

PROSJEKTARBEID

FY1303 ELEKTRISITET OG MAGNETISME

NOVEMBER 2004

- *Lyn og torden*
Brit Nes, Ingeborg Sletta, Silje Vågø
- *Solceller*
Kristian Hagen, Torbjørn Lilleheier
- *Kjente fysikere - med vekt på utviklerne av elektromagnetismen*
Sigrid Hansson
- *Elbilen*
Anne Tronhus, Heidi Waterloo
- *Brenselceller*
Bård Martin Kjelling, Tor Nordam
- *Vannkraft*
Aslak Opsahl Brimi, Ola Frisk
- *Bølgeenergi*
Torgeir Anda, Anders Leirvik
- *Superledere*
Solveig Andersen, Erik Frøset, Bård Olav Johannessen
- *Magnetisk levitasjon*
Bjørn Terje Smestad
- *Radiomottaker*
Martin Børstad Eriksen, Kjetil Liestøl Nielsen
- *Filterkrets og høyttalere*
Håvard Hatle, Kjartan Kristoffersen, Daniel Strand
- *Atombomben*
Henrik Hemmen, Arne Skodvin Kristoffersen
- *Strengteori*
Gard Wold Sætre, Magne Inderberg Søby

LYN OG TORDEN



**Prosjekt i FY1303 Elektrisitet og Magnetisme
Høsten 2004**

Brit Nes, Ingeborg Sletta og Silje Vågø

Abstrakt

Tordenskyer dannes vanligvis ved at sola varmer opp lufta over bakken. Lufta begynner da å stige til den kondenseres til skyer. Dersom forholdene ligger til rette for det, vil det utvikles fullmodne tordenskyer. Inne i disse skyene vil det være oppdrift og nedadgående luftstrømmer. Det oppstår da statisk elektrisitet i skya på samme måte som når vi gnir på en glasstav.

Det blir en ladningsfordeling i tordenskyene. Øverst er det et positivt ladningssenter, og i midten og nedre deler av skyen er det negativ ladning. Vi har i tillegg noe positiv ladning nederst i skya. Hvordan denne ladningsfordelingen kommer til, er det noe uenighet om. Mange teorier er lagt fram, og disse faller i hovedsak inn under to hovedhypoteser; konvektiv- og nedbørshypotese. Den konvektive hypotesen går ut på at luftstrømmer fører positive ladninger oppover, og negative ladninger nedover. I nedbørshypotesen kolliderer nedbørspartikler i skya og får ulik ladning. De lette, positive lada partiklene blir ført opp med luftstrømmer, mens de tyngre, negativt lada partiklene faller nedover. På grunn av denne ladningsfordelinga i skya, oppstår det et elektrisk felt mellom skya og jordoverflata.

Lyn er ladningsutladninger som kan skje mellom ei sky og jordoverflate, mellom skyer, fra ei sky til luft og inne i ei sky. Det er blitt identifisert fire forskjellige utladninger mellom skyer og jordoverflata. 90% av de globale lynene er negativt, nedadgående lyn. Selve utladningsprosessen er komplisert. Etter at skya har fått ladningsfordeling, begynner en leder fra skya å gå ned mot jordoverflata. Der blir den møtt av en oppadgående leder fra jordoverflata. Når disse møtes, er det blitt dannet en fullstendig kanal fra skya til bakken. Det er nå klart for at et eller flere returlyn kan gå fra bakken til skya, og vi får ladningsutvekslinger. Hadde det ikke vært for at jorda fikk kvittet seg med positiv ladning på denne måten, ville jorda blitt utladet på under fem minutter.

Innhold

Abstrakt	s.2
Innholdsfortegnelse	s.3
Forord	s.4
Innledning	s.5
1. Skydannelse og tordenværets livsfaser	s.7
1.1 Skydannelse	s.7
1.2 Skytyper som er involvert i tordenvær	s.8
1.3 Tordenværets livsfaser	s.10
2. Ladningsforhold mellom jordoverflata og atmosfæren	s.13
3. Ladningsfordeling i tordenskyer	s.14
3.1 Elektrifisering av tordenskyer	s.14
3.2 Den konvektive hypotesen	s.16
3.3 Nedbørshypotesen	s.18
4. Lynprosessen	s.20
4.1 Ulike typer lyn	s.20
4.2 Negativt nedadgående lyn	s.24
5. Lyn knyttet opp mot elektromagnetisme	s.28
5.1 Elektrostatisk felt fra en dipol	s.28
5.2 Magnetfelt fra en rettlinja strøm	s.29
5.3 Eksempler	s.31
Oppsummering	s.32
Konklusjon	s.33
Takk til	s.34
Referanseliste	s.35

Forord

Lyn og torden er et naturfenomen som de fleste har observert, og det har i lange tider skapt undring og frykt. Fenomenet fascinerer også oss og derfor vil vi finne ut mer om dette. Hvorfor kommer disse mektige lysglimtene på himmelen?

Målet med denne oppgava er å forstå hvorfor lyn blir dannet, og hva som skjer under selve utladningsprosessen.

Siden torden og lyn begynner med dannelsen av ei sky vil vi skrive litt om dette. Etter at skya er dannet vil det oppstå ladningsfordelinger i skya. Og vi vil se på hvorfor slike ladningsfordelinger kommer til, og hvordan lyn blir dannet ut i fra disse.

Vi oppdaga allerede fra starten at dette var et komplisert tema, og det var vanskelig å finne relevant litteratur. Vi leita på Internett, men fant lite som vi kunne bruke. Stoffet vi fant var overfladisk og gikk lite inn på de prosessene som vi ville skrive om. Derfor tydde vi fort til bøker på biblioteket. Disse bøkene inneholdt det vi var ute etter, men de var stort sett vanskelige for oss å forstå. Bøkene var skrevet på engelsk og inneholdt mange fremmede ord.

I litteraturen vi leste var det en del motstridende fakta. Dette er et tema under stadig vitenskapelig utvikling, og vi forkastet fort de eldre bøkene. Det finnes flere ulike teorier på ett og samme fenomen, og vi har valgt å konsentrere oss om de teoriene det er størst enighet om. I den enklere litteraturen, kan innholdet være så forenklet og forkortet at det blir misvisende og av og til feil.

Det finnes mange ulike typer lyn. Vi har valgt å skrive om lyn mellom skyer og bakken, da det er disse vi har sett oftest. Vi oppdaget at det finnes flere forskjellige utladninger mellom skyer og bakken. Siden det er de negativt nedadgående lynene det finnes mest av på jorda, har vi valgt å konsentrere oss om disse.

Innledning [5,10]

Lyn er et naturfenomen som i alle tider har skapt undring hos menneskene, inkludert forfatterne av denne oppgava. Lyn har skapt både inspirasjon og frykt, og menneskene har til alle tider prøvd å forklare disse hendelsene.

Lyn ble sett på som det store våpenet fra Gud. Grekerne både undret seg over og fryktet lyn, som de mente var kastet fra Zevs. Vikingene trodde lynet ble laget av Tor. Når han kjørte over skyene med vognen sin, satt han og slo på en ambolt med en hammer og lagde lynet. Indianerstammene i Nord-Amerika trodde lynet kom fra en mystisk fugl med blinkende fjær, og tordenet var lyden fra de blafrende vingene. I Østen viser gamle statuer av Buddha at han bar lyn med piler i endene.

Etter hvert ble disse overnaturlige forklaringene på lyn erstattet med vitenskap. Flere personer hadde funnet likhetstrekk mellom gnister i laboratoriet og lyn, men *Benjamin Franklin* var den første som systematisk og vitenskapelig studerte lyn. Dette skjedde gjennom andre halvdel av 1700-tallet. Eksperimenteringen med elektrisitet hadde da kommet så langt at man kunne skille mellom positive og negative ladninger. Elektriske maskiner kunne, ved å gni sammen to forskjellige materialer, lagre elektrisk ladning i primitive kondensatorer kalt "Leyden Jars". Man kunne se at de genererte gnister.

Franklin var den første til å lage et eksperiment som med sikkerhet beviste de elektriske egenskapene til lyn. I eksperimentet kom han fram til en teori om at når skyene var elektrisk ladet så måtte lynene være det også. I eksperimentet stod Franklin på et elektrisk stativ. Han holdt en jernstang i ei hånd for å oppnå en elektrisk utladning mellom den andre hånda og bakken. Dersom skyene var elektrisk ladet ville gnister "hoppe" mellom jernstanga og vaieren til bakken, som i dette tilfellet var holdt av et isolerende vokslys. Eksperimentet ble vellykket utført av Drancios D'Alibard fra Frankrike i mai 1752, da gnister ble observert fra jernstanga i tordenvær. Dermed var det påvist at lynet måtte være en elektrisk gnist mellom sky og jord.

I juli 1753 beviste en svensk fysiker ved navn Richmann at tordenskyer inneholdt elektrisk ladning. Han ble selv drept da lynet traff han. Før Franklin fullførte sitt eksperiment fant han en bedre måte å bevise hypotesen sin på, han erstattet jernstanga med en drage som inneholdt

metall og som var knyttet til en person gjennom et isolerende silkebånd. Da klarte han å bevise hypotesen sin. I tillegg til å vise at tordenskyer var elektriske, fant Franklin ut at nedre del av skyene var negativt ladet.



Figur 1; Benjamin Franklins eksperiment [4].

Kort tid etter at Franklin i 1752 påviste at lynet måtte være en elektrisk gnist mellom sky og jord, fikk han ideen til lynavledere. Lynavlederne ble raskt utbredt, selv om skepsisen blant enkelte var stor. I 1778 krevde faktisk moten at damehatter måtte utstyres med lynavledere for å beskytte damene mot ilden fra himmelen!

Frem til slutten av 1800-tallet var det liten betydningsfull framgang i forståelsen av lyn, men det ble da tatt i bruk fotoapparat i lynforskningen. Lynforskning i moderne tider kommer fra arbeidet til C.T.R. Wilson. Han var den første til å bruke målinger av elektrisk feltstyrke til å bestemme strukturen til ladninger som var involvert i lynets utladning. Wilson gjorde store bidrag til vår forståelse av lyn og mottok Nobel prisen i fysikk i 1927.

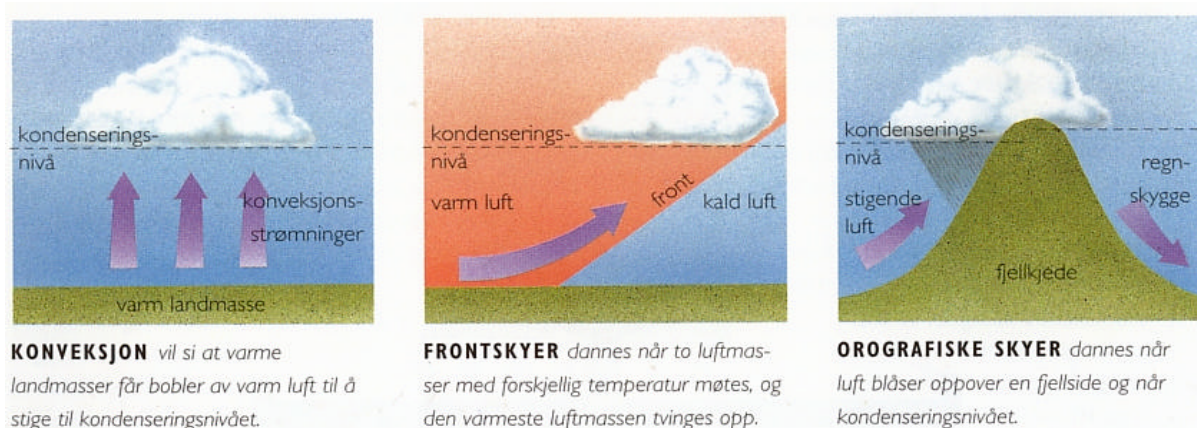
I dag er interessen og aktualiteten av lynforskning betydelig. Vi er omringet av elektronikk i datamaskiner og andre apparater, og vi flyr mye. Lyn har innvirkning på alt dette. Det er blitt utviklet gode lynavledere som sparer menneskeliv. Men likevel er det fortsatt store uløste gåter innenfor dette fagfeltet, og det er stor uenighet mellom fagfolk om hvilke teorier som er riktige.

1.1 Skydannelse [4,6,9]

En rekke forskjellige prosesser kan få luft til å stige opp og danne skyer. Under normale forhold avtar temperaturen med høyden. Lufta (som inneholder vanndamp) blir dermed kjøligere etter hvert som den stiger, og kan da inneholde stadig mindre vann. Til slutt når den duggpunktet der luftmassen blir mettet og kondenseres til vanndråper. Dersom kondensering skjer i kuldegrader, kan vanndampen sublimeres til iskrystaller. Flere hundre millioner slike iskrystaller og mikrodråper vil til slutt danne skyer av alle former og størrelser. Typen sky kommer an på faktorer som mengde av fuktighet i lufta, hvor mye luft som løftes og av atmosfærens stabilitet.

Vi skiller mellom tre alminnelige prosesser som får lufta til å stige:

1. **Konveksjon:** Når en luftmasse ved bakken varmes opp av sola, vil luftmolekylene svinge raskere og presse seg utover slik at luftmassen ekspanderer. Ekspansjonen forårsaker nedgang i tettheten. Luftmassen blir noe lettere enn omgivelsene og vil dermed stige og kjøle. Luftmassen kommer etter hvert ned i duggpunkttemperaturen, og vil danne skyer. Jo sterkere oppvarming, desto sterkere konveksjon.
2. **Frontdannelse:** Når to luftmasser med forskjellig temperatur møtes, vil den varmere lufta bli presset oppover av den kjøligere lufta. Hvis den stigende lufta inneholder tilstrekkelig mye fuktighet, dannes det skyer. En kaldfront tvinger varm luft til å stige raskt. Dette skaper kraftig konveksjon og ustabilitet (labilitet) som kan gi tordenvær. En varmfront stiger gradvis over et lag kald luft og kan danne skyer.
3. **Orografisk løfting:** Denne prosessen skjer når en luftmasse møter en fjellkjede. Landmassen tvinger lufta oppover, og løfter den ofte opp til kondensasjonspunktet.



Figur 2; Tre prosesser som får lufta til å stige [4].

En luftmasse fortsetter å stige så lenge den er varmere og har mindre tetthet enn lufta rundt. Vi har da labile (ustabile) forhold. Hvis luftmassen kommer ned i samme temperatur som omgivelsene, vil forholdene bli stabile. Så lenge det ikke skjer noen kondensering, kjølnes stigende luft med 9,8 grader pr tusen meter. Vi kan dermed beregne hvor høyt lufta vil stige hvis vi kjenner temperaturen i den stigende luftmassen og lufttemperaturen i forskjellige deler av troposfæren (0 – ca 10 000 moh). Generelt er det lufttemperaturen på de øvre nivåene som bestemmer stabiliteten. Kald luft over varm luft har lett for å skape labile forhold.

Når vanndampen i en stigende luftmasse kondenseres, frigjør den latent varme. Dette varmer luftmassen og gjør atmosfæren mer labil, noe som i sin tur fører til at luftmassen stiger høyere. Latent varme er en svært viktig faktor i dannelsen av tordenvær.

1.2 Skytyper som er involvert i tordenvær [4,6,9]

CUMULUS:

Cumulus (haugskyer) er enkeltstående, tette skyer med skarpe konturer. Disse har som regel vannrett underside og blomkållignende vertikale ”oppblomstringer”. Skyene har et hvitt utseende med en noe mørkere underside. Cumulus har skybasis i lavere nivå (0 – 2 000 moh), men pga sin store vertikale utstrekning kan Cumulus ha skytopp også i midlere nivå (2 000 – 7 000 moh). Skyene består hovedsaklig av vanndråper.

- o **Cumulus Humilis:** ”Godværs cumulus”
- o **Cumulus Mediocris:** Disse skyene dannes av litt sterkere konveksjon enn den som gir opphav til Cumulus Humilis og er ofte en overgangsfase mellom Humilis og Congestus. Skyene oppstår vanligvis sent på formiddagen, etter at bakken er blitt tilstrekkelig oppvarmet til å danne konveksjon.
- o **Cumulus Congestus:** Neste stadium i den vertikale utviklingen av cumuluskyer etter Mediocris er Congestus. Disse skyene dannes sjelden av konveksjon alene. Det trengs også atmosfærisk labilitet. Dette skjer når temperaturen i den omkringliggende luftmassen faller raskere med høyden enn det som er normalt, ofte på grunn av at en kaldfront glir over skyen. Congestus kan vokse til Cumulonimbusstadiet dersom konveksjonen er sterk nok eller hvis den omkringliggende atmosfæren blir enda mindre stabil.



Figur 3; Cumulus Congestus [4].

CUMULONIMBUS:

Cumulonimbus (Bygeskyer) er store og tette, opptårnede skymasser med stor vertikal utstrekning. Cumulonimbus kan ha skytopp både i midlere og høyere (6 000 – 12 000 moh) nivå. Skyene består som regel av vanndråper i den nederste delen og iskrystaller i den øverste.

- o **Cumulonimbus Calvus:** Calvus representerer en overgangsfase mellom Cumulus og fullt utvikla Cumulonimbus. Skyene forekommer når en kombinasjon av konveksjon og atmosfærisk labilitet driver skytoppene til høyder inntil 9 000 m. På dette nivået av troposfæren ligger temperaturen som regel langt under frysepunktet, og enhver kondensering som skjer vil danne iskrystaller istedenfor små vanndråper.
- o **Cumulonimbus med Pileus:** Disse skyene kan hjelpe til å forutsi tordenvær, siden de har lettest for å utvikle seg til fullvoksne Cumulonimbuskyer. Den sterke oppvinden i forbindelse med en Calvussky tar med seg en plate av luft og skyver den oppover. Dette fører til at fuktigheten i luftplaten kondenseres og en avlang, luelignende formasjon (Pileussky) dukker opp over den stigende Calvusen. Etter hvert som Calvusskyen fortsetter å stige, innhenter den litt etter litt Pileusskyen til de smelter sammen.
- o **Cumulonimbus Incus:** Incus kalles skyenes konge og kan nå opp til 18 000 m i tropiske områder. Disse skyene er kronet med en stor, kileformet masse som minner om en ambolt, noe som er et klart kjennetegn på et fullt utviklet tordenvær. Incus utvikles fra Congestus når konveksjon kombineres med atmosfærisk labilitet slik at det dannes en kraftig oppvind. Så lenge luften i nærheten av oppvinden holder seg ustabil, fortsetter skyen å

stige og vokse. Til slutt når Cumulonimbuskyen toppen av troposfæren, der lufttemperaturen slutter å synke og i stedet begynner å øke med høyden. Denne forandringen legger et lokk på oppvinden, og skyen kan ikke stige mer. Lufta nedenfor fortsetter imidlertid å presse oppover, og sprer skya til alle kanter slik at amboltfasongen oppstår.



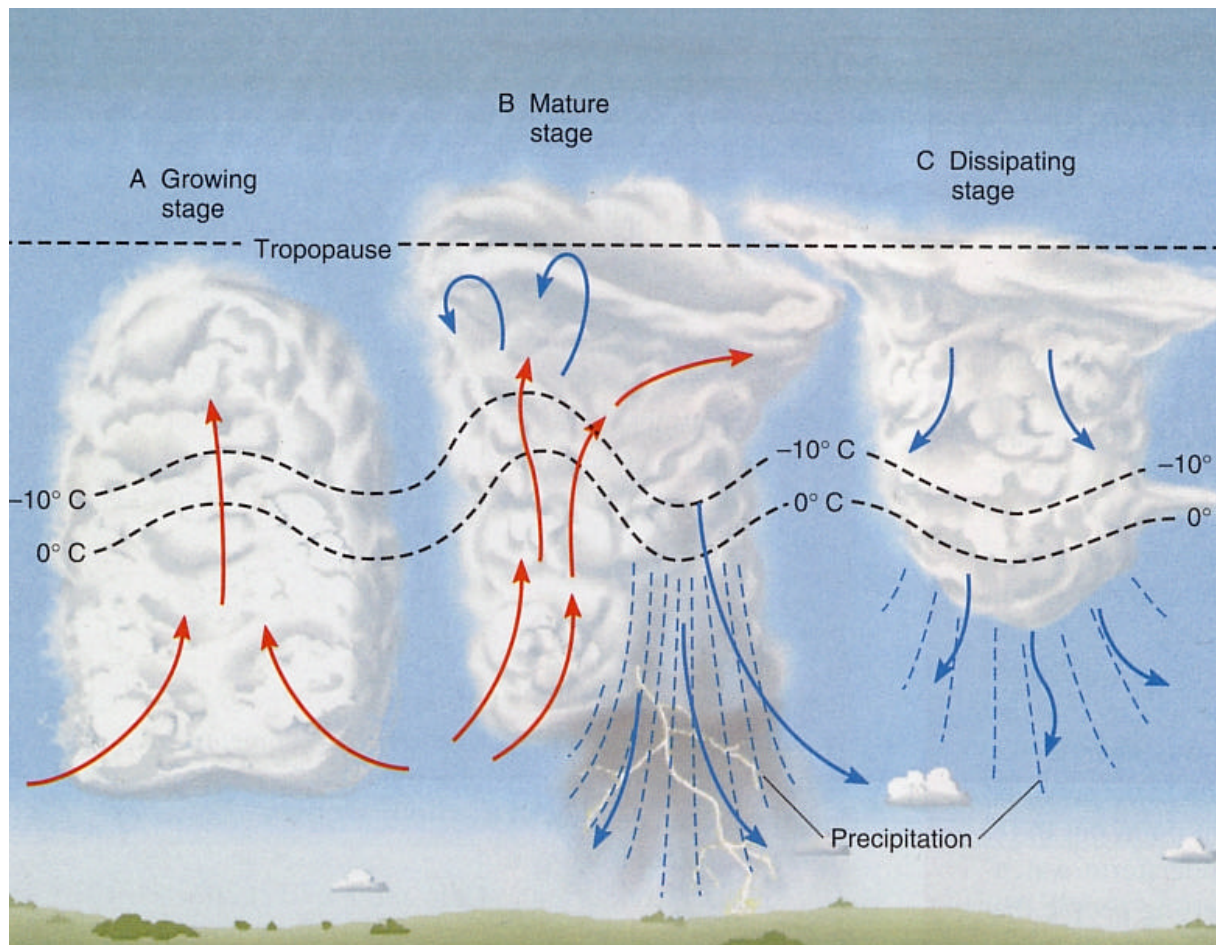
Figur 4; Den amboltaktige toppen av en Cumulonimbus er et sikkert kjennetegn på et fullmodent tordenvær [4].

1.3 Tordenværets livsfaser [4,6,8]

Fuktighet, labilitet og oppadgående luftstrømmer er hovedingrediensene som må til for at et tordenvær skal dannes. Vi skiller mellom to typer tordenvær; luftmassetordenvær og fronttordenvær.

Luftmassetordenvær er mest vanlig og dannes på grunn av konveksjon. Disse kan ha en eller flere celler. Et encellet tordenvær utvikles og svekkes raskt, mens flercellede tordenvær er klynger av tordenskyer som ”mater” hverandre. De fallende luftstrømmene fra hver sky sprer seg når de treffer bakken, noe som fører til at varm overflateluft stiger opp. Hvis andre tordenskyer er i nærheten, vil denne stigende luften fremme utviklingen deres.

Fronttordenvær dannes av en kaldfront og har rikelige mengder fuktighet, stigende luft og labilitet. Disse kalles superceller og kan vare i timevis, for kaldfronten gir en kontinuerlig strøm av kjøligere luft i mellomhøye nivåer, noe som øker labiliteten.



Figur 5; De ulike fasene i et tordenvær [6].

Vi skiller mellom tre faser; utviklingsfase, moden fase og oppløsningsfase.

I **utviklingsfasen** dannes tordenskyer som vanlige Cumulusskyer. Varm, fuktig luft stiger opp, og etter hvert som den kjølnes, kondenseres luftfuktigheten til skyer. Hvis konveksjonen er sterk nok, kan skyene utvikle seg til Congestus-stadiet. Labilitet i mellomhøye og høye deler av troposfæren trengs for at skya skal utvikle seg videre. Latent varme frigjort under kondenseringen forsterker labiliteten.

15-30 min etter at skya har nådd Cumulus-stadiet, vil det begynne å bli nedbør, noe som markerer overgangen til **moden fase**. Stormen vil etter hvert også inneholde torden, lyn, tung nedbør og turbulente vinder. Tordenskyene utvikles til denne fasen dersom forholdene ligger til rette for det. Skyene vil da utvikles til Cumulonimbus-stadiet, og vil ikke slutte å stige før den kommer til tropopausen (nivået hvor temperaturen slutter å avta med høyden og heller begynner å stige igjen). Et lag av tilstrekkelig stabil luft kan også gjøre at skya slutter å stige. Ved tropopausen spres skya ut i en flattoppet fasong som minner om en ambolt. I denne

høyden er temperaturen rundt 60 minusgrader, og toppen av skya består av iskrystaller. De stigende luftstrømmene som typisk har en fart på 10-20 m/s, kan av og til slå gjennom tropopausen og opp i stratosfæren. Dette kalles en overskytende topp, og er et tegn på alvorlig tordenvær. Oppdriften som dannes i skya vil også hindre nedbørspartikler å falle. Farta til en regndråpe er typisk 10 m/s, og hvis oppdriften er større enn dette, vil dråpen stige.

Oppdriften er ikke helt vertikal, så nedbørspartikler kan "falle ut av" oppdriften og havne i områder med saktere luftstigning. Andre nedbørspartikler stiger i oppdriften og blir også spredd til deler i skya som mangler sterk oppdrift. Når de faller, vil de dra med seg lufta rundt og danne nedadgående luftstrømmer. Lufta øverst i skya vil etter hvert kjølnes, og begynner å synke. Det dannes også da nedadgående, fuktige luftstrømmer, som i sin tur frigjør mer latent varme. De stigende og synkende luftstrømmene gjør at det inne i skya virvler en blanding av is, snø, hagl og regn. Det oppstår statisk elektrisitet på samme måte som når vi gnir en glasstav. Disse positive og negative ladningene vil igjen forårsake lyn. Den elektriske ladningen fremmer også dråpeveksten i skyen slik at nedbøren øker. De nedadgående luftstrømmene danner vindfronter ved bakken, som igjen vil løfte varm luft og gi ny oppdrift.

15-30 min etter at tordenværet har kommet til moden fase, vil stormen nå **oppløsningsfasen**. De kalde, synkende luftstrømmene øker i antall og styrke og sprer kald luft langs bakken. Disse kutter stormens tilførsel av varm, fuktig luft, slik at oppdriften og tordenværet svekkes. Svake nedadgående luftstrømmer og temperaturer kaldere enn de i samme nivå utenfor skyen, karakteriserer det nedre området av skya i denne fasen. Noen ganger vil spenningsforskjellen mellom bakken og skya skape et elektrisk felt som er så kraftig at det kan holde nedbøren i skya tilbake. Vi får da styrtregn i oppløsningsfasen. Torden og lyn avtar og vil til slutt opphøre.

2. Ladningsforholdet mellom jordoverflata og atmosfæren [3,12]

Jordoverflata har en total negativ ladning på $-4,6 \cdot 10^5$ C. På en godværsdag vil det like utenfor jordoverflata være et midlere elektrisk felt på ca 100 - 150 V/m rettet mot jorda. Under tordenvær vil dette feltet ha en verdi på ca 10 kV/m, og ha en retning ut fra jordoverflata.

I atmosfæren vil man på grunn av kosmisk stråling ha ionisering av luftmolekylene. Positive ioner vil dras inn mot og negative ioner bort fra jordoverflata. Vi vil da få en strøm på ca 1800 A mot overflata. Ved ionosfæren (ca 50 km over bakken) er ionetettheten så stor at sfæren kan betraktes som en leder. Her vil vi ha et overskudd av positive ladninger, slik at spenningsforskjellen mellom ionosfæren og jordoverflata er ca 400 kV.

Det er tordenvær og lyn som opprettholder negativ ladning på bakken og positiv ladning i atmosfæren. Ved et lynnedslag vil det altså vanligvis overføres negativ ladning fra skya til jorda. Det er gjennomsnittlig 300 tordenvær per døgn på jorda. Tordenværene er ”lademotoren” som pumper positive ladninger fra overflata til atmosfæren, og den negative overflateladningen og det elektriske feltet blir dermed opprettholdt. Uten tordenvær ville all positiv ladning i ionosfæren lekke ned til jorda, slik det gjør i godvær.

3.1 Elektrifiseringen av tordensky [1,6]

Hvordan elektrifiseringen av tordensky kommer i gang, har lenge vært et uløst problem i atmosfærisk fysikk. Til tross for en rekke simulerte laboratorieeksperimenter sammen med store mengder innsamla data de siste 10 åra, er kunnskapen om hvordan disse skymassene blir ladet begrenset på mikrofysikalsk nivå.

Sir John Mason identifiserte elektrifiseringa av tordenværet som en av de tre ledende uløste problemene i skyers fysikk. Han hadde dette å si om problemet:

This is, for me, the most intriguing and challenging problem in cloud physics, with a strong incentive to understand one of the most spectacular of natural phenomena, but made all the more interesting by the fact that the search for a continuing solution has led us into a number of rather difficult areas of classical physics, and to a deeper study of fundamental properties of water and ice. [1]

På bakgrunn av observerte elektriske karakteristikk av tordenvær, er det blitt satt opp mange teorier for opprinnelsen av elektrifiseringen.

Fra forskningen rundt lyn og torden er det blitt satt opp en liste med krav, eller grunnleggende forhold som må være tilstede, for at lyn skal oppstå.

En tilfredsstillende teori må kunne forklare disse forholdene [1]:

- a) For at lyn skal oppstå, må skyas dybde være større enn 3-4 km. Veldig høye tordenskyer produserer oftere lyn enn de med ordinær høyde.
- b) Selv om lyn kan forekomme i "varme" skyer, er det ikke observert sterk elektrifisering hvis ikke skyen utvider seg over høyder som tilsvarer $T = 0^{\circ} \text{C}$.
- c) Høyt elektriserte regioner i et tordenvær har nesten alltid sammenheng med eksistensen av is og underkjølt vann i området.
- d) Sterk elektrifisering forekommer når det er sterk konvektiv aktivitet, - med sterk vertikal utvikling.
- e) Prosessen med dannelselse og spredning av ladning er nært assosiert med utviklinga av nedbør. Generelt utvikles lyn oftest i områder med høy nedbørsaktivitet.
- f) Det første lynnedslaget forekommer ofte innen 12-20 min etter at nedbøren er registrert. Den initiale elektrifiseringsraten har en tidskonstant på to minutter.
- g) Den gjennomsnittlige varigheten av nedbør- og elektrisk aktivitet fra en tordensky er rundt 30 min.
- h) Lokaliseringen av ladningssentrene ser ut til å være bestemt ut ifra temperatur og ikke høyde over bakkenivå. Hovedsenteret for negativ ladning er generelt lokalisert i den delen av skyen der temperaturen er mellom -5°C og -25°C . Hovedsenteret for positiv

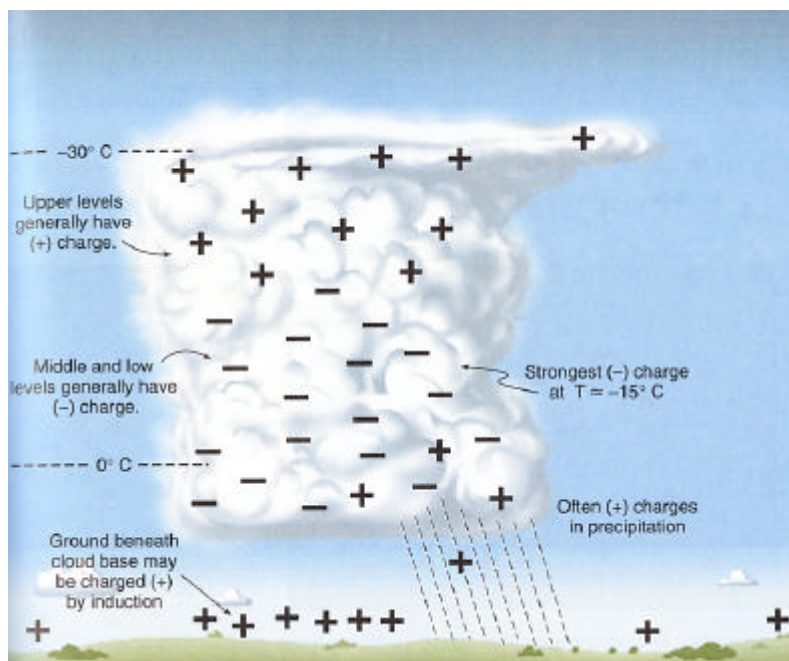
ladning er noen km lenger oppe. Det er en liten lomme med positiv ladning nedenfor området med negativ ladning, og her ligger temperaturen rundt frysepunktet.

- i) I den modne fasen av en storm kan elektriske felt opp imot 400 kV/m forekomme. Det kan oppstå flere lysglimt per min, som krever en ladningsstrøm av størrelsesorden 1A. Det kreves en ladningsmengde per min på ca 1 C per km³.
- j) Det gjennomsnittlige elektriske dipolmomentet som blir ødelagt i et lynglimt er på ca 100 C km, og den tilhørende ladningen er på 20-30 C.
- k) Dipolen som ødelegges ved lyn kan avvike fra vertikalen med så mye som 90°. Det vil si at ladningsutløsninger kan skje i vilkårlige retninger.

Disse ”kravene” viser at en isbasert nedbørsmekanisme spiller en sterk fundamental rolle i elektriseringen av tordenværet. Det er blitt rapportert lynnedslag fra skyer som overalt hadde temperatur større enn 0°C, men slike observasjoner er sjeldne og elektriseringen har vært svak.

Derfor er mekanismer relatert til is i skyene mest anerkjent. I de siste 10-åra er en rekke mekanismer blitt foreslått for å forklare de observerte trekkene ved tordenvær.

Ladningsfordelingen i en tordensky:



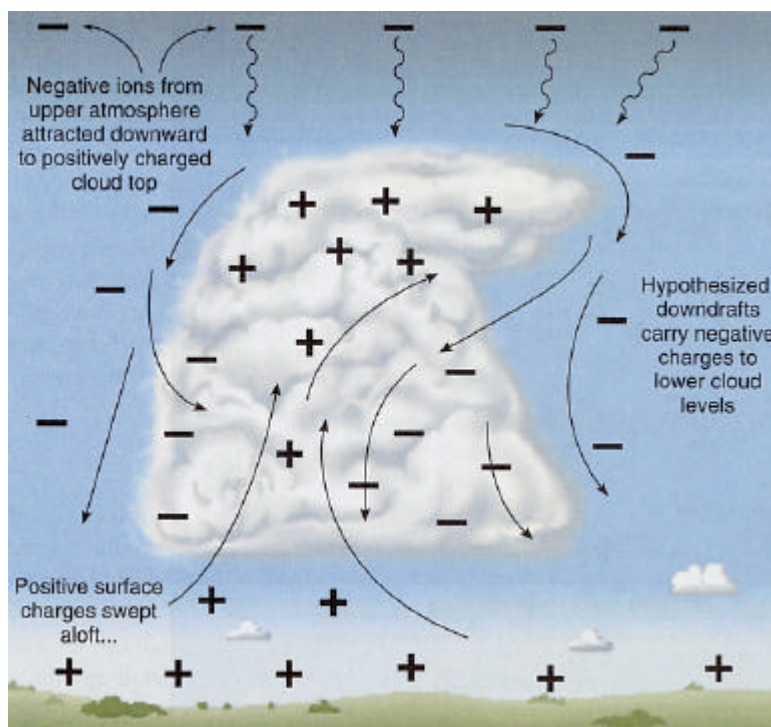
Figur 6; Ladningsfordelingen i og utenfor tordenskyen [6].

De fleste fysikere er enige om at dette er den ladningsfordelingen som er korrekt (se figur 6). Hvorfor ladningsfordelingen er slik, er det mer uenighet om.

De ulike hypotesene om hvordan ladningen fordeler seg faller i hovedsak inn under to kategorier: Den konvektive hypotesen og nedbørshypotesen.

3.2 Den konvektive hypotesen [1,6,12]:

Figuren nedenfor illustrerer hovedtrekkene ved den konvektive hypotese.



Figur 7; Den konvektive hypotesen for ladningsfordeling i tordenskyer. Luftstrømmer fører positive ladninger oppover og negative ladninger nedover [6].

Teorien er basert på vertikal transport av ioner i atmosfæren på grunn av sterke oppadgående luftstrømmer inne i tordenskyen og på grunn av kompenserende nedadgående luftstrømmer på utsiden.

Dette skjer steg for steg:

- 1) Varmestrømninger fører positive ladninger inn i skya og videre til øvre deler av skyen.
- 2) Det vil være en blanding av positive og negative ioner i den øvre atmosfære, selv om de positive er i overvekt. En positiv skytopp vil trekke til seg de negative ladningene.
- 3) De nedadgående negative ladningene kommer inn i strømmen langs periferien/kanten av skya som transporterer dem til midten og nedre deler av skya. Dette fører igjen til en (enda) sterkere tiltrekning av positive ladninger opp mot skya.

Teorien forklarer den generelle oppfatningen av at positive ladninger er i øverste del av skya, og at negative ladninger er i nedre deler. Hypotesen forklarer likevel ikke det faktum at negative ioner ser ut til å hope seg opp samtidig og på samme sted som nedbørsdannelsen. Den forklarer heller ikke hvorfor den negative ladningen samler seg i området av skya der temperaturen er -15°C .

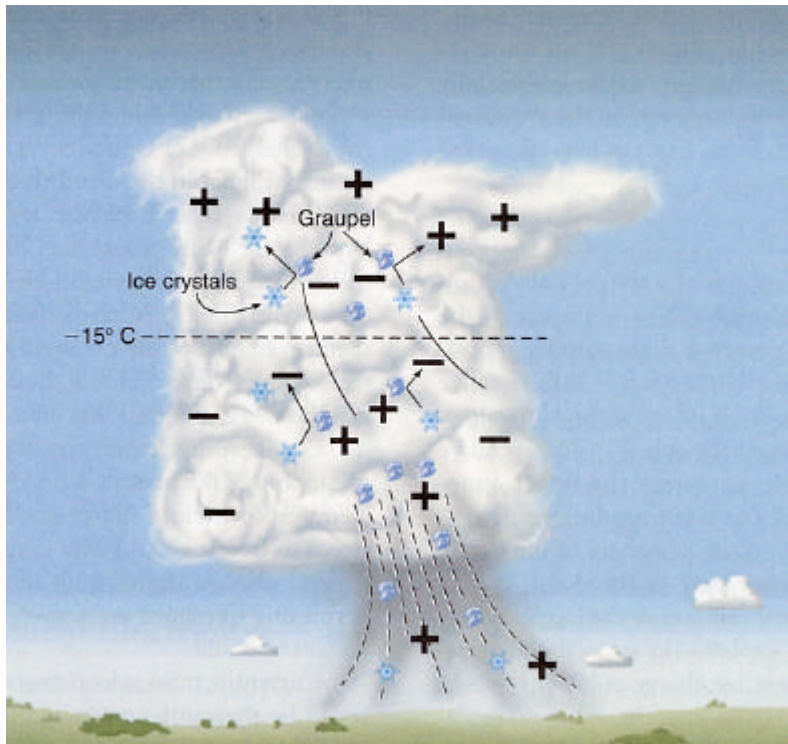
Konsentrasjonen av ioner rundt en tordensky er vel heller ikke tilstrekkelig for å forklare den observerte degenerasjonsraten av ladning inne i skya. Det er vist at den totale punktutladningsstrømmen alene er for liten til å utgjøre de observerte lynstrømmene.

Det er også stilt tvil ved teorien på det grunnlag at en skulle tro at de oppadgående luftstrømmene ikke bare førte med seg positiv ladning, men også negative ladninger som er blitt transportert av de nedadgående vindene.

Når det gjelder tidsramma til prosessen, har den ført til bekymring. Utladning skjer ikke før det elektriske feltet ved bakken er blitt bygd opp til 800 V/m . Innen den tid er feltet inne i skya høyt nok til å utløse lyn. Videre bruker de resulterende positive ionene betydelig tid for å nå skya. Derfor forklarer ikke teorien den initielle elektrifiseringen av skya.

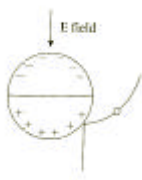
3.3 Nedbørshypotesen [1,6]:

Denne figuren illustrerer hovedtrekkene ved nedbørshypotesen.



Figur 8; Nedbørshypotesen for ladningsfordeling i en tordensky. Når iskrystaller og tunge, rimete partikler kolliderer ved temperaturer lavere enn -15°C , vil iskrystallene få positiv ladning. I og med at de er lettere, er tendensen at disse blir værende i høyere delene av skyen enn de tyngre negativt lada partiklene. Slik blir skyen positivt lada i høyere deler med negativ ladning lenger ned [6].

Dette skjer:



Figur 9; Polarisert partikkel i ytre elektrisk felt [1].

Store (tyngre, rimete) partikler i ytre vertikalt elektrisk felt rettet nedover, vil polariseres med negativ ladning på toppen og positiv ladning i bunnen. Når disse faller nedover, vil de kollidere med mindre partikler. Dette fører til at positiv ladning blir fjernet fra den nedre delen av den store partikkelen, og blir ført til øvre deler av skyen på grunn av luftstrømmen.

Den større partikkelen faller nå med netto negativ ladning. Begge partiklene beveger seg i retninger som forsterker det ytre elektriske feltet.

Argumentene for og imot nedbørshypotesen:

Det er bekrefta ved laboratorieeksperiment at ladningsfordeling blir slik som vist i figuren over ved kollisjon av nedbørspartikler [1]. Generelt får små partikler positiv ladning ved lave temperaturer. Det faktum at lyn ofte forekommer ved begynnelsen av nedbørsfall er ”bevis” i støtten av hypoteser som kobler nedbør og lyn.

Men det er mange spørsmål som enda ikke kan besvares med sikkerhet i dag. Hvorfor får tunge rimete partikler negativ ladning ved lave temperaturer, men positiv ladning ved temperaturer nær frysepunktet? Og hvorfor ser det ut til at ladningsfordelingen også avhenger av fuktigheten i lufta? Inntil disse spørsmålene kan besvares, vil det fortsatt være skepsis til nedbørshypotesen.

I dag regner de fleste fysikere nedbørshypotesen som den mest overbevisende, selv om det er mulig at begge mekanismer spiller en rolle, avhengig av hvilke forhold som hersker i et gitt tordenvær. Usikkerhetene rundt både nedbørshypotesen og den konvektive hypotesen kommer av vanskelighetene rundt det å observere ladningsfordelingen i en ekte tordensky. Dette komplekse og viktige temaet kommer nok til å oppta fysikere (og ikke minst datamaskinene da det tross alt er de som utfører de mest kompliserte beregningene og observasjonene) i årene fremover.

4.1 Lynprosessen [2,5,10,12]

Lyn er ladningsutladninger som kan skje mellom ei sky og jordoverflata, mellom skyer, fra ei sky til luft, og inne i ei sky.

Lyn innenfor ei sky:

Dette er den vanligste formen for lyn. Utladningen skjer mellom den negativt ladde undersiden av skya og de positivt ladde øvre nivåene, og resultatet blir at skya belyses innenfra. Hvis det skjer en rekke utladninger opp og ned langs lynkanalen blir lynet så kraftig at det kan lyse opp en hel Cumulonimbussky inntil et halvt sekund.

Lyn mellom to skyer:

Denne utladningen skjer mellom en positivt ladet topp av den ene skya og en negativt ladet underside av en annen. Dette lynet foregår i en mye større høyde enn lyn mellom sky og bakke, og kan dermed ses over mye lengre avstander. Faktisk kan lynet sees på en mye større avstand enn hva tordnet høres.



Figur 10; Lyn mellom to skyer [4].

Lyn fra sky til luft:

Et slikt lyn forekommer når det er elektriske utladninger mellom en oppbygging av en type ladninger i en Cumulonimbussky og et omvendt ladet felt i atmosfæren omkring. Disse lynene er ikke så kraftige som de mellom ei sky og bakken. Disse lynene er ofte forgreininger av positive lyn fra toppen av skya til bakken, og de går fra de positivt ladde delene av skyen og ut i lufta.



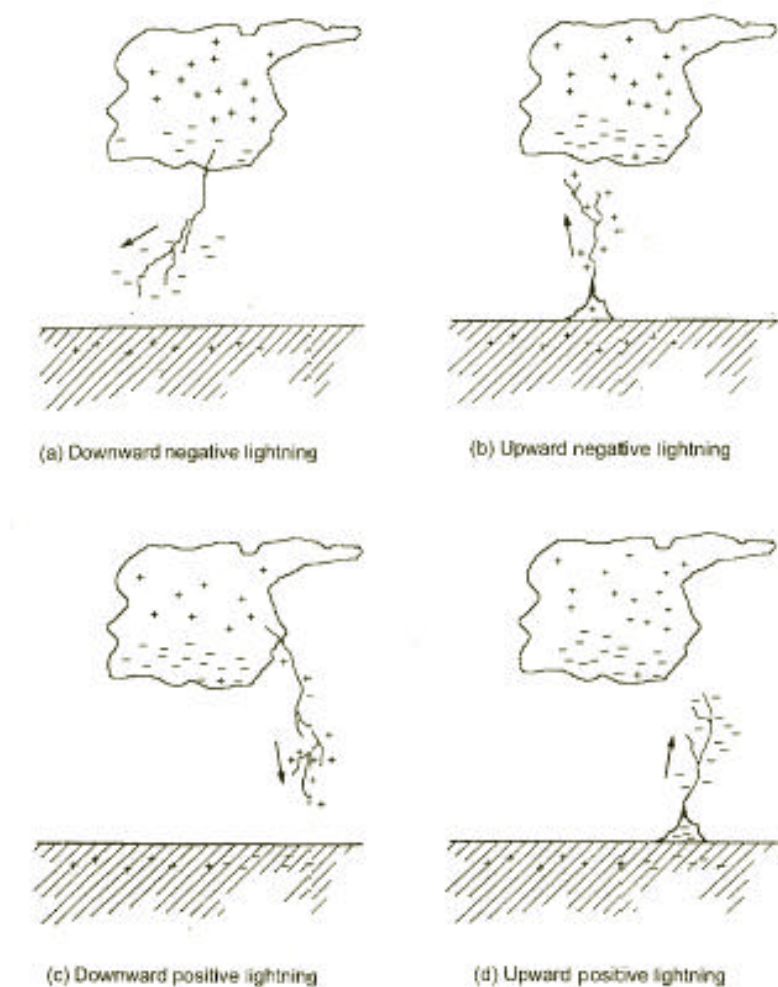
Figur11; Lyn fra sky til luft [4].

Lyn mellom ei sky og bakken:

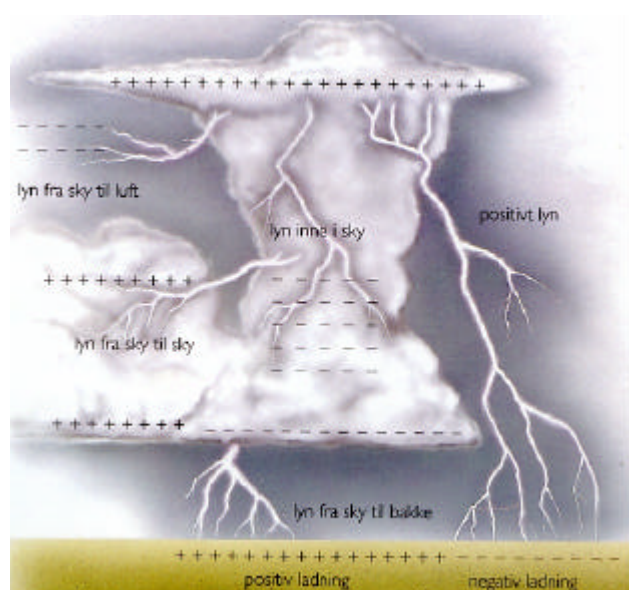
Dette er den mest ødeleggende og farlige formen for lyn for oss mennesker. Det er ikke det mest vanlige lynet, men det best forståtte.

Det er blitt identifisert fire forskjellige typer utladninger mellom sky og jordoverflata, det er negative og positive lyn og begge kan gå både oppover fra jordoverflata og nedover fra skya:

1. Negativt nedadgående lyn. Utgjør 90% av de globale lynene.
2. Negativt oppadgående lyn. Skjer bare fra høye objekter på ca 100m el mer eller fjell.
3. Positivt nedadgående lyn. 10% el mindre av de globale lynene.
4. Positivt oppadgående lyn. Skjer bare fra høye objekter eller fjell.



Figur 12; De fire forskjellige typene lyn mellom ei sky og bakken. a) nedadgående negativt lyn, b) oppadgående negativt lyn, c) nedadgående positivt lyn, d) oppadgående positivt lyn[2].



Figur 13; over alle de forskjellige typer lyn som kan komme ut i fra ei sky [4].

Kulelyn:

Dette er små eller store lysende kuler som kommer lydløst og forsvinner lydløst, eller de dukker opp med et brak og forsvinner. Disse lynene har inntruffet inne i et hus og drept et menneske, men teorien bak denne typen lyn er ukjent for vitenskapen. Selv om det finnes personer som tviler på at kulelyn finnes, er de aller fleste fysikerne enige om at dette er et virkelig fenomen.

Fargen på lynet viser hva den omliggende luften inneholder:

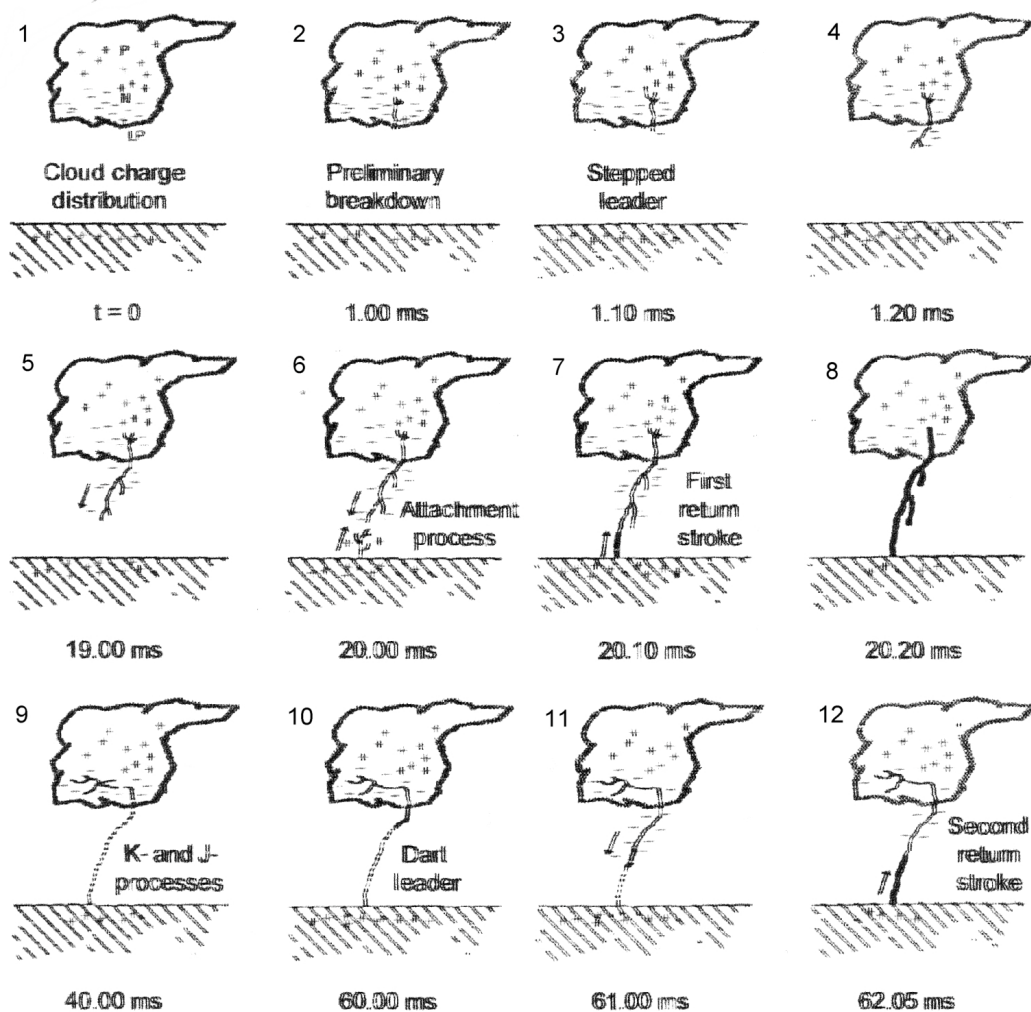
- Rødt: regn i skyen
- Blått: hagl i skyen
- Gult: betydelig mengde støv i atmosfæren
- Hvitt: lav fuktighet, og pga dette er det dette lynet som lager lettest brann på jorda



Figur 14; Hvite lyn fra skyene til bakken viser at det er lite fuktighet i luften, derfor er det denne typen lyn som lettest forårsaker brann [4].

4.2 Negativt-nedadgående lyn [2,4,5,11]

Dette lynet utgjør 90% av de globale lynene. Potensialforskjellen mellom et lederlyn (den første lederen på vei ned fra skya mot bakken) på vei ned mot bakken og jordoverflata er noen MV, som er en anstendig del av potensialforskjellen mellom skya og jordoverflata. Det elektriske potensialet mellom den nedre delen av den negativt lada delen av skyen og bakken kan være fra 50 til 500 MV.



Figur 15; En skisse over hvordan utladningsprosessen foregår i et negativt lyn mellom ei sky og jordoverflata. De blir referert til som bilde 1 til bilde 12 [2].

Når et lederlyn nærmer seg bakken øker det elektriske feltet ved bakken. Dette fortsetter helt til den kritiske verdien for begynnelsen av en eller flere oppadgående positive ledere er nådd. Dermed går det en leder med negativ ladning nedover som er lederlynet og en leder med

positiv ladning oppover som møter lederlynet (se bilde 5 og 6). Grunnen til at området rundt lederlynet kan betraktes som en leder er at dette området har blitt fylt med store mengder negativ ladning fra skyen i tillegg til at luften rundt har blitt ionisert av de hurtige ladningene. Tettheten av disse ladningene er så stor at vi har en leder.

De to lederne møter hverandre noen titalls meter over jordoverflata og det er nå en leder som går helt fra skyen ned til jordoverflata (se bilde 7). Denne lederen ser vi ikke her på jorda, men det gjør vi når returutladningen starter. Denne returutladningen blir det første lynet. Dette betyr at et det lynet vi ser her på jorda ikke er ladninger som blir transportert fra sky til jord, men omvendt. Lederen mellom skya og bakken er fylt med negativ ladning, og returlynet som går fra bakken til skya har som oppgave å nøytralisere ladningen lagra i lederkanalen (se bilde 7 og 8). Denne returutladningsprosessen nøytraliserer kanskje ikke all lederladning og det kan også hende at den etterlater positiv ladning i lederkanalen og da også inne i skya, men hovedpoenget er at jorda får kvittet seg med positiv ladning.

Siste stadium av returutladningsprosessen er kompleks, men nettoresultatet er et returlyn. Hastigheten til returlynet er like under halvparten av lyshastigheten, og hastigheten minker med økende høyde over bakken. Hastigheten blir i tillegg betraktelig dempet etter at lynet har passert ei hovedforgreining, men det blir en økning av kanallyset.

Det første returlynet har en strøm (målt fra bakken) som i løpet av noen mikrosekunder når sin maksimumsverdi på 30 kA, og minker til halvparten av denne verdien i løpet av noen titalls mikrosekunder. Strømmen varierer også når den passerer forgreininger i lederkanalen. Dette er den impulsive delen av strømmen, som kan bli fulgt av en strøm på noen hundre ampere som varer i noen millisekunder.

Det første lederlynet senker meget effektivt ladningen på jordoverflata. Men det har også varmet opp lederkanalen til en maksimumstemperatur på ca 30 000 K som er flere ganger overflatetemperaturen til sola. I tillegg økes trykket i kanalen til 10 atm noe som er 10 ganger så stort som normalt lufttrykk. Denne trykkøkninga resulterer i at kanalen ekspanderer, og det blir en intens optisk utstråling. Dette fører igjen til at det blir dannet ozon som har en karakteristisk lukt som kan kjennes under tordenvær. En ytre sjokkbølge brer seg utover til alle kanter og lyden av **tordenbrølet** kan høres. Grunnen til at det er ett tordenskrall og ikke en høy kort lyd, er at siden bølgene brer seg utover rundt hele lederkanalen, tar det forskjellig

tid til lyden kommer til en bestemt plass. Torden er lyd som har en fart på ca 330 m/s, slik at ved å telle antall sekunder fra lynet ses til lyden høres, kan man finne ut hvor langt unna lynet man er.

Når det første returlynet og alle dets utladningsaktiviteter har tatt slutt, ender noen ganger lysglimtet. Er dette tilfelle har vi et lyn med bare en utladning. Oftere hender det at lederlynet blir fulgt av et dartlyn. Dette er et lyn som følger lederkanalen til returlynet uten alle stoppene som lederlynet gjorde. Dartlynet har en ferdig kanal og trenger ikke å stoppe opp, og resultatet bli en kontinuerlig strøm.

I tidsintervallet fra returlynet er ferdig til dartlynet starter, skjer det J- og K-prosesser inne i skya. J står for ”junction” og K står for ”kleine” som er tysk for liten, eller for fysikerne Kitagawa og Kobayashi. K-prosessene er raske hendelser, men J-prosessen er mye langsommere. J-prosessen omfordeler ladningen i skya, etter returutladninga, på en tidsskala på noen titalls sekunder. Den har til formål å forlenge den positive lederen fra der den slutter i skya til det negativt ladde området av skya. K-prosessen er relativt raske tilbakegående strømmer fra enden av den positive lederen og de brer seg mot lynstartpunktet. Derfor kan K-prosessen betraktes som et forsøk på et dartlyn.

K- og J-prosessene prøver tilsynelatende å få returutladningskanalen lengre inn i skyen, men det er uenighet om prosessene er knyttet til starten av det påfølgende dartlynet. Både J- og K-prosessen i utladninger mellom ei sky og jorda transporterer ytterligere negativ ladning inn i og langs med en allerede eksisterende kanal eller dens rester, men de går ikke helt ned til jordoverflata (se bilde 9).

Prosessene som forekommer etter et lyn med bare en utladning eller etter det siste lynnedslaget i et lyn bestående av flere utladninger, blir kalt F (final) prosesser. De er lignende, men ikke identisk lik, J-prosessene.

Dartlederen brer seg nedover fra skyen med en hastighet på $1 \cdot 10^7$ m/s, og den ignorerer forgreiningene som lederlynet hadde (se bilde 10). Dette lynet setter igjen en ladning på omlag 1 coulomb langs kanalen, og dets maksimale strøm er på ca 1kA. Noen ledere begynner å gå i sikksakk når de nærmer seg bakken mens de sprer seg i lederen som det siste

returlynet brukte. Disse blir kalt darttrinnledere. Noen dart- eller darttrinnledere forlater kanalen som det siste returlynet lagde og danner en ny vei ned til jordoverflata.

Dartledere eller darttrinnledere nærmer seg jordoverflata med en lignende prosess som når lederlynet nådde bakken, men siden de ikke tar med alle trinnene som lederlynet hadde, går de en kortere distanse. Lynene i disse lederne bruker derfor mindre tid, og de blir møtt med en oppadgående leder fra bakken på noen meter. Når dartlederen eller darttrinnlederen får kontakt med jorda, kommer den andre (eller hvilken som helst etterfølgende) returutladningsstrømmen fra jordoverflata (se bilde 10, 11 og 12). Denne strømmen kan bli så stor som 10-15 kA i løpet av et mikrosekund, og den halveres i løpet av noen titalls mikrosekunder. Farten til et slik oppadgående returlyn er lik farten til det første returlynet, men pga fravær av forgreininger blir farten mer stabil siden forgreiningene forårsaket raske fall av farten.

Den impulsive komponenten av strømmen i et forgreinet returlyn er ofte fulgt av en vedvarende strøm som har en størrelse på noen titalls til hundredetalls av ampere og en varighet opp til noen hundredetalls av millisekunder. Mellom 30 og 50 % av alle negative lyn mellom jordoverflata og skyer inneholder en lang og vedvarende strøm med en varighet som overstiger 40 ms. Kilden til slike vedvarende strømmer er ladningen i skya, i motsetning til ladningen som er fordelt i lederkanalen.

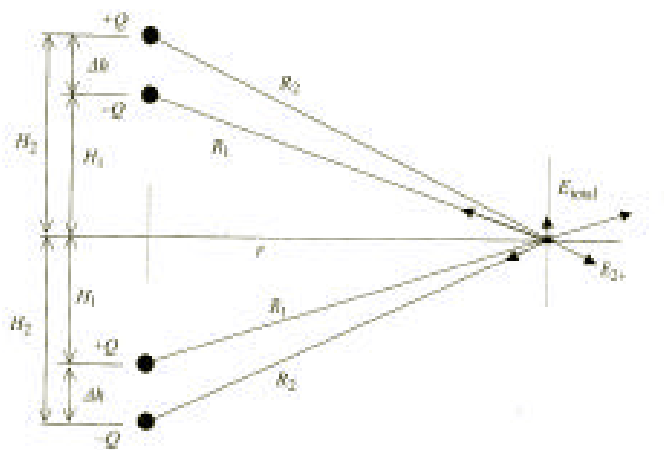
Tidsintervallet mellom vellykkede returslag i et glimt er vanligvis flere titalls millisekunder, men er det en lang og vedvarende strøm, kan det komme opp i flere hundre millisekunder. Returslaget kan også være så kort at det har en varighet på mindre enn ett millisekund. Total varighet på et glimt er vanligvis noen hundre millisekunder, og total ladning overført til bakken er noen titalls coulomb.

Observasjoner gjort av Ogawa viser at et sky til bakke lyn har en total varighet fra 10 ms til 2 s, med en typisk verdi på 300 ms. Den totale utladningen anslår han til å være fra 1-400 C, med en typisk verdi på 20 C.

Prosentandelen av lyn som har bare en utladning er blitt satt til 14 - 21%, noe som betyr at de aller fleste av de negative lynene mellom ei sky og jordoverflata inneholder mer enn en utladning.

5.1 Elektrostatisk felt fra en dipol [1]

Målinger indikerer altså at tordenskyer har bipolar struktur, med en nedre negativt lada del og en øvre positivt lada del. Derfor kan tordensky tilnærma modelleres som en dipol, så lenge det sakte varierende feltet på bakken er bevart. For enkelhets skyld kan vi regne at ladningsfordelingen for negativt og positivt lada områder er kulesymmetrisk, selv om ladningsfordelingen er mer utbredt horisontalt enn vertikalt. Ladnings- sentrene er atskilt med en avstand Δh . Vi antar at jorda er en flat og perfekt leder. Vi skal nå se på hvordan det elektrostatiske feltet på bakkenivå ser ut som funksjon av avstand fra tordensky. Ei geometrisk framstilling av problemet er vist i figuren nedenfor:



Figur 16; Diagram for beregninger av det elektriske feltet fra en dipol over bakken [1].

Det elektriske feltet ved bakken fra ladningen $+Q$ ved høyden H_2 er gitt ved

$$E_{2+} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_2^2} \quad (1)$$

der $R_2 = \sqrt{H_2^2 + r^2}$. Retninga til E_{2+} er som vist i figuren. Det samme er retninga fra andre punktladninger. Ut ifra geometrien i figuren er det klart at det ikke er noen netto horisontal komponent til det elektriske feltet på bakkenivå. Vi definerer en netto vertikal komponent

$$E_{total}.$$

Bidraget fra E_{2+} i retninga til E_{total} er gitt ved multiplikasjon av (1) med $-H_2/R_2$, dvs.

cosinusen til vinkelen mellom vektorene E_{total} og E_{2+} . Påvirkningen fra induerte ladninger i inkludert via den såkalte speilladningen $-Q$ i posisjon $-H_2$. Ved å addere opp bidragene til

E_{total} fra de to punktladningene og deres speilladninger får vi et uttrykk for det totale elektriske feltet:

$$E_{total} = \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[\frac{H_1}{R_1^3} - \frac{H_2}{R_2^3} \right] \text{ der } R_1 = \sqrt{H_1^2 + r^2} \quad (2)$$

Avstanden mellom punktladningene er Δh og $H_2 = H_1 + \Delta h$. Når verdien til den horisontale avstanden r økes, forandrer E_{total} polaritet fra positiv verdi når $r \ll H_1$ til negativ verdi når $r \gg H_1$. I mellom disse ytterpunktene er det verdier av r hvor det netto elektriske feltet blir null. Denne verdien finnes ved å sette ligningen over lik null. Det er observert at det elektriske feltet ved bakken som blir dannet ved tordenvær reverserer fortegn når tordenværet nærmer seg observeringsstedet fra langt unna.

5.2 Magnetisk felt fra en rettlinja strøm [1].

Ved en ladningsutladning mellom sky og jordoverflata er lederen og returlynkanalen tilnærma vertikal og bærer en strøm. Denne strømmen varierer stort sett raskt med tiden. Her ser vi likevel for enkelhets skyld på en rettlinja strøm over bakken som er retta oppover og som er fast eller bare varierer sakte med tiden. Effekten fra bakken på det magnetiske felte er tatt i betraktning ved at vi ser på en kanal som er et speilbilde av returlynkanalen. Denne kanalen har lik strøm som også er retta oppover.

Det magnetiske feltet i en avstand R fra strømelementet $I dz$ er gitt ved Biot-Savarts lov,

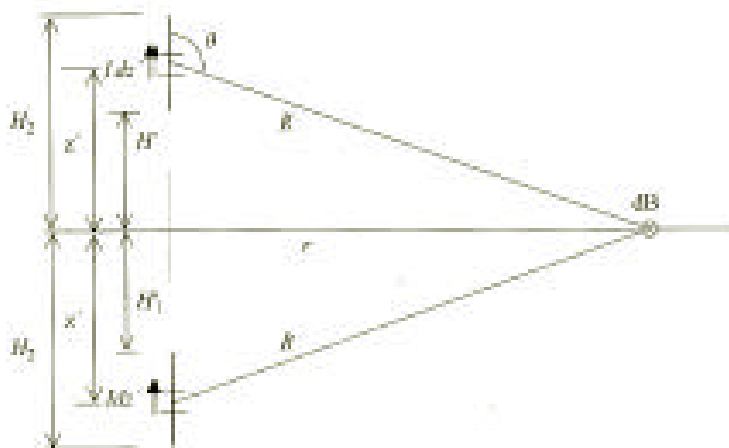
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I dz}{4\pi R^2} \cdot (\hat{z} \times \hat{R}) \quad (3)$$

hvor $\hat{z}$ er enhetsvektor i retning strømmen og $\hat{R}$ er enhetsvektor i retning mot feltpunktet fra strømelementet $I dz$.

Vi har at:

$$\hat{z} \times \hat{R} = \sin\theta \hat{f} = \frac{r}{R} \hat{f}$$

hvor $R = \sqrt{z^2 + r^2}$ og $\hat{f}$ er enhetsvektoren i retninga til magnetfeltet.



Figur 17; Diagram for beregninger av det magnetiske feltet fra en linjestrøm over bakken [1].

Det totale magnetiske feltet fås ved å integrere ligning (3) over lengden til kanalen.

”Speilstrømmen” genererer også et likt magnetisk felt ved en horisontal avstand r og i samme retning. Derfor er bidraget fra ”speilstrømmen” inkludert ved å multiplisere ligning (3) med 2.

Det totale magnetiske feltet er gitt ved:

$$\bar{B} = \frac{m_0 I}{2p} \cdot \int_{H_1}^{H_2} \frac{r}{(z^2 + r^2)^{3/2}} \cdot dz \hat{f} = \frac{m_0 I}{2pr} \cdot \left[\frac{H_2}{\sqrt{H_2^2 + r^2}} - \frac{H_1}{\sqrt{H_1^2 + r^2}} \right] \cdot \hat{f} \quad (4)$$

Dersom en jevn strøm flyter mellom bakken ($H_1 = 0$) og ladningen sentrert ved en høyde

H ($H_2 = H$), så blir ligning (4):

$$\bar{B} = \frac{m_0 I}{2pr} \cdot \left[\frac{H}{\sqrt{H^2 + r^2}} \right] \cdot \hat{f} \quad (5)$$

Veldig nærme kanalen ($r \ll H$) blir det magnetiske feltet:

$$\bar{B} = \frac{m_0 I}{2pr} \cdot \hat{f} \quad (6)$$

og i store avstander fra kanalen ($r \gg H$) blir de magnetiske feltet:

$$\bar{B} = \frac{m_0 IH}{2pr^2} \cdot \hat{f} \quad (7)$$

5.3 Eksempler [1,2]:

Elektrisk feltstyrke:

Høyden for positiv ladning inne i skya: $H_2 = 12\,000\text{ m}$

Høyden for negativ ladning inne i skya: $H_1 = 7\,000\text{ m}$

$$\Rightarrow \Delta h = 12\,000\text{ m} - 7\,000\text{ m} = \underline{5\,000\text{ m}}$$

Størrelsesorden for positiv ladning: $Q = 40\text{ C}$

Størrelsesorden for negativ ladning: $Q = -40\text{ C}$

Ser på en avstand $r = 500\text{ m}$ i fra tordenskyen.

Det totale elektriske feltet i avstand r uttrykkes ved ligning (2):

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[\frac{H_1}{R_1^3} - \frac{H_2}{R_2^3} \right] \quad (R_1 = \sqrt{H_1^2 + r^2}) \\ &= (9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 40) \cdot \left[\frac{7000}{(7000^2 + 500^2)^{3/2}} - \frac{12000}{(12000^2 + 500^2)^{3/2}} \right] \\ &= 7,2 \cdot 10^{11} [20 \cdot 10^{-9} - 7 \cdot 10^{-9}] \\ &= \underline{9360\text{ (V/m)}} \end{aligned}$$

Vi ser at dette feltet er av størrelsesorden hele 100 ganger større enn feltet mot jordoverflaten på en godværsdag!

Magnetisk feltstyrke:

Strømmen i returlynet (maksstrømmen): $I = 30\,000\text{ A}$

Nær tordensky, $r \ll H$ (her har vi valgt $r = 100\text{ m}$), kan det magnetiske feltet gis som:

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \cdot \hat{f} \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30000}{2\pi \cdot 100} \\ &= 1,00006\text{ T} = \underline{600 \cdot 10^{-6}\text{ T}} \end{aligned}$$

Det magnetiske feltet i en avstand 100 meter fra selve lynet er altså $600\text{ }\mu\text{T}$. Til sammenligning vet vi at magnetfeltet fra jorda er $50\text{ }\mu\text{T}$.

Oppsummering

Den vanligste årsaken til at tordenskyer dannes er konveksjon. Lufta ved bakken varmes opp av sola og begynner å stige helt til den kondenserer til Cumulus- og videre til Cumulonimbuskyer. Dersom disse utvikler seg til fullmodne tordenskyer, vil det i tillegg til oppdrift, også dannes nedadgående luftstrømmer. Vi får da en ladningsfordeling i skya.

Øverst i skya dannes et positivt ladningssenter, og i midten og nedre deler av skyen oppstår negativ ladning. I tillegg har vi noe positiv ladning nederst i skya. Det er to hovedhypoteser for hvordan ladningene fordeles; konvektiv- og nedbørshypotese. Den konvektive hypotesen går ut på at luftstrømmer fører positive ladninger oppover, og negative ladninger nedover. I nedbørshypotesen kolliderer nedbørspartikler i skya og får ulik ladning. De lette, positive lada partiklene blir ført opp med luftstrømmer, mens de tyngre, negativt lada partiklene faller nedover. På grunn av denne ladningsfordelinga i skya, oppstår det et elektrisk felt mellom skya og jordoverflata

Lyn er ladningsutladninger som kan skje mellom sky, luft og jordoverflata. Det er fire forskjellige utladninger mellom skyer og jordoverflata, og 90% av de globale lynene er negativt, nedadgående lyn. Selve utladningsprosessen er komplisert. Etter at skya har fått ladningsfordeling, begynner en leder fra skya å gå ned mot jordoverflata. Der blir den møtt av en oppadgående leder fra jordoverflata. Når disse møtes, er det blitt dannet en fullstendig kanal fra skya til bakken. Det blir ladningsutvekslinger ved at det går returlyn fra bakken til skya.

Konklusjon

Prosjektet har vært veldig lærerikt og interessant, men også tidkrevende. Vi har lært mye om dannelsen av lyn og lynprosessen, og har dermed funnet ut en stor del av det vi lurte på. Selv om vi nå forstår mye mer av lynprosessen, har vi innsett hvor uvitende vi faktisk er. Dette er et veldig stort og vanskelig tema med mange ubesvarte spørsmål.

Selv om det var vanskelig å finne stoff, så ordnet det seg til slutt. Vi fikk også god hjelp underveis.

Samarbeidet i gruppa har vært kjempebra! Alle har tatt ansvar og vært villige til å gjøre en innsats. Det har ikke vært noe problem å fordele oppgaver, men heller det å passe på at noen ikke tar på seg en for stor del av oppgaven.

Takk til:

Jon Andreas Støvneng for hans veiledning og interesse i prosjektet vårt. Det har vært en viktig motivasjonsfaktor for oss.

Reidar Svein Sigmond for engasjement og gode råd underveis. Han lånte også ut litteratur og leste igjennom første utkast av det vi hadde skrevet.

Egil Lillestøl for fin respons på våre spørsmål.

Referanseliste:

Bøker:

- [1] The lightening flash, Vernon Cooray, The Institution of Electrical Engineers, London, 2003
- [2] Lightning; Physics and effects, Rakov og Uman, Cambridge University press, Cambridge, 2003
- [3] Generell fysikk for universiteter bind 2, Lillestøl Hunderi Lien, Universitetsforlaget, Oslo, 2001
- [4] Været, Whitaker mf, Gyldendal, Oslo, 1998
- [5] Natursjokk, Andrew Robinson, Grøndahl og Dreyers forlag AS, Oslo, 1995
- [6] Meteorology, Levin Abram Danielson, The McGraw-Hill Companies, New York, 2003
- [7] Tornadoer og annet dramatisk vær, Michael Allaby, Gyldendal, Oslo 2002

Tidsskrifter:

- [8] Illustrert Vitenskap nr 4, Bonniers Specialmagasiner A/S, København, 1995

Internettider:

- [9] http://met.no/met/met_lex/q_u/skyer5.html
- [10] <http://thunder.msfc.nasa.gov/primer/>
- [11] http://met.no/met/met_lex/q_u/torden.html

Personer:

- [12] Reidar Svein Sigmond

Forsidebildet er hentet fra [7].

Prosjekt i Elektrisitet og magnetisme (FY1303)

Solceller

Av

Kristian Hagen
Torbjørn Lilleheier

Innholdsfortegnelse

<u>Sammendrag.....</u>	<u>3</u>
<u>Innledning.....</u>	<u>4</u>
<u>Bakgrunnsteori.....</u>	<u>5</u>
Halvledere.....	5
Dopede halvledere	7
Pn-overgang	9
Solcellens oppbygning	12
Effektivitet	13
Tap av effektivitet i solcellen	15
<u>Eksperiment.....</u>	<u>17</u>
<u>Utgangspunkt.....</u>	<u>21</u>
Effekt inn på solcella.....	21
Utleddning av V_m , I_0 , I_m og R_m	22
<u>Vurdering.....</u>	<u>25</u>
<u>Konklusjon.....</u>	<u>26</u>
<u>Kilder.....</u>	<u>27</u>

Sammendrag

I dette prosjektet skal vi ta for oss flere temaer innenfor solceller.

Vi skal blant annet se på teorien bak solceller, hva en halvleder er og hvilke egenskaper den har. I tillegg skal vi se nærmere på hva som skjer dersom vi doper en halvleder. Vi skal også gjøre rede for hva en pn-overgang er, dens egenskaper, og hvordan man kan utnytte denne til å lage strøm fra lys. Dette er utgangspunktet for en solcelle.

I tillegg skal vi se på faktorer som gjør at strømmen man kan få utnyttet i en solcelle reduseres. Vi skulle selvfølgelig ønske at alt lyset som fant veien til solcella kunne bli utnyttet i form av elektrisk strøm, men dette er altså ikke tilfelle.

Ved hjelp av et solcellepanel, ei lampe og en del måleinstrumenter utførte vi et eksperiment. Her målte vi blant annet strøm og spenning over solcella. Noe som kanskje var mer interessant var hvor stor elektrisk effekt vi greide å få ut, kontra hvor mye lys som skinte på solcella. Dette skal vi også se nærmere på.

Ut av eksperimentet vårt fikk vi en del måleresultater. Vi skal sammenligne disse med teoretiske. Ved hjelp av en del utregninger skal vi til å se hvordan man kommer fram til formler for blant annet hvilken motstand man får størst effekt.

Til slutt vil vi også ta med en sammenligning av de teoretiske verdiene mot de verdiene vi fikk i eksperimentet vårt.

Innledning

Vi bruker i dag mye fossilt brennstoff. Bruken av fossilt brennstoff fører til utslipp av karbondioksid. Det er bevist at karbondioksid i atmosfæren fører til økt drivhuseffekt. Drivhuseffekt vil si at mer stråling på vei ut av atmosfæren blir reflektert tilbake til jorda og mindre energi slipper ut. Dette fører til at klimaet på jorden blir varmere. Et varmere klima kan påvirke den økologiske balansen på jorda.

Innstrålt effekt fra sola på jordens overflate er $1353 \frac{W}{m^2}$. Denne energien tilsvarer den energien som skal til for å varme opp mer enn 3 desiliter vann $1^\circ C$ per sekund.

Solceller er veldig aktuelt for å lage strøm i verdensrommet til for eksempel satelliter. Solceller er godt egnet i verdensrommet fordi de veier lite samtidig som de har lang holdbarhet. Dette er to viktige kriterier innenfor romfart.

Produksjon av solceller er i dag ganske kostbart og strømmen man klarer å produsere med solceller er begrenset. Dette medfører at solceller i dag ikke er en av de mest lønnsomme måtene å produsere strøm på.

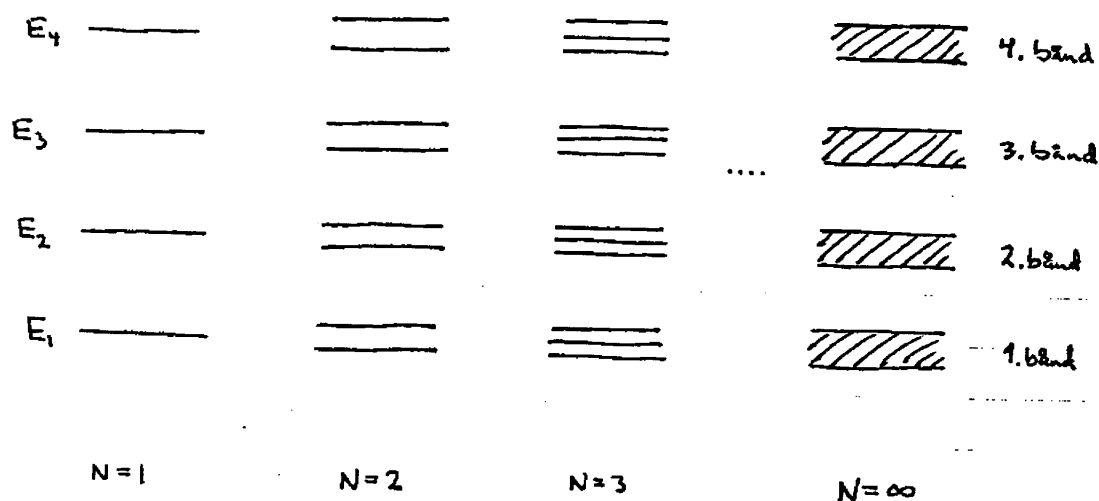
Kanskje kostnadene ved dyrere, men mer miljøvennlig strøm er noe verdenssamfunnet må ta på seg. Kanskje forskning på solceller kan øke effektiviteten slik at framtidens solceller blir økonomisk gunstige. Kanskje vi i framtiden slipper å bekymre oss over ikke-fornybare, forurensende energikilder?

Bakgrunnsteori

Halvledere

Faststoff materialer kan deles inn i tre grupper. Disse er ledere, isolatorer og halvledere. På atomært nivå kan disse sees på som krystaller. Det vil si at atomene ligger lagvis og ordnet avhengig av hva slags type krystall det er snakk om. Denne typen ordnet oppbygning kalles et gitter. I en krystall vil aldri et atom bevege seg langt vekk fra en unik, fiksert posisjon.

Elektroner har diskrete tillatte energinivåer. I følge kvantefysikken er det kun to elektroner som kan ha nøyaktig samme energi (spinn opp og spinn ned). I det to atomer kommer nærme hverandre vil de dele seg opp i to nivåer som ligger nær hverandre. I det mange atomer kommer sammen vil energinivåene ligge veldig tett sammen og danne tilnærmede kontinuerlige energibånd. Det vil bli noe tilsvarende som figuren under.



Dersom man nå ser på situasjonen ved $T=0$ (null temperatur) vil elektronene fylle opp de laveste energinivåene. I det elektronene har fylt opp de laveste energitilstandene, er de høyere nivåene tomme for elektroner. Energibåndene som er oppfylt av elektroner kalles valensbånd, mens energibåndene som ikke har elektroner kalles ledningsbånd. Dette er ikke helt tilfellet i praksis siden $T > 0$ og termiske eksitasjoner vil forekomme, men det er uansett veldig mye høyere konsentrasjon av elektroner i valensbåndet enn i ledningsbåndet.

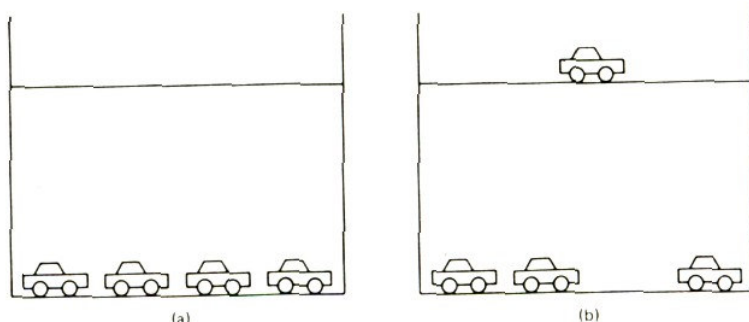
Energinivået til bunnen av ledningsbåndet betegnes gjerne med E_C og energinivået til toppen av valensbåndet betegnes med E_V . Energigapet mellom de to er gitt ved $E_G = E_C - E_V$.

Størrelsen på E_G avgjør om det er en isolator, halvleder eller leder. Dersom energigapet er stort slik at mye energi må tilføres for å løsrive et elektron, er det en isolator. E_G i en isolator er av størrelsesorden 5eV . I en halvleder er $E_G \approx 0,5 - 1,5\text{eV}$. I et metall derimot er $E_G = 0$.

I en halvleder i romtemperatur vil elektroner hele tiden bli eksitert og bevege seg rundt i krystallen og rekombinere med andre atomer. I fravær av et elektron vil det oppstå et hull. Dette hullet kan enklest beskrives ved å late som det er en partikkel med positiv ladning. Det vil si at dersom elektroner opptar posisjoner og beveger seg i en retning, kan man si at hullene beveger seg i motsatt retning. Dette blir analogt med å anse at det er luftboblene i vann som stiger, når det egentlig er vannet som faller ned i tomrommet.

I en ren halvleder er det like mange elektroner (betegnes med n) som hull (betegnes med p). Dvs. $n = p$.

En god analogi er et parkeringshus med to nivåer.



Dersom bilene nå representerer elektroner så er i bilde a det nederste (valensbåndet) fylt opp. I det den ene bilen "eksiteres" til ledningsbåndet, blir det en ledig plass i valensbåndet. Fravær av bil (elektron) tilsvarer at det oppstår ett hull.

Sannsynligheten for at et elektron er eksitert fra valensbåndet til ledningsbåndet er tilnærmet gitt ved

$$f \approx e^{-E_G/2k_B T}$$

k_B er Boltzmans konstant.

Man ser her at denne sannsynligheten er avhengig av størrelsen på energigapet og temperaturen.

Tettheten av eksiterte elektroner er gitt ved

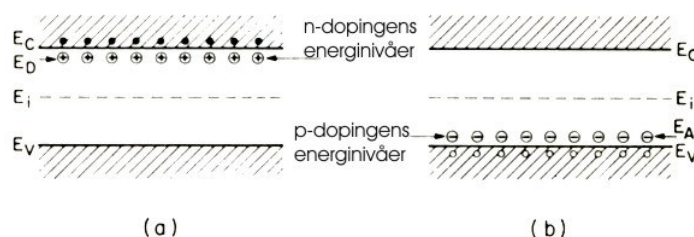
$$n = n_0 e^{-E_G/2k_B T}$$

Ut av dette ser man at dersom energigapet er stort, vil både sannsynligheten for å finne et elektron i ledningsbåndet være liten og tettheten av elektroner i ledningsbåndet være liten.

Dopede halvledere

For å lage en pn-overgang må man nødvendigvis ha en p-halvleder og en n-halvleder. Grunnen til at man doper er for å endre egenskapene til halvlederen.

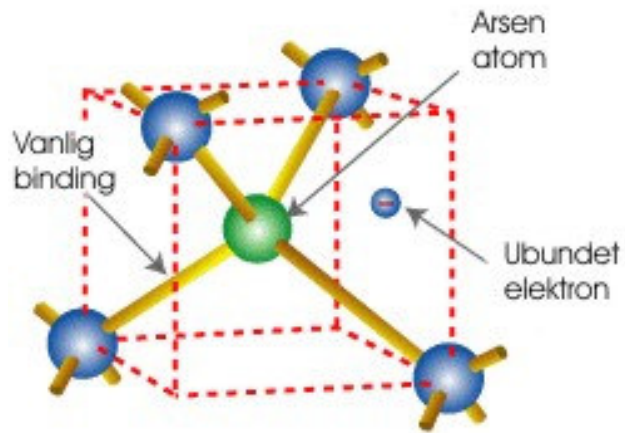
Forskjellige atomer har forskjellige tillatte energinivåer som er karakteristiske for akkurat denne typen atomer. Det er en fordel om man doper halvlederen med en type atomer der øverste energinivå som er fylt av elektroner, ligger nært bunnen av ledningsbåndet og nært toppen av valensbåndet i henholdsvis n-dopet og p-dopede halvledere. Dette er illustrert i figuren under.



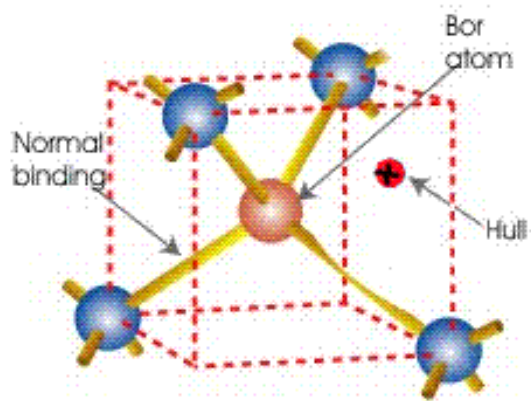
Ved n-doping tilsetter man atomer som har det høyeste okkuperte energinivået tett oppunder ledningsbåndet til halvlederen. Sagt på en annen måte så gjør dette at de elektronene ikke trenger mye energi for å bli frigjort fra donoratomet. I eksempelet over innebærer det at det høyeste okkuperte energinivået for arsen ligger like under bunnen av ledningsbåndet til silisium. Energien som skal til for å eksitere et elektron fra arsenforurensningen og opp i ledningsbåndet er svært lite. Dette medfører at termiske eksitasjoner alene vil være nok til å få eksitert elektroner.

Når det gjelder p-doping, tilsettes et stoff som har sitt energinivå like over valensbåndet til halvlederen. Energiforskjellen fra toppen av valensbåndet til dette nivået er tilsvarende lite som det var for elektronene og ledningsbåndet i n-halvlederen. Dette medfører på tilsvarende måte at termisk energi er nok til å eksitere elektroner fra toppen av valensbåndet til dette energinivået, og dermed tilføre halvlederen nyere hull.

Et eksempel på en n-halvleder er dersom man tilfører arsenatomer til silisium. Arsen har 5 valenselektroner mens silisium har 4. Dette fører til at arsenatomet binder seg til 4 silisium atomer, men det har i tillegg et ekstra elektron som lett kan bli eksitert opp i ledningsbåndet til silisium. Halvlederen er fortsatt elektrisk nøytral. Selv om den har fått mange frie elektroner, har arsenatomene blitt ionisert slik at de har fått positiv ladning.



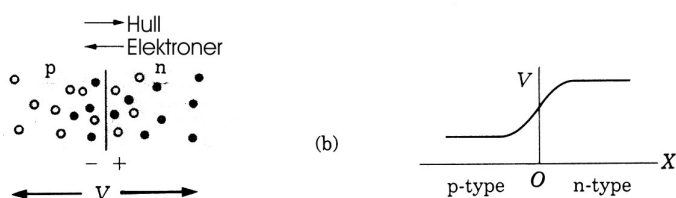
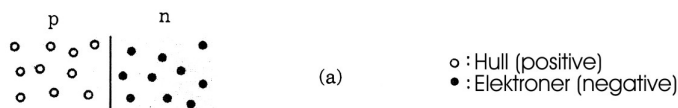
En typisk p-halvleder er silisium dopet med boratomer. Boratomer har 3 valenselektroner og i det de binder seg til silisium vil boratomet bli negativt og man får frigjort et hull. Dette står forholdsvis fritt til å bevege seg.



Pn-overgang

I det man kobler sammen en p- og en n-halvleder, vil dette skape diffusjon av frie ladninger. De frie elektronene i ledningsbåndet fra n-siden vil bevege seg over til p-siden fordi det er større konsentrasjon av elektroner på n-siden. Der vil de falle ned i ledige tilstander i valensbåndet. Dette kalles rekombinasjon.

På samme måte vil hullene på p-siden diffundere over til n-siden fordi det er færre hull på den siden. Både p- og n-siden var i utgangspunktet elektrisk nøytrale. Nå har n-siden fått tilført positive hull, mens p-siden har fått tilført negative elektroner.



På grunn av konsentrasjonsforskjellen av elektroner og hull, har vi nå en potensialforskjell mellom p-siden og n-siden. Dette fører til at det blir dannet et elektrisk felt. Dette feltet har retning slik at elektroner går fra p-siden og over til n-siden. For hull blir det motsatt. Dette elektriske feltet skapes nær overgangene der vi har potentialspranget fra n-siden til p-siden. Denne diffusjonen av elektroner og hull vil fortsette kontinuerlig. Diffusjonsstrømmen kan uttrykkes ved

$$I_{diff} = I_0 e^{\frac{eV}{kT}}$$

I_0 er metningsstrømmen i materialet. Den er liten og konstant.

k er Boltzmanns konstant

T er temperaturen.

V er potensialforskjellen. Det er viktig å merke seg at dette ikke «er» den innebygde potensialforskjellen mellom p-siden og n-siden. Dette er derimot potensialforskjellen dersom man kobler til en ytre spenning. Dette kommer vil tilbake til om litt. Dersom det ikke er påtrykt noen ytre spenning, vil diffusjonsstrømmen bare bli

$$I_{diff} = I_0$$

I tillegg medfører diffusjonsstrømmen også en driftstrøm. Uten ytre påvirkning vil driftstrømmen være like stor som diffusjonsstrømmen og systemet er i dynamisk likevekt.. Driftstrømmen uttrykkes som

$$I_{drift} = -I_0$$

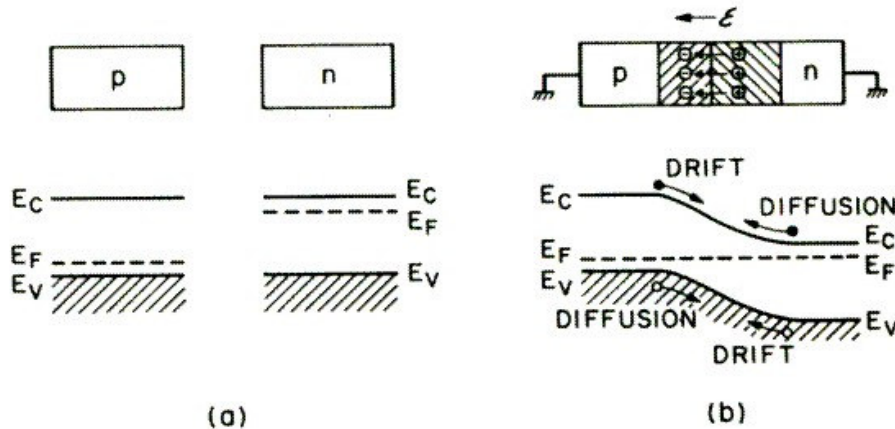


Fig: Viser hvordan strømmene går i en pn-overgang.

Som nevnt tidligere har vi i likevekt

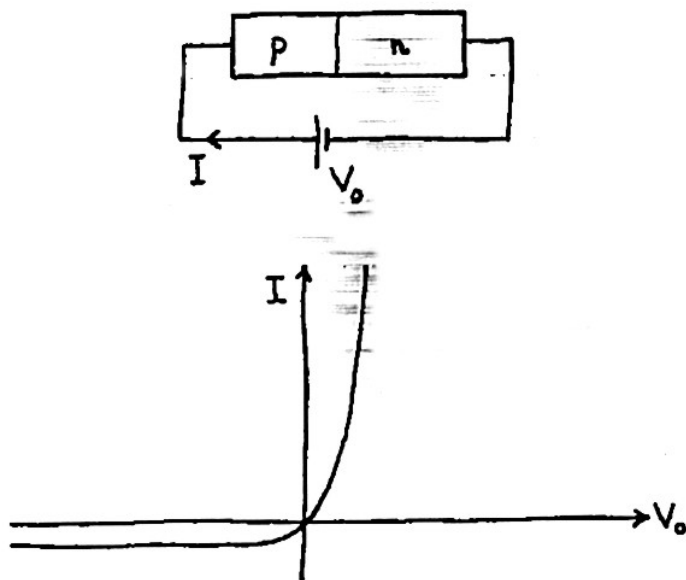
$$I_{drift}^C + I_{diff}^C = 0 \text{ og}$$

$$I_{drift}^V + I_{diff}^V = 0$$

Dersom vi påtrykker strømkretsen en ytre spenning, vil ikke systemet lenger være i likevekt. Hvis vi kobler på en spenning $V < 0$ vil potensialforskjellen mellom p-siden og n-siden bli enda større. Dette påvirker ikke I_{drift}^C siden den er proporsjonal med konsentrasjonen av elektroner. På tilsvarende måte vil dette heller ikke påvirke I_{drift}^V som er proporsjonal med konsentrasjonen av hull. I_{diff}^V og I_{diff}^C derimot har fått et større potentialsprang de må overvinne for å diffundere over til den andre siden. Dermed blir disse to strømmene redusert.

Dersom vi i stedet kobler på en spenning $V > 0$ vil potensialforskjellen mellom p-siden og n-siden bli mindre. I_{drift}^C og I_{drift}^V vil bli forholdsvis uendret siden de er proporsjonal med konsentrasjon av elektroner og hull på deres respektive sider.

I_{diff}^V og I_{diff}^C har nå fått et mindre potentialsprang å overvinne for å diffundere over. Dette påvirker elektroner (på n-siden) og hull (på p-siden) slik at diffusjonsstrømmen vil øke eksponentielt.



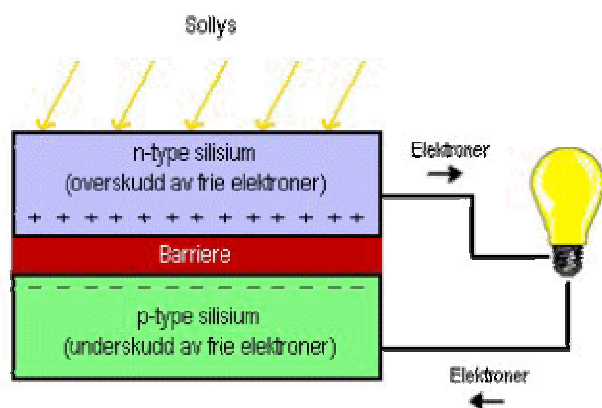
Dette gir den totale strømmen i en pn-overgang. Den skrives som

$$I_{pn} = I_{diff} - I_{drift} = I_0(e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

Vi ser både av utregningen og av grafen over at med $V > 0$ øker strømmen eksponentielt med hvor stor spenning vi påtrykker. Har vi derimot $V < 0$ vil vi ikke få noe særlig strøm.

Solcellens oppbygning

En solcelle er essensielt pn-overganger tilkoblet en krets.



For å forstå hvordan man kan få generert strøm ved at fotoner treffer et solcellepanel kan det være enklest å tenke på lys som en strøm av partikler (fotoner). Sola sender ut et stort antall fotoner med forskjellig energi, uttrykt ved

$$E = h\nu$$

Her er h Plancks konstant og ν er frekvensen til det innkommende lyset. I det et foton absorberes av et elektron, vil elektronet få tilført energi. Dersom det absorberte fotonet hadde tilstrekkelig energi, vil elektronet løsne seg fra bindingen det har til atomet. Det vil da komme opp i ledningsbåndet. Dersom det løsrivne elektronet befinner seg på p-siden, vil det elektriske feltet kunne transportere det over på n-siden. I det mange elektroner blir eksitert på denne måten og kommer opp i ledningsbåndet på n-siden, vil dette tilsvarende øke strømmen gjennom kretsen. Det vil si at jo mer intenst lys man har, jo mer strøm vil gå gjennom kretsen. Vi har at den totale strømmen I som går gjennom kretsen med lys på solcellepanelet.

$$I = I_{\omega} - I_{pn} = I_{\omega} - I_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

I_{ω} er strømmen generert av lyset.

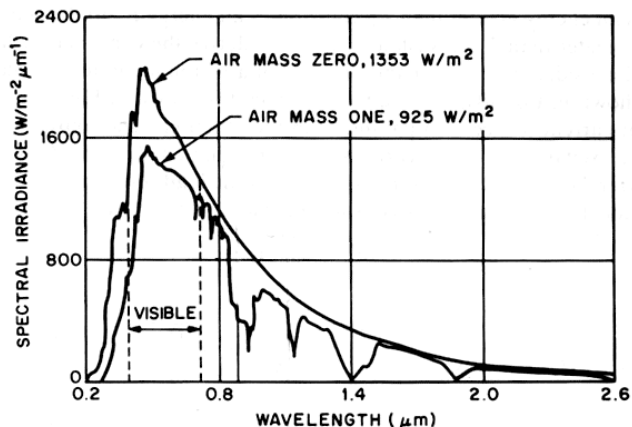
En omskrivning av dette uttrykket gir

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{\omega}}{I_0} + 1 \right)$$

som er et uttrykk for spenningen over solcella når den ikke er koblet i en krets. V_{oc} kommer vi til å bruke en del etter hvert.

Effektivitet

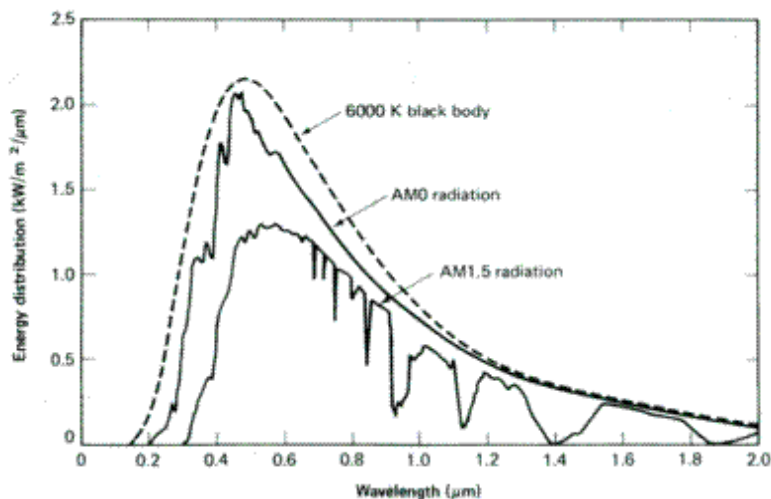
Hvor mye energi vi klarer å dra nytte av fra solcellepaneler har flere begrensninger. En begrensning er den teoretiske grensen for hvor stor effektivitet vi kan få fra en pn-overgang. Før vi ser nærmere dette betrakter vi solas lyskarakteristikk.



Figur: Solas strålings karakteristikk.

Den øverste grafen i figuren viser lysets strålingskarakteristikk utenfor atmosfæren, mens den underste viser lysets karakteristikk under atmosfæren. Forskjellen mellom de to grafene kommer av at lyset svekkes i atmosfæren. Spesielle bølgelengder blir absorbert av ozon og vanndamp, mens det i tillegg er en generell spredning fra støv.

Dersom vi forenkler lyskarakteristikken fra sola til nærmeste lyskarakteristikk for et sort legeme, finner vi at det er karakteristikken til et sort legeme med en temperatur på 6000 K som er nærmest.

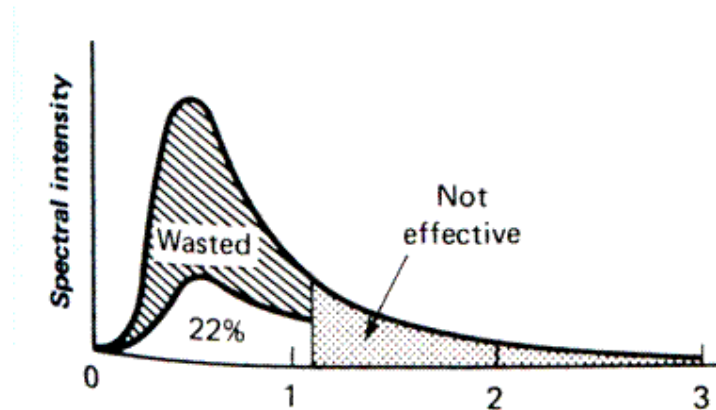


Figur: Viser lyskarakteristikken fra sola og fra et sort legeme med $T = 6000 \text{ K}$

Uttrykket for det sorte legemet er gitt ved:

$$E(\nu) = \frac{8\pi h\nu}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

En viss energi skal til for å eksitere et elektron over potensialforskjellen i en pn-overgang. Kun fotoner med mer energi enn det som skal til for å eksitere et elektron over energigapet bidrar til å til den elektriske energien. Den energien fotoner har mer enn det som skal til for å eksitere et elektron over energigapet, går bort til termisk energi og bidrar ikke til den elektriske energien.

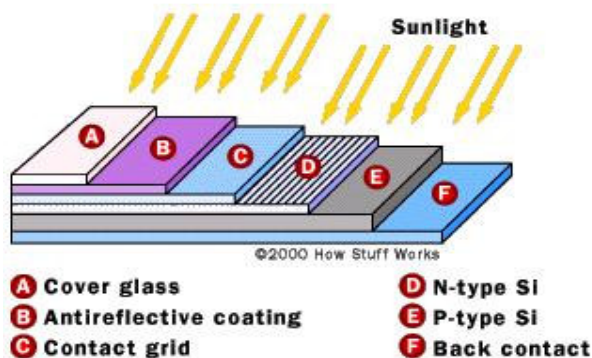


Dette vil si at en maksimalt ved en pn-overgang kan utnytte 32,4 % av solas energi.

For å få en pn-overgang som drar nytte av denne mest egnede bølgelengden trenger vi en pn-overgang med en potensialforskjell i likevekt på 0,14 eV.

Tap av effektivitet i solcellen

Det vi har sett på til nå har vært ideelle pn-overganger og ideelle forhold for en solcelle. Dette er som sagt ikke tilfellet i virkeligheten. Det eksisterer en rekke faktorer som bidrar til å minske effektiviteten til en solcelle. Silisium, som de fleste solceller blir laget av, er et skinnende materiale som i seg selv reflekterer ca. 30 % av alt lyset som skinner på det. Solceller derimot er utstyrt med antireflekerende lag som gjør at refleksjonen blir betydelig mindre. To lag med silisiummonoksid kan redusere refleksjonsprosenten betydelig slik at omtrent 4 % av lyset blir reflektert.

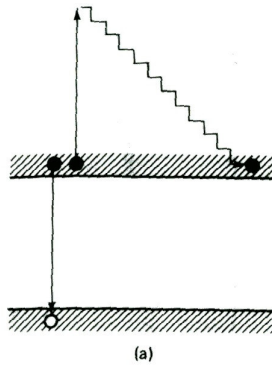


Et annet punkt er at solceller er laget slik at metallkontaktene som kobler p-siden sammen med n-siden gjerne blokkerer for deler av solcella. Disse kan blokkere ute 5-15 % av det innkommende lyset. I tillegg er det ikke riktig alt lyset som blir stoppet av solcella. Noe av lyset går rett gjennom solcella uten å avgi energi til solcella.

Det er selvfølgelig også en motstand i solcella og kretsen koblet til den. Det vil alltid være en liten motstand i metallkontaktene mellom p-siden, n-siden og i ledningene slik at noe av det som kunne blitt utnyttet som strøm blir gjort om til varme i stedet.

Dersom man betrakter solcella på atomnivå er det også noen faktorer som gjør at effektiviteten reduseres. En del av fotonene som faller inn på solcella har ikke nok energi til å løsribe et elektron slik at det eksiteres opp i ledningsbåndet. Dette fører til at elektronet får tilført noe energi, men ikke tilstrekkelig. Elektronet befinner seg da fortsatt i valensbåndet. Denne ekstra energien går over til varme etter kort tid. Tilsvarende kan et energirikt foton tilføre så mye energi til elektronet at det eksiteres opp i ledningsbåndet, men det blir i tillegg eksitert høyt opp i ledningsbåndet slik at det etter kort tid faller ned igjen og kun har den energien som er "vanlig" for eksiterte elektroner. Denne ekstra energien blir også omgjort til varme.

En figur som illustrerer dette er på neste side.

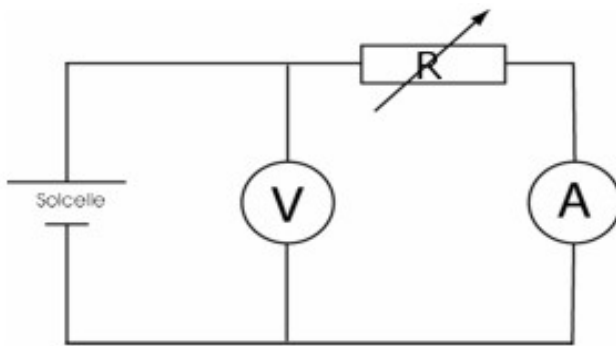


Dersom et elektron blir eksitert opp i ledningsbåndet av et foton er det ikke nødvendigvis sikkert at elektronet "finner veien til" pn-overgangen. Dersom denne eksitasjonen skjer et stykke fra pn-overgangen, er det store sjanser for at elektronet og et hull vil rekombinere før elektronet kommer til overgangen og vi kan utnytte det som elektrisk strøm. Dette er grunnen til at overflaten til en solcelle har mange slike pn-overganger. På denne måten vil et eksitert elektron aldri være langt fra en pn-overgang.

Eksperiment

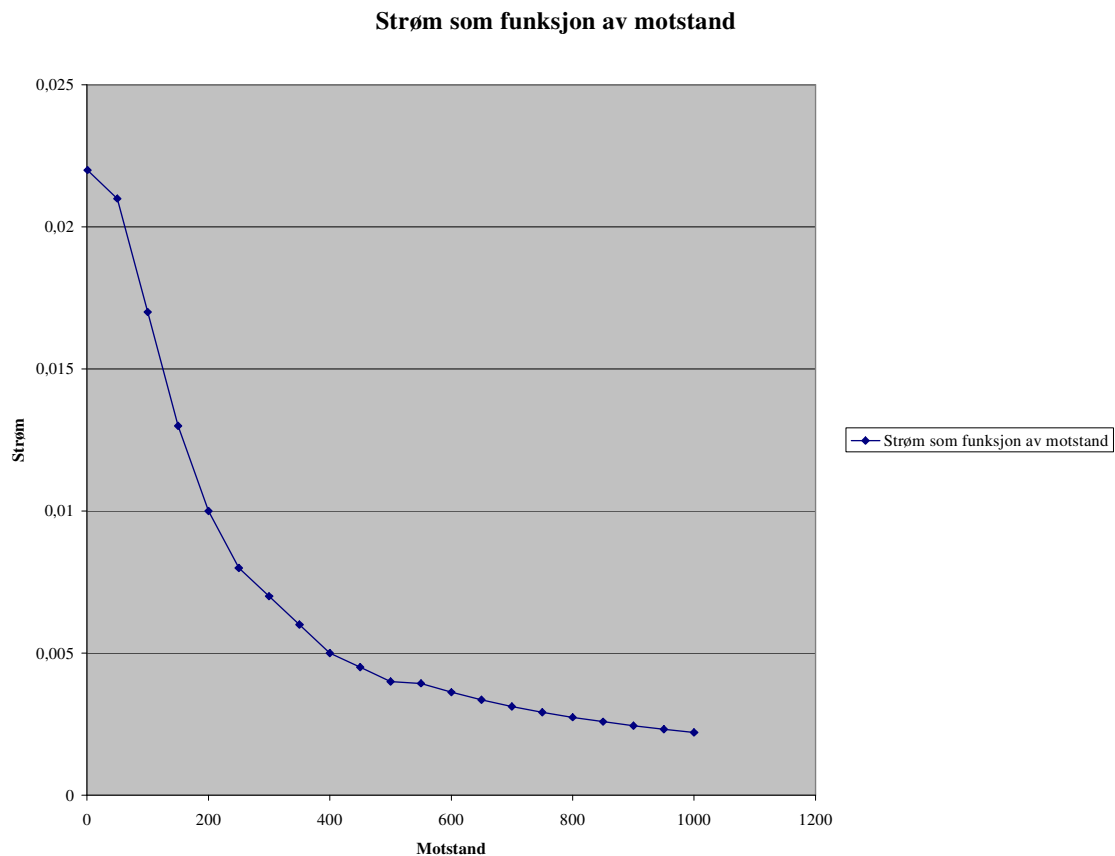
Vi utførte et eksperiment for å se på strøm, spenning og effektkarakteristikken for et solcellepanel.

Vi koblet et solcellepanel i serie med en variabel motstand og et amperemeter. Spenningen over solcelle panelet målte vi ved å koble et voltmeter parallelt med den variable motstanden og amperemeteret. En 150 watts lampe i konstant avstand på 29,5 cm belyste solcellepanelet.



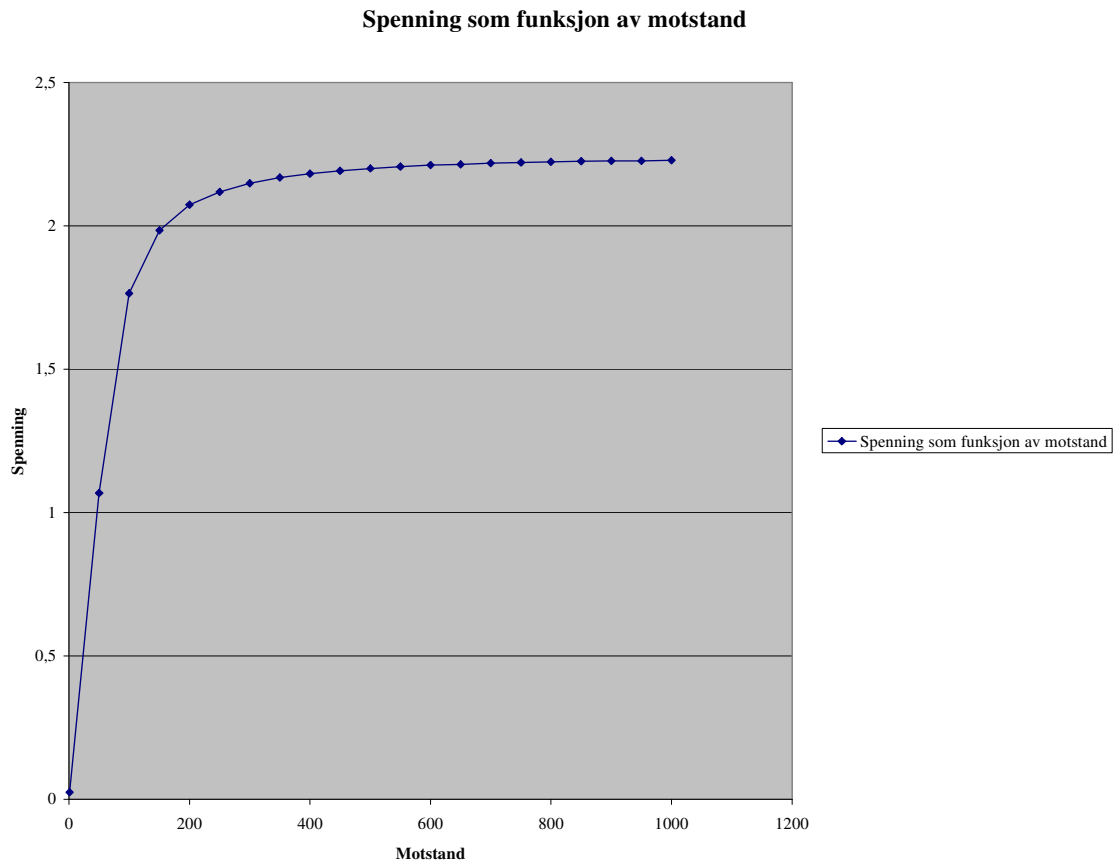
Figur: Viser koblingsskjema for forsøket.

Motstanden varierte vi fra 10Ω til 1000Ω med intervaller på 50Ω . For hver motstand målte vi strømmen og plottet den inn i en graf.



Ut fra denne grafen kunne vi konstatere at i det motstanden i kretsen økte, ble strømmen redusert. Dette var ikke uventet.

I tillegg målte vi spenningen ved hver motstand. Disse resultatene presenterte vi også grafisk.



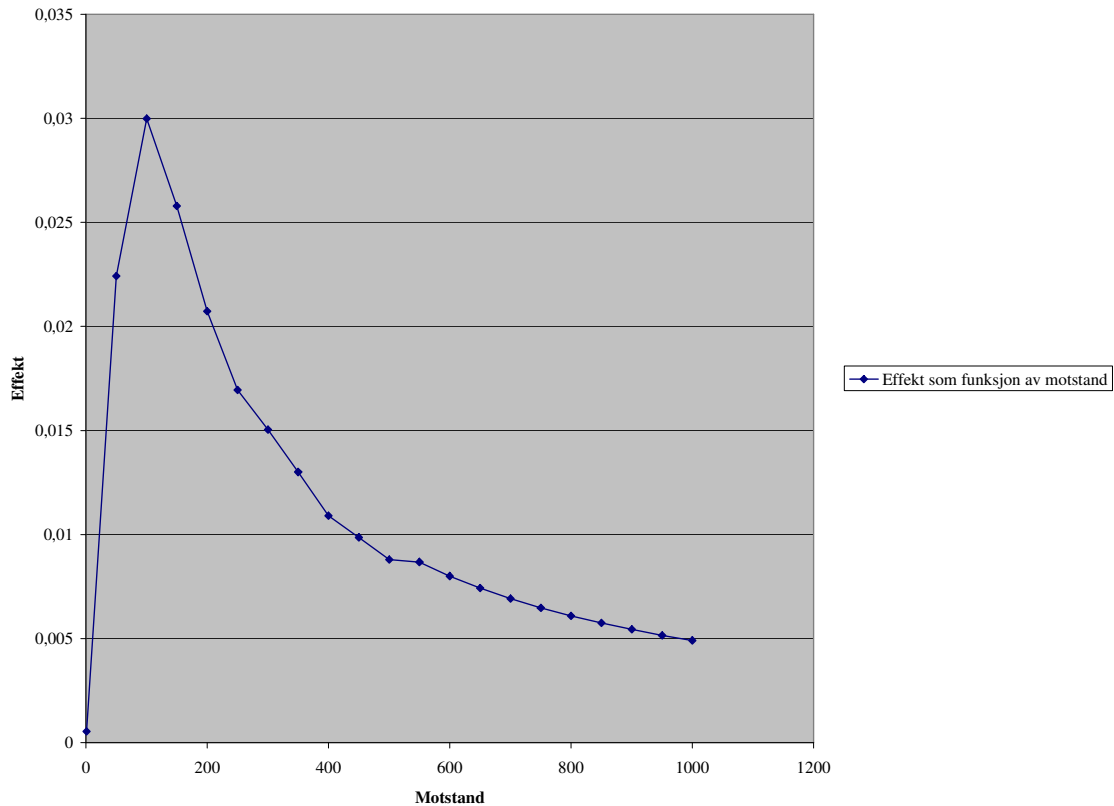
Ut fra denne grafen kunne vi se at spenningen konvergente mot en verdi i noe i nærheten av 2,23V. Dette er da maksimal spenning for akkurat denne solcella. Dette var også som forventet, nemlig at solcella ikke er i stand til å lage en uendelig stor spenning.

Fra strøm og spenningsdataene regnet vi ut effekten ved hver måleserie ved formelen

$$P = V \cdot I$$

Resultatet fremstilte vi grafisk ved effekten som funksjon av motstand.

Effekt som funksjon av motstand



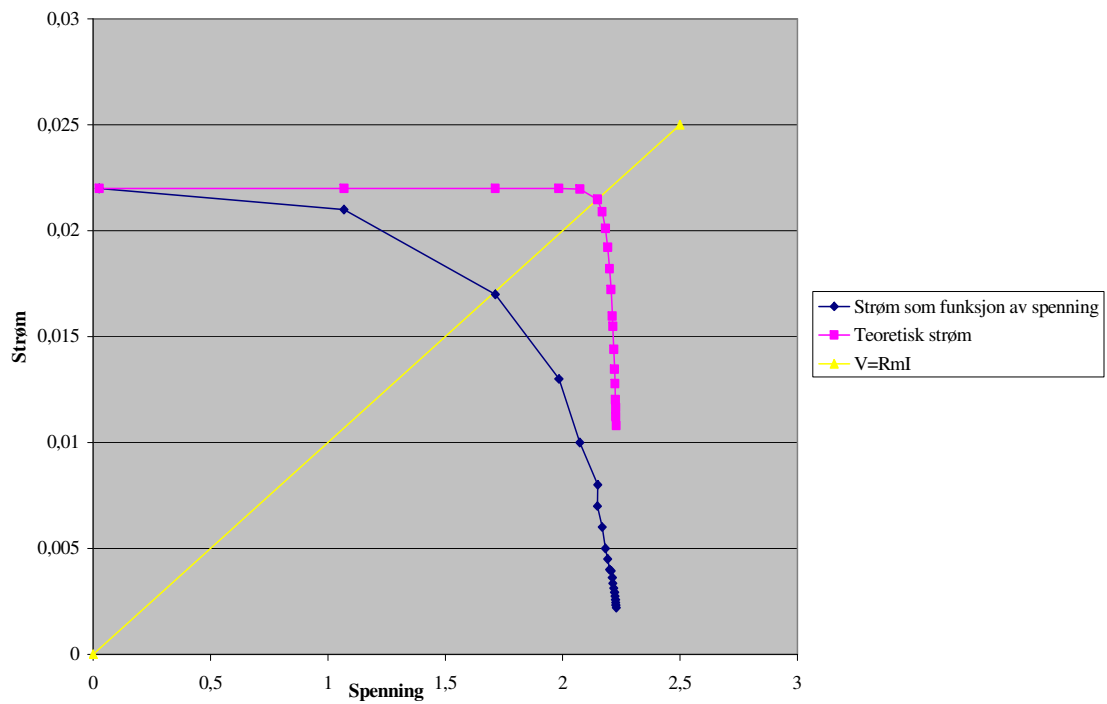
Fra grafen med effekten som funksjon av motstanden, så vi tydelig at effekten hadde et maksimum på $0,03W$ når motstanden var ca. 100Ω .

Vi laget også en graf der vi fremstilte strøm som funksjon av spenning. I tillegg hadde vi et uttrykk for teoretisk strøm som vi plottet i grafen.

$$I = I_{\omega} - I_0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

Her måtte vi anta $I_0 = 4,113 \cdot 10^{-40} A$ som er metningsstrømmen. Hvordan vi kom fram til dette resultatet følger senere. I tillegg antok vi $I_{\omega} = 0,022A$ som er strømmen generert av lyset. Dette antok vi til å være det samme som den strømmen vi fikk gjennom kretsen med kun 1Ω motstand.

Det siste vi plottet på denne grafen var $V = R_m I$. Vi brukte en fast motstand, 100Ω . Dette var den motstanden som ga oss mest effekt.



Effekten kan vi også finne ved å regne ut arealet av det firkantede området mellom aksene og skjæringspunktet til strømfunksjonen og voltfunksjonen. Med en gang ser vi at effekten til teoretisk strøm er større enn det vi fikk i praksis.

De to verdiene vi fikk ut fra grafen var

$$P_{m\ddot{a}lt} = 1,713V \cdot 0,017A = 0,029W$$

$$P_{teori} = 2,111V \cdot 0,021A = 0,045W$$

Utrekning

Effekt inn på solcella

I vårt forsøk brukte vi en 150W pære vi plasserte 0,295m fra panelet. Dersom vi antar at pæra lyser uniformt ut i en halvsirkel, har vi:

$$I = \frac{P}{A} \Rightarrow \frac{P}{2\pi r^2} = \frac{150}{2\pi(0,295)^2} = 274,33 \text{ W/m}^2$$

Solcellas sideflater målte vi til 0,08m og 0,11m . Dette gir et areal,

$$A = 0,08 \cdot 0,11 = 0,0088 \text{ m}^2 .$$

Teoretisk ideell effekt inn på solcella blir til slutt

$$P = I \cdot A = 274,33 \cdot 0,0088 = 2,414 \text{ W}$$

Dette gir en forskjell mellom hvor mye lys som falt inn på solcella i mot hvor mye vi greide å utnytte i vårt forsøk på

$$\frac{0,029121 \text{ W} \cdot 100}{2,414 \text{ W}} = 1,21 \%$$

Som en kuriositet kan man også se på hvor mye av lyset som hadde blitt utnyttet dersom solcellen hadde fulgt den teoretiske verdien for strøm vi hadde tidligere. I dette tilfellet hadde vi en effekt $P_{teori} = 0,045 \text{ W}$

Da blir prosentdelen av lyset som ble utnyttet

$$\frac{0,045 \text{ W} \cdot 100}{2,214 \text{ W}} = 2,03 \%$$

Utleddning av V_m , I_0 , I_m og R_m

V_m , I_m og R_m er her den spenning, strømmen og motstanden som gir størst effektivitet.
 I_0 er metningsstrømmen til solcellen.

Har

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

og

$$I(V) = I_\omega - I_0(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1) \quad (2)$$

Slår sammen (1) og (2)

$$P = V[I_\omega - I_0(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1)]$$

Finner maksimum ved å sette den deriverte og sette den deriverte lik 0.

$$\frac{dP}{dV} = [I_\omega - I_0(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1)] - VI_0(e^{\frac{eV}{k_B T}}) \frac{e}{k_B T}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

$\Leftrightarrow$

$$[I_\omega - I_0(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1)] - VI_0(e^{\frac{eV}{k_B T}}) \frac{e}{k_B T} = 0$$

$\Leftrightarrow$

$$\frac{I_\omega}{I_0} + 1 = (e^{\frac{eV}{k_B T}}) \cdot (1 + \frac{eV}{k_B T})$$

$\Leftrightarrow$

$$V_m = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln\left(\frac{1 + (\frac{I_\omega}{I_0})}{1 + (\frac{eV}{k_B T})}\right)$$

$\Leftrightarrow$

$$V_m = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln\left(1 + \frac{I_\omega}{I_0}\right) - \frac{k_B T}{e} \ln\left(1 + \frac{eV}{k_B T}\right) \quad (3)$$

Vi har:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln(1 + \frac{I_\omega}{I_0})$$

Setter inn Voc i (3)

$$V_m = V_{oc} - \frac{k_B T}{e} \ln(1 + \frac{eV}{k_B T})$$

Finner Vm med eksperimentell Voc:

Vi har:

$$V_m = V_{oc} - \frac{k_B T}{e} \ln(1 + \frac{eV}{k_B T})$$

Setter inn Voc fra eksperiment:

$$V_m = (2,25 - \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln(1 + \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{1,39 \cdot 10^{23}} \cdot V))$$

$\Leftrightarrow$

$$V_m = 2.13V$$

Dette medfører at den spenningen der vi teoretisk skal få størst effekt er ved 2,13V

Finner I_0 med eksperimentell Voc og I_ω :

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln(1 + \frac{I_\omega}{I_0})$$

$$2,25 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln(1 + \frac{0,022}{I_0})$$

$$I_0 = 4,113 \cdot 10^{-40} A$$

Finner I_M med eksperimentell Voc og I_ω :

$$I(V) = I_\omega - I_0 (e^{\frac{eV}{k_B T}} + 1)$$

$$I_M = 0,022 - 4,113 \cdot 10^{-40} (e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,13}{1,37 \cdot 10^{-19} \cdot 300}} + 1)$$

$$I_M = 0,021 A$$

Finner teoretisk R_M med eksperimentell Voc og $I\omega$:

$$R_M = \frac{V_M}{I_M}$$

$$R_M = \frac{2,13}{0,021}$$

$$R_M = 97,7 \Omega$$

Vurdering

Måleresultater

De instrumentene vi brukte hadde selvfølgelig en viss grad av unøyaktighet. Hadde amperemeteret og voltmeteret for eksempel hatt flere desimaler, ville vi fått større grad av nøyaktighet. I tillegg kommer unøyaktighet i ledninger. De ledningene vi brukte har visse avvik fra ideelle ledere.

Vi målte spenningen med voltmeteret over den variable motstanden og den viste seg å være veldig nøyaktig. Vi fikk samme resultat da vi målte med voltmeteret som motstanden skulle yte.

Innkommende effekt

Måten vi regnet ut den innkommende effekten er ikke nødvendigvis helt nøyaktig. Det mest ideelle hadde nok vært å måle intensiteten til lyset på en annen måte, men vi brukte ressursene vi hadde til rådighet der og da. Lyspæra vi brukte hadde en effekt på 150W. Vi brukte som en tilnærming at den strålte uniformt ut i en halvsirkel. Dette er selvfølgelig bare en antagelse. Hvor vidt lampen faktisk strålte ut lys med effekt på 150W måtte vi bare anta.

Elektrisk effekt

Ved å sammenligne de målte verdiene vi fikk for strøm som funksjon av spenning og den teoretiske verdien av strøm som funksjon av spenning ser vi at det er ganske stor forskjell. Både når det gjelder hvilken spenning som ga mest effekt og hvor mye strøm som gikk gjennom kretsen ved det aktuelle punktet. Som nevnt tidligere er det mange faktorer som reduserer effekten i en solcelle. Derfor er det helt naturlig at vi fikk lavere effekt enn den teoretisk maksimale.

Med tanke på at vi hadde en stor usikkerhet i den innkommende effekten og den målte effekten, blir det følgelig stor usikkerhet i hvor stor prosentandel av lyset vi nyttiggjorde oss av i eksperimentet.

Grafiske resultater kontra utledede resultater

Våre måleresultater viste oss at den motstanden som ga størst effekt var ved 100Ω . I vårt eksperiment tok vi kun avlesninger med 50Ω mellomrom. Da vi derimot regnet på hvor stor motstand som ga best effekt fikk vi $97,7\Omega$. Dette må sies å være en relativt liten forskjell. I den utregnede motstanden vi brukte lå også måleresultatene til grunn, men vi brukte utregnet ideell strøm. Siden den ideelle strømfunksjonen ikke hadde målepunkter å forholde seg til på samme måte, ble det mer som en kontinuerlig funksjon. Det kan være en grunn til at vi fikk et litt annet resultat. Vi så også at det var stor forskjell på grafen for ideell strøm og målt strøm, men hvilken motstand som ga størst effekt var likevel omtrentlig det samme.

Konklusjon

Vi har i dette prosjektet sett på solceller og dets oppbygning. Solceller benytter på en fascinerende måte den dynamiske likevekten i en pn-overgang til å lage strøm. Vi har sett at solceller er en fin, fornybar måte å produsere strøm på. Solceller har likevel begrensninger i forhold til den relativt lille effektiviteten som er mulig å fremskaffe.

Det er teoretiske, så vel som praktiske faktorer som begrenser effektiviteten. Den teoretisk størst mulige effektiviteten er et resultat av sammenhengen mellom energigapet i halvlederne og energien til lys med forskjellige bølgelengder. Solcellenes oppbygning gir opphav til flere av de praktiske begrensningene. En av disse er kontaktene på oversiden av solcellen. I tillegg har vi det faktum at solceller som oftest lages av silisium og at silisium er et reflekterende materiale.

Solcellene har en bestemt motstand der effekten er størst. I realiteten er en solcelles strøm- og spenningskarakteristikk ganske annerledes enn den teoretiske med tanke på effekt. Likevel stemmer forholdet mellom strøm og spenningen bra med teorien. Dette medfører at den motstanden vi målte til å gi mest effekt, stemte bra med den utregnede.

Alt i alt må det sies at vi i løpet av dette prosjektet lærte veldig mye om solceller. I tillegg til å lære om solceller spesielt, lærte vi også mye generelt om halvledere og pn-overganger. Vi har naturligvis bare skrapet overflaten, men vi fikk et inntrykk av kompleksiteten ved å produsere mest mulig effektive solceller.

Kilder

Green, Martin A. – Solar Cells
Sze, S.M – Semiconductor Devices
Alonso & Finn – Physics

URL's:

Teknologien bak solceller:

[http://www.elkraft.ntnu.no/~eit04/landsby2/Presentasjoner/EiT%202004%20\(E\)/web/solceller_teknologi.html](http://www.elkraft.ntnu.no/~eit04/landsby2/Presentasjoner/EiT%202004%20(E)/web/solceller_teknologi.html)

How stuff works:

<http://science.howstuffworks.com/>

U.S Department of energy:

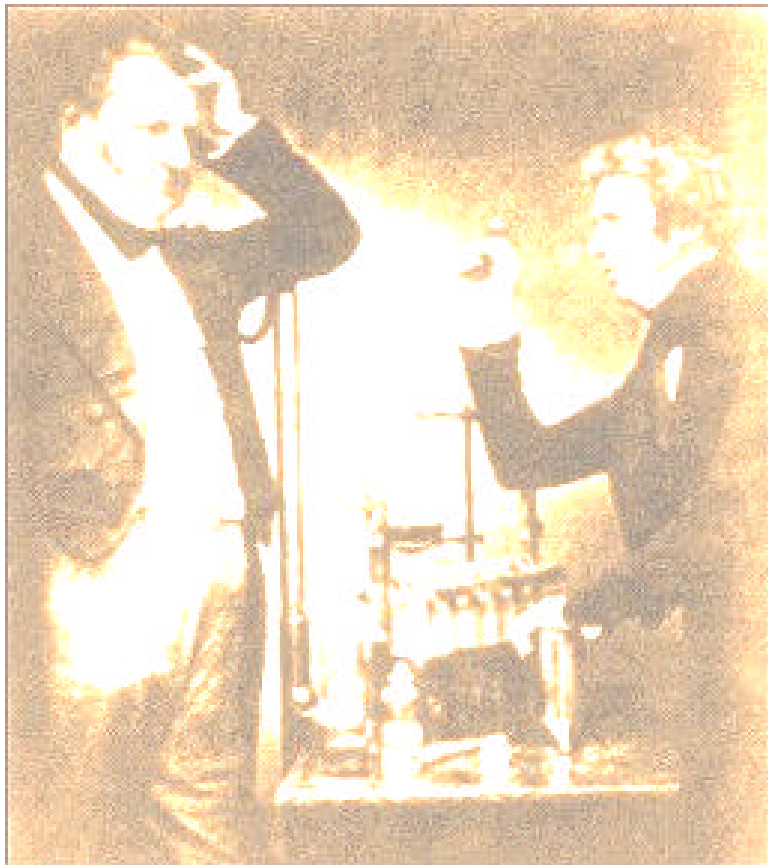
http://www.eere.energy.gov/solar/pv_physics.html

Støvneng (2002-03): Forelesningsnotater,

<http://bohr.phys.ntnu.no/~stovng/MNFFY103/mnffy103.htm>

KJENTE FYSIKERE

-med vekt på
utviklerne av
elektromagnetismen



Et prosjektarbeid i fy1303
Av Sigrid Hansson. 662441

Innholdsfortegnelse

1. Forside
2. Innholdsfortegnelse
3. Innledning
4. Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta
5. forts.
6. George Simon Ohm
7. forts.
8. Hans Christian Ørsted
9. André Marie Ampère
10. forts.
11. forts.
12. Joseph Henry
13. forts.
14. Michael Faraday
15. forts.
16. forts.
17. forts.
18. forts.
19. James Clerk Maxwell
20. forts.
21. forts.
22. Elektromagnetismens historie, kortversjonen
23. forts.
24. Kildehenvisning

Innledning

Da vi skulle velge oppgave i FY1303 valgte jeg å finne ut mer om noe som jeg ser på som et stort hull i vår realfags utdanning, nemlig fysikkens historie, og dens skapere. Det er rart at vi i løpet av våre 12 år på grunnskolen og videregående ikke får noen som helst opplæring i vitenskapens historie, og helt utrolig at vi heller ikke på universitetet har noen fag som omhandler dette emnet. Dersom man går på formgivning, er kunsthistorie, om de kunstneriske epokene, og de kjente kunstnerne noe av det første en lærer. Allerede på grunnskolen lærte vi om Mozart, Bach og Beethoven i musikken, men ikke et ord hørte jeg om Einstein, Newton og Faraday i noen fag.

I historietimene virker det nesten som om de store vitenskapsmenn- og kvinnene gjennom tidene har blitt visket ut av pensum, dersom de nevnes, er det stort sett kun i bisetninger. Dette er kvinner og menn som gjennom hardt arbeid har ført menneskeheten til sivilisasjon, mange av dem med døden til følge. I de tidligste årene ble flere drept fordi de prøvde å fortelle om verden sannheten om den verdenen vi lever i, og i senere tid har flere dødd av virkninger av eksperimenteringer med farlige stoffer.

Grunnene til å studere de store vitenskapsmenn- og kvinnene er mange. Det kan være inspirerende å vite at Faraday som levde i dyp fattigdom, og uten spesielle midler, klarte ved hjelp av enorm viljestyrke, livsglede og enormt pågangsmot å komme så langt i livet som han faktisk gjorde. Kanskje kan det være en trøst for noen at Einstein slettes ikke var noen god skoleelev, men strøk flere ganger på eksamen. En viktig grunn er i hvert fall at man får bakgrunnskunnskap til hvordan naturens lover ble oppdaget, for dermed kanskje å kunne huske på, og skjønne dem bedre. Selv synes jeg det er artig å finne at de kjente fysikerne var vanlige mennesker som oss andre, og spesielt artig å finne små spesielle særegenheter ved dem, som at Einstein ikke kunne svømme, men likevel var en ivrig seiler, at Maxwell hadde for vane å løpe rundt i korridorene på skolen på natterstid, eller at familien lenge trodde Volta var tilbakestående fordi han ikke begynte å prate før han var fire. Det er slike ting som gjerne blir sittende.

Kanskje litt mer fokus på fokus på vitenskapshistorie kunne vekke mer interesse for realfag, i et samfunn hvor færre og færre velger å fordype seg i disse fagene. Uansett synes jeg folk bør vite hvem de kan takke for de forskjellige hjelpemidlene vi strør om oss med, i hvert fall ettersom vi vet så mye om kjente mennesker innenfor så mange andre (etter min ydmyke realistmening) mindre viktige felt.

It is true that history of science is very different from the science of history. We are not studying or attempting to study the working of those blind forces which, we are told, are operating on crowds of obscure people, shaking principalities and powers, and compelling reasonable men to bring events to pass in an order laid down by philosophers.

The men whose names are found in the history of science are not mere hypothetical constituents of a crowd, to be reasoned upon only in masses. We recognize them as men like ourselves, and their thoughts, being more free from influence of passion, and recorded more accurately than those of other men, are all the better materials for the study of the calmer parts of human nature.

James Clerk Maxwell



Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827)

Volta ble født i Como, Lombardy i Italia 18. februar 1745. Han ble født i en mindre adels familie som ikke hadde stor innflytelse.

Familien hans var lenge overbevist om at han var tilbakestående ettersom han ikke begynte å snakke før han var fire år gammel, men etter dette tok han raskt igjen de andre barna på evner og intellekt og det var ikke lenge før han lå langt foran sine jevnaldrende.

Da Volta var 14 år gammel, bestemte han seg for at han skulle bli fysiker.

På den tiden var det veldig mange fysikere som var opptatt av elektrisitet, og Volta var ingen unntak. I 1774 fikk han jobb som professor i fysikk på Como high school og året etter oppfant han *electrophorus*, en ladningsakkumulerende maskin / Elektrisk kondensator, med andre ord en maskin som genererer statisk elektrisitet. Denne besto av en metall plate dekket av ebonitt og en annen metall plate med et isolert håndtak. Dersom man gnir ebonittplaten slik at den får en negativ ladning, og deretter holder den andre platen over den, vil de positive ladningene på platen holde seg på den nedre siden, mot ebonittplaten, mens de negative ladningene vil holde seg på den siden som er lengst borte fra ebonittplaten.

Volta oppnådde raskt beundring og berømmelse som følger av sine oppdagelser. I 1778 var Volta den første som klarte å isolere Metan, som er en svært viktig naturgass.

Da Volta i 1779 ble professor på universitetet i Pavia, fortsatte han å jobbe med forskjellige sider med elektrisitet. For sitt arbeid fikk han Copley medaljen fra the Royal Society, hvor han ble medlem i 1791.

Volta var en god venn med Luigi Galvani, som hadde drevet med eksperimenter med dissekerte froskemuskler. Han merket at når han brukte to skalpeller av to forskjellige metaller, trakk muskelen seg sammen. Galvani trodde det hadde noe med livsvevet å gjøre, og kalte det for animalsk elektrisitet, men det var ikke Volta like overbevist om. I 1794 gjorde han et eksperiment kun ved bruk av metallene, og fant ut at det like fullt oppstod en strøm, og at strømmen derfor ikke hadde noe med livsvevet å gjøre. Dette førte til en strid mellom de to italienske vennene. Blant Voltas fremste supportere til sin teori var en ikke helt ukjent mann ved navn Coulomb. Etter hvert pekte bevisene mer og mer mot at det var Volta som hadde riktig, og Galvani døde i den visshet.

VOLTA SØYLEN



I 1800 lagde Volta det som skulle bli verdens første elektriske batteri. Han hadde studert tidligere eksperimenter, og han mente at to forskjellige metaller kunne skape elektrisitet når de var i kontakt med hverandre. Han lagde små runde skiver av kobber og sink og plasserte de vekselvis oppå hverandre med en papp plate dyppet i saltvann mellom hver skive, dersom man så festet en ledning til toppen av søylen og den andre enden i bunnen av søylen, fikk man en kontinuerlig strøm gjennom ledningen. "Volta-søylen" ble etter hvert verdensberømt som verdens første elektriske batteri! For sin oppfinnelse fikk Volta mange medaljer og priser, og ble bl.a. gjort til Greve av Napoleon, og i 1810 ble han senator i Lombardy. Den største æren var nok kanskje likevel at han fikk enheten for spenning Volt,(V) oppkalt etter seg.

Volta gjorde en gang et "vilt" eksperiment hvor han plasserte to elektroder koblet til et batteri inn i ørekanalene sine. Han hørte et høyt smell, og en merkelig følelse av å høre en lyd som han senere sa hørtes ut som kokingen av en tykk suppe. Enkelte vil kanskje tenke at dette var et særdeles ufornuftig eksperiment, men dette fikk faktisk mange til å forske på bruk av elektrisk strøm for å stimulere hørselssystemet slik at døve kan få muligheten til å høre. Resultatene til disse forskerne samt moderne teknologi har ligget til grunn for hørselsimplantater som stimulerer den hørende delen av det indre øret, og gjør slik at døve kan forstå prat uten å lese på lepper. Det er i dag i overkant 40 000 brukere av denne typen implantater på verdensbasis.

Ellers bør det vel kanskje nevnes at Volta var den første som klarte å gjennomføre elektrolyse av vann, noe som var begynnelsen på elektrokjemi



George Simon Ohm (1789-1854)

Selv om det er et fåtall mennesker som begraver seg i fysikkens verden, er det vel få som har kunnet unngå å komme borti Ohms lov enten i naturfagen eller i andre fysiske fag. George Ohms største oppdagelse var at strømstyrken er proporsjonal med potensiellforskjellen, (gjerne kalt spenningen, U på vgs.) og omvendt proporsjonal med resistansen i kretsen. Populært kalt URI ($U=RI$) på vgs. I likhet med de fleste store fysikere, var ikke hans resultater noe som dukket opp over natten..

George var den eldste sønnen til Johann Wolfgang Ohm. Moren hans døde da George var bare 10 år gammel, men faren hans som var låsesmed sørget for at George og hans søsken lærte seg matte, fysikk, kjemi og filosofi i tillegg til hans eget yrke som låsesmed. Da han var ferdig med skolen i 1805, fortsatte George på universitetet hvor han studerte fysikk, matematikk, og filosofi i tre semester før faren hans tvang ham til å slutte, delvis på grunn av manglende penger, men også fordi George etter farens mening tilbrakte alt for mye tid på dansing, billiard og skøyting.

For å overleve begynte George Ohm å undervise matematikk på en skole i Bern, mens han på fritiden studerte vitenskaplige arbeider, bla Eulers, Laplace og Lacroix.

Han underviste flere steder og gav bl.a. ut en tekstbok i geometri i 1817, samme året som han ble overlærer i matematikk og fysikk i et Jesuitt gymnas i Cologne. Her fant han ut at det var gode muligheter for eksperimentelt arbeid. Han studerte også Lagrange, Legendre, Biot, Poisson, Fourier og Fresnel, som er velkjente navn innenfor matematikkens verden. Da han hørte om Ørstedts oppdagelse av elektromagnetisme i 1820, ble han inspirert til å eksperimentere med elektrisitet og magnetisme, spesielt arbeid som skulle klargjøre mer av den galvaniske kretsen. Etter å ha tilbrakt det George selv mente var muligens for mange år som lærer, ble han oppsatt på å bevise for omverden at han dugde til annet enn å lære bort fysikk og matte. Han tok seg ett år i Berlin sammen med sin bror Martin som var en velkjent matematiker for å studere elektrisitet og magnetisme på fulltid. Dette var nok ikke noe dårlig trekk, for etter dette året gav han ut "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet" (Galvaniske kretser) i 1827.

Her beskrev han sammenhengen mellom resistans, strømstyrke og spenning, bla ved å gi til kjenne den nå berømte Ohms lov.

Selv om ingen fysikere klarte å motbevise Ohms lov, den ble tvert imot bekreftet av flere andre vitenskapsmenn, fikk George Ohm mye kritikk fordi han hadde basert loven sin mer på eksperimenter og observasjoner istedenfor å ha framsatt en hypotese og begrunnet loven sin

først, for deretter å vise det eksperimentelt. Ohm ble såret, og demoralisert av kritikken, og sluttet som lærer i Cologne, de neste seks årene brukte han på å lære opp kadetter.

I 1833 ble George oppnevnt som professor i fysikk på et polyteknisk institutt i Nuremberg, hvor han ble i fjorten år. Etter "Die Galvanische Kette", la George elektromagnetismen på hylla, og begynte å engasjere seg innenfor molekylær fysikk, og også vitenskaplige undersøkelser på andre områder. Han fant blant annet ut at det menneskelige øret bare oppfatter sinusoidale bølger som rene toner. I 1841, 1847 og 1860 ble "Die Galvanische Kette" oversatt til henholdsvis engelsk, italiensk og fransk.

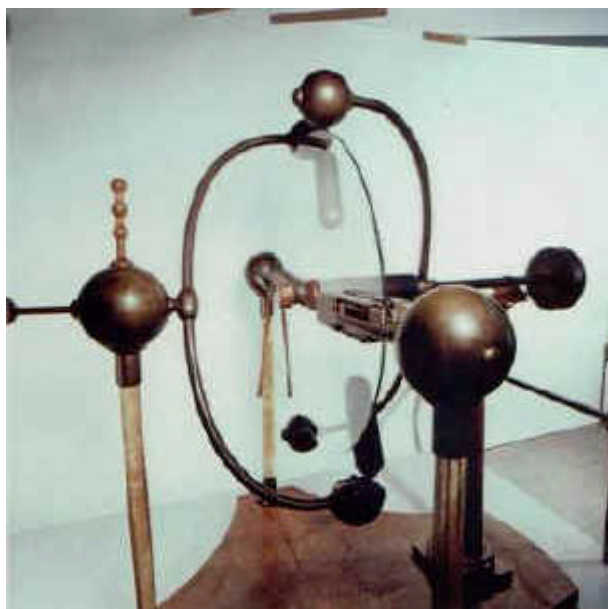
Endelig i 1849 oppnådde Ohm målet sitt om å bli en høy stilling ved universitetet i München. Hans siste viktige arbeid var i 1852-53 hvor han studerte interferens fenomener, dette til tross for at han var nesten blind på den tiden.

Det tok lang tid før fysikere rundt om i Europa fikk ta nytte av den enorme kunnskapen George Ohm hadde bidratt med i sin bok. Faraday beklaget seg over at han ikke kunne tysk, og dermed ikke fikk lest de viktige verkene skrevet på dette språket, og da hadde han "Die Galvanische Kette" i tankene.

Situasjonen bedret seg betraktelig da han fikk den prestisjetunge Copley medaljen av the Royal Society i London. På sine eldre dager fikk han altså den æren han fortjente.

George Ohm døde av et slag i München 6. juni, 1854.

Nå, i 2004 bruker fysikere over hele verden loven hans hver eneste dag for å løse tallrike problemer, og det greske symbolet O , vil for alltid først og fremst stå for Ohm, SI-enheten for resistans oppkalt etter George Ohm.



Ohms elektrostatiske friksjons maskin, som han brukte i sine eksperimenter



Hans Christian Ørsted (1755-1851)

Selv om Ørsted var en engasjert naturfilosof som både utgav en bok om metafysikk, og også var en engasjert lærer, er han først og fremst kjent som den første personen som hadde mistanke til at det var en sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme. Nesten ved en tilfeldighet fant han et eksperimentelt resultat som tydet på at han hadde rett i sine mistanker. Ørsted holdt en forelesning om forholdet mellom magnetisme og ”galvanisk” strøm da han merket seg at en magnetnål som var plassert i en glassboks under en strømførende ledning skvatt over i en øst-vestlig stilling og tilbake igjen, da han etterpå sendte strømmen den andre veien, gikk nålen over i vest-østlig stilling før den gikk tilbake til vanlig stilling. Etter å ha fundert i tre måneder over fenomenet, sendte han ut en beskrivelse av sitt eksperiment til alle store universiteter og vitenskapsmenn i Europa. Alt dette skjedde i år 1820. Eksperimentet hans vakte stor oppsikt, og fysikere over hele Europa etterprøvde danskens eksperiment. Nå gjaldt det å finne forklaringen på dette fenomenet.

André Marie Ampère (1775-1836)

Ampère blir ofte kalt ”elektrisitetens Newton” fordi han hadde slik en enorm innflytelse på elektrisitetlæren. Ampère ble født i Lyon, Frankrike 20. januar 1775. Faren var en velstående mann med nok midler til å gi Ampère en barndom uten mangler på noe som helst. Til tross for at Ampère ikke gikk på skolen, sørget faren Jean Jacques for at han fikk en glimrendes utdannelse. Selv om Ampère ikke ble tvunget til å ta en utdannelse, inspirerte faren ham til å ville lære og å selvrealisere seg selv.

Det sies at Ampère kunne all kjent matematikk før han fylte tolv, men selv sa han at han ikke begynte å studere elementær matematikk før han ble 13 år gammel. Ampère skjønnte fort at han hadde mye å bidra med innenfor dette feltet, og utga sin første artikkel om kjeglesnitt mens han enda var 13 år gammel. Etter å ha tatt noen timer i differensial likninger og integrering, begynte han å studere verker av Euler og Bernoulli. Deretter begynte han å studere nøyte Lagranges *Mecanique analytique*, og gjentok alle kalkulasjoner i denne.



Dessverre skulle livet snart bli mindre rosenrødt for Ampère. Han levde i tiden for den franske revolusjonen, og det var vanskelig for faren å holde seg unna trøbbel. I 1792 døde Ampères storesøster Antoinette. 9 oktober samme året ble faren arrestert da Lyon ble beseiret etter lenge å ha stått i mot presset fra Paris. Grunnen var at han hadde utstedt en arrestordre på Jacobin Chevalier som hadde blitt fengslet og drept. I fengselsperioden før Jean Jacques ble tatt av dage med giljotinen skrev han brev til sin kone blant annet om at hun måtte gjøre alt som stod i hennes makt for å få overta alle hans midler. I sitt siste brev skrev han blant annet om sine barn;

”Måtte de få en bedre skjebne enn deres far, og alltid frykte Gud, den sunne frykten som fører til uskyldighet og rettferdighet i oss til tross for vår svake natur... og når det gjelder min sønn, er det ingenting jeg ikke forventer av ham”.

Som ventet tok Ampère budskapet om hans fars død svært tungt. De hadde et svært nært forhold. Etter farens død skulle det gå 18 måneder før Ampère returnerte til sine studier. Etter hvert vendte også livsgnisten tilbake da han ble forelsket i Catherine-Antoinette Carron, som vanligvis ble kalt Julie, rett og slett fordi det var vanlig å kalle barna noe helt annet enn det de egentlig het i Carron familien. Dessverre virket det ikke som om Julie gjengjeldte hans følelser. Det tok lang tid før de ble forlovet, og før det hadde Ampère sendt brev etter brev til henne og besøkt Carron familien svært ofte. Det var Julies lillesøster Elise (Egentlig Elisabeth) som etter hvert klarte å overtale henne om hvor fantastisk Ampère var. I 1799 giftet de seg og i 1800 ble deres sønn som de kalte opp etter Ampères far født. Ampère var hodestups forelsket hele tiden de hadde sammen, og sparte på hvert brev han fikk av sin Julie, og fortalte henne at han kysset dem hele tiden. Dessuten skrev han hver minste detalj om alt som hadde med Julie å gjøre ned i dagboken sin. Dessverre varte ikke lykken lenge. I 1803 døde Julie av en ondartet svulst i magen, og nok en gang sørget Ampère. Selv om hans kone var syk, hadde han tidligere klart å fokusere på sine teoremer og arbeider, etter Julies død, pakket han sakene og ville begynne på ny frisk i Paris.

I 1809 etter å ha giftet seg og skilt seg i løpet av en kort tid, fikk Ampère jobb som professor i matematikk på Ecole Polytechnique hvor han ble til 1828. Her jobbet han tett sammen med

Cauchy med å lære bort analyse og mekanikk. Ampère var av de to den som var flinkest til å lære bort, mens Cauchy hadde en mye mer teoretisk læreform som elevene syntes var vanskelig å forstå.

Samtidig jobbet Ampère med matematikk, metafysikk, fysikk og kjemi. I 1816 framla han en klassifikasjon av de da kjente elementene, som har vist seg å stemme utrolig bra med senere kunnskap. Ellers var han en sterk tilhenger av bølgeteorien for lys, i motsetning til de samtidige Biot og Savart.

4 september 1820 ble Ørstedes eksperiment rapportert til Akademiet i Paris, og eksperimentet ble snart gjentatt på et akademimøte. Dette fattet Ampère raskt interesse for, og de neste ukene framla han mange magnet/elektrisitet effekter for Akademiet.

18. september kunne Ampère vise til et eksperiment som viste at når andre magnetisme kilder var nøytralisert, ville kompass nåler rotere slik at de sto normalt på en linje trukket fra en strømførende ledning. Når de var i denne posisjonen ville de enten bli tiltrukket ledningen, eller frastøtt avhengig av nålas orientasjon. Fra dette framla Ampère en teori om at en kompass-nålers oppførsel i forhold til jordas magnetisme, skyldtes at det gikk elektriske strømmen som gikk i jorda. Og også at magneter burde ha en hittil uoppgdaget elektrisk krets som gikk gjennom dem. Dette ledet ham til å tro at han burde være i stand til å lage en slags magnet ved å bruke strømlidninger formet i spiraler, dette viste han at var tilfelle på et møte 25. september. I løpet av ett av disse eksperimentene oppdaget han trolig at to strømførende ledninger tiltrakk eller frastøtet hverandre avhengig av hvilken vei strømmen gikk. Dette demonstrerte han for sine kollegaer vha et oppsett av en strømførende leder som sto fritt til å svinge til begge sider og som hang over en stasjonær strømførende leder. Her viste han klart at når to ledere fører strøm i samme retning, vil lederne tiltrekkes av hverandre, mens dersom strømmene gikk i motsatt retning av hverandre, vil lederen på svingen svinge bort fra den stasjonære lederen.

På den tiden hadde Laplace stor innflytelse på fysikk og matematikk forskning i Paris på den tiden, og han hadde en streng oppfatning av hva som var hensiktsmessig forskning. Han mente at forskningen skulle basere seg på tidligere studier av det området det ble forsket på, og teorien bør helst være grunnlagt med matematiske utledninger. Selv om matematikken i fysikken også var noe Ampère var svært opptatt av, var han ikke like nøye på dette med matematiske utledninger og hypoteser før han begynte med eksperimenteringen. Amperes neste bidrag til elektromagnetismen ble å prøve å finne en matematisk formel som kunne brukes om kreftene rundt de elektriske lederne. Måten han fant den på var nok likevel ikke helt etter Laplace sin smak. Han gjorde en rekke eksperimenter for å sammenligne forskjellige oppsett av de to strømførende lederne i forhold til hverandre. Han oppdaget raskt at kraften var størst tiltrekkende når de to lederne var parallelle og strømmen gikk i samme retning, og motsatt, størst frastøtende når de to lederne var parallelle, men strømmene gikk i motsatt retning av hverandre. Dessuten oppdaget han at kraften forsvant helt når lederne sto normalt på hverandre. Av dette utledet han at dersom lederne ikke sto normalt på en linje som går gjennom begge lederne, vil kraften avhenge av vinklene de to lederne lagde med denne.

Biot og Ampère var i samme vitenskaplige miljø i Paris, og det er ikke til å legge skjul på at det var en del rivalisering mellom dem, i tiden etter Ørstedes oppdagelse kjempet de side om side for å legge frem det beste bidraget til elektromagnetismen. Biot og hans assistent Savart utledet bl.a. den kjente Biot-Savart lov, som er elektromagnetismens svar på Coulombs lov.

Ampères viktigste bidrag til elektromagnetismen var hans mesterverk fra 1826; *Memoar on the Mathematical Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience*. Her utleder han den elektromagnetiske kraft loven og beskriver fire eksperimenter. Ampères teorier ble grunnleggende for utviklingen innenfor elektromagnetisme på 1800 tallet. Weber, Faraday, Thomson og Maxwell var bare noen av dem som studerte hans teorier nøye i sitt arbeid.

Ampères siste år var dessverre ikke særlig lykkelige, etter 1826 mistet han gradvis interessen for elektrodynamikk, selv om han fortsatt fulgte Faradays oppdagelse av induksjonen med stor interesse. Det var en del andre områder som krevde hans oppmerksomhet. Forholdet med sønnen Jean-Jacques var ganske dårlig, begge hadde stort temperament, og hadde en tendens til å komme med store sinneutbrudd, og dette var ingen god kombinasjon for disse to. I tillegg giftet hans datter fra hans andre ekteskap seg med en offiser, Ride i Napoleons hær som var voldelig og hadde problemer med alkoholen. Dette var en stor sorg for Ampère som brydde seg svært mye om begge sine barn tross alt. Ikke bare truet Ride datteren, men ved en anledning truet han også med å drepe den raskt eldende Ampère.

I løpet av de siste årene skrev Ampère *Essai sur la Philosophie des sciences* som var en blanding av Ampères erfaringer som vitenskapsmann, og filosofiske tanker om relasjonen mellom de forskjellige akademiske disiplinene. Mens han skrev *Essai* ble hans helsetilstand vesentlig verre. 10. juni 1836 fikk han plutselig høy feber og døde før hans venner og familie rakk å komme for å ta farvel.

Man skulle kanskje tro at det var Ampère som utledet den berømte Ampères lov, men det er ikke tilfelle. Ampères lov er det neste generasjons fysikere som sto for, og fysikken i Ampères lov er et stort skritt videre fra Ampères fysikk. Grunnen til at "loven" likevel har fått navn etter Ampère er sannsynligvis fordi Ampères viktigste resultater kan sies å være oppsummert i denne "loven"

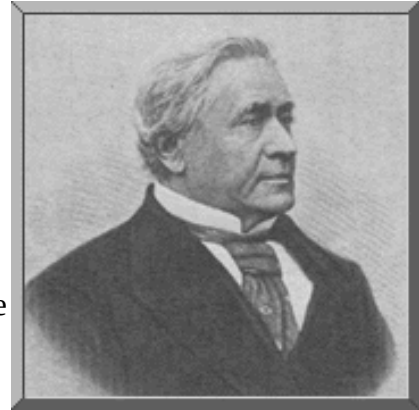
Ettertiden visste i hvert fall å sette pris på Ampères arbeid, i 1881 bestemte elektriker kongressen i Paris at enheten for elektrisk strøm skulle være ampere. Dette er vel kanskje hovedgrunnen til at folk kjenner hans navn den dag i dag. En liten bonus for Ampères ettermæle er definisjonen;

En ampere er strømmen i hver av de to lange parallelle ledningene plassert en meter fra hverandre i vakuum når kraften som virker på hver ledning per enhetslengde er 2×10^{-7} newton per meter.

Den gjensidige kraften mellom to ledninger var det jo nettopp Ampère som oppdaget!

Joseph Henry (1797-1878)

Joseph Henry ble født 17. desember 1797 i Albany, New York. Faren James Henry var en vanlig arbeider og moren Ann en møllerdatter, så han ble ikke akkurat født med en "sølvskje i munnen". Faren døde da Joseph var ung, så han ble i hovedsak oppdratt og forsørget av sin mor. Joseph fikk sin første jobb på en dagligvarehandel da han var ni år. Da hadde han fullført en treårig grunnskole, og sjefen på dagligvarehandelen oppmuntret ham til å fortsette å studere utenom arbeidstiden. Da Joseph var nærmere fjorten, begynte han som lærling hos en klokke-maker og sølvsmed, her plukket nok Joseph opp mange nyttige tips til hans senere eksperimenteringer!



Da foretningen gikk konkurs, dro Joseph tilbake til Albany og brukte et års tid på teateret der hvor han skrev, produserte og var skuespiller i en del skuespill. Samtidig fortsatte han utdannelsen ved å ta kveldskurs i geometri, mekanikk, kjemi og kalkulus. Han var kjent for å ha et usedvanlig bra utseende, og en fantastisk utstråling, Joseph var derfor svært godt likt. Albany hadde også et vitenskaplig miljø, Albany instituttet som hadde et stort bibliotek. Her fikk Joseph seg jobb som bibliotekar, og foreleste for de andre i det vitenskaplige miljøet mens han på fritiden studerte Lagranges *Mecanique Classique*. I 1826 fikk han seg jobb som professor i matematikk og naturfilosofi ved Albany Academy. Det er sannsynlig at han nå hadde kjennskap til Coulomb, Ampere og Volta sine bedrifter og arbeider. Han gjentok mange av de kjente eksperimentene på egen hånd.

I 1829 giftet Joseph Henry seg med sin kusine Harriet, sammen fikk de seks barn, hvorav to av dem døde i krybbedød, og en døde mens han enda var tenåring. Harriet var en støtte for Joseph gjennom livet.

Da Joseph var 36 år gammel, fikk han jobb ved det som senere skulle bli Princeton University. Her fikk han endelig kontakt med en bred sirkel av forskere. Dessverre var ikke disse forskerne særlig raske med å publisere vitenskaplige artikler, noe som førte til at Faraday ofte kom Henry i forkjøpet med de store oppdagelsene.. Det at Faraday alltid kom han i forkjøpet var veldig bittert for ham, han fikk ikke den store anerkjennelsen mens han levde.

Henry bygde den første elektromagnet ved hjelp av konas underskjørt. Tidligere hadde engelskmannen Sturgeon prøvd å bygge en elektromagnet ved å vikle en kobberledning rundt en bøyd jernstang, dette lyktes selvsagt ikke ettersom kobberledningene var i kontakt med hverandre, og strøm som kjent tar den letteste veien fra et sted til et annet, istedenfor å ta den vanskelige veien rundt hele jernkjernen.

Henry var på i et stort middagsselskap da han plutselig fikk en glimrendes ide. Med en gang han kom hjem, dro han ut tråder fra underskjørtet til kona for å surre disse rundt kobbertrådene for å dermed isolere dem fra hverandre. Henry oppdaget induktans uavhengig av Faraday omtrent samtidig, men i ettertiden har Faraday blitt kreditert med oppdagelsen av induktans, mens oppdagelsen av selvinduktans er blitt kreditert Henry.

Henry var den første i verden som surret isolerte ledninger rundt jernkjerner for å få kraftige elektromagneter. Han bygget verden sterkeste elektromagnet på den tiden som kunne løfte opp til 300 kg. Da han eksperimenterte med slike magneter, oppdaget han at det kom en kraftig gnist når kretsene ble brutt, og han slik oppdaget han selvinduktans, som prøver å

motvirke enhver endring den elektriske strømmen i kretsen. Henry oppdaget også at selvinduktansen avhenger av hvordan kretsen er satt opp, spesielt av hvordan ledningene er surret. Henry oppdaget også hvordan man kunne lage ikke induktive viklinger ved å vikle ledningen bakover over samme området den var viklet i utgangspunktet.

S.F.B. Morse konsulterte Henry, og brukte en av hans artikler da han bygget den første telegraf.

Da Henry var 49 år gammel, var han med å stifte *the Smithsonian Institution*, hvis hensikt var å øke, og delegere kunnskap blant mennesker. Det er merkelig nok først og fremst som en av grunnleggerne av denne institusjonen at Joseph Henry er kjent.

Henry fortsatte å jobbe ved *the Smithsonian Institution* helt til han var åtti, og han en dag oppdaget at hans høyre hånd var paralyisert. Henry døde mens han sov 13. mai 1878, og i 1883 ble det avduket en statue av ham utenfor *the Castle*, det store biblioteket ved *the Smithsonian Institution*.

Joseph Henry lengtet på sine eldre dager etter den berømmelsen han syntes han fortjente, men dessverre tok det lang tid før hans resultater fikk anerkjennelse i vitenskaplige miljøer utenfor USA. Han hadde nok hatt stor glede over å vite at enheten for induktans henry(H) senere skulle bli oppkalt etter ham.



Michael Faraday (1791-1867)

Michael Faraday ble født i en landsby ved navn Newington utenfor London 22. september 1791. Faren James Faraday var en grovsmed, og sammen med moren Margaret Hastwell oppdro de Michael i et godt kristent hjem. Familien tilhørte den Sandemanske kirke som praktiserte en fredsommelig, uforstyrrelig trosform. Spesielt med den var at tilhengerne ikke ble overøst av skyldfølelse over alt de gjorde galt, slik som var tilfelle for mange andre trossamfunn på den tiden. De mente at de var frelst ved Jesu korsfestelse, og at menneskene burde være gode og gavmilde i takknemlighet, og for å vise at mennesker også kan gi av seg selv. Den Sandemanske religionen var tilhengere av askese, små krav til livet. De var ikke opptatt av eiendeler, og skulle være glade og fornøyde over livet, ettersom de mente dette ville behage Gud.

Michael Faraday var dypt religiøs, og personligheten hans var veldig i tråd med slik den skulle være i forhold til hans religion. Faraday vokste opp i en periode med økonomisk depresjon og sosialt kaos i store deler av Europa som følge av en kuldebølge og den franske revolusjonen.

Familien hans var svært fattig, og mange ganger måtte Faraday overleve på kun et brød i uka. Til tross for dette beskrives unge Michael Faraday som en glad gutt. Etter hvert ble familien nødt til å flytte til London, ettersom færre og færre på landsbygda hadde råd til farens tjenester. Her begynte Faraday på en dagskole hvor han lærte seg å lese, skrive og telle, men ikke stort mer.

Høsten 1804, da Faraday bare var 13 år måtte han finne seg en jobb for å hjelpe til med å forsørge familien. Dette viste seg å være et lykketreff, han fikk jobb hos Mr George Riebau som var en bokhandler og bokbinder. Etter et år som visergutt, ble han forfremmet til bokbinderlærling. Faraday benyttet seg av muligheten til å lese alt han kom over i bokhandelen, særlig interessert var han i mekaniske innretninger og bøker og naturfilosofi. I 1809 leverte dr. Isaac Watts inn ei bok som het *The improvement of the mind*, dette var en bok som handlet om metodikk og system for å tilegne seg kunnskap. Dr. Watts var spesielt nøye på å skjelne mellom ord og fakta, og at det viktigste tross alt var observerte fakta.

Faraday bestemte seg for at han ville bli vitenskapsmann, tilfeldighetene førte ham til elektrisitet. Han tok forelesninger i elektrisitet, hydrostatikk, optikk, geologi, teoretisk og eksperimentell mekanikk, kjemi, astronomi og meteorologi. I tillegg til dette fant Faraday ut at han trengte mer skolering innenfor morsmålet, så i syv år fra han var 19 til 26 år gammel gikk han en kveld i uka til privatundervisning i muntlig og skriftlig engelsk. Samtidig ble han mer og mer interessert i elektrisitet.

Faraday fikk lov av Riebaus til å lage seg et slags "laboratorium" i bokbinderverkstedet. Faraday hadde lest om Galvanis eksperimenter med "animalsk elektrisitet" og også om Alessandro Voltas "volta-søyle". I 1800 gjentok han forsøket med sink og kobber vekselvis oppå hverandre med plater dyppet i saltvann mellom hver skive. Faraday ble svært fornøyd da han fikk til eksperimentet på første forsøk. Ikke bare observerte han at det oppstod en strømkrets, men han merket seg også at det dannet seg et sinklag på kobber platene og et kobberlag på sinkplatene. Dette var noe som ikke kunne forklares på den tiden. Løsningen på dette problemet stusset Faraday over i mange år, og løsningen mange år senere ledet fram til lovene for elektrolytiske prosesser og mange av de senere oppdagelsene hans.

I 1812 gikk Faraday til kjemi forelesninger hos Humphry Davy på *The Royal Institution*. Her tok han nøye notater som faktisk skulle komme til å hjelpe ham senere. Nå hadde Faraday bestemt seg for å bli vitenskapsmann. Ambisiøs som han var skrev han brev til presidenten i *The Royal Society* om hvordan han kunne bli en vitenskapsmann. Da han ikke fikk svar, skrev han til Davy og la ved notatene han hadde tatt i forelesningene hans. Dette var visst et lurt trekk, for han fikk svar av Davy som ville treffe ham. En heldig hendelse for Faraday var at Davys assistent fikk sparken kort tid etter, og denne stillingen spurte Davy om Faraday ville ha, og det ville han selvfølgelig. I 1813 ble Faraday med Davy på en vitenskapelig tur rundt i Europa, her fikk han bl.a. treffe Ampère og Volta, to av heltene til Faraday.



Faraday og Davy på laboratoriet

Gjennom stort sett hele sitt liv hadde Faraday kun hatt menn i omgangskretsen sin, og Faraday var veldig opptatt av at alle mennesker bør selvrealisere seg selv for å gjøre noe viktig for sin omverden. Derfor mente Faraday at forelskelse og slikt var en uvelkommen avsporelse. I et dikt skrev han bl.a.

*What is the pest and plague of human life?
And what the curse that often brings a wife?
'tis love.*

Til tross for sin noget negative innstilling, ble han stormende forelsket i Sarah Barnard som var datteren til en av forstanderne i sandeman-kirken. Nå overgav han seg helt til å prøve å få henne til å gjengjelde hans interesse. Dette så i første omgang ikke ut til å virke, men etter å ha kurtisert henne en god stund, både ved besøk og pre brev, giftet de seg 12. juni 1813. Selv om de to hadde svært forskjellige interesser, ble ekteskapet deres beskrevet som svært harmonisk og lykkelig.

Da Ørsted i 1820 viste med sitt eksperiment en sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme, ble i likhet med mange andre også Davy og Faraday interessert. Grunnet en del andre forsøk, eksperimentering med stållegeringer og kurtisering av sin framtidige kone, tok det litt tid før Faraday virkelig gikk helhjertet inn for å løse problemer innenfor elektromagnetismen, men så ble han bedt om å skrive en historisk oversikt over denne nye vitenskapsgrenen, og da gjentok han de viktigste eksperimentene til Ørsted, Arago, Ampère, og enkelte andre.



Faradays laboratorium

Nå fikk han virkelig et innblikk i elektromagnetismens verden, og gjorde også en del egne forsøk. 3. september 1821 gjorde han noen eksperimenter som viste den elektriske kraften i en strømførende ledning hadde en tendens til å bevege den i tilnærmede sirkler rundt de magnetiske polene på magnetnålen. Faraday lagde et apparat for å vise dette fenomenet klarere. Han plasserte en stavmagnet vertikalt på et stykke voks i bunnen av en dyp skål fylt med kvikksølv til bare magnetpolen var synlig. En ledning som hang fritt til å kunne dreie rundt magnetpolen ble koblet til en strømkrets. Når så strømmen ble koblet til, roterte ledningen rundt magneten. Han lagde det også til slik at magneten roterte rundt ledningen. Dette er prinsippet bak verdens første elektromotor, og også nok et argument i haugen av argumenter for det at alle krefter i naturen er konverterbare i forhold til hverandre. I oktober 1821 skrev Faraday en artikkel som ble sendt til *Quartly Journal of Science* som beskrev hans nye oppdagelse.

I 1824 ble han valgt inn i *the Royal Society*.

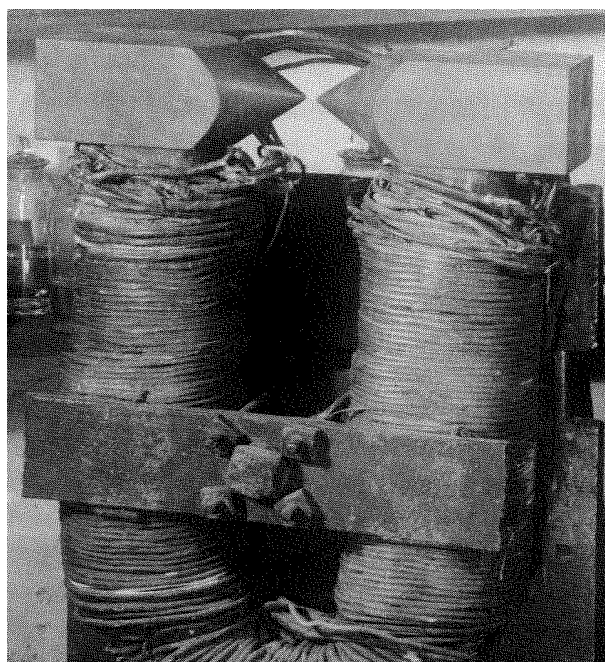
De neste ti år etter Faradays artikkel, vet man ikke noe om hans elektromagnetiske eksperimenter, dette kan skyldes en del anklager om plagiat og andre sårende utspill fra misunnelige fysikere, men også det at han overtok populærforelesningene etter Davy, noe det viste seg at han var fryktelig dyktig til. Han var en glimrendes pedagog, og ble berømt for sine seks juleforelesninger for barn.

I 1831 gjorde Faraday sin trolig viktigste oppdagelse, nemlig oppdagelsen av elektromagnetisk induksjon. Han hadde lenge lurt på om magnetisme kunne produsere elektrisitet ettersom elektrisitet kunne skape magnetisme. For å undersøke det smidde han en ring i mykt jern, rundt denne viklet han rundt den en del av den ene halvparten en spole av kobbertråd som var isolert med bomullstråder. Deretter forbandt han kobbertråden med polene på et batteri. Faraday mente at når strømmen gikk gjennom viklingen, så ville det skje noe inni jernringen. Eventuelle "krefter" som ble produsert ville være sterkest på den andre siden, derfor surret han nok en spole med isolert kobbertråd rundt en del av den andre halvparten av spolen. Disse trådene festet han til et galvanometer.

I det Faraday koblet til strømmen, vibrerte nåla på galvanometeret kraftig, for deretter å gå tilbake til sin opprinnelige posisjon. Når han så brøt strømmen, gikk nålen over i motsatt retning for deretter å igjen slå seg i ro på midten. Denne ringen ble etter hvert kjent som den berømte induksjonsringen, som faktisk også var verdens første transformator!

Selv om galvanometeret viste utslag når han sendte strøm gjennom primærspolen på induksjonsringen, ville Faraday vise at det var elektrisitet som beveget nålen på galvanometeret, og ikke en annen kraft. Det neste halvåret gjorde han en rekke forsøk med varierte forsøksbetingelser. Han varierte bl.a. materialet på spiralen, og eksperimenterte med forskjellige stillinger på magnetene. Forsøket som lyktes var en 10 cm lang jernsylinder viklet med en kobbertråd som var forbundet til et galvanometer. Denne sylinderen ble plassert vertikalt mellom to motsatte poler på to stavmagneter som var skråstilt med de andre polene i kontakt med hverandre. Når så kontakten mellom sylinderen og magneten ble vekselvis sluttet og brutt, viste det utslag på galvanometeret.

Nå var Faraday i stand til å produsere strøm når han ville. Han fortsatte å variere eksperimentet, og ble etter hvert klar over at det var endringen i spenningen som produserte strømmen. 17. oktober 1831 dekket han en hul pappkartong med åtte kobberspiraler som var surret i samme retning. Endene på spiralene ble buntet sammen og koblet til et galvanometer. Deretter dyttet han en stavmagnet så vidt inn i spiralsylinderen, og det kom et utslag på galvanometeret, da han så dyttet hele magneten inn i spiralsylinderen, kom det også utslag, men denne gangen beveget nålen seg i motsatt retning. Dette kalte Faraday selv for magneto-elektrisk induksjon. Nå var betingelsene for induksjon av elektrisk strøm klare, man trengte et magnetfelt, og en bevegelse av enten en magnet eller en leder i forhold til hverandre.



Faradays store elektromagnet

Strømmen som ble produsert på denne måten var støtvis, og Faraday ville undersøke om han kunne gjøre strømmen kontinuerlig dersom han erstattet bevegelsen med en roterende. Faraday brukte en kobberplate som roterte mellom sør og nordpolen på en magnet. Deretter festet han ledninger på forskjellige steder på skiven som han koblet til galvanometeret. Forsøket var en suksess.

Og slik ble verdens første dynamo til. En oppfinnelse som brukes til alt fra å omgjøre potensiell energi i vann til elektrisk strøm her i Norge, til å få sykkellys til å lyse v.h.a det roterende hjulet.

Selv om dette var en utrolig viktig oppdagelse, og Faraday hadde en viss anelse om at denne oppfinnelsen kom til å kunne brukes til mye, var han ikke videre opptatt av å finne bruksområder for det nye leketøyet. Faraday ville heller bruke tiden sin på å eksperimentere mer, og kanskje oppdage

mer. Et par år senere var statsministeren på besøk på *The Royal Institution*, og han pekte på Faradays elektromagnetiske maskin og lurte på hva den skulle brukes til. Da svarte Faraday; "Jeg vet ikke riktig ennå, Sir, men jeg er nokså sikker på at én dag kommer Deres regjering til å skattelegge den." Dette skjedde i 1880-årene.

Til tross for at Faraday ikke selv ville finne bruksområder for sine oppfinnelser, var han veldig fornøyd om noen kunne finne noe å bruke dem til. Han ville gjerne gjøre hverdagen enklere for mennesket.

Alle årene mens han eksperimenterte var han også foreleser på *The Royal Institution*, og en særdeles dyktig sådan. Men allerede som 35-åring begynte Faraday å merke tegn på sviktende

hukommelse, og hadde ofte intens hodepine. Dette skyldes mest sannsynlig hans eksperimentering med gasser, løsningsmidler og tungmetaller. Faraday drev nemlig ikke bare med elektromagnetisme, han bidro med mye annet forskjellig, som metoder til å forbedre søppelsitasjonen i London, bedre måter til å oppbevare matvarer til sjøs, og å finne et rensemiddel til å beskytte maleriene på *National Gallery*.

Etter 1860 fikk han oftere og oftere hukommelsessvikt, og i 1861 trakk han seg fra sine verv ved *the Royal Institution*, men fortsatte å forelese. Dessverre ble også dette snart umulig for ham, på sin siste forelesning 20. juni 1862 satte han ved et uhell fyr på notatene sine.

Gjennom hele sitt liv var Faraday opptatt av at mennesker skulle bidra sitt beste for samfunnet uten å forvente gjenytelse, han ville derfor ikke motta adelskap som ble tilbudt ham av dronningen, og ville heller ikke ta imot en god del pengebeløp han ble tilbudt for sin konsulent virksomhet. Faraday ble derfor aldri noen rik mann, og da han sluttet i sitt arbeid, var han forholdsvis fattig. Heldigvis tilbød dronning Viktoria ham en æresbolig hvor han og hans kone Sarah kunne bo i sine siste leveår. Etter hvert mistet Faraday all kontakt med omverden, og 25. august 1867 døde han i lenestolen sin 67 år gammel. Faraday ble etter eget ønske ikke begravd i *Wesminster Abby*, men på en mer anonym kirkegård, med en liten enkel gravstein hvor det kun sto:

MICHAEL FARADAY
BORN 22 SEPTEMBER 1791
DIED 25 AUGUST 1867

Til tross for at Faraday var en eksepsjonell fysiker, var han kjent for å være en matematisk analfabet, noe som er litt uvanlig for en fysiker av hans kaliber. Dette kan faktisk ha vært en fordel ettersom han derfor viet all sin tid på eksperimentering, noe han var veldig dyktig på, og overlot matematikken til andre. Han brevvekslet en periode med Maxwell og var svært interessert i matematikken Maxwell knyttet til eksperimentene hans, selv om han ikke skjønnte noe særlig av den, han likte at andre kunne bruke resultatene hans til å utvikle nye formler og teorier.

Gjennom hele sitt liv, var Faraday en lykkelig mann, selv om han fikk et vanskelig utgangspunkt i livet med en fattig familie. Det var kun på grunn av hans enorme pågangsmot, og enkelte lykketreff at han kom så langt som han gjorde. Han var alltid takknemlig for livet, og ønsket å yte noe tilbake til samfunnet han levde i, dette uten håp om gjenytelse av noe slag. Ikke rart han var svært godt likt av alle som traff han. Selv hadde han nok ingen anelse om at hans arbeid skulle bidra så mye til menneskeheten bl.a. med en måte å omforme forskjellige typer energi til en form vi mennesker kan anvende til hva det skulle være, men hvis han hadde visst det hadde det nok gitt ham en større glede enn noen av medaljene og utmerkelsene han mottok opp gjennom årene.

"Nothing is too wonderful to be true if it be consistent with the laws of nature." - Michael Faraday

Happy is the man who can recognize in the work of Today a connected portion of the work of life, and an embodiment of the work of Eternity. The foundations of his confidence are unchangeable, for he has been a made a partaker of infinity.

-James Clerk Maxwell



James Clerk Maxwell (1831-1879)

James Clerk Maxwell ble født i Edinburgh, Skottland 13. juni 1831, men familien flyttet ut på landet til et hus kalt Glenair i Middlebie, Galloway. Unge Maxwell ble beskrevet som en svært livsglad gutt med en utømmelig nysgjerrighet for alt som rørte på seg. Da han var åtte år gammel døde moren av magekreft, tilsynelatende den samme sykdommen som drepte James i samme unge alder. Foreldrene hadde egentlig tenkt til å undervise ham hjemme til han ble tretten år, men etter en mislykket erfaring med en privatlærer som slo ham, ble Maxwell sendt til sin tante i Edinburgh for å gå på akademiet der. Som en bondegutt med for det meste praktisk litt rart utseende tøy, ble Maxwell mobbet av de andre elevene. Ettersom han også hadde litt rare interesser, fikk han kallenavnet "Dafty" av de andre elevene, kanskje ikke det mest passende navnet for en som senere skulle bli verdensberømt for sine matematikk- og fysikk kunnskaper. Maxwell briljerte ikke spesielt de første årene på skolen, men midtveis begynte han å utmerke seg ved å vinne masse priser i bl.a. matematikk. Faren som var en ihuga hobby vitenskapsmann på flere områder må ha mye æren for at også Maxwell begynte å interessere seg for vitenskap. I 1846 skrev Maxwell sin første oppgave som het *On the description of oval curves, and those having a plurality of foci*. Her generaliserte han definisjonen på en ellipse. Dette hadde Descartes gjort før ham, men det var likevel et fantastisk arbeid av en fjortenåring. Oppgaven ble lest høyt på *the Royal Society i Edinburgh*. 16 år gammel studerte Maxwell matematikk, fysikk og logikk med henholdsvis Kelland, Forbes, og William Hamilton som forelesere. Her utmerket han seg sterkt, og Kelland ga Maxwell fri tilgang til laboratoriet sitt. Mens han studerte leste han bøker av blant andre Cauchy, Fourier, Monge, Newton, Poisson, Taylor, og Willis. Snart fant han ut at for å utvikle sitt talent videre, måtte han dra til Cambridge, som var et senter for fysikk og matematikk kunnskap.

Også på Cambridge ble Maxwell beskrevet som briljant, om enn noe eksentrisk. Han gjorde stort sett som han ville, og hadde ikke noe særlig strukturert måte å arbeide på. Det virket som om alt kom veldig lett til ham. Maxwell skilte seg ut på andre måter også. Fra 2 til 2.30 på natta løp han langs en korridor i øvre etasjen, ned trappa, langs hele korridoren i nedre etasjen, for deretter å løpe opp trappa og gjenta hele ruta. Dette gjorde han helt til beboerne av rommene langs ruta ble så lei at de la seg i bakhold bak dørene og kasta sko og hårbørster på ham. Til tross for hans eksentritet og noe ustrukturerte arbeidsform, skjønte hans lærere og medelever at han var usedvanlig talentfull. Maxwell gikk ut av skolen som nr 2 i sitt kull, kun forbigått av Edward Routh som i tillegg til å være en briljant matematiker, også arbeidet

strukturert og var flinkere til å tilpasse seg arbeidsmåtene på *Trinity College*. Maxwell ble stipendiat på *Trinity College* og jobbet der et par år etter at han hadde fullført skolen. Det var i denne tiden han første gang begynte å fatte interesse for elektromagnetisme. Etter disse to årene fikk han arbeid som professor i fysikk på et *College* i Aberdeen, denne jobben tok han delvis fordi farens helsetilstand var dårlig, og Maxwell ønsket å være i nærheten av ham.

Maxwell var aldri noen god foreleser, han hadde vanskelig for å sette seg ned på elevenes nivå, og hans geniale tenkemåte var vanskelig å følge for de fleste. En student forteller at han ofte ikke kom lenger enn fem minutter ut i timen før han stoppet opp og sa ” Dette her må jeg kanskje utdype litt nærmere” for deretter å fylle hele tavla med figurer og symboler som stort sett ingen klarte å følge med på, og plutselig var gjerne timen over uten at det nødvendige pensum var blitt gjennomgått. Likevel var han veldig god til å skrive notater, bøker og artikler som elevene kunne gjennomgå, og her var det lettere å følge hans tankegang. Studentene syntes dessuten at hans iver og genialitet kunne være veldig inspirerende. I løpet av de fire første årene i Aberdeen skrev Maxwell sin første artikkel om elektromagnetisme; *On Faraday's Lines of force*. Hensikten var å gi en matematisk form på Faradays konsept på elektriske felt. Thomsom hadde tidligere komponert en matematisk teori til Faradays elektriske kraftlinjer, og Maxwell hadde fått tak i dette arbeidet. Han skrev et humoristisk brev til Thompson der han ba om tillatelse til å ”stikke nesa si i Thompson arbeid”. Thompson skrev tilbake at det måtte han bare gjøre, og lykke til med det. Maxwell lyktes, hans nye teori gikk mye dypere enn Thompson noen gang kom. Den omhandlet både magnetiske og elektriske feltlinjer, og viste sammenhengen mellom dem. Deretter sendte den 26 år gamle Maxwell en kopi til Faraday. Faraday skjønte stort sett ingenting av matematikken i artikkel, men skjønte likevel at Maxwell hadde gjort et viktig stykke arbeid. I sitt svar unnskyldte han seg for at han ikke kunne skjønne de matematiske utledningene, og takket så mye for arbeidet. Dessuten sendte han med en artikkel han hadde skrevet, og antydte han at han kom til å gjøre en del forsøk på tiden i sine elektromagnetiske forsøk. Maxwell tente øyeblikkelig på ideen, og inkluderte tiden i sine nye arbeider. Ikke bare korresponderte Maxwell med Faraday, og gjorde mye viktig arbeid i denne perioden, men han var også opptatt av å kurtisere Katherine Dewar, datteren til rektoren på skolen, og de to giftet seg i 1858.

I 1860 fikk Maxwell stilling som professor i fysikk på *King's College* i London. Disse fem årene i London var de mest produktive i hans liv. Her gjorde han sitt arbeid på den dynamiske teorien om elektromagnetisme, utviklet nye ideer på oppførselen til gasser, og produserte verdens første fargefotografi. I 1861 og 1862 kom et arbeid kalt *On Physical Lines of Force*. Her lagde han en ”eter”modell, som gjorde ham i stand til å kalkulere farten til de elektriske bølgene han mente propagerte gjennom mediet. Den kalkulerte farten var forbausende lik lysfarten. Maxwell konkluderte med at *light consists of transverse undulations of the medium which is the cause of electric and magnetic phenomena.* Forskingen hans ga han stor tilfredsstillelse i motsetning til undervisningen. Han må ha visst at han ikke var særlig dyktig på dette området, og hevdet at mye tid bort fra sine studenter var til det beste både for dem og for ham. Til slutt fant han ut at han ikke trengte å ha en akademisk stilling lenger. Han hadde alle de vitenskaplige kontaktene han trengte for å kommunisere med resten av den vitenskaplige verden, og dessuten lagt seg opp nok penger til at han ikke var nødt til å arbeide. Maxwell lengtet tilbake til landet, og flyttet tilbake til Glenair for å ”spasere i marka og gjøre seg til venns med unge frosker og gamle vannrotter”, som han hadde gjort da han var yngre. I 1865 flyttet Maxwell til Glenair, og ble der helt til han noe motvillig mottok en stilling fra Cambridge om å bli Cavendishs første fysikk professor i 1871. De fire partielle differensial ligningene som nå er kjent som Maxwells ligninger ble for det meste utledet mens han bodde på Glenair, men dukket først opp ferdig utviklet i *A Treatise on Electromagnetism* i 1873.

Opprinnelig var det tolv ligninger, men Maxwells etterfølgere, hovedsakelig Hertz skrev dem om fordi de ville ha dem mer komprimert, og slik ble de tolv linjene til de fire linjene som er kjent som Maxwells ligninger, to som omhandler divergensen og curlen til det elektriske feltet **E**, og to som omhandler divergensen og curlen til det magnetiske feltet **B**.

Det tok lang tid før Maxwells arbeid fikk ordentlig anerkjennelse. Det var alt for lite eksperimentelt arbeid som støttet hans konklusjoner. Senere skulle Hertz utføre flere eksperimenter som understøttet Maxwells teorier.

Selv om Maxwell er mest kjent for sine fire ligninger, og sitt arbeid med elektromagnetismen, bidro han også betydelig på andre vitenskaplige områder. Han vant Adams Prize i 1857 for sin essay om Saturns ringer, og Airy skrev *It is one of the most remarkable applications of mathematics to physics that I have ever seen*. I 1866 formulerte Maxwell, uavhengig av Ludwig Boltzmann, Maxwell-Boltzmann kinetiske teori for gasser. Denne viste at temperaturer og varme involverte kun molekylbevegelse. Og mens han var på Cavendish finskrev han den eksepsjonelle matematikeren Henry Cavendish etterlatenskaper av notater og artikler. Dette ble beskrevet som et kapittel i den elektrisitetens historie som ikke kan sidestilles av noe. *The Electrical Researches of the honourable Henry Cavendish* ble utgitt i 1879

Det var alltid tydelig for omverden at Maxwell var en eksentrisk, og litt sær person, men noe annet som også var åpenlyst var at Maxwell var en usedvanlig sjenerøs, uselvvisk og pliktoppfyllende. Han passet alltid godt på, og støttet kona Katherine som opplevde lange stunder med depresjoner, til og med da han selv begynte å bli dårligere. I en periode på tre uker satt han ved hennes seng hver natt, og gjorde sine plikter for skolen om dagen. Han var også veldig støttende mot sine kollegaer, spesielt dem som ikke fikk så mye oppmerksomhet, og i sine rettelser av unge kollegaers artikler, ga han ofte mer informasjon enn det hadde vært i artikkelen i utgangspunktet. I den siste tiden før han døde, var Maxwell svært dårlig og hadde store smerter, men han hadde likevel som alltid et upåklagelig humør. James Clerk Maxwell døde 5. november 1879.

Maxwells ligninger:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = q/e_0$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -d/dt(\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A})$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$$

Elektromagnetismens historie, kortversjonen

Dersom man skulle definere en start på elektromagnetismen, måtte det nok vært Ørstedes forsøk i 1820, men det er noen tidligere oppdagelser som er vel verdt på merke seg.

I 1791, samme året som Michael Faraday ble født, utførte italieneren Luigi Galvani en del forsøk på dissekerte froskemuskler. Galvani brukte skalpeller av to forskjellige metaller som han satte i hver sin ende av muskelen, og observerte at muskelen trakk seg sammen. Galvani ville undersøke om det var noen sammenheng mellom muskelaktivitet og elektrisitet, og sluttet av sitt forsøk at kilden til elektrisiteten lå i muskelen, og han kalte dette animalsk elektrisitet. Galvanis venn Alessandro Volta hadde en mistanke om at kilden til elektrisiteten snarere lå i metallene, og ikke i muskelen. I 1800 gjorde han et forsøk hvor han la plater av kobber og sink vekselvis oppå hverandre, med papplater dyppet i saltvann mellom hver plate. Når han så festet en ledning på toppen av søylen og berørte bunnen av søylen med den andre enden av ledningen, kom det en gnist ut av bunnen på søylen, og dersom han festet den andre enden av ledningen i bunnen, gikk det en kontinuerlig strøm gjennom kretsen. Dette var verdens første elektriske batteri, kalt "Volta-søylen". Dette batteriet skulle bli ekstremt viktig for senere forskere på elektromagnetismen. Men det tok tjue år før noen skulle komme på å undersøke virkningen av "Volta-søylen" på en magnet.

I 1820 gjorde den danske fysikeren Hans Christian Ørsted en fantastisk oppdagelse rent ved en tilfeldighet. Han var vel trolig den første som hadde mistanke til at det var en sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme. Ørsted holdt en forelesing om sammenhengene mellom magnetisme og "galvanisk strøm" da han oppdaget at en magnetnål som var plassert i en glassboks under en strømførende ledning skatt raskt over i øst-vestlig stilling og tilbake igjen da han skrudde på strømmen. Hadde det vært en annen forsker, hadde kanskje hendelsen blitt ansett som tilfeldig og uinteressant, men heldigvis forsto Ørsted at dette var en viktig oppdagelse, mye takket være sine tidligere mistanker. Han reverserte strømretningen og observerte at nå skvatt nålen raskt over i vest-østlig stilling og tilbake igjen når strømmen ble skrudd på. Etter å ha brukt tre måneder på å fundere over oppdagelsen sin, sendte han ut en fire siders beskrivelse av sitt eksperiment til alle større universiteter, og de fleste kjente vitenskapsmenn i Europa.

Ørstedes oppdagelse vekte oppsikt stort sett i alle de vitenskaplige miljøene, og flere av tidens store fysikere begynte straks å arbeide med det nye feltet som hadde dukket opp. Først ute med nye oppdagelser var Ampère, Biot og hans assistent Savart. Disse holdt alle til i det vitenskaplige miljøet ved *Paris Academy*. Det utviklet seg til et lite hesteveddeløp mellom Ampère og Biot. De to hadde ganske forskjellige måter å arbeide på. Laplace som var en minister under Napoleon hadde en sterk innflytelse på det matematiske og miljøet i Paris, og mente all ny forskning burde begrunnes med og finne ut ny matematikk. Biot og hans assistent var en sterke tilhengere av denne metoden, og begynte med å prøve å finne en makroskopisk fenomenologisk lov som beskrev avstands avhengighet for en total effekt på en elektrisk krets fra en magnet. Deretter gjorde de en grunnleggende lov som gjaldt for bitte små delkrets elementer, Biot-Savarts lov. Denne viser bl.a. at intensiviteten til et magnetfelt som blir satt opp av en elektrisk strøm i en leder er omvendt proporsjonal med avstanden til lederen. Ampère foretrakk å eksperimentere, og dra konklusjoner fra utfallene av sine forsøk. Ørstedes arbeid ble reportert til akademiet ca 11. september 1820, og før slutten av september hadde Ampère oppdaget elektrodynamiske krefter mellom lineære ledere. Han oppdaget også raskt at kraften mellom to ledere som fører strøm i samme retning er en tiltrekkende kraft, og motsatt, to ledere som fører strøm i motsatte retninger frastøter hverandre. Ampère hadde

vanskelig for å føre sine resultater over til en matematisk form, og til dette fikk han stor hjelp av Felix Savary. Ampères resultater kan sammenfattes i det som etter hvert ble Ampères lov, som mest sannsynlig har fått det navnet nettopp av denne grunn, for matematikken i denne var ikke kjent på Ampères tid, og ble utledet av neste generasjons fysikere. Ampères arbeider skulle få stor betydning for andre forskere senere.

Omtrent samtidig var det noen som arbeidet med andre sider ved elektromagnetismen. To av disse var Joseph Henry og Michael Faraday, to menn som hadde merkelig mye til felles, selv om Henry var fra USA og Faraday fra England. De levde omtrent samtidig, begge kom fra fattige familier, begge var dypt religiøse menn, og viktigst; begge oppdaget induksjonen uavhengig av hverandre omtrent samtidig. Den største forskjellen var nok at Faraday tilhørte et stort vitenskapelig miljø ved *the Royal Institution* i London, mens Henry tilhørte et mye mindre miljø i USA hvor de var sene til å publisere artikler, noe som førte til at Henry gang på gang måtte se seg slått av Faraday. I ettertid har Faraday blitt kreditert oppdagelsen av induktans, mens Henry har fått kreditert selv induktans. Henry var den første som lagde store elektromagneter som kunne løfte opptil 300 kg. Det var da han eksperimenterte med disse at han oppdaget selvinduktans. Han hadde observert at det kom en stor gnist når han brøt kretsen, på samme måte som vi kan se at det kommer en gnist fra støpslet når man plutselig trekker ut kontakten for eksempel til støvsugeren.

I 1821 utga Faraday en artikkel som omhandlet prinsippet bak verdens første elektriske motor. Ti år senere i 1831 gjorde Faraday sitt forsøk med induksjonsringen, som også var verdens første transformator. En jernring med to ledninger viklet rundt hver sin side av ringen, det ene ledningen var koblet til et batteri("volta-søyle"), mens den andre var koblet til et galvanometer. For å forsikre seg om at det virkelig var magnetfeltet som førte til utslaget på galvanometeret, eksperimenterte han med en pappsyylinder med isolerte kobberviklinger rundt. Viklingene var forbundet med et galvanometer, og 17. oktober oppdaget han at når han dyttet en stavmagnet ut og inn av sylindere, fikk han utslag på galvanometeret. Han hadde oppdaget prinsippet bak induksjon; dersom man beveger en krets og en magnet i forhold til hverandre, får man elektrisk strøm. Faraday ga seg ikke med dette, han ville gjerne få en kontinuerlig strøm, og laget verdens første dynamo av en kobberplate koblet til et galvanometer med ledninger, som roterte mellom nord og sørpolen på en magnet.

Kronen på verket vil nok mange si er James Maxwells samling av elektromagnetiske prinsipper i sine fire ligninger. Maxwell skrev sin første oppgave *On Faraday's Lines of force* i 1855, om elektromagnetismen som ga matematisk form til Faradays konsept om elektriske felt. Før ham hadde også Thomson prøvd på dette, men Maxwell utviklet de matematiske teoriene mye dypere enn det Thomson hadde fått til. Maxwell sendte også en kopi av sin artikkel til Faraday, som slettes ikke skjønnte noe særlig av matematikken i artikkelen ettersom han kunne sies å være en matematisk analfabet, men han var glad for at Maxwell kunne utvikle hans arbeid videre. I 1873 ga Maxwell ut et sammendrag av all sin teori og andre aspekter ved elektromagnetismen i to deler kalt *A Treatise on Electromagnetism*. Det er her vi finner Maxwells fantastiske fire ligninger for første gang, selv om det opprinnelig var tolv ligninger, og de var på litt annen form. Det var Maxwells etterfølgere med Hertz i spissen ville ha mer "renhet" i ligningene, og komprimerte derfor Maxwells ligninger til den formen vi kjenner dem i dag. Det var også Heinrich Hertz som første gang klarte å vise eksperimentelle resultater som understøttet Maxwells arbeider som tidligere ikke hadde hatt så mange tilhengere, kanskje spesielt fordi det ikke var noen særlige eksperimenter med utfall som støttet teoriene, og det heller ikke var noen som klarte å finne ut hvordan de skulle klare å etterprøve Maxwells teorier eksperimentelt.

Kildehenvisning

Einstein sa en gang: ” Kunsten med å være kreativ er å skjule sine kilder godt..”
Likevel, her er mine;

Internett:

<http://www.arcticnet.no/la5xx/henry.htm>
<http://www.italian-american/volta.htm>
<http://www-gap.dcs.st-and.uk/~history/mathmaticians>
http://library.thinkquest.org/C004471/tep/en/biographies/count_a...
<http://www.corrosion-doctors.org/Biographies>
<http://www.energyquest.ca.gov/scientists/>
<http://www.ideafinder.com/history/inventors/volta.htm>
http://etc.princeton.edu/CampusWWW/Companion/henry_joseph.html
<http://scienceworld.wolfram.com/biography>

Bøker:

- *Remarkable Physicists – From Galileo to Yukawa*, Ioan James (2004)
- *Great Physicists-The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking*, William H. Cropper (2001)
- *Michael Faraday-fattiggutten som forandret verden*, Gunnar Bach (1990)
- *André Marie Amperé*, Jamer R. Hofmann (1995)

Elbilen



Venturi (Ref. <http://www.elbil.no>)

av
Anne Tronhus og Heidi Waterloo

**Prosjekt i FY 1303 Elektrisitet og magnetisme
Høsten 2004**

Innhold

<i>Innhold.....</i>	<i>2</i>
<i>Sammendrag</i>	<i>3</i>
<i>Innledning.....</i>	<i>4</i>
<i>Historie.....</i>	<i>5</i>
<i>Litt generelt om elbiler</i>	<i>6</i>
<i>Modeller</i>	<i>7</i>
<i>Think.....</i>	<i>7</i>
<i>Volvo.....</i>	<i>12</i>
<i>Batterier</i>	<i>13</i>
<i>Batterienes oppbygging.....</i>	<i>13</i>
<i>Bilbatteri.....</i>	<i>14</i>
<i>Batteriet i elbilen.....</i>	<i>15</i>
<i>Motoren</i>	<i>17</i>
<i>-likestrømsmotor</i>	<i>17</i>
<i>AC-motor.....</i>	<i>20</i>
<i>-vekselstrømsmotor</i>	<i>20</i>
<i>3-fase asynkron induksjonsmotor</i>	<i>23</i>
<i>Elektronisk kontrollenhet.....</i>	<i>26</i>
<i>Oppsummering.....</i>	<i>27</i>
<i>Litteraturliste.....</i>	<i>28</i>

Sammendrag

Elbilen er enkelt oppbygd. Den består i hovedsak av et batteri, en elektrisk motor og en elektronisk kontrollenhet. Batteriene som brukes er blybatterier og nikkel-kadmium-batterier. De omdanner kjemisk energi til elektrisk energi. Motoren bruker den elektriske energien og setter bilen i bevegelse.

I teksten skrives vektorer med **fet** type.

Innledning

Verden står i dag ovenfor store miljøproblemer. Mange ikke-fornybare energikilder er i ferd med å gå tomme og hver dag blir det laget store mengder miljøskadelig utslipp. Det må derfor tenkes nytt. Det må tas i bruk nye måter å skaffe energi på og de miljøvennlige metodene vi har må videreutvikles. Dette er ikke noe unntak innenfor bilbransjen. Mange bedrifter tenker framover og produserer biler som nesten ikke forurensar. Det finnes allerede biler drevet av solenergi, batteri og såkalte hydrogenbiler. Av disse er det de batteridrevne elbilene som oftest er å observere.

Vi hadde lyst til å vite mer om hvordan elbilene er oppbygd og hvordan de fungerer. Vi har i hovedsak sett på batteriene og motoren.

Historie

Allerede i 1873 ble den første elbilen vist. Det var i Edinburgh i Skottland, av en person ved navn Davidson. Det var en enkel firhjuls truck og batteriet som ble brukt var et jern/ sink batteri. Men det var faktisk 41 år tidligere at en elektrisk motor ble demonstrert. Prinsippet bak motoren var elektrisitet og magnetisme. Den bestod av en sylinder med en strømførende ledning rundt. Strømmen var tidsavhengig og dannet derfor et magnetfelt. Inne i sylinderen var det festet en magnet. Når den ble påvirket av det ytre feltet sørget den magnetiske krafta for at magneten beveget seg rundt. Magneten kunne igjen være festet til en aksling. Dette prinsippet er fortsatt mye brukt i dagens biler, f. eks er induksjonsmotoren bygd opp rundt samme tankegang.

I slutten av 1890- årene var det elbilen som solgte best i USA. Og hele 33 % av bilene var elektriske. Da bør det opplyses om at antall biler på markedet var 2300. I Norge ble den første elbiltesten gjennomført i 1899. Kjøretøyet hadde to seter og batteriet i en kasse bak. Men salget på elbilen i Norge var aldri noen stor suksess før under 1. verdenskrig. Da sørget mangelen på bensin og diesel for at de forurensende bilene fikk litt konkurranse. Det ble solgt 80 elektriske lastebiler og 5 elektriske personbiler. Selvfølgelig var mangelen på drivstoff den største grunnen til økt interesse for elbiler. Men også det at den var veldig godt egnet for varetransport, er en av hovedgrunnene til at salget tok seg opp. Etter 1. verdenskrig var det igjen bensin og diesel bilene som dominerte markedet og interessen for elbiler dalte. Så i 1940-årene var det nok en gang mangelen på drivstoff som gjorde at batteri ble energikilden. Men denne lille oppblomstringen ble ganske kortvarig. Da krigen var over var det liten eller ingen oppslutning om den lille miljøvennlige bilen.

Men nå er det håp for elbilene igjen. At folk er blitt mer miljøbeviste er trolig en av årsakene til at de finnes på norske veier. Men staten har også bidratt til økt oppslutning. De har vedtatt en del økonomiske fordeler for elbilsjåfører og en prøveordning som går ut på at elbiler kan kjøre i kollektivfelt. Spesielt i byer vil det være mye å spare på å kjøre biler drevet av batteri. Både tid og penger!

Den norske elbilen het PIVCO og ble produsert i Aurskog. Bilen ble i 1999 solgt til Ford og de skiftet navn til Think. Bilen fanget interessen til en del norske statsborgere og i Trondheim kjører det rundt ca 50 Think biler. Men modellen ble ingen stor suksess utenfor norske landegrenser. Ford solgte derfor modellen videre til et Sveitsisk firma, Kamkorp Microelectronics, i 2003. De driver fortsatt bedriften i Aurskog.

En annen norsk elbil er Kewet. Den ble kjøpt fra et dansk firma i 1999 og de lages i Oslo på bestilling.

Litt generelt om elbiler

Elbilene har en rekkevidde som varierer mellom 50 km og 90 km. Hvor langt en kan kjøre er avhengig av modellen og av sjåførens kjøremønster. Akselerasjon og høy hastighet krever mye energi, mens bremsing ved hjelp av motoren vil lade batteriene. Toppfarten på de vanlige elbilene er ca 90 km/t.

Bykjøring med en bensinbil er som godt kjent mye mer forurensende enn landeveiskjøring. Det er fordi virkningsgraden til bensinbiler er lavere når den stopper ofte og kjører ved lave hastigheter. Elbiler derimot har en bedre virkningsgrad når det gjelder bykjøring. De egner seg veldig godt der det er mye trafikk og en ikke skal kjøre så langt. Andre fordeler er at den ikke støyer og det viktigste av alt; ingen utslipp av CO₂, NO_x og partikkelstøv.

Det er i tillegg vedtatt en del økonomiske fordeler for en elbilsjåfør:

- Kan parkere gratis på kommunale parkeringsplasser
- Kan passere gratis i bomstasjoner
- Har ingen årsavgift
- Kan lades gratis på mange ladestasjoner i byene
- Har redusert servicekostnad fordi den har færre deler og krever mindre vedlikehold
- Full tank koster under 5 kr, dvs. under 10 øre pr km
- Billige å forsikre

Batteriene er plassert i en separat kasse under førersetet. Å lade batteriene tar ca 4 – 9 timer og dette gjøres ved vanlige strømuttak, 10 A eller 16 A. Batteriene er nokså dyre og derfor koster en elbil ganske mye, ca. 130 000 – 260 000 kr.

I oktober 2000 var det registrert 388 elektriske personbiler og 63 elektriske varebiler i Norge.

197 Think

81 Kewet

80 Peugeot

14 Citroen

(56 Peugeot varebiler)

Modeller

Think



Think (Ref. <http://think.no>)

Think er en norsk bil

Max hastighet: 90 km/t

0 - 50 km/t på 7 sekunder

Rekkevidde inntil 85 km

Ladetid: 6-8 timer

NiCd (Nikkel Cadmium) batterier, ca 250 kg

Egenvekt 940 kg

Vannkjølt 3-fase asynkron induksjonsmotor

Underramme av 90% høyfast stål, fullforsinket

Overramme av ekstrudert og sveiset aluminium

Karosseri av termoplast

Taket består av ABS-plast

Kewet



Kewet (Ref. <http://www.elbilnorge.no>)

Kewet er en norskprodusert (tidligere dansk) elbil.

Max hastighet: 80 km/t
0 - 50 km/t på 8 sekunder
Rekkevidde: 30 - 70 km
Ladetid: 6-8 timer
Blybatterier, ca 370 kg
Egenvekt: 513 kg
Motoren er en 72V DC motor
Karosseri: Glassfiberarmert polyester
Sikkerhetskabin: Varmgalvanisert stål

Peugeot



Peugeot 106 (Ref. <http://www.miljobil.no>)

Dette er en Peugeot 106 Electric

Max hastighet: 90 km/t
Rekkevidde: 80 km
NiCd (Nikkel Cadmium) batterier, ca 250 kg
Ladetid: 7 timer
Vekt: ca 1000 kg
Likestrømsmotor (DC-motor)
4 sitteplasser



Peugeot (Ref. <http://www.miljobil.no>)

Peugeot Partner Electric

Max hastighet: 95 km/t

Rekkevidde: 80-100 km

NiCd (Nikkel Cadmium) batterier, ca 250 kg

Ladetid: 7 timer

Vekt: ca 1400 kg

Likestrømsmotor (DC-motor)

Venturi



Venturi (Ref. <http://www.elbil.no>)

Franske Venturi har lansert en el-sportsbil Fetish.

Max hastighet: 170 km/t

0 - 100 km/t på 4,5 sekunder

Rekkevidde 250 - 350 km

Ladetid: 3,5 timer ved 80 A!

(Eller 16 timer ved 16 A)

Lithium-Ion batterier med vekt på 350 kg

Bilen har en pris på rundt 500.000 € eller 4,1 mill. kr, men kan importeres til Norge uten avgifter. Fetish er et godt eksempel på hva det er teknisk mulig å få til i dag, når det gjelder fart, kjørelengde og ladning.

Volvo



Volvo (Ref. <http://www.dn.no/dnBil/article358638.ece>)

Volvos nye prototype, 3CC

Bilen er utstyrt med en elmotor som kan få den opp i en hastighet på 135 km/t.

0-100 km/t går unna på omkring ti sekunder.

Bilen sies å ha en potensiell rekkevidde på 300 kilometer.

Aerodynamikken sies å være 30 prosent bedre enn på den nye Volvo S40.

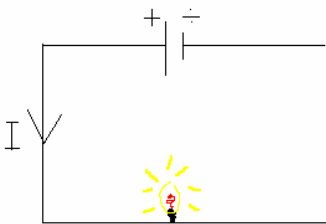
Bilen har mål som en toseters sportsbil, men har plass til tre.

Batterier

Batterienes oppbygging

Hver eneste dag bruker vi energi. Vi trenger det for å komme oss opp om morgenen, for å bevege oss, for å lage mat, til oppvarming, for å transporteres til og fra jobb, ja kort og godt for å overleve. Og energi får vi på utallige måter. Noen energikilder er mat, vindkraft, vannkraft, gass, batteri og vår viktigste energikilde, sola. I dagens vestlige samfunn har vi blitt totalt avhengige av batteriet som energikilde. Hva skulle vi f. eks gjort uten mobiltelefonen? Og om noen år kan vi kanskje ikke skjønne hvordan folk klarte seg uten biler som er batteridrevne.

Et batteri omdanner kjemisk energi til elektrisk energi. Batteriet er oppbygd av galvaniske celler. Det er de galvaniske cellene som omformer den kjemiske energien, og sørger for at det går en elektrisk strøm i en krets. En gitt krets kan være et batteri som er koblet i serie med en motstand, f. eks en lyspære.



Figur 1.

Her ser vi en strømkrets. Kretsen består av et batteri og en lyspære som er koblet i serie.

Det er spenningsfallet fra den positive polen til den negative polen som driver ladningene i kretsen. I figuren over ser vi at strømmen (ladningene) går fra + til -. Siden det er et spenningsfall V fra den positive til den negative polen, vil ladningene tape energi.

Definisjon fra Ergo: "Energi kan verken oppstå eller forsvinne, bare gå over i andre energiformer." Den tapte energien finner vi altså igjen som en annen type energi. I kretsen ovenfor har energien gått over til varme og lys i motstanden (lyspære). Så når ladningene har kommet til den negative siden av batteriet, bringer de kjemiske reaksjonene i de galvaniske cellene ladningen tilbake til utgangspunktet. Og den tapte energien gis tilbake. Slik er det altså batteriet omdanner kjemisk energi til elektrisk energi.

Ohms lov forteller oss at $V = R \cdot I$.

V er spenningsfallet fra den positive til den negative polen.

I er strømmen i kretsen.

R er den totale motstanden i kretsen.

Den totale motstanden er summen av den indre motstanden (motstanden i batteriet) og den ytre motstanden (motstanden i kretsen).

R kan da skrives som $r + R$, der r betegner den indre og R betegner den ytre motstanden.

Setter vi inn i Ohms lov får vi at $\epsilon = (r + R) \cdot I$.

ϵ er den elektromotoriske spenningen.

Vi skriver om og får at $\epsilon - r \cdot I = R \cdot I = V$.

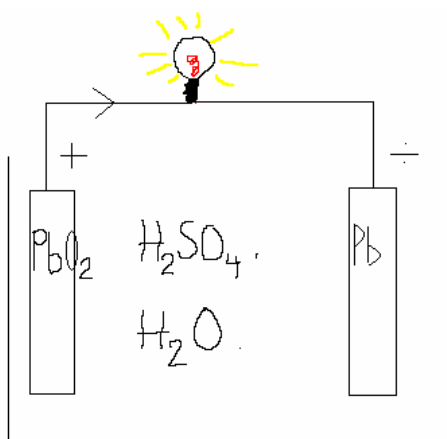
Hvis det går en strøm $I \neq 0$ i kretsen, er polspenningen V større enn den elektromotoriske spenningen ϵ . Hvis det ikke går en strøm i kretsen, altså at $I = 0$, er polspenningen $V = \epsilon$. Polspenningen er med andre ord avhengig om det går en strøm i kretsen eller ikke.

I generell fysikk, bind 2 er det skrevet et bilde på hva som skjer når batteriet omdanner kjemisk energi til elektrisk energi. "Dette er analogt med vann som strømmer fra et vannreservoar i en viss høyde over havnivået gjennom en vannledning og avgir energi til en turbin før det ender i havet. Ved hjelp av varmen fra solen vil vannet fordampe og komme tilbake til vannreservoaret. I denne analogien spiller solen den samme rollen som batteriet."

Bilbatteri

Batteriet i vanlige biler er som regel blyakkumulator. Denne typen batteri kalles sekundære fordi den elektrokjemiske reaksjonen kan reverseres og batteriet lades opp igjen. Batteri som ikke kan lades opp kalles primære batteri.

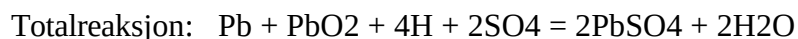
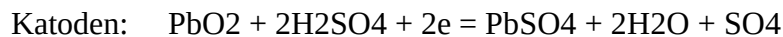
Bilbatteriet er vanligvis satt sammen av 6 galvaniske celler, hver celle med en spenning på 2V. En celle er igjen oppbygd av to elektroder, en anode og en katode. Anoden, den negative elektroden består av bly. Katoden, den positive elektroden består av blyoksid. Elektrodene står i en ganske sterk oppløsning med svovelsyre, H_2SO_4 , som kalles en elektrolyttløsning.



Figur 2.

Denne figuren viser et bilbatteri. Det er to elektroder som er satt ned i en oppløsning med svovelsyre. Mellom elektrodene er det en strømførende leder og en lyspære. På grunn av de kjemiske reaksjonene vil det gå en strøm i ledningen og lyspæren lyser.

Når batteriet kobles til en ytre krets går det en strøm fra den positive til den negative polen. I figuren over er den ytre kretsen en strømførende ledning og en lyspære. Etter hvert som batteriet lades ut skjer følgende reaksjoner:

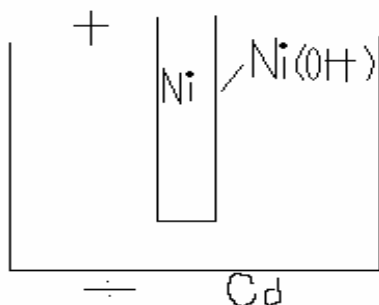


Av totalreaksjonen ved anoden kan vi se at SO_4 -ionene blir absorbert og elektronene blir sendt ut i den ytre kretsen. Svovelsyren blir dermed fortynnet. Til slutt vil reaksjonene stoppe. Men denne typen batteri kan som kjent lades opp igjen. Det gjøres ved å koble batteriet til en likespenningskilde. Da vil strømmen passere gjennom batteriet i motsatt retning. Reaksjonene snur og batteriet lades opp.

Batteriet i elbilen

I en elektrisk drevet bil er det den energien som er lagret i store batteri som driver motoren. De mest brukte batteriene er vanlige blybatteri (blyakkumulator), de brukes i f. eks Kewet, eller nikkel-kadmium-batteri som er i bruk i Think.

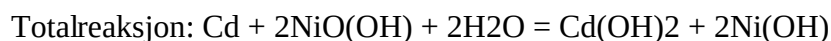
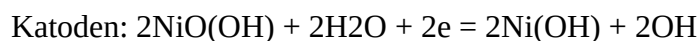
Nikkel-kadmium-batteriene er den dyreste typen, men har derimot størst energitetthet. Det er ca 250 kg tungt og lagrer energi opptil 11.5 kWh ved hjelp av 16A eller 10A likestrømkilder. Anoden består av kadmium og katoden består av nikkel og er dekket med Ni(OH) .



Figur 3.

Et nikkel-kadmium-batteri.

Reaksjonene er:



Men nikkel -kadmium batteriet blir forbudt fra og med 2005. Grunnen til det er at det inneholder store mengder miljøskadelig kadmium.

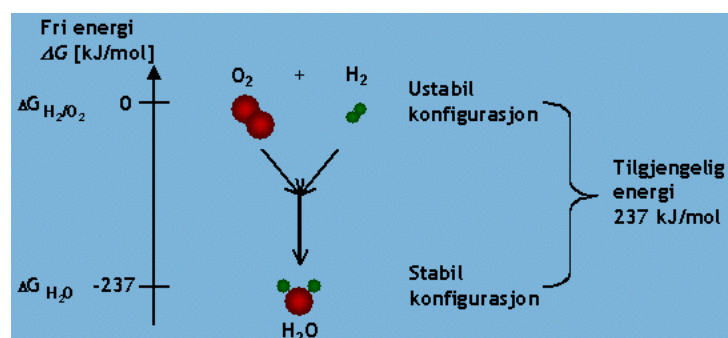
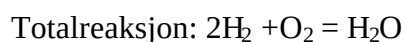
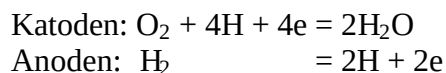
Et alternativ

Brenselceller omdanner i likhet med batteriet, kjemisk energi til elektrisk strøm og varme. Og de er derfor en mulig erstatte til NiCd batteriet. En svært aktuell brenselcellen i dag heter PEMFC, polymer elektrolytt membran brenselcelle. Den fungerer ved hjelp av luft! Det geniale med denne måten å lage elektrisk strøm på er at den verken forurensar eller at den er spesielt dyr, i tillegg er støynivået lavt og de er meget driftsikre. Det er kanskje derfor lett å forstå at de ni største bilfabrikantene i verden vil ta i bruk denne oppfinnelsen i bilene sine i nærmeste framtid.

Men hvordan fungerer brenselcellen?
Og hvorfor har ikke noen ”funnet det opp” tidligere?

Denne måten å lage strøm på er faktisk ikke en ny oppdagelse. Allerede i 1839 fant en tysk teknolog ved navn Christian Friedrich Schoenbein ut at ved å kombinere hydrogen og oksygen får en dannet strøm. Men det var ikke før i 1960 at de for alvor ble tatt i bruk. Da ble oppdagelsen videreutviklet i forbindelse med Apolloferden til månen. I dagens samfunn er PEM brenselcellen i aller høyeste grad nyttige. Den elektriske energien blir laget ved hjelp av to atskilte elektrokjemiske reaksjoner. Det som trengs er oksygen, hydrogen, en strømførende leder, to elektroder av porøst kull og en kalium-hydrogen-elektrolytt. Elektrolytten fungerer som en elektrisk isolator, ionisk leder og fysisk barriere mellom anode og katode. Oksygenet reduseres på katoden og reagerer med protoner, avfallsstoffet er vann. Som for øvrig er det eneste og det bringes ut av cellene som damp. Hydrogenet blir pumpet inn i anoden og oksidert til protoner og elektroner. Ionene strømmer gjennom elektrolytten mens elektronene går rundt i en strømførende leder.

De kjemiske reaksjonene er:



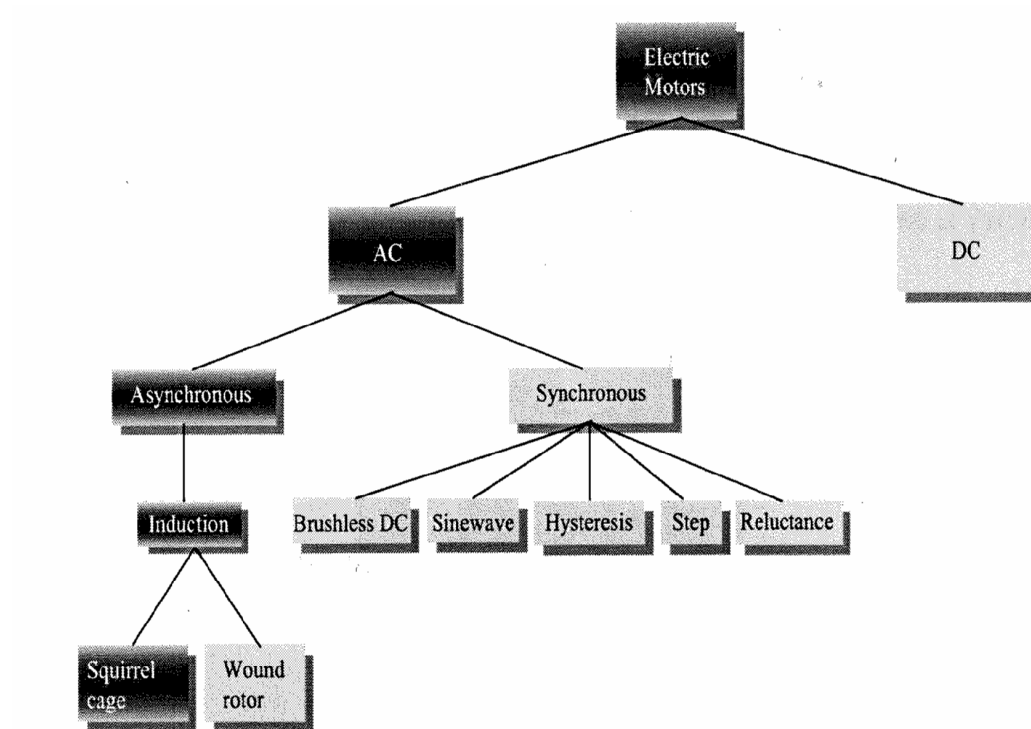
Figur 4.

Figuren er hentet fra en artikkel om brenselceller og beskriver hvorfor hydrogen og oksygen reagerer og danner vann. (Ref. http://www.fuelcell.no/principle_mainpage_no.htm)

Figuren over viser at reaktantene hydrogen og oksygen har høyere fri energi (kjemisk energi), enn vann. Fordi hydrogenet og oksygenet søker lavere fri energi vil de reagere med hverandre.

Motoren

Motoren i en elbil er en elektromotor. En elektromotor omdanner elektrisitet til mekanisk bevegelse. Det finnes mange ulike typer, og figuren nedenfor viser hvordan disse kan deles inn. De vanligste motortypene i elbilene er induksjonsmotoren og DC-motoren



Figur 5.

Oversikt over de ulike elektromotorene.

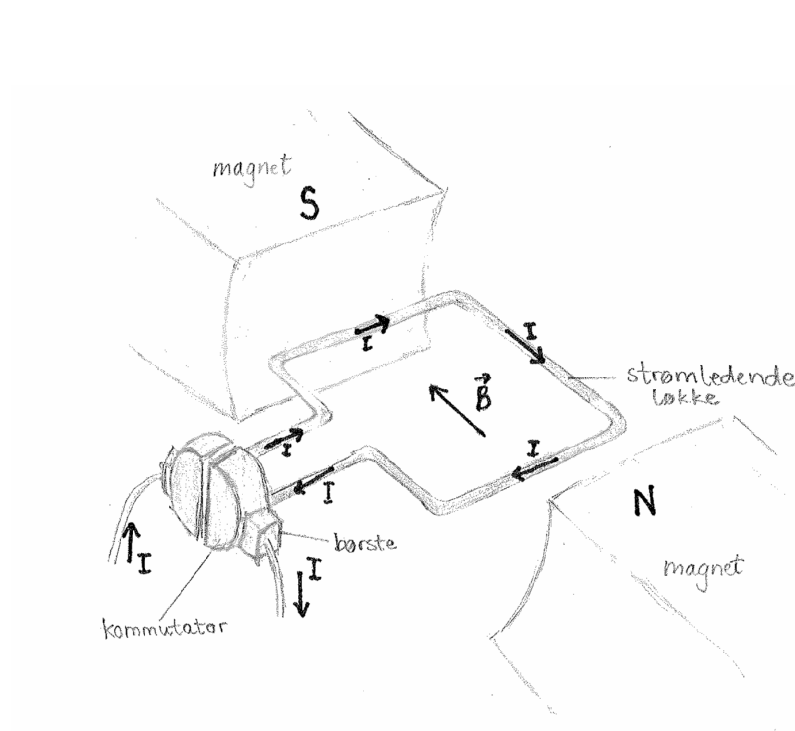
(Ref:http://www.eetkorea.com/ARTICLES/2001APR/2001APR27_AMD_DSP_AN.PDF)

DC-motor -likestrømsmotor

Likestrøm er en stabil, tidsuavhengig strøm. På engelsk heter det direct current og vi omtaler det derfor ofte som DC.

En DC-motor består av et magnetfelt, en løkke som det går likestrøm gjennom, en kommutator som sørger for å skifte strømretningen og børster som skaper elektrisk kontakt med kommutatoren. Når en elektrisk strøm går gjennom en løkke i et magnetisk felt, danner de magnetiske kreftene et dreiemoment som setter motoren i gang.

En enkel skisse av en DC-motor:



Figur 6.

Likestrøm sendes inn i en løkke i et magnetfelt. Kommutatoren snur strømmen (når løkken står vinkelrett på magnetfeltet), og løkken vil rotere rundt.

Vi har en aksling festet til løkken. For å få akslingen til å rotere og for å få noe utbytte av en slik motor, må løkken dreie rundt i samme retning.

Hvis vi sender inn likestrøm og følger løkkens bevegelse ut fra kreftene som blir dannet, ser vi at løkken vil snu når den har kommet så langt at den står vinkelrett på magnetfeltet. For å unngå at løkken snur, kan vi snu strømmen. Det er kommutatorens oppgave. Den snur strømmen akkurat i det punktet løkken skal til å snu, og dette medfører at kreftene vil virke på løkken slik at den får et dreiemoment, som gjør at løkken vil rotere rundt.

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$$

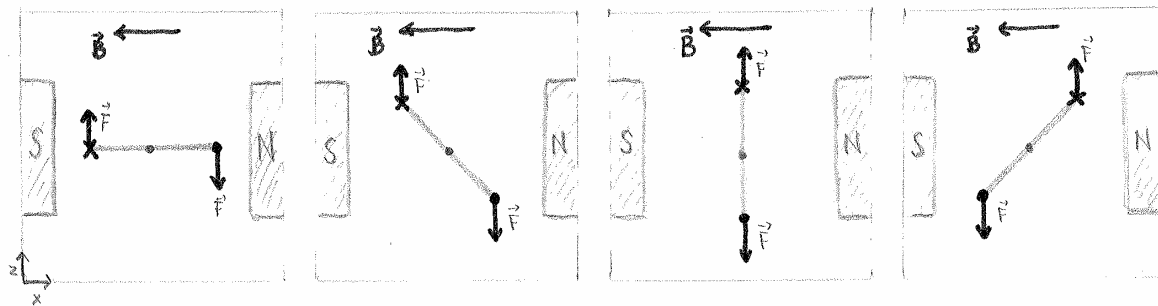
hvor $\mathbf{F}$ er krafta, I er strømmen, $\mathbf{B}$ er magnetfeltet og $\mathbf{L}$ er lengden av en side til løkken. Det vil virke krefter kun på de sidene hvor magnetfeltet står vinkelrett på.

$$\mathbf{t} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} = I\mathbf{A} \times \mathbf{B}$$

med absoluttverdi $\tau = I \cdot A \cdot B \cdot \sin\theta = I \cdot L \cdot B \cdot \sin\theta$

hvor $\mathbf{m}$ er det magnetiske dipolmomentet, A er arealet og θ er vinkelen mellom magnetfeltet og løkkens normal.

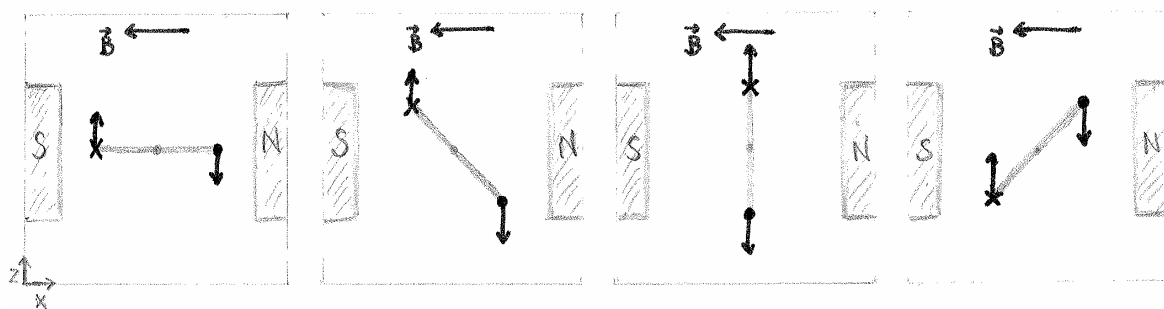
Uten å snu strømmen:



Figur 7.

Vi lar strømmen gå i samme retning og ser på fire ulike tidspunkt for løkken i magnetfeltet. Kraftene vil virke slik at løkken blir stående og vippe fram og tilbake.

Når vi snur strømmen:



Figur 8.

Vi snur strømmen idet løkken står vinkelrett på magnetfeltet. Da vil kreftene virke slik at løkken roterer rundt.

Kreftene "foran" og "bak" vil ikke bidra til noe dreiemoment. De vil kun virke på løkken i en slik retning at de prøver å strekke den, men siden løkken er fast vil ikke disse kreftene ha noen innvirkning.

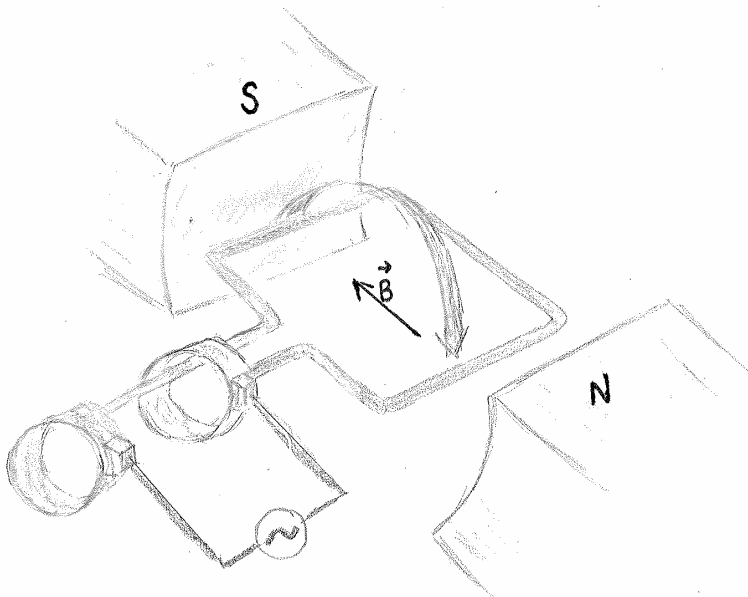
Det finnes to typer likestrømmotorer, seriemotorer og shuntmotorer. I en seriemotor er magnetviklingene og rotorviklingene seriekoblet, mens i en shuntmotor er de parallellkoblet.

AC-motor -vekselstrømsmotor

Vekselstrøm er elektrisk strøm som forandrer retning gjentatte ganger. Den vanligste formen for vekselstrøm er strøm med sinus-bølge-mønster. Vekselstrøm heter alternating current på engelsk, og vi kaller det derfor AC-strøm.

Det finnes mange typer vekselstrømsmotorer. Det kan vi se fra figur 5. Vekselstrømsmotorer deles i hovedsak inn i asynkron og synkron, men disse deles igjen videre. Asynkron og synkron har med rotasjonshastigheten å gjøre, og dette kommer vi litt mer inn på senere.

For å gå litt gradvis fram begynner vi med å se på en generell skisse for AC-motorer:



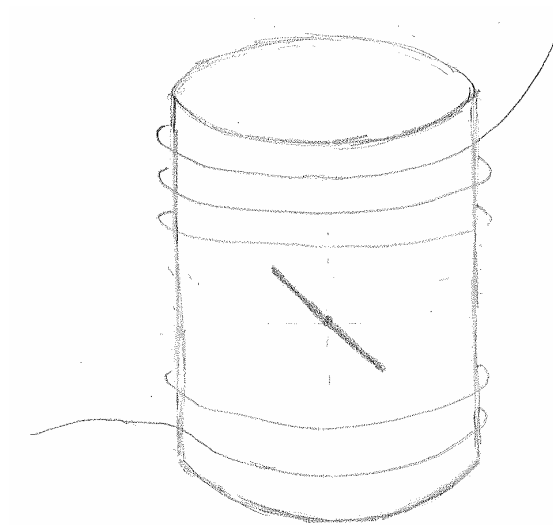
Figur 9.

Vekselstrøm sendes inn i en løkke i et magnetfelt. Løkken vil da rotere rundt.

Denne utgaven ligner veldig på DC-motoren, men her sender vi inn vekselstrøm i stedet for likestrøm. Vi trenger altså ingen kommutator for å snu strømmen slik at løkken skal rotere, her roterer den av seg selv.

Vi kan også ha elmotorer uten å sende strøm inn til løkken i magnetfeltet. Vi kan i stedet få dannet en strøm i løkken ved induksjon. Et magnetfelt som varierer kan nemlig indusere (frambringe) en elektrisk strøm.

En figur som viser dette er:



Figur 10.

Ved å sende vekselstrøm i viklinger viklet rundt en sylinder, får vi dannet et varierende magnetfelt inne i sylindere. Har vi en ledende sløyfe inne i sylindere, vil det varierende magnetfeltet indusere en strøm i løkken, og løkken vil rotere rundt.

Faradays induksjonslov (fra Ergo):

Når den magnetiske fluksen gjennom en ledersløyfe varierer, blir det indusert en elektromotorisk spenning i ledersløyfen. Den induserte spenningen er lik minus den tidsderivate av fluksen, $\epsilon = -\Phi'(t)$

Magnetisk fluks (fra Ergo):

Den magnetiske fluksen gjennom en flate er lik produktet av flukstettheten i magnetfeltet og arealet av flate, $\Phi = B \cdot A$
(eller fra formelark: $\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$)

Lenz' lov:

Fra Ergo: En indusert elektrisk strøm motvirker årsaken sin.

Fra Generell fysikk: Den induserte strømmen motsetter seg fluksforandringen

I figur 10 ser vi løkken fra den ene siden. Denne løkken er en ledende løkke og den er festet til en aksling. Vi sender inn vekselstrøm i viklingene som er viklet rundt sylindere og denne vekselstrømmen vil danne et magnetfelt i sylindere som varierer.

Har for eksempel at

$$I(t) = I_0 \cos \omega t$$

Magnetfeltet er da gitt ved

$$B(t) = \mu_0 \cdot n \cdot I(t) = \mu_0 \cdot n \cdot I_0 \cos \omega t$$

hvor n er antall viklinger pr lengdeenhet og μ_0 er permeabiliteten for vakuum.

Fluksen er gitt ved
 $\Phi(t) = B(t) \cdot A \cdot \cos\theta$

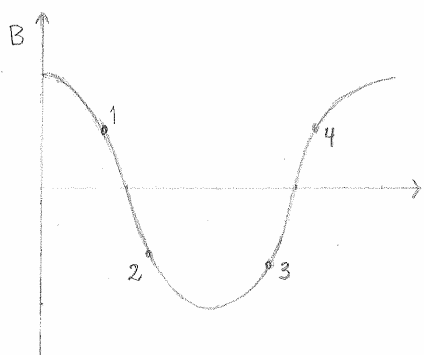
Den elektromotoriske spenningen er gitt ved
 $\varepsilon(t) = -\Phi'(t)$

og dette igjen medfører

$$I_{\text{ind}} = \varepsilon(t)/R$$

(hvor R er motstanden i løkken).

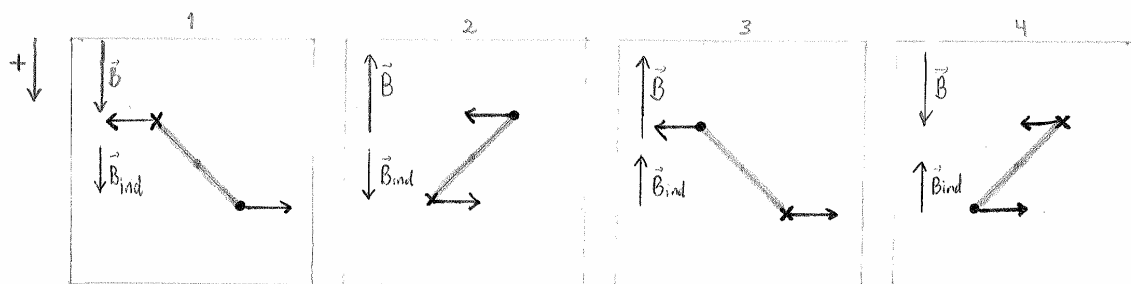
Vi kan se på løkken ved enkelte tilfeller:



Figur 11.

Grafen viser magnetfeltet.

1. Magnetfeltet er positivt og avtar. Fra Lenz' lov får vi at det induerte feltet virker samme vei.
2. Magnetfeltet er negativt og øker. Det induerte feltet virker motsatt vei.
3. Magnetfeltet er negativt og avtar. Det induerte feltet virker samme vei.
4. Magnetfeltet er positivt og øker. Det induerte feltet virker motsatt vei.



Figur 12.

Figuren viser magnetfeltet, det induerte magnetfeltet, retningen til den induerte strømmen og kreftene som virker på løkken. Vi ser på fire forskjellige tidspunkt. Bilde 1 viser hvordan kreftene virker i punkt 1 i figur 11. Bilde 2 viser punkt 2, osv.

Kreftene vil føre til at løkken roterer, og vi får en slags motor. Det er i prinsippet slik en induksjonsmotor fungerer.

Induksjonsmotorene vi finner i elbilene er noe mer komplisert oppbygd. Den vanligste induksjonsmotoren er en 3-fase asynkron induksjonsmotor. Denne finner vi blant annet i Think-bilene.

3-fase asynkron induksjonsmotor

En induksjonsmotor er i hovedsak bygd opp av en stator og en rotor.

Stator er en sylinder med flere spoler i veggen. Når det sendes vekselstrøm gjennom disse spolene dannes det et (roterende) magnetfelt i sylindren.

Rotor er en magnet som er festet på en aksling og plassert midt i stator. I de fleste induksjonsmotorene er rotoren slik at den ligner på et "squirrel-cage", direkte oversatt til norsk blir det et ekornbur. Den består altså av et visst antall kopper- eller aluminiumstaver og to ringer (av Cu el Al) som sammen danner et bur. Inni buret er det en jernkjerne og resten er fylt med stål.

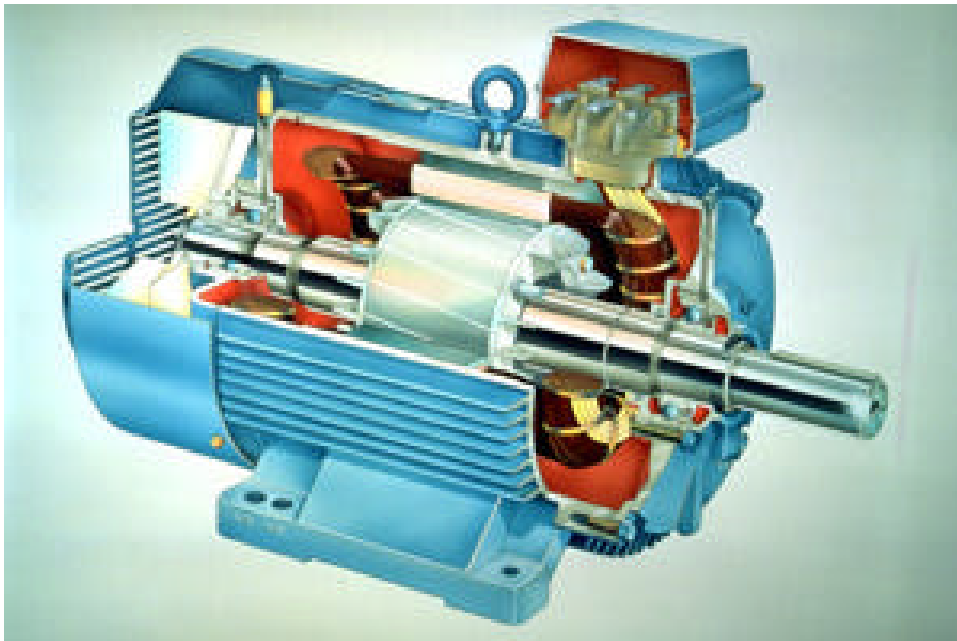


Figur 13.

Rotor. De fleste rotorene består av et ekornbur-lignende gitter.

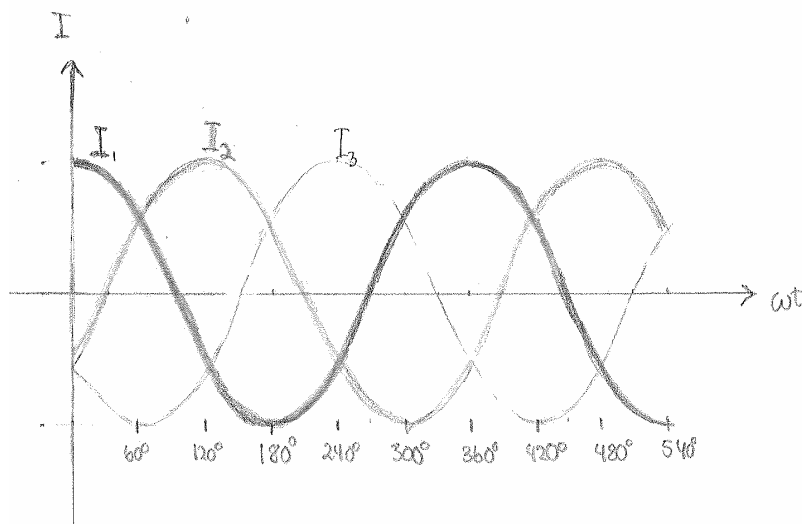
(Ref. <http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/async.htm>)

I virkeligheten ser motoren slik ut:



Bildet viser en AC induksjonsmotor med ekornbur-rotor.
(Ref. http://www.ecmweb.com/mag/electric_minimizing_ac_induction/)

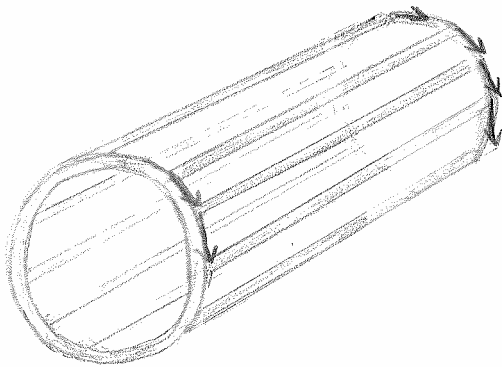
Denne motoren er en 3-fase-motor, dvs. strømmen sendes inn i 3 ulike faser. De er faseforskjøvet med 120° .



Figur 14.
Strømmene som sendes inn i stator er faseforskjøvet med 120°

Disse faseforskjøvede strømmene danner et magnetfelt som roterer med hastigheten til statorfrekvensen ω_e . Det skiftende magnetfeltet induserer en strøm i stavene i buret. Disse strømmene danner igjen et magnetfelt rundt rotor-wiren. Disse to magnetfeltene skaper krefter som gjør at rotoren begynner å rotere. Den roterer i samme retning som stator-feltet, men med en lavere hastighet ω_r . Hvis rotoren roterer med samme frekvens som stator, ville rotor-feltet ha vært i fase med stator-feltet og induksjon ville ikke ha vært mulig. Forskjellen mellom statorfrekvensen og rotorfrekvensen kalles slip. ($\omega_{\text{slip}} = \omega_e - \omega_r$).

Dreiemomentet utvikles altså ved virkningen av strømmene som går i rotorstavene og statorens roterende magnetfelt.



Figur 15.

De to magnetfeltene danner krefter som virker på rotoren slik at den vil gå i rundt.

Hvis vinkelrett på:



Figur 16.

Vi ser på en av sløyfene i buret. Hvis magnetfeltet står vinkelrett på sløyfen, og magnetfeltet øker, vil den induserte strømmen (ut fra Lenz' lov) ha en retning som vist på figuren.

Det dannes ulike strømkretser i buret. Strømmens retning i disse kretsene er avhengig av hvordan fluksforandringen er gjennom arealet av sløyfen, hvordan magnetfeltet står i forhold til sløyfen.

Elektronisk kontrollenhet

I en elmotor kan ofte mye mer av energien brukes til nyttig arbeid i forhold til en bensinmotor. Først var elmotoren vanskelig å hastighetsregulere. Motoren gav bare full effekt ved noen bestemte hastigheter. Dette ble løst ved utvikling av kraftelektronikken. En elektronisk kontrollenhet gjør det mulig å regulere hastigheten som magnetfeltet roterer med ved at frekvensen på vekselstrømmen (i tillegg til strømstyrken) blir regulert ved for eksempel gasspedalen. Når det trykkes på gasspedalen, regulerer kontrollenheten både spenning og frekvens slik at motoren går hurtigere. Ved bremsing sørger elektronikken for at motoren fungerer som en dynamo og tilfører energi til batteriene. Teknikken med frekvensstyring sørger for at motoren kan arbeide med maks dreiemoment over så å si hele turtallsområdet. Det gir god akselerasjon på de første meterne ut fra lyskryss, selv om antall hestekrefter er beskjedent.

Oppsummering

I denne prosjektoppgaven har vi studert elbilen og satt oss inn i hvordan batteriet og motoren fungerer. Det var morsomt å lære litt om batteridrevne biler siden vi visste så lite fra før. Foreløpig er elbiler lite utbredt, men med litt større satsning på videreutvikling kan elbilen absolutt få større oppslutning. Spesielt i byer vil de være et godt alternativ til bensinbilene. Vi har satt oss inn i to typer motorer, DC-motoren og induksjonsmotoren. DC-motoren var grei å forstå, men 3-fase asynkron induksjonsmotor var nokså komplisert. Vi har forstått hvordan den fungerer, men vi klarte aldri helt å bevise (vha fysiske lover) hvorfor alt er som det er.

Litteraturliste

- Lillestøl, Hunderi og Lien: Generell fysikk bind 2.
- Westbrook, Michael H.: The electric car: development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars.
- Morten, Helbæk; Fysikalsk kjemi.
- James E. Brandy; Generell kjemi.
- Christian Callin m/flere: Ergo, 3 Fysikk
- Tor Brandt m/flere: 3 Kjemi
- <http://www.engin.umich.edu/labs/csdl/ME350/motors/ac/induction/>
- <http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/async.htm>
- http://www.fuelcell.no/principle_mainpage_no.htm
- <http://www.bellona.no/no/energi/hydrogen/11576.html>
- <http://www.elbilnorge.no>
- <http://www.ntnu.no/gemini/2003-01/3.htm>
- <http://www.ntnu.no/gemini/2003-05/9.htm>
- <http://www.trailerqueens.com/Miljobilen.html>
- <http://www.oslosurf.com/innhold/00000017.shtml>
- <http://www.pors.hit.no/~trondc/motor.htm>
- <http://www.elbil.no>
- <http://www.lillemarius.com>
- http://www.ecmweb.com/mag/electric_minimizing_ac_induction/
- http://www.eetkorea.com/ARTICLES/2001APR/2001APR27_AMD_DSP_AN.PDF
- http://www.fact-index.com/e/el/electric_motor.html
- http://vmc.ppf.ktu.lt/normantas/ElMasinos/elvariklis/ACR_all.pdf
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>
- <http://think.no>
- <http://www.dn.no/dnBil/article358638.ece>
- <http://www.miljobil.no>

Prosjekt i Fy 1303

Brenselceller

av
Bård Martin Kjelling
Tor Nordam

Innholdsfortegnelse

Abstract	side 3
Innledning	side 3
Teori	side 3
Introduksjon	side 3
Reversibel cellespenning	side 5
Bidrag til overspenning	side 6
Utrykk for overspenning som funksjon av strøm	side 8
Impedansspektroskopi og strømbruddstest	side 8
Eksperimentelt	side 9
Resultater	side 12
Diskusjon	side 14
Strøm som funksjon av motstand	side 14
Karakteristisk spenningskurve	side 15
Strømbrudd	side 17
Applikasjoner	side 18
Oppsummering	side 19
Referanser	side 20

Abstract:

I teoridelen beskrives først det grunnleggende konseptet bak Proton Exchange Membrane (PEM) brenselceller som går på hydrogen og oksygen. Oppbyggingen og reaksjonen som driver den beskrives. Deretter presenteres en utregning av den reversible spenningen til en slik celle, før vi går gjennom et forsøk på å utlede en beskrivelse av hvordan spenningen vil variere med strømmen for en reell celle. To teknikker som brukes for å studere brenselceller, impedansspektroskopi og strømavbrudd, beskrives kvalitativt. I resultatdelen presenteres målinger gjort på en HydroGenius brenselcelle av typen PEM fra Heliocentris. I diskusjonsdelen diskuteres resultatene, og kurven som viser målt spenning som funksjon av strøm sammenlignes med forskjellige modeller beskrevet i teoridelen. Metodene som ble brukt diskuteres også. I applikasjoner diskuteres litt generelt om hvor det er aktuelt å bruke brenselceller, hva som gjør brenselceller egnet til ulike formål og hva som er utfordringene for at dette skal bli vanlig. I oppsummeringen presenteres noen tanker omkring selve prosjektet.

Innledning:

Siden 1839, det året da William Grove først viste verden hva en brenselcelle er, har vi først de siste 35-40 årene virkelig åpnet øynene for hvilken nytte brenselcellen kan ha for oss. Bemannede romskip har helt fra starten benyttet seg av denne teknologien, mens mer hverdagslige anvendelser nå begynner å komme på banen [1]. Casio har utviklet en brenselcelle som driver en bærbar PC med fire ganger så lang levetid som et typisk Litium ion-batteri [2]. Denne planlegger de å få ut på markedet i 2007. I samme året vil etter planen Toshiba ha sine brenselceller i bruk i mobiltelefoner [3]. Det at dette er et tema det forskes mye på gjorde at vi synes det var et interessant tema å sette oss inn i. Vi regnet også med at det ville være lett å finne oppdatert stoff om temaet, og at det ville være mulig å gjøre forsøk for å sammenligne teori og praksis.

Teori:

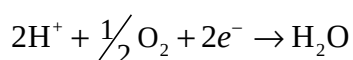
Introduksjon:

Prinsippet bak en brenselcelle er at en redoksreaksjon finner sted ved at elektronene passerer gjennom en ytre krets fra en høyere energitilstand til en lavere, i stedet for direkte, som de ville gjort i en vanlig forbrenningsreaksjon. Derved kan en mye bedre utnyttelse av brenselet oppnås enn ved å bruke varme fra forbrenningen til å produsere damp som overfører energien til en turbin.

I en redoksreaksjon vil et stoff gi fra seg elektroner, som tas opp av et annet stoff. For at disse elektronene skal passere gjennom en ytre krets må reaktantene være atskilte, så de ikke kan reagere direkte. I en Proton Exchange Membrane (PEM) celle er det som navnet tilsier en protonpermeabel membran som skiller reaktantene. For en celle som drives av hydrogen og oksygen er halvreaksjonene



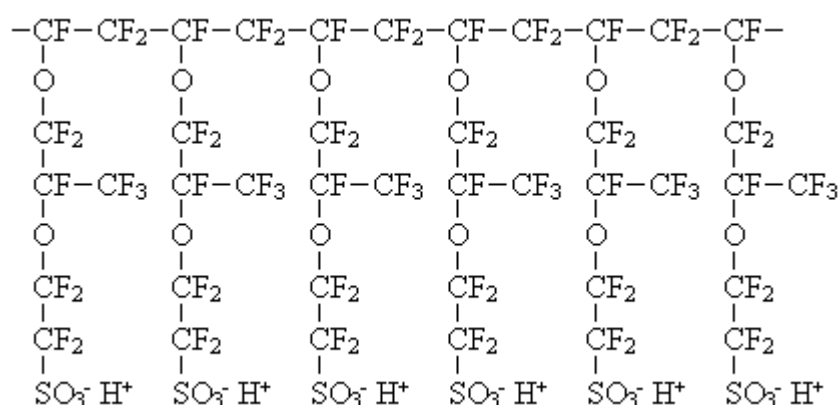
ved anoden, og



ved katoden. Til sammen er dette den samme reaksjonen som en vanlig forbrenning av hydrogen i oksygenatmosfære.

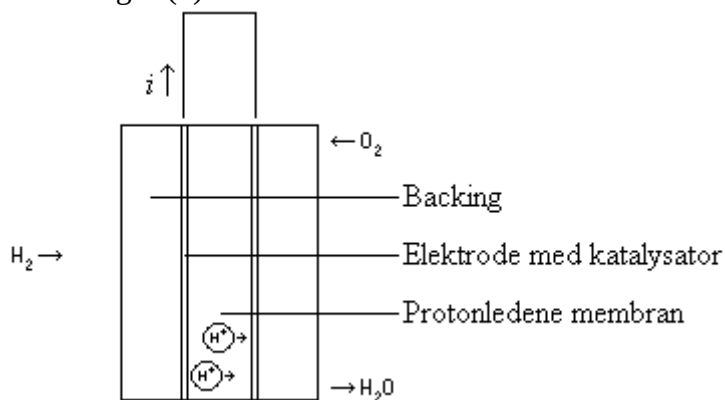
Kjernen i en PEM celle er membranen[4], som ideelt sett kun skal slippe H^+ igjennom, og være helt tett for elektroner og H_2 . En slik membran er som oftest oppbygd av en kjerne av en teflonlignende polymer med sidegrener fra annethvert karbonatom. Til endene på sidegreinene er det bundet sulfittioner, med tilhørende H^+ . Når membranen blir mettet med vann forblir sulfittionene bundet til sidegreinene, mens H^+ kan bevege seg fritt gjennom membranen. En vanlig membran, NafionTM fra DuPont er vist i figur (1).

Figur (1): Strukturformel for NafionTM



På hver side av membranen er det påført et elektrodslag som består av karbon og finfordelt platina. Dette kan for eksempel påføres som en løsning og tørkes. Deretter legges det en backing på hver side. Denne må være tilstrekkelig porøs til at gassen kan strømme gjennom den for å nå frem til katalysatorpartiklene, og den må ha stor kontaktflate med katalysatoren for å frakte elektroner effektivt. I tillegg må den ha god ledningsevne. Karbonpapir er vanlig å bruke til dette formålet. Den ferdige membran med elektrode og backing er typisk 500 til 1000 mikrometer tykk. En skjematisk fremstilling av en ferdig membran er vist i figur (2).

Figur (2): Membran.



På hver side av den ferdige membranen monteres det så en kombinert gasstilførsel og elektronsamler, som gjerne består av en plate av grafitt eller metall, med spor i, så gassen kan ledes til hele overflaten av backingen. I en seriekobling av flere celler benyttes slike plater mellom cellene. Det er da frest spor på hver side, slik at platen leder oksygen til, og fjerner vann fra, katoden på den ene cellen, og leder hydrogen til anoden på den andre. Det kan i tillegg lages et tredje sett kanaler i platen for å lede et kjølemedium. Plater som benyttes til seriekobling kalles bipolare plater. Det er svært viktig at materialet som brukes i bipolare plater ikke leder gass. Da ville en blanding av hydrogen og oksygen kunne reagere direkte på katalysatoren, uten å bidra til en ytre strøm.

Reversibel cellespenning

Det største teoretiske arbeidet, W , cellen kan levere er gitt ved endringen i Gibbs fri energi mellom produktet (vann) og reaktantene[5]:

$$W = \Delta G = \Delta_f G(\text{H}_2\text{O}) - (\Delta_f G(\text{H}_2) + \frac{1}{2} \Delta_f G(\text{O}_2)) \quad (1)$$

Ved standard trykk og temperatur (STP) er $\Delta_f G = \Delta_f G^0$ for grunnstoffer i sin mest stabile tilstand er definert som null, som gjør at den totale endringen i energi for reaksjonen ved STP er $\Delta_f G^0(\text{H}_2\text{O}) = -237,11 \text{ kJ/mol}$ [6]. Høyeste teoretiske spenning, E^0 , for cellen ved STP er gitt ved sammenhengen

$$W = \Delta G = -zFE^0 \quad (2)$$

der z er valenstallet og F er Faradays konstant (96487 C/mol). Dette gir

$$E^0 = \frac{\Delta_f G(\text{H}_2\text{O})}{-2 \cdot F} = \frac{-237,11 \cdot 10^3}{-2 \cdot 96487} = 1,229 \text{ V} \quad (3)$$

som er cellespenningen for en reversibel reaksjon. En reell brenselcelle vil imidlertid ikke reagere reversibelt, og vil dermed ha en lavere spenning enn den teoretisk høyeste. Dette avviket kalles overspenning. Det er flere faktorer som bidrar til irreversibiliteter i cellen.

Bidrag til overspenning

Indre motstand[7]

Det vil alltid være en viss indre motstand i cellen, som gir et effekttap. Etter Ohms lov er spenningsfallet ΔV_r gitt som

$$\Delta V_r = -I \cdot R_i \quad (4)$$

der I er strømmen og R_i er den indre motstanden.

Aktiveringsenergi

For strømmen i en elektrokjemisk reaksjon har vi generelt[8]

$$I = nFA_k k_k - nFA_a k_a \quad (5)$$

der n er valenstallet, A_k er arealet av katoden, A_a er arealet av anoden, k_k er hastighetskoeffisienten til reaksjonen ved katoden, og k_a er hastighetskoeffisienten til reaksjonen ved anoden. Sammenhengen mellom aktiveringsenergi og reaksjonshastighet er gitt av Arrhenius' ligning

$$k = Ae^{\frac{-\Delta G^\ddagger}{RT}} \quad (6)$$

der $\Delta G^\ddagger$ er den molare energien som kreves for å danne et aktivert kompleks som inngår i reaksjonen, og R er gasskonstanten. Denne energien avhenger av potensialet, h , på elektrodeoverflaten, og kan skrives [9]

$$\Delta G_k^\ddagger = \Delta G_{0k}^\ddagger - a n F h \quad (7)$$

for katoden og

$$\Delta G_a^\ddagger = \Delta G_{0a}^\ddagger + (1-a) n F h \quad (8)$$

for anoden. Dette gir sammenhengene

$$k_k = Ae^{\frac{-\Delta G_{0k}^\ddagger}{RT}} e^{\frac{-a n F h}{RT}} \quad (9)$$

$$k_a = Ae^{\frac{-\Delta G_{0a}^\ddagger}{RT}} e^{\frac{(1-a) n F h}{RT}} \quad (10)$$

Dette gir Butler-Volmer-ligningen, som beskriver sammenhengen mellom strøm og potensial når man kan se bort fra transporteffekter

$$I = I_0 \left(e^{\frac{-a n F h}{RT}} - e^{\frac{(1-a) n F h}{RT}} \right) \quad (11)$$

der i_0 er likevektsutvekslingsstrømmen, som er en elektrodespesifikk konstant, gitt ved

$$I_0 = nFA_a k_a [H_2] e^{\left(\frac{(1-a)F}{RT}\right)} = nFA_k k_k [O_2] e^{\left(\frac{-aF}{RT}\right)} \quad (12)$$

der $[H_2]$ er konsentrasjonen av hydrogen ved anoden, og $[O_2]$ er konsentrasjonen av oksygen ved anoden. Hvis h er større enn $5 \cdot 10^{-2}$ V, kan vi, avhengig av fortegnet på h , se bort fra enten det første eller det andre leddet i Butler-Volmer ligningen (12). I vårt tilfelle er h positiv, og ligning (12) kan dermed omskrives til

$$h = \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{I_0}{I} \quad (13)$$

Hvis membranen ikke er perfekt vil den slippe gjennom både elektroner og H_2 som reagerer direkte med oksygen uten å bidra til strømmen i den ytre kretsen. Vi antar at et H_2 -molekyl gjennom membranen gir samme overspenning på grunn av aktiveringsenergien til reaksjonen som to elektroner gjennom den ytre kretsen. En slik brenseltransport direkte gjennom membranen vil derfor redusere spenningen ved null ytre strøm, og må regnes med i strømmen i uttrykket for aktiveringsoverspenningen. Vi kaller denne transporten I_n , gitt for STP ved

$$I_n = \frac{nFPV}{3600RT} = \frac{2 \cdot 96485 \cdot 1 \cdot V}{3600 \cdot 0,082 \cdot 298} \quad (14)$$

der P er trykket i atmosfærer, V er volumet hydrogen som forbrukes ved null strøm per time, R er gasskonstanten med enheter $L \text{ atm mol}^{-1} K^{-1}$. Uttrykket for overspenningen på grunn av aktiveringsenergi, som funksjon av strøm blir da

$$\Delta V_a = \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{I_0}{(I + I_n)} \quad (15)$$

Konsentrasjon og Transporteffekter

Dette er ting som i praksis er veldig viktig, fordi en brenselcelle i for eksempel en bil vil gå på oksygen fra lufta. Gibbs-energien til oksygen i luft er en annen enn for rent oksygen[10], gitt ved

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln a \quad (16)$$

der a er aktiviteten. For en ideell gass er aktiviteten definert som

$$a = \frac{p_a}{p_0} \quad (17)$$

der p_a er partialtrykket til gassen, og p_0 er totaltrykket. Transporteffekter vil særlig gjøre seg gjeldende ved høye strømmer. Hvis det ikke benyttes rent hydrogen og oksygen som brensel vil konsentrasjonen av reaktanter synke når strømmen øker, fordi reaktanten blir forbrukt mens inerte gasser ikke blir det. Hvis det benyttes oksygen fra luft vil oksygen forbrukes, mens nitrogen ikke vil reagere. Dermed synker partialtrykket av oksygen. Når strømmen blir tilstrekkelig stor vil reaktantene forbrukes like raskt som de kan fraktes til elektroden, og det blir da den største strømmen cellen kan produsere. Hvis vi kaller denne maksimale strømmen i_l , og antar at trykket avtar lineært med økende strøm, får vi for sammenhengen mellom strøm og trykk [11]

$$p_a = p_{a0} \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right) \quad (18)$$

der p_{a0} er partialtrykket av gassen ved null strøm. Dette gir for spenningsfallet som følge av transporttap:

$$\Delta V_t = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{p_{a0}}{p_0} \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right)\right) \quad (19)$$

Utrykk for overspenning som funksjon av strøm

$$\Delta V_r = -I \cdot R_i \quad (4)$$

$$\Delta V_a = \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{I_0}{(I + I_n)} \quad (15)$$

$$\Delta V_t = \frac{RT}{nF} \ln\left(a \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right)\right) \quad (19)$$

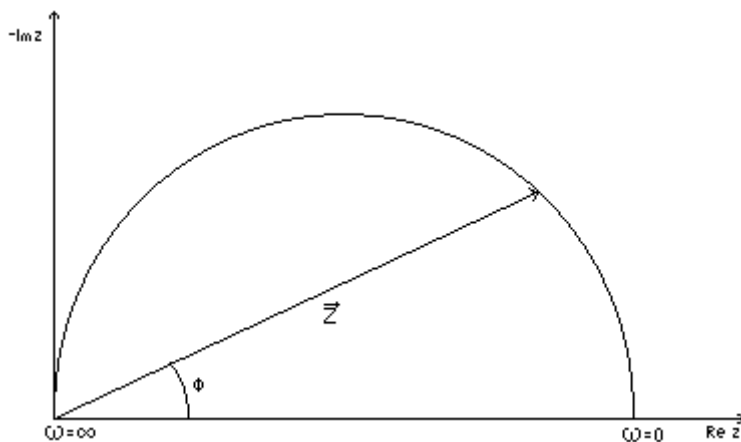
Dette gir følgende sammenheng mellom spenning og strøm

$$V = E^0 - IR_i - \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{(I + I_n)}{I_0} + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{p_{a0}}{p_0} \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right)\right) \quad (20)$$

Impedansspektroskopi og strømbruddstest

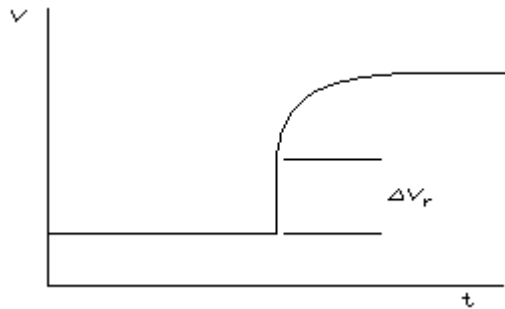
En brenselcelle er essensielt en katalysert membranreaktor, og dens oppførsel avhenger av en rekke faktorer, som er åpenbart fra et plott av spenning som funksjon av strøm for en celle. Impedansspektroskopi [12, 13] er en teknikk som kan si en del om flere av disse faktorene. En likespenning lik cellens åpen-krets-spenning trykkes på cellen, og en vekselspenning på 10-30 mV varieres i frekvens fra typisk 10^{-2} til 10^7 Hz, og cellens impedans måles for et stort antall frekvenser. Det finnes så flere måter å tolke resultatene, men en vanlig måte er å lage et Nyquist-plott, der man tegner inn punkter i det komplekse planet som bestemt av impedansvektoren for hver frekvens. Basert på disse målingene kan man modellere en ekvivalentkrets for cella, som kan si mye om prosessene som påvirker spenningen. En svært enkel ekvivalentkrets kan være en motstand i parallell med en kapasitans. Nyquist-plottet for en slik krets er vist i figur 3.

Figur 3: Nyquist-plott for en en-kapasitans ekvivalenskrets.



En slik måling er en nokså langvarig og komplisert prosess. Et enklere alternativ er en såkalt strømavbruddstest[14]. Der leverer cellen en strøm gjennom en motstand, så brytes kretsen mens spenningen måles som funksjon av tiden. Resultatet blir en kurve som gjør et umiddelbart hopp i det kretsen brytes, og som deretter stiger langsommere mot åpen-krets-spenningen.

Figur 4: Kvalitativ strømavbruddskurve.



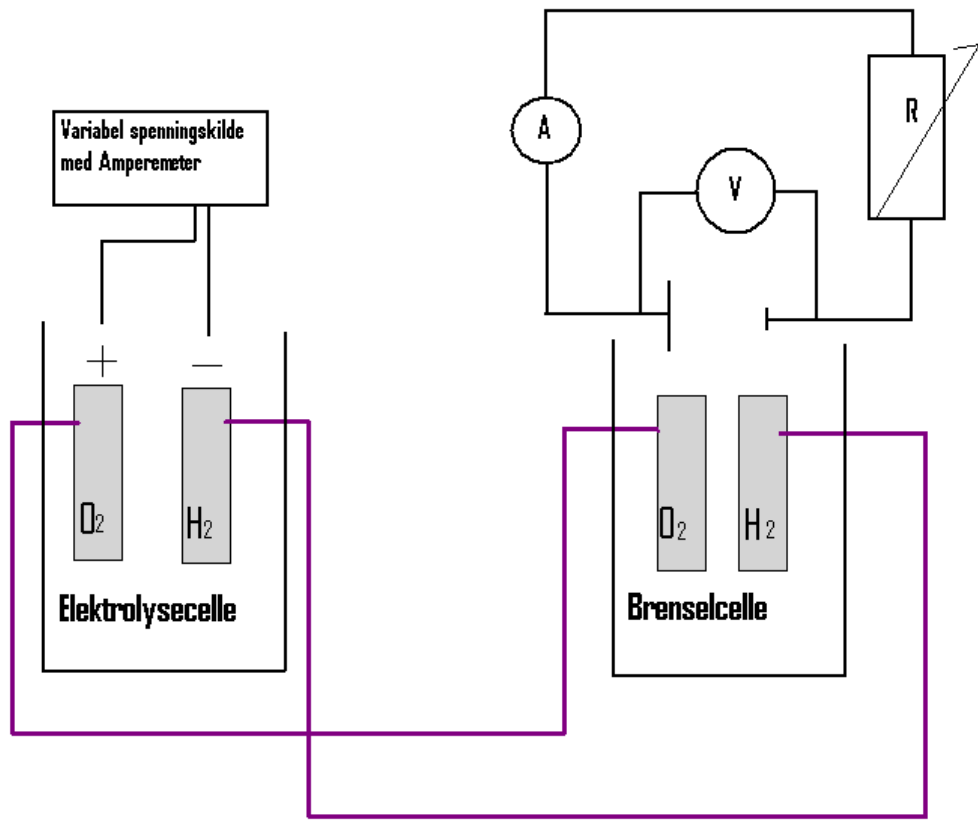
Det raske hoppet i spenningen skyldes at spenningsfallet som kommer av strøm gjennom motstand forsvinner straks strømmen opphører. I overgangen mellom elektrolytt og elektrode vil det eksistere et såkalt ladningsdobbeltag. Det kommer av coulombkrefter mellom de mobile elektronene i elektroden og de mobile protonene i elektrolytten. Når strømmen blir null endres likevektsbetingelsene for dette ladningsdobbeltaget, og dette er årsaken til den langsomme delen av spenningsstigningen i Figur 4. Atskilte ladninger med motsatt fortegn er essensielt en kondensator, og det er egenskapene til ladningsdobbeltaget man kan si noe om ut fra kapasitansen(e) i en ekvivalentkrets. I en brenselcelle har man to slike ladningsdobbeltag, et ved katoden og et ved anoden. For å få en god ekvivalenskrets er det derfor gjerne nødvendig med to kapasitanser.

Eksperimentelt:

Til forsøkene ble det brukt en Hydro-Genius brenselcelle fra Heliocentris. Cellen var av typen Proton Exchange Membrane, og ble drevet av hydrogen og oksygen. Som kilde til hydrogen og oksygen ble det brukt en elektrolysecelle som elektrolyserte destillert vann. Denne ble drevet med en strøm på 0,5 A.

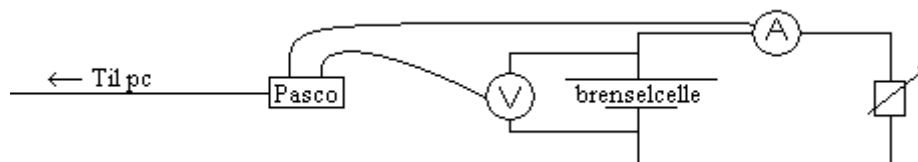
Et forsøk ble utført der brenselcellen ble koblet i serie med en variabel motsand og et amperemeter, og spenningsfallet over cellen ble målt med et voltmeter. Spenningen og strømmen ble målt for en rekke motstander. Oppkoblingen er vist i figur 5. Resultatene finnes i vedlegg 1.

Figur 5: Skjematisk fremstilling av oppsettet



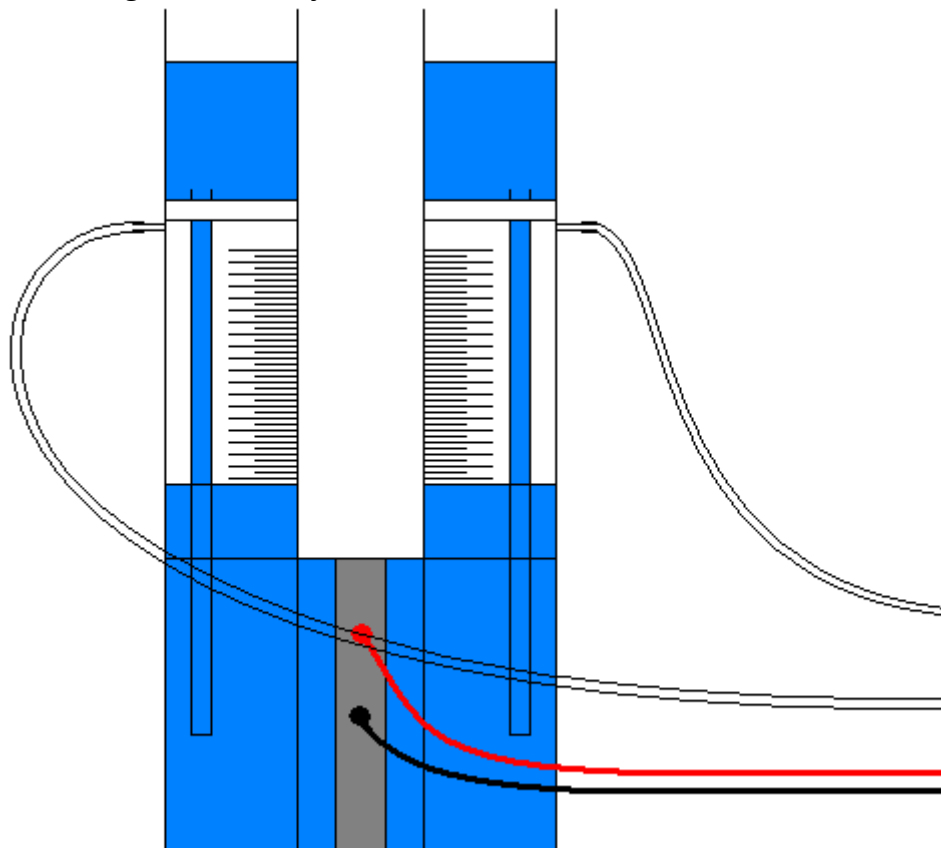
Et forsøk ble utført der cellen ble seriekoblet med en variabel motstand. En strømmåler koblet til en datalogger ble seriekoblet inn i kretsen, og spenningsfallet over cellen ble målt med datalogger. Kretsen ble brutt, og spenningen og strømmen ble målt som funksjon av tiden, med en loggefrequens på 200 målinger i sekundet. Motstanden gjennom den variable motstanden og amperemeteret ble målt med ohm-meter. Forsøket ble utført for ytre motstander på 3,15 ohm, 7,15 ohm og 12,15 ohm. Oppkoblingen er vist i figur 6.

Figur 6: Skjematisk fremstilling av strømbruddstestoppsett



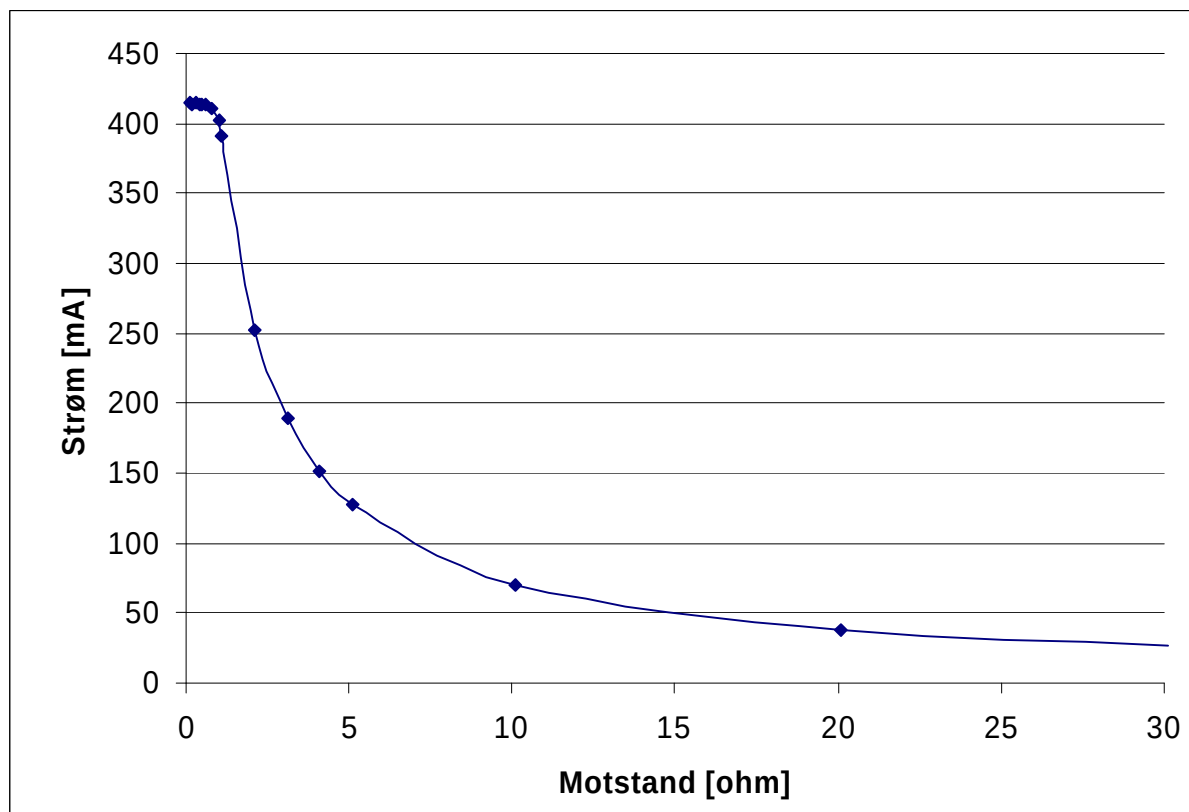
Et forsøk ble utført der elektrolysecellen ble koblet til brenselcellen, og utløpene fra cellen ble tettet. Cellen var ikke del av en sluttet krets. Forbruket av gass ble målt ved vannstanden i elektrolysecellen. Forsøket ble utført to ganger.

Figur 7: Elektrolysecelle

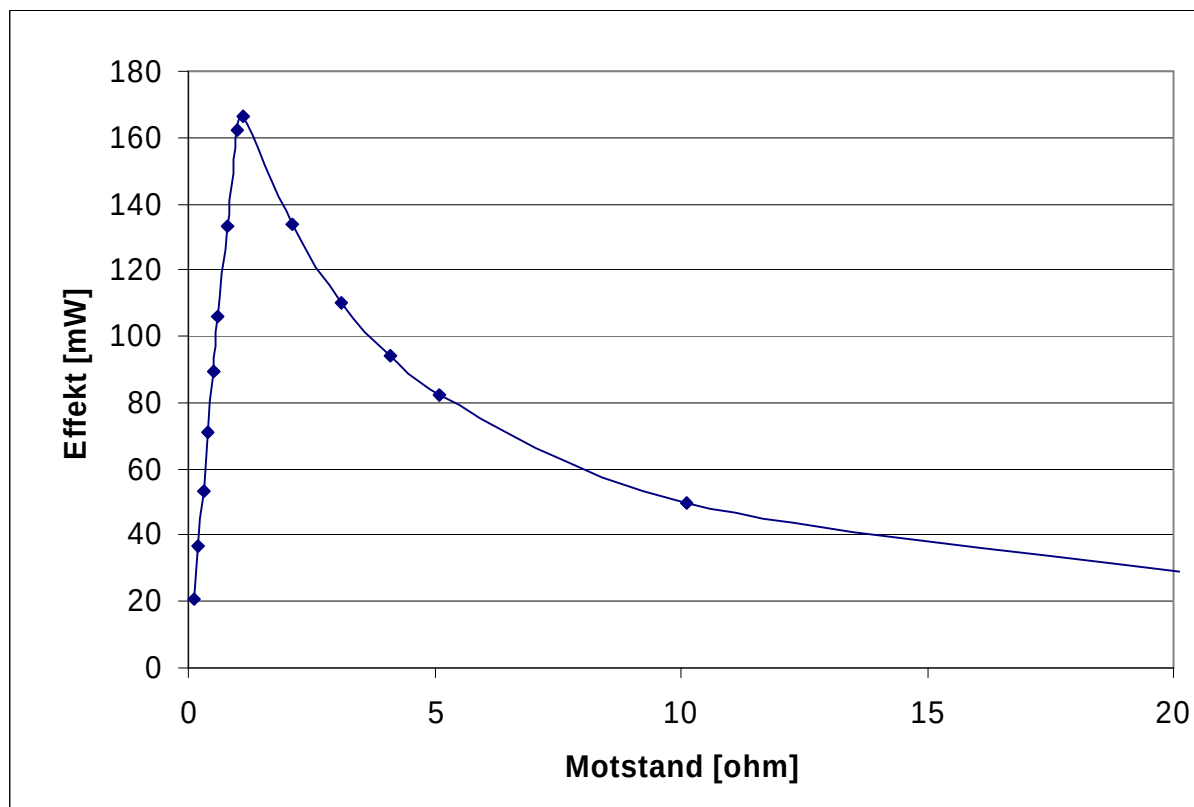


Resultater

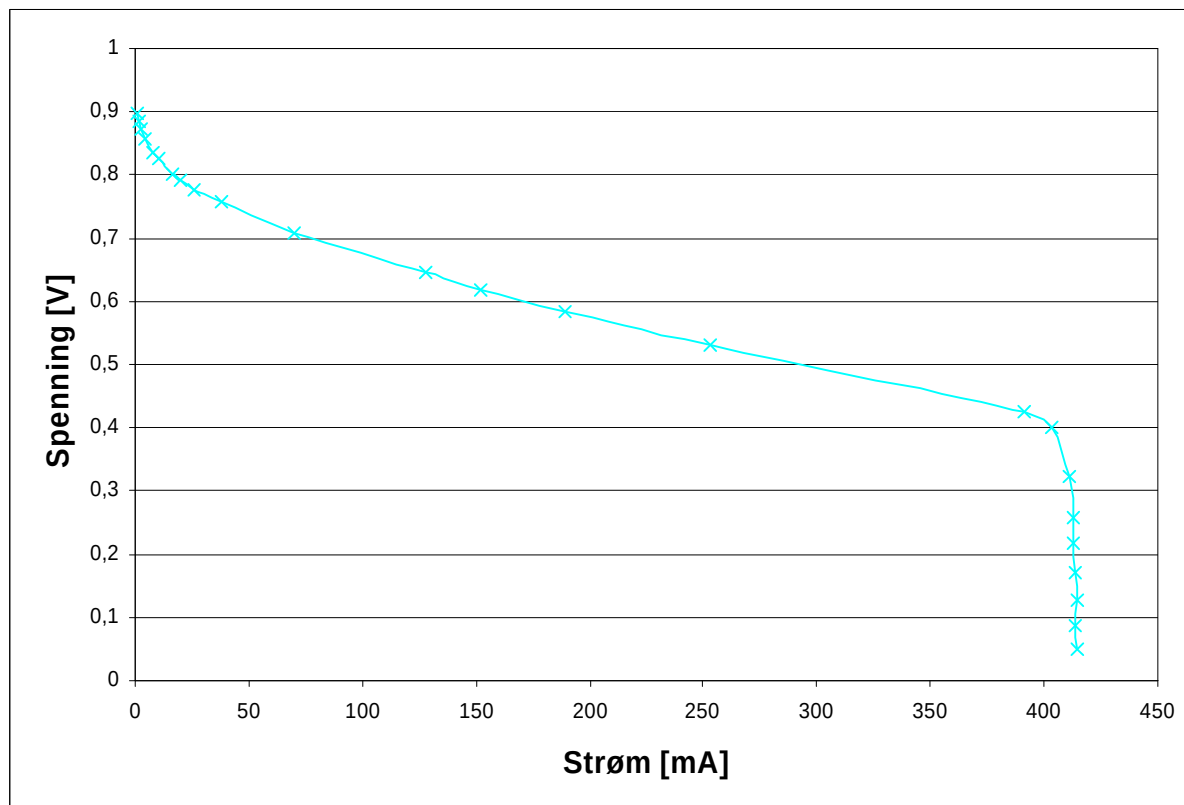
Figur 8: Strøm som funksjon av motstand



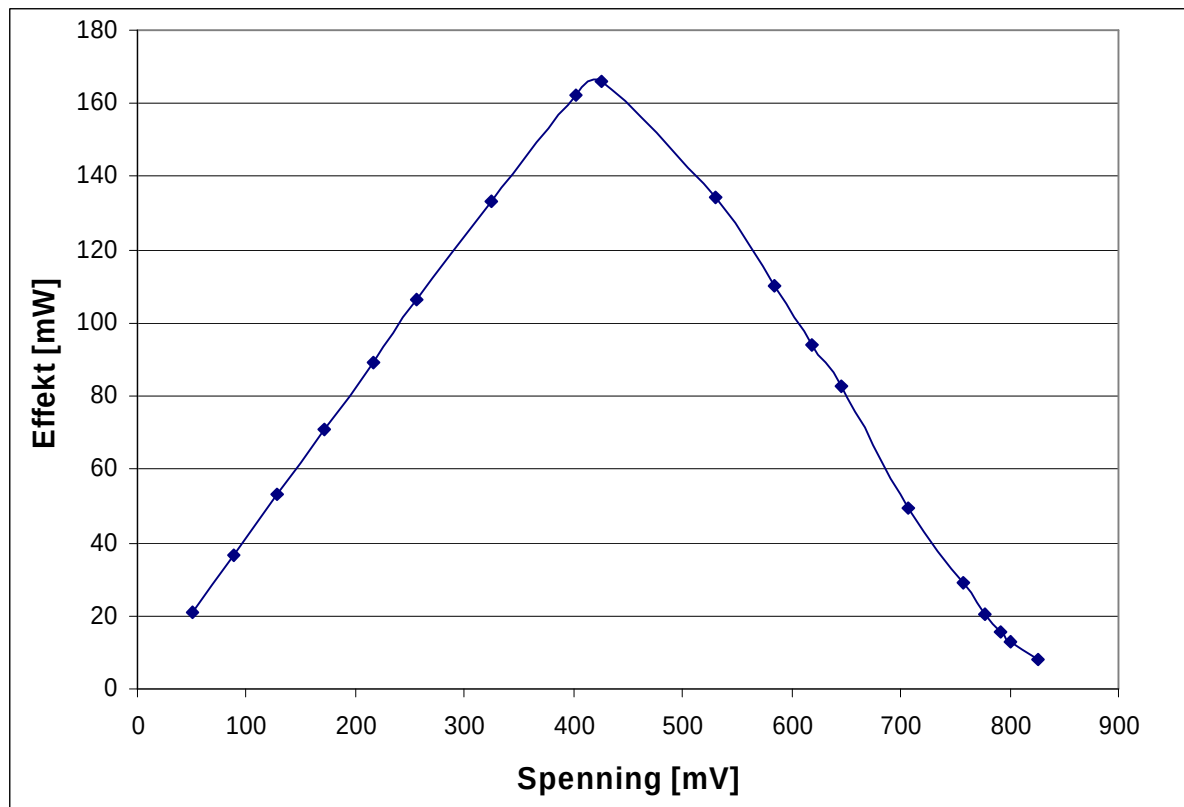
Figur 9: Effekt i ytre krets som funksjon av motstand



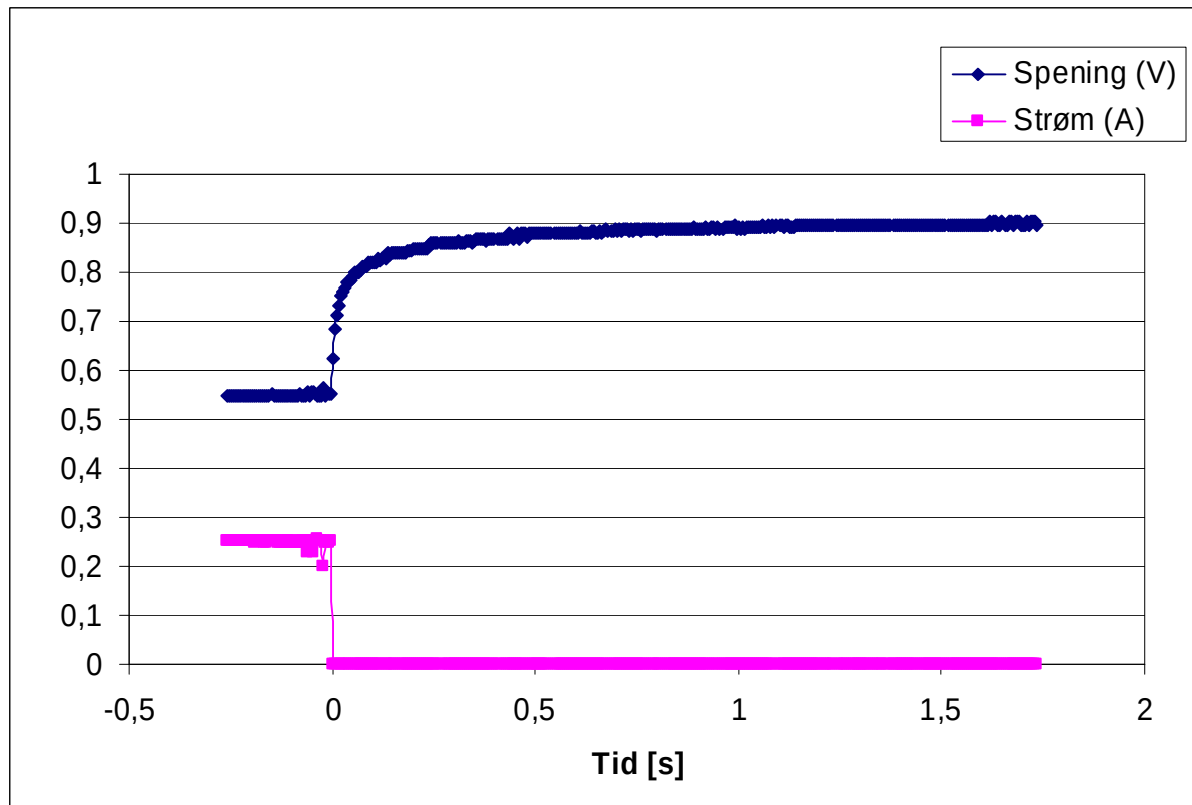
Figur 10: Spenning som funksjon av strøm



Figur 11: Effekt som funksjon av spenning



Figur 12: Strøm og spenning som funksjon av tid i strømbruddstest



Det ble funnet at cellen brukte 10 ml hydrogen i løpet av en time ved null strøm. Det dannet seg kondens inne i cella i løpet av forsøket, så det er rimelig å anta at i allefall en del av denne gassen har passert gjennom membranen og reagert med oksygen direkte på katalysatoren på katoden. Fra dette resultatet og ligning (14) får vi $I_n = 21,9 \text{ mA}$

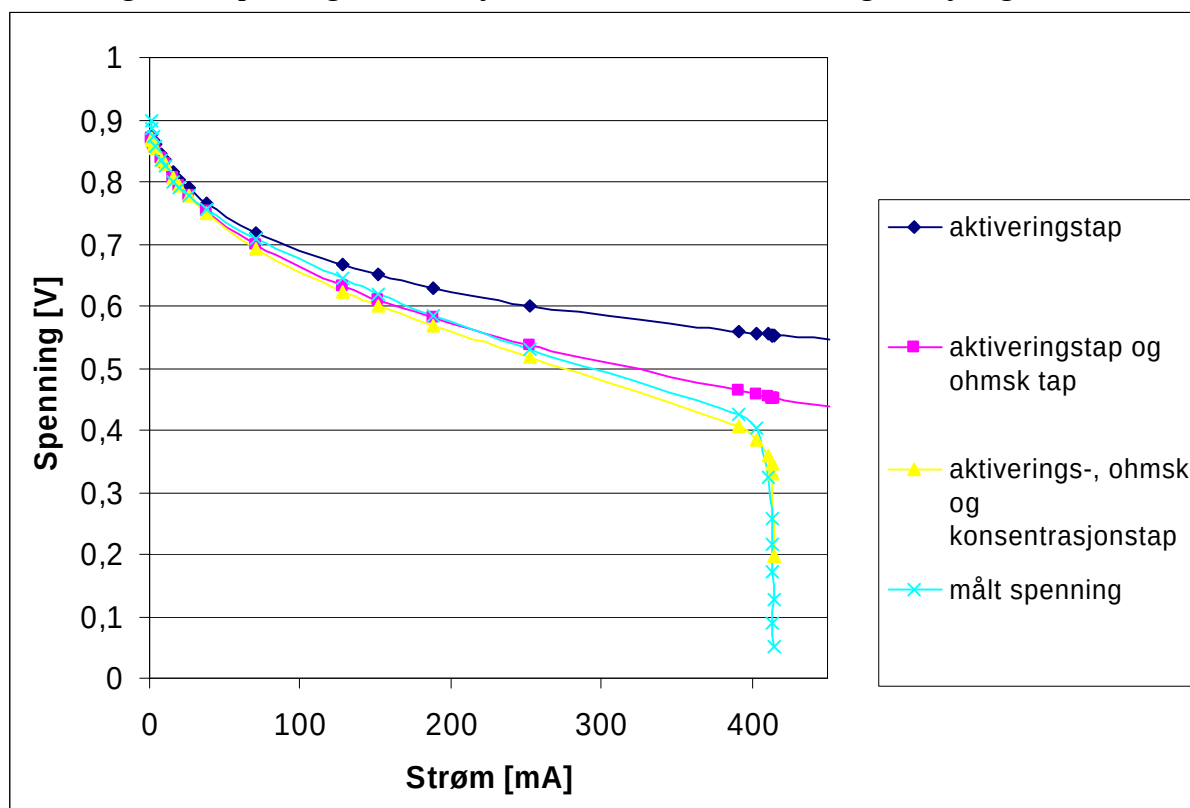
Diskusjon:

Strøm som funksjon av motstand

Fra figur 8 er det tydelig at for store motstander endrer strømmen seg omtrent som for en ideell spenningskilde. Dette er forventet, fordi ved store ytre motstander blir den indre motstanden i systemet av liten betydning. For lave motstander er det tydelig at strømmen går mot en maksimal verdi. Denne største strømmen er omtrent det samme som I_l i ligning (17), men i vårt tilfelle skyldes den ikke begrenset diffusjonshastighet, men begrensning i gasstilførselen. Elektrolysecellen ble operert ved 0,5 A, og hvis man tar hensyn til indre brenseloverføring i cellen, og indre elektronstrøm i elektrolysecellen virker det rimelig at den største strømmen blir omtrent 420 mA.

Karakteristisk spenningskurve

Figur 12: Spenning som funksjon av strøm, målte verdier, og forskjellige teoretiske



For sammenhengen mellom spenning og strøm har vi funnet ligning (20) i teorien

$$V = E^0 - IR_i - \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \left(\frac{I + I_n}{I_0} \right) + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{p_{a0}}{p_0} \left(1 - \frac{I + I_n}{I_l} \right) \right) \quad (20)$$

Den kan omskrives til

$$V(I) = E^0 - IR_i - A \ln \left(\frac{I + I_n}{I_0} \right) + B \ln \left(\left(1 - \frac{I + I_n}{I_l} \right) \right) \quad (21)$$

Konstanten $\frac{p_{a0}}{p_0}$ for våre forsøk er lik 1 siden vi brukte ren oksygen og ren hydrogen.

Konstantene A og B er gitt som: $A = \frac{RT}{(1-a)nF}$ og $B = \frac{RT}{nF}$.

Ligning (21) er den matematiske formen på den tilpassede funksjonen som viser spenning med ohmske tap, konsentrasjonstap og aktivasjonstap. Verdiene for konstantene i uttrykket er gitt i tabell 1.

Tabell 1: Konstanter i ligning (21)

I_n [mA]	A [V]	I_0 [mA]	I_l [mA]	B [V]	R_i [ohm]
18,343	0,1035	0,836082	433,3444	0,02	0,235294

Aktiveringstapkurven viser spenningen cella gir antatt at A-leddet i uttrykket er det eneste bestemmende for spenningsfallet. Grafen som vi har kalt aktiveringstap og ohmsk tap, viser spenningen cella gir for forskjellige strømmer, hvis vi antar at konsentrasjonstap ikke vil skje. Av denne kan vi se at for høye strømmer oppfører spenningen seg som en vanlig spenningskilde med en viss indre motstand R_i . For grafen som inkluderer alle effektene, nemlig ohmsk-, aktiverings-, og konsentrasjonstap, følger den de målte verdiene meget godt.

Konstantene i ligning (21) ble funnet med kurvetilpasning via minste kvadraters metode i Excel. Det ble gjort ved å lage en kolonne for kvadratavvik mellom den målte spenningen, og spenningen beregnet med teorien, og så minimere kvadratavviket med Solver-funksjonen ved å endre parametrene som er vist i tabell 1. Vi tilpasset først kurven ved små verdier for strømmen, så tilpasset vi R_i for å få riktig generell stigning for grafen, og inkluderte til slutt høye verdier for strømmen. På grunn av det meget bratte fallet for spenningen ved høye og lave strømmer gjorde kvadratavvik-metoden upresis, med en kurve som falt noe for tidlig for høye strømmer og feilet i å falle bratt nok for lave strømmer. Vi brukte derfor en god mengde med skjønn i prosessen med å finne en kurve som avvek minst mulig. På grunn av egenskapene til det matematiske uttrykket hvor hvert ledd dominerer et område av grafen er det ganske greit å vite hvor man må forandre parametre for å få en bedre tilpasning. Men siden det tross alt er en viss påvirkning fra ledd i intervall hvor et annet eller de andre leddene i teorien skulle være helt dominerende, forventer vi å ikke få en fullstendig unik løsning av tilpasningsparametrene, og ergo korrekt beskrivelse av ytelsen til cella for alle strømmene. Dette kan være med å gjøre det vanskelig å for eks. finne en riktig verdi for motstanden R_i .

Generelt vil de mest interessante parameterne å finne i slike tilpasninger av kurver være verdier for I_0 og R_i . Disse sier direkte noe om prestasjonen til cella. I_0 , som er likevektsutvekslingsstrømmen, sier noe om aktiviteten til elektrodene. Det er viktig at denne gjøres størst mulig. Faktorer som påvirker denne er katalysatormaterialet, og overflaten på katalysatoren. Det er viktig at denne gjøres størst mulig. Vi ser fra det tredje leddet i ligning (21) at en høyere I_0 vil ha en positiv effekt på spenningen.

De to verdiene vi har best forutsetning for å diskutere er I_n og I_l . I_n har vi målt direkte, og funnet en verdi på 21,9 mA. Dette er litt høyere enn verdien vi fant ved kurvetilpasning. Det er mulig at dette kan skyldes en liten lekkasje i gass-systemet, samt at noe av gassen kan ha blitt løst i vannet den timen forsøket pågikk. I_l ser også ut til å stemme bra, siden den er ca lik den høyeste strømmen vi målte pluss I_l . Til tross for noen mindre avvik er det rimelig å tro at vi har funnet en ganske god sammenheng mellom strøm og spenning for cellen vi brukte. Noen typiske verdier for en PEM brenselcelle [15] er oppgitt i tabell 2, omregnet til samme elektrodestørrelse som vår celle.

Tabell 2 Typiske verdier for en PEM brenselcelle

	I_n [mA]	A [V]	I_0 [mA]	I_l [mA]	B [V]	R_i [ohm]
Typisk celle	17	0,06	0,57	7650	0,05	0,03
Vår celle	18,343	0,1035	0,836082	433,3444	0,02	0,235294

Det vi skal legge merke til her er forskjellen i B , A og R_i . I_l kunne vi også gjort større med større gasstilførsel. I_n og I_0 er innenfor spekteret av typiske verdier. Vi ser fra ligning (21) at en større A indikere at aktiveringsoverspenningen er av større betydning. Denne er nesten dobbelt så stor i vår celle som en typisk verdi. Den største fordelen ligger imidlertid i den

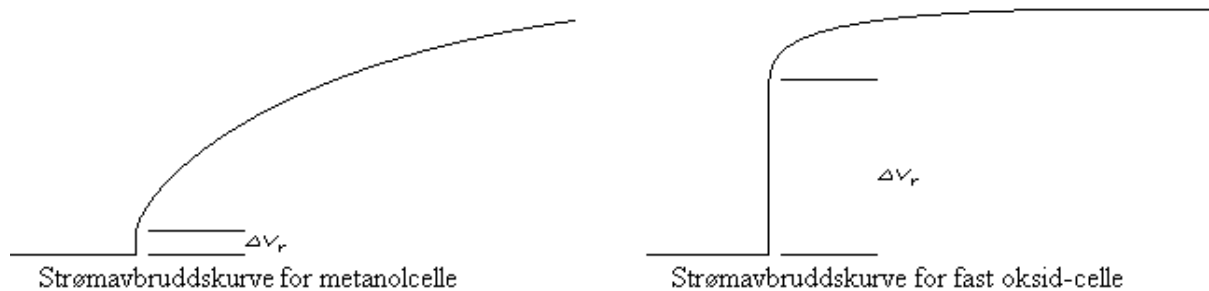
indre motstanden. Her har vår celle en verdi som er nesten 8 ganger en typisk verdi. Det er ikke urimelig at dette kommer av at membranen ikke ble fuktet tilstrekkelig. Siden de protonledende egenskapene til membranen er avhengig av at membranen er mettet med vann er det vanlig å større celler å bruke fuktig hydrogen som drivstoff. Vi gjorde ikke noe i forhold til dette.

Det at B har forskjellige verdier for forskjellige celler er alarmerende, for å si det mildt, siden denne etter vår teori skal være gitt som $B = \frac{RT}{nF}$. Dette ble imidlertid oppdaget på et svært sent stadium i prosjektet, så det ble ikke tid til å rette det opp.

Strømvbruddstest:

Det er vanskelig å si noe kvantitativt ut fra denne testen, men rent kvalitativt kan den indikere forholdet mellom aktiveringsoverspenningen og det ohmske tapet. Det raske hoppet i det strømmen brytes er knyttet til den indre motstanden i cellen, og den langsomme stigningen er knyttet til ladningsdobbel laget og aktiveringsoverspenningen. For en PEM celle på hydrogen er disse to typisk av samme størrelsesorden, mens for eksempel en metanolbrenselcelle har mye større aktiveringsenergi på anoden enn hydrogen cellen, og strømvbruddskurven for en metanolcelle ser annerledes ut. For en fast oksid-celle som opererer ved om lag 700 °C er aktiveringsenergien mye mindre, og dermed blir det raske hoppet den dominerende karakteristikken for strømvbruddskurven.

Figur blabla: Kvalitative strømvbruddskurver[16]



Applikasjoner av brenselceller:



Casios bærbare PC med metanoldrevet brenselcelle som strømkilde..
<http://world.casio.com/info/2002/fuelcell.html>

Det er i dag ikke mye anvendelse av brenselceller i energitilførselen, men fordelene ved bruk av dem er likevel mange. Brenselcelleteknologi har høy grad av reliabilitet, med ingen bevegelige deler[17]. Viktig er det å nevne brenselcellers miljøvennlighet, med lave mengder skadelige utslipp forbundet ved seg, og maskiner som bruker brenselceller er svært lite lydforurensende. Grunnet brenselcellens lange levetid og lette vekt i forhold til tradisjonelle batterier begynner det amerikanske militæret å se dypt inn i mulighetene til brenselceller for sitt bærbare utstyr, men også for stasjonære system[18]. Når brenselceller på stedet brukes til å forsyne mindre anlegg med strøm kan man også benytte spillvarmen til å dekke deler av anleggets oppvarmingsbehov, og slik kan man få effektiviteten opp mot 85%. Teknologien har allerede kommet så langt at brenselceller er utviklet for bruk på fly[19]. Det er godt håp for at forskningen intensiveres videre, og bringer mulighetene for kommersialisering og applikasjoner til et nytt nivå.

Hvorfor er ikke brenselceller mer anvendt i dag? Brenselceller har høy energieffektivitet, men kostnaden per kWt produsert er for høy til at kommersialiseringen av brenselceller har kommet særlig langt[20]. Det må dog nevnes at kostnadene er betraktelig redusert de siste årene. En celle alene gir ca. bare 0,7 volt ved normal strøm, slik at mange celler må seriekobles for å få høy nok spenning til vanlig forbrukerelektronikk. For å effektivisere sammenkoplingen av cellene bruker man en såkalt bipolar plate, som leder strøm fra en anode til katoden i neste celle, og dessuten har kanaler for tilførsel av henholdsvis hydrogen og oksygen, og i noen brenselceller også kjølekanaler. Designet av den bipolare platen må balanseres mellom forskjellige viktige hensyn. Den må ha så mye tilførsel av gass som mulig, noe som begrenser den elektriske konduktiviteten. Platen bør være så tynn som mulig for å sikre god konduktivitet og dessuten ikke ha for høy massetetthet. [21] Dette er en av hovedfaktorene til hvorfor prosessen med å lage brenselceller har blitt meget komplisert, og kostnadene i dag generelt er så høye at kommersialiseringen av teknologien virker å la vente på seg. Membranen i en proton-exchange-membrane type brenselcelle (PEM-celle) er avhengig av akkurat den riktige tilførselen av vann for å yte best mulig. Det viser seg å være rimelig komplisert å finne den riktige likevekten for opererende celler. Katalysatoren i en PEM-celle er sårbar for tilførsel av til og med små mengder karbonmonoksid. [22]

Utfordringene brenselcelleteknologien strekker seg over flere plan enn dette, og vi har bare skrappt overflaten ved å nevne noen.



Fem 200kW brenselceller i Alaska med naturgass som drivstoff
<http://www.nrel.gov/hydrogen/photos.html>

Oppsummering

I dette prosjektet om et mangfoldig tema har vi fått mulighet til å lære teorien bak og om anvendelsen til en av fremtidens energikilde. Det har vært fascinerende å få kunnskap om et felt som ligger i et krysningsfelt mellom elektrofysikk og kjemi. Vi synes vi har funnet en modell som gir en rimelig beskrivelse av den karakteristiske spenningskurven til en brenselcelle, og dermed gir litt innblikk i mekanismene som ligger til grunn, og hvor utfordringene i videre forskning ligger.

Referanser

- [1] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 11
- [2] <http://world.casio.com/info/2002/fuelcell.html>
- [3] <http://www.computerweekly.com/Article134032.htm>
- [4] Hefte "Fuel cells – Green Power" Vedlagt s. 9-13
- [5] Helbæk, M., *Fysikalsk kjemi*, Fagbokforlaget, 1999, s. 447
- [6] Lide, D. R., *Handbook of Chemistry and Physics*, 85th ed., CRC Press, 2004, s. 5-18
- [7] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 49
- [8] Amphlett, J. C., Baument, R. M., Mann, R. E., Peppley, B. A., Roberge, P. R., Harris, T. J., 1995, "Performance modelling of the Ballard Mark V solid polymer electrolyte fuel cell", *Journal of the electrochemical society*, Vol. 142, s. 1-8
- [9] Sawyer, D. T., Sobkowiak, A., Roberts, Jr., J. L., *Electrochemistry for Chemists*, J. Wiley & sons, 1995, s. 17-19
- [10] Helbæk, M., *Fysikalsk kjemi*, Fagbokforlaget, 1999, s. 182
- [11] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 50
- [12] http://www.gamry.com/App_Notes/EIS_Primer/EIS_Primer.htm
- [13] Ciureanu, M., Mikhailenko, S. D., Kaliaguine, S., "PEM fuel cells as membrane reactors: kinetic analysis by impedance spectroscopy", *Catalysis Today*, Vol. 82, s. 195-206
- [14] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 56-59
- [15] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 53
- [16] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 58
- [17] <http://www.fuelcells.org/basics/benefits.html>
- [18] <http://www.abiresearch.com/reports/MFM.html>
- [19] <http://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/Helios/HTML/ED03-0152-1.html>
- [20] http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_challenges.html
- [21] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 7-9
- [22] <http://www.sanewsletters.com/FCIR/glossary1.asp>

Vedlegg 1: Resultater fra måling av strøm og spenning for forskjellige motstander

Motstand [Ohm]	Strøm [mA]	Spenning [mV]	Effekt [mW]
0,1	415	50	20,75
0,2	414	88	36,432
0,3	415	128	53,12
0,4	414	171	70,794
0,5	413	216	89,208
0,6	413	257	106,141
0,8	411	324	133,164
1	403	402	162,006
1,1	391	425	166,175
2,1	253	530	134,09
3,1	189	584	110,376
4,1	152	619	94,088
5,1	128	645	82,56
10,1	70	707	49,49
20,1	38	757	28,766
30,1	26	777	20,202
40,1	20	791	15,82
50,1	16	801	12,816
80,1	10	826	8,26
100,1	8	835	6,68
200,1	4	857	3,428
300,1	2,8	874	2,4472
500,1	1,7	886	1,5062
1000,1	0,9	898	0,8082
uendelig	0	916	0

Vannkraft

Prosjekt i FY1303, Høst 2004



av Ola Frisk og Aslak Brimi

Abstract – Vannkraft og vannkraftverk

Vi har i all hovedsak to typer vannkraftverk; elve- og magasinkraftverk. Elvekraftverk utnytter den vannmengden elva fører med seg, som regel store vannmengder med liten fallhøyde. Magasinkraftverkene utnytter stor fallhøyde på vannet, skapt av kunstige dammer som skaper høyt trykk. For å finne ut om en utbygging vil være lønnsom kan man med en enkel ligning regne ut den teoretiske effekten, P :

$$P = g \cdot H_{st} \cdot \rho \cdot Q,$$

der g er gravitasjonskonstanten, H_{st} er brutto fallhøyde til vannet, ρ er vanntettheten og Q er vannføringen.

Fra ulike steder blir vann ført til kraftstasjonen. Vannet blir ført i et rør ned til turbinen, som drives rundt av vannets energi. Turbinen er akslet sammen med generatoren, som danner mekanisk energi om til elektrisk energi. Strømmen sendes gjennom en transformator, før den sendes ut på strømmettet.

Turbin- og generatortype må velges riktig, slik at man får maksimal utbytte av de ressursene man rår over. Når det gjelder turbiner, er det tre hovedtyper: Francis, Kaplan og Pelton. *Francisturbinen* har et stort bruksområde, og kan benyttes i fallhøyder fra 5 til oppimot 700 meter. *Kaplanturbinen* er konstruert for mye vann og liten fallhøyde, mens *Peltoneturbinen* derimot må ha store fallhøyder, men trenger mindre vanntilstrømming.

Valg av generatortype er hovedsakelig delt inn i to; en type for høytrykksanlegg (magasinkraftverk) og en type for lavtrykksanlegg (elvekraftverk). I et høytrykksanlegg vil turbinen gi generatoren høy hastighet og man bruker to- og firepolers generatorer. I lavtrykksanlegg, der generatoren får liten hastighet, trenger man flere poler for å oppnå samme effekten.

Før strømmen sendes av gårde blir den sendt gjennom en transformator. Her blir spenningen skrudd opp, og strømmen ned. For lange overføringer unngår man slik store tap. Spenningsstyrke på 400 kV er derfor normalt i de største høyspentledningene. Før strømmen når forbrukeren blir spenningen justert ned til 220 V i en trafokiosk nær forbrukeren.

Forord

Målet med denne oppgaven er å bli bedre kjent med hvordan vi får laget elektrisk strøm med vannkraft. Dette ble vår problemstilling:

Hvordan er et vannkraftverk oppbygd, og hvordan blir elektrisk strøm laget fra energien i vannet?

Et vannkraftverk er oppbygd av flere faktorer. Fra ulike steder bli vann ført til kraftstasjonen. Vannet treffer på et vannhjul, en turbin, som, pga energien i vannet, går rundt. Turbinen står i forbindelse med en generator, som da produserer elektrisk strøm. Denne strømmen blir videre ført til en transformator, og videre til den vanlige forbruker.

99 % av elektrisiteten i Norge blir produsert av rundt 600 vannkraftverk. Vannkraft er en viktig del av norsk industrihistorie, det var en av de viktigste brikkene til den industrielle og økonomiske veksten på slutten av 1800-tallet og utover 1900-tallet.

Vannkraft er et emne med mange faktorer, og det finnes egne studier som omhandler flere av disse. Dette blir derfor et prosjekt som ikke går veldig i dybden, men tar for seg de mest grunnleggende elementene, og de, etter vårt skjønn, viktigste prinsippene.

NTNU, november 2004

Ola Frisk og Aslak Brimi

Innholdsliste

Kapittel	Tittel	Side
1	Innledning	5
1.1	Historikk	5
1.2	Litt om begrepene	7
2	Et vannkraftverk...	10
2.1	Vannressursene	10
2.2	Vannkraftverket	12
2.2.1	Generell oppbygging	12
2.2.2	Overvann og undervann	13
2.2.3	Effekt	14
2.2.4	Turbiner	19
2.2.4.1	Francis	20
2.2.4.2	Kaplan	22
2.2.4.3	Pelton	22
2.2.5	Generator	23
2.2.6	Overføring av strøm	31
3.	Etterord	33
4.	Kilder	34

1. Innledning

1.1. Historikk

Potensialet for utbyggingen av vannkraft i Norge har alltid vært stort. Blant annet typografien for vanndragene er gunstige, og mange innsjøer etterlatt fra istiden er godt grunnlag for anlegging av magasiner. Særlig da det er i vinterhalvåret vi nordmenn trenger strøm mest, og det er på denne tida det er minst vannføring i vanndragene, er det helt essensielt å skaffe *helårsmagasin*. Med slike magasiner mener man som regel oppdemte magasiner. Her kan vannstanden være godt over original vannstand; og vannstanden kan senkes til under originalstand.

Altså, ressursgrunnlaget i Norge er ikke bare vann, også *skog* er et essensielt stikkord. I Norge har skogen alltid vært grunnlaget for bygging av samfunnet, både som energikilde (vedfyring osv) og som byggemateriale. Norge har i mange hundre år eksportert treverk til Europa, særlig til de Britiske øyene. Det ble en eksepsjonell vekst i denne industrien da det ble laget sagbruk der man hadde vannhjul som drog sagbladet. Vannkraft ble først brukt til å drive vannhjul fra omkring år 1500 i Norge. Sagbrukene ble lagt like ved siden av elveløp, og kraften fra vannet gjorde at vannhjulet gikk rundt. Kraften ble ført videre til å gjøre det folk fram til da hadde måtte gjort for hand, å dra sagbladet.

Andre halvdel av 1800-tallet var preget av *industriell vekst*, både i Europa og i Norge. Norge var et fattig land på denne tiden sammenlignet med andre land i nær omkrets. Det var treverkindustri og skipsbygging som hadde drevet landet frem til nå, og det var disse som ledet an veksten i Norge, sammen med mekanisk industri og støperier. Etter at elektrisiteten kom tok flere industribedrifter til å nytte elektrisitet internt; til belysning. Først ute var Lisleby Brug i 1877. Vannturbiner var ikke uvanlig i litt større bedrifter. Ny og stor industri søkte til utløpet av de større elvene, både på grunn av kraft og transport.

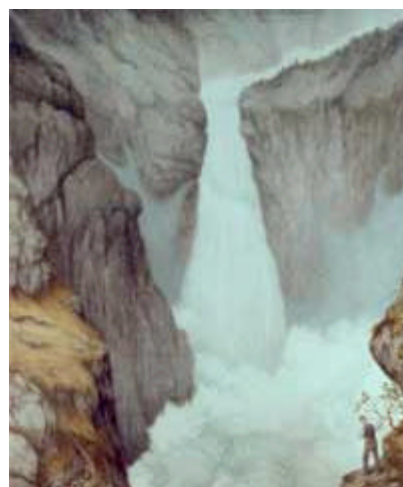
Det som regnes for å være begynnelsen på alminnelig *elektrisitetsforsyning* er Thomas Edisons Pearl Street station i New York, som åpnet 1882. Teknologien spredde seg fort, og norsk næringsliv og industri var på hugget. Allerede i 1885 fikk vi elektrisitesforsyning i Skien, fra en treforedlingsbedrift som het Laugstol Brug. Dette var elektrisitet skapt av vannkraft.

Først ute med kommunal elektrisitetsforsyning var Hammerfest. I 1890 stod et vannkraftverk ferdig til å forsyne byen med strøm. Det var to turbiner, en for å levere likestrøm til gatebelysningen i byen, den andre leverte vekselstrøm for alminnelig forsyning i byen.

Det var 20 byer i Norge som hadde elektrisitetsforsyning før 1900, 14 av disse valgte vannkraft fra starten av. De 6 andre, bl.a. Christiania benyttet seg av varmekraft fra kull (dampkraft). Noen år senere kom et vannkraftverk i Maridalen på 25 MW, men i Oslo ble det benyttet dampkraft som bienergikilde helt fram til andre verdenskrig.

Elektrisiteten ble logisk nok mer og mer sentralt i alle foretak, og med ekspansjonen av linjeverket kom også enda mer vekst i industrien. Særlig etter unionsoppløsningen i 1905 ble det kraftig vekst. De største utbyggingene stod Norsk Hydro for i 1910 og 1916, med kraftverk på henholdsvis 108 MW og 120 MW. Det var og i denne tiden

at en stor del industri begynte å se etter kraftkilder inne i fjordene på vestlandet, med stort kraftpotensialet i fjellvann og store fallhøyder.



Bilde 1.: Rjukanfossen malt av Th. Kittelsen. Rjukanfossen var en av Norges flotteste fosser og en stor turistmagnet før den ble tørrlagt pga Hydros vannkraft-utbygging mellom 1910 og 1920.

Det var naturlig nok byene som hurtigst fikk opp elektrisitetsforsyningsnett utover 1900-tallet. Men også på landsbygda kom det sigende. I 1921 var alle byer i Norge forsynt, og det var på denne tiden til sammen 200 elektrisitetsverk utenfor byområdene. I 1920 bodde 60% av Norges befolkning i hus med ordnet elektrisitet, noe som var den høyeste utbredelse av elektrisk strøm i verden.

På landsbygda ble det tatt lokale initiativ. Private og industrielle småkraftverk ble det mest vanlige (I 1930 var det 1425 vannkraftverk i Norge, 1315 var på under 1 MW). Det ble mange små lokalnett, men den tøffe økonomiske situasjonen på 20- og 30-tallet gjorde sitt til at det egentlig ble lite bygging. Dette bedret seg etter krigen, særlig da staten bestemte seg for å hjelpe til økonomisk med utbygginger i områder der utbygging generelt ble sett på som ulønnsom med hensyn på liten befolkning.

Under oppbyggingen av landet etter krigen ble det konstant behov for strøm. Flere og flere, både store og små kraftverk ble bygd. Også linjenettverket ble kraftig utbygd og modernisert. Ny teknologi innen sprengning og ingeniørkunst gjorde sitt til at utbygging ble billigere og mer økonomisk bærekraftig. Staten var en pådriver i kraftutbyggingen, og ble en viktig medspiller. Statusen på 50-tallet var at alminnelig forsyning var kommunenes ansvar; kraftkrevende industri bygget ut sin egen kraft; staten supplerte begge.

Utover 50- og 60-tallet ble linjenettverket videre utbygd, og snart hadde man fått til sammenhengende linje fra Kirkenes til Kristiansand. Staten var sentral i linjenettsutbyggingen, da det var et mål å binde sammen de nye store statlige kraftverkene på Østlandet og Midt-Norge. Staten ble eier av 90 % av hovedføringsnettet. I 1965 var det 2650 personer i Norge som ikke hadde tilgang til strøm, i 1989 var tallet 260.

I den senere tid er det med ny teknologi satset mest på å ruste opp de gamle vannkraftverkene. Her står det fremdeles igjen mye arbeid. Da det i 2002 ble vedtatt på Stortinget at det ikke skal bygges ut flere store vannkraftverk i Norge, er det da også opprusting og fornying av det vi har som er valgalternativet for å utvinne mer energi fra vannressursene våre. Det man også ser tegn til i denne perioden er at små private vannkraftverk, slik som ved forrige århundreskifte og de 20 år etter, blir satsingsområde.

1.2. Litt om begrepene

I dagliglivet er det mange begreper som er i bruk uten at folk flest i bunn og grunn vet hva det er snakk om. Slik som begrepet **energi (E)**. Vet alle hva energi er? Hva energi er er et vanskelig spørsmål, og det er ikke sikkert det er et spørsmål med et enkelt svar i det hele tatt. Energi er ikke noe man kan ta og føle på. Energi kan uttrykkes på følgende måte:

*Energi er evnen til å utføre arbeid,
energi er altså det som får ting til å skje.*

Enheten til energi er J (Joule).

Energi finnes i mange former: Det er mekanisk energi (kinetisk og potensiell energi), termisk energi (temperatur), kjemisk energi, bioenergi osv. Men all energi kan deles inn i to typer: Stillingsenergi og bevegelsesenergi; alt som beveger seg har bevegelsesenergi, og all energi som kommer av at noe har en bestemt posisjon eller stilling er stillingsenergi. Dette gjelder fra det minste molekyl og atom, til biler og romferger.

*Den universelle energiloven sier at energi ikke kan skapes eller forsvinne,
den kan bare gå fra en energiform til en annen.*

Den energiformen som er mest interessant i denne oppgaven er **elektrisk energi**. Elektrisk strøm bringer energi i strømkretser.

Elektrisk energi er knyttet til elektrisk ladning, dvs. til et elektrisk potensial mellom punkter i et elektrisk felt; spenning. Dersom punkter med ulik ladning settes i forbindelse med hverandre, kan det oppstå en bevegelse av elektroner eller ioner. Forutsetningen for dette er at stoffet som knytter punktene sammen kan lede elektrisk ladning og at det er en spenningsforskjell mellom punktene.

I et elektrisk batteri oppstår det spenning på grunn av kjemiske omsetninger, mens i en elektrisk generator er kilden elektromagnetisk induksjon.

Et anna velbrukt uttrykk vi *arbeider* mye med, er definisjonen **Arbeid (W)**. Hvis du noen gang har løftet en tung stein, vet du at det kan være både tungt og slitsomt, og at du må ta i og bruke energi for å klare det. I fysikken kalles denne måten å overføre energi på for et arbeid. Arbeid er altså et uttrykk for hvor mye energi du overførte til steinen ved å løfte den.

$$\begin{aligned} \text{Arbeid} &= \text{kraft} \times \text{strekning} \\ W &= F \cdot s \end{aligned} \tag{1}$$

Enheten til arbeid er Nm, dvs J (joule), som for energi.

Det neste uttrykket som vi vil forklare, særlig da det benyttes mye i oppgavens hoveddel, er **effekt (P)**. Effekt er et uttrykk for hvor raskt arbeid blir gjort; energioverføring per tidsenhet. Hvis man skal se matematisk på det, er det den deriverte av arbeidet med hensyn på tida:

$$P \equiv \frac{dW}{dt} \quad (2)$$

Dersom vi har konstant kraft, er effekt gitt som krafta multiplisert med hastigheten:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(F \cdot s)}{dt} = F \frac{ds}{dt} = F \cdot v \quad (3)$$

Effekt = Kraft $\times$ Fart

Enheten til effekt er joule per sekund, som videre har blitt definert som W (Watt).

1 Watt er effekten som er generert når en kraft på 1 N (Newton) forflytter et legeme med en hastighet på 1 meter per sekund. Et annet vanlig uttrykk for effekt er hestekrefter, som er vanlig å bruke i sammenheng med motorer og lignende:

$$1\text{hk} = 746\text{W}$$

Når det er snakk om elektrisk energi kommer vi inn på uttrykket for effekt. Måleenheten for elektrisk energi er som oftest gitt i kilowatt-timer (kWh). Dette er altså mengden arbeid som er gjort når 1kW (dvs. 1000 W) har virket i 1 time. Da det er 3600 sekunder i en time har vi:

$$1\text{kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} \quad (5)$$

Dette tilsvarer varmen fra en 60 W lyspære i 17 timer.

Ut i fra dette uttrykket finner vi flere brukte uttrykk, som megawatt-time, gigawatt-time og terrawatt-time:

$$1\text{TWh} = 1 \cdot 10^3 \text{GWh} = 1 \cdot 10^6 \text{MWh} = 1 \cdot 10^9 \text{kWh}$$

Til sammenligning er årlig energiforbruk i et vanlig familiehus på omtrent 25 MWh, og middels årsproduksjon i kraftstasjonene i Norge er 113 TWh (1999).

2. Et vannkraftverk...

2.1. Vannressursene

Vannkraft er en form for solenergi. Solen fordampet vann, som videre blir ført i gassform. Det dannes skyer, som videre blir ført for eksempel innover land. Her blir vannet avkjølt, og blir nedbør over landområdene. Nedbøren faller ned i elver, i innsjøer, på jorder, i fjell, på breer osv. En del av vannet blir videreført til ulike magasiner og vassdrag som kraftstasjonene bruker som sin vannressurs.

Merk: En del av kraften som blir dannet i kraftstasjoner i dag, kommer fra nedbør som landet på en bre for mange tusen år siden.

Vannet som går gjennom kraftstasjonen går videre ut i elvene, og vannet blir ført tilbake der det kom fra, til havet. Og slik går omløpet. Derfor kan man fastslå at vannkraft er en fornybar ressurs.

De mange kraftstasjonene er ulike på mange måter, en av dem er hvor vannressursen er i forhold til kraftverket. Et *lavtrykkskraftverk* utnytter en stor vannmengde med liten fallhøyde. Elvekraftverk er lavtrykkskraftverk, og benytter den vannmengda som elva fører med seg; vannet blir brukt stort sett når det kommer. I elvekraftverk vil kraftproduksjonen variere med vanntilførselen; i flomperioder vil kraftproduksjonen være stor; om vinteren vil den være liten.

Et høytrykkskraftverk utnytter til forskjell fra lavtrykkskraftverk store fallhøyder, og mindre vannmengder. Et høytrykkskraftverk, ofte kalt magasinkraftverk, er avhengig av flere ting; blant annet fallhøyde på vannet, og lagring av vann. Vannet blir lagret i naturlige eller kunstige magasiner. Kunstige magasiner er dammer konstruert med en demning (eller flere). En slik konstruert dam er veldig hendig i et land som Norge, da nedbørsmengda om vinteren både er liten og for det meste kommer som snø (dvs. at nedbøren ikke blir potensial til kraftproduksjon før avsmelting om våren), og det er om vinteren det er mest etterspørsel etter kraft. I tider med mye nedbør bli magasinene fylt opp og vannstanden blir høyere enn normal vannstand; i tider med mindre nedbør blir magasinet tappet og vannstanden blir lavere enn original vannstand. Sjølv om det i prinsippet går an å lagre elektrisk energi, er magasiner helårsvannkraftverk sin måte å lagre energi på. Elektrisk strøm blir ikke lagret noe sted. Den strømmen folk bruker, kommer direkte fra kraftstasjonen. Den elektriske strømmen blir laget på kraftstasjonen idet du bruker den hjemme i stua.

Magasinkraftverk er ikke plassert like ved vannressursen. Det er en forbindelse mellom kraftverket og dammen med tunneler i fjell eller rørledninger ned fra fjellet. Etter krigen har alle slike magasinkraftverk, og dets tilførsel av vann, blitt plassert inne i



Hol I kraftstasjon i Høvet

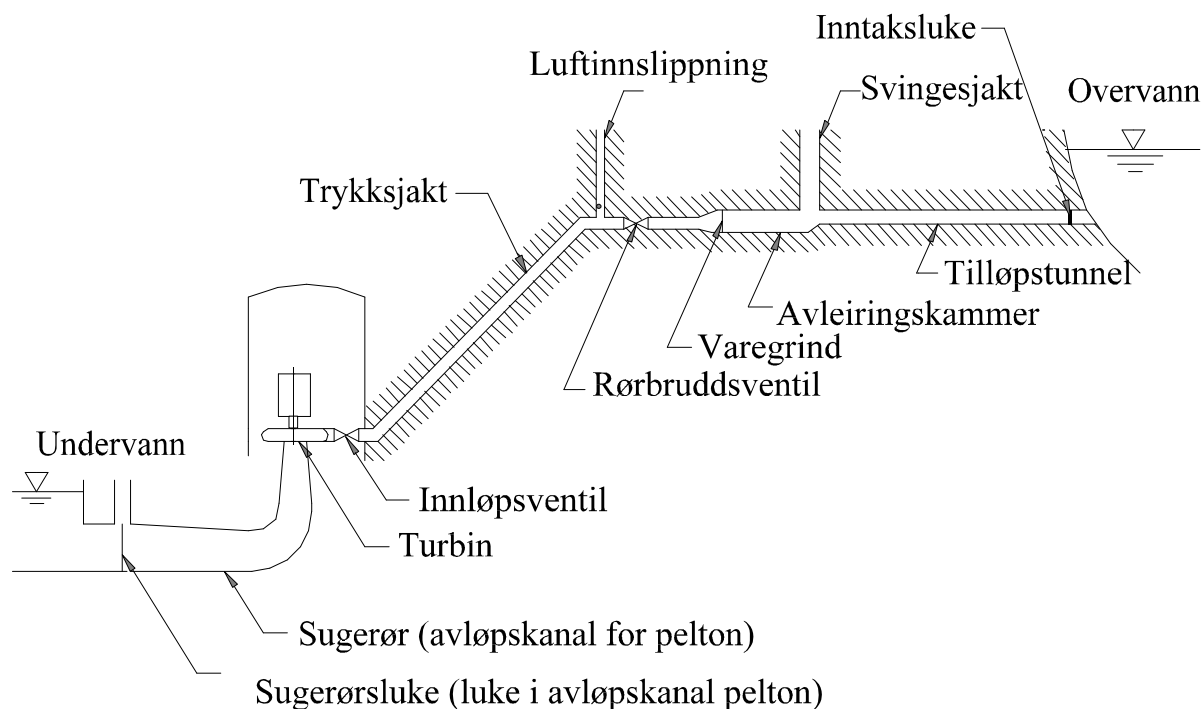
Bilde 2.: "Hol 1": kraftverk i Hol i Hallingdal.

fjellet. Den siste kraftutbygginga med kraftverk og rørgate ute i dagen ble kraftverket i Hol i Hallingdal, som stod ferdig i 1949.

Merk: Magasinkraftverk er den type vannkraftutbygging som har ført til mest skade på naturen. Et lavtrykkskraftverk lager ikke så mye større på skader på naturen utenom at det er stygt å se på, mens en demning lager store inngrep. Et damanlegg oversvømmer områder ovenfor demningen, og ødelegger den naturlige strømmen av vann nedenfor anlegget. Dette er ikke bare stygt å se på, men kan også være hemmende på det lokale økosystemet.

2.2. Vannkraftverket

2.2.1. Generell oppbygging



Illustrasjon I: "Vannkraftverk"

Som det er presisert over er det mange forskjeller på de ca 850 vannkraftverkene vi har i Norge. Men det er mange likheter også, og illustrasjonen over viser en skisse av et vanlig norsk høytrykkskraftverk i fjell. De viktigste elementene fra overvann til undervann er angitt nedenfor i tur og orden:

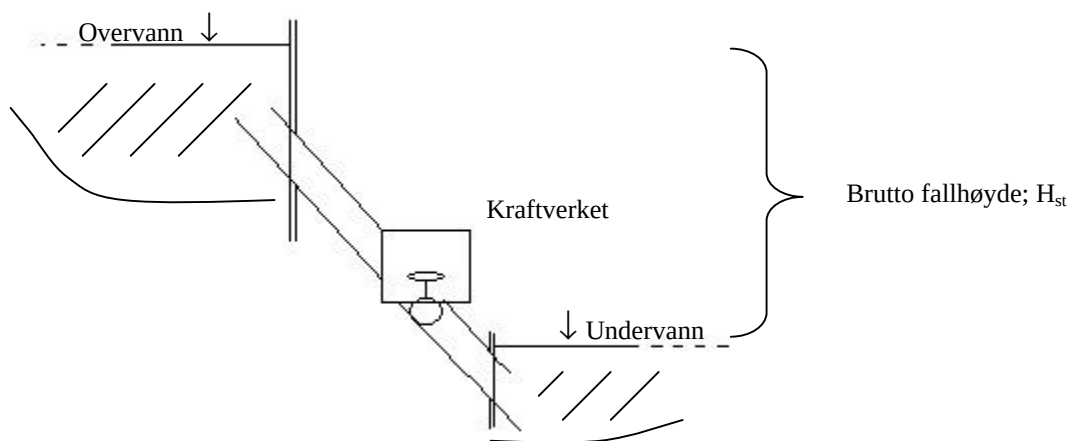
- *Inntaksluken:* Dette er organet som åpner og lukker tilgangen til vann. Dette er et organ som må til, da det er nødvendig med vedlikehold i tilløpstunnelen og varegrinda. Og når man skal begrense tilførselen av vann for å fylle opp magasinet, er det inntaksluken som ordner med det.
- *Avleiringskammeret:* Her blir sand, småstein og lignende avleiret. Dette kalles også forsandfanget.
- *Varegrind:* Dette er ei "rist" som hindrer gjenstander over en viss størrelse fra å havne i turbinen.
- *Svingesjakt:* For å gjøre kraftverket mer stabilt må man hindre trykket i rørgata i å overstige visse grenser. Dette gjøres da ved å redusere og dempe masse- og trykksvingninger ved hjelp av denne funksjonen.

- *Rørbruddsventil*: Dette er et avstengingsorgan som nyttes dersom det blir rørbrudd eller det trengs annen vedlikehold lenger nede i systemet.
- *Innløpsventil*: Har samme funksjon som rørbruddsventilen; skal her kunne avstenge vanntilførselen til turbinen.
- *Turbinen*: Dette er "vannhjulet" som omformer energien i vannet til energi som generatoren gjøres om til elektrisk energi. Turbiner kommer det mer om i senere kapitler.
- *Sugerør*: Dette er røret som vannet går ut gjennom fra turbinrommet.
- *Sugerørsluke*: Med denne funksjonen kan man tørlegge sugerøret, dersom det er nødvendig med vedlikehold eller lignende.

2.2.2 Overvann og undervann

Illustrasjonen under illustrerer høydeforskjellen på overvannet og undervannet. Overvannet er vannstanden i dammen, og undervannet er vannstanden i nedenfor kraftverket.

Brutto fallhøyde er nivåforskjellen mellom undervann og overvann. Fallhøyden er definert som H_{st} .



Illustrasjon II: "Overvann og undervann"

Frå det tidspunktet vannet går frå vanndammen virker det flere faktorer inn på det. Dvs vi har tapsfaktorer på fallhøyden. Diskusjon av disse tapsfaktorene går utover denne oppgaven, men det kan nevnes f.eks at det er tap i inntaket, det er tap i utløpet m.m. Dette gjør at netto fallhøyde er mindre enn brutto fallhøyde:

$$H = H_{st} - f, \quad (5)$$

der f er tapsfaktor.

Fallhøyden er et viktig element i utrekningen av effekten til kraftverket.

2.2.3. Effekt

For å undersøke om det lønner seg å bygge et kraftverk et sted, må man se på ulike faktorer. De to kanskje viktigste er fallhøyde, H , som beskrevet over, og *vannføringen* (Q):

$$Q = \frac{\text{volum vann}}{\text{tid}} = \frac{V}{t}, \quad (6)$$

$$\text{med enhet } [Q] = \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Å rekne ut den *teoretiske effekten* til et vannkraftverk er en enkel utrekning om du vet disse enhetene. Du har nemlig gitt følgende ligning for effekten:

$$P = g \cdot H_{st} \cdot \rho \cdot Q \quad (7)$$

For ikke å gå inn i en utledning som overskrider skribentenes evner, ser vi på et enkelt system for å utlede dette uttrykket. Systemet er en vannvei fra overvann (ved høyde h_2) til undervann (ved høyde h_1), og vi skal finne et uttrykk for hvor mye energi som kan bli overført til turbinen fra vannet.

Ved en høyde har en masse en potensiell energi U :

$$U = m \cdot g \cdot h, \quad (8)$$

der m er massen, g er tyngdeakselerasjonen, og h er høyden over en referansehøyde med U lik null: Potensielt nullpunkt.

I et volum væske, i vårt tilfelle vann, kan vi skrive tettheten på følgende måte:

$$r = \frac{m}{V}, \quad (9a)$$

ergo har vi uttrykt massen:

$$m = r \cdot V \quad (9b)$$

Med 8. og 9. blir den potensielle energien gitt ved følgende uttrykk:

$$U = m \cdot g \cdot h = r \cdot V \cdot g \cdot h \quad (10)$$

For å finne maksimal effekt vi kan få, kan man se på energioverføring på ei viss tidperiode:

$$P = \frac{\Delta E}{t} \quad (11)$$

Maksimal effekt i vårt tilfelle vil da være energiforskjellen som vannet har i overvannshøyde h_2 og undervannshøyde h_1 . Setter vi potensiell energi lik null ved turbinen, dvs. h_1 , har vi:

$$\Delta E = U_2 - U_1 = U_2 = g \cdot V \cdot \rho \cdot h_2 \quad (12)$$

Altså, fra 11. og 6., og at ($h_2 - h_1 = H_{st}$) har vi da maksimal effekt:

$$P = \frac{\Delta E}{t} = \frac{g \cdot h_2 \cdot V \cdot \rho}{t} = g \cdot H_{st} \cdot \rho \cdot \frac{V}{t} = g \cdot H_{st} \cdot \rho \cdot Q$$

La oss videre se på hva som skjer. Vannet går ned gjennom røret fra overvann til undervann. Anta nå en viss mengde vann går fra h_2 (overvannshøyde) til h_1 (undervannshøyde) på en viss tid t .

Vi lar vannet ha en strømlinjeformet bevegelse, det vil si at alle væskepartiklene følger en bane uten virvler og at banene til de respektive partiklene ikke krysser hverandre. Anta en parametrisering av strømningslinjene til vannet. Vi lar parameteren være s . Dersom vi forutsetter at væsken ikke kan presses sammen (dvs. den er inkompressibel), og at den ikke har friksjon, har vi gitt følgende uttrykk:

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gh \right) = 0, \quad (13a)$$

altså

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gh = \text{konst.} \quad (13b)$$

Her er ρ væsketettheten ($\frac{kg}{m^3}$), v er væskefarten ($\frac{m}{s}$), g er tyngdeaksellerasjonen ($\frac{m}{s^2}$), og h er stedshøyden (m).

Fra 13. kan vi skrive følgende uttrykk:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gh_2 \quad (13c)$$

Det er det samme som å skrive følgende:

$$p_1 V + \frac{1}{2} m v_1^2 + m g h_1 = p_2 V + \frac{1}{2} m v_2^2 + m g h_2 \quad (13d)$$

Vi kan også anta at hastigheten til massen vann ikke forandres gjennom observasjonen, dvs. har konstant hastighet fra topp til bunn i vannrøret i tidsintervallet t .

Merk: I realiteten er det ikke slik at en avgrenset masse vann som har konstant hastighet på hele turen fra h_2 til h_1 , men effektivt blir det slik fordi det fylles opp i toppen av vanntunnelen med like mye masse vann (m_{vann}), som det går m_{vann} ut i bunnen.

Dersom hastigheten er konstant, blir den kinetiske energien i en viss masse vann lik ved h_2 som ved h_1 . Men derimot vil den potensielle energien i en masse vann forandre seg fra overvannshøyde til undervannshøyde, i henhold til formel 8. Det samme vil trykket. Med 13d. kan vi utlede følgende:

$$p_1 V + \frac{1}{2} m v^2 + m g h_1 = p_2 V + \frac{1}{2} m v^2 + m g h_2$$

$$p_1 V + \frac{1}{2} \rho V v^2 + \rho V g h_1 = p_2 V + \frac{1}{2} \rho V v^2 + \rho V g h_2$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h_2$$

$$p_1 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2$$

Setter vi potensiell energi ved h_1 lik null, og definerer trykkforskjellen fra h_2 til h_1 som $\Delta p = p_1 - p_2$, så har vi:

$$p_1 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2$$

$$p_1 - p_2 = \rho g h_2 \tag{14}$$

$$\frac{\Delta p}{\rho} = g h_2 = g H_{st}$$

Enhetssjekk:

$$\left[\frac{p}{\rho} \right] = \frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{m \cdot \frac{kg}{s^2}}{kg} = \frac{kg \cdot m^2}{kg \cdot s^2} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = \frac{J}{kg}$$

$$[gH] = \frac{m}{s^2} m = \frac{kg \cdot m^2}{kg \cdot s^2} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = \frac{J}{kg}$$

Spesifikk energi, dvs. energi per masseenhet, er gitt med enheten Joule per kg. Spesifikk energi er da gitt som:

$$E_s = gH \quad (15)$$

Effekt er videre gitt som spesifikk energi multiplisert med massestrøm (m_s):

$$P = E_s \cdot m_s \quad (16)$$

La oss sikre at dette stemmer med enhetene:

$$[P] = [E \cdot m_s] = \frac{J}{kg} \cdot \left[\frac{m}{t} \right] = \frac{J}{kg} \cdot \frac{kg}{s} = \frac{J}{s} = W$$

Massestrømmen er gitt som masse per sekund. Da kan vi videre si at massestrømmen er vannføringen multiplisert med tettheten av vannet (vannføringen er volum vann per tid, og tettheten er masse per volum):

$$m_s = \frac{m}{t} = \frac{m}{t} \cdot \frac{V}{V} = \frac{V}{t} \cdot \frac{m}{V} = Q \cdot r$$

Fra 15. og 16. har vi da effekten gitt:

$$P = E_s \cdot m_s = E \cdot \rho \cdot Q = g \cdot H_{st} \cdot \rho \cdot Q \quad (7a)$$

der, for å repetere, r er væsketettheten ($\frac{kg}{m^3}$), g er tyngdeakselerasjonen ($\frac{m}{s^2}$), H_{st} er teoretisk fallhøyde (m), og Q er vannstrømmen ($\frac{m^3}{s}$).

Fra 11. har vi da også at effekten kan skrives:

$$P = g \cdot H_{st} \cdot \rho \cdot Q = \frac{\Delta p}{\rho} \cdot \rho \cdot Q = \Delta p \cdot Q \quad (7b)$$

Energien som har blitt tilført turbinen er gitt i ligning 8.:

$$E = g \cdot H \cdot h , \quad (17)$$

der h er virkningsgraden til turbinen. Virkningsgraden til en turbin er gitt på følgende måte:

$$h = \frac{H - J}{H} , \quad (18)$$

der J er summen av strømningsstap i turbinen, med enheten *meter vannsøyle* (mVS).

Fra 14. og 15. får vi den hydrauliske energien til turbinen:

$$E = g \cdot (H - J) \quad (19)$$

Det første man gjør for å finne ut om det er potensial for et vannkraftverk et sted er å bruke ligning 7., og finner et teoretisk tall for effekten. Tyngdeakselerasjonen g er kjent, massetettheten til vannet er kjent, så det er bare vannføringen og en teoretisk fallhøyde man må finne ut av. Videre blir det da undersøkt hva slags turbin det lønner seg å ta i bruk...

2.2.4. Turbiner

Valg av turbintyper og antall turbiner for et gitt vannkraftverk vil influere anleggets avkastning i betydelig grad. Ved valg av turbintyper er det de to ovenfornevnte faktorene H og Q som er viktigst. Det er hovedsakelig tre typer turbintyper:

- Francis
- Kaplan
- Pelton

Peltonturbinen er avhengig av høy fallhøyde, og heller lite vannføring. Kaplanturbinen er avhengig av store vannmengder, og heller liten fallhøyde. Francisturbinen ligg mellom de to andre, og kan brukes for de fleste fallhøyder opp mot 600-700meter. Over 600 meter er peltonturbinen prioritert, dersom det ikke er andre faktorer som tilsier noe annet.

Fire andre parametere som har mye å si for valg av turbin til et kraftverk:

- pris
- virkningsgrad
- driftsforhold
- reparasjonstid

Skribentene kommer ikke til å gå nærmere inn på disse faktorene, men vil heller se litt nærmere på de tre turbintypene:

2.2.4.1. Francisturbinen

Francisturbinen er den turbintypen som er mest brukt i Norge. 70 % av kraftverkene i Norge har francisturbin. Hovedgrunnen er at francisturbinen har et veldig stort bruksområde, fra fem til oppimot 700 meters fallhøyde.

Francisturbinen er en reaksjonsturbin. Dvs at ca 50 % av den omsatte spesifikke energien er hastighetsenergi, og at vannet får et spinn før innløpet til løpehjulet. Den spesifikke energien omsettes i løpehjulet til mekanisk energi: Hastigheten til det roterende vannet gir en vinkelhastighet ω til løpehjulet.

I illustrasjonen nedenfor vises en francisturbin, og følgende funksjoner er poengtert:

1. *Spiraltrømme*: Denne fordeler vannet gjennom skovlene i spiraltromma og inn på ledeapparatet, slik at strømningsforholdene blir jevnest mulig rundt ledeapparatet.
2. *Ledeskovler*: Disse regulerer vannføringen, og gir vannet i spiraltromma rotasjon med riktig strømningsvinkel inn på vannhjulet. Ledeskovlene kan reguleres, slik at vannet får mindre eller større rotasjon ettersom hvor stort strømbehovet er der og da.
3. *Løpehjul* (vannhjulet): Omformer den spesifikke energien i vannet til mekanisk energi. Løpehjulet består av navskive, ring og løpehjulsskovler.

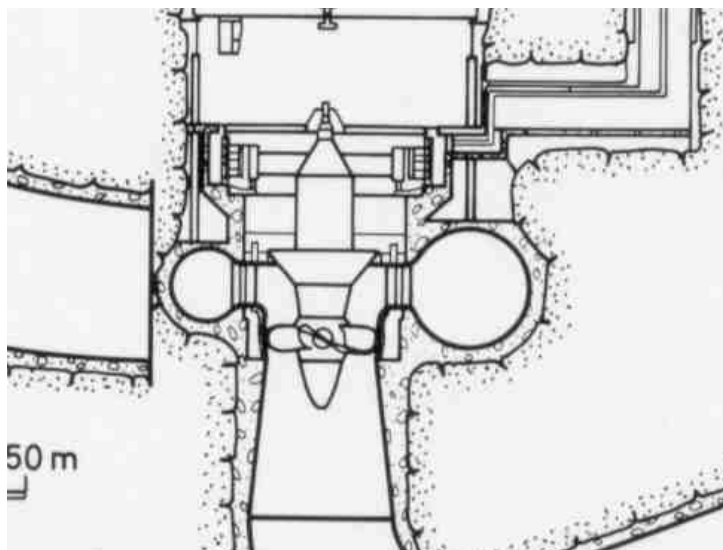
-

Vannet som strømmer inn i spiraltromma blir jevnt fordelt rundt omkretsen og strømmer gjennom ledeskovlene, og videre inn på løpehjulsskovlene. Vannet blir hele tiden akselerert fordi det kommer inn på mindre og mindre radius, og dermed mindre tverrsnitt. Ved hjelp av ledeskovlene øker rotasjonen. I turbinrommet er det ikke noe luft, dvs trykket blir opprettholdt inne i turbinen. Dette er grunnen til at turbinen klarer å utnytte energien.

21

En kaplanturbin er konstruert for mye vann, typisk for bruk i elvekraft der tilstrømming av vann er stor. Den enkleste form for kaplanturbin er et propellignende løpehjul, med store og få løpehjulsskovler. Oppbyggingen av en kaplanturbin er så å si den samme som for francisturbin, bare at løpehjulet som oftest er en del større, og det er færre skovler på løpehjulet.

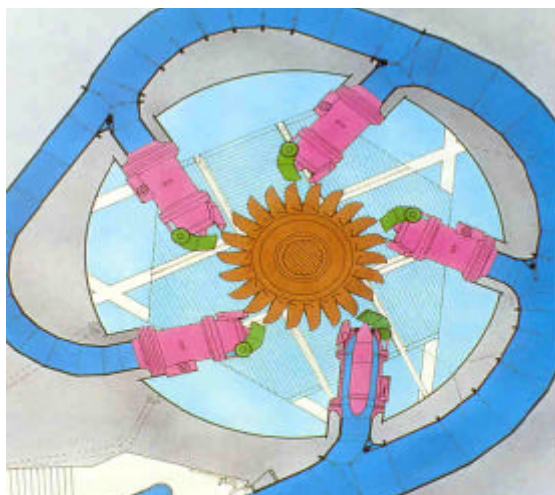
Illustrasjonen over viser en vertikal kaplanturpintype, dvs at akslingen står vertikal. For nyere elvekraftverk i Norge, der fallhøyden er så å si null, er det også vanlig å ha horisontale kablanturbiner.



Bilde 4.: Utsnitt av et vannkraftverk med vertikal kaplanturbin.

2.2.4.3 Peltonturbin

Peltonturbinen er en såkalla impulsturbin. Dvs at trykkenergien i vannet omsettes til hastighetsenergi, og tynne sterke stråler med vann treffer noen steder på løpehjulet. Peltonturbinen er den eneste turbinen der løpehjulet står fritt i luft.



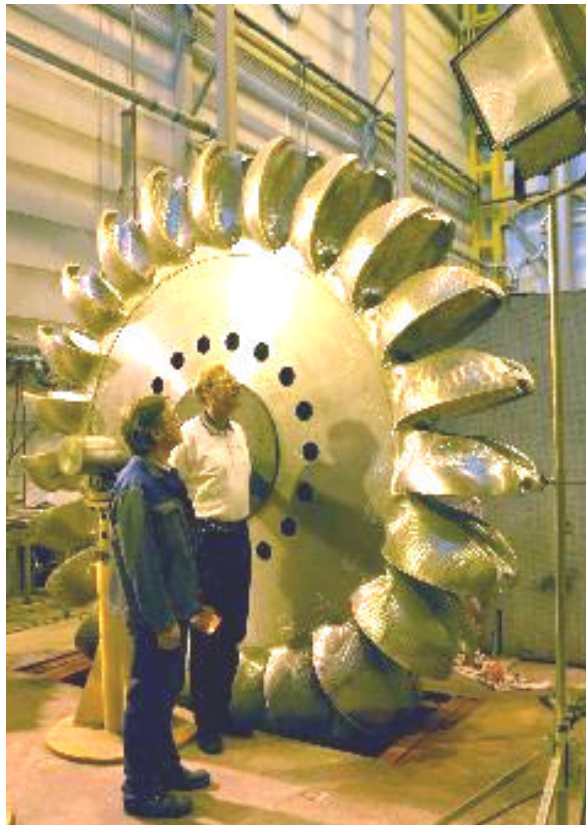
Bilde 5.: Peltonturbin med 5 tilsprøytninger

Peltonturbintypen er en dyr turbin, men er likevel enerådende for fall over 600-700 meter. En peltonturbin kan stå både vertikalt og horisontalt, men det er den vertikale typen som blir brukt mest.

I motsetning til francis (og Kaplan) sine propell-lignende løpehjulsskovler, er det på peltonturbinen hule og ovalforma skovler. Grunnen til det er at i motsetning til francis og kaplan er ikke hele "rommet" fylt med

vann. Her er man avhengig av å "fange" vannstrålen.

Merk: Utenfor vannkraftlaboratoriet midt på Gløshaugen står det en pensjonert Peltonturbin, lik den på bildet under:

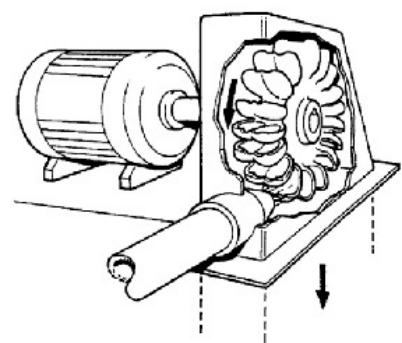


Bilde 6.: Peltonturbin

2.2.5. Generator

Det er den elektriske generatoren som omdanner den mekaniske energien, skapt av vannet, til elektrisk energi. Man kan kort si at generatoren er hjertet i et vannkraftverk. Med tanke på å få best mulig effekt ut fra de ressursene man rår over, er generatorer tema for mye forskning. Helt siden den

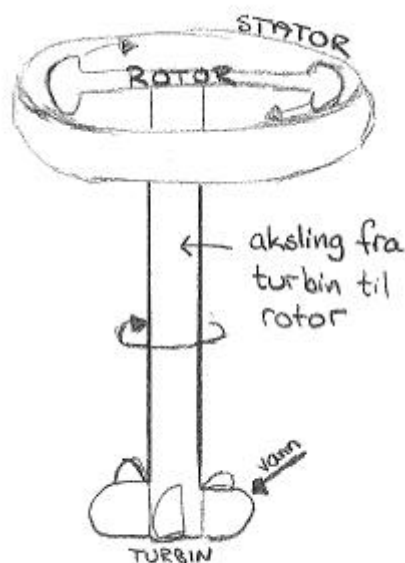
første elektriske generatoren ble bygget av den franske forskeren H. Pixii i 1832 har generatorer gjennomgått en rivende utvikling. Men prinsippet fra den gang er det samme som vi ofte har i dag, med en magnet som roterer i forhold til en spole og induserer spenning i spolens viklinger.



Bilde 7.: En illustrasjon som viser at en peltonturbin går rundt pga av vannet, og turbinen roterer en aksling som går til generatoren.

Norske bedrifter var blant verdens ledende på generatorutvikling for noen år siden. Norge var engasjert over store deler av verden, spesielt sørlige strøk av Afrika og Amerika, samt Sørøst-Asia. Nå, derimot, ligger mye av vår stolte og tradisjonsrike industri brakk og ”råtner på rot”.

Nå skal vi gå inn på hva som virkelig skjer når det dannes elektrisk energi inne i generatoren.

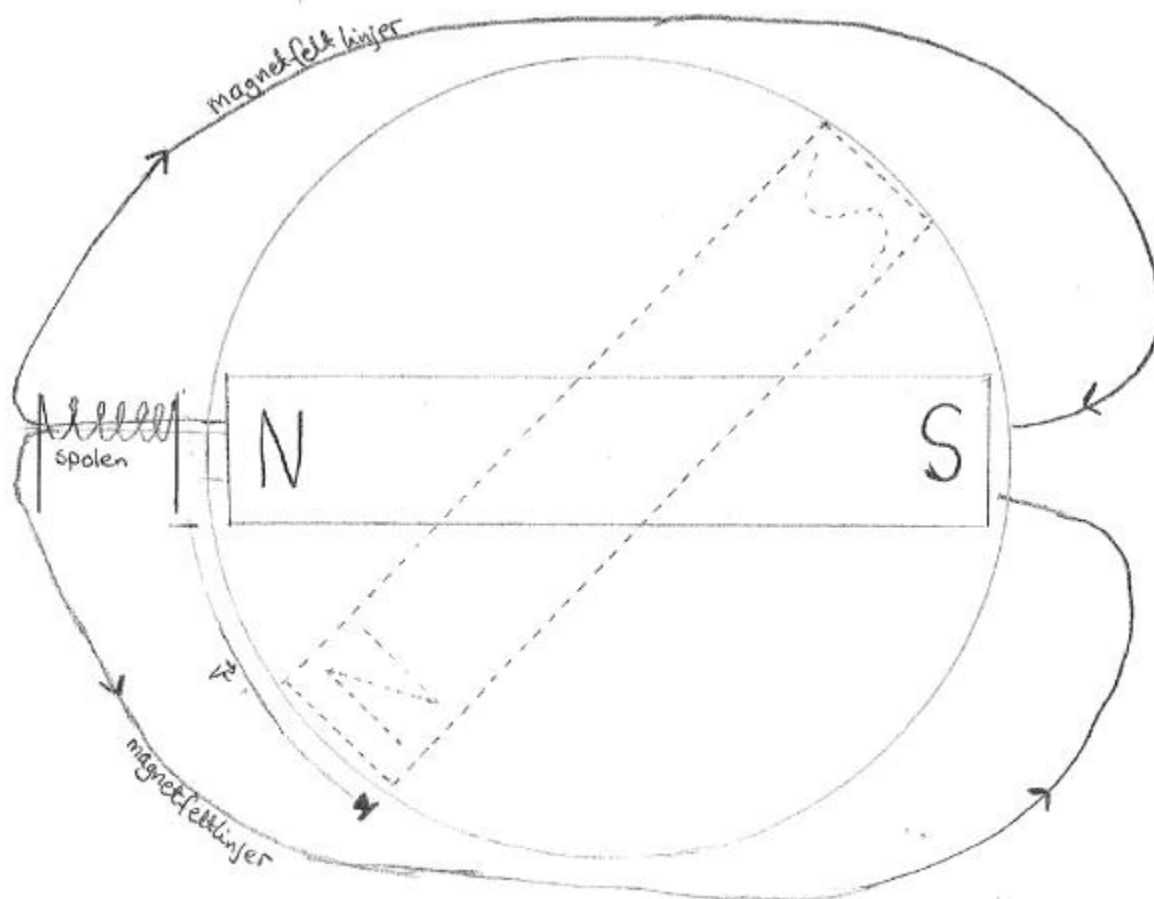


Illustrasjon III: ”Turbin og rotor på samme aksling”

Vi har vel alle sett en dynamo i aksjon, enten på sykkel, i bilmotoren eller andre steder. Det som skjer i en dynamo er i prinsippet det samme som skjer inne i en generator. Det aller første vi trenger er energi for å få generatoren i sving. På en sykkel vil det være hjulet som går rundt, mens i et vannkraftanlegg er det mekanisk energi fra vannet. Gjennom turbinen går det en aksling som er festet i rotoren og setter det hele i gang.

En generator består hovedsakelig av to ting; en rotor og en stator. Rotoren er til turbinen gjennom en aksling og vil som navnet tilsier, rotere. Rotoren består av viklinger som fører likestrøm, og vil derfor fungere som en magnet. Statoren består av mange viklinger av kobbertråd, og vil, i utstrekt form, være flere tusen meter lang. Disse kobbertrådene står i ro (statiske) og kalles derfor stator. Det er flere kretser festet rundt statoren. Grunnen er at med kun én krets vil vi ikke oppnå et varierende magnetisk felt i kretsen og det vil ikke induseres spenning.

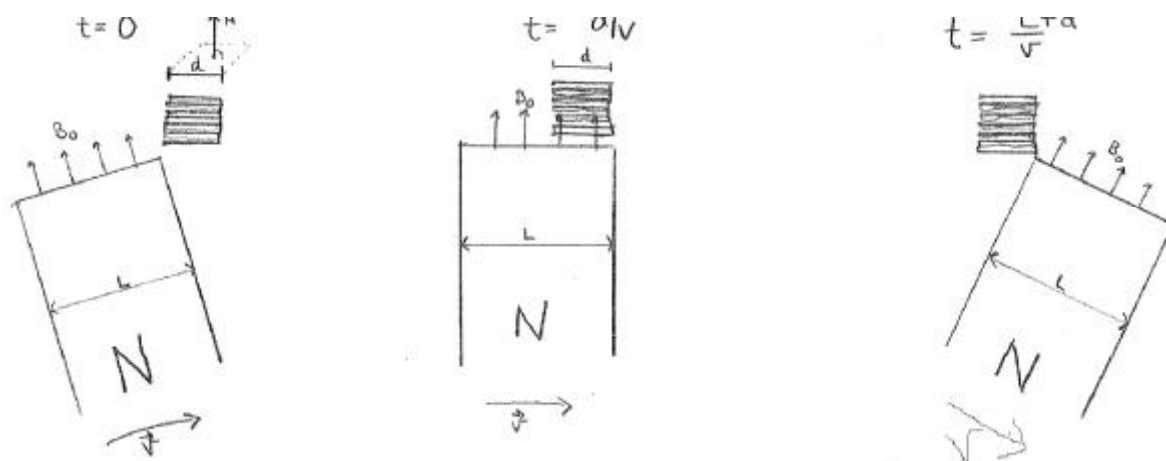
Vi vil ta for oss en elementær og synkron generator. Det er en generator som har rotor bestående av kun to poler; en N og S. Videre tar vi for oss en liten spole på statoren som blir utgangspunktet for vår videre utledning. Spolen er firkantet, for enkelhets skyld, og magnetflaten er stor i forhold til arealflaten av spolen.



Illustrasjon IV: "Enkel skisse av magnetfeltlinjene fra magneten i en generator"

For å kunne forklare hva som egentlig skjer, har vi laget oppsettet vårt veldig enkelt. Virkeligheten vil selvsagt være mer komplisert, men prinsippet blir likevel det samme. Når rotoren begynner å rotere rundt vil den magnetiske fluksen i spolen vår variere. Vi har valgt en stor magnetflate, i forhold til spolen, slik at vi kan regne med et konstant magnetfelt, B .

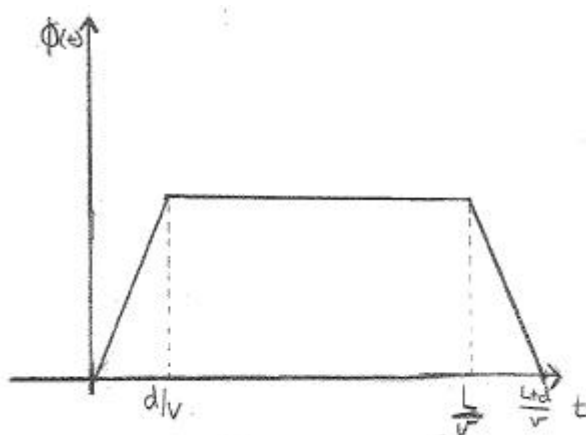
Det er i det magneten passerer spolen vår at det blir interessant, så la oss se litt nærmere på hva som skjer;



L = bredde på magneten
 d = bredde på spolen
 $\vec{v}$ = hastigheten til magneten
 B_0 = konstant magnetfelt
 A = flatenormalen til arealet av spolen

Illustrasjon V: "Magnetten passerer spolen"

Ved $t=0$ er det null magnetisk fluks (Φ) inne i spolen. Magnetten beveger seg med konstant hastighet, v , og fram til magnetten dekker hele spolen vil fluksen i spolen øke. Ved tiden $t=d/v$ vil fluksøkningen stoppe opp og være konstant helt fram til magnetten er i ferd med å forlate spolen igjen. Fra $t=L/v$ vil fluksen i spolen avta helt fram til $t=(L+d)/v$, der fluksen igjen vil være 0.



Graf I: "Magnetisk fluks i spolen med hensyn på tida"

Vi ser at vi har en lineær fluksøkning fram til $t=d/v$. Deretter vil den være stabil helt fram til magnetten er i ferd med å forlate i $t=L/v$, og vi får en ny fluksendring i spolen.

Den magnetiske fluksen er gitt ved Gauss' lov:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (20)$$

I vårt tilfelle har vi N viklinger i spolen, og magnetfeltet er konstant, B_0 . Det eneste som varierer er hvor stor del av spolens areal som vil inneholde magnetisk fluks. Videre vil $\vec{A}$ alltid være parallell med $\vec{B}$. Ligningene for fluks i spolen vil dermed se slik ut:

$$\Phi_1(t) = NAB_0 \left(\frac{t}{d/v} \right), \text{ i intervallet } t \in \left\langle 0, \frac{d}{v} \right\rangle$$

$$\Phi_2(t) = NAB_0, \text{ i intervallet } t \in \left\langle \frac{d}{v}, \frac{L}{v} \right\rangle$$

$$\Phi_3(t) = NAB_0 \left(\frac{(L + d/v) - t}{d/v} \right), \text{ i intervallet } t \in \left\langle \frac{L}{v}, \frac{L + d}{v} \right\rangle$$

Nå har vi et uttrykk for fluksen gjennom spolen, og vi kan finne den induserte spenningen (ϵ):

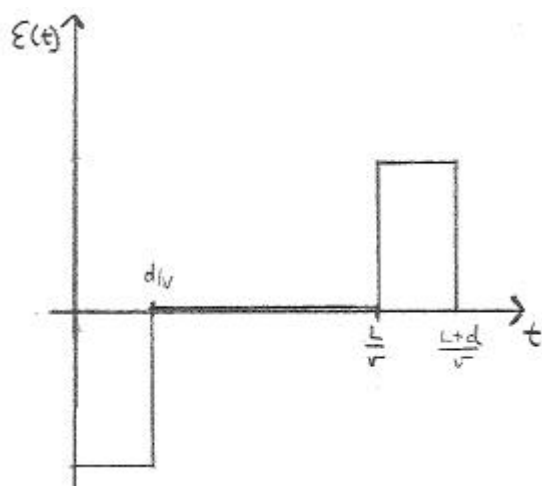
$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (21)$$

Fra likningen for fluksen i de ulike intervallen har vi:

$$\epsilon_1 = -NAB_0 \frac{v}{d}$$

$$\epsilon_2 = 0$$

$$\epsilon_3 = NAB_0 \frac{v}{d}$$



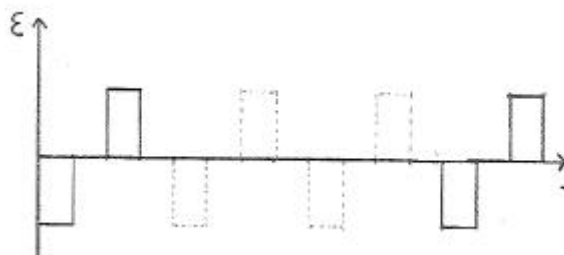
Graf II: "Indusert spenning"

Vi ser at vi får indusert spenning i spolen kun når det magneten kommer inn mot spolen, og når den forlater den. Dette passer veldig bra, fra formel (21) ser vi at indusert spenning er forandring i magnetisk fluks.

Vi kan se at indusert spenning i vår ene spole vil være ganske beskjeden, i og med at vi har valgt den såpass liten. Ved å plassere mange spoler rundt i statoren vil man derimot oppnå en god effekt av generatoren, og den vil være kapabel til å levere mye elektrisk energi.



Graf III: "En spole"

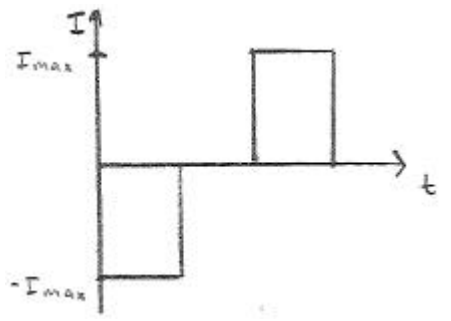


Graf IV: "Flere spoler"

Spolen vår er tilkoblet en krets som leverer energien videre. I kretsen vil det gå en strøm (I) som vil være avhengig av spenningen og den indre motstanden i ledningen (R).

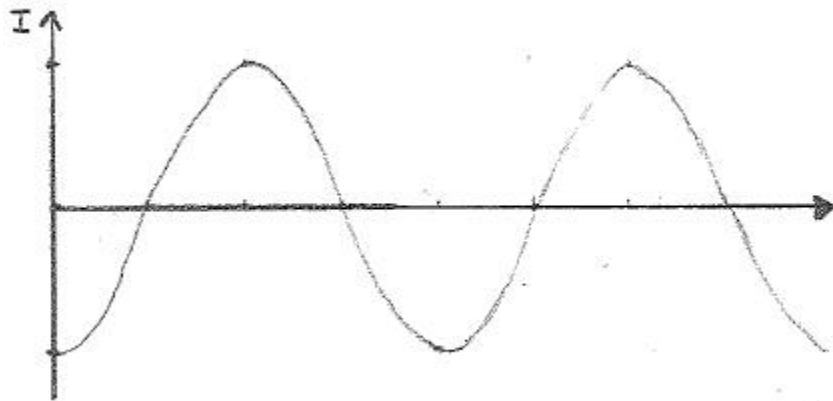
$$I = \frac{\epsilon}{R} \quad (22)$$

Denne strømmen varierer med tiden og kalles derfor vekselstrøm. I vårt tilfelle vil den se slik ut:



Graf V: "Strømproduksjon i vårt tilfelle"

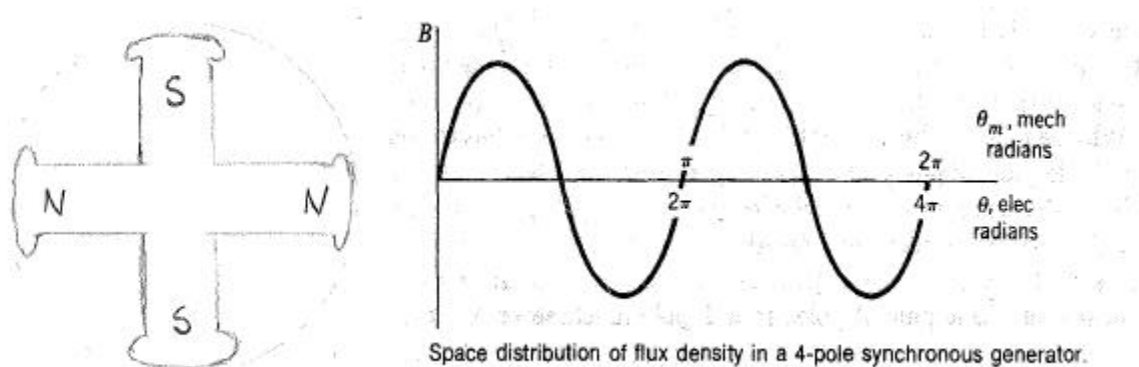
I et reelt tilfelle vil vi ikke få så skarpe overganger, strømmen vil være gitt ved en sinuskurve:



Graf VI: "Vekselstrøm"

Spolen er koblet i en elektrisk krets, slik alle de andre spolene rundt statoren er. Disse kretsene er leverandørene av elektrisk strøm. Strømmen blir deretter "transformert opp", den får altså høyere spenning, før den blir sendt av gårde på strømmettet.

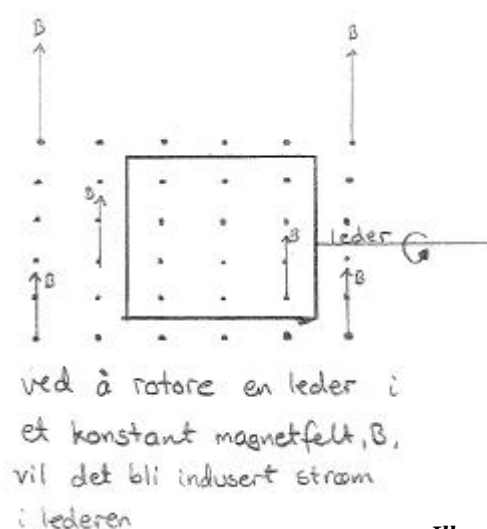
Hvis man har flere poler på rotoren, blir regningen noe annerledes. Det vil induseres dobbelt så mye på én rotasjon i forhold til eksemplet vårt, forutsatt at man beholder samme antall spoler i statoren. En 4-polers generator er satt opp med polene som vist under til venstre. Til høyre ser vi at ved å innføre flere enn to poler på en generator må man regne med både elektriske og mekaniske grader.



Illustrasjon VI: "Fire polers generator"

Her i Norge har vi en vekselstrøm på 50 Hz på strømmettet vårt. Vi er nødt til å ta hensyn til det i generatoren vår, og må justere generatortype og hastighet etter forholdene. I den typen som vi har tatt utgangspunkt i, med kun to poler, må rotoren rotere med en vinkelhastighet på 50 rotasjoner i sekundet for å oppnå en frekvens på 50 Hz. Har vi derimot fire poler på rotoren er det kun nødvendig med 25 rotasjoner i sekundet, i og med at det induseres dobbelt så mye på én rotasjon. I elvestryk, der turbinen ikke klarer å overføre så mye energi, er det derfor vanlig med mange poler på rotoren. Dermed trenger man ikke så høy hastighet på rotoren for å få den rette frekvensen. I høytrykksanlegg, derimot, benytter man en- og topolers generatorer. I slike anlegg har vannet høy energi, og turbinen kan gi rotoren høy hastighet. Frekvensen på strømmettet varierer rundt om i verden. USA, for eksempel, bruker 60 Hz på nettet sitt.

Det er også mulig å bevege en *leder* i et *magnetisk felt* for å oppnå magnetisk fluks, og derved strøm.



Illustrasjon VII: "Roterende leder i magnetfelt"

I de aller fleste tilfeller i et vannkraftverk benyttes derimot tilfellet vi har beskrevet ovenfor. Men det er kun av praktiske årsaker at denne metoden benyttes, resultatet vil bli det samme i begge tilfellene, altså induisert spenning. Det motsatte tilfellet av det som skjer i en generator, altså å benytte elektrisk energi til å drive en motor kan vi se overalt rundt oss. Elektrisk tannbørste, miksmaster og motoren til en bil er alle eksempler på det motsatte av det som skjer inne i en generator.

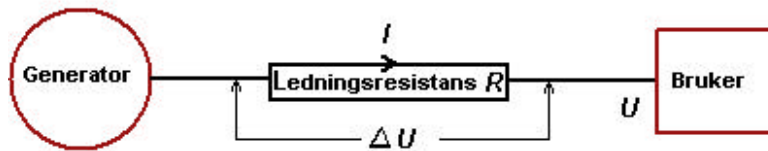
I generatorer regnes det i snitt til å være ca 10 % tap. Dette varierer selvsagt fra kraftverk til kraftverk, men man kan ikke regne med å få utbytte av stort mer enn ca. 90 % av tilgjengelig energi generatorprosessen.

2.2.6. Overføring av strøm

I generatoren dannes altså den elektriske energien som vi bruker i dagliglivet. Men hva har skjedd med den elektriske energien fra den blir dannet i generatoren til den kommer inn som strøm i husene våre?

I generatoren dannes det spenning på mellom 3.000 og 13.000 volt. Dette er for lite spenning til at det skal være lønnsomt å sende over lange strekninger. La oss nå tenke oss en flaske full av vann. Deretter stikker vi et hull på to steder på flasken, et helt i bunn og et lenger opp. Da vil vi se at vannet som strømmer ut av det nederste hullet vil sprute lengre enn det øverste. Dette kommer av at det er større trykk i bunnen av flasken enn det er lenger opp. På samme måten kan vi tenke oss strømovertføring; jo større trykk, jo lenger går den. Eller rettere sagt; jo større spenning, jo bedre effekt får vi. Derfor benytter vi oss av transformatorer, som øker spenningen og dermed sørger for at vi kan sende strøm over lange strekninger, og uten at det blir store tap.

Men hvorfor blir det store tap ved lave spenninger? I alle ledninger som fører strøm er det en indre elektrisk motstand, eller resistans. Denne resistansen fører til spenningsfall og dermed til tap av effekt i ledningen. En forenklet modell kan vises slik:



Illustrasjon VIII: "Spenningsfall i overføringen"

Effekten som kommer inn i stuene våre er gitt:

$$P = U \cdot I, \quad (23)$$

der P er effekten (Joule), U er spenningen (Volt) og I er den elektriske strømmen (Ampere).

I og med at spenningen er konstant, vil overført effekt være proporsjonal med strømmen I. I en ledning vil spenningsfallet være gitt ved Ohms lov:

$$\Delta U = R \cdot I, \quad (24)$$

der R er motstanden i ledningen, målt i ohm (Ω).

Effekttapet i overføringen blir fra 13. og 14. gitt som:

$$\Delta P = \Delta U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (25)$$

Dette viser oss at effekttapet i overføringen er proporsjonal med kvadratet av strømmen. Dermed lønner det seg å skru opp spenningen og ned strømmen når man skal overføre elektrisk energi over lange strekninger. I høyspentledninger på 400 kV regnes det med et tap på ca. 3-4 % på overføringen.

Hvor mye spenningen blir transformert opp varierer alt ettersom hvilket behov det er. Ved de virkelig lange strekningene blir spenningen transformert helt opp til 400 kV. Det er den største



spenningsstyrken som benyttes på det norske nettet i dag. Men det finnes også høyspentledninger med lavere spenning, for eksempel 132 kV og 64 kV.

Før strømmen kommer inn til forbrukeren blir den transformert ned igjen. Dette skjer nær forbrukeren, slik at overføringstapene blir små. Da er midlere spenning kommet ned til 220 V, som er spenningsstyrken vi bruker her i Norge.

3. Etterord

Elektrisiteten vi får fra vannkraftproduksjon i Norge er helt essensiell. Landet vårt er som skapt for formålet; mange egnede elver, store fallhøyder og mange potensielle vannmagasiner gjør sitt til et nesten uttømmelig vannkraftpotensial.

Vannkraftproduksjon er en veldig ren energiutvinning, det er ingen utslipp av klimagasser eller kjemiske styggheter. Anleggene krever også lite vedlikehold. Ulempene er at det kan føre til store inngrep i naturen, og økosystemet kan komme i ubalanse.

Eksempel på norsk vannkraftutbygging som har vært omdiskutert i denne sammenheng er Alta-utbyggingen på begynnelsen av 1980-tallet. Utbyggingen førte til store protester fra både innbyggere og miljøeksperter, men kraftverket og dammen stod klare i 1983. Senere har det blant annet vist seg at laksebestanden i Alta-elva har blitt redusert, samt at nytteverdien av kraftverket ikke har blitt så stor som antatt.

Staten har nå satt stopper for alle fremtidige store utbygginger av norske vassdrag, og det satses nå på å fornye de allerede bygde kraftverkene. Norsk industri og forskning er også retta mot land i Asia og Sør-Amerika, der potensialet for vannkraft er stort. Blant anna har Statkraft nå sin hovedsatsing, av ny utbygging, i Nepal.

Kilder

- Elektric Machinery 2nd edition, Fitzgerald/Kingsley/Umans, International student edition, Mac-Graw Hill, Inc., 1986
- Vannkraft i Norge, Vidkunn Hveding, NTNU, 1992
- Physics for scientists and engineers 2nd edition, Fishbane/Gasiorowicz/Thornton, Prentice-Hall, Inc., 1996
- Grunnkurs i hydrauliske Strømningsmaskiner, Hermod Brekke, Vannkraftlaboratoriet NTNU, 2000
- www.kraftskolen.no
- www.elsiden.no
- www.home.no/vannenergi
- www.tev.ntnu.no/vk/
- www.statkraft.no
- <http://www.energifakta.no/documents/Vannkraft/vannkraft.htm>

Hjelp og råd fra:

- professor Arne T. Holen
- dr.ing student Thomas Vekve
- førsteamanuensis Jon Andreas Støvneng

Bildene og illustrasjonene er hentet fra:

- Framsida: www.tev.ntnu.no/vk/
- Bilde 1.: www.statkraft.no
- Bilde 2.: www.hydro.no
- Bilde 3.-7.: www.tev.ntnu.no/vk/
- Illustrasjon I: www.tev.ntnu.no/vk/
- Illustrasjon II-VIII: Illustrert selv.

Bølgeenergi

**Anders Leirvik
Torgeir Anda**

Prosjekt i FY1303 Elektrisitet og magnetisme høsten 2004

Abstract

Prosjektet gir en grundig innføring i enkelte prinsipper for å ta opp energi fra havbølger. Det er konstruert, fysisk eller bare teoretisk, mange ulike typer bølgeenergiabsorbatorer, såkalte WEC – wave energy converters. De mest sentrale WEC er oscillerende vannsøylar (OWC) og oscillerende bøyer. Innkommende bølger setter et legeme, enten en vannsøyle eller en flytende bøye i bevegelse, og det hydrauliske eller pneumatiske systemet inne i absorbatoren driver en turbin, som genererer en elektrisk strøm. Vi har her gjennomgått noen av disse.

Men det er ikke enkelt å utvinne energi fra havbølger, siden havbølger er irregulære bølger. Absorbert effekt fra en absorbator uten noen form for styring er meget liten i forhold til en som blir styrt. Da kommer vi inn på begrep som fase- og amplitudestyring, som er det mest sentrale i teorien om bølgeenergi. Den generelle teorien om fasestyring resulterer i at oscillasjonsfarten og kraften fra bølgene må være i fase for å gi størst mulig absorbert effekt i det oscillerende legemet. En må da finne måter å kontrollere WEC på, som er både energi- og kostnadseffektiv. Det er mange gode forslag fra ledende forskere, men teknologien er enda ikke utviklet nok til å drive bølgeenergiverk i stor skala. For å bedre forstå fase- og amplitudestyring har vi sett på en elektrisk analogi for en OWC – en elektrisk krets hvis komponenter tilsvarer størrelser i et mekanisk svingesystem. Det viser seg at denne analogien at oscillasjonsfarten og kraften fra bølgene ikke nødvendigvis må være i fase for å oppnå maksimal nyttig effekt, fordi det ikke er det oscillerende legeme, men en turbin som skal absorbere effekten.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning	- 04 -
2. Symboler	- 04 -
3. Forskjellige typer bølgeenergiabsorbatorer	- 06 -
3.1 OWC – oscillerende vannsøyle	- 06 -
3.2 Offshore WEC bøye	- 08 -
3.3 TAPCHAN	- 10 -
3.4 Wave dragon	- 11 -
4. Generell teori og fase- og amplitudestyring	- 13 -
5. Elektrisk analogi til fasestyring	- 17 -
6. Generator	- 24 -
7. Konklusjon	- 26 -
8. Kildehenvisninger	- 27 -
9. Vedlegg	

1. Innledning

Vi starter med å se på forskjellige typer bølgeenergiabsorbatorer, WEC (wave energy converters). Først en oscillerende vannsøyle, OWC (oscillating water column) installert ved kysten, deretter en oscillerende bøye med et hydraulisk system installert offshore, og to WEC som bygger på at bølgene slår over i et reservoar, TAPCHAN og wave dragon – den største forskjellen er at den ene er montert ved kysten og den andre er offshore. Hovedtyngden i denne delen ligger på to første, ettersom de er mer aktuelle for senere beregninger. TAPCHAN og wave dragon blir fremstilt for å vise at det er flere andre måter å utvinne bølgeenergi på. Vi sier også litt om hvordan absorbatorene må fase- og amplitudestyres.

Videre ser vi på teorien som ligger bak alle typer WEC. Vi ser på kreftene som virker på absorbatoren, og ut i fra det beregner vi hvordan vi kan oppnå maksimal absorbert effekt. Vi ser også på det som vil tilsvare maksimal absorbert effekt i en elektrisk analogi for en OWC.

Til slutt forteller vi enkelt hvordan en generator fungerer, og oppsummerer resultatene fra prosjektet.

2. Symboler

Symbol tillagt en subposisjonert 0 er amplituden til den fysiske størrelsen.

Brukt i 3.2 Offshore WEC bøyer og 4. Generell teori og fase- og amplitudestyring

$F(t)$ - total bølgekraft + ekstern kraft som følge av fasestyring

$F_e(t)$ - eksitasjonskraft, kraften som virker på legemet fra innkommende bølge

$F_r(t)$ - strålingskraft, kraft som virker på legemet fra bølger generert av oscillasjonen

$F_{tot}(t)$ - total bølgekraft: Eksitasjonskraft + strålingskraft

j - faseforskjell mellom eksitasjonskraft og kompleks oscillasjonsfart

$P(t)$ - absorbert effekt

$\overline{P(t)} = P$ - midlere absorbert effekt

P_e - effekt fra eksitasjonskraften

P_m - uttrykk for maksimal effekt, avhenger av faseforskjellen j

P_{max} - maksimal effekt som følge av fasestyring

P_r - effekt tapt på grunn av strålingsmotstanden

R_r - strålingsresistans, motstand fra genererte bølger

$s(t)$ - forskyvning til et legeme som følge av oscillasjon

u - kompleks oscillasjonsfart

u^* - komplekskonjugert oscillasjonsfart

$|u_0|_0$ - optimal fartsamplitude, avhenger av faseforskjellen j

$|u_0|_{opt}$ - optimal fartsamplitude som følge av amplitudestyring

Z_r - mekanisk strålingsimpedans

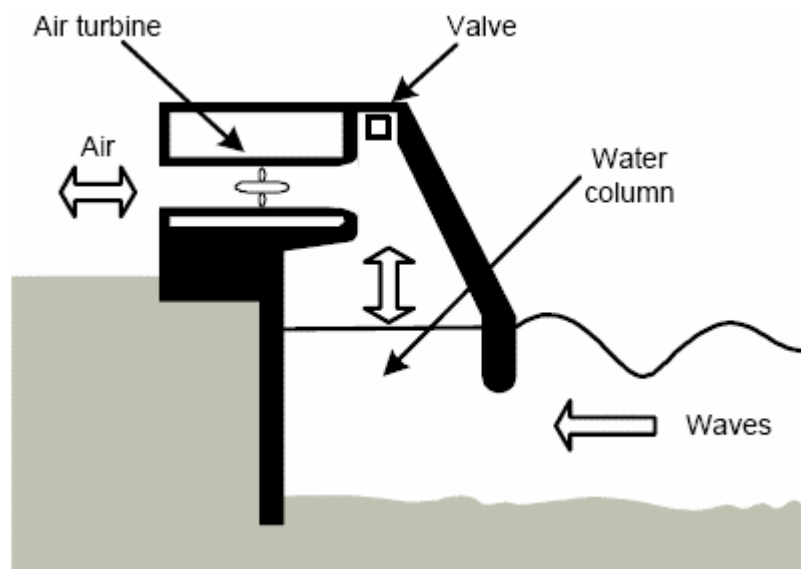
Brukt i 5. Elektrisk analogi til fasestyring

A_0	- kompleks amplitude til innkommende bølge
C_i	- kapasitanser
F_{tot}	- totalkraften på vannsøylen
$f_{e,I}$	- eksitasjonskraftskoeffisient
g	- tyngdens akselerasjon
I	- elektrisk strøm
L	- induktans
ω	- sirkelfrekvens
R_1	- resistans i kretsen som tilsvarer den mekaniske resistansen $R_{r,I} + R_f$
R_2	- resistans i kretsen analogt med absorbert energi
R_f	- friksjon
$R_{r,I}$	- strålingsresistans
r	- massetetthet til vann
$rgSs_0$	- oppdriftskraft
S	- overflaten på vannsøylen.
s_0	- kompleks amplitude for utsvinget til vannsøylen
U	- elektrisk spenning
u_0	- kompleks fartsamplitude
V	- spenning
Z_l	- mekanisk last impedans
Z_w	- reflektert impedans og friksjon
Z_{tot}	- total impedans i kretsen

3. Forskjellige typer bølgeenergiabsorbatorer

3.1 OWC – Oscillerende vannsøyle

En OWC består av et kammer hvor et volum med luft er innelukket over havoverflaten. Kammeret er åpent mot havet i en viss avstand under vannoverflaten. I de fleste tilfeller blir anvendbar energi produsert av en luftturbin som er plassert mellom luftkammeret og den ytre atmosfæren. En innkommende bølge vil tvinge vannsøylen under den innelukkede luften til å oscillere og dermed pumpe luft gjennom turbinen.



Figur 3.1.1. Prinsippskisse av en OWC

Kilde: <http://www.wave-energy.net>

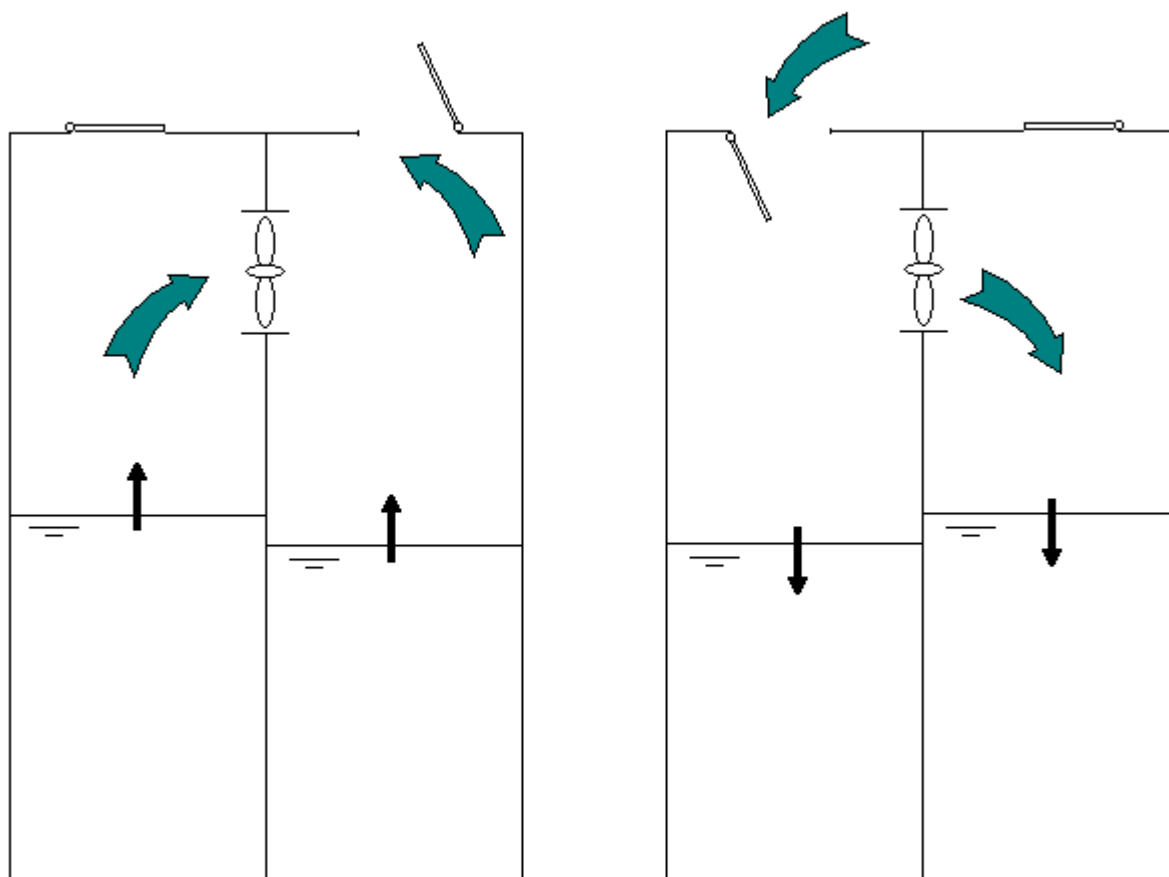
Gjennomstrømningen av luft gjennom turbinen vil forandre retning ettersom trykket i kammeret oscillerer. En vanlig propell vil under slike forhold stoppe opp for deretter å rotere andre veien. Siden trykket i kammeret hele tiden oscillerer, vil en slik propell hele tiden bremses og stoppes opp. Dette er lite gunstig når propellen skal kobles til en generator. Det finnes flere måter å løse dette problemet på. Den mest populære måten er Wellsturbinen oppfunnet for ca. 25 år siden av Dr. Allen Wells. Denne gjør bruk av en propell som roterer uavhengig av luftgjennomstrømningens retning.



Figur 3.1.2. Propell brukt i en Wells turbin.

Kilde: Havbølger: Energi og utnytting av J. Falnes og J. Hals

En annen mulig løsning er tvilling OWC. Ved å bruke to kammer vegg i vegg i stedet for ett tar denne modellen sikte på å få en konstant retning på luftgjennomstrømningen. Ved å bruke to luftluker, en i hvert kammer, kan det skapes et undertrykk i det ene kammeret og et overtrykk i det andre ved å åpne den ene luken når vannsøylene er på vei opp og åpne den andre når vannsøylen er på vei ned. Disse luftlukene brukes også til å fasestyre OWC.



Figur 3.1.3. Prinsipp for tvilling OWC med konstant luftgjennomstrømning i turbinen. Til venstre er vannsøylen på vei opp og til høyre er vannsøylen på vei ned.

Kilde: *An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters* av Arne Brendmo

Fasestyring av en OWC består i å kontrollere den svingende vannsøylen. Som med en bølge vil den svingende vannsøylen bli faseforskjøvet i forhold til eksitasjonskraften. I tilfellet med en bølge kan dette rettes opp igjen ved å holde igjen bøyen med en klype eller en annen mekanisk innretning. Siden vannsøylen ikke er massiv må andre teknikker brukes. Det vanligste er å styre lufttrykket i kammeret over vannsøylen. Ved å slippe ut luft når vannsøylen er på topp og dermed skape et undertrykk i kammeret vil den holdes fast eller sinkes ned. Tilsvarende kan oppnås når vannsøylen er på bunn ved å slippe inn luft og dermed skape overtrykk.

I Norge har det blitt bygget en OWC på Toftestallen i Øygarden, Hordaland. Arbeidet med denne ble startet i 1980 av Kværner Brug A.S. og den ferdige installasjonen sto klar i 1985. Dette var et prøveprosjekt som ble skrinlagt et par år etter at bølgeenergiverket ble satt ut av drift i 1988 på grunn av ødeleggelser fra storm.

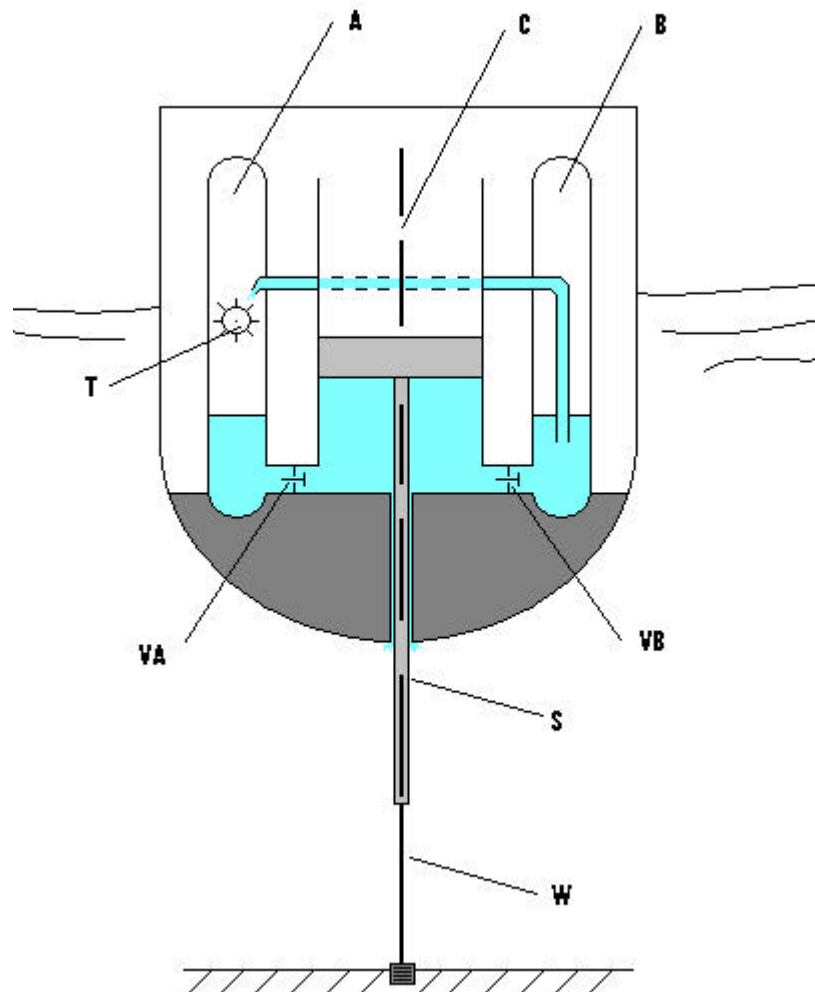
3.2 Offshore WEC bøye

OWEC bøyer er bøyer som er festet til havbunnen med en kabel. De oscillerer opp og ned som følge av bølger. Selv om det er flere forskjellige bøyer, hvor for eksempel geometrien har mye å si, er prinsippet omtrent det samme. Oscillasjonen fører til at det pumpes vann inn i bøyen, som ved hjelp av forskjellige teknikker benytter seg av gass- eller væsketrykk som driver en turbin. Det finnes også bøyer som bygger på OWC-prinsippet. Bøyene er relativt små for å få mest mulig absorbert effekt mot de økonomiske kostnadene, men det gjøres opp for ved å plassere ut mange små bøyer. Her skal vi se på et eksempel på en hydraulisk bøye, den første foreslått av Kjell Budal (1933-1989), tidligere professor ved NTNU.



Figur 3.2.1. Bøye sett fra over vann.

Kilde: <http://members.tripod.com/Interproject/>



Figur 3.2.2. Bøyen er festet til havbunnen med en kabel W , et stempel S inne i en hul sylinder C pumper vann fra A til B , V_A og V_B er luker som regulerer vannet og fasestyringen, A er en gassakkumulator med lavere trykk enn gassakkumulator B , T er en pelton turbin.

Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters (1992)* av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Denne modellen er av en sylinderformet bøye med en kuleformet bunn. Gasstrykket i akkumulator A er lavere enn gasstrykket i akkumulator B . Hvis begge lukene er stengt, vil bøyen være låst i en bestemt posisjon, hvis bare luke V_A er åpen, vil den flyte ved likevektspunktet, og hvis bare luke V_B er åpen vil den dras under likevektspunktet. Med andre ord, bøyens posisjon i forhold til likevektsposisjonen er avhengig av bølgekraften og kraften av trykket:

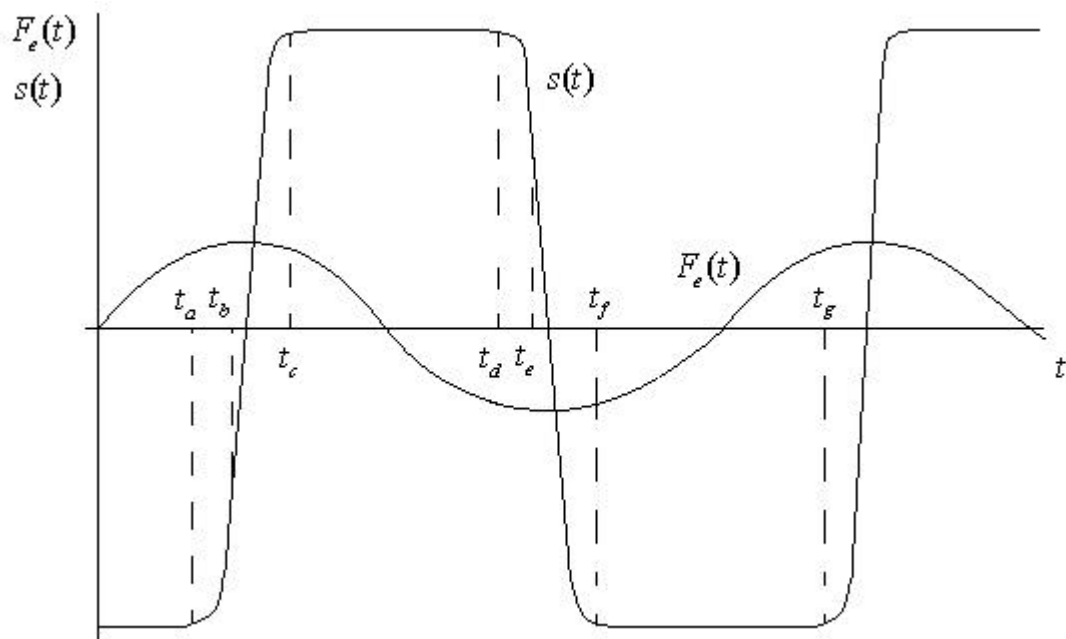
$$F(t) = F_{tot}(t) + F_p(t) \quad (3.2.1)$$

hvor trykkraften $F_p(t)$ er motsatt rettet bølgekraften $F_{tot}(t)$. Stempelet S fungerer da også som en demper for oscillasjonen. Lukene brukes nemlig ikke bare til å pumpe vannet fra A til B , men også til fasestyring.

Bøyen er festet til havbunnen med kabelen W . Stempelet S inne i den hule sylindren C pumper vann fra A til B . På grunn av at det er høyere gasstrykk i B enn i A , blir vannet presset ned i akkumulatoren, og da opp gjennom røret som leder vannet gjennom en pelton turbin og tilbake til akkumulator A . En pelton turbin er en helt vanlig turbin som for eksempel blir brukt i alle norske vannenergiverk.

Fase- og amplitudestyring oppnås ved hydraulisk låsing, se figur 3.2.3. Luke V_A og V_B åpnes og lukkes for å styre legemet. Bøyen er låst i en bestemt posisjon når begge lukene er lukket, fordi vannmengden inne i hovedakkumulatoren er konstant. Ved tid t_a er bøyen i sin nederste posisjon, V_A åpnes, og på grunn av trykkraften vil bøyen stige. Ved t_b lukkes V_A samtidig som V_B åpnes, og vi får større trykk som fører til at bøyen retarderer. Ved t_c er bøyen i sin øverste posisjon. Oscillasjonsfarten er lik null, noe som gjør at det krever lite energi for å låse bøyen. Dette gjøres ved å stenge begge lukene. Ved t_d åpnes V_B , og bøyen synker nedover. Ved t_e lukkes V_B , mens V_A åpnes. Trykkraften reduseres, og bøyen retarderer. Ved t_f er bøyen i sin nederste posisjon igjen, og låses. Ved t_g åpnes V_A , og prosessen gjentar seg.

Amplitudekontroll oppnås ved at vann transporteres fra akkumulator A til akkumulator B ved bevegelsen som sylindren utfører. Ut i fra figur 3.2.3 ser vi når V_A er åpen. Dempingen kan forandres ved å justere t_b og t_e .



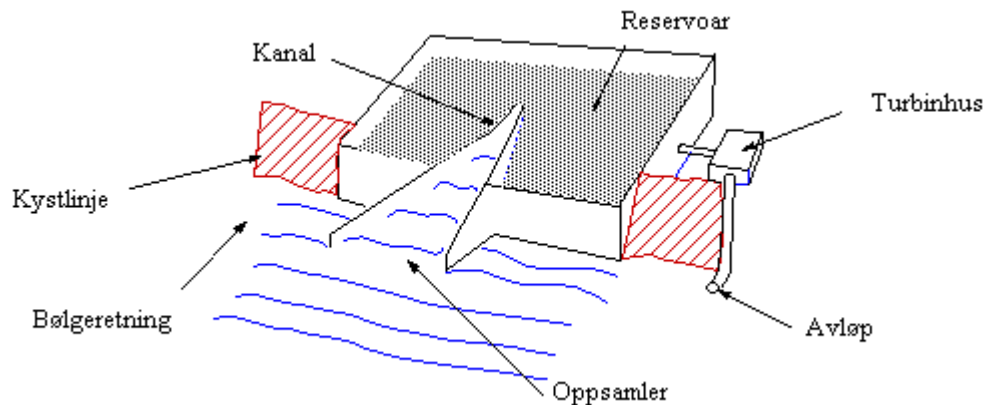
Figur 3.2.3. Bøyens forskyving $s(t)$ i forhold til likevektspunktet, og eksitasjonskraften $F_e(t)$ fra bølgen. Tidene for åpning og lukking av lukene er vist. (Eksitasjonskraften blir forklart under avsnitt 4.)

Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters (1992)* av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Tidene t_a til t_g er på denne figuren optimaliserte tider å operere fase- og amplitudestyringen på for en harmonisk bølge. Med havbølger, som er irregulære, er det som tidligere nevnt ikke like lett. Amplitude og bølgelengde må måles og predikeres av datamaskiner, og dempingen til bøyen må kunne styres raskere enn en bølgeperiode.

3.3 TAPCHAN

TAPCHAN står for Tapered Channel. Vann samles opp og konsentreres i en oppsamler, som gradvis blir en smalere og smalere kanal. Dette fører til at bølgeamplituden øker, og til slutt slår over i reservoaret, som ligger 3-4 meter over havoverflaten. Den kinetiske energien fra bølgene er omgjort til potensiell energi som lagres i reservoaret, som fører en jevn strøm av vann til en turbin ved trykket i reservoaret, og ut i havet igjen. Se figur 3.3.1.



Figur 3.3.1. Skisse over en TAPCHAN.

Kilde: http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint2.html

Teknikken er utviklet i Norge, og en TAPCHAN ble bygget nær Bergen i 1985 (se figur 3.3.2). Den fungerte bra i mange år, til den ble ødelagt under vedlikeholdsarbeid. På 1980-tallet var det planlagt å bygge ut flere TAPCHAN, spesielt på øya Java, men det ser ut til at teknologien gikk i glemmeboken. Det er grenser for hvor man kan plassere en TAPCHAN. Det kan ikke være store tidevannsforskjeller, og bølgene må være regulære. Ved store tidevannsforskjeller og irregulære bølger vil ikke reservoaret fylles kontinuerlig, og effekten blir meget redusert i forhold til kostnadene. Som nevnt ovenfor, fant man for eksempel ett sted hvor dette kunne fungert, på øya Java i Indonesia, men ingenting ble gjort.



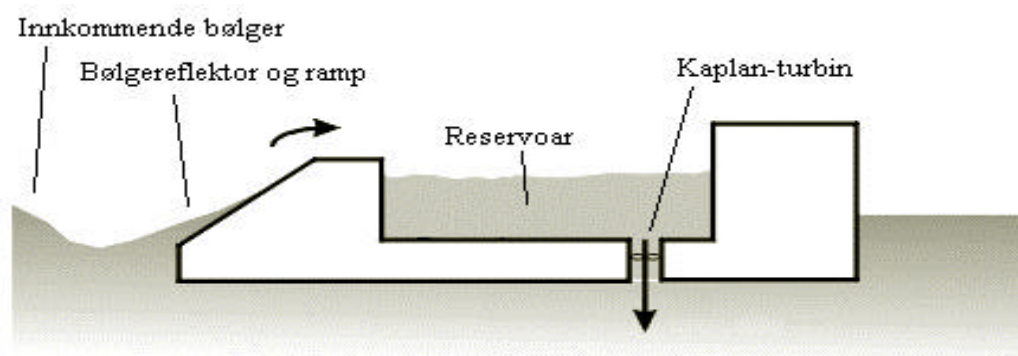
Figur 3.3.2. TAPCHAN ved Toftestallen nær Bergen.

Kilde: [http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development(11.1).pdf)

3.4 Wave dragon

Wave dragon er et dansk patent. Den fungerer på mange måter som en TAPCHAN, bortsett fra at dette er en offshore WEC (OWEC) som er slakt festet til havbunnen, i motsetning til TAPCHAN som er installert ved kystlinjen. Bølgene kommer inn mot to bølgereflektorer som konsentrerer dem mot en ramp. Bølgene slår over rampen, som for en TAPCHAN, og fyller et reservoar som er høyere enn havoverflaten. Trykket gjør at en turbin i bunnen av wave dragonen, av samme type som i en TAPCHAN, drives. For å suksessfullt utvinne energi, må

mang slike wave dragoner monteres på rekke og rad, og i følge forfatteren av artikkelen referert som kilde til dette avsnittet er denne en av de WEC som er best egnet til slik utnyttelse offshore.



Figur 3.4.1. Snitt av en wave dragon.

Kilde: http://wave-energy.net/Library/WaveDragon_dec_2000.pdf

4. Generell teori og fase- og amplitudestyring

Dette er basisgrunnlaget for teorien for bølgeenergiabsorbatorer (WEC). Vi ser på et legeme som bare oscillerer i z-retning, det vil si opp og ned. Vi kan da se bort i fra vektornotasjon. Samtidig ser vi på havbølgene som harmoniske bølger, noe vi ikke har i virkeligheten. Virkelighetens bølger er irregulære. Legemet absorberer energi fra bølgene. Bølgen presser på legemet med en kraft F_e som kalles eksitasjonskraften. Dette er den totale bølgekraften på overflaten til legemet. Når legemet oscillerer, genereres en utsendt strålingskraft F_r . Resultantkraften på legemet blir da

$$\begin{aligned} F_{tot}(t) &= F_e(t) + F_r(t) \\ F_{tot,0} e^{i\omega t} &= F_{e,0} e^{i\omega t} + F_{r,0} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Når vi stryker tidsavhengigheten $e^{i\omega t}$ kan vi skrive reaksjonskraften på denne formen med kompleks amplitude

$$F_{r,0} = -Z_r u_0 \quad (4.2)$$

hvor $Z_r = R_r + iX$ er mekanisk strålingsimpedans, og u_0 er den komplekse fartsamplituden til legemet. $R_r = \text{Re}(Z_r)$ er motstanden fra genererte bølger: Når legemet oscillerer, genererer det nye bølger som motvirker eksitasjonskraften.

Strålingsimpedansen avhenger av sirkelfrekvensen ω og geometrien til legemet.

$$F_{tot,0} = F_{e,0} - Z_{r,0} u_0 \quad (4.3)$$

Effekten absorbert av legemet er

$$P(t) = F_{tot} u(t) \quad (4.4)$$

Absorbert effekt over et tidsintervall blir,

$$\begin{aligned} P &\equiv \overline{P(t)} \\ &= \left(\frac{F_0}{2} e^{i\omega t} + \frac{F_0^*}{2} e^{-i\omega t} \right) \left(\frac{u_0}{2} e^{i\omega t} + \frac{u_0^*}{2} e^{-i\omega t} \right) \\ &= \frac{1}{4} (F_0 u_0^* + F_0^* u_0 + F_0 u_0 e^{2i\omega t} + F_0^* u_0^* e^{-2i\omega t}) \end{aligned}$$

(De to siste leddene er hverandres komplekskonjugerte og har samme vinkelfrekvens, slik at summen har et tidsmiddel lik null.)

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{F_{tot} u_0^*\} = \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{2} F_{e,0} u_0^* + \frac{1}{2} Z_r u_0 u_0^*\right\} \\
&= \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{F_{e,0} u_0^*\} - \frac{1}{2} R_r u_0 u_0^* \\
&= P_e - P_r
\end{aligned} \tag{4.5}$$

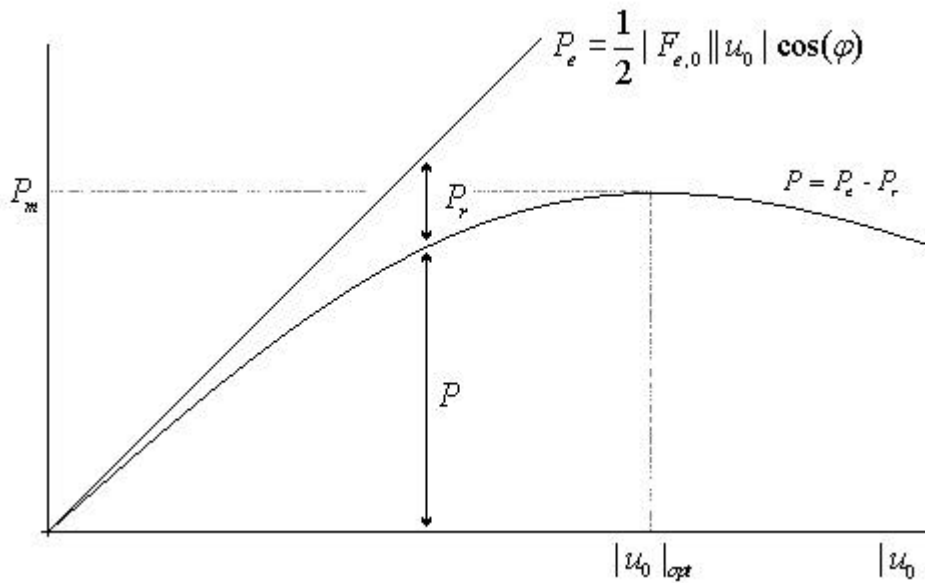
Eksitasjonseffekten

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{F_{e,0} u_0^*\} = \frac{1}{2} |F_{e,0}| |u_0| \cos(j) \tag{4.6}$$

er den totale effekten fra bølgene (hvor j er faseforskjellen mellom kraft og fart), mens

$$P_r = \frac{1}{2} R_r |u_0|^2 \tag{4.7}$$

representerer effekt reflektert fra legemet.



Figur 4.1. Absorbert effekt P som funksjon av oscillasjonsfarten (parabel). Reflektert effekt P_r er differansen mellom eksitasjonseffekten (rett linje) og den absorberte effekten.

Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters* (1992) av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Fra ligningene (4.5) og (4.6) får vi total absorbert effekt,

$$P = P_m = \frac{|F_{0,e}|}{8R_r} \cos^2(j) \tag{4.8}$$

og tilsvarende optimal fartsamplitude,

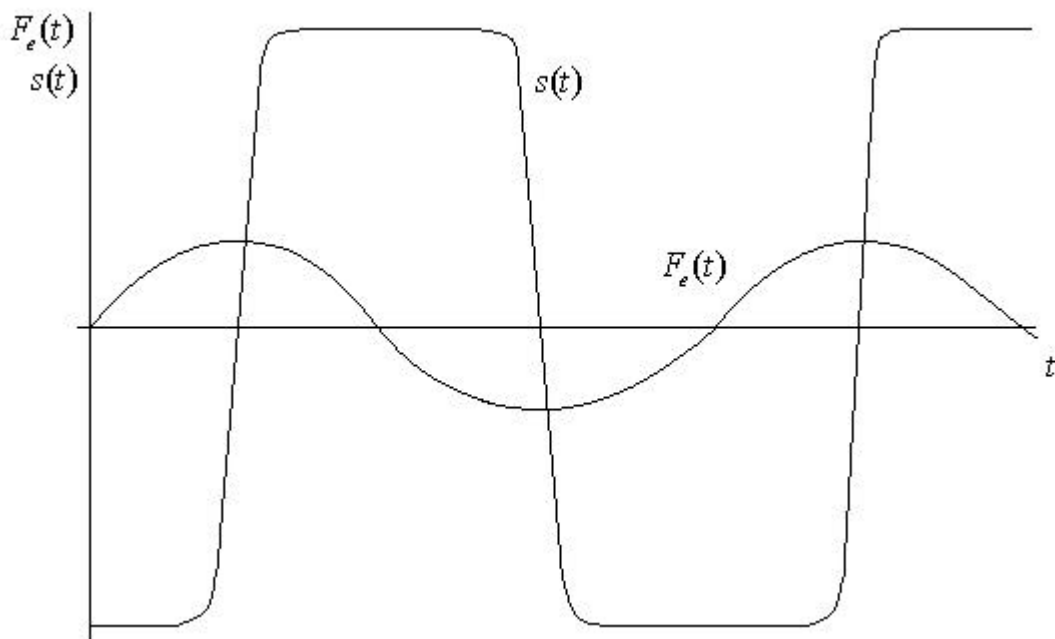
$$|u_0|_o = \frac{|F_{0,e}|}{2R_r} \cos(j) \quad (4.9)$$

Størrelsen j er som nevnt faseforskjellen mellom eksitasjonskraften og oscillasjonsfarten. Fra ligningene (4.8) og (4.9) ser vi at vi får maksimal effekt ved $j = 0$, slik at $\cos^2(j) = 1$. Eksitasjonskraften og oscillasjonsfarten er da i fase, og vi får resonans:

$$P_{\max} = \frac{|F_{e,0}|}{8R_r} \quad (4.10)$$

$$|u_0|_{opt} = \frac{|F_{e,0}|}{2R_r} \quad (4.11)$$

Ut i fra denne generelle teorien bak alle typer WEC kan vi trekke én enkel konklusjon. Oscillasjonsfarten og eksitasjonskraften må være i fase for å oppnå maksimal effekt. Dette styres enklest ved å påføre en ytre kraft på legemet. En kan påføre en kraft kontinuerlig, slik at legemet hele tiden er i optimal fase og amplitude, men dette er vanskelig. Det er lettere å låse legemet for diskrete tidspunkt, se figur 4.2.



Figur 4.2. Legemets forskyving $s(t)$ i forhold til likevektspunktet, og eksitasjonskraften $F_e(t)$ fra bølgen. Her har vi harmoniske bølger. Dette legemet er perfekt fase- og amplitudestyrt. Legg merke til at forskyvningen av legemet og eksitasjonskraften har en faseforskjell $j = \pi/2$. Om en deriverer forskyvningen, får vi oscillasjonsfarten, som er i fase med kraften. Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters* (1992) av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Figur 4.2 representerer en bølge som oscillerer i havet. Det er flere måter å holde igjen og slippe løs på, men det er ikke så viktig akkurat nå. Én måte er forklart under avsnitt 3.2.

Ut i fra denne figuren ser vi at når oscillasjonsfarten til legemet er positiv, er også eksitasjonskraften rettet i positiv retning. Det samme gjelder for negativ retning. Oscillasjonsfarten og eksitasjonskraften er dermed i fase. Som tidligere regnet ut, er dette

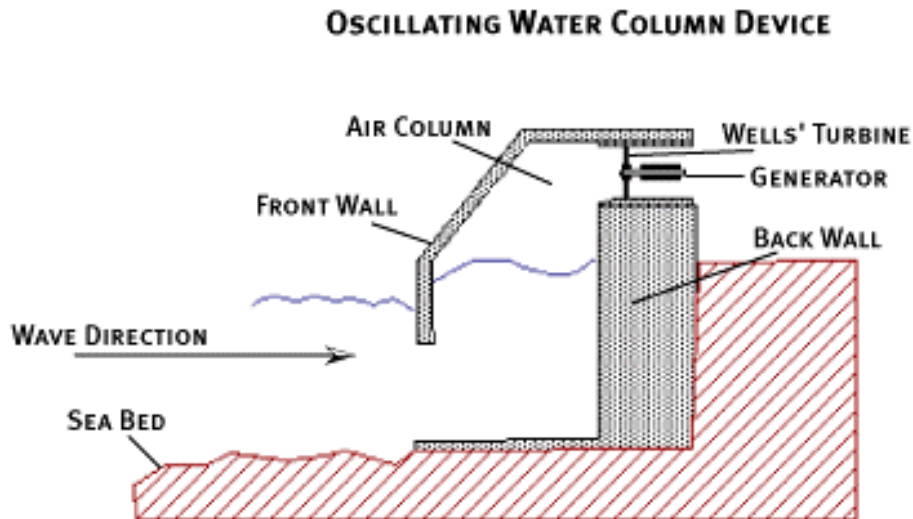
gunstig fordi en større del av eksitasjonseffekten blir absorbert enn om de hadde pekt i forskjellige retninger. Uten denne fasestyringen ville legemets treghet ført til at legemet retarderte, og absorbert effekt ville blitt mye mindre.

Legemet er også amplitudestyrt. Ved å holde igjen og slippe løs legemet ved korrekte tider kan vi oppnå maksimal amplitude, se figur. Legemet låses når det er ved toppen av bevegelsen, det vil si når den deriverte av forskyvningen, farten, er lik null. Da brukes minst energi for å stoppe legemet. Legemet slippes igjen slik at det holdes i fase. Legemet er nå langt over bølgen, og får da en større fart ned mot bølgedalen. Det samme skjer igjen, bortsett fra at nå låses legemet i bunnen av bevegelsen, og holdes nesten helt til bølgen er ved et nytt toppunkt. Den slippes for så å raskt nå et nytt toppunkt. Dette kan gi en ekstrem amplitude for legemets oscillasjon i forhold til bølgens amplitude.

Fase- og amplitudestyring er den store utfordringen. Hadde havbølgene vært regulære harmoniske bølger, ville ikke dette vært noe problem. Men siden bølgene kommer inn med forskjellige bølgelengder og amplituder, vil en WEC uten fase- og amplitudestyring ikke være spesielt effektiv. En bruker dataprogram til å måle og forutse innkommende bølger, men vi mangler likevel kunnskap for å utnytte dette maksimalt.

5. Elektrisk analogi til fasestyring

Vi skal i denne delen se på dynamikken i en OWC som ikke er fasestyrt. Vi skal prøve å identifisere kreftene som er involvert for deretter å sette opp et mekanisk ekvivalent system. Dette diagrammet skal vi igjen omforme til et elektrisk ekvivalent system. Til slutt vil vi prøve å forklare fasestyring i en OWC ved å se på det elektrisk ekvivalente systemet.



Figur 5.1. Prinsippskisse av en OWC uten fasestyring

Kilde:

<http://www.cwru.edu/pubs/cwrumag/spring2002/departments/worldview/images/wave03.gif>

I den litteraturen vi har studert angående OWC (An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters av Arne Brendmo) er kreftene som virker på den oscillerende vannsøylen i dette tilfellet beskrevet ved følgende ligning som er Newtons andre lov i ny forkledning:

$$F_{0,tot} = f_{e,l}A_0 - Z_w u_0 - r g S s_0 = Z_l u_0 \quad (5.1)$$

I Brendmo sin bok er denne beskrivelsen kalt modell 1. Det som karakteriserer denne forenklete modellen er at vannsøylen blir betraktet som et masseløst stivt legeme. I Newtons andre lov fungerer massen som en koeffisient foran akselerasjonen. Her er massen lik null, men et begrep tilleggs masse blir introdusert, og denne tilleggs massen fungerer som en koeffisient foran farten og ikke akselerasjonen. Denne måten å tolke den fysiske situasjonen på fører med seg en del ny teori fra hydrodynamikken. Blant annet vil det være mulig for et gitt legeme å ha akselerasjon selv om totalkraften på legemet er lik null. Dette fordi også massen er null.

$$\Sigma F = m \cdot a \quad (5.2)$$

Som med innsatt totalkraft og masse gir:

$$0 = 0 \cdot a$$

Som vi ser fra formelen kan vi da ha en akselerasjon uten en totalkraft ulik null.

Vi skal ikke prøve å forklare systemet fullt ut ved denne teorien, men i alle fall prøve å identifisere alle leddene i formelen og rettferdiggjøre deres mekaniske og elektriske ekvivalenter.

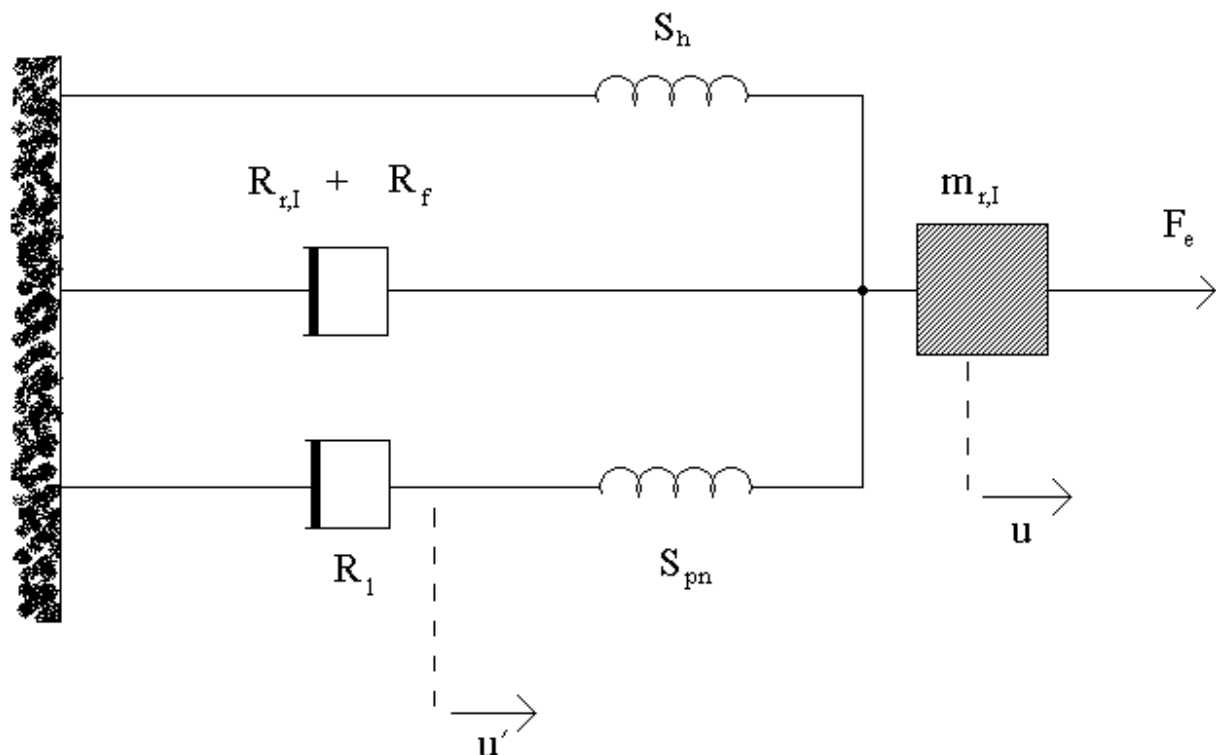
$f_{e,I}$ er eksitasjonskraftskoeffisienten og A_0 er den komplekse amplituden til innkommende bølge. Sammen utgjør disse eksitasjonskraften som er kraften på vannsøylen fra innkommende bølge. I den mekaniske analogien vil denne kraften tilsvare en ytre påtrykt kraft F_e , som virker på tilleggsmassen. Og i den elektriske analogien tilsvare den påtrykte spenningen i en krets.

$Z_w = Z_{r,I} + R_f$. Her representerer R_f tap av energi i systemet på grunn av friksjon mellom vann og vegg, og vann og luft. $Z_{r,I}$ er reflektert impedans. Denne kan deles i en reaktiv del, som vil påvirke vannsøylens fase, og en resistent del, som vil gi tap av energi i systemet. Den reaktive delen er i den mekaniske analogien tolket som en masse med treghet $m_{r,I}$, mens energitapet er representert i en mekanisk motstand $R_{I,r} + R_f$ som vi heretter slår sammen til én resistans, R_I . I den elektriske analogien vil tilleggsmassen være erstattet med en induktans som fungerer som en treghet i kretsen, mens den mekaniske motstanden er erstattet med en elektrisk motstand.

$r g S s_0$ er kun en reaktiv del som beskriver den hydrodynamiske stivheten til vannsøylen. r er massetettheten til vann. g er tyngdens akselerasjon. S er vannsøylens overflate og s_0 er avstanden fra vannsøylens minimale utslag til vannsøylens maksimale utslag. Vi kan tolke dette leddet som en slags potensiell energi i systemet (fordi dette leddet ikke tapper noe energi fra systemet) og representerer det ved en fjær S_h i den mekaniske analogien. I den elektriske analogien representerer vi det ved en kondensator.

Z_I inneholder en reaktiv del og en resistent del. Den reaktive delen svarer til luftsøylens kompresjon og ekspansjon. Den vil på samme måte som den hydrodynamiske stivheten kunne tolkes som en potensiell energi og blir også, som den hydrodynamiske stivheten representert ved henholdsvis en fjær, S_{pn} og en kondensator. Den resistente delen er energien som blir tappet fra systemet i turbinen og beskrives ved en mekanisk eller en elektrisk motstand, R_2 .

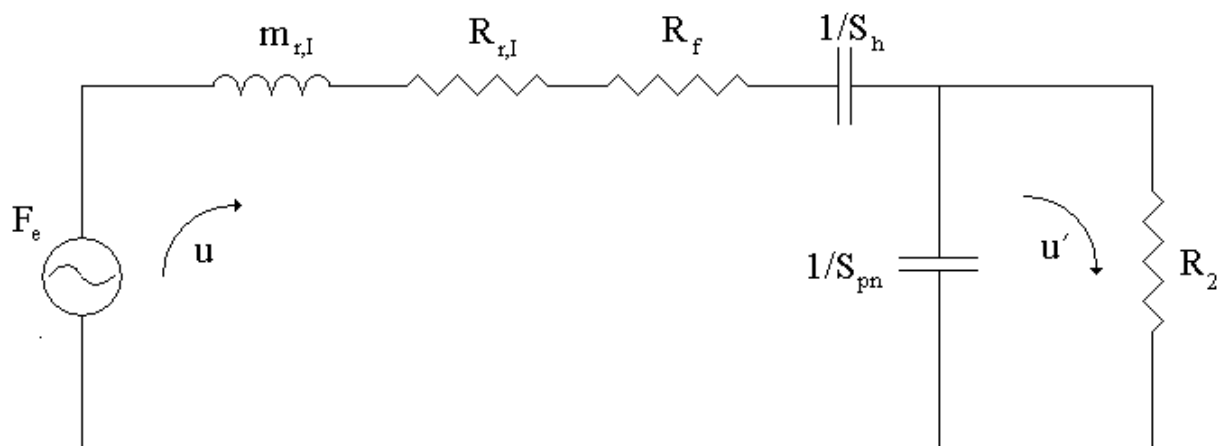
u_0 er den komplekse fartsamplituden til vannsøylen. Det vil si det maksimale utslaget for vannsøylens fart opp og ned i kammeret. I den mekaniske analogien vil denne størrelsen tilsvare fartsamplituden til tilleggsmassen. Og i den elektriske analogien svare til strømstyrken i kretsen.



Figur 5.2. Mekanisk ekvivalent system.

Kilde: *An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters* av Arne Brendmo

Krefter som virker selvstendig på det oscillerende legemet er koblet i parallell, mens krefter som virker sammen på den oscillerende massen er koblet i serie. Dette er rimelig. Hvis fjæren koblet i serie med R_1 er veldig slakk vil ikke R_1 ha noen innvirkning på systemet, som kan tilsvare at luftkammeret ikke er lukket, og ingen luft vil gå gjennom turbinen. De andre kreftene vil kun virke som en følge av bevegelsen til massen.



Figur 5.3. Elektrisk ekvivalent system.

Kilde: *An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters* av Arne Brendmo

Impedanser som virker selvstendig med strømmen er koblet i serie, mens impedanser som virker sammen med strømmen er koblet i parallell. Her kan vi igjen se på tilfellet hvor luftkammeret er åpent som tilsvarer en uendelig stor verdi for kondensatorer koblet i parallell.

Dette vil medføre at ingen strøm går igjennom R2 slik at den ikke har innvirkning på strømmen.

Ved å innføre symboler vi er vant med fra elektrisitetst læren kan vi skrive opp impedansen i kretsen ved bruk av kretssymboler slik:

$$\begin{aligned} Z_{tot} &= Li\omega + R_1 + \frac{1}{i\omega C_1} + (i\omega C_2 + \frac{1}{R_2})^{-1} \\ Z_{tot} &= Li\omega + R_1 - \frac{i}{\omega C_1} + \frac{R_2}{R_2 i\omega C_2 + 1} \\ Z_{tot} &= Li\omega + R_1 - \frac{i}{\omega C_1} + \frac{R_2 - R_2^2 i\omega C_2}{(R_2 \omega C_2)^2 + 1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Symbolene vi har innført er L for induktansen, C₁ for kondensatoren koblet i serie og C₂ for kondensatoren koblet i parallell.

Slik vi har forstått resonans i elektromagnetismen er det når den imaginære delen av impedansen er lik null:

$$\text{Im}(Z_{tot}) = L\omega - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{R_2^2 \omega C_2}{(R_2 \omega C_2)^2 + 1} = 0 \quad (5.4)$$

Vi kan forstå dette ved å se på følgende relasjon, hvor R er resistans og X reaktans:

$$|I_0| = \frac{V_0}{|Z_{tot}|} = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (5.5)$$

Vi ser at ligning (5.5) går over til $|I_0| = \frac{V_0}{R}$ når X = 0 som har gitt maksimal amplitude for strømmen i kretser vi har jobbet med tidligere i år. Det som imidlertid er interessant å legge merke til er at ved å endre C₂ så vil også realdelen av impedansen endres, dvs. resistansen.

Dette på grunn av leddet $\frac{R_2 - R_2^2 i\omega C_2}{(R_2 \omega C_2)^2 + 1}$ som er bidraget fra parallellkoblingen. Mer kvalitativt

kan vi si at dette kommer av at strømstyrken gjennom R₂ endres som en følge av at C₂ endres. Dette virker rimelig. Hvis C₂ er stor kan mye ladning lagres på kondensatoren og dermed mindre strøm gå gjennom R₂. På samme måte kan vi forestille oss at vi ved å slippe mye luft inn og ut av luftkammeret vil mindre luft gå igjennom turbinen. I denne sammenheng må det presiseres at denne modellen ikke tar høyde for å slippe inn og ut luft, men kun ser på tilfellet hvor luften er lukket inne slik at luftkompresjonen kun vil påvirke vannsøylens fase, men ikke vil gi noe energitap.

Siden C₂ også påvirker kretsens resistans kan det tenkes at en verdi av C₂ som vil gi resonans slik vi har forstått begrepet tidligere ikke nødvendigvis vil gi den største amplituden for strømmen, hvis for eksempel denne verdien av C₂ gir en høy verdi av R. I teoridelen om fasestyring regnet vi oss frem til at eksitasjonskraften og oscillasjonsfarten måtte være i fase, det vil si den påtrykte spenningen og strømmen i den elektriske kretsen, for å få størst mulig absorbert effekt i det oscillerende legemet. Det vi imidlertid ser her er at vi i alle fall ikke nødvendigvis må få størst amplitude for strømmen når denne er i fase med spenningen. Men

kan det i stedet være slik at maksimal absorbert effekt vil sammenfalle med $\text{Im}(Z_{\text{tot}}) = 0$, dvs. når spenningen er i fase med strømmen?

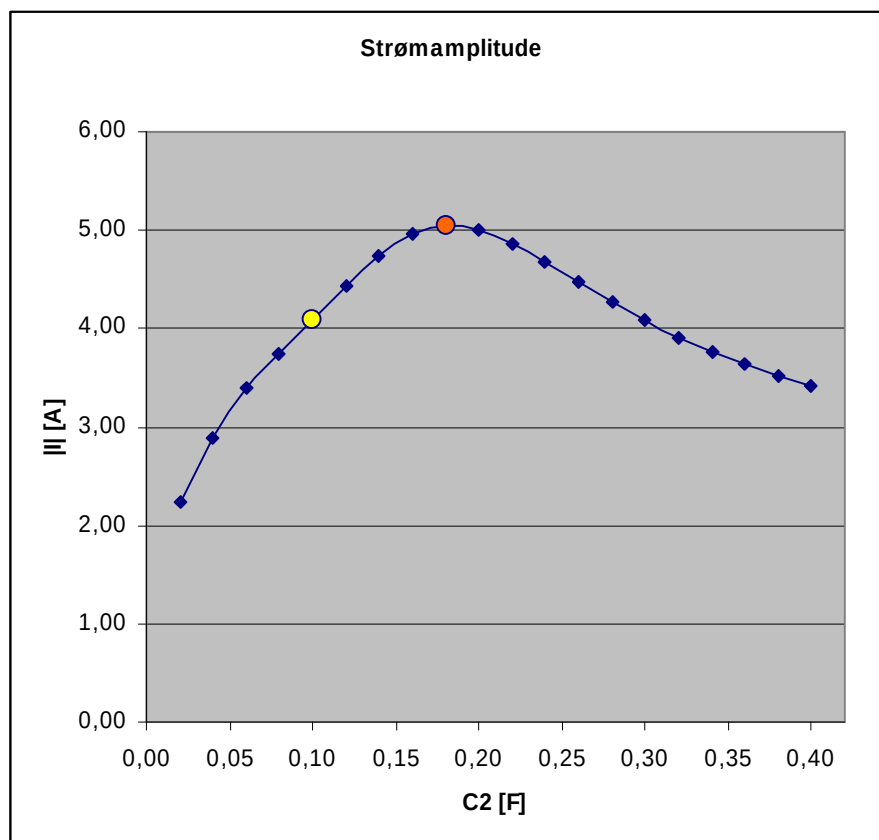
Midlere effekt i en elektrisk krets kan skrives som:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} R \cdot |I_0|^2 \quad (5.6)$$

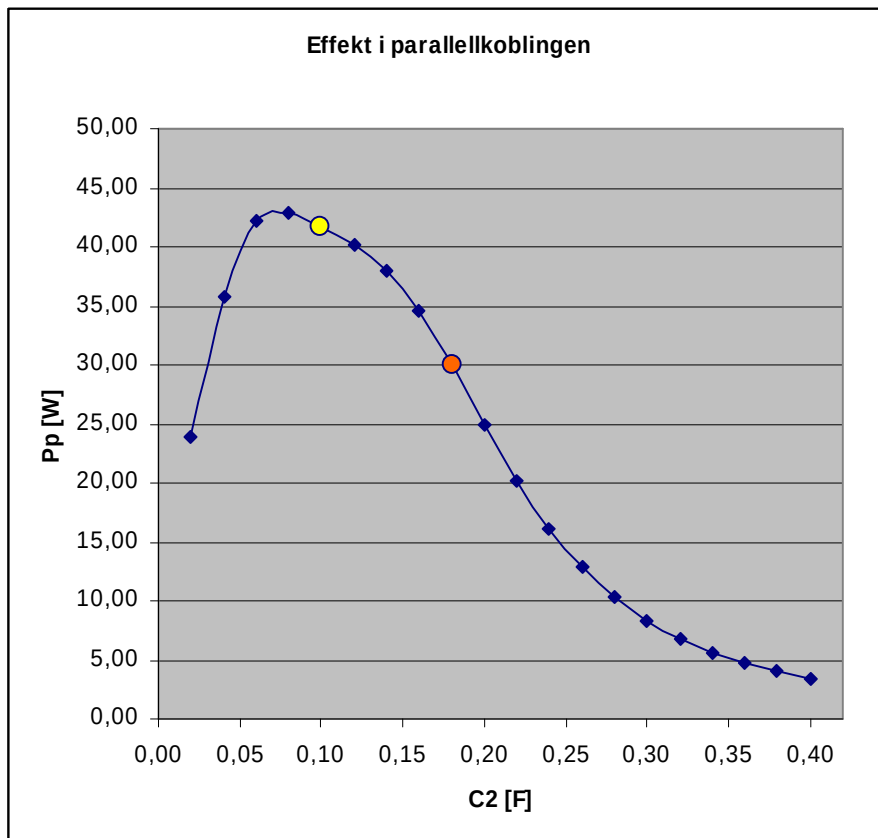
Når vi regner ut midlere effekt i R_2 bruker vi strømamplituden i kretsen og ikke strømmen gjennom R_2 , og vi bruker resistansen i parallellkoblingen og ikke R_2 selv. Da får vi

$$\langle P_{R_1} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(Z_l) \cdot |I_0|^2 \quad (5.7)$$

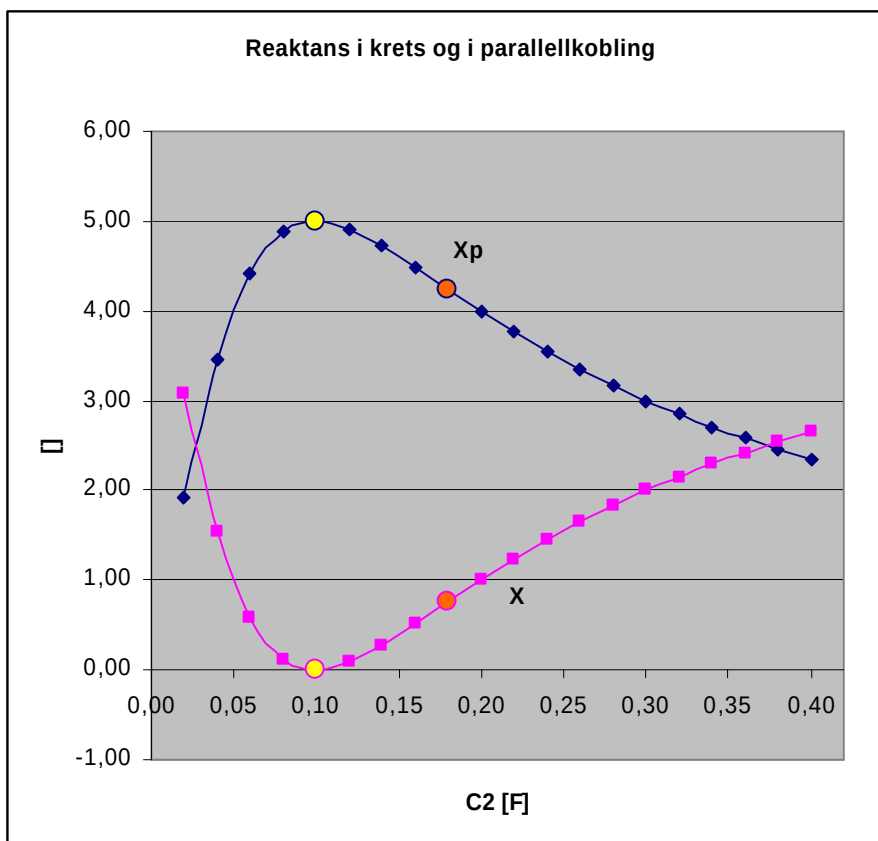
Vi ønsker å finne ut når midlere effekt i R_2 er størst. Det som imidlertid medfører mye komplisert regning, er å finne et eksplisitt uttrykk for denne effekten for deretter å derivere dette for å finne en maksimumseffekt. Det vi i stedet har gjort er å skrive inn uttrykkene for forskjellige størrelser: strømamplitude $|I_0|$, resistans i parallellkobling R_p , midlere effekt i R_2 $\langle P \rangle_{R_1}$, reaktans i parallellkobling X_p og reaktans i kretsen X , for deretter å teste forskjellige verdier av C_2 (med et tilhørende sett med parametre for de andre kretskonstantene) og se om dette gir noen fornuftig sammenhenger.



Figur 5.4. Strømamplitude vist som funksjon av C_2 .



Figur 5.5. Effekt i parallellkoblingen vist som funksjon av C_2 .



Figur 5.6. Reaktans i krets og i parallellkobling begge vist som funksjon av C_2 .

I grafene markerer det gule datapunktet minimumsverdien for kretsen reaktans og det orange datapunktet maksimumsverdien for strømamplituden. Det vi i utgangspunktet ønsket var en sammenheng mellom midlere effekt i R_2 og strømamplituden og/eller kretsens reaktans. Med en mindre fin inndeling på x-aksen fikk vi faktisk akkurat det vi hadde mistanke om at vi skulle få, nemlig et samsvar mellom maksimal effekt i R_2 og en reaktans i kretsen lik null. Dette ville i så fall vært helt i samsvar med den teorien vi allerede har etablert for fasestyring. Men ved å se på et mindre intervall på x-aksen og samtidig dele opp i flere datapunkter kan vi se fra grafene at effektmaksimum er forskjøvet litt til venstre for hvor reaktansen er lik null.

Ved å teste med forskjellige verdier av parameteren R_1 ser vi at når R_1 går mot null vil effektmaksimum samsvare med en reaktans lik null (dette virker rimelig ettersom da R_2 representerer det eneste effekttapet i kretsen). Hvis vi lar R_1 øke mye vil effektmaksimum flytte seg litt lenger til venstre, mens reaktanskurvene er de samme siden de ikke er avhengig av R_1 . Ved å forandre de andre parametrene ser vi at effektmaksimum alltid ligger litt til venstre for hvor reaktansen i kretsen er lik null. Vi tolker det dit hen at det er en sammenheng mellom effektmaksimum og nullpunktet for reaktansen selv om den ikke er like entydig som i den første modellen.

Så hva skyldes avviket?

Vi tror avviket har å gjøre med at modellene vi har brukt for å diskutere henholdsvis fasestyring og den elektriske analogien er litt forskjellige. En viktig forskjell på de to modellene er at den første modellen ser på absorbert effekt i det oscillerende legeme, mens det i den andre blir komplisert ved at det oscillerende legeme (vannsøylen) må vekselvirke med luftsøylen som igjen må vekselvirke med turbinen som absorberer effekten. I tillegg har vi heller ikke fullstendig oversikt over overgangen fra en WEC til en elektrisk krets. Vi så jo blant annet hvor viktig parameteren R_1 var for forskyvningen av effektmaksimum i forhold til reaktansens nullpunkt. Og hvordan denne parameteren er bestemt i en OWC er det vanskelig for oss å si noe om.

I en OWC er alle parametre utenom lufttrykket bestemt av konstruksjonen og omgivelsene. I vårt elektrisk ekvivalente system tilsvarer lufttrykket kondensatoren C_2 . Denne kondensatoren kan i det elektrisk ekvivalente systemet tilpasses slik at reaktansen i kretsen blir null og vi får noe som ligger "nær" maks effekt i R_2 . Vi tolker dette dit hen at lufttrykket i en OWC hvis tilpasset riktig også kan gi en total reaktans i systemet lik null og dermed få "nær" maks effekt til turbinen. I praksis må det taes høyde for to ting som vi ikke har gått inn på i vår oppgave.

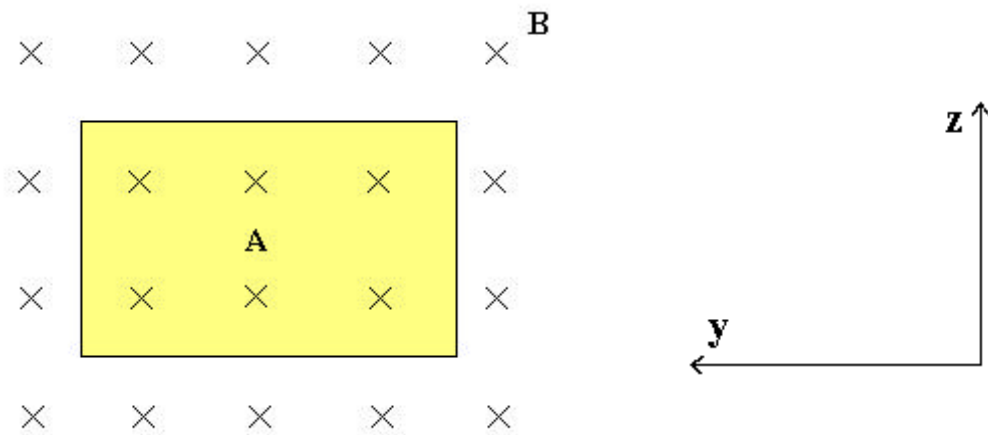
Den ene tingen som vi har nevnt allerede, å justere lufttrykket, medfører i de modeller vi har sett på, å slippe luft inn og ut av kammeret. Siden dette vil, så langt vi forstår, gi et energitap i systemet, kan det dukke opp uforutsette konsekvenser.

Den andre tingen er hvordan effekten er fordelt på turbinen. Dette la professor Falnes stor vekt på da vi snakket med han fordi det kan få store konsekvenser når den teoretiske modellen skal settes ut i praksis. Blant annet vil en levert effekt til turbinen med store maksimum kreve en turbin som kan ta opp store effekter. En turbin som kan absorbere stor effekt er mer kostbar enn en som kan absorbere mindre effekt. Derfor er det ikke særlig gunstig å ha voldsomme utslag for effekten hvis den høye effekten ikke er stabil. Da er det bedre å ha en mer stabil effekt selv om den gjennomsnittlig er litt mindre.

6. Generator

Vi skal i denne delen kort forklare hvordan man kan bruke et roterende legeme til å produsere en vekselspenning. Det roterende legemet vil i en WEC for eksempel være en propell i en turbin (OWC).

For å forklare dette tar vi utgangspunkt i en rektangelformet elektrisk leder plassert i et homogent magnetfelt $\mathbf{B}$, som står normalt på arealet den elektriske lederen omslutter.



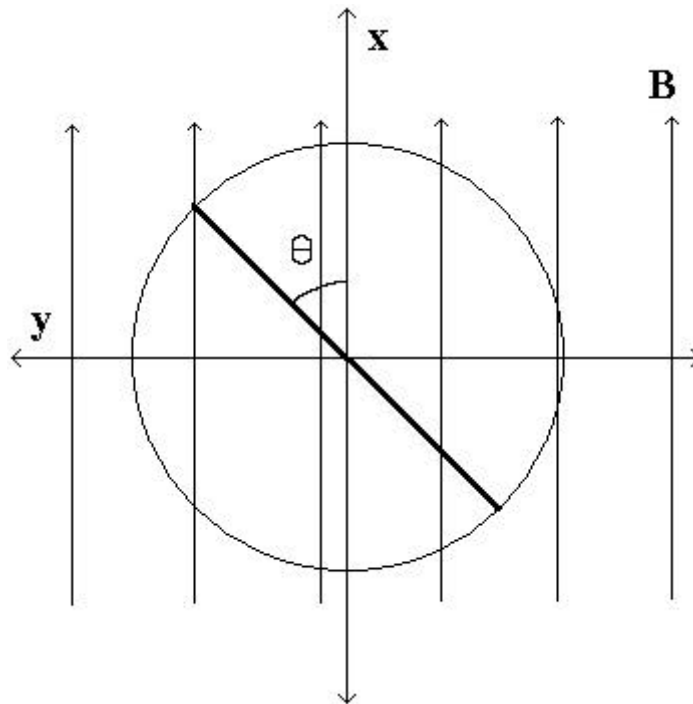
Figur 6.1. Et Areal **A** omsluttet av en elektrisk leder plassert i et magnetfelt $\mathbf{B}$, normalt på arealet eller parallell med **A**.

Vi kjenner til sammenhengene:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad (6.2)$$

Fra disse sammenhengene ser vi at ved å endre $\mathbf{B}$ eller $\mathbf{A}$ vil det genereres en spenning. Hvis nå $\mathbf{B}$ peker i positiv x-retning kan vi tenke oss at den elektriske lederen roterer rundt z-aksen. Da vil arealet $\mathbf{A}$, som $\mathbf{B}$ feltet går gjennom variere med vinkelfrekvensen på følgende måte, hvis vinkelen $q = \omega t$ er i forhold til x-aksen:



Figur 6.2. Den elektriske lederen dreier om z-aksen med en vinkel ω i forhold til x-aksen slik at A hele tiden står normalt på z-aksen.

$$A(t) = A \cdot \sin(\omega t) \quad (6.3)$$

Hvis nå den roterende propellen i en turbin er koblet til en elektrisk leder lik den vi har sett på, og får denne til å rotere vil det induseres en spenning i den elektriske lederen:

$$e = -\omega B \cdot A \cdot \cos(\omega t) \quad (6.4)$$

Den elektriske lederen kan så i sin tur kobles til en elektrisk krets som nå kan levere en tidsavhengig vekselstrøm.

7. Konklusjon

Vi har sett på to hovedtyper bølgeenergiabsorbatorer, en OWC og en oscillerende bølge. Hva som kan sies om begge to er at de er helt avhengige av fase- og amplitudekontroll for å være kostnadseffektive i bruk. For at det oscillerende legeme i en WEC skal absorbere maksimal effekt må oscillasjonsfarten og eksitasjonskraften være i fase, som en ser av ligning (4.6). I en OWC som er et mer komplisert system, har vi kommet frem til at vilkårene for maksimal absorbert effekt ikke lar seg uttrykke like enkelt, siden det ikke er det oscillerende legemet, men en turbin som skal absorbere effekten.

Denne styringen av WEC er utfordringen til fremtidens forskere. Vi har opparbeidet en del kunnskap, men vi mangler fremdeles mye. Ikke bare kunnskap i fysikk, men også avansert teknologi som styrer fase- og amplitudestyringen.

Bølgeenergi er en miljøvennlig og fornybar energikilde, og et meget godt alternativ til dagens forurensende og ufornybare energikilder. Det er derfor viktig å forske på denne teknologien. Norge er et ledende land innen denne typen forskning. Kjell Budal startet denne type forskning på NTNU i 1973, og fikk senere følge av Johannes Falnes.

8. Kildehenvisninger

3.1 OWC - oscillerende vannsøyle

An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters av Arne Brendmo

Havbølger: Energi og utnytting av J. Falnes og J. Hals

<http://www.wave-energy.net>

3.2 Offshore WEC bøye

Some early proposals for offshore wave energy converters (1992) av Eidsmoen og Falnes

Budal's latching-controlled-buoy type wave-power plant (2003) av Falnes og Lillebekken (publisert i 5th European Wave Energy Conference 2003, paper H1)

[http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20B%20-%20Generic%20Technologies\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20B%20-%20Generic%20Technologies(11.1).pdf)

3.3 TAPCHAN

[http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development(11.1).pdf)

http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint2.html

3.4 Wave dragon

http://wave-energy.net/Library/WaveDragon_dec_2000.pdf

4. Generell teori og fase- og amplitudestyring

Some early proposals for offshore wave energy converters (1992) av Eidsmoen og Falnes

Ocean waves and oscillating systems (2002) (side 18) av J. Falnes

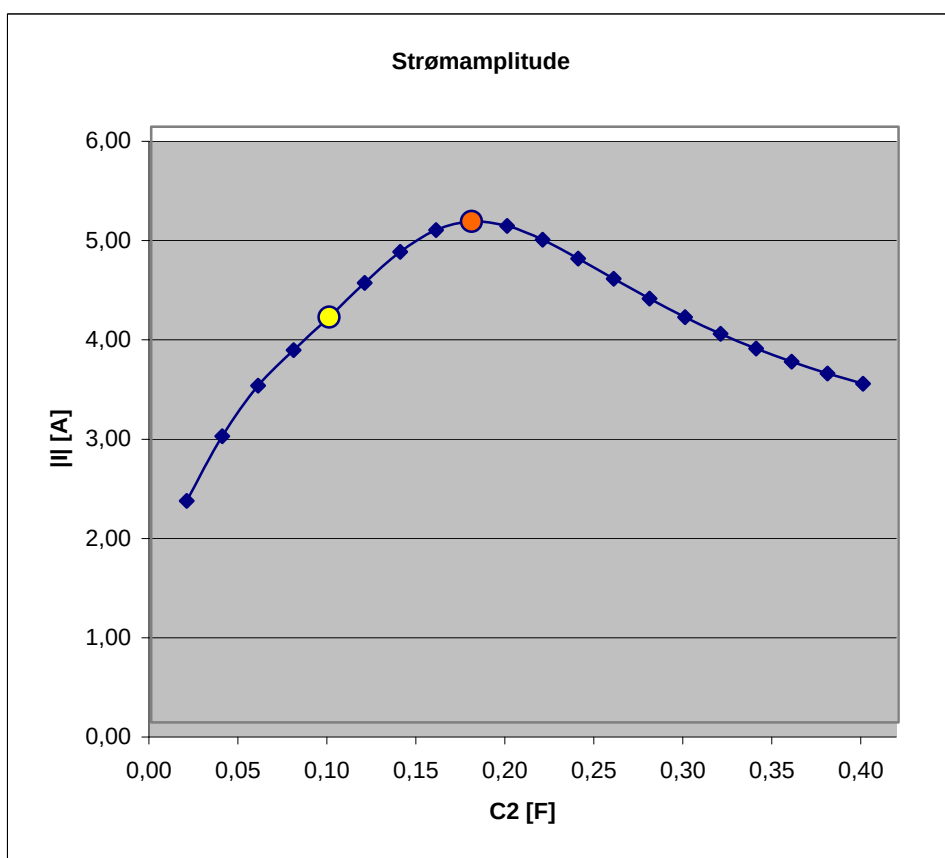
5. Elektrisk analogi

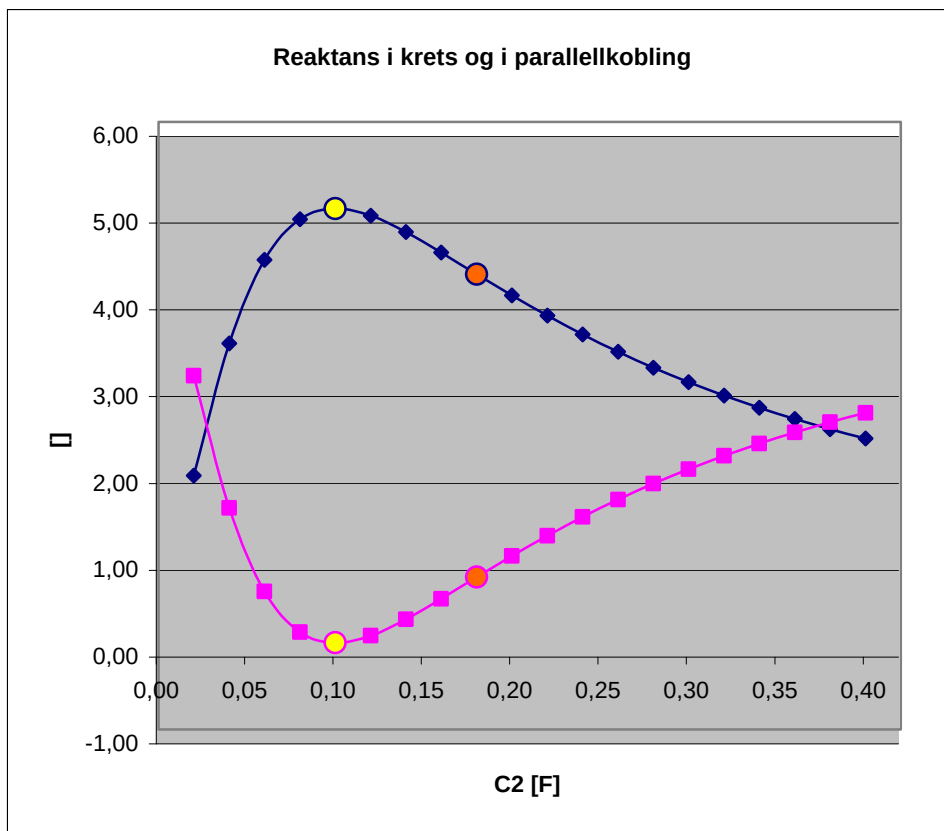
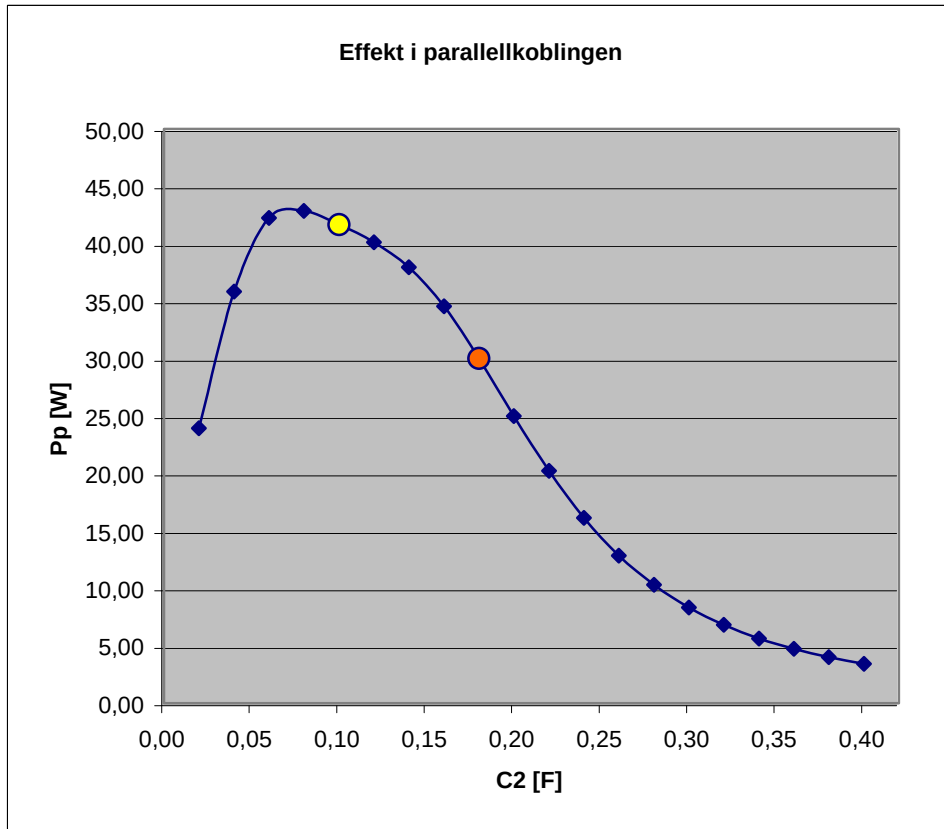
An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters av Arne Brendmo

U [V]	10,00
L [H]	10,00
w [rad/s]	1,00

R ₁ [Ω]	1,00
R ₂ [Ω]	10,00
C ₁ [F]	0,20

C ₂ [F]	I ₀ [A]	R _p [Ω]	<P> _{R2} [W]	X _p [Ω]	X [Ω]
0,02	2,23	9,62	23,94	1,92	3,08
0,04	2,88	8,62	35,83	3,45	1,55
0,06	3,39	7,35	42,26	4,41	0,59
0,08	3,75	6,10	42,87	4,88	0,12
0,10	4,08	5,00	41,67	5,00	0,00
0,12	4,43	4,10	40,14	4,92	0,08
0,14	4,74	3,38	37,95	4,73	0,27
0,16	4,96	2,81	34,55	4,49	0,51
0,18	5,05	2,36	30,02	4,25	0,75
0,20	5,00	2,00	25,00	4,00	1,00
0,22	4,86	1,71	20,23	3,77	1,23
0,24	4,67	1,48	16,15	3,55	1,45
0,26	4,47	1,29	12,86	3,35	1,65
0,28	4,27	1,13	10,30	3,17	1,83
0,30	4,08	1,00	8,33	3,00	2,00
0,32	3,91	0,89	6,82	2,85	2,15
0,34	3,77	0,80	5,64	2,71	2,29
0,36	3,63	0,72	4,73	2,58	2,42
0,38	3,52	0,65	4,00	2,46	2,54
0,40	3,41	0,59	3,42	2,35	2,65







SUPERLEDERE

Prosjektrapport i FY1303,
Elektrisitet og Magnetisme,
høsten 2004.

Av:
Solveig Andersen
Erik Frøset
Bård Olav Johannessen

08.11.2004



Innholdsfortegnelse

Forord / Innledning	3
Sammendrag	3
Historie	4
BCS-teori	6
Cooperpar	6
Energigap	9
Type 1 og type 2 superledere	10
Type 1	10
Type 2	11
Andre egenskaper	12
Coherence lengde	13
Meissner-effekten	14
Diamagnetisme	14
Pinning	15
Forsøk	15
Superledere i dag	17
Maglevtog	17
MRI	19
SQUID	20
Er superledere fremtiden?	21
Strømledninger	21
Generatorer	21
Motorer	21
SMES	22
Datamaskiner	22
Superledere i fremtiden	23
Avslutning	24
Kilder	25

Forord / Innledning

Superledere er metaller eller keramiske stoffer som ved nedkjøling under en kritisk temperatur (T_c) mister all motstand. Dette gjør superledere til perfekte ledere; de fører strøm uten tap av energi. Vi har to typer superledere: type 1 og type 2. Type 1 superledere er metaller som også leder strøm ved romtemperatur, og som blir superledende ved svært lave temperaturer. Type 2 superledere består av keramiske materialer som normalt sett er isolatorer ved romtemperatur og har høyere kritiske temperaturer enn type 1 superledere. Vi har BCS teorien som forklarer fenomenet med superledere, men denne er til nå kun satt til å gjelde type 1 superledere. Observasjoner har vist at denne teorien ofte også passer for type 2 superledere, men regnes ikke å gjelde godt nok for dem.

Superledere er et vidt område innen for fysikken, og vi har prøvd å dekke hoveddelene innen for dette området. Samtidig har vi prøvd å ordlegge oss så lite komplisert som mulig, slik at man med minst mulig bakgrunnskunnskaper skal kunne forstå mesteparten av rapporten.

Vi var også så heldig å få være med og observere en demonstrasjon av Meissner-effekten og vi retter en stor takk til Torgar Haugen som tok seg tid til å demonstrere dette for oss.

Sammendrag

I denne prosjektoppgaven har vi sett på superledere. Først og fremst har vi sett på hvordan de virker og hva de brukes til. Vi har tatt med en del teori, men har med minst mulig formel da vi fant disse vanskelige og også unødvendige for den helhetlige forståelsen. Vi har tatt for oss mange områder innenfor superledere; blant annet har vi tatt med historien bak superledere, hvem oppdaget hva, og når de oppdaget det. Selv om superledere er et kanskje nytt område innen fysikkens verden, så har utviklingen og bruken av superledere kommet langt siden oppdagelsen av superledere ble gjort i 1911.

I en slik prosjektoppgave er det umulig å komme utenom det teoretiske. Vi tar for oss noen av forskjellene på de to typene superledere vi har. Vi har også tatt for oss de forskjellige teoriene om hva som skjer i en superleder. Vi kan alle observere hva en superleder gjør, men det er fremdeles ikke full enighet om hvordan den virker.

Vi var så heldige å få være med og observere da det ble gjort en demonstrasjon av Meissner-effekten, der en magnet svever over en superleder. Vi har tatt med en liten lab rapport, samt en forklaring om hva som skjer.

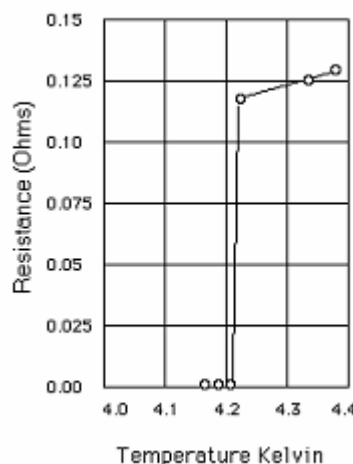
Det mest spennende med superledere er ikke hva som har skjedd og hvordan det skjer, men det er hva som skjer og hva det kan brukes til. Vi ser nærmere på noen av de vanligste bruksområdene til superledere i dag, deriblant Magnetiske levitasjons tog, MRI (Magnetic Resonance Imaging) og SQUID (Superconducting QUantum Interference Device). Vi har også med et avsnitt om hva man håper å kunne bruke superledere til i framtiden og litt om hva det har å si for økonomien.

Historie

Superledere er en av de største overskriftene i nyere vitenskapelige oppdagelser. Ikke bare vet vi at grensene for denne oppdagelsen ennå ikke er nådd, men det ser også ut til at superlederens potensielle bruksområder stadig blir utvidet.

Det hele begynte i 1908 da den nederlandske fysikeren Heike Kamerlingh Onnes først klarte å fremstille flytende Helium (som koker ved 4.2K). I 1911 kjølte han ned kvikksølv til en temperatur på 4K ved hjelp av denne oppdagelsen og oppdaget at motstanden i materialet plutselig redusertes til en umålelig liten verdi ved 4.15K!

Dette kom som en oppfølging på en diskusjon som hadde pågått i det vitenskapelige miljøet over lenger tid. På den ene siden befant det seg fysikere som hevdet at elektroner som beveget seg gjennom en leder ville stoppe opp derom temperaturen nærmet seg 0K, mens det på den andre siden befant seg fysikere som hevdet at motstanden ville forsvinne totalt. Onnes befant seg i denne gruppen, og han fikk dermed bekreftet sin teori om kalde ledere. Han kalte denne nye oppdagelsen sin for "superledning".



Figur 1: Et diagram som viser hvilke verdier Onnes fikk da han målte resistansen i kvikksølv ved ekstremt lave temperaturer.

(Kilde: <http://www.physnet.uni-hamburg.de/home/vms/reimer/htc/pt2.html>)

Etter hvert ble det oppdaget stadig flere slike superledende materialer, og Nobelpriser ble delt ut med jevne mellomrom til fysikere som forsket på dette området. Blant annet fikk Onnes til slutt utdelt Nobelprisen i 1913 for sine revolusjonerende oppdagelser og den (foreløpig) siste Nobelprisen som ble utdelt for forskning på superledere og supervæsker ble gitt til Alexei Abrikosov, Vitaly Ginzburg og Anthony Leggett i 2003.

Superlederne var og ble et mysterium. Det var ingen som klarte å komme opp med en god forklaring på hvorfor motstanden forsvant i enkelte metaller når temperaturen kom ned under en viss kritisk temperatur T_c . I 1933 kom W. Hans Meissner og Robert Ochsenfeld et lite skritt videre da de holdt på med deres undersøkelser omkring superledernes magnetiske egenskaper. Deres undersøkelser resulterte i det som er blitt kalt Meissner-effekten. Men selv om Meissner og Ochsenfeld fant et nytt fenomen ved superlederne så klarte de ikke å komme opp med en god teoretisk forklaring på det som skjedde. Det var det først brødrene Fritz og Heinz London som klarte i 1937 ved hjelp av de såkalte Londonlikningene. Meissner-effekten blir nærmere beskrevet i et senere kapittel.

En teori som kunne gi en god forklaring på Onnes oppdagelse av superlederne ble derimot ikke utviklet før de tre amerikanske fysikerne John Bardeen, Leon Cooper og Robert Schrieffer kom med deres teori; BCS-teorien, i 1957. Denne BCS-teorien forklarer hvordan enkeltelektroner slår seg sammen til Cooper-elektronpar, og at elektronene da ikke utsettes for de samme energiabsorberende kollisjonene som det de vanligvis gjør når de beveger seg gjennom en vanlig leder. BCS-teorien sier videre at for å danne Cooper-par, må et superledende materiale være under en kritisk temperatur T_c . Mer om BCS-teorien kommer i et senere kapittel.

I 1986 klarte Georg Bednorz og Alex Müller det ingen før dem hadde klart; gjennom sitt arbeid med ulike materialer fant de indikasjoner på superledning ved 35K, hele 12K "varmere" enn den tidligere rekorden! Dette var en viktig oppdagelse og det var en av årsakene til at forskere fra hele verden snart satte i gang med å forske på denne nye typen superledere. I februar 1987 tok Bednorz og Müller verden enda et skritt videre da de fant et keramisk materiale som var superledende ved 92K! Dette var en meget økonomibesparende oppdagelse siden det nå ble mulig å bruke flytende nitrogen til nedkjølingsprosessen istedenfor flytende helium som var mye dyrere og vanskeligere å fremstille. Siden disse materialene ble superledende ved så merkbart mye høyere temperaturer, refererer vi gjerne til den som høy-temperatur superledere.

Fra 1987 og frem til i dag har utviklingen på superlederområdet nådd stadig nye høyder. I dag er rekorden for et superledende materiale på 138K, og det forventes at den blir høyere med tiden. Superledere er allerede tatt i bruk dagens teknologi og det arbeides på spreng for at vi skal kunne ta dem i bruk på stadig nye områder. Mer om bruk av superledere i dag og i fremtiden er det skrevet om i et senere kapittel.

BCS-teori

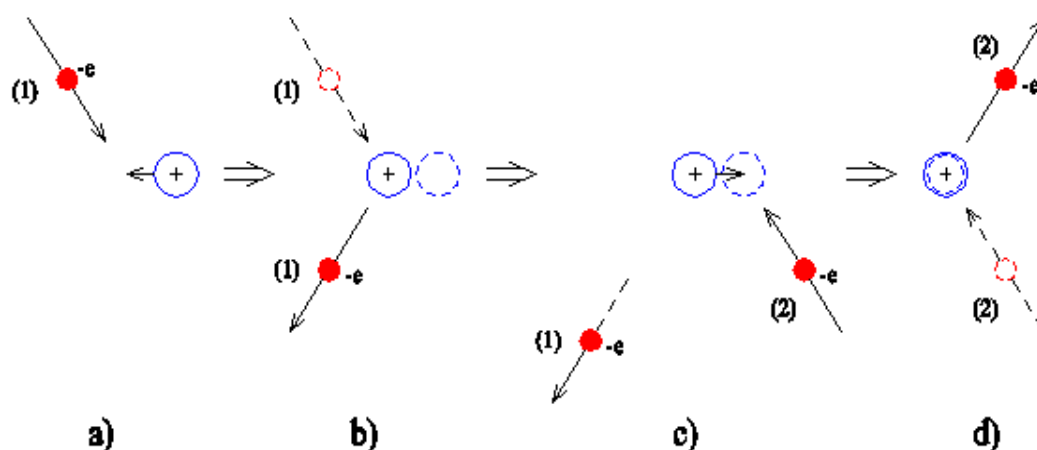
I 1957 kom den første aksepterte teorien som kunne forklare de mikroskopiske aspektene ved superlederen. Mennene bak denne teorien var John Bardeen, Leon Cooper og John Schreiffer, og teorien har dermed fått navnet BCS-teorien.

Teorien kom som et resultat av at Cooper begynte å det velkjente klassiske fenomenet om at like ladninger frastøter hverandre, mens ulike ladninger tiltrekker hverandre (Coloumb-vekselvirkningen). Cooper tok nå utgangspunkt i det faktum at dersom de ladete partiklene er inne i et eller annet fast stoff, for eksempel metall, så får vi en annen situasjon enn den klassiske fordi vi her har både positive og negative ladninger side og side og dermed kan det skje endringer i Coloum-vekselvirkningen. Spørsmålet Cooper nå stilte seg var: kan vi få tilfeller der det motsatt av det logiske skjer; nemlig at like ladninger tiltrekker hverandre? Cooper hadde tidligere studert vekselvirkningen mellom to elektroner i en "gass" av frie ladningsbærere i et metall, og han visste at det var en grunnleggende ustabilitet i et slikt system dersom det fantes den minste tiltrekkende vekselvirkning mellom de to elektronene. Cooper hadde en hypotese om at dersom han kunne komme videre med dette, så kunne han kanskje forstå hemmeligheten ved superledningen.

Cooper, Bardeen og Schreiffer arbeidet sammen som et team i lang tid før de kom frem til det som skulle bli et stort gjennombrudd innen forskningen på superledere, og i 1957 hadde de altså løsningen på et av de store mysteriene rundt type I superledere. (For type II superledere finnes det ennå ingen allment akseptert teori.)

Cooperpar

BCS-teorien påpeker det faktum at når et elektron passerer gjennom et ionegitter, påvirkes det av ionenes ladning og svingninger, såkalte fononer. Disse fononene skaper positiv ladning i området som er med på å tiltrekke det neste elektronet som passerer det samme området. For å lettere forstå hva som skjer kan vi se på figur 2:



Figur 2: Dannelse av et Cooperpar
(Kilde: <http://www.phys.ntnu.no/brukdef/prosjekter/super/Library/index.html>)

Forklaring til figur 2:

a) Her ser vi at det første elektronet beveger seg i retning av et positivt ladet ion. På grunn av at ionet og elektronet har motsatte ladninger er det en tiltrekkende vekselvirkning mellom disse. Dette fører til en polarisering av mediet, og det vil videre si at ionet beveger seg mot elektronet. Ionet er nå ute av den likevektsposisjonen som den normalt vil ha på grunn av bindingene til de andre nærliggende ionene.

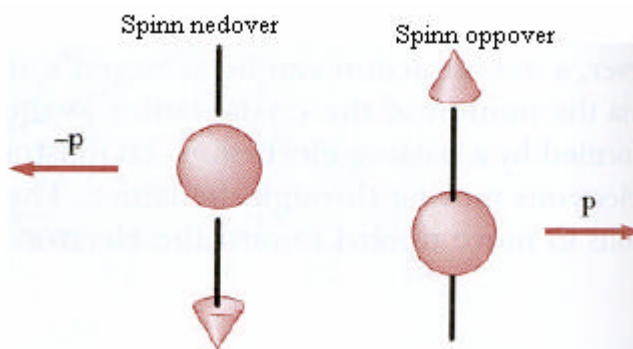
b) Her vises situasjonen etter at elektronet har blitt spreidd mot ionet og deretter er på vei bort. Siden elektronet har en mye større fart enn ionet, vil ionet bevege seg svært lite i løpet av denne tiden.

c) Nå ser vi at ionet fortsatt ligger med omtrent samme forskyvning fra likevektsstedet som tidligere i det et nytt elektron nærmer seg ionet med samme fart som det første elektronet, men i motsatt retning. Også dette elektronet blir tiltrukket av ionet og det drar ionet i retning tilbake til sin opprinnelige likevektsposisjon i gitteret.

d) Til slutt forsvinner også elektron nummer to ut av bildet, og ionet er omtrent tilbake der det startet i figur a).

Når vi ser på denne prosessen som en helhet, så ser vi at dette samarbeidet mellom to elektroner og et ion er i bunn og grunn tilnærmet en netto tiltrekningsvekselvirkning mellom de to elektronene. Dermed ser vi at to elektroner som i utgangspunktet skulle frastøte hverandre, nå i realiteten tiltrekker hverandre når vi tar med et ion inn i prosessen. En ting som er verdt å merke seg er at det er viktig at de to elektronene ikke er nær ionet samtidig slik at de ikke frastøter hverandre. Dette er mulig på grunn av at ionet har en relativt lav svingefrekvens sett i forhold til hastigheten på et elektron.

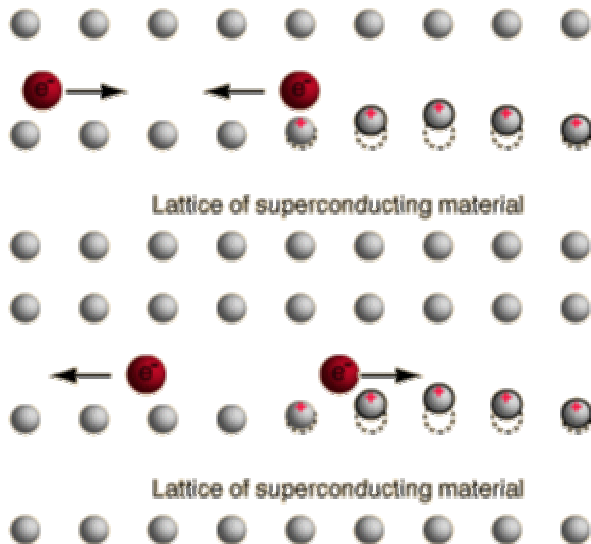
De to elektronene i et Cooperpar har motsatt rettet spinn og impuls i forhold til hverandre slik at total spinn i paret er lik null. Siden Cooperparet ikke har noen total spinn, kan alle parene være i samme tilstand i motsetning til vanlige elektroner som alle må være i ulike tilstander.



Figur 3: Her ser vi en skjematisk fremstilling av et Cooperpar. Elektronet til høyre har en impuls $\mathbf{p}$ og spinnretning oppover, mens elektronet til venstre har en impuls $-\mathbf{p}$ og en spinnretning nedover. Dermed er total impuls og total spinn for systemet lik null.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Selv om vi nå har sett på en relativt enkelt fremstilling av hvordan et Cooperpar oppstår, så må vi huske på at det i realiteten ikke er snakk om svingninger på bare ett ion, men snarere en kollektiv bevegelse i ionegitteret. Selve fysikken er i midlertid den samme, bare i en større skala selvfølgelig. (Se figur 4)



Figur 4a: Et passerende elektron tiltrekker seg de positive ionene langs gitteret og forårsaker en liten endring i deres posisjon.

Figur 4b: Et annet elektron som passerer i motsatt retning blir tiltrukket av den lille endringen i positiv ladning.

(Kilde: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/supcon.html)

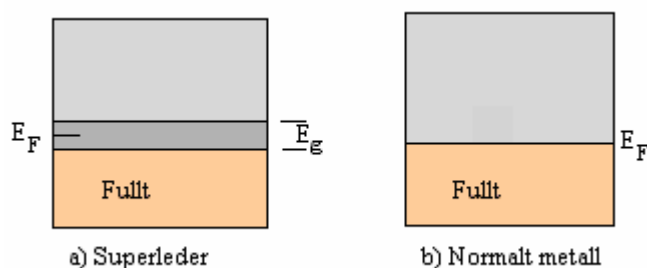
Denne prosessen med danning av Cooperpar er i store trekk innholdet i den revolusjonerende BCS-teorien for lavtemperatures superledere.

Et annet viktig resultat av BCS-teorien er forklaringen på hvordan vi kan oppnå null motstand og tilsvarende evigvarende strøm. Dette kan forklares med at ikke-perfekte ionegitter og gittervibrasjoner som vanligvis sprer elektronene ikke har noen innvirkning på Cooperparene. Det er noe av dette som er det utrolige med superledere; at de gittervibrasjonene som vanligvis er delvis ansvarlig for motstanden i vanlige metaller også er del i den interaksjonen som gir grunnlag for superkonduktiviteten. Dermed ser vi at de metallene som ved romtemperatur har liten gittervibrasjon og dermed er gode ledere, for eksempel kobber, sølv og gull, ikke er superledere, mens tinn og kvikksølv, som ved romtemperatur bare er middels gode ledere fordi de har relativt mye gittervibrasjon, blir til superledere ved lave nok temperaturer.

I en superleder nytter det ikke å se på Cooperparene individuelt siden kondenseringen av alle parene til samme kvantetilstand får systemet til å oppføre seg som et stort kvantemekanisk system. Alt som vi vil gjøre med ett Cooperpar, er vi nødt til å gjøre med alle de andre Cooperparene samtidig. Dersom vi nå kobler en krets med spenningskilde og superleder, og deretter fjerner spenningskilden så vil strømmen fortsette å bevege seg i superlederen. Dette kan greit forklares med at dersom strømmen skal stoppe opp, så er alle Cooperparene nødt til å stanse sin bevegelse samtidig siden de er i samme kvantetilstand og det er lite trolig at dette skjer.

Energigap

Stabiliteten til et superledende stadium er sterkt avhengig av korrelasjonen mellom Cooperparene. BCS-teorien forklarer superledning som en funksjon av energinivåene til et slags "makromolekyl" og eksistensen av et energigap E_g . (Figur 5a)



Figur 5:

- a) En enkel energibånd struktur for en superleder. Her ser vi energigapet mellom de lave nivåene som er fulle og de øvre tomme nivåene.
- b) Energibåndstrukturen for en vanlig leder. Legg merke til at her har vi ikke noe energigap. Ved $T = 0K$ er alle nivåene under fermi-energien E_F fulle, mens alle nivåene ovenfor er tomme.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

I en normal leder representerer fermi-energien E_F den største kinetiske energien som et fritt elektron kan ha ved temperatur $0K$. Energigapet i en superleder er veldig lite ved $T = 0K$ sammenliknet med energigapet i en halvleder og fermi-energien til et metall. Vi snakker om en størrelsesorden der E_g i en superleder $\approx 10^{-3}eV$, E_g i en halvleder $\approx 1eV$ og E_F i et metall $\approx 5eV$.

BCS-teorien hevder at når $T = 0K$ så er $E_g = 3.53 k_B T_c$, der k_B er Boltzmanns konstanten ($\approx 8.617 \times 10^{-5} eV/K$) og T_c er superlederens kritiske temperatur. Siden energigapet representerer den energien som er nødvendig for å bryte opp et Cooperpar vil det si at superledere som har store energigap har relativt høy kritisk temperatur. Siden de to elektronene i et Cooperpar har motsatt rettet spinn, vil et ytre magnetisk felt øke energien til det ene elektronet og senke energien til det andre. Hvis det magnetiske feltet blir stort nok, søker elektronparet en tilstand der begge kan spinne i samme retning. Resultatet er at paret bryter opp forbindelsen og den superledende fasen er ødelagt.

Type 1 og Type 2 superledere

Type 1 superledere

Kritisk temperatur (T_c) og kritisk magnetfelt (B_c):

Tabell 1 lister opp noen stoffer med superledende egenskaper som er klassifisert som type 1 superledere. Legg merke til at verken kobber, sølv eller gull er med, for selv om disse har utmerkede strømførende egenskaper ved normale temperaturer så blir de ikke superledende ved lave temperaturer.

Tabell 1:

Superleder	Kritisk temperatur (K)	Kritisk magnetfelt (T)
Al	1,196	0,0105
Ga	1,083	0,0058
Hg	4,153	0,0411
In	3,408	0,0281
Nb	9,26	0,1991
Pb	7,193	0,0803
Sn	3,722	0,0305
Ta	4,47	0,0829
Ti	0,39	0,01
V	5,3	0,1023
W	0,015	0,000115
Zn	0,85	0,0054

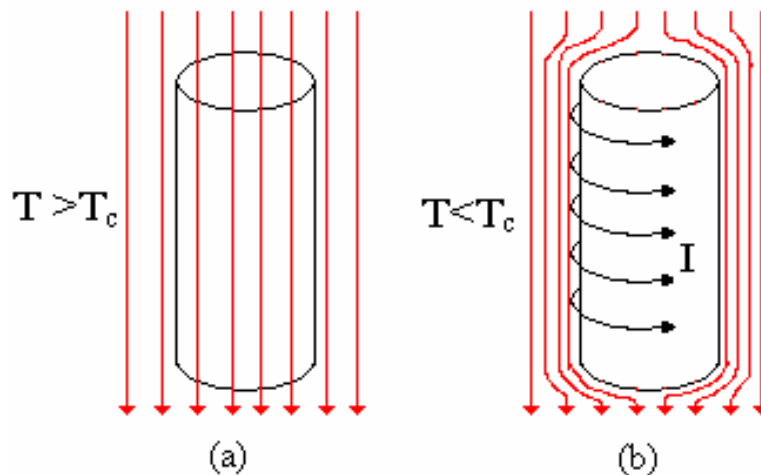
Når et magnetfelt er til stede så blir den kritiske temperaturen lavere med økende magnetfelt. Hvis magnetfeltet stiger over den kritiske verdien for magnetfeltet, så blir den superledende egenskapen ødelagt, og materialet oppfører seg som en normal leder med motstand.

$B_c(0)$ er det minimale magnetfeltet som kreves for å ødelegge superlederen i hvilket som helst materiale. Hvis magnetfeltet overstiger $B_c(0)$ så blir ikke metallet superledende for noen temperaturer. Som vi kan se av tabellen over, så er det kritiske magnetfeltet ganske så lavt for type 1 superledere. Av denne grunn er ikke type 1 superledere brukt til å konstruere superledende magneter fordi magnetfeltet som genereres ødelegger de superledende egenskapene.

Magnetiske egenskaper for type 1 superledere:

Ved hjelp av enkle argumenter basert på lover fra elektrisiteten og magnetismen kan man vise at det magnetiske feltet inne i en superleder ikke kan forandres over tid. I følge Ohms lov er det elektriske feltet inne i en leder proporsjonalt med motstanden i lederen. Siden $R = 0$ for en superleder, så må den elektriske fluksen inne i superlederen være null.

Før 1933 trodde man at superledende egenskaper var manifestet til en perfekt leder. Hvis en perfekt leder er kjølt ned under dens kritiske temperatur når den er utsatt for et magnetfelt, så skal feltet være fanget inne i lederen, selv etter at feltet er fjernet. Slutt-tilstanden til en perfekt leder er avhengig av om man setter superlederen inn i magnetfeltet før eller etter man kjøler den ned under den kritiske temperaturen. Hvis feltet kommer etter at den er kjølt ned under T_c så vil feltet bli avvist av superlederen. På den annen side, hvis den er satt inn i feltet etter nedkjølingen så vil den ikke bli avvist av superlederen.



(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Figur 6: En type 1 superleder som har form som en sylinder i et magnetfelt. (a) For temperaturer over T_c , går felt linjene gjennom prøven fordi den er i sin normale tilstand. (b) Når den er kjølt ned slik at den blir superledende, så blir den magnetiske fluksen utvist fra lederen ved at det induseres en overflate strøm.

Type 2 superledere

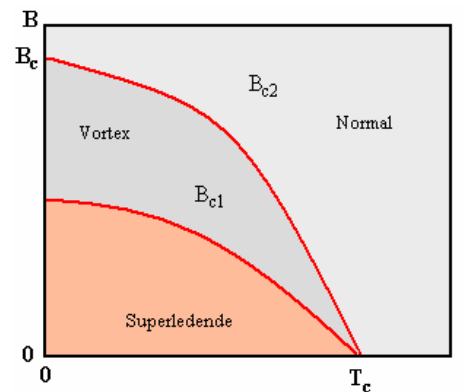
Type 2 superledere er karakterisert av to kritiske magnetfelt, kalt B_{c1} og B_{c2} i figur 7. Når det utvendige magnetfeltet er mindre enn det laveste kritiske feltet B_{c1} , er materialet helt superledende og ingen flukslinjer trenger gjennom, akkurat slik som ved type 1 superledere. Når det utvendige magnetfeltet overstiger en øvre kritisk grense B_{c2} , trenger fluksen igjennom og den superledende tilstanden er ødelagt. Akkurat slik som for type 1 superledere. I feltet mellom B_{c1} og B_{c2} , er materialet i en blandet tilstand. I denne tilstanden kan materialet ha null motstand og samtidig ha fluks som går igjennom. Det som skjer er at deler av superlederen mister sin superledende egenskap, og samtidig er det deler som forblir superledende. Se figur 8.

Tabell 2 viser noen kritiske temperaturer og kritisk magnetfelt der superlederen mister sine superledende egenskaper B_{c2} .

Tabell 2:

Superleder	Kritisk temperatur (K)	Kritisk magnetfelt (T)
Nb ₃ Al	18,7	32,4
Nb ₃ Sn	18	24,5
Nb ₃ Ge	23	38
NbN	15,7	15,3
NbTi	9,3	15
Nb ₃ (AlGe)	21	44
V ₃ Si	16,9	23,5
V ₃ Ga	14,8	20,8
PbMos	14,4	60

Verdiene til B_{c2} er store i forhold til B_c for type 1 superledere, av denne grunn er type 2 superledere best egnet for konstruksjon av magneter med et sterkt felt.



Figur 7: Kritisk magnetfelt som en funksjon av temperatur for en type 2 superleder. Under B_{c1} oppfører materialet seg som en type 1 superleder. Over B_{c2} oppfører materialet seg som en normal leder. Mellom disse to tilstandene er superlederen i en blandet (vortex) tilstand.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Type 2 superledere kan brukes til å skape et magnetfelt av styrke 5 til 10 T og de krever ingen strøm for å opprettholde denne tilstanden (annet enn nedkjøling). Vanlige elektromagneter med jernkjerne klarer sjeldent og lage et magnetfelt som er sterkere enn 2 T, og bruker i tillegg strøm for å opprettholde feltet.

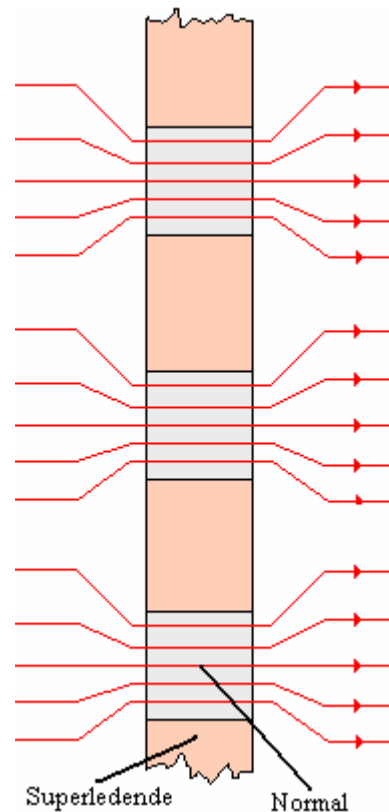
Andre egenskaper til superledere

Vedvarende strøm:

Fordi motstanden i en superleder er null under en kritisk temperatur, så vil man med en gang en strøm er satt i lederen oppdage at den er konstant, uten at man tilfører ny strøm (fra Ohms lov). Disse vedvarende strømmene, noen ganger kalt superstrøm, har blitt observert til å vare flere år, uten noe målbart tap av strøm.

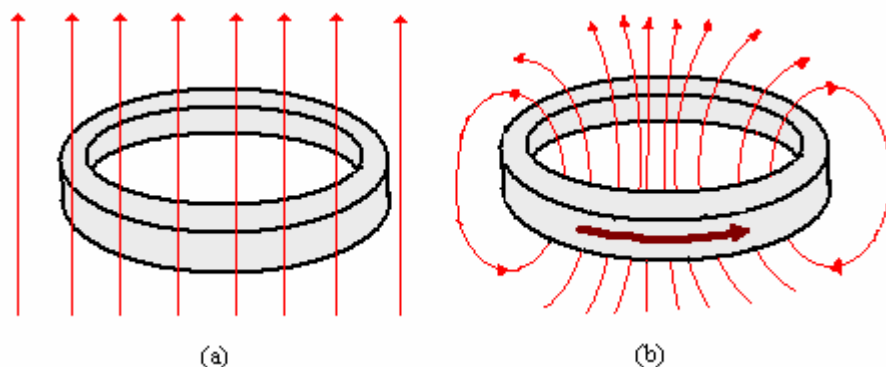
For å bedre forstå opprinnelsen til slike strømkretser kan du se for deg en ring laget av et superledende materiale. Dersom den er i normalt tilstand ($T > T_c$) i et magnetfelt, og temperaturen siden senkes under T_c , så blir ringen superledende (vist i figur 9a). I likhet som med en sylinder, blir fluksen avvist fra det indre av ringen pga induisert overflatestrøm. Fremdeles så passerer flukslinjene gjennom hullet i ringen. Når det påførte magnetfeltet skrues av, slik som i figur X3b, så blir fluksen gjennom hullet i ringen fanget fordi fluksen i superlederen ikke kan forandres.

Den superledende ringen hindrer fluksen fra å gå tilbake til null, fordi den induerte strømmen i ringen ikke forsvinner når det utvendige magnetfeltet skrues av. Eksperimentelle forsøk der man har brukt en teknikk som er kjent som nuclear magnetic resonance indikerer at slike strømmer vil vare lenger enn 10^5 år.



Figur 8: Et skjematisk diagram av en type 2 superleder i en blandet (vortex) tilstand. Prøven inneholder fyllrom med normalt materiale, slik at magnetiske feltlinjer kan passere. Disse feltlinjene er holdt ute fra de superledende regionene.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)



(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Figur 9: (a) Når en superledende ring plasseres i et magnetfelt ved temperatur $T > T_c$, og temperaturen så senkes til $T < T_c$, så passerer fluksen gjennom hullet i ringen selv om det ikke passerer gjennom materialet som lager ringen. (b) Når det påførte magnetfeltet skrues av, blir fluksen gjennom hullet fanget, og en induert strøm oppstår i materialet.

Det som skjer hvis ringen er kjølt ned slik at $T < T_c$ før det blir påført et ytre magnetfelt, er at fluksen da blir holdt ute av hele ringen (ingen flukslinjer gjennom hullet i ringen). Det blir da induisert en strøm (når ringen er i magnetfeltet) slik at det blir opprettholdt null fluks gjennom hullet i ringen. I dette tilfellet forsvinner den induerte strømmen når det ytre magnetfeltet skrues av.

Coherence lengde

En annen viktig parameter i sammenheng med superledere er coherence lengde (ξ). Coherence lengde er den minste dimensjonen hvor en superleder kan bli opprettet eller ødelagt. Tabell X1 lister opp noen av disse for noen utvalgte superledere.

Superleder	ξ (nm)	λ (nm)
Al	16	160
Cd	110	760
Pd	37	83
Nb	39	38
Sn	34	23

Tabell 3: Inntrengningsdybde og coherence lengde til noen superledere ved $T = 0$ K
(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

En superleder er av type 1 hvis $\xi > \lambda$. De fleste av de rene metaller som er superledende faller under denne kategorien.

En økning i forholdet λ/ξ impliserer i de fleste tilfeller at det er en type 2 superleder.

En detaljert analyse viser at coherence lengde og inntrengningsdybde begge er avhengige av den gjennomsnittelige frie veien til elektronene i normal tilstand. Dette betyr også at man ved å tilføre urenheter kan redusere den frie veien til elektronene; noe som medfører at inntrengningsdybden øker og coherence lengden synker. På denne måten kan man få et metall til å skifte fra type 1 leder til type 2. Ett eksempel er bly som er en type 1 superleder, men som ved å tilføre 2% indium skifter til å bli en type 2 leder.

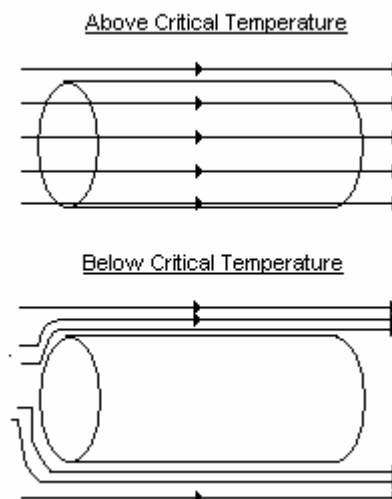
Meissner-effekten

Da det ble oppdaget at superledere ikke bare var perfekte ledere for strøm, men at de også hadde muligheten til å ekskludere et magnetisk felt, ble dette et nytt og spennende forskningsområde. De som først oppdaget denne muligheten i 1933 var Walther Meissner og R. Ochsenfeld. De oppdaget at en superleder ikke vil tillate at et magnetisk felt gjennomtrenger selve superlederen. Denne effekten kalles Meissner-effekten. Den blir også ofte referert til som perfekt diamagnetisme eller Meissner-Ochsenfeld effekten. Vi fikk demonstrert Meissner-effekten i løpet av prosjektperioden, og mye av det vi lærte og observerte i løpet av denne demonstrasjonen vil vi bruke til å forklare hva Meissner-effekten egentlig går ut på.

Meissner-effekt, diamagnetisme

Diamagnetisme er en svak form av magnetisme som bare opptrer når du har et ytre magnetisk felt. Diamagnetismen kommer av forandringer i elektronbanene på grunn av dette feltet. Det induerte feltet er vanligvis veldig lite og har motsatt retning i forhold til det påførte feltet. Superledere har det som vi kaller perfekt diamagnetisme. Da vil det bli induert et slikt felt som er akkurat like stort som det påførte feltet, med et resultat av at feltet inne i superlederen blir lik null. Dette fordi motstanden i superlederen er lik null.

Figur 10: Meissner-effekten opptrer når vi har et ytre felt på en superleder og superlederen blir nedkjølt til kritisk temperatur.

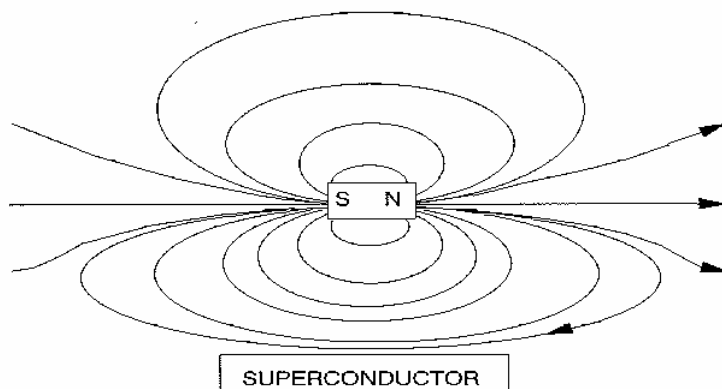


Meissner-effekten vil bare være tilstede dersom det magnetiske feltet er relativt lite. Dersom det magnetiske feltet blir for stort, vil det gjennomtrengne metallet og metallet vil miste sin superlederevne.

Magnetisk sveving, pinning

Ved å ha et ytre felt på superlederen mens vi kjøler den ned får vi et frastøtende magnetisk felt. I følge Earsnhaws teorem kan ikke en magnet sveve på et slikt felt da det ikke er noen stabil posisjon magneten kan befinne seg i, men i en superleder vil dette kunne gå på grunn av såkalt "pinning".

Pinning kommer av det man kan se på som huller i superlederen; små deler i superlederen som ikke er superledende. Disse hullene vil bli magnetisert av magnetfeltet slik at det blir dannet et felt som går samme vei som det ytre magnetfeltet. Summen av feltene fra alle disse små magnetene gir et relativt sterkt felt. Dette feltet vil holde en magnet i en fast avstand fra en superleder.

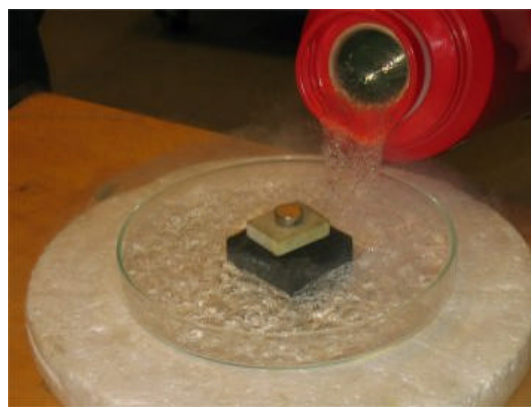
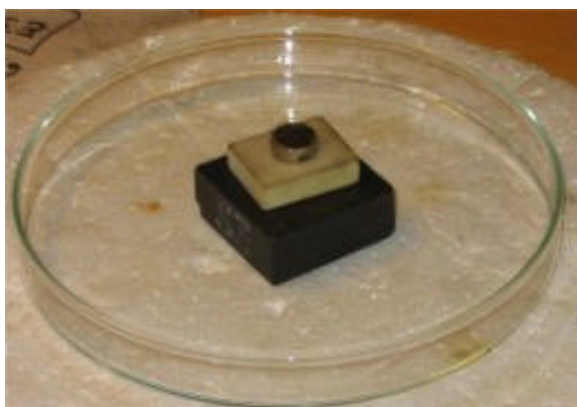


Figur 11: Tegning av flukslinjene til en magnet som svever over en superleder (Kilde: www.physnet.uni-hamburg.de/home/vms/reimer/htc/pt2.html)

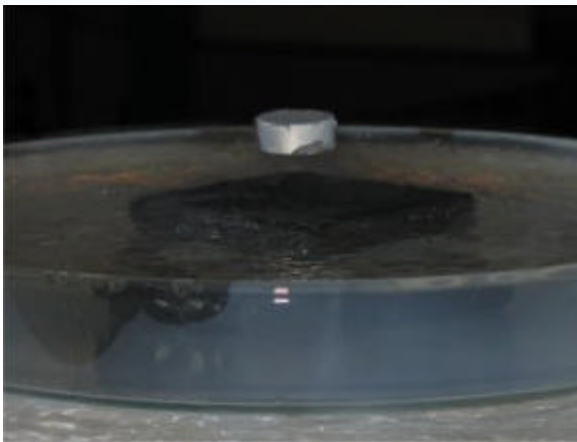
Forsøk med Meissner-effekt

I dette forsøket skulle vi få en magnet til å sveve over en superleder. Vi brukte $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ som superleder og flytende nitrogen til å kjøle superlederen ned. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ blir superledende ved 93K.

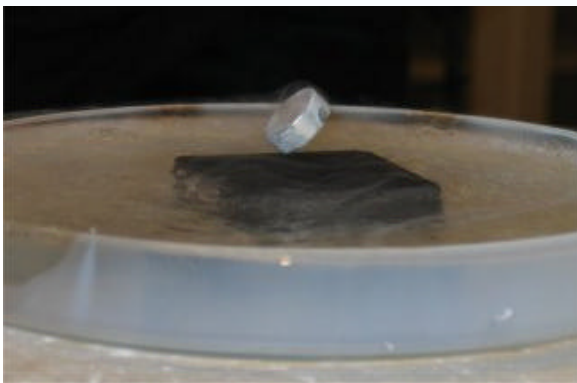
Vi la superlederen i en glassbolle og la en magnet oppå den. Mellom superlederen og magneten ble det lagt et viskelær. Så helte vi flytende nitrogen i skåla og ventet på at temperaturen til superlederen skulle nå 93K.



Når magneten var nedkjølt nok kunne vi ta vekk viskelæret mellom superlederen og magneten. Vi kunne da se at magneten svedde over superlederen.



Ved å bruke fysisk kraft på magneten kunne vi forandre flukslinjene slik at magneten ble stående i en annen posisjon. Ved å gi magneten en dytt kunne vi få den til å spinne. Når magneten spinner uten å forandre flukslinjene vil den kunne spinne veldig lenge. Dette fordi friksjonen fra lufta på magneten er svært liten.



Vi kunne også løfte opp superlederen og snu den på hodet. Vi ser at magneten fremdeles holder seg i samme posisjon.



Etterhvert som superlederen ble varmere så vi at magneten datt lenger nedover. Til slutt, når temperaturen ble for høy, lå magneten helt nede på superlederen.

Superledere i dag

Maglevtog

Hvis du har planer om å reise fra en plass til en annen har du mange muligheter. Du kan gå, sykle, kjøre bil, ta tog eller fly. Over en lengre distanse er det som regel fly som er den beste løsningen. Men tenk hvis vi hadde et tog som kunne konkurrere med hastigheten til et fly; et tog som kunne komme opp i en hastighet på 500km/t og som i tillegg nesten ikke forurensrer og bråker mye mindre enn et vanlig tog.

Dette toget finnes allerede. Det finns flere prøvebaner for slike tog i Japan, Tyskland og USA. I Shanghai er det faktisk et kommersielt maglevtog i full bruk. Dette toget går fra Longyang Road Station til Pudong Airport, og bruker under 10 minutter på en 30km lang strekning. Gjennomsnittshastigheten til toget er på hele 430km/t. Så hvorfor bygges det ikke flere slike togbaner? Vi har jo teknologien til å bygge det, har vi ikke?

Problemet med en slik bane som er i Shanghai er at det koster altfor mye å bygge og er forholdsvis dyr i drift, en bane slik som den som er beskrevet nedenfor er mer aktuell for fremtiden fordi denne bruker superledende magneter som gjør at den er billigere i drift og også billigere å produsere.



Miyazaki Maglev testbane i Japan. (Kilde: www.rtri.or.jp)

Forskning og utvikling av maglev-teknologi med superledere har holdt på siden 1970. Etter en god del testing på laboratoriet kunne byggingen av en 7km lang testbane i Miyazaki Prefecture begynne 1975, og i 1987 kom toget MLU001 opp i en fart på 400,8km/t på denne banen.

En annen milepel innenfor Maglev kom i 1990 når det fikk status som nasjonalt sponset prosjekt i Japan, og Yamanashi Maglev Test Line ble bestemt bygd. Banen sto ferdig i 1997 og blir nå brukt til test kjøring. 24. desember samme året kom et maglevtog opp i 550km/t på denne banen og 2. desember 2003 kom et annet tog opp i en fart på 581km/t.

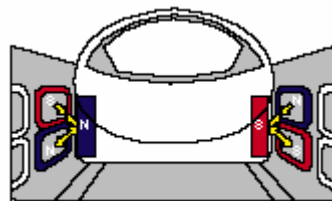
Forsking og utvikling av maglevtog har også vært under utvikling i Tyskland, men banene har ikke basert togene sine på superledende magneter.

“The Maglev 2000 of Florida Corporation” er godt i gang med å utvikle en ny type maglevtog basert på den japanske modellen og på de nyere maglev-opptdagelsene til Dr. Powell og Danby. Dette systemet har forbedret ytelse og svært reduserte kostnader. Dette gjør byggingen av nye maglevtog og baner mye mer attraktivt, da det nå er mulig å kunne tjene penger på det. Maglev 2000 har planer om å bygge en slik togbane i Florida.

Vi har valgt å se på den japanske modellen siden det er denne som bruker superledende magneter i maglevtoget. Denne modellen er også utgangspunktet for banen som skal bygges i Florida.

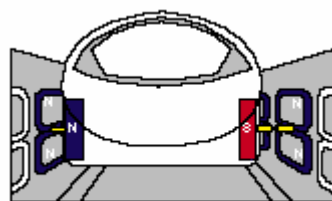
Figur 12a: *Prinsipp om sveving:*

Levitasjonsspoler er montert på sideveggene av banen. Når de superledende magnetene som er om bord på toget passerer i høy hastighet noen cm nedenfor disse spolene blir det induisert en elektrisk strøm i spolene. Et resultat av dette er krefter som presser den superledende magneten oppover og krefter som presser den nedover samtidig, og på den måten får toget til å sveve.



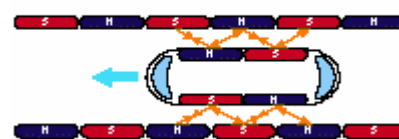
Figur 12b: *Prinsipp om sideveis styresystem:*

Levitasjonsspolene som står mot hverandre er koblet sammen under banen og utgjør en sløyfe. Når et maglevtog som vi kan tenke på som en superledende magnet, er i fart og skifter retning, vil en elektrisk strøm bli induisert i sløyfa. Dette medfører videre til en frastøtende kraft som virker på levitasjonsspolene på den siden som er nærmest toget og en tiltrekkende kraft på den sida på den sida som er lengst vekk. Toget vil da alltid ligge midt på banen.



Figur 12c: *Prinsipp om framdrift:*

En frastøtende kraft og en tiltrekkende kraft induisert mellom magnetene blir brukt til å drive toget fremover. Fremdriftsspolene på hver side av banen får kraft fra en kraftstasjon som lager et skiftende magnetisk felt på banen. De superledende magnetene om bord på toget blir tiltrukket og frastøtet av det skiftende feltet, og driver på den måten toget fremover.



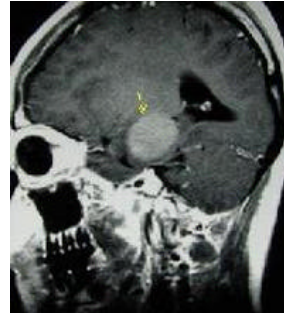
(Kilde: www.maglev2000.com/today/today-02-a.htm)

MRI

MRI (Magnetic Resonance Imaging) er en maskin som kan gi oss fantastiske bilder av hva som skjer inne i menneskekroppen. Den gir oss utallige flere detaljer enn noen annen avbildningsmetode. For at disse maskinene skal gi oss best mulig bilder, trenger vi sterke magnetiske felt.



Stor og bråkete MRI maskin



MRI-bilde av en person med svulst på hjernen

Den største og viktigste delen i et MRI system er magneten. Magneter som brukes i MRI i dag er 0,5 T – 2,0 T. For å kunne lage et så sterkt felt brukes det tre forskjellige typer magneter; elektromagneter, permanente magneter og superledendemagneter.

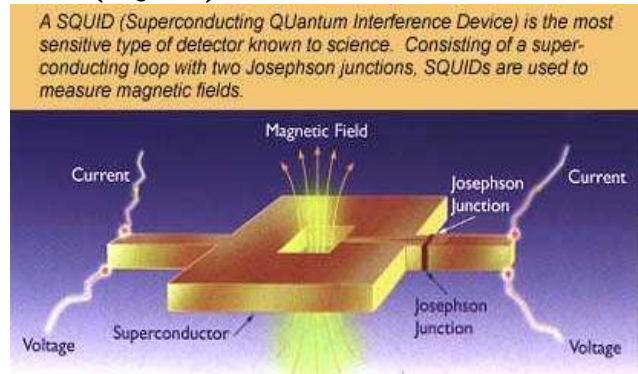
- Elektromagnetene er de billigste magnetene å produsere, men å lage et felt på 0,3 T med en slik magnet krever svært mye strøm og det blir veldig dyrt å bruke.
- En permanent magnet er (utrolig nok) permanent, men en permanent magnet med sterkt nok felt til en MRI vil veie svært mange tonn.
- En superledende magnet er den magneten som er mest vanlig. Den er forholdsvis dyr å produsere men fordi motstanden i den er lik null vil brukskostnadene være svært redusert. En slik magnet kan lett lage det ønskede 0,5 til 2,0 T feltet og vil pga dette kunne lage bilder med høyere kvalitet.

Ved å sammenligne disse tre forskjellige magnettypene er det ikke vanskelig å forstå at det er superledendemagneter som er mest brukt i MRI.

Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)

SQUID kan oppdage magnetfelt som er mindre enn 1 til 10 milliarder av det som jorda lager.

SQUIDs blir brukt av fysikere i søken etter gravitasjonsbølger. Geologer bruker SQUIDs til å finne oljedepoter og andre mineraler. Olje og mineraldepoter forstyrrer jordens magnetfelt, noe som lett oppdages ved hjelp av SQUID. SQUID brukes også ombord på fly og helikopter for å sjekke ut lengde av områder.



Figur 13: SQUID er den mest sensitive typen av detektorer som vi kjenner til i fysikken
(Kilde: www.superconductors.org)

(Vi nevner også for moro skyld at det materialet som var i den superledende klossen vi brukte under Meissner forsøket er den typen materialet man lager en SQUID av.)

Er superledere fremtiden?

Superdatamaskiner, SQUIDS, elektrisk kraftstyring, motorer og magnetiske svevetog er bare noe av det superledere kan brukes til uten å kaste bort energi. Årlige brukes milliarder på forskning på høy temperaturs superledere, og superledere er i dag en milliardindustri.

Strømledninger

Strømledninger som overfører strøm uten tap av energi ville bety at mer strøm kan overføres enn tidligere. Vanlige høyspenningsledninger har i dag et tap på ca 3% av den energien som overføres. Superledende høyspenningsledninger ville bety sparte penger, samt at man ikke hadde trengt all den plassen man bruker i dag.

Generatorer

I generatorer kunne man byttet ut ledninger med jernkjerne med et superledende materiale. Dette ville gjort generatorer mindre og mer effektiv.

Motorer

Motorer som er laget med superledende ledninger ville kunne lages mindre enn de motorene vi har i dag, og vært langt mer effektive. Denne typen motorer ville vært spesielt godt egnet på ubåter og skip.

Siden superlederteknologi vil hjelpe med å redusere størrelse og vekt på motorer, generatorer og andre støttende komponenter, forventer den amerikanske marinen at dagens forskning skal hjelpe de med å gå fra vanlige forbrenningsmotorer og over til elektrisk framdrift for skipene deres.



Superledermotor
(Kilde: superconductors.org/Uses.htm)

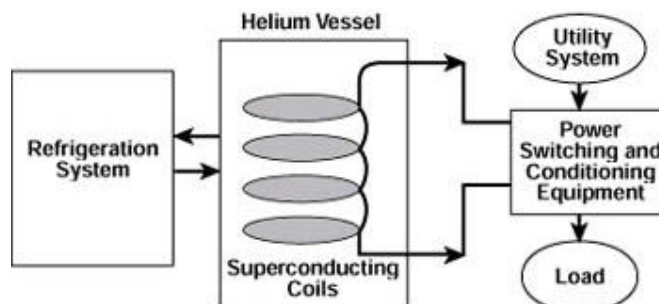
Med en motor som er bygget med superlederteknologi kan det bygges motorer som er opptil 70% mindre og lettere enn en vanlig motor, og fremdeles produsere like mye energi. Dette er inklusivt alle de ekstra kjølesystemene som trengs pga superlederne. Dette gir en kjempe fordel ute til sjøs der den sparte plassen kan brukes til ekstra lastekapasitet. En slik motor er også 1 til 2 % mer effektiv enn en vanlig motor, litt avhengig av belastningen. Til sammen så betyr dette mange millioner i året for et vanlig lasteskip.

Elektriske motorer brukes i dag i de fleste cruise skip. Årlig omsettes det for 400 millioner dollar bare på motorer og generatorer i markedet for cruise og laste skip. Det er den amerikanske marinen som betaler for testene selv om disse motorene sannsynligvis blir å finnes i det kommersielle markedet først. Daglig leder for American Superconductor's, Greg Yurek, forventer at de første høy temperaturs superledermotorer blir å finne i kommersielle skip allerede i begynnelsen av 2005.

Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

SMES lagrer elektrisitet i lengre perioder i superledende "coils". SMES vil brukes i elektriske apparaturer en dag og vil også brukes til lagring av kraft, slik at man kan redusere antall strømbrudd. Slike strømbrudd koster i dag amerikanske selskaper ca 12 milliarder dollar hvert år.

Større selskaper er svært avhengig av pålitelige og bærekraftige kraftverk for dagelig bruk. Den utvidede bruken av sofistikerte elektroniske og databaserte systemer gjør at man krever et forbedret miljøvennlig alternativ til uavbrutte strømleveranser. Dette har ført til at det nå forskes, utvikles, testes og evalueres slike systemer.



Figur 14: Basis for et SMES-system.

(Kilde: www.afrlhorizons.com/Briefs/Dec01/ML0009.html)

Årsaken til denne evalueringen er for å få nærmere kunnskaper om SMES-teknologien er noe å satse på i framtiden. United States Air Force tester og evaluerer disse produktene som senere skal brukes i det kommersielle markedet. Meningen er å bestemme om SMES-teknologien har mulighet til nok forbedring på strømkvalitet, pålitelighet og operasjonell funksjonalitet.

Et SMES-system, laget for å forbedre strømkvaliteten for kritiske belastninger, sørger for at det ikke oppleves at strømmen forsvinner ved midlertidige strømbrudd. Systemet lagrer energi i en superledende spiral senket ned i flytende helium. (se figur 14)

Nytten av et slikt system er at det fungerer som et nødaggregat. Istedenfor at strømmen går i bygget, så utlades spiralen og gir den nødvendige strømmen som er tilpasset belastningen. Kjølssystemet og heliumet holder superlederen kald slik at spiralen holder seg i en superledende tilstand.

Det har blitt gjort store forbedringer på områdene innenfor kjøling, elektronikk, overvåking og kontroll av slike systemer. Høye investering og vedlikeholdskostnader er fremdeles den største hindringen for å gjøre SMES til et økonomisk alternativ til batteri-backup og motorgeneratorer.

Kun framtiden og videreforskning på området vil vise om SMES blir et alternativ til UPS (uninterruptible power supply) batteri systemer, og dermed kunne redusere antall batteri som kreves for drift av et effektivt UPS system og samtidig redusere eller eliminere bruken av miljøfarlig batterisyre.

Datamaskiner

Hvis datamaskiner brukte superledende deler ville de vært mye raskere enn de er i dag. De ville vært mindre fordi de ikke ville trengt rom for avkjøling. Dagens datamaskiner tar mye plass fordi de trenger kjøling.

Dagens datamaskiner bruker Josephson forbindelser. Disse har navnet etter Bjarne David Josephson fra Cambridge Universitetet i England, som kom opp med Josephson effekten. Josephson effekten sier det at elektroner kan flyte fritt over et isolerende lag mellom to superledende materialer. Han fikk nobel prisen i fysikk for sine oppdagelser i 1973. Josephson forbindelser har et tynt lag med isolerende materiale i klem mellom to superledende

materialer. Siden Josephson forbindelser krever svært lite strøm for å fungere produserer de også mye mindre varme.

Superledere i fremtiden

Høy temperaturs superledere kan lede til mange viktige teknologiske framskritt, slik som høyeffektive lettvekts motorer. Men mange viktige materialproblemer må overkommes før slike apparater kan bli virkelighet. Kanskje den vanskeligste delen er å forme det skjøre keramiske materialet i brukbare former, slik som wire og tynne filmer for små apparater (SQUID). Et annet stort problem er den relativt lave strømtettheten som keramiske materialer kan bære. Hvis dette kan overkommes er det spennende å spekulere i noen av de framtidige bruksområdene til slike nye materialer.

Et åpenbart bruksområde til slike strømførere med null motstand er å bruke det i strømførende ledninger. En ikke ubetydelig del av strømmen går tapt til varme når strømmen føres gjennom normale ledere. Hvis slike strømlinjer og transformatorer kunne lages av superledende materiale kunne disse overføringstapene bli eliminert, og store mengder energi hadde blitt spart på verdensbasis.

De nye superlederne kan få en revolusjonerende innvirkning innenfor elektronikken. Hvis man kunne brukt superledende film til å binde sammen databrikker kunne størrelsen blitt betydelig redusert og hastigheten økt siden informasjon kunne blitt overført raskere og flere brikker kunne blitt plassert på samme kort. Dette fordi det blir langt mindre varmeutvikling.

Et annet viktig bruksområde til superledere er supermagneten i partikkelakseleratorer. Nå bruker alle profesjonelle partikkelakseleratorer flytende helium til nedkjøling av superlederne. Igjen kan store summer bli spart på nedkjøling og driftskostnader hvis man kan gå over til superledende elementer som bare trengs nedkjøling av flytende nitrogen.

Er superledere fremtiden? Etter at man har forstått hva superledere er for noe og hva det brukes til i dag så er forskere ganske overbevist om at superledere både er viktig i dag og i fremtiden, men mye av dette er avhengig av fremdriften innen forskning på cryogenic kjøling, da dette er den største hindringen så langt.

En dag vil superledere erstatte de strømførende materialene vi bruker i dag. Superledere vil forhåpentligvis spare milliarder for land rundt om i hele verden.

Avslutning

Superledere har langt flere bruksområder enn å føre strøm fra A til B uten energitap. De har for eksempel interessante magnetiske egenskaper som gjør at de kan brukes i forskjellige måleapparater og til konstruksjon av supermagneter på en svært gunstig måte, både med tanke på energitap og den unike funksjonen de kan få i noen tilfeller.

Superledere er et område under utvikling. I fysikkens verden er dette et relativt ferskt område hvor man først de siste 50 årene har gjort de store framskrittene. I dag er de største hindringene ikke viljen til å utvikle området, men de barrierene man møter fordi superleder må være så ekstremt kalde, og det at dagens superledere er så vanskelig å forme til noe brukbart siden de er så porøse. Investeringene innen forskning på superledere har bare de siste årene mangedoblet seg fordi det kommersielle markedet fikk opp øynene for det.

De teoriene man har utviklet så langt gjelder kun for type 1 superledere, men de er gode teorier så man regner med at man beholder dem hvis det ikke blir oppdaget noe særdeles overraskende innenfor området. Pr i dag har vi ingen gode teorier for type 2 superledere selv om BCS teorien også her virker ved de fleste empiriske observasjoner.

Pr i dag så er det keramiske materialet: $\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$ den nåværende rekordholderen når det kommer til høy temperaturs superledere, og som forsiden viser så er den rekorden på 138K.

Kilder

Internett sider

<http://www.eapen.com/jacob/superconductors/chapter6.html>
<http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/jan04/0104tran1.html>
<http://www.afrlhorizons.com/Briefs/Dec01/ML0009.html>
<http://superconductors.org/Uses.htm>
<http://www.phys.ntnu.no/brukdef/grupper/materialfysikk/super/index.html#>
http://en.wikipedia.org/wiki/Meissner_effect
<http://www.maglev2000.com/today/today-02-a.html>
<http://travel.howstuffworks.com>
<http://www.physnet.uni-hamburg.de/home/vms/reimer/htc/pt2.html>
<http://www.superconductors.com>
<http://cnls.lanl.gov/Highlights/1997-06/html>
<http://www.forskning.no/Artikler/2003/oktober/1065526989.54>
<http://www.forskning.no/Artikler/erik/1075374858.74>
<http://www.kptnaturfag.no>
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/supcon.html>
<http://www.ornl.gov/info/reports/m/ornlm3063r1/contents.html>
http://www.chemsoc.org/exemplarchem/entries/igrant/main_noflash.html
<http://www.phys.ntnu.no/brukdef/prosjekter/super/Library/>

Bok

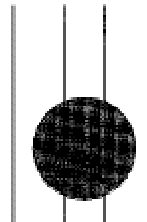
Serway, Moses, Moyer: *Modern Physics (2.ed)*, 1997, side 476 - 527

MAGNETISK LEVITASJON

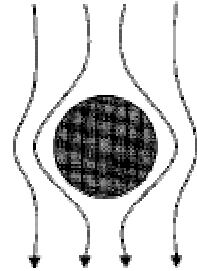
MAGLEV TEKNOLOGIEN & MAGLEV SVEVETOG



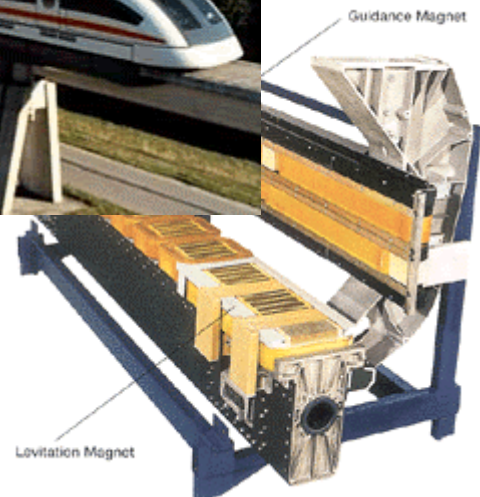
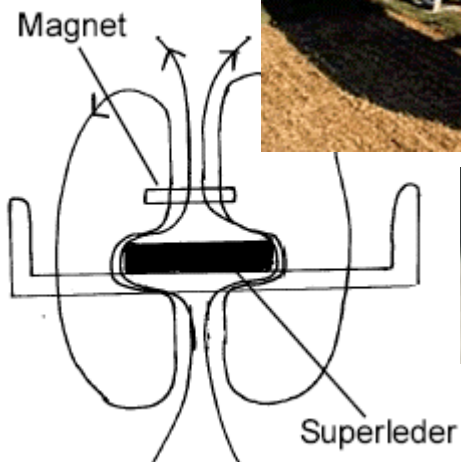
Vanlig metall



Superleder



er magnetisk, men en vanlig leder gjør



1: SAMMENDRAG

Magnetisk levitasjon handler om å få ting til å sveve ved bruk av magnetiske krefter. Maglev er kort for Magnetisk levitasjon. Meissner oppdaget at superledere blir perfekte diamagneter, vi kaller det Meissner effekt.

Tog som svever over sin skinnegang har nesten ingen friksjon bortsett fra luftmotsand. Disse benytter seg Maglev teknologien. Vi kaller de Maglev tog. Det finnes to typer maglev tog. Et konsept utviklet i Japan og et utviklet i Tyskland. Sistnevnte er i bruk mellom flyplass og bysentrum i Kina's Shanghai. Maglev kan bli svært billig og er miljøvennlig. Det som koster i dag er elektrisitet evnt nedkjøling og oppstart. Den Japanske metoden bruker nedkjøling av coilene (superlederene) for å minske strømforbruket. Til dette bruker man flytende helium som er flytende ned til det absolutte frysepunkt (0K el -273°C). Flytende helium er i dag dyrt og vanskelig å produsere, men dersom man utvikler gode høy temperatur superleder går elektrisitetskostnaden betraktlig ned. Superledere som fungerer ved temperaturer rundt 0 °C kan derfor virkelig gjøre den japanske Maglev teknologien til fremtidens teknologi.

Superledning er navnet på ledere som har null motsand. Dette har svært mange nytte områder og man kan lett lage gode og sterke permanente magneter ved bruk av denne egenskapen. Det finnes to typer superledere også. Type 1 og Type 2. Type 1 er den som ble først oppdaget og trenger svært lave temperaturer for å bli superledende. Den påvirkes også lett av magnetiske felt. Type 2 tåler høyere temperaturer og sterkere magnetfelt. Den høyestetemperaturen oppdaget i 1999 var på ca 160 K. Superledning er en av de hotteste forsknings temaene om dagen.

2: INNLEDNING

Formålet med denne oppgaven er å bli kjent med Maglev teknologien slik vi kjenner den i dagens bruk til transport, nærmere sagt Maglev tog. Vi skal ta for oss de to typene Maglev tog og se på forskjellen mellom de. Videre skal vi se nærmere på Superledere og hvordan dette kan brukes i Maglev teknologien. Vi gjennomførte også et forsøk med Meissner effekten i prosjekt perioden. Dette skal vi se på.

3: INNHOLD

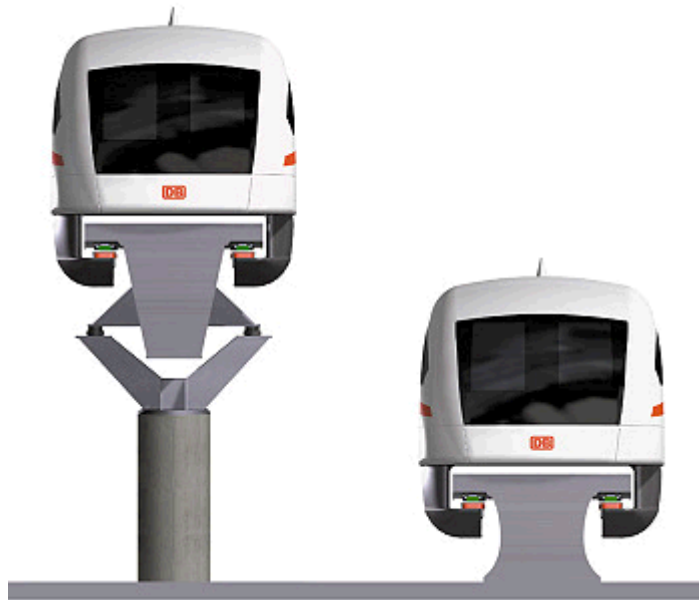
Kapittel 1: Sammendrag	side nr. 1
Kapittel 2: Innledning	side nr. 2
Kapittel 3: Innhold	side nr. 3
Kapittel 4: Maglevtog aka Svevetog	side nr. 4
I Tysk modell	side nr. 4
II Japansk modell	side nr. 7
III Fordeler ulemper Tysk vs. Japansk	side nr. 9
IV Enkel Beregning for Magnetisk løfting av TOG	side nr.10
V Avsluttning	side nr.13
Kapittel 5: Superledere og Supermagneter	side nr.14
I Type 1 Superledere	side nr.14
II Type 2 Superledere	side nr.15
III Bruksområder	side nr.16
IV Avsluttning	side nr.16
Kapittel 6: Forsøk: Meissner effekt	side nr.17
Kapittel 7: Kilder	side nr.19
Kapittel 8: Konklusjon	side nr.20

4: MAGLEV TOG

De to typene maglev tog bygger på samme fysikk men er forskjellige på et par måter. Den største forskjellen er kanskje at det japanske bruker superledere og derfor nedkjøling ved bruk av flytende helium.

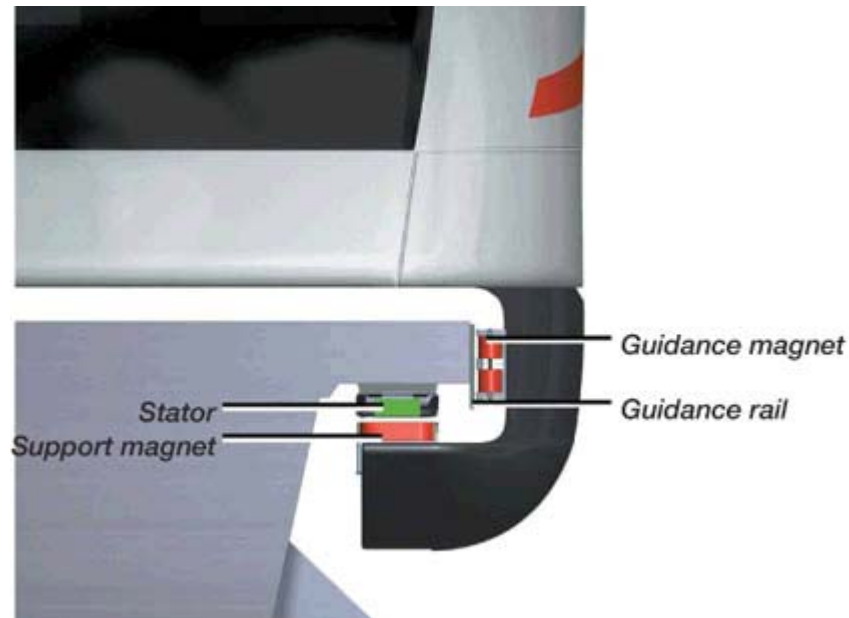
I: TYSK MODEL

Den tyske modellen for maglev tog har en skinnegang på mange måter slik vi kjenner den idag. Togets understell ligger rundt skinnegangen og blir løftet opp ca 1 cm av tiltrekkende magneter. Dette lager et ustabilt likevektspunkt som det kreves en god regulator til å styre, dette er likevel lettere da styringen og fremdriften blir lettere å styre. Det tyske selskapet Transrapid bruker elktromagnetisk dempningsystem (electromagnetic suspension) EMS. (NB! EMS blir gjerne kalt Transrapid)



Løfte og styremekanismen:

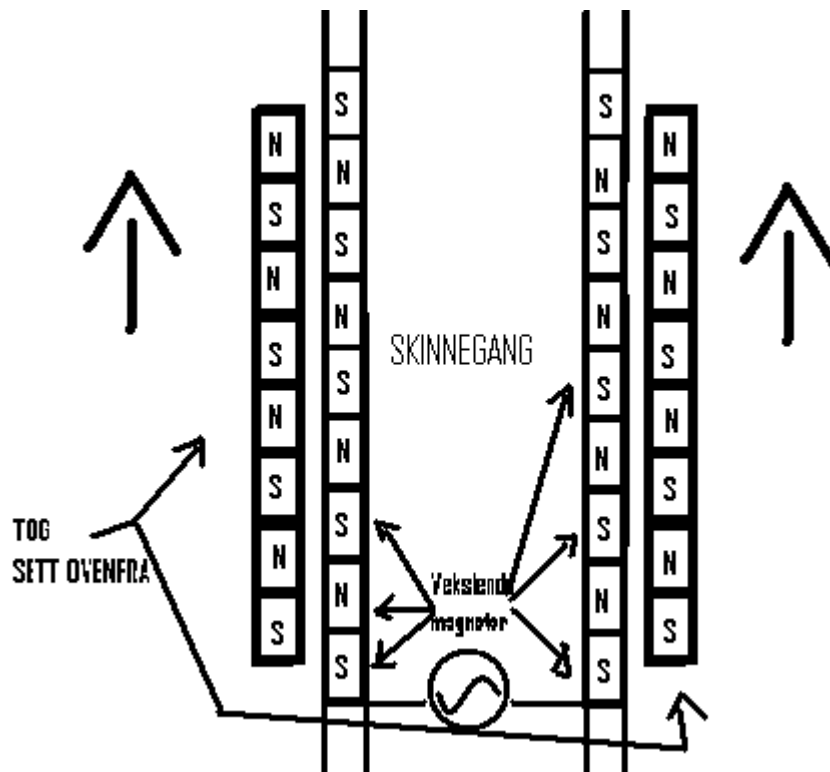
Støttmagneter er plassert på hver side av toget for å dytte det opp til undersiden av skinnegangen (se figur under). Styre magneter langs toget holder toget i riktig posisjon til enhver tid. Regulatorer sørger for at det til enhver tid er en konstant avstand (1cm) mellom skinnegang og togets magneter. For å sveve bruker togene svært lite strøm (mindre enn airconditioning systemet ombord) og strømmen til dette hentes fra batterier ombord. Dersom strømmen i skinnegangen skulle bli borte har togene nok strøm ombord til å sveve i ca en time ombord. Batterien blir ladet når toget beveger seg. Dette sies likevel å være en av den tyske modellens svakheter da den baserer seg på nødbatterier ombord. Den japanske utgaven, som vi skal se på senere, henter all sin strøm fra sin "skinnegang".



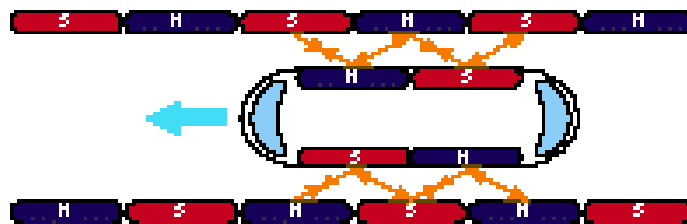
Nå tenker man kanskje at det er rart at man ikke bruker frastøtende magneter på oversiden av skinnegangen og på togets underside. Dette vil jo skape en mye større likevekt der den magnetiske frastøtende kraften blir større når toget "faller" mot skinnegangen og mindre dersom toget forsvinner lengre fra skinnegangen. Sant nok. Grunnen til at det ikke er slik har med bla penger og mangel på teknologi å gjøre. For å skape en stor nok frastøtende kraft trenger man to sterke magneter, enten permanente eller superledere. Dette er dyrt og ikke minst tungt. Ved bruk av den tyske måten slipper man unna med en slik sterk magnet festet på toget. I tillegg vil det være svært dyrt med en regulator til den langsgående fremdrifts "motoren" dersom man brukte frastøtende krefter.

Fremdrifts- og bremse-mekanisme:

Fremdriften til de to systemene (tysk vs. japansk) er svært like. Prinsippet er like genialt som det er enkelt å forstå. Hvis vi tenker oss at toget har permanente sterke magneter festet langs sidene på toget og skinnegangen er utsyrt med magneter som kan bytte polarisasjon. (se figur neste side).

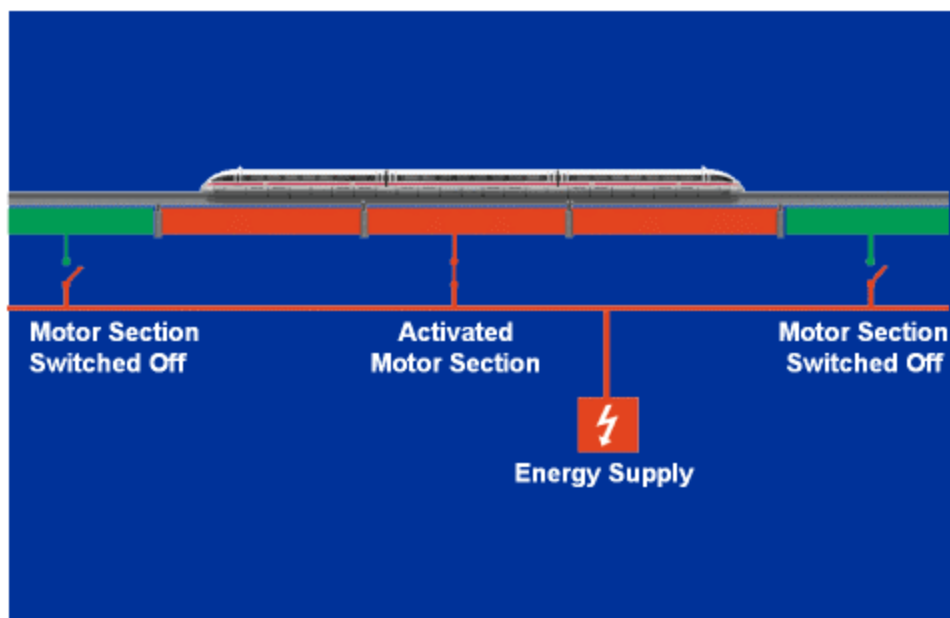


Dette skaper tiltrekkende og frastøtende krefter som driver toget fremover (oppover ut av arket). Magnetene på skinnegangen bytter polarisasjon (ved bruk av vekslestrøm) når toget har kommet slik at magnetene på toget er midt på de vekslende magnetene i skinnegangen. Dette skaper en kraft fremover. (Se figur under)



Ved å forandre frekvensen på vekslingen dvs strømmen kan man øke eller minske farten til toget. Jo større frekvens, jo større hastighet osv. En annen flott ting med fremdriften til tyske maglev toget er at det er kun det feltet av skinnegangen hvor toget befinner seg at strømmen trenger å være koblet til. Dette sparer man strøm på og er mer miljøvennlig. (se figur neste side.)

Longstator Propulsion Switching



Den synkroniserte linære motoren fungerer akkurat som en vanlig elektromotor der armaturet er rullet ut langs skinnegangen. Støttmagnetene fungerer som det roterende i elektromotoren. Når toget bremser fungerer dette som en generator som bringer strøm tilbake i systemet.

II: JAPANSK MODELL

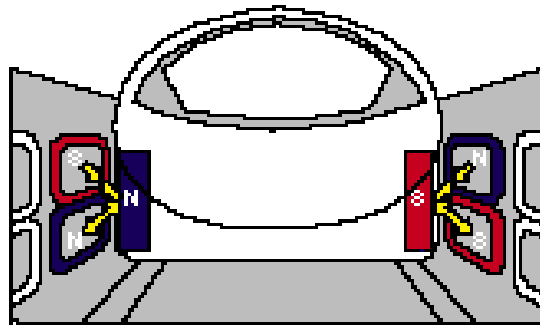
Den japanske modellen bruker et noe annet system selvom mye er det samme. Skinnegangen vi kjenner fra dagens jernbanetog og på en måte den tyske modellen, er byttet ut med en U-formet bane, lik en sklie. I denne sklien rutsjer toget fremover 10 cm over bunnen. (se figur)



Magnetene ombord på det japanske toget er såkalte supermagneter dvs. perfekte diamagneter. Dette blir de ved å kjøles ned til svært lave temperaturer ved bruk av flytende helium. (se kapittel 5: Superleder og Supermagneter.) Dette skaper svært sterke felt rundt toget og gjør at man må skjerme mennesker som er på vei av eller på toget. Dette gjør man ved bruk av sluser som man passerer gjennom beskyttet for det sterke magnetiske feltet. (Se figur)

Løftemekanisme:

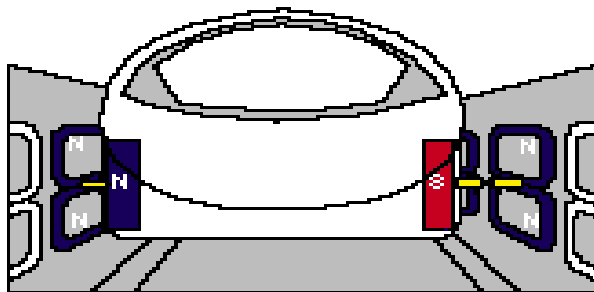
I den japanske modellen blir toget løftet opp av frastøtende og tiltrekkende magneter i togets rutsjebane. (se figur)



Som vist på figuren over trekkes og dyttes toget opp av magneter i siden av rutsjebanen. Det blir stabilt ettersom det trekkes og dyttes fra hver side av banen. Magnetiseringen skjer ved induksjon og blir ikke kraftig nok før toget har nådd en hastighet på ca 100km/h. 8-talls lignende coiler er satt inn i sideveggene på banen. Magnetiseringen skjer ved at magnetene på toget passerer i høy fart noen centimeter under midten av disse coilene slik at det induseres spenninger i de innbygde coilene i banen slik at det videre dannes magnetiske krefter som forklart over løfter toget. Frem til toget har nådd denne farten på ca 100km/h ruller den på hjul som løftes opp slik at toget svever fritt. Dette har også et sikkerhetsaspekt ved at dersom strømmen brytes ruller toget videre fremover.

Styremekanismen:

Det japanske systemet bruker frastøtende magneter til å styre seg bortover banen. Disse magnetene fungerer på samme måte som løfte magnetene men skaper ingen løft eller driv ettersom de står vinkel rett på toget når det er løftet. (se figur neste side)



På figuren vil toget svinge mot venstre dersom toget er på vei ut av arket.

Fremdrifts- og bremse-mekanismen:

Fremdriften til den japanske modellen er det samme systemet som fremdriften til den tyske modellen. (se over) Det handler om en såkalt lineær elektromotor. Dette er kanskje det mest interessante systemene for fremdrift av superhutige tog. Til forskjell fra elktromotoren der kraften jo overføres fra motorens roterende aksel til hjulene som videre driver kjøretøyet fremover, virker lineær elektromotoren langs en rett linje. Dette systemet brukte vår egen Kristian Birkeland for å konstruere sin elektriske kanon. Denne viste seg å være en flopp, men var med på få han (og Eyde) til å oppdage utvinnelsen av nitrogen.

III FORDELER ULEMPER TYSK VS. JAPANSK

Maglev togenes fordeler er mange. Et maglev tog er en svært behagelig måte å reise på. Dette fordi det først og fremst går fort. Du kan bringes direkte til bykjerne og maglev tog er svært stabilt uten risting eller lyd fra skinneganger. Maglev togene konkurrerer med fly på mellomdistanser. Med maglev tog trenger man ikke å sitte fastspent i et sete, men kan vrimle rundt i toget kupè. Ettersom det ikke koster like mye i drift å drive et maglev tog som et fly kan man også bruke mer penger på plass og komfort.

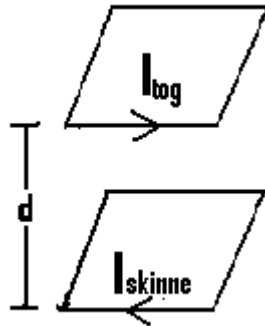
Høyhastighets Maglev tog består av forskjellige kombinasjoner for magnetisk levitasjon. I Tyskland har man prøvd ut flest av disse da forskningen på Maglev tog har forgått i lang tid. På mange måter kan det derfor virke som det tyske systemet. Slik er det iallefall i dag, men dersom man utvikler høytemperatur superledere har plutselig Japan et fortrinn.

Forskjellene mellom tysk og japansk metode er nokså store selvom prinsippene er like. Det tyske Transrapid bruker tiltrekende magneter fra under siden av skinnegangen til å løfte toget mens japanerne har en u-formet bane hvor magneter i siden løfter toget opp. En annen forskjell er at japaneren løfter toget 10 cm over banen mens tyske kun løfter toget 1 cm over skinnegangen. I de japanske togene induseres strømmen som løfter toget og blir dermed holdt konstant av superledere, for å indusere denne strømmen må det rulle de første meterene på hjul (for nærmere forklaring se punkt II). Det japanske systemet bruker også som sagt superleder teori og er i dag derfor dyrere enn det tyske

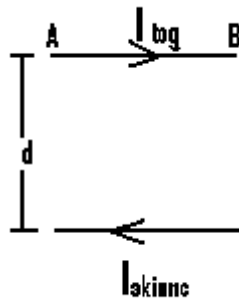
systemet. En annen svakhet ved den japanske modellen er det sterke magnetfeltet som blir rundt toget som gjør at personer må skjermes i sluser ved av og på stigning.

IV: ENKEL BEREGNING FOR MAGNETISK LØFTING AV TOG

Denne beregningen er gjort for å finne hvor mye strøm man trenger for å løfte et tog som veier 20 tonn og er 20 meter (cirka størrelser).



Vi tenker oss to coiler (her firkantet for enkelthetskyld. NB! Det blir likt for runde coiler). En montert i toget og en montert i skinnegangen. I hver av disse sier vi at det går en strøm I . Hvis vi kun ser for oss en av siden i hver av coilene har vi følgende.



Disse skaper nå magnetfelt og krefter som virker oppover og derfor holder toget oppe. NB! Kraften nedover virker mot bakken. Vi vet videre at denne strømmen må være stor for å motvirke tyngdekraften til toget. La oss regne litt på dette.

Den magnetiskekraften er gitt ved følgende:

$$F = I_{tog} \vec{L} \times \vec{B}$$

Der L er lengden og retningen av stykket AB . B feltet er rettet inn i papirplanet. B kan skrives som:

$$B = \frac{\mu_0 I_{skinne}}{2\pi d}$$

og B har altså retning inn i papiplanet slik at:

$$\vec{F} = I_{tog} \vec{L} \times \vec{B}$$

blir rettet oppover slik vi ønsker det.. Videre har vi da ved innsetting:

$$F = BIL = \frac{\mu_0 I_{skinne} I_{tog} L}{2\pi d}$$

Vi kan så regne videre for å finne strømmen når den magnetiske kraften oppover må være lik tyngdekraften nedover.:

$$F = \frac{\mu_0 I_{tog} I_{skinne} L}{2\pi d} = mg$$

$$I_{tog} I_{skinne} = \frac{2\pi d mg}{\mu_0 L}$$

Vi antar herifra at for å bruke minst strøm må strømmen i skinne og tog være lik. Har da:

$$I^2 = \frac{2\pi d m g}{\mu_0 L}$$

$$I = \sqrt{\frac{2\pi d m g}{\mu_0 L}}$$

Vi står nå igjen med kun konstanter som vi kjenner og kan derfor regne ut strømmen som trengs for å løfte et tog.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$$g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$m = 20 \text{ tonn} = 20 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$d = 0,01 \text{ m}$$

$$L = 20 \text{ m}$$

d er hvor høyt toget skal sveve altså 1 cm etter tysk modell. Får da:

$$I = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 0,01 \text{ m} \cdot 20 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20 \text{ m}}} = \sqrt{\frac{0,01 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{2 \cdot 10^{-7}}}$$

$$I = 22,1 \text{ kA}$$

Vi trenger altså 22,1kA for å holde et 20 kilo tungt og 20 meter langt tog svevende. Vi legger merke til at dersom toget var lengere og ikke nødvendigvis tyngere ville strømmen vært mindre. Etter japansk modell ville strømmen vær betraktlig større, men vi husker da at disse brukte superledere.

Merknader:

- Forenklingene vi har gjort ser bort i fra andre en vertikale krefter. Som vi har sett på tidligere trengs det også krefter til å styre og drive toget.
- Coilene i vår forenkling er ikke reel på den måten at vi setter strøm i både tog og skinne. Strømmen i skinnene induseres av toget som drives fremover.
- Vi bruker en rekke tilnærminger. Vi tenker bla. at coilen er uendelig stor.
- Likevel er beregningene gode nok til å være med her.

V: AVSLUTTNING

Maglev tog kan på mange måter være fremtiden innen mellomdistansetrafikk. Med en hastighet på 500 km/h vil toget på tid kunne reise avstander vi før var avhengige av flytrafikk på. Avstander på opptil ca 800 km vil ta kortere tid med tog en de i dag gjør med fly. Dette er selvfølgelig etter at man beregner litt lengere tid frem og tilbake fra flyplass og tid du bruker på innsjekking. Tysk og Japansk modell er på mange måter like og spesielt i prinsipene. Noe er likevel forskjellig og i dag er den tyske den som er best utviklet og klar for dagens marked. Dersom man finner opp gode høytemperatur superleder har den Japanske modellen et forsprang ettersom den da vil ha lavere strømforbruk.

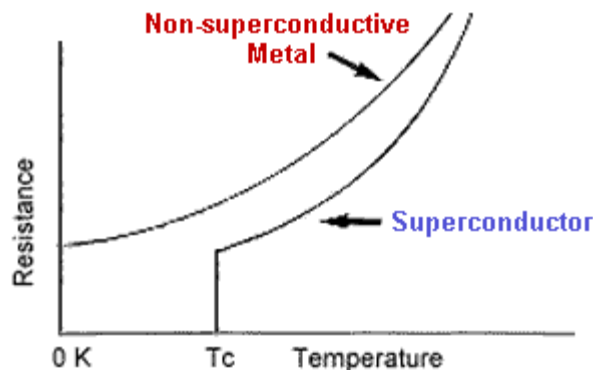
5: SUPERLEDERE OG SUPERMAGNETER

Den japanske modellen bruker superledere til å skape elektromagnetene som er med til å styre, drive og løfte toget. Superleder vil si metaller eller andre (keramiske) stoffer som blir uten motsand når de kjøles ned til en hvis temperatur. Denne temperaturen kalles kritisk tempraur. Supermagneter er et kallenavn for samme fenomen men ved at man setter et ytemagnetfelt på superledere som ved sin kritiske tempratur blir en perfekt diamagnet. Dette forklares mer i kapittel 6: Forsøk: Meissner effekt.

Superleder fører strøm også når strømkilden er fjernet (fordi det ikke er noen resistans) og er derfor godt egnet til å lage stabile eltromagneter. Det finnes to typer superledere, henholdsvis type 1 og type 2. En av forskjellene på disse er at det for type 2 er høyere kritisk tempraturen enn hos type 1. En annen forskjell er at type 1 som regel er vanlige metaller som fører strøm ved romtemperatur mens type 2 som regel er keramiske stoffer som ved romtemperatur nærmest er isolatorer.

I: TYPE 1 SUPERLEDERE

Type 1 superleder var de som først ble oppdaget. Heike Kamelinh-Onnes oppdaget at kvikksølv mistet all sin motstand når det ble kjølt ned til 4,15 K ved hjelp av flytende helium. Det som var rart med oppdagelsen var at det brått mistet all sin motstand. kanskje er litt rart med superledende stoffer er at de svært brått mister sin motstand (se figur.)



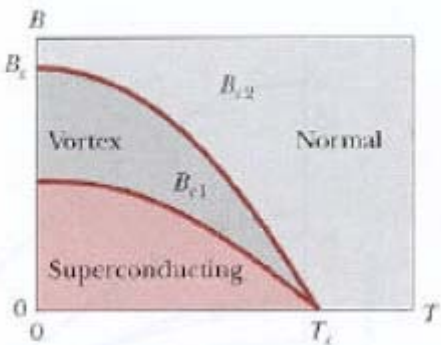
Den kritiske tempraturen varierer fra stoff til stoff, men alle type 1 superledere kjennetegnes ved at de har lavere kritisk tempratur enn 8 K Dersom disse stoffene (metalene) blir utsatt for et ikke for stort magnetfelt oppfører deg seg altså som perfekte diamagneter. Men dersom dette magnetfeltet igjen er for stort går stoffet tilbake til normal tilstand, ergo ikke superledende. Den kritiske temperaturen synker dersom magnetfeltet øker. Det finnes altså en kritisk verdi for magnetfeltet som blir påtrykket superlederen. Denne er avhengig av både temerauren rundt og stoffets kritiske temperatur. På grunn av det kritiske feltet får vi også en kritisk verdi for hvor mye strøm som kan passere gjennom superlederen. Dette fordi det skapes magnetisk felt når det går en strøm i en leder dette følger av Amperse lov for en strømførende leder med radius d .

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi d}$$

II: TYPE 2 SUPERLEDERE

I 1953 målte B.T Matthias den kritiske temperaturen til niobium-tinn til 18 K. Dette var starten på oppdagelsen av Type 2 superleder. Type 2 superledere er som regel legeringer av metalloksider og keramer dvs isolatorer ved romtemperatur. Dette gjør også til at de er hardere enn det type 1 superledere er. Type 2 superleder tåler også sterke magnetfelt til en viss grad og derfor også store strømstyrker. Mens type 1 superledere har en godt utviklet teori er det ikke ennå noen god forståelse for hvordan type 2 superledere fungerer.

Type 2 superledere har to kritiske verdier for magnetfeltet det tåler. En kritisk verdi (lav) for når superlederen oppfører seg som en type 1 superleder og en ved når den slutter å oppføre seg som superleder (se figur.) Når en type 2 superleder er i mellom disse to kritiske verdiene opphører det ikke å være superledende men er i en tilsand i mellom disse (her vortex).



Selvom type 2 superlederen ikke er superledene slik vi kjenner det fra type 1 superledere beholder type 2 superlederen de fleste ev egenskapene vi har fra type 1. Det som gjør at den ikke er "normalt" superledende i denne tilstanden er at den slipper gjennom noe av magnetfeltet i spesielle virvler. Magnetfeltet er altså ikke lik null i superlederen. Likevel har vi superledning i resten av materialet. Størrelsen på disse virvelene som har magnetisk fluks er svært små, men blir ikke større dersom man øker magnetfeltet. Tettheten derimot blir større og når tettheten er så stor at virvelene overlapper hverandre opphører stoffet å være superledende. På grunn av at disse virvelene blir påvirket av strømmene gjennom superledere bruker de energi på å flytte seg, dette energiforbruket gjør at metallet får resistanse.

På grunn av disse virvelen beskrevet i avsnittet over får vi bruk for en egenskap som blir kalt pinning. Pinning løser problemet hvor superlederen får resistanse. Pinning er rett og slett å forurenses stoffet slik at virvelene dannes i disse forurensede områdene å låser til de. Når det nå går strøm får ikke virvelen flyttet seg som igjen koster energi og dermed resistanse. Dette skaper et stoff hvor noen deler (de forurensede) ikke er superledende og resten er superledende.

Høy temperatur superledere er en del av type 2 superledere og er type 2 superledere med høye kritiske temperaturer, derav navnet. Til å kjøle ned høy temperatur superledere holder det i mange tilfeller å bruke flytende nitrogen som er svært mye enklere og billigere å produsere enn flytende helium. Høy temperatur superleder har de samme egenskapene som de andre type 2 superlederene, men er fullstendige isolatorer ved romtemperaturer. Den høy temperatur superlederen med høyest målte kritiske temperatur i 1999 hadde en kritisk temperatur på cirka 160 K, men å finne stoffer som er superledende ved romtemperatur er langt i fra umulig. I de siste tiårene har flere priser deriblandt Nobel's fysikk pris gått til personer som har forsket på nettopp dette feltet

III: BRUKSOMRÅDER

Superledende materialer kan brukes og brukes til mange ting. Vi må tilbake til den viktigste egenskapen til superledning nemlig at vi ikke har resistans. Dette betyr at vi kan lede strøm uten energi tap. I dag bruker vi høy spenning i ledninger for å begrense energi tapet i strømførende ledninger over store strekninger mellom kraftanlegg og hustand. Før vi kan bruke denne elektrisiteten fra høyspenten går den gjennom trafoer som senker spenningen og øker strømmen. I disse trafoene er det et energi tap på ca 30%. Vi kan lett tenke oss at dersom vi kunne sendt 230 volt direkte fra kraftanlegg til husstand uten energitap ville vi kunne spart ufattelig mye energi og derfor penger samt miljø. For å få til dette må vi kunne bruke superledere ved temperaturer rundt 0°C. Ved bruk av superledere på samme måte kunne man også f.eks oppnådd superraske datamaskiner.

Den viktigste bruken av superledere idag er superledende magneter aka supermagneter Vi har i denne oppgaven sett mye på Maglev hvor den japanske modellen bruker nettopp supermagneter. Det største bruksområder til supermagneter i dag er nok MR. Magnetisk resonans blir brukt til å skape bilder av ting vi ikke kan se på med det blotte øyet. Ved bruk av MR skaper man et bilde ved å utsette vevet i kroppen for sterke magnetfelt som ve forskjellige frekvenser gjør at det sendes ut et signal. Ettersom det sendes ut forskjellige signaler for forskjellige atomer kan man samle inn signalene slik at de skaper et bilde som en datamaskin kan tegne opp. MR er i dag bruk i de aller fleste sykehus. For å skape sterke og uniforme nok magnetfelt bruker man supermagneter. Vært år bruker man cirka 60 millioner slike undersøkelser bare i Norge.

IV: AVSLUTTNING

Det finnes i dag svært mange forskere som forsker på dette feltet. De fleste ute etter å knekke kode som gjør det mulig å finne brukbare superledende materialer i romtemperatur. Superledning har mange spennende bruksområder og er helt klart et fremtidens materiale.

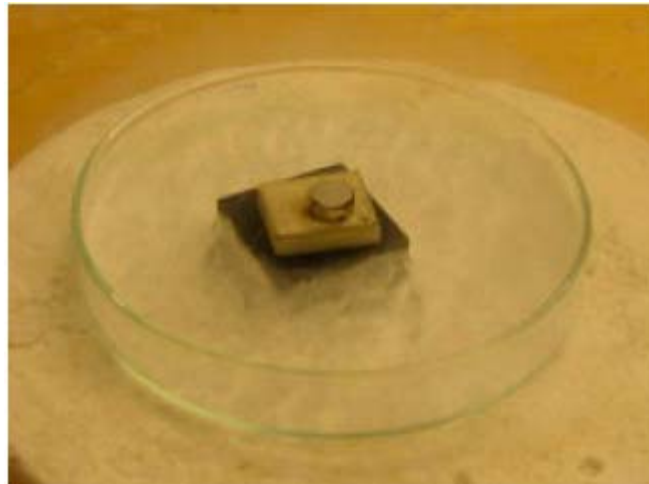
Høy temperatur superledere kan lede til mange viktige teknologiske fremskritt. Som tidligere nevnt har vi superraske datamaskiner, lette og svært effektive elektro motorer mm. . Problemene med de stoffene som til nå er funnet med høye kritiske temperaturer er at de har små eller ingen bruksområder. Spesielt tenker vi da her på mekaniske egenskaper da dette ville vært praktisk til bruk i Maglev teknologien og til bruk i f.eks. datamaskiner, kraftoverføring osv. Et annet problem er at de høy temperatur superledere vi har i dag har svært dårlig bærevne. De knekker rett og slett fort.

6: FORSØK: MEISSNER EFFEKT

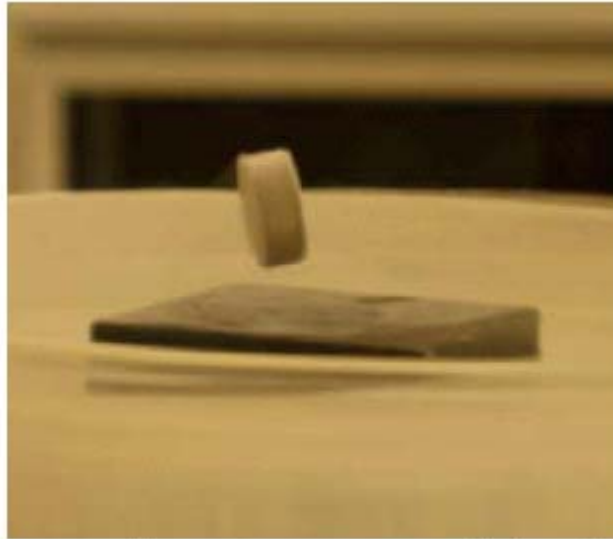
Det ble gjennomført et forsøk i forbindelse med prosjektet. I dette forsøket så vi på magnetisk superledning på mange måter likt med Meissner's oppdagelse. Meissner brukte i sin tid det vi idag kaller en type 1 super leder, vi brukte i vårt forsøk en type 2 superleder av YBaCuO . Denne superlederen hadde en kritisk temperatur på 92 K. Forsøket ble gjennomført av et stipendiat innen feltet, vi andre observerte.

Fremgangsmåte:

Vi la superlederen i et lite glasskar. Oppe på denne la vi et stykke med noe som ikke var superledende og oppå dette igjen la vi en permanent magnet (se figur). Vi kjølte så ned den superledende biten med flytende nitrogen. Når superlederen var nok kjølt ned fjernet vi den midterste biten med ikke-superledende materiale.



Den permanente magneten svedde nå over superlederen. Vi kunne nå prøve å snurre den svevende magneten denne snurret da nærmest friksjonsfritt. Vi prøvde dessuten å flytte på magneten, men oppdaget fort at den ville tilbake i sin likevektsposisjon. Dersom vi trykket eller dro hardt på den permanente magnet kunne vi flytte likevektspunktet.



Teori:

Når superledern blir kjølt ned til sin kritiske temperatur setter den opp et magnetfelt for å kansellere det ytre magnetfeltet. Det skal ikke være noe magnetfelt inne i superlederen. Noe magnetfelt er det likevel inne i superlederen, men disse feltene er kvantiserte slik at vi får de virvelene slik det er forklart i 5: Superledere og Supermagneter. Pinningen gjorde slik at den permanente magneten hadde en likvekts posisjon. Disse magnetfeltene fungerer som små tornadovirvler eller gummistrikker som holder den permanente magneten på plass. Det kreves energi for å flytte på disse gummistrikkene og magneten vil derfor være på sin bestemte plass. Det går likevel an å flytte disse ved å bruke makt på magneten. Da forandrer man kvantiseringen av superlederen.

7: KILDER

Følgende kilder i bok eller artikkel form har blitt brukt:

- Serway, Moses, Moyer; Modern Physics, 2nd edition, 1997
- Young & Freedman; University physics with modern physics, 10th edition, 2000
- Marriott; The all Colour Book of Supermachines, 1989
- Rohlf; Modern Physics from α to Z^0 , 1st edition, 1994
- Hanevik; Maglevtog, Prosjekt i FY1303, 2003
- Meltzer, Henriksen; Superledere, Prosjekt i FY1303, 2003
- Wang, Ren, Zhu, Jiang, Wang, Shen, Song; High temperature superconducting Maglev equipment on vehicle, 2003
- Lee; Mechanism of the magnetic effect occurrence of YBaCuO superconductor , 2004

Følgende verdensvevsider har blitt brukt:

- www.maglev.com
- www.superconductors.org
- www.phys.ntnu.no/brukdef/prosjekter/super/
- www.sciencedirect.com
diverse artikler se over.
- www.howstuffworks.no
- www.rtri.or.jp

8: KONKLUSJON

Jeg har nå gjennomført et dypdykk i Maglev teknologien og fått et innblikk i hvordan superledere fungerer. Jeg har styrt unna den vanskeligste matematikken samt teorien og prøvd å holde meg på et nivå jeg føler jeg har mestret godt. På denne måten har jeg kunnet hengt med på bergninger og forstått hva som prinsipielt skjer i og rundt Maglev tog og superledere. Jeg har brukt mye tid på å forstå hvordan og hvorfor istedet for å skrive mye.

Dette har vært et spennende og interresant prosjekt og man kan bare glede seg til videre forskningsresultater innen nettopp dette feltet.

X _____ X

B j ø r n T e r j e S m e s t a d

Radiomottaker

Martin Børstad Eriksen

marberi@stud.ntnu.no

Kjetil Liestøl Nielsen

kjetini@stud.ntnu.no

8. november 2004

Innhold

0.1	Abstract	1
0.2	Radioens opprinnelse	2
I	Hoveddel	3
0.3	Modulasjon	4
0.3.1	Frekvensspekter	5
0.4	Spole mottaker	7
0.5	Frekvensvelger	8
0.5.1	Induktansen til en solonoide	13
0.6	Energibånd og halvledere	17
0.6.1	Doping	18
0.7	Dioder	19
0.7.1	P-N overgang	19
0.7.2	Toppdetektor i AM-kretser	24
0.8	Transistorer	26
0.8.1	Forsterker	28
0.8.2	NPN transistor	30
0.8.3	Hybrid- π modell	31
0.8.4	Emitterfølger konfigurasjon	37
0.8.5	Forspenning av transistorer	39
0.9	Utførelse	42
0.9.1	Antennen	42
0.9.2	Frekvensvelgeren	42
0.9.3	Toppdetektor	44
0.9.4	Felles emitteren	44
0.9.5	Emitter følgeren	45
0.10	Resultater	47
0.11	Diskusjon	49
0.11.1	Antenna	49
0.11.2	Frekvensvelgeren	49

0.11.3	Toppdetektor	49
0.11.4	Måling av spenningsforsterkning	50
0.11.5	Måling av strømforsterkning	51
0.12	Loddingen	51
II	Avslutning	52
0.13	Konklusjon	53

0.1 Abstract

Rapporten er resultatet av prosjektarbeidet i FY1303 ved NTNU høsten 2004. Målet var å forstå grunnleggende radioteori og forsøke å konstruere en enkel AM krets. Oppgaven er praktisk rettet og denne rapporten tar for seg teorien.

En enkel radio kan deles opp i forskjellige deler. Signalene kommer inn og blir tatt imot på antennen. For en AM kanal er lyden lagre i amplituden til det innkommende signalet. En toppdetektor gjør om signalet til lydbølger. Lyden sendes gjennom en spenningsforsterker og en strømforsterker og ut til et høytalerelement.

Egenskapene til radioen kan forbedres ved å gjøre endringer i de ulike kretsene. Forbedringer og valg av komponent verdier er diskutert. Til slutt i oppgaven er den praktiske konstruksjonen oppsummert.

0.2 Radioens opprinnelse

Vi kan si at radioens historie begynner å begynne rundt 1860 da den skotske fysikeren James Clerk Maxwell forutsa eksistensen av radiobølger. Senere i 1886 klarte den tyske fysikeren Heinrich Rudolf Hertz å produsere radiobølger ved å bruke periodiske elektriske strømmer med veldig høy frekvens. I en demonstrasjon viste han hvordan variasjonen av strømmen sendte ut elektromagnetiske bølger med samme frekvens. Men at radiobølger var et virkemiddel som kunne brukes til kommunikasjon, ble først oppdaget i 1893 da russeren Nikola Tesla for første gang holdt en offentlig demonstrasjon. To år etter klarte også italieneren Guglielmo Marconi å sende og motta et radiosignal basert på arbeidet til Maxwell og Hertz. Radiosignalet inneholdt bokstaven S og han var ikke i tvil om radiobølgenes praktiske betydning. Det første signalet gikk bare rundt 100m, men det tok ikke lang tid før han klarte å sende og motta radiosignaler på flere mils avstand. I 1899 klarte han å sende et radiosignal over den engelske kanalen, og i 1901 var den kommet over atlantehavet. Det tok ikke mange år før radiotelegrafering ble et vanlig kommunikasjonsmiddel blant annet i skip.

Det er diskusjon om hvem som var den første som klarte å sende stemmer ved hjelp av radiobølger, men mange anser Reginald Fessenden til å være den første. I 1902 klarte han for første gang å sende stemmer ved hjelp av radiobølger til en mottaker 1500m unna. Metoden han oppfant for å sende lyd var am eller "amplitude modulation" og i 1906 stod han for historiens første kringkasting, der han klarte å sende fiolinmusikk og bibellesing som man kunne motta flere kilometer unna.

Am hadde derimot mange ulemper, blant annet at en am-bølge er veldig mottakelig for støy. Dette skulle forandre seg med Edwin Armstrong som fant opp en ny måte å modulere på FM, eller frequency modulation. Dette er den formen for modulasjon som er mest vanlig i dag.

Del I

Hoveddel

0.3 Modulasjon

For at radiobølger skal kunne sende informasjon må de moduleres, dvs at vi forandrer radiobølgens utseende slik at den vil inneholde den ønskelige informasjonen. Som sagt er det mange måter å gjøre dette på, men vi skal konsentrere oss om metoden som ble oppdaga av Reginald Fessenden; amplitude modulation.

En umodulert radiobølge kalles en bærebølge fordi den skal bære"med seg den informasjonen vi ønsker. Amplitude modulation går ut på at vi forandrer amplituden til bærebølgen til å forandre seg samme frekvens som f.eks et lydsignal, som vil være av mye lavere frekvens.

La oss se på en umodulert bærebølge som kan beskrives ved

$$v_c = a_c \cos \omega_c t \quad (1)$$

der ω_c er vinkelfrekvensen til bærebølgen. Vi vil nå modulere den med en moduleringsfunksjon.

$$a_m = 1 + m \cos(\omega_m t) \quad (2)$$

der ω_m er vinkelfrekvensen til modulasjonsbølgen og m er $\frac{a_m}{a_c}$ og kalles modulasjonsindeksen. For å få en modulert bølge, multipliserer vi bærebølgen med modulasjonsfunksjonen.

$$v = a_m v_c = a_m (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t \quad (3)$$

Det fins mange fordeler og ulemper med am modulasjon. Fordelen er at am-sendere og mottakere er relativt enkle å konstruere. Ulempene er som sagt at en ambølge er veldig mottakelig for støy. En av årsakene til dette, er at det er mange naturlige fenomen som virker som en am modulator. Derfor vil en slik bølge bli modulert av andre faktorer slik at bølga som blir mottatt, inneholder støy.

FM modulasjon går ut på at man forandrer frekvensen til bærebølga, slik at frekvensen varierer i takt med frekvensen til modulasjonssignalet, og dermed kan bærebølgen bære med seg den ønskelige informasjonen. Vi går ikke nærmere inn på FM i denne rapporten.

0.3.1 Frekvensspekter

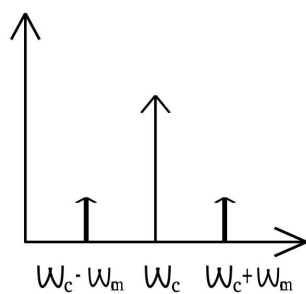
Funksjoner som er en sum av flere trigonometriske funksjoner med ulike frekvenser kan bli plottet grafisk slik at vi ser hvor mye av hver enkelt frekvens som er inneholdt i det endelige uttrykket.

La oss se på den modulerte bølga. Dersom vi bruker at $\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}\cos(a+b) + \frac{1}{2}\cos(a-b)$ kan vi skrive om den modulerte bølga slik at den blir

$$v = a_m \cos(\omega_c t) + \frac{ma_m}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t + \frac{ma_m}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t \quad (4)$$

Den moduserte bølga kan altså beskrives som en sum av tre cosinusfunksjoner med forskjellig frekvens. Dersom f.eks $m = 0, 2$, kan vi gjøre en fourieromvend-
ing og frekvensspekteret blir da

Hvorfor dette er viktig ser vi først når vi kommer til RCL-kretsen.



Figur 1: Modulert bølge

0.4 Spole mottaker

Elektromagnetiske bølger består både av et endrende elektriskfelt og et endrende magnetfelt. Mange mottakere, som f.eks en dipol antenne er basert på endringer i det elektriske feltet. En spoleantenne bruker endringene i magnetfeltet for å plukke opp signalet.

Fluks er definert som $\Phi = \vec{B} * \vec{A}$, der $\vec{A}$ er gitt ved en høyrehåndsregel. Spenningen indusert i en spolesløyfe følger av Faraday-Henry's lov:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} * d\vec{A} \quad (5)$$

Siden spolen består av N vindinger er fluksen $\Phi = \vec{B} * \vec{A} * N$. Vi har følgende uttrykk for magnetfeltet:

$$\vec{B} = B_0 \cos(-\omega * t)_{\perp \hat{v}} \quad (6)$$

Der $\hat{v}$ er bølgens forplantingsretning. Bruker Faraday-Henrys lov på uttrykket for magnetfeltet. Regner magnetfeltet for konstant over hele inngangsarealet til spolen.

$$\epsilon = -N * A * \frac{\partial}{\partial t} (B_0 \cos(-\omega * t) \perp \vec{v}) \quad (7)$$

$$\epsilon = -N * A * B_0 (-\omega) (-\sin(-\omega * t + \phi)) \quad (8)$$

$$\epsilon = -N * A * B_0 * \omega \sin(-\omega * t + \phi) \quad (9)$$

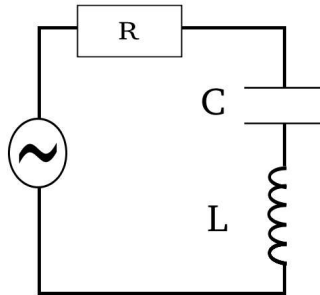
$$(10)$$

0.5 Frekvensvelger

Sendte signaler blandes ofte med støy fra andre sendere. Det er behov for å lage en krets for å filtrere bort uønskede frekvenser. Igjen står man med det sendte signalet.

Radioantennene mottar mange forskjellige stasjoner og sendinger. Hvordan kan vi filtrere bort alle andre signaler enn den ønskede frekvensen? Problemet kan løses ved en RCL-krets.

RCL-kretsen inneholder, som navnet sier, en kapasitans C , en spole med induktans L samt en motstand R . La oss se på en krets der elementene er koblet i serie, og med en ytre påtrykt spenning fra en vekselspenningskilde $V = V_0 \cos(\omega t)$, der ω er vinkelfrekvensen.



Figur 2: RCL-kretsen i serie

Vi ønsker å finne et uttrykk for den totale strømmen som funksjon av frekvensen. Kompleksregning og bruk av impedansen Z , som er en kompleks størrelse er tidsbesparende. Vi skriver derfor spenningen, strømmen og ladningen i kretsen på kompleks form:

$$V = V_0 * e^{i\omega t} \tag{11}$$

$$\tag{12}$$

Der realdelen av den komplekse notasjonen er den fysiske komponenten i kret-

sen. Impedansen er definert som $Z = \frac{V}{I}$. Impedansen er da definert som $Z = \frac{V}{I}$ der $|Z| = \frac{V_0}{|I_0|}$. På kompleks form kan Z skrives:

$$Z = |Z| * e^{i\alpha} \quad (13)$$

For å finne spenningsfallet over kretsen bruker vi Kirtchovs spenningsregel som gir:

$$V = I * R + \frac{Q}{C} + L * \frac{d}{dt}I \quad (14)$$

For å finne impedansen for å kunne uttrykke Q og $\frac{d}{dt}I$ ved I . Dette gjør vi ved derivasjon.

$$\dot{Q} = i\omega Q_0 * e^{i(\omega)t} \quad (15)$$

$$= i(\omega)Q \quad (16)$$

$$= I \quad (17)$$

$$\rightarrow \quad (18)$$

$$Q = \frac{I}{i\omega} \quad (19)$$

$$\dot{I} = i\omega e^{i\omega t} \quad (20)$$

$$= i\omega t \rightarrow V = I * R + \frac{I}{i\omega C} + i\omega IL \quad (21)$$

$$Z = \frac{V}{I} \quad (22)$$

$$= R + \frac{1}{i\omega C}(i\omega L) \quad (23)$$

$$= R + i(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (24)$$

$$(25)$$

Dette gir den totale strømmen.

$$I = \frac{V}{Z} \quad (26)$$

$$= \frac{V_0 * e^{i(\omega)t}}{|Z| * e^{i(\alpha)}} \quad (27)$$

$$|Z| = \sqrt{\operatorname{Re}(Z^2) + \operatorname{Im}(Z^2)} \quad (28)$$

$$= \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{i\omega C})^2} \quad (29)$$

Man ser strømmen er størst for minst impedans. Maksstrøm får en for $\operatorname{Im}(Z)=0$.

$$\omega L - \frac{1}{i\omega C} = 0 \quad (30)$$

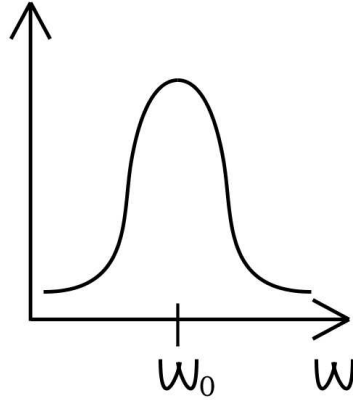
$$(\omega)^2 = \frac{1}{LC} \quad (31)$$

I følge ligningene over er strømmen størst når frekvensen er: $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$. Ved denne frekvensen er systemet i resonans og strømmen har en maksimumsverdi. Tilhørende frekvens kalles derfor resonansfrekvensen. Grafisk fremstilling av spenningsutfallet som funksjon av vinkelfrekvensen gir resonanskurva:

Bredden til resonanskurven varierer for ulike verdier av R og L. Båndbredden er definert som avstanden mellom de stedene hvor spenningsfallet er halve verdien til det maksimale spenningsutfallet. For små verdier av R kan båndbredden skrives som:

$$b = \frac{R}{L} \quad (32)$$

Her kommer viktigheten av frekvensspekteret til modulasjonsbølgen inn. Vi ser av likning (4) at en modulasjonsbølge består av tre frekvenser, der alle frekvensene vil inneholde informasjon. Normal tale vil variere i frekvens fra omtrent 200 Hz til 5 kHz. Det betyr at for at vi skal kunne få all informasjonen



Figur 3: Resonanskurve

(talen) ut av modulasjonsbølge, så må båndbredden være så stor at vi får med oss bærefrekvensen pluss-minus 5 kHz. Dersom båndbredden er for smal, vil vi miste mye av lydinformasjonen. Men vi ønsker kun å høre lyden fra én stasjonen og ikke litt av stasjonene i naboområdet i tillegg, og derfor må heller ikke båndbredden være for bred. Pga den relativt store båndbredden som trengs for å få inn en stasjon, vil vi derfor også få inn mye støy som setter ned lydens kvalitet.

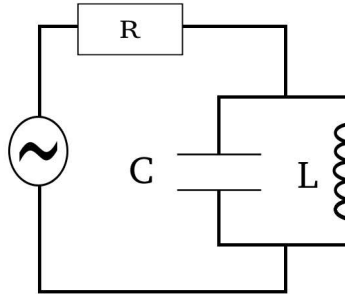
Resonansfrekvensen kan styres dersom kapasitansen i kretsen er variabel. Endring av spolens induktans ville også forskyvet resonansfrekvensen, men kapasitanser er lettere å variere enn induktanser.

I AM-radioer kobles normalt kondensatoren og spolen i parallell og ikke serie.

Ved å regne på impedansen for en slik krets, blir det fort åpenbart:

$$= R + \frac{i\omega L}{1 - (\omega^2)LC} \quad (33)$$

$$|I| = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \frac{(\omega L)^2}{1 - \omega^2 LC}}} \quad (34)$$



Figur 4: RCL-krets i parallell

Her ser vi at resonans-frekvensen med LC i parallell gir det motsatte av resonans-frekvensen med LC i serie. Resonansfrekvensen gir her uendelig stor impedans, som gir null strøm. Dvs at vi har null spenningsfall over motstanden. Dette medfører at hele spenningsfallet i kretsen må ligge over knutepunktene til parallell-koblinga til kondensatoren og spolen. Vi lar derfor utsignalet være spenningsfallet over kondensatoren og spolen, siden det er der resonansfrekvensen gir størst spenningsfall.

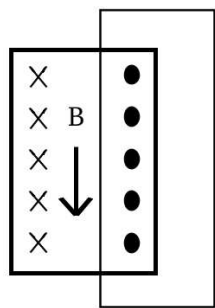
0.5.1 Induktansen til en solonoide

En strømsløyfe setter opp et magnetisk felt, som igjen induserer en strøm i sløyfen som satt opp magnetfeltet. Dette fenomenet kalles selvinduktans og er viktig for hvordan spoler virker i elektriske kretser. Hvor stor selvindusert strøm en spole får avhenger av de fysiske egenskapene til spolen. Selvinduktansen er definert som:

$$\phi_B \equiv L * I \quad (35)$$

Hvorfor er selvinduktansen definert slik? Ved å ta en titt på 1 strømsløyfe kan vi overbevise oss om at dette er en fornuftig definisjon. Vi skal ikke gå videre i det sporet, men heller se på induktansen til en solenoide. Induktansen karakteriserer en spole og inngår i utregningen av impedansen til en krets med en spole. I vårt tilfelle ønsker vi å konstruere en RCL krets med resonans for en gitt frekvens. Dersom resistansen og kapasitansen også er kjent har vi en verdi for induktans til spolen. Vår spole skal være en solenoide. Vi er avhengig av å finne et forhold mellom de fysiske egenskapene til solenoiden og induktansen dersom vi skal regne ut en teoretisk verdi/overslag av induktansen.

Induktansen til en ideel solenoide:



Figur 5: Amperekurve i ideal solonoide

Legger en amperekurve som vist på figuren over. Kun linjestykket inne i solenoiden gir et bidrag. Utenfor er feltet 0 og de to kortsidene gir motsatt

bidrag.

$$B * L = I_{in} \quad (36)$$

$$B * L = \mu_0 N * I I = \frac{B * l}{\mu_0 * N} \quad (37)$$

Flux'en kan skrives på to måter:

$$\phi = A * B * N \quad (38)$$

$$\phi = L * I \quad (39)$$

$$(40)$$

Kombinerer de to måtene å skrive flux'en på med uttrykket for I:

$$A * B * N = L * I \quad (41)$$

$$A * B * N = L * \frac{B * l}{\mu_0 * N} \quad (42)$$

$$L = \mu_0 A \frac{N^2}{l} \quad (43)$$

For å konstrueres en spole trenger vi en metalltråd. Tråden må ha en radie, men har valg av radie noen praktisk betydning?

Radien inngår ikke i uttrykket for induktansen til en solenoide (43). På hvilken andre måter kan radien i tråden påvirke kretsen vår? Tråden gir en resistans, denne er igjen avhengig av radien. Resistiviteten er definert som:

$$\rho \equiv R \frac{A}{L} \quad (44)$$

for kobberledninger, som de har på elektronikkverkstedet, har vi følgende materialveridier:

Materiale	Resistivitet, $\rho, (\omega * m)$	Konduktivitet $\sigma, (\omega * m)^{-1}$
Kobber	$1.71 * 10^{-8}$	$5.81 * 10^{-7}$

Omformer definisjonen av resistiviteten til å finne et uttrykk for resistansen:

$$R = \frac{\rho * L}{A} \quad (45)$$

Hvordan forandres resistansen dersom arealet dobles?

$$R_1 = \frac{\rho * L}{A_0} \quad (46)$$

$$R_2 = \frac{\rho * L}{2 * A_0} \quad (47)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{2} \quad (48)$$

Resistansen halveres når arealet dobles. For å minske resistansen i spolen kan vi bruke en tykkere tråd. Nå forholdet mellom radie/areal er kjent blir spørsmålet: hvor stor resistans kan vi ha i kretsen vår? Enten kan vi undersøke hvor stort effekttap kretsen vår vil tåle, eller sammenligne vår resistans med ferdiglagde komponenter. Vi valgte å sammenligne med denne komponenten ¹:

	Induktans	DC-resistans	Dimensioner	Artikkel-	Pris per stykk
Type	mH	Ω	mm	nummer	i NOK
LSIP-56	0,56	0,30	59×19	58-300-70	41.00

Finner en formel for radien når resistansen er gitt fra (??):

¹[4] se: induktanser -> spoler -> luftfylt høytaler spole

$$A = \frac{\rho * L}{R} \quad (49)$$

$$\pi r^2 = \frac{\rho * L}{R} \quad (50)$$

$$r = \sqrt{\frac{\rho * L}{R\pi}} \quad (51)$$

Regner ut

Spolen vi sammenligner har $R = 0,3\Omega$. tallverdien til r:

$$r = \sqrt{\frac{1,7 * 10^{-8} \Omega M * 24m}{0,3\Omega * \pi}} \quad (52)$$

$$r = 6,6 * 10^{-4}m \quad (53)$$

Dersom vi velger en kobbertråd med større radie enn 0,66 mm vil vi få mindre resistans i spolen enn ved å kjøpe tilsvarende fra Elfa.

0.6 Energibånd og halvledere

Løsninger av Schrøder likningen viser at elektronene i atomer kun kan ha gitte energier. Dvs at energien er kvantisert i nivåer. F.eks i et hydrogen er det laveste energinivået på $-13,6\text{eV}$. Men dersom man fører to like atomer sammen, vil de ha ulike energinivåer pga krefter dem i mellom. Dersom man setter sammen mange nok atomer, vil energibåndene bli så tette at det danner bånd, dvs kontinuerlig fordelinger av energier. Det vil fortsatt være energier elektronene ikke kan ha, og disse områdene kalles gap. Det nederste båndet kalles valensbåndet, mens det neste kalles ledningsbåndet.

I en isolator vil hele valensbåndet være fylt av elektroner, mens ledningsbåndet vil være tomt for elektroner. I en leder derimot, vil ledningsbåndet være delvis fylt med elektroner slik at det kan gå en strøm gjennom.

Dersom vi nå skulle sette en spenning over en leder og en isolator vil vi se at for at elektronene i isolatoren skal kunne bevege seg, må de forflytte seg over i det forbudte energinivået, altså går det ingen strøm gjennom isolatoren. I lederen derimot, så er ledningsbåndet delvis fylt med elektroner slik at de elektronene kan forsette videre opp i ledningsbåndet. Det går altså en strøm gjennom lederen. Så hva med en halvleder?

I en halvleder vil energigapet mellom valensbåndet og ledningsbåndet være så lite (ca 1eV) at ved gitte temperaturer (f.eks 300K) kan elektronene eksitere fra valensbåndet til ledningsbåndet.

Når et elektron eksiterer til ledningsbåndet, vil det etterlate seg en fri plass i valensbåndet. Dette kalles et hull, og selv om det kun er et fravær av et elektron, vil det oppføre seg som om det skulle vært en positivt lada partikkel.

Si nå at vi setter på en spenning over halvlederen.

Vi får da en dobbel strøm. Elektroner mot høyre og hull mot venstre. Begge vil bidra til den totale strømmen, som vil være summen av elektron- og hullstrømmen.

Under ligger en tabell som viser energigapet hos noen utvalgte halvledere ved temperatur 300K .

Halvledere	eV
Silicon	1,14
Germanium	0,67
Tellurium	0,33
Indium antimonide	0,23

0.6.1 Doping

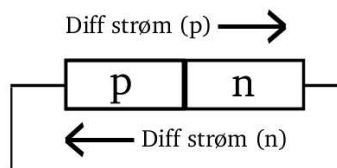
Hitil har vi sett på rene halvledere. Ta f.eks silisium. I silisium er ledningsbåndet praktisk talt tomt slik at det er ingen god leder av elektroner. Dette kan man forandre ved å forurense halvlederen. Et silisium atom har fire valenselektron som danner bindinger med fire andre silisium atomer, Men hva skjer dersom vi bytter ut noen silisium atomer med f.eks arsenic som har fem valenselektron. Først så vil fire av arsenic elektronene danne bindinger med fire andre silisium atomer eller elektroner om du vil. Det femte elektronet er veldig løst bundet til atomene, og dette elektronet vil okkupere et energinivå som ligger like under ledningsbåndet til silisium. Derfra kan det lett eksitere til ledningsbåndet og vil derfor øke ledningsevnen til halvlederen. Dette kalles doping, og arsenic atomet blir kalt et donor-atom siden det donerer bort et elektron til valensbåndet. Ladningsstrømmen i halvlederen vil for det meste bestå av elektroner. Slike halvledere kalles n-type halvleder.

En annen forom for doping er å bytte ut silisium atomer med f.eks gallium atomer som har tre valenselektron. For å få fire bindinger med nabo atomene av silisium, vil gallium akseptere et elektron fra valensbåndet til et energinivå som ligger rett over valensbåndet. Det medfører at det vil bli et hull i valensbåndet som vil føre til økt hullstrøm, og dermed større ledningsevne. Ladningsstrømmen vil hovedsakelig bestå av hull. En slik halvleder kalles derfor for en p-type halvleder.

0.7 Dioder

0.7.1 P-N overgang

I en p-n overgang plasseres to halvledere, en p-type og en n-type i kontakt. Den store forskjellen i elektron- og hullkonsentrasjon ved overgangen mellom halvlederne medfører en diffusjonsstrøm av hull fra p-typen til n-typen og elektroner til p-typen.



Figur 6: pn overgang

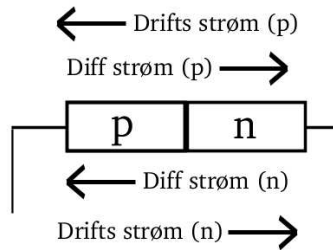
Diffusjonsstrømmen kan beskrives ved Ficks lov:

$$j_n = eD_n \frac{dn}{dx} \quad (54)$$

$$j_p = eD_p \frac{dp}{dx} \quad (55)$$

der D_n og D_p er diffusjonskonstanter, og e er elementærladningem. En kunne forventet en utjevning av konsentrasjonen til elektroner og hull pga. diffusjonsstrømmer. Dette er ikke tilfelle. p-typen og n-typen var elektrisk nøytrale før de kom i kontakt. Når et elektron flytter seg fra n til p, blir det igjen et positivt lada donorion på n-siden. Når et hull flytter seg fra p til n, vil det bli igjen et negativt lada akseptor ion på p-side. Ettersom diffusjonsstrømmen fortsetter, vil det bli et overskudd av positivt lada partikler på n-siden og negativt ladede partikler på p-siden. Det oppstår et spenningsfall fra n til p, og dermed et elektrisk felt $E = -\frac{dV}{dx}$. Feltet er rettet fra n-siden

mot p-siden. Det elektriske feltet gir opphav til elektriske krefter, og vi får en driftsstrøm av hull mot p-siden, og elektroner mot n-siden. Dette motvirker diffusjonsstrømmen, og vi får et avgrenset område ved pn-overgangen med et ladningsoverskudd. Området heter på norsk sperresonen eller på engelsk depletion layer eller space-charge region".



Figur 7: pn overgang

Strømmen pga det elektriske feltet blir:

$$jn(drift) = -ne(\mu)n \frac{dV}{dx} \quad (56)$$

$$jp(drift) = -pe(\mu)p \frac{dV}{x} \quad (57)$$

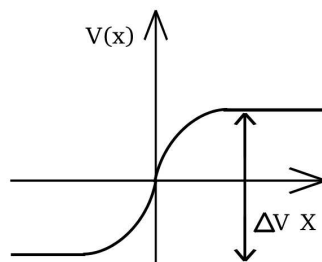
Der μ er mobiliteten til henholdsvis elektroner og hull. Sidene er i likevekt når den totale strømmen er lik null:

$$I_{total} = I_{diff} + I_{drift} = 0 \quad (58)$$

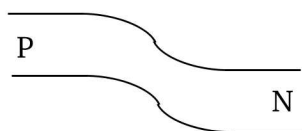
Det elektriske potensialet over strukturen kan fremstilles som funksjon av posisjonen.

Dersom vi tegner opp energibånd diagrammet, får vi en liten forskyvning. Dette skyldes det interne spenningsfallet og kalles for en barriere.

Det er 4 strømmer:



Figur 8: Elektrisk potensial som funksjon av posisjonen i strukturen

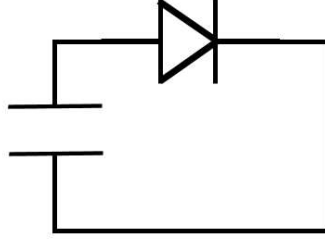


Figur 9: Energibånd diagram med barriere

- diffusjon av hull mot n-siden $I(p)_{po}$
- drift av hull mot p-siden $I(n)_{po}$
- diffusjon av elektroner mot p-siden $I(n)_{no}$
- drift av elektroner mot n-siden $I(p)_{no}$

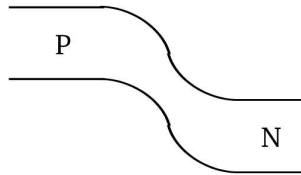
Driftstrømmene vil være småe, pga at vi har liten konsentrasjon av elektroner på p-siden og hull på n-siden. Diffusjons strømmen kan beskrives som henholdsvis $ne^{-\frac{e(\Delta)V}{kT}}$ og $pe^{-\frac{e(\Delta)V}{kT}}$ for elektroner og hull, der $e^{-\frac{e(\Delta)V}{kT}}$ er sannsynligheten for at et elektron skal overkomme barrieren $e\delta V$, der k er Boltzmannkonstanten og T er temperaturen. Siden barrieren vår er høy, er sannsynligheten liten og vi har derfor liten driftstrøm. Det er likevekt.

Denne pn-overgangen er en diode. La oss nå se litt på praktisk bruk av en diode. Vi setter nå dioden i en krets med ytre påtrykt spenning. Det er ikke lenger likevekt:



Figur 10: Diode i krets

Ved å sette på en negativ spennig, kommer det i tillegg til det indre spenningsfallet et spenningsfall V_0 over dioden. Når V_0 er negativ, er den positive spenningen på n-siden større og den negative spenningen på p-siden er større. Dette fører til at sperresonen utvides. Et nytt energibånddiagram viser en utvidet barriere:



Figur 11: Energibånd diagram - stor barriere

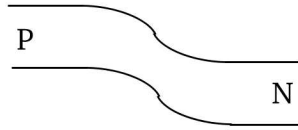
Konsentrasjonen av elektroner på p-siden og hull på n-siden er fortsatt liten. Diffusjonsstrømmen er så godt som uendret, og den nye driftstrømmen blir:

$$I_n = I_{n0} e^{\frac{eV_0}{kT}} I_p = I_{p0} e^{\frac{eV_0}{kT}} \quad (59)$$

siden V_0 er negativ vil den opprinnelige driftsstrømmen reduseres.

Dersom det settes på en positiv spenning blir det positive spenningsfallet på n-siden mindre. Det negative spenningsfallet på p-siden blir mindre. Totalt

spenningsfall over dioden blir mindre. Dette medfører mindre sperresone og dermed mindre barriere.



Figur 12: Energibånd diagram - liten barriere

Diffusjonsstrømmen er fortsatt omtrent uendret, og uttrykket for driftstrømmen vil være likt uttrykket for negativ spenning (59). Men V_0 er nå en positiv størrelse og driftsstrømmen øker. For den totale strømmen får vi:

$$I_n^{total} = I(n)_n + I(p)_n \quad (60)$$

$$= I(n)_{n0} (e^{\frac{eV_0}{kT}} - 1) \quad (61)$$

$$I_n^{total} = I(p)_p + I(n)_p \quad (62)$$

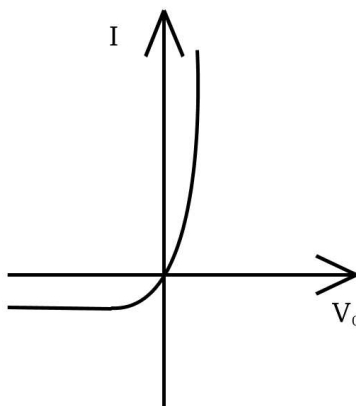
$$= I(p)_{p0} (e^{\frac{eV_0}{kT}} - 1) \quad (63)$$

$$I^{total} = I_n^{total} + I_p^{total} \quad (64)$$

$$= I_0 (e^{\frac{eV_0}{kT}} - 1) \quad (65)$$

Vi kan nå sette opp en Spennings-Strøm karakteristikk for dioden.

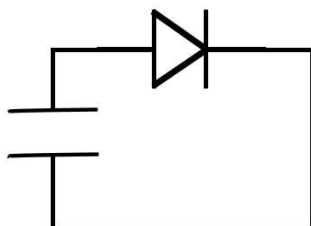
Som vi ser, vil det neste ikke gå strøm gjennom dioden for negativ spenning, mens strømmen går fort mot uendelig for positive spenninger. I praksis vil dioden fungere som en likeretter, - den slipper kun igjennom strømmen en vei. I en reell diode, vil det trenge en viss spenning før dioden oppfører seg som en kortslutning (se: ??). Dette skyldes det indre spenningsfallet som den ytre soenningen må overkomme. I silisium f.eks er spenningsfallet på ca 0.6-0.7V. En reell diode vil heller ikke fungere som en likeretter for alle spenninger. Dersom vi setter på en stor nok negativ spenning, vil barrieren bli lang og tynn nok for elektronene til å tunnelere igjennom den. I praksis sier man at dioden bryter sammen, og blir ødelagt.



Figur 13: Spennings-Strøm karakteristikk

0.7.2 Toppdetektor i AM-kretser

Lydsignalene er som tidligere nevnt kodet inn på en bærebølge. Bølgetoppene til bærebølgen varierer med samme amplitude som lydbølgen. En radio mottar disse signalene i senderen og må omforme signalet tilbake til et lydsignal. Dette gjøres ved hjelp av en toppdetektor, eller 'peak detector' på engelsk. En toppdetektor kan lages av en diode og en kondensator.



Figur 14: Toppdetektor

der R er indre motstand i kretsen. Det amplitudemodulerte signalet sendes inn på kretsen og likeretteren kutter vekk de negative komponentene til signalet. Kondensatoren er i starttidspunktet utladet. AM-signalet lader opp

kondensatoren når signaler er en bølgetopp. Dersom likeretteren ikke hadde vært plassert før kapasitansen ville negative strømmer utladet kapasitatoren, noe vi i vårt tilfelle ikke ønsker. La oss først sende inn kun en sigalpuls. Kapasitatoren lades opp av innsignalet. Utsignalet fra toppdetektor-kretsen synker etterhvert mot null. Utsignalet kommer fra utladningen til kapasitatoren som lader seg ut med en tidskonstand $t = RC$. I en krets som mottar AM-signaler f.eks på 900 kHz blir ikke kapasitatoren utladet før neste topp lader opp kapasitatoren igjen. mot null.

Velges RC liten nok, blir utsignalet veldig likt omhylningskurve. Siden innsignalet er amplitudemodulert er omhylningskurven lik lydsignalet bærebølgen er modulert med. Man må dog passe å ikke velge RC for liten, siden kapasitatoren vil da utlade og lade seg for sent og amplituden på lydsignalet ut blir feil. En regel er å velge tidskonstanten slik at $RC = \frac{1}{m\omega_m}$.

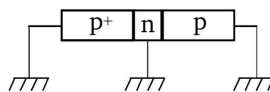
0.8 Transistorer

Det finnes to hovedtyper transistorer: bipolære og field-effekt. I våre kretser trenger vi kun bipolæretransistorer, så vi begrenser oss til teorien bak bipolære transistorer.

En transistor består av to pn-overganger. Den har en emitter, base og kollektor, som er tre distinkte halvleder regioner. Emitteren og kollektoren er laget av samme halvledertypen men emitteren er mye mer dopa enn kollektoren. Mellom emitteren og kollektoren sitter basen som er laget av halvleder typen emitteren og kollektoren IKKE er laget av. Den er veldig tynn i utstrekning i forhold til de andre regionene. Basen er litt mer dopa enn kollektoren, men mindre dopa enn emitteren. De bipolære transistorene kan deles inn i to undergrupper:

- pnp - basen er n-type, kollektoren og emitteren er p-type
- npn - basen er p-type, kollektoren og emitteren er n-type

La oss først se på en pnp i likevekt.



Figur 15: pnp i likevekt

Settes transistoren i en krets med to spenningskilder, vil systemet ikke lenger være i likevekt. På emitteren og basen setter vi en positiv spenning, og på kollektoren og basen setter vi en negativ spenning. Da vil emitter-base overgangen lett slippe strøm fra emitter til base, mens det vil være vanskelig å sende en strøm fra kollektoren til basen.

Dersom basen er bred vil transistoren fungere som to distinkte pn-overganger. Er basen tynn, vil hull som går fra emitteren inn i basen fortsette inn i kollektoren. Noen av hullene vil rekombinere med elektroner i basen og vi

får derfor en strøm ut av kollektoren som er litt mindre enn strømmen inn i emitteren, men likevel stor når en vet spenningen fra kollektoren til basen er negativ.

Strømmen ut av basen er her emitterstrømmen minus kollektorstrømmen. Vi kan sette opp følgende strømrelasjonene:

$$I_e = I_{ep} + I_{en} \quad (66)$$

$$I_c = I_{cp} + I_{cn} \quad (67)$$

$$I_b = I_e - I_c = I_{en} + (I_{ep} - I_{cp}) - I_{cn} \quad (68)$$

I_{ep} = strøm av hull fra emitter til base

I_{en} = strøm av elektroner fra base til emitter

I_{cp} = strøm av hull fra base til kollektor

I_{cn} = strøm av elektroner fra kollektor

I_c = kollektor strøm

I_e = emitter strøm

I_b = base strøm

Vi definerer nå den felles base ”strømfaktor”:

$$\alpha = \frac{I_{cp}}{I_e} \sim < 1 \quad (69)$$

$$\alpha = \frac{I_{cp}}{I_{ep} + I_{en}} \quad (70)$$

$$= \frac{I_{ep}}{I_{ep} + I_{en}} * \frac{I_{cp}}{I_{ep}} \quad (71)$$

$$= \gamma * \alpha_t \quad (72)$$

der γ er emitter-effektivitet (mindre eller nesten lik 1) og α_t er basetransportfaktor (mindre eller nesten lik 1).

$$I_c = I_{cp} + I_{cn} \quad (73)$$

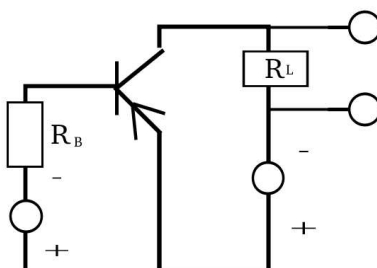
$$= \alpha I_e + I_{cn} \quad (74)$$

$$= \alpha I_e + I_{cbo} \quad (75)$$

Der I_{cbo} er kollektor-base (lekasje)strøm ved åpen emitter (dvs når $I_e = 0$)

0.8.1 Forsterker

Forsterkere inneholder vanligvis transistorer som forsterker element. Dette gjøres f.eks. ved en felles-emitter konfigurasjon. Navnet kommer fra koblingen inn på transistoren. Både inn- og utstrømmen er kobla til emitteren.



Figur 16: Forsterker

Ligning (??) gir:

$$I_c = \alpha I_e + I_{cbo} \quad (76)$$

$$= \alpha(I_b + I_c) + I_{cbo} \quad (77)$$

$$(78)$$

dette gir videre

$$I_c(1 - \alpha) = \alpha I_b + I_{cbo} \quad (79)$$

$$I_c = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_b + \frac{I_{cbo}}{1 - \alpha} \quad (80)$$

$$= \beta I_b + I_{ceo} \quad (81)$$

Der β er emitterstørmforsterkningskonstanten og er definert som:

$$\beta = \frac{dC}{dI_b} = \frac{\alpha}{a - \alpha} \quad (82)$$

Siden α kan være veldig nærme 1, kan β bli mye større enn 1. Dette medfører I_c mye større enn I_b , vi har fått en strømforsterkning. En variabelspenning, f.eks et lydsignalet ut fra en toppdetektor, kunne vært satt sammen med V_{eb} . V_{eb} og V_{ec} må da velges riktig for å få positiv spenning over emittteren til basen, og negativ over kollektoren til basen. I_c blir da mye større enn I_b , og innsignalet vår har blitt forsterket.

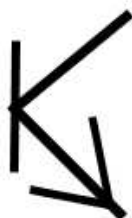
Merk: Seinere i rapporten er det teoretisk riktig å bruke to forskjellig β -verdier på ulike steder. β verdiene er veldig like, og den ene ofte brukes som en approksimasjon til den andre. For vår oppgave er ikke forskjell mellom de to β verdiene viktig. Teoridelen er skrevet med en β verdi for enkelheten og lesbarhetens skyld.

Det er to spenninger, så transistoren kan forspennes på fire ulike måter. Dersom V_{eb} er positiv og V_{ec} er negativ, er transistoren i aktiv modus. Denne forspenningen egner seg godt som forsterker. Er begge spenningene negative er transistoren i "cut-off"modus. Strømmene er da små, så denne konfigurasjonen egner seg dårlig. Ved å bytte på spenningen i aktiv modus settes transistoren i invert modus. Resultatet er ganske likt aktiv modus, men strømmen er mindre. Dette skyldes høyere doping i emitteren enn kollektoren, og kollektoren fungerer ikke like bra som praktisk emitter". Den siste muligheten er to positive spenninger. Begge pn-overgangene vil fungere som kortslutninger og transistoren vil oppføre seg som et knutepunkt. Dette kalles metningsmodus. Vi velger derso å konstruere vår forsterker ved å bruke en transistor i aktiv modus.

Merk at I_c i forsterkerekspepelet over er uavhengig av V_{ce} . V_{ce} er kun brukt til å holde transistoren i aktiv modus.

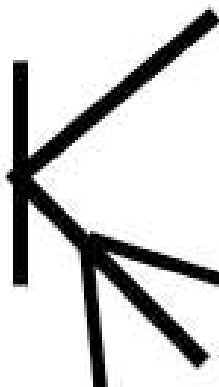
0.8.2 NPN transistor

Symbolet for npn transistor:



Figur 17: npn symbol

Symbolet for pnp transistor:

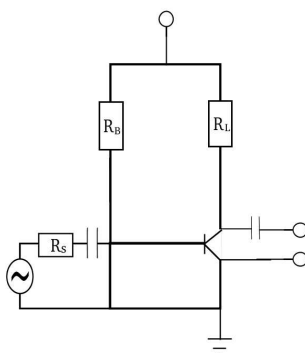


Figur 18: pnp symbol

Egenskapene til npn transistorer ligner de til pnp transistorer. Ladningsstrømmene er de samme, men hullene er byttet ut med elektroner og elektronene med hull, så strømmen går motsatt vei enn i pnp transistoren. Vi må

også bytte om på fortegnet på spenningene, slik at kollektor til base overgangen sperrer strømmen, mens base til emitter overgangen slipper gjennom strøm.

La oss se på felles-emitter konfigurasjonen igjen, i en litt mer praktisk retning. Vi bruker en npn transistor og et batteri til intern spenningskilde i forsterkerkretsen.



Figur 19: Forsterker

De to kondensatorene vil forhindre DC (likestrøm) komponentene i å "forlate" forsterker kretsen. Denne komponenten vil bare bli støy på høytalerene. R_s representerer en Thevenin resistans som er samla motstand i input-kretsen. Vi er også interessert i spenningsforsterkningen i kretsen. For å finne denne, prøver vi å beskrive transistoren (nnp) ved resitive elementer. Dette kan gjøres forutsatt inn-signalet ikke er for stort. Den resitive modellen kan trygt bli brukt for frekvenser av 10kHz og lavere. Denne modellen er også begrenset for små signaler. Hva menes med et lite signal? Vi kommer snart tilbake med en definisjon.

0.8.3 Hybrid- π modell

La oss først se tilbake til dioden. Strømmen gjennom en diode kunne beskrives ved uttrykket:

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (83)$$

størrelsen $\frac{kT}{q}$ har dimensjon volt, ved romtemperatur vil $\frac{kT}{q}$ være 26mV. Når dioden fungerer som kortslutning, vil den ytre spenning være større enn det indre spenningsfallet. F.eks. vil spenningsfalle i silisium være over 0.6-0.7C. Faktoren $e^{\frac{qV}{kT}}$ vil bli mye større enn 1 slik at strømmen kan skrives som:

$$I = I_0 e^{\frac{qV}{kT}} \quad (84)$$

Med denne tilnærmingen kan emitterstrømmen og kollektorstrømmen skrives som:

$$i_e = I_{ES} e^{\frac{qv_{BE}}{kT}} \quad (85)$$

$$i_c = \alpha I_F e^{\frac{qv_{be}}{kT}} \quad (86)$$

der I_{ES} er driftsstrømmen fra basen til emitteren. Det sendes nå et innsignal inn på kretsen. Base-emitter spenningen i kretsen blir:

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad (87)$$

der V_{BE} er spenningsfallet over BE pga batteriet og V_{be} pga signalspenningen. Dette gir kollektor strømmen:

$$i_c = I_{ES} e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} e^{\frac{qv_{be}}{kT}} \quad (88)$$

Dersom vi definerer små signaler som: $|v_{be}| \ll \frac{kT}{q} = 25mV$. Eksponensialuttrykket i kollektorstrømmen som inneholder v_{be} kan taylorutvikles for å gi en approksimasjon:

$$e^{\frac{qv_{be}}{kT}} \approx 1 + \frac{qv_{be}}{kT} \quad (89)$$

Ved å bruke denne tilnærmelsen blir kollektorstrømmen:

$$i_c = I_{ES} e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} + (I_{ES} e^{\frac{qV_{BE}}{kT}}) \left(\frac{q}{kT} \right) v_{be} \quad (90)$$

Det andre leddet vil være signalkomponenten av kollektorstrømmen, mens første ledd er operasjons-strømmen I_c .

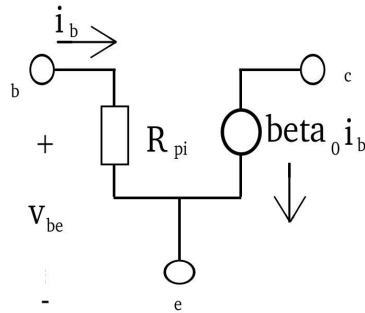
Signal komponenten til kollektor strømmen er:

$$I_c = \frac{qIC}{kT} * v_{be} \quad (91)$$

Som gir oss et uttrykk for signalkomponenten av basestrømmen

$$I_b = \frac{1}{\beta} * \frac{qIC}{kT} v_{be} \quad (92)$$

Vi kan nå sette opp en modell som oppfører seg som en transistor.

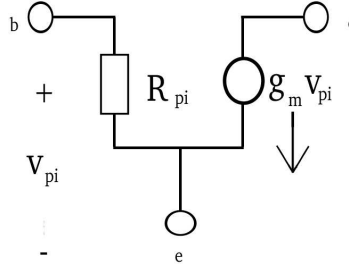


Figur 20: hybrid- π modell 1

Denne modellen kalles hybrid- π modellen. Modellen har to elementer, en motstand mellom basen og emitteren, og en strømgenerator. Motstanden r_π gir forholdet mellom I_b og v_{be} og har verdien:

$$\frac{1}{r_\pi} = \frac{i_b}{v_{be}} \quad (93)$$

$$= \frac{1}{\beta} * \frac{qI_c}{kT} \quad (94)$$

Figur 21: hybrid- π modell 2

Konstanten g_m er transkonduktansen og er definert slik:

$$g_m = \frac{qI_c}{kT} \quad (95)$$

ved å sette transkonduktansen inn i r_π får et nytt uttrykk for r_π :

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad (96)$$

Merk at g_m kun avhenger av dc komponenten til kollektorstrømmen I_c . Er I_c kjent, kan g_m regnes ut direkte og fra den g_m . Ved romtemperatur kan vi numerisk finne en verdi for $\frac{kT}{q}$, og det gir g_m verdiene:

$$g_m(S) = 0,004I_c(mA) \quad (97)$$

$$g_m(mS) = 40I_c(mA) \quad (98)$$

La oss se på forsterkeren igjen. Vi ønsker først å skrive opp I_b og I_c . For sette transistoren aktiv modus må V_{BE} være ca. 0.7 (eller mer). Dette gir uttrykkene:

$$I_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R_b} \quad (99)$$

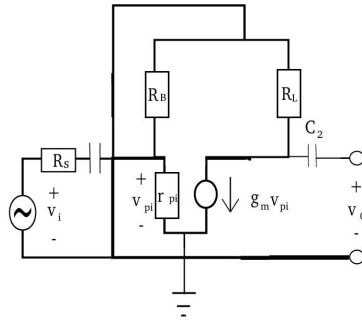
$$= \frac{V_{cc} - 0,7}{R_b} \quad (100)$$

$$(101)$$

$$I_C = \beta I_b \quad (102)$$

$$= \beta \frac{V_{cc} - 0,7}{R_B} \quad (103)$$

Vi vil nå bruke hybrid- π modellen for en såkalt "incrementalkrets, som fullstendig representere svingingene i felles-emitter kretsen. Dette gjør vi for å studere inn-signalet uten å ta hensyn til uønskede komponenter. Vi bytter ut transistoren med hybrid- π modellen, og ser kun på det variable spenningsfallet eller den variable strømmen gjennom motstandene. Likespenningskilden må også byttes ut, men med hva? En DC-kilde gir ingen variable komponenter, og vi kan bytte den ut med en 0 volts variable spenningskilde. DC kilden er derfor en kortslutning.

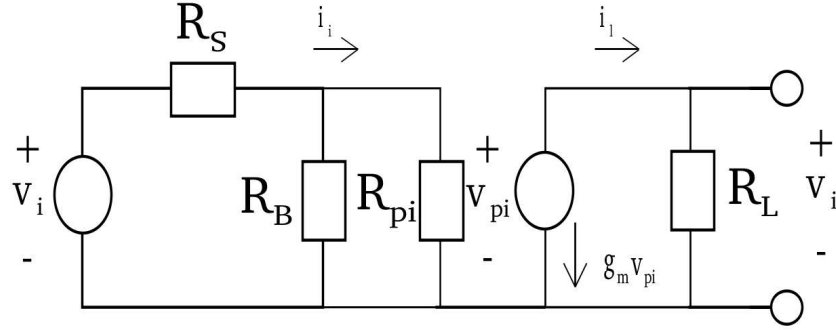


Figur 22: hybrid- π equivalent

Utsignalet V_0 er gitt ved:

$$v_0 = -g_m R_L v_\pi \quad (104)$$

Vi trenger å beskrive v_π ved v_i . Når R_s er i serie med parallelkoblingen av R_B og r_π har vi:



Figur 23: Incremental equivalent

$$v_{\pi} = \frac{\left(\frac{1}{r_{\pi}} + \frac{1}{R_B}\right)^{-1}}{R_s + \left(\frac{1}{r_{\pi}} + \frac{1}{R_B}\right)^{-1}} \quad (105)$$

Dette gir spenningsforsterkningen:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad (106)$$

$$= \frac{-g_m R_L \left(\frac{1}{r_{\pi}} + \frac{1}{R_B}\right)^{-1}}{R_s + \left(\frac{1}{r_{\pi}} + \frac{1}{R_B}\right)^{-1}} \quad (107)$$

Vi ser en faseforskyvning av signalet sendt gjennom forsterkeren. For et positivt innsignal er utsignalet negativt og omvendt. I vår forsterker vil vi ha R_B veldig stor i forhold til r_{π} . Ved denne sammenhengen kan R_B neglisjeres og uttrykket forenkles seg til:

$$A_v = -\frac{g_m r_\pi R_L}{R_s + r_\pi} \quad (108)$$

$$= -\frac{\beta R_L}{R_s + r_\pi} \quad (109)$$

Siden R_s og r_π normalt er mindre enn R_L , gir kretsen ifølge (109) en spenningsforsterkning. Dette skal vi hovedsakelig bruke som spenningsforsterkning, men vi får også en strømforsterkning. Samme krets-modell kan brukes for enkelt å regne ut strømforsterkningen. Signalstrømmen gjennom R_L er:

$$I_l = -g_m v_\pi \quad (110)$$

der $v_\pi = i_i(\frac{1}{R_N} + \frac{1}{r_\pi})^{-1}$. Med samme tilnærming, R_b kan negliseres blir strømforsterkningen:

$$A_i = \frac{i_l}{i_i} \quad (111)$$

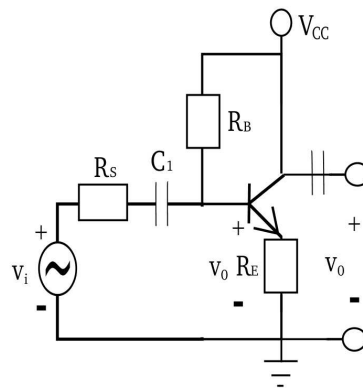
$$= -\beta \quad (112)$$

0.8.4 Emitterfølger konfigurasjon

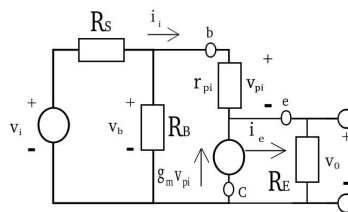
En annen viktig transistor konfigurasjon er felles-kollektor eller emitter-følger konfigurasjonen.

Vi ønsker å lage en signalmodell av denne forsterkeren. Dette gjør vi ved å bruke hybrid- π modellen for transistoren på samme måte som for emitter-følgeren. DC kilden kan vi fortsatt betrakte som en kortslutning.

Også her kan R_B neglisjeres, og vi gjør dette nå fra starten for enkelhetsskyld. Dette gir følgende ligninger:



Figur 24: Emitterfølger konfigurasjon



Figur 25: Incremental equivalent

$$v_0 = i_e R_E \quad (113)$$

$$v_\pi = i_i r_\pi \quad (114)$$

$$i_e = i_i + g_m v_\pi \quad (115)$$

$$\rightarrow \quad (116)$$

$$i_e = i_i(1 + g_m r_\pi) \quad (117)$$

$$= i_i(1 + \beta) \quad (118)$$

Vi bruker så Kirchoffs spenningsregel for innsignalet

$$v_i = i_i R_s + i_i r_\pi + v_0 \quad \rightarrow \quad i_i = \frac{v_i}{R_s + r_\pi + (1 + \beta)R_E} \quad (119)$$

Vi kan dermed finne spenningsforsterkningen:

$$A_v = \frac{v_0}{v_i} = \frac{(1 + \beta)R_E}{R_s + r_\pi + (1 + \beta)R_E} \quad (120)$$

Ifølge (120) få vi faktisk en spenningsavtakelse. Emitterfølgeren kan ikke brukes som noen spenningsforsterker. dersom R_s og r_π er mye mindre enn $(1 + \beta)R_E$, så vil innsignalet være omtrent like stort som utsignalet. Emitterfølgeren gir ikke noen spenningsforsterkning, men hva med strømforsterkning? Strømforsterkningen kan vi finne direkte fra (118) som gir:

$$A_v = \frac{i_e}{i_i} \quad (121)$$

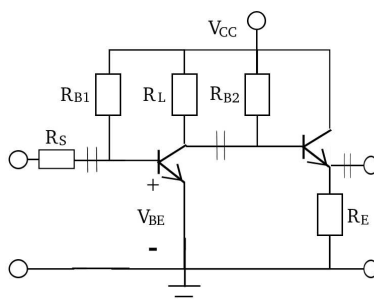
$$= 1 + \beta \quad (122)$$

Vi ser nå at emitterfølgeren er ment til å være en strømforsterker.

0.8.5 Forspenning av transistorer

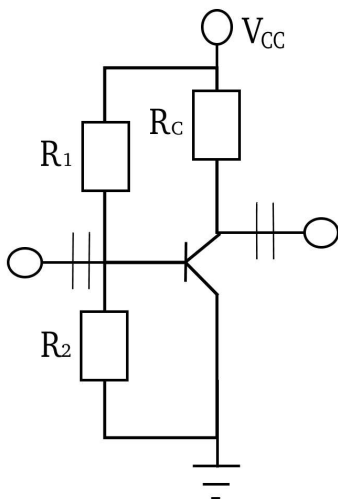
Radion trenger en forsterker. Lydbølgen ut fra toppdetektoren er ikke kraftig nok til å drive en høytaler og vi ønsker derfor å lage en forsterker. Signalet vi

får inn avhenger av avstanden til senderen og forholdene, men vil sannsynligvis være i mikrovolt området. En høytaler er ikke kun avhengig av nok spenning, men også nok strøm. Det vil ikke gå mye strøm gjennom spenningsforsterkeren. Vi setter derfor på en ren strømforsterker etter spenningsforsterkeren.



Figur 26: Teoretisk forsterker

Her har vi satt spenningsfallet over base til emitter til 0,7V uten å gjøre noe for å få dette spenningsfallet. Dette gjør vi ved å legge en ekstra motstand parallell til base-emitter.

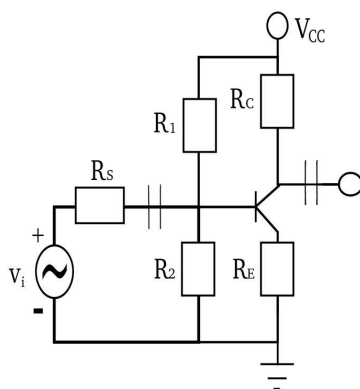


Figur 27: Forbedret forsterker

Vi bruker Kirchoffs spenningslov for å finne spenningsfallet over R_2 :

$$v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{cc} \quad (123)$$

Velger vi R_1 og R_2 riktig kan vi få spenningsfall på 0,7V over basen-til emitteren. Dette gjøres på felles-emitteren og emitter-følgeren. Vi ønsker skjerme transistoren og legger inn en motstand mellom emitter og jord på felles emitteren. Uheldigvis vil denne resistansen minske spenningsforsterkningen kraftig, men dette kan forhindres ved å legge på en kondensator i parallell over motstanden mellom emitteren og jord.



Figur 28: Skjerming av transistor

Kondensatoren i parallell påvirker ikke DC strømmen som vil gå gjennom resistansen. For AC strømmen vil kapasitatoren fungere som en kortslutning. Vi har laget to forskjellige veier, for DC strømmen gjennom resistansen og AC strømmen gjennom kondensatoren. Transistoren er fortsatt skjermet, mens AC forsterkningen er lik forsterkningen uten den nye motstanden.

0.9 Utførelse

0.9.1 Antennen

Vi hadde opprinnerlig tenkt å lage en antenne, men dette ble det ikke noe av. Årsaken til dette var at vi fant ut at forholda for å ta motta AM bølger var så små at vi mest sannsynlig ikke ville klart å motta noe nyttig.

0.9.2 Frekvensvelgeren

Spolen med forskjellige induktanser kan bestilles fra distributører av elektronikkomponenter, f.eks elfa hvor vi har bestilt de andre delene til radioen. I samråd med veileder førsteamanuensis Støvneng valgte vi å konstruerer en eller flere av spolene i kretsen fra grunnen av. Fordene i forhold til ferdigkjøpt er:

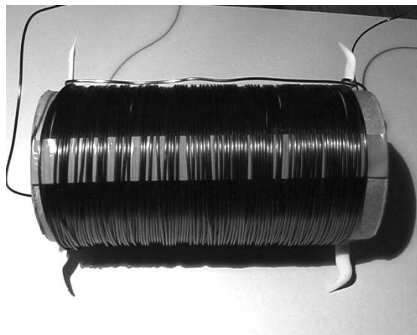
Vi skaffet først en spoletråd fra elektronikkverkstedet på institutt for fysikk. I følge teorien trengte vi kobbertråd med lengde 24 m og radie på 0,66 mm. For å være på den sikre siden la vi på en 10-1527 meter. Radien valgte vi litt over anslaget. Radio-gruppen lånte også med seg isolebartape som tåle varme.

Spolen skulle vikles utenpå en tom dorullhylse. For å gjøre hylsen mer solid snittet vi en hylse nummer 2 på langs. Denne lirke gruppen inn i hylse nummer 1. For å feste den indre hylsen bedre og hindre kobbertråden skaffet vi 4 tannpikere. På hver ende av dorullen stakk vi to tannpikere igjennom hylsene og inn mot rotasjonsaksen. Tannpikernes i hver ende stod rett ovenfor hverandre. Deretter ble endene av tannpikerendene inne i hver ende festet sammen med teip.

Etter 100 vindinger var overflaten til dorullhylsen full. To striper gul isolasjonstape ble tapet på over langsiden rett ovenfor hverandre. Tapen hjalp til å holde vindingene på plass, men var der mest så vi kunne se hvor de nye viklingene ble lagt.

Flere viklinger ble lagt på 10 av gangen, til vi kom til 168 vindinger. Ved 168 vindinger var lag 2 fullt. induktans stemte bra med ønsket induktans og

vi avsluttet surringene. To nye striper isolerendetape holdt det siste laget på plass. Ledningsenden ble trukket over langsiden til motsatt enda av startledningen og festet i tannpirkerene. Vi klippet ledningene og målte induktansen til spolen. Den ferdige spolen er vist på bildet under:



Figur 29: Egenkonstruert spole

Spolens radius = 0,0225m

Spolens lengde = 0,1m

Antall vindinger = 168

Vi kan nå finne induktansen

$$L = \mu_0 A \frac{N^2}{l} \quad (124)$$

$$= 4\pi * 10^{-7} * \pi * 0,0225^2 \frac{168^2}{0,1} \quad (125)$$

$$= 5,640834221 * 10^{-4} \quad (126)$$

Vi ønska å legge resonansfrekvensen til rundt 900kHz, siden dette er en passende frekvens for AM-bølger. Spolen vi laga målte en induktans på 5,6 mikro H. Den tilhørende kapasitansen blir da

$$C = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \quad (127)$$

$$C = \frac{1}{5,6 * 10^{-4}} \left(\frac{1}{2\pi * 900 * 10^3} \right)^2 \quad (128)$$

$$= 5,58 * 10^{-11} \quad (129)$$

Vi lånte dermed en variabel kondensator som inneholdt denne verdien.

0.9.3 Toppdetektor

Vi valgte kondensatoren til å være 2,2nF. Som diode valgte vi en germanium diode.

Siden vi ikke var i stand til å motta radiosignal, prøvde vi å generere våre egne AM-signal.

Vi kobla en cd-spiller til en signalgenerator som var i stand til å AM modulere signaler. Vi brukte en 900kHz bærebølge som vi sendte inn på toppdetektoren. Vi testa deretter toppdetektoren med og uten frekvensvelgeren og vi klarte i begge tilfeller å få lyd i en 100 Ω høyttaler. For å simulere en antenne, sendte vi AM signalet fra signalgeneratoren gjennom en spole. Vi satt deretter vår egen spole nær denne slik at det ble indusert en strøm med lik frekvens i spolen vår.

0.9.4 Felles emitteren

Det viktigste elementet når man setter sammen en forsterker, er å forsikre at transistoren er riktig forspent slik at den vil være i aktiv modus. Som sagt på har vi at spenningen over basen til emitter må være minst 0,7 volt for at den skal være riktig forspent. Men vi må også tenke på at spenningsfallet over kollektoren til basen må være riktig for at transistoren ikke skal være i metning-modus. Avhengig av forholda, vil metningsgrensa for V_{CB} normalt ligge mellom 0,2 og 1,5 volt. Vi brukte en likespenningskilde på 6V

Vi valgte R_1 og R_2 til å være 5100 og 680V. Vi får da spenningsfallet

$$V_{BE} = \frac{680}{5100 + 680} * 6 = 0,7V \quad (130)$$

Som er det spenningsfallet vi ønsker. Vi lot R_L være en variabel motstand slik at vi kunne gjøre målinger på forsterkningen for ulike verdier av R_L . R_E ble valgt til 100 .

Vi ønsker å finne r_{pi} . β ble målt til å være lik 325. Vi har

$$I_C = 325 \frac{(6 - 0,7)}{5,1k\Omega} = 338mA \quad (131)$$

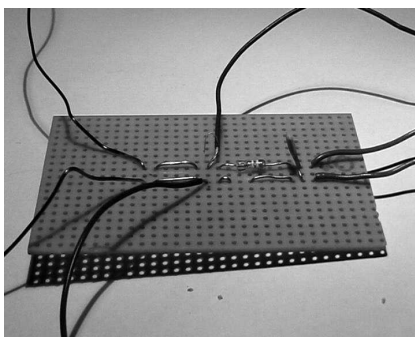
$$g_M = 40 * 338 = 13520mA \quad (132)$$

$$r_\pi = \frac{325}{13520} = 0,024k\Omega = 24\Omega \quad (133)$$

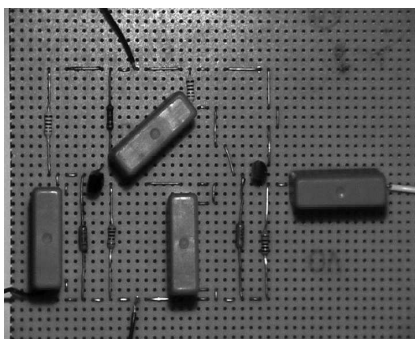
0.9.5 Emitter følgeren

Vi forspente emitterfølgeren på samme måte som felles emitteren. R_E valgte vi til å være samme som på felles emitteren.

Konstruksjonen av forsterkeren og mottakeren ble først gjort på et brødbrett, siden det gav oss en mulighet til å gjøre tester og målinger og deretter lett rette evt feil og/eller mangler. Deretter gikk vi over til å lodde komponentene til et loddebrett, for å få en mer kompakt, stødigere og mer oversiktelig modell.



Figur 30: Toppdetektor



Figur 31: Forsterker

0.10 Resultater

Vi gjorde en måling av spenningsforsterkningen i felles-emitteren. Vi gjorde 11 målinger, fra 0 til 10 k Ω med et intervall på 1k Ω . Merk at målingene er gjort mens komponentene var på europa-brettet siden loddinga ikke ble vellykket.

Inn signal varierte fra 0,5 til 0.6V og hadde en frekvens på ca 500 Hz.

UT	R k Ω	Spenningsforsterkning (midlere)
0,8	0	1,45
5,3	1	9,64
10,8	2	19,6
16,0	3	29,1
21,2	4	38,5
26,0	5	47,3
30,0	6	54,5
26,8	7	48,7
24,4	8	44,6
22,0	9	40,0
19,6	10	35,6

Siden inn-signalet vårt er større enn 25mV, vil ikke våre teoretiske likninger for spenningsforsterkningen holde. Vi tar likevel med de teoretiske verdiene for sammenlikning. Vi gjorde ingen måling av den indre spenningen i signalgeneratoren og ledningene, men vi anslår den til å være 1k Ω .

R (k Ω)	Spenningsforsterkning	$\frac{\text{teoretisk spenningsforsterkning}}{\text{mlt spenningsforsterkning}}$
0	0	0
1	317	219
2	635	65,9
3	952	48,6
4	1270	43,6
5	1587	41,2
6	1904	40,3
7	2222	40,8
8	2539	52,1
9	2856	71,4
10	3174	89,2

0.11 Diskusjon

0.11.1 Antenna

Som sagt, så ble aldri antenna laget, fordi vi anså forholda til å motta AM bølger til å være veldig dårlige. Årsaken til denne konklusjonen var at vi tok med oss en radio på laboratoriet for å se hvilke stasjoner vi fikk inn. Vi klarte derimot ikke å motta noe som helst med den radioen vi hadde med inne på laboratoriet. For å få inn en stasjon, måtte vi vekk fra universitetets området selv da klarte vi bare å så vidt få inn noen antydning til en stasjon. Vi annså det derfor for nytteløst å prøve å motta AM bølger inne på laboratoriet. Og dersom vi skulle klart å motta noen stasjoener, ville sannsynligvis signalet vært så svakt at det hadde drukna i støyen fra de elektriske apparatene på laboratoriet.

0.11.2 Frekvensvelgeren

Induktansen til spolen i laga passa godt til teorien. Vi brukte et analogt RCL-meter som er årsaken til den røffe avrunda måleresultatet. Vi gjorde ingen systematiske målinger av resonansfrekvensen, men vi kobla en signal-generator til frekvensvelgeren og så på utspenningen på et oscilloscop, for å verifisere resonansfrekvensen.

0.11.3 Toppdetektor

Vi valgte en kondensator med kapasitans $2,2\text{nF}$. Dette er fordi vi fant den verdien som anbefalt for en diode-mottaker i "Anvendt Eletronik". Germanium dioden valgte vi pga at det ble ofte brukt germaniumdioder i de gamle radioene som hadde en konstruksjon lik vår.

0.11.4 Måling av spenningsforsterkning

I teorien gjorde vi den antagelsen at signalet vi skulle forsterke var mye mindre enn 25mV, noe som sannsynligvis ville vært riktig dersom vi skulle forsterke et mottatt radiosignal. Siden forholda for å motta radiobølger var heller dårlig, måtte vi sende inn et generert signal. Vi burde da ha sent inn et lite signal for å komme så nær som mulig de virkelige forholda, men vi registrerte mye støy fra omgivelsene og ble derfor tvunget til å bruke et relativt stort signal.

Dersom vi sammenlikner de teoretiske med de målte verdiene ser vi at de spriker veldig. Vi visste at de ikke kom til å stemme pga at vi kjørte inn et for stort signal, men det vi målte var ikke engang i nærheten av det teoretiske. Det kan være mange årsaker til dette. En årsak kan være at vi kun anslå verdien av R_S uten å måle den. Dersom verdien vi anslo ligger langt unna den riktige verdien, vil resultatet bli veldig galt.

Typically, the voltage gain for a common-emitter circuit is between -10 and -100. If a voltage gain greater than -100 is calculated, it should be treated with some skepticism, since a more complex hybrid- π model than the one shown in FIG.11.3 is needed to accurately represent the transistor when the voltage gain become so large" (Electronic circuits and Applications 1975, side 309 , Stephen D. Senturia og Bruce D. Wedlock)

I alle våre utregninger er spenningsforsterkningen over 100 ganger. Ifølge "Electric circuits and applications" vil da disse verdiene ikke være korrekte, siden vi måtte ha brukt en mer komplisert hybrid- π modell. Og siden våre utregninger gav spenningsforsterkninger på 2000-3000 ganger, vil de sannsynlig være veldig gale. Vi ser at forholda mellom teori og måling er mer eller mindre konstant for R_L lik 3 til 7k Ω . Dette er positivt for det viser at den målte spenningsforsterkningen var proporsjonal med R_L , noe som stemte med teorien. Som sagt så registrerte vi mye støy når vi ikke hadde på spenningskilden, og det er dermed stor sannsynlighet at det utsignalet vi målte da vi brukte små verdier av R_L , var mye prega av støy fra omgivelsene. Dette kan vi lett se ved at vi registrerte en spenningsforsterkning da vi valgte R_L til å være null. Dette kan forklare at forholdet mellom teori og måling forandra seg drastisk for små verdier av R_L .

I følge vår likning er det også ingen grense for hvor stor spenningsforsterkning vi kan få ved å øke R_L . Dette virker litt urealistisk, og vi ser at vi i målingene

hadde en øvre grense for resistansen vår som lå på ca. $6k\Omega$. En forklaring kunne vært at utsignalet ble så stort at vi til tider fikk transistoren i metning-modus. Men vi gjorde noen raske målinger og så at den øvre grensa for R_L lå på $6k\Omega$ uavhengig av inn og utsignalet. Dette kan muligens forklares dersom man bruker en mer komplisert hybrid- π modell som antydnet i *Electronic circuits and Applications*".

0.11.5 Måling av strømforsterkning

Vi prøvde også å gjøre noen målinger av strømforsterkeren, men det gav oss ingen ønska resultat. I første omgang klarte vi ikke å få noen strømforsterkning i det hele tatt, men etter å ha bytta litt rundt på koblinger fikk vi en liten strømforsterkning på rundt 4. Hvorfor vi fikk så liten strømforsterkning, er vi heller litt usikre på. Koblingsfeil er en mulighet, og så brukte vi mye kobbertråd som forbindelse mellom mange av komponentene. Denne kobbertråden har en isolerende lakk, som vi måtte fjerne i endene for å få kontakt. En mulighet er at det derfor ble dårlig kontakt mellom komponentene. Det er også en mulighet at vi hadde et europabrett med mange dårlige kontakter.

0.12 Loddingen

Vi lodda komponentene på et lodde brett, med nøyaktig samme komponentoppsett og samme komponenter som på europa brettet. Likevel så fungerte ikke forsterkeren da vi prøvde den på laboratoriet. Dette kan være et resultat at f.eks tørrlodding", dvs at det er en luftlomme mellom loddetinnnet og komponentbena. Vi kan også ha oversett ufullstendige loddinger, dvs at vi ikke har fullstendig dekket hullet vi plaserer komponentbena med loddetinn. Vi gjorde en kjapp test på peak-detektoren, og den fungerte heldigvis fortsatt som den skulle.

Del II

Avslutning

0.13 Konklusjon

Vi greide å konstruere en radio

En enkel radiomottaker er ganske enkel teoretisk. Forsterkerkretsen er noe vaskeligere og inneholder transistorer. Transistorer er behandlet grundig i oppgaven og forutsetter kunnskaper om halvledermaterialer.

Så,- hvordan er teorien i praksis? Selv med den enkleste radiokrets går et eller annet galt. Manglende kontakt, instrumenter som viser feil og kortslutninger er ikke behandlet i den teoretiske delen, men vi fikk erfare det i praksis. Konstruksjonen tok mye lenger tid enn planlagt og vi støtte på mange av de praktiske problemstillingene. Mange ganger forsvant vi fra elektronikkverkstedet for å regne på størrelser som muligens hadde noe å si når vi valgte komponenter. Spiller for eksempel radien på kobbertråden noen rolle når en spole skal vikles? Andre ganger regnet vi for mye. Størrelsen på loddebrettet var regnet på hullet. Synd loddebrettene var europakort", felles størrelse for hele Europa.

Alle radiokomponentene fungerte ved oppstilling på brødbrettet. Vi greide å sende lyd gjennom kretsen. De samme komponentene, loddet i samme krets fungerte ikke. Enten feilen er tørrloddning, manglende kontakt eller ødelagte komponenter er en ting klart. Teori er ikke praksis.

Gjennom labarbeidet lærte vi godt denne forskjellen. Feilsøking er en kunst og vi fikk prøvd mye på dette. Denne erfaringen er fin neste gang vi kommer tilbake til laboratoriet.

Bibliografi

- [1] Fishbane, Paul M.
Gasiorowicz, Stephen
Thorntorn, Stephen T.
Physics for Scientists and Engineers - Paul Corey
2. utgave, Prentice-hall
New Jersey, 1996
- [2] Senturia, Stephen D.
Wedlock, Bruce D.
Electronic Circuits and Applications
John Wiley and Sons, Inc.
United States of America, 1975
- [3] Jan Solberg
Anvendt ElektronikkA
1. utgave, Josti Kit
København, 1973
- [4] <http://www.elfa.se/no>
- [5] <http://ocw.mit.edu/>
- [6] <http://www.turnpoint.net/wireless/has.html>
- [7] <http://no.wikipedia.org/wiki/Radar>
- [8] <http://inventors.about.com/library/inventors/blradio.htm>
- [9] <http://www.geocities.com/SiliconValley/Campus/4400/ior.htm>
- [10] <http://www.electronics-tutorials.com/>
- [11] <http://my.integritynet.com.au/purdic/>

[12] <http://www.hard-core-dx.com/>

[13] <http://www.cebik.com/>

FILTERKRETS OG HØYTTALERE

Rapport for prosjekt i Elektromagnetisme (FY1303)

ved



Høsten 2004

Av:

Kjartan Kristoffersen, Daniel Strand og Håvard Hatle

Forord

Denne rapporten kommer i forbindelse med prosjekt i emnet Elektrisitet og magnetisme (FY1303), høsten 2004. For å få dette gjennomført måtte vi oppsøke flere sakkyndige for å få nødvendig hjelp og kunnskap. I den forbindelse vil vi rette en takk til dem.

Arne Moholdt, Avdelingsingeniør ved Elektronikkverkstedet – For bestilling av komponenter.

Erling Kristiansen, Ingeniør ved Elektronikkverkstedet – For teknisk støtte i den praktiske delen, samt for et fremragende kurs i lodding av komponenter.

Thor Bernt Melø, Professor ved Institutt for fysikk- For hjelp i laboratoriet.

Tore Høe Løvaas, Førsteamanuensis ved Institutt for fysikk – For tilordning av loddekurs.

Rapporten leveres i ett skriftlig eksemplar og ett i PDF-format. Dette er sendt til stovneng@phys.ntnu.no

NTNU Gløshaugen, Trondheim – 08.11.2004

(Kjartan Kristoffersen)

(Daniel Strand)

(Håvard Hatle)

Sammendrag

Vår høyttaler består av en diskant og en bass. Da er det meningen at de lave signalene skal gå til bassen og de høye til diskanten. Men for at det skal gå til må vi dele opp innsignalet i to, nemlig i høye og lave frekvenser. For å få til det må vi da ha en filterkrets.

Vi fant filterkretsen vi ville ha, en LC-krets, på internett (ref 2), og brukte den fordi den ikke var for matematisk komplisert og det er kjent at den fungerer i praksis.

Neste skritt blir da å finne ut hvilke verdier vi skal ha på de forskjellige komponentene, som vi fant med å regne ut effekten i høytalerelementet for diskanten og bassen. Vi visste hvordan ville ha grafen og kunne dermed tilpasse komponentene slik at vi fikk den ønskede teoretiske grafen.

Da komponentene var kjent bestilte vi dem, og gikk i gang med å bygge filterkretsen. Det førte til at vi blant annet underveis måtte ta et loddekurs og måtte lage spoler for hånd for å få det ferdig.

Da høytaleren med filterkretsen var ferdig gikk vi til laboratoriet og startet en rekke målinger på den for å se om ting virket slik vi ønsket. Vi målte effekt, lydtrykk og faseforskyvning, og sammenlignet dette med det teoretisk forventede.

Innholdsfortegnelse

Rapporten inneholder 30 sider og 4 sider vedlegg.

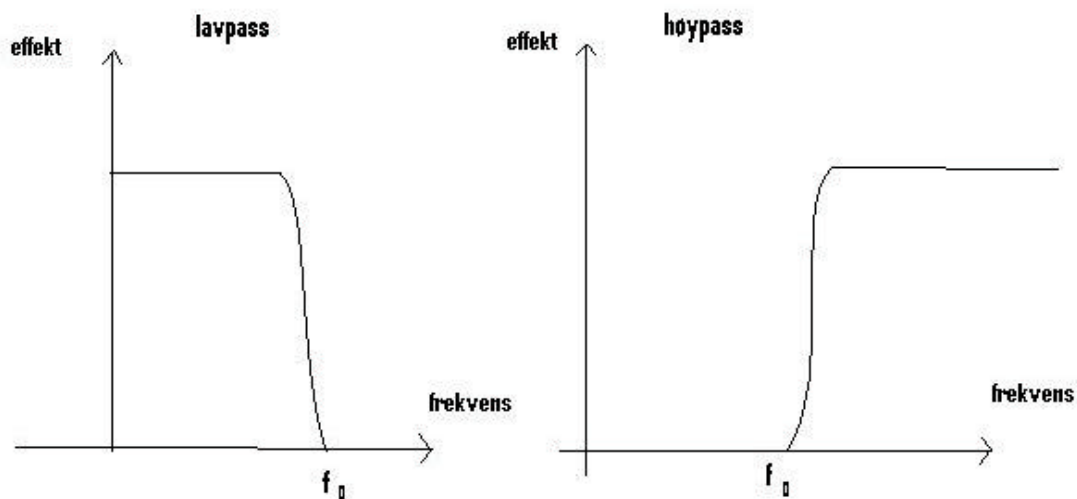
Innhold:

Forord	1
Sammendrag	2
Innholdsfortegnelse	3
1 Innledning	4
2 Teori	6
2.1 Spoler	6
2.2 Filterkretser	11
2.3 Høytalerelementet	16
3 Matematiske beregninger	18
3.1 Høypass	18
3.2 Lavpass	20
4 Fremgangsmåte	22
4.1 Verdiberegning	22
4.2 Spoleberegning	23
4.3 Praktisk fremgangsmåte og målinger	24
4.4 Faseforskyvning	27
5 Konklusjon/Oppsummering	31
6 Referanser	32
7 Vedlegg	
7.1 Måling av faseforskyvning – graf	i
7.2 Loddekurs	ii
7.3 Symboler & konstanter	iv

1 Innledning

Noe av det viktigste for menneskers trivsel i dag er å høre på musikk. Under krigen fikk vi både musikk og viktige nyheter ut fra disse raritetene kalt høyttalere. Vi mennesker har alltid vært ute etter perfektjon, og får å få best mulig lyd ut av høyttalere er det larest å la forskjellige høyttalerelement ta seg av forskjellige frekvenser. Altså innebærer dette mer enn å bare koble et signal inn på et element. I dag deler vi inn elementene i diskant, bass og gjerne mellomtone. Resultatet blir nok best med mellomtone, men dette gjør teorien for oss noe vanskeligere. Vi har tatt utgangspunkt i at vi vil ha en bass og en diskant, der de tar for seg henholdsvis de lave og de høye frekvenser.

Skal vi få til dette må vi ha en såkalt filterkrets som filtrerer ut de ønskede frekvensene til de rette høyttalerelementene. Den teoretiske biten her er å regne ut verdier for denne kretsen, for videre å bestemme hvilke verdier vi må ha på komponentene som inngår – for å få den ønskede virkningen. Ved å finne et uttrykk for effekten høyttalerelementet skal jobbe med kan vi bruke Microsoft Excel til å bestemme disse verdiene. Dette kan vi gjøre fordi vi vet hvordan vi vil at kurvene for effektene i bass og diskant helst skal se ut. Se Figur 1:



Figur 1

Vi vil altså at bassen skal arbeide for et gitt nedre frekvensområde og diskant for alle frekvenser over bassen.

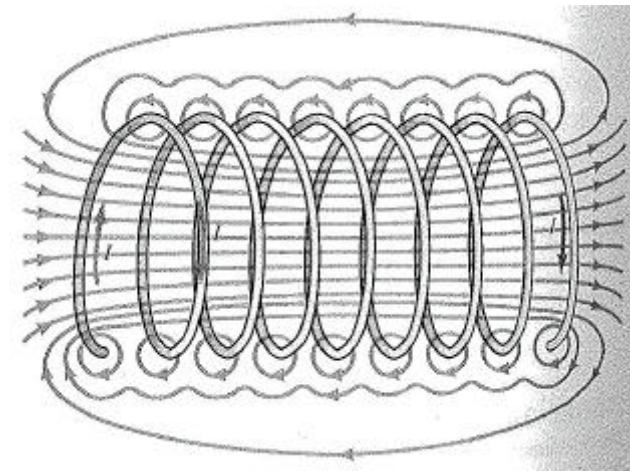
I prosjektet spiller spoler/induktanser en viktig rolle. Både som bestanddel av høyttalerelementet og i kretsen. Spolene skulle vi også lage selv. På grunn av dette har spoler med forskjellige tilknyttede formler fått en egen innledende plass i hoveddelen. Vi har ikke tatt med tilsvarende for kondensatorer da vi ikke fikk samme tilknytning til dem.

2 Teori

2.1 Spoler

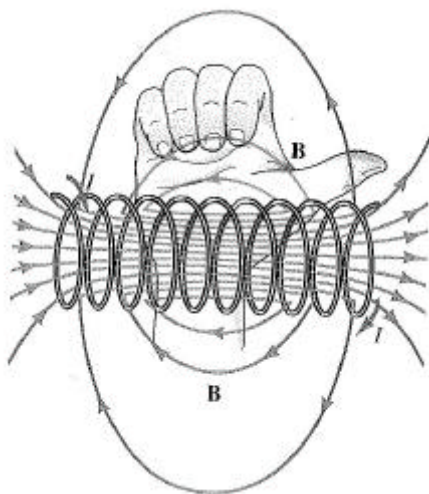
Et betydningsfullt element brukt i bl.a. kretser er spoler eller induktanser. En induktans består essensielt av en strømførende leder viklet tett rundt en eller annen form (helst firkantet eller sirkelformet). Formen kan imidlertid utelates. For å få en lett beregnelig spole bør lengden på spolen være mye større enn radiusen (for sylinderformet spole). I våre utregninger betraktes den som uendelig lang. Da kan vi lett bruke Amperes lov til å beregne det totale magnetfeltet induisert av den strømførende lederen.

La oss først se på hvordan magnetfeltet vil være rundt spolen:



Figur 2.1.1 (Fra ref. 1)

Vi ser at med mange, og tette, nok viklinger vil feltet tilnærmet bli slik:



Figur 2.1.2 (Fra ref. 1)

Feltet på utsiden av spolen kan vi tilnærmet si er lik null. Vi kan se på det slik at feltlinjene er lukket og kan ikke krysse hverandre. Inne i spolen vil de da ligge tett i tett på det begrensede området, mens utenfor kan de "boltre seg fritt", noe som resulterer i drastisk mindre tetthet av feltlinjer.

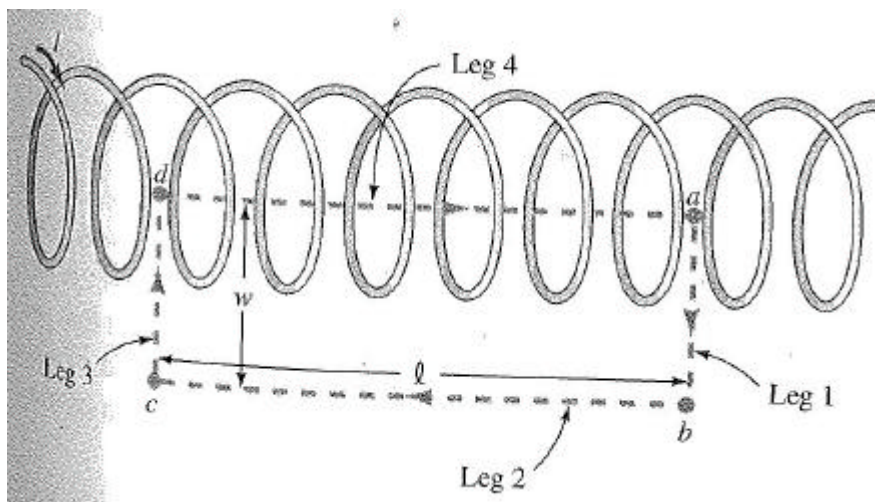
Så bruker vi Amperes lov til å finne styrken på det magnetiske feltet inne i spolen:

Vi tenker oss en Amperekurve som vist på figur 4. Amperes lov sier da at integralet av magnetfeltet rundt kurven er lik (for luftfylt spole) permeabiliteten til vakuum multiplisert med den totale strømmen kurven omslutter. Altså; Amperes lov:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{inn} \quad (2.1)$$

Utenfor spolen er $\mathbf{B}$ tilnærmet lik null, og for de loddrette siden av kurven står $\mathbf{B}$ normalt på ds , som også gir null i bidrag. Så det er kun den indre veggen med lengde d som gir bidrag, som for øvrig er $B \cdot d$. Samtidig vet vi at totalt omsluttet strøm vil være strømmen i spoletråden multiplisert med antall viklinger innenfor kurven. Dette gir oss et uttrykk for styrken på magnetfeltet inne i spolen:

$$B = \frac{\mu_0}{d} I_{inn} = \frac{\mu_0}{d} N \cdot I \quad (2.2)$$



Figur 2.1.3 (Fra ref. 1)

I vår prosjektoppgave skal vi bruke spoler til to ting. Først i filterkretsen hvor vi vil filtrere ut ønskede frekvenser til respektive høyttalerelement(Bass og diskant). Men det finnes også en spole i selve høyttalerelementet. Dette vil betraktes i delen om selve høyttalerelementet.

I filterkretsene skal vi bruke spolene til hjelp for å få teoretiske uttrykk som gir oss frekvensfiltrering. For å få til dette innfører vi to begreper; En spoles *induktans*, og en spoles *impedans*. Forskjellige elementer i en krets har hver sin egen impedans, og dette er et viktig verktøy i beregninger av for eksempel forskjellige strømmer i kretsen. For å regne ut total impedans i en krets legger man sammen impedansene etter regler for som motstander for serie- og parallellkoblinger for likestrøm.

Når det går strøm igjennom en spole vil det induseres en motspenning i spolen på grunn av det induserte feltet inne i spolen. Dette vil gi oss en slags motstand når vi skal regne på en krets som har spoler med. Når vi regner på kretser vil vi vite spenningsfallet over hvert element i kretsen. For en motstand har vi fra Ohms lov at det er $R \cdot I$. For å se hva dette blir for en spole tenker vi oss at strømmen gjennom en vikling induserer et magnetfelt inne i viklingen. Altså er feltet proporsjonalt med strømmen. Da er også fluksen gjennom viklingen proporsjonal med strømmen. Proporsjonalitetskonstanten som rettferdiggjør disse likningene kalles for induktansen, med symbol L . Det gir at fluksen gjennom overflaten bundet av viklingen er gitt slik:

$$\Phi_B \equiv L \cdot I \quad (2.3)$$

Fra Faradays lov får vi at industert ems(eller motspenning) i viklingen er forandringen av fluksen gjennom den:

$$e = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2.4)$$

Ved hjelp av (2), (3) og det faktum at omsluttet fluks per vikling er styrken på feltet multiplisert med arealet av overflaten bundet av viklingen (altså tverrsnittarealet av en sylinderformert spole) kan vi finne et uttrykk for induktansen L til en gitt spole. Vi ser at den avhenger bare av konstante størrelser og blir uavhengig av strømmen.:

$$\Phi_{tot} = N \cdot B \cdot A = N^2 m_0 I \frac{A}{d}, \Phi_{tot} = L \cdot I, \Rightarrow L = N^2 m_0 \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

Er ønsket induktans kjent ser vi at vi kan bruke (2.5) til å finne antall viklinger vi trenger på en bestemt spoleform.

Impedansen (absoluttverdi) gjennom et element er definert som spenningsamplituden dividert med strøamplituden gjennom elementet:

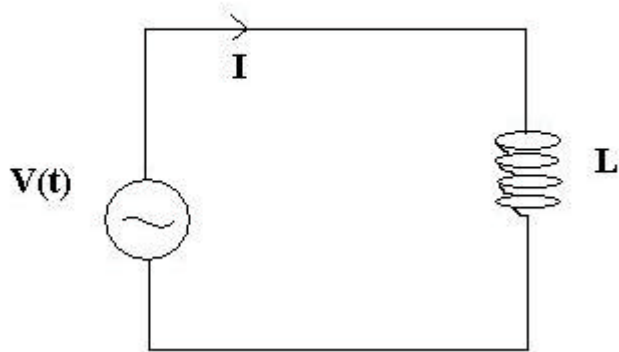
$$Z = \frac{V_0}{I_0} \quad (2.6)$$

Dette finner vi ved å bruke Kirchhoffs spenningslov på kretsen. Kirchhoffs spenningslov sier at summen av alle spenningsfall i en sløyfe av en krets skal være lik null. I en enkel krets med likespenning V og motstand R ser vi at $V - I \cdot R = 0$ stemmer bra da vi vet at spenningsfallet over en motstand er $-I \cdot R$ (når vi følger strømetningen). For å finne impedansen til en induktans ser vi på en VL-krets (Figur 5) og bruker Kirchhoff. Ved å bruke kompleks regning blir ikke dette den store matematiske utfordringen:

Kompleks regning går her ut på at ved et innsignal $V(t) = V_0 \cos(\omega t)$ kan vi heller skrive

$V(t) = V_0 e^{i\omega t}$ ved hjelp av Euleridentiteten: $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$, og så ta realdelen etterpå. For $Q(t)$ (ladningen på kondensatorplatene) og $I(t)$ (strømmen gjennom kretsen) blir det tilsvarende konvensjoner: $Q(t) = Q_0 e^{i\omega t}$ og $I(t) = I_0 e^{i\omega t}$.

Kompleks notasjon er tiltalende fordi ved derivering blir $e^{i\omega t} \rightarrow i\omega e^{i\omega t}$.



Figur 2.1.4 (VC-krets)

Kirchhoff gir:

$$V - L \frac{dI}{dt} = 0$$

$$V = V_0 e^{i\omega t}, I = I_0 e^{i\omega t}$$

$$\Rightarrow V_0 e^{i\omega t} - i\omega \cdot L I_0 e^{i\omega t} = 0$$

$$\Rightarrow I_0 = \frac{V_0}{i\omega L}$$

Fra (2.6) får vi da impedansen til en induktans:

$$Z_{spole} = i\omega L \tag{2.7}$$

2.2 Filterkretser

Tegningene i figur 2.2.1, 2.2.2 og 2.2.3 er delvis hentet fra referanse 1 fig. 34-21 s 927

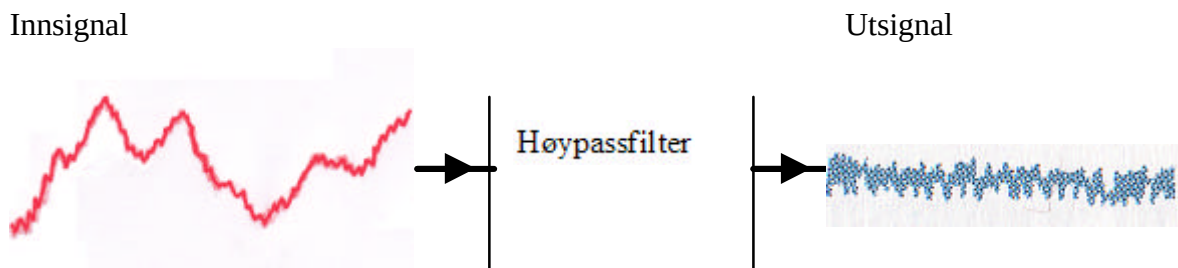
Litt generelt om filterkretser

Filterkretser brukes til å filtrere/skilte forskjellige frekvensområder ut fra et innsignal.

Desto skarpere en vil ha utsignalet, desto mer innviklet krets får en.

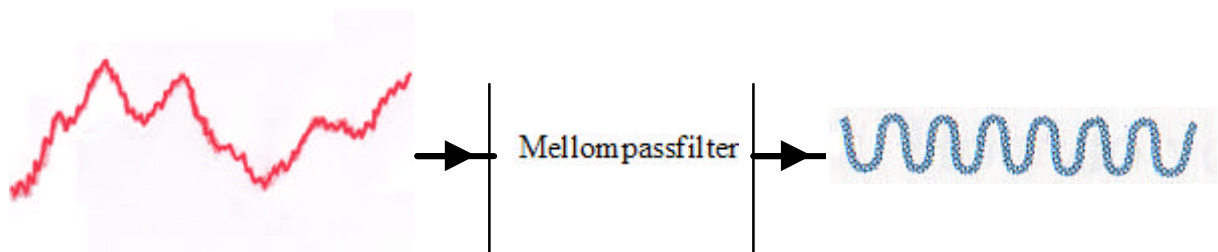
Når det gjelder høyttalere finnes det tre forskjellige kategorier av filtre:

- 1) **Høypassfilter** som filtrerer ut høye frekvenser:



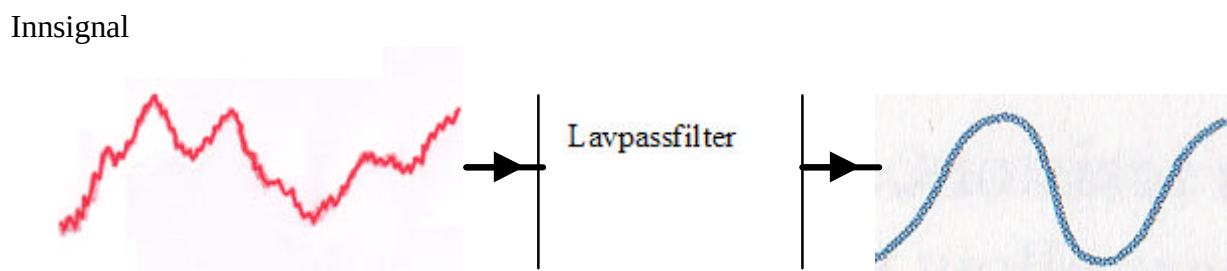
Figur 2.2.1

- 2) **Mellompassfilter** som filtrerer ut mellomfrekvenser:



Figur 2.2.2

- 3) **Lavpassfilter** som filtrerer ut lave frekvenser



Figur 2.2.3

Komponenten i filtrene, som vi skal se på, består av resistanser, spoler og kondensatorer. Impedansen Z for en spole L og en kondensator C er definert som følgende:

$$\begin{aligned} Z_L &\equiv (V_0/I_0) \\ Z_C &\equiv (V_0/I_0) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Ut ifra den første definisjonen har vi vist at

$$Z_L = i\omega L \quad \text{se ligning (2.7)}$$

Videre kan det vises at

$$Z_C = 1/(i\omega C) \quad \text{der } \omega \text{ er vinkelfrekvensen} \quad (2.9)$$

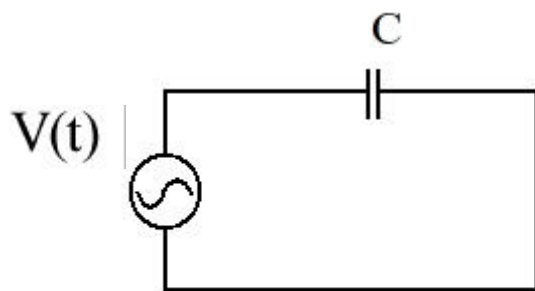
Hvis en da anvender Ohms lov ($V = I \cdot R$, dvs. $V = I \cdot Z$) på spolen og kondensatoren gir den at

$$V_L = (i\omega L) \cdot I \quad (2.10)$$

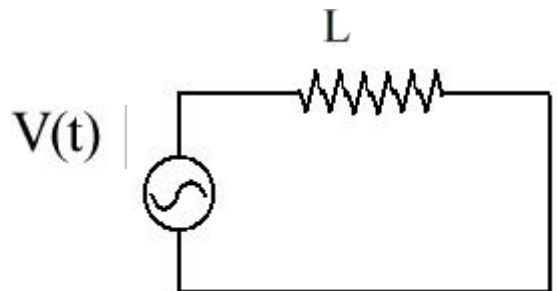
$V_C = (1/(i\omega C)) \cdot I \quad (2.11)$ der V_L og V_C er henholdsvis spenningen over spolen og kondensatoren for en gitt strøm I . V_L og V_C inneholder komplekse størrelser.

Av dette ser en at spenningen over spolen øker proporsjonalt med ω for en gitt strøm. Dette fører til at det vil legge seg et spenningsfall med høye frekvenser over spolen. For kondensatoren blir det motsatt. Spenningen over kondensatoren øker omvendt proporsjonalt med ω , dette gjør at det vil legge seg et spenningsfall med lave frekvenser over kondensatoren. Vi vil presisere at verken en spole eller en kondensator kan brukes som et filter alene. Se figur 2.2.4

Krets 1



Krets 2



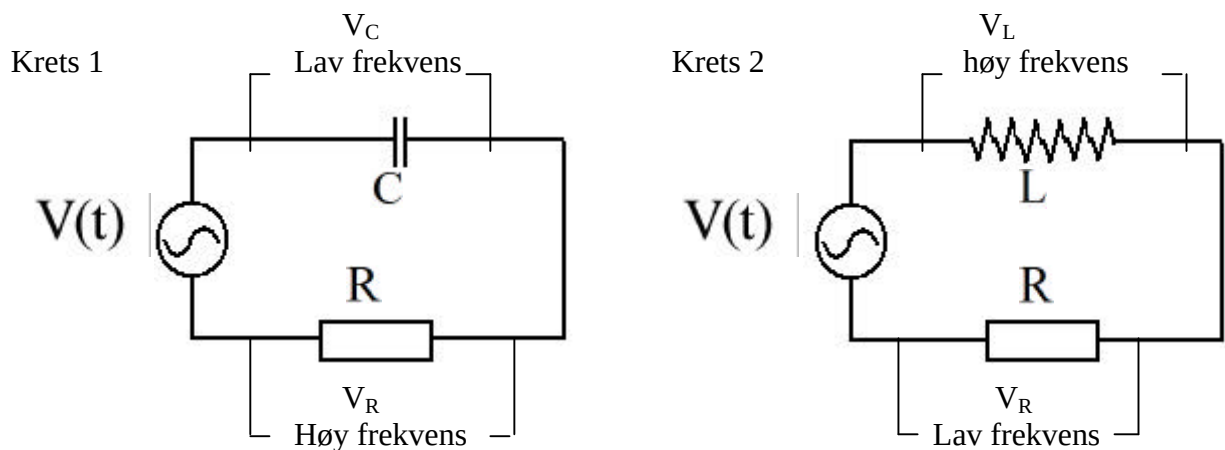
Figur 2.2.4

Hvis en bruker Kirchhoffs spenningsregel på disse to kretsene: $\Sigma(\text{spenningsfall}) = 0$ så ser en med en gang at

$$V(t) = V_C = V_L \quad (2.12)$$

Altså blir ingen frekvensområder filtrert ut over kondensatoren og spolen.

Hvis en legger inn en resistans R i hver krets på figur 2.2.4, så kommer disse to kretsene til å fungere som filterkretser. Se figur 2.2.5



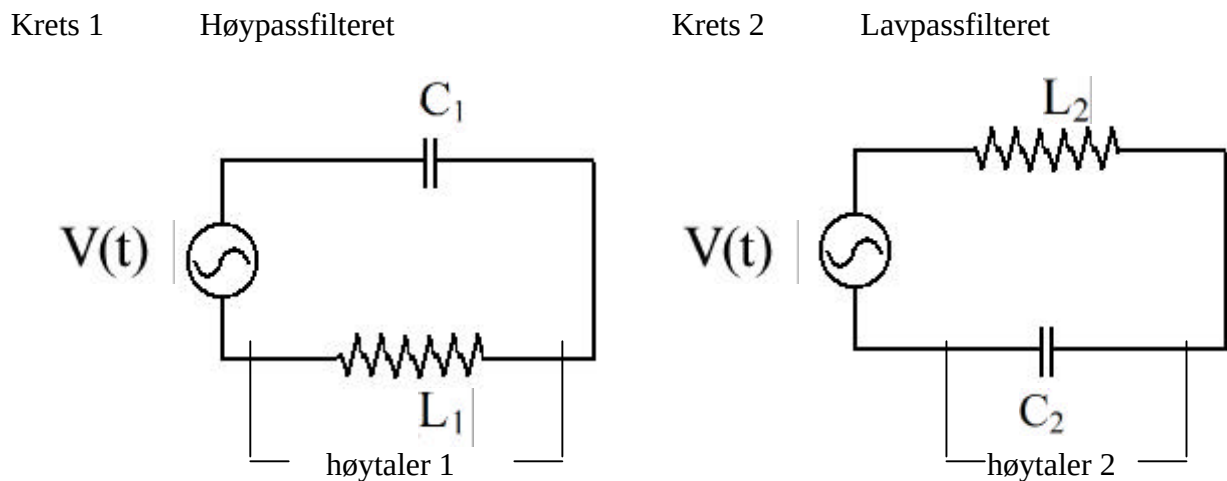
Figur 2.2.5

Filterkretsene på figur 2.2.5 er en av de enkleste filterkretser som finnes. Egentlig så kan det ikke finnes noen enklere filterkretser en dette.. Som nevnt tideligere, så får du filtrert ut lav frekvens over en kondensator og høy frekvens over en spole. Da sier det seg egentlig selv spenningen over at resistansen må inneholde de "gjenværende" frekvensene, altså de frekvensene som ikke ligger over kondensatoren og spolen.

Derfor får vi lav frekvens over resistansen for krets 1 og høy frekvens over resistansen for krets 2, selv om resistansene kunne ha vært like.

Vår filterkrets

Vi lagde to filterkretser, et høypassfilter og et lavpassfilter. Kretsene er helt like de på figur 2.2.5, bortsett fra at vi ”byttet” ut resistansene med en spole og en kondensator. Se figur 2.2.6



Figur 2.2.6

Kretsene i figur 2.2.6 er prinsipielt helt like, men verdiene for spolens induktans er forskjellige. Imidlertid er verdiene for kondensatorens kapasitans like. Vi har i krets 1 parallellkoblet høyttaler 1 med spole L_1 , og i krets 2 har vi parallellkoblet høyttaler 2 med kondensator C_2 , noe som fører til at vi får ut diskant på høyttaler 1 og bass på høyttaler 2. Vi kunne ha laget et høypassfilter og et lavpassfilter ut ifra krets 1 hvis vi hadde plassert høyttaler 2 over kondensator C_1 , men da hadde frekvensområdene for diskant og bass hvert avhengige av hverandre. Derfor har vi laget disse to uavhengige kretsene slik at vi hadde mye større mulighet til å tilpasse bass og diskant som vi ville.

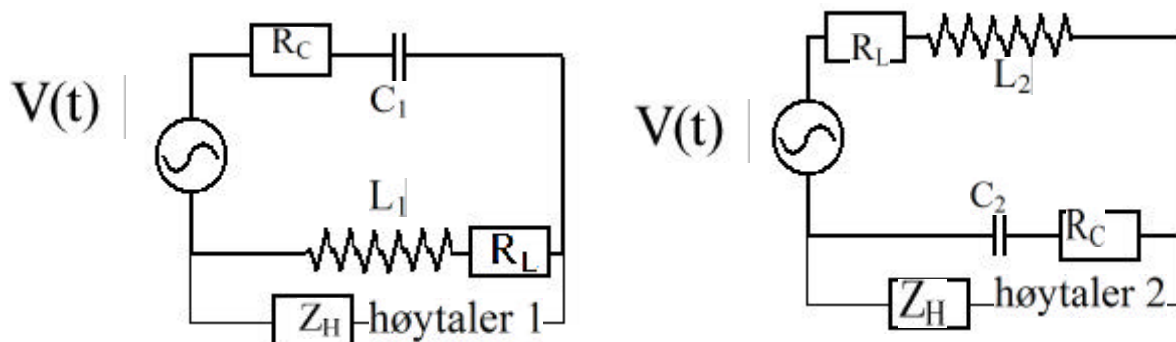
Siden vi ikke hadde noen erfaring med filterkretser da vi begynte på dette prosjektet, så valgte vi å gå inn på hjemmesida til Ljudia, se referanse 2 for å finne noen passende kretser der. Vi fant da disse to kretsene som er på figur 2.2.6 Vi syntes disse to kretsene så såpass enkle ut, slik at vi kunne klare å regne på og analysere dem, og ikke minst lage de i virkeligheten med våre forkunnskaper innenfor filterkretser.

I virkeligheten finnes det ikke noen ideelle kretser som på figur 2.2.6, vi har både resistans i spolene, i kondensatorene, og i ledere. For å ta hensyn til dette har vi modifisert kretsene i figur 2.2.6 ved å legge inn tre resistanser R_C , R_L , og Z_H i kretsen. Se figur 2.2.7

Krets 1 Høypassfilteret

Krets 2

Lavpassfilteret



Figur 2.2.7

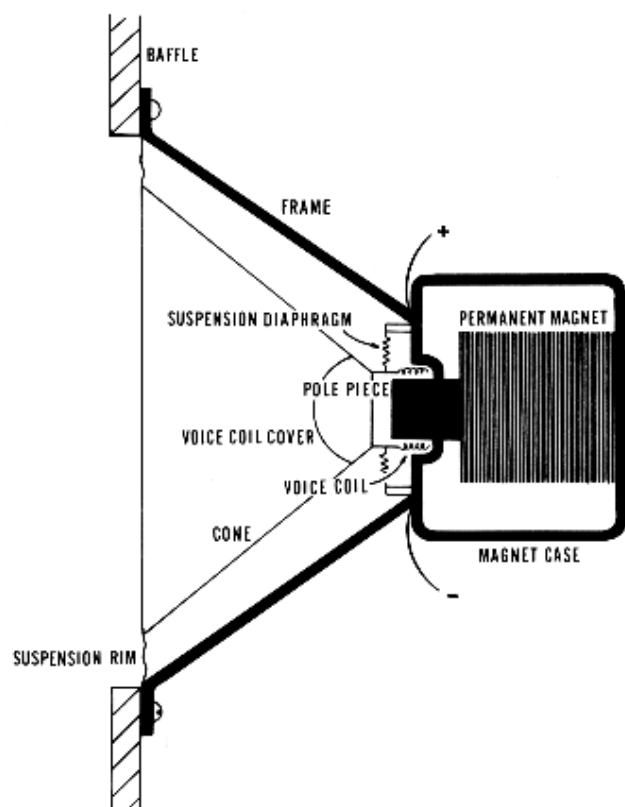
Da vi beregnet kondensatorenes kapasitans og spolenes induktans, regnet vi på disse kretsene som vist i figur 2.2.7. Vi har antatt at induktansen i høytaleren er så liten at det ikke er nødvendig å ta den med i disse beregningene, siden impedansen på høytalerne var oppgitt i Ohm. Det vil si at $Z_H = R_H + i\omega L \approx R_H$ der R_H er den reelle motstanden i høytaleren.

2.3 Høytalerelementet

Hittil har vi verktøy for å filtrere innsignalet til høyttaleren. Men utsignalet er fortsatt bare i ”elektrisk tilstand”. Omgjøringsprosessen fra spenningssignalet i grenen hvor vi regnet ut utsignalet skjer i et høytalerelement. Prosessen er motsatt fra for eksempel lyd gjennom mikrofon til elektrisk signal i kretsen(innsignal). En høytaler består (for eksempel) essensielt av en sirkelformet magnet, med for eksempel sørpol i midten(radius $r > 0$) og nordpol rundt(radius $R > r > 0$, såkalt annulus) I det svært tynne luftrommet mellom polene er det en spole som er festet til membranen – som videre skal gi oss lyd.

Når utsignalet vårt går igjennom spolen i elementet blir spolen selv en magnet, med vekslende retning i samsvar med signalets frekvens (Det er jo en vekselspanning vi har). Når spolen essensielt blir en magnet med sørpol på den enden som er ved høytalermagneten, vil spolen – festet til membranen – blir frastøtet, og membranen svinger ut. Når så signalet skifter retning blir spolen en nordpol på samme stedet, og spolen tiltrekkes da magneten. Da vil membranen svinge inn. Når dette skjer i samsvar med signalets frekvens vil altså membranen gjengi det elektriske signalet til lydbølger i luft. Og vips; høyttaleren har gjort sin oppgave.

Vi ser på figur 2.3.1 at det er noen ekstra fjærer fra sidene inn mot membranspolen. Dette er fjærer som skal dempe resonanstoppene som vil være naturlig i et slikt mekanisk svingesystem.



Figur 2.3.1 (Fra referanse 3, Skjematisk tegning av høyttalerelementet)

3 Matematiske beregninger

3.1 Høypass

Impedans:

$$Z_{High} = R_K + \frac{1}{i\omega C} + \left(\frac{1}{i\omega L + R_L} + \frac{1}{Z_H} \right)^{-1}$$

Der R_K er motstand i kondensator, R_L er motstand i spole og Z_H er impedans i høytalerelementet.

$$\begin{aligned} &= R_K + \frac{1}{i\omega C} + \frac{Z_H \cdot (i\omega L + R_L)}{Z_H + i\omega L + R_L} \\ &= \frac{-\omega^2 LC \cdot (R_K + Z_H) + Z_H + R_L + i\omega \cdot (R_K C \cdot (Z_H + R_L) + R_L C Z_H + L)}{-\omega^2 LC + i\omega L \cdot (Z_H + R_L)} \end{aligned}$$

$$|Z| = \frac{\sqrt{(R_L + Z_H - \omega^2 Z_H CL - R_K \omega^2 CL)^2 + \omega^2 \cdot (R_K C Z_H + R_K R_L C + L + C Z_H R_L)^2}}{\sqrt{\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 \cdot (Z_H + R_L)^2}}$$

Faseforskyvning a :

$$a = \arctan\left(\frac{\omega \cdot (R_K C \cdot (Z_H + R_L) + R_L C Z_H + L)}{-\omega^2 LC \cdot (R_K + Z_H) + Z_H + R_L}\right) + \arctan\left(\frac{(Z_H + R_L)}{\omega L}\right) \quad (3.1)$$

Spenning og strøm gjennom høytalerelementet:

$$V_H = V_{Inn} - I \cdot \left(R_K + \frac{1}{i\omega C}\right) \quad V_H = V_L$$

Der V_H er spenningen gjennom høytalerelementet og V_L er spenningen gjennom spolen.

$$\Rightarrow I_L R_L + L \frac{\partial}{\partial t} I = Z_H I_H \quad \Rightarrow I_L R_L + i\omega L I_L = Z_H I_H$$

$$\Rightarrow I_L = \frac{Z_H I_H}{R_L + i\omega L} \quad (3.2) \quad , \text{ der } I_L \text{ er strømmen gjennom spolen og } I_H \text{ er strømmen gjennom høytalerelementet.}$$

$$\frac{V}{Z_{High}} = I_{High} = I_L + I_H \quad \text{Setter inn likning (3.2) og får:}$$

$$\Rightarrow I_H = \frac{I_{High}}{\frac{Z_H}{i\omega L + R_L} + 1} = \frac{(i\omega L + R_L) \cdot I_{High}}{Z_H + i\omega L + R_L} \quad (3.3). \text{ Dermed er både } I_{High}, I_L, \text{ og } I_H \text{ kjent. Dermed}$$

kan vi finne.....

Effekten i høytaleren:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_H I_H dt = \frac{1}{T} \int_0^T Z_Z I_H^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T Z_H |I_{H0}|^2 \underbrace{\cos^2(\omega t - a)}_{\frac{T}{2}} dt = \frac{Z_H}{T} |I_{H0}|^2 \cdot \frac{T}{2} =$$

$$\frac{Z_H}{2} |I_{H0}|^2$$

Setter vi inn likning (3.3) i formelen for effekt får vi:

$$\langle P \rangle = \frac{Z_H |I_{High0}|^2 \cdot (\omega^2 L^2 + R_L^2)}{2((Z_H + R_L)^2 + \omega^2 L^2)}$$

Når vi setter inn $|I_{High0}| = \frac{V_0}{|Z|}$ får vi:

$$\langle P \rangle = \frac{Z_H V_0^2 \cdot (R_L^2 + \omega^2 L^2) \cdot (\omega^4 L^2 C^2 + \omega^2 C^2 \cdot (Z_H + R_L)^2)}{2((Z_H + R_L)^2 + \omega^2 L^2) \cdot ((-\omega^2 LC(R_K + Z_H) + (Z_H + R_L))^2 + \omega^2 (R_K C(Z_H + R_L) + R_L (Z_H + L)^2))}$$

Setter vi R_K og $R_L = 0$ får vi:

$$\langle P \rangle = \frac{Z_H V_0^2 \omega^2 L^2 \cdot (\omega^4 L^2 C^2 + \omega^2 C^2 Z_H^2)}{2(Z_H^2 + \omega^2 L^2) \cdot ((-\omega^2 LCZ_H)^2 + \omega^2 L^2)}$$

3.2 Lavpass:

Impedans:

$$\begin{aligned}
 Z_{Low} &= R_L + i\omega L + \left(\frac{1}{R_K + \frac{1}{i\omega C}} + \frac{1}{Z_H} \right)^{-1} \\
 &= R_L + i\omega L + \left(\frac{(R_K i\omega C + 1) \cdot Z_H}{i\omega C Z_H + R_K i\omega C + 1} \right) \\
 &= \frac{R_L - \omega^2 LC \cdot (Z_H + R_K) + Z_H + i\omega \cdot (R_L Z_H C + R_L R_K C + L + C R_K Z_H)}{1 + i\omega C \cdot (Z_H + R_K)} \\
 |Z_{Low}| &= \frac{\sqrt{(R_L - \omega^2 LC \cdot (Z_H + R_K) + Z_H)^2 + \omega^2 \cdot (R_L Z_H C + R_L R_K C + L + C R_K Z_H)^2}}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 \cdot (Z_H + R_K)^2}}
 \end{aligned}$$

Faseforskyvning a :

$$a = \arctan\left(\frac{\omega \cdot (R_L Z_H C + R_L R_K C + L + C R_K Z_H)}{R_L - \omega^2 LC \cdot (Z_H + R_K) + Z_H}\right) - \arctan(\omega C \cdot (Z_H + R_K)) \quad (3.4)$$

Spenning og strøm gjennom høytalerelementet:

$$\begin{aligned}
 V_H &= I R_L + L \frac{\partial}{\partial t} I & V_H &= V_L \\
 \Rightarrow I_K R_K + \frac{I_K}{i\omega C} &= Z_H I_H, \text{ der } I_K \text{ er strømmen gjennom kondensatoren og } I_H \text{ er strømmen} \\
 &\text{gjennom høytalerelementet.}
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow I_K = \frac{Z_H I_H}{R_K + \frac{1}{i\omega C}} \quad (3.5)$$

$$\frac{V}{Z_{Low}} = I_{Low} = I_K + I_H$$

Setter inn likning (3.5) og får:

$$I_{Low} = I_H \cdot \left(\frac{Z_H}{R_K + \frac{1}{i\omega C}} + 1 \right) \Rightarrow I_H = \frac{I_{Low} \cdot (R_K i\omega C + 1)}{Z_H i\omega C + R_K i\omega C + 1} \quad (3.6)$$

Effekten i høytaleren:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_H I_H dt = \frac{1}{T} \int_0^T Z_Z I_H^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T Z_H |I_{H0}|^2 \underbrace{\cos^2(\omega t - a)}_{\frac{T}{2}} dt = \frac{Z_H}{T} |I_{H0}|^2 \cdot \frac{T}{2} = \frac{Z_H}{2} |I_{H0}|^2$$

Setter inn likning (3.6) inn i formelen for effekt og får:

$$\langle P \rangle_H = \frac{Z_H |I_{Low}|^2 \cdot (1 + \omega^2 R_K^2 C^2)}{2 \cdot (1 + \omega^2 \cdot (CZ_H + R_K C)^2)}$$

Setter inn $|I_{Low}| = \frac{V_0}{|Z_{Low}|}$ og får:

$$\langle P \rangle_H = \frac{Z_H V_0^2 \cdot (1 + \omega^2 R_K^2 C^2)(1 + \omega^2 C^2 \cdot (Z_H + R_K)^2)}{(1 + \omega^2 \cdot (CZ_H + R_K C)^2)((R_L - \omega^2 LC \cdot (Z_H + R_K) + Z_H)^2 + \omega^2 \cdot (R_L Z_H C + R_L R_K C + CR_K Z_H + L)^2)}$$

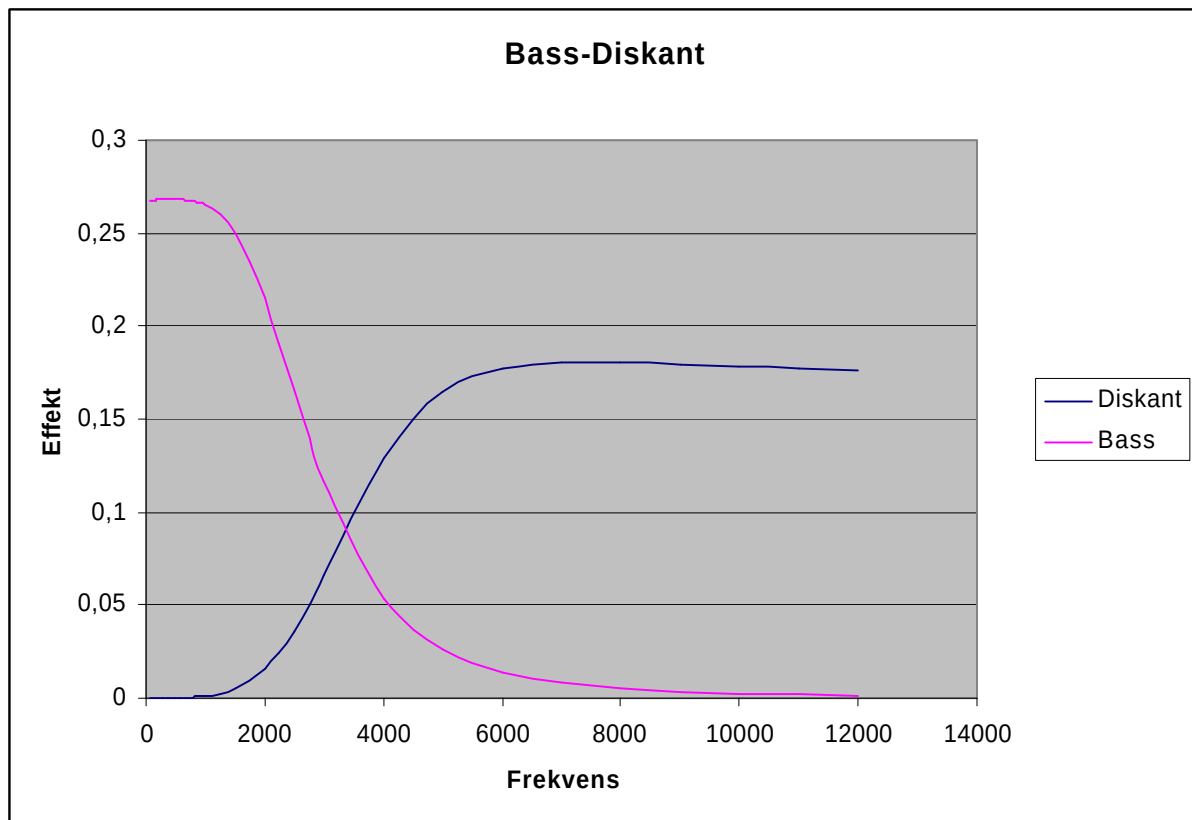
Setter vi R_K og R_L lik 0 får vi:

$$\langle P \rangle_H = \frac{Z_H V_0^2 \cdot (1 + \omega^2 C^2 Z_H^2)}{2 \cdot (1 + \omega^2 C^2 Z_H^2)((-\omega^2 LCZ_H + Z_H)^2 + \omega^2 L^2)}$$

4 Fremgangsmåte

4.1 Verdiberegning

Når de teoretiske beregningene er unnagjort er kretsens forskjellige komponenter entydig bestemt. Dette inneholdt en del algebra, samt nyttig bruk av Excel. Ved å skrive inn uttrykkene for effektene i Excel kunne vi prøve oss med forskjellige verdier for komponentene i kretsen. Ved å se på hvilke verdier som gav oss best mulig kurve for hvert filter – samt at de krysset hverandre på en slik måte at ingen frekvenser kom utenfor begge – ble verdiene bestemt. Deretter måtte vi se på hvilke verdier av komponentene som var mulig å skaffe. Dette førte til små justeringer av verdiene. I Figur 4.1.1 har vi fremstilt teoretiske effektkurver. I Figur 4.1.2 er de tilhørende tabeller med verdier for komponentene.



Figur 4.1.1

Bass	
V _{inn} (V)	2,2000000
R _{kondensator} (Ohm)	2,7000000
R _{Induktans} (Ohm)	0,8000000
C(F)	0,0000047
L(H)	0,0003200
Z _H (Ohm)	8,0000000

Diskant	
V _{inn} (V)	2,2000000
R _{kondensator} (Ohm)	2,7000000
R _{Induktans} (Ohm)	0,5000000
C(F)	0,0000047
L(H)	0,0005700
Z _H (Ohm)	8,0000000

Figur 4.1.2

4.2 Spoleberegning

Når det gjelder spolene fant vi ut at en fin vri hadde vært å lage dem selv. De ble laget av en dobbel toalettrull og en tom sysnelle. Vi visste hvilken verdi for induktansen vi skulle ha fra beregningene over. Da ble jobben å finne ut hvor mange viklinger med kobbertråd vi måtte vikle rundt spoleformene våre(for hånd!). Fra (5) ser vi at dette blir slik:

$$L = N^2 m_0 \frac{A}{d}$$

$$\Rightarrow N = \sqrt{\frac{L \cdot d}{m_0 \cdot A}}$$

$$m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m / A, A_{\text{toalettrull}} = 1,81 \cdot 10^{-3} m^2, L_{\text{bass}} = 0,56 mH, d_{\text{toalettrull}} = 0,095 m$$

$$A_{\text{sysnelle}} = 4,26 \cdot 10^{-4} m^2, L_{\text{diskant}} = 0,39 mH, d_{\text{sysnelle}} = 0,043 m$$

$$\Rightarrow N_{\text{bass}} = 153$$

$$\Rightarrow N_{\text{diskant}} = 182$$

Da denne formelen er fra en idealisert spole(uendelig lang, vakuum, etc), ville reell induktans være noe forskjellig fra den vi ønsket. Den reelle L-verdien og motstanden i spolen ble målt etter at den var ferdig viklet. Vi hadde viklet på ca. 20 ekstra for å være sikre, men det viste seg at for sysnellen holdt det ikke. Et problem for den var blant annet at radiusen til

tverrsnittet varierte ettersom flere lag med viklinger kom på – selv om vi på forhånd tok høyde for dette og regnet med en midlere radius. Vi bemerker at i effektkurvene over er det den reelle L-verdien og motstand vi har satt inn. Vi ser at kurven fikk den ønskede formen likevel.

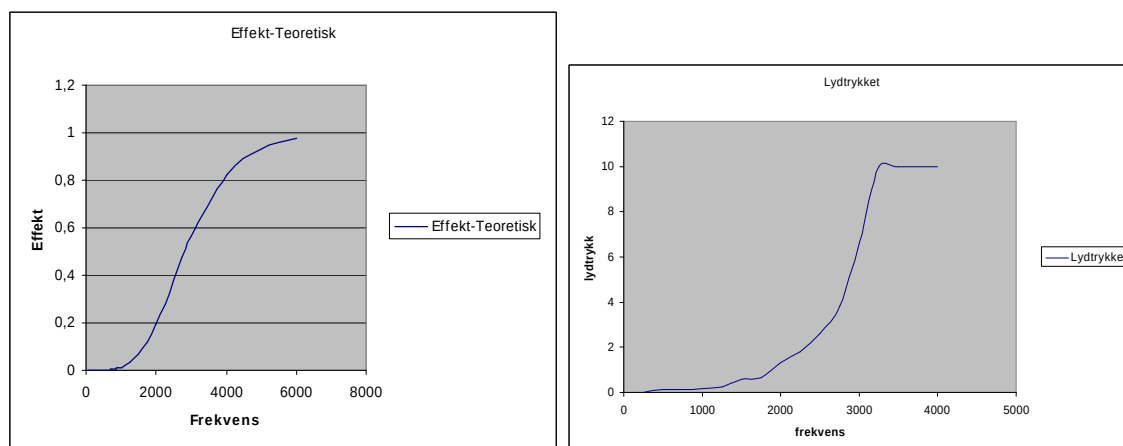
4.3 Praktisk fremgangsmåte og målinger

Videre måtte komponentene kobles sammen til den ønskede kretsen. For å få dette gjennomført på en profesjonell måte fikk vi muligheten til å lære oss noe nytt og praktisk: lodding. Komponentene skulle loddess sammen på et loddebrett, akkurat slik elektronikken vi finner til daglig er. For å kunne utføre dette hadde vi et ca. 2 timer langt introduksjonskurs i lodding, anført av han som har loddekurs for 3.klassinger. Etter å ha bestått dette kunne vi lodde sammen oppgaven vår.

Når dette var gjort måtte det selvfølgelig testes. Var arbeidet bra nok gjennomført skulle vi få lyd ut av høyttalerne. Gleden var stor da en signalgenerator ble tilkoblet kretsen og vi fikk lyd ut. Både lavpass- og høypassfilter gav lyd fra seg.

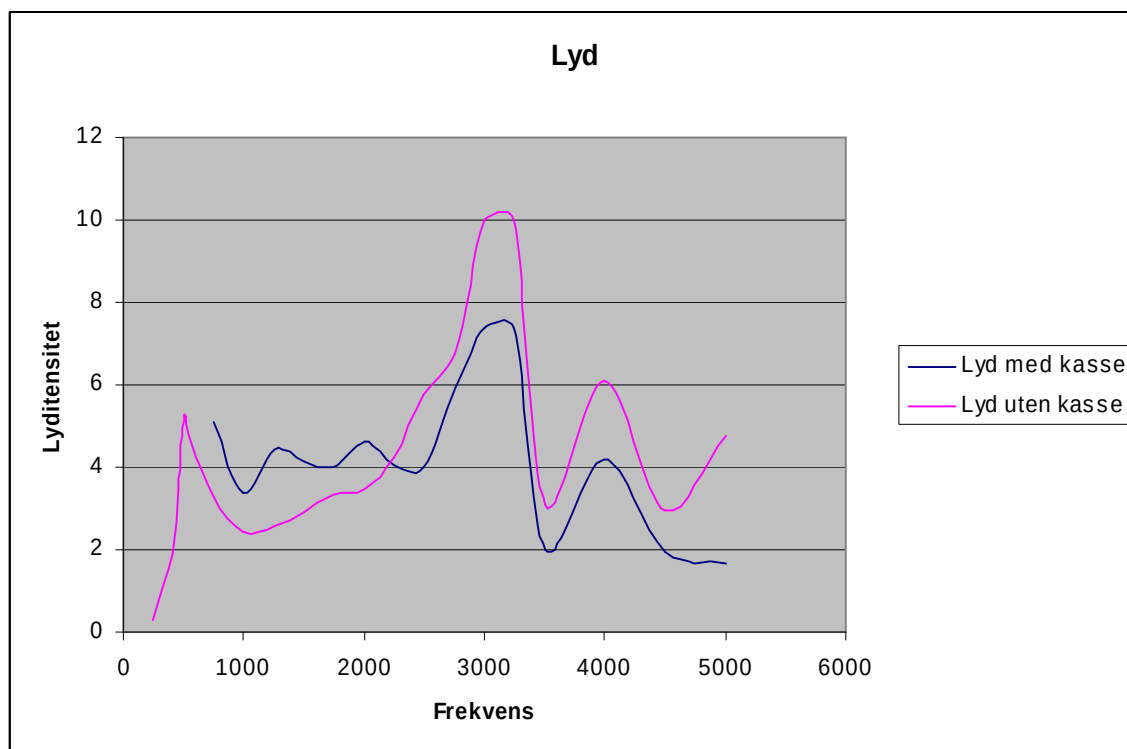
Neste skritt ble da å foreta kvalitative målinger av lyden som ble produsert da vi varierte frekvensen på innsignalet. Lydkurven skulle da etter teorien ha noe samme form som effektkurvene vi hadde beregnet. Høypassfilteret var først ut med å gi oppløftende resultater. Ved lave frekvenser var lyden svært lav, og den økte i takt med formen på effektkurven. Dette var et gledelig bevis på at filteret hadde filtrert ut de laveste frekvensene, slik som teorien tilsier.

Her har vi sammenlignet effekt- og lydkurven:



Figur 4.3.1

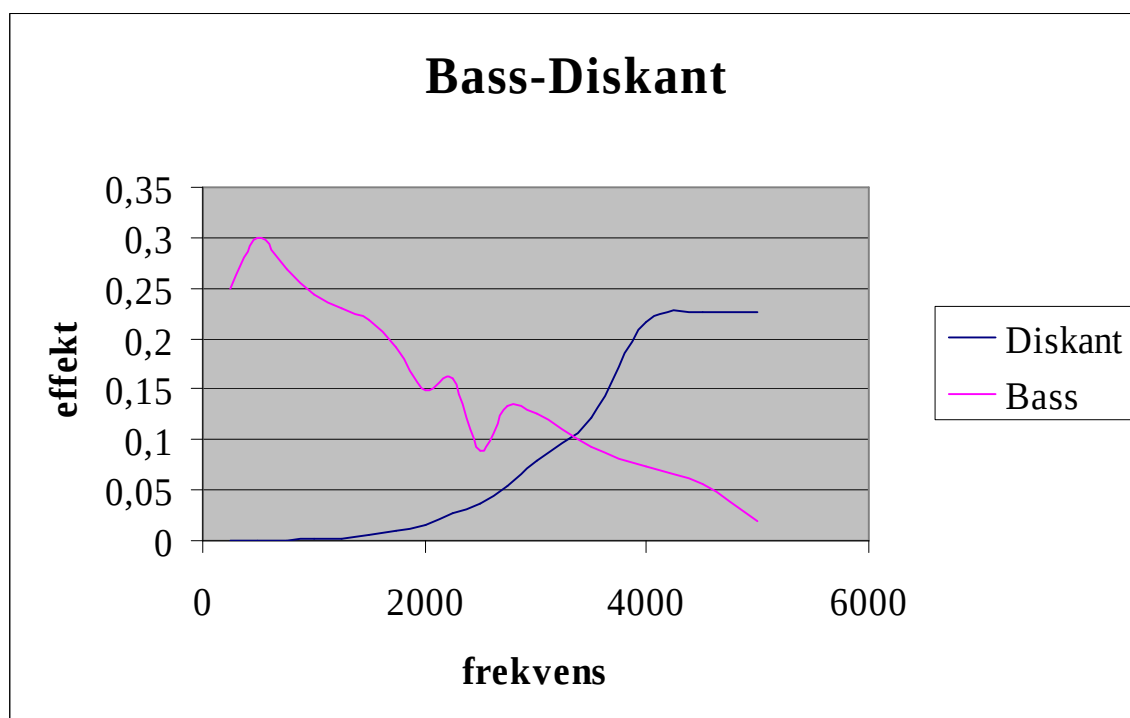
Under målinger av lavpassfilteret derimot møtte vi et problem lydteknikere flest sliter med. Kurven hadde noe av den rette formen, men flere resonanstopper oppstod. Dette er selvsagt litt uheldig, men det er nå den gang slik at slikt oppstår. Høytalerelementet er et mekanisk svingesystem og vil dermed ha resonansområder. Samtidig kan også selve kassen høytalerelementet er bygd inn i påvirke lyden, og eventuelt gi resonans. Målinger med og uten kasse gav forskjell, men det viste seg faktisk at kassen dempet toppene en del, som vist på figuren:



Figur 4.3.2

Av det målte lydtrykket ser vi at vi har resonans ved frekvensen lik $\sim 3000\text{Hz}$ og en mindre resonans ved $\sim 4000\text{Hz}$. Vi ser videre at den største resonansen er "avspist" på toppen, noe som er vanlig fordi produsenten prøver alltid å gjøre resonansen mindre ved å gjøre deler av spolen i høytalerelementet stivere. Dette gjør at resonansen blir mye mindre enn det den ellers hadde vært, men vi får flere resonanser.

Etter dette bestemte vi oss for å måle effekten over høytalerelementene i stedet, for å prøve å få sett bort i fra resonans i selve elementet. En ny runde med Pasco dataloggesystem gav oss disse effektkurvene for bass og diskant:



Figur 4.3.3

Vi ser at for diskanten har vi også her et svært oppløftende resultat, mens vi fortsatt har noen turbulenser i bassen. Men formen er noenlunde slik den skal være, og vi ser her et annet gledelig resultat; bass og diskant krysser hverandre på samme sted som i teorien!

Som du ser har vi bare målt opp til 5000Hz , grunnen til det er at følsomheten i utstyret ikke klarer å måle for høyere frekvenser. Loggefrekvensen bør nemlig være 10-100 ganger større enn frekvensen til det målte signalet. Når loggesystemet vårt hadde maksimum loggefrekvens på 10kHz sier det seg selv at de målte punktene som gav kurvene kunne avvike også for

frekvenser under 5000Hz. Dette kan også være en grunn til forstyrrelsene i kurvene våre. For frekvensene over dette ble det umulig å få gyldige resultater.

4.4 Faseforskyvning

Strømmen som går igjennom kretsen blir faseforskjøvet i forhold til spenningen, men dette er ikke viktig for oss. Det som er viktig er hvordan strømmen som går gjennom bassen og diskanten er forskjøvet i forhold til hverandre.

Vi satte på en testfrekvens på 500Hz og målte lydtrykket i bassen og diskanten. Resultatet ser du i grafen på vedlegg 1. Det vi ser der er at lyden er minimalt/ikke forskjøvet i forhold til hverandre, noe som vi kunne forvente siden høypass- og lavpassfilteret er like bortsett fra at kondensatoren og spolen har byttet plass.

Den minimale forskjellen skyldes nok at L-verdien er forskjellig for de to kretsene.

Teoretisk skulle vi ha en faseforskjell på 0,60. Dette avviket kan ha noe med at vi ser på elementet som kun en motstand i våre beregninger.

Når vi skal se på faseforskjellen mellom de to høyttalerne må vi se på strømmene som går igjennom elementet, og ikke totalstrømmen. Faseforskyvningene er nemlig forskjellig. Dette fører til litt mer regning:

Ettersom spenningen over en parallellkobling er lik for begge grenene har vi for diskanten:

$$\begin{aligned} Z_H \cdot I_H &= R_L \cdot I_L + L \cdot \dot{I}_L = (R_L + i\omega L) \cdot I_L \\ \Rightarrow I_L &= \frac{Z_H I_H}{(R_L + i\omega L)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Videre er jo totalstrømmen (Fra Kirchhoffs knutepunksregel, at total strøm inn mot et knutepunkt skal være null) beskrevet i (4.2) og videre med (4.1) innsatt får vi et uttrykk for strømmen gjennom høyttalerelementet. Som vi så uttrykker med kompleks notasjon og finner til slutt et uttrykk for faseforskyvningen i forhold til innsignalet: (Merk at også (2.6) brukes)

$$I_{High} = I_L + I_H \quad (4.2)$$

$$I_{High} = \left(\frac{Z_H}{(R_L + i\omega L)} + 1 \right) \cdot I_H$$

$$\Rightarrow I_H = I_{High} \cdot \frac{(R_L + i\omega L)}{(R_L + Z_H + i\omega L)} = \frac{V}{Z} \cdot \frac{(R_L + i\omega L)}{(R_L + Z_H + i\omega L)} = \frac{V_0 e^{i\omega t}}{|Z| e^{ia}} \cdot \frac{\sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2} e^{i \arctan \frac{\omega L}{R_L}}}{\sqrt{(R_L + Z_H)^2 + \omega^2 L^2} e^{i \arctan \frac{\omega L}{(R_L + Z_H)}}}$$

Som skal være lik et uttrykk på formen: $|I_{High0}| e^{i\omega t} e^{-ia}$, Det gir:

$$a = a(\omega) - \arctan \frac{\omega L}{R_L} + \arctan \frac{\omega L}{(R_L + Z_H)} \quad (4.3)$$

Der $a(\omega)$ er fasevinkelen fra (3.1).

Med tilsvarende bruk av kunnskap finner vi faseforskyvningen for bassen også. Her må først (4.4) (analog med (4.1)) tilfredstilles.

$$\begin{aligned} Z_H I_H &= \frac{Q}{C} + I_K R_K = \left(\frac{1}{i\omega C} + R_K \right) I_K \\ \Rightarrow I_K &= \left(\frac{i\omega C Z_H}{(1 + i\omega C R_K)} \right) I_H \end{aligned} \quad (4.4)$$

Her er det brukt at $I_K = \dot{Q}$. Videre settes (4.4) inn i analogen til (4.2) og vi finner faseforskyvningen:

$$\begin{aligned} I_{Low} &= \left(\frac{i\omega C Z_H}{(1 + i\omega C R_K)} + 1 \right) I_H \\ \Rightarrow I_H &= \frac{V}{Z} \cdot \frac{(1 + i\omega C R_K)}{(1 + i\omega C (Z_H + R_K))} = \frac{V_0 e^{i\omega t}}{|Z| e^{ia}} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\omega C R_K)^2} e^{i \arctan \omega C R_K}}{\sqrt{1 + (\omega C (Z_H + R_K))^2} e^{i \arctan \omega C (Z_H + R_K)}} \\ \Rightarrow a &= a(\omega) - \arctan \omega C R_K + \arctan \omega C (Z_H + R_K) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Der $a(\omega)$ er fasevinkelen fra (3.4).

Fra faseforskyvningsuttrykkene i likningene (3.1), (3.4), (4.3) og (4.5) finner vi disse grenseverdiene:

$$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow a_{bass} \rightarrow \arctan 0 - \arctan 0 - \arctan 0 + \arctan 0 = 0$$

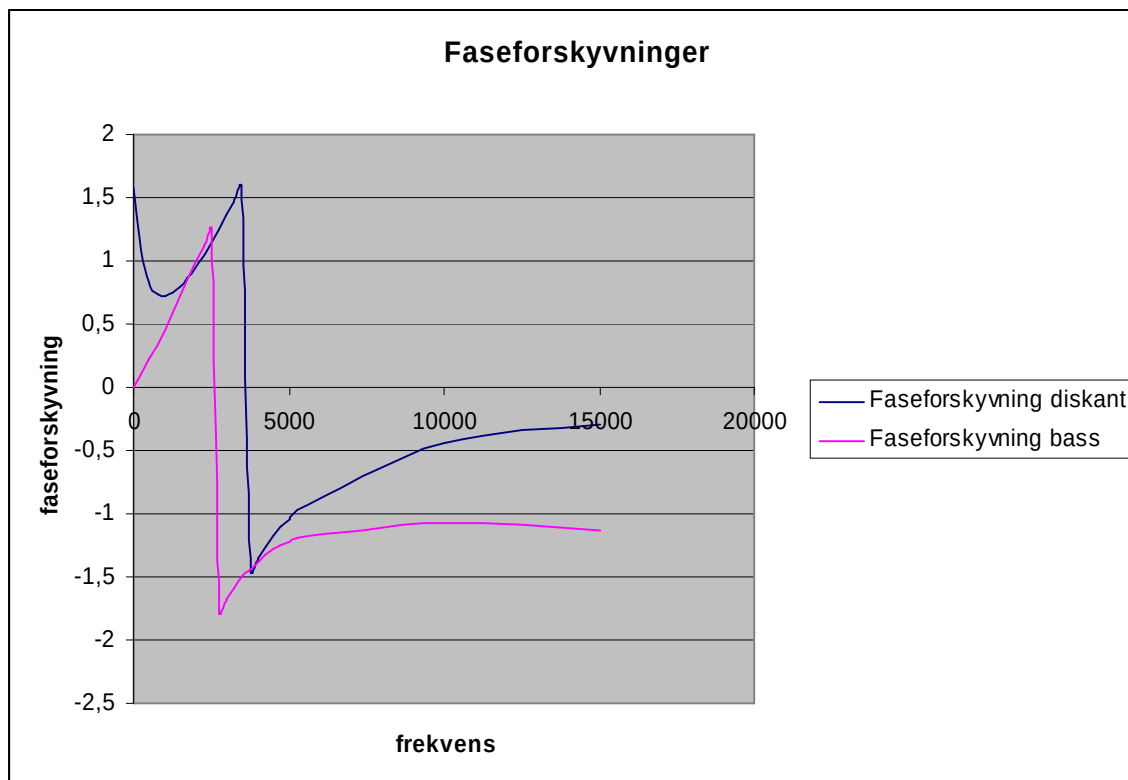
$$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow a_{diskant} \rightarrow \arctan 0 + \arctan \infty - \arctan 0 + \arctan 0 = \frac{p}{2}$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow a_{bass} \rightarrow \arctan 0 - \arctan \infty - \arctan \infty + \arctan \infty = -\frac{p}{2}$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow a_{diskant} \rightarrow \arctan 0 - \arctan 0 - \arctan \infty + \arctan \infty = 0$$

Dette er altså verdier i forhold til innsignalet.

Vi har fremstilt faseforskyvningene i figur (4.4.1):



Figur 4.4.1

De skarpe ”hoppene” kommer av at uttrykket for faseforskyvningene består kun av arctangensverdier, og disse oppfører seg på denne måten. Arctangens tar verdier mellom $-p/2$ og $p/2$, og vi ser det kommer tydelig frem av kurvene. De ”hopper” ikke på samme sted, dette er fordi verdiene for L og R_L er forskjellige for de to filtrene. For like verdier ville de hoppet ved samme frekvens. (Dette kan med litt regning bestemmes ved å se når forskyvningsuttrykket vil forandre fortegn.)

Ut i fra vårt ståsted nå er det vanskelig å forklare mer konkret hvorfor vi fant en faseforskjell tilnærmet lik null ved måling med frekvens 500 Hz, og hvorfor det avviker fra den teoretiske – som vi ser fra kurven ligger på nærmere 0,60. Målingen ble gjort med usikkerheter, ut ifra at lydsensorene ikke nødvendigvis stod like langt fra membranfestet til elementene. Men ved 500 Hz så er bølgelengden av størrelsesorden 1 meter, og da har disse usikkerhetene minimal betydning. Vi ser nå at vi skulle ha tatt en rekke flere målinger av faseforskyvningen for å fått bedre diskusjonsgrunnlag her, men den ene gir oss en pekepinne.

Som nevnt er det en viss sannsynlighet for at vår konvensjon om at impedansen i høyttalerelementet var kun reelt og som for en motstand har vært med på å føre til noe feil resultat. Vi ville i en senere situasjon ha tatt høyde for dette og utført noen målinger på

elementene for å få en idé om hvordan elementet virkelig ser ut. For eksempel en parallellkobling med kondensator og spole. Hadde vi fått frem en kurve, kunne resonansfrekvensen fortalt noe om verdier av L og C , og så videre. Greit å vite til neste gang!

Når ω går mot null for lavpassfilteret så vil det ikke gå noe strøm gjennom kondensatoren, dermed går all strøm gjennom høytalerelementet. Da er kretsen essensielt bare en VR-krets, der faseforskyvning er kjent til å være null. Så den er grei.

Når ω går mot uendelig for lavpassfilteret vil kondensatoren tilnærmet være en kortslutning. Dette fører til at all spenning vil legge over spolen (som for uendelig stor impedans), slik at spolen forårsaker all faseforskyvning. Vi får da arctangens til noe som går mot ∞ , altså mot $\pi/2$. Beregningene gav $-\pi/2$. Hva det stusser på her er det ikke greit å komme inn på.

Når ω går mot null i høypassfilteret vil det nesten ikke gå strøm i kretsen på grunn av kondensatoren. Dermed blir bidragene fra motstanden til spolen og høytaleren svært små. Så å si all spenningen vil da legge seg over kondensatoren, dermed vil den forårsake all faseforskyvningen. Vi får da arctangens til $-\infty$, altså $-\pi/2$. Her har vi også motsatt fortegn i forhold til beregningene. Fint med en slik symmetri, men skulle helst vært omvendt ☺ Kan være bare noe elementært krøll ☺.

Når ω går mot uendelig blir kondensatoren en kortslutning og kun dens motstand gjenstår. Grenen med spolen vil ved uendelig ω bli en uendelig stor motstand da spolen induserer uendelig stor motspenning. Da går det ikke noe strøm der (pga parallellkoblingen) og alt vi står igjen med er en VR-krets, som jo gir faseforskyvning 0.

5 Konklusjon

Vi har i dette prosjektet laget to filterkretser, et høypassfilter og et lavpassfilter.

Ut ifra teoretiske og praktiske beregninger/målinger vil vi si at filtrene fungerer grovt sett som de skal, selv om den målte effekten/lydintensiteten ikke var helt som forventet for bassen.

Dette kan som sagt ha noe med resonansfrekvenser for høytalerelementet å gjøre, det kan ha noe med målefeil/usikkerhet og muligens resonans i den elektriske kretsen.

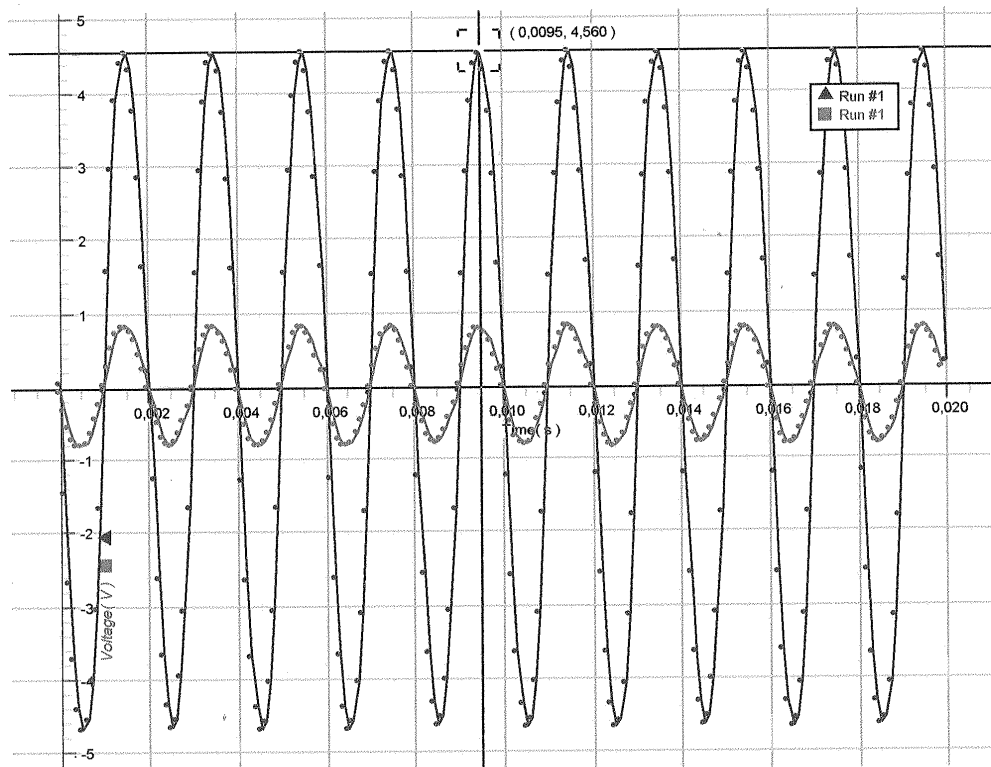
Vi målte også faseforskyvningen mellom bass og diskanten ved 500 Hz til å være minimal (vedlegg 1). Dette stemte ikke helt med de teoretiske beregningene, der vi hadde beregnet faseforskyvningen til 0,60. Dette kan være fordi vi har gjort feil i målingene. Vi tror også det kan skyldes at vi ikke tok induktansen i høytaleren, med i beregningene våre.

6 Referanser

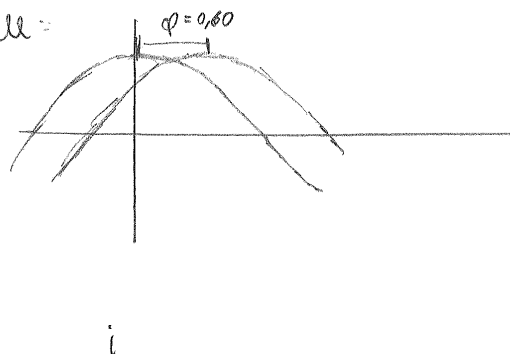
1. Fishbane, Gasiorowicz & Thornton; *Physics for Scientists and Engineers* (1996, second edition), Prentice Hall
2. <http://www.ljudia.no/no/teknik/index.html>
3. <http://www2.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Graphics/Loudspeaker.gif>

Graph 1

VEDLEGG 1



Teoretisk faseforskyll:



7.2 Loddekurs

Som nevnt i rapporten hadde vi lodding av komponenter som en del av den praktiske biten av prosjektet. Et loddekurs er en del av tredjeåret i bachelorgradprogrammet, men vi fant det instruktivt og morsomt å ta det nå under prosjektet. Det bestod essensielt bare i å lodde forskjellige komponenter på et loddebrett i ca. to timer, med Erling Kristiansen(fra forord) gående rundt og godkjenne loddingene.

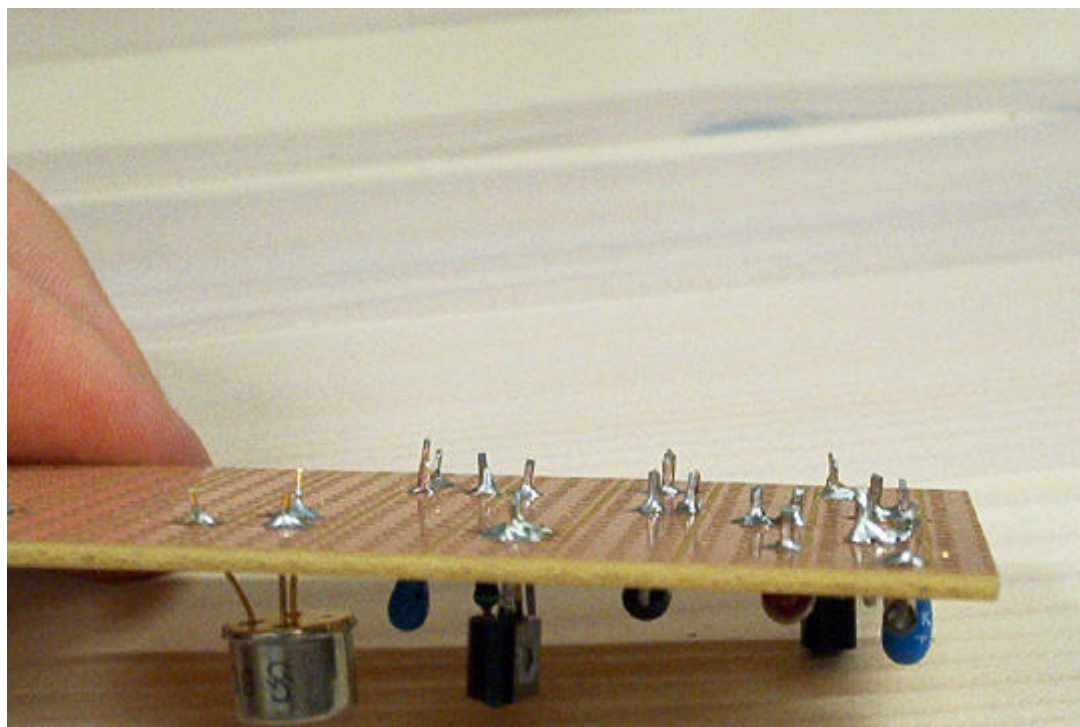
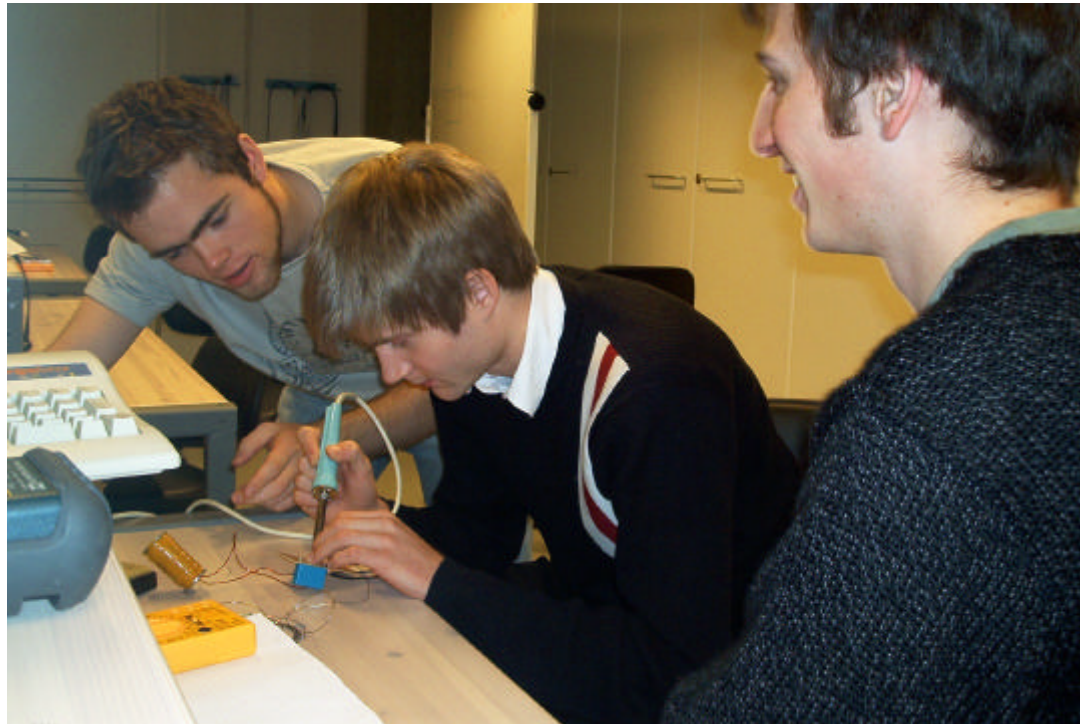
Loddebrettet har en komponentside og en loddeside. Loddesiden er den som er kobberbelagt. Loddingen går ut på at vi trer lederen fra komponentene gjennom loddebrettet og bøyer svakt med en tang – slik at komponenten henger på plass når vi snur brettet. Så tar vi loddetinn – som også inneholder fluss for at loddingen skal bli bedre ved at loddestedet renses og dermed øke ledeevnen – og en oppvarmet loddebolt. Så plasseres loddetinnet på den ene siden av komponentfoten og loddebolten på motsatt side. Loddebolten bør helst danne en 45-graders vinkel med brettet. Når det da blir varmt nok smelter loddetinnet og fordeler seg rundt komponentfoten. Det er viktig at hele hullet som komponentfoten står i blir dekt med loddetinn. En god lodding har også en passe mengde tinn og blank sølvfarge(Og ikke grå eller med svarte flekker, men dette skjer med nybegynnere en del likevel så klart☺). Vi kan se om vi har nok tinn og om loddingen er bra ved at tinnet skal være fordelt slik rundt komponentfoten:



Figur 7.2.1

Det må heller ikke renne noe tinn over i andre baner av kretsen da dette kan føre til kortslutning om begge baner brukes.

Bilde av oss i aksjon og av loddebrettet fra kurset:



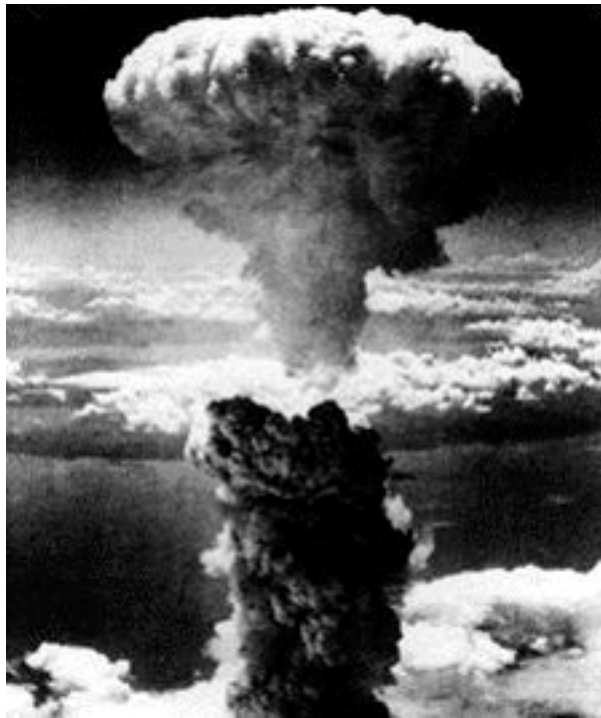
7.3 Symboler & konstanter

m_0	Permeabilitet i vakuum	$4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m/A$
C	Kapasitans i kondensator	Farad (F)
L	Induktans i spole	Henry (H)
ω	Vinkelfrekvens	$f/2\pi$ (Hz)
V	Spenning	Volt (V)
Z	Impedans	Ohm (Ω)
R	Resistans	Ohm (Ω)
I	Strøm	Amper (A)
B	Magnetfelt	Tesla (T)
P	Effekt	Watt (W)
n	Antall	(1, 2, 3,...)
T	Periode	Sekund (s)
A	Areal	Kvadratmeter (m ²)

Fysikkprosjekt Elektrisitet og Magnetisme
Høsten 2004

Atombombe

Historikk, teori og fysiske virkninger



Arne Skodvin Kristoffersen og Henrik Hemmen

Innholdsfortegnelse

<u>Innledning</u>	3
<u>Historikk</u>	3
Veien til atombomben	3
Einsteins brev til Roosevelt	5
Manhattanprosjektet	7
Trinity	9
Andre atomprogram	9
<u>Fisjonsteori</u>	10
Kort om fisjon	10
Mer omfattende om fisjon	10
Kjedereaksjoner ved fisjon	13
Kritisk masse	13
Anriket brennstoff	14
<u>Atombombers oppbygning</u>	17
Little Boy	17
Fat Man	19
H-bombe	19
<u>Følgene av en atomeksplosjon</u>	20
Elektromagnetisk Puls (EMP)	20
EMP-effekter ved detonasjon nær bakken.	22
EMP-effekter ved detonasjon utenfor atmosfæren	23
Noen andre konsekvenser ved detonasjon av atombomber	25
<u>Oppsummering</u>	26
<u>Bibliografi</u>	27

Innledning

Kjernefysiske våpen har siden 1945 vært menneskenes farligste våpen. Supermaktenes atomvåpenarsenal kan utslette alt menneskelig liv, men virker samtidig så avskrekkende at det hindrer nye verdenskriger. Vi vil i dette prosjektet se på historien bak utviklingen av atomvåpen og teorien som ligger bak. Vi greier ut om de kjernefysiske prosessene bak fenomenet og ser på et par prinsippskisser for forskjellige atombombeopsett. Vi har også gått nærmere inn på de elektromagnetiske effektene ved en atombombesprengning, og avslutter med en betraktning rundt navnet atombombe.

Historikk

Veien til atombomben

Man kan kanskje si at veien til atombomben startet i 1919 da den New Zealandske fysikeren Ernest Rutherford gjennomførte den første kunstige transmutasjon av et grunnstoff da han forandret flere nitrogenatomer til oksygenatomer i et forsøk utført ved universitetet i Manchester (Rutherford jobbet på Cavendish-laboratoriet ved universitetet i Cambridge, men utførte eksperimentet i Manchester). Rutherford oppdaget en høyenergipartikkel med positiv ladning som viste seg å være en hydrogenkjerne. Proton, som denne subatomære partikkelen ble kalt, fikk i 1932 selskap av nøytron, etter oppdagelse av James Chadwick. Nøytronet fikk sitt navn fordi det ikke har en elektrisk ladning. Før oppdagelsen av nøytronet hadde man problemer med å forstå at et grunnstoff kunne forekomme med forskjellig masse, selv om de hadde likt antall protoner og elektroner, men Chadwicks oppdagelse forklarte dette mysteriet. De forskjellige variantene av et grunnstoff, med samme protontall og elektrontall, men med forskjellig nøytrontall, ble kalt isotoper. De tre mest vanlige isotopene av uran, for eksempel, er $^{234}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ og $^{238}_{92}\text{U}$. De har alle 92 protoner i kjernen, og 92 elektroner i baner rundt, men henholdsvis 142, 143 og 146 nøytroner i kjernen.

1932 var et godt år for atomfysikk, for i tillegg til oppdagelsen av nøytronet, ble engelskmannen J.D. Cockroft og iren E.T.S. Walton de første som klarte å dele et atom. Dette ble gjort ved å bombardere litium med protoner generert av en partikkelakselerator. Resultatet ble at en litiumkjerne ble delt til to heliumkjerne. Dette forsøket ble utført på Cavendish-laboratoriet ved universitetet i Cambridge.



Lawrence, Seaborg og Oppenheimer ved kontrollpanelet til Lawrences syklotron

Partikkelakseleratorer skulle spille en viktig rolle i atomfysikken. Det var nødvendig å akselerere en partikkel til en meget høy hastighet for at den skulle kunne penetrere en atomkjerne og dele kjernen.

Kanskje den mest kjente partikkelakseleratoren er Ernest Lawrences *syklotron*, som han oppfant rundt 1930 (og fikk nobelprisen for i 1939).

Denne maskinen akselererte partikler ved hjelp av en høyfrekvensspenning plassert i et magnetfelt. Den første maskinen var bare 10 cm i diameter, mens en maskin bygget noe senere med diameter 25 cm kunne akselerere partikler til en energi på omtrent 1MeV.

Et problem med syklotroner på 1930-tallet var at de brukte positivt ladete protoner og alfapartikler. Alfapartikler er heliumkjerner, bestående av to protoner og to nøytroner, og kan skrives som He^{2+} . Disse møtte en naturlig motstand i målet, som var positivt ladete atomkjerner. Selv de kraftigste syklotroner på denne tiden kunne akselerere partikler slik at de anslagsvis bare traff atomkjernen en av en million ganger. Dette problemet gjorde at fysikere, selv om de forstod at dette var et meget viktig område å forske på, ble mer eller mindre oppgitt over de enorme energimengdene som måtte til for å oppnå så lite.



Enrico Fermi bidro med både teoretisk og praktisk arbeid til utviklingen av kjernefysikken

Løsningen kom i 1934, da den italienske fysikeren Enrico Fermi begynte å akselerere nøytroner og sende dem inn i atomkjerner istedenfor protoner. Men Fermi hadde ikke tenkt på Einsteins berømte masse/energi-relasjon $E = mc^2$. Nøytronene kolliderte med kjernene med så stor fart at store deler masse ble erstattet av energi. Fermi og hans kolleger bombarderte i et forsøk 63 stabile kjerner, og produserte 37 nye radioaktive kjerner! Da fant de ut at nøytronene måtte dempes på en eller annen måte før de nådde kjernene. Fermi oppdaget at både karbon og hydrogen fungerte som *moderatorer*, for å få farten til nøytronene ned slik at de ville oppholde seg lengre i nærheten av kjernene og dermed ha større sjanse for å bli oppfanget.

Et grunnstoff Fermi sendte nøytroner mot var uran, som på denne tiden var det tyngste grunnstoffet man kjente. Forskere var uenige om hva Fermi egentlig hadde oppnådd med sine forsøk med uran. Noen mente at han ikke hadde oppnådd annet enn å lage *transuranske stoffer* (*transuranske stoffer er elementer som blir produsert ved partikkelbombardement av uran, for eksempel plutonium og neptunium*), mens andre påpekte at de kjemiske egenskapene til sluttproduktene lignet lettere stoffers egenskaper. Fermi selv var usikker, og de nærmeste årene kastet flere og flere forskere seg inn i kampen om å finne løsningen på dette problemet. Ved juletid 1938 kom svaret, fra det nazistiske Tyskland.

De tyske radiokjemikerne Otto Hahn og Fritz Strassmann bombarderte forskjellige stoffer med nøytroner i laboratoriet sitt i Berlin, og gjorde en bemerkelsesverdig oppdagelse. Mens atomkjerner vanligvis bare forandret seg i liten skala ved et slikt nøytronbombardement, skjedde det noe oppsiktsvekkende når uran ble utsatt for samme forsøk. Urankjernene forandret seg radikalt, og delte seg opp i to omtrent like store kjerner. Disse nye kjernene var ikke transuranske elementer slik mange trodde Fermi hadde produsert, men var faktisk radioaktive bariumisotoper. Og som andre hadde påpekt ved Fermis forsøk, lignet ikke bare sluttproduktene lettere stoffer, de var også det. Men den viktigste oppdagelsen i forsøkene til Hahn og Strassmann var allikevel at sluttproduktene hadde mindre masse enn den

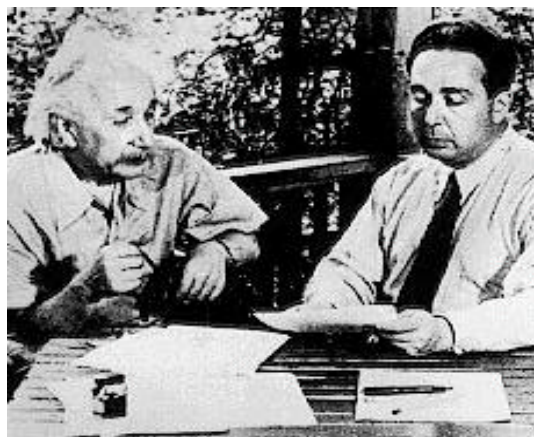
opprinnelige. Konklusjonen var at den manglende massen måtte ha blitt omgjort til energi ifølge Einsteins berømte relasjon. Lise Meitner og hennes nevø Otto Frisch satte i gang med det teoretiske arbeidet og kom snart frem til at så mye energi hadde blitt frigjort, at man hadde oppdaget et helt nytt fenomen. Meitner ga prosessen navnet *fisjon*, som opprinnelig er et uttrykk fra biologi og betyr deling eller spalting. Enrico Fermi hadde faktisk fisjonert uran i 1934, men kunne ikke forklare hva som hadde skjedd.

Meitner og Frisch tok kort tid etter sin oppdagelse kontakt med den danske fysikeren Niels Bohr, og opplyste ham om funnet. Bohr reiste til New York, og tok med seg den nye kunnskapen til USA. Amerikanske fysikere hadde gjort seg bemerket ved eksperimentell fysikk på 1930-tallet, og med nye teoretiske resultater fra Europa ble USA fra starten av krigen et sentrum for kjernefysisk forskning. Bohr og amerikaneren John A. Wheeler jobbet sammen ved Princeton-universitetet (hvor også Einstein holdt til), og utviklet det teoretiske arbeidet fra Europa videre. Samtidig jobbet Fermi og den ungarske fysikeren Leo Szilard, som i likhet med de fleste europeiske vitenskapsfolk i USA på denne tiden hadde emigrert på grunn av nazistisk og fascistisk forfølgelse, flittig på Columbia-universitetet med kjernereaksjoner. I mars 1940 hadde de funnet ut at det var $^{235}_{92}\text{U}$ -isotopen av uran som ville fisjonere best, og siden denne isotopen var så sjelden måtte en også utvikle gode anrikingsmetoder for å kunne utføre eksperimenter med denne isotopen.

Einsteins brev til Roosevelt

Albert Einstein skrev den 2. august 1939 et brev til president Franklin D. Roosevelt. I brevet forklarte Einstein om den nye oppdagelsen at grunnstoffet uran kunne benyttes som en meget viktig energikilde i den umiddelbare fremtid. Basert på arbeider av Joliet i Frankrike og Fermi og Szilard i USA kunne en konkludere med at det måtte være mulig å oppnå en kjernereaksjon i en stor uranmasse, der store mengder energi og et stort antall radium-lignende stoffer blir frigjort. Einstein presiserte at dette nok kunne muliggjøres i nær fremtid.

Einstein forklarte også at dette nye fenomenet nok ville lede til produksjon av bomber, og at det var sannsynlig at svært kraftige bomber av denne sort ville kunne fremstilles. Videre nevnte Einstein litt om hvor i verden man kunne finne uran; svært lite i USA, en del i Canada og tidligere Tsjekkoslovakia, mens klart størst andel fantes i Belgisk Kongo. Han foreslo at Roosevelt snarest burde opprette en kontakt mellom den amerikanske regjering og gruppen fysikere i USA som jobbet med kjernefysikk og kjernereaksjoner.



Albert Einstein og Leo Szilard jobber med brevet til president Roosevelt

Til slutt kunne Einstein fortelle at Tyskland hadde stoppet alt salg fra urangruven i Tsjekkoslovakia (som de kontrollerte), og at dette kunne indikere at Tyskland hadde fått øynene opp for dette nye fenomenet.

Franklin D. Roosevelt skrev tilbake til Einstein den 19. oktober 1939, og kunne fortelle at han hadde nedsatt en komité, som skulle ledes av sin nære venn og rådgiver, Alexander Sachs. I komiteen satt representanter fra hæren og marinen, og de skulle arbeide med saken omtrent som Einstein hadde anbefalt.

Denne beslutningen av Roosevelt, var den første av mange som skulle lede til det prosjektet vi kjenner som *The Manhattan Project*, eller *Manhattanprosjektet*.

President Roosevelt opprettet den 21. oktober 1939 en urankomité, som skulle ledes av Lyman J. Briggs. Denne komiteen skulle koordineres med Sachs' komité, men altså fokusere på uran. Blant annet hvordan USA skulle få tilgang på mest mulig uran, hvordan de skulle anrike den og annen relatert forskning.

Amerikanerne hadde begynt den lange prosessen som skulle lede til en ferdig utviklet atombombe. 1. november 1939 kom den første rapporten fra urankomiteen. De anbefalte at regjeringen skulle innvilge penger til å kjøpe fire tonn grafitt (til bruk som moderatorer) og 50 tonn uranoksid. Fermi uttalte sent i 1939 at han helt klart så muligheter til å bruke uran som energikilde, men at det ikke ville være praktisk mulig å lage en atombombe, på grunnlag av at den ville bli altfor tung.



I begynnelsen av 1940 innså amerikanerne at USA sannsynligvis kom til å bli involvert i krigen. Dette var en faktor som påvirket regjeringen til å bevilge mer penger til atomprosjektet, og da spesielt til forskning på anriking av uran. En annen faktor var Ernest O. Lawrence, som brukte mye av sin tid til å kjempe for dette. Lawrence var kjent for sin utrettelighet og sitt glødende engasjement.

Urankomiteen, fra v. Urey, Lawrence, Conant, Briggs, Murphree og Compton

Han demonstrerte sin kreativitet ved å bygge om sin syklotron til et massespektrometer som kunne anvendes til å separere uranisotoper. Lawrence ble også utnevnt som Briggs' rådgiver i urankomiteen, noe som naturlig nok førte til økt finansiell støtte til forskerne.

I juli 1941 kom et etterlenget gjennombrudd. En britisk gruppe forskere kalt MAUD-gruppen framla for amerikanerne en rapport som viste til denne gruppens forskningsarbeid angående muligheten for å utvikle atomvåpen.

MAUD-rapporten estimerte teoretisk at en kritisk masse mye mindre enn tidligere antatt ville være tilstrekkelig for å produsere en stor eksplosjon. En bombe på denne størrelsen ville ikke være problematisk å frakte med fly. Rapporten kunne også skilte med spesifikke planer om hvordan å sette sammen en slik bombe. Dette gav amerikanerne en ny giv i forskningen, etter en periode med stagnasjon og en del pessimisme fra høyere hold. I bakhodet lå også tanker

om at tyskerne kunne ha kommet langt med sitt sannsynlige atomprosjekt, og man økte på ny ressurser og bevilgninger for å være så langt framme som mulig. Nå ble endelig Fermi inkludert i den innerste forskningskrets, og samtidig ble også Harold C. Urey tatt med på grunn av hans arbeid med isotopseparering og kunnskap om tungtvann som moderator. Urankomiteen fikk ordre fra den nasjonale forsvar- og forskningskomiteen om å fokusere på praktisk testing av det teoretiske beskrevet i MAUD-rapporten.

Etter angrepet på Pearl Harbor den 7. desember 1941, ble USA involvert i krigen. Like etter dette, kom urankomiteen frem til at selv før innholdet i MAUD-rapporten kunne testes praktisk, var sjansene så store for at teorien stemte, at de krevde innvilget store summer til anriking av uran. De fikk klarsignal av Roosevelt, og både Urey, Lawrence og Arthur H. Compton ble satt som sjefer for prosjektet. Urey fokuserte på gassdiffusjon og sentrifugering, Lawrence på elektromagnetisk separasjon og å finne ut mer om det nyoppdagede stoffet plutonium, mens Compton fikk i oppdrag å kjøre små praktiske tester med kjedereaksjoner og bombedetonasjoner. Atomprogrammet hadde etter hvert utviklet seg fra et program uten verken tidsfrister eller penger, til å bli et meget målrettet program med mer enn nok pengestøtte, men tiden var til gjengjeld meget knapp. Det var nå et race for å utvikle en atombombe før fienden.

Den 28. desember 1942 kom den endelige bekreftelsen fra president Roosevelt. Bekreftelsen som iverksatte *Manhattanprosjektet*. Det var et prosjekt med gigantiske proporsjoner, og gikk ut på å bygge blant annet et enormt gassdiffusjonsanlegg, en ny fabrikk for elektromagnetisk separasjon, en installasjon for fremstilling av plutonium, og fasiliteter for produksjon av tungtvann.

Manhattanprosjektet

På mange måter fungerte Manhattanprosjektet på samme måte som et stort industriselskap. De kjøpte inn råvarer, og foredlet dem med tanke på bruk i produksjon av et produkt. Ved slutten av krigen beregnet man at Manhattanprosjektet hadde kostet rundt 2.2 milliarder dollar. Dette inkluderte bygging av fasiliteter og anlegg i både Tennessee, Washington og New Mexico. I tillegg kom all den økonomiske støtten til universiteter og forskningsbaser over store deler av USA. Men det som skilte dette prosjektet fra et industriselskap var at det her ble investert store summer i noe helt nytt og uprøvd, og at alt foregikk i ytterste hemmelighet. Både hurtighet, effektivitet og hemmelighold ble kjennetegn på Manhattanprosjektet.

Området rundt en liten småby i Tennessee, som senere fikk navnet Oak Ridge (*uklart hva denne byen het før og under 2. verdenskrig*) ble valgt som første byggeplass for nye anlegg. Her ble det bygget på et område kalt Y-12, som blant annet skulle huse det



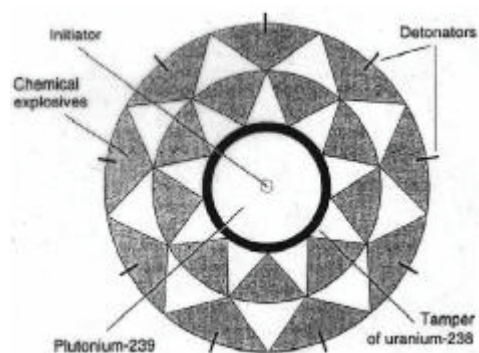
Det racerbaneformede anlegget for elektromagnetisk separasjon.

store anlegget for elektromagnetisk separasjon. I dette anlegget bygget Lawrence et kjempemessig massespektrometer. Bare magneten som skulle produsere magnetfeltet hadde en diameter på nesten 5 meter. Man estimerte at massespektrometeret kunne anrike opptil 100 gram uran om dagen.

Byggingen av et nytt stort anleggsområde begynte i februar 1943 ved Hanford, Washington. Her skulle mye av det anrikede uranet lagres, av sikkerhetsårsaker, i spesielle vannavkjølte stabler. Det ble også bygget fire fabrikker for fremstilling av plutonium, og fasiliteter for testing av fisjon ved plutonium. Hanford sies i dag å være det mest radioaktive området i USA.

Den siste delen av Manhattanprosjektet ble bygget ved Los Alamos, New Mexico i begynnelsen av 1943. Her var det J. Robert Oppenheimer som var sjef, og anlegget hadde som mål å designe og produsere atombomber. Avgjørelsen om å la Oppenheimer ha toppstillingen ble av enkelte kritisert fordi han ikke hadde vunnet en nobelpris. Men kritikken forsvant raskt, da han viste seg å være en meget dyktig og effektiv direktør for Los Alamos-anlegget. Samarbeidet mellom militærets øverste representant, general Leslie Groves og Oppenheimer ble etter hvert et slags symbol på hele Manhattanprosjektet, både fordi de gjorde en formidabel innsats, og fordi de jobbet med det mest konkrete prosjektet, den praktiske fremstillingen av bomben.

Tidlige eksperimenter med både uran og plutonium gav positive resultater. Uran emiterte nøytroner i løpet av en milliarddels sekunder, som var akkurat tidsnok i den kjernefysiske verden for en effektiv eksplosjon. Og tester med plutonium viste at dette nye stoffet emiterte nøytroner både hurtigere og i større antall enn uran. Både teori og praksis viste nå at en kunne bruke begge disse stoffene i en bombe, der sannsynligheten mer enn antydte et vellykket resultat. Nå kunne man begynne å planlegge strukturen på bombene. Våpnene måtte være en slags skytevåpen som kunne slå sammen subkritiske masser med høy hastighet. Men uranbomben var enklere, og man fokuserte mest på den mer kompliserte plutoniumbomben, som måtte ha en høyere detonasjonshastighet på grunn av den økte faren for predetonasjon. To *plutoniumskytevåpen* ble bestilt og testet, deretter ble det bestilt to *uranskytevåpen*. Faren for predetonasjon ved en plutoniumbombe ble vurdert som for stor til at en kunne risikere å benytte et *plutoniumskytevåpen* i krig, og fra en idé av ungaren John von Neumann, begynte man å utvikle et implosjonsvåpen for plutonium. Denne typen ville virke raskere enn et



Tidlig prinsippskisse av en implosjonsbombe

skytevåpen, og dermed senke faren for en for tidlig eksplosjon til et minimum. En subkritisk masse ville bli satt under et så stort trykk ved en symmetrisk implosjon at en stor nok eksplosjon ville finne sted. Denne bomben ville trenge mindre plutonium, og dermed kunne bomben bli tidligere ferdig. I mars 1944 hadde forskerne klart å lage to implosjonsbomber og begynte å teste dem ved å slippe dem fra bombefly, men resultatene var ikke tilfredsstillende. Både effektivitet og problemer med for små mengder plutonium plaget Oppenheimer og hans medarbeidere.

På våren 1945 var uranbomben klar. Los Alamos hadde så sterk tro på denne bomben at de anså prøvesprengninger som unødvendig. Deadline satt av forsvaret for levering av bombene

var 1. august samme år. Problemet var nå å få ferdig plutoniumbomben i tide. Etter intenst arbeid med implosjonsteknologi og etter å ha produsert plutonium over evne klarte de den 16. juli 1945 å klargjøre en plutoniumbombe for prøvesprengning.

Trinity

Bomben ble plassert på toppen av et rundt 30 meter høyt tårn i et øde område ca. 340 km sør for Los Alamos, som Oppenheimer hadde navngitt *Trinity*, inspirert av diktene til John Donne.

Nøyaktig klokken 05.30 om morgenen, mandag 16. juli 1945 begynte atomalderen. Oppenheimer og de aller fleste andre involverte observerte fra bunkere plassert i en sirkel rundt detonasjonsstedet, omtrent 10 km unna. Eksplosjonen lyste opp himmelen med enorm lysstyrke over ørkenen mens tårnet under bomben ble pulverisert. Asfalt rundt tårnet ble omdannet til grønn sand. En 200 tonns container plassert 800 m fra *ground zero* ble blåst overende av den kraftige sjokkbølgen som fulgte eksplosjonen. Og mens den oransje skyen utvidet seg, oppstod det en ny sky, smalere enn den første. Skyen steg til værs og flatet ut. Dens soppform har siden vært et symbol på enorme krefter og store ødeleggelser.



I dag er det reist et minnesmerke ved Trinity

Oppenheimer uttalte senere at denne erfaringen fikk ham til å tenke på *Prometheus*, som ble straffet av *Zeus* for å ha gitt ild til menneskene. Han tenkte også på *Alfred Nobel*, som hadde håpet at oppdagelsen av dynamitt ville få slutt på all krig. Den skremmende destruktive kraften som kom med atombomber og deres bruksområder skulle komme til å hjemsøke mange av de involverte fra Manhattanprosjektet resten av livet.

Suksessen til sprengningen på *Trinity* gjorde at Los Alamos også klarte å levere plutoniumbomben til den fastsatte deadline. Uranbomben fikk navnet *Little Boy*, mens den større plutoniumbomben ble kalt *Fat Man*. De ble sluppet over henholdsvis Hiroshima og Nagasaki i Japan, den 6. og 9. august 1945. (Det meste av historikken bygger på informasjon fra www.atomicarchive.com)

Andre atomprogram

Britene bidro mye til teoretisk forskning tidlig under 2. verdenskrig, men hadde ikke ressurser til å følge opp et atomprogram mens de samtidig kjempet for sin egen eksistens i krigen. De godtok derfor amerikansk lederskap, og sendte sine fremste forskere til alle fasiliteter kontrollert av Manhattan-prosjektet.

Tyskland hadde i motsetning til hva de allierte fryktet, ikke kommet særlig langt i sitt atomprogram. Tyske forskere hadde fokusert på fisjon, men klarte altså ikke å produsere atomvåpen. Både Russland og Japan hadde også lignende program. De første vellykkede sovjetiske prøvesprengninger fant ikke sted før i 1949, mens japanerne ikke klarte å opprettholde prioriteten av atomprogrammet på grunn av det stadig økende presset mot slutten

av krigen. Det var altså kun amerikanerne, som både kom sent inn i krigen, og var beskyttet av sin fjerne beliggenhet, som klarte å fullføre et atomprogram fra oppdagelsen av fisjon i laboratoriet til den ferdige bomben.

Fisjonsteori

Kort om fisjon

Hovedprinsippet for en atombombe er det fysiske fenomenet fisjon. Fisjon er kort sagt en prosess der en tung atomkjerne deles i to omtrent like store kjerner samtidig som det frigjøres energi.

Fisjon kan forekomme på tre måter; spontant, ved å eksitere atomkjernen ved tilførsel av energi eller ved induksjon.

Spontan fisjon

Spontan fisjon forekommer særdeles sjelden i naturen, og i teorien må en atomkjerne som skal ha mulighet til å fisjonere spontant ha $Z^2/A > 18$ (Z = protontall, dvs. antall protoner i atomkjernen, A = nukleontall, dvs. summen av nøytroner og protoner i atomkjernen), men den sannsynlige grensen er ifølge Bohr og Wheelers beregninger på rundt $Z^2/A \approx 48$. En atomkjerne med Z^2/A mindre enn 18 vil være enten for stabil til å fisjonere spontant eller ikke ha nok *elektron skall* til å kunne oppnå den nødvendige eksitasjonsenergi. Sannsynligheten for at denne spontane prosessen skal forekomme er svært liten helt opp til de tyngste atomkjernene. Siden spontan fisjon er en form for radioaktiv nedbrytning, kan man beregne sannsynligheten basert på halveringstiden til et gitt atom.

Spontan fisjon er definert som sannsynligheten per sekund for at et gitt atom vil fisjonere spontant – altså uten ytre påvirkning.

Eksitert atomkjerne (induksjon ved partikkelbombardement)

Ved å eksitere atomkjernen kan man oppnå nok energi til at en fisjon skal kunne forekomme. Dette kan skje ved at en bombarderer kjernen med partikler. Minimumsenergien for de fleste tunge atomkjerner som kreves for en fisjonsprosess ligger mellom 4 og 6 MeV.

Indusert fisjon ved nøytroner

Den vanligste måten å fremkalle fisjon på er å indusere den ved å sende nøytroner mot atomkjerner. Bindingsenergien til det oppfangede nøytronet er i noen tilfeller nok til å eksitere atomkjernen slik at energinivået overstiger det nødvendige for at fisjonsprosessen skal kunne finne sted.

Mer omfattende om fisjon

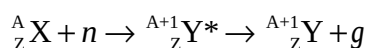
De fleste atomkjerner som blir bombardert av en eller annen partikkel eller av gammastråling, vil gjennomgå en forandring. En innkommende partikkel kan binde seg til kjernen, en

bestanddel av kjernen kan emitteres, eller det kan bli emittert stråling fra kjernen i form av energi. Alle kombinasjoner av disse er også mulig, hvilken kombinasjon avhenger av kjernens opprinnelige oppbygning, hva slags partikler som sendes mot den, og hva slags hastighet disse har. Felles for alle er at atomkjernen forandres.

Fisjon skiller seg fra andre kjernereaksjoner ved at denne prosessen må starte med en tung atomkjerne, for så å deles i to omtrent like store kjerner i tillegg til et utslipp av energi. Når en atomkjerne blir tilstrekkelig tung (*en atomkjerne defineres vanligvis som tung ved protontall 80-90 og større*), er de frastøtende kreftene mellom protonene i kjernen nesten like store som de tiltrekkende kjernekreftene som holder kjernen sammen. Dette betyr at de tunge atomkjernene er ustabile, og er de eneste som eigner seg i fisjonsprosesser.

En typisk fisjonsprosess vil alltid ha utgangspunkt i en tung atomkjerne. Et nøytron sendes inn i atomkjernen, der den ideelt sett skal binde seg til kjernen for å eksitere den. Nøytroners bindingsenergi er vanligvis rundt 6 eller 7 MeV. Denne energien er i de fleste tilfeller nok til å starte en fisjonsprosess, men i enkelte atomkjerner er det ikke tilstrekkelig. Da må nøytronene ha en viss kinetisk energi i tillegg. Dette oppnås enklest ved å la hastigheten på nøytronene være meget høy. Problemet med dette er at høyhastighetsnøytroner vil ha vanskeligere for å binde seg til kjernen. En tilpasning av nøytronets akselererte hastighet fra partikkelakseleratoren gjøres ved hjelp av moderatører, som ofte består av hydrogenisotoper (*f. eks tungtvann, som er vann der hydrogenatomet er av isotopen deuterium*) eller karbon (*grafitt*). Moderatorene forårsaker elastiske kollisjoner som senker hastigheten på partiklene.

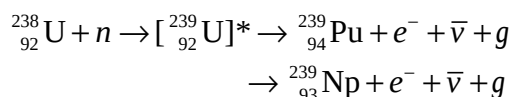
Dersom en atomkjerne blir eksitert oppstår det som regel kollektive vibrasjoner rundt kjernens likevektsform. Dersom eksitasjonsenergien er liten, er oscillasjonene små. Da vil før eller siden eksitasjonsenergien bli frigjort i form av stråling, og kjernen returnerer til sin likevektsform. Denne prosessen kalles radioaktiv nøytronoppfanging og kan beskrives som:



(n = nøytroner, g = elektromagnetisk gammastråling, som er fotoner med meget høy energi)

Men, hvis eksitasjonsenergien er tilstrekkelig høy, kan kjernen bevege seg så langt bort fra sin likevektsform at den elektriske frastøtingen mellom protonene dominerer over kjernekreftene som holder kjernen kompakt. Da vil sjansen være stor for at kjernen vil fisjonere ved å dele seg opp i to omtrent like store deler istedenfor å returnere til likevektsformen.

Noen atomkjerner vil kun fisjonere dersom et nøytron med høy hastighet blir fanget opp. Dersom det i en slik kjerne blir sendt inn et moderert nøytron, er ikke bindingsenergien tilstrekkelig til å starte en fusjonsprosess, og det vil isteden produseres et tyngre stoff. For ${}^{238}_{92}\text{U}$ vil dette resultere i produksjon av neptunium eller plutonium ifølge prosessen:



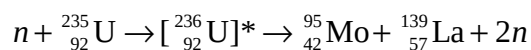
($\bar{\nu}$ = antinøytrinoer, som er antimateriens svar på elementærpartiklene nøytrinoer, e^- = elektroner)

Årsaken til disse forskjellige egenskapene blant atomkjernene har sin forklaring i kjernenes struktur og oppbygning. En $^{235}_{92}\text{U}$ -kjerne er av typen *lik-odde*, som betyr at protontallet er et partall og nukleontallet er et oddetall. Denne kjernen har 143 nøytroner, og når et nytt nøytron blir oppfanget oppstår det en kjerne av typen *lik-lik*; $^{236}_{92}\text{U}$. Det oppfangede nøytronet blir her *paret* med det ene *frie* nøytronet som er i kjernen fra før, og det vil frigjøres en *paringsenergi* på omtrent 0.57 MeV som følge av dette.

En $^{238}_{92}\text{U}$ -kjerne derimot, er av typen *lik-lik* i utgangspunktet, og når den da fanger opp et nøytron, oppstår det en *lik-odde*-kjerne, uten et *fritt* nøytron som det oppfangede nøytronet kan *pares* med. Det blir da heller ikke frigjort energi.

En kjerne som får ekstra energi som følge av en nøytronparring, har et forsprang på en kjerne som ikke får det, og har dermed lettere for å starte en fisjonsprosess.

Når et nøytron har bundet seg til en atomkjerne, er kjernen et øyeblikk i eksitert tilstand. $^{235}_{92}\text{U}$ er en kjerne som blir eksitert ved oppfangning av et *lavhastighetsnøytron*. Reaksjonen vil for eksempel bli:



(* betyr at kjernen er i den ustabile eksitasjonsfasen)

Fra Einsteins berømte masse/energirelasjon $E = mc^2$ kan vi beregne hvor mye energi som blir frigjort i denne fisjonsprosessen:

De opprinnelige massene er:

$$\text{Nøytronmasse} + {}^{235}_{92}\text{U-masse} = 1.0090 \text{ amu} + 235.0439 \text{ amu} = 236.0529 \text{ amu}$$

(amu = atomic mass unit, masseenheter for atomer)

Massen til $[{}^{236}_{92}\text{U}]^*$ er 236.0456 amu, så det er i den eksiterte tilstanden altså en manglende masse på 0.0073 amu. Dette korresponderer til en eksitasjonsenergi på 6.796 MeV.

De endelige massene er:

$$\begin{aligned} & {}^{95}_{42}\text{Mo-masse} + {}^{139}_{57}\text{La-masse} + 2 \text{ nøytronmasse} = 94.9058 \text{ amu} + 138.9061 \text{ amu} \\ & + 2 * 1.0090 \text{ amu} = 235.8299 \text{ amu} \end{aligned}$$

Vi ser at masseforskjellen mellom opprinnelig og endelig masse er

$$236.0529 \text{ amu} - 235.8299 \text{ amu} = 0.223 \text{ amu}$$

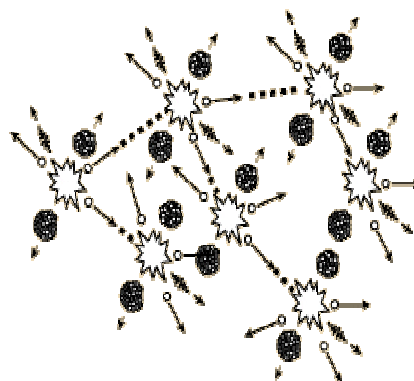
Dette tilsvarer en energi på 207.16 MeV, som opptrer i form av kinetisk energi fra sluttproduktene. I tillegg til denne energien, vil de to nye kjernene ofte være ustabile og derfor frigjøre energi i form av emitterte elektroner, nøytrinoer og gammastråler helt til de når en stabil form.

Når man tenker på at når det fra ett eneste atom kan frigjøres så mye energi som 207 MeV, må man absolutt gjenkjenne det enorme energipotensialet fisjonsprosesser kan realisere.

Kjedereaksjoner ved fisjon

Det er to ting ved fisjon som spiller en vesentlig rolle for at fisjonsprosessen skal være av praktisk betydning. Det ene er at det må frigjøres nøytroner i prosessen, og det andre er at det må frigjøres energi.

Hovedprinsippet med en atombombe er også at det skal frigjøres store mengder energi, og det skal skje ved fisjon. Men det holder ikke at én atomkjerne fisjonerer, man må få et meget stort antall kjerner til å fisjonere. For å få dette til, må det skje en kjedereaksjon. Ved fisjon av en atomkjerne deles kjernen i to deler og det frigjøres energi i form av kinetisk energi fra fisjonsproduktene. Disse produktene er i tillegg til de to nye kjernene og gammastråling, også nye nøytroner (det sendes gjennomsnittlig ut 2.5 nøytroner i en fisjon). De nye nøytronene beveger seg med stor hastighet mot andre atomkjerner i nærheten, og kan fanges opp av disse for å skape en ny fisjon. Den nye fisjonen sender ut ytterligere nøytroner, som igjen kan kollidere med nye atomkjerner, og en kjedereaksjon oppstår.



Figuren viser en typisk kjedereaksjon

Kritisk masse

For at en gitt masse med et stoff som kan fisjonere skal kunne opprettholde en kjedereaksjon, må massen være såkalt *kritisk*. Massen er kritisk først og fremst ved en spesifikk minimumsstørrelse som avhenger av hva slags materiale som fisjoneres. Denne størrelsen avhenger igjen av flere faktorer, som konsentrasjon av det fisjonerbare stoffet og dets geometriske oppbygning. En masse kalles *subkritisk* dersom den er mindre enn en kritisk masse, og *superkritisk* dersom den er større.

Hvis det skjer i en kjedereaksjon at mer enn ett nøytron per fisjon vil produsere en ny fisjon, vil antall fisjoner øke eksponentielt og kjedereaksjonen vil være divergent. Det er dette som skjer i en atombombe, i motsetning til i en atomreaktor, der fisjonsprosessen er kontrollert. I en atombombe er det viktig å ikke ha én kritisk masse samlet. Da kan en spontan fisjon starte en kjedereaksjon for tidlig og naturligvis forårsake store skadevirkninger.

Anriket brennstoff

Uran og plutonium er de to stoffene som blir brukt i atombomber. Men en kan ikke benytte en hvilken som helst isotop av disse stoffene for å starte en fisjonsprosess. $^{235}_{92}\text{U}$ er den ideelle isotopen for fisjon av uran, mens $^{239}_{94}\text{Pu}$ er ideelt for plutonium.

Naturlig uran består av 0.0055 % $^{234}_{92}\text{U}$, 0.7205 % $^{235}_{92}\text{U}$ og 99.274 % $^{238}_{92}\text{U}$. Den siste isotopen, som det finnes klart mest av, vil som nevnt tidligere ikke fisjonere hvis den blir utsatt for lavhastighetsnøytroner, og ved oppfangning av høyhastighetsnøytroner vil det produseres et tyngre stoff, og da ofte plutoniumisotopen $^{239}_{94}\text{Pu}$.

For å få et *brennstoff* som er mest mulig effektivt for fisjon, vil man helst ha så høy prosentandel av den ideelle isotopen som mulig. For uran vil man forsøke å *anrike* den naturlige massen så mye som mulig. Å anrike uran vil altså si å øke prosentandelen $^{235}_{92}\text{U}$ i uranmassen.

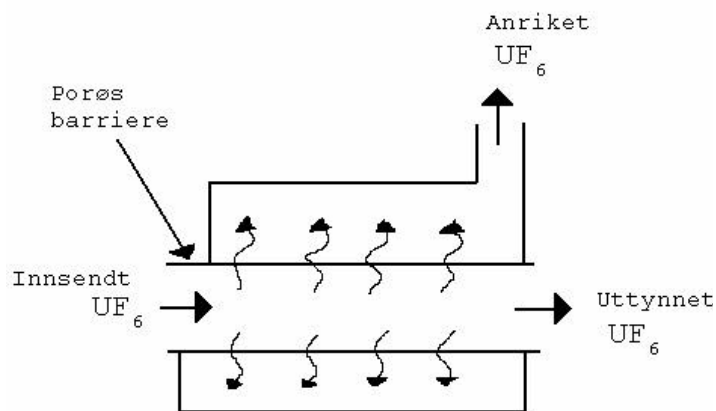
Forskerne i Manhattanprosjektet benyttet fire forskjellige metoder for å anrike uran; *gassdiffusjon*, *termisk diffusjon*, *elektromagnetisk separasjon* og *sentrifugering*.

Gassdiffusjon

Gassdiffusjon er en prosess basert på molekylær effusjon (utgytelse). Denne prosessen omhandler det som skjer når en gass blir separert fra vakuum ved bruk av en porøs barriere som inneholder mikroskopiske hull. Gassen passerer gjennom hullene på grunn av trykkforskjellen på de to sidene av barrieren (se fig). Det er flere *kollisjoner* per flateenhet på den siden som har høyest trykk, og gassen vil passere gjennom hullene til det oppstår en likevektstilstand. Den skotske kjemikeren Thomas Graham oppdaget at effusjonsraten gjennom hullene var invers proporsjonal med kvadratroten av massen. Dermed ville lettere molekyler bevege seg raskere gjennom hullene enn tyngre. I denne prosessen ble det brukt uran i gassform, uranheksafluorid (UF_6). Effektiviteten på en slik prosess kan skrives som forholdet:

$$\frac{^{238}\text{UF}_6}{^{235}\text{UF}_6} = \frac{352}{349} = 1.0086$$

(Forklaring på forholdstallene: Fluoret har nukleontall 19. $19 \cdot 6 = 114$, $238 + 114 = 352$)



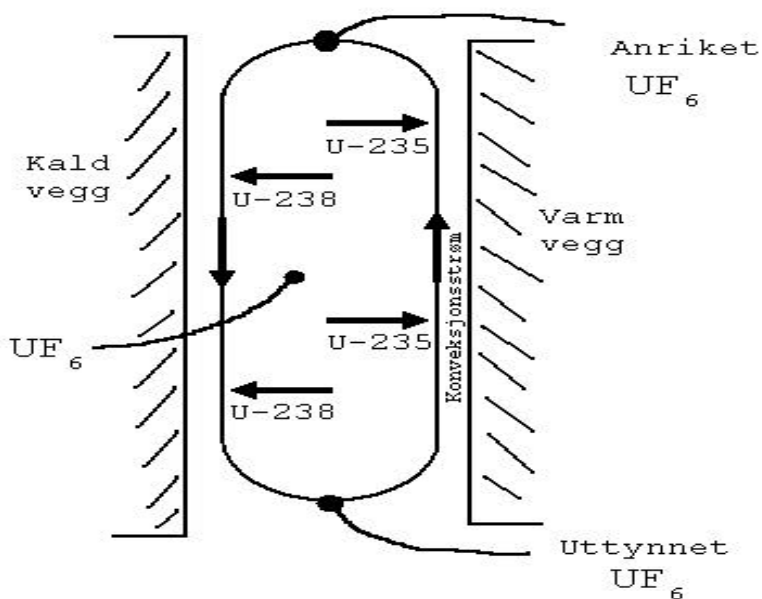
Skisse av gassdiffusjonsprinsippet

Fordi dette forholdet er så lite, trengs det rundt 4000 slike gassdiffusjoner for å oppnå en akseptabel prosentandel $^{235}_{92}\text{U}$. Barrieren må være tilstrekkelig porøs for å oppnå en god *flyt* av gass gjennom hullene. Heksafluorid er meget korroderende, så nikkel eller aluminiumoksid er best egnet som barrieremateriale fordi de ikke vil reagere med gassen.

Problemet med denne måten å anrike uran på er at et slikt system vil være uhyre kostbart, bruke store mengder energi og kreve mye vedlikehold.

Termisk diffusjon

Termisk diffusjon benytter varmetransport gjennom et tynt lag bestående av væske eller gass for å separere isotoper. Ved å nedkjøle det tynne laget på den ene siden og varme det opp på den andre, vil det oppstå konveksjonsstrømmer. En strøm oppover på den varme siden og en strøm nedover på den kalde siden. Under slike forhold vil de lettere $^{235}\text{UF}_6$ -molekylene diffundere mot den varme siden, mens de tyngre $^{238}\text{UF}_6$ -molekylene diffunderer mot den kalde siden. Etter hvert vil de to isotopene hope seg opp henholdsvis oppe og nede på det tynne laget (se fig).



Denne metoden var mye rimeligere og enklere enn gassdiffusjonsmetoden, men brukte faktisk mer energi. Uranet ble typisk først anriket ved termisk diffusjon, for så å bli videre anriket ved en av de to andre prosessene.

Skisse av en tenkt termisk diffusjon

Elektromagnetisk separasjon

Denne anrikingsmetoden er basert på prinsippet av et massespektrometer. Det går ut på at en ladet partikkel vil følge en sirkelbane når den passerer gjennom et uniformt magnetisk felt (se fig).

En kilde sender ut ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ - og ${}^{238}_{92}\text{U}^+$ -ioner. Disse ionene er produsert fra det faste stoffet urantetrafluorid, UF_4 , som blir oppvarmet til den spesifikke koketemperaturen for dette stoffet, og deretter bombardert med elektroner for å lage U^+ -ioner. Ionene blir sendt fra kilden gjennom et spenningsfall V som akselererer ionene. Ionenes hastighet i det de kommer inn i magnetfeltet kan beregnes ved å benytte at endringen i potensiell energi gjennom spenningsfallet tilsvarer endringen i kinetisk energi for ionene:

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Ionene følger en sirkelbane når de har kommet inn i magnetfeltet. Da kan vi påvise at baneradien r til en gitt partikkel er proporsjonal med partikkelens masse m :

Sentripetalakselerasjon i magnetfeltet,

$$a = \frac{v^2}{r}$$

og Newtons 2. lov gir:

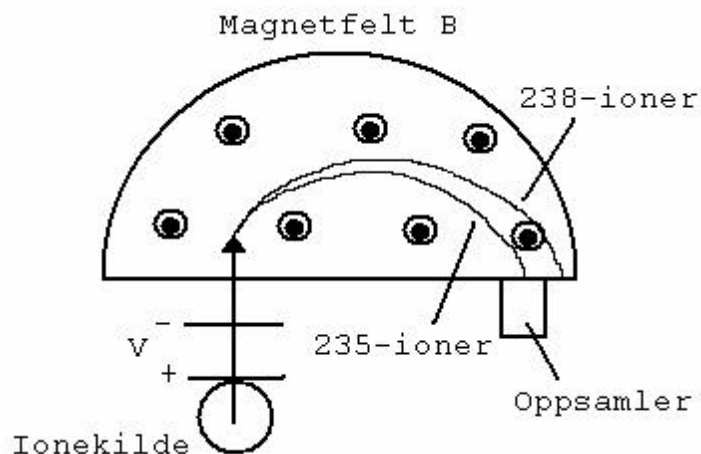
$$F = m \frac{v^2}{r} = evB \Rightarrow r = \frac{mv}{eB}$$

Ut fra dette kan vi se at r er proporsjonal med $\sqrt{m}$:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Vm}{e}}$$

Og siden ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ - og ${}^{238}_{92}\text{U}^+$ -ioner har forskjellig masse, vil de ha en viss forskjell i baneradius. Dermed kan en plassere en *oppsamler* slik at kun ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ -ionene vil bli fanget opp.

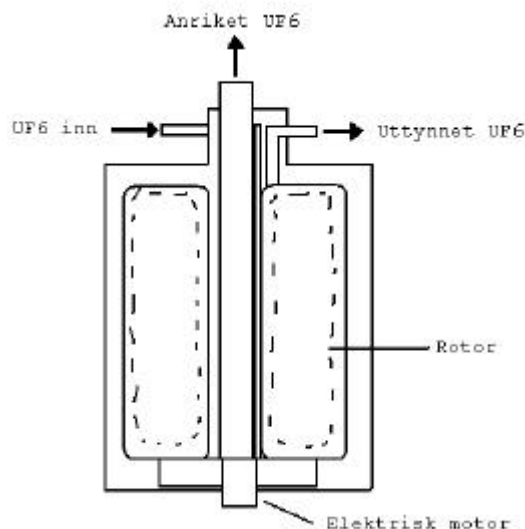
Det har dog vist seg i praksis, at denne metoden for anriking av uran har en stor hake. Mindre enn halvparten av de opprinnelige ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ -ionene blir fanget opp, så effektiviteten av denne prosessen er lav.



Figuren viser en skisse av et massespektrometer, der ioner blir sendt inn i et magnetfelt og avbøyes

Sentrifugering

Den vanligste metoden for anriking av uran i senere tid er å sentrifugere UF_6 -gass i en tank som inneholder en elektrisk drevet sylindrerformet rotor. Rotoren roterer meget hurtig og sentrifugalkrefter presser de tyngre uranisotopene tettere mot veggen enn de lettere (se fig). Sentrifugeringen har på grunn av sin lave kostnad i forhold til andre anrikingsmetoder mer og mer overtatt som den fremste metoden for anriking av uran. Til sammenligning bruker en gassentrifuge omtrent 10 % av energien en gassdiffusjon (og enda mindre i forhold til termisk diffusjon) må bruke for å anrike en tilsvarende mengde uran. *(Fisjonsteoridelen bygger hovedsakelig på informasjon fra [7])*



Enkel skisse av en sentrifuge for anriking av uran

Atombombers oppbygning

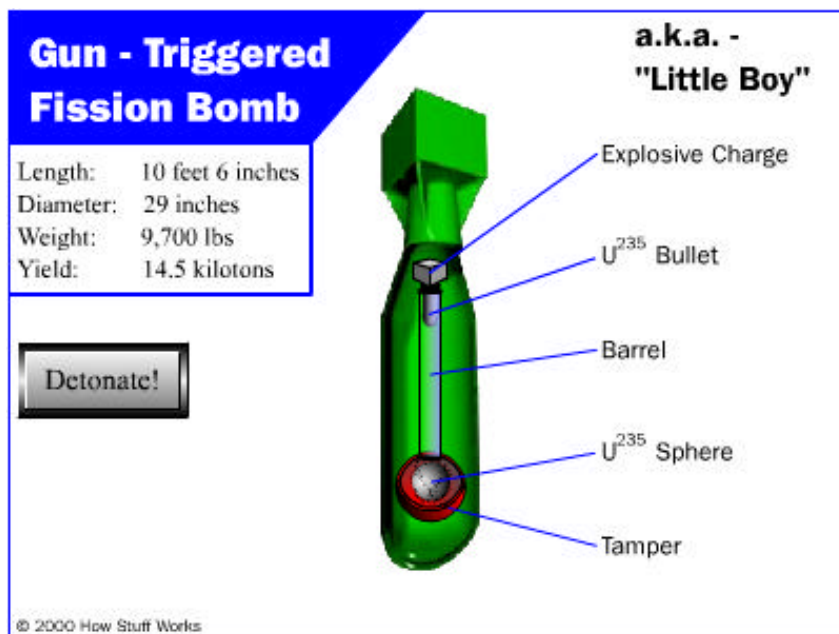
Hvor mange atombomber som har blitt konstruert, og nøyaktig hvordan de fungerer er vanskelig å vite. Selv hvilke land som faktisk har atombomber er usikkert. USA og Russland har i hvert fall hatt tusenvis av bomber, og nye land som Nord-Korea og Iran kan være i ferd med å skaffe seg det. Det finnes ikke en entydig måte å lage en atombombe på, og mange forskjellige oppsett har vært forsøkt. Helt konkret hvordan de er satt sammen og fungerer er militære hemmeligheter, men vi skal se kort på noen forskjellige prinsipper. De to atombombene som ble brukt ved avslutningen av andre verdenskrig er gode eksempler.

Little Boy

Prinsippet for den første atombomben, *Little Boy*, er enkelt, selv om det praktiske oppsettet er vanskelig. Man trenger:

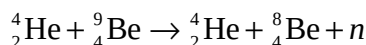
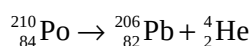
- Radioaktivt materiale som spaltes så raskt at man kan få en kjedereaksjon
- Å holde materialet samlet lenge nok til å få en kraftig eksplosjon
- Å sørge for at kjedereaksjonen starter når man vil den skal starte.

Det radioaktive materialet brukt i Little Boy var uran. For å få kjedereaksjonen til å gå raskt nok hadde man økt innholdet $^{235}_{92}\text{U}$ til 90 %. For å unngå en for tidlig kjedereaksjon var det nødvendig å dele uranet opp i subkritiske masser. Måten dette ble løst på var ved å plassere en mengde uran i ene enden av bomben, og en mindre bit i den andre. Til sammen ville disse bitene danne en kritisk masse. Ved å skyte den minste biten inn i den største og samtidig starte en nøytrongenerator fikk man detonasjon av atombomben.



Figur av Little Boy med spesifikasjoner. Hentet fra www.howstuffworks.com

Uranet er formet rundt en liten mengde polonium og beryllium atskilt fra hverandre. Når urankulen blir skutt inn i den større mengden, kommer poloniumet og berylliumet sammen, og vi får følgende reaksjon:



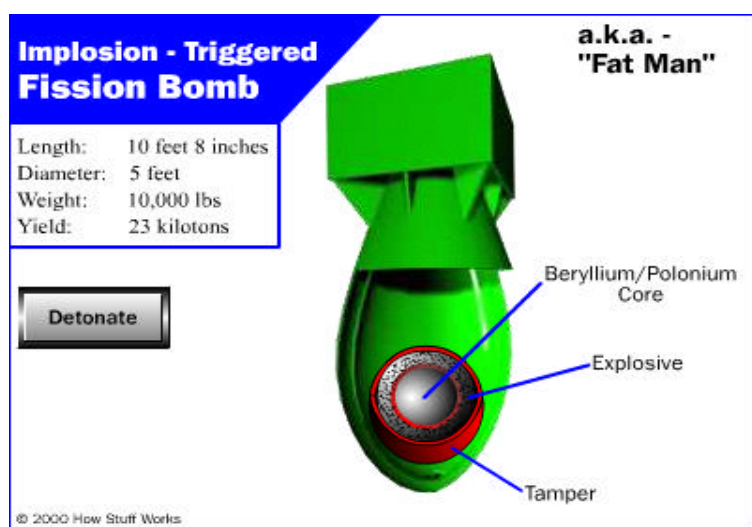
Den radioaktive isotopen $^{210}_{84}\text{Po}$ sender ut alfapartikler. Alfapartiklene kolliderer med ^9_4Be , som sender ut et nøytron. Nøytronene starter videre kjedereaksjonen i uranet.

Rundt det radioaktive materialet har man, for å minske mengden materiale nødvendig for å få kritisk masse, et nøytronskjold. Nøytroner fra nøytrongeneratoren og fra spaltet uran som ikke har blitt fanget opp av fisjonsmaterialet, blir fanget opp av skjoldet. Skjoldet består av materiale som sender ut nye nøytroner ved absorpsjon av nøytroner, og en del av disse vil bli sendt tilbake inn i kjernen. Antall nøytroner som kan brukes til fisjon blir derved høyere. Det beste materialet for nøytronskjold er ^9_4Be , som kan sende ut 2 nøytroner ved absorpsjon av ett nøytron. I Little Boy var det derimot av $^{238}_{92}\text{U}$, som også er brukbart.

Dette bombeoppsettet var man så sikker på at ville virke at man ikke engang foretok prøvesprengninger. Faren for detonasjon ved flykrasj eller andre ulykker var allikevel for stor til at den ble videreutviklet. Little Boy ble derfor den eneste bomben av denne typen som ble sprengt av USA.

Fat Man

Den andre atombomben, som ble sluppet på byen Nagasaki, var nesten dobbelt så kraftig som Little Boy, selv om den veide omtrent det samme. Istedenfor å føre to atskilte subkritiske masser sammen, hadde man en subkritisk kule med $^{239}_{94}\text{Pu}$, som man ved å minske volumet på gjorde superkritisk. Fordi plutonium fisjonerer meget raskt kan det ikke brukes i atombomber med Little Boy-design. Ved implosjon er det derimot praktisk mulig, og gir bedre effekt enn å bruke uran.



Figur som viser Fat Man med spesifikasjoner. Hentet fra www.howstuffworks.com

Kulen med plutonium er pakket inn i sprengstoff og et nøytronskjold. Ved detonasjonen av sprengstoffet øker trykket rundt kulen, som blir presset sammen. Samtidig startes nøytrongeneratoren inni kulen, og kjedereaksjonen begynner.

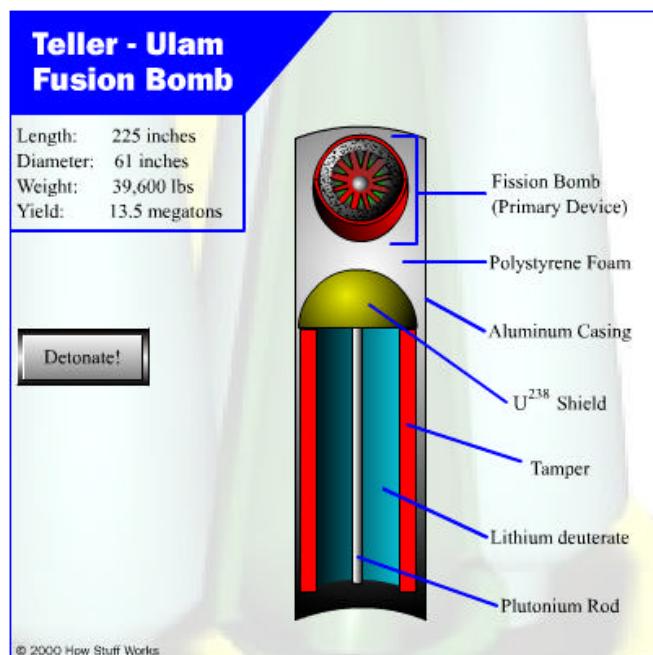
Det vanskeligste aspektet ved dette oppsettet er å få trykket fra sprengstoffet til å komprimere plutoniumet jevnt rundt hele kulen. Ettersom eksplosjonen spres fra der man tenner på eksplosivene, må man ha mange detonasjoner av sprengstoffet samtidig, spredt rundt kulen. Selv dette viste seg å ikke være godt nok. Istedenfor en sammentrykt kule, fikk man en slags golfballeffekt, fordi kulen ble mest sammentrykt ved de forskjellige detonatorene (noe som faktisk førte til større overflateareal). Fisjonen startet, men trykket økte så fort at plutoniumet presset seg ut mellom "hullene i golfballen" før sprengkraften ble stor nok. Ved å bruke en komplisert blanding av hurtig og sakte eksploderende sprengstoff, greide man likevel til slutt å få til implosjon, og Fat Man var et faktum.

H-bombe

De første atombombene utnyttet forholdsvis lite av energien i det kjernefysiske materialet (www.howstuffworks.com hevder Little Boy 1,5 % og Fat Man 17 %) og man lette derfor etter mer effektive måter å lage bombene på. Den enkleste forandringen var å lage et tomrom i

midten av plutoniumskulen og fyller det med materiale som kunne fusjonere (eks. deuterium og tritium). Det høye trykket ved fisjonen av plutoniumet gjorde fusjon mulig, og siden energien frigjort ved fusjon er høyere enn fisjonen var dette ønskelig. Begrensninger ved hvor mye fusjonsmaterie man kunne plassere inni plutoniumet, og beregninger som viste at fusjonsmaterie utenfor plutoniumet ville bli sprengt bort før det rakk å fusjonere gjorde at man begynte å lete etter et helt nytt design for fusjonsbomber.

Teller-Ulam-designet løste dette. Prinsippet at man detonerer en fisjonsbombe ved siden av fusjonsbomben, og bruker energien i røntgenstrålene fra denne til å øke trykket i materialet som kan fusjoneres. Ved samtidig å ha fusjonsmateriale i sentrum av fusjonsmaterien får man høyt trykk, varme og frie nøytroner som utløser fusjonen. (Atombombeoppsettene bygger på informasjon fra www.howstuffworks.com)



Figur av en H-bombe á la Teller-Ulam.
Hentet fra www.howstuffworks.com

Følgene av en atomeksplosjon

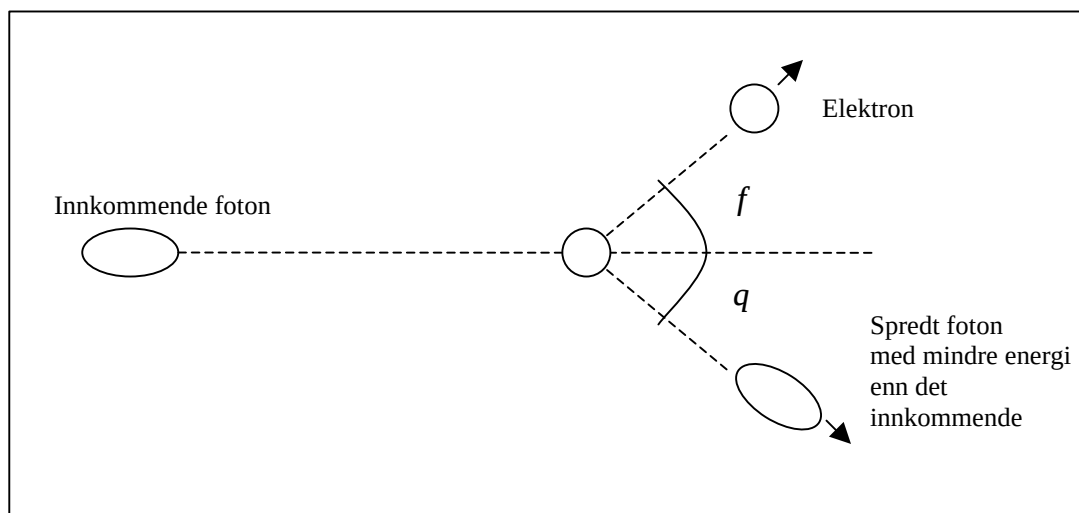
En atombombe har enormt ødeleggende krefter. Så kraftige at man betegner sprengkraften i kilo- eller megatonn TNT. Vi har sett nærmere på den elektromagnetiske siden ved en atombombesprengning.

Elektromagnetisk Puls (EMP)

Ved detonasjon av en atombombe er en del av energien som utløses gammastråling som spres radielt ut fra bomben. Denne gammastrålingen har flere opphav. Den kan sendes ut som en direkte følge av fusjonsprosessen, der en del av masseenergien frigjøres som gammafotoner. Den oppstår også når nøytroner fra fisjonen blir fanget opp av kjernen til ikke-spaltbare kjerner. Kjernen blir da eksitert, og vil ved å sende ut en eller flere gammastråler miste denne energien. Eller den kan oppstå når nøytroner fra fisjonen kolliderer med og overfører energi til

atomkjerner uten å bli tatt opp i kjernen. Atomkjernene sender ut gammafotoner når de returnerer fra eksitert tilstand til grunntilstand.

Alle disse gammautstrålingene oppstår i løpet av noen få milliondels sekund etter detonasjonen av atombomben, og danner sammen den *øyeblikkelige gammastrålingen*, eller *prompt gamma radiation*. Restene av materialet som er blitt spaltet, og en del av materialet som ikke er blitt spaltet er radioaktivt med kort levetid, og vil også sende ut gammastråling. Dette vil pågå over tid og kalles *forsinket gammastråling*, eller *delayed gamma radiation*. Den elektromagnetiske pulsen kommer som en følge av den øyeblikkelige gammastrålingen.



Compton-effekten (Kopi av fig 2.23 i Serway mfl.)

Når gammastrålingen treffer atomene i atmosfæren, kan vi få frigjort elektroner. Det er flere effekter som fører til dette, avhengig av fotonenes energi. Den første, og den som bidrar mest er Compton-effekten (oppdaget av Arthur Compton i 1922). I korte trekk går det ut på at et høyenergifoton som treffer et fritt elektron vil bli avbøyd av elektronet, og noe av fotonets energi overføres til elektronets kinetiske energi.

Vi får også frigjort elektroner ved den fotoelektriske effekten (beskrevet av Einstein i 1905) som oppstår når fotoner med høyere energi enn bindingsenergien til elektronene blir totalt absorbert av elektronene i et atom. Fotonenergien går da både til å frigjøre elektronene fra atomene og til elektronets kinetiske energi.

Til sist kan gammafotoner, med energi større enn 1.02 MeV, som passerer nært en atomkjerne annihileres og danne et elektronpar. Siden paret består av et positivt og et negativt elektron vil dette ikke bidra til EMP (motsatt ladning gir motsatt effekt).

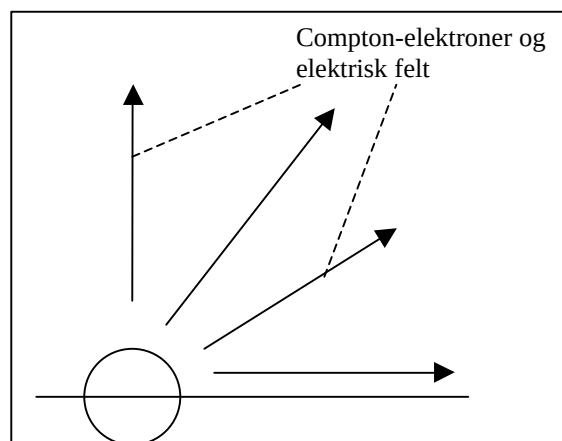


Illustrasjon av tenkt detonasjon over en by.
(Hentet fra <http://popularmechanics.com>)

Den elektromagnetiske pulsen fra en atombombe har forskjellig karakter og virkning avhengig av hvor bomben blir detonert (størrelsen på bomben er naturligvis også en faktor, men bare kvantitativt). Vi skal her bare ta for oss to detonasjonsområder: nær bakken og utenfor atmosfæren. Det kan nevnes at en detonasjon i middels høyde har mange av de samme egenskapene som en nær-bakke-detonasjon, men med større asymmetriske komponenter pga jordoverflaten.

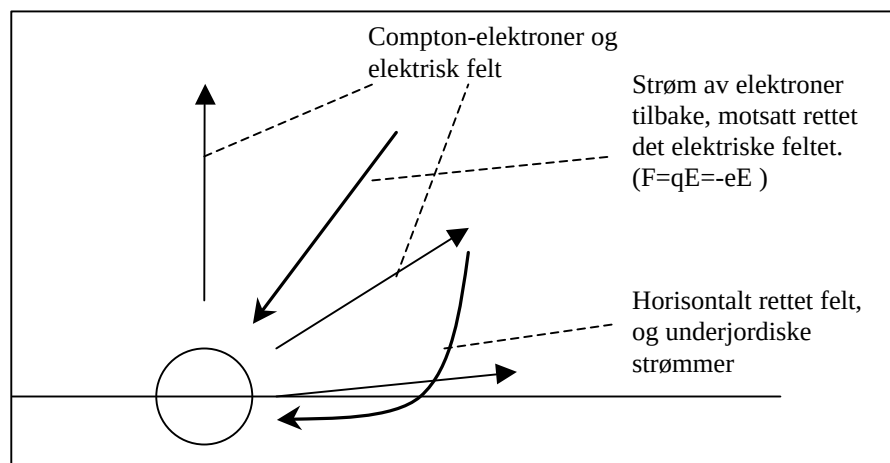
EMP-effekter ved detonasjon nær bakken.

Som nevnt over vil den øyeblikkelige gammastrålingen fra bomben treffe luftmolekylene rundt den, og ved Compton-effekten (hovedsakelig) slå løs elektroner fra molekylene. Disse elektronene beveger seg med høy hastighet vekk fra de tyngre luftmolekylene, med størst fartskomponent rettet radielt vekk fra eksplosjonen. Den relative forflytningen av de negative elektronene og de positive ionene gir opphav til et sterkt elektrisk felt. Gjennomsnittlig avstand et gammafoton forflytter seg før den kolliderer med et elektron er ca 200m.



Compton elektronene spres radielt fra bomben og danner elektriske felt (De følgende tre figurene er variasjoner av fig 1.5 i Ricketts mfl)

Det elektriske feltet som oppstår virker på elektroner i atmosfæren som ikke er truffet av gammafotonene, og fører til en strøm av elektroner tilbake mot detonasjonsområdet. Ettersom jord har høyere ledningsevne enn luft, vil jorden kortslutte denne strømmen ved små høyder. Vi får da også et horisontalt rettet felt og strømmer i jorden.



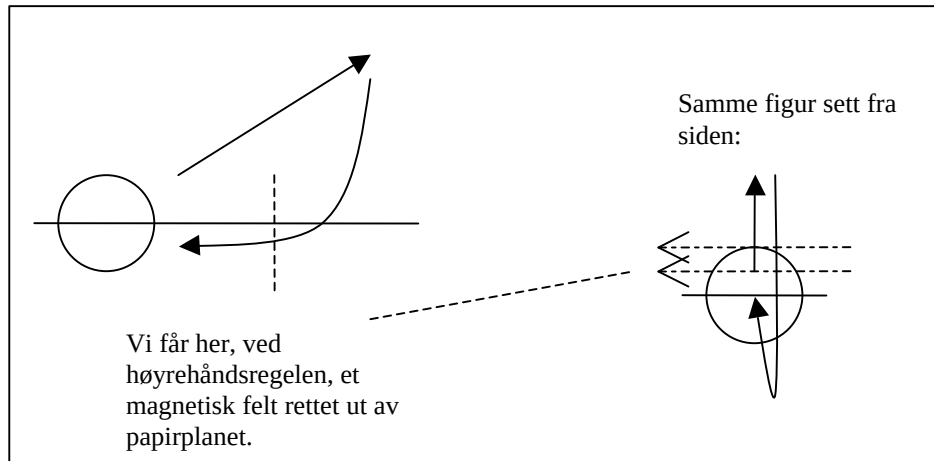
De tjukke pilene viser strøm og elektriske felt tilbake mot bomben

Arne Skodvin Kristoffersen og Henrik Hemmen

Side 22 av 27

09.11.2004

Ser vi på en krets av Compton-elektroner i luften og strømmen av elektroner tilbake mot detonasjonsområdet i bakken, skjønner vi også at dette må føre til et magnetisk felt rettet vinkelrett på radien.

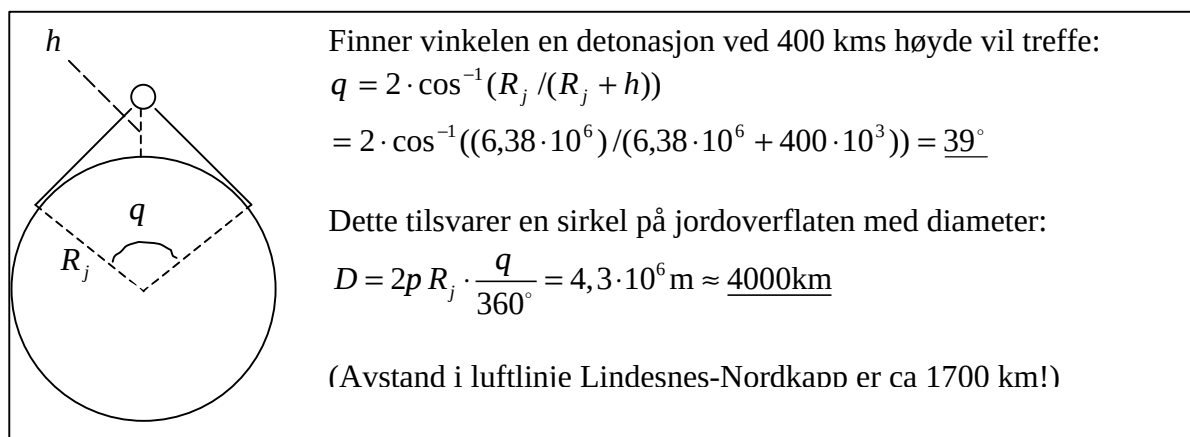


Resultierende magnetiske felt

Det radielle elektriske feltet er forholdsvis kraftig (Ricketts nevner størrelsesordenen 10^5 V/m i noen millisekunder [4]), men avtar hurtig med avstanden. På store avstander vil komponentene på hver side av bomben kansellere hverandre (analogt med feltet fra en dipol langs dipolaksen). Store EMP-effekter fra nær-bakke-detonasjon har vi derfor bare i det området der bomben også har andre ødeleggende effekter.

EMP-effekter ved detonasjon utenfor atmosfæren

I motsetning til den begrensede utstrekningen av EMP ved nær-bakke-detonasjon kan detonasjoner utenfor atmosfæren få effekter over hele kontinenter. I prinsippet vil den elektromagnetiske pulsen kunne nå alt land som er synlig fra detonasjonsområdet.

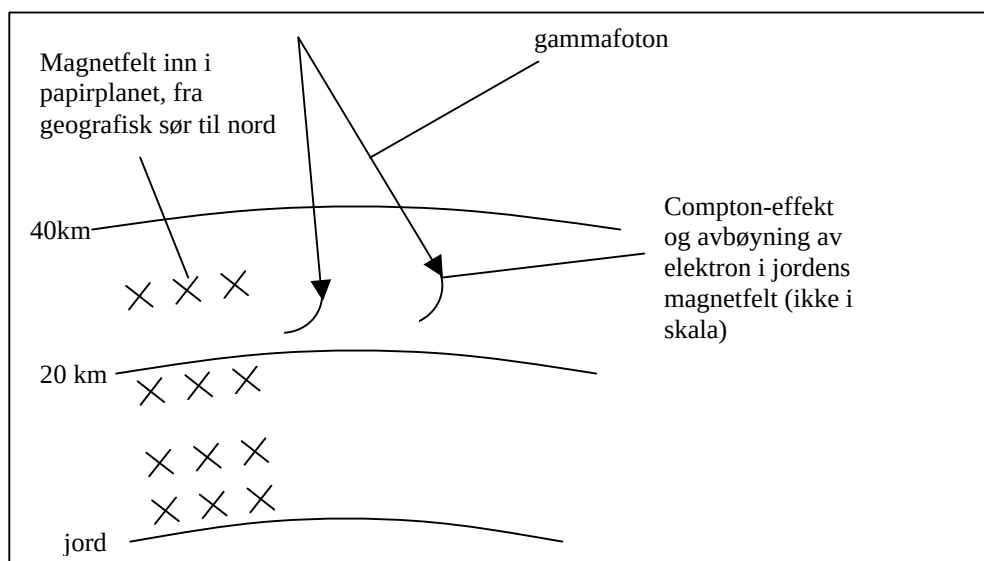


Figur og utregning av EMPens rekkevidde

Den største delen av den øyeblikkelige gammastrålingen blir sendt ut i løpet av ca 10 ns, følgende regnestykke gir oss da en gammapuls med lengde i størrelsesorden noen få meter:

$$s = vt \approx c \cdot 10\text{ns} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8} \text{ m} = \underline{3\text{m}}$$

Ved større høyder enn 40 km er atmosfæren så tynn at gammastrålene kan stråle ut nesten uten å reagere med luftmolekylene. Fra 40 km og nedover vil vi derimot få Compton-spredning. Nesten alle gammafotonene har kollidert med elektroner innen de når en høyde over jorden på 20 km. Mellom 40 og 20 km er avstanden Compton-elektronene bruker på å stoppe ca 100 m.



Avbøyning av Compton-elektronene i jordens magnetfelt

Fra figuren over skjønner vi at vi (ved ekvator) vil få liten EMP-effekt i retning sør/nord fra detonasjonsområdet, fordi Compton-elektronene her går tilnærmet parallelt med magnetfeltet. Effekten avhenger riktignok av hvilken breddegrad detonasjonen skjer på. På grunn av manglende måleresultater og varierende fotonenergi er det vanskelig å si noe nøyaktig om hvordan feltene i EMPen vil være. Vi kan allikevel gjøre noen antagelser, og si noe om hvordan feltet vil spres:

Om størstedelen av elektronene blir avbøyd som på figuren over vil vi få magnetfelt inn i papirplanet vinkelrett på radiell retning, i tillegg til radielt rettede elektriske felt. Det elektromagnetiske feltet spres utover med lysfarten og holder derfor følge med gammastrålingen. For hver gang noe av gammastrålingen går over til energi i Compton-elektronene vil feltet øke. Når all gammaenergien er absorbert vil det fortsette å ekspandere som et kuleskall til det treffer jorden.

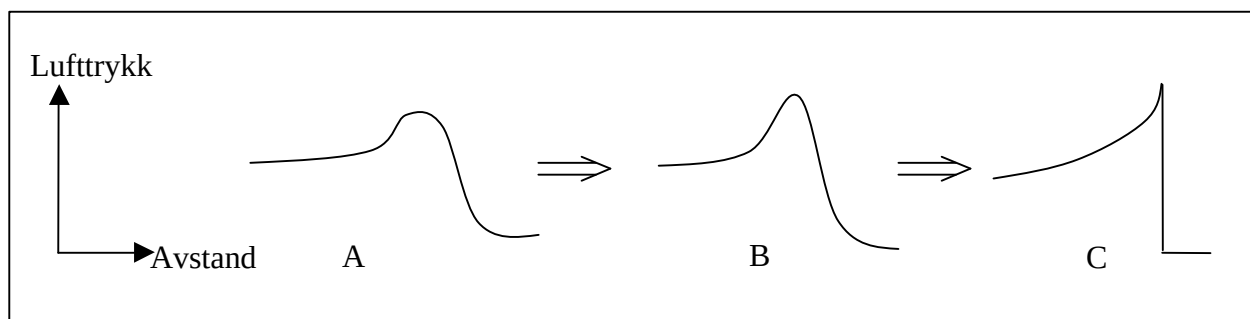
Siden atmosfæriske atombomber ikke er noe som lett kan utføres på laboratoriet, og USA og Sovjet inngikk avtale om å stoppe atmosfæriske prøvesprengninger i 1968 er eksakte måledata vanskelig å få tak i (og i beste fall militære hemmeligheter). Federation of American Scientist hevder at EMPen fra Compton-elektronene varer omtrent 1 mikrosekund, og at det induerte elektriske feltet kan komme opp i størrelsesorden 10-talls kV/m. Man kan lett forstå at så høy spenning i strømledninger, telefonledninger, eller elektriske ledere generelt kan

kortslutte elektriske systemer. (EMP-delen bygger hovedsakelig på informasjon hentet fra [4] og [2].)

Noen andre konsekvenser ved detonasjon av atombomber

Trykkbølge (sjokkbølge)

Fisjonen ved sprengningen skaper en enormt høy temperatur som varmer opp gassene og materialet rundt bomben. Øker du temperaturen i en gass, vil trykket også øke. Dette trykket fører til at gassens volum øker, og vi får en trykkbølge som beveger seg vekk fra bomben. Straks etter sprengningen vil trykkbølgen ha form omtrent som bølge A under. Ettersom temperaturen og trykket bak bølgefronten er høyere enn trykket foran vil gassene bak fronten ha høyere fart enn fronten, og etter en kort stund får vi dannet en sjokkbølge lik bølge C. Bølgen spres utover med denne formen, men avtar i intensitet. 10 sekunder etter detonasjonen, 4 km unna, er bølgen fremdeles sterk nok til å knuse vinduer, men er nesten uten energi 12 km unna [2].



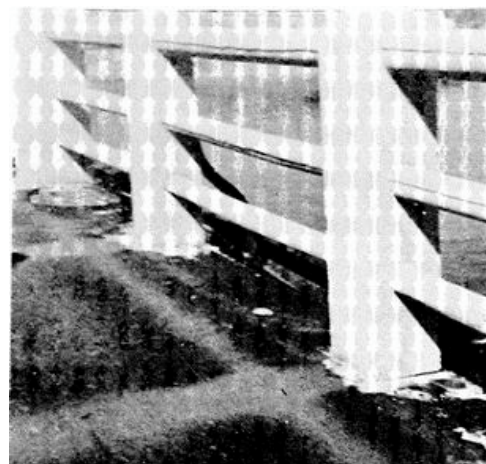
Utviklingen av trykkbølgen fra atombombe (kopi av fig. 1.57 i Glasstone)

Termisk stråling

Ved en atombombesprengning dannes det en ildkule med temperatur helt opp i flere millioner Kelvin. Dette er nær det vi finner i sentrum av solen. Kulen vil, selv om temperaturen synker til noen tusen kelvin noen hundredeler etter sprengningen, utstråle en intens varmestråling. Avhengig av atmosfæriske forhold (forurensning, lufttetthet etc.) vil dette kunne gi hudskader på over 4 kms avstand [2].

En viktig faktor som forsterker skadeeffekten er at varmestrålingen sendes ut over et kort tidsintervall. Hvis den samme energien hadde blitt utstrålet over lengre tid ville varmen som oppstår ved absorpsjon blitt mindre. Dette fordi varmen ville blitt transportert vekk fra legemet som absorberer energien. Fordi strålingen er begrenset til noen sekunder med veldig høy energi, blir varmen også høy.

Strålingen går i rette linjer vekk fra bomben, og områdene skjult fra bombestrålingen vil ikke bli påvirket av den termiske strålingen. Et eksempel på dette kan sees til høyre.



I skyggen bak dette gjerdet er asfalten ikke blitt svidd (bildet hentet fra Glasstone)

Oppsummering

I noe av kildematerialet vi har brukt til dette prosjektet har forfatterne vært påpasselige med å bruke navnet kjernefysiske våpen (nuclear), istedenfor atombomber. De begrunner dette ved at energien til bombene kommer fra atomkjernen, og derfor ikke omfatter hele atomet. Vi mener at vi i dette prosjektet har vist at navnet atombombe allikevel er mest passende. Effektene til bomben tar form som molekylære trykkbølger så vel som elektromagnetiske feltvariasjoner og strømmer. Selv om eksistensen til atomåpen og deres bruk i krig er et omstridt tema, var deres utvikling en katalysator for kjernefysikken. Dette er noe vi fremdeles drar nytte av i kjernefysiske kraftverk og i teoretisk forskning.

Bibliografi

- [1] L.Bedash – *Scientists and the Development of Nuclear Weapons* - Humanities press - 1995
- [2] S.Glasstone – *The Effects of Atomic Weapons* - The Combat Forces Press - 1950
- [3] R.Rhodes – *Dark Sun* - Simon & Schuster - 1995
- [4] L.W. Ricketts; J.E. Bridges; J.Miletta – *EMP Radiation and Protective Techniques* - John Wiley & Sons - 1976
- [5] H.D. Young; R.A. Friedman – *University Physics/Sears and Zemansky/*
- [6] M. Alonso; E. Finn – *Physics/Addison-Wesley*
- [7] L. Wilets – *Theories of nuclear fission* - Clarendon Press - 1964

http://www.awe.co.uk/main_site/scientific_and_technical/featured_areas/dpd/computational_physics/nuclear_effects_group/electromagnetic_pulse/index.html

<http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/emp.htm>

<http://www.abc.net.au/science/k2/moments/s380431.htm>

<http://www.howstuffworks.com/nuclear-bomb.htm/printable>

<http://science.howstuffworks.com/e-bomb.htm/printable>

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/5971/emp.html>

<http://popularmechanics.com/science/military/2001/9/e-bomb/print.phtml>

<http://www.barryrudolph.com/pages/atomic.html>

<http://www.ssb.no/aarbok/geografi.html>

<http://www.spartacus.schoolnet.co.uk/2WWatom.htm>

<http://www.atomicarchive.com/>

<http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Chemistry/NuclearChemistry/NuclearWeapons/FirstChainReaction/FirstNuclWeapons/mainpage.htm>

<http://www.chemcases.com/2003version/nuclear/nc-07.htm>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/u235chn.html>

Prosjekt om strengteori

av

Gard Sætre og

Magne Søby

Innholdfortegnelse:

1) <u>Forord</u>	side 3
2) <u>Innledning</u>	side 4 – 5
3) <u>Historie</u>	side 6 – 8
4) <u>Ekstra dimensjoner</u>	side 8 – 9
5) <u>Budbringerpartikler</u>	side 10 – 11
6) <u>Svarte hull</u>	side 11 – 13
7) <u>En mekanisk streng</u>	side 13 – 16
8) <u>Kommentarer</u>	Side 16 – 17
9) <u>Synspunkter på strengteorien</u>	side 17
10) <u>Litteratur liste</u>	side 18

Forord:

Man har lenge vært klar over problemet med å ha to teorier for å kunne beskrive alt rundt oss. Det var først etter at strengteori kom på banen at man kanskje kunne klare å beskrive alt ved hjelp av en teori, og ikke bruke den som var mest passende. At strengteori har en såpass mystisk opprinnelse helt tilbake fra 1968, hjelper også på å skape litt blest om den. Men den har hatt hard medfart opp igjennom årene. Det å si at det ikke er en fysisk teori fordi den ikke bygger på noen eksperimentelle resultater er for eksempel blitt gjort. Bare det å si at den fungerer best under 11 dimensjoner, er jo å be om bråk. At en slik teori som har et så enkelt grep som å gjøre om byggesteinene fra punktpartikler til strenger skal klare (i teorien selvfølgelig) å beskrive gravitasjon på kvantenivået, med forutsetningen av gravitonet, var nok mye av det som inspirerte fysikere til å fortsette å jobbe med den. Den har hatt flere høyder i sin karriere, som for eksempel den vellykkede beskrivelsen av svarte hull i samsvar med entropien til hullet. Dett er noe Stephen Hawking tidligere hadde beskrevet, eller den matematiske utledningen av roterende strenger som stemte rimelig godt overens med de eksperimentelle grafene av såkalt regge-spor.

Innledning:

Helt siden Newtons berømte oppdagelse av tyngdekraften, har fysikere prøvd å forklare alt som skjer rundt oss ved hjelp av formler og regler. Newton klarte aldri å finne ut hvorfor tyngdekraften virket som den virket, men han klarte å definere regler, om hvordan tyngdekraften virket på et legeme. Det viste seg at det kom til å ta over 200 år før noen fant ut hvordan tyngdekraften virket. Rundt 150 år etter Newtons oppdagelser fant fysikeren Maxwell sammenhengen mellom elektrisitet og magnetisme. To områder innen fysikken som alltid hadde blitt sett på som to helt forskjellige krefter. Maxwell kom frem til sine tre berømte ligninger og ble kjent for det. Det var ikke før Einstein kom på banen at mysteriet rundt tyngdekraften ble løst. Etter å ha kommet fram til mange sammenhenger i fysikken og mottatt nobelprisen i fysikk, ble Einstein besatt på å finne en ligning som kunne forene gravitasjonen og elektromagnetismen. Hvis det ble funnet en sammenheng mellom disse kreftene kunne man forklare alt som skjer trodde Einstein. Dette viste seg å være veldig vanskelig, for gravitasjon og elektromagnetisme har så store ulikheter at Einstein grublet på hvordan å forene de helt fram til sin død. Over 30 år hadde han da brukt kun på denne tilsynelatende umulige oppgaven. For å gjøre ting verre, fant Niels Bohr ut på 30 tallet at verken Newtons gravitasjon eller Maxwells elektromagnetisme kunne brukes på atomer. De viste seg å være enda flere krefter, sterke og svake *nukleære krefter*. Disse var igjen noe helt for seg selv. Fantet det virkelig ingen måte å kunne forklare alt rundt oss i en eneste universal ligning? Er alt som skjer rundt oss så komplekst at en ligning faktisk er umulig? Eller er strengteori svaret på Einsteins drøm om å kunne forklare alt. Strengteori kan være det som trengs for å endelig kunne få en sammenheng mellom alle de tilsynelatende uforenelige kreftene. Hvis man tar til ettertanke hvor uforenelige de forskjellige kreftene er, blir det kanskje lettere å forstå hvorfor strengteori kun kan brukes hvis man antar 11 dimensjoner og parallelle univers.

Disse tankene er science fiction for mennesker flest, men er det egentlig så umulig at det finnes parallelle univers og flere dimensjoner enn det øyet kan se?

I standardmodellen for atomer tenker er en seg at elementærpartikler og kvarker er punktpartikler, dette er også vist eksperimentelt, ned til en viss størrelse. Strengteorien sier at alt er bygd opp av bitte små strenger, små sirkler av energi som vibrerer og vrir seg. Alt ettersom hvordan disse strengene vibrerer og vrir seg, får man forskjellige energinivåer. Det er disse energinivåene som bestemmer hvilken partikkel den beskriver. For å illustrere hvor små strengene faktisk er; tenk deg at et atom er på størrelse med vårt solsystem, da ville en streng vært på størrelse med et vanlig tre. I denne verdenen vi lever i idag, opplever vi kun fire dimensjoner, høyre-venstre, fram-tilbake, opp-ned og dimensjonen for tid. Ligningene i strengteori forutsetter at det skal eksistere 11 dimensjoner. Dette er jo 7 mer enn det vi opplever daglig, så hvor er resten skjult? En forestiller seg da at disse også er veldig små. Så små at vi ikke merker dem. Hvis man kan litt kvantefysikk, vet man at det er ikke hundre prosent sjanse for at noe skal skje. Man kan bare regne ut sannsynligheten for at noe skal skje. For eksempel kan man regne ut hvor stor sjanse det er for å finne et elektron i en viss avstand fra atomkjernen. Det er nettopp ved hjelp av kvantefysikk man kan tenke seg de parallelle universene. For å ta et eksempel; hvis man er på byen og bestiller seg en øl. Det er ikke sikkert man får den ølen man hadde håpet på. Hvis utestedet har fem forskjellige tappekraner med fem forskjellige øltyper, er det bare en-femtedels sjanse for at man får den ølen en vil ha. Det er like stor sjanse for å få hvilken som helst av de fem øl typene. Da er det ikke så vanskelig å forestille seg at alle de fem utfallene faktisk skjer samtidig. Men hvis alle utfallene skjer samtidig, da har man plutselig flere parallelle univers, på en ganske forståelig måte. Dette høres veldig fjernt ut og kan virke som tull, men husk jorda har en gang vært flat, alle visste det og det var en godtatt sannhet. Eller jorda er universets sentrum. Det er farlig å si at noe er helt feil, en vet aldri hva som faktisk stemmer og hva som ikke stemmer. Hva hvis man en gang finner ut at det faktisk er strenger, og prøver å dele dem? De vil bare da danne nye mindre strenger, og vi er tilbake til utgangspunktet.

Historie:

En kveld i 1968 satt en enslig student, Gabriel Veneziano og kikket gjennom gamle matematikk bøker i håp om å finne det matematiske beviset for ”den sterke kraften”, som holder kjernen til alle atomer sammen, binder protoner til neutroner. Etter å ha kikket gjennom endel bøker, kom han til en bok som handlet om utregninger og teorier gjort av den sveitsiske matematikeren Leonhard Euler. Mens han bladde gjennom boken fant han en 200 år gammel ligning som tidligere ble sett på som matematisk nysgjerrighet. Etter å ha kikket nærmere på denne ligningen så han at ligninger forklarte ”den sterke kraften”. Han publiserte en artikkel på dette og ble verdenskjent. Dette var starten for strengteori. Denne formelen endte opp hos den amerikanske fysikkstudenten Leonard Susskin. For han var denne formelen så enkel å forstå at det virket rart, og han hadde oppdaget noe underliggende med denne formelen. Det første som gikk opp var at denne formelen omhandlet en type partikler med en indre struktur som kunne vibrere. Det virket som partiklene kunne gjøre mer enn det man trodde om vanlige punkt-partikler. Det gikk opp for Leonard at denne indre strukturen var en streng. Ikke bare kunne denne strengen trekke seg sammen eller bli strekt, men den kunne også vibrere fra side til side. Leonard skrev en artikkel om denne revolusjonerende oppdagelsen og ville naturligvis publisere denne fordi han var sikker på at ingen andre i verden hadde kommet frem til det samme. Leonard så for seg ære og berømmelse. Siden artikkelen før publisering må gjennom en gruppe som bestemmer hva som publiseres og dette var på den tiden da partikkelfysikk var på topp, og nye partikler ble funnet nesten ukentlig, ble han avvist. Dette var ikke verdt å publisere. Det virket som strengteorien ble avvist i fødselen, og interessen sank kraftig blant andre fysikere. En fin oppdagelse men den har ingen betydning i naturen. De eneste som fortsatt trodde på strengene var pionerene, de regnet og regnet, men det viste seg å bare komme flere og flere problemer med teorien. Strengteorien forutsetter mange

elementer som ikke er bevisst, f.eks. Taccchion et partikkel som beveger seg fortere en lyset, og et masseløst partikkel aldri før sett i naturen.

I 1973 var det kun en håndfull fysikere som strevde med den vanskelige matematikken og fysikken rundt strengteori. Uansett hva de gjorde, reduserte dimensjonene fra ti til fire, ble kvitt de ukjente partiklene, det var fortsatt ufine svar og veldig vanskelig matematikk. I over fire år prøvde fysikeren Joe Schwarz å finne ut av ligningen for strengteori, byttet om på rekkefølger, gjorde om her og der, men kom ingen vei. Da Joe var på nippet til å gi opp alt, kom han til å tenke på tyngdekraften. Ingen før han hadde tenkt på hvordan denne virket inn på teorien og størrelsen på strengene. Hvis man antok at en streng var hundre milliarder milliarder ganger mindre enn et atom ble et av teoriens svakheter en nødvendighet. Den masseløse partikkelen viste seg å være en graviton. Den partikkelen som lenge var trodd å overføre gravitasjon på kvantenivå. Denne sensasjonelle oppdagelsen gjorde at Joe laget en artikkel om den. Han sendte inn artikkelen til oversyn, men heller ikke denne gangen ble strengteorien tatt på alvor, og ble avvist. Men Joe ble ikke satt ut av dette, han hadde sett "The holy grail" og fortsatte arbeidet sitt. Hvis det var gravitoner som bestemte gravitasjonen på kvantenivå, så må disse være bindeleddet for "teorien som beskriver alt". Det er jo nettopp å forene EM, den sterke og svake kraft, og gravitasjon som virker umulig. For å kunne bevise dette og for å bli kvitt noen matematiske feil, jobbet Joe og en kollega, Michael Green, i fem lange år. De visste at dersom de matematiske feilene ikke lot seg løse, var teorien bare å glemme. En teori som ikke holder matematisk duger ikke til noe. En natt i 1984 kom gjennombruddet. Etter så mange år med prøving og feiling, omgjøring og klundring, bestemte de seg for å putte inn bestemte verdier. Hvis verdiene på begge sider av ligningen var like, så var det egentlig ikke noen matematiske feil, og da var strengteorien matematisk fri for hull. De satte inn verdier og fikk 496 på den ene siden og etter mye regning fikk de også 496 på den andre siden. Det var nå bevist at strengteorien ikke bare kunne bevise gravitasjonen, men også de andre kreftene. Sammenbindingen av de tidligere uforenelige kreftene var et faktum, og det virket som Einstein livslange drøm kunne oppfylles. Dette beviset ble publisert og strengteorien blomstret som aldri før. På kun et år økte antall strengteori fysikere fra en håndfull til flere hundre. Årene gikk og strengteorien blomstret som aldri før. Det som tidligere virket som en håpløs drøm var nå en "ustoppelig" virkelighet, men bak fasaden

om fremgang gikk det egentlig ikke så bra som mange trodde. Det som egentlig skulle være en teori for alt, hadde utviklet seg til ikke mindre en fem forskjellige teorier. Fem forskjellige teorier som skulle forklare alt. Strengteoretikerne hadde vært litt for flinke. Alle de fem teoriene var bygd opp av strenger og ekstra dimensjoner men de var ikke i harmoni med hverandre. Dette reiste mange vanskelige spørsmål for fysikerne, var en av de fem teoriene riktig?, hvem av de var riktig?, og siden alle teoriene skulle forklare universet, hvem bodde da i de fire andre universene, siden bare en av teoriene forklarte vårt univers. Det virket igjen som strengteorien ikke holdt mål, og mange fysikere ga seg. Det var ikke før Edward Witton kom inn i bildet at denne gåten ble løst. På en strengteori konferanse i 1995 skulle Ed fremføre en presentasjon, og han ville gjøre til noe helt spesielt. Siden det nå var fem forskjellige teorier, ville han prøve å bli kvitt noen av de. Ikke bare ble han kvitt noen av de ekstra teoriene men han kom fram til en eneste ligning, og han skulle vise hvordan på konferansen. Fra Eds perspektiv var det egentlig ikke fem forskjellige teorier men fem forskjellige måter å se på samme ting. Denne nye teorien ble kalt M-teorien. Strengteorien var reddet og nå var det kun en teori. Denne suksessen ga imidlertid fysikerne et nytt problem, for den teorien som før hadde krevd tilstedeværelse av ti dimensjoner krevde nå elleve dimensjoner, og det viste seg at den nye teorien skjulte mer enn noen kunne ane da den kom. Denne nye teorien forutsa at det i tillegg til strenger fantes nye objekter som er større enn strengene, men fortsatt så små at vi enda ikke har oppdaget de. Disse objektene er membraner som svever rundt.

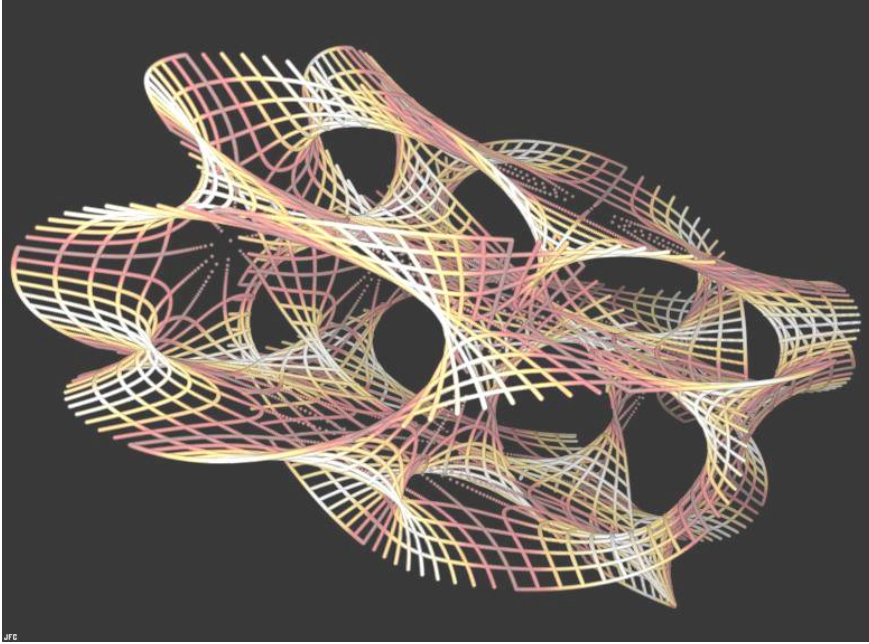
Det som virker merkeligst med strengteorien er de ekstra dimensjonene den trenger. Her kommer en liten forklaring på hvorfor den trenger disse og hvordan de kan se ut.

Ekstra dimensjoner i strengteori:

En viktig del av strengteorien er tilstedeværelsen av flere dimensjoner enn de fire vi ser til vanlig, de tre dimensjoner for volum og en for tid. Grunnen til dette er, at strengteorien forutsetter partikler (ennå ikke bevist) som i en fire-dimensjonalt univers har en negativ sannsynlighet for finnes. Dette er et ganske stort dilemma for fysikerne. Skal man godta at det finnes partikler med en negativ sannsynlighet for å bli funnet, eller skal man godta at

det finnes flere dimensjoner en man kan se. Siden den første antakelsen ikke gir noen som helst mening, forutsetter man at det finnes ekstra dimensjoner. Siden denne antakelsen har vært godtatt en mange år, har man prøvd å finne ut hvor disse dimensjonene er, hvordan de ser ut og hvilken påvirkning de har for strengteorien. For å svare på hvordan dimensjonene kan se ut, er det spesielt en teori der som har utmerket seg. Hvis man tenker seg rommet som et rutenett, delt oppe i veldig veldig små ruter, så vil det på hvert eneste punkt i dette rutenettet være en bitte liten seks-dimensjonal dimensjon (For illustrasjon se figur 1). Når det kommer til spørsmålet om hva disse ekstra dimensjonene gjør for strengteori, så ligger disse helt til grunn for strengteorien. Som tidligere sagt, så kommer det an på hvordan en streng vibrerer og beveger seg som forteller oss hvilken partikkel som blir bygd. Det er nettopp disse seks-dimensjonale ”vridde kulene” som påvirker hvordan en streng vibrerer og beveger seg. Disse teoriene gjelder fortsatt den dag idag, men etter Ed Wittons revolusjonerende konferanse trengte man elleve dimensjoner for å kunne forklare strengteorien. Denne nye M-teorien vekket en ny og kanskje en enda merkeligere begrunnelse for de ekstra dimensjonene. Eds teori la grunnlaget for membraner, disse membranene kan med nok energi bli like svære som et univers. Disse membranene kan også variere i antall dimensjoner. Kanskje det er slik at vårt univers bare er en av et uendelig antall membraner. I et høyere dimensjonelt rom.

Fig 1:



Antydninger:

Her kommer et par eksempler som styrker strengteorien, og som gjør det letter å forstå hvorfor den får så mye oppmerksomhet som den gjør.

Budbringerpartikler (messenger particles):

Selv om det kan virke som om det er mange forskjellige krefter som virker i dagliglivet, kan alt oppsummeres til fire krefter. De fire kreftene er gravitasjon, elektromagnetisme, sterke kjernekrefter og svake kjernekrefter. Siden de to sistnevnte har et virkeområde fra 10^{-15} til 10^{-17} meter, legger man ikke så lett merke til dem. Derimot så ser man resultatet av dem over alt, det er nemlig de sterke kjernekreftene som holder atomkjærnene stabile, ved "lime" sammen protoner og nøytroner. De svake kjernekreftene er de som f.eks.

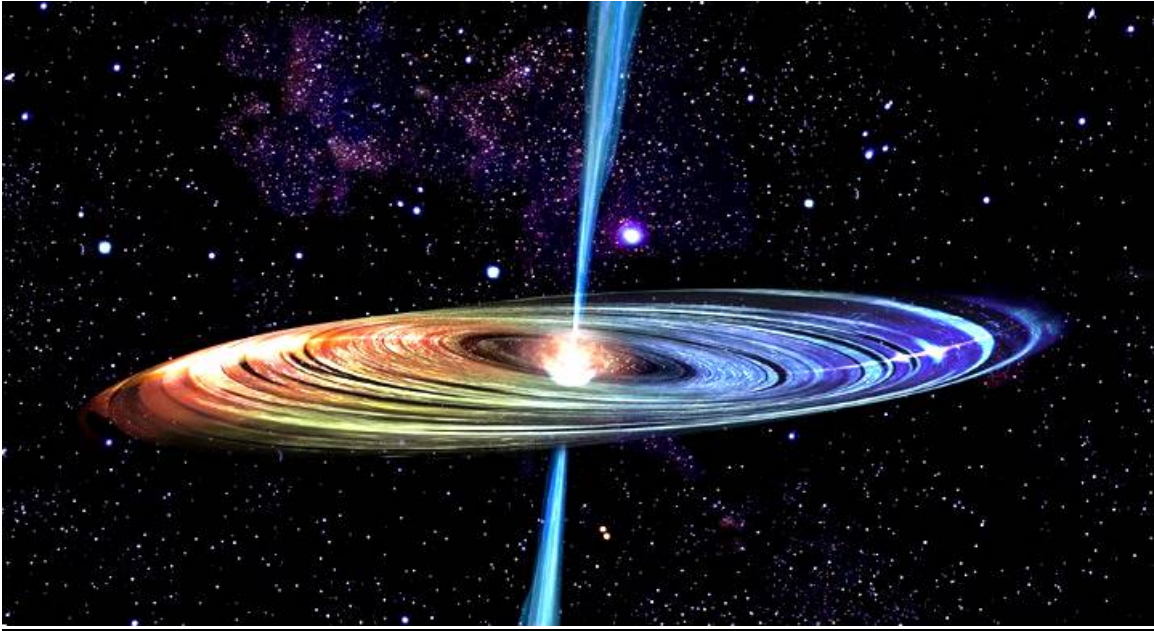
forårsaker radioaktivitet. De to kreftene vi legger mest merke til blir da gravitasjon og elektromagnetisme. Disse to er de kreftene man tenker over til vanlig.

Hva krefter er, er jo et tema. Og ikke minst hvordan de virker på ”ting”. På 70-tallet ble det funnet massevis av partikler og noen av disse ble gjenkjent som budbringerpartikler for tre av kreftene. Disse partiklene er det minste kvant kreftene kan virke med.

Sterke kjernekrefter	Gluoner
Svake kjernekrefter	Gauge Bosoner
Elektromagnetisme	Fotoner

Siden det er fire krefter, hvorfor har man bare kunnet finne tre budbringerpartikler? Strengteorien slet på den tiden med en del matematiske problemer, og en masseløs partikkel som dukket opp av ligningene. John Schwarz var en de få personene som jobbet med det på midten av 70-tallet. Han foreslo etter fire år med tavleskriving at ligningene beskrev gravitasjon. Det viste seg at den masseløse partikkelen de hadde hatt så store problemer med å bli kvitt, sannsynligvis var den lenge ettersøkte partikkelen for gravitasjon, kalt *Graviton*. Dette er partikkelen som skal formidle gravitasjonskreftene på det mikroskopiske nivået. Dette ”funnet” av gravitoner medførte at strengteorien nå kunne beskrive hvordan gravitasjon virket innenfor kvantemekanikken. Strengteori kunne nå snakke om gravitasjon på det mikroskopiske nivået, noe som andre teorier bare kunne drømme om. Andre teorier, som Newtons mekanikk og relativitetsteorien ble konstruert for å beskrive gravitasjon. Strengteori hadde fått at gravitasjonen måtte eksistere. Det vil si at man kan utlede en sammenheng mellom relativitetsteorien og kvantemekanikken fra strengteori.

Svarte hull:



Som nevnt tidligere har man nå kommet frem til to teorier for å forklare alt som skjer rundt oss. Den ene teorien virker på store objekter og den andre virker på veldig små objekter. Dette høres veldig bra ut, men som med alt annet finnes det også her unntak. I denne sammenhengen er det ikke slik at en kan gjøre om på litt også virker det. Disse unntakene er så ekstreme at de ikke lar seg løse. Et eksempel på dette er svarte hull. Et svart hull er en gigantisk masse krympet ned til en lite punkt. Siden hullet har en enorm vekt virker det logisk å bruke relativistisk regning, men siden hullet bare er et punkt burde man bruke de kvantemekaniske lovene. Det som gjør dette så vanskelig er at disse to lovene ikke virker sammen. Kvantemekanikken beskriver alltid sannsynligheten for noe. Sannsynligheten for at en partikkel kan befinne seg på et gitt punkt, og lignende. Prøver man å kombinere den relativistiske teorien og kvantemekanikken ender man opp med en sannsynlighet som er uendelig, noe som ikke gir noen mening.

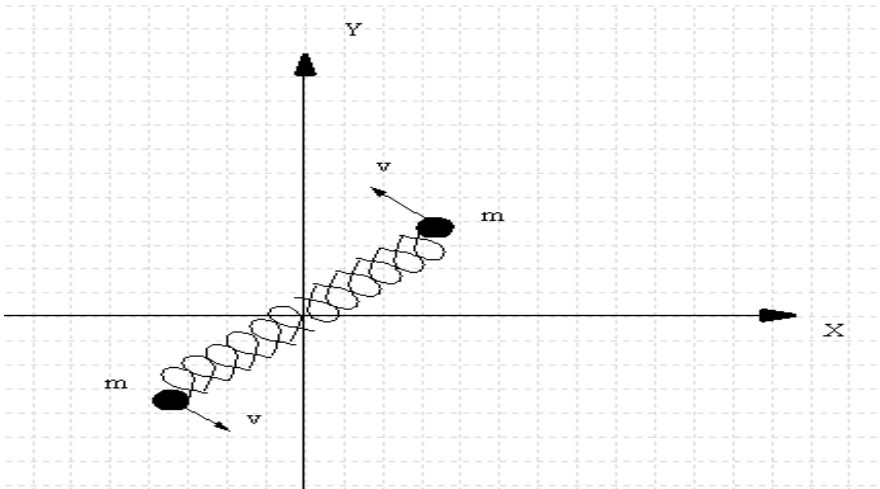
Egenskapene til svarte hull var lenge et mysterie. Det ble sagt at "svarte hull har ikke noe hår", med dette mente man at var at det var vanskelig å finne noe som skilte svarte hull fra hverandre. Etterhvert ble det oppdaget at svarte hull har masse, ladning og spinn, men utenom disse egenskapene fant man ingenting som skilte to hull fra hverandre.

I 1970 foreslo en student ved navn Jacob Bekenstein at svarte hull har entropi. Entropi er et tall som sier noe om graden av orden. Høy entropi beskriver uorden, mens lav beskriver orden. En veletablert lov i termodynamikk sier at alt går mot høyere entropi, altså uorden. Siden ting blir ”sugd” inn i et svart hull, skulle det ha en meget høy entropi. Stephen Hawking var ikke enig dette i begynnelsen, for hvis et svart hull har entropi skal det også ha utstråling, men det er jo svart. Hawking viste senere at svarte hull faktisk har utstråling (1974). Det blir sagt at svarte hull gløder, men, dette er ikke eksperimentelt bevist. Hva har så strengteorien å si om det her? I 1996 publiserte to fysikere ved navn Andrew Strominger og Cumrun Vafa, en artikkel som satte strengteorien i samsvar med svarte hull. De viste hvordan de med ligningene til strengteori kunne bygge opp svarte hull fra bunnen av, med de egenskapene hullene har. Dette ble naturligvis gjort teoretisk. Det neste de gjorde var å se på antallet bestanddeler som kunne forandres, uten at de observerbare egenskapene til svarte hull, dets masse og ladning ble annerledes. De sammenlignet så det tallet med entropien for det svarte hullet. Dette tallet stemte eksakt med det Hawking hadde regnet ut tidligere. De hadde klart å gjøre rede for sammenhengen mellom bestanddelene for et svart hull og entropien ved bruk av strengteori.

En mekanisk streng:

Strengteori har ingen eksperimenter som entydig bekrefter de teoretiske resultatene. Nå skal vi se på et eksempel som har en eksperimentell sammenheng med den matematiske teorien.

La oss først betrakte et system som består av en masseløs fjær med en masse, m , i hver ende. Denne roterer om sin egen akse.



Dette er helt analogt med en fjær som er festet i origo med masse m i enden, og som kan rotere friksjonsfritt.

N2 gir da $m \frac{v^2}{r} = kr$ hvor k er fjærkonstanten og r er radius.

$$\Rightarrow r = v \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Vi er interessert i å utlede en sammenheng mellom banespinnet og totalenergien for systemet.

$$L = \vec{r} \times \vec{p} \Rightarrow L_z = rp = rmv \Rightarrow L_z = (v \sqrt{\frac{m}{k}})mv = mv^2 \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Totalenergien er gitt ved den potensielle energien lagret i fjæra, og den kinetisk energien til massen med fart.

$$E = \frac{1}{2}kr^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k(v\sqrt{\frac{m}{k}})^2 + \frac{1}{2}mv^2 = mv^2 \quad \Rightarrow \quad E = L_z \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\Rightarrow E_{total} = 2L_z \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Vi ser her da at klassisk er det en lineær sammenheng mellom E og L . Strenger er jo tenkt på som byggesteinene, det at de kan rotere og/eller forflytte seg med fart opp mot lyshastigheten er et interessant tilfelle.

En streng har i følge teorien kun todimensjonal utstrekning i rommet ($\leq$ sjekk opp!!!).

$$\Rightarrow F(x, y, z, t) = F(x = x_1, y = x_2, z = x_3 = 0, t = x_0 = \frac{a}{c} \tau)$$

Man ønsker så å beskrive x_1 og x_2 retningen med kun en parameter, og etter litt regning

som vi ikke tar med her (matematikken er for vanskelig) får man $x_n(\sigma, \tau)$ $n = 0, 1, 2, 3$

Så velger man et standard ortonormalt rom, definert med følgende rammebetingelse:

$$\dot{x}^2 + x'^2 = \dot{x} \cdot x' = 0$$

Her er ikke indreproduktet det euklidske men Lorentz-invariants. Definert som:

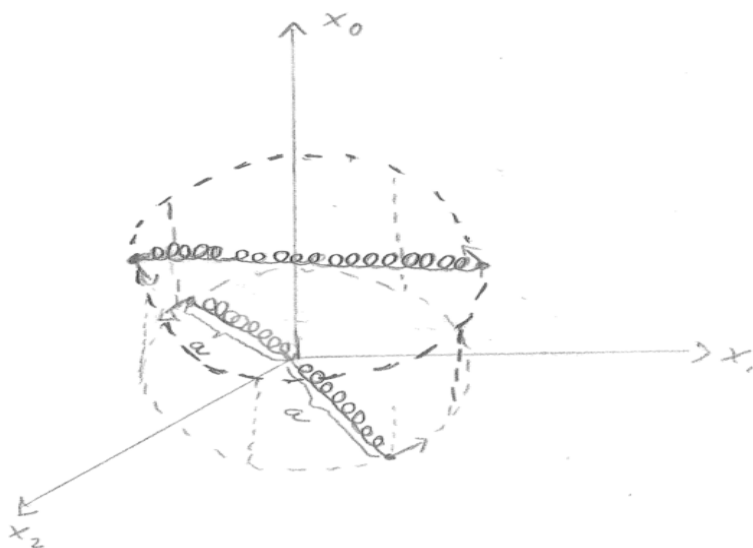
$$\dot{x}_n \cdot x'_n = \frac{\partial x_0}{\partial t} \frac{\partial x_0}{\partial \sigma} - \frac{\partial x_1}{\partial t} \frac{\partial x_1}{\partial \sigma} - \frac{\partial x_2}{\partial t} \frac{\partial x_2}{\partial \sigma}$$

Man parametriserer da strenger som følgende:

$$x_0 = ct = a\tau \quad x_1 = a \cos \sigma \cos \tau \quad x_2 = a \cos \sigma \sin \tau \quad x_3 = 0, \text{ hvor } a \text{ er halve}$$

lengden av strengen.

Man tenker seg følgende figur:



Hvor $r = a \cos \sigma$ beskriver bevegelsen til strengen i x_1, x_2 planet. Vi kontrollerer parametriseringen ved å se på farten i endepunktene (merk: her antas det ikke en masseløs fjær).

$$\left(\frac{\partial x_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial t}\right)^2 = \left(-\frac{ca}{a} \cos \sigma \sin \frac{c}{a} t\right)^2 + \left(\frac{ca}{a} \cos \sigma \cos \frac{c}{a} t\right)^2 = \frac{c^2 r^2}{a^2} \left(\sin^2 \frac{c}{a} t + \cos^2 \frac{c}{a} t\right).$$

$$= \frac{c^2 r^2}{a^2} = c^2 \text{ hvis } r = a \Rightarrow v = \sqrt{v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2} = \sqrt{c^2} = c$$

Har videre oppgitt at momentet for en streng av denne typen er gitt som

$$p_n = \int_0^\pi P_n(\tau, \sigma) d\sigma,$$

og har videre oppgitt at med den parametriseringen vi har, gir oss $P_n = cTa\pi\delta_{n0}$.

δ_{n0} er definert slik at den er 0 for alle $n \neq 0$ og 1 for $n = 0$.

$\Rightarrow$ strengen har totalmoment i retning x_0

$$\Rightarrow P_0 = cTa\pi \text{ og med } m = \frac{P_0}{c} = Ta\pi$$

Spinnet for en slik streng vil også virke i samme retning. $J_0 = \vec{r} \times m\vec{v}$.

$$\text{Spinnet er gitt som } J_0 = \int_0^\pi (x_1 P_2 - x_2 P_1) d\sigma = \frac{\pi c T a^2}{2}$$

$$\Rightarrow J = (c^2 T a \pi)^2 \frac{1}{2c^3 T \pi} \text{ lar så } \frac{1}{2c^3 T \pi} = b$$

$$\Rightarrow J = b(mc^2)^2$$

Spinnet er lineært avhengig av kvadratet av energien. Dette er faktisk ganske likt det klassiske uttrykket. For å finne denne sammenhengen ble det gjort en del forsøk på begynnelsen av 70-tallet, disse ble kalt Kald regge-spor. Et regge-spor av partikler som består av tre kvarker. Man fant ut at denne tilnærmingen passet ganske bra for endel partikler. Man skal være forsiktig å påstå at dette er et eksperimentelt vitne for strengteorien, men det kan jo være en antydning på at en er inne på noe.

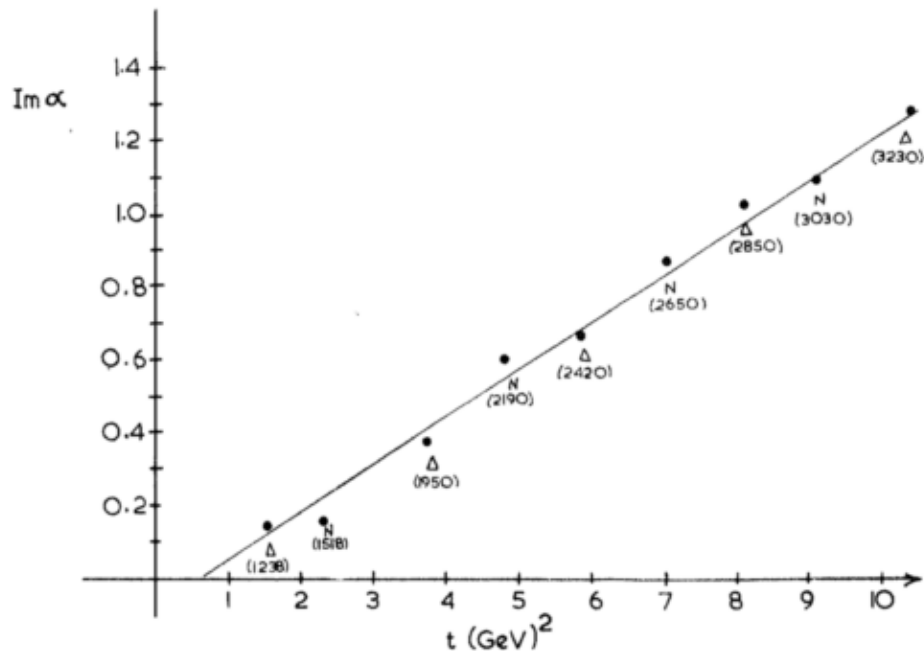


Fig. 13. A plot of $\text{Im } \alpha$ against t for the two baryon trajectories which have the greatest number of established resonances.

P.D.B. Collins Regge Theory and Particle Physics, Physics Reports 1, 103-234 (1971).

Kommentar

Kritikken mot strengteori har vært hard opp gjennom årene. Spesielt ble det brukt at fysikere som jobbet med dette var mer opptatt av skjønnhet og harmoni, enn fysikken bak. Fysikk ble og blir nok fortsatt sett på som en stort sett eksperimentell vitenskap. Når man da jobber med en teori som ikke lar seg testes eksperimentelt på mange år, kanskje til og med aldri vil en del hevde, hvor ligger da fysikken i det du jobber med? Det å si at en teori aldri kan bli testet er en veldig farlig uttalelse. Før Einstein kom på banen var alle sikre på at alle de fysiske lovene var blitt utledet. Det er også endel fysikere som mener strengteorien ligger på grensen til en filosofi. De som holder på med strengteori kan argumentere så mye de vil, men de kan ikke bevise noe av det, når det kommer til stykket

De vet ikke om teorien faktisk fungerer på den måten de tror, eller om den virker i hele tatt. Kan man ikke bevise teorien er den ikke annet en en tanke, en filosofi.

Strengteori er en meget enkel (bortsett fra alle dimensjonene og den ekstremt vanskelige matematikken) måte å se hvordan universet er bygd opp på, men om den faktisk er riktig er det ingen som kan svare på enda. Det man kan svare på er at universet er stort, og det er nok mye mer om dets natur vi ikke vet enn vet.

Helt til slutt tar vi med noen synspunkter på strengteorien.

“The string theorists have a theory that appears to be consistent and is very beautiful, and I don’t understand it.”

Sheldon Glashow, Boston University

“If string theory unifies gravity with the other forces, then I think we’ll be within our rights to ring a bell and say, ‘Hey, this is it.’”

Steven Weinberg, University of Texas at Austin

Litteratur liste:

- The Elegant Universe, dokumentar, 2002, (<http://www.Pbs.org/wgbh/nova/elegant>)
- Beyond String Theory (<http://tena4.vub.ac.be/beyondstringtheory/>).
- P. di Vecchio, Introduction to string theory, forelesninger på NORDITA Masterclass in physics, Hillerød, Danmark 20-28.7.2001 (<http://www.nordita.dk/conferance/masterclass2001/>).
- P.D.B Collins, Regge Theory and particle physics, physics reports 1, 103-234, 1971.
- Brian Green, The elegante universe, 1999.
- B. Zwiebach, A first course in string theory, 2004.
- Steven Weinberg, Dreams of a final theory, 1992.
- P.C.W Davies and Julian Brown, Super string, a theory of everything?, 1988

