



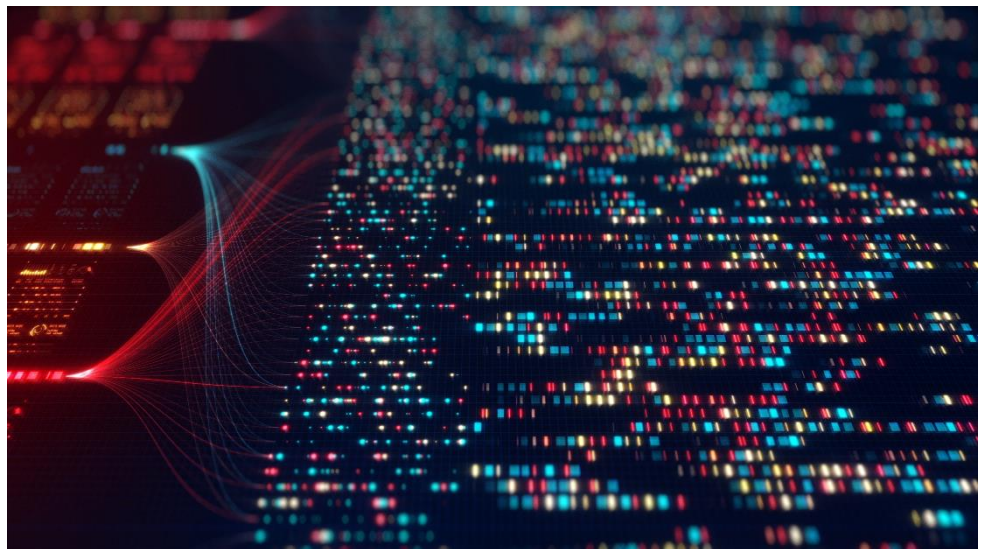
# Kvantberäkningar för optimeringsproblem

En introduktion med fokus på försvarstillämpningar

CHARLOTTA BENGTON OCH JOHAN NILSSON

Charlotta Bengtson och Johan Nilsson

# Kvantberäkningar för optimeringsproblem



En introduktion med fokus på försvarstillämpningar

Titel	Kvantberäkningar för optimeringsproblem – En introduktion med fokus på försvarstillämpningar
Title	Quantum computation for optimization problems
Rapportnr/Report no	FOI-R--5827--SE
Månad/Month	Januari
Utgivningsår/Year	2026
Antal sidor/Pages	41
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsdepartementet
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	A53005
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

Bild/Cover: Shutterstock

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

## Sammanfattning

Kvantteknologier är ett samlingsbegrepp för en rad olika teknologier som baseras på kvantfenomen. Idag är vi inne i vad som brukar benämnas den andra kvantrevolutionen, där vi inte bara förstår den underliggande teorin för kvantsystem, utan har lärt oss designa kvantsystem där kvanteffekter kan utnyttjas som resurser. I kvantberäkningar utnyttjas kvanteffekterna sammanflätning och superposition för att utveckla algoritmer som kan komma att överträffa de algoritmer som endast baseras på klassisk fysik. Det finns olika klasser av sådana algoritmer, men för att de ska kunna implementeras och faktiskt kunna påvisa en så kallad kvantfördel krävs också att det finns kvanthårdvara (kvantdatorer) som kan hantera tillräckligt stora problem. De hårdvaruparadigm som existerar på marknaden idag är framförallt två; quantum annealers och begränsade grindbaserade kvantdatorer av typen NISQ (noisy-intermediate-scale-quantum). För dessa två är det idag i huvudsak algoritmer för att lösa optimeringsproblem som utforskas. Det finns studier som indikerar att det för dessa algoritmer kan finnas kvantfördelar att dra nytta av för tillräckligt stora och komplexa problem. De algoritmer som utvecklas för att lösa dessa optimeringsproblem är dock heuristiska och måste prövas från fall till fall. Användning av kvantalgoritmer som bygger på helt felkorrigerade kvantbitar ligger långt in i framtiden. Nuvarande forskningsfronten är att realisera ett fåtal måttligt felkorrigerade kvantbitar. I den här rapporten ges först en introduktion till kvantberäkningar och centrala begrepp som används för att beskriva kvantalgoritmer och kvantdatorer. Sedan beskrivs kvantalgoritmer och kvantdatorer generellt innan praktiska hårdvaruparadigm för kvantdatorer introduceras. Fysiken och arkitekturen bakom olika typer av kvantdatorer beskrivs samt vilka typer av kvantdatorer som finns på marknaden idag. Kvantalgoritmer för optimeringsproblem och dess potentiella försvarstillämpningar introduceras och fysiken bakom hur dessa algoritmer är praktiskt implementerade beskrivs. Slutligen diskuteras olika typer av benchmarks för att kunna avgöra om en kvantberäkning verkligen presterar bättre än vad som är möjligt med de klassiska metoder som redan finns. Syftet med rapporten är att ge en sammanfattande introduktion om hur och varför kvantberäkningar kan komma att utgöra en alternativ lösningsmetod när det gäller vissa typer av militärt relevanta optimeringsproblem.

**Nyckelord:** Kvantalgoritmer, kvantberäkningar, kvantfördel, optimering, kvantdatorer, kvantbit, kvantgrind, kvantsystem, quantum annealers, NISQ, superposition, sammanflätning, kvantteknologi.

## Summary

Quantum technologies in the second quantum revolution utilize quantum effects as a resource to go beyond technologies based on classical physics. In quantum computation entanglement and superposition are used to develop algorithms that can be superior to classical algorithms. To be useful such algorithms must be implemented on quantum computers that can handle sufficiently large problems. There are mainly two hardware paradigms that are available on the market today: quantum annealers and limited gate-based quantum computers of the NISQ-type (noisy-intermediate-scale-quantum). On these, algorithms for solving optimization problems are of particular interest. Most of these algorithms are heuristic and hence there is no guarantee of success, but some studies indicate that there may be a quantum advantage in some cases. Implementation of algorithms based on fully error-corrected qubits lies in the far future. Current state of the art research on hardware is to implement a few qubits with rudimentary error-correction.

In this report we first give an introduction to quantum computation and related concepts. Then quantum algorithms and quantum computers are introduced on a general level before the limited hardware that is available on the market today is discussed. Thereafter we describe quantum algorithms for optimization problems and their potential future applications in defense. Finally benchmarks that may be used to quantify how quantum and classical algorithms compare are discussed. The aim of this report is to give an introduction to why and how quantum computation may become an alternative route for solving certain military relevant optimization problems.

**Keywords:** Quantum algorithms, quantum computation, quantum advantage, optimization, quantum computer, qubit, quantum gate, quantum system, quantum annealer, NISQ, superposition, entanglement, quantum technology.

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Från kvantberäkningars födelse till dagens hopp om kvantfördelar ...</b>	<b>9</b>
2.1	Centrala begrepp inom kvantberäkningar .....	9
2.2	Utvecklingen av kvantberäkningar .....	10
2.3	Kvantdatorns beståndsdelar .....	11
2.4	Hur fungerar en kvantalgoritm? .....	12
2.5	Vad innebär kvantfördel? .....	13
<b>3</b>	<b>Hårdvaruplattformer för kvantberäkningar .....</b>	<b>15</b>
3.1	Hårdvaruparadigm .....	15
3.2	Realisering av komponenterna i en kvantdator .....	16
3.3	Sammanställning av hårdvaruplattformer .....	18
3.4	Molntjänster .....	19
3.5	Några utvalda forskningsresultat från det senaste året .....	20
<b>4</b>	<b>Kvantalgoritmer för optimeringsproblem .....</b>	<b>23</b>
4.1	Vad är ett kombinatoriskt optimeringsproblem? .....	23
4.2	Adiabatisk kvantberäkning och Ising-modellen .....	25
4.3	Att lösa optimeringsproblem med en quantum annealer .....	26
4.4	Att lösa optimeringsproblem med en universell kvantdator .....	27
<b>5</b>	<b>Utvärdering av prestandan hos kvantdatorer och kvantalgoritmer ...</b>	<b>31</b>
5.1	Benchmarking av kvantdatorer .....	31
<b>6</b>	<b>Diskussion och utblick .....</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>37</b>



# 1 Inledning

Året då detta skrivs, år 2025, är utnämnt av FN som "International year of quantum science and technology" [1]. Detta för att fira och uppmärksamma det 100-årsjubileum som kvantteorin officiellt firar i år. Därtill tilldelades 2025 års Nobelpris i fysik upptäckten av att det går att manipulera supraledande elektriska kretsar så att de beter sig som kvant-system [2]. Det är en upptäckt som bland annat lagt grunden för ett av de mest utvecklade hårdvaruparadigmen för kvantdatorer som finns. Den framgångsrika kvantteorin har givit oss teknologi såsom halvledare, laser och transistorer i vad som brukar refereras till som den första kvantrevolutionen. I denna första kvantrevolution är det förståelsen av hur subatomära partiklar beskrivs som ligger bakom teknikutvecklingen. Idag är vi mitt uppe i den andra kvantrevolutionen där teknologier såsom kvantdatorer och kvantsensorer utvecklas. I denna era baseras inte teknikutvecklingen endast på förståelse av hur vi beskriver materia på de allra minsta längd- och tidskalorna, utan nu kan vi även designa kvanttillstånd och kvantsystem för att utnyttja genuina kvanteffekter som resurser. Så är till exempel ett sammanflätat kvanttillstånd en resurs för effektiv informationsöverföring [3], vilket kan nyttjas i kvantdatorer.

Kvantteknologierna i den andra revolutionen kan delas upp i tre huvudområden; kvantsensorer, kvantberäkningar och kvantkommunikation. Kvantsensorer av olika slag kan förbättra prestandan jämfört med nuvarande sensorsystem medan kvantkommunikation och kvantberäkningar kan introducera helt nya förmågor, såsom kvantnyckelöverföring och kvantberäkningar för att lösa optimeringsproblem som är bortom vad vi kan lösa med dagens datorer. Kvantberäkningar innefattar kvantalgoritmer, som kan beskrivas som algoritmer där kvanteffekter utnyttjas för att skapa en algoritm som är beräkningsmässigt mer effektiv än motsvarande klassiska algoritm, samt kvantdatorer, vilket beskriver den hårdvara som kan åstadkomma kvantoperationer och därmed utföra den beräkning som kvantalgoritmen specificerar. Det ska noteras att man inte måste ha en kvantdator för att utföra en beräkning med en kvantalgoritm, men med dagens klassiska datorer skulle det rent tidsmässigt inte vara möjligt att lösa problem som har en värdefull tillämpning. Därför väljer vi i denna rapport att sammanföra kvantalgoritmer och kvantdatorer som "kvantberäkningar" för att tydliggöra att vårt intresse och fokus är kvantalgoritmer som utförs på kvantdatorer. Vad det gäller kvantberäkningar kan även det delas in i tre huvudområden; kvantsimuleringar för fysik och kemi, optimeringsproblem, samt kvantmaskininlärning.

Uttrycket "Quantum warfare" förekommer i litteraturen och definieras bland annat av Kreliina som krigsföring där kvantteknologier används för militära tillämpningar [4]. Att definiera en "kvantdomän" som en ny domän är dock svårare då kvantteknologier är en faktor som kan komma att påverka alla förekommande militära domäner snarare än att bilda en egen. Ett av de tillämpningsområden av kvantteknologier som det finns stort militärt intresse för, är att lösa svåra kombinatoriska optimeringsproblem [4, 5]. Många av dessa problem, såsom resursallokering och optimering av logistikkedjor, återfinns även i den civila sektorn eftersom optimeringsproblem uppstår i många sammanhang även där. Även om "kvantoptimering" inte nödvändigtvis kommer att innebära en förbättring för alla typer av optimeringsproblem, så utgör det en alternativ verktygslåda med potential att lösa optimeringsproblem som är svåra, eller rent av omöjliga, att lösa med dagens klassiska algoritmer. Det är också en tillämpning av kvantberäkningar som många spår först kommer att innebära en nytta för lösandet av verkliga problem.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Se till exempel kapitlet "Why quantum computing?", sidan 9-11 i Ezratty [6], en sammanställning på knappt 1600 sidor från 2024 om kvantteknologier.

Intresset för kvantteknologier för militära tillämpningar märks inte minst inom Nato Science and Technology Organization (STO), där den senast upprättade panelen "Technology and Science Incubation" (TSI) har en underkommitté inom just kvantteknologier. Dessförinnan fanns ett tiotal forskningsgrupper som behandlar olika aspekter av kvantteknologier och Nato STO utgav under mars 2023 "Science and Technology Trends 2023-2043", vilket är en utförlig översikt över tio kommande och banbrytande teknologier. Sju teknologier omnämndes som banbrytande och tre teknologier som kommande. Kvantteknologier är en av de tre kommande teknologierna i denna rapport. I årets vidareutveckling av detta arbete, "Science and Technology Trends 2025-2045" [7] fördjupas betydelsen av kvantteknologier för militär förmåga och dess konvergens med andra teknologier inom olika domäner.

I den här rapporten ges en introduktion till kvantberäkningar samt hur och varför de kan användas för att lösa komplexa optimeringsproblem. Rapporten inleder med en introduktion till kvantteori, kvanteffekter, kvantdatorer och kvantalgoritmer i kapitel 2. Där introduceras centrala begrepp som behövs för att tillgodogöra sig innehållet i rapporten. I kapitel 3 ges en överblick över olika typer av hårdvara för kvantdatorer samt vilka klasser av kvantalgoritmer de är anpassade för. Rapportens huvudtema, kvantalgoritmer för optimering, beskrivs i kapitel 4. Möjligheten att jämföra en given kvantalgo- ritm med den bästa klassiska algoritmen för samma problem (för en given hårdvara) och därmed kvantifiera en kvantfördel, behandlas i kapitel 5. Rapporten avslutas med en diskussion och utblick i kapitel 6. Vi försöker genomgående i rapporten att knyta an till försvarstillämpningar.

## 2 Från kvantberäkningars födelse till dagens hopp om kvantfördelar

Kvantteori är en av de mest framgångsrika teorierna genom tiderna inom fysik och beskriver materia på de allra minsta längd- och tidskalorna. Vi är nu inne i en tidsera där vi inte bara har lärt oss att beskriva kvantsystem – vi har nu också lärt oss att designa dem. I det här kapitlet sammanställs först centrala begrepp inom kvantberäkningar. Därefter ges en kort introduktion för att sätta kvantberäkningar i en kontext. Slutligen introduceras vad kvantalgoritmer och kvantdatorer är och varför de är intressanta.

### 2.1 Centrala begrepp inom kvantberäkningar

För att kunna förstå vad som skiljer en kvantalgoritm och en kvantdator från en klassisk algoritm och en klassisk dator, är det några begrepp som är centrala. Dessa beskrivs i Informationsruta 1 (Centrala begrepp inom kvantteori) och Informationsruta 2 (Centrala begrepp inom kvantberäkningar).

#### Informationsruta 1: Centrala begrepp inom kvantteori

##### Kvanttillstånd och kvantsystem

Ett kvanttillstånd beskriver ett kvantsystem och innehåller således all information om kvantsystemet (såsom energi, spinn och polarisation). När den rumsliga aspekten av kvanttillståndet inte beaktas kan man tänka på kvanttillståndet som en vektor där varje basvektor är ett baskvanttillstånd.

##### Schrödingerekvationen

Schrödingerekvationen beskriver utvecklingen av ett kvanttillstånd i rummet och tiden. Ekvationen är ett postulat och kan inte härledas från klassisk fysik eller en mer fundamental teori. Partiklars rumsliga utbredning ges i termer av vågfunktioner, vilka utgör lösningar till Schrödingerekvationen.

##### Kvantisering av energinivåer

Schrödingerekvationen relaterar en energioperator för kvantsystemet till diskreta energinivåer. Energinivåerna är kvantiserade och motsvarar de lösningar till Schrödingerekvationen som i klassisk vågmekanik benämns stående vågor.

##### Amplituder och sannolikheter

Kvanttillstånd är förbundna med tidsberoende koefficienter i form av komplexa tal. En vedertagen tolkning av kvantmekaniken är att amplituden för ett kvanttillstånd i kvadrat, vilket utgör ett reellt tal, är sannolikheten för att kvantsystemet ska befinna sig i just det kvanttillståndet vid en given tidpunkt.

##### Superposition av kvanttillstånd

På grund av att egenskaper hos Schrödingerekvationen (linjäritet), kan nya kvanttillstånd ges som en summa (med komplexa, tidsberoende koefficienter) av de tillåtna kvanttillstånden för systemet. Ett sådant nytt kvanttillstånd kallas för en superposition.

##### Kvantsammanflätning

I kvantvärlden finns möjligheten att två partiklar som en gång har interagerat inte kan beskrivas var för sig utan måste beskrivas med ett gemensamt tillstånd. Man benämner detta ett sammanflätat kvanttillstånd och det är med sammanflätade tillstånd som kvantteori definitivt avviker från klassisk fysik.

## Informationsruta 2: Centrala begrepp inom kvantberäkningar

### Kvantbit

En kvantbit är ett särskilt kvanttillstånd och utgör den fundamentala informationsenheten i kvantberäkningar. Bas-kvanttillstånden är här "0" och "1" och kvantbiten är alla de tillstånd som kan representeras som en superposition av dessa två bas-kvanttillstånd (med komplexa, tidsberoende koefficienter).

### Kvantgrind

En logisk kvantgrind, eller bara "kvantgrind", motsvarar logiska grindar i en klassisk beräkning. Med hjälp av kvantgrindarna styrs tidsutvecklingen (enligt Schrödingerekvationen) i ett system av kvantbitar.

### Kvantdator

En kvantdator är en typ av hårdvara för beräkningar där kvantbitar och kvantgrindar är de fundamentala komponenterna.

### Kvantalgoritm

En kvantalgoritm är en algoritm utvecklad för att utföras på en kvantdator. Genom att använda kvanteffekterna sammanflätning och superposition kan algoritmer som inte har någon klassisk motsvarighet utvecklas och implementeras.

### "No cloning theorem"

No cloning theorem innebär att det inte går att kopiera informationen som en godtycklig kvantbit innehåller. Detta teorem förhindrar användningen av klassiska felkorrigeringsscheman i en kvantberäkning.

### Brus, dekoherens och felkorrigering

Kvantsystem är väldigt känsliga för omgivningseffekter och brus skapar det som kallas dekoherens, vilket är avtagandet av kvanteffekter såsom kvantsammanflätning i kvantsystemet. Bruset introducerar också slumpmässiga fel i kvantberäkningarna och måste korrigeras med hjälp av kvantfelkorrigering, vilket är komplicerat och resurskrävande i termer av extra kvantbitar.

## 2.2 Utvecklingen av kvantberäkningar

År 1982 föreslog fysikern och Nobelpristagaren Richard Feynman att det enda sättet att simulera ett godtyckligt stort kvantsystem för till exempel kvantkemiska beräkningar, är genom att använda ett annat kvantsystem [8]. Han refererar också till denna nya föreslagna beräkningsmaskin som en kvantdator. 14 år senare, år 1996, visade Seth Lloyd att det verkligen är möjligt att simulera ett kvantsystem effektivt med en kvantdator precis som Feynman föreslagit [9]. Enkelt uttryckt kan en kvantdator simulera ett annat kvantsystem genom att med tillräckligt små steg röra sig fram och tillbaka i olika riktningar. Det brukar populärt förklaras med analogin att en bil kan parkeras i en liten ruta, bara försumbart längre än bilen själv, men bara om inkörningen i rutan sker i tillräckligt många och små steg framåt och bakåt.

Peter Shor publicerade år 1994 en kvantalgoritm som kan faktorisera heltal i sina primtalsbeståndsdelar exponentiellt snabbare än den då bästa kända klassiska algoritmen [10]. Det är denna algoritm som på senare tid orsakat mediasubriker då dagens protokoll för säker kommunikation på internet använder RSA-kryptering (Rivest-Shamir-Adleman), som bygger på att det anses vara svårt att faktorisera en produkt av två stora primtal. Shors algoritm följdes 1996 av Grovers algoritm som är en kvantalgoritm för att söka i en ostrukturerad databas med en kvadratisk uppsnabbning jämfört med motsvarande klassiska algoritm [11]. Dessa två algoritmer med sina teoretiskt garanterade kvantfördelar i form av

snabbare beräkningar har motiverat att försöka realisera en kvantdator. Idag fungerar Shors och Grovers algoritmer som subrutiner – eller byggstenar om man så vill – i andra kvantalgoritmer.

För att beskriva och utveckla kvantalgoritmer och kvantdatorer används kvant-informationsteori, vilket innefattar den teori som krävs för att förstå informationsflödet i kvantsystem såsom en kvantdator. Mycket av den fundamentala teorin är direkt analog med klassisk informationsteori, men modifierad för att dynamiken ska följa kvantmekanikens lagar. Kvantsammanflätning och icke kopierbar information [12] (no cloning theorem), ligger både bakom kvantdatorers potential att utföra snabbare och mer effektiva beräkningar, men också varför de är så svåra att realisera i verkligheten. Kvantsammanflätningar kan ses som en resurs som kan möjliggöra uppgifter som inte är möjliga med ett klassiskt ramverk. Samtidigt är det känsligt för omgivningens brus och förbrukas då utan att göra nytta i beräkningen.

## 2.3 Kvantdatorns beståndsdelar

För att beskriva en kvantdator och dess beståndsdelar, utgår man ofta ifrån kvantkretsparadigmet. Andra paradigmer finns också och kommer att nämnas senare i rapporten. I beskrivningen av en kvantdator används i detta paradigm samma terminologi som i beskrivningen av en klassisk dator, men med ”kvant” som ett prefix. Kvantdatorn lagrar och manipulerar ett register om  $N$  kvantbitar med hjälp av kvantgrindar. Kort sammanfattat, det krävs följande fyra beståndsdelar för att representera och beskriva en kvantdator:

1. Kvantbitar för att representera data.
2. Tillståndspreparering för att skapa det initialtillstånd för kvantbitarna som krävs för att starta beräkningen.
3. Kvantgrindar verkandes på kvantbitarna för att manipulera data.
4. Mätningar på kvantbitarna för att avläsa det slutliga resultatet av beräkningen.

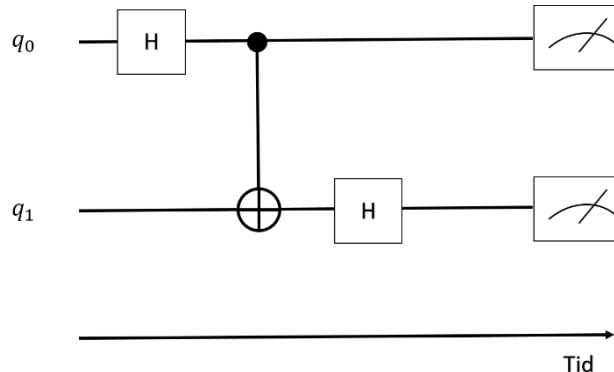
Beräkningsstegen 2 till 4 behöver oftast upprepas. Svaret kommer då att ges som en sannolikhetsfördelning över de möjliga utfallen där det korrekta svaret kommer att förekomma med störst sannolikhet. Detta relaterar tillbaka till amplituder och sannolikheter i Informationsruta 1.

Kvanteffekter såsom sammanflätning är bestående endast under en begränsad tid. Denna tid brukar benämnas koherenstid. Ju längre koherenstid, desto fler gånger kan en kvantgrind appliceras på en kvantbit. Att förlänga koherenstiden förbättrar alltså en kvantdators prestanda. Ett sätt att förlänga koherenstiden är att isolera kvantsystemet från dess omgivning. Samtidigt är det nödvändigt att kunna interagera med kvantbitarna i en kvantdator för att först initialisera kvantsystemet inför en beräkning och för att kunna utföra en mätning och därmed erhålla resultatet av beräkningen.

Något annat som försvårar kvantberäkningar är oexakta kvantgrindar, det vill säga en kvantgrind som inte åstadkommer exakt det kvanttillstånd som var avsett utan ett kvanttillstånd som endast är närliggande. Även om det går att korrigera felet (begreppet ”felkorrigering” används i sammanhanget) genom användning av så kallade logiska kvantbitar, kräver det oerhört stora resurser i form av en stor mängd extra kvantbitar som tillsammans agerar som en enda perfekt kvantbit. Man gör alltså en distinktion mellan en *fysisk* kvantbit (en enda) och en *logisk* kvantbit (uppbyggd av flera fysiska kvantbitar). Att det inte går att korrigera felet med mer än att förbruka ett stort antal extra kvantbitar, beror återigen på att kvantinformation – till skillnad från klassisk information – inte kan kopieras (se ”no cloning theorem” [12]).

### 2.3.1 Att läsa kvantkretsdiagram

En kvantkrets kan sägas vara en praktisk realisering av en kvantalgoritm. Därför illustreras ofta kvantalgoritmer med hjälp av kvantkretsdiagram i litteraturen. Ett enkelt kvantkretsdiagram kan se ut som i Figur 1.



Figur 1: Illustration av ett kvantkretsdiagram. Till vänster ses kvantsystemets initialtillstånd för kvantbitarna  $q_0$  och  $q_1$  och till höger mätningarna. Däremellan två kvantgrindar (betecknade H i figuren) som verkar på en kvantbit, samt en två-kvantbitsgrind representerad av det lodrätta strecket med tillhörande cirklar.

De horisontella linjerna representerar ett kvantbitsregister, det vill säga en uppsättning kvantbitar. I det här fallet består registret av två kvantbitar ( $N = 2$ ), kvantbitarna  $q_0$  och  $q_1$ . Kvantgrindarna (betecknade H i diagrammet) är sådana att de kan verka på antingen en kvantbit eller två kvantbitar. En vanlig sådan två-kvantbitsgrind är den som kallas CNOT (Controlled-Not) och som finns representerad som ett lodrätt streck med tillhörande cirklar i Figur 1. Mer information om kvantgrindar återfinns i avsnitt 3.2.2.

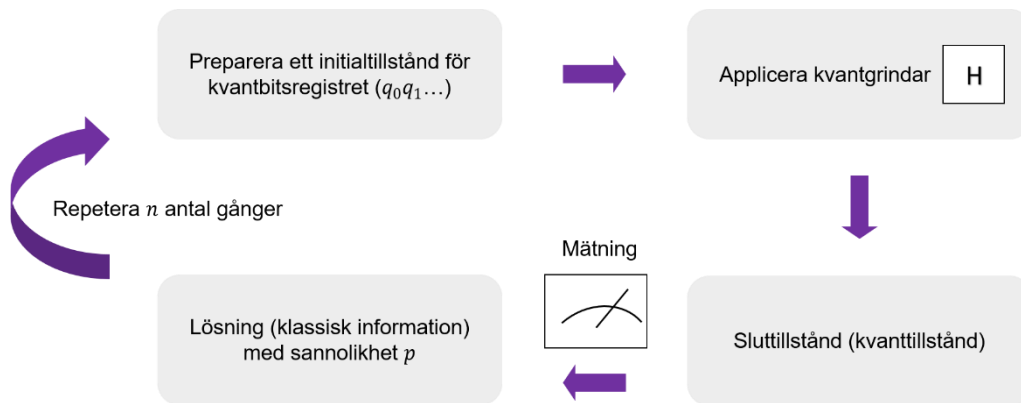
I ett kvantkretsdiagram går tiden från vänster till höger och kvantgrindarna är ordnade i kronologisk ordning, så att den kvantgrind som är längst till vänster appliceras först. Varje tidssteg i kvantalgoritmen benämns som en cykel. Sist i kvantkretsdiagrammet utförs en mätning av varje kvantbit. Resultatet av denna mätning är en bitsträng av klassisk information där varje kvantbit ger resultatet 0 eller 1. Det ska noteras att det även finns kvantalgoritmer där man inte enbart mäter en gång i slutet av beräkningen, men det vanligaste tillvägagångssättet är att man utför mätningen sist såsom beskrivet ovan.

## 2.4 Hur fungerar en kvantalgoritm?

Tillämpningen av en generell kvantalgoritm sker enligt följande steg:

1. **Välj ett initialtillstånd för kvantbitsregistret.** Optimalt är att detta tillstånd även är enkelt att preparera praktiskt på en kvantdator, se avsnitt 2.3. Detta tillstånd är alltså det tillstånd som kvantbitarna initieras i.
2. **Applicera en uppsättning kvantgrindar på initialtillståndet.** Kvanttillståndet utvecklas då i tiden enligt Schrödinger-ekvationen, det vill säga, den ekvation som beskriver ett kvantsystem (se [Informationsruta 1](#)).
3. **Utför en mätning på sluttillståndet.** Vid mätningen erhålls informationen i form av klassiska bitar, det vill säga, varje kvantbit mäts som antingen 0 eller 1.

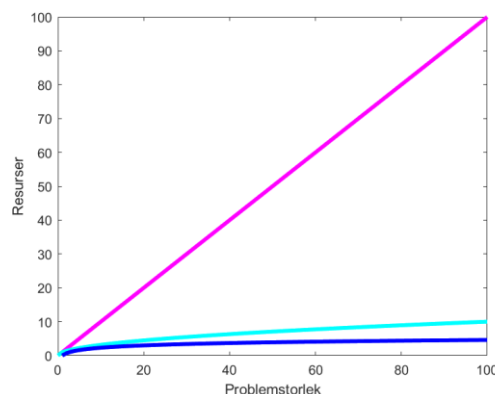
Genom att upprepa steg 1-3  $n$  antal gånger kommer typiskt en konfiguration av varje kvantbits tillstånd att förekomma med signifikant högre sannolikhet än de andra möjliga konfigurationerna. Detta är lösningen till problemet som kvantalgoritmen är utformad att lösa. Ett schematiskt flödesdiagram över en generisk kvantalgoritm visas i Figur 2.



Figur 2: Schematisk beskrivning av en kvantalgoritm där beräkningarna repeteras  $n$  gånger.

## 2.5 Vad innebär kvantfördel?

Motivationen för att utveckla kvantalgoritmer och kvantdatorer ligger i den beräkningsmässiga kvantfördel (quantum advantage) som kan erhållas. Länge definierades denna fördel endast i termer av en snabbare beräkning jämfört med motsvarande klassiska algoritmer och grafer såsom den i Figur 3 visades flitigt. Här ses den uppsnabbning som de två grundbultarna, Shors algoritm och Grovers algoritm ger. I sammanhanget är beräkningstiden proportionell mot antalet resurser, därav en kortare beräkningstid (uppsnabbning) för en algoritm som kräver mindre resurser.



Figur 3: Illustration över kvantfördel för Grovers och Shors algoritm. Resurserna för Grover skalar som  $\sqrt{N}$  (cyan), Shor som  $\log(N)$  (blå) jämfört med klassiska  $N$  (magenta).

Det är viktigt att komma ihåg att illustrationen i Figur 3 endast ger den teoretiskt möjliga uppsnabbningen av dessa beräkningar. Dels är denna teoretiskt möjliga uppsnabbning inte möjlig i praktiken av flera anledningar, såsom att dagens kvantgrindar inte är snabba nog vilket gör att beräkningstiden är längre i praktiken, dels finns det andra möjliga kvantfördelar än uppsnabbning. Exempel på sådana fördelar är ökad noggrannhet eller bättre energieffektivitet.

När det gäller möjligheten att erhålla en kvantfördel, kan kvantalgoritmer delas upp i tre grupper.

- **Grupp 1:** En klassisk (tidseffektiv) algoritm för att lösa problemet existerar. I så fall kan denna i många fall transformeras till en kvantalgoritm. Detta är relevant i de fallen där kvantalgoritmen presterar bättre än den klassiska algoritmen sett ur den åtgångna beräkningstiden. En svårighet med den här gruppen av algoritmer är att klassiska algoritmer och kvantdatorer och -algoritmer utvecklas parallellt, vilket gör att över tid kan det vara svårt att avgöra om det är bättre att använda en

kvantalgoritmer eller om det redan finns en bättre klassisk algoritmer än den man först jämförde med.

- **Grupp 2:** Kvantalgoritmer som är kostnads- och/eller energieffektivare än motsvarande klassiska algoritmer. I de fall att det existerar en tidseffektiv klassisk algoritmer, kan det ändå vara intressant ur ett ekonomiskt och energetiskt perspektiv att undersöka tillämpningen av en kvantalgoritmer. Skillnaden mot de kvantalgoritmer som faller inom ramen för grupp 1 är att i det här fallet söker man inte en tidsuppsnabbning utan är endast ute efter andra fördelar (lägre ekonomisk kostnad och/eller energiförbrukning).
- **Grupp 3:** Ingen klassisk (tidseffektiv) algoritmer existerar. Utmaningen ligger i att utveckla en kvantalgoritmer utan klassisk förebild.

## 3 Hårdvaruplattformar för kvantberäkningar

För att kvantalgoritmer ska ge en fördel gentemot en klassisk algoritm, krävs det att beräkningen sker på en kvantdator. Därför sker utvecklingen av kvantalgoritmer parallellt med utvecklingen av hårdvara och olika hårdvara lämpar sig olika väl för olika typer av kvantalgoritmer. I litteraturen är det framför allt två typer av hårdvara som är intressanta; så kallade quantum annealers (som inte har någon bra svensk översättning) och universella grindbaserade kvantdatorer.<sup>2</sup> Dessa två hårdvaruparadigm skiljer sig väsentligt åt. I det här kapitlet presenteras dessa olika hårdvaruparadigm, komponenter i en kvantdator samt olika hårdvaruplattformar. Molntjänster för kvantberäkningar samt några aktuella forskningsresultat diskuteras också.

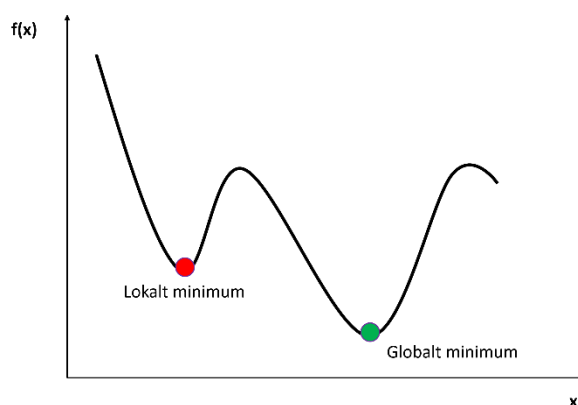
### 3.1 Hårdvaruparadigm

De olika hårdvaruparadigm som kvantdatorer är konstruerade enligt, avgör vilka typer av problem de är lämpade för att lösa. I det här avsnittet beskrivs quantum annealers och universella kvantdatorer.

#### 3.1.1 Quantum annealers

En quantum annealer är ett system med många kvantbitar vars dynamik liknar den hos det modellsystem vi vill studera och förstå. En quantum annealer kan inte användas för att implementera en godtycklig kvantalgoritm. Kvantberäkningen styrs därför istället av ett kvantmekaniskt system som, i möjligaste mån, efterliknar en klass av andra kvantmekaniska system.

Quantum annealing är en heuristisk version av adiabatisk kvantberäkning, som förklaras närmare i avsnitt 4.2, och baseras på arbetet av Kadowaski och Nishimori [14]. Processen kan liknas vid att en boll släpps och långsamt rullar nedåt mot ett minimum. I det klassiska fallet kan bollen fastna i ett minimum som är lokalt och inte det globalt optimala minimumet, se Figur 4. I kvantvärlden finns däremot möjligheten att bollen tunnlar, alltså tar sig igenom en barriär, och hamnar i det globalt optimala minimumet.



Figur 4: Illustration av globalt respektive lokalt minimum. En boll som släpps från en höjd rullar ner mot ett minimum. Om hastigheten inte är hög nog kan bollen fastna i det lokala minimumet i figuren. Är däremot hastigheten hög nog kan bollen ta sig över barriären mellan det lokala och globala minimumet och hamna i det globala minimumet.

<sup>2</sup> För kvantsystem som bygger på fotoner finns andra paradigmat som till exempel ”Fusions-baserade kvantberäkningar” som introducerades av företaget PsiQuantum [13].

Fördelen med quantum annealers är att de har många kvantbitar. Nackdelarna är att interaktionen mellan kvantbitarna (som är avgörande för hur väl beräkningen kan genomföras) inte är helt kontrollerad och att det är osäkert hur länge kvanteffekterna i systemet verkligen består (hur lång koherenstiden är).

### 3.1.2 Universella kvantdatorer

En universell kvantdator är baserad på grindparadigmet och har därmed en uppbyggnad som kan beskrivas med liknande terminologi som en klassisk dator (se avsnitt 2.3). En grindbaserad universell kvantdator kan, om den är lämpligt programmerad, användas för att simulera ett godtyckligt fysikaliskt system. Dessa kvantdatorer kan också noggrant kontrolleras med hjälp av kvantfelkorrigering, ett begrepp som introducerades i [Informationsruta 2](#) i kapitel 2. De kan därmed placeras in i klassen felkorrigerade kvantdatorer, som kan utföra ”fault tolerant quantum computing”. Denna process är resurskrävande i termer av antalet kvantbitar och logiska grindar som krävs, och de kvantdatorer med rudimentär felkorrigering som finns idag har endast ett fåtal logiska kvantbitar.<sup>3</sup> Av de felkorrigeringskoder som används är så kallade ytkoder vanligast förekommande, men att hitta mer effektiva koder är ett aktivt forskningsområde [16].

I väntan på felkorrigerade kvantdatorer som uppnått det antal logiska kvantbitar som krävs för att lösa ”riktiga” problem, används idag kvantdatorer utan felkorrigering. Dessa kvantdatorer benämns NISQ-datorer där NISQ är akronym för ”noisy intermediate-scale quantum”, ett begrepp som myntades av fysikern John Preskill [17]. ”Noisy” refererar till att det existerar icke-kontrollerade interaktioner både mellan kvantbitarna och mellan systemet av kvantbitar och deras omgivning, interaktioner som kan medföra en försämrad prestanda. ”Intermediate scale” syftar både på det begränsade antalet kvantbitar i NISQ-datorer, samt den begränsade kopplingen mellan dessa kvantbitar. Eftersom NISQ-datorerna inte skyddas av kvant-felkorrigering, är de kraftigt begränsade i vilken omfattning som noggranna beräkningar kan utföras.

Idag utvecklas även kvantdatorer med fel-lindringstekniker, så kallade ”error-mitigation techniques” [18, 19]. Konceptet kan liknas vid mekanismen bakom brusreducerande hörlurar, där en motriktad störande signal skickas ut som delvis släcker ut bruset.

På grund av utvecklingen av felkorrigering som flera stora aktörer arbetar med kommer i framtiden allt fler kvantoperationer kunna göras på logiska kvantbitar innan fel introduceras. Frågan är då vad som kommer att ersätta NISQ-konceptet. Preskill har nyligen föreslagit att vi bör diskutera kvantdatorer i termer av megaquops (miljontals kvant-operationer), och senare gigaquops, och så vidare [20]. Frågeställningarna blir då: Vad går det att beräkna med 1 Mquops? När finns en kvantdator som klarar av 1 Mquops? osv.

Fördelen med universella kvantdatorer är, som redan nämnts, att de går att använda till alla typer av beräkningsproblem och att de har en kontrollerad konfiguration och interaktion mellan kvantbitarna i systemet. Nackdelen är att de är störningskänsliga och att det ännu kommer att dröja innan det finns felkorrigerande kvantdatorer som kan användas för verkliga beräkningsproblem.

## 3.2 Realisering av komponenterna i en kvantdator

En teoretisk introduktion av kvantbitar och kvantgrindar återfinns i avsnitt 2.3. I det här avsnittet beskrivs hur kvantbitar och kvantgrindar realiseras i de hårdvaruplattformar som finns på marknaden idag.

<sup>3</sup> Se Tabell 3 på sidan 267 i [15] för state of the art.

### 3.2.1 Kvantbitar

Allmänt kan alla kvantmekaniska system som kan isoleras, manipuleras, och mätas tillräckligt bra användas som kvantbitar. De mest populära plattformarna är baserade på atomer respektive supraledare:

- I atombaserade kvantbitar (kalla atomer och joner fångade i jonfällor) används diskreta energinivåer i atomerna som kvantbitens tillstånd. Övergångar mellan olika tillstånd kan kontrolleras med hjälp av elektromagnetiska vågor av rätt våglängd, ofta i form av lasrar. Grundforskning om detta har pågått i många år och lett till välutvecklade och förfinade metoder. Eftersom alla atomer av samma slag är identiska fås automatiskt identiska kvantbitar av hög kvalitet i dessa system.
- I kvantbitar som bygger på supraledare använder man att en supraledare fungerar som ett makroskopiskt kvantmekaniskt objekt<sup>4</sup>. Diskreta energitillstånd för dessa kan designas på många olika sätt genom att kombinera supraledande element med magnetfält, tunnelbarriärer, och andra elektroniska komponenter som till exempel kondensatorer och induktanser. Eftersom dessa kvantbitar är tillverkade (ibland talar man om *artificiella atomer*) är det en stor utmaning att göra dem helt identiska med varandra. Detta ger upphov till fel och brus i kvantdatoren.

Som diskuteras i kapitel 5, är antalet användbara kvantbitar ett viktigt kvalitetsmått för kvantdatorer. Samtidigt är det viktigt att kvaliteten på kvantbitarna är fortsatt hög när antalet skalas upp. Detta är ett av de stora problemen att lösa för att kunna bygga mer kraftfulla kvantdatorer av denna typ i framtiden.

För en detaljerad beskrivning av hur kvantbitarna realiserar i olika system hänvisar vi till den aktuella referenslitteraturen, till exempel kapitlet om ”Quantum computing hardware” i [6] och de många referenserna som finns däri.

### 3.2.2 Kvantgrindar

För att kunna utföra alla kvantalgoritmer räcker det med att godtyckliga en-kvantbitsgrindar och en viss klass av två-kvantbitsgrindar kan implementeras. Detta och mer detaljer om kvantgrindar beskrivs väl i referenslitteraturen [6, 21].

En-kvantbitsgrindarna ska kunna genomföra godtyckliga manipulationer lokalt på alla kvantbitar. Av matematiska skäl behöver endast ett fåtal väl valda lokala kvantgrindar kunna realiserar fysiskt (se kap. 4.5 i [21]), vilka sedan kan användas för att approximera en godtycklig lokal manipulation till önskad noggrannhet. Det kan dock ofta vara mer effektivt att ha tillgång till fler än det minimala antalet.

Två-kvantbitsgrindarna utför operationer på två kvantbitar och behöver kunna generera sammanflätade tillstånd hos de två kvantbitarna. En konceptuellt viktig grind är CNOT-grinden (Controlled-Not). Denna gör en negering av den andra kvantbiten om den ena har värdet 1 och lämnar annars den andra kvantbiten oförändrad (operationen på den andra kontrolleras av värdet på den ena). Med CNOT och godtyckliga en-kvantbitsrotationer kan alla kvantkretsar implementeras (se återigen kap. 4.5 i [21]).

Eftersom två-kvantbitsgrindarna involverar en koppling mellan två kvantbitar är de oftast svårare att implementera än en-kvantbitsgrindarna. Två-kvantbitsgrindarna är typiskt också enklast att realisera om de två kvantbitarna ifråga är nära varandra rent fysiskt. I system med orörliga kvantbitar (som till exempel supraledande kvantbitar) betyder detta att det fundamentalt endast finns vissa lokala två-kvantbitsgrindar tillgängliga. En två-kvantbitsgrind mellan två kvantbitar på ett större avstånd mellan varandra kan då endast realiseras genom ett stort antal två-kvantbitsgrindar, till exempel med så kallade utbytesgrindar (”SWAP-gate”). Detta gör att antalet operationer som måste göras ökar vilket i sin tur minskar kvaliteten på beräkningarna om de inte är felkorrigerade. Kvaliteten på två-

<sup>4</sup> Se informationen om Nobelpriset i Fysik 2025 [2].

kvantbitsgrindarna är en av de viktigaste begränsande faktorerna i dagens kvantdatorer. Ett kvantitativt mått på hur bra en kvantgrind är dess fidelitet  $F$  [21]. Denna kvantifierar hur väl grinden genererar det önskade tillståndet. För fideliteten på två-kvantbitsgrindarna använder vi beteckningen  $F_2$ , som ofta ges som ett medelvärde för alla grindar.

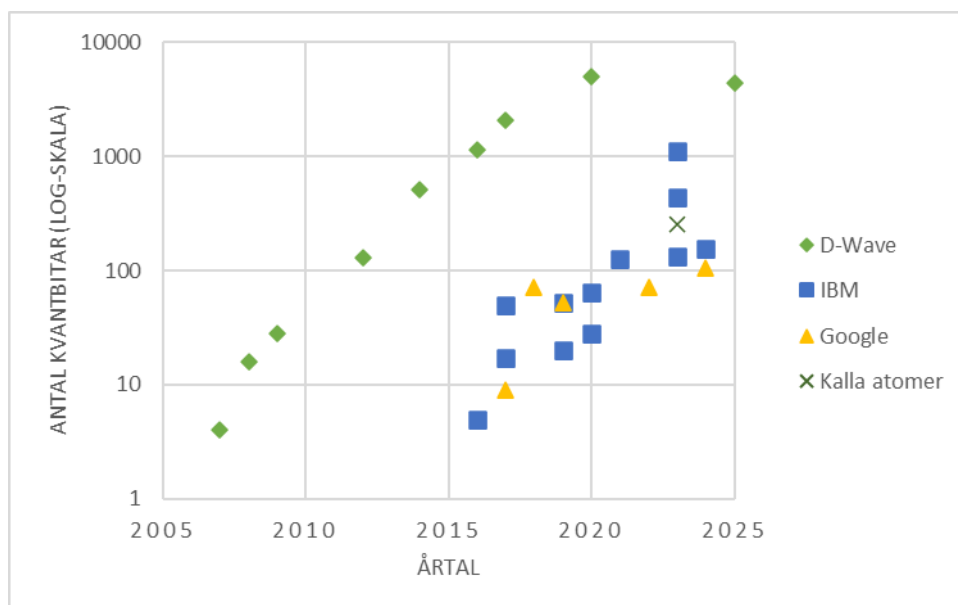
### 3.3 Sammanställning av hårdvaruplattformar

En uppdaterad uttömmande lista med hårdvaruplattformar i kategorin universella kvantdatorer finns på wikipedia [22]. Ett urval av några betydelsefulla kvantdatorer från denna presenteras i Tabell 1. De ledande systemen är numera huvudsakligen kommersiella, även om forskningsplattformar på universitet också finns. Några av dessa kvantdatorer samt typer av kvantbitar beskrivs i mer detalj i de följande delavsnitten.

Tabell 1: Hårdvaruplattformar på marknaden.

Kvantdator (namn)	Typ av kvantbitar	Antal kvant-bitar	två-kvantbits-fidelitet $F_2$	Utvecklare	Betydelsefullt resultat
IBM Q System One	Supraledande kvantbitar	65		IBM	Första integrerade kvantdatorn för kommersiellt bruk
IBM Heron R2	Supraledande kvantbitar	156	99,5%	IBM	Senaste från IBM 2024
Google Sycamore	Supraledande kvantbitar	54		Google	Åstadkommit kvantöverlägsenhet år 2019
Google Willow	Supraledande kvantbitar	105	99,67%	Google	Senaste från Google 2024
IonQ Forte	Jonfällor	36	99,6%	IonQ	Hög fidelitet och koppling mellan alla kvantbitar - 2022
Quantinuum H2	Jonfällor	56	99,87%	Quantinuum	State of the art fångade joner - 2023
Rigetti Aspen-9	Supraledande kvantbitar	32		Rigetti Computing	Hybridberäkningar (kvant-klassiskt)
Honeywell H1	Jonfällor	10		Honeywell Quantum Solutions	Hög kvantvolym och precision
Xandu Borealis	Fotonkvantberäkning	N/A		Intel	Skalbar kvantberäkningsarkitektur
QuEra Aquila	Neutrala atomkvantbitar	256		QuEra Computing	Hög grad av koppling mellan kvantbitar och skalbarhet

Utvecklingen av antal kvantbitar över tid kan ses i Figur 5. Notera att de största systemen från IBM (Osprey med 433 kvantbitar och Condor med 1121) har sämre kvalitet än de bästa andra systemen från IBM i närtid och att de därför inte är medtagna i Tabell 1. De utvecklas inte aktivt för tillfället, och de är inte heller tillgängliga i IBMs molntjänst. Istället ligger fokus nu på de mindre systemen (Heron r1 och r2) med upp till 156 kvantbitar av högre kvalitet (se sidan 416 i [6]). Att bara titta på antalet kvantbitar ger definitivt inte en fullständig bild av systemen.



Figur 5: Utvecklingen av antalet kvantbitar över tid i några olika representativa system.

Utöver antalet kvantbitar är fideliteten på två-kvantbitsgrindarna  $F_2$  den största begränsande faktorn för dagens kvantdatorer ( $F_2$  för några ledande system finns listade i Tabell 1). Fångade joner har bäst kvalitet men svårigheter att skala upp antalet kvantbitar, medan antalet kvantbitar domineras av supraledande system som i gengäld generellt är av lägre kvalitet. Kalla atomer ligger någonstans mittemellan, men har för närvarande vissa utmaningar i att realisera grind-modellen. En intressant graf som illustrerar kvalitet och antal kvantbitar för olika plattformar återfinns i Figur 260 i [15].

### 3.4 Molntjänster

Flera utvecklare tillhandahåller kvant-processorer ("Quantum Processor Units" eller "QPUs") i olika molntjänster. Det är dock inte alla som är tillgängliga i Europa för närvarande. Exakta priser varierar, men ofta finns en gratis-version som kan användas som introduktion till systemen och mindre omfattande experimenterande. Några exempel på molntjänster är

- Amazon Braket, som har QPU:er från företagen IonQ, QuEra, Rigetti, och IQM. Idag är endast IQM Garnet (20 kvantbitar) tillgänglig i Europa.  
<https://docs.aws.amazon.com/braket/latest/developerguide/braket-devices.html>
- IBM Quantum Platform. Vilka QPU:er som är tillgängliga i Europa varierar. Enligt listan på hemsidan nedan finns idag (24 oktober 2025) ett par av de äldre Eagle r3 QPU:erna (ibm\_brussels och ibm\_strasbourg) samt en nyare Heron r2 (ibm\_aachen) listade som eu-de, vilket betyder att de finns i Frankfurt i Tyskland.  
<https://quantum.ibm.com/services/resources>
- D-Wave Leap quantum cloud service. Ska vara tillgänglig i flera länder i Europa, inklusive Sverige.  
<https://support.dwavesys.com/hc/en-us/articles/360051869733-From-What-Countries-Can-I-Access-D-Wave-s-Leap-Quantum-Cloud-Service>
- Microsoft Azure Quantum.  
<https://quantum.microsoft.com/>

## 3.5 Några utvalda forskningsresultat från det senaste året

I detta avsnitt diskuteras kort några intressanta experimentella forskningsresultat från det senaste året. Flera av de stora företagen har presenterat nya resultat.

### 3.5.1 D-Wave Advantage 2

De stora system som D-Wave har utvecklat, Advantage med 5000+ kvantbitar och Advantage 2 med 4400+ kvantbitar, men med bättre kvalitet och utvecklad geometri, är de som i dagsläget bedöms ha störst chans att påvisa kvantfördel på ett problem med praktisk nytta (sidan 892 i [6]).

I en artikel i Science argumenterar författarna från D-Wave för att deras system kan simulera ett fysikaliskt system (i detta fall ett magnetiskt system) som är svårt att simulera med klassiska metoder [23]. Argumentationen bygger på en jämförelse mellan mätresultat från kvantdatorn och state of the art klassiska algoritmer. Kort efter att artikeln publicerades (den har funnits tillgänglig på arXiv sedan mars 2024 [24]) har två preprints kommit som visar på att nyutvecklade klassiska algoritmer har kommit ikapp kvantberäkningarna i flera av problemen som studerades i artikeln [25]. Troligt är att de klassiska metoderna kan utvecklas mer och fortsätta tävla i kapplöpningen med kvantberäkningarna ett tag till.

Det har också tidigare varit en hel del kontroverser om hur mycket ”kvant” D-Waves system är, se till exempel diskussionen i [6] på sidan 373.

### 3.5.2 Google Sycamore

Googles introducerade sitt senaste chip Sycamore med 105 kvantbitar och förbättrad grindkvalitet (fidelitet) i december 2024 [26]. I bloggposten [27] och tillhörande artikel nämns huvudsakligen två resultat:

- Demonstration av felkorrigering med ytkod och repetitionskod. Egenskaperna hos de logiska kvantbitarna förbättrades när antalet fysiska kvantbitar som utgör dem skalades upp i båda fallen.
- De påvisade kvantdatorns potential med ”Random Circuit Sampling”-algoritmen, som de också använt i tidigare forskning. Med det nya chippet är kvantfördelen mycket stor, och det verkar nu inte längre troligt att klassiska beräkningar kommer att kunna komma ikapp som de gjort förut. Det är dock värt att notera att ingen praktisk användning av denna algoritm är känd. Den kan endast användas för att visa att kvantdatorer är mer kraftfulla än klassiska på vissa typer av problem.

### 3.5.3 Microsoft Majorana 1

Microsoft fortsätter att arbeta mot att bygga så kallade topologiska kvant-datorer, som vi inte kommer att beskriva i mer detalj. Press-releasen från Microsoft har bemötts med mycket skepsis på grund av tidigare problem med ”hype” och tillbakadragna vetenskapliga artiklar (se inledande diskussion i kapitel 5 om benchmarking av kvantdatorer). I den granskade artikeln beskriver de och demonstrerar hur vissa kvantgrindor kan implementeras i deras design [28].

Nya resultat angående de topologiska kvant-bitarna utlovades på APS March Meeting, men rapporterna därifrån var blandade [29]. Värt att notera är att Microsofts artikel har ca. 160 medförfattare [28], så det är en stor satsning från deras sida. Huruvida resultaten håller får den fortsatta vetenskapliga processen avgöra.

### 3.5.4 Amazons katt-kvantbitar

Amazon har i en artikel publicerad i slutet av februari 2025 demonstrerat hur ”tatt-kvantbitar” och ”tatt-koder” kan användas för att göra felkorrigering [30]. Tatt-kvantbitar konstrueras med så kallade koherenta tillstånd i en kvantmekanisk oscillator (kvantmekanisk pendel). De har egenskapen att de har väldigt låg sannolikhet att generera bit-flipp-fel, där ”0” byts mot ”1” och vice versa. Detta betyder att en enklare felkorrigeringsmetod (repetitionskod) kan användas för de kvarvarande fas-felen, som innebär att den relativa fasen hos tillstånden ”0” och ”1” blir fel i en superposition. Rent praktiskt betyder detta att overheaden för att ha en logisk kvantbit är mycket mindre för denna kod än till exempel den populära ytkoden (se avsnitt 3.1.2). Skillnaden kan vara att en logisk kvantbit använder 20 fysiska kvantbitar istället för 1000. Priset som får betalas för detta är att själva kvantbitarna är mer komplicerade då det koherenta tillståndet måste genereras och kontrolleras.

### 3.5.5 IBM:s planerade kvantdatorer

IBM har under sommaren 2025 kommunicerat ut en uppdaterad och mycket ambitiös version av sin ”roadmap” innehållandes förväntade framsteg i deras kvantdatorer de närmsta åren [31]. Denna bygger bland annat på en metod för felkorrigering som kräver mindre overhead än många tidigare metoder och att flera av deras kvantdatorer ska kopplas ihop på ett sätt som gör sammanflätning mellan olika kvantprocessorer möjlig.

De utlovar att de 2029 ska ha en kvantdator med 200 logiska (det vill säga delvis felkorrigerade) kvantbitar på vilken de ska kunna köra 100 miljoner kvantgrindar. Om detta visar sig realiseras betyder det att stora framsteg har gjorts och de börjar närma sig en kvantdator av gigaquops-klass (se avsnitt 3.1.2), något som ingen annan för närvarande är i närheten av.



## 4 Kvantalgoritmer för optimeringsproblem

Vissa klasser av optimeringsproblem kan utgöra den första tillämpningen av kvantdatorer av praktisk betydelse [6]. I det här avsnittet behandlas kvantalgoritmer för optimeringsproblem av den sort som beskrivs i grupp 1 i avsnitt 2.5. Det innebär att för att kunna använda en kvantdator måste först den klassiskt utformade algoritmen transformeras till en kvantalgoritm som är anpassad för den fundamentalt annorlunda hårdvaran som en kvantdator utgör jämfört med en klassisk dator. Vidare fokuseras på kvantalgoritmer som är möjliga att använda på den kvanthårdvara som finns tillgänglig idag; quantum annealers och NISQ-datorer. För dessa kvantdatorer finns ingen garanterad, teoretiskt bevisbar kvantfördel utan de kvantalgoritmer som utvecklats är heuristiska. Däremot finns det redan resultat som visar att det är möjligt att utföra beräkningar med kvantalgoritmer på NISQ-datorer som är svåra att simulera på en klassisk dator [32].

I det här kapitlet introduceras först vad ett optimeringsproblem är för något samt ett antal klassiska exempel på sådana kombinatoriska optimeringsproblem. Här presenteras även idéer om militära problem eller scenarier som leder till att just sådana problem måste lösas. För överblickens skull, och för att det lägger grunden för den teoretiska beskrivningen av de kvantoptimeringsalgoritmer som presenteras, introduceras därefter kvantadiabatisk beräkning och den så kallade kvantadiabatiska algoritmen. Slutligen beskrivs hur optimeringsproblem kan lösas med quantum annealers och NISQ-datorer.

### 4.1 Vad är ett kombinatoriskt optimeringsproblem?

En klass av problem som ofta uppstår inom planering och logistik, till exempel i ett militärt uppdrag, är så kallade kombinatoriska optimeringsproblem. Dessa problem består av att hitta den bästa lösningen ur en ändlig mängd av diskreta lösningar, vilket till exempel kan vara att hitta den bästa sekvensen i ett beslutsproblem. I optimering av kombinatoriska problem blir Lösningssrummet snabbt för stort för att utforskas med en uttömmande sökning. Med en uttömmande sökning menas här att jämföra varje möjlig sekvens av beslut och hitta den som utifrån en given premiss är optimal.

Ett viktigt koncept inom alla typer av optimeringsproblem är *kostnadsfunktionen*  $C$  (från engelskans "cost"). I ett kombinatoriskt optimeringsproblem finns ett värde på  $C$  för varje kombinationsmöjlighet. Ett exempel på vad  $C$  skulle kunna vara, är total tillryggalagd sträcka under ett uppdrag. Det är denna kostnadsfunktion som minimeras (optimeras) i en algoritm som löser ett kombinatoriskt optimeringsproblem. Nedan ges exempel på kända optimeringsproblem med tillämpningar relevanta för militära operationer.

#### 4.1.1 Ett välkänt optimeringsproblem med många tillämpningar: Handelsresandeproblemet

Ett väl utforskat kombinatoriskt optimeringsproblem med tillämpningar inom vitt skilda områden såsom logistik och resursallokering, är *handelsresandeproblemet*. Problemet är att i ett nätverk av noder där varje kant, det vill säga koppling eller förbindelse mellan noderna, tilldelats en vikt, ta sig mellan alla noder med minimal total vikt. Samtidigt ska villkoret att varje nod bara får besökas en gång vara uppfyllt. I problemets ursprungliga utformning syftar optimeringen till att hitta den bästa rutten (den rutt som minimerar den totala vägsträckan) för en handelsresande som ska ta sig mellan en uppsättning städer. Problemet illustreras i Figur 6.

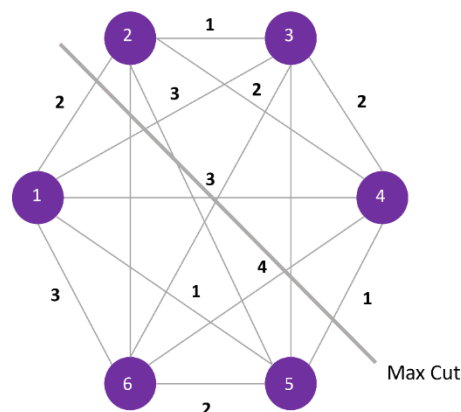


Figur 6: Illustration av en möjlig lösning till handelsresandeproblemet för ett problem med ett visst antal städer.

Olika varianter av handelsresandeproblemet dyker upp i många sammanhang, men det är ett erkänt svårt problem att lösa eftersom sökrummet för problemet växer exponentiellt med antalet noder. Den bäst presterande klassiska algoritmen i dag för att lösa handelsresandeproblemet utgörs av dynamisk programmering [33]. Dynamisk programmering syftar till en metod där man delar upp problemet på ett sätt så att svaret på ett delproblem kan återanvändas och inte behöver beräknas flera gånger om. I den militära sektorn skulle handelsresandeproblemet kunna tillämpas på problemet att optimera (minimera) vägsträckan för en autonom farkost som ska ta sig till ett antal positioner för att spana eller lämna av något.

#### 4.1.2 Ett optimeringsproblem med enkel matematisk struktur: Max Cut-problemet

Det finns flera exempel på intressanta kombinatoriska optimeringsproblem som har en enklare matematisk struktur än handelsresandeproblemet, men som ändå kan vara intressanta ur ett försvarsperspektiv. Ett sådant är det så kallade ”Max Cut”-problemet som är ett av de mest studerade när det gäller algoritmer för kombinatoriska optimeringsproblem. Optimeringsproblemet består i att dela upp ett nätverk av noder i två delnätverk och maximera summan av vikten för kanterna mellan dessa delnätverk. Den optimala lösningen beror således både på vilken delning som har flest antal kanter mellan sig, och hur stor vikt dessa kanter har. En illustration av Max Cut-problemet visas i Figur 7.



Figur 7: En illustration av Max Cut-problemet. Noderna (de lilafärgade cirklarna) är numrerade från nod 1 till nod 6 och varje kant mellan två noder har tilldelats en vikt. Max Cut är den skiljelinje som delar upp nätverket i två delnätverk på ett sådant sätt att summan av vikterna för de kanter som skär skiljelinjen är maximal.

Precis som i handelsresandeproblemet i avsnitt 4.1.1, har varje kant i nätverket tilldelats en vikt som i det här fallet beskriver hur stark förbindelsen mellan dessa två noder är. Som ett exempel kan man tänka sig ett socialt nätverk. Noderna i Figur 7 utgörs då av personer, där man vill bilda två grupper och maximera interaktionen *mellan* dessa två grupper. Problemet karakteriseras som svårt eftersom antalet sätt att dela upp noder i två grupper växer exponentiellt med antalet noder.

Max Cut-problemet har tillämpningsområden inom nätverksdesign och -analys, till exempel för att designa kommunikationen i ett nätverk så att förbindelserna är maximala, eller för att analysera hur olika grupper i sociala nätverk interagerar. Scenarier med relevans för försvar och totalförsvar skulle kunna vara att designa en decentraliserad drönarsvärm så att förbindelserna mellan drönarna är så stor som möjligt.

#### **4.1.3 Ett exempel från flygbolagssektorn: Tail-assignment problemet**

Tail-assignment-problemet är ett komplext optimeringsproblem som uppstår när olika flygplan (som identifieras av det nummer som står på flygplanets stjärtparti – därav ”tail”) ska tilldelas sekvenser av flygningar i en optimal schemaläggning. Problemet består alltså av att för varje flygplan tilldela en sekvens av rutter så att de totala kostnaderna minimeras. Det försvåras av en rad villkor som samtidigt måste uppfyllas, till exempel regelbundna flygplanskontroller, anslutningar (tillräckligt med tid vid flygplatsen), flygplanets kapacitet för en viss flygning (ett flygplan avsett för korta distanser skiljer sig från ett långdistansflygplan i passagerarkapacitet) och arbetsregler för besättningen. Det är ett känt ”svårt” problem i bemärkelsen att det blir exponentiellt svårare att hitta en optimal lösning när antalet flygplan och rutter ökar.

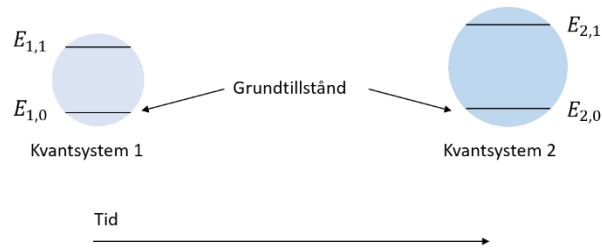
Även i den militära sektorn kan liknande optimeringsproblem uppkomma. Villkoren kommer att skilja sig från de i den civila flygsektorn och även kostnadsfunktionen eftersom det inte alls behöver vara den ekonomiska aspekten som är viktig att optimera i en militär operation.

#### **4.1.4 Optimering av packning av objekt i en given behållare: Knapsack-problemet**

Knapsack-problemet är ett klassiskt optimeringsproblem och är en variant av resursallokering. Här ska ett visst antal objekt, alla förknippade med en vikt (heltal) och ett värde, inrymmas i en ”rygsäck” med en maximal kapacitet beträffande vikten. Optimeringen syftar till att maximera det totala värdet av packningen samtidigt som vikten av de inrymda objekten inte överstiger rygsäckens maximala kapacitet. Det här är alltså ett optimeringsproblem som likt handelsresandeproblemet och tail-assignment-problemet kräver att optimeringen sker med villkor. Ett testproblem för militär tillämpning kan vara att optimera packningen av en soldats rygsäck, men det kan även användas för att optimera förvaringen av till exempel vapen i förråd.

## **4.2 Adiabatisk kvantberäkning och Ising-modellen**

En kvantadiabatisk process är en långsam, gradvis ändring av ett kvantsystems parametrar, vilket gör att systemet hela tiden hinner anpassa sig till sin nya konfiguration. I den kvantadiabatiska algoritmen [34, 35] utnyttjas den adiabatiska satsen [36] för att gå från grundtillståndet hos ett system som är lätt att preparera (se text om initialtillstånd i avsnitt 2.4) till grundtillståndet hos ett system som har en annan konfiguration, se Figur 8. Detta är sluttillståndet hos systemet, på vilken man sedan gör en mätning (se avsnitt 2.4).



Figur 8: Illustration av kvantadiabatiska algoritmen. Här betecknar till exempel  $E_{1,0}$  den lägsta energinivån (grundtillståndet) för kvantsystem 1.

Fördelen med denna algoritm är att det går att skriva om kostnadsfunktionen  $C$  för ett optimeringsproblem i termer av en operator (energioperatör) för det kvantsystem som vi vill hamna i (kvantsystem 2 i Figur 8). Utan att gå in på detaljer, beskriver denna operator kvantsystemet och den innehåller information om vilka energinivåer som är tillåtna. I kvantsystem är energinivåerna kvantiserade, se [Informationsruta 1](#) i kapitel 2.

Nästa viktiga koncept är Ising-modellen, vilken är en av de mest grundläggande modellerna i fysiken. Den introducerades i mitten på 1920-talet av Ernst Ising och Wilhelm Lenz [37] med syftet att förklara egenskaper hos magnetiska material i termer av en samling av interagerande atomspinn, vilka kan rikta in sig med eller mot ett pålagt magnetiskt fält. Spinnen interagerar också med varandra och ger upphov till ett komplext nätverk av interaktioner. Det visar sig att modellen är betydligt mer allmängiltig än det ursprungliga syftet och kan användas till att beskriva ett godtyckligt system av parvis interagerande, oberoende element. Framförallt finns det många kombinatoriska optimeringsproblem som matematiskt kan behandlas som ekvivalenta med Ising-modellen [38].

När energioperatören beskriver ett kvantsystem av Ising-modell, kommer lösningen till det ursprungliga optimeringsproblemet att kunna relateras till grundtillståndet i det slutliga kvantsystemet. Det betyder att när vi gått från det kvantsystem som vi startar beräkningen i (som är lätt att preparera) till det system som vi vill hamna i, kan vi göra en mätning av vilken energinivå vi befinner oss i och därefter konvertera denna information till lösningen för det kombinatoriska optimeringsproblem vi ville lösa. Det finns alltså information i  $E_{2,0}$  i Figur 8 som går att relatera till  $C_{min}$  (kostnadsfunktionens minimala värde).

### 4.3 Att lösa optimeringsproblem med en quantum annealer

En quantum annealer kan ses som en praktisk realisering av den kvantadiabatiska satsen och kan endast användas för att lösa optimeringsproblem som kan skrivas om som ett Ising-problem [39]. För att detta ska vara möjligt måste kvantsystem 1 och kvantsystem 2 i Figur 8 ha en särskild relation. Deras respektive energi-operatorer måste beskrivas av matriser som inte kommuterar<sup>5</sup>. Dessa två operatorer, vi kallar dem  $H_1$  (för kvantsystem 1) och  $H_2$  (för kvantsystem 2) kombineras sedan till en sammansatt operator  $H$  för att ta sig från grundtillståndet i kvantsystem 1 till grundtillståndet i kvantsystem 2. Operatören  $H$  kommer att bestämma dynamiken och när systemet utvecklas långsamt i tiden kan kvantsystem 1 fås att övergå i kvantsystem 2 enligt den kvantadiabatiska satsen.

Om tiden för processen varit långsamt nog kommer en mätning av energinivån för grundtillståndet i sluttillståndet att med hög sannolikhet vara detsamma som grundtillståndet för kvantsystem 2 och därmed kunna ge lösningen till det optimeringsproblem vars

<sup>5</sup> Att två matriser  $A$  och  $B$  inte kommuterar betyder att ordningen i vilken de multipliceras spelar roll,  $AB \neq BA$ .

kostnadsfunktion man kodat i kvantsystem 2. För att öka sannolikheten för att få rätt svar, bör kvantalgoritmen upprepas.

Uttrycket annealing (glödning) kommer från analogin med när metallurger ändrar ett materials egenskaper genom först hetta upp det och sedan sänka temperaturen ytterst långsamt. När temperaturen sedan är tillräckligt låg, kommer systemet med hög sannolikhet att ha nått ett så kallat globalt minimum, se Figur 4 i avsnitt 3.1.1. Medan metallsystemet måste ha vissa uppfyllda förutsättningar för att inte hamna i ett lokalt minimum, kan ett kvantsystem under rätt förutsättningar ändå hamna i det globala minimumet genom tunnling, vilket är ett kvantmekaniskt fenomen. Genom att relatera kostnadsfunktionens optimala värde till kvantsystemet globala minimum kan alltså en quantum annealer användas för att lösa optimeringsproblem.

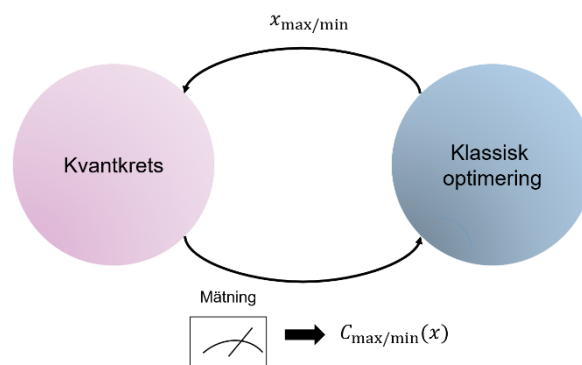
En utmaning med att använda quantum annealing är att operatören  $H$  i många fall kräver full förbindelse mellan alla kvantbitar i systemet, vilket är svårt att åstadkomma praktiskt.

### 4.3.1 Tillämpningar av quantum annealing

Quantum annealers är utformade för att användas just för optimeringsproblem. Vad det gäller just kombinatoriska optimeringsproblem, visas i en ny studie att en state of the art quantum annealer både har högre noggrannhet och är snabbare än den bästa motsvarande klassiska algoritmen för storskaliga optimeringsproblem [40]. Olika generationer av D-wave jämförs i [41] för en förenklad version av tail-assignment-problemet. Man finner att Advantage är överlägset gentemot D-wave 2000Q för nästan alla problem som undersöks.

## 4.4 Att lösa optimeringsproblem med en universell kvantdator

Den mest utforskade kvantalgoritmerna för NISQ-datorer hör till en klass av algoritmer som kallas "variational quantum algorithms" (VQA). För en omfattande sammanställning av VQAs hänvisas till [42]. VQA innefattar "variational quantum eigensolvers" [43, 44] som är viktiga inom kvantfysiksimuleringar, "quantum approximate optimization algorithm" (QAOA) [45] för olika optimeringsproblem, "variational quantum linear solvers" för att lösa linjära ekvationssystem, samt "quantum machine learning" för diverse problem inom maskininläring. Samtliga algoritmer inom VQA är så kallade hybrid-algoritmer som kombinerar kvantmekaniska och klassiska subrutiner. En schematisk beskrivning av VQAs ges i Figur 9. Kortfattat innebär proceduren för en VQA att beräkningen med en parametriserad kvantkrets utförs på en kvantdator medan parameter-optimeringen görs med en klassisk optimeringsmetod.



Figur 9: Schematisk beskrivning av en VQA. I kvantkretsen optimeras kostnadsfunktionen  $C(x)$  genom mätning på grundtillståndet så att  $C_{\min}$  hittas. Sedermera optimeras  $x$ , som är de parametrar optimeringen sker över, med en klassisk algoritmen för att hitta det värde,  $x_{\min}$  som ger  $C_{\min}$ . Proceduren sker iterativt till dess att konvergens av  $C_{\min}(x)$  uppnåtts.

En bedömning (se kapitlet "NISQ algorithms", sidan 867 i [6]) är att det kommer att krävas beräkningar med åtminstone 50 till 100 logiska kvantbitar för att en kvantfördel i

form av en uppsnabbning av beräkningstiden ska kunna erhållas. Samtidigt har de flesta studier hittills haft färre än 30 kvantbitar, vilket inte är i NISQ-regimen enligt Preskill [17] (se avsnitt 3.1.2). Ett problem är att för existerande VQAs, verkar algoritmernas bredd och djup vara för stora för dagens NISQ-systems kvantbitskvalitet och arkitektur [46]. Bredden ( $b$ ) för en kvantalgoritm motsvarar antalet kvantbitar som används för att utföra beräkningen, och djupet ( $d$ ) motsvarar antalet kvantgrindscyklar (vilket definieras som ett steg i algoritmen, se avsnitt 2.3.1).

#### 4.4.1 Några förutsättningar för QAOA

Här är vi, som rubriken till detta kapitel avslöjar, intresserade av kvantalgoritmer för att lösa optimeringsproblem – och då specifikt kombinatoriska optimeringsproblem som introducerats i avsnitt 4.1. QAOA är en lösningsmetod som kortfattat kan beskrivas som en approximation av quantum annealing på en universell grindbaserad kvantdator. Som ett led i approximationen har dock tidsvariabeln i quantum annealing delats upp i små tidssteg som sedan relateras till två parametrar som brukar betecknas  $\beta$  och  $\gamma$ . Vanligtvis representerar inte  $\beta$  och  $\gamma$  varsitt enskilt tal, utan ska ses som varsin uppsättning parametrar. Det är dessa uppsättningar av parametrar som sedan ändras istället för att långsamt ändra operatoren  $H$  för processen, som i quantum annealing. Detta görs på en klassisk hårdvara, varför algoritmen betraktas som en hybridalgoritm. Dynamiken i kvantsystemet, som nu utgörs av en universell, grindbaserad kvantdator, styrs av en uppsättning av en- och två-kvantbitsgrindar som tillsammans utgör en operator  $H$  enligt avsnitt 4.3. Uppsättningen av parametrarna  $\beta$  och  $\gamma$  varieras i den klassiska loopen för att ge ett så lågt värde på energinivån på systemet som möjligt. Värdet på energinivån ges som tidigare genom en mätning på systemet. Ju lägre värde, desto närmare Ising-systemets grundtillstånd och desto större sannolikhet för att resultatet kan relateras tillbaka till lösningen för det ursprungliga optimeringsproblemet.

När parameteruppsättningarna  $\beta$  och  $\gamma$  valts, det vill säga, man har hittat en energinivå som bedöms ligga nära det som man har kodat in i sin Ising-modell, måste man precis som i fallet för quantum annealing upprepa steg 1 till 3 i avsnitt 2.4 flera gånger för att med en hög sannolikhet karakterisera lösningen.

QAOA föreslogs 2014 av Fahri, Goldstone och Gutmann som en ny kvantalgoritm för att hitta approximativa lösningar till kombinatoriska optimeringsproblem [45]. Samma författare visade senare 2014 att QAOA löser ett specifikt kombinatoriskt optimeringsproblem med bättre approximationsförhållande (vilket är ett mått på hur bra en approximativ algoritm presterar) än någon polynomiell-tids klassisk algoritm känd vid denna tidpunkt [47]. Polynomiell tid syftar till att tiden för beräkningar maximalt skalar mot problemets storlek enligt en polynomfunktion. Dock upptäcktes senare en än mer effektiv klassisk algoritm för detta specifika problem [48]. För närvarande är prestandan för QAOA relativt motsvarande bästa klassiska algoritmen ett aktivt forskningsfält, se till exempel [49, 50, 51, 52]).

#### 4.4.2 Tillämpningar av QAOA

QAOA har implementerats på ett antal olika hårdvaruplattformar såsom jonfällor [53] och supraledande kvantbitar [54, 55, 56]. Det är ett aktivt forskningsfält att tillämpa QAOA på verkliga problem för att förstå dess potential att möjliggöra kvantfördelar, se till exempel den omfattande sammanställningen i [42]. Som noterades tidigare i detta avsnitt sätter den nuvarande hårdvaran begränsningar när det gäller att visa på eventuella kvantfördelar.

Max Cut-problemet är välstuderat i litteraturen och det finns flera publikationer där detta problem angrips med QAOA, se till exempel [55, 57, 58, 59]. Det är ett av de mest intressanta optimeringsproblem som inte kräver att man även inför villkor när det omformas till ett Ising-problem.

Trail-assignment-problemet har lösts med QAOA i till exempel [60]. Här studeras ett förenklat fall där det matematiska problemet kan reduceras till ett enklare underliggande

optimeringsproblem (som går under namnet "Exact Cover problem"). Slutsatsen från den förenklade studien är att QAOA har potential att vara en kraftfull metod för att lösa tail-assignment-problemet.

Handelsresandeproblemet är ett svårare problem, men tillämpningen av QAOA är ett aktivt forskningsfält och har nyligen studerats i till exempel [61, 62]. Detta problem är svårare bland annat för att det kräver införandet av villkor för att kunna lösas med QAOA. För ett nätverk med  $n$  stycken noder krävs dessutom  $n^2$  kvantbitar för att lösa handelsresandeproblemet med en NISQ-dator [38], vilket begränsar vilka problemstorlekar som kan studeras.

En sammanställning av hur fler kombinatoriska optimeringsproblem kan omvandlas till problem anpassade för Ising-modellen hittas i Lucas [38].



## 5 Utvärdering av prestandan hos kvantdatorer och kvantalgoritmer

Den snabba utvecklingen av olika hårdvaruplattformar, och konkurrensen om investeringar – speciellt i de många startupbolagen, har lett till en hel del ”hype” och att resultat presenteras på ett ibland missvisande sätt för att framställa de egna systemen som särskilt framstående eller ”världsledande”. Ett aktuellt exempel är Microsofts pressmeddelande [63], angående deras artikel i Nature [28].<sup>6</sup> En intressant diskussion om diskrepansen mellan artikeln och pressmeddelandet finns på Scott Aronsons blogg [64].

En annan komplicerande faktor är att plattformarna har olika styrkor och svagheter (se avsnitt 3.3), och att företag och forskargrupper använder sig av olika mått och metoder för att karakterisera sina system. Detta har gjort att benchmarking av kvantdatorer och kvantalgoritmer har vuxit fram som ett viktigt forskningsfält. Här, också, finns konkurrerande och kompletterande förslag på benchmarks som täcker in många olika aspekter. Det senaste året har ett antal översiktsartiklar skrivits på detta område: [65, 66, 67]. Målet med dessa är ofta att svara på frågor som är relevanta för den potentiella användaren av kvantberäkningarna, och kanske framförallt: Vilka problem kan dagens eller den nära framtidens kvantdatorer lösa och i vilka sammanhang fås någon kvantfördel? I det här kapitlet redogörs för hur kvantfördelar kan kvantifieras.

### 5.1 Benchmarking av kvantdatorer

Ett kvantmått är ett kvantitativt mått som mäter kvanteffekter och/eller prestandan hos en kvanthårdvara enligt ett specifikt protokoll. En kvant-benchmark är en uppsättning resultat från implementeringen av en eller flera kvantmått på en specifik uppsättning kvant-hårdvara. Vi redogör nedan kortfattat för vad olika benchmark mäter. Här följer vi huvudsakligen [67] där måtten delas in i 5 övergripande kategorier:

- Karakterisering av hårdvaruarkitekturen
- Kvalitetsmått
- Snabbhetsmått
- Stabilitetsmått
- Mått för kvantdatorer utanför grindparadigmet

#### 5.1.1 Karakterisering av hårdvaruarkitekturen

Vad det gäller karakterisering av hårdvaruarkitekturer, finns storheter som:

- Antalet fungerande kvantbitar (en av de viktigaste parametrarna).
- Parvis konnektivitet, det vill säga, vilka kvantbitar som direkt kan interagera parvis med varandra via en inbyggd två-kvantbitsgrind. I många tillämpningar är det viktigt att tillstånden hos alla olika kvantbitar kan sammanflätas med varandra. Om detta inte kan göras direkt måste det göras i flera steg (till exempel med så kallade utbytesgrindar) vilket leder till sämre prestanda.
- Grundläggande grinduppsättning, det vill säga vilka grundläggande kvantgrindar kan implementeras direkt på hårdvaran.
- Möjligheten att göra mätningar mitt i kretsen. Detta är viktigt för att kunna återanvända kvantbitar och implementera felkorrigeringsalgoritmer.

---

<sup>6</sup> I den granskade publicerade artikeln står det ”By itself, this measurement does not unequivocally distinguish between MZMs in the topological phase and fine-tuned low-energy Andreev bound states in the trivial phase” (med MZMs menas Majorana Zero Modes). På Microsofts hemsida står det däremot ”The Nature paper marks peer-reviewed confirmation that Microsoft has not only been able to create Majorana particles, which help protect quantum information from random disturbance, but can also reliably measure that information from them using microwaves.”

### 5.1.2 Kvalitetsmått

Denna kategori har flera undergrupper. Vissa är ganska tekniska och är främst av intresse för experter och de som bygger kvantdatorer. Ett exempel är relaxationstiden hos kvantbitarna, till exempel 208 mikrosekunder i fallet `ibm_aachen` (se beskrivning av IBM i avsnitt 3.4). Detta måste också sättas i relation till hur snabbt grindarna kan exekveras, som har med snabbhetsmåten att göra.

Ett av de viktigaste måtten i dagens system är fideliteten  $F_2$  (två-kvantbits-grind-fideliteten). Fideliteten på en-kvantbitsgrindarna är typiskt alltid bättre än de för två kvantbitar och är därför inte lika begränsande. Fideliteten mäter hur väl en grind utförs (se avsnitt 3.2.2). Detta sätter bland annat gränser för vilka algoritmer som kan köras på kvantdatorerna. En enkel tumregel är att kretsens bredd  $b$ , och djup  $d$ , (se avsnitt 4.4) ska förhålla sig till felet  $\varepsilon = 1 - F_2$  som

$$b \cdot d \ll \frac{1}{\varepsilon},$$

i annat fall kan fel göra hela resultatet av beräkningen oanvändbart. Vänsterledet är antalet operationer som genomförs. För att vara i regimen `Mquops` (se avsnitt 3.1.2) behövs alltså ett fel på mindre än  $10^{-6}$ , vilket för närvarande kräver att felkorrigering används.

$F_2$  bestämmer också om det är möjligt att göra felkorrigering och därmed skapa logiska kvantbitar med bättre egenskaper än de fysiska. De exakta siffrorna beror på vilken felkorrigeringsalgoritm som används, men typiskt brukar 99,99% anges som en gräns för den populära ytkoden [68]. Fideliteten påverkar också om det är möjligt att simulera beräkningen på kvantdatorn på en klassisk dator. Typiskt behöver antalet kvantbitar vara fler än omkring 50 för att inte en direkt klassisk emulering ska vara möjlig [69]. Genom att använda speciella metoder som tensor nätverk kan vissa större system approximeras väl också klassiskt. En hög brusnivå (och därmed låg fidelitet) kommer också att göra att systemet går att simulera effektivt även klassiskt.

Två kvalitetsmått som mäter mer övergripande egenskaper är "Quantum Volume" (QV) och "Algorithm qubits" (#AQ). QV mäter den största kvadratiske krets ( $b = d$ ) för vilket ett tillräckligt bra resultat fås. Rent praktiskt är kretsen vald slumpmässigt och resultatet jämförs med en exakt klassisk simulering, något som inte kommer att fungera när kretsarna blir tillräckligt stora (QV diskuteras i mer detalj på sidan 983 i [15]). #AQ är en generalisering av QV där kretsarna är valda utifrån 6 olika användbara kvantalgoritmer och #AQ är ett övergripande mått på det största antalet kvantbitar som ger ett godtagbart resultat [70]. Dessa mått ger en indikation på hur stora problem som går att köra på kvantdatorn i praktiken. Båda måtten har dock kritiserats. Varför används till exempel kvadratiske kretsar i QV? I många intressanta tillämpningar är djupet större än bredden. #AQ tillåter också post-selektion som kan göra resultaten missvisande [71].

En användarcentrerad uppsättning av benchmarks finns i kategorin "Well-studied tasks execution quality metric" [67]. Här studeras hur stora problem som kan lösas godtagbart bra inom några välstuderade typklasser såsom VQA och QAOA (se avsnitt 4.4).

### 5.1.3 Snabbhetsmått

Under denna rubrik finns flera detaljerade mått på hur snabbt grindoperationer kan exekveras, kvantbitar mäts och nollställas osv. Dessa är till stor del framförallt inriktade till de som konstruerar kvantdatorer.

Ett mer intressant mått för en potentiell användare ges av "Overall device speed on reference tasks". Här mäts hur snabbt ett visst problem kan lösas av kvantdatorn, vilket ger en indikation på hur snabbt andra liknande problem kan lösas i verkligheten. För en användare är detta ett av de viktigaste måtten: Om beräkningen inte går snabbare på kvantdatorn än i den klassiska är det troligen inte värt besväret och kostnaden att använda kvantdatorn.

#### **5.1.4 Stabilitetsmått**

Mäter hur stabila och pålitliga hårdvarusystemen är över tid. Kan till exempel kvantifieras genom standardavvikelsen i andra specifika mått över tid. Stabiliteten kan studeras över olika tidsskalor som kan vara mycket mindre, mycket större, eller av samma storleksordning, som beräkningstiden för en kvantberäkning.

#### **5.1.5 Mått för kvantdatorer utanför grindparadigmet**

I detta fall är det mest relevanta hur stora problem och med vilken kvalitet som lösningar av Ising-modellen (se avsnitt 4.2) kan utföras på de quantum annealers som finns, i huvudsak D-Waves maskiner. Alternativt kan en problemtyp (Maximum independent set) som passar speciellt bra på en viss hårdvara (kalla atomer) [72], undersökas och jämföras med utfallet från beräkningar på olika hårdvaror.



## 6 Diskussion och utblick

Utvecklingen av andra generationens kvantteknologier har potential att både utveckla de koncept som redan används i försvaret (såsom sensorer) och erbjuda helt nya förmågor (såsom att kunna lösa logistikproblem som dagens klassiska datorer inte klarar av att optimera). Vad det gäller kvantberäkningar är just alternativa metoder för att lösa kombinatoriska optimeringsproblem ett område av intresse både militärt och civilt.

Låt oss till att börja med slå fast att kvantalgoritmer som bygger på helt felkorrigerade kvantbitar ligger långt in i framtiden. Nuvarande forskningsfronten för hårdvaran är att realisera ett fåtal måttligt felkorrigerade logiska kvantbitar. Exakt hur många beror på var man drar gränsen för att vara måttligt felkorrigerad, enligt Tabell 3 på sidan 267 i [15] är maximala antalet uppe i 12 eller 48, även om de flesta har låga antal i spannet 1 till 3. Från samma tabell ses också att kvantgrindarna som har körts på dessa är begränsade. Antalet logiska kvantbitar behöver också vara minst omkring 50 till 100 för kvantfördel. För förbättrad kvalitet på de logiska kvantbitarna behöver antalet fysiska kvantbitar i varje logisk kvantbit öka, eller alternativt måste kvaliteten på de fysiska kvantbitarna förbättras, helst både och. Forskning pågår också på förbättrade felkorrigeringsmetoder som kräver färre antal fysiska kvantbitar i varje logisk kvantbit; ett exempel är katt-kvantbitarna som diskuteras i avsnitt 3.5.4.

Dagens kvantalgoritmer för kombinatoriska problem är heuristiska och kräver att man provar sig fram för att hitta fall där en kvantfördel eventuellt kan erhållas. Huruvida det är möjligt att hitta komplexa scenarier där kvantberäkningar, antingen på en quantum annealer eller en NISQ-dator, faktiskt erbjuder en kvantfördel, är fortfarande en obesvarad forskningsfråga. Ett sätt att ta sig an frågeställningen kan vara att experimentera med olika klassiska och kvantmekaniska subrutiner för att försöka att skraddarsy en hybridalgoritm för ett specifikt problem där en del körs på en klassisk dator (en så kallad "high performance computer") och den andra delen körs på kvanthårdvara.

När det gäller beräkningar med dagens kvantdatorer är de oftast för små (få kvantbitar) för att kunna tackla relevanta storskaliga industriella problem. D-Wave har gjort flera "use cases" tillsammans med olika industripartners där nyttan med deras system undersöks. Typiskt förenklas problemet först genom att identifiera de viktigaste variablerna och göra en förenklad modell för dessa. Denna kan sedan studeras med deras hybridalgoritmer som verkar vara kraftfulla. Se också avsnitt 4.3.1 om tillämpningar av quantum annealing.

Det finns ett fåtal studier där dagens kvantdatorer (via molntjänster) jämförs med några kraftfulla klassiska algoritmer på några olika optimeringsproblem. Några av dessa sammanfattas i diskussionen i kapitel 9.4.10 i [15]. Slutsatsen där är att, för närvarande, är quantum annealers generellt bättre än de universella grind-baserade kvantdatorerna. Det råder dock viss oenighet i frågan men på grund av intressekonflikter bakom artiklarna är det svårt att som utomstående bedöma argumentationen.

När det gäller de olika hårdvaruplattformarna är det svårt att säga vilka som blir vinnare i det långa loppet. QuEra, som använder sig av kalla atomer, genomför enkäter med olika aktörer (mestadels akademiska experter) inom kvantteknologier och publicerar vad de tror om framtiden. I senaste versionen (se länk på bloggen [73]) finns en fråga om de mest lovande hårdvaruplattform där kalla atomer (33%) och supraledare (31%) är de mest populära svaren. För några år sedan fanns nog kalla atomer långt ned på rankingen i en sådan fråga. Klart är att det krävs det fortsatta studier för att avgöra vilka hårdvaruparadigm som faktiskt kan erbjuda en kvantfördel.

Sammanfattningsvis är kvantberäkningar ett område med potential att erbjuda nya och mer effektiva lösningar på många olika typer av problem, men det är fortfarande svårt att förut-säga exakt om, när och hur de kan vara fördelaktiga jämfört med klassiska beräkningar.



## 7 Referenser

- [1] "International year of quantum science and technology," 4 8 2025. [Online]. Available: <https://quantum2025.org/>.
- [2] Nobel Prize Outreach 2025, "Advanced information. NobelPrize.org," 24 10 2025. [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/advanced-information/>.
- [3] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres och W. K. Wootters, "Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels," *Physical Review Letters*, vol. 70, nr 13, pp. 1895-1899, 1993.
- [4] M. Krelina, "Quantum Technology for Military Application," *EPJ Quantum Technology*, vol. 8, nr 24, p. 53, 2021.
- [5] N. M. P. Neumann, M. P. P. van Heesch, F. Phillipson och A. P. Smallegange, "Quantum Computing for Military Applications," i *2021 International Conference on Military Communication and Information Systems*, 2021.
- [6] O. Ezratty, "Understanding Quantum Technologies 2024," 2024. [Online]. Available: <https://www.oezratty.net/wordpress/2024/understanding-quantum-technologies-2024/>.
- [7] "Science and Technology Trends 2025-2045," 01 12 2025. [Online]. Available: [https://sto-trends.com/assets/briefing-papers/NATO\\_STO\\_Science\\_and\\_Technology\\_Trends\\_2025\\_2045\\_Volume\\_1\\_English.pdf](https://sto-trends.com/assets/briefing-papers/NATO_STO_Science_and_Technology_Trends_2025_2045_Volume_1_English.pdf).
- [8] R. Feynman, "Simulating physics with computers," *Int. J. Theor. Phys.*, vol. 21, 1982.
- [9] S. Lloyd, "Universal quantum simulators," *Science*, vol. 273, 1996.
- [10] P. Shor, "Algorithms for quantum computation; discrete logarithms and factoring," *Proc. 35th Annu. Symp. Found. Comput. Sci.*, 1994.
- [11] L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search," *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, pp. 212-219, 1996.
- [12] W. Wootters och W. Zurek, "A single quantum cannot be cloned," *Nature*, vol. 299, pp. 802-803, 1982.
- [13] S. Bartolucci, P. Birchall, H. Bombín och e. al., "Fusion-based quantum computation," *Nature communications*, vol. 14, p. 912, 2023.
- [14] T. Kadowaki och H. Nishimori, "Quantum annealing in the transverse Ising model," *Physical Review E*, vol. 58, p. 5355, 1998.
- [15] O. Ezratty, "Understanding Quantum Technologies 2025," 2025. [Online]. Available: <https://www.oezratty.net/wordpress/2025/understanding-quantum-technologies-2025/>.
- [16] Nordita Workshop, "Fault-Tolerant Quantum Computing: From Theory to Practise," 2025. [Online]. Available: <https://indico.fysik.su.se/event/8804/>.

- [17] J. Preskill, "Quantum computing in the NISQ era and beyond," *Quantum*, vol. 2, p. 79, 2018.
- [18] E. van den Berg, Z. K. Mineev, A. Kandala och K. Temme, "Probabilistic error cancellation with sparse pauli-lindblad models on noisy quantum processors," *Nature Physics*, vol. 19, pp. 1116-1121, 2023.
- [19] K. Temme, S. Bravyi och J. M. Gambetta, "Error mitigation for short-depth quantum circuits," *Physical Review Letters*, vol. 119, 2017.
- [20] J. Preskill, "Beyond NISQ: The Megaquop Machine," *ACM Trans. Quantum Comput.*, March 2025 <https://doi.org/10.1145/3723153>.
- [21] M. A. Nielsen och I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, 2000.
- [22] wikipedia, "List of quantum processors," 2025. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_quantum\\_processors](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quantum_processors).
- [23] A.D. King et al., "Beyond-classical computation in quantum simulation," *Science*, vol. 388, nr 6743, pp. 199-204, 2025.
- [24] A.D. King et al., "Computational supremacy in quantum simulation," 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2403.00910v1>.
- [25] D. Castelvecchi, "Fresh 'quantum advantage' claim made by computing firm D-Wave," *Nature*, 12 03 2025 <https://doi.org/10.1038/d41586-025-00765-1>.
- [26] Google Quantum AI and Collaborators, "Quantum error correction below the surface code threshold," *Nature*, 09 12 2024 <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>.
- [27] H. Neven, "Meet Willow, our state-of-the-art quantum chip," 2025. [Online]. Available: <https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/>.
- [28] Microsoft Azure Quantum, "Interferometric single-shot parity measurement in InAs–Al hybrid devices," *Nature*, 19 02 2025 <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08445-2>.
- [29] D. Garisto, "Microsoft quantum-computing claim still lacks evidence: physicists are dubious," *Nature*, 18 03 2025 <https://doi.org/10.1038/d41586-025-00829-2>.
- [30] Amazon AWS, "Hardware-efficient quantum error," *Nature*, vol. 638, p. 927, 2025 <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08642-7>.
- [31] IBM, "How IBM will build the world's first large-scale, fault-tolerant quantum computer," 2025. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc>.
- [32] F. Arute, K. Arya, R. Babbush och et.al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature*, vol. 574, pp. 505-510, 2019.
- [33] R. Bellman, "Dynamic Programming Treatment of the Travelling Salesman Problem," *J. Assoc. Comput. Math.*, vol. 9, 1962.
- [34] E. Farhi, J. Goldstone, S. Gutmann, J. Lapan, A. Lundgren och D. Preda, "A Quantum Adiabatic Evolution Algorithm Applied to Random Instances of an NP-Complete Problem," *Science*, vol. 292, 2001.

- [35] E. Farhi, J. Goldstone, S. Gutmann och M. Sipser, "Quantum Computation by Adiabatic Evolution," 2000. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0001106>.
- [36] M. Born och V. Fock, "Beweis des Adiabatsatzes," *Zeitschrift für Physik A*, vol. 51, nr 3-4, p. 165–180, 1928.
- [37] E. Ising, "Contribution to the Theory of Ferromagnetism," *Zeitschrift für Physik*, 1925.
- [38] A. Lucas, "Ising formulations of many NP problems," *Frontiers in physics*, vol. 2, nr 5, 2014.
- [39] Hauke, Katzgraber, Lechner, Nishimori och Oliver, "Perspectives of quantum annealing: methods and implementations," *Reports on Progress in Physics*, vol. 83, nr 054401, 2020.
- [40] K. Seongmin, S.-W. Ahn, I.-S. Suh, A. Dowling, E. Lee och T. Luo, "Quantum annealing for combinatorial optimization: a benchmarking study," *njp Quantum Information*, vol. 11, nr 77, 2025.
- [41] D. Willsch, M. Willsch, C. Gonzalez Calaza, F. Jin, H. De Raedt, M. Svensson och K. Michielsen, "Benchmarking Advantage and D-Wave 2000Q quantum annealers with exact cover problems," *Quantum Information Processing*, vol. 21, nr 141, 2022.
- [42] M. Cerezo, A. Arrasmith, R. Babbush, S. Endo, J. McClean, K. Fujii, J. McClean, K. Mitarai, X. Yuan, L. Cincio och P. Coles, "Variational quantum algorithms," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, pp. 625-644, 2021.
- [43] A. Peruzzo, J. McClean, P. Shadbolt, M.-H. Yung, X.-Q. Zhou, P. J. Love, Á. Aspuru-Guzik och J. L. O'Brien, "A Variational Eigenvalue Solver on a Photonic Quantum Processor," *Nature Communications*, vol. 5, nr 4213, 2014.
- [44] Y. Cao och Á. Aspuru-Guzik, "Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing," *Chemical Reviews*, vol. 119, nr 19, p. 10856–10915, 2019.
- [45] E. Farhi, J. Goldstone och S. Gutman, "A quantum approximate optimization algorithm," 2014. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1411.4028>.
- [46] S. Bravyi, D. Gosset och R. König, "Quantum advantage with shallow circuits," *Science*, vol. 362, nr 6412, pp. 308-311, 2018.
- [47] E. Farhi, J. Goldstone och S. Gutmann, "A quantum approximate optimization algorithm applied to a bounded occurrence constraint problem," 2014. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1412.6062>.
- [48] B. Barak, A. Moitra, R. O'Donnell, P. Raghavendra, O. Regev, D. Steurer, L. Trevisan, A. Vijayaraghavan, D. Witmer och J. Wright, "Beating the random assignment on constraint satisfaction problems of bounded degree," 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1505.03424>.
- [49] C. Y.-Y. Lin och Y. Zhu, "Performance of QAOA on typical instances of constraint satisfaction problems with bounded degree," 2016. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1601.01744>.
- [50] D. Wecker, M. B. Hastings och M. Troyer, "Training a quantum optimizer," *Physical Review A*, vol. 94, nr 022309, 2016.

- [51] E. Farhi och A. W. Harrow, "Quantum supremacy through the quantum approximate optimization algorithm," 2016. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1602.07674>.
- [52] Z.-C. Yang, A. Rahmani, A. Shabani, H. Neven och C. Chamon, "Optimizing Variational Quantum Algorithms Using Pontryagin's Minimum Principle," *Physical Review X*, vol. 7, nr 021027, 2017.
- [53] G. Pagano, A. Bapat, P. Becker, K. Collins, A. De, P. Hess, H. Kaplan, A. Kyprianidis, W. L. Tan, C. Baldwin, L. Brady, A. Deshpande, F. Liu, S. Jordan, A. Gorshkov och C. Monroe, "Quantum approximate optimization of the long-range Ising model with a trapped-ion quantum simulator," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, nr 41, pp. 25396-25401, 2020.
- [54] A. Bengtsson, P. Vikstål, C. Warren, M. Svensson, X. Gu, A. Frisk Kockum, P. Krantz, C. Krizan, D. Shiri, I.-M. Svensson, G. Tancredi, G. Johansson, P. Delsing, G. Ferrini och J. Bylander, "Improved Success Probability with Greater Circuit Depth for the Quantum Approximate Optimization Algorithm," *Physical Review Applied*, vol. 14, nr 034010, 2020.
- [55] M. P. Harrigan, K. J. Sung och et.al., "Quantum approximate optimization of non-planar graph problems on a planar superconducting processor," *Nature Physics*, vol. 17, pp. 332-336, 2021.
- [56] N. Lacroix, C. Hellings, C. Kraglund Andersen, A. Di Paolo, A. Remm, S. Lazar, S. Krinner, G. Norris, M. Gabureac, J. Heinsoo, A. Blais, C. Eichler och A. Wallraff, "Improving the Performance of Deep Quantum Optimization Algorithms with Continuous Gate Sets," *Physical Review X*, vol. 1, p. 020304, 2020.
- [57] L. Zhou, S.-T. Wang, S. Choi, H. Pichler och M. D. Lukin, "Quantum Approximate Optimisation Algorithm: Performance, Mechanism, and Implementation on Near-Term Devices," *Physical Review X*, vol. 10, nr 021067, 2020.
- [58] G. E. Crooks, "Performance of the Quantum Approximate Optimization Algorithm on the Maximum cut Problem," 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1811.08419>.
- [59] J. Wurtz och P. Love, "Maxcut quantum approximate optimization algorithm performance guarantees for  $p > 1$ ," *Physical Review A*, vol. 103, nr 042612, 2021.
- [60] P. Vikstål, M. Grönkvist, M. Svensson, M. Andersson, G. Johansson och G. Ferrini, "Applying the Quantum Approximate Optimization Algorithm to the Tail-Assignment Problem," *Physical Review Applied*, vol. 13, nr 034009, 2020.
- [61] W. Qian, R. A. Basili, M. M. Eshaghian-Wilner, A. Khokhar, G. Luecke och J. P. Vary, "Comparative Study of Variations in Quantum Approximate Optimization Algorithms for the Traveling Salesman Problem," *Entropy*, vol. 25, 2023.
- [62] M. Ramezani, S. Salami, M. Shokhmkar, M. Moradi och A. Bahrampour, "Reducing the Number of Qubits from  $n^2$  to  $n \log_2(n)$  to Solve the Traveling Salesman Problem with Quantum Computers: A Proposal for Demonstrating Quantum Supremacy in the NISQ Era," 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2402.18530>.
- [63] Microsoft, "Microsoft's Majorana 1 chip carves new path for quantum computing," 19 2 2025. [Online]. Available: <https://news.microsoft.com/source/features/ai/microsofts-majorana-1-chip-carves-new-path-for-quantum-computing/>.

- [64] S. Aronson, "FAQ on Microsoft's topological qubit thing," 12 02 2025. [Online]. Available: <https://scottaaronson.blog/?p=8669>.
- [65] T. Proctor, K. Young, A. D. Baczewski och R. Blume-Kohout, "Benchmarking quantum computers," 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2407.08828>.
- [66] A. Acuaviva, D. Aguirre, R. Peña och M. Sanz, "Benchmarking Quantum Computers: Towards a Standard Performance Evaluation Approach," 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2407.10941>.
- [67] D. Lall et al., "A Review and Collection of Metrics and Benchmarks for Quantum Computers: definitions, methodologies and software," 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2502.06717>.
- [68] S. Aronson, "And yet quantum computing continues to progress," 2024. [Online]. Available: <https://scottaaronson.blog/?p=7916>.
- [69] H. D. Raedt, J. Kraus, A. Hertel, V. Mehta, M. Bode, M. Hrywniak, K. Michielsen och T. Lippert, "Universal Quantum Simulation of 50 Qubits on Europe's First Exascale Supercomputer Harnessing Its Heterogeneous CPU-GPU Architecture," 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2511.03359>.
- [70] IonQ Staff, "Algorithmic Qubits: A Better Single-Number Metric," 2025. [Online]. Available: <https://ionq.com/resources/algorithmic-qubits-a-better-single-number-metric>.
- [71] Quantinuum, "Debunking algorithmic qubits," 2024. [Online]. Available: <https://www.quantinuum.com/blog/debunking-algorithmic-qubits#>.
- [72] Ebadi et al., "Quantum optimization of maximum independent set using Rydberg atom arrays," *Science*, vol. 376, nr 6598, pp. 1209-1215, 2022.
- [73] QuEra, "Survey Report: Quantum Readiness January 2025," 2025. [Online]. Available: <https://www.quera.com/blog-posts/quantum-readiness-in-2025>.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)