



**Uddannelses- og
Forskningsministeriet**

Prækvalifikation af videregående uddannelser - Kvantecomputing

Udskrevet 13. april 2024

Kandidat - Kvantecomputing - Syddansk Universitet

Institutionsnavn: Syddansk Universitet

Indsendt: 31/01-2024 20:53

Ansøgningsrunde: 2024-1

Status på ansøgning: Indsendt

[Download den samlede ansøgning](#)

[Læs hele ansøgningen](#)

Ansøgningstype

Ny uddannelse

Udbudssted

Odense

Informationer på kontaktperson for ansøgningen (navn, email og telefonnummer)

AC-fuldmægtig Camilla Katrine Hollmann, camkat@sdu.dk, +45 65 50 18 58, Det Naturvidenskabelige Fakultetssekretariat, SDU samt SDUs prækvalifikations mailbox praekval@sdu.dk

Er institutionen institutionsakkrediteret?

Ja

Er der tidligere søgt om godkendelse af uddannelsen eller udbuddet?

Nej

Uddannelsestype

Kandidat

Uddannelsens fagbetegnelse på dansk

Kvantecomputing

Uddannelsens fagbetegnelse på engelsk

Quantum Computing

Angiv den officielle danske titel, som institutionen forventer at bruge til den nye uddannelse

Cand.scient. i kvantecomputing

Angiv den officielle engelske titel, som institutionen forventer at bruge til den nye uddannelse

Master of Science (MSc) in Quantum Computing

Hvilket hovedområde hører uddannelsen under?

Naturvidenskab

Hvilke adgangskrav gælder til uddannelsen?

Retskrav

Ingen bacheloruddannelser har retskrav til denne kandidatuddannelse.

Direkte adgangsgivende bacheloruddannelser

Følgende bachelorgrader er direkte adgangsgivende til kandidatuddannelsen:

- Matematik, fysik, datalogi fra Syddansk Universitet
- Matematik, fysik, datalogi fra Københavns Universitet
- Matematik, fysik, datalogi fra Aarhus Universitet
- Matematik, fysik, datalogi fra Aalborg Universitet
- Kunstig Intelligens fra Syddansk Universitet
- Kunstig Intelligens og Data, DTU
- Data Science, ITU
- Tilsvarende dansk eller international bacheloruddannelse*

*Ansøgere med en bachelorgrad fra øvrige danske og internationale bacheloruddannelser kan optages på kandidatuddannelsen, såfremt ansøgeren kan dokumentere, at uddannelsen indeholder mindst 120 ECTS inden for matematik, fysik og/eller datalogi.

Sprogkrav til uddannelsen

Alle ansøgere skal desuden opfylde sprogkravet om bestået Engelsk B (inkl. udprøvning) med et gennemsnit på mindst 2,0. Følgende tests opfylder også sprogkravet: IELTS Academic med minimum 6,5, TOEFL iBT med minimum 88, CAE med minimum 180 eller CPE.

Er det et internationalt samarbejde, herunder Erasmus, fællesuddannelse el. lign.?

Nej

Hvis ja, hvilket samarbejde?

Hvilket sprog udbydes uddannelsen på?

Engelsk

Er uddannelsen primært baseret på e-læring?

Nej, undervisningen foregår slet ikke eller i mindre grad på nettet.

ECTS-omfang

120

Beskrivelse af uddannelsens formål og erhvervssigte. Beskrivelsen må maks. fylde 1200 anslag

Uddannelsens formål

At uddanne kandidater med kompetencer inden for kvantecomputing med særligt fokus på software-aspekter af kvantecomputing. De færdige kandidater vil have kompetencer til at programmere og udvikle software til kvantecomputere. Uddannelsen vil fokusere på praktiske såvel som teoretiske aspekter af programmering og softwareudvikling på kvante-platforme, og de færdige kandidater vil kunne arbejde både med de aktuelt eksisterende platforme såvel som andre platforme, som vil blive udviklet i fremtiden. Som pionerer inden for et nyere teknologisk felt er formålet ligeledes at uddanne kandidater, der kan integrere denne nye software sammen med eksisterende teknologier.

Uddannelsens erhvervssigte

At uddanne programmører og softwareudviklere til kvantecomputere til private og offentlige aktører, der vil benytte kvantecomputere til kommercielle og forskningsmæssige formål. Det forventes, at der vil være en stigende efterspørgsel på disse kandidater, og at uddannelsen vil være unik i Danmark med sit fokus på software-delen af kvantecomputing.

Uddannelses struktur og konstituerende faglige elementer

Uddannelsens struktur

Uddannelsen består af følgende elementer:

- Konstituerende kurser på 60 ECTS
- Valgmoduler på 20 ECTS af et udvalg på 80 ECTS
- Valgfri kurser på 10 ECTS
- Speciale på 30 ECTS

Uddannelsens opbygning indgår i det vedhæftede bilag.

1. semester:

Obligatoriske kurser (30 ECTS):

Introduction to Quantum Computing, 10 ECTS

This course introduces the basics of quantum computing. This includes elements of computer science, mathematics and quantum mechanics. The mathematical formalization of the postulates of quantum mechanics is given. The definitions of qubits, entanglement, quantum gates, universal gate sets and the quantum circuit model are given, and many important examples are analyzed. The principle of quantum supremacy is introduced, and examples where quantum computing gives an exponential speed-up compared to classical computing are studied. In particular, Grover's quantum search algorithm and Shor's factorization algorithm are studied. This course will qualify the students to understand and design quantum computing algorithms via the quantum circuit model, to explain quantum supremacy and to deal with decoherence through error correction. Moreover, this course prepares the students for further studies in quantum computing.

- Introduction to quantum mechanics
- Hilbert spaces, qubit-spaces, entanglement and tensor products
- Quantum circuit model (QCM)
- Grover's quantum search algorithm
- Shor's factorization algorithm
- Introduction error correction

Quantum Information Theory, 10 ECTS

This course introduces the basics of classical and quantum Shannon theory and presents many of the most important results of quantum information theory. This includes a review of basic probability theory. The central quantum unit protocols are defined. The density operator formalism is presented, and the definition of quantum channels is given. Entropy and distance-measures are studied. This course will qualify students to quantify information resources, and to analyze the capacity of a quantum channel to reliably transmit information from a sender to a receiver, and to compare the capacities of classical and quantum channels. Moreover, this course will qualify students for further study in quantum cryptography and quantum key distribution.

- Classical Shannon theory
- Quantum unit protocols
- Quantum Shannon theory

Quantum Computing Platforms, 10 ECTS

This course introduces the central platforms for quantum computing, namely: the quantum circuit model, the continuous variables formalism, the measurement-based formalism, topological quantum computing and quantum tensor networks. This course will qualify students to work with these different platforms, to understand how they compare against each other, and to analyze when a specific problem can be advantageously approached from one of these platforms. Moreover, this course gives students knowledge about existing webservices relevant for computing with these different platforms. In addition to the standard quantum circuit model (which is covered in the course Introduction to Quantum Computing, which is running in parallel with this course), the course covers the following platforms.

- Quantum circuit model
- Continuous variables formalism
- Measurement based formalism
- Topological quantum computing
- Tensor networks

2. semester:

Quantum Algorithms and Programming, 10 ECTS

This mandatory course covers essential algorithms and techniques for programming quantum computers. The course will cover the analysis of quantum algorithms such as Deutsch-Josza's algorithm, Grover's search algorithm, and Shor's factorisation algorithm in terms of complexity and correctness; and techniques such as quantum phase estimation, quantum Fourier transform, QAOA, and quantum annealing; and the ability to implement them all in a state-of-the-art programming language. This course will give students knowledge of a variety of standard quantum algorithms and techniques and enable students to analyse their applicability to concrete problems and compare them to state-of-the-art classical solutions. In addition, students will gain competences to manage computation pipelines on existing (web-based) quantum computing services.

- Examples of quantum algorithms
- Quantum Fourier transform
- Developing quantum algorithms
- Error correction

Quantum Cryptography and Quantum Key Distribution, 10 ECTS

This course introduces the basics of quantum cryptography and quantum key distribution (QKD) protocols for secure and reliable communication over quantum channels. The course develops the central idea that security and privacy of quantum channels is guaranteed by the measurement postulate of quantum mechanics, which implies that an attack of an eavesdropper will alter the system in a detectable way. This gives a security based on the principles of quantum mechanics, which is much stronger than any security based on the assumed computation power of an eavesdropper. Central QKD protocols are presented. Using concepts from quantum information theory, the definitions for security analysis are given, and security of central QKD protocols are proven. This course will qualify students to implement QKD protocols for secure communication, and to use concepts from quantum information theory to analyse and prove the security of such protocols.

- Classical cryptography
- Quantum key distribution protocols
- Security analysis
- Mistrustful quantum cryptography
- Post quantum cryptography

Advanced Quantum Mechanics, 10 ECTS

This course is a graduate level course, which focuses on advanced aspects of quantum mechanics. The course develops the Hilbert space formalism for quantum mechanics, and it covers in detail the concept of entanglement, which is treated with several examples. This course will qualify students to further studies in quantum physics. Furthermore, this course will provide students with important knowledge on the physical aspects of key non-classical phenomena in quantum mechanics, such as entanglement, which are utilized as a resource in quantum computing.

- Hilbert space formalism
- Entanglement
- Symmetries
- Perturbation theory

Quantum Complexity Theory, 10 ECTS

This elective course introduces the area of computational complexity with a particular focus on those aspects that relate to quantum computation. The course will introduce fundamental concepts of classical complexity (such as formal languages; Turing machines; the complexity classes P, NP, and PSPACE; NP-completeness; and polynomial time reductions) before introducing central aspects of quantum complexity (such as quantum Turing machines, the complexity classes BQP and PromiseBQP, PromiseBQP-completeness, and relations to classical complexity classes). This course will enable students to analyse the hardness of computational problems and relate them to other problems, with a particular focus on problems where quantum algorithms give a significant improvement over state-of-the-art classical algorithms.

- Turing machines and complexity classes
- The BQP complexity class
- Examples of BQP complete problems

Categories for Quantum Computing, 10 ECTS

This elective course concerns the use of category theory and categorical methods to understand quantum computing. The course gradually builds up to the standard approach of categorical quantum theory, compact closed categories, by introducing symmetric monoidal categories, linear structures, internal monoids, and Frobenius structures, before introducing compact closed categories, and more advanced topics such as the use to Hopf algebras to characterise complementary bases, the CPM and CP* constructions, and relations to the ZX calculus. During the course, key concepts will be put to use through familiar examples such as quantum teleportation and the Deutsch-Josza algorithm. This course will enable students to quickly and intuitively reason about quantum algorithms and protocols and their correctness, and to relate their knowledge of quantum computation to key topics in theoretical computer science such as logic and programming language theory.

- Compact closed categories and string diagrams
- Frobenius structures
- Hopf algebras and complementarity
- CPM and CP* constructions

Data Mining and Machine Learning, 10 ECTS

This course is an introduction to data mining and machine learning. The aim of the course is to enable the student to choose and use techniques from data mining and machine learning, which is important in regard to being able to analyze large datasets in many financial, medical, commercial, and scientific applications. Data mining and machine learning techniques enable computational systems to identify meaningful patterns in the data and to adaptively improve their performance with experience accumulated from the observed data. This course introduces the most common techniques for performing basic data mining and machine learning tasks, and covers the basic theory, algorithms, and applications. This course balances theory and practice and covers the mathematical as well as the heuristic aspects. Computational learning methods are introduced at a general level, with their basic ideas and intuition. Moreover, the students have the opportunity to experiment and apply data mining and machine learning techniques to selected problems.

- Theory of learning
- Bias and variance
- Training vs. Testing methods (for example rule learning, Bayes learning, nearest neighbor classification, decision trees, clustering)
- Frequent pattern mining

Linear and Integer Programming, 10 ECTS

Linear and integer programming is a field at the intersection between mathematics and computer science that has seen a huge development in the last 60 years. It provides the tools that are at the core of operations research, the discipline that provides analytical methods to aid decision making. The main focus of linear and integer programming is on resource constrained optimization problems that can be described by means of linear inequalities and a linear objective function. These problems may arise in all contexts of decision making, such as manufacturing, logistics, health care, education, finance, energy supply and many others. The subject of the course therefore has an enormous practical relevance. The aim of the course is to enable the student to use mathematical modeling for solving practical optimization problems and to work with a mathematical software system for finding numerical solutions to the applications proposed. To reach these goals the course will provide to the student knowledge on the basics of linear programming and duality theory and on the main solution techniques for linear and integer programming, such as the simplex method, branch and bound and cutting planes.

- Linear programming and the simplex method
- Duality theory
- Integer programming

3. semester:

Obligatoriske kurser (10 ECTS):

Quantum Machine Learning, 10 ECTS

This course introduces the theory of quantum machine learning. It develops the notion that one can fruitfully combine ideas from classical machine learning, high performance computing (HPC) and quantum computing to obtain so-called quantum machine learning algorithms, which in some cases offer an exponential speed-up or advantage over classical algorithms. Many of these rely on Grover's quantum search algorithm and quantum linear algebra. The course focuses primarily on applying quantum learning algorithms to classical data sets, and the course will also introduce elements of classical machine learning. The course presents quantum or classical-quantum hybrid versions of k-nearest neighbour, support vector machines, clustering, pattern recognition and quantum associative memory. This course qualifies the students to use quantum and hybrid machine learning for applications.

- Elements of classical machine learning

- Monte Carlo Simulation, optimisation
- HPC
- Quantum linear algebra
- Classical quantum hybrid learning algorithms: clustering, pattern recognition, classification, tomography and regression, boosting

Valgmodul (10 ECTS), studerende skal vælge 10 ECTS fra følgende kurser:

Quantum Tensor Networks, 10 ECTS

This course introduces the theory of tensor networks (TN) and the graphical calculus developed by Penrose. TN provide an efficient diagrammatic formalism for understanding multilinear algebra and has been used with great success in quantum information theory and quantum many body physics. This course presents the definitions of tensor networks, and, in connection to quantum computing, matrix product states, projected entangled pairs of states and matrix product operators. This course qualifies the students to represent many concepts from quantum computing and quantum information theory efficiently and diagrammatically in the form of tensor networks, and to apply tensor network algorithms. Moreover, the course qualifies the students to work with existing software for implementing TN algorithms, such as Google's TensorFlow.

- Penrose graphical calculus
- Matrix product operators
- Tensor networks and quantum systems

Advanced Continuous Variables Formalism, 10 ECTS

This course gives an in-depth introduction to the continuous variables formalism for quantum computing, as well as an introduction to Gaussian quantum information theory. The definitions of continuous variables systems, Gaussian states and Gaussian operations and dynamics are defined. Examples of continuous variables systems are given. Quantum information protocols such as entanglement generation and quantum key distribution will also be discussed in the CV formalism. The course further addresses continuous variable quantum algorithms and their potential applications to various fields. This course qualifies students to conceptualize and execute computational tasks on continuous variable quantum systems. Students will become proficient in manipulating Gaussian states and will gain the skills necessary to develop and implement quantum algorithms that harness the power of continuous variable systems. This course qualifies the students to work with state-of-the-art quantum computing platforms in the CV formalism (e.g., Gaussian boson sampling and measurement-based quantum computers), offering a tangible edge in the burgeoning field of quantum technology.

- Continuous variables systems
- Gaussian states
- Gaussian operations and dynamics
- Technologies with continuous variables

Advanced Topological Quantum Computing, 10 ECTS

This course gives an in-depth introduction to topological quantum computing. This course develops the idea that fault-tolerant quantum computing can be achieved with the paradigm of topological quantum computing. In this paradigm, fault-tolerance is guaranteed by working with topological quantum systems, in which the dynamics are invariant under small perturbations and noise (usually the source of decoherence), due to the topological nature of the system. The definition of a topological quantum field theory (TQFT) is given, and universality of topological quantum computing is studied using TQFT. Examples of quantum algorithms for solving important problems in topology in mathematics are studied, and an example of a BQP-complete problem arising from topology is included. This course qualifies the students to understand topological quantum computing, topological fault-tolerance, and the close connection to topological quantum matter and TQFT. Moreover, this course qualifies the student to work with webservices relevant for topological quantum computing.

- Anyons and modular tensor categories
- Topological quantum field theory
- Topological quantum computing

Valgfag (10 ECTS), studerende kan vælge mellem:

- Valgfrie kurser (inkl. kurser fra listen oven)
- Virksomhedsprojekt

4. semester:

- Speciale (30 ECTS)

Kompetenceprofil

Uddannelsens formål er at uddanne kandidater med kompetencer til at arbejde med kvantecomputere og kvanteteknologier, og mere specifikt vil færdige kandidater besidde kernekompetencer inden for følgende områder:

1. Programmering af kvantecomputere
2. Design og udvikling af software til kvantecomputere, herunder integrering af kvantebaserede løsninger på eksisterende teknologier
3. Kvantekryptering

Mere specifikt vil færdige kandidater besidde viden om:

- Centrale discipliner, principper og metoder inden for kvantecomputing og kvantekryptering.
- De eksisterende platforme inden for kvantecomputing.
- Software-aspekter af kvantecomputing.
- Kvantevalgoritmer, kvanteprotokoller og praktiske anvendelser heraf.
- Sammenspillet mellem fysik, datalogi, matematik og ingeniørvidenskab indenfor kvantecomputing.
- Litteraturen og den videnskabelige terminologi og tradition indenfor kvantecomputing

Endvidere vil færdige kandidater besidde følgende færdigheder:

- Programmere kvantecomputere og udvikle kvantesoftware inden for de aktuelt eksisterende platforme, samt at implementere kvantealgoritmer og kvanteprotokoller til brug for beregning og kvantekryptering i praksis.
- Foretage sikkerhedsanalyse for en given kvanteprotokol for kvantekryptering.
- Identificere potentielle dekohærens kilder for en given implementeret kvantealgoritme og foretage den nødvendige error-correction.

Endvidere vil færdige kandidater besidde kompetencer til at:

- Redegøre for og kommunikere om kvantecomputing på videnskabelig basis og både skriftligt og mundtligt.
- Identificere beregningsmæssige og eller informationsteoretiske problemer som kan løses med kvantealgoritmer og eller kvanteprotokoller.
- Analysere og vurdere styrker og svagheder ved forskellige kvantealgoritmer og kvanteprotokoller, samt sammenligne med klassiske algoritmer og sikkerhedsprotokoller.
- Tilegne sig ny viden på systematisk og videnskabelig vis om udviklinger inden for kvantecomputing

Begrundet forslag til takstindplacering af uddannelsen

Uddannelsen foreslås indplaceret i takstgruppe 3, hvor kandidatuddannelserne i fysik og datalogi er placeret. Begrundelsen for dette er, at alle kurser indeholder øvelser med behov for adgang til computer-infrastruktur

Forslag til censorkorps

Censorkorps for Datalogi, suppleret med Censorkorps for Matematik og Censorkorps for Fysik

Dokumentation af efterspørgsel på uddannelsesprofil - Upload PDF-fil på max 30 sider. Der kan kun uploades én fil

Arbejdsmarkedsbehovsundersøgelse.pdf

Kort redegørelse for det nationale og regionale behov for den nye uddannelse. Besvarelsen må maks. fylde 1800 anslag

Regeringen har i 2023 lanceret en national strategi for kvanteteknologi med bl.a. fokus på kvanteteknologiens potentiale for erhvervslivet, og strategien tydeliggør behovet for mere kvantetalent i Danmark, herunder nye uddannelsesinitiativer. Kvanteteknologien forventes at udvikle sig hastigt over de kommende år og kan få afgørende betydning på globalt plan inden for bl.a. cybersikkerhed og sikkerhedspolitik, og derfor har NATO for nyligt oprettet et kvanteteknologisk center i Danmark for at være på forkant med den teknologiske udvikling. Derudover kommer kvanteteknologien til at have en stor betydning for Danmarks konkurrenceevne, særligt inden for områder som medicin, finans og klima.

Regeringens ambition er, at Danmark skal være førende inden for kvanteområdet på globalt plan og tiltrække internationale investeringer og kompetencer. På internationalt plan findes flere uddannelser inden for kvanteteknologi, både hardware og software. I det danske uddannelseslandskab eksisterer kun KUs engelske kandidatuddannelse i Quantum Information Science med fokus på hardware-delen. Dette efterlader et hul i det danske marked i forhold til kompetencer inden for kvantesoftware. Derfor er SDUs kandidatuddannelse i kvantecomputing relevant, hvis der skal sikres tværfaglig viden og kompetencer inden for området. De to uddannelser vil således supplere hinanden og bidrage til, at Danmark har forskellige styrkepositioner inden for kvanteteknologien, der dækker både hardware- og software. Uddannelsen udbydes på engelsk bl.a. for at styrke det internationale rekrutteringsgrundlag og sikre kvalificeret arbejdskraft. I SDUs aftagerundersøgelse anbefaler 15 ud af 18 af aftagerne eksplicit, at uddannelsen udbydes på engelsk.

Uddybende bemærkninger

Ovenstående behov kan kun indfries med en ny kandidatuddannelse i kvantecomputing, og ikke med en specialisering inden for henholdsvis datalogi, fysik eller matematik.

Kvanteteknologien er under hastig udvikling, og det ses bl.a. med de aktuelle projekter, der er i gang i Danmark:

Eksempler på rådgivere og anvendere af kvanteteknologi*:

- a. Danske Bank og Energinet – deltager i feltforsøg med kvantekommunikation.
- b. Novo Nordisk – undersøger kvantesimulering og -computing til "drug discovery".
- c. TDC NET – har anvendt kvantealgoritmer til ruteoptimering for serviceteknikere.
- d. KPMG har placeret sin globale kvantehub i Danmark og har fokus på anvendt kvanteteknologi via rådgivning og konsulentydelse.

*Regeringens rapport: National strategi inden for kvanteteknologi – del 2 (september 2023)

<https://em.dk/aktuelt/udgivelser-og-aftaler/2023/sep/national-strategi-for-kvanteteknologi>

Derudover er der allerede en aktuell efterspørgsel på kandidater med kompetencer inden for kvantecomputing, eks. følgende stillingsopslag fra Novo Nordisk, august 2023:

The Quantum Compute Lead Scientist will contribute to the research team's effort towards exploring the evolution and application of quantum computing in clinical development space. As a Quantum Compute Lead Scientist, the ideal candidate will bring scientific understanding, technical depth and experience in developing/implementing novel quantum computing algorithms to solve practical and real-world problems. The Quantum Compute Lead Scientist will, with guidance, contribute toward identifying relevant opportunities for quantum computing in clinical drug development areas, collaborate with internal and external partners, and work closely with engineering and scientific groups to deliver value for drug development initiatives.

Qualifications: In this role you will engage with stakeholders to understand challenges and articulate value from quantum computing in the clinical drug development domain. You will support the implementation and maintenance of local and cloud-based data and computational environments and platforms and help to integrate data and solutions from different sources. A deep understanding of various numerical methods, optimization, classical statistical methods along with modern ML approaches relevant in the Quantum Computing domain is needed. In addition, you also need to have a deep understanding of the physics of quantum computing, choice and robustness of available hardware, and experience with quantum native and hybrid algorithms.

Udover ovenstående aktuelle behov forventes kvanteteknologien at få betydning inden for følgende områder:

Forsvar/sikkerhedspolitik: I overensstemmelse med oprettelsen af NATO-centeret forventes det, at kvantecomputing vil være af central vigtighed for forsvar med anvendelse inden for eksempelvis:

- Kryptering
- Cybersikkerhed
- Sensorer og overvågning
- Simulering af krigsscenerier

Teknologi/Industri: Det forventes, at kvantecomputing vil spille en central rolle blandt de nye kvanteteknologier og vil bidrage til en kraftig acceleration af den teknologiske udvikling og digitalisering. Det forventes, at kvantecomputing eksempelvis vil bidrage til:

- Kryptering og kommunikation

- Forudsigelse af aktiemarkedet og porteføljeoptimering
- Optimering i energisektoren
- Dataanalyse, quantum machine learning og søgning

Ydermere forventes det, at beregningskraften muliggjort af kvantecomputing vil føre til videnskabelige gennembrud i en lang række andre videnskabelige discipliner som benytter kvantitative metoder; såsom

- klimamodellering
- biokemi
- molekylær biologi
- økonomi
- medicin
- samfundsvidenskab

Grundforskning: Forskning i kvantecomputing er en ny videnskabelig disciplin, som er vigtig i sig selv. Denne forskning ligger i krydsfeltet mellem fysik, datalogi og matematik og giver ny viden om, hvordan kvantemekanikkens love kan udnyttes til beregninger og generel processering af information. Denne forskning kaster dermed også nyt lys over samspillet mellem fysik, datalogi og matematik og vil føre til nye videnskabelige gennembrud i disse felter indenfor:

- simulation af kvantesystemer
- forståelsen af topologiske faser
- forskellige aspekter af cybersikkerhed og kommunikation
- kryptering

- kvante- og klassisk informationsteori
- kompleksitetsteori
- algoritmik

Underbygget skøn over det nationale og regionale behov for dimittender. Besvarelsen må maks. fylde 1200 anslag

Vi forventer at uddanne 40 dimittender årligt. Størstedelen af aftagerne tilkendegiver, at de har et aktuelt behov i 2027, og interesseorganisationer og -klynger bekræfter ligeledes, at medlemmerne efterspørger kandidater inden for kvantecomputing. F.eks. bekræfter IBM, der er førende inden for kvanteområdet, at de gerne vil ansætte kandidater fra SDU, og at der er et aktuelt behov. På regionalt plan tilkendegiver for eksempel Energinet, at de vil ansætte i omfanget af 10-15 kandidater, der skal arbejde med opgaver inden for kvantecomputing. Bankdata understreger, at de har svært ved at tiltrække dygtige kandidater til Trekantområdet, og der er markant underskud på kandidater med disse kompetencer i regionen.

Med det politiske fokus på mere kvantetalent i Danmark og kommercialiseringen af kvanteområdet forventes behovet for kandidater inden for kvantecomputing at stige over de kommende år.

Hvilke aftagere har været inddraget i behovsundersøgelsen? Besvarelsen må maks. fylde 1200 anslag

Den samlede behovsundersøgelse består af:

1) Regeringens rapporter: National strategi for kvanteteknologi del I og II (2023)

2) SDUs aftagerundersøgelse består af 1) dialogmøde med IMADAs aftagerpanel med repræsentanter fra KMD, Helsehus, Autorola, Nordfyns Gymnasium og Universal Robots samt 2) en aftagerundersøgelse med 18 interviews med virksomheder, klynger og interesseorganisationer på tværs af brancher i det danske erhvervsliv: IBM, Energinet, COWI, KPMG, Jyske Markets v. Jyske Bank, Novo Nordisk, ATP, Trifork, Bankdata, Cryptomathic, DMI, Kvantify, Ørsted, Dansk Industri, Danish Quantum Community, Technology Denmark, Erhvervshus Fyn og DTU

3) Støtteerklæringer fra Microsoft, IBM, Energinet, Jyske Markets v. Jyske Bank, ATP, Cryptomathic, Erhvervshus Fyn, Bankdata, COWI og Ørsted

Der henvises desuden til behovsundersøgelsen, der er vedlagt som bilag.

Hvordan er det konkret sikret, at den nye uddannelse matcher det påviste behov? Besvarelsen må maks. fylde 1200 anslag

Det påviste behov er konkret sikret ved, at uddannelsen har fokus på:

Kvantesoftware

Der er et konkret behov for en uddannelse inden for kvantecomputing, da kompetencerne er efterspurgt på arbejdsmarkedet, både regionalt og nationalt.

Virksomhedsinddragelse og praksisnær undervisning

Uddannelsen skal have fokus på praksisnær undervisning med virksomhedsinddragelse og konkrete cases.

Erhvervslivets kvante-parathed

Uddannelsen bliver brobygger til erhvervslivet og bidrager til erhvervslivets kvante-parathed. Dette formål understøttes desuden også af SDU Quantum Hub.

Kvanteteknologi er et internationalt område

I SDUs aftagerundersøgelse anbefaler 15 ud af 18 af aftagerne eksplicit at udbyde uddannelsen på engelsk for bl.a. at styrke det internationale rekrutteringsgrundlag og sikre kvalificeret arbejdskraft.

Revidering af uddannelsens indhold

Flere af aftagerne har efterspurgt, at uddannelsen også indeholder emner inden for post quantum cryptography, optimeringsprocesser, Monte Carlo-simuleringer samt high-performance computing (HPC). Det er nu tilføjet i uddannelsens obligatoriske kurser Quantum Machine Learning og Quantum Cryptography and Quantum Key Distribution

Beskriv ligheder og forskelle til beslægtede uddannelser, herunder beskæftigelse og eventuel dimensionering. Besvarelsen må maks. fylde 1200 anslag

Der eksisterer ingen kandidatuddannelse i Danmark inden for kvantecomputing, som primært fokuserer på software-aspektet. Kandidatuddannelsen i kvantecomputing er en tværfaglig uddannelse, der kombinerer elementer fra fysik, datalogi og matematik til at træne kandidater i at udvikle software til kvantecomputere. Uddannelsen adskiller sig således signifikant fra kandidatuddannelser i fysik, datalogi og matematik. Desuden er Quantum Computing nu etableret som en selvstændig videnskab, og der vil blive udbudt flere kurser, der ikke kan reduceres til matematik, fysik eller datalogi.

Kandidatuddannelsen i kvantecomputing adskiller sig også betydeligt fra den nyligt godkendte kandidatuddannelse i kvanteinformationsvidenskab på KU, som har fokus på ingeniør- og hardwaremæssige aspekter af kvantecomputere, men ikke på softwareaspekter. Derudover er KUs uddannelse i kvanteinformationsvidenskab forankret på Fysik og SDUs på Datalogi.

Uddybende bemærkninger

Det forventes, at kandidater inden for kvantecomputing i høj grad vil finde beskæftigelse i den nye branche af private virksomheder, som arbejder med kvanteteknologi. Til sammenligning vil kandidater i fysik, datalogi og matematik finde beskæftigelse inden for en bred række af traditionelle brancher, såsom undervisning, finans, it, produktion, statistik og forskning. Der er lav dimittendledighed inden for disse områder, og kompetencerne er efterspurgt i erhvervslivet. På internationalt plan findes der kandidatuddannelser inden for kvantecomputing, bl.a. i Holland, Tyskland, Spanien og Grækenland og derudover udbydes der ph.d. og onlinekurser i USA.

Disse er angivet i bilaget i afsnittet "Andre uddannelser inden for kvantecomputing".

Beskriv rekrutteringsgrundlaget for ansøgte, herunder eventuelle konsekvenser for eksisterende beslægtede udbud. Besvarelsen må maks. fylde 1200 anslag

Rekrutteringsgrundlaget er danske og internationale universitetsstuderende med en bachelorgrad inden for fysik, matematik eller datalogi. Det forventes, at uddannelsen vil appellere til studerende med et ønske om at arbejde inden for den hurtigt voksende industri, der beskæftiger sig med kvanteteknologi. Uddannelsen har et unikt fokus på software til kvantecomputere i dansk sammenhæng og forventes ikke at have en negativ betydning for optaget på kandidatuddannelserne i fysik, matematik eller datalogi. Derimod forventes det, at kandidatuddannelsen i kvantecomputing vil føre til et øget optag på de danske adgangsgivende bacheloruddannelser inden for fysik, matematik og datalogi.

Beskriv kort mulighederne for videreuddannelse

Der vil være mulighed for videreuddannelse i form af ph.d. og erhvervs-ph.d. samt forskningsforløb i nationale såvel som internationale virksomheder.

Forventet optag på de første 3 år af uddannelsen. Besvarelsen må maks. fylde 200 anslag

Vi forventer et optag på 25 studerende det første år og et stadigt optag på 40 studerende derefter.

Hvis relevant: forventede praktikaftaler. Besvarelsen må maks. fylde 1200 anslag

Ikke relevant.

Øvrige bemærkninger til ansøgningen

Nedenfor opremses en række nationale og internationale projekter og initiativer inden for kvantecomputing, alle involverende Centre for Quantum Mathematics (QM) under Institut for Matematik og Datalogi, SDU, som vil bidrage med en positiv synergieffekt til kandidatuddannelsen i kvantecomputing, og som forventes øge rekrutteringen samt at give muligheder for udvekslingsaftaler.

Projekter og internationale samarbejder indenfor kvantecomputing: QM har lanceret projektet "QM Quantum Computing Initiative", som involverer en række kvantecomputing-samarbejder med udenlandske og danske aktører, både offentlige og private.

Dette involverer følgende:

- “Scalable Continuous Variable Cluster State Quantum Technologies” (Clustec), et projekt finansieret af Horizon Europe, og som består i et samarbejde imellem
 - o QM (SDU)
 - o Johannes Gutenberg-Universität Mainz
 - o Sorbonne Université
 - o Heidelberg University
 - o Palacky University Olomouc
 - o The French National Centre for Scientific Research (CNRS)
 - o Q.ANT GmbH
 - o Center for Electronics and Microtechnology (CSEM)
 - o Danmarks Tekniske Universitet (DTU).

- “Quantum Computing for Clinical research”. Dette er et projekt finansieret af DIAS og Region Syd, og som består i et samarbejde mellem
 - o QM (SDU)
 - o OUH
 - o Institut for Sundhedstjenesteforskning (SDU)

- “Danish Quantum Infrastructure Project”. Dette projekt er finansieret af en bevilling fra EU-DIGITAL-QCI. Projektets målsætning er etableringen af et kvante-internet mellem fire danske myndigheder i København, to data-centre i København og DTU, KU og SDU. Dette samarbejde involverer et konsortium bestående af danske myndigheder, ministerie, DTU, KU, SDU og en række nationale og internationale private aktører.

- “Quantum Computing for Modelling Climate”. Dette er et samarbejde imellem
 - o QM (SDU)
 - o Dansk Meteorologisk Institut
 - o SDU Climate Cluster

- Qpurpose: Denne virksomhed er en spin-off af QM, som leverer konsulentvirksomhed inden for kvantecomputing-løsninger. Nuværende partnere/kontrakter involverer bl.a.:
 - o Ørsted
 - o ATP
 - o Jyske Bank
 - o Kamstrup
 - o Novo Nordisk
 - o MSCI

Hermed erklæres, at ansøgning om prækvalifikation er godkendt af institutionens rektor

Ja

Status på ansøgningen

Indsendt

Ansøgningsrunde

2024-1

Afgørelsesbilag - Upload PDF-fil

Samlet godkendelsesbrev - Upload PDF-fil

Bilag til prækvalifikationsansøgning for kandidat i kvantecomputing

November 2023

Udarbejdet af AC-fuldmægtig Camilla Katrine Hollmann, camkat@sdu.dk,
Det Naturvidenskabelige Fakultetssekretariat, SDU

Indhold

01	UDDANNELSENS INDHOLD OG OPBYGNING	3
02	ANDRE UDDANNELSER INDEN FOR KVANTECOMPUTING	4
03	BEHOVSUNDERSØGELSE	5
	RESUME	5
	ANBEFALINGER OG POINTER FRA SDUs AFTAGERUNDERSØGELSE (2023).....	7
	METODE	9
	<i>National strategi for kvanteteknologi - del 1 og 2</i>	<i>9</i>
	<i>SDUs aftagerundersøgelse 2023</i>	<i>13</i>
	RESULTATER.....	15
	1. <i>Kvanteteknologiens potentiale på tværs af brancher i det danske erhvervsliv</i>	<i>15</i>
	2. <i>Behov for kandidater inden for kvantecomputing med kompetencer inden for software</i>	<i>17</i>
	3. <i>Uddannelsens indhold, sammensætning og sprog</i>	<i>23</i>
	STØTTEERKLÆRINGER.....	29
	REFERENCER	30

01 Uddannelsens indhold og opbygning

4. semester	Speciale (30 ECTS)		
3. semester	Quantum Machine Learning (10 ECTS)	Valgmodul (10 ECTS)	Valgfag (10 ECTS)
2. semester	Quantum Cryptography and Quantum Key Distribution (10 ECTS)	Quantum Algorithms and Quantum Programming (10 ECTS)	Valgmodul (10 ECTS)
1. semester	Introduction to Quantum Computing (10 ECTS)	Quantum Computing Platforms (10 ECTS)	Quantum Information Theory (10 ECTS)

Valgmodul – 2.semester:

Et af følgende kurser vælges:

- Advanced Quantum Mechanics, 10 ECTS
- Quantum Complexity Theory, 10 ECTS
- Categories for Quantum Computing, 10 ECTS
- Data Mining and Machine Learning, 10 ECTS
- Linear and Integer Programming, 10 ECTS

Valgmodul – 3.semester:

Et af følgende kurser vælges:

- Quantum Tensor Networks, 10 ECTS
- Advanced Continuous Variables Formalism, 10 ECTS
- Advanced Topological Quantum Computing, 10 ECTS

Valgfag – 3.semester:

- Valgfrie kurser (inkl. kurser fra listen oven)
- Virksomhedsprojekt, 10 ECTS

02 Andre uddannelser inden for kvantecomputing

Listen nedenfor viser forskellige internationale uddannelsesstilbud inden for kvantecomputing. Listen er ikke udtømmende.

Uddannelsesstilbud
<p>Holland – Kandidat: MSc, Quantum Information Science and Technology, Technische Universitet Delft, https://www.tudelft.nl/onderwijs/opleidingen/masters/qist/msc-quantum-information-science-technology</p>
<p>USA - Kandidat Quantum Hardware/Software Track, Duke ECE https://ece.duke.edu/masters/study/quantum-computing</p>
<p>Tyskland - Kandidat MSc High Performance Computing/Quantum Computing, Deggendorf Institute of Technology, https://www2.daad.de/deutschland/studienangebote/international-programmes/en/detail/7744/#tab_overview</p>
<p>Spanien - Kandidat <i>Masters degree in Quantum Computing, Nebrija University</i> https://www.nebrija.com/en/postgraduate-degree/master/quantum-computing/#Principal</p>
<p>USA – ph.d. University of Southern California, https://sites.usc.edu/cqist/</p>
<p>USA – ph.d IQIM, Caltech https://iqim.caltech.edu/classes/</p>
<p>USA - Online Quantum Computing Fundamentals, MIT, https://learn-xpro.mit.edu/quantum-computing?utm_medium=ppc&utm_source=google&utm_campaign=qcx&utm_term=mit%20quantum%20computing&utm_content=aw-a&utm_term=mit%20quantum%20computing&utm_campaign=Quantum+Computing+Program+-+xPRO+-+A+-+AW+Lead+Gen+-+Run+14+-+2T2023+NEW&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2285614976&hsa_cam=19681427239&hsa_grp=146240837659&hsa_ad=647908863285&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-470306591488&hsa_kw=mit%20quantum%20computing&hsa_mt=p&hsa_net=ad-words&hsa_ver=3&qad_source=1&qclid=EAlaIqobChMIwsKjkarEggMVt5NoCR2poAh2EAAYASAAEgJFxd_BwE</p>
<p>Grækenland - Kandidat MSc in Quantum Computing and Quantum Technologies, Democritus University of Thrace https://quantum.ee.duth.gr/</p>

03 Behovsundersøgelse

Denne arbejdsmarkedsbehovsundersøgelse består af:

- 1) Erhvervsministeriets rapporter "National strategi for kvanteteknologi" - del 1+2 (2023)
- 2) SDUs aftagerundersøgelse (2023)
- 3) Støtteerklæringer fra relevante aftagere

Ovenstående skal belyse, at der er samfundsmæssig relevans og et politisk fokus på kvanteområdet, et aktuelt behov kandidater inden for kvantecomputing på både regionalt og nationalt plan samt et konkret behov for en engelsksproget uddannelse.

Resume

Konklusion

I september 2023 har regeringen lanceret en national strategi for kvanteteknologi med fokus på kvanteteknologiens potentiale for dansk erhvervsliv og behovet for at fremtidssikre talentudviklingen med tværfaglig viden og kompetencer på området. Regeringens ambition er, at Danmark skal være førende inden for kvanteområdet på globalt plan og i fremtiden kan tiltrække internationale investeringer og kompetencer.

Til trods for at Danmark har stærke videregående uddannelser med relevans for kvanteområdet inden for fysik, kemi, nanoscience, fotonik, matematik og datalogi, er der en skærpet international konkurrence om de bedste talenter til at forske i og udvikle kvanteteknologi. Derfor er der et behov for at fremtidssikre talentbasen i Danmark ved at udvikle, tiltrække og fastholde talent og kompetencer.

På internationalt plan findes flere uddannelser inden for kvanteteknologi, både hardware og software. I det danske uddannelseslandskab eksisterer kun KUs kandidatuddannelse i Quantum Information Science med fokus på hardware. Dette efterlader et hul i det danske marked i forhold til kompetencer inden for kvantesoftware, og derfor er SDUs kandidatuddannelse i kvantecomputing relevant, hvis der skal sikres tværfaglig viden og kompetencer inden for software-området. De to uddannelser vil således supplere hinanden og bidrage til, at Danmark har forskellige styrkepositioner inden for kvanteteknologien, der dækker både hardware- og software.

Konklusion i forhold til regionalt og nationalt behov

SDUs aftagerundersøgelse bekræfter, at der er et konkret behov, både regionalt og nationalt, og at SDUs kandidatuddannelse i kvantecomputing imødekommer behovet i indhold

og dermed sikrer de kompetencer, der er efterspurgt på arbejdsmarkedet og bidrager til kvanteteknologiens potentiale i erhvervslivet. Særligt aftagere fra Trekantområdet udtrykker et stærkt behov for kandidater med disse kompetencer.

I forhold til uddannelsens fokus på software-aspektet, bekræfter 17 ud af 18 af aftagerne, at det er et relevant område, og kompetencerne er efterspurgt på arbejdsmarkedet. Flere af aftagerne påpeger vigtigheden af, at de danske universiteter opretter uddannelser inden for kvanteområdet, og det ses som positivt, at SDU fokuserer på software, og at KU/DTU fokuserer på hardware.

Aftagerne opfordrer SDU til at have fokus på at skabe en uddannelse, der bygger bro til erhvervslivet med virksomhedsinddragelse og konkrete cases. Derudover er det vigtigt, at undervisningen er praksisnær, så kandidaterne kan et håndværk, når de kommer ud på arbejdsmarkedet og dermed kan anvende viden om kvantesoftware, både i forhold til eksisterende og nye teknologier.

Flere af aftagerne påpeger usikkerheden omkring udviklingen af kvanteteknologien, og hvornår der vil være et aktuelt behov for at ansætte kandidater med denne profil. Aftagernes konkrete behov for kandidater afspejler sig også i, hvor kvanteparate virksomhederne er. Denne aftagerundersøgelse bekræfter, at det særligt er store virksomheder og startups, der er i gang på området. Små og mellemstore virksomheder samt den offentlige sektor vil komme med senere på de modne use-cases, eksempelvis når der er udviklet kvantebaserede cloudløsninger.

Dog er kompetencerne inden for matematik, datalogi og fysik efterspurgt på arbejdsmarkedet og med en lav dimittendledighed inden for disse områder, er der ingen bekymringer for, om kandidaterne kommer i ansættelse. Derudover bekræfter en væsentlig del af aftagerne, at der vil være et stigende behov for kandidater på området inden for de kommende år, da kandidaterne skal bidrage til kvanteteknologiens udvikling og sikre teknologiens fordele og dermed erhvervslivets kvanteforståelse og -parathed, der tilsammen højner erhvervslivets konkurrenceevne.

På følgende sider præsenteres de vigtigste anbefalinger og pointer fra SDUs aftagerundersøgelse, hvor ledere og nøglepersoner på tværs af brancher i det danske erhvervsliv har bidraget med perspektiver til udvikling af uddannelsen i kvantecomputing.

Anbefalinger og pointer fra SDUs aftagerundersøgelse (2023)

Aftagernes anbefalinger og pointer er sammenfattet i følgende temaer:

1) Mere kvantetalent i Danmark – Et konkret behov for kandidater inden for kvantecomputing

Størstedelen af aftagerne bekræfter, at der er behov for kandidaterne inden for kvantecomputing med kompetencer inden for software. Herunder at det særligt er vigtigt med matematisk forståelse og praktiske færdigheder inden for simpel programmering. Flere af aftagerne efterspørger kandidater, der kan hjælpe dem med udviklingen inden for kvanteområdet, og udtrykker et behov for kandidater, der har kan navigere og har forståelse for både klassisk computerteknologi og kvanteteknologi. De samme aftagere anser denne kombinationen af kompetencer som særlig værdifuld.

Både på regionalt og nationalt plan udtrykker klynger og interesseorganisationer vigtigheden af, at de danske universiteter uddanner kandidater inden for kvanteområdet, da der i takt med teknologiens udvikling skal uddannes dimittender til at hjælpe erhvervslivet med integration af kvanteteknologien, og derfor vil der komme en stigende efterspørgsel på denne type kandidater.

2) Virksomhedsinddragelse og praksisnær undervisning

Størstedelen af aftagerne fremhæver vigtigheden af, at uddannelsen ikke bliver for teoretisk, men det er vigtigt, at kandidaterne kan et håndværk, når de kommer på arbejdsmarkedet, og derfor skal der være fokus på praksisnær undervisning. Derudover skal uddannelsen sikre, at kandidaterne har fokus på problemløsning og en innovativ tilgang med et erhvervsrettet fokus. Med et praksisnært og erhvervsrettet uddannelsesfokus får kandidaterne kompetencer til konkret problemløsning, da virksomhederne oftest arbejder i komplekse kontekster.

3) Uddannelsens indhold og sammensætning

Størstedelen af aftagerne bekræfter, at uddannelsens indhold imødekommer behovet for de kompetencer, som arbejdsmarkedet efterspørger. Særligt påpeger aftagerne første semesters indhold som relevant, og derudover er valgmodulet på 2.semester særligt interessant for aftagerne i forhold til emnerne inden for bl.a. data mining og maskinlæring samt lineær- og heltalsprogrammering.

Derudover anbefaler flere af aftagerne, at områder inden for post quantum kryptografi, optimeringsprocesser og Monte Carlo-simuleringer samt high-performance computing (HPC) tilføjes til uddannelsen, da disse områder bl.a. vil øge erhvervslivets konkurrenceevne.

4) En engelsksproget uddannelse – det internationale perspektiv

I SDUs aftagerundersøgelse anbefaler 16 ud af 18 af aftagerne eksplicit at udbyde uddannelsen på engelsk. Flere af aftagerne ser det som positivt, at uddannelsen udbydes på engelsk, da kandidaterne vil indgå i internationale teams eller have tætte internationale samarbejdspartnere, som er særligt kendetegnet inden for tech-branchen og kvanteområdet. Derudover vil det være en fordel for de studerende, at de lærer vokabularet på engelsk, og dermed får evnen til indgå i faglige diskussioner på engelsk. Flere af aftagerne påpeger også, at SDU kan tiltrække attraktive internationale studerende og dygtige undervisere fra udlandet, hvis uddannelsen udbydes på engelsk.

Enkelte af aftagerne påpeger dog, at det ikke har betydning for en fremtidig ansættelse, om uddannelsen udbydes på dansk eller engelsk.

5) Brug for en hel uddannelse med et højt fagligt niveau

Flere af aftagerne bekræfter, at det er positivt, at uddannelsen udbydes som en hel uddannelse og ikke som specialisering eller profil i en eksisterende uddannelse. Aftagerne bemærker, at der er faglig dybde og kvalitet i uddannelsen i forhold til indhold og sammensætning og ser det som positivt, at uddannelsen har et højt niveau, da der er efterspørgsel på dygtige talenter inden for kvanteområdet. Derudover er det positivt at uddannelsen er tværfaglig med elementer fra datalogi, fysik og matematik.

6) De studerende skal have samme forudsætninger - et fælles fagligt fundament

En væsentlig del af aftagerne gør SDU opmærksom på, at de studerende kommer med forskellige bachelorbaggrunde, og det skal sikres, at de studerende har samme forudsætninger og et fælles, fagligt fundament i forhold til den videre faglige progression. Dette omhandler særligt kernekompetencer inden for matematik og programmering.

7) Uddannelsen skal bidrage til erhvervslivets kvanteparathed

Flere af aftagerne tydeliggør, at uddannelsen har en vigtig rolle i forhold til at skabe opmærksomhed omkring kvanteområdet. Særligt ved at sætte fokus på, hvordan erhvervslivet drager fordelene af denne nye teknologi i et forretningsperspektiv. Derfor vil dimitterende blive brobyggere til erhvervslivet og dermed bidrage til erhvervslivets kvanteparathed og dermed indfri kvanteteknologiens potentiale inden for software.

Med ovenstående anbefalinger og pointer har SDU revideret uddannelsens indhold og har fået bekræftet nogle særlige fokuspunkter, der skal forankres i uddannelsen:

Revision af uddannelsens indhold efter aftagernes anbefalinger og pointer

I forhold til uddannelsens indhold, så efterspørger flere af aftagerne emner inden for post-quantum cryptography, optimeringsprocesser, Monte Carlo-simuleringer samt high-performance-computing (HPC). Disse områder er nu tilføjet og indgår i kurserne Quantum Machine Learning og Quantum Cryptography and Quantum Key Distribution.

Derudover påpeger aftagerne vigtigheden af, at der er fokus på tværfagligheden, og der skal sikres et fælles, fagligt fundament. Dette er allerede tænkt ind i uddannelsen, hvor de studerende bl.a. skal samarbejde på projekter på tværs af fagligheder på første semester. Uddannelsen vil udarbejde nogle anbefalinger i forhold til valgmodulerne, der sikrer, at kandidaterne opnår de rette kompetencer alt efter hvilken bachelorbaggrund, de kommer med.

Endelig har SDU fået bekræftet, at undervisningen skal være praksisnær. Dette er allerede tænkt ind, og der vil bl.a. sikres adgang til kvanteplatforme, således de studerende kan øve de praktiske færdigheder, som efterspørges af aftagerne.

I forbindelse med interviewene tilbød flere af aftagerne at bidrage med konkrete cases og vil gerne inviteres ind i undervisningen for at præsentere reelle problemstillinger. Derudover er flere af aftagerne interesseret i at indgå samarbejde omkring virksomhedsprojekter og speciale. Med oprettelsen af [SDU Quantum Hub](#) og [QPurpose](#), som spin-off fra SDU, er der allerede en tilknytning til erhvervslivet. SDU vil efter aftagernes anbefalinger have et øget fokus på virksomhedsinddragelse og brobygning mellem uddannelsen og erhvervslivet.

Med ovenstående justeringer imødekommer SDUs uddannelse i kvantecomputing arbejdsmarkedets og aftagernes behov i forhold til indhold og kompetencer.

Metode

I de følgende afsnit præsenteres hovedpointerne fra regeringens rapporter "National strategi for kvanteteknologi" for at belyse samfundsmæssig og politisk relevans i forhold til udvikling og implementering af kvanteteknologi, herunder kvanteteknologiens kommercielle potentiale samt behovet for mere kvantetalent i Danmark.

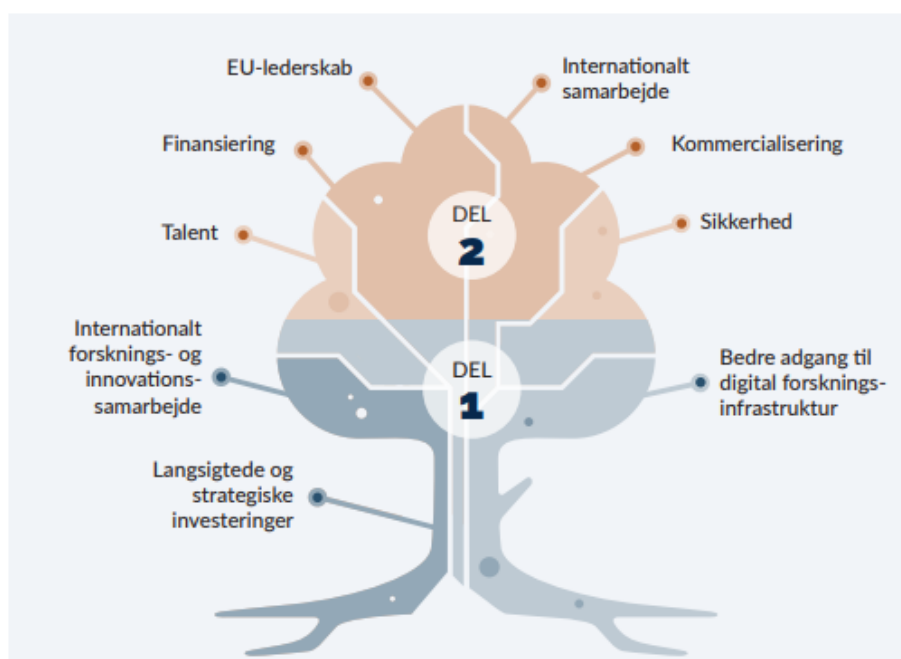
National strategi for kvanteteknologi - del 1 og 2

I juni 2023 har regeringen lanceret "Strategi for kvanteteknologi – del 1 – Forskning og innovation i verdensklasse", der fokuserer på kvanteforskning og den videnbaserede innovation. Målsætningen er, at Danmark skal have et af verdens førende kvanteforskningsmiljøer og effektivt kan omsætte forskning til ny, anvendelig teknologi. Dette skal bidrage med at styrke Danmarks internationale position i den globale konkurrence om udvikling af kvanteteknologi og muligheden for at tiltrække internationale investeringer og kompetencer. Derudover påpeger strategien også at kvanteteknologien medfører store

risici, især for dem, der ikke følger med, og derfor er det nødvendigt med store og målrettede investeringer på området. (1)

I september 2023 blev strategiens del 2 lanceret. Denne del af strategien har bl.a. fokus på at styrke det danske økosystem inden for kvanteteknologi og understøtte udvikling, kommercialisering og anvendelse af kvanteteknologi i Danmark.

Nedenstående oversigt viser sammenhængen mellem strategiens del 1 og 2:



Figur 1: Sammenhæng mellem del 1 og 2 – National Strategi for kvanteteknologi del 2 (2)

Regeringens ambition – det kommercielle potentiale skal udnyttes

Danmark har allerede en ledende rolle inden for forskning i kvanteteknologi, og dette giver mulighed for at indfri nogle af kvanteteknologiernes potentialer. Regeringens ambition er, at Danmark skal udnytte det kommercielle potentiale i kvanteteknologi til gavn for dansk erhvervsliv og sikkerhed. Der er med finansloven for 2023 afsat 212 mio. kr. til forskning og innovation inden for kvanteområdet. Det vil i perioden 2023-2027 betyde en prioritering på 1 mia. kr. til forskning og innovation inden for kvanteområdet. Derudover prioriterer regeringen yderligere 200 mio. kr. fra 2024-2027 til at styrke kommercialisering, sikkerhed og internationalt samarbejde. (2)

For at styrke Danmarks konkurrenceevne skal den forskningsmæssige styrkeposition udvikles til også at være en erhvervsmæssig styrkeposition. (2)

Udbredelse af kendskabet til teknologiens anvendelsesmuligheder

Kvanteteknologi er endnu i den tidlige modenhedsfase, og de aktive virksomheder på området er hovedsageligt opstået fra spin-outs fra universiteterne. En vigtig del af arbejdet er at udbrede kendskabet til teknologiens anvendelsesmuligheder. Der er derfor brug for videndeling og tydeliggørelse af kvanteteknologiens anvendelsesmuligheder. Dette er nødvendigt for at kunne sætte tempo på kommercialiseringen af kvanteteknologi. (2)

Mere kvantetalent i Danmark

Danmark har stærke videregående uddannelser med relevans for kvanteområdet inden for særligt fysik, kemi, nanoscience, fotonik, matematik og datalogi, men med en skærpet international konkurrence om de bedste talenter til at forske i og udvikle kvanteteknologi, er der behov for at fremtidssikre talentbasen i Danmark ved at udvikle, tiltrække og fastholde talent og kompetencer. (2) Derfor igangsætter regeringen følgende tiltag:

- Der etableres i 2024 en pulje, hvorfra de videregående uddannelsesinstitutioner kan få tilskud til udvikling af nye uddannelsestilbud og -forløb samt undervisningsmateriale inden for kvanteområdet.
- Der etableres desuden en international sommerskole i Danmark for talentfulde studerende inden for kvanteområdet. Det skal dygtiggøre danske studerende igennem samspillet med internationale studerende, understøtte interessen for dansk kvanteforskning samt åbne muligheder i dansk erhvervsliv for talentfulde internationale studerende.
- Mulighederne for at øge optaget af internationale studerende på kandidatniveau afsøges, herunder inden for kvanteområdet, fx fysik, kemi, nanoscience, fotonik, matematik og datalogi.

Der er behov for at fremtidssikre talentudviklingen på området samt imødekomme et stigende behov for tværfaglig viden og kompetencer for at kunne lykkes med kvanteteknologi – både hos uddannelses- og forskningsinstitutioner og i erhvervslivet. (2)

Nedenstående oversigt viser initiativer og indsatsområder inden for kvanteområdet.(2)

Oversigt over initiativer



INDSATSOMRÅDE 1:

Kommerialisering af kvanteteknologi

1

Quantum House Denmark

2

Etablering af kvantefond

3

Aktivere de danske styrkepositioner i kvanteteknologi gennem use-cases og demonstrationsprojekter

4

Mere kvantetalent i Danmark

5

Nationalt forum for kvanteteknologi – fortsættelse fra del 1



INDSATSOMRÅDE 2:

Sikkerhed som fundament i den danske kvanteteknologiske udvikling

6

Styrke Danmarks kritiske digitale infrastruktur mod truslen fra kvanteteknologier

7

Øget sikkerhed i det danske kvantemiljø

8

Effektiv regulering og beskyttelse af kvanteteknologi



INDSATSOMRÅDE 3:

Fremme af danske kvanteinteresser internationalt

9

Danmark i en ledende rolle i udvikling af kvanteteknologi i Europa

10

International kvantehub skal løfte Danmarks strategiske kvantepartnerskaber

11

Dansk aftryk i international standardisering på kvanteområdet

SDUs aftagerundersøgelse 2023

Metode

I efteråret 2023 har SDU udført en bred aftagerundersøgelse på tværs af brancher, hvor ledere og nøglepersoner er blevet interviewet for at undersøge, om der er et regionalt og nationalt behov for kandidater inden for kvantecomputing i det danske erhvervsliv.

I aftagerundersøgelsen indgår virksomheder fra både den private og offentlige sektor samt klynger og interesseorganisationer. Grundet kvanteteknologiens modenhed er det primært større virksomheder og interesseorganisationer, der indgår i undersøgelsen.

IMADAs aftagerpanel – November 2023

Repræsentanter fra: KMD, Hesehus, Autorola, Nordfyns Gymnasium og Universal Robots deltog på mødet.

På et dialogmøde er aftagerpanelet, der er tilknyttet institut for Matematik og Datalogi (IMADA) blevet præsenteret for uddannelsen i kvantecomputing. Aftagerpanelet er positive omkring oprettelse af uddannelsen og bekræfter, at der er et behov for kompetencerne, særligt med et tværfagligt fundament inden for matematik, fysik og datalogi. Aftagerpanelet belyser vigtigheden af, at der i uddannelsen er fokus på at sammenligne klassiske algoritmer og kvantealgoritmer, så kandidaterne får kendskab til fordele og begrænsninger inden for kvanteteknologien.

Aftagerpanelet påpeger, at det er vigtigt med tydelighed omkring, hvad det er for en type af opgaver, kandidaterne uddannes til at løse i erhvervslivet. Der er stor usikkerhed på, hvornår kvanteteknologien er klar, og hvad det er for et erhvervsliv, kandidaterne kommer ud i. Aftagerpanelet bekræfter dog, at trods usikkerhed om erhvervslivets kvanteparathed, vil der være stillinger til kandidaterne i forhold til de opnåede kompetencer, særligt med den matematiske forståelse og det tværfaglige aspekt i uddannelsen med elementer fra datalogi, fysik og matematik.

Derudover opfordrer panelet til, at man på nationalt plan vækker de studerendes interesse for kvanteområdet tidligt, og det kan særligt være interessant at integrere i undervisningen i gymnasiet.

Udover at være i dialog med IMADAs aftagerpanel har SDU foretaget interviews med 18 forskellige virksomheder, klynger og organisationer:

Virksomheder – offentlige og private

- IBM
- Energinet (regional)
- COWI
- KPMG
- Jyske Markets v. Jyske bank (regional)

- Novo Nordisk
- ATP
- Trifork
- Bankdata (regional)
- Cryptomathic (grundlægger)
- DMI
- Kvantify
- Ørsted (regional)

Interesseorganisationer, klynger og øvrige interessenter

- Dansk Industri (DI)
- Danish Quantum Community (DQC)
- Technology Denmark
- Erhvervshus Fyn
- DTU (Vice-studieleder for Master in Quantum Information Science-DTU/KU)

Interviewene er dialogbaserede og udføres med en semistruktureret tilgang, hvor aftagere forinden præsenteres for en interview-informationsguide.

Nedenstående spørgsmål danner rammen for interviewet:

- **Hvordan vil kvanteteknologi skabe værdi for din virksomhed/organisation?**
- **Hvad er din umiddelbare reaktion på en kandidatuddannelse i kvantecomputing?**
 - Hvad tænker du om SDUs specifikke fokus på software-delen?
 - Vil du overveje at ansætte en kandidat med denne profil?
 - Hvordan vurderer du behovet for dimittender af denne type om 5-10 år i jeres organisation?
- **Hvad tænker du om udkastet til uddannelsens sammensætning?**
 - Er der noget, der skal fylde mere eller mindre i uddannelsen, så en kandidat med denne profil får job i din virksomhed?
 - Hvad tænker du om, at vi udbyder uddannelsen i kvantecomputing på engelsk? Hvilke styrker ser du, der er i en engelsksproget uddannelse i forhold til jeres virksomhed/organisation?

Aftagere, der repræsenterer en interesseorganisation eller klynge, har forholdt sig til medlemmernes behov og arbejdsmarkedet generelt.

Støtteerklæringer

Efter interviewene er udvalgte aftagere blevet spurgt, om de vil give en støtteerklæring til oprettelse af SDUs kandidatuddannelse i kvantecomputing. Microsoft har ikke deltaget i et interview. Støtteerklæringerne findes på side 29.

Resultater

Dette afsnit af aftarerapporten er baseret på interviews med i alt 18 forskellige virksomheder, klynger og interesseorganisationer.

Som tidligere nævnt er interviewene dialogbaserede, og derfor går de forskellige interviews i mindre grad i forskellige retninger i forhold til, hvad der er relevant for den enkelte virksomhed. Derfor er det heller ikke alle spørgsmål, der indgår i dialogen. Svarene med disse nuancer er afspejlet i de udvalgte udtalelser fra aftagerne.

Resultaterne fra aftageundersøgelsen er kategoriseret i hhv. 1) Kvanteteknologiens potentiale på tværs af brancher i det danske erhvervsliv 2) Behovet for kandidater inden for kvantecomputing med kompetencer inden for software samt 3) Uddannelsens indhold, sammensætning og sprog.

1. Kvanteteknologiens potentiale på tværs af brancher i det danske erhvervsliv

Aftagerne har forholdt sig til, om de vurderer, at kvanteteknologien kommer til at skabe værdi for virksomheden. Dette er bl.a. med til at afklare virksomhedernes kvanteparathed i forhold til implementering af kvanteteknologi samt for at undersøge kvanteteknologiens potentiale på tværs af danske brancher.

Nedenstående viser en opsummering af de områder, som aftagerne har nævnt eksplicit i interviewene:

- Optimeringsprocesser (Energinet, Novo Nordisk, Trifork, Ørsted, DMI)
- Risikoanalyser- og modelleringer (ATP, Ørsted, Bankdata)
- Beregningskraft og databehandling (Energinet, DI, Novo Nordisk, Jyske Markets, COWI, Ørsted, DMI)
- Modelleringer og simuleringer (Novo Nordisk, Energinet, Bankdata, DMI)
- Beskyttelse og kryptering (Trifork, Bankdata)
- Øge konkurrenceevnen (DI, Novo Nordisk, Jyske Markets)
- Logistik (Novo Nordisk)

Delkonklusion

Aftagerne bekræfter, at kvanteteknologien kommer til at have en betydning på tværs af brancher, og at der allerede er en nysgerrighed og opmærksomhed på området. Derudover tydeliggør udtalelserne, at der er stor forskel på, hvor kvanteparate virksomhederne er, og det danske erhvervsliv generelt. Der er dog ingen af aftagerne, der betvivler, at kvanteteknologien får betydning for erhvervslivet. Det er dog primært usikkerheden omkring, hvornår det sker i forhold til bl.a. udviklingen af kvantehardware samt behovet for at se use-cases, der er relevante for den enkelte virksomhed.

Flere af aftagerne bruger udviklingen af kunstig intelligens (AI), som tilsvarende eksempel. At der i mange år har været en stejl udrulningskurve og pludselig gik udviklingen stærkt. Det startede i forskningsmiljøerne og i startups og pludselig, så var alle virksomheder med.

Nedenstående udtalelser viser nuancerne i forhold til kvanteteknologiens potentiale for den enkelte virksomhed eller arbejdsmarkedet generelt:

Det er vigtigt, Danmark ikke bliver hægtet af

Det er et milliardmarked med både erhvervs- og samfundspotentiale. Pludselig kommer det store gennembrud. Det er vigtigt, Danmark ikke bliver hægtet af - DQC

Forskningen er lysår foran erhvervslivet

Det kommer, når IBM og co. er klar. Erhvervslivet har ikke fattet det endnu, så forskningen er lysår foran. Vi mangler at se use-cases. Hvad er det, vi kan bruge til det. De store virksomheder vil gerne være med, men ligesom med AI, er der behov for at se cases, før virksomhederne ved, om det er relevant for dem - DI

Hvis vi ikke gør det her, så er det afvikling frem for udvikling

Vi har ikke evnerne til at se mulighederne for disse teknologier. Vi mangler dem, der kan tage det næste skridt videre – og vise os, hvor vi kan føres hen. Vores opgave er at være quick follower, når teknologien kommer. På nogle områder skal vi nok være med helt fremme. Hvis vi kommer for sent ud med at tilpasse vores forretningsmodel, så kan vi ikke være med og de store banker vil overhale os. Hvis vi ikke gør det her, så er det afvikling frem for udvikling - Jyske Market

Med de projekter, der er i gang, vil der snart komme en revolution

Uvisheden om hvornår kvantecomputeren er klar - Det har været diskuteret i mange år, men jeg er overbevist om med de projekter, der er i gang, eks. hos Novo, så vil der hurtigt komme en revolution, og derfor er uddannelsen relevant – Cryptomathic

Virksomhederne skal også uddannes – men de ved, de skal med

Virksomhederne skal nok blive parate, men lige nu er de kun nysgerrige. De skal også uddannes, men det er samme som AI; de ved, de skal med. Ligesom AI så rammer det os pludselig som en bombe, og så er alle med på bølgen. Spørgsmålet er hvornår - Technology Denmark

Markedsmodenheden i Danmark skal skaleres massivt

De danske virksomheder skal tage sig sammen både med AI og kvanteteknologi. Markedsmodenheden i Danmark skal skaleres massivt. Hvis vi kigger fem år tilbage, så er der sket meget inden for kvanteområdet – så der vil også ske rigtig meget inden for de næste fem år- Trifork

2. Behov for kandidater inden for kvantecomputing med kompetencer inden for software

Nedenstående viser en oversigt over de aftagere, der eksplicit i interviewet har udtrykt et behov for kandidater inden for kvantecomputing, når kandidaterne er færdiguddannede i 2027 samt har tilkendegivet et konkret behov for kandidater med kompetencer inden for kvante-software.

Aftager	Behov for kandidater inden for kvantecomputing	Software-aspektet
Trifork	X	X
Energinet	X	X
ATP		X
IBM	X	X
DI	X	X
KPMG	X	X
DQC	X*	X
Novo Nordisk	X	X
Jyske Markets	X	X
Cryptomathic	X	X
Bankdata	X	X
COWI	X	X
DTU	X*	X
DMI		X
Erhvervshus Fyn	X*	X
Technology Denmark	X*	X
Kvantify	X*	X
Ørsted		

x* = har forholdt sig til arbejdsmarkedet generelt og ikke som konkret behov

Nedenstående udtalelser viser nuancerne i aftagernes behov for kandidater inden for kvantecomputing:

Konkret behov for kandidater inden for kvantecomputing i virksomheden i 2027

Der er vi klar til at ansætte. Særligt kombinationen med AI og kvanteteknologi er vi interesseret i - Trifork

Vi har brug for dygtige kandidater, der kan dette

I 2027 har vi et konkret behov. Der vil vi gerne stå forrest i køen, da disse kandidater vil være relevante for vores opgaver. Vi har brug for dygtige kandidater, der kan dette. Hvis uddannelsen bliver anvendelsesorienteret, så bliver det 10-15 kandidater, der kommer til at sidde med dette område - Energinet

Det er alt for sent med kandidaterne, vi har brug for dem nu

Det er alt for sent med kandidaterne, vi har brug for dem nu. Vi vil gerne ansætte dygtige kandidater fra SDU – og der vil også være andre, der står i kø. Dette er et område, der er i underskud - IBM

Vi har allerede folk, der arbejder med dette og har brug for flere af disse profiler

Vi har allerede folk, der arbejder med dette. Det er nogle profiler, vi vil ansætte, og som kan indgå som en del af vores teams og løsninger nu - KPMG

Vi kommer til at efterspørge kandidater med forståelse for disse teknologier

De medarbejdere, vi har siddende nu, har ikke denne ekspertise. Vi kommer til at efterspørge kandidater og medarbejdere, hvor de har forståelse for disse teknologier for at skabe fundament, for at vi kan deltage i eliteplan med storbankerne - Jyske Market

Der vil være kæmpe efterspørgsel på denne type kandidater

Hvis de lærer noget praktisk, vil det ikke være problem at få arbejde, og hvis de har data-logi, matematik og fysisk og samtidig kan programmere, så vil vi gerne ansætte – men vi vil hellere ansætte nogle, der også er gearet til ny teknologi. Der vil være kæmpe efterspørgsel på denne type kandidater – Cryptomathic

De skal kunne noget bredere

I 2027 vil vi ikke ansætte folk, der kun kan arbejde med kvanteteknologi. De skal kunne noget bredere – Ørsted

Behovet for kandidater i kvantecomputing på arbejdsmarkedet generelt

Hvis I først lavede uddannelsen, når erhvervslivet var parat, så var det for sent

Hvis I først lavede det her, når erhvervslivet var parat, så var det for sent at lave uddannelsen. Det er ikke 50 kandidater, der kan afsættes inden for kvantecomputing næste år, men så vil de få jobs alle andre steder - men i 2027 – jo, der er vi klar- DI

Den brede efterspørgsel vil være der i 2027

De skal nok komme i job og efterspørges på arbejdsmarkedet. Lige nu er det få, der kan det her, så det er svært ikke at forestille sig, der er et stigende behov for disse kompetencer. Den brede efterspørgsel vil være der i 2027 -DI

Danmark skal opruste talentdel og talentudvikling inden for kvanteområdet

Vi synes, det er en rigtig god idé med uddannelsen og generel støtte til at Danmark og de danske universiteter opruster på talentdel og talentudvikling. Der er en stigende efterspørgsel på talenter, da det kræver en specialistviden, som der ikke er mange har. Der er et gap i forhold til, hvem skal udfylde disse roller, og det kommer kvanteuddannelserne til at bidrage med – DQC

Disse kandidater kan også bruges nu, selvom kvantecomputeren ikke er klar

Selvom det tager 5-10 år, før kvantecomputeren er klar, så er der muligheder for kandidater allerede nu med de kompetencer, de får, og vi mangler fysikere, matematikere og dataloger i virksomhederne - Cryptomathic

Der er nul bekymringer for, at de nyuddannede skal finde en hylde i erhvervslivet, når de er færdiguddannede - DQC

Virksomhederne skal modnes til at tage denne type af profiler - COWI

Danmark er i massiv ubalance i forhold til disse profiler

Vi har svært ved at tiltrække de rigtige kandidater i vores regionale område, og Danmark er i massiv ubalance i forhold til disse kandidater. De har den profil og dna, som vi har brug for, da vi bevæger os imod at være en rendyrket tech-virksomhed – Bankdata

Der er ingen ledighed derude

Der er ingen tvivl om, at kandidaterne er attraktive, når de kommer ud på den anden side. De har den faglige dybde, kan tænke ud af boksen, og det er kompetitivt i tech-branchen. Om det er kvante – eller klassisk software, så er der ingen ledighed derude - Kvantify

Behov i de små virksomheder og den offentlige sektor

Det er de større virksomheder, der skal ansætte

De små virksomheder- vi skal ikke udvikle, men vi arbejder sammen med større leverandører, og det er dem, der skal ansætte jeres kandidater. Vi vil ikke have brug for en fuld-tidsstilling. Det vil de små virksomheder ikke have behov for, men det kan være en delt ansættelse mellem mindre virksomheder - Erhvervshus Fyn

Det er de mere modne cases, der bliver relevante for kommunerne

Klimamodeller er et godt eksempel. Det kommer mange kommuner til at arbejde med. Men det er de mere modne cases, der bliver relevante for kommunerne. I den offentlige sektor vil der være et stærkt fokus på softwaredelen, hvor kandidaterne vil arbejde med optimering af modeller eller portefølje og avancerede dataanalyser. Danmark er kendt for at have en stor mængde offentlige data, og der vil kandidaterne komme til at arbejde med nye algoritmer og kvanteteknologi - DQC

Sundhed, klima og risikovurderinger. Det er relevante cases for den offentlige sektor - DQC

Man skal kunne se sig selv i de små og mellemstore virksomheder (SMV), hvor man måske er den eneste med denne profil

Det er ikke kun de i de store virksomheder, de ender. Man skal kunne se sig selv i en SMV, hvor man måske er den eneste, der sidder inden for dette område – Technology Denmark

SDUs specifikke fokus på software

Nedenstående udvalgte udtalelser viser nuancerne i forhold aftagernes behov og holdning til SDUs specifikke fokus på software i uddannelsen:

Det er lige spot on - IBM

Vi har brug for kandidater, der kan software-vinklen

Software-vinklen er især vigtig. Kandidater skal have software-vinklen for, at vi kan bruge dem, ikke kun hardware - Trifork

Dette er en sindssyg god ide, og det er på tide, for ellers er der bare andre, der finder på det - Erhvervshus Fyn

De kompetencer er i høj kurs og efterspurgt hos vores medlemmer

Det er en spændende specialisering, og så kan den bruges på mange områder, fordi der er fokus på software-delen. De kompetencer er i høj kurs og efterspurgt hos vores medlemmer - Technology Denmark

Software-perspektivet passer godt i forhold til vores uddannelse i Master of Quantum Information Science, da det ikke er vores hovedfokus. Vores uddannelse er relativt bred, så man kan godt få noget software i den retning, men det er ikke en forventning, at de fleste vælger det - DTU

I Danmark skal vi fokusere på software og uddanne folk inden for dette

Det er det helt rigtige fokus. Mange steder i verden har de penge til udvikling af hardware. I Danmark kan vi fokusere på software og uddanne folk inden for dette – ATP

Det er interessant, hvordan hardware modnes, men der er software-perspektivet, der er relevant

Det er interessant at se, hvordan hardware modnes, men det er mere software-perspektivet, der er relevant i forhold til os som aftagere. Softwaredelen er at foretrække frem for hardware. Det fysiske aspekt har vi ingen interesse i – Bankdata

Software-perspektivet er godt for det danske marked

Software-perspektivet er godt for det danske marked – man kan ikke ramme det hele, Hvis man kigger tilbage på computerne, så blev man overrasket over, at software-delen er vigtigere end hardware-delen, Der er brug for begge typer, man kan ikke undvære applikations- og software-folk i de enkelte virksomheder, men man kan godt undvære hardwaren – Novo Nordisk

Det er det her, Danmark kan

Det er det her, Danmark kan. Det er ikke Danmark, der kommer til at lave hardware, men vi kan bruge software-delen - DI

Delkonklusion

Aftagerne bekræfter, at der er et konkret behov, både regionalt og nationalt, og at SDUs kandidatuddannelse i kvantecomputing imødekommer behovet i indhold og dermed sikrer de kompetencer, der er efterspurgt på arbejdsmarkedet. Særligt aftagere fra Trekantområdet udtrykker et stærkt behov for kandidater med disse kompetencer.

Kompetencerne inden for matematik, datalogi og fysik er efterspurgt på arbejdsmarkedet og med en lav dimittendledighed inden for disse områder, er der ingen bekymringer for, om kandidaterne kommer i beskæftigelse.

I forhold til uddannelsens fokus på software-aspektet, bekræfter 17 ud af 18 af aftagerne, at det er et relevant område, og kompetencerne er efterspurgt på arbejdsmarkedet. Denne aftagerundersøgelse bekræfter, at det særligt er store virksomheder og startups, der er i gang på området. Små virksomheder og den offentlige sektor vil komme med senere på de modne use-cases.

Flere aftagere påpeger, at det er software-delen, der er relevant, og det er dér potentialet for erhvervslivet er. Aftagerne opfordrer generelt til, at Danmark investerer inden for dette område og påpeger, at det er positivt, at de danske universiteter positionerer sig på forskellige områder af kvanteteknologien.

Det er vigtigt med en fælles ambition om at styrke kvanteteknologiens udvikling i Danmark, og der er dermed behov for kandidater inden for både hardware og software:

Vi skal have alle universiteter i omdrejninger på dette område - IBM

Der mangler uddannelser, der er dedikerede til kvanteteknologi

Der mangler uddannelser, der er dedikerede til kvanteteknologi, og som går i dybden med området, hvor det ikke bare er valgfag. Det er positivt, at det her ikke bare er opkvalificering - DQC

Det er vigtigt med fælles ambitioner og samarbejde på tværs af universiteterne – Bankdata

Vigtigt med samarbejde på tværs af universiteter

På kvanteområdet er det vigtigt med samarbejde på tværs af universiteter. Det skal man holde fast i, man ikke må kannibalisere på hinanden i forhold til uddannelserne - DI

Det er positivt, at SDU har fokus på software og KBH får hardware-vejen – Bankdata

Det er fint at vælge fokus ellers bliver uddannelsen for tynd

Det er fint at vælge fokus. Hvis man vælger begge dele, bliver uddannelsen for tynd. Hardware-delen er bedre dækket af klassisk fysik - KPMG

3. Uddannelsens indhold, sammensætning og sprog

Aftagerne har forholdt sig til uddannelsens sammensætning; om det faglige indhold er relevant, og om der er noget, der mangler eller som bør fylde mere i uddannelsen.

Nedenstående viser, de kurser, der indgår i uddannelsen. Der, hvor aftagerne har angivet, at det faglige indhold er særligt relevant for dem, er markeret (x):

Kursus		Indhold, der er særligt relevant for aftagerne
Speciale	x	
Quantum Machine Learning	x	Klassisk maskinlæring, hybrid-algoritmer, pattern recognition
Valgfag – mulighed for virksomhedsprojekt	x	Virksomhedsprojekt
Quantum Tensor Networks, (valgfag)	x	
Advanced Continuous Variables Formalism (valgfag)	x	
Advanced Topological Quantum Computing (valgfag)		
Linear and Integer Programming (valgfag)	x	Matematisk forståelse
Data Mining and Machine Learning (valgfag)	x	Maskinlæring
Categories for Quantum Computing (valgfag)		
Quantum Complexity Theory		
Advanced Quantum Mechanics (valgfag)		
Quantum Algorithms and Quantum Programming	x	Udvikling af algoritmer, error correction, Quantum Fourier transformation – samt klassisk transformation
Quantum Cryptography and Quantum Key Distribution	x	Kryptografi, herunder også klassisk kryptografi
Quantum Information Theory	x	Klassisk Shannon
Quantum Computing Platforms	x	Indledende emner, der udfoldes senere i uddannelsen
Introduction to Quantum Computing	x	Fælles fagligt fundament

I interviewene har aftagerne sat ord på, hvilke kompetencer, der er vigtige, når kandidaterne skal ud i erhvervslivet. Dette er opsummeret:

Kompetencer

- Faglig dybde, matematisk forståelse og metodeforståelse
- Forståelse for teknologiernes kontekst og anvendelse og have indblik i muligheder og begrænsninger, både i forbindelse med software og hardware
- Integration af algoritmer – og koblingen til eksisterende it-løsninger
- Koblingen til klassiske algoritmer
- Programmering i praksis
- Sammenligne forskelle på klassiske computere og kvantecomputere og forstå fordele og ulemper
- Kendskab til forskellige programmeringssprog og hvad der er egnet til forskellige platforme
- Grundlæggende forståelse for modeller
- Forretningsforståelse i forhold til udvikling og nye løsninger og hvordan ny teknologi kan bruges på en intelligens måde
- Evnen til at udarbejde standarder for kvantealgoritmer
- Sikkerhedsperspektivet
- Evnen til at oversætte en problemstilling til en kvantemekanisk problemstilling

Især valgmodulerne giver mening for virksomhederne – det kan vi genkende hos os - ATP

Hvis vi får kandidater, der kan dette, så får vi, hvad vi skal bruge – Jyske Market

Nysgerrighed, teknisk forståelse og om de kan bruge det i praksis – det kigger vi efter hos kandidater – Bankdata

Det er et godt teoretisk fundament, og teknisk er det interessant. Det dækker de områder, vi arbejder med – IBM

Ønsker til indhold:

Derudover var der flere aftagere, der påpegede, at der manglede noget om post quantum cryptography, optimeringsprocesser og Monte Carlo-simuleringer samt high-performance computing HPC.

Enkelte aftagere efterspurgte også områder inden for hybrid quantum platform (HPQ), quantum inspired algorithms, quantum inspired optimization, quantum annealing, quantum safe og risk, cloudløsninger, mere om klassiske algoritmer, fourier-algoritmer og kvantecomputerens muligheder.

Delkonklusion

En stor del af aftagerne bekræfter, at særligt uddannelsens første semester er relevant og giver kandidaterne et godt fundament til de efterfølgende semestre. Derudover er valgmodulerne interessante for aftagerne, der ser det om positivt, at de indeholder bl.a. datamining, maskinlæring samt lineær- og heltalsprogrammering. Aftagerne opfordrer til, at de studerende skal anbefales at følge disse. Dog påpeger aftagerne også, det er vigtigt med valgfriheden, da de studerende kommer med forskellige bachelorbaggrunde.

I forhold til kurset Quantum Complexity Theory anerkender aftagerne, at det er en vigtig disciplin, men det er mere forskningsorienteret og ikke relevant for virksomhederne.

På tredje semester bekræfter aftagerne, at placeringen af Quantum Machine Learning er korrekt i forhold til kompleksiteten inden for det faglige område.

Derudover er det positivt, at der er mulighed for at indgå samarbejde med virksomhederne, både som virksomhedsprojekt og i specialet.

Uddannelsens niveau og sikring af det faglige fundament på tværs af fagligheder

Der er flere af aftagerne, der bekræfter, at uddannelsens niveau skal være højt:

Det faglige fokus afslører, at der er faglig kvalitet i uddannelsen - ATP

Det er vigtigt med et højt niveau, og at der er skarpe kriterier for uddannelsen. Kandidaterne skal være dygtige til matematik - Trifork

Det er ikke alle, der kan gennemføre denne uddannelse. Det er vigtigt at have fokus på kravene til uddannelsen. Det skal ikke være en nem kandidat - KPMG

Godt det er et højt niveau. Det skal lugte af, at det er højt niveau, også internationalt. Det skal tiltrække de rigtige kandidater. Barren skal holdes højt, for der er forskel på de kandidater, der kommer ud, når barren er sat højt, og hvad de kan – i forhold til de uddannelser, hvor barren er sat for lavt. I skal op i samme liga som de øvrige universiteter - Bankdata

Tværfaglig uddannelse – samme faglige fundament når de starter

En stor del af aftagerne påpeger vigtigheden af, at det skal sikres at de studerende har samme faglige fundament, når de starter på kandidaten grundet de forskellige bachelorbaggrunde. Særligt skal det sikres, at der er en basal forståelse for matematik og algoritmer.

Cases og virkelighedsnær uddannelse med virksomhedsinddragelse

Flere af aftagerne har eksplicit i interviewet påpeget vigtigheden af, at uddannelsen anvender konkrete cases og inddrager virksomhederne samt at undervisningen er anvendelsesorienteret og praksisnær:

- 7 ud af 18 af aftagerne påpeger vigtigheden af virksomhedsinddragelse og at anvende konkrete cases i uddannelsen
- 13 ud af 18 af aftagerne påpeger vigtigheden af, at uddannelsen er anvendelsesorienteret og med praksisnær undervisning

Nedenstående udvalgte udtalelser viser nuancerne:

Dyb faglighed og erhvervsfokus skal kombineres

Hvordan får man kombineret dyb faglighed med erhvervsfokus eller iværksættereri og får entreprenørånden ind i uddannelsen. Der skal skabes mulighed for de dygtige talenter, der vil udover stepperne, og som vil noget andet end forskningsvejen. Hvis I inviterer virksomhederne ind i uddannelsen med konkrete cases, og de kan lære talenterne at kende, så vil kandidaterne være plug and play til virksomheden, når de kommer ud - DQC

Kandidater skal være stærke inden for teknologi, men skal kunne tilegne viden om værdikæden og centrale processer

Det vigtigste er, vi får nogle kompetencer, som kan se muligheder i den nye teknologi og som kan skubbe lidt til os. Jeres kandidater skal bidrage med, hvad de nye teknologier kan og spejle ind i, hvad vi laver i dag og spejle ind i den nye verden. Kandidater skal være stærke inden for teknologi, men de skal kunne tilegne viden om værdikæden og centrale processer - Jyske Market

Kandidaterne skal kunne et håndværk, når de kommer ud

Det er vigtigt, de kan programmere i praksis, så det ikke udelukkende bliver teoretisk. Virksomhederne har brug for, at kandidaterne kan programmere. De skal kunne et håndværk, når de kommer ud - Cryptomathic

Kvantecomputing skal sælges til virksomhederne – kobl dem på uddannelsen

Hav fokus på problemløsningen og hvordan man gør noget anderledes i virksomhederne. Det skal integreres i undervisningen. Lad virksomhederne pitche problemstillinger til uddannelsen. Området med kvantecomputing skal desuden sælges til virksomhederne. Kobl dem på uddannelsen - COWI

Mange uddannelser er teoretiske – men er ikke gearet til virkeligheden

Hav fokus på, hvor det giver værdi at implementere teknologien i forhold til forretningsvinklen og innovation. Det er hardcore viden, men hvad er den praktiske opgave, man sidder med ude i virksomheden? Mange uddannelser er teoretiske, men er ikke gearet til virkeligheden - Technology Denmark

Delkonklusion

Aftagerne opfordrer SDU til at have fokus på at skabe en uddannelse, der bygger bro til erhvervslivet med virksomhedsinddragelse og konkrete cases. Derudover er det vigtigt, at undervisningen er praksisnær, så kandidaterne kan et håndværk, når de kommer ud på arbejdsmarkedet.

Engelsksproget uddannelse

En stor del af aftagerne har forholdt sig til, om uddannelsen skal udbydes på engelsk, og hvilke styrker de ser i en engelsksproget uddannelse i forhold til virksomheden og erhvervslivet. I interviewene anbefaler følgende aftagere eksplicit, at uddannelsen udbydes på engelsk:

Aftagere	Anbefaler uddannelsen på engelsk
Trifork	x – dog ingen betydning for ansættelse
Energinet	x
ATP	x – dog ingen betydning for ansættelse
IBM	x – Koncernsprog er engelsk
DI	x
KPMG	
DQC	x
Novo	x
Jyske Markets	x – dog ingen betydning for ansættelse
Cryptomathic	x
Bankdata	x – dog ingen betydning for ansættelse
COWI	x
Erhvervshus Fyn	x
Technology Denmark	
DMI	x
Kvantify	x
Ørsted	x
DTU	

Delkonklusion

- 15 ud af 18 af aftagerne anbefaler SDU at udbyde uddannelsen på engelsk
- 4 af aftagerne påpeger, at sproget ikke har betydning for fremtidig ansættelse i virksomheden

Aftagerne lægger særlig vægt på, at kandidaterne kommer til at arbejde i internationale miljøer, både inden for forskning og i erhvervslivet og ved at udbyde uddannelsen på engelsk, kan SDU tiltrække både dygtige internationale undervisere samt optage internationale studerende. Flere af aftagerne påpeger dog, at det ikke har betydning for om kandidaterne kan ansættes, da koncernsproget er på dansk. Der er dog enkelte aftagere, der

har engelsk som koncernsprog, eller som har meget internationalt samarbejde og derfor vil se det som en fordel, hvis uddannelsen udbydes på engelsk.

Nedenstående udvalgte udtalelser viser nuancerne:

Som repræsentant for dansk erhvervsliv, håber jeg, det er på engelsk

Klart engelsk, Det betyder ikke så meget for de kandidater, der skal arbejde i Danmark. Men dem der skal være bannerførere inden for området skal kunne arbejde internationalt, og det giver desuden muligheden for at tiltrække udenlandske studerende. Jeg håber, det er på engelsk, som repræsentant for dansk erhvervsliv - Trifork

Ingen betydning for ansættelse hos os

Vores organisationssprog er dansk, men hvis man vil tiltrække international arbejdskraft, så bør uddannelsen være på engelsk fra starten. Men i forhold til ansættelse hos os, er det underordnet, om det er på dansk eller engelsk - Energinet

Det er et internationalt område – de skal lære vokabularet på engelsk

Hos IBM er koncernsproget engelsk. Det er vigtigt at få det teoretiske og vokabular på engelsk, da det er et internationalt område. De kommer til at arbejde på tværs af landegrænser. I forhold til forskningen, så er der høj koncentration af specialister inden for kvantecomputing i Danmark, og det kan tale for dansk, men hvis vi ser på det internationalt, så sker der meget inden for dette område uden for Danmarks landegrænser - IBM

Man afskriver nogle dygtige studerende ved at udbyde på dansk

Uddannelsen vil være eftertragtet af udenlandske studerende – og vi vil gerne tiltrække talenter. Man afskriver nogle dygtige studerende ved at udbyde på dansk. De første jobs de vil få vil være i store hig- tech virksomheder, hvor virksomhedssproget er engelsk. Det er en fordel på engelsk i forhold til arbejdsmarkedet – DI

Det er svært at forestille sig, at de kun arbejder i det danske marked

I skal gøre det på engelsk. De fleste virksomheder med en vis størrelse er internationale orienteret, og det er svært at forestille sig, at de kun arbejder i det danske marked. I min virksomhed kommunikerer vi også kun på engelsk – Cryptomathic

SDU skal styrke det rekrutteringsgrundlag, som vi har brug for

I skal tiltrække udenlandske studerende, så SDU vil styrke det rekrutteringsgrundlag, som vi har brug for. Det vil jeg være helt skarp på: Det skal være engelsk - Bankdata

Jeg kan ikke forestille mig uddannelser i dag på dette niveau, der ikke er på engelsk

Jeg kan ikke forestille mig uddannelser i dag på dette niveau, der ikke er på engelsk. Alle de kandidater vi får ind, har det på engelsk. Vi vil se det som et plus. Det er et større problem, hvis de ikke kan det på engelsk i forhold til vores kunder - COWI

Alle perspektiverne er opsummeret i afsnittet Anbefalinger og pointer fra SDUs aftagerundersøgelse (2023).

Støtteerklæringer

Støtteerklæringer til kandidatuddannelsen i kvantecomputing på SDU:

Microsoft – Administrerende direktør, Development Center Copenhagen

Microsoft bekræfter sin støtte til SDUs kandidatuddannelse i kvantecomputing med særlig fokus på software-perspektivet. Gennem denne uddannelse vil kandidaterne opnå den nødvendige ekspertise til at imødekomme Microsofts behov for dygtige medarbejdere inden for kvanteteknologi.

IBM – Teknisk direktør

IBM støtter hermed SDUs kandidatuddannelse i kvantecomputing med fokus på software-perspektivet. Kandidater med denne vinkel imødekommer virksomhedens nuværende og fremtidige behov for velkvalificerede medarbejdere til at håndtere opgaverne inden for udvikling af software til kvantecomputere og ikke mindst de kommende hybrider mellem klassiske computere og kvantecomputere.

Energinet - Group Vice President & Direktør, innovation

Energinet følger udviklingen inden for kvanteteknologi og ser et potentiale i kommende dimittender med denne kandidatbaggrund til at bidrage til virksomhedens fremsynede arbejde med optimering og sikkerhed.

Jyske Markets v. Jyske Bank – Director, Head of trading

Jyske Markets i Jyske Bank ser potentiale i at integrere fordelene ved kvanteteknologien sammen med nuværende teknologier for at styrke virksomhedens sammenhængskraft og optimering og dermed sikre bankens konkurrencedygtighed på eliteniveau. Derfor støtter Jyske Bank SDUs nye kandidatuddannelse i kvantecomputing, da Jyske Bank har behov for disse profiler med ekspertviden inden for kvanteteknologi og evne til at bidrage med nye muligheder.

Cryptomathic – grundlægger og tidl. direktør

Peter Landrock, grundlægger og tidligere direktør for Cryptomathic, støtter SDUs uddannelse inden for kvantecomputing og anbefaler, at kandidaterne også tillærer kompetencer inden for eksisterende computerteknologi. Han mener, det er en fordel, at de studerende er i stand til at løse udfordringer på traditionelle computere og samtidig kunne se sammenhænge og bidrage med løsninger ved hjælp af kvanteteknologi

Erhvervshus Fyn – Chef for HR og IT

Erhvervshus Fyn ser et betydeligt potentiale i at integrere kvanteteknologi sammen med eksisterende teknologier for at styrke regionale virksomheders konkurrenceevne. De støtter SDUs kvanteuddannelse og for at fremme regional relevans, er det afgørende, at de studerende kan tackle udfordringer ved hjælp af en bred vifte af teknologier. Derfor understreger de vigtigheden af en bredere tilgang til uddannelsen, der har fokus på anvendelse i virksomheder og virksomhedssamarbejde, samt en opmærksomhed på at øge de

studerendes forretningsparathed, hvorved de bedst muligt kan understøtte virksomhederne.

Bankdata – Digitaliseringschef

Bankdata har et stærkt ønske om at tiltrække talentfulde kandidater med en dyb forståelse og ekspertise inden for nye teknologier. Derfor støtter virksomheden SDUs uddannelse i kvantecomputing og fremhæver værdien af at forbinde teori og virkelighed, så kandidaterne støttes i at udvikle evne til at omsætte deres teoretiske viden til direkte anvendelse i virksomhedens kontekst.

ATP - Senior Portfolio Manager

ATP ser muligheder i at anvende kvanteteknologien fremsynet i virksomheden og støtter derfor SDUs fokus på softwareperspektivet i kandidatuddannelse i kvantecomputing.

COWI - Senior Digital Transformation Director

COWI bakker op om en uddannelse i kvantecomputing på SDU og understreger betydningen af anvendelsesperspektivet i virksomhederne.

Ørsted - Head of Numerical Competence Centre, Strategy & Innovation

Hos Ørsted er vi allerede i samarbejde med Qpurpose (en virksomhed affilieret med Centre for Quantum Mathematics, SDU) om udviklingen af kvante-baserede løsninger til optimeringsproblemer med relevans i energisektoren. Vi er fuldt ud overbeviste om, at kvanteteknologier, herunder især kvantecomputing, kommer til at spille en afgørende rolle i den grønne omstilling. Derfor er det enormt vigtigt at få en højtuddannet arbejdskraft til rådighed, som kan arbejde med kvanteteknologier. Vi støtter derfor oprettelsen af en kandidatuddannelse i kvantecomputing på SDU, og ser frem til at ansætte fremtidige kandidater herfra

Referencer

- (1) Regeringens rapport: Strategi for kvanteteknologi – del 1: Forskning og innovation i verdensklasse juni 2023 <https://ufm.dk/publikationer/2023/filer/strategi-for-kvante-teknologi-del-1.pdf>
- (2) Regeringens rapport: National strategi inden for kvanteteknologi – del 2 (september 2023) <https://em.dk/aktuelt/udgivelser-og-aftaler/2023/sep/national-strategi-for-kvanteteknologi>