

Materialer, der kan lede en strøm på overfladen, men ikke indei, er et nyt varmt forskningsemne. Udover at være interessante i sig selv er de *topologiske isolatorers* særlige egenskaber yderst interessante til brug i fremtidens elektronik.

At lede eller ikke at lede

Forfattere



Nikolaj Zinner,
lektor, ph.d.
Institut for
Fysik

og Astronomi
Aarhus Universitet.
zinner@phys.au.dk



Philip
Hofman,
professor,
Institut

for Fysik og Astronomi
Aarhus Universitet.
philip@phys.au.dk

Forskning i materialers egenskaber har i de seneste par år gennemgået en mindre revolution. Det skyldes, at man har opdaget, at klassifikationen af materialer som enten ledende eller isolerende er et ufuldstændigt billede af virkeligheden. Det viser sig nemlig, at der findes isolatorer, som på trods af deres modvilje mod at lede strøm inde i materialet, er gode ledere på overfladen. Man kalder disse materialer for *topologiske isolatorer*. Deres specielle egenskaber og stabiliteten af disse egenskaber er meget lovende i forhold til teknologiske anvendelser. Fx vil topologiske isolatorer kunne bruges til at lave elektroniske kredsløb med et meget lavt strømforbrug. I den mere eksotiske ende af skalaen er det desuden blevet forslået, at netop disse materialer kan bruges som en vital komponent i kvante-computere.

Derfor forskes der på livet løs mange steder i verden for at finde de bedst egnede topologiske isolatorer. Topologi er et meget generelt begreb fra matematikkens verden, som kan bruges til at sammenligne forskellige geometriske strukturer. Fx har en badebold og en badering forskellig topologi, fordi baderingen har et hul i midten, hvilket bolden ikke har. Således kan man ikke ved at bøje, strække og deformere en badebold give den form som en badering eller omvendt. Fra et topologisk synspunkt er alle bolde (uden huller) ens, og alle ringe (med netop et hul) er ens.

Sammenhængen mellem det matematiske begreb topologi og de topologiske isolatorer vil for menigmand være sløret i specifikke detaljer og beregninger. Ved hjælp af analogier og simple billeder kan



man dog få en fornemmelse for, hvad det drejer sig om. Og det viser samtidig, hvorfor disse materialer er så interessante for forskerne i disse år.

Niels Bohr viser vejen

Et tidligt eksempel på en topologisk isolator er materialer, der udviser den såkaldte kvante-Hall-effekt. Det essentielle fysiske billede af hvad der sker i kvante-Hall-effekten blev første gang beskrevet af Niels Bohr i en afhandling fra 1911. Det er imidlertid langt fra oplagt ved første øjekast, at det billede har noget at gøre med topologien. Topologi blev således heller ikke benyttet i den fysiske beskrivelse af kvante-Hall-effekten fra starten. Hvis man ser nærmere på Niels Bohrs beskrivelse bliver det dog klart, at topologiske isolatorer og kvante-Hall-effekten har meget med hinanden at gøre. Materialer, der udviser kvante-Hall-effekten er, nemlig ligesom de topologiske isolatorer, isolerende i det indre, men opfører sig som et metal på overfladen, således at de kan lede en strøm kun langs overfladen. For kvante-Hall-materialer skyldes det, at et kraftigt ydre magnetfelt holder elektronerne fast i små cirkelbaner som forudsagt af Niels Bohr. Ydermere kan elektronerne ved kanterne kun bevæge sig i én retning (se boks). En vigtig konsekvens af det er, at der opstår perfekt elektrisk ledning langs kanten, som ikke kan ødelægges ved, at elektronerne spredes på uønskede urenheder i materialet Dette er en meget ønskværdig egenskab i forhold til teknologiske anvendelser.

Fra det tidspunkt, hvor Niels Bohr præsenterede de grundlæggende idéer, skulle der imidlertid gå cirka 70 år før kvante-Hall-effekten blev beskrevet som en topologisk tilstand og derpå yderligere mere end 20 år, før de topologiske isolatorer blev alment kendte.

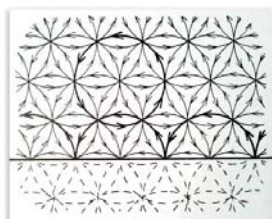
Nu med spin...

For at få et materiale til at udvise kvante-Hall-effekten er det nødvendigt at påføre et kraftigt ydre magnetfelt – desværre så kraftigt, at man kun kan lave dem i specialiserede laboratorier. I forhold til teknologiske anvendelser vil man derfor meget gerne undgå ydre magnetfelter. Inden for de seneste ti år er det blevet klart, at der faktisk er en smart måde at opnå dette på, nemlig ved at benytte den egenskab ved elektroner, der kaldes spin. Spin betegner et magnetisk moment alle elektroner er født med, så man faktisk kan tænke på dem som små magnetiske dipoler. I nogle materialer er elektronernes bevægelse særligt stærkt koblet til elektronernes dipol, og disse materialer behøver ikke et ydre magnetfelt for at udvise en effekt tilsvarende kvante-Hall-effekten. Man taler derfor om en kvante-spin-Hall-effekt, og materialer med denne effekt, er også gode ledere på kanterne. Kvant-spin-Hall-effekten blev påvist eksperimentelt for første gang i 2007.

Et todimensionelt materiale, der udviser kvante-Hall-effekten, opfører sig som en isolator på nær i kanten af materialet, hvor der er metalliske tilstande og en strøm kan løbe. Tilsvarende kan de topologiske isolatorer forstås som tredimensionelle

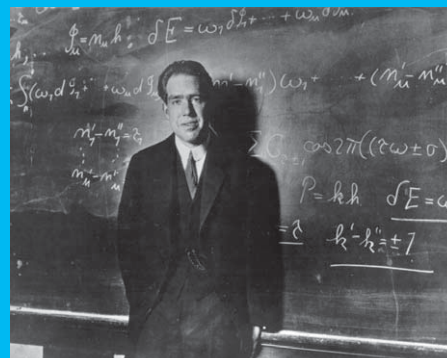
Den grundlæggende idé i de topologiske isolatorer er her illustreret via en arkitekttegning af et forslag til en bro mellem Hong Kong og Kina som skifter kørsel i venstre side til kørsel i højre og omvendt. Man kan ikke "rette" denne bro ud, sådan at krydsningen bliver fjernet, med mindre man laver trafikreglerne om i enten Kina eller Hong Kong. Det samme gør sig gældende i de topologiske isolatorer, hvor det er valensbånd og ledningsbånd, der er snoet ind i hinanden på lignende måde. Se boks.

Billede: NL architects, Amsterdam. www.nlarchitects.nl



"Følger man derimod de Elektroner, der under Gennemløbningen af deres Baner kommer i Berøring med Væggen, vil man se, at disse, som det fremgaar af Figuren, under det magnetiske Felts Indvirkning faar en Slags krybende Bevægelse langs med Væggen, og disse Elektroner vil derfor, betragtet for sig, frembringe et magnetisk Felt i samme Retning som det ydre Felt, og som vil være ligesaa stort og modsat rettet det, som frembringes af Elektronerne i det Indre."

Uddrag fra Niels Bohrs doktorafhandling fra 1911 som omhandler elektronteorien for metaller. Afhandlingen beskriver blandt andet elektroners bevægelse i et magnetisk felt og er således et af de første bidrag til beskrivelsen af kvante-Hall-effekten, som imidlertid først blev eksperimentelt bekræftet i 1980'erne.



materialer med en metallisk overflade, som kan lede en strøm på trods af, at der er tale om en isolator inde i selve materialet. Elektroner på overfladen har stadig en stærk kobling mellem deres bevægelse og deres indre magnetiske dipol ganske som i et kvante-spin-Hall-materiale.

Svært at måle

De topologiske isolatorer, man hidtil har fundet, er faktisk særdeles velkendte materialer. Det drejer sig især om termoelektriske halvledere, som er materialer, der kan bruges til at danne en strøm ud fra en temperaturforskul. Et ofte studeret eksempel er Bi_2Te_3 , en blanding af Bismuth og Tellur. Disse materialer har man kunnet fremstille i mange år, men det er først for ganske nylig, at man har fået øjnene op for, at de kan have topologiske egenskaber.

I princippet burde det jo være ganske simpelt at

måle, om et materiale er en topologisk isolator. Man tager en isolator og prøver at sende strøm gennem den. Hvis det lykkes, må det være fordi, der er løbet strøm langs overfladen. Desværre er det ikke helt så let i virkeligheden. Mange materialer, som man mistænker for at have topologiske egenskaber, indeholder ladede urenheder i deres indre, som kan afgive elektroner, og som derfor leder strøm i det indre. Selv om ledningsevnen i det indre af et materiale kan være dårlig, har et materiale typisk en indre del, som fylder meget mere end overfladen, og derfor kan det indre stadig bidrage væsentlig til ledningen.

For at overkomme det problem kan man gå tre forskellige veje. Den første er at syntetisere materialer, som er så perfekte, at deres indre faktisk ikke er ledende. Den anden mulighed er kun at kigge på meget tynde materialer, således at overfladen udgør en betydelig andel af det samlede materiale.

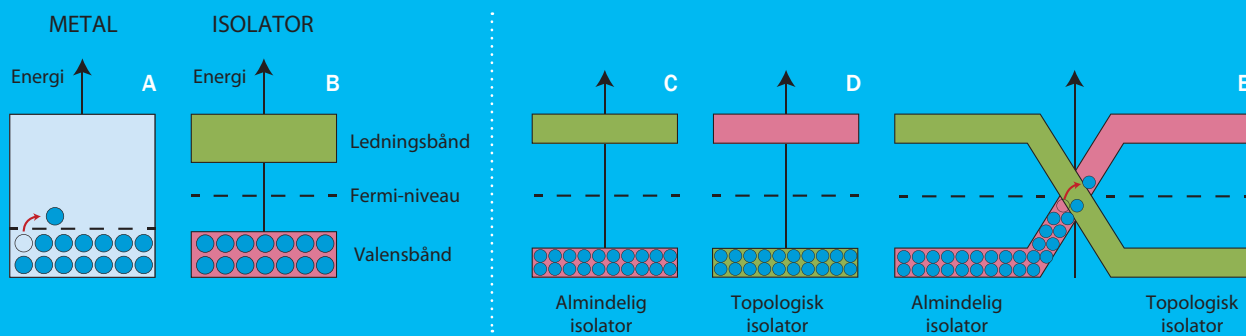
Kvante-Hall-effekten

Kvante-hall-effekten kan bedst illustreres via en række skitser som vist her. Når elektroner bevæger sig i et magnetisk felt, som er vinkelret på deres bevægelsesretning, vil deres bane afbøjes på grund af den såkaldte Lorentz kraft. Det fører klassisk set til en opladning af siderne af materialet som vist til øverst til venstre (den klassiske Hall effekt). I tilfældet, hvor det magnetiske felt er meget kraftigt, vil elektronbanerne afbøjes så meget, at de udgør små lukkede kredsløb som vist øverst til højre. Det betyder effektivt, at der ikke ledes nogen strøm i det indre, da elektronerne står stille i deres små cirkler (2 midterste figurer øverst). På overfladen vil elektronerne derimod støde mod kanten af materialet og afbøjes tilbage, således at man får en "slags krybende bevægelse langs med væggen" (øverst til højre), som Bohr kaldte det i 1911.

I de to næste figurer (grønt felt) tager vi højde for, at der typisk er urenheder i materialerne, her illustreret ved små sorte prikker, som elektronerne støder ind i og bliver kastet tilbage fra, i næsten vilkårlig retning. Hvis vi nok engang påfører et kraftigt magnetfelt, finder vi ud af, at elektronerne, der kryber langs kanten, ikke kan spredes vilkårligt på urenheder, da de altid afbøjes tilbage mod kanten og fortsætter deres bevægelse i den samme retning. Vi har altså redegjort for, at urenheder ikke kan ødelægge den elektriske strøm, der løber langs kanten.

Ser vi derimod på materialer, der udviser kvante-spin-Hall-effekten, behøver vi intet ydre magnetisk felt, men får stadig ledning langs med kanten (orange felt), og vi har sågar, at retningen af strømmen på overfladen afhænger af, om elektronen har magnetisk dipol pegende op eller ned (små pile på elektronerne).

Topologisk isolator



For at illustrere princippet bag en topologisk isolator og specielt de ledende tilstande på overfladen i et ellers isolerende materiale ser vi først på et almindeligt metal (A) og en isolator (B). I faste stoffer sidder elektronerne ikke på veldefinerede energiniveauer som i atomer, men kan have energier fordelt over et stort interval – et såkaldt energibånd. I et metal er energibåndet kun delvis fyldt, og der er mange tilstande, som elektronerne kan hoppe op til, uden at det koster særlig meget energi. Dette er vist til venstre (A), hvor en elektron hopper op over de andre. Den stiplede linje viser det såkaldte Fermi-niveau, hvor alle elektroner ligger under i grundtilstanden. For at lede en strøm skal elektronerne bare tilføjes en smule kinetisk energi, og man betaler kun en lille pris for at sende elektroner op til lige netop på den anden side af Fermi-niveauet. Til sammenligning har en isolator (B) ikke nogen ledige tilstande til rådighed med mindre man betaler en betydelig pris for at få en elektron til at hoppe fra det såkaldte valensbånd op til ledningsbåndet, hvor den kan lede en strøm. Elektronerne er således låst fast i deres bevægelse.

På figurerne til højre ser vi en almindelig isolator (C) og en topologisk isolator (D). Begge materialer har en stor afstand mellem valens- og ledningsbånd. Det specielle ved den topologiske isolator er nu at disse to bånd har byttet plads således, at valensbåndet har samme egenskaber som ledningsbåndet i en almindelig isolator. Dette lader sig kun gøre i bestemte materialer, hvor der er en meget stærk kobling mellem elektronernes bevægelser og deres indre magnetiske moment gennem en såkaldt spin-orbit kobling. Fænomenet kan dog forstås på samme vis som hvis man betragter en elektron i et brintatom. Her vil elektronen også have forskellige bevægelsesmønstre (givet ved den såkaldte bølgefunktion) afhængig af, om den befinder sig i grundtilstanden eller i en tilstand med en højere energi.

Hvis man forestiller sig, at man sætter en almindelig og en topologisk isolator op ad hinanden, så ser båndene ud som skitsen til højre (E), da bånd med samme egenskaber ifølge kvantemekanikken nødvendigvis må mødes ved grænsefladen, som ligger i midten. I vores analogi med brintatomet svarer det til, at elektroner med samme bevægelsesmønster skal mødes, således at dem i de laveste tilstande i en almindelig isolator mødes med dem fra valensbåndet i den topologiske isolator og omvendt. Men det betyder, at man netop på grænsefladen mellem de to materialer får tilstande lige over Fermi-niveauet, som elektronerne kan benytte og en strøm kan ledes på grænsefladen. Praktisk set er der ikke engang behov for at bruge grænsefladen mellem en almindelig og en topologisk isolator. Da luften omkring os er et eksempel på en almindelig isolator, kan vi således se, at topologiske isolatorer må tillade en strøm at løbe på deres overflade.

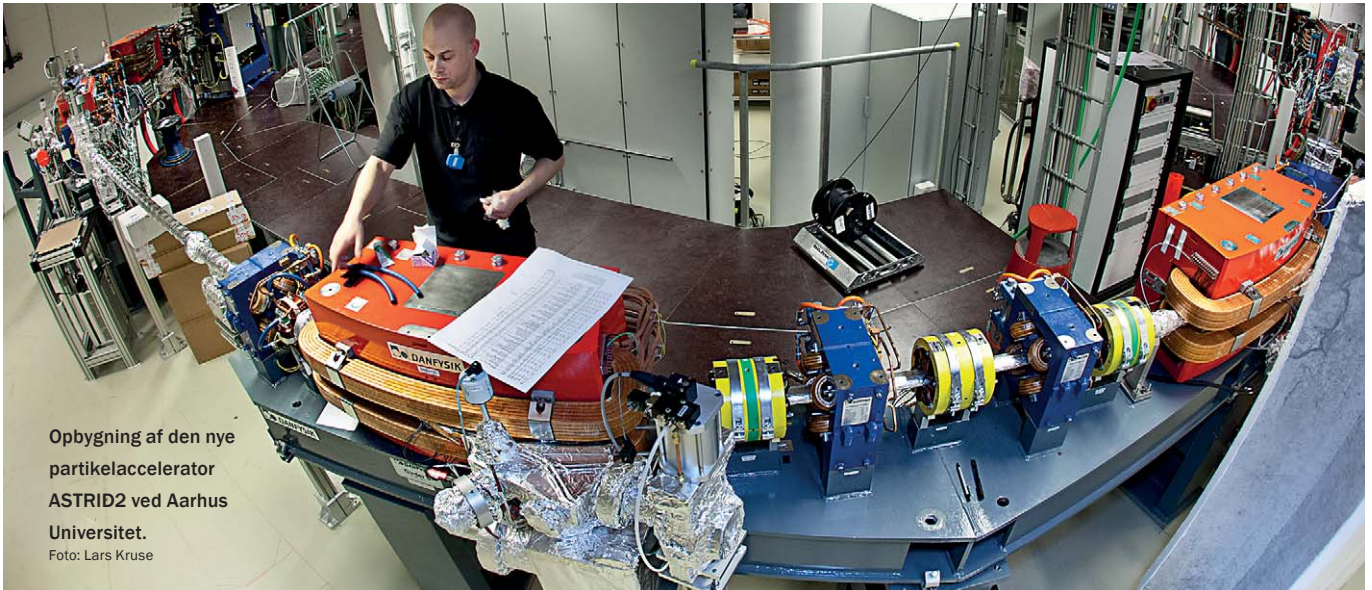
Situationen med lednings- og valensbånd kan illustreres med en analogi til en foreslået trafikbro mellem Hong Kong og Kina (se startbilledet fra NL architects). Broen har den særlige egenskab at sporene skal krydse for at få trafikken fra højre til venstrekørsel. Således er det også med lednings- og valensbåndene mellem en topologisk isolator og en almindelig isolator. Det vigtige er at det ikke er fordi grænsefladen mellem båndene har specielle egenskaber, men tværtimod at det indre af de to materialer har forskellige egenskaber. I billedet med broen er det kørselsretningen som er en indre egenskab ved henholdsvis Kina og Hong Kong, og som altså gør det nødvendigt at krydse retningen.

Indblik i de topologiske tilstande

Den tredje metode er at gå meget direkte til værks og simpelthen måle egenskaberne ved tilstande, som ligger i overfladen. Det sidste kan gøres for både tynde og tykke materialer. Fordelen ved at måle direkte på overfladen er, at man umiddelbart får information om eksistensen af de metalliske tilstande, som skal findes på overfladen af en topologisk isolator. Teknikken til at gøre det kaldes vinkelopløst fotoemissionspektroskopi. Den bygger på den fotoelektriske effekt, som beskriver det fænomen, at lys river elektroner løs i overfladen på metaller, som man derpå opsamlers i en detektor. Finten er, at den vinkel og

den energi, som elektronen har, når den løsriver sig fra materialet, afhænger af de forhold, der er i overfladen af materialet. Således får man meget direkte information om, hvordan tilstandene er i overfladen, og om de kan lede en strøm.

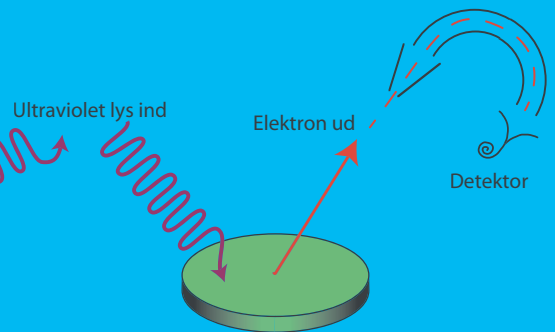
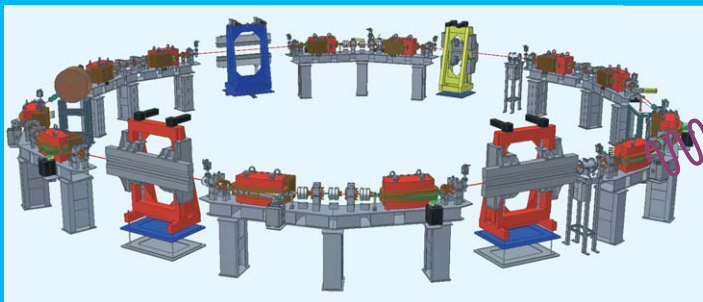
I vore eksperimenter på Aarhus Universitet bruger vi UV-lys fra ASTRID og ASTRID2, som er partikelacceleratorer der udsender såkaldt synkrotronstråling, som kan anvendes i et utal af spændende eksperimenter. Det gør det muligt at opnå en tilstrækkelig høj opløsning af strålingens spektrum til, at de topologiske tilstande på overfladen kan identificeres.



Opbygning af den nye partikelaccelerator ASTRID2 ved Aarhus Universitet.
Foto: Lars Kruse

Måling af overfladetilstande

Synkrotronstrålings kilde (ASTRID2)

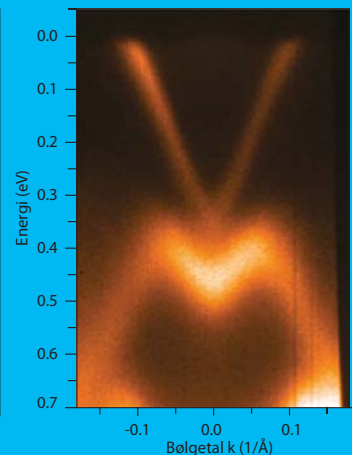
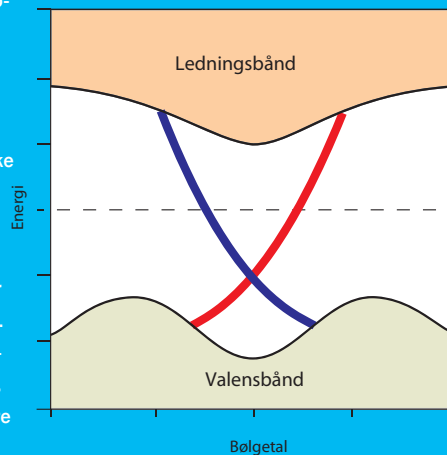


For at måle egenskaber af overfladetilstande på et givent materiale benyttes vinkelopløst fotoemissionsspektroskopi, også kaldet ARPES. For at gennemføre sådanne forsøg har man behov for en synkrotronstrålingskilde. På Aarhus Universitet er vi i besiddelse af en topmoderne ring kaldet ASTRID2, som er leveringsdygtig i synkrotronstråling af høj kvalitet, der gør ARPES-forsøg mulige.

Det ultraviolette lys fra ASTRID2 sendes ind på prøven/materialet og river elektroner løs. Disse elektroner kan man derpå samle op med en detektor. Afhængig af vinklen elektronen sendes ud med og dens energi kan man således regne sig frem til den energi og impuls, som elektronen havde, da den befandt sig inde i materialet. Moderne ARPES-opstillinger kan måle fotoemissionsintensitet over et bredt energi og vinkelområde, og man kan faktisk opnå et direkte billede af materialernes elektronstruktur.

I figurerne til højre vises en skitse af, hvad man teoretisk forventer at se, når man måler på overfladen af en topologisk isolator. Det såkaldte bølgetal er her et mål for impuls af elektronerne. Den blå og den røde linje viser overflade tilstande for elektroner med modsatte magnetiske moment. Disse tilstande kan kun bevæge sig til henholdsvis venstre og højre på overfladen ganske som i kvante-spin-Hall effekten. De opfylder også det topologiske krav om at forbinde valens- og ledningsbåndet, så at overfladen bliver metallisk.

Til højre ses en ARPES-måling på en topologisk isolator som stemmer overens med vores teoretiske forståelse. Bemærk især, hvor klart de to overflade tilstande fremstår. Ledningsbåndet kan ikke ses i denne type måling, fordi udsendelse af fotoelektroner kun kan lade sig gøre fra tilstande, som er besatte med elektroner.



Grundforskning og teknologiske anvendelser

Topologiske isolatorer er et meget nyt forskningsfelt, og lige nu arbejder mange forskere med at identificere og syntetisere nye topologiske isolatorer, og med at optimere egenskaberne af de mest velegnede materialer. Især i USA og Kina er der store forskningsinitiativer indenfor topologiske isolatorer. Ved Aarhus Universitet er vi i gang med et større forskningsprojekt støttet af VILLUM fonden, hvor vi leder efter nye topologiske isolatorer og undersøger deres fundamentale egenskaber. De vigtigste aktuelle spørgsmål for forskere indenfor feltet er, om man kan finde udgaver af topologiske isolatorer, som er bedre isolatorer i deres indre dele, om man kan finde nye todimensionale topologiske isolatorer, og hvordan man kan påvirke de topologiske tilstande med eksterne magnetfelter eller magnetiske urenheder.

En stor fordel er, at vore kolleger ved Kemisk Institut på Aarhus Universitet besidder en stor ekspertise indenfor fremstillingen af materiale med de rette egenskaber, og vi kan således få adgang til prøver med meget få urenheder og dermed minimere ledningen i de indre dele.

Fra topologi til spintronics

I fremtiden vil topologiske isolatorer kunne bruges til fremstilling af elektroniske komponenter, hvor

det ikke kun er elektronernes bevægelse, der overfører strøm og dermed signaler, men også deres indbyggede magnetiske dipolmoment, deres spin. Fordelen ved at udnytte elektronernes spin er, at man kan undgå en stor del af det tab, som er forbundet med elektriske kredsløb, fordi man minimerer sammenstød, hvor elektronerne kastes tilfældigt rundt, når de rammer urenheder. Det gælder især for de éndimensionale kanter af todimensionale topologiske isolatorer, som også vil kunne bruges til at filtrere elektronerne efter deres spinretning. Sammenstød mellem elektroner og urenheder opvarmer materialerne og giver både nedsat ydeevne og højere energiforbrug. At minimere sådanne effekter er således et guldbrandede mål for materialeforskningen, og derfor er materialer, som udviser kvantepin-Hall-effekten, særdeles attraktive.

På længere sigt kan man også tænke sig, at elektronernes spin kan udnyttes til at transportere eller gemme (kvante)-information. Det svarer til en situation, hvor man flytter information ved hjælp af elektronernes spin uden at flytte elektronerne selv, altså uden en elektrisk strøm. Denne idé er grundlaget for et nyt visionært forskningsfelt, som er blevet døbt spintronics på grund af analogien til normal elektronik, hvor det er elektronernes ladning, der transporterer information. ■

Læs mere

www.phys.au.dk/~philip/

<http://www.isa.au.dk/facilities/astrid2/astrid2.asp>

<http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.102.096802>

<http://ing.dk/artikel/dansk-forskningsgenembrud-spin-transistorer-er-kommet-inden-raekkevidde-121532>