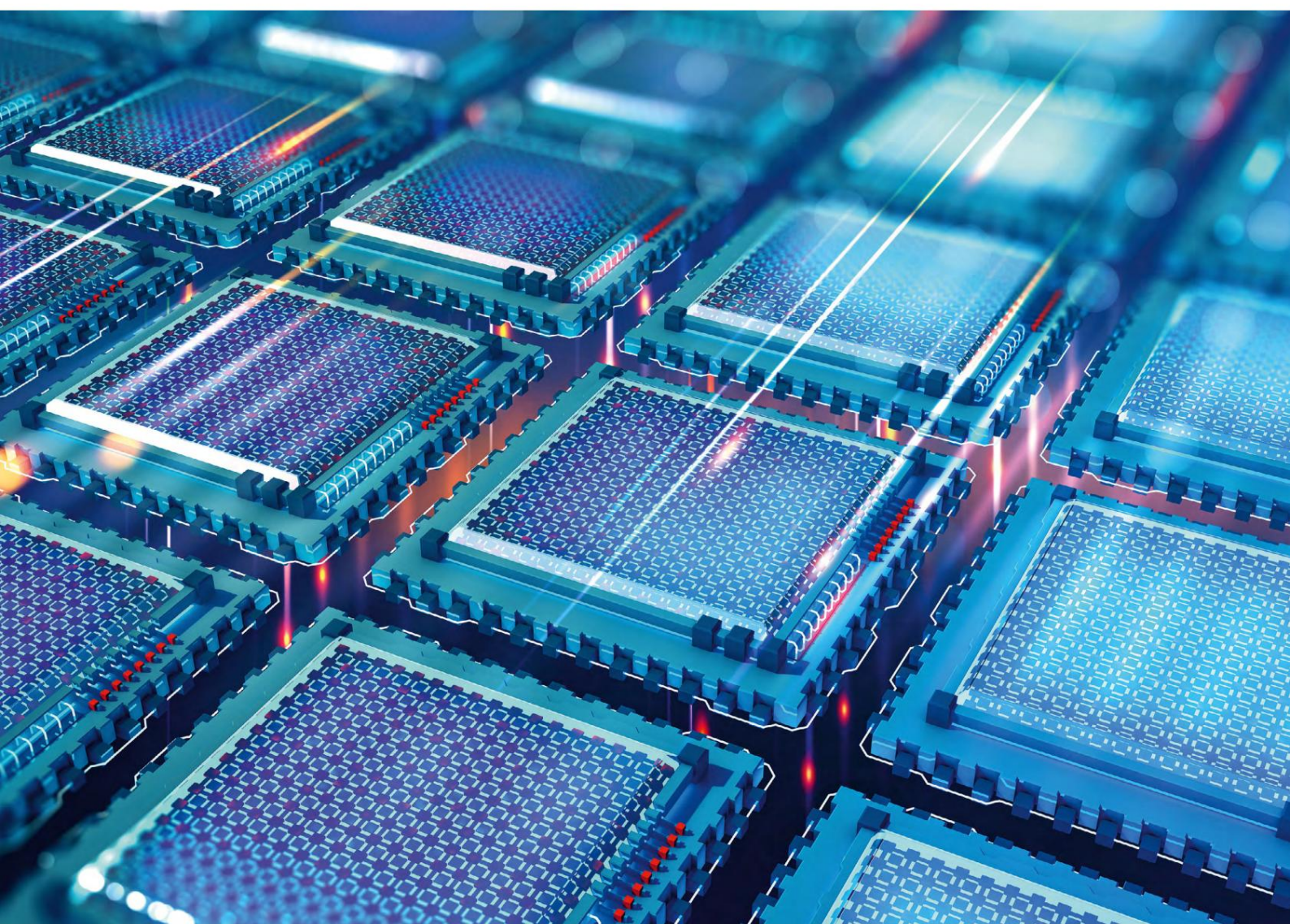


Finansieret af
europæiske Union



QUANTUM
FLAGSHIP



Kompetenceramme for kvanteteknologier

kompileret af Franziska Greinert og Rainer Müller
Version 1.0 (maj 2021)



Oversigt og generel struktur



Sådan bruger du kompetencerammen

Den europæiske kompetenceramme for kvanteteknologier har til formål at kortlægge **landskabet af mulige kompetencer og færdigheder inden for kvanteteknologier**. Det er blevet udarbejdet af QTEdu CSA for at lette planlægningen og designet af uddannelses- og træningsprojekter i Quantum Technologies.

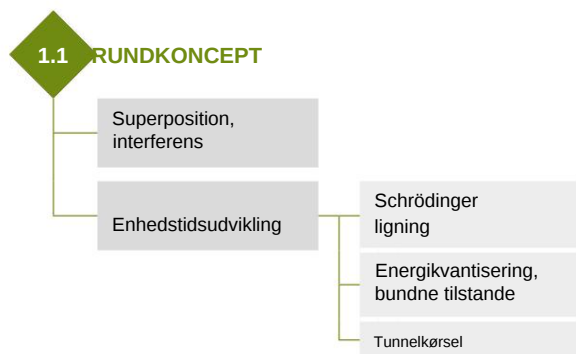
Kompetencerammen består af syv hovedområder. De skitserer den brede struktur af Quantum Technologies:

1 KONCEPT FOR KVANTEFYSIK

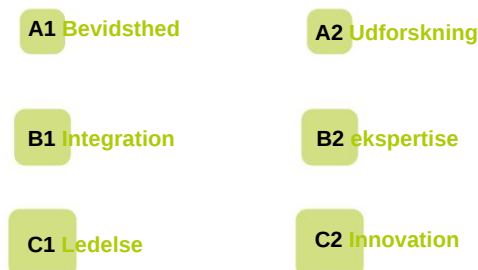
Hvert af disse hovedfelter har flere underfelter, f.eks.



På den første side af dette dokument er hovedfelterne og underfelterne vist i et grafisk skema. For hvert underfelt er der en ekstra side med flere detaljer:



Afhængigt af målgruppen vil hvert undervisningstilbud adressere forskellige niveauer af dybde og sværhedsgrad. For at afspejle dette er der en yderligere dimension til Kompetencerammen, som ikke er vist i grafikken. For hver indgang kan et færdighedsniveau angives: fra A1 (bevidsthed) til C2 (innovation). Denne ordning blev udviklet til European Language Reference Framework; det bruges f.eks. også i den europæiske DigCompEdu-ramme for digitale færdigheder. Brugen af færdighedsniveauer gør det lettere at skræddersy uddannelsestilbud til målgruppernes behov.



Kompetencerammen er blevet udarbejdet af QTEdu-teamet i en bottom-up tilgang. Mellem sommeren 2020 og foråret 2021 gennemførte vi et tre-rundt Delphi-studie med mange **deltagere fra QT-samfundet. Resultaterne blev forfinet ved at gennemføre ekspertinterviews for hvert delområde.**

Kvanteteknologier er i hastig udvikling. Nye teknologier vil blive udviklet, andre vil blive mindre vigtige. Kompetencerammen skal tilpasses i overensstemmelse hermed. Kompetencerammen er således et levende dokument, som vil blive opdateret med jævne mellemrum. Forslag til tilføjelser og rettelser modtages til enhver tid.

Venligst kontakt:

Rainer Müller og Franziska Greinert
f.greinert@tu-braunschweig.de
QTEdu – Koordinerings- og støtteaktion for kvanteteknologiuddannelse

Denne ramme er en del af et projekt, der har modtaget støtte fra EU's Horizon 2020 forsknings- og innovationsprogram under tilskudsafale nr. 951787.



© Den Europæiske Union, 2021

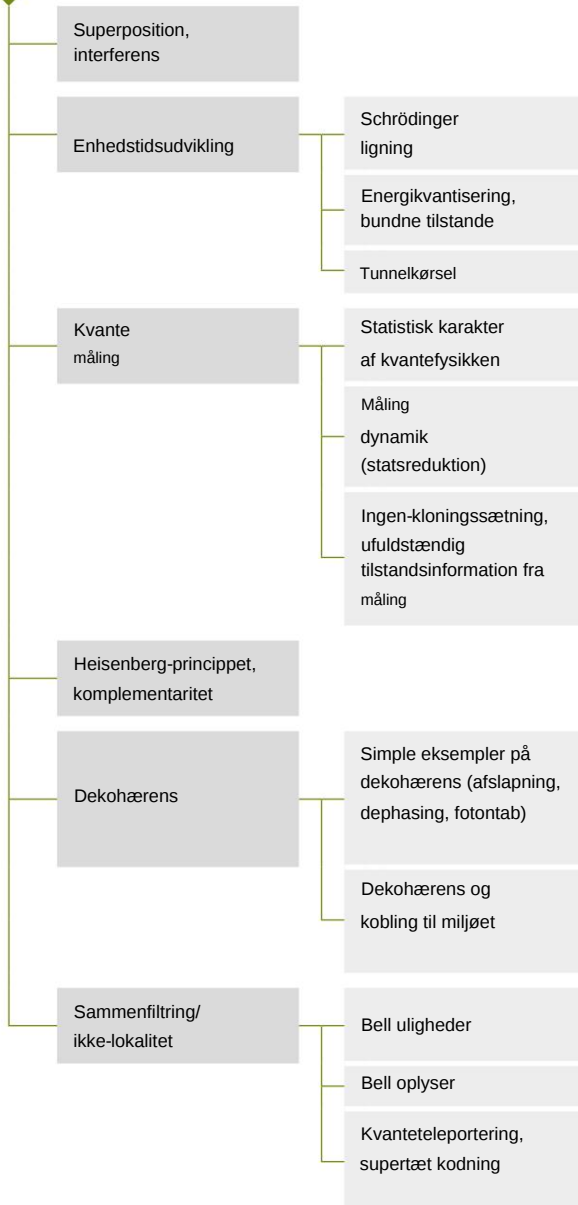


Genbrugsloven for Europa-Kommissionens dokumenter er gennemført ved Kommissionens afgørelse 2011/833/EU af 12. december 2011 om genbrug af Kommissionens dokumenter (EUT L 330 af 14.12.2011, s. 39).

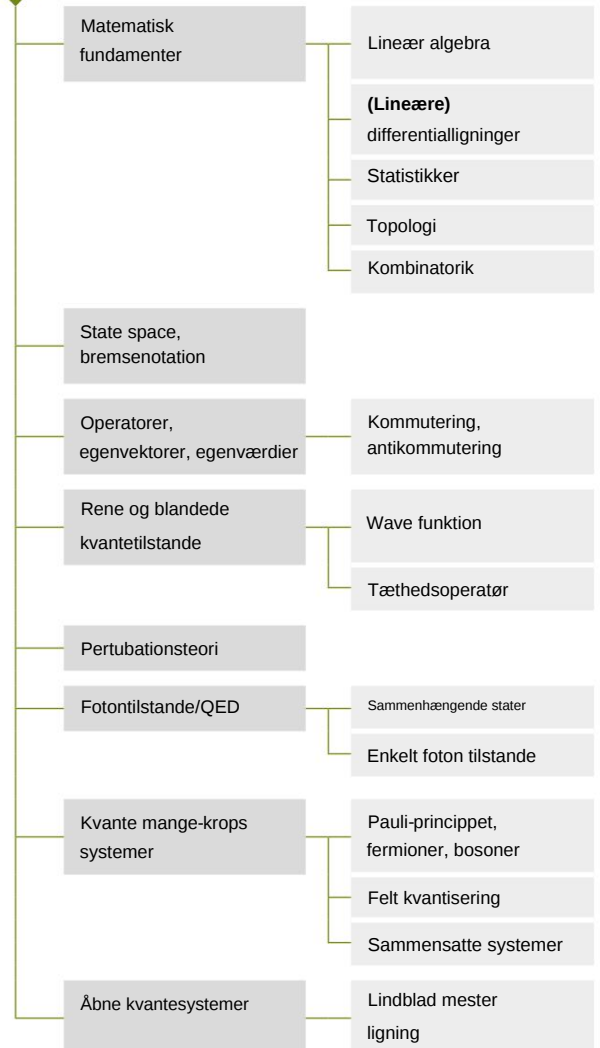
Medmindre andet er angivet, er genbrug af dette dokument godkendt under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)-licensen (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Det betyder, at genbrug er tilladt, forudsat at der gives passende kredit og eventuelle ændringer er angivet.

1 CONCEPT FOR KVANTEFYSIK

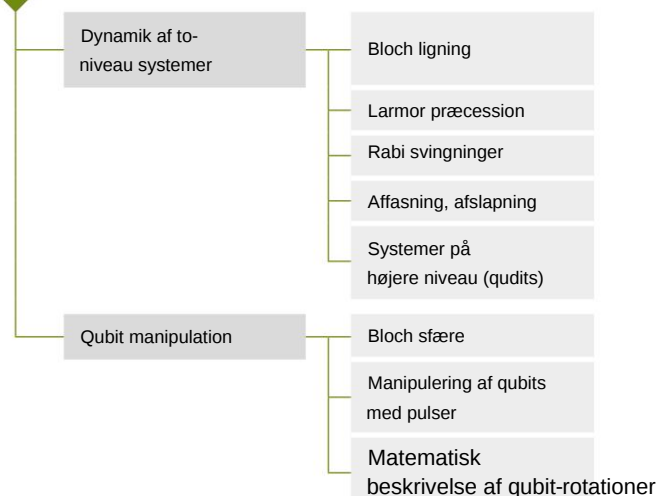
1.1 GRUNDKONCEPT



1.2 MATEMATISK FORMALISME



1.3 QUBIT DYNAMIK



2

FYSISK GRUNDLAG AF KVANTETEKNOLOGIER

2.1

ATOMFYSIK SOM GRUNDLAG TIL KVANTETEKNOLOGIER

Hyperfine og andre overgange

Elektroniske niveauer og forbudt overgange

Zeeman, Stark effekt

oplyser Rydberg

Vibrations- eller rotationsniveauer i molekyler

Kvantedegenererede gasser og kvantestatistik

2.2

KVANTEMOPTIK SOM BASIS TIL KVANTETEKNOLOGIER

Fotoninteraktioner med atomer og stof

Polariseringsgrader af frihed

Poincaré kugle

Bunching, anti-bunching, klemte tilstande

Kvantemaskinelæring

2.3

FASTSTANDSFYSIK SOM GRUNDLAG TIL KVANTETEKNOLOGIER

Faststofegenskaber

Båndstruktur

Elektrisk transport

Optiske egenskaber

Halvledere

Superledningsevne

Josephson effekt

SQUID enheder

Nanostrukturer

2D elektrongas

Kvanteprikker

Nanotråde

Materialevidenskab

Overfladevidenskab

Mesoskopiske fænomener

Topologiske effekter

3

AKTIVERING AF TEKNOLOGIER

3.1 OPTISK TEKNOLOGI

- Klassisk optik
- Lasere
- Enkelte fotonkilder
- Sammenfildrede fotonkilder
- Opto-elektroniske og opto-mekaniske systemer
- Enkelt foton detektorer
- Fotonik, fibre**

3.2 FAST TILSTAND TEKNOLOGIER

- Mikro- og nanoelektronik
- Blæksprutter

3.3 LABORATORIUM TEKNOLOGIER

- Vakuum teknologi
- Kryogenik
- Elektronik
- Mikrobølgeovn, RF-teknologi
- Laser køling
- Laserstabilisering
- Støjanalyse
- Afskærmningsteknikker
- Renrumsteknologi
- Mikro- og nanostrukturering

3.4 OPTISK TEKNOLOGI

- Software
- Hardware
- Kvantestyringsalgoritmer

4

HARDWARE TIL QUANTUM COMPUTERE OG SENSORER

4.1

SUPERLEDNING ENHEDER

Superledende qubit-typer: **ladning, flux, transmon, fluxonium**

Josephson junctions for metrologi

4.6

HARDWARE TIL INITIALISERING, MANIPULERING OG LÆSNING AF AFSLUTNINGER

Mikrobølger

Lasere

Resonatorer (f.eks. udlæsning og porte af superledende qubits)

Kontakter, faseskifttere, forsinkelser

4.2

SPIN-BASEREDE ENHEDER

NV centre

Halvleder kvanteprikker

4.3

NEUTRALE ATOMER OG IONER

Ionfælder

Rydberg atomer

Kolde kvantegasser

Optiske gitter

4.7

BRUG AF HARDWARE PLATFORME TIL KVANTUM COMPUTING

DiVincenzo kriterier

NISQ-begrænsninger

Platformspecifikke begrænsninger

Integration, pakning, skalering

Benchmarking

Mellemvare

Integration med klassisk hardware

4.4

EMERGING QUBIT KONCEPT

Topologiske qubits

Molekylær-spin qubits

4.5

FOTONISKE SYSTEMER

Lineære optiske netværk

Fotoniske integrerede kredsløb

Bosonprøvetagningsteknikker

5

KVANTUM COMPUTING OG SIMULERING

5.1 KVANTEMÅLER

- Enkelte qubit porte
- To og flere qubit-porte

5.2 KVANTEM PROGRAMMERINGS-PROG, VÆRKTØJ OG PLATFORME

- Grafiske platforme
- Softwareudviklingssæt
- Programmeringssprog

5.3 KVANTEMALGORITHMER OG DATATEKNIKKER

- Shor-algoritme, **skjult undergruppefund**
- Grover-algoritme, **amplitudeforstærkning**
- Kvanteoptimeringsalgoritmer
- Kvantemaskinelæring
- Værktøjer
 - Quantum Fourier Transform
 - Kvantefase estimering
 - Kvante lineære algebra algoritmer
 - Kvantevandring
 - E-handel
- Andre algoritmer: Oversigt over Quantum Algorithm Zoo

5.4 KVANTEMEJL RETTELSE

- Fysiske dekohærens mekanismer (dynamisk afkobling)
- Fejlafhjælpning
- Kvantefejlkorrektionskode

5.5 KVANTESIMULERING

- Digitale kvantesimulatorer
- Analoge kvantesimulatorer og kvanteudglødningsapparater

6

KVANTESENSORER
OG METROLOGI

6.1

ELEKTROMAGNETISK
FELT SENSORER

- NV center sensorer
- Rydberg atomsensorer
- Atommagnetometre, OPM'er
- Superledende sensorer (nanoledninger, superledende tunnelforbindelser, kinetiske induktansdetektorer)

6.2

TEMPERATUR, PARTIKEL
OG TRYKSENSORER

- Spin-qubit baserede sensorer
- Præcisionsspektroskopi gas sensorer
- Optomekaniske sensorer

6.3

INERTIAL OG GRAVITET
SANSELSER

- Mikro-elektromekanisk sensorer (MEMS)
- Atom interferometre
- Roterende nanopartikelsensorer

6.4

KVANTIMAGDNING

- Spørgelsesbilleder, tomografi
- Enkeltfoton-kameraer, sub-shot-noise-kameraer
- Kvanteradar, kvantelidar

6.5

ATOMUR

- Mikrobølgeure
 - Atomiske springvandsure
 - CPT ure
- Optiske ure
 - Fangede ion-ure
 - Neutrale atomer i optiske gitter
 - Kvantelogiske ure
- Nukleare ure
- Transportable atomure

6.6

ANVENDELSESFELTER
TIL KVANTESENSORER

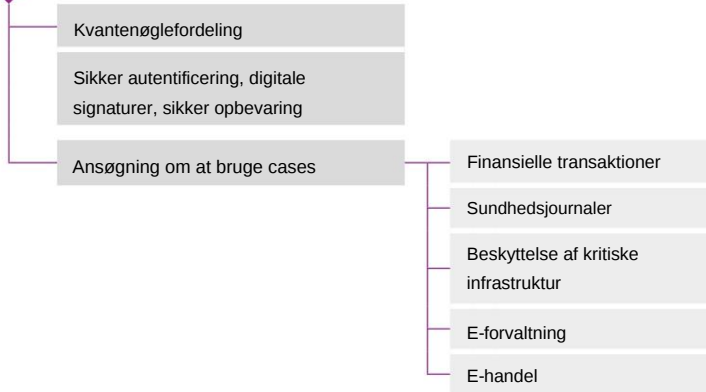
- Metrologi på enkelt kvanteniveau
 - Definition af SI-enheder
- Medicin og molekylær biologi
 - Magnetisk påvisning af neuronal og hjerte signaler
 - Billeddannelse (f.eks. levende celler)
 - Mikrobølgediagnostik
- Naturressourcer, civilingeniør og jordovervågning
 - Civilingeniør
 - Underjordiske undersøgelser
 - Infrastruktur overvågning
 - Naturressource udforskning
 - Naturlig fare forebyggelse
 - Jordovervågning
- Transport og navigation
 - Præcis timing og positionsdetektering
- Kontrol i industrielle processer
 - Inspektion i mikroelektronik
 - Ultrapræcis timing og synkronisering

6.7

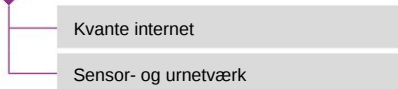
SENSOR INTEGRATION
OG HYBRID SENSING

7 KVANTEMUNIKATION

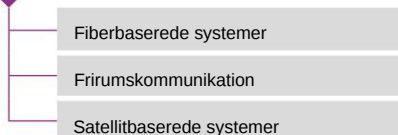
7.1 KVANTEMKRYPTOGRAFI



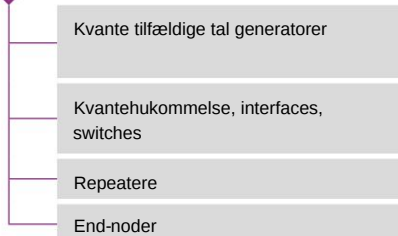
7.2 KVANTUMNETVÆRK



7.3 INFRASTRUKTUR FOR KVANTEMUNIKATION



7.4 HARDWARE TIL KVANTEMUNIKATION



8

PRAKTISKE OG BLØDE FÆRDIGHEDER

8.1

**PRAKTISK/
EKSPERIMENTELLE FÆRDIGHEDER**

8.2

**KLASSISK
PROGRAMMERING**

- Programmeringssprog
- Klassiske algoritmer
- Kompleksitetsklasser
- Klassisk kryptografi
- Postkvantekryptografi

8.3

**LEDELSE OG
LEDELSESEVNER**

- Overblik, potentiale og begrænsninger
- Økonomisk effekt af QT
- Entreprenørskab
- Projektdesign og implementering

8.4

**VIDEN OM
INDUSTRIELLE PROCESSER**

8.5

**FORBINDELSE QT MED
APPLIKATIONER OG BRUGSCASER**

- Viden indenfor områderne
brugssager
- Kortlægning af use cases til
kvantealgoritmer
- Anerkendelse af
kvantefordele
- Anvendelse af kompleksitetsteori

8.6

**UNDERVISNING OG
OPSOMMENDE FÆRDIGHEDER**

8.7

**NETVÆRK OG
KOMMUNIKATIONSEGENSKABER**

- Kommunikation med eksperter
inden for anvendelsesområderne
- Kommunikation med kunder

8.8

**FORSKNINGSETIK, ANSVARLIG
FORSKNING OG INNOVATION**

8.9

**IMMATERIELL EJENDOMSVIDEN,
STANDARDISERING, CERTIFICERING**