

## ØVELSE 4: FUNKSJONELLE EGENSKAPER: LADNINGSTRANSPORT OG OPTISKE EGENSKAPER

Fremmøte: MENA1001-lab'en i 2. etasje vest i fysikkbygningen, V225 (der første lab var, ved siden av forelesningsauditoriet Lille Fysiske Auditorium).

I Øvelse 4 skal vi måle og regne på materialers elektriske egenskaper – deres ledningsevne for elektroner; et metall, en halvleder, og en superleder. Videre skal vi se på optiske egenskaper ved å studere et par optiske fenomener: Dobbeltbrytning og Faradayeffekten – en magnetooptisk effekt.

Les først Innledning og Teori for Øvelse 4a-c.

Gjør deretter Prelab for Øvelse 4a-c.

Les deretter Innledning og Teori for Øvelse 4d-e. (Det er ingen Prelab for disse.)

Da er du klar for å gå på lab for å gjøre Øvelse 4a-c og d-e.

### Øvelse 4a-c: Ledningsevne i ulike typer ledere

#### Innledning

Materialers evne til å lede elektrisk strøm og hva slags mekanisme ladningstransporten skjer ved, er viktige egenskaper ved et materiale i mange sammenhenger. Dette er ting vi bevisst eller ubevisst gjør nytte av hver eneste dag, for eksempel når vi bruker en PC, en varmeovn eller skrur på en lysbryter.

Grovt sett deler vi materialer inn i metalliske ledere, halvledere og isolatorer. Som kjent har metaller den beste ledningsevnen av disse og isolatorer den dårligste.

I tillegg kommer superledere, som har uendelig høy ledningsevne.

I denne delen av øvelsen skal vi se litt nærmere på forskjellene mellom de ulike typene ledere. De er alle elektroniske ledere, dvs. de leder elektroner. (I neste øvelse skal vi også bruke en ioneleder – en protonleder.)

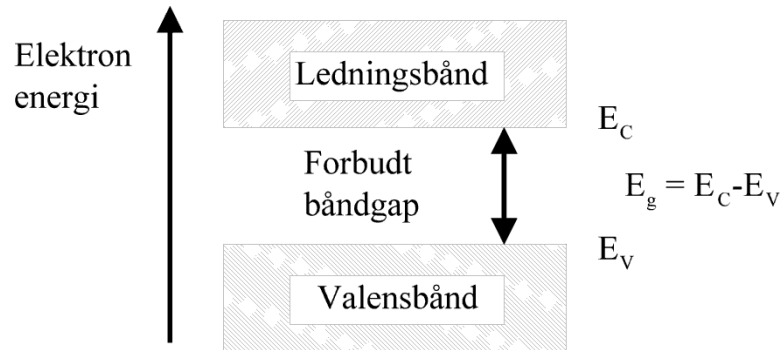
#### Teori

##### *Båndteori for udopede materialer*

I et fritt atom beveger elektronene seg i atomorbitaler. Orbitalene sier blant annet noe om hvilke energier elektronene kan ha. I krystallinske faste stoffer er orbitalene samlet i *energibånd*. Båndene kan overlappe hverandre, eller de kan være separert av et båndgap uten tillatte energinivåer.

For å minimere energien fyller elektronene de laveste energinivåene først. Det høyeste okkuperte energinivået kalles Fermಿನivået,  $E_F$ . Det høyeste energibåndet som

inneholder elektroner ved 0 K representerer valenselektronene. Det kalles derfor gjerne valensbåndet, og det øverste energinivået i dette båndet noteres  $E_V$ . Det neste båndet kalles ledningsbåndet (laveste energinivå i dette noteres  $E_C$ ). Avstanden mellom ledningsbåndet og valensbåndet kalles båndgapet,  $E_g = E_C - E_V$ , og inneholder bare forbudte energinivåer for elektronene (se Figur 1). Størrelsen på båndgapet og fordelingen av elektroner mellom valensbåndet og ledningsbåndet avgjør materialets elektriske egenskaper.



Figur 1: Skjematisk illustrasjon av båndgapet i en halvleder eller isolator.

#### Elektrisk ledningsevne i metaller

I et materiale med metallisk ledningsevne er enten valensbåndet ikke fullt, eller det overlapper med ledningsbåndet. Et resultat av dette er at vi har svært mange elektroner som kan bevege seg uten at de trenger å få tilført noe særlig energi. Dersom valensbåndet ikke er fullt kan valenselektronene bevege seg i valensbåndet siden det da er mange ledige energinivåer å bruke. Dersom valensbåndet er fullt, men overlapper med ledningsbåndet, kan valenselektronene hoppe over til ledningsbåndet hvor de kan bevege seg.

Dersom vi øker temperaturen vil atomene i materialet få mer energi og bevege seg mer, noe som skaper større vibrasjoner i gitteret av atomene. For et materiale med metallisk ledningsevne vil elektronene "kollidere" med disse gittervibrasjonene. Dette fører til at elektronene bremses og ledningsevnen blir dermed mindre. For et materiale med metallisk ledningsevne vil derfor ledningsevnen avta med økende temperatur.

Den gjennomsnittlige avstanden et elektron beveger seg mellom to kollisjoner kalles den midlere frie veilengde,  $L_m$ , og er et mål for hvor fritt elektronene kan bevege seg. Elektronenes midlere frie veilengde kan bestemmes fra formelen:

$$\sigma = ne u_e = \frac{ne^2 L_m}{m_e v_F} \quad (1)$$

der  $e$  er elektronets ladning (elementærladningen),  $n$  er antall ledningselektroner per  $m^3$ ,  $u_e$  er elektronets ladingmobilitet,  $m_e$  er elektronets hvilemasse, og  $v_F$  er den hastigheten som tilsvarer Fermienergien:

$$E_F = \frac{1}{2} m_e v_F^2, \text{ slik at } v_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m_e}} \quad (2)$$

For Cu er Fermienergien 7,05 eV, og  $v_F$  kan da beregnes fra denne. Vi antar ofte at antall ledningselektroner i et metall tilsvarer antall atomer (dvs. at ett elektron i hvert

atom bidrar til ledning).  $n$  er derfor lik atomtettheten til materialet som måles. Regn ut disse tallene i Prelab (under).

#### *Elektrisk ledningsevne i halvledere og isolatorer*

Dersom et materiale har fullt valensbånd og båndgapet,  $E_g$ , er mellom 0,5 og 3 eV, karakteriseres materialet vanligvis som en halvleder. Ved temperaturer over det absolutte nullpunkt vil elektronene kunne eksiteres termisk fra valensbåndet til ledningsbåndet. Det blir da dannet frie elektroner i ledningsbåndet og elektronhull i valensbåndet. Disse er ladningsbærerne i materialet og sørger for den elektroniske ledningsevnen. Konsentrasjonen av ladningsbærere i en halvleder er kun avhengig av temperaturen og størrelsen på båndgapet. Når temperaturen øker vil flere elektroner eksiteres og ledningsevnen vil øke. Gittervibrasjonene er en mindre effekt og spiller her liten rolle. Når temperaturen er høy nok er ledningsevnen,  $\sigma$ , for en udopet halvleder eksponentielt proporsjonal med temperaturen:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (3)$$

der  $E_g$  er energigapet mellom valensbåndet og ledningsbåndet (båndgapet),  $k$  er Boltzmanns konstant og  $T$  er temperaturen i Kelvin.

Et materiale er en isolator dersom båndgapet er større enn 3 eV. Isolatorer skal i prinsippet oppføre seg likt som en halvleder, men pga det store båndgapet ser vi ikke noen effekt av termisk eksiterte elektroner. Alle isolatorer vil imidlertid bli halvledere ved tilstrekkelig høy temperatur (dersom materialene eksisterer ved disse temperaturene).

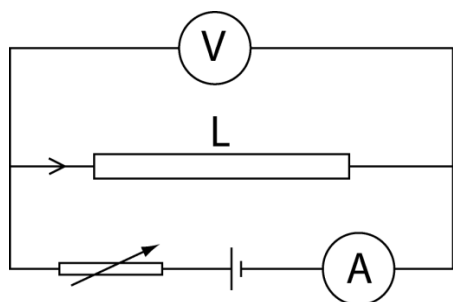
#### *Superledere*

En superleder har, som navnet tilsier, svært høy elektrisk ledningsevne; en superleder leder faktisk strøm uten motstand. Superledende materialer oppfører seg gjerne som metalliske ledere ned til en kritisk temperatur,  $T_C$ , der resistiviteten brått går til null.  $T_C$  er gjerne svært lav, ofte mellom 1 og 20 K, men det finnes også materialer med høyere  $T_C$  (for eksempel YBCO med  $T_C$  rundt 95 K). Det antas at superledning innebærer at par av elektroner beveger seg på en korrelert måte som gjør at de kan bevege seg uhindret gjennom materialet, men forklaringen bak dette ligger utenfor dette fagets omfang.

Siden elektriske og magnetiske felt påvirker hverandre, kan superledning påvises ved å teste om materialet utviser *Meissner effekt*. En superleder vil frastøte et påsatt magnetfelt, men i en Type 2 superleder som YBCO vil den også låse magnetflukslinjer, og dette kan sees ved at en magnet svever over superlederen (ved en temperatur under  $T_C$ ), eller omvendt. På samme måte som at temperaturen kan være for høy for at materialet skal være superledende, kan også styrken på elektriske og magnetiske felt overstiges, og materialet vil da ikke utvise superledning under disse betingelsene.

#### *Måling av elektrisk ledningsevne*

For å måle den elektriske ledningsevnen til et materiale kan vi bruke et oppsett som vist i Figur 2:



Figur 2: Kablingsskjema for måling av ledningsevne i en leder eller halvleder. Strømmen kan besørges av et batteri og kontrolleres ved en motstand, som i figuren, eller av en elektronisk strømkilde som erstatter disse to enhetene.

Materialprøven i figur 2 har lengden  $L$  og tverrsnitt  $A$  (NB! Ikke det samme som enheten for  $I$ , ampere, A!). Vi sender en strøm  $I$  (enhet ampere, A) gjennom prøven og leser av potensialforskjellen  $U$  (enhet volt, V) som oppstår over prøvens endepunkter. Den spesifikke ledningsevnen  $\sigma$  er definert ved relasjonen:

$$i = \sigma \cdot E \quad (4)$$

der  $i$  er strømtettheten og  $E$  er det elektriske feltet i materialet. Dette er Ohms lov uttrykt ved parametre som er uavhengige av prøvens dimensjoner. Av dette følger:

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{U}{L} \quad \text{eller, omarrangert} \quad \sigma = \frac{I L}{U A} \quad (5)$$

der  $L$  og  $A$  er prøvens lengde og tverrsnittsareal. Benevnningen til  $\sigma$  er S/m. En Siemens (S) er en invers Ohm ( $S = \frac{1}{\Omega}$ ).

Legg merke til at ved å sette inn  $R$  for  $L/(\sigma A)$  får du Ohms lov på den formen du kanskje kjenner fra før ( $U = RI$ ). Dette er fordi ledningsevne og resistans er inverse av hverandre ( $R = 1/G$ ). Den totale ledningsevnen gjennom en prøve kalles *konduktans*,  $G$ , og er relatert til prøvematerialets spesifikke ledningsevne, *konduktiviteten*  $\sigma$ , gjennom:

$$G = \sigma \frac{A}{L} \quad (6)$$

På samme måte er den totale motstanden gjennom en prøve, *resistansen*  $R$ , relatert til den prøvens materialspesifikke motstand, *resistiviteten*  $\rho$ :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (7)$$

I resten av denne oppgaven kommer vi likevel til å bruke ledningsevne om konduktiviteten  $\sigma$ .

### Prelab for Øvelse 4a-c

I denne Prelab skal vi regne ut noen tall vi trenger for å regne på resultatene av ledningsevne målingen på kobber. Det gir trening i å omgås med forskjellige enheter for energi, samt fysiske størrelser for elektroner og atomer og stoffer.

PL4-1. For Cu er Fermienergien 7,05 eV. Regn ut hastigheten for elektroner  $v_F$  som tilsvarer Fermienergien. Bruk likning (2). Pass på at enhetene blir riktige, og benytt omregninger ved hjelp av tabellen bak i kurskompendiet når nødvendig. Svaret skal bli om lag  $1,6 \cdot 10^6$  m/s. Du skal regne ut den mer eksakte verdien.

PL4-2. Du skal også regne ut konsentrasjonen av elektroner  $n$  i kobber. Vi antar ofte at konsentrasjonen av ledningselektroner i et metall tilsvarer konsentrasjonen av atomer (dvs. at ett elektron i hvert atom bidrar til ledning).  $n$  er derfor lik atomtettheten til materialet som måles. Finn atomtettheten til kobber.

Du kan gjøre dette ut i fra at kobber har fcc-struktur med 4 atomer i enhetscellen. Enhetscellen er kubisk med gitterkonstant  $a = 3,62$  Å.

Du kan alternativt finne atomtettheten ved hjelp av materialets tetthet, atommassen (slå opp disse) og Avogadros tall.

## Eksperimentelt Øvelse 4a-c

### Øvelse 4a: Ledningsevnen til kobber, Cu

I denne øvelsen skal dere måle strøm,  $I$ , og spenning,  $U$ , gjennom en kobberprøve som funksjon av temperatur,  $T$ .

Vi bruker oppsettet i *Figur 2* og benytter som prøve en kobbertråd med oppgitt lengde og tverrsnitt montert på et kretskort. Strømmen gjennom prøven settes av en strømkilde – maksimal strøm (1 A) må ikke overskrides. Prøvens temperatur kontrolleres ved hjelp av et varmelement. Dette har sin egen strømkilde. (NB: De oppgitte maksimalverdier for strøm og spenning (6 V) i elementet må ikke overskrides!)

Temperaturen  $T$  i prøven registreres ved hjelp av spenningen  $U_T$  i et termoelement. Et termoelement er et par materialer med forskjellig Seebeck-koeffisient (for eksempel en n- og en p-leder) som derved gir en spenning i en temperaturgradient (Ref. Kap. 3 og Labøvelse 1). Termoelementet gir tilnærmet konstant spenning per grad temperaturforskjell. Denne koeffisienten er oppgitt på termoelementet, og er typisk  $S = dU/dT = 40 \mu\text{V/K}$ . Vi har da at spenningen over elementet  $U_T$ , samt temperaturen, er gitt ved:

$$U_T = S(T - T_0) \quad \text{og} \quad T = T_0 + U_T/S \quad (8)$$

der  $T_0$  er romtemperaturen (som leses av med et termometer).

Mål sammenhørende verdier av strømmen  $I$  gjennom tråden, potensialforskjellen  $U$  mellom trådens endepunkter og temperaturen,  $T$ , i området fra ca. 20 °C til ca. 45 °C. Du kan med fordel lage en liste over spenninger over termoelementet ved utvalgte temperaturer og utføre målingene ved disse forhåndsbestemte temperaturene.

Beregn for hvert punkt resistans  $R$  og resistivitet  $\rho = R A / L$ . For ett av punktene beregner du også konduktans  $G = 1/R$  og ledningsevne  $\sigma = 1/\rho = G L / A$ . Husk å notere prøvens dimensjoner.

### Øvelse 4b: Ledningsevnen til germanium, Ge

I denne øvelsen skal dere måle spenningen,  $U$ , over en Ge-prøve som funksjon av temperatur. Temperaturen måles som i *Øvelse 3a* indirekte ved å måle spenningen,  $U_T$ , i et termoelement.

Vi bruker også her oppsettet fra *Figur 2*. Still denne på angitt strøm (20 mA) – maksimal strøm (30 mA) må ikke overskrides.

Mål sammenhørende verdier av spenningen,  $U$ , over prøven og temperaturen,  $T$ , (via spenningen  $U_T$  over termoelementet) i området fra ca. 20 °C til ca. 100 °C. Dersom den påsatte strømmen  $I$  varierer, notér denne også. Skriv ned prøvens dimensjoner.

Bestem  $\sigma$  som funksjon av temperaturen ved å bruke likning (5).

### Øvelse 4c: Egenskapene til YBCO

Til denne oppgaven skal vi bruke ferdig monterte prøver av YBCO til målinger av ledningsevnen.

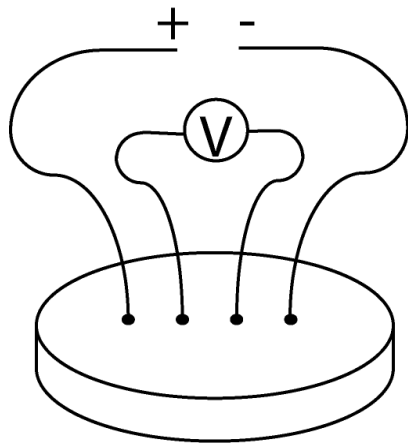
*Del 2: De elektriske egenskapene til YBCO*

I denne oppgaven skal vi måle motstanden i en YBCO-tablett ved romtemperatur. Dette skal gjøres på en litt annen måte enn for kobber og germanium. Prøvene har påmontert fire kontakter som er plassert på linje som vist i *Figur 3*. Vi sender strøm gjennom de ytterste kontaktene og måler potensialfallet over de to midterste kontaktene. Veiledere kan bistå med dette. Varier strømmen i intervallet 0 – 0,4 A, og noter sammenhørende verdier av strøm og spenning.

Plassér deretter tablettene på litt tørris (fast CO<sub>2</sub>; dette er kaldt, du må bruke hansker hvis du må ta på tørrisen!). Gjenta målingene du gjorde ved romtemperatur.

Sett strømmen gjennom tablettene til omtrent 0,1 A før den senkes ned i flytende nitrogen. Hva skjer med spenningen etter hvert som temperaturen til tablettene synker?

Når prøven er senket ned i flytende nitrogen og du har observert at den er superledende skal du igjen prøve å variere strømmen gjennom prøven litt. Hva skjer med spenningen nå?



*Figur 3: Ferdig YBCO-prøve med påmonterte ledninger.*

## Resultater og diskusjon Øvelse 4a-c

### Øvelse 4a: Ledningsevnen til kobber, Cu

Lag en grafisk framstilling av trådens resistans  $R$  som funksjon av temperaturen.

Bestem verdien av temperaturkoeffisienten (stigningstallet)  $\frac{dR}{dT}$ .

Vis sammenhørende verdier av  $R$ ,  $\rho$ ,  $G$  og  $\sigma$  ved en valgt temperatur.

Anslå verdien av elektronets midlere frie veilengde  $L_m$  ut i fra ledningsevnen ved den valgte temperaturen. Bruk likning (1). Sammenlikn  $L_m$  med avstanden mellom atomene i gitteret.

### Øvelse 4b: Ledningsevnen til germanium, Ge

Fra likning (3), vis matematisk hvorfor  $\ln \sigma$  er en lineær funksjon av  $1/T$ .

Måleresultatene framstilles i et plott av  $\ln \sigma$  mot  $1/T$ . Finn  $E_g$  fra plottet ved hjelp av lineær regresjon.

#### 4. Funksjonelle egenskaper

I denne oppgaven brukte vi et varmeelement og et termoelement. Beskriv funksjonaliteten til et varmeelement. (Hvordan er det konstruert, hva er materialeegenskapen vi utnytter, hva tilfører vi og hva får vi ut? Bruk ohms lov.)

Beskriv også funksjonaliteten til et termoelement. (Hvordan er det konstruert, hva er materialeegenskapene vi utnytter, hva måler vi?)

*Programmeringsøvelse (frivillig):*

Lag et program som ber om og leser inn  $\sigma_0$  og  $E_g$  og så lager et plott av  $\ln \sigma$  mot  $1/T$  fra  $0^\circ\text{C}$  til  $1000^\circ\text{C}$ . Husk å konvertere til K. Velg selv hvordan punktene skal velges for å få jevn avstand mellom dem. Dokumenter.

#### **Øvelse 4c: Egenskapene til YBCO**

Lag en tabell som viser sammenhørende verdier av strøm,  $I$ , og spenning,  $U$ , for YBCO ved romtemperatur og ved "tørris-temperatur". Regn også ut motstanden, og sett inn i samme tabell. Basert på disse målingene, hva slags leder er YBCO under disse forholdene?

Hint: Stiger eller synker den elektriske ledningsevnen med økende temperatur? Hvordan stemmer dette overens med hva du observerte for metallet og halvlederen i henholdsvis øvelse 4a og 4b?

Forklar på hvilken måte forsøket vi gjorde over viste at YBCO var en superleder.



## Øvelse 4d-e: Optiske fenomener

### Innledning

Bindingstypen mellom atomer i et materiale påvirker strukturens geometri, og dette kan igjen gi opphav til optiske fenomener, som for eksempel dobbeltbrytning. Et annet (magneto)optisk fenomen er Faraday-effekten. Materialer som utviser Faraday-effekten kan gi et bilde av magnetfeltet det befinner seg i dersom en film av et slikt materiale belyses av polarisert lys.

I denne delen av øvelsen skal vi undersøke noen optiske fenomener der vi ser hvordan lys kan bli påvirket av å bevege seg gjennom en krystall og gjennom en krystall i et magnetfelt.

### Teori

#### *Resonansformer og VSEPR-tilnærming*

Ofte kan Lewis-strukturer tegnes på flere forskjellige, men likeverdige måter. Disse forskjellige mulighetene kalles *resonansformer*. Et molekyl med flere resonansformer har like stor sannsynlighet for å befinne seg i hver av resonansformene, og vi sier at elektronene er *delokaliserte*. Dette kan forklares med at Lewis-bildet er en forenkling og en mer "riktig" måte å se elektronene på er at de okkuperer en molekylorbital der sannsynligheten for å finne et elektron er stor over hele molekylet.

Elektroner i kovalente bindinger deles omtrent likt mellom to naboatomer fordi atomene trekker omtrent like mye på elektronene. Kovalente bindinger har bestemte retninger, og disse gis av molekylorbitalene. En kan tenke seg at elektronene frastøter hverandre, slik at molekylorbitalene spriker mest mulig fra hverandre. Dette kalles *VSEPR-tilnærming* (*Valence Shell Electron Pair Repulsion*). En typisk situasjon der VSEPR-tilnærming gir et bra bilde av geometrien er når vi har et sentralatom omgitt av andre atomer gjennom enkeltbindinger.

#### *Hva er lys?*

Synlig lys er elektromagnetisk stråling innenfor et visst frekvensområde (ca. 400-700 nm). Elektromagnetisk stråling har en elektrisk komponent og en magnetisk komponent (se kapittel 2), og disse to feltene står vinkelrett på hverandre. I normalt, hvitt lys har bølgelengdene alle mulige retninger i alle bølgelengdene innenfor synlig lys og bølgene trenger ikke å være i fase. Men det finnes også spesielle typer lys, et eksempel er polarisert lys. I polarisert lys har alle de elektriske og magnetiske feltvektorene til alle fotonene samme retning. Det finnes også flere spesielle typer lys, men disse vil ikke bli omtalt her.

#### *Lysbryting*

Lys har forskjellig hastighet i forskjellige medier, og dette fører til lysbryting. Når lys treffer et medium absorberes energien og setter det i gang svingninger av de elektrisk ladede partiklene i mediet. Disse svingningene kan etterfølges av umiddelbar re-emittering av lyset, både i nye, speilede eller uforandrede vinkler. Når lys går gjennom et materiale og kommer ut i en annen vinkel sier vi at lyset er brutt; dette er lysbrytning. Når lys blir brutt kan det oppfattes som at lyset har en annen hastighet gjennom mediet

som bryter det, sett i forhold til mediet det kommer fra. Et materiales brytningsindeks er forholdet mellom den hastigheten lyset har i vakuum og i materialet, og er gitt ved  $n = c/v$ . Siden lysbrytning skyldes ladete partikler satt i sving avhenger lysbrytning av det elektroniske miljøet i et materiale.

Noen materialer er hva vi kaller anisotrope (retningsavhengige), og noen anisotrope materialer kan utvise dobbeltbrytning av lys. Dobbeltbrytning innebærer at lys brytes på to forskjellige måter gjennom materialet og skyldes at det finnes to ruter for lyset som har forskjellige elektroniske miljøer. Dette gir forskjellige brytningsindekser for de to veiene og lyset oppfattes som det er brutt i to forskjellige retninger. Siden lys som brytes oppfattes som det har en annen hastighet gjennom mediet som bryter det, kan vi se på dobbeltbrytning som at lyset har én vei som er lang, men lyset beveger seg raskt, og én vei som er kort, men lyset beveger seg tregt (men de bruker like lang *tid* på de to veiene). For at et materiale skal være anisotrop kan det ikke ha to ekvivalente symmetriakser vinkelrette på hverandre, noe som utelukker materialer med kubisk symmetri. Et eksempel på et materiale som utviser dobbeltbrytning av lys er kalsitt,  $\text{CaCO}_3$ .

### *Faradayeffekten*

Faradayeffekten er et magnetooptisk fenomen, dvs. en effekt som gir interaksjoner mellom lys (optikk) og magnetfelt i et materiale. Lys har, som nevnt tidligere, både en magnetisk og en elektrisk komponent, og når lyset utsettes for et materiale som utviser Faradayeffekt vil dette materialets magnetfelt kunne vri det innkommende lysets feltvektorer. Dette innebærer at innkommende lys polarisert i én bestemt retning vil være polarisert i en annen retning når det kommer ut igjen av materialet. Graden av polarisering er mulig å måle ved å sende polarisert lys gjennom et materiale som utviser Faradayeffekt, for så å videre sende lyset gjennom et polariseringsfilter. Polariseringsfilteret slipper bare gjennom lys med feltvektorer i en bestemt retning, så ved å vri på polariseringsfilteret kan vi måle feltvektorenes nye retning relativt til den gamle.

Hvor mye polarisering av innkommende lys som kan oppnås avhenger av materialets magnetfelt, lengden lyset må passere gjennom dette materialet og en konstant som kalles Verdet-konstanten,  $V(\lambda)$ . Verdet-konstanten er avhengig av det innkommende lysets bølgelengde og temperaturen i materialet. Dersom vi sier at materialets magnetfelt påvirker den elektriske feltvektoren til lyset slik at polarisasjonsplanet dreies en vinkel  $\theta$ , vil dreiningen være proporsjonal med lengden av materialprøven lyset går gjennom, styrken på materialets magnetfelt og Verdet-konstanten:

$$\theta = V(\lambda) L B \quad (9)$$

Noen anisotrope krystaller utviser Faradayeffekt og kan brukes i magnetooptisk avbildning. Ved magnetooptisk avbildning kan en film av et materiale som utviser Faradayeffekt gjennomlyses av polarisert lys. Dreiningen av lyset gir et bilde av magnetfeltet i filmen, som kan brukes til å avbilde magnetfluks og hvordan den oppfører seg i materialer.

## Eksperimentelt Øvelse 4d-e

### Øvelse 4d: Dobbeltbrytning i kalsitt, $\text{CaCO}_3$

I laboratoriet finnes det en modell som viser kalsittkrystallens struktur. Kalsiumionene er representert ved sølvfargede kuler. Karbon- og oksygenatomene er representert ved henholdsvis svarte og røde kuler. Legg spesielt merke til at de tre oksygenatomene i hver  $\text{CO}_3$ -gruppe danner en likesidet trekant. Karbonatomet ligger i senteret av denne trekanten. Legg også merke til at atomene i samtlige  $\text{CO}_3$ -grupper ligger i parallelle, ekvidistante plan. Retningen vinkelrett på disse planene kalles krystallens optiske akse.

#### *Del 1:*

En kalsittkrystall som er skåret slik at den har to parallelle sider vinkelrett på den optiske aksens legges på en tekstsider. Betrakt teksten gjennom krystallen slik at siktelinjen er parallell med den optiske aksens.

#### *Del 2:*

Betrakt den samme teksten gjennom en krystall som har sin naturlige form. Lyset splittes nå i to stråler; en ordinær og en ekstraordinær stråle. Disse to strålene skyldes at lyset brytes av to plan med forskjellige brytningsindekser.

#### *Del 3:*

I denne deloppgaven skal du bestemme vinkelen mellom de to forskjellige brytningsplanene i kalsitten i sin naturlige form. Til dette skal det benyttes en optisk benk.

Følgende komponenter er plassert på den optiske benken:

- en spektrallampe
- en irisblender
- en konveks linse
- krystall montert i stativ
- en analysator
- en hvit skjerm

Diameteren på irisblenderens apertur innstilles på noen få millimeter (irisblenderen regulerer lysmengden som slipper gjennom). Avstanden mellom komponentene velges slik at irisblenderens apertur avbildes skarpt på skjermen.

Hold den skårede krystallen (av samme type som du benyttet i del 1) mellom linsen og analysatoren (polariseringsfilter). Undersøk om lyset som kommer ut fra denne krystallen er polarisert ved å vri på analysatoren.

Hint: Dersom lyset er polarisert skal lysintensiteten ha et maksimum ved en bestemt dreining.

Hold så i stedet den naturlige krystallen (av samme type som du brukte i del 2) mellom linsen og analysatoren slik at lysstrålen fra irisblenderens apertur er vinkelrett på en av krystallens sideflater. Du ser nå to bilder på skjermen. Det ene bildet dannes av den såkalte ordinære strålen gjennom krystallen. Dette bildet ligger på samme sted som det bildet du observerte i del 3. Strålen som danner det andre bildet kalles ekstraordinær.

Finn ut hvordan de to strålene er polarisert i forhold til hverandre, dvs. hvor mange graders dreining det er mellom maksimal lysintensitet av de to strålene.

Husk å ta med en skisse av apparaturen i rapporten.

#### Øvelse 4e: Faraday-effekten

Flintglass har den egenskapen at det kan utvise Faradayeffekt under påsatt magnetfelt. I denne deloppgaven skal vi måle hvor mye et innkommende polarisert lys blir polarisert når det passerer en prøve av flintglass med et påsatt magnetfelt. Vi skal også bestemme verdien av Verdet-konstanten,  $V(\lambda)$ , for flintglasset under belysning av rødt og blått lys.

Vi benytter en sylinderprøve av flintglass med lengde  $L = 30$  mm. Sylinderprøven befinner seg i et magnetfelt rettet langs sylinderens akse ( $z$ -aksen). En lineært polarisert lysstråle sendes gjennom sylindren.

Vi bruker et utstyrsoppsett som består av følgende deler:

- En spektrallampe
- Et dikromatisk filter
- Et polariseringsfilter som polariserer innkommende lys
- En sylinderprøve av flintglass plassert over elektromagneter (som skaper et magnetfelt)
- En analysator (som er et polariseringsfilter for det utgående lyset)

Polarisatoren (for det innkommende lyset) innstilles på  $-45^\circ$  (dette er en tilfeldig valgt vinkel). Analysatoren (polariseringsfilteret for det utgående lyset) innstilles slik at det utgående lyset får minimal intensitet (nær  $+45^\circ$ ). Vinklene på polarisatoren og analysatoren blir nullpunktene for målingene dine. Du skal nå måle i hvor stor grad lyset polariseres når du setter opp et magnetfelt over flintglasset. Magnetfeltet settes opp ved å sende en strøm gjennom elektromagnetene flintglasset er plassert over.

- Send en magnetstrøm på 1,0 A gjennom elektromagnetene. Dette vil føre til at lysintensiteten ikke lenger er på sitt minimum.
- Du må nå vri analysatoren noen grader for å igjen få minimal lysintensitet. Noter ned hvor mange grader du har måttet vri analysatoren (Dersom analysatoren nå står på for eksempel 47 har du måttet vri analysatoren  $47-45 = 2$  grader). Noter også ned hvilken flukstetthet,  $B$ , for magnetfeltet den påsatte magnetstrømmen tilsvarer. Dette finner du på en tabell ved apparaturen.
- Sett strømmen til 0, og vri deretter på strømvenderen (denne gjør at strømmen skifter retning). Sett strømmen på 1,0 A i den andre retningen. Dette vil føre til at lysintensiteten ikke lenger er på sitt minimum.
- Vri analysatoren noen grader for å igjen få minimal lysintensitet. I prinsippet skal du måtte vri analysatoren like langt i motsatt retning som ved samme strømverdi i motsatt retning. Måtte du for eksempel vri analysatoren til 47 grader den andre retningen skal du i prinsippet måtte vri den til 43

grader nå (+2 og -2 grader om nullpunktet som er satt på 45 grader). Notér ned hvor mange grader du har måttet vri analysatoren.

Utfør de ovennevnte stegene for magnetstrømmene 1,0 A, 1,5 A, 2,0 A, 2,5 A og 3,0 A. Halvparten av differansen mellom de avleste analysatorvinklene for de to motsatte magnetstrømmene gir verdien  $\theta$ :

$$\theta = \frac{\theta_{+1A} - \theta_{-1A}}{2} \quad (10)$$

NB! Husk å alltid sette magnetstrømmen til 0 før strømvenderen benyttes!

## Resultater og diskusjon Øvelse 4d-e

### Øvelse 4d: Dobbelbrytning i kalsitt, $\text{CaCO}_3$

Beskriv  $\text{CO}_3^{2-}$ -ionet med Lewis-elektronstruktur (Hint: resonans, delokalisering) og forutsi dets geometri ved hjelp av VSEPR-tilnærmelsen.

Beskriv ditt inntrykk av bokstavene i teksten sett gjennom de to krystallene i del 1 og 2. Hvordan brytes og polariseres lyset i de to tilfellene? Forklar ved hjelp av karbonationets ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) geometri.

Hint: Hvordan er elektrontettheten rundt karbonationet i forhold til Ca-ionet? Hvordan er da elektrontettheten fordelt i kalsittstrukturen?

Hvordan er vinkelen mellom de to polariseringsplanene?

Hint: Hvordan er strålene som brytes av de to planene polarisert i forhold til hverandre.

### Øvelse 4e: Faraday-effekten

Ble lyset vridd da du satte magnetstrømmer over flintglasset? Var det forskjeller i vridningen av lyset for rødt og blått lys?

Hvilke verdier fikk du for Verdet-konstantene under belysning av rødt og blått lys for materialet som ble undersøkt?