

15. august 2019
ubuho

Slutrapport vedr. projektet "QuantumLab" ved DTU Fysik

På vegne af projektgruppen vil jeg gerne takke Lundbeckfonden, Otto Mønstedts Fond og Marie & M. B. Richters Fond for deres bevillinger til projektet, og for derved at have givet os mulighed for at realisere en vision om at levere nystabende undervisning og formidling inden for kvanteteknologi, målrettet gymnasieskolen og universitetsstuderende.

Det har været utrolig udbytterigt og en stor fornøjelse at gennemføre projektet, og det har været yderst tilfredsstillende at opleve den generelle begejstring der har været for projektet både blandt modtagerne, lokalt på DTU og øvrige der har stiftet bekendtskab med vores initiativer og aktiviteter.

Kort om projektet

Projektets vision har været at etablere en eksperiment- og erfaringsbaseret undervisnings- og formidlingsfacilitet (QuantumLab) på DTU Fysik med fokus på moderne kvanteteknologi, målrettet gymnasiets fysikelever og universitetsstuderende. Dette er motiveret af et ønske om (1) at fremme interessen for naturvidenskab blandt unge og befolkningen generelt gennem nyskabende formidling og (2) at styrke uddannelsen af kommende ingeniører inden for det kvanteteknologiske område. Udover at etablere QuantumLab har en væsentlig del af projektet været at udvikle et online undervisningsmateriale, der kan danne baggrunden for et selvstændigt undervisningsforløb om kvantefysik på gymnasieniveau. En ambition for materialet har været at udvikle og teste eksperimenterede didaktiske virkemidler til at gøre kompleks naturvidenskab mere tilgængelig og relevant for målgruppen.

Resultater

I det følgende opsummeres de resultater der er opnået gennem de forskellige aktiviteter i projektet.

Formidling til gymnasieskolen:

QuantumLab har opnået stor visibilitet hos den danske gymnasieskole og i alt har 23 danske gymnasier været i berøring med faciliteten, enten i form af dagsbesøg af hele hold/klasser, SRP elever eller lærerbesøg i forbindelse med kursus. Som det fremgår af grafikken herunder, så er de besøgende gymnasier fordelt bredt ud over landet.

Vi sætter stor pris på den interesse der har været, og fortsat er, for QuantumLab og vi er stolte over at have givet så mange danske gymnasieelever hands-on erfaring med nogle af kvantefysikkens mest komplekse fænomener.



Figur 1 Gymnasier der har besøgt QuantumLab: Rysensteen Gymnasium, Stenhus Gymnasium, Birkerød Gymnasium, Frederiksberg Gymnasium, Slagelse Gymnasium, Sorø Akademi, Ordrup Gymnasium, Holstebro Tekniske Gymnasium, Odder Gymnasium, Silkeborg Gymnasium, Fredericia Gymnasium, Roskilde Katedralskole, KVUC, H.C. Ørsted Gymnasiet, Horsens Gymnasium, Herlufsholm Skole, Gl. Hellerup Gymnasium, Campus Bornholm, Virum Gymnasium, Sankt Annæ Gymnasium, Ribe Katedralskole, Viby Gymnasium, Egedalgynasium.

Udover at vekselvirke med gymnasieskolen gennem besøg, så har vi desuden formidlet den fysik der behandles i QuantumLab til fysiklærere i gymnasieskolen både i en baggrundsartikel i LMFK-bladet og gennem afholdelse af et heldagskursus.

- ["Prøv kræfter med kvantemekanikken i QuantumLab på DTU Fysik"](#)
U.B. Hoff og O. L. Trinhhammer
LMFK-bladet 3/2017

Undervisning på DTU:

QuantumLab er blevet anvendt til demonstrationsforsøg og til at give studerende på DTU eksperimentel erfaring med det kvantefysiske fænomen entanglement i forbindelse med følgende kurser på DTU Fysik: Videregående kvantemekanik (10112), Kvanteoptik (10380) og Kvanteinformation (10384)

Derudover er et nyt 3-ugers kandidatkursus, centreret omkring QuantumLab blevet oprettet: "Experimental techniques in quantum technology". Kurset er projektorienteret (baseret på CDIO princippet) og giver studerende mulighed for at arbejde intensivt med implementering af optiske kvanteteknologier som f.eks quantum key distribution, quantum random number generation og quantum interferometry. Kurset er indtil videre blevet afviklet i 2 semestre. De kursusansvarlige er adjunkt Tobias Gehring og postdoc Ulrich Hoff.

De første erfaringer med kurset er blevet rapporteret i et foredrag ved konferencen "46th SEFI Annual Conference 2018", en uddybende conference proceedings artikel samt i et foredrag ved DTUs Undervisningsbiennale 2019.

- “Practical Education of Quantum Engineers”
U.B. Hoff, T. Gehring, and O.L. Trinhammer
Proceedings of the 46th SEFI Annual Conference 2018, p. 864
ISBN: 978-2-87352-016-8

Produktion af undervisningsmateriale og samarbejde med Anders Morgenthaler/New Creations:
Udarbejdelsen af et supplerende undervisningsmateriale til QuantumLab har været en mere krævende opgave end forventet, bla. fordi den person der oprindeligt var knyttet til opgaven opsagde sin stilling på DTU Fysik umiddelbart efter projektets opstart. Opgaven blev derefter overtaget af postdoc Ulrich Hoff, parallelt med ansvaret for eksekveringen af alle projektets øvrige aktiviteter. Arbejdet med undervisningsmaterialet er derfor beklageligvis endnu ikke fuldt ud afsluttet.

En ambition for undervisningsmaterialet har været at udvikle og afprøve alternative didaktiske virkemidler. Til det formål blev der indledt et samarbejde med tegner Anders Morgenthaler og produktionsvirksomheden New Creations om produktion af en række animationer og tegneseriestriber, der med en skæv indfaldsvinkel og alternative fortolkninger illustrerer og perspektiverer elementer af kvantefysikken og indholdet af undervisningsmaterialet.



Figur 2 Et eksempel på en af de tegneseriestriber der er blevet produceret til QuantumLabs undervisningsmateriale. Striben kobler kvantemekanikkens ”Schrödingers kat-paradoks” med det mærkværdige men populære YouTube fænomen ”Unboxing”.

Resultaterne af dette samarbejde har modtaget stor opmærksomhed og ros både fra målgruppen, forskningsverdenen og erfarne videnskabsformidlere. Det er vores ambition at fortsætte samarbejdet mellem DTU Fysik og Anders Morgenthaler/New Creations og videreudvikle vores ideer omkring humor-drevet formidling af kompleks naturvidenskab.

Til udbredelse af undervisningsmaterialet er der blevet oprettet en hjemmeside. Siden er stadig under udvikling og indeholder kun dele af det producerede tekstmateriale samt produktionerne fra Anders Morgenthaler/New Creations. Siden kan tilgås via flg. link: <http://www.dev.quantumlab.dk/>

Samarbejde med Center for Faglig Formidling om evaluering:

Til evaluering af effekt og kvalitet af den formidling og undervisning der leveres i QuantumLab, er der i samarbejde med Center for Faglig Formidling under Videnskab.dk blevet udarbejdet en spørgeskemaundersøgelse målrettet brugere fra gymnasieskolen. Undersøgelsen søger gennem før og efter tests at evaluere brugernes udbytte af QuantumLabs undervisningsmateriale, og en række yderligere spørgsmål adresserer brugernes udbytte af arbejdet med eksperimenterne i QuantumLab.

Da undervisningsmaterialet ikke er færdigudviklet og derfor endnu ikke er blevet anvendt ude på gymnasierne, kan de data der til dato er indsamlet i forbindelse med besøg i QuantumLab ikke danne grundlag for en endelig evaluering. Besvarelsene giver os dog værdifulde input til, hvordan vi i det fortsatte arbejde med undervisningsmaterialet skal prioritere indhold, justere sværhedsgrad osv.

Der foreligger således endnu ikke en endelig evaluering af QuantumLab, men jeg fremsender naturligvis gerne den endelige evaluering når denne foreligger, såfremt fonden er interesseret.

"Gør-det-selv kvantefysik" ved Folkeuniversitetet:

En ikke-planlagt udløber af QuantumLab projektet har været etableringen af kurset "Gør-det-selv kvantefysik" ved Folkeuniversitetet i København. Det er et 5-ugers emnekursus, der gennem en kombination af forelæsninger og hands-on eksperimenter i QuantumLab giver kursisterne en indføring til moderne kvanteteknologi og de fænomenerne teknologierne er baseret på. Kurset har kørt i 3 semestre (alle gange udsolgt). Det fjerde kursus opstartes i september 2019.

Ansvarlig for planlægning og afvikling af kurset: postdoc Ulrich Hoff.

Kursusbeskrivelsen findes her:

<https://www.fukbh.dk/program/linjestudier/natur-og-teknik/natur-og-teknik-goer-det-selv-kvantefysik.aspx>

Udvidelse af QuantumLab:

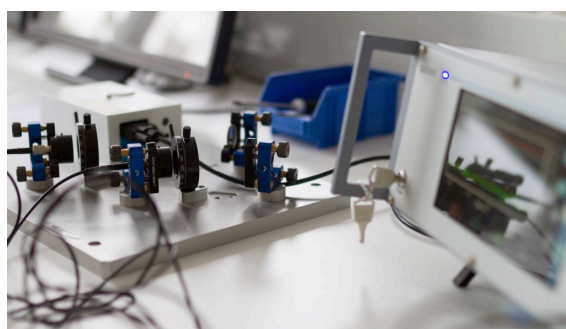
I henhold til re-budgetteringen for projektet, som fonden godkendte i starten af 2018, er QuantumLab blevet udvidet med en eksperimentel opstilling, der gør det muligt for besøgende at gøre sig erfaringer med magnetfeltsensing ved hjælp af nitrogen-vakance (NV) centre i diamant. Dette er en af de aktuelt mest lovende teknologier til udvikling af kvantesensorer til anvendelse inden for f.eks medicinsk imaging. QuantumLab havde kortvarigt en projektansat, som arbejdede på at udvikle en sådan opstilling, men vedkommende opsagde sin stilling til fordel for et arbejde i den private sektor, og det blev derfor besluttet at indkøbe en opstilling fra qutools GmbH (quNV).

Derudover er QuantumLab blevet udvidet med opstillinger vedr. optisk version af Stern-Gerlach eksperimentet, kvante Zeno-effekt samt tomografi af fotoniske kvantetilstande, udviklet af postdoc Ulrich Hoff.

Projektets forløb

I det følgende gives en kronologisk opsummering af de vigtigste begivenheder i projektets forløb med uddybende kommentarer.

- 02/12/2015 *Bevilling*
 Bevillingsbrev vedr. Lundbeckfondens bevilling på kr. 1.000.000 til projektet QuantumLab.
- 08/2016 *Etablering*
 Levering af eksperimentelle opstillinger fra qutools GmbH til demonstration af entanglement (5x quED) og to-foton interferens (5x qu2PI).



En af QuantumLabs eksperimentelle opstillinger til demonstration af entanglement (qutools quED)

- 09/11/2016 *Omtale*
["DTU inviterer gymnasieelever og andet godtfolk til at lave kvanteeksperimenter"](#)
 Artikel i Ingeniøren
- 12/12/2016 *Bevilling*
 Bevillingsbrev vedr. Otto Mønstedts Fonds bevilling på kr. 300.000 til projektet QuantumLab.
- 02/2017 *Omtale*
["Kursus om kvantefysik med eksperimenter"](#)
 Artikel i DTUavisen om kurset "Experimental techniques in quantum technology"
- 17/03/2017 *Omtale*
["Fysiker vil hverve unge til kvanteforskningen"](#)
 Artikel og video på Videnskab.dk
- 10/02/2017 *Bevilling*
 Bevillingsbrev vedr. Marie & M. B. Richters Fonds bevilling på kr. 300.000 til projektet QuantumLab.
- 21/03/2017 *Formidling*
 Foredrag på Frederiksberg Gymnasium

21/03/2017 *Formidling*
Foredrag for IDA Universe, IDA-huset, København.

27/03/2017 *Officiel åbning*
Ved en reception i Nanoteket på DTU Fysik blev QuantumLab åbnet af daværende forsknings- og uddannelsesordfører Jakob Engel-Schmidt (V). Ved receptionen deltog repræsentanter for de fonde der har ydet støtte til QuantumLab, og tegner Anders Morgenthaler holdt et oplæg om samarbejdet med DTU Fysik.



12/04/2017 *Formidling*
"Kan du forstå kvantefysik"
Podcast på Videnskab.dk / ForskerZonen

12/04/2017 *Formidling*
"Hvordan formidler vi kvantefysik, vi ikke kan se?"
Artikel på Videnskab.dk / ForskerZonen

19/04/2017 *Formidling*
Foredrag på Rysensteen Gymnasium

29/04/2017 *Omtale*
"Kvantemekanik skal være allemandseje"
Artikel i Ingeniøren

09/2017 *Formidling*
Baggrundsartikel i LMFK-bladet om eksperimenterne i QuantumLab til inspiration for danske gymnasielærere.

28/09/2017 *Formidling*
Foredrag sammen med tegner Anders Morgenthaler ved konferencen "Sci-Vi: Visualisation and Animation in Science Dissemination", Viborg.

05/04/2018 *Formidling*
Foredrag ved konferencen "Big Bang – Naturfag for fremtiden", Odense.

- 11/09/2018 *Formidling*
Webinar for Dansk IT.
- 20/09/2018 *Formidling*
Proceedingsartikel (peer-reviewed) og foredrag ved konferencen "46th SEFI Annual Conference 2018", DTU, Kgs. Lyngby.
- 28/11/2018 *Kursus*
Fysiklærerdag om kvantefysik i Nanoteket på DTU Fysik.
[Link til kursusopslag.](#)
- 07/2019 *Etablering*
Levering af eksperimentel opstilling fra qutools GmbH til demonstration af magnet-feltsensing med NV centre i diamant (quNV).

Afrunding

Med nærværende rapport håber jeg at have givet en fyldestgørende og tilfredsstillende redegørelse for forløbet af projektet og de resultater der er blevet opnået. Jeg håber desuden at fondene vurderer, at bevillingen til projektet er blevet anvendt hensigtsmæssigt og i overensstemmelse med det oprindeligt beskrevne projekt.

Hvis fonden har ønsker om yderligere detaljer vedrørende projektet, dets forløb og resultater, så står jeg naturligvis til rådighed.

Med venlig hilsen,



Ulrich Hoff
projektleder for QuantumLab
Postdoc, DTU Fysik