



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Demokratiseret forskning og spilbaseret undervisning**

Hansen, Sidse Damgaard; Magnussen, Rikke; Sherson, Jacob Friis

*Published in:*  
Kvant

*Publication date:*  
2012

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Hansen, S. D., Magnussen, R., & Sherson, J. F. (2012). Demokratiseret forskning og spilbaseret undervisning. *Kvant*, 2012(2), 27. <http://www.kvant.dk/upload/kv-2012-2/kv-2012-2-SDH-Kvantespil.pdf>

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Demokratiseret forskning og spilbaseret undervisning

Sidse Damgaard Hansen, Rikke Magnussen og Jacob Friis Sherson, AU Ideas Center for Community Driven Research

Vi vil ved hjælp af et online socialt computerspil forsøge at løse en aktuell og meget resourcekrævende teknologisk udfordring – at designe verdens kraftigste kvantecomputer. I the Quantum Computer Game skal spillerne på en sjov og nem måde udforske og udvikle kvantecomputerens fulde potentiale. Vi har en forventning om, at denne form for onlineforskning, faciliteret af internettet, kan blive et vigtigt redskab for både grundvidenskabelig og anvendt forskning samt undervisning i det 21. århundrede.

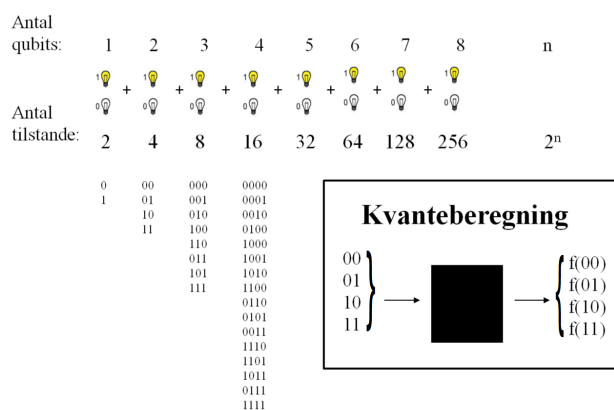
## Kvantecomputeren

Den eksponentielle vækst af tilgængelig computerkraft gennem de sidste årtier, konkretiseret i Moore's lov, har været enestående. Omtrent hvert andet år er det konsekvent lykkedes at formindske størrelsen af computerens elementære logiske bestanddel, transistoren, til det halve. Denne udvikling præsenterer samtidig udviklerne for et dilemma. Hvis tendensen fortsætter er den mikroskopiske verden, enkelte atomer lever i, nemlig i sigte. I dette regime er den store udfordring at håndtere de særlige spilleregler, der gælder for enkelte atomer, kvantemekanikken. Allerede i dag er kvantemekaniske effekter, hvor enkelte elektroner tunnelerer mellem tætliggende ledere en alvorlig udfordring for miniaturiseringen af computerchips.

I stedet for at opfatte de kvantemekaniske effekter som begrænsende faktorer kan man vælge at udnytte kvantemekanikkens love til at opbygge en kvantecomputer, der vil kunne lave mange beregninger på samme tid. Det er muligt, fordi kvantemekanikken tillader et atom at være i flere forskellige tilstande samtidig (superpositionsprincippet). De fundamentelle byggesten i almindelige computere er bits, der enten har værdien 0 eller 1. Den kvantemekaniske ækvivalent, en qubit, kan derimod være i tilstandene 0 og 1 samtidig. To qubits kan være i en kombination af fire tilstande (00, 01, 10 og 11), og for hver tilføjet qubit fordobles dette antal. Det betyder at hvor 10 normale bits repræsenterer ét af tallene fra 1 til  $2^{10}$ , kan 10 qubits i en vis forstand repræsentere alle  $2^{10}$  tal på én gang. Denne eksponentielle vækst er ekstrem hurtig: bare 300 qubits kan repræsentere flere tal, end der er atomer i universet, og en kvantecomputer vil i en vis forstand kunne lave operationer på dem alle samtidigt, se figur 1.

Det lyder næsten for godt til at være sandt, og det er det desværre også på grund af endnu et af kvantemekanikkens forunderlige koncepter. Et atom kan jo som nævnt være i flere forskellige tilstande samtidig, men det viser sig, at når man måler på det, kollapser atomet til ét bestemt af dem. For kvantecomputeren betyder det, at nok kan man lave manipulationer på mange forskellige tilstande på én gang, men lige så snart man spørger til resultatet af udregningen får man kun ét resultat ud! Så synes vi at være lige vidt. Heldigvis har

det i løbet af de sidste par årtier vist sig, at hvis man udfører smarte kombinationer af manipulationer og stiller de rigtige spørgsmål til atomerne kan man alligevel udnytte paralleliteten til at lave bestemte beregninger hurtigere end alle normale computere tilsammen. Et eksempel på en sådan udfordring er primtalsfaktorisering [1]. Eftersom en stor del af krypteringen på internettet i dag er baseret på antagelsen af, at dette ikke kan gøres effektivt, kan udviklingen af en funktionel kvantecomputer potentielt få store konsekvenser for samfundet.



**Figur 1.** En qubit kan visualiseres som en lyspære, der både kan være tændt (1) og slukket (0) på samme tid. For hver qubit, der føjes til systemet, fordobles antallet af tilstande så f.eks. fire qubits kan være i 16 forskellige tilstande samtidig. En kvanteberegning kan ses som en kasse, der udfører en funktion på inputtet. Da inputtet rummer forskellige tilstande, vil outputtet også bestå af flere forskellige beregningsværdier.

Denne erkendelse har siden afstedkommet intenst eksperimentelt og teoretisk arbejde. Allerede i 2001 blev den første prototype af en kvantecomputer udviklet med enkelte atomer i et organisk molekyle i en vandig opløsning som qubits. Beregningerne (primtalsfaktorisering af 15) blev foretaget ved en teknik kaldet kernemagnetisk resonans (NMR), men desværre tillod strukturen af molekylet kun 7 qubits [2].

I figur 2 lister vi de tre vigtigste kriterier for at kunne bygge en kvantecomputer og sammenligner dem med de tilsvarende krav til en almindelig computer.

Først og fremmest skal man have et system der kan operere på tilstrækkeligt mange værdier. Som nævnt ovenfor vil bare 300 qubits muliggøre manipulation af ekstremt mange tilstande, men af tekniske grunde vil en fuldt funktionel kvantecomputer nærmere kræve nogle tusinde qubits, der hver især kan initialiseres i de ønskede starttilstande.

Dykker man tilstrækkeligt dybt ned i en normal computers software, viser det sig at den kan programmeres alene ved hjælp af enkelte bit flips, hvor 0 flippes til 1 og vice versa, samt 2-bit operationer hvor outputtet afhænger af værdierne af begge bits. Et eksempel på en 2-bits operation er XOR, hvor outputtet er 1 hvis og kun hvis netop en af de to bits er 1. Analogt har det vist sig at al software i en kvantecomputer kan sammensættes af enkelt- og 2-qubit operationer. En enkelt-qubit operation er lidt mere kompliceret end et normalt bit-flip, idet man skal kunne dreje qubitten til en vilkårlig superposition af 0 og 1. Der eksisterer flere forskellige 2-qubit operationer, og hvilken der søges implementeret afhænger af det specifikke system. Et eksempel på en 2-qubit gate er en phase-gate, hvor tilstanden ganges med -1 hvis og kun hvis de to qubits begge er 1 tilstanden.

	Klassisk computer	Kvante computer
a.	Milliarder af bits	100 – 10.000 qubits
b.	Flip bit	Drej qubit
c.	2-bit operation fx. XOR:	2-qubit operation fx. phase-gate:
	00 → 0	00 → 00
	01 → 1	01 → 01
	10 → 1	10 → 10
	11 → 0	11 → -11

**Figur 2.** Kriterier for at lave henholdsvis klassiske og kvanteberegninger. I begge tilfælde kan al software implementeres ved en sekvens af enkelt bit og to-bit operationer.

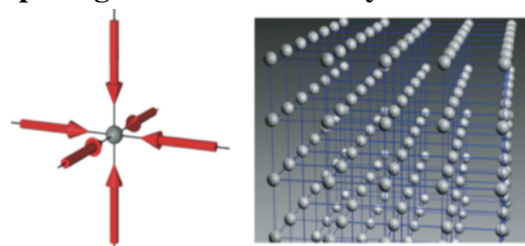
I løbet af det sidste årti har forskere rundt omkring i verden arbejdet på at implementere en kvantecomputer i forskellige systemer såsom enkelte atomer og molekyler, ioner, fotoner og elektriske kredsløb. Hvert system har sine unikke fordele og ulemper, men fælles er den store udfordring at sikre at systemet forbliver komplet isoleret fra omgivelserne da bare den mindste kobling vil forårsage fejl i kvanteberegningen. Langt de fleste grupper har forsøgt en bottom-up tilgangsvinkel til at bygge en kvantecomputer, hvor forskerne først laver

en mindre computer og derefter arbejder på at forøge størrelsen ved at tilføje en qubit af gangen. I dag er antallet af qubits med stor møje kun blevet forøget til 12, så fremskridt mod en stor-skala kvantecomputer med hundrede- eller tusindevis af qubits har været meget langsom.

### Vores kvantecomputerkandidat

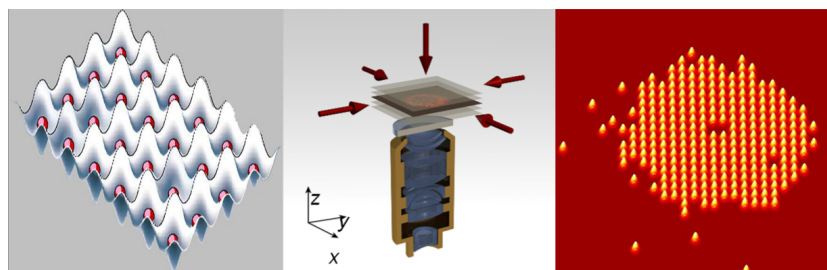
I løbet af det sidste par år har IFA's kvantefysikgruppe i et dansk-tysk samarbejde i en top-down tilgangsvinkel eksperimentelt frembragt en utroligt ren og manipulerbar krystal af 300 enkelte atomer [3].

#### Optisk gitter – en fælde af lys

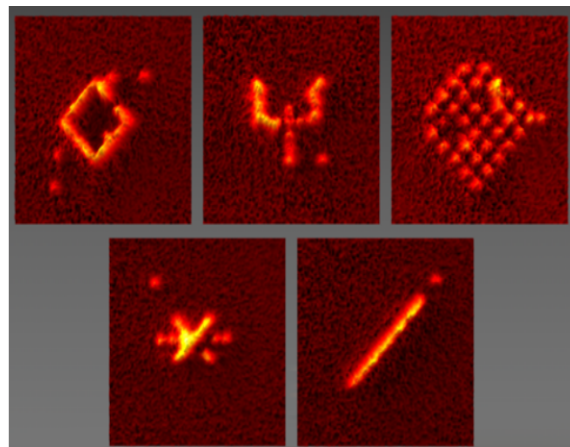
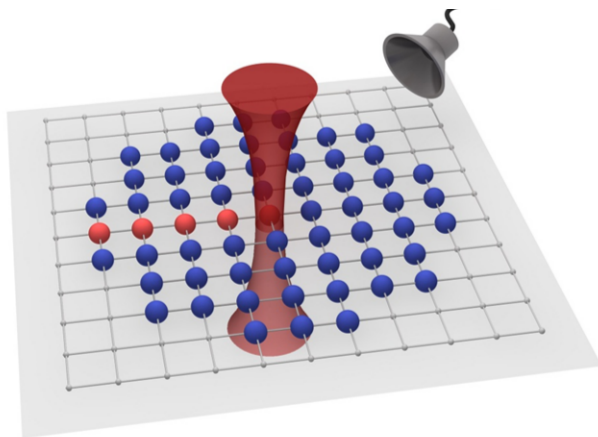


Det vigtigste redskab i eksperimentet er et optisk gitter. Det består af stående bølger af lys, som produceres ved at reflektere en laserstråle tilbage i sig selv, ligesom når man fastgør et tov til en mur og svinger det. Hvis man vælger den rigtige lysfrekvens søger atomerne mod områder med høj intensitet. Hvis man gør det i alle tre rumlige retninger dannes en perfekt krystalstruktur som udsætter atomerne for en kraft rettet mod gitterpunkterne. I eksperimentet udvælges et enkelt plan af 3D-strukturen, hvilket resulterer i den æggebakkellignende struktur illustreret i figur 3.

Det skete ved at placere ultrakolde atomer i en æggebakkellignende potentialstruktur bestående af en kunstig krystal af lys, et optisk gitter (se faktaboksen: "Optisk gitter"). Ved præcist og langsomt at øge dybden af brøndene lykkedes det at udnytte atomernes indbyrdes vekselvirkning til at få dem til at organisere sig selv på rad og række i en yderst ordnet struktur med præcist ét atom per brønd. Afstanden mellem brøndene er bare 0,5  $\mu\text{m}$ , så det var kun muligt at afbilde de enkelte atomer ved at udvikle et specialdesignet mikroskop med en ultrahøj opløsning (se figur 3). Med en temperatur på 4 nK er krystallen den koldeste krystal i Verden og ville med sine 300 atomer kunne udgøre kernen i en stor-skala kvantecomputer.

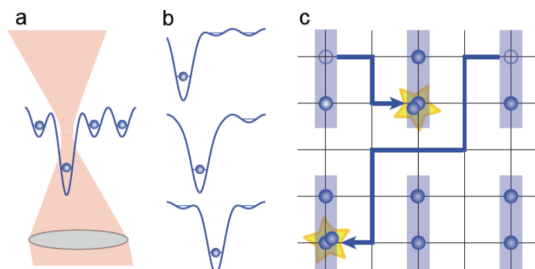


**Figur 3.** Til venstre ses et idealiseret billede af selvorganiserede atomer i en æggebakkellignende struktur. I midten ses det ultra-højt opløsende mikroskop, der er brugt til at tage billedet af atomerne i den eksperimentielt fremstillede krystal vist til højre.



**Figur 4.** Adressering af enkelte atomer [4]. Til venstre: En laserstråle fokuseret på en enkelt brønd i krystalstrukturen udgør en optisk pincet. Den skifter energien for en overgang i det udvalgte atom, og med mikrobølger flippes atomet mellem 0 og 1. Til højre: Et udpluk af mønstre tegnet ved efter tur at pege pincetten på de udvalgte atomer.

For at løse udfordringen med at manipulere enkelte atomer blev mikroskopet derefter udnyttet til at skabe en optisk pincet fokuseret på en vilkårlig brønd i krystalstrukturen. Denne laserstråle har en bølgelængde langt fra alle tilladte overgange i atomet, så strålens fotoner bliver ikke absorberede af atomerne, men ligesom det optiske gitter udsætter pincetten atomerne for en kraft. Denne kraft forandrer i det udvalgte atom energien mellem de to tilstande i atomet, der benyttes som de logiske 0 og 1 beregningstilstande. Med mikrobølger resonante med denne skiftede energi flippes atomet mellem 0 og 1, mens de resterende atomer forbliver uberørte [4], se figur 4. Dette udgør en enkelt-qubit gate, og dermed er to ud af de tre kriterier for at kunne lave en kvanteberegning opfyldt (se figur 2).



**Figur 5.** 2-qubit operation [5]. a: Atomet fanges af pincetten. b: Atomet transporteres til nabobrønden. c: Atomer transporteres rundt via gitterets frie brønde og bringes til at vekselvirke med udvalgte atomer.

Vi har siden undersøgt teoretisk, hvorvidt kombinationen af krystallen og den optiske pincet også kan bruges til at realisere den sidste ingrediens i kvanteberegningen, en operation betinget af to atomers tilstande. Dette syntes at kunne lade sig gøre ved at benytte pincetten til først at transportere to udvalgte atomer tæt på hinanden og derefter bringe dem sammen vha. den optiske pincet [5]. På grund af den svage interatomare frastødning vil tilstandene i atomerne langsomt akkumulere en faseforskel, der vil kunne udgøre en 2-qubit gate, se figur 5. Hvis denne arkitektur skal være en seriøs kandidat til en stor-skala kvantecomputer skal

fejlsandsynligheden i hver operation dog være mindre end  $10^{-3}$ . Så vil kvante-fejlretningsprotokoller kunne garantere, at selv beregninger med tusindvis af operationer vil kunne foretages uden at fejlene i de enkelte operationer hobes op.

Vi har parametriseret pincettens bevægelse og intensitet som funktion af tiden i hvert delskridt (transport af atomet, vekselvirkning mellem atomer mm.) og numerisk optimeret bevægelsen og dermed bragt fejlsandsynligheden under de påkrævede  $10^{-3}$ . Problemet er, at selv efter intensiv optimering er det ikke lykkedes at finde bevægelsesalgoritmer, der er robuste når realistiske eksperimentelle fejlkilder såsom en uundgåelig svag rysten af pincetten – akkurat som det er svært at holde en laserpointer helt stille – medtages. Det synes dermed ikke realistisk at implementere en kvantecomputer ved hjælp af den optiske pincet, med mindre man kan finde en anden måde at søge efter robuste algoritmer på.

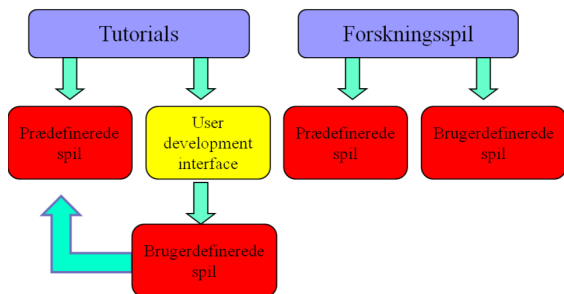
### The Quantum Computer Game

Vi mener at den eksponentielle vækst af information og kommunikation på internettet, som allerede har omdefinert det moderne samfund også har potentialet til at omdefinere, hvordan forskning udføres. Vi forsøger derfor i en community-baseret tilgang (spillet: the Quantum Computer Game) at engagere internettets mange brugere til at løse vores konkrete udfordring med at udvikle nye, robuste kvantecomputeralgoritmer.

Som vist i figur 6 består spillet af to enheder. De første baner fungerer som tutorials, der ikke bidrager direkte til udviklingen af en kvantecomputer, men istedet skal lære spillerne om kvantemekanik og ad den vej gøre dem bedre til at løse de forskningsmæssige udfordringer i the Quantum Computer Game.

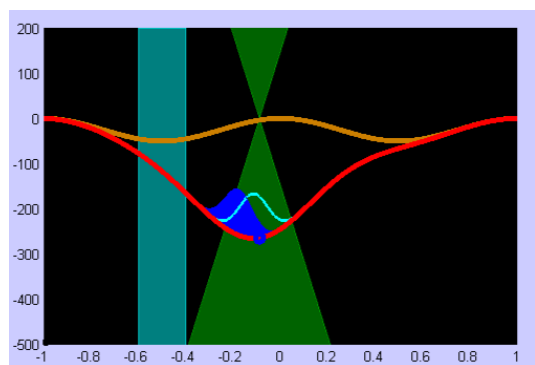
I forskningsspillene vil brugerne frit kunne udforske fysikken bag kvantecomputeren og bidrage med nye kvantecomputeralgoritmer, se faktaboksen “Et eksempel på et kvantecomputerspil”. Efter hvert forsøg udregnes en score baseret på kvaliteten af den resulterende kvantecomputer. Hvis en spiller finder en bedre løsning på et delproblem uploades data om spillerens løsning

til en central server og den tilhørende score tilføjes en global high-score liste, der til enhver tid vil svare til forskningsfeltets state-of-the-art. Denne bliver udbygget for hver time intelligente og lidenskabelige mennesker spiller. Til sidst vil spil-dataene hørende til den globale high-score kunne publiceres som et optimeret resultat for en robust kvantecomputeralgoritme.



**Figur 6.** Schematisk oversigt over spillet. Til venstre: Spillet indeholder baner, der skal lære spilleren om kvantemekanik og derved ruste dem bedre til at løse de videnskabelige problemer. I denne afdeling er det muligt for spillerne selv at opbygge baner til brug for alle andre spillere. Til højre: Baner hvor spillerne hjælper forskningen. Her bliver data om spillernes valg uploadet til en server, hvorfra de bedste resultater kan bruges i opbygningen af en kvantecomputer.

### Et eksempel på et kvantecomputerspil



Figuren viser et screen shot af den nuværende beta-version af et af spillene i the Quantum Computer Game, mens det er i spil.

Her ses to af brøndene i den underliggende gitterstruktur (orange). Den optiske pincet (grøn) samt den underliggende gitterstruktur giver det resulterende potentialerandskab (rød) atomet føler. Pincetten peger i starten på den højre brønd.

I dette spil er målet at bringe atomet (blå), der starter i den højre brønd, over i den venstre brønd – midten af den venstre brønd er markeret med en blå søjle. Det blå atom skal, for at undgå beregningsfejl i kvantealgoritmen, ende i den laveste energitilstand for potentialerandskabet, der er vist med den lyseblå linje.

Atomet og den laveste energitilstand vil ændre sig i realtid når spilleren ændrer potentialerandskabet.

Spilleren ændrer potentialerandskabet ved at klikke på den blå cirkel og derefter bevæge musen rundt på skærmen. Den optiske pincet og det resulterende potentialerandskab følger nu musens bevægelser.

Spillerne af the Quantum Computer Game vil ikke alene bidrage med beregningskraft til at afprøve de mange muligheder, men også med menneskelig feedback til optimeringen baseret på mønstergenkendelse og intuition, hvilket har vist sig essentielt i spillet Foldit (se faktaboksen “Forsknings/lærings spil”). Derudover håber vi på at engagere spillerne i at udvikle metoder, der ligger udenfor de prædefinerede rammer af spillet og endda med tiden til at hjælpe med at definere nye videnskabelige problemer, der skal løses i fremtidige versioner af spillet. Med kombinationen af massiv udbredelse og en flok af dedikerede medudviklere håber vi dermed at skabe et bredt forskningsfællesskab, der udnytter det fulde potentiale af den nye community-baserede tilgang til forskning.

### Didaktiske udfordringer i spil-baseret undervisning

En af de uddannelsesmæssige udfordringer i videnskonomier som den danske er at undervise børn og unge i at deltage kreativt i skabelse og udvikling af råstoffet i videnssamfundet: ny viden. Formidlingen af statisk viden i skolerne har været det gældende paradigme indtil nu, men med fremkomsten af spil-baseret undervisning er grundstenen lagt til at elever kan producere viden og dermed tilegne sig viden aktivt. Udover at skabe et spil, der egner sig til viral udbredelse på f.eks. Facebook, arbejder vi i øjeblikket med den didaktiske udfordring at udvikle et undervisningsforløb til gymnasiet baseret på både klassiske og kvantemekaniske elementer af spillet. Vi ser dette som et pilotprojekt for implementeringen af forskningsproducerende undervisning i komplekse naturvidenskabelige fænomener til grundskole og gymnasiet, hvor vi tror, at følelsen af at bidrage aktivt til naturvidenskabelig grundforskning vil være et kraftigt læringsincitament.

Spilmediet er velegnet til komplekse simuleringer af faglige tilgange og kan med narrative elementer og konstruktion af regler fungere som rammen om simulering af komplekse autentiske læringsmiljøer. I den vidensbaserede udvikling af et undervisningsforløb til gymnasiet vil det videnskabelige fokus her være på innovativt design af et læringsmiljø kombineret med samtidige eksperimentelle studier af effekten af de innovative elementer. Målet er at udvikle et didaktisk design hvor eleverne får førstehåndsoplevelsen af at være med til at skabe naturvidenskabelig viden og at denne ikke er statisk, men i konstant udvikling og tilblivelse.

Der er flere didaktiske udfordringer i at designe såkaldte ”Scientific Discovery Games” som the Quantum Computer Game. Et af de mere specielle karakteristika ved denne type spil er at løsningerne på spillets missioner er ukendte. Hverken lærere eller forskere ved reelt hvad den bedste proces er. Det betyder, at spillet skal designes så generelt som muligt for at give spillerne maksimal frihed til udforskning.

En anden udfordring er, at spillet skal være designet til at ikke-ekspert spillere kan fremme viden indenfor et yderst komplekst forskningsområde med høj grad af ekspertise. Dette har indflydelse på design

af spillets forskellige elementer såsom grafik, interface og spildynamikker. Spillets interaktive visualiseringer af videnskabelige fænomener skal gøre det muligt for nybegyndere at eksperimentere med komplekse parametre og samtidig formidle begrænsninger indenfor forskningsområdet der genereres ny viden til. Belønningsstrategier som pointgivning og highscorelister skal således understøtte, at spillerne kan benytte sig af flere ny kreative strategier, samtidig med at spillet er tro mod den nyeste model af det pågældende videnskabelige fænomen. For at optimere det forskningsmæssige udbytte af spillet vil social interaktion og konkurrence mellem grupper, såsom klasser, gymnasier, byer eller lande, desuden blive inkorporeret.

### **Forsknings/læringspil: proteinfoldning og detektivarbejde**

#### **Scientific Discovery Games og proteinfoldning**

Internettet har frembragt en eksplosion af community-baseret indsamling og deling af viden, som fx Wikipedia.org. Involvering af internetbrugere til at hjælpe med at løse praktiske og fundamentale problemer fik sit gennembrud i 1999 med SETI@home, hvor brugere stiller deres computerkraft til rådighed for søgningen efter liv i universet. Endnu et kvantespring skete i 2008 med introduktionen af online-spillet Foldit, hvor forskere fra University of Washington lader spillere løse komplicerede 3D-protein-foldningsproblemer. Det er blevet en ekstrem succes med mere end 100.000 spillere, og de genererede resultater hjalp forskerne til at vinde den prestigefyldte kemiudfordring, Critical Assessment of Techniques for Protein Structure Prediction (CASP) i 2009. Foldit: <http://fold.it/portal/>

#### **Forskningsbaserede spil og simulation af professionelle miljøer**

I det sidste årti har der i Danmark og internationalt foregået en udforskning af hvordan man kan bruge spilmediet til at skabe nye typer af læringsmiljøer. Indenfor naturfagsundervisningen har der bl.a. været fokus på hvordan spil kan understøtte nye typer af sanselig forståelse af naturvidenskabelige fænomener og hvordan man kan bruge spil til at simulere autentiske professionelle naturfaglige miljøer. Et eksempel på dette er spillet Drabssag/Melved [6] som blev udviklet af en gruppe spiludviklere og forskere i 2003 på forskningsinstitutionen Learning Lab Denmark i samarbejde med skolebogsforlaget Malling Bech. I spillet skal eleverne (7.-10. klasse) i teams opklare en række mord i en fiktiv midtsjællandsk by ved at lytte til optagelser med vidner og mistænkte og gennem teknisk analyse af spor. Gennem brug af autentiske kemiske, matematiske, fysiske og biologiske kriminaltekniske redskaber skal eleverne opbygge verificerbare hypoteser og teorier om hændelsesforløb.

I bestræbelserne på at tilpasse denne klasse af spil i skolen som et didaktisk design til samarbejde med forskere, er der også en række designfunktioner og pædagogiske overvejelser, der skal tages i betragtning, for eksempel lærerens rolle og deltagelse. Som allerede nævnt er et af de unikke aspekter ved denne type spil,

at løsninger på missioner er ukendte. Derfor vil læreren ikke kende resultaterne på de problemer, de studerende forsøger at løse, og vil snarere skulle påtage sig rollen som facilitator eller forskningsleder end den alvidende underviser. Vi arbejder derfor på at give læreren mulighed for nemt at sammensætte sin egen kombination af spil skræddersyet til undervisningsforløbet.

Disse forskellige udfordringer og undersøgelses-spørgsmål har vi valgt metodisk at adressere gennem en designbaseret forskningsproces hvor forskningsbaserede prototyper implementeres online og i gymnasieklasser. Efter interventioner med de første prototyper videreudvikles designet på baggrund af data fra afprøvingerne og nyopståede forskningsspørgsmål. Dette vil både bidrage til udviklingen af en ny type forskningsbaseret læringsteknologi og teoretisk forståelse af et nyt forskningsfelt.

#### **Vil du være med?**

Vil du være med til at udvikle the Quantum Computer Game?

- Så meld dig som beta-tester.  
Skriv en mail til [coderteam@phys.au.dk](mailto:coderteam@phys.au.dk)
- Hvis du underviser i fysik/matematik og har lyst til at bruge spillet i din undervisning eller opbygge et undervisningsforløb omkring spillet så skriv en mail til [coderteam@phys.au.dk](mailto:coderteam@phys.au.dk)

Besøg os på vores hjemmeside  
[www.scienceathome.org](http://www.scienceathome.org)

#### **Litteratur**

- [1] Michael A. Nielsen and Issac L. Chuang: Quantum Computation and Quantum Information, (Cambridge University Press 2000) side 216 - 247.
- [2] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura and L. J. O'Brien, *Nature* **467**, 68 - 72 (2010).
- [3] Jacob F. Sherson, Christof Weitenberg, Manuel Endres, Marc Cheneau, Immanuel Bloch and Stefan Kuhr: Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator, *Nature* **464**, 45 - 53 (2010).
- [4] Christof Weitenberg, Manuel Endres, Jacob F. Sherson, Marc Cheneau, Peter Schauss, Takeshi Fukuhara, Immanuel Bloch and Stefan Kuhr: Single-spin addressing in an atomic Mott insulator, *Nature* **471**, 319 - 324 (2011).
- [5] Christof Weitenberg, Stefan Kuhr, Klaus Mølmer and Jacob F. Sherson: Quantum computation architecture using optical tweezers, *Phys. Rev. A* **84**, 032322 (2011).
- [6] <http://drabssag.elevunivers.dk/>



Jacob Friis Sherson er adjunkt ved Institut for Fysik og Astronomi (IFA), Aarhus Universitet, og er leder af det tværfaglige AU Ideas Center for Community Driven Research (CODER). Han har gennem både eksperimentelt og teoretisk arbejde med kolde atomare gasser bidraget til udviklingen mod en stor-skala kvantecomputer.



*Sidse Damgaard Hansen* er cand.scient i fysik og er som videnskabelig assistent i CODER ansvarlig for udviklingen af kvantecomputerspillets software, samt den tekniske understøttelse i forbindelse med indlejringen af spillet i gymnasieundervisningen.



*Rikke Magnussen* er Lektor på Institut for Kommunikation på Aalborg Universitet hvor hun er tilknyttet ForskningsLab: It og LæringsDesign. Hun har igennem mange år forsket i og udviklet spilbaserede læringsmiljøer til naturfagsundervisning og er i CODER ansvarlig for udviklingen af spillenes læringsdesign.