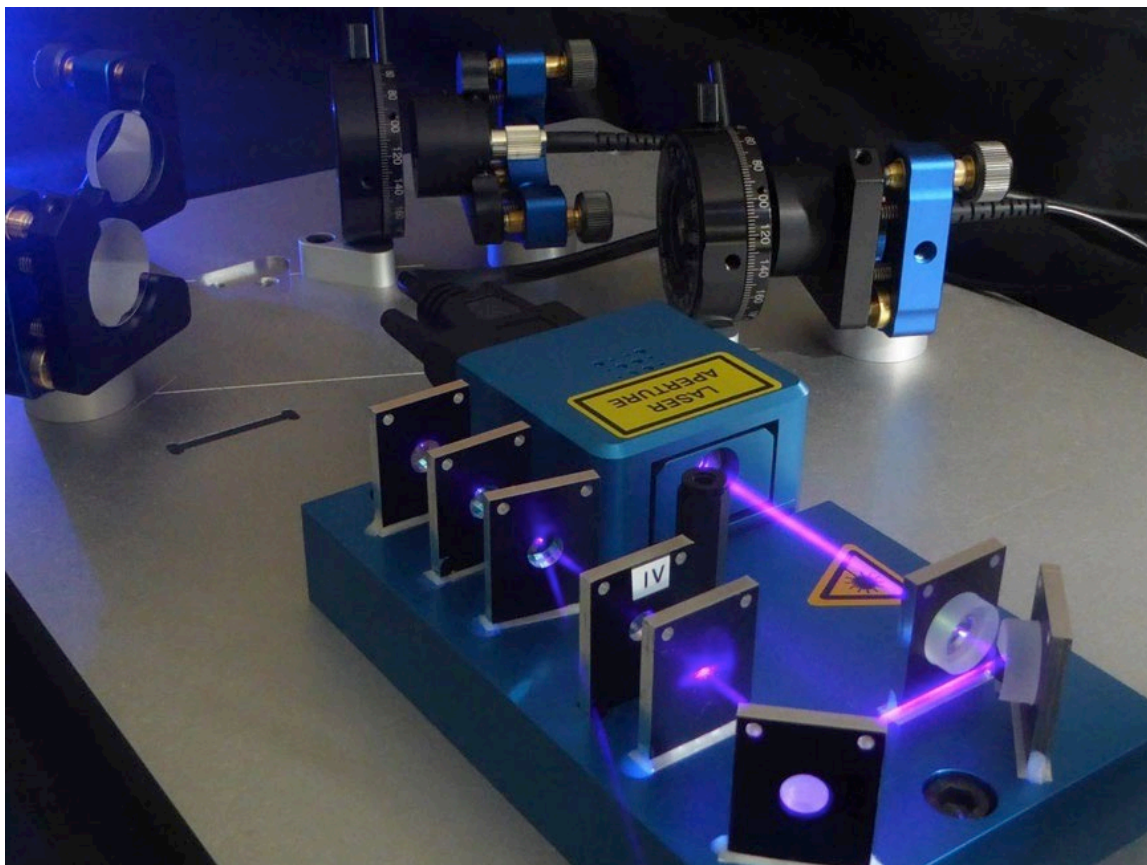


# Bells ulighed (vejledning til metode)

## Nanoteket, DTU Fysik



Copyright: Hel eller delvis gengivelse af denne vejledning er tilladt med kildeangivelse.

Forsidebillede: Opsætningen i eksperimentet uden beskyttelseskasse på laser-modulet.

Rettelser til: [ole.trinhammer@fysik.dtu.dk](mailto:ole.trinhammer@fysik.dtu.dk)

>

## Indledning

I dette forsøg undersøger vi det kvantemekaniske fænomen kaldet *kvantemekanisk sammen-filtrering*. Kort sagt; Har vi et system hvor to partikler tidligere har mødt hinanden, vil de være sammenfiltrede, og vi bliver derfor nødt til at beskrive systemet med en ligning som indeholder begge partikler. Da viser det sig, at hvis den ene partikel måles, vil den anden partikels tilstand være kendt øjeblikkeligt, uanset hvor langt vi bringer de to partikler fra hinanden!

Dette virker mærkeligt, og som A. Einstein forståeligt nok sagde; "This is spooky action at a distance!". Han gik derfor sammen med B. Podolsky og N. Rosen og skrev en artikel om at teorien for kvantemekanikken måtte være forkert, da den ikke kunne beskrive fænomenet korrekt! Dog hævdede de, at en teori måtte kunne laves, som beskrev fænomenet ordentligt.

Det resulterede i, at J. S. Bell i 1964 udgav en artikel med en ligning som beskrev en ulighed, som er opretholdt såfremt, partikler i forsøget opfører sig, som om de ikke er sammenfiltrede. Så hvis det var muligt at bryde den ulighed, som Bell havde formuleret, ville det vise at partiklerne bevægede sig i sammenfiltrede par. Det lykkedes - omtrent 20 år efter - for franskmændene Alain Aspect. I december 2022 fik Alain Aspect sammen med John. F. Clauser og Anton Zeilinger Nobelprisen for deres indsats.

Og netop i dag skal vi foretage et eksperiment meget lig det, som Aspect foretog tilbage i 1984. Vi skal se, om det er muligt for os at bryde Bells Ulighed, og dermed vise at fotonerne i eksperimentet er sammenfiltret.

## EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues  
Find It Is Not 'Complete'  
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of  
'the Physical Reality' Can Be  
Provided Eventually.

## Teori

I dette forsøg forklares teorien ved en fælles gennemgang inden eksperimentet med tilføjelser undervejs, således at det kan forstås bedst muligt. Teorien er ikke så nem at læse sig til. Det er vores erfaring, at den bedst formidles ved en mundtlig præsentation, hvor der er tid til spørgsmål undervejs. Skulle man ønske, at prøve kræfter med at læse noget teori på forhånd, kan vi henvise til en artikel i LMFK-bladet. Ulrich Hoff og Ole Trinhammer: *Prøv kræfter med kvantemekanikken i Quantum Lab på DTU Fysik*. LMFK-bladet 3/2017. Artiklen er IKKE skrevet til elever, men til lærere, som i forvejen har et vist kendskab til kvantemekanik.

Bemærk, at gennemgangen af teorien ved besøget bygger på, at man IKKE har set den matematiske beskrivelse af kvantemekanik på forhånd. Kun er det en fordel, hvis man på forhånd kender til udregning af forventningsværdien  $E(X)$  af en stokastisk variabel  $X$ .

Link og supplerende litteratur: 1. [https://artikler.lmfk/data/artikler/1703/1703\\_38.pdf](https://artikler.lmfk/data/artikler/1703/1703_38.pdf)

2. K. Mølmer (2021) "Kvantemekanikkens fortolkninger", *Kvant*, bind 32, nr. 2, side 21-25.

3. Emil Charlie Lind-Thomsen, "Filosofien i Københavnerfortolkningen", *Kvant*, bind 33, nr. 4, side 9-12.

4. Filosofiske perspektiver er beskrevet tidligt på dansk i Werner Heisenbergs bog "*Fysik og Filosofi*", Thaning og Appels Forlag, København 1960/1971.

## Metode

Herunder er en kronologisk beskrevet rækkefølge til, hvordan at I sætter forsøget op, tester det, og til sidst foretager målinger og dataanalyse.

## Sikkerhed

Vi skal arbejde med lasere, så naturligt ville man skulle bruge beskyttelsesbriller. Dog er effekten af laseren i dette forsøg på  $<10 \mu\text{W}$  ved 810 nm. Vi behøver derfor ikke sikkerhedsbriller.

**Regneopgave:** ved  $\lambda = 810 \text{ nm}$ , hvad er energien af de enkelte fotoner, hvis vi regner med at de bevæger sig med lysets hastighed  $c$ ?

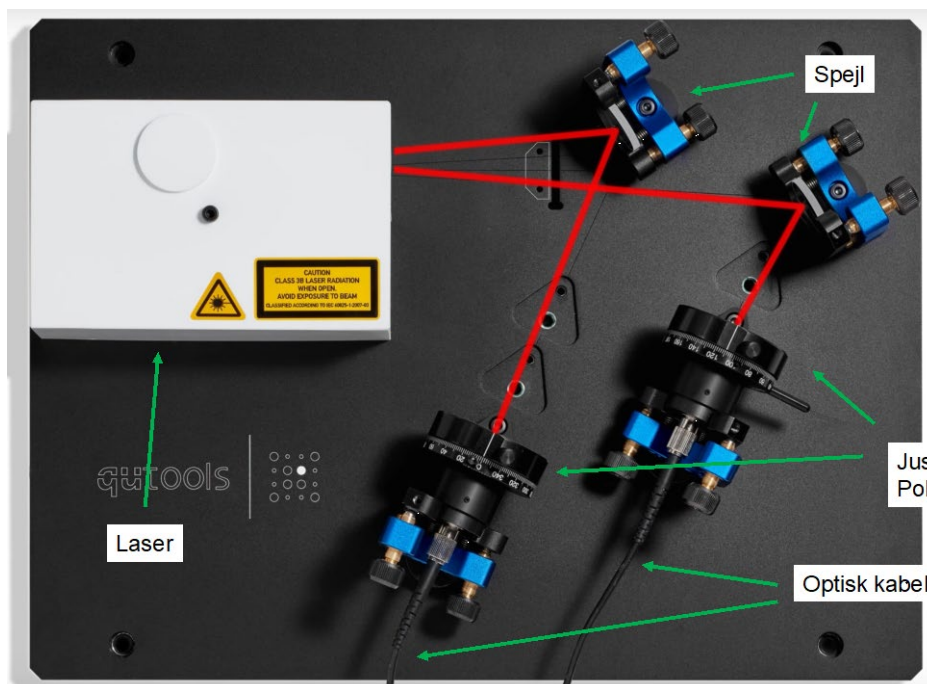
**Fra Datasheet quTools:** *This product contains Class 3B laser according to IEC 60825-1 (or EN 60825-1) Safety Standards.*

## Opsætning

I skal bruge følgende til forsøget

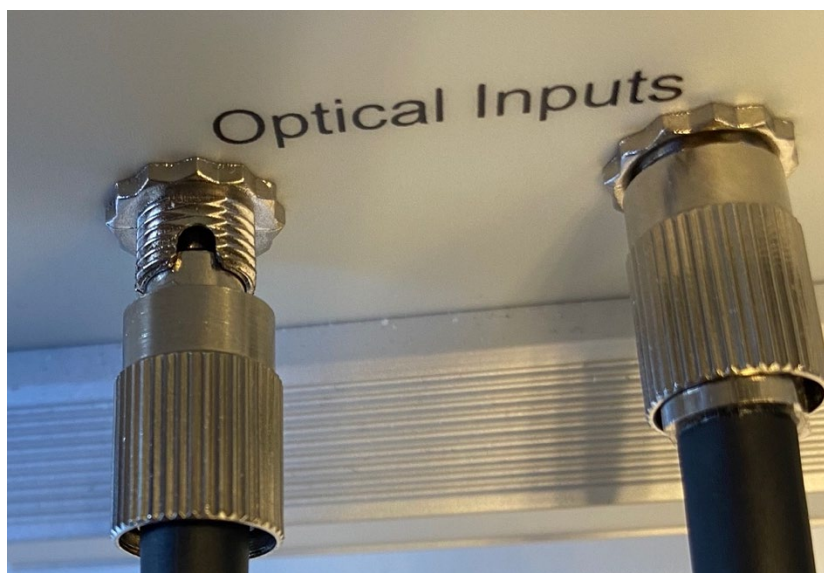
- 1 grå kasse med optik-opsætningen
- 2 lyslederkabler (sidder i den grå kasse)
- 1 strømkabel til detektormodul
- 1 datakabel til detektormodulet og laseren
- 1 computer til databehandling
- 1 usb-stik til at overføre data mellem detektormodul og computeren

I skal nu sætte detektormodulet ved siden af den grå kasse hvori optikelementerne er, og åbne låget på kassen. Nu kan I se opsætningen, samt laseren som er i den hvide kasse, som vist på Figur 1.



Figur 1: Den optiske opsætning nede i kassen. I den hvide kasse foregår opsplitningen af fotonerne, som beskrevet i teorigennemgangen. Den optiske lysvej er indtegnet på billedet med en rød streg.

I skal nu forbinde laseren med detektormodulet med datakablet, som skrues fast begge steder. Forbind derefter de to optiske kabler i de to indgange på detektormodulet, korrekt med hakket på stikket, som vist i Figur 2.



Figur 2: Indsæt hakket korrekt som på kablet til venstre. Skru derefter låsen på, så den sidder som kablet til højre.

Til sidst kan detektormodulet forbindes med strøm ved at sætte strømkablet i modulet. Husk til sidst at sørge for, at ingen af kablerne er i vejen for den optiske lysvej.

## Test af signal



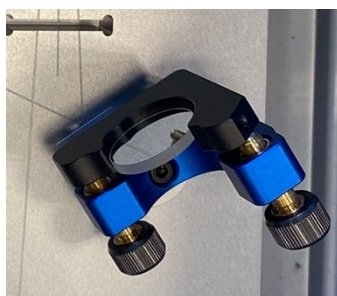
Figur 3: I dette tilfælde skal laseren bruge  $I=32.5\text{ mA}$ .

I skal nu kontrollere indgangssignalet i de to foto-detektorer i opsætningen ved forskellige polariseringer. Start med at tænde for detektormodulet ved at dreje på nøglen. Derefter indstilles den korrekte strøm  $I$ , som er noteret på kassen over laseren, på detektormodulet. **Bemærk: strømmen er specifik for den enkelte laser, så brug det korrekte tal på den hvide kasse, ikke den på billedet!**

Tænd derefter laseren på "Laser on/off", og klik på ikonet med en blå kurve for at gå videre;



I kan cirkulere rundt mellem vinduerne i den menu, ved at klikke gentagne gange på samme ikon. Start på vinduet med den blå, røde og grønne graf. Vinduet viser antal tællinger over 1000ms. Vi sætter nu begge polariseringsfiltre på 0 grader, og ser om den røde og blå indgang får lige mange tællinger. Hvis ikke, justér hhv. den øvre eller nedre skrue på det respektive spejl for den lysvej du vil optimere. Vær tålmodig og langsom med skrueene, de skal ikke ændres meget.



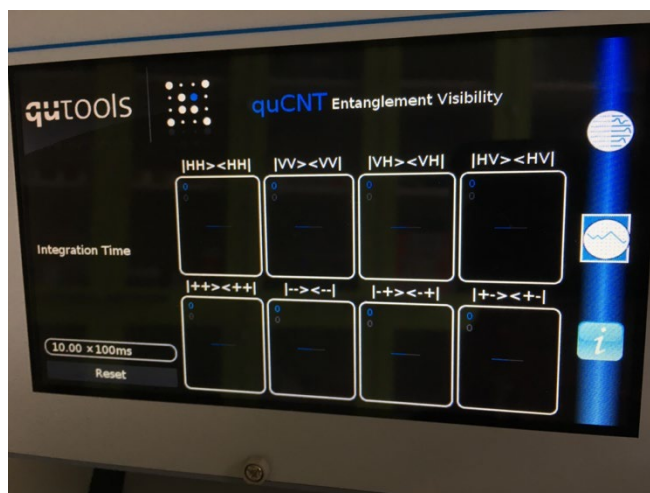
Figur 4: Her kan begge skrue ses oppefra på det ene spejl. vær meget nænsom og forsigtig når du skrue på skrueene.

Prøv så vidt som muligt at få de to grafer til at lægge lige højt, så at vi måler lige mange fotoner i hver detektor.

**Tænkeopgave:** Er det bedst at hæve den røde graf til den blå, eller at sænke den blå til den røde? Hvorfor er den ene at foretrække frem for den anden?



Når vi er tilfredse med tælle-tallet i indgangene, skal vi nu kontrollere inputtet ved forskellige vinkler. Til start sættes polariseringsfiltrene på *Horisontal/Horisontal* - vi måler altså horisontal polarisering på begge filtre. Derefter måler vi *Vertikal/Vertikal*, og derefter *Vertikal/Horisontal* og til sidst *Horisontal/Vertikal*. Ligeledes skal I foretage de samme type test, men for +45 og -45 grader. På skærmen kan der ses et felt til hver af de otte kombinationer.



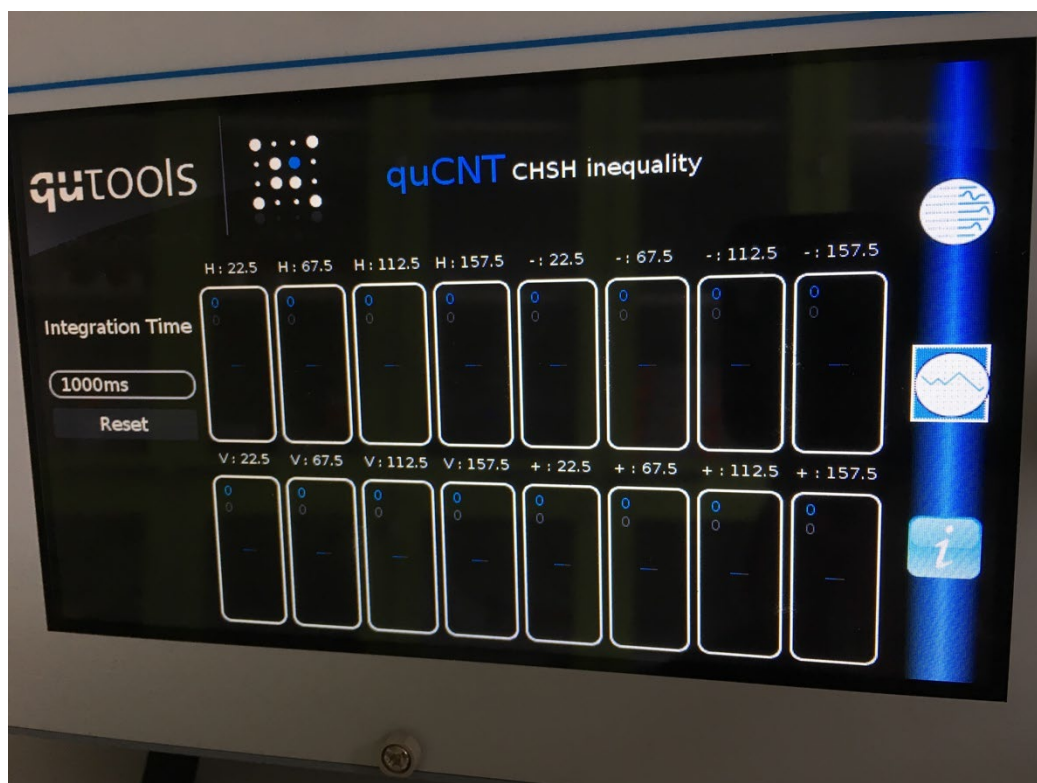
I disse ønskes et højt tal, når at begge filtre har samme polarisering, og et lavt tal når de er polariseret vinkelret på hinanden. Efter hver kolonne vil skærmen vise en beregning af hvor stor visibilitet indgangen har;



Notér gerne disse tal ned for at huske hvor nøjagtige jeres målinger er. Vi kan nu cirkulere videre i menuen til vinduet de faktiske målinger;

## Eksperiment - mål sammenfiltrering

Vi skal nu foretage målinger. Som beskrevet i teorigennemgangen, er det muligt at finde vinkler som er optimale for at bryde Bells ulighed, og netop dem skal vi bruge i eksperimentet. Disse vinkler er indskrevet på skærmen som vi kan se;



Tænk gerne over hvorfor netop disse vinkler er valgt.

Nu skal vi indstille polariseringsfiltrene til deres respektive indstillinger. For at måle i data til øverste venstre hjørne, skal vi sætte det ene polariseringsfilter på H (horisontal), og det andet på 22.5 grader, og klikke på feltet for at tage en måling over 1000ms. På denne måde skal alle 16 kombinationer måles.

Når dette er gjort, kan vi gemme vores data. For at eksportere data, skal I sætte et USB hukommelseskort i USB-stikket bag i detektormodulet og klikke på eksporter-til-USB-knappen. I kan nu overføre CSV filen til jeres egen computer, eller til en af Nanotekets computere.

## Databehandling - er uligheden brudt?

Vi vil nu regne på, om vores  $S$ -værdi bryder uligheden. Til start skal vi importere data, som er udskrevet fra detektormodulet i en `.txt`-fil. Vi har brugt følgende kombinationer;

(H, 22.5)	(H, 67.5)	(H, 112.5)	(H, 157.5)	(-, 22.5)	(-, 67.5)	(-, 112.5)	(-, 157.5)
(V, 22.5)	(V, 67.5)	(V, 112.5)	(V, 157.5)	(+, 22.5)	(+, 67.5)	(+, 112.5)	(+, 157.5)

Vi kan nu udregne korrelationsfunktionerne der indgår i CHSH uligheden som

$$E(\alpha, \beta) = \frac{N(\alpha, \beta) + N(\alpha^\perp, \beta^\perp) - N(\alpha^\perp, \beta) - N(\alpha, \beta^\perp)}{N(\alpha, \beta) + N(\alpha^\perp, \beta^\perp) + N(\alpha^\perp, \beta) + N(\alpha, \beta^\perp)}$$

Her betyder  $N(\alpha, \beta)$  antallet  $N$  af fotoner ved hhv. vinkel  $\alpha$  og vinkel  $\beta$ . Her har vi brugt polarisationsvinklerne i den følgende tabel;

Vinkel	Grader
--------	--------



$\alpha$	$-45^\circ$
$\alpha'$	$0^\circ$
$\beta$	$157.5^\circ$
$\beta'$	$22.5^\circ$

Og vi kan nu regne de fire korrelationsfunktioner, vi skal bruge for at finde S.

$$E(\alpha, \beta) =$$

$$E(\alpha, \beta') =$$

$$E(\alpha', \beta) =$$

$$E(\alpha', \beta') =$$

Vi kan nu regne S;

$$S = E(\alpha, \beta) - E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta) + E(\alpha', \beta')$$

Hvad er jeres værdi for S? Er uligheden brudt, og såfremt den er, hvad betyder det for systemet?