

Whitepaper - Introductie van het concept quantumcommunicatie

Viering van het Internationale Jaar van de
Quantumwetenschap en -technologie met een
verkenning naar impact voor onderwijs en onderzoek

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Structuur en aanpak	3
1.2	Begripsomschrijvingen	4
2	Wat is quantumcommunicatie?	5
2.1	Sterkere correlaties dan met klassieke methoden	5
2.2	Waarborgen op fysiek niveau voor privacy en beveiliging	5
2.3	Aansluiting van quantumapparatuur	5
3	Quantumcommunicatie in Nederland en Europa	6
3.1	Ontwikkelingen in Nederland	6
3.2	Europese quantuminitiatieven en investeringen	7
4	Wereldwijde ontwikkelingen in quantumcommunicatie	8
4.1	China	8
4.2	De Verenigde Staten	8
4.3	Geopolitiek	8
5	Mogelijke impact op onderwijs en onderzoek	9
5.1	Cyberbeveiliging voor instellingen	9
5.2	Gedecentraliseerde infrastructuur	9
5.3	Virtuele klaslokalen en realtime samenwerking	9
6	Conclusie	10
	Bronnenlijst	11
	Colofon	14

1 Inleiding

De resolutie van de VN "Verzoekt de Organisatie van de Verenigde Naties voor Onderwijs, Wetenschap en Cultuur (UNESCO) om op te treden als hoofdagentschap en aanspreekpunt voor het Internationale Jaar van de Quantumwetenschap en -technologie, en nodigt alle lidstaten van de Verenigde Naties, leden van de gespecialiseerde agentschappen, waarnemers van de Algemene Vergadering, evenals organisaties binnen het systeem van de Verenigde Naties en andere internationale en regionale organisaties, de academische wereld, de burgerlijke samenleving, de particuliere sector en andere relevante belanghebbenden uit om 2025 te beschouwen als het Internationale Jaar van Quantumwetenschap en -technologie".

De wetenschappelijke gemeenschap erkent het belang van quantumwetenschap en verenigt zich om het bewustzijn te vergroten voor de impact ervan in het verleden en de toekomst. Dit ondersteunt het 'International Year of Quantum', ter ere van 100 jaar quantummechanica. Gezien de verwachte waarde van quantumtechnologie in de komende jaren wil SURF zo vroeg mogelijk gebruik maken van quantumtechnologie en het onderzoek en onderwijs in Nederland hiervan laten profiteren.

Het is een belangrijk moment om quantumtechnologieën wereldwijd vooruit te helpen en te erkennen. Nu landen zich erop instellen het volledige potentieel van quantumtechnologie te benutten, is de inzet hoger dan ooit. De fenomenen van de quantumfysica worden al tientallen jaren bestudeerd, met tal van toepassingen zoals lasers, transistoren, atoomklokken en quantuminformatietechnologieën. Onder de transformatieve technologieën is quantumcommunicatie een baanbrekend middel om onze internetinfrastructuur te beveiligen en te verbeteren.

In lijn met het Internationale Jaar van de Quantumwetenschap en -technologie hebben we geprobeerd de mythes rond dit thema te ontrafelen. Wij richten ons puur op quantumcommunicatie en het potentieel ervan voor onderwijs en onderzoek. Deze whitepaper is geschreven voor geïnteresseerde lezers die niet regelmatig werken of te maken hebben met quantumtechnologieën.

1.1 Structuur en aanpak

Wij hebben geprobeerd de mythes rond dit thema te ontrafelen door ons puur te richten op quantumcommunicatie en het potentieel ervan voor onderwijs en onderzoek. Deze whitepaper is gericht op:

1. Begrip van (de grondbeginselen van) quantumcommunicatie
2. Het genereren van een overzicht over initiatieven op het gebied van quantumcommunicatie in Nederland en de Europese Unie
3. Het verkennen van wereldwijde initiatieven voor quantumcommunicatie
4. Inzicht in de rol die quantumcommunicatie speelt bij het vormgeven van de toekomst van onderwijs en onderzoek

Met dank aan

Deze whitepaper combineert inzichten die zijn verkregen via bureau-onderzoek met inzichten uit overleg met experts en andere professionals in en rond dit vakgebied. Het biedt een uitgebreid overzicht van het quantumcommunicatielandschap. Dit zijn de personen die we hebben geraadpleegd:

- Clara Osorio Tamayo, Senior Scientist bij TNO en hoofd van het Quantum Sensing Applications Programma van Quantum Delta NL
- Marten Teitsma, Professor en Program Manager van Applied Quantum Computing aan de Hogeschool van Amsterdam en initiatiefnemer van het Talent and Learning Centre bij Quantum Delta NL
- Lolke Boonstra, ICT Research Expert op de afdeling Innovatie van ICT, TU Delft

1.2 Begripsomschrijvingen

- Quantum Computing: het gedrag van quantumfysica toegepast op computing.
- Quantumcommunicatie: een opkomend communicatieparadigma dat informatie codeert in een quantumtoestand.
- Quantum sleutelverdeling (QKD): een quantumcommunicatieprotocol dat de distributie van een geheime sleutel tussen twee punten/mensen mogelijk maakt, die niet kan worden onderschept.
- Quantumnetwerk: de fysieke infrastructuur die quantumcommunicatie mogelijk maakt.
- Quantumsensoren: een type sensor waarbij quantummechanische effecten, zoals coherentie en verstriking, stimulansen omzetten in elektrische signalen.
- Qubits: bouwstenen van quantumdata (qubits in plaats van klassieke bytes).

2 Wat is quantumcommunicatie?

Quantumcommunicatie groeit snel voor wat betreft ontwikkeling en belangrijkheid. Het maakt nieuwe soorten connectiviteit mogelijk door de grondbeginselen van quantummechanica toe te passen. Quantumcommunicatie maakt gebruik van quantumtoestanden om informatie te coderen, te verzenden en te decoderen. De drie hoofdkenmerken zijn:

1. sterkere correlaties dan met klassieke methoden;
2. waarborgen op fysiek niveau voor privacy en beveiliging;
3. aansluiting van quantumapparatuur.

2.1 Sterkere correlaties dan met klassieke methoden

Als we op klassieke wijze (dus zonder quantummechanica) eerlijk twee muntjes tossen op twee afzonderlijke locaties, zou dat twee reeksen willekeurige, maar niet-samenhangende resultaten opleveren. Dit houdt in dat de uitkomst van elke tos op de ene locatie volledig willekeurig is, maar niets vertelt over het resultaat op de andere locatie. Met quantummechanica kun je correlaties realiseren die op klassieke wijze niet mogelijk zijn. Het is mogelijk om een quantumequivalent van ons denkexperiment te construeren waarbij de resultaten van het tossen perfect willekeurig blijven, maar ook perfect gecorreleerd zijn. Dit houdt in dat de uitkomst van één tos op de ene locatie weliswaar perfect willekeurig is, maar altijd identiek zou zijn met het resultaat op de andere locatie. Dit effect verspreidt zich verder dan twee locaties, naar meer ingewikkelde correlaties en biedt mogelijkheden voor taken die gecoördineerd moeten worden.

2.2 Waarborgen op fysiek niveau voor privacy en beveiliging

Klassieke gegevens kunnen worden gelezen en gekopieerd zonder bijwerkingen voor de gegevens zelf. Voor quantumgegevens is dit in principe niet mogelijk. Wie een onbekend stuk quantumgegevens meet, zal de toestand van het quantumstelsel wijzigen. Een procedure om quantumgegevens te kopiëren, is in fysiek opzicht eenvoudigweg onmogelijk. Er kunnen ook quantumtoestanden worden geconstrueerd, die fysiek niet kunnen worden gedeeld tussen willekeurig veel partijen. Daardoor ontstaan er effectieve verbindingen die niet kunnen worden afgetapt. Dit betekent dat quantumgegevens op fysiek niveau beschermd worden op een wijze die bij klassieke gegevens nooit mogelijk is. Dat biedt kansen op het gebied van privacy en beveiliging.

2.3 Aansluiting van quantumapparatuur

Quantumapparaten zijn eenvoudig aan te sluiten via het klassieke internet, net zoals quantumcomputing tegenwoordig in de cloud ter beschikking wordt gesteld. Deze communicatie is echter beperkt tot de klassieke in- en uitgangen van quantumprocessen. Quantumgegevens die in de processen worden aangemaakt, kunnen niet via klassieke kanalen worden gecommuniceerd. Daarom is quantumcommunicatie nodig om quantumprocessen in twee onafhankelijke apparaten met elkaar te laten interageren op quantumniveau. Dit maakt quantumcommunicatie een belangrijke enabler voor gedistribueerde en genetwerkte quantumcomputing en andere netwerken van quantumapparatuur, zoals quantumsensoren.

3 Quantumcommunicatie in Nederland en Europa

3.1 Ontwikkelingen in Nederland

Nederland wil vooroplopen op de wereldmarkt op het gebied van quantuminnovatie door een ecosysteem te bevorderen waarin baanbrekend onderzoek, technologische ontwikkeling en toepassingen in de praktijk worden geïntegreerd. Er is een ambitieuze quantumstrategie om tegen 2035 in de top 3 van quantumeconomieën te staan (QDNL, 2023). Het land bouwt voort op haar vooruitstrevende nationale quantumstrategie en belangrijke initiatieven, zoals QuTech, QuSoft en Quantum Delta NL, en staat in de startblokken om de vooruitgang en commercialisering van quantumtechnologie te versnellen. Momenteel ligt de focus op de implementatie van een veilig nationaal quantumnetwerk, gecoördineerd door Quantum Delta NL via diverse initiatieven, zoals QCINed. Quantum Delta NL wordt gefinancierd door het nationale groeifonds (615,2 miljoen euro¹) en legt daarmee de nadruk op de overheidsinspanningen om quantumdoorbraken te koppelen aan het bredere ecosysteem van de digitale infrastructuur.

De visie is dat Nederland de komende jaren zal beschikken over onderzoeksinstellingen, testfaciliteiten en productielijnen van wereldklasse voor quantumtechnologieën. Hiervoor is personeel nodig en ondersteuning van de sector. Er zijn nieuwe educatieve programma's geïntroduceerd om het onderwijs over quantumtechnologie te bevorderen. Een van de uitdagingen met betrekking tot de toekomst van quantumcommunicatie, is het gebrek aan geschoolde arbeidskrachten om de technologie te bouwen (Bogobowicz et al., 2023). De talentenpool blijft beperkt, waardoor er een knelpunt ontstaat voor innovatie en grootschalige implementatie.

Daarnaast onderstreept de inzet van QuSoft aan de ontwikkeling van nieuwe algoritmen en toepassingen, onze nadruk op software-innovatie als aanvulling op hardwareprestaties. QDNL somt de vier belangrijkste punten op om deze visie van Nederland als leider in quantumtechnologie te realiseren (QDNL, 2023):

1. **Technologieversnelling:** het opzetten van programma's die innovatie, samenwerking, concurrentie en vooruitgang in quantumtechnologie bevorderen.
2. **Commercialisering:** een sterke nadruk op technologieoverdracht, betrokkenheid van de sector en ontwikkeling van start-ups om de uitwisseling van ideeën van onderwijs- en kennisinstellingen te vergemakkelijken.
3. **Internationalisering:** het opbouwen van internationale partnerschappen en het aantrekken van talent en bedrijven van buitenaf in het Nederlandse ecosysteem
4. **Fabricage:** de bouw van productiefaciliteiten die nodig zijn voor proefprojecten, productie op middelhoog en hoog niveau. Aangezien de academische infrastructuur voornamelijk bestemd is voor onderzoek, ontwikkeling en prototyping, zou het handig zijn om speciale faciliteiten beschikbaar te hebben voor producties op grotere schaal.

¹ <https://www.nationaalgroeifonds.nl/overzicht-lopende-projecten/thema-sleuteltechnologieen-en-valorisatie/quantum-delta-nl>

3.2 Europese quantuminitiatieven en investeringen

De Europese Unie positioneert zich als leider op het gebied van quantumcommunicatie door initiatieven op dit vakgebied actief te integreren in haar bredere digitale strategie. Via deze initiatieven ziet de EU een toekomst waarin quantumcommunicatietechnologieën een hoeksteen worden van haar digitale soevereiniteit en economische groei (*Het Europees initiatief voor quantumcommunicatie-infrastructuur (EUROQCI)*, 2024). De EU boekt vooruitgang via haar programma Quantum Flagship en pan-Europese samenwerkingen, beschreven in hoofdstuk 3.2, met Duitsland, Frankrijk en Nederland als de grootste spelers op het gebied van initiatieven (Ministerie van Economische Zaken en Klimaatbeleid, 2024). Een van die uitgebreide initiatieven is EuroQCI, dat ernaar streeft ultraveilige communicatiekanalen in de lidstaten op te zetten (Choucair, 2024). Dit initiatief verbetert niet alleen de beveiliging van kritieke communicatie, maar bevordert ook een florerend Europees quantumecosysteem. Het stimuleert innovatie, marktexpansie en de ontwikkeling van nieuwe industrieën in de quantumsector.

De Europese Commissie heeft ook gewerkt aan het opzetten van overeenkomsten, zoals de Kaderpartnerschapsovereenkomst (KPA) voor quantumcommunicatie. Met deze overeenkomsten moeten stabiele en gestructureerde partnerschappen tot stand worden gebracht tussen de Commissie en de instellingen en organisaties die zich inzetten voor het opstellen, onderhouden en uitvoeren van het stappenplan voor communicatietechnologieën. Voorbeelden van KPA's zijn:

- De Quantum Internet Alliance (QIA), een pan-Europees samenwerkingsinitiatief, werkt aan de ontwikkeling van technologie om het quantuminternet tot realiteit te maken. Het doel is om geavanceerde toepassingen mogelijk te maken die verder gaan dan QKD via schaalbare software en netwerkstacks.
- Quantum Secure Network Partnerships (QSNP) richt zich op de verdere ontwikkeling van quantumcryptografietechnologieën om internetcommunicatie te beveiligen en de weerstand tegen toekomstige cyberdreigingen te garanderen.

4 Wereldwijde ontwikkelingen in quantumcommunicatie

Als we naar de toekomst kijken, is het potentieel van quantumcommunicatie veelbelovend. McKinsey's Quantum Technology Monitor (2023) schat dat quantumcommunicatie tegen 2040 wereldwijd een marktaandeel van ongeveer 7 tot 9 miljard dollar zal uitmaken. Quantumcommunicatie beschermt gevoelige informatie in de gezondheidszorg, financiële systemen en militaire operaties, aangezien quantumcomputers de komende jaren naar verwachting tot een doorbraak in klassieke encryptieprotocollen zullen leiden. Quantumcommunicatie zou tegen 2030 een geschatte omzet van 8 miljard dollar kunnen behalen (*Shaping the Long Race in Quantum Communication and Quantum Sensing*, 2021). Deze innovaties hebben ook het potentieel tot een grote transformatie in ruimtegebaseerde systemen, zoals satellieten. Deze kunnen dienen als knooppunten in een wereldwijd quantumnetwerk, waardoor veilige communicatie over continenten heen mogelijk wordt.

Belangrijke spelers op het gebied van quantumcommunicatie zijn China, de Verenigde Staten en de Europese Unie, die elk aanzienlijke stappen zetten. Opkomende spelers zoals Rusland, India, Japan en Canada kunnen een cruciale rol spelen.

4.1 China

Opmerkelijk hierbij zijn de prestaties van China op dit gebied, zoals de Micius-satelliet, de uitgebreide QKD-netwerkinfrastructuur ervan en staatsgestuurde initiatieven (Krause, 2024). In 2017 leverde de Micius-satelliet een bijdrage aan 's werelds eerste intercontinentale, QKD-beveiligde videoconferentie tussen Peking en Wenen. Het langste QKD-netwerk in China beschikt over een maar liefst 2032 kilometer lange verbinding tussen Peking en Shanghai. Banken en andere financiële ondernemingen gebruiken het momenteel om privégegevens door te geven.

4.2 De Verenigde Staten

De Verenigde Staten volgen met door de overheid geleide inspanningen, zoals de National Quantum Initiative Act en QNext, naast bijdragen uit de privésector, van start-ups en militair onderzoek naar quantumveilige communicatie. Quantum Xchange, een start-up in de VS, werkt aan de bouw van een 88,87 kilometer lang QKD-netwerk dat Manhattan en New Jersey verbindt om de grote datacenters van banken op deze locaties te ondersteunen (Giles, 2024).

4.3 Geopolitiek

In strategisch opzicht heeft quantumcommunicatie gevolgen voor cyberbeveiliging, defensie, wereldwijde standaarden en bestuur. Het brengt ook ethische uitdagingen en risico's van bewapening met zich mee. Dat onderstreept de noodzaak van internationale samenwerking en verantwoordelijke ontwikkeling. In 2023 organiseerde het VN-onderzoeksinstituut voor ontwapeningsvraagstukken (UNIDIR) een dialoog met meerdere belanghebbenden over quantumtechnologieën. De discussie richtte zich op het identificeren van potentiële bedreigingen door vorderingen op het gebied van de quantumtechnologie en het onderzoeken van strategieën om ze aan te pakken. Beleidsmakers staan voor uitdagingen om innovatie, wereldwijde samenwerking en beveiliging in balans te brengen bij de vooruitgang van quantumtechnologieën. Dit houdt ook in dat de relatie tussen overheden en de privésector moet worden gehandhaafd. Als bedrijven die de wereldwijde cloud computing-markt nu al domineren, ook middelen voor quantumcomputing via de cloud gaan aanbieden, kunnen de bestaande structurele afhankelijkheden van deze bedrijven sterker worden (*The Quantum Race: U.S.-Chinese Competition for Leadership in Quantum Technologies – IGCC*, 2024).

5 Mogelijke impact op onderwijs en onderzoek

Er bestaan toepassingsmogelijkheden in de halfgeleiderindustrie en fotonica, cyberbeveiligingstechnologie en post-quantumcryptografie (Ministerie van Economische Zaken en Klimaatbeleid, 2024). In onderwijs en onderzoek worden er sociale voordelen verwacht. Marten Teitsma zei dat het onduidelijk is wat het nut van quantumcommunicatie zal worden, vooral met nieuwe technologieën zoals AI die het onderwijs en leerprocessen al veranderen. In dit deel proberen we te begrijpen hoe of waar de toepassingen van quantumcommunicatie in onderwijs en onderzoek herkenbaar worden.

5.1 Cyberbeveiliging voor instellingen

Een van de belangrijkste voordelen van quantumcommunicatie is het vermogen om de cyberbeveiliging voor universiteiten en onderzoeksinstellingen te verbeteren. Naarmate cyberdreigingen toenemen, wordt het steeds belangrijker om gevoelige gegevens van studenten, onderzoeksresultaten en academische middelen te beschermen. Dit zou onderzoek naar onderwerpen als fotonica en voedselbeveiliging kunnen beschermen. Bovendien kan het cyberaanvallen op studentendossiers, online examens en universitaire databases voorkomen en tegelijkertijd veilige internationale samenwerking mogelijk maken.

5.2 Gedecentraliseerde infrastructuur

Quantumcommunicatie heeft het potentieel om onze mogelijkheden voor coördinatie tussen meerdere apparaten te verbeteren. In een steeds meer verbonden wereld kan dit leiden tot volledig nieuwe toepassingen op basis van infrastructuren die tegenwoordig technologisch nog niet haalbaar zijn, hetzij omdat ze onveilig zouden zijn, dan wel omdat ze niet kunnen schalen naar de omvang van het internet. Met een quantumnetwerk is het bijvoorbeeld mogelijk om statistische gegevens te verzamelen zonder dat de deelnemers hun waarden aan elkaar bekendmaken. Dit opent potentieel mogelijkheden voor gedecentraliseerde infrastructuren door de behoefte aan een centrale autoriteit te reduceren. Instituten voor onderzoek en onderwijs zouden op die manier gezamenlijk hun eigen digitale infrastructuren kunnen opbouwen.

5.3 Virtuele klaslokalen en realtime samenwerking

Onderwijs kan ook een transformatie ondergaan dankzij quantumcommunicatie. Virtuele klaslokalen kunnen worden aangevuld met veilige, realtime verbindingen. Op die manier kunnen studenten wereldwijd communiceren met experts zonder zich zorgen te maken over gegevensbeveiliging of hun privacy. Quantumcommunicatie kan het concept van virtuele werelden stimuleren voor een naadloze integratie van fysieke en digitale werelden samen met XR- en AI-technologieën.

6 Conclusie

Deze whitepaper onderzoekt de geopolitieke vertellingen rond deze opkomende technologie, die de groei, adoptie en wereldwijde concurrentie kunnen beïnvloeden. De volledige omvang van de mogelijkheden en de integratie ervan in onderwijs, onderzoek en de maatschappij blijft echter onzeker. In algemene zin is het potentieel van quantumcommunicatie enorm, met toepassingen die in de loop der tijd duidelijke contouren zullen krijgen. De ontwikkeling van quantumnetwerken – een netwerk dat veilig is op fysiek niveau – zou de manier waarop informatie wordt gedeeld en beschermd kunnen veranderen. Ook het klassieke netwerk ondergaat echter vernieuwingen, zoals kloksynchronisatie die de latentie en lichtpadconnectiviteit tot 800 Gbit/s verlaagt.

Quantumcommunicatie blijft zich echter ontwikkelen en stoot baanbrekende veranderingen aan. Het voorbereiden van arbeidskrachten en het opleiden van studenten op dit gebied zal een cruciale stap zijn om bij te dragen aan de ontwikkeling van quantumtechnologieën en om de kloof tussen onderzoek en praktische implementatie te overbruggen. Naarmate de evolutie van quantumcommunicatie verdergaat, zullen beleidsdiscussies essentieel zijn om vorm te geven aan een veilige en efficiënte toekomst op basis van quantumtechnologie.

Ongeacht de vorderingen, de investeringen en het beleid moeten we onze verkenningstocht een vervolg geven. De realisatie van het concept van quantumcommunicatie is slechts een kwestie van tijd. Om beter te begrijpen, te anticiperen en ons voor te bereiden, moeten we ons afvragen hoe de toekomst met quantumcommunicatie eruit zou kunnen zien.

Bronnenlijst

International Year of Quantum Science and Technology. (2025). about IQ. <https://www.quantum2025.org>

Muller, A. (18 mei 2023). Wat is kwantumverstrengeling? Een natuurkundige legt Einsteins 'griezelige actie op afstand' uit. Astronomy Magazine. <https://www.astronomy.com/science/what-is-quantum-entanglement-a-physicist-explains-einsteins-spooky-action-at-a-distance/>

Krause, J. (2024). The Quantum Race: U.S.-Chinese competition for leadership in quantum technologies. In IGCC Policy Brief. <https://ucigcc.org/wpcontent/uploads/2024/02/Krause-Quantum-Race-3.4.24.pdf>

Azuma, K., Economou, S. E., Elkouss, D., Hilaire, P., Jiang, L., Lo, H., & Tzitrin, I. (2023b). Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet. *Reviews of Modern Physics*, 95(4). <https://doi.org/10.1103/revmodphys.95.045006>

Rubino, G., Rozema, L. A., Ebler, D., Kristjánsson, H., Salek, S., Guérin, P. A., Abbott, A. A., Branciard, C., Brukner, Č., Chiribella, G., & Walther, P. (2021). Experimental quantum communication enhancement by superposing trajectories. *Physical Review Research*, 3(1). <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.3.013093>

Kozłowski, W., Wehner, S., Van Meter, R., Rijsman, B., Cacciapuoti, A.S., Caleffi, M., Nagayama, S., (2023, March 1). RFC 9340: Architectural Principles for a Quantum Internet. IETF Datatracker. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9340#name-introduction>

Lewis, J. A., & Wood, G. (2024). Quantum Technology: Applications and Implications. <https://www.csis.org/analysis/quantum-technology-applications-and-implications#h2-quantum-communication>

Quantum communication: How will quantum-secure communication technologies develop in future? (4 juli 2024). Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. <https://www.isi.fraunhofer.de/en/presse/2024/presseinfo-19-quantenkommunikation-quantensichere-Kommunikation.html>

De rol van Nederland in kwantumtechnologie. (2023). Invest-NL. <https://www.invest-nl.nl/actueel/de-rol-van-Nederland-in-Quantum-technologie>

McKinsey & Company. (2023). Quantum Technology Monitor. In McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20technology%20sees%20record%20investments%20progress%20on%20talent%20gap/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf>

Airbus. (19 april 2023). Quantum communication for dummies. Airbus. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-04-quantum-communication-for-dummies>

QCINED | Quantum Delta NL. (n.d.). Quantum Delta NL. <https://quantumdelta.nl/qcined>
KPN B.V. (5 oktober 2021). QuTech, KPN, SURF and OPNT join forces to build a quantum network. QuTech, KPN, SURF and OPNT Join Forces to Build a Quantum Network. <https://www.overons.kpn/nieuws/en/qutech-kpn-surf-and-opnt-join-forces-to-build-a-quantum-network/>

Bogobowicz, M., Gao, S., Masiowski, M., Mohr, N., Soller, H., Zemmel, R., & Zesko, M. (2023, April 24). Quantum technology sees record investments, progress on talent gap. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-technology-sees-record-investments-progress-on-talent-gap>

QDNL. (2023). VISION 2035. In Vision for the Quantum Ecosystem Towards 2035. <https://assets.quantum-delta.prod.verveagency.com/assets/qdnl-vision-2035-summary-1731584077.pdf>

The European Quantum Communication Infrastructure (EUROQCI) initiative. (2024). Shaping Europe's Digital Future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

Ministerie van Economische Zaken en Klimaatbeleid. (2024). De Nationale Technologiestrategie. https://www.kia-st.nl/_asset/_public/_site_4/257-034_Nationale_Technologie_Strategie-EN_met_agenda.pdf

Choucair, C. (2024, October 23). EU Revives Quantum Communication Investment with \$97M to Secure Europe's Infrastructure. The Quantum Insider. <https://thequantuminsider.com/2024/10/23/eu-revives-quantum-communication-investment-with-97m-to-secure-europes-infrastructure/>

Quantum Internet Alliance. (19 december 2024). Quantum Internet Alliance. <https://quantuminternetalliance.org/>

Giles, M. (2024, August 22). Inside Europe's quest to build an unhackable quantum internet. MIT Technology Review. <https://www.technologyreview.com/2018/10/22/139629/europes-quest-for-an-unhackable-quantum-internet/>

The Quantum Race: U.S.-Chinese Competition for Leadership in Quantum Technologies - IGCC. (2024). <https://ucigcc.org/publication/the-quantum-race-u-s-chinese-competition-for-leadership-in-quantum-technologies/>

Swayne, M. (2024, October 29). U.S. restricts quantum tech investments in China, citing national security risks. The Quantum Insider. <https://thequantuminsider.com/2024/10/29/u-s-restricts-quantum-tech-investments-in-china-citing-national-security-risks/>

Shaping the long race in quantum communication and quantum sensing. (21 december 2021). McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/shaping-the-long-race-in-quantum-communication-and-quantum-sensing>

Dutta, H., & Bhuyan, A. K. (2024, June 6). Quantum Communication: from fundamentals to recent trends, challenges and open problems. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2406.04492>
Quantum internet: A vision for the road ahead. (2018). In Science (Vol. 362, p. 303) [Journal-article]. <https://doi.org/10.1126/science.aam9288>

IBM. (2024). IBM Technology Atlas Quantum Roadmap. <https://www.ibm.com/roadmaps/quantum.pdf>

Colofon

Auteurs

Akcaova, Gül ( [0000-0001-9060-4518](https://orcid.org/0000-0001-9060-4518))

Kozłowski, Wojciech ( [0009-0002-1098-742X](https://orcid.org/0009-0002-1098-742X))

Venkat, Shruthi ( [0000-0003-1416-800X](https://orcid.org/0000-0003-1416-800X))

Redactie

Akcaova, Gül

Brugmans-Slot, Dorien

Vertaling

LanguageWire

Jaar van publicatie

2025

Versie

1.0

Copyright

©2025 SURF

Dit werk is onder licentie van Creative Commons Attribution 4.0 International. U kunt een kopie van deze licentie oproepen op <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>