstant procentvis tab pr. km. En rimelig god værdi er 5% tab pr. km.

Eksempel

Vi sætter startintensiteten til 1 mW. Det vil sige $I_0 = 1$ mW. Lad os regne på tilfældet med 5 % dæmpning pr. km og beregne konstanten k . Der er 95% af intensiteten tilbage efter 1 km.

$$I(x) = I_0 \cdot e^{(-k \cdot x)}$$

$$I(1\text{km}) = 1\text{mW} \cdot e^{(-k \cdot 1\text{km})}$$

$$-k \cdot 1\text{km} = \ln\left(\frac{0,95\text{mW}}{1\text{mW}}\right)$$

$$k = 0,0513\text{km}^{-1}$$

altså

$$I(x) = 1\text{mW} \cdot e^{(-0,0513\text{km}^{-1} \cdot x)}$$

Efter 100 km er intensiteten

$$I(100\text{km}) = 1\text{mW} \cdot e^{(-0,0513\text{km}^{-1} \cdot 100\text{km})} \\ = 0,0059\text{mW}$$

Efter 100 km transmission er der altså kun ca. 0,6 % af den oprindelige intensitet tilbage. Men signalet kan alligevel registreres med en følsom detektor.

Udviklingen fortsætter. Ved at tilsætte den sjældne jordart Erbium til glasmaterialet i fiberens kerne kan man opnå, at lyset forstærkes undervejs i stedet for at dæmpes. Der skal blot tilføres ekstra energi til lyslederen, og det klares med et kraftigt lasersignal fra en laser med en kortere bølgelængde end signalet. Herved udnytter man samme lysforstærkning, som foregår inde i en laser.

Øvelse 5. Dæmpning

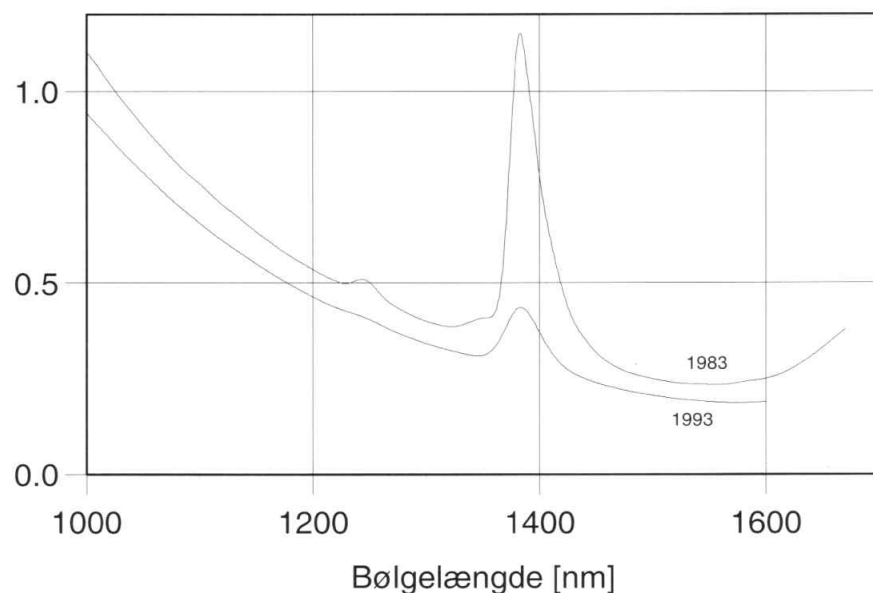
En laser sender lys ind i en lysleder med intensiteten 200 μW . Konstanten k er givet ved 0,12 km^{-1} . Hvor stor er intensiteten efter 1 km? Efter 10 km?

Øvelse 6. Regeneratorer

Omkring 1983 var dæmpningen omkring 4% pr. km. Hvad skulle regeneratorafstanden være dengang, hvis der skal være 2,5 promille tilbage af det oprindelige signal?

Hvor lille skal dæmpningen være, hvis regeneratorafstanden skal være 1000 km?

Dæmpning [dB/km]



Figur 4.6 Dæmpningen i en optisk fiber er meget afhængig af fremstillings-teknologien. Under fremstillingen benyttes en kemisk proces der frigør vand, og netop vand giver "tillægstab". Ved tillægstab forstås tab ud over hvad selve glasmaterialet giver. Figuren viser målinger med 10 års mellemrum på to fibre fremstillet af den danske fiberfabrik Lycom. Man kan se, at kurven fra 1993 har lavere dæmpning end den fra 1983. Specielt dæmpningen ved 1380 nm, der netop skyldes vand (resonans i O-H bindingen) er reduceret meget. Omkring bølgelængden 1550 nm, der benyttes til telekommunikation, er tillægdsdæmpningen næsten væk, således at den resterende dæmpning næsten udelukkende skyldes Rayleigh spredning. Det er en uundgåelig dæmpning i kvartsglasset.

Atomer

Hvad har atomer med lysledere at gøre? Jo, alt stof og dermed glasset i lyslederen er opbygget af atomer. Men det er ikke det vigtigste. Den væsentligste grund til at se på atomer i forbindelse med lysledere er, at al lysfrembringelse og -modtagelse sker via atomer i en laser og en detektor.

Siden grækeren Demokrit omkring år 400 f.Kr. introducerede begrebet atom, har man gjort sig mange forestillinger om, hvad ordet stod for. Oversat betyder atom "udelelig", og for Demokrit var et atom da også den mindste byggesten, som stof er opbygget af.

Først med den kemiske industris enorme opblomstring i 1700- og 1800-tallet, kom der for alvor gang i den kemiske videnskab, som tager sit udgangspunkt i atomernes opbygning og karakteristiske egenskaber. Med J.J. Thomsons opdagelse af elektronen i 1897 og E. Rutherfords opdagelse af atomkernen i 1911 var grundlaget lagt for den moderne atomopfattelse.

Brintatomet er det simpleste atom med en kerne bestående af kun én positivt ladet proton samt én negativt ladet elektron. Atomet holdes sammen på grund af den elektriske tiltrækning mellem den negative elektron og den positive proton. I de tungere grundstoffer er atomkernen opbygget af flere protoner (og neutroner) med et tilsvarende antal elektroner udenom. I det neutrale atom er antallet af elektroner det samme som antallet af protoner.

Når man skal anskueliggøre atomers opbygning, sker det undertiden ved at sammenligne med et solsystem med kernen på Solens plads og elektronerne kredsende omkring som planeter. Men billedet holder ikke for en nærmere undersøgelse, idet elektronerne ikke kredser i lukkede baner omkring kernen. I stedet er det mere frugtbart at tænke på atomerne som små energisystemer, som kan befinde sig i ganske bestemte energitilstande. I grundtilstanden er atomerne i den laveste tilstand.

Forandring fra én energitilstand til en anden kan ske ved lysudsendelse (emission) eller lysoptagelse (ab-

Figur 4.7 Brintatomet består af en positiv tung proton og en negativ let elektron. Til højre ses elektronfordelingen – orbitalerne – svarende til grundtilstanden 1) og den første exciterede tilstand 2).

sorption). Det er her atomerne kommer ind i forbindelse med lyslederne.

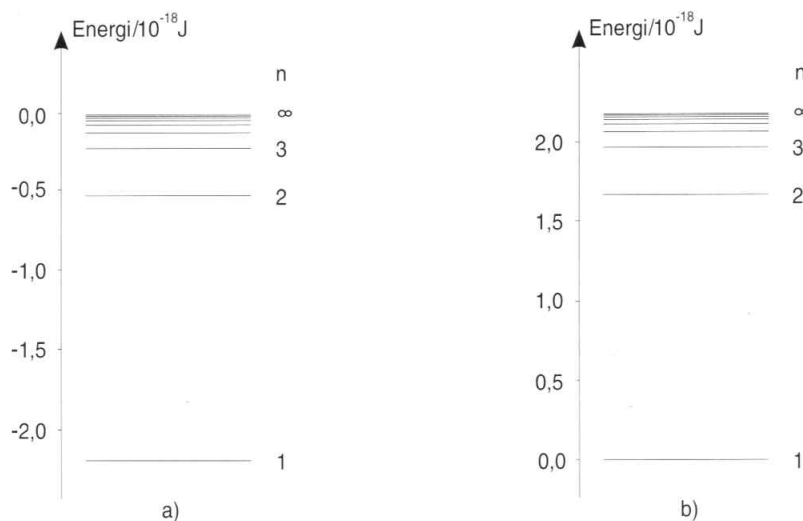
Hvad så med elektronerne når atomerne befinder sig i en stationær energitilstand og altså ikke udsender eller modtager lys? Her viser det sig, at det giver god mening at forestille sig elektronerne fordelt rumligt omkring kernen i faste sandsynlighedsfordelinger, kaldet orbitaler. Elektronen befinder sig ikke et bestemt sted, men der er en sandsynlighed for at finde den et bestemt sted, så længe atomet befinder sig i en bestemt energitilstand. Nogle steder er der stor sandsynlighed, andre steder er der lille sandsynlighed for at finde

elektronen. Det illustreres ofte ved at tegne små elektronskyer omkring kernen med en mørk farve svarende til en stor sandsynlighed for at finde elektronen det pågældende sted.

Atomer har forskellige energitilstande. Grundtilstanden for et atom er den lavest mulige energitilstand. Atomet har i denne tilstand afgivet mest mulig energi til omgivelserne. Energitilstandene er nummereret, sådan at grundtilstanden har nr. 1, og jo højere nummer, jo højere er atomets energitilstand.

Atomer kaldes exciterede, hvis de ikke befinder sig i grundtilstanden. Dermed er tilstandene fra nummer 2 og opefter alle exciterede.

Figur 4.8 Brintatomets energitilstande. Det fremgår af figur a), at grundtilstanden har en negativ energi, hvilket hænger sammen med, at atomets energi er valgt til nul, når elektronen og protonen befinder sig langt fra hinanden, hvilket svarer til at atomet har mistet sin elektron. Dette gøres af historiske grunde. På figur b) ses brintatomernes energitilstande, hvor grundtilstandens energi er valgt som nulpunkt for energiskalaen.



Lys og atomer

Det er velkendt, at lys repræsenterer energi. Mindre kendt er det nok, at et atoms udsendelse eller absorption af lys sker i bestemte energibundter, kaldet energikvanter eller fotoner. Lysets forskellige farver repræsenterer forskellige energikvanter. Den røde farve i den ene ende af farveskalaen svarer til små energikvanter, og den blå farve i den anden ende svarer til store energikvanter. I energimæssig henseende kan man tænke på lys som sammensat af et meget stort antal fotoner. Hver af regnbuens farver består af fotoner med en bestemt energi. Det var den tyske fysiker Max Planck, som år 1900 først arbejdede med antagelsen om energikvantisering i forbindelse med lysudsendelse fra et varmt legeme. I 1905 fremsatte Einstein så den egentlige fotonteori for lys, som siden er blevet bekræftet ved utallige eksperimenter. Teorien kan sammenfattes i Plancks lov, og går i korthed ud på, at fotonernes energi E er proportional med lysets frekvens f

$$E = h \cdot f$$

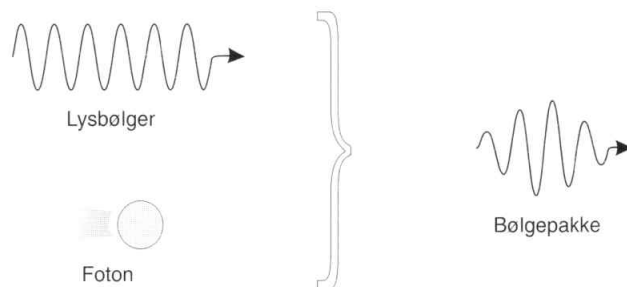
Konstanten h kaldes Plancks konstant. Den har værdien $6,63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$.

Øvelse 7. Farver og fotoner

En bestemt farve rødt lys har en frekvens på $450 \cdot 10^{12} \text{Hz}$. Hvad er energien af fotonerne i dette røde lys? En lille laser udsender det røde lys med effekten 1 mW. Hvor mange fotoner udsendes pr. sek?

En virkning af dette ses, når lys slår elektroner løs fra en metaloverflade. Men da elektronerne er bundet i metallet, skal en del af fotonernes energi bruges til løsrivelsen. Dette kaldes løsrivelsesarbejdet A_L . For metallet zink er løsrivelsesarbejdet $5,82 \cdot 10^{-19} \text{Joule}$ pr. elektron eller 3,63 Volt. 1 Volt er det samme som $1,602 \cdot 10^{-19} \text{Joule}$ pr. elektron. Energien af de hurtigste elektroner løsrevet fra et metal bestemmes derfor af formlen:

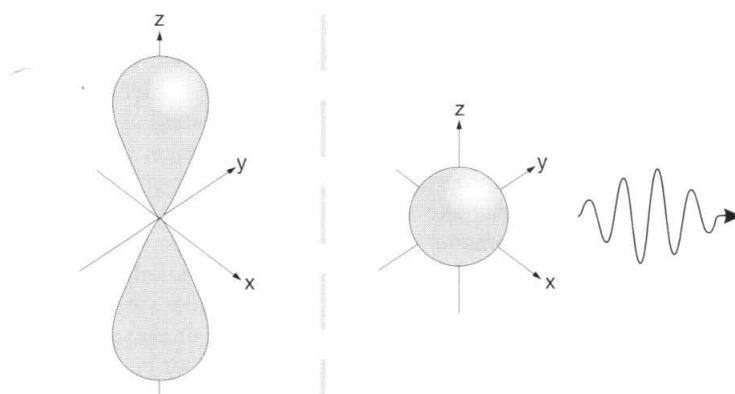
$$E_{\text{kin}} = E_{\text{foton}} - A_L = h \cdot f - A_L$$



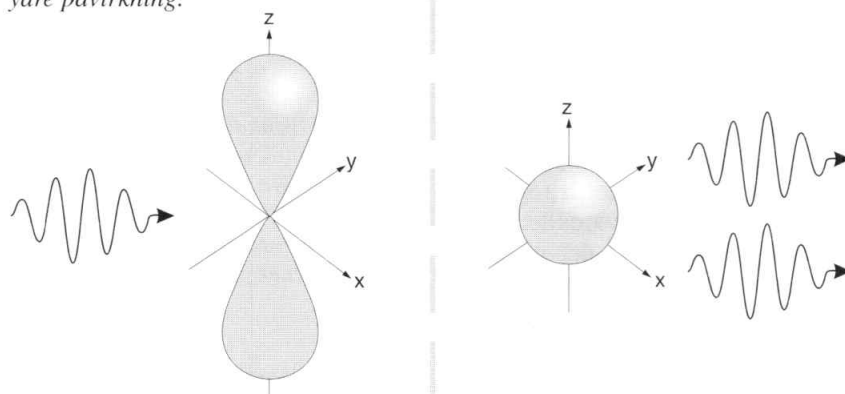
Figur 4.9 Opfattelse af lys som bølger og lys som partikler eller fotoner kan smeltes sammen til lys som en pakke.

Før

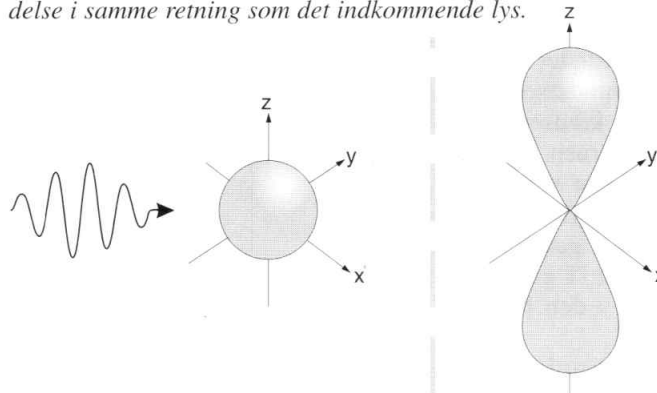
Efter



Figur 4.10 Spontan emission hvor et exciteret atom af sig selv udsender lys uden ydre påvirkning.



Figur 4.11 Stimuleret emission, hvor lys påvirker et exciteret atom til lysudsendelse i samme retning som det indkommende lys.



Figur 4.12 Absorption af lys i et atom. Excitation af et atom med lys.

Traditionelt bliver lys beskrevet som bølger, der kan brydes og reflekteres. Ovenfor har vi lige beskrevet lys som fotoner, en slags partikler, der udsendes af lysgiveren og som rammer modtageren. Umiddelbart kunne det lyde som en modstrid, at lyset både kan være bølger og partikler på samme tid. Det er da også et stort filosofisk problem. Vi vil her tegne lyset som en bølgepakke med begrænset rumlig udstrækning og ikke spekulere dybere over, om det nu er en partikel eller en bølge.

Lysabsorption og -emission

Indfangning af lys kaldes ofte for absorption, hvilket hænger sammen med, at der absorberes en foton. Lysudsendelse kaldes tilsvarende for emission, hvilket kommer af det engelske ord "emission", der netop betyder udsendelse.

I det følgende skal vi se på forskellige typer af emission og absorption. Først spontan emission. Et isoleret atom, der befinder sig i en energitilstand over grundtilstanden – kaldet et exciteret atom – vil før eller siden overgå til lavere og lavere energitilstande indtil grundtilstanden er nået. Når overgangene sker uden ydre påvirkning, kaldes det for spontan emission (det sker af sig selv – det sker spontant).

I modsætning til den spontane emission, sker det undertiden, at et exciteret atom henfalder, fordi det bliver påvirket udefra. Det kan ske med fotoner udefra, og det kan ske ved sammenstød med andre atomer. Når det sker med påvirkning af fotoner udefra, kaldes det for stimuleret emission. Atomet bliver stimuleret til at udsende en foton. Denne påvirkning til at henfalde er specielt virkningsfuld, når den indkommende foton har samme energi, som den foton, der udsendes ved energiovergangen i atomet. Der sker da det, at den foton, som udsendes, får præcis samme bevægelsesretning, som den indkommende foton. Da energierne er ens, har vi nu 2 fotoner med samme energi i stedet for 1, og de bevæger sig begge i den første fotonens retning. Dermed er lyset blevet kraftigere. Det er blevet forstærket ved at støde ind i det exciterede atom. Det er den form for forstærkning af lyset i én ganske bestemt retning, vi udnytter i laseren. Laseren lyser kraftigt i én retning.

Laseren

I en laser sker lysudsendelse ligesom i et udladningsrør ved, at atomerne udsender lys. Det specielle ved laseren er, at lysudsendelsen sker ved stimuleret emission i stedet for ved spontan emission.

Det er således helt afgørende for laseren at udnytte den stimulerede emission. Har man først én foton med den rette energi, er den med til at udløse udsendelsen af en anden foton med samme energi og i samme retning. Begge fotoner har nu mulighed for at udløse nye fotoner med samme energi og samme retning osv. På denne måde kan man opnå en meget kraftig intensitet af én bestemt frekvens i én bestemt retning. Men for at opnå en kraftig laservirkning er der flere forhold at iagttage:

1) Det er vigtigt, at der er mange exciterede atomer i den rigtige energitilstand, så fotonerne i laseren har god mulighed for at stimulere udsendelsen af andre fotoner. Atomerne skal derfor kunne befinde sig tilstrækkeligt længe i den exciterede tilstand uden at henfalde ved spontan emission.

2) Atomerne må ikke henfalde spontant, for da sker lysudsendelsen i en vilkårlig retning, og det bidrager ikke til laserlyset i laserretningen.

3) Der må ikke være ret mange atomer i den tilstand, som atomerne henfalder til ved lysudsendelse. Derved ville der jo være mulighed for, at disse atomer kan absorbere det lys, vi er interesseret i at forstærke.

Betingelserne er:

- Vi skal have mange atomer i den exciterede tilstand.
- Vi skal have lille sandsynlighed for, at atomerne fra denne tilstand henfalder spontant.
- Vi skal have få atomer i den energitilstand, atomerne henfalder til ved spontan emission.

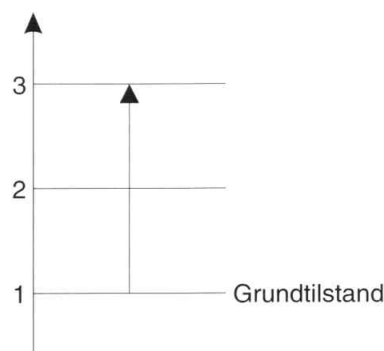
Men hvordan skaffer vi så betingelserne for en laser.

Punkt a) klares ved excitation ad elektrisk vej. Dette kaldes pumpning. Halvlederlasere er opbygget af halvledermaterialer som i en lysdiode. Her sker pumpningen blot ved at pålægge laserkrystallen en elektrisk spændingsforskel. I He-Ne-

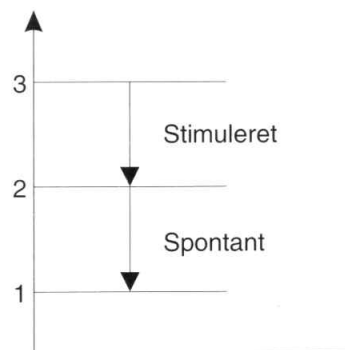
laseren, sker det ved at beskyde atomerne med elektroner inde i et glasrør.

Excitationen foregår i to omgange. Første exciteres He-atomerne, og siden overgiver de denne energi til Ne-atomerne, som udsender lyset. He-Ne-laserens virkemåde er derfor meget afhængig af, at energiniveauerne i Helium og Neon passer med hinanden. Det er vist på figur 4.17 side 37.

Punkt b) og c) klares ved at vælge atomer, hvor der findes specielle exciterede energitilstande, som er særligt stabile overfor spontan emission, og hvor der findes lavere tilstande, hvortil atomerne hurtigt henfalder spontant efter den stimulerede emission. Henfalder atomerne ikke hurtigt videre, mister vi vi let laserlyset, da det så ville kunne absorberes af atomerne igen. Forstærkningen er dermed bestemt af den stimulerede emission og af absorptionen i fælleskab.



Figur 4.13 Atomerne i laseren exciteres elektrisk til en ganske bestemt energitilstand.



Figur 4.14 Atomerne i laseren henfalder først stimuleret ved udsendelse af laserlyset i én retning og derefter spontant i alle mulige retninger.

4.5 Lys ind og ud

I det følgende vil vi se på, hvordan man kobler en kraftig lyskilde i den ene ende af lyslederen og en følsom lysdetektor i den anden.

Halvlederlasere

Ved den optiske kommunikation med de digitaliserede signaler er det afgørende, at man kan få laseren til at virke med lysudsendelse i meget korte lyspulser og meget hurtigt efter hinanden. Af hensyn til informations-hastigheden i lyslederen skal laseren gerne kunne sende med en frekvens på 10^{10} lyspulser pr. sek (1993). Tilsvarende skal der i den anden ende af lyslederen være meget følsomme og hurtigtvirkende detektorer.

Halvlederlaserens konstruktion er styret af ønsket om en kraftig laservirkning.

En halvlederlaser er en speciel form for lysdiode. Den er opbygget af en krystal, hvis to halvdele er behandlet forskelligt kemisk set. Spændingsfald udregnes som energiudsendelsen pr. ladingsenhed. Et stort spændingsfald svarer til en stor energifrigivelse pr. elektron. I krystallens to halvdele er der ingen spændingsfald svarende til, at der ikke udsendes energi. Hele spændingsfaldet ligger over grænseområdet. Her afgiver elektronerne energi. Det sker ved lysudsendelse, som når et exciteret atom udsender lys ved henfald til grundtilstanden. Faktisk udnytter man krystallens atomer i grænseområdet, hvor de indfanger de strømmende elektroner. Dette giver lysudsendelse, og er intensiteten stor, får vi en laservirkning med en meget kraftig lysudsendelse i én bestemt retning til følge.

Når laseren lyser, bevæger elektronerne sig fra minuspolen ind i den del af krystallen, kaldet n-delen, hvor elektronerne bevæger sig frit (n-del eftersom det er de negative elektroner, der bevæger sig frit). Den anden del af krystallen kaldes p-delen, eftersom strømmen ledes via positivt ioniserede atomer. Her ledes strømmen ved, at elektronerne springer fra ion til ion. Lysudsendelsen sker i grænselaget, hvor elektronerne kommer fra n-delen, til de indfanges ved de positive ioner i p-delen. Selve indfangningen giver lysudsendelsen, som når et exciteret atom henfalder. Springene fra ion til ion i p-delen sker igen uden energiudsendelse og dermed uden spændingsfald. Spændingen over krystallen er kun bestemt af indfangningen af elektroner i grænselaget.

Spændingen er konstant så længe laseren lyser. Hvis spændingen falder, lyser den slet ikke.

I en almindelig lysdiode sker indfangningen og henfaldet spontant. Ved en halvlederlaser bliver lysudsendelsen så kraftig, at det er lyset, der stimulerer til henfald, og vi får en laservirkning.

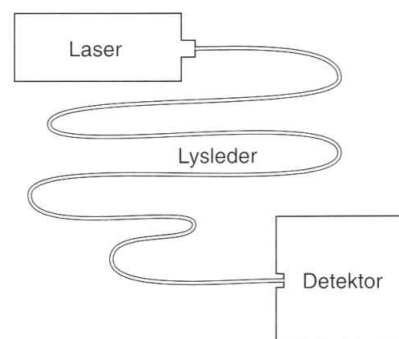
Men hvordan er krystallens rumlige opbygning? Det aktive grænselag er tyndt. Det tynde område er dels med til at gøre intensiteten af det udsendte lys meget stort, hvilket er en forudsætning for laservirkningen, og dels er det med til at sikre, at laseren reagerer meget hurtigt på den påtrykte spænding. En hurtig reaktion er en forudsætning for en høj sendefrekvens. Laserområdet er langt for at sikre, at fotonerne kan nå at stimulere andre fotoner til lysudsendelse, inden de forlader laseren. Det er jo den stimulerede emission af fotoner, der giver laservirkningen.

Grænselaget er omgivet af materialer med et mindre brydningsindex. Det er med til at holde fotonerne inde i grænseområdet på samme måde, som lyset holdes inde i kernen af en lysleder. Fotoner på vej ud af grænselagets sider spejles ind i grænseområdet igen ved totalreflektion. Endelig udnyttes, at krystallens endeflader står vinkelret på grænseområdet. Endefladerne kommer dermed til at virke som spejle, der bevirker forøget intensitet inde i laseren.

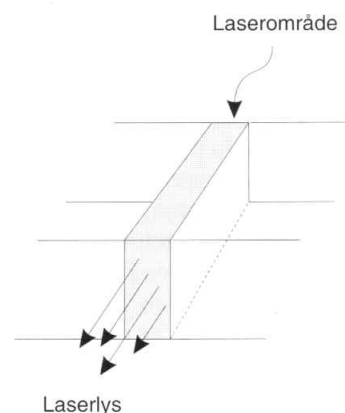
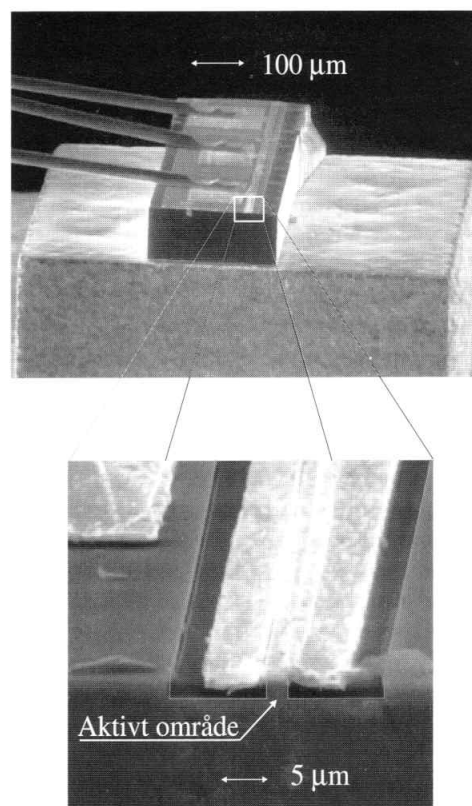
Lyset, der slipper ud af den ene ende, ledes ind i lyslederkablet, der skal monteres meget præcist for enden af laserområdet. Da dette område er ca. $1-2 \mu\text{m}$ bredt, kræver dette en særdeles nøjagtig teknik.

Detektor

En diode kan også anvendes som en detektor. Vi skal først forstå, at dioden spærre for strømmen, når batteriet vendes om. I den situation virker dioden som lysdetektor. Dioden spærre nu for strøm, da atomerne i grænselaget ikke af sig selv kan lade sig excitere. Dermed kan elektronerne ikke passere grænselaget, og dioden standser strømmen. Ved at belyse dioden i grænselaget bliver en del af atomerne exciteret på grund af lyset, og der går en strøm, der er proportional med antallet af exciterede atomer, som igen er proportional med det indkommende lys. Dermed har vi en lysdetektor, hvor strømstyrken er proportional med det lys, som rammer det følsomme område.



Figur 4.15 Lysleder koblet sammen med laser og detektor.



Figur 4.16 Rumlig opbygning af en halvlederlaser.
(Foto: Tele Danmark Research)

Opgaver

1. Ned gennem Jylland

Hvor lang tid vil et lyssignal tage at løbe i en fiber ned gennem Jylland, der er ca. 380 km lang? Hvor lang tid vil et signal tage i luft? Hvor lang tid vil det tage over satellit?

2. Øjenkontakt?

Vand har et brydningsindeks på 1,33. Du ser en fisk ind i øjnene. Du ser i retningen 45 grader med vandret. Fisken ser også dig ind i øjnene. I hvilken retning ser fisken?

3. Forskydning af lys

Laserlys sendes ind på en rektangulær glasklod med tykkelsen 2,5 cm. Beregn forskydningen af laserstrålen, når indfaldsvinklen er 70° , og brydningsindekset er 1,6.

4. Varmedis

Hvordan kan det være, at varm luft, som stiger til vejrs, slører billedet? Det kan være over en varm asfaltvej, en varm radiator eller sandet i Sahara.

5. Solbøjning

Atmosfærens tæthed aftager med stigende højde. Det betyder, at lyset fra solen, månen eller stjernerne bevæger sig lidt langsommere i takt med at det nærmer sig jordens overflade. Derfor afbøjes lysstrålerne i atmosfæren nedad mod jordoverfladen, når de rammer atmosfæren skråt. Lys, som rammer jorden tangentielt afbøjes $0,58^\circ$. Det svarer netop til lyset fra solen ved solnedgang. Hvor lang tid går der så fra solen forsvinder under horisonten, til vi ser solen gå ned? Er dagen så lidt længere på grund af atmosfæren?

Hvor er solen rigtigt, når vi netop ser solen ramme horisonten. Til sammenligning kan anføres, at solens radius er $6,96 \cdot 10^8$ m, og at afstanden til solen er $1,50 \cdot 10^{11}$ m. Heraf kan vi finde vinklen, som vi ser solen under.

6. Perspektiv

Hvorfor ser solen og månen så store ud, når de netop går ned i forhold til, når vi ser dem højt på himlen?

7. Dæmpning

Lyset dæmpes i en lysleder ved at lyset spredes på ujævnheder i glasstrukturen. Tilsvarende dæmpes sollyset på vejen gennem atmosfæren. Specielt lys med små bølgelængder svarende til blå lys spredes meget. Effekten er naturligvis kraftigst, hvor

lyset skal bevæge sig langt gennem atmosfæren som ved solopgang og solnedgang.

Hvorfor forklarer det, at solen er rødlig ved solopgang og solnedgang? Hvordan vil du tilsvarende forklare, at himlen er blå, når der er skyfrit? Hvorfor er skyerne så hvide, hvis de da ikke i stedet er sorte?

8. Totalreflektion i klods (svær)

Vis, at brydningsindekset af en rektangulær klods skal være mindre end kvadratrods 2 for at det kan lade sig gøre at ramme grænsevinklen for totalreflektion med en laser. (Hint: Kan det lade sig gøre med totalreflektion fra luft til glas? Og hvordan brydes en laserstråle på vej ind i glas?)

9. Hastighed, frekvens, bølgelængde

Hvad er frekvenserne svarende til rødt og blå lys med bølgelængder på hhv. 600 nm og 450 nm? Hvad er de tilsvarende hastigheder, frekvenser og bølgelængder inde i kernen af en lysleder med brydningsindexet 1,6?

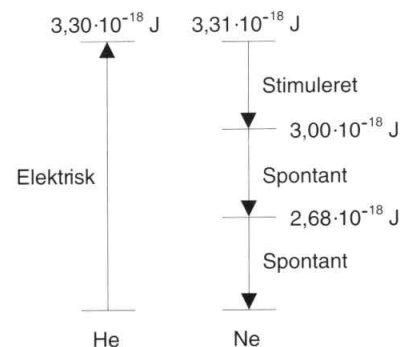
10. Fotoner i en laser

Skolens He-Ne-laser har en karakteristisk rød farve med bølgelængden 632,8 nm. Hvilken energi har de enkelte fotoner i en He-Ne-laser? En typisk værdi for lyseffekten er 1 mW. Hvor mange fotoner udsendes pr. sek i laserstrålen? Inde i laseren er anbragt spejle, hvor det ene spejler lyset 100 %, og det andet spejler 99,7%. Resten udgør laserstrålen. Hvad er lysintensiteten inde i laseren? Hvor mange fotoner er der inde i laseren, når vi sætter længden af en typisk He-Ne-laser til 40 cm?

11. He-Ne-laser

En He-Ne-laser indeholder både helium og neon. Deraf navnet. Helium har en simpel energistruktur med få energiniveauer. Ét bestemt energiniveau i neon har de ønskede laseregenskaber, hvilket vil sige, at det er ret stabilt overfor spontan emission, samt at det efterfølgende henfald spontant sker hurtigt. På tilfældig vis passer det aktuelle energiniveau i Ne med ét i He. Excitationen af Ne-atomer sker derfor ved at gassen beskydes med elektroner. Atomerne exciteres mere eller mindre. Det er ret sandsynligt, at det rette energiniveau i He exciteres, da He har en simpel energistruktur. Herefter overføres energien til Ne-atomerne ved almindelige sammenstød. Da energini-

veauerne passer med hinanden, udveksles derved ofte energi. Ne-atomerne er exciteret til den rette tilstand. Aflæs på figuren for Ne forskellen i tilstandenes energi for "laserovergangen". Dette er netop fotonergien i laseren. Benyt Plancks konstant til at finde fotonernes frekvens. Find ud fra lysets hastighed også bølgelængden af laserlyset. Passer det med de 632,8 nm, vi aflæser på laseren?



Figur 4.17

12. Dæmpning i en lysleder

I en lysleder er dæmpningen 40% pr. kilometer ved bølgelængden 1300 nm. Beregn intensiteten efter 1 km, når startintensiteten er 1 mW. Opstil derefter et udtryk for lysintensiteten som funktion af afstanden og tegn grafen på semilogaritmisk papir. Hvor langt når lyset, før intensiteten er faldet til 1 mikrowatt.

13. Dæmpning i dB

Dæmpningen i optiske fibre angives ofte i dB pr. kilometer. Denne størrelse beregnes som $10 \log(I_{\text{in}}/I_{\text{out}})$, hvor I_{in} er startintensiteten og I_{out} er intensiteten efter 1 km. Beregn dæmpningen i dB pr. kilometer når dæmpningen er 5% og 40% pr. km.

14. Sjælland Bornholm tur retur

Den typiske sendeeffekt for en laser er 1 mW, og ved 565 Mb/s kræves omkring 0,5 mikrowatt for at have et acceptabelt signal-støjforhold i modtageren. Kan man transmittere fra Sjælland til Bornholm (157 km fiber) med et sådant system?

Hvor lang tid varer en bit når bitraten er 565 Mb/s? Hvor lang er en bit?

På grund af fiberens dispersion bliver impulserne $2 \cdot 10^{-12}$ sekunder eller 0,4 mm bredere for hver kilometer (afhængigt af den anvendte laser). Erfaringen viser, at dispersionen begynder at blive et problem, når den samlede impulsforbredning bliver ca. 25% af bittens egen bredde. Vil dispersionen være et problem i en lysleder mellem Sjælland og Bornholm?

15. Afstandsloven for lys

Almindeligt lys vil udbrede sig til alle sider, og derfor vil der være to forskellige fænomener, der vil dæmpe lysintensiteten. For det første vil lyset blive absorberet i partikler, som det møder undervejs. Det kaldes dæmpning. For det andet vil lyset aftage i intensitet, fordi det udbreder sig over et større og større område. Det kaldes afstandskvadratloven, eftersom intensiteten aftager med kvadratet på afstanden. Fordobles afstanden, falder lysets intensitet til en 1/4 osv. Selvom lasere normalt udsender lys i en ganske bestemt retning, vil der alligevel være en lille spredning på lyset, og derfor dæmpes også laserlys i luften efter afstandskvadratloven.

Antag, at intensiteten i centrum af lystrålen 1 meter fra laseren er I_0 . Hvad er da intensiteten i centrum af lyskeglen 1 km fra laseren, når vi ser bort fra absorption? Hvorfor gælder afstandskvadratloven ikke for en optisk fiber?

16. Brintatomet

Fysikeren Niels Bohr var den første, der regnede teoretisk på brintatomet, og kom frem til den nuværende formel for energiniveauerne i brintatoms forskellige tilstande. Formlen er:

$$E(n) = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} \cdot \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Undersøg, om formelen passer med tallene aflæst på figur 4.8 a) side 33. Lav også en formel for tilstandenes energier svarende til figur 4.8 b).

Udregn energien af de fotoner, som udsendes ved overgangen fra 3. til 2. tilstand. Fra 4. til 2. tilstand. Og endelig fra 5. til 2. tilstand.

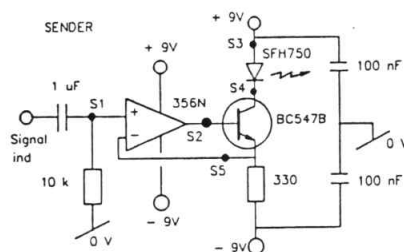
Hvilken farve har det tilsvarende lys?

Eksperimenter

1. Brydning

I denne øvelse er det meningen, at I selv skal udtænke og gennemføre eksperimentet. Altså ikke noget med at læreren kommer med forslag eller hjælp undervejs. Brug i stedet læreren som konsulent til at diskutere jeres forslag med.

Tag udgangspunkt i et par forskellige klodser af glas, og design minimum to forskellige metoder til bestemmelse af klodsernes brydningsindeks.



Figur 4.18 viser et diagram over et kredsløb, hvor lydsvingningerne i mikrofonen omsættes til analoge lys-svingninger fra lysdioden. Opstillingen realiseres nok lettest på et sømbrædt, hvor du lodder komponenterne fast på messingsøm. På figuren er foreslået nogle værdier for de forskellige komponenter. (Gengivet med tilladelse fra Danmarks Ingeniørakademi Elektroafdelingen).

Først når metoderne er diskuteret færdig, er det tid til at foretage målingerne og lave udregningerne.

2. Lyd omsat til lyssignaler

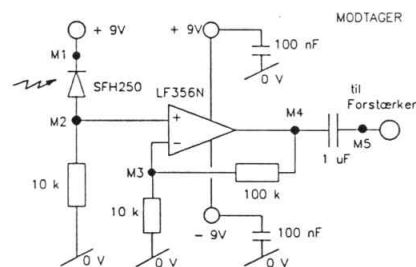
En mikrofon omsætter lydens svingninger til analoge elektriske svingninger, hvor spændingen svinger i takt med lydets trykvariationer i luften. Disse elektriske svingninger kan forstærkes med et transistor-kredsløb og sættes til at styre lysudsendelsen fra en lysdiode. Dermed har vi omsat lydsvingningerne til lyssvingninger, som så kan sendes gennem et lyslederkabel.

Byg kredsløbet i figur 4.18 og kontroller, at lyset svinger i takt med lydene til mikrofonen. Der skal være en ret kraftig variation i lyset fra lysdioden

3. Analoge lyssignaler til lyd

I princippet kan man anvende en almindelig diode vendt i spærreretningen som en lysdetektor, men det kan ikke anbefales, da det giver meget svage signaler, og dermed meget støj. I stedet benyttes en fotodiode eller en fototransistor, som er noget mere følsom. Signalet fra fotodioden forstærkes med et transistor-kredsløb, og sendes til en højttaler. Dermed har vi funktionelt bygget det omvendte kredsløb af det i eksperiment 2.

Byg kredsløbet i figur 4.19 og kontroller, at det fungerer. Det skal bl.a. reagere med brum ved lys fra et lysstofrør. Når det virker, er det tid for at koble apparaturet fra eksperiment 2



Figur 4.19 viser kredsløbet, der kan omsætte analoge lyssignaler til lyd-signaler fra en højttaler.

(Gengivet med tilladelse fra Danmarks Ingeniørakademi Elektroafdelingen).

sammen med det fra eksperiment 3. Prøv i første omgang at koble signalet fra lysdioden direkte til fotodioden. Vær opmærksom på, at der skal benyttes forskellige batterier til de to opstillinger for at lyden ikke skal forplante sig gennem batteriet.

Når begge kredsløb virker efter hensigten prøver I, om det også virker, når der kobles et lyslederkabel ind mellem lysdioden og fotodioden. Kablet skal holdes meget præcist, for at lyset kan overføres til fotodioden.

4. Fotoelektrisk effekt med Zn

Efterprøv påstanden om at en negativ ladet Zn-plade kan aflades ved at belyse den med ultraviolet lys fra f.eks. en kviksølvlampe.

Giver det samme resultat med et kraftigt lys fra en glødelampe, hvor der næsten ikke findes ultraviolet lys?

Hvad sker der, når Zn-pladen er positivt ladet – altså har underskud af elektroner?

Forklaringen på, at det kun er det ultraviolette lys som kan aflade den negative plade og ikke den positive plade, er, at der skal en mindste energi til at løsrive elektronerne fra Zn-pladen. Det kræver fotoner af en bestemt mindste frekvens svarende til det ultraviolette lys. Det kræver langt mere energi at løsrive de positive atomkerner fra metallet, og derfor kan ikke engang ultraviolet lys aflade den positive Zn-plade.

5. Virkningsgrad af elektrisk pære

Virkningsgraden af en elektrisk pære kan bestemmes eksperimentelt ved at mål energiafsætningen i f.eks. vand, både med og uden stannioldviklet omkring pæren. Når der ikke er stannioldviklet omkring pæren, og når bægeret er af glas, undslipper lyset vort energisystem.

6. Polarisation af laserlys

I de fleste He-Ne-lasere er der indbygget et polarisationsfilter i udladningsrøret. Undersøg ved hjælp af et polarisationsfilter eller et par polaroid solbriller, om skolens He-Ne lasere udsender polariseret lys. Man må dog ikke se ind i laseren!

7. Gitterformlen og laserlys

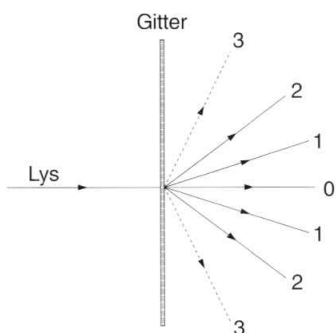
Et optisk gitter består af en glasplade, hvori der er ridset et stort antal parallelle linier. Afstanden mellem linierne betegnes d , kaldet gitterkonstanten. Det spændende med et gitter er, at når gitteret belyses, afbøjes lysets forskellige farver i forskellige retninger ligesom lys, der brydes i et prisme. Gitteret er blot mere præcis at arbejde med end et prisme.

Gitterligningen for lysets afbøjning i et gitter lyder

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin(v_n)$$

n er et nummeret på de afbøjede stråler, så nr 0 er den stråle, som går direkte gennem gitteret. v_n er afbøjningsvinklen fra nr. 0 til nr. n .

He-Ne-laserens spektrum er et eksempel på et diskret spektrum, eftersom der kun er én frekvens svarende til bølgelængden 632,8 nm. Prøv at skifte laseren ud med en reuterlampe, hvor lyset stammer fra en glødetråd. For at I kan se noget, skal I nok sende lyset gennem en spalte inden lyset rammer gitteret.



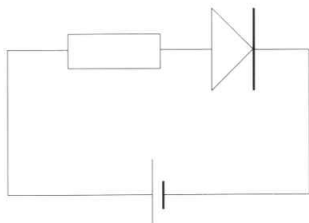
Figur 4.20 Lys med én bestemt bølgelængde λ rammer vinkelret ind på gitteret med gitterkonstanten d . Derved opspaltes lyset i forskellige retninger, og afbøjes derved i vinklerne v_n . Strålerne er nummererede, så den direkte stråle, der ikke er afbøjet har nummeret 0. De øvrige har så nummer 1, 2, 3, etc.

8. Brintspektret og diskrete spektre
De fleste skoler har et apparat kaldet et goniometer, der består af en stor skive med gradinddeling, en spalte og en kikkert. Goniometret benyttes ved præcise vinkelmålinger af afbøjning af lys.

Benyt et gitter til afbøjningen som beskrevet i eksperiment 7, og mål på brintlys eller andre atomers spektre. Prøv endelig med en glødelampe og nyd den flotte regnbue af farver, der svarer til vores opfattelse af hvidt lys. Prøv at variere spændingen til glødetråden og iagttag skiftet mod de røde farver ved lavere spændinger og dermed lavere temperaturer.

9. Dioden

Dioden leder strømmen i den ene retning og spærrer for strømmen i den anden. Lav en opstilling som vist på figuren. Beskyttelsesmodstanden på 10 ohm er medtaget for ikke at brænde dioden af. Denne kan typisk tåle op til et par ampere. Benyttes en lysdiode, må strømstyrken gennem dioden ikke overstige 50 mA, så det sikreste er nok at erstatte beskyttelsesmodstanden med én på 500 ohm.



Figur 4.21 viser opstillingen til måling af diodens karakteristik med en beskyttelsesmodstand indsat.

10. Plancks konstant med lysdioder
Lysdioder udsender lys, når de frie elektroner i n-laget indfanges af krystallens atomer i p-laget. Lysets farve er bestemt af energispringets størrelse. Store energispring giver blåt lys og små energispring giver rødt lys. Energispringet svarer til den spænding, der er over dioden, når den lyser. Spændingsfald er det samme som energitab pr. ladningsenhed, og da det er elektroner, det drejer sig om, må energien være elektronens ladning $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb ganget med spændingsfaldet.

Få fat i lysdioder med forskellige farver. Mål spændingen over dioderne ved en fast strøm på f.eks. 10 mA. Frekvensen af lyset fra lysdioderne måles ligesom i eksperiment 7 med et

gitter, hvor man i første omgang bestemmer bølgelængden, men via lyshastigheden kan dette omregnes til lysfrekvensen. Prøv ud fra målingerne at bestemme en værdi for Plancks konstant. Metoden er ikke specielt nøjagtig, og derfor er vi tilfredse, blot vi får et resultat i nærheden af tabelværdien.

Få fat i lysdioder med forskellige farver. Mål spændingen over dioderne ved en fast strøm på f.eks. 10 mA. Benyt evt. opstillingen skitseret i eksperiment 4.

Frekvensen af lyset fra lysdioderne måles ligesom i eksperiment 4 med et gitter, hvor man i første omgang bestemmer bølgelængden, men via lyshastigheden kan dette omregnes til lysfrekvensen.

11. Lysfølsomme modstande, bamseøjne og termoresistorer

En ren halvleder er en dårlig leder. Men ved at lyse på halvlederen, er der mulighed for at løsrive et antal elektroner fra de enkelte atomer, så de bliver frie ladningsbærere til at lede en strøm. Det udnyttes i de såkaldte bamseøjne, hvor modstanden falder i takt med lysintensiteten. Man kan også opnå flere frie elektroner ved at varme materialet op, så der bliver kraftigere termiske vibrationer i krystallen. Dette udnyttes i en termoresistor, hvor modstanden falder kraftigt ved stigende temperatur.

Skaf en lysfølsom modstand og en termoresistor og undersøg, hvordan modstanden falder med stigende lysintensitet, henholdsvis med stigende temperatur.

12. Egne lysledere

Varm en ca. 5 mm glasstang over en gasflamme. Glas er en dårlig varmeleder, så er stangen blot 10-15 cm, kan man sagtens holde den i enderne, mens man varmer den på midten. Når stangen er blevet blød på midten, trækker man den så lang, armene rækker. På grund af overfladespændingen dannes der en tynd tråd. Tykkelsen skal være lidt tykkere end et hår. Prøv at sende lys gennem fiberen ved hjælp af skolens He-Ne-laser.

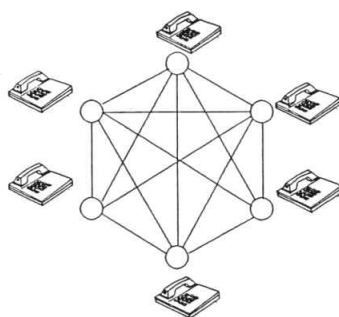
Prøv at placere en dråbe glycerin midt på fiberen. Hvad sker der med lyset i fiberen?

Prøv fiberens trækstyrke. Rigtige fibre har trækstyrke som ståltråd.

Prøv hvor lille bøjningsradius fiberen kan klare uden at knække. Rigtige fibre kan vikles omkring en blyant uden at tage skade.

5. Et verdensomspændende netværk?

Det er klart, at telefoner ville være nytteløse, hvis brugerne ikke kunne komme i forbindelse med hinanden. Det var man naturligvis klar over helt fra begyndelsen; men i telefonens helt unge dage var det overladt til telefonbrugeren selv at etablere den ønskede forbindelse, når han ville tale ned nogen (det var også ejerens ansvar at vedligeholde selve ledningsnettet). Primitivt kontakter, placeret i ejerens hjem eller kontor, blev brugt til at etablere forbindelse til den ønskede modtager. Som man kan se af figur 5.1 skal der et helt spidelvæv af ledninger til for at forbinde blot 6 telefoner med hinanden. Man kan let forestille sig, hvor besværligt det ville være at tilslutte blot en eneste telefon mere til dette netværk. Matematisk kan det vises, at antallet af forbind-



Figur 5.1. Et sekspunkts netværk.

elser I , der kræves for at forbinde N telefoner med hinanden er

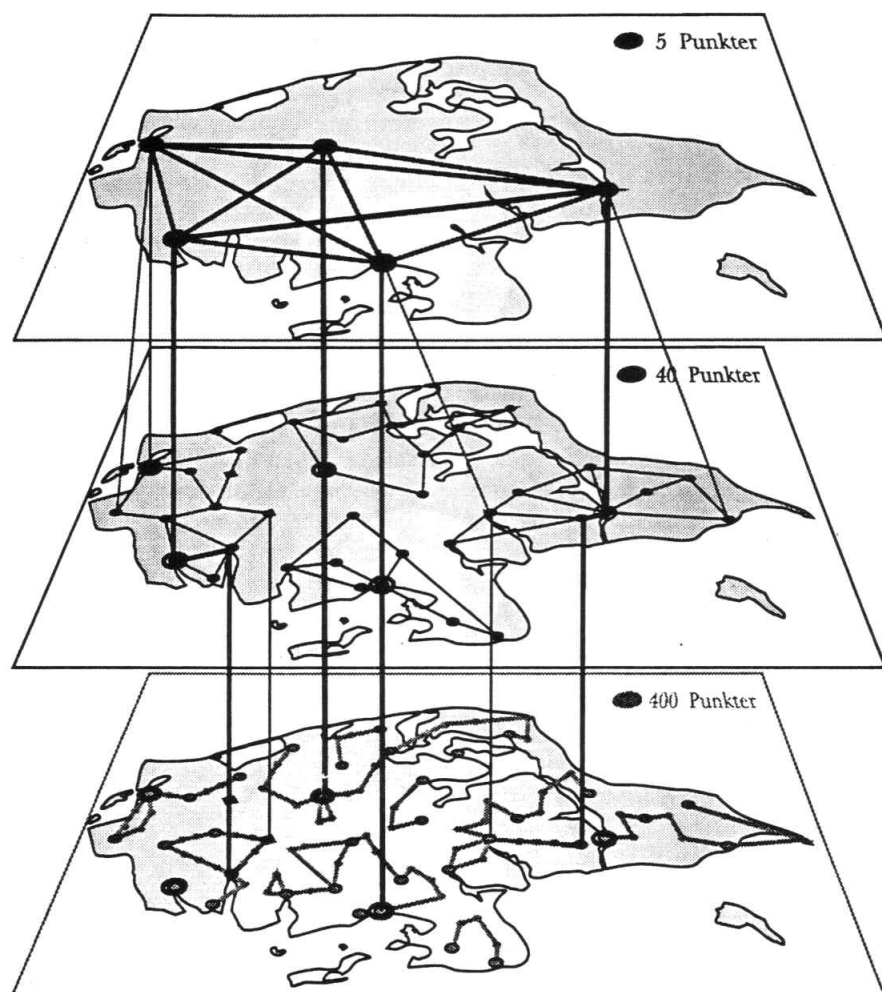
$$I = \frac{1}{2} \cdot N \cdot (N-1)$$

Hvis der er 50 telefonapparater kræves $0,5 \cdot 50 \cdot 49 = 1225$ forbindelser, og antallet af telefoner skal ikke være ret stort, før antallet af ledninger bliver helt astronomisk.

Det er klart, at dette arrangement ikke virker, hvis mange telefoner skal forbindes. I stedet bruger man telefoncentraler. En telefoncentral er i sin simpleste form et sted, hvor telefonlinier fra en mængde telefoner er ført sammen, og hvor man har udstyr til at forbinde dem med hinanden to og to. Tidligt i telefonens historie kunne man kun telefonere lokalt. En telefoncentral var en slags ø, der kun betjente de lokale abonnenter. Efterhånden som behovet for at kunne telefonere over større afstande voksede, fandt man på at forbinde de enkelte lokale centraler med et nyt "lag" af centraler, de såkaldte "mellembyscentraler", hvor man kunne forbinde de enkelte lokalcentraler med hinanden efter behov. Disse mellembyscentraler blev så igen forbundet med hinanden via "landsdelscentraler" osv. På den måde blev et lagdelt system af telefoncentraler bygget op. Hvis en abonnent skulle ringe til et andet sted i landet kaldte han først op til sin lokalcentral. Telefonisten kaldte derefter op til mellembyscentralen, der måske igen kaldte op til landsdelscentralen, der derefter kaldte op til en mellembyscentral, en lokalcentral osv, indtil man havde etableret en lang kæde af forbindelser mellem de to, der ønskede at tale sammen. På den måde kunne man, allerede før århundredskiftet, knytte telefonabonnenterne sammen i et vidtrækkende netværk, der, selvom det var 100% manuelt betjent, arbejdede effektivt og pålideligt, og som tilfredsstillede kundernes behov for et effektivt virkende telekommunikationsapparat.

Selvom teknikken er skiftet flere gange indenfor de sidste 100 år, så telefonnetværket nu fungerer automatisk, er der ikke ændret fundamentalt på den grundlæggende struktur med et lagdelt net af centraler, organiseret efter hierarkiske principper. Figur 5.2 viser et nutidigt kort over Jydsk Telefons telefonnet.

Nederste lag, der forbinder 400 lokalcentraler til mellembyscentralerne, kaldes "det primære accessnet".



Figur 5.2. Skematisk diagram af det lagdelte telefonnet i Jylland.
Kilde: Jydsk Telefon, Tele nn 1993.

Mellemste lag, der kaldes "det sekundære transportnet" forbinder 40 mellembycentraler med hinanden og med landsdelscentralerne. Det øverste lag, det såkaldte "primære transportnet", forbinder de 5 landsdelscentraler med hinanden. Hvis man skal sammenligne med vejnettet, svarer de tre lag ganske godt til biveje, amtsveje og motorveje.

5.1 Den historiske udvikling

Inden vi går videre med diskussionen af det moderne telekommunikationsnetværk, ser vi lidt på det danske og det internationale netværk med historiske og forretningsmæssige øjne. Den første danske telefoncentral blev indrettet i en lejlighed i København d. 15 januar 1881. Den havde 22 abonnenter. Udviklingen var lynhurtig og allerede d. 1. april samme år var abonnenttallet mere end fordoblet.

Denne stigningstakt med en fordobling på mindre end 3 måneder kunne naturligvis ikke fortsætte ret længe; men fra at være en luksus og et statussymbol som kun samfundets elite kunne skaffe sig (se figur 5.3), er det at have telefon blevet så almindeligt, at det vækker forundring, hvis vi en sjælden gang træffer på en husstand uden telefon. De fleste mennesker har nok lidt svært ved at forestille sig, hvordan man kan klare sig uden at have en telefon til rådighed. Der er 56.6 telefonabonnenter pr. 100 indbyggere i Danmark (og 86 telefonapparater pr. 100 indbyggere). Det er en af verdens højeste tætheder af telefoner.

I 1991 var der 2.072.216 abonnenter. Tallene kommer fra "Teleårbog Danmark 1991" udgivet af Telestyrelsen. Man kan læse mange interessante detaljer af en statistik som den. Figur

5.4 viser udviklingen i antallet af abonnenter, og f.eks. kan man se, at abonnentantallet er steget knap 2.5 gange igennem perioden. Det samme er antallet af indenlandske opkald. Antallet af opkald pr. telefon har altså været nogenlunde konstant gennem 21 år!

Øvelse 1. Tæthed

Diskuter hvilke parametre der påvirker telefонтætheden i et land. Overvej faktorer som: BNR (brutto national produkt), erhvervsstruktur, politisk system mv.

Selvom telefondækningen er tynd i mange udviklingslande, kan man med en vis ret sige, at vi har et verdensomspændende telenet. Som nævnt i kapitel 3, har vi i Danmark selvvalgt til ca. 150 lande, og udlandstrafikken udgjorde i 1991 4 % af den samlede

Det internationale Bell Telefon-Selskab, Kjøbenhavn. Fortegnelse

over de med Abonnenter m. Fl. til 1ste April 1881 oprettede directe Samtale-Forbindelser gennem Selskabets Centralbureau.

1. Privatbanken Børsen.	25. Rophus Philipson & Co., Vexellerere. Pilestræde Nr. 1.
2. Smith & Marstrand, Fabrikanten Vesterbrogade Nr. 2 C.	26. Heckscher & Son, Skibsmæglere St. Annæplads Nr. 9.
3. De danske Sukkerfabrikker Slotsholmsgade Nr. 18.	27. J. H. Mannheim, Grosserer Kronprindsesgade Nr. 20.
4. Aug. J. Wolff & Co.s Annoncebureau Skindergade Nr. 2.	28. Adolf Trier & Goldschmidt, Grosserer Amagerfort Nr. 8.
5. Telefon-Selskabets Contoir Børsen.	29. Telefon-Selskabets Hovedcontoir Ny Adelgade Nr. 1.
6. Edv. Hvidt & Son, de private Assurandører Holmens Canal Nr. 16.	30. Adolf Trier & Goldschmidt, Grosserer Kvæsthusgade Nr. 2.
7. Fr. Duus, adm Directeur for Kastrup Glasværk Vestergade Nr. 26.	31. De danske Sukkerfabrikker Helsingørsgade Nr. 20.
8. Carl Rerup, Grosserer Nyhavn Nr. 14.	32. Halberstadt & Mannheim, Grosserer Amaliegade Nr. 3.
9. Rubin & Bing, Vexellerere Amagerfort Nr. 8.	33. Det Kjøbenhavnske Byggeselskab Ny Adelgade Nr. 3.
10. J. M. Levin & Co., Vexellerere Østergade Nr. 9.	34. Wihl. Thielens, Grosserer Ny Toldbodgade Nr. 4.
11. De danske Sukkerfabrikker Kvæsthusgade Nr. 4.	35. J. H. Ruben, Grosserer, Fabrikant Kronprindsesgade Nr. 8.
12. H. B. Cohn, Grosserer Havnegade Nr. 47 A.	36. Theger From, Grosserer Rosenborggade Nr. 1.
13. Mohr & Hjer, Grosserer Amaliegade Nr. 12.	37. D. B. Adler & Co., Grosserer Ved Stranden Nr. 14.
14. Petersen, Møller & Hoppe, Skibsmæglere St. Annæplads Nr. 8.	38. H. J. Schmidt & Co., Langebroes Dampmølle Vestervoldgade 133.
15. De danske Sukkerfabrikker Longangsstræde Nr. 27.	39. Brødr. Trier, Vexellerere Østergade Nr. 22.
16. Bjerre & Romer, Skibsmæglere Lille Strandstr. Nr. 24.	40. Hansen & Hartens, Grosserer Broggerstræde Nr. 9.
17. Stokkebye & Hvaløe, Grosserer Amaliegade Nr. 6.	41. Landmandsbanken Holmens Canal Nr. 12.
18. Chr. T. Lund & Co., Grosserer Knabrostræde Nr. 30.	42. Den Kjøbenhavnske Sø-Assurance-Forening Holmens Canal Nr. 14.
19. Theodor Green & Co., Vexellerere Kongens Nytorv Nr. 3.	43. J. S. Salomonsen & Co., Vexellerere Amagerfort Nr. 7.
20. Alfred Christensen, Grosserer Tordenskjoldsg. Nr. 16.	44. Altrens Bureau Kjøbmagergade Nr. 26.
21. Oscar Prior, Grosserer, Dampmølle Niels Juelsgade Nr. 3.	45. C. Jacobsen, jun., Bygger Broggerstræde Nr. 5.
22. Güsefeld & Rée, Grosserer, Fabrikere Herluf Trollesg. Nr. 5.	46. Fr. Wolff, International Bureau Raadhusstræde Nr. 5.
23. Prior & Thorsen, Grosserer Bredgade Nr. 33.	47. E. P. Stokkebye, Grosserer Nytorv Nr. 7.
24. Carl Blad, Vexelmægler Holmens Canal Nr. 7.	

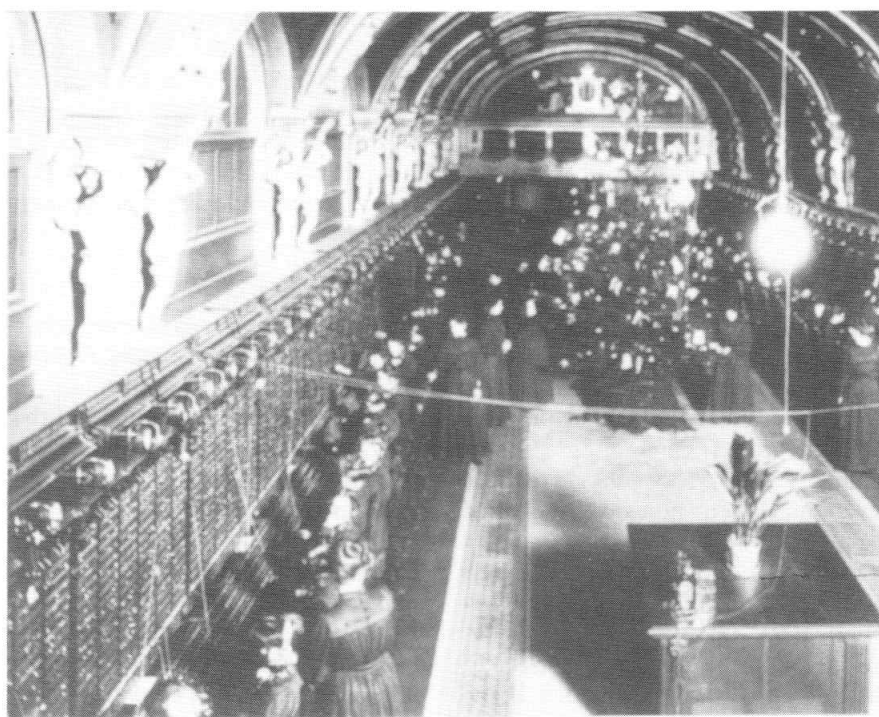
Desuden ville følgende Forbindelser blive oprettede efterhaanden og saa hurtigt Omstændighederne tillade det.

Marineminiisteriet Slotsholmsgade Nr. 10 og Orlogsværftets Contoirbygning.	Kastrup Glasværk Kastrup.
Güsefeld & Rée, Grosserer, Fabrikere Kastrup.	F. W. Kjørboe & Co., Grosserer Fredericiagade Nr. 18.
A. N. Hansen & Co., Grosserer Overgaden oven Vandet Nr. 62.	De forenede Dampmøller Lille Torvegade Nr. 2.
Y. C. Jessen, Pakhusforretningen paa Larsens Plads Ny Toldbodgade.	I. Jacobsen, Bødkerforretning Vilders Plads.
N. Josephsen, Proprietair, Commissionair Mariendal, Falkoner-Alleen Nr. 37 — Kvæstfortvet.	Holm & Wonsild, Skibsmæglere Amaliegade Nr. 35.
Smith & Marstrand, Fabrikanten Vesterlællevej Nr. 6.	C. K. Hansen, Grosserer Toldbodveien Nr. 5 og Havnegade Nr. 35.
Chr. Hansen, Apotheker, Fabrikant Vesterlællevej Nr. 56.	Chr. Brøberg & Son, Grosserer Strandgade Nr. 23.
Julius Schmiedes, Grosserer, Tommerhandler Nansengade Nr. 8.	W. R. Rubow, Grosserer Blas Pakhus, Ny Toldbodgade.
Chr. Lind, Kjøbenhavns Pakkeseffabrik H. C. Østedsvej 52.	Aktieselskabet Christiansholms Fabrikker Christiansholms Ø.
D. Lowener & Co., Fabrikanten Overgaden oven Vandet Nr. 6, Holmens Canal v. Theatret og Kuhlerts Vej, Amagerbro.	Harry Levin, Grosserer Frederiksgade Nr. 5.
Ed. Blad, Fabrikanten Alliance Alliansevej.	R. W. Brøndums Efterfølger, Grosserer, Fabrikant St. Kongensgade 110.
J. H. Ruben, Grosserer, Fabrikant Rolighedsvej Nr. 8.	Smith & Mygind, Fabrikanten Norrebrogade Nr. 70.
Alfred Christensen, Grosserer Amaliegade Nr. 43.	M. J. Ballins Sønner, Fabrikanten Norrevoldgade Nr. 82.
B. G. Wolff, Kgl. Hof-Blomsterhandler Østergade Nr. 57 — Vesterbrogade 278.	II. C. Ørstedesvej 48.
	Industriudstillingsbygningen
	Det forenede Dampskibsselskab Kvæsthusgade Nr. 9, Havnegade Nr. 41, Havnegade Nr. 43 og Kvæstfortvet.
	P. D. Hvaløe, Grosserer Østerbroes Døsserling Nr. 99.
	Telefon Selskabets Contoir, Toldboden Nordre Toldbodbyg.

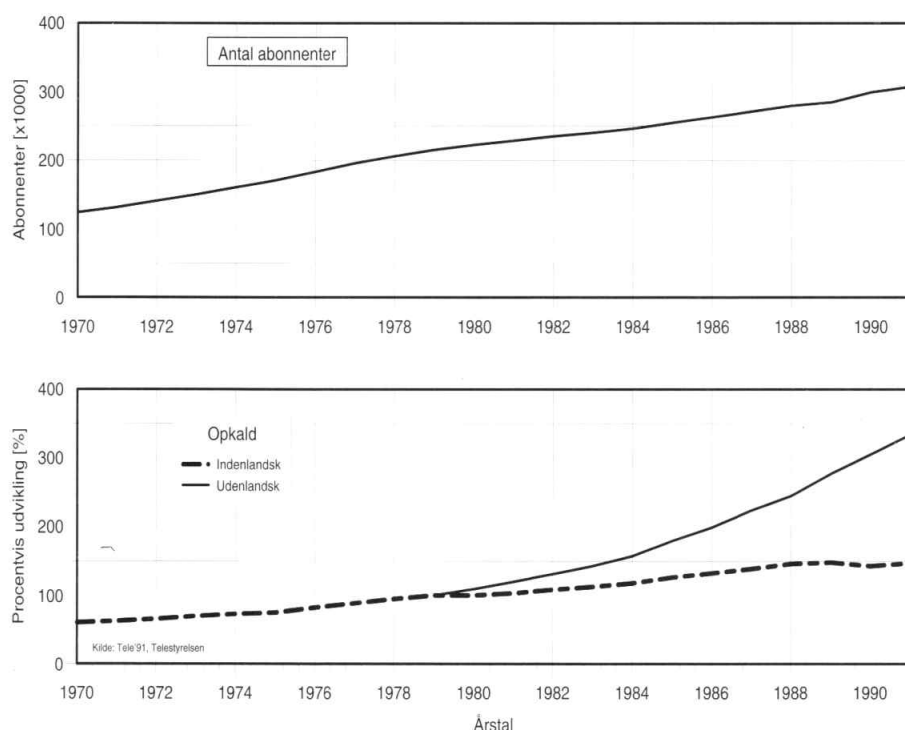
Fra omtrent midt i April og indtil videre vil Tjenesten i Selskabets Centralbureau være fra Kl. 8^{1/2} Morgen til Kl. 8 Aften. Udenfor denne Tjenestetid og om Son- og Helligdage kunne Abonnenterne efter Ønske staae indstillede til Samtale, to og to sammen. Telefon-Selskabets Forbindelser med dets Contoirer paa Børsen og paa Toldboden ere til fri Afbenyttelse i Forretningsstunden for Selskabets Abonnenter o. fl. mod Forevisning af de omdelte Adgangskort. Abonnement paa Telefon-Forbindelser modtages fremdeles paa Selskabets Hovedcontoir, Ny Adelgade Nr. 1 (efter Flyttedagen Nr. 5), samt ved Selskabets Agent, Hr. Grosserer Wm. Bahnsen, Graabrødretorv Nr. 11.

Berlingske Trykkeri ved Kjøbenhavn.

Figur 5.3. Københavns Telefonaktieselskabs telefonbog fra 1. april 1881.



Figur 5.4 Juleaften i Københavns hovedcentral i Jorcks passage, 1910. Fotografiet giver en fornemmelse af, hvor hurtig ekspansionen på telefonområdet har været. Centralen var manuelt betjent og kundebetjeningen foregik stort set udelukkende ved kvindelig arbejdskraft. På billedet ses de store omstillingstavler, hvor forbindelserne mellem abonnenterne etableres. Det sker med ledninger, således at hver abonnent har et stik på tavlen. For at undgå meget lange ledninger på centralen skete omstillingen af flere omgange, i flere niveauer. Kun hvis abonnenter forbundet til den samme tavle skulle forbindes, kunne det ske på det laveste niveau.



Figur 5.5 viser også en afbildning af udviklingen i teletrafikken fra 1970 til 1991. Udenlandstrafikken er kun registreret fra 1979, så kurven for udenlandstrafikken går kun fra 1979 til 1991. Tallene er normeret således, at teletrafikken i 1979 svarer til 100 %.

telefontrafik (herunder også den del af datatrafikken, der afvikles over telefonnettet). Udenlandstrafikkens andel har iverdigt været stærkt stigende gennem det sidste årti.

Man ser af kurverne, at udenlandstrafikken er steget næsten eksplosivt sammenlignet med den indenlandske trafik. Årsagen kan være stigende international orientering og ændrede samfundsstrukturer i almindelighed; men naturligvis betyder prisfastsættelsen også meget for, hvor ofte og hvor længe man telefonerer. Det er værd at huske, at prisfastsættelsen helt og holdent bestemmes politisk. Så længe der ikke er fri konkurrence på telekommunikationsmarkedet, kan de, der udbyder en teleservice, fastlægge prisen udfra overordnede betragtninger, fremfor hvad den pågældende service koster at producere.

Øvelse 2. Telefontrafik

Når man planlægger nye telekommunikationsforbindelser mellem større befolkningscentre, benytter man en overslagsmetode til at forudsige den nødvendige kapacitet. Som estimat for behovet benyttes udtrykket

$$K \cdot \frac{A \cdot B}{D}$$

hvor A og B er befolkningstallene i de to centre og D er afstanden imellem dem. K er en proportionalitetskonstant, der afhænger af hvilken tele-tjeneste, der er tale om. Undersøg om telefontrafikken imellem de lande, der er nævnt i figur 5.6, følger denne formel, og bestem i givet fald konstanten K for telefontrafik.

Med den omfattende teletrafik imellem landene kunne man tro, at der fandtes et egentligt verdensomspændende netværk – det gør der imidlertid ikke. De enkelte lande indgår gensidige aftaler med hinanden om at etablere teleforbindelser, og etablerer i fællesskab de kabelforbindelser der er nødvendige. De meget kostbare forbindelser, så som satellitforbindelser og transatlantiske- og transstillehavsforbindelser, er ofte ejet af flere landes televæsenere i fællesskab. Det fælles ejerskab skyldes dels et ønske om at dele milliardinvesteringerne og dels et ønske om at få medkontrol over driften af kommunikationsanlæggene, der kan have livsvigtig betydning for de lande, der betjener sig af dem.

5.2 Infrastruktur og forretning

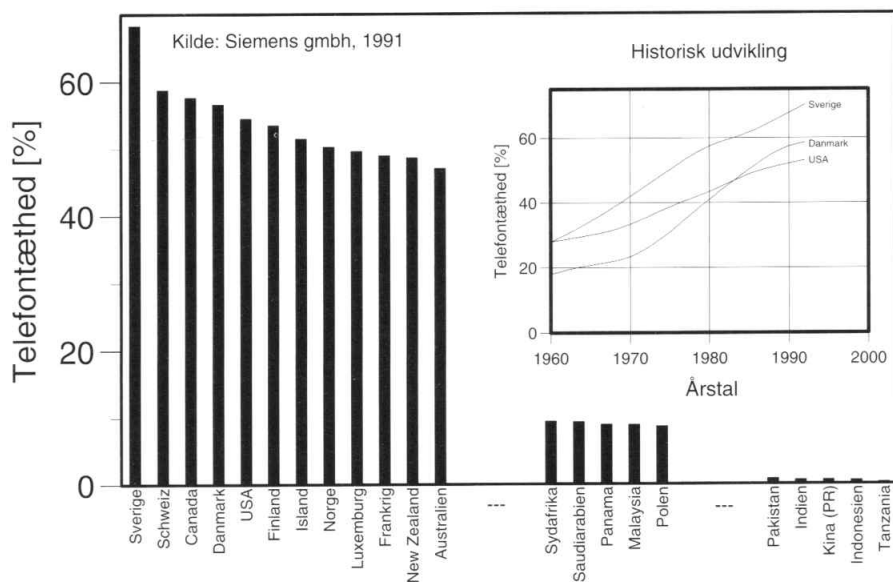
Både offentlige myndigheder og private investorer har interesser i telenettet. At offentlige myndigheder er interesserede er en oplagt sag, idet telenettet er en vigtig del af verdens infrastruktur. De private firmaer, på den anden side, ser en oplagt indtjeningsmulighed i at udbyde teletransmission som service. I USA og England har man på nationalt plan flere alternative telenetoperatører. Set med danske øjne kan det resultere i overraskelser. Hvis man fra en amerikansk telefonboks foretager en langdistance samtale, bliver man inden samtalen spurgt hvilken netoperatør, man ønsker at bruge. Der er typisk nogle stykker at vælge imellem. Når samtalen afsluttes, takker den pågældende netoperatør hjerteligt for at man valgte netop ham.

EF-kommissionen har bestemt, at teletrafikken i Europa skal privatiseres og liberaliseres. Alle de europæiske lande har derfor i begyndelsen af 90'erne indrettet deres lovgivning på dette. Det kræver to ændringer af de bestående forordninger i de fleste lande.

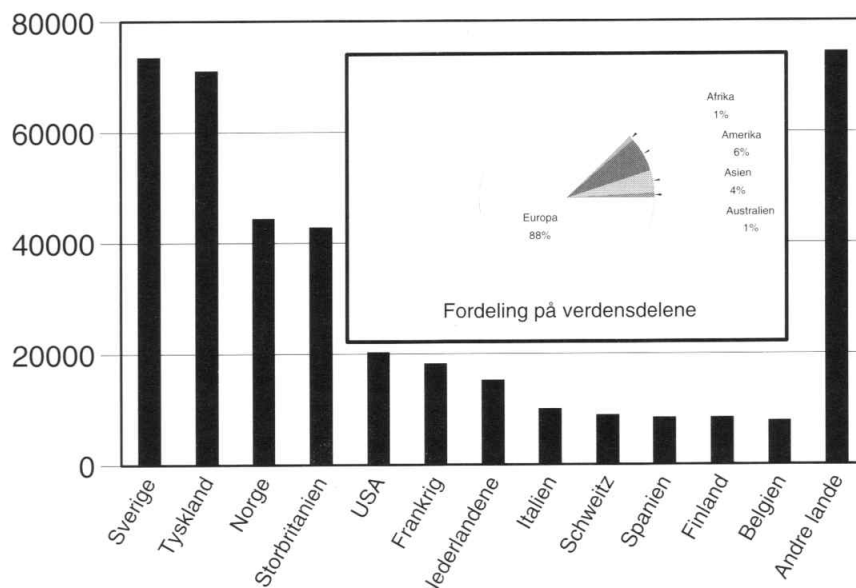
1) Det er påbudt, at der skabes en knivskarp adskillelse mellem den lovgivende /regulerende myndighed på området og de udførende instanser. Dette har for eksempel for Danmarks vedkommende medført at telesiden af Post- og Telegrafvæsenet er opdelt i "Telestyrelsen", der er en styrelse under Kommunikations-ministeriet, og "TELECOM A/S", der er et aktieselskab, der udfører de praktiske opgaver, der tidligere blev ført ud i livet af Post- og Telegrafvæsenet.

2) Teletrafikken bliver efterhånden liberaliseret, så de gamle telefonselskaber vil få konkurrence på alle de forretningsområder, hvor de tidligere havde monopol.

Et vigtigt teleområde har imidlertid altid været liberalt. Det er transmissionen mellem landene ved hjælp af satellitter eller søkabler. Investeringerne er for nogle transmissionsselskabers vedkommende i mange milliarder kroners klassen. Den største ejer af langdistance telenetværk er det Amerikanske AT&T (American Telephone and Telegraph), der i bogstaveligste forstand omspænder verden med sit netværk og har gjort det til en særdeles indtægtsgivende forretning at udleje transmissionskapacitet til andre telefonselskaber.



Figur 5.6 viser en opgørelse over antallet af telefoner pr. 100 indbyggere i en række lande. Telefontætheden er formentlig først og fremmest bestemt af indtægtsmæssige forhold; men det rent faktiske behov for at have adgang til en telefon afhænger også af samfundsstrukturen og traditionerne.



Figur 5.7 viser en statistik over antal samtaleminutter (i 1000) fra Danmark til udlandet. Det er tydeligt, at den største del af trafikken går til nærliggende lande.

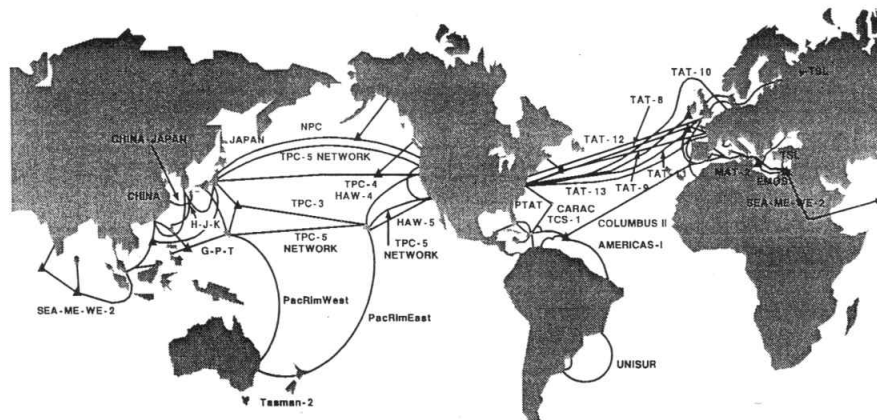


Fig 5.8. Søkabler i verden

5.3 Det verdensomspændende bredbåndsnet

På trods af den noget "tilfældige" opbygning af verdens overordnede telenet, virker det set fra brugerens side som ét stort sammenhængende system. Det kan vi blandt andet takke digitaliseringen for. Over hele verden digitaliseres information efter de samme retningslinier. Dog er der lokale afvigelser ved transmissionen. Digitaliseringen medfører, som vi har talt om tidligere, at alle typer af information, så som tale, musik, TV, data optræder på præcis samme form – som bit, der blot skal transporteres fra den ene terminal til den anden. Lidt forenklet kan man sige, at televæsnernes opgave efterhånden er blevet forenklet til at transportere bit. Hvad bittene betyder, om de repræsenterer tale, billeder eller en bankkonto, vedrører kun terminalerne og de kunder, der bruger dem. Altså giver digitaliseringen en betydelig forenkling af telenettet, idet alle signaler er af samme grundtype. Der er imidlertid en anden fordel ved digitaliseringen, som er mindre iøjnefaldende, nemlig at man kan gøre sig uafhængig af den underliggende transmissions-teknologi. Hvis blot den benyttede transmissionsteknologi kan transmittre tilstrækkelig mange bits afsted pr. sekund, kan alle typer af signal overføres på alle typer af transmissionsmedium. Som eksempel benytter man i Danmark i udstrakt grad 140 Mb/s transmissionssystemer, der kan transmittre ca. 2000 telefonsamtaler eller 2 TV-kanaler i hybridnetskvalitet. I telenettet transmitteres disse signaler som lys i optiske fibre, som elektriske signaler i kabler eller som radiobølger via mikrobølgekæde. 2 Mb/s systemer, der er ved at blive forholdsvis almindelige i store firmaers abonnenttilslutning, kan uden videre sendes over gammeldags telefonkabler med to snoede ledninger (såkaldt parsnoing), coaxial kabler (skærmerkabler) eller lysledere. Altsammen uden at der skal ændres noget på signalernes grundstruktur – det er præcis de samme bit, der sendes på de forskellige forbindelser, bortset fra at de enten sendes som lys, radiobølger eller elektriske strømme i et kabel.

5.4 Kredsløbs- og pakkekobling

Verdens telenet er ikke et rigtigt netværk. Det består snarere af et stort antal adskilte netværk, der samarbejder på forskellig vis. Overordnet er der to forskellige måder, man kan or-

ganisere informationsstrømmen i et netværk. Man kan anvende kredsløbskobling eller pakkekobling.

Kredsløbskobling

Kredsløbskoblingsteknikken er den klassiske metode. Udtrykket kommer fra klassisk telefonteknik, hvor man simpelt hen etablerede en elektrisk strømkreds mellem den kaldende og den modtagende abonnent. Denne strømkreds kunne have meget stor udstrækning for eksempel ved telefoning mellem landsdelene. Ikke desto mindre havde man (i princippet) en simpel elektrisk forbindelse fra den ene abonnent, gennem centraler, søkabler, luftledninger og så videre til den anden abonnent. Med nutidens digitalteknik er kredsløbskoblingen mindre iøjnefaldende, idet signalerne digitaliseres, multiplekseres og så videre. Princippet er imidlertid stadig, at der er en fast forbindelse (nu med varierende teknologier) mellem de to samtalepartnere, og at signalet flyder kontinuert, med en konstant hastighed.

Kredsløbskoblingen har den fordel, at den kun kræver "intelligens" i telesystemet når forbindelsen mellem partnerne etableres. Når først dette er sket, passer kommunikationen sig selv, indtil parterne er færdige med at tale sammen. På den måde er kredsløbskoblingen en primitiv teknologi, der ikke udnytter telenettets muligheder, og ikke giver kunderne de faciliteter de kan ønske sig.

Pakkekobling

Pakkekobling er den moderne måde at transmittre informationer i telenettet på. I et pakkekoblet net transmitteres digitale informationer i pakker af en given størrelse. Disse pakker består af en 'nyttelast' og en adresse. Adressen gør at pakkerne kan dirigeres hele vejen igennem telenettet fra afsenderen til modtageren. Man kan måske sammenligne disse pakker med godstog der kører rundt på telenettets skinnelægeme og bliver dirigeret de rigtige steder hen ved hjælp af sporskifter, vigespor og signaler. Systemet kræver lidt ekstra kapacitet af telesystemet, da adresserne er nogle ekstra bit, der skal transmittres med rundt i systemerne. Fordelen ved pakkekoblingen er, at de enkelte informationskilder, forbundet til telenettet, kun optager så meget kapacitet, som de har brug for i det aktuelle øjeblik. Mange teletjenester, som for eksempel datatransmission,

er helt ufølsom overfor variationer i transmissionshastigheden, blot alle bittene kommer frem og kommer i den rigtige rækkefølge. Andre tjenester som telefoni og videotransmission er helt og holdent afhængige af en konstant bitstrøm, så der ikke opstår pauser i signalerne. Man kan derfor opdele tjenesterne i forskellige 'service klasser' alt efter deres sårbarhed overfor ujævn transmissionshastighed. Man kan derved reservere den dyre 1. classes service til de tjenester der virkelig kræver det, medens andre tjenester kan nøjes med en billigere service. På den måde kan man sige, at man har delt teletrafikken op i en slags A og B post. Naturligvis til forskellige takster.

Pakkekoblingen, der allerede benyttes i nogle datanet, forventes at vinde indpas overalt i forbindelse med udbredelsen af B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Network) i begyndelsen af det 21. århundrede. Det signalformat, der vil blive brugt, hedder ATM (Asynchronous Transfer Mode). Det er blevet standardiseret og internationalt anerkendt i begyndelsen af 1990'erne. ATM har en betydelig indbygget "intelligens", der er nødvendig for afvikling af teletrafikken. Denne intelligens, eller evne til signalbehandling, som det rettere er, kan bruges til etablering af nye teletjenester, som ikke, eller i hvert fald kun meget vanskeligt, kan tilbydes til telekunderne i dag. Det kan være videotelefoni, forskellige møde- og sekretærtjenester, "video on demand" hvor kunderne kan få en videofilm transmitteret på et ønsket tidspunkt, radio og TV fra sidste uge, teleshopping for blot at nævne nogle af de mest oplagte tjenester. Eller man kan forestille sig en slags "en til mange" samtaler, hvor en person for eksempel kan ringe op til alle dyrlæger i Ringkøbing Amt for at give en besked. Mulighederne er næsten uendelige.

Bells telefonselskab

Hvordan gik det så med opfinderen Bells telefonselskab? I kapitel 2 så vi på opfindelsen af telefonen, og vi husker de to opfindere Elisha Gray, der arbejdede for telegraf-selskabet Western Union, og Bell, der løb af med sejren om telefonpatentet, der udstedtes til Graham Bell 17. marts 1876. Allerede nogle måneder senere havde Bell og medarbejderne en fungerende telefon klar til produktion. Nu dannede Bell sammen med finansmanden og sagførerens Gardiner Hubbard telefonselskabet American Bell Telephone Company. Forinden havde de dog tilbudt patentrettighederne for \$100000 til "fjenden" Western Union. Dette blev afslået af ledelsen for Western Union, hvilket de siden fortrød bitterligt, for allerede 1877 dannede de et konkurrerende telefonselskab kaldet American Speaking Telephone Company. Det viste sig nemlig hurtigt, at telefonen blev en enorm succes, og det var mere end blot det legetøj, som Western Union og mange andre anså telefonen for i starten. Efter langvarige retssager om rettighederne til telefonpatentet, indgik man et forlig, hvor American Speaking mod erstatning for investeringerne lovede at trække sig helt ud af telefonmarkedet. Dermed var vejen åben for Bells firma, og samtidig havde man elimineret et firma, som med en enorm kapital i ryggen kunne blive en hård konkurrent.

Telefon boomet 1876-78 viste sig nemlig at være mere end et modefænomen. Bell siger selv i et memorandum om telefonens fremtidsudsigter at dens afgørende fortrin frem for telegrafer er, "at man ikke skal være specielt trænet for at kunne bruge telefonen". En pointe, som Bells firma gik meget ind for - også senere i udviklingen mod den moderne telefon, brugerne kender i dag. Undervejs var der nogle tekniske hindringer, der skulle løses, før det kunne lade sig gøre at telefonere over store afstande. Kulkorns-mikrofonen blev opfundet af Thomas A. Edison i 1877, og med radorørets opfindelse af Lee de Forest 1905, der indførtes kommercielt 1915, var grundlaget lagt.

Bell Telephone udviklede sig hurtigt til en meget god forretning med en

stortende omsætning. Efter opkøb af en række andre firmaer skiftede Bell Telephone navn i 1885 til American Telephone and Telegraph Company (AT&T). Det firma vi kender i dag som en af giganterne på teleområdet.

Men inden var man stødt på et meget alvorligt problem. På grund af den store succes steg problemerne. Bells vision om en telefon i hvert hjem krævede, at man lavede centrale omstillinger, som skulle klare omstillingen mellem abonnenterne. Verdens første omstillingsbord blev taget i anvendelse i New Haven, Connecticut i 1878. Allerede 1881 var man klar over, at telefoncentralerne var et problem. Der skete nemlig det, at omkostningerne eksploderede i takt med voksende tilslutning af abonnenter. Omkostninger voksede nemlig i takt med kompleksiteten og ikke i takt med antallet af kunder. Vi har set side 40, hvordan antallet af ledninger vokser med antallet af brugere. Groft sagt vokser kompleksiteten kvadratisk med antallet af brugere. Det betød med andre ord, at når antallet af abonnenter voksede, så steg prisen pr. samtale også. De store centraler i de store byer måtte kræve 3 til 4 gange så høje takster for at dække omkostningerne som ved de små centraler på landet. Problemet med de voksende centraler var først og fremmest, at det krævede mange personer at betjene det voksende antal brugere, og flaskehalsen var koblingen af de mange forbindelser. Man forsøgte i første omgang med mundtlig kommunikation mellem personalet, med mange fejl til følge. Dernæst med skriftlige meddelelser med tilsvarende langsom og afvikling. I byerne kunne det tage op til 5 minutter at etablere en forbindelse. Løsningen blev at indføre et hierarki af centraler, med tilhørende takster for samtalerne. Jo længere man skulle ringe, jo højere nåede man i hierarkiet, og jo dyrere blev taksten. Dermed var det for alvor driften af nettet, som gav indtjeningen. Telefonapparaterne hos kunderne blev af mindre betydning for omkostningerne.

Netop kompleksiteten, som i første omgang var et problem for Bells

firma, var siden patentrettighedernes udløb en afgørende faktor for monopollet på markedet. De nye små firmaer kunne i starten konkurrere på prisen, men når de voksede sig store, kompleksiteten steg og der blev behov for samtaler over længere afstande, eksploderede omkostningerne. Så var tiden moden for gigantene at overtage firmaet.

I løbet af få årtier havde Bell monopol på telekommunikationen, og i takt med det voksende brug af telekommunikation steg indtjeningen. Længe har AT&T været det største multinationale firma i verden. Det ekspanderede på mange andre områder, og sidder i dag på en del andre sektorer. Bl.a. er computerfirmaerne Olivetti og NCR ejet af AT&T.

I 1984 blev AT&T af det amerikanske monopoltilsyn tvunget til at opgive monopollet på telekommunikationen. Pr. dekret blev AT&T tvunget til at adskille vedligeholdelse af nettet og salg af tjenester over nettet. Ved den lejlighed blev AT&T delt op i 8 mindre firmaer, og samtidig fik andre firmaer ret til at sælge tjenester over samme fysiske net. Hovedafdelingen bærer stadig navnet AT&T, og de 7 mindre regionale virksomheder går under betegnelsen Baby-Bell selskaberne. Efter opdelingen gik indtjeningen ned for en kortere periode. Men siden er det gået stærkt fremad igen. I øjeblikket er hovedfirmaet AT&T nr. 2 på top 10 listen over de største multinationale selskaber i verden med en årlig omsætning på 60 mia \$, kun overgået af det tilsvarende japanske med en omsætning på 160 mia \$.

Men netop opdelingen i virksomheder og indførelse af konkurrencen har gearret firmaet til at søge markeder udenfor USA, og i øjeblikket er Europa sammen med resten af verden kommet under pres fra gigantterne.

Som et kuriosum kan det nævnes, at liberaliseringen på det danske mobiltelefonområde har bevirket, at også private selskaber har lov til at sælge telefonsamtaler. Endnu har de dog ikke lov til at grave kabler i jorden. Selskabet Sonofon er kommet ind på det danske marked. Sonofon ejes af et af de regionale Bell-selskaber i USA.

I kø hos bageren

Hvis hver abonnent har sin private ledning til hver eneste af de andre abonnenter, kan han altid komme i forbindelse med den han ønsker at tale med (medmindre vedkommende er "optaget"). I en moderne central deler abonnenterne en stor del af komponenterne. Det er intelligensen, der analyserer telefonnummeret og kobler de ønskede ledninger sammen, selve sammenkoblingsenhederne, kablerne osv. Heldigvis taler ikke alle abonnenter i telefon samtidig, så der er i praksis en statistisk udjævning af opkaldene. Det betyder, at det i almindelighed ikke er noget stort problem at deles om centralens ædlere dele. Det forekommer dog lejlighedsvis, at der ikke er ledigt udstyr hele vejen fra den kaldende abonnent til den modtagende. I det tilfælde bliver samtalen sat til at vente indtil der er ledigt. Hvis ventetiden bliver for lang (mere end nogle få sekunder) får den kaldende abonnent optagetone, selvom den modtagende abonnent ikke er optaget. Telenettet er dimensioneret til at klare almindelige spidsbelastningssituationer; men i ekstreme tilfælde, som hvis Danmark har vundet EM i fodbold, eller hvis TV afholder meningsmålinger over telefonnettet, kan man blive generet af dette.

I gamle dage var man helt og holdent overladt til telefonisten, når man forsøgte at lave et telefonopkald. Et stykke tid efter at man havde løftet af, ville telefonisten svare: "De ønsker?" Selvfølgelig var ventetiden afhængig af, hvor mange telefonister der var i tjeneste og hvor travlt, der var. Brugerne ventede i en kø for at blive betjent.

Vi venter stadig i kø i dag, men det er mindre åbenlyst. Når vi venter på klartone i telefonen er vi også i en køsituation. Der er naturligvis et begrænset antal enheder på centralen, der kan udsende klartone og analysere numre. Vi må pænt vente til det bliver vores tur. Det samme gentager sig flere gange højere oppe i centralhierarkiet, hvor man kan komme til at vente på, at en ledig kabelforbindelse bliver fundet osv. Ventetiden er i almindelighed så kort, at man ikke tænker nærmere over det, og systemet er indrettet, så

hvis ikke der bliver ledigt indenfor relativ kort tid (sekunder), får den kaldende abonnent optagetone.

Den matematiske teori, der ligger til grund for ventetidsoptimering af telesystemer, er udviklet af den danske matematiker A.K. Erlang (1878 - 1929), der var ansat som videnskabelig medarbejder ved Københavns Telefonaktieselskab gennem 20 år. Ventetidsteorien kan bruges til at analysere alle typer af ventetidssystemer, hvad enten det drejer sig om telefontrafik, ankomende fly til en lufthavn eller kunder på et posthus eller i en bagerbutik.

En jordnær analogi til afviklingen af telefonopkald er faktisk forretningsgangen hos en bager. Når man ankommer, undersøger man, om der er en ledig ekspedient. Hvis ikke der er det, tager man et nummer og får derved en plads i køen. Man kan beregne den gennemsnitlige ventetid, hvis man ved hvor mange ekspedienter der er, hvor lang tid en gennemsnitsekspedition tager, og hvor mange kunder der kommer i timen. Ud fra en forventning om, hvor lang tid kunderne vil acceptere at vente, kan bagermesteren beslutte, hvor mange ekspedienter der skal være i arbejde på forskellige tidspunkter af dagen. Økonomiske overvejelser spiller naturligvis en afgørende rolle for dette valg.

Den matematiske teori, der ligger til grund for en forudsigelse af den gennemsnitlige ventetid, er alt for vidtrækkende til at blive præsenteret her; men der findes tabelværker over den gennemsnitlige ventetid. Figur 5.9 viser et udsnit af en sådan "Erlang C" tabel tilpasset bagereksemplet. På den vandrette akse har man produktet af antal kunder pr. time og den gennemsnitlige ekspeditionstid i minutter. På den lodrette akse aflæses den gennemsnitlige ventetid afhængig af antallet af ekspedienter. Bemærk at aksen er logaritmisk, således at tallene stiger meget hurtigt ud ad aksen.

Hvis vi antager, at der er 36 kunder pr. time og at hver ekspedition tager 5 minutter i gennemsnit, har man $36 \cdot 5 = 180$ kundeminutter pr. time. Man kan se at med 4 ekspedienter, vil man have en gennemsnitlig

ventetid på 10 minutter. Det er interessant at iagttage, at hvis kunderne ville være villige til at vente 40 minutter ville 3 ekspedienter kunne klare jobbet. Hvis man tilføjer blot én ekspedient mere, kan man altså reducere ventetiden med en faktor 4! Dette er en generel egenskab ved køsystemer. Op til et vist punkt forøges effektiviteten eksponentielt med antallet af ekspedienter. Hvis kundeantallet falder har det langt mindre effekt på ventetiden. Hvis antallet af kundeminutter pr. time for eksempel halveres til 90 vil ventetiden blot blive halveret i tilfældet med 4 ekspedienter.

Forholdene bliver langt mere komplicerede hvis nogle af kunderne giver op (forlader deres plads i køen), eller hvis der kan åbnes flere ekspeditionspladser i tilfælde af at køen vokser. Det sidste er ofte tilfældet i telenettet, hvor systemet ofte kan vælge mellem flere alternative veje fra et punkt til et andet. Til transatlantiske samtaler benytter man helst fiber-søkabler; men hvis ventetiden til en ledig forbindelse bliver for lang, åbner man nogle ekstra satellitforbindelser. Dette er ikke så attraktivt at gøre, da lyd kvaliteten dels er dårligere, dels fordi satellitforbindelsen er noget man lejer i dyre domme af et andet firma. Optimering af telesystemer er en vanskelig videnskabelig disciplin hvor tekniske, økonomiske og pålidelighedsmæssige aspekter indgår.

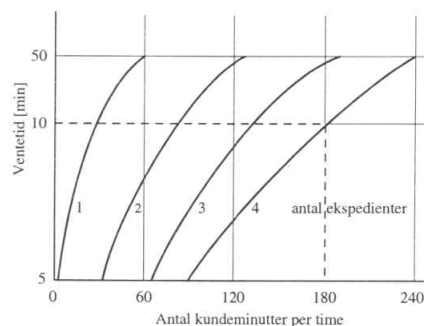


Fig 5.9 Ventetid hos bageren.

Opgaver

1. Priser på samtaler

Find en telefonbog og sammenlign prisen på et opkald fra København til Ribe med et fra København til Flensborg. Hvilket opkald er dyrest? Hvorfor?

2. Udviklingen i antal abonnenter

Undersøg om antallet af telefonabonnenter har fulgt den almindelige samfundsudvikling gennem perioden 1971 til 1991? Hvad med det samlede antal af telefonapparater? Har udviklingen i antallet af samtaler fulgt udviklingen i abonnentantallet, eller må det antages at være andre faktorer i samfundet der styrer antallet af samtaler?

3. Kvadratisk kompleksitet

Vis, at antallet af forbindelser, der skal til at forbinde N telefoner med hinanden, er givet ved

$$I = \frac{1}{2} \cdot N \cdot (N - 1)$$

Hjælp: Hvis man er den P 'te abonnent der bliver tilsluttet, hvor mange nye ledninger skal der da oprettes. Sumér over alle P fra 2 til N .

4. Bit hængende i luften

En mikrobølge link-forbindelse er en radiotransmission af telefonsamtalerne. Man benytter en radiofrekvens på 3.2 GHz. Beregn signalets bølglængde. Transmissionsafstanden er 30 km. Hvor mange bit "hænger i luften" hvis bitraten er 140 Mb/s. Omregn dette tal til antal almindelige bogstaver når der kræves 8 bit pr. bogstav i almindelig datatransmission.

5. Interesser i telefonvæsenet

Skriv en halv A4 side om de forskellige interesser, man kan have i telefonsvæsenet set fra

- 1) brugerne
- 2) telesekskaberne
- 3) det offentlige

6. Interesser i monopol

Hvem kan have interesser i at telefonselskaberne har monopol dels på udlægning af kabler og etableringen af netværk med centraler og dels på salg af tjenester vedrørende telefonvæsenet. Hvem kan tilsvarende have interesse i at liberalisere telefonvæsenet, så alle firmaer kan komme ind på markedet og sælge telefonsamtaler og andre tjenester.

Hvilken indflydelse kan monopol kontra liberalisering have på Anlægsudgifter til de elektriske net? Prisen for en telefonsamtale? Prisen for oprettelsen af ny telefon i byen og på landet? Kvaliteten af lyd gengivelsen?

7. Opfindelser og militæret

Ved opfindelsen og udviklingen af edb-maskiner spillede militæret en meget stor rolle. Giv en forklaring på, hvorfor udviklingen af telefonen ikke i særlig stor udstrækning er styret af militære interesser. Ja opfindelsen har, som vi så i kapitel 2, intet med militæret at gøre. Hvad er det, der adskiller en edb-maskine fra en telefon i denne sammenhæng?

8. Spindelvæv af ledninger

Giv et groft overslag på antallet af ledninger der skal til at forbinde alle abonnenter i verden med ledninger uden centraler, hvor der skal trækkes to ledninger pr. to abonnenter. Giv tilsvarende et overslag over den samlede længde af disse ledninger og find hvor meget kobber, der vil medgå til fremstillingen, hvis alle ledninger er parsnoede kabler. Gør selv passende antagelser (gerne grove).

9. Struktur på centralerne

Giv et bud på, hvordan man skal arrangere centralerne, hvis det handler om at grave så lidt som muligt. Prisen for nedgravning af kabler er i 1993 ca 3000 kr pr. meter i byerne og ca 1500 pr. meter på landet. Abonnentkablerne af kobber koster ca. 10 kr pr. meter, og lysledere ca. det samme.

10. Verden taler i telefon

Tag dit eget telefonforbrug som udgangspunkt for at give en skøn over det samlede telefonforbrug i verden.

11. Antal bit i verden

Forestil dig, at al kommunikation er digitaliseret. Hvor mange bit skal ét verdensomspændende net modtage, transportere og afgive pr. sek, når du tager udgangspunkt i dit gæt på talelysten i verden fra opgave 10.

12. GATT forhandlinger

GATT står for General Agreement on Tariffs and Trade. Det er en international organisation, der blev oprettet 1947, og som Danmark blev medlem af 1950. GATT er oprettet med det formål at ophæve told på import og sikre så stor frihandel mellem lande-

ne som muligt. GATT-forhandlingerne i 1993 strandede blandt andet på liberalisering af teletjenesterne, hvor især USA gik ind for stor liberalisering. I EF har man besluttet, at der skal ske en liberalisering på teleområdet, så firmaerne frit kan give sig til at leje telefonforbindelser af telefonselskaberne, der ejer ledningerne, og leje dem ud til kunderne. Men USA er interesseret i at komme ind og lægge egne kabler i jorden. Danmark via EF er imod. Hvilke interesser kan firmaer fra USA have i en åbning af det danske marked på teleområdet? Forhandlingerne er brudt sammen pt. december 1993, og parterne overvejer en regulær handelskrig. Hvad kan det betyde for den enkelte forbruger?

13. Investering i Telekabler

I løbet af 1995 regner man med, at der lægges et telekabel (TPC-5 for Trans Pacific 5) mellem Japan og USA. Det skal kunne transmittere 5 Gbit/sek hver vej de 5000 km gennem 2 lysledere i hver retning og ved hjælp af ca. 300 undersøiske forstærkere. Hvor mange telefonsamtaler kan kablet sende samtidigt?

Anlægsudgifterne til kablet anslås til 10 mia \$. Belægningsgraden anslås til 75 %, hvilket svarer til at 75% af kablets samlede kapacitet er udnyttet konstant. Det høje tal skyldes til dels, at befolkningsunderlaget har forskudte tidszoner, så der er altid nogen til at tale i telefon.

Regn med, at det koster 10 kr/minut for en enkelt telefonforbindelse.

Hvor lang tid går der, før den samlede samtaleindtægt svarer til startinvesteringen?

Hvor stort et driftstab vil det koste, hvis kablet er ude af drift i 24 timer?

14. Støj på ledningen

De første telefoner blev forsynet gennem en enkelt ledning. Returforbindelsen foregik via en jordforbindelse. Giv grunde til, at det kunne give anledning til støj på ledningen. For at mindske indstrålingen af støj gik man hurtigt over til at benytte 2 ledninger, der enten var snoet direkte om hinanden, eller ophængt på telefonmaster efter et system, så ledningerne blev snoet ved hver mast (uden at røre).

Hvorfor kan snoringen af ledningerne afhjælpe støjproblemerne?

Hvordan kan det være, at man undertiden i sin telefon kan høre andre samtaler meget svagt?

Stikordsregister

A/D omsætter	20, 22	Fejlsansynlighed	25	Netværk	40
A-skala	22	Fiber	28	Neutron	33
Abonenttæthed	42	Fisker	8	Numerisk åbning	31
Absorption	33, 34	Forord	1	Nye tjenester	44
Afstandsloven	38	Fotoelektrisk effekt	34		
Aftastning	20	Fotoner	34	Opkald	17
Aischylos	8	Fourier	24	Orbital	33
Amplitude	19	Frekvens	19, 30	Oxygen-brint-binding	32
Analog transmission	18	Frekvensspektre	24		
Analogt eller digitalt	17			p-del	36
AT&T	45	Gatt	47	Pakkekobling	44
ATM	44	Gitterformel	39	Piezoelektrisk effekt	21
Atomer	33	Gradueret-indeks	29	Planck	34
		Gray	13	Plancks konstant	34, 39
B-ISDN	4	Grays telefonprincip	15	Polarisation	37
Babelstårnet	2	Grundtilstand	33	Proton	33
Bavne	8	Grænsefrekvens	31	Pumpning	35
Beirut	2	Grænselag	36		
Bell	11, 45	Guitarmusik	27	Rayleighspredning	32
Bell kontra Gray	14			Reflektion	31
Bells forsøgsopstilling	12	Halvlederlaser	36	Regeneratorer	29, 32
Bintspektret	37	HD-TV	4	Rutherford	33
Binær kodning	7	He-Ne laser	35		
Binære tal	20	Henfald	35	Sendefrekvens	29
Bit	6	Hvad er kommunikation	2	Shannon	6
Bitrate	7	Hybridnet	44	Signal	6
Bredbåndnet	4, 44	Højttaler	21	Signal-støjforhold	25
Brintatom	33, 38			Signaleffekt	25
Brydning	30, 38	Infaldsvinkel	30	Simpelt telefonsystem	27
Brydningsindeks	30	Informationshastighed	6	Single-mode	29
Budstikke	8	Informationsindhold	6	Snorbølger	27
Bølgefront	30	Informationskapacitet	25	Spejling	31
Bølgelængde	19, 30	Infrastruktur og forretning	43	Spontan emission	34
Bølgepakke	34			Step-indeks	29
Bølger i bevægelse	26	Journalistisk	2	Stimuleret emission	34
Båndbredde	24			Støjeffekt	25
		Kappe	28	Stående bølger	26
CD afspiller	22, 23, 25	Kerne	28	Svingninger	19
Central hierarki	40	Kommunikationsteori	24	Svingningstid	19
Chappé	8	Kredsløbskobling	44	Sömering	9
Cook og Wheatstone	10	Kulkornsmikrofon	21		
		Kundeminutter	46	Telefoncentraler	40
D/A omsætter	20, 22	Køteori	46	Telefonens opfindelse	13
dB	37			Telefonens opbygning	18
Detektor	36	Laser	35	Telefonopkald	27
Digital multipleks	22, 23	Laserområde	36	Telestatistik	42
Digital transmission	20	Lyd omsat til lys	36	Thomson	33
Digitalisering	20	Lydbølger	19	Tipstegn	6
Digitalisering	4	Lys omsat til lyd	36	Totalrefleksion	30
Diode	36, 39	Lyshastighed	30	Trykbølger	19
Dæmpning	32	Lysledere	28		
		Lysudsendelse	34	Udlandstrafik	43
Edison	45	Løsrivelsesarbejde	34	Udtværing	29
Electretmikrofon	21				
Elektron	33	Meddelelse	6	Virkningsgrad	37
Emission	33	Mikrofon	21	Voltasøjle	9
Energitilstand	33	Morse	1		
Entropi	6	Morsealfabetet	10	Ørsted	9
Erlang	46				
Excitation	33, 35	n-del	36		

Naturkonstanter

Lysets fart i vacuum (side 30)
 $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Brydningsindeks (side 30)

$$\begin{aligned}n_{\text{vacuum}} &= 1 \\n_{\text{luft}} &= 1,000292 \\n_{\text{glas}} &= 1,5 \\n_{\text{vand}} &= 1,33\end{aligned}$$

Plancks konstant (side 34)
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Formler

Samlet informationsindhold (side 6)

$$I_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^M N \cdot p_i \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right)$$

Middelinformation pr. tegn (side 6)

$$H = \frac{I_{\text{total}}}{N} = \sum_{i=1}^M p_i \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right)$$

Frekvens (side 19)

$$f = \frac{1}{T}$$

Bølgernes fart (side 19)

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \frac{1}{T} = \lambda \cdot f$$

Signal-støj-forhold (side 25)

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log \left(\frac{\text{effekt}_{\text{signal}}}{\text{effekt}_{\text{støj}}} \right)$$

Brydningsloven (side 30)

$$\frac{\sin(i)}{\sin(b)} = \frac{n_2}{n_1}$$

Totalreflektion (side 31)

$$\sin(i_{\text{gr}}) = \frac{n_2}{n_1}$$

Numerisk åbning (side 31)

$$\sin(v) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Dæmpning (side 32)

$$I(x) = I_0 \cdot e^{(-k \cdot x)}$$

Fotonenergi (side 34)

$$E = h \cdot f$$

Løsrivelse af elektroner (side 34)

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{foton}} - A_L = h \cdot f - A_L$$

Brintatomets energitilstande (side 38)

$$E(n) = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} \cdot \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Gitterligningen (side 39)

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin(v_n)$$

Antal ledningsforbindelser (side 40)

$$I = \frac{1}{2} \cdot N \cdot (N-1)$$



ISBN 87-7792-008-2