

Radio en navigatie met behulp van kwantumsensoren

Toepassingen en impact op het frequentiespectrum

Dialogic: dr. Tessel Blom, ir. Wazir Sahebali, Sonja Kleter MSc, Kimberley Deppe MSc,
ir. ing. Reg Brennenraedts MBA

TNO: Reinier Tan MSc, dr. ir. Jaap Essing

In opdracht van:
Rijksinspectie
Digitale Infrastructuur

Publicatienummer:
2022.139-2306

Datum:
Utrecht, 17 maart 2023

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting (NL)	3
Management summary (EN)	7
1 Introductie	10
1.1 Aanleiding	10
1.2 Doelstelling	10
1.3 Onderzoeksvragen	10
1.4 Leeswijzer	10
2 Methodiek	11
2.1 Interviews	11
2.2 Literatuuronderzoek	11
2.3 Analyse patentaanvragen	11
3 Achtergrond	13
3.1 Kwantumtechnologie	13
3.2 Kwantumsensoren	14
3.3 Van technologie tot toepassing	21
4 Ontwikkelingen op het gebied van radio	24
5 Ontwikkelingen op het gebied van navigatie	30
5.1 Navigatie aan de hand van satellietsignalen	32
5.2 Navigatie aan de hand van de eigen beweging	34
5.3 Navigatie aan de hand van een kaart	37
6 Overige ontwikkelingen	41
6.1 Radar	41
6.2 Optische atoomklokken	41
6.3 Biomedische sector	43
7 Conclusies en aanbevelingen	44
8 Verwijzingen	46
Bijlage 1. Overzicht interviewrespondenten	51

Managementsamenvatting (NL)

Introductie

De ontwikkelingen op het gebied van kwantumsensoren volgen elkaar in snel tempo op. De Rijksinspectie Digitale Infrastructuur (RDI) wil daarom graag inzicht krijgen in deze ontwikkelingen om zich voor te bereiden op de mogelijke invloeden hiervan op haar werkveld. Dialogic is door de RDI gevraagd om in kaart te brengen wat de huidige stand van zaken is van de techniek, wetenschappelijke doorbraken en toepassingsmogelijkheden op het gebied van kwantumsensoren met een invloed op het gebruik van de frequentieruimte. De focus van het onderzoek lag hierbij op de domeinen van radiocommunicatie en navigatie.

Achtergrond

Kwantumsensoren maken gebruik van speciale natuurkundige eigenschappen op subatomaire schaal. Deze eigenschappen bestaan niet in de klassieke natuurkunde, zoals verstrengeling, kwantuminterferentie (superpositie), discrete toestanden en coherentie. Kwantumsystemen zijn echter zeer fragiel en wanneer ze in aanraking komen met een externe grootte stort de kwantumtoestand in. Kwantumsensoren benutten deze 'zwakte'. In theorie zouden kwantumsensoren dus door de kleinste veranderingen in de omgeving beïnvloed kunnen worden, waardoor deze invloeden te detecteren en te meten zijn.

Binnen de scope van dit onderzoek is een aantal kwantumsensoren belangrijk. In onderstaande tabel worden deze sensoren kort beschreven.

Kwantumsensor	Te meten grootte	Korte beschrijving
SQUIDs	Magnetische velden	Een SQUID bestaat uit twee supergeleiders waartussen elektronenparen zich kunnen voortbewegen zonder spanning te verliezen. Door toevoeging van een magnetisch veld gaat de spanning in de SQUID oscilleren. Deze oscillatie is evenredig met de grootte van het magnetisch veld. Eén periode van deze oscillatie correspondeert met de toename van één magnetische flux <i>quantum</i> , die volledig bepaald wordt door fundamentele fysische constanten.
Rydberg atoom	Elektromagnetische golven	Lasers kunnen het elektron van een atoom naar een schil verder bij de atoomkern vandaan brengen. Interactie met elektromagnetische golven leidt vervolgens tot een overgang van het elektron naar een andere schil. Hierbij komt een bepaalde mate van energie vrij waarmee de frequentie van de elektromagnetische golf bepaald kan worden.
Nitrogen-vacancy (NV) center	Magnetische velden, elektromagnetische golven, temperatuur, druk, rotatie	Wanneer in een diamantstructuur één koolstofatoom wordt vervangen door een stikstofatoom en een aangrenzende atoomlocatie vrij wordt gelaten, ontstaat er een NV center. Interactie met een te meten kracht kan vervolgens de polarisatie van de spins van de atomen beïnvloeden, waardoor de fluorescentie van het licht dat de diamant uitzendt verandert.
Cold atom interferometer	Versnelling, zwaartekracht	Wanneer atomen worden gekoeld tot temperaturen nabij het absolute nulpunt, beginnen ze zich te gedragen als golven. In een interferometer wordt de groep atomen achtereenvolgens gesplitst door verschillende lasers. Door externe krachten bewegen de groepen in andere richtingen en de sterkte van de te meten kracht bepaalt de uiteindelijke grootte van de groepen.
Atomic vapors	Magnetische velden, rotatie, tijd/frequentie	Lasers polariseren de spin van atomen die zich in een dampcontainer bevinden. Deze spin kan door externe krachten worden beïnvloed. Met behulp van een andere laser kan deze spin vervolgens worden uitgelezen en de grootte van de externe kracht bepaald worden.

Opzet onderzoek

Dit onderzoek is primair uitgevoerd via literatuurstudie en interviews met experts. Een deel van deze interviews had als doel om door experts geïnformeerd te worden op het gebied van kwantum- en radiotechnologie. De andere interviews diende om een beeld te krijgen van de huidige ontwikkelingen van toepassingen. De interviews in dit rapport hebben met name bijgedragen aan de interpretatie van recente publicaties en de hierbij te verwachten ontwikkelingen.

Resultaten

Onderzoeksvraag 1. Wat is de stand van de techniek en wat zijn de verwachte onderzoeksontwikkelingen in de komende vijf jaar op het gebied van kwantumsensoren; in het bijzonder ten aanzien van:

a) radiocommunicatie met kwantumsensoren;

Op het gebied van radiocommunicatie zijn er ontwikkelingen gaande op het gebied van 1) elektromagnetische kwantumsensoren (die kunnen acteren als radio-ontvangers) en 2) Analog Digitaal Converters (ADC). *Rydberg atomen* en *Nitrogen Vacancy (NV) centers* kunnen ingezet worden als radio-ontvangers, omdat ze gevoelig zijn voor veranderingen in het elektromagnetische spectrum. Momenteel zijn deze technologieën echter alleen nog operationeel in de laboratoria en de verwachtingen omtrent ontwikkelingen op het gebied van radiocommunicatie de komende vijf jaar zijn laag. Dit komt met name door het feit dat kwantumsensoren, naast een hogere sensitiviteit, ook gevoeliger zijn voor ruis. Hierdoor zijn de verbeteringen ten opzichte van de huidige radio-ontvangers beperkt. Daarnaast zijn er ook praktische belemmeringen zoals de grootte, het gewicht en de kosten van de kwantumsensor radio-ontvanger.

SQUIDS kunnen als onderdeel van een ADC het analoge, oscillerende elektrische signaal dat is opgewekt door de absorptie van de elektromagnetische straling omzetten naar een digitaal signaal. In theorie zou dit kunnen leiden tot minder ruis en vervorming van het signaal dan de huidige ADCs.

b) kwantumnavigatie en kwantum-ondersteunde satellietnavigatie;

Ontwikkelingen op het gebied van navigatie met behulp van kwantumsensoren vinden met name plaats op twee gebieden: *inertial navigation* en *magnetic-aiding navigation*.

Bij *inertial navigation* wordt er genavigeerd op basis van de eigen beweging: door de versnelling en rotatie ten opzichte van de startpositie te meten kan de nieuwe positie berekend worden. *Cold atom interferometers* zijn gevoelig voor zowel versnelling en rotatie en kunnen dus dienst doen als de accelerometer en gyroscoop in een kwantum *inertial navigation* systeem. In theorie zou deze kwantumsensor gevoeliger moeten zijn dan de huidige sensoren, over langere termijn stabiliteit verschaffen en in tegenstelling tot de huidige sensoren een absolute meting kunnen geven. Echter zijn er ook nog uitdagingen die opgelost moeten worden zoals het bieden van de benodigde bandbreedte voor navigatie doeleinden. Wel wordt er verwacht dat kwantum *inertial navigation systems* de komende vijf jaar toegepast zullen worden in specifieke sectoren als de ruimtevaartsector.

Bij *magnetic-aiding navigation* worden de huidige navigatiesystemen ondersteund door magnetometers en een kaart van het aardmagneetveld. Kwantumsensoren als *NV centers* en *atomic vapors* zijn gevoelig voor veranderingen in het magneetveld. Het aardmagnetisch veld kent kleine verschillen tussen verschillende locaties. Door op aangrenzende posities het lokale magneetveld te meten kan de plaats op een kaart van het aardmagneetveld bepaald worden. Met name voor lange afstanden biedt deze manier van navigeren voordelen. Voor

korte afstanden is het detailniveau van de kaart niet voldoende (de waardes van het magneetveld veranderen vaak geleidelijk). Ditzelfde geldt voor navigatie aan de hand van een kaart van het zwaartekrachtveld. Navigeren op basis van deze velden zal dus aangevuld worden met een andere manier van navigeren, zoals de *inertial navigation systems*. Een combinatie van deze twee vormen van navigatie biedt als voornaamste voordeel dat het niet afhankelijk is van GNSS. De komende vijf jaar zullen ontwikkelingen met betrekking tot navigeren op het aardmagneetveld zich met name focussen op de implementatie van de sensor in navigatiesystemen.

Onderzoeksvraag 2. Wat zijn verwachte en mogelijke toepassingen van bovenstaande ontwikkelingen, waaronder:

a) de mate, termijn en mogelijkheid van verdringing van huidige radiotoepassingen die zij teweeg brengen;

Verwacht wordt dat de toepassingen van kwantumsensoren op het gebied van radio en navigatie zich de komende vijf tot tien jaar voornamelijk zullen beperken tot de defensiesector en dat ze met name ter aanvulling van de huidige radiotoepassingen gebruikt zullen worden. De beperking van de toepassing tot defensie heeft ten minste drie redenen: Ten eerste kent onderzoek naar kwantumsensoren hoge kosten en zal de productie van de toepassingen ook gepaard gaan met hoge kosten. Binnen bepaalde defensiesectoren zijn grote budgetten beschikbaar voor technologische ontwikkelingen die een voordeel kunnen opleveren ten opzichte van de tegenstander, waardoor onderzoek naar kwantumsensoren met name hier plaatsvindt. Ten tweede opereren veel kwantumsensoren onder cryogene omstandigheden, waardoor de toepassingen grote koeling systemen bevatten. Een groot, zwaar apparaat dat moeilijk te verplaatsen is, is in sommige gevallen geen belemmering voor de defensiesector, maar in veel andere (commerciële) sectoren wel. Ten derde zijn er bij defensie bepaalde behoeften voor verbeteringen in *performance* van toepassingen, die in andere contexten minder leven. Zo is het voor defensie bijvoorbeeld waardevol om andere vormen van navigatie te hebben naast GNSS, maar is het voor de commerciële markt minder interessant om deze te implementeren als ze minder nauwkeuriger zijn dan GNSS.

b) de verwachte en mogelijke nieuwe gebruikstoepassingen en gebruikersgroepen.

Uit dit onderzoek zijn geen nieuwe gebruikstoepassingen of -groepen naar voren gekomen binnen het werkveld van RDI de komende vijf tot tien jaar. Onderzoek naar kwantumsensoren focust zich met name op het verbeteren van huidige toepassingen voor specifieke gebruikersgroepen. Ook verwachten wij dat door de hoge kosten die toepassingen op basis van kwantumsensoren zullen hebben, deze in ieder geval de komende vijf tot tien jaar geen nieuwe gebruikersgroepen aan zullen spreken.

Conclusies en aanbevelingen

Het doel van dit onderzoek was om in kaart te brengen wat de huidige stand van zaken is van de techniek en toepassingsmogelijkheden op het gebied van kwantumsensoren die van invloed kunnen zijn op het gebruik van de frequentieruimte de komende vijf tot tien jaar. Wij concluderen dat de techniek achter veel kwantumsensoren in deze tijdspanne waarschijnlijk nog niet functioneel zal zijn buiten de laboratoria. Om daarnaast invloed te hebben op de frequentieruimte zullen kwantumsensoren ook nog moeten landen in gebruikstoepassingen die gebruik maken van het spectrum. Voor toepassingen op basis van kwantumsensoren geldt een afweging met aan de ene kant de behoefte en de verbetering in *performance* van de nieuwe toepassing en aan de andere kant de praktische eigenschappen (grootte, gewicht, benodigd vermogen) en kosten van de nieuwe toepassing. Door de grote kosten die gepaard gaan met (de ontwikkeling van) kwantumsensoren, de omringende apparatuur als koeling en lasers die veel kwantumsensoren nodig hebben en de (voorlopig)

geringe verbeteringen in *performance* die kwantumsensoren hebben, verwachten wij niet dat het werkveld van RDI de komende vijf tot tien jaar beïnvloedt zal worden.

De ontwikkelingen in de kwantumtechnologie volgen elkaar echter in rap tempo op. Wij raden RDI daarom wel aan om deze ontwikkelingen, bijvoorbeeld op gebied van *medical imaging*, in de gaten te blijven houden. Met name in de defensiesector en op het gebied van *magnetic-aiding navigation* zijn er ontwikkelingen gaande die waarschijnlijk op termijn van belang kunnen gaan zijn voor RDI en het gebruik van de frequentieruimte.

Management summary (EN)

Introduction

Developments in the field of quantum sensing follow each other in rapid succession. The Rijksinspectie Digitale Infrastructuur (RDI) would therefore like to gain insight into these developments in order to prepare for their possible influences on its field of work. Dialogic was asked by the RDI to map the current state of technology, scientific breakthroughs and possible applications in the field of quantum sensing that can have an impact on the use of frequency space. The focus of the research was on the fields of radio communication and navigation.

Background

Quantum sensors make use of special physical properties on a subatomic scale. These properties do not exist in classical physics, such as entanglement, quantum interference (superposition), discrete states and coherence. However, quantum systems are very fragile and when they come into contact with an external force, the quantum state collapses. Quantum sensors exploit this 'weakness'. In theory, quantum sensors can be affected by even the slightest changes in the environment, which makes these influences detectable and measurable.

Within the scope of this research, a number of quantum sensors are relevant. The table below briefly describes these sensors.

Quantum sensor	Measurable quantity	Short description
SQUIDs	Magnetic fields	A SQUID consists of two superconductors between which electron pairs can move without losing voltage. The addition of a magnetic field causes the voltage in the SQUID to oscillate. The period of this oscillation is equal to one magnetic flux quantum.
Rydberg atom	Electromagnetic waves	Lasers can move the electron from an atom to a shell further away from the nucleus. Interaction with electromagnetic waves then leads to a transition of the electron to another shell. This transition releases a certain amount of energy that can be used to determine the frequency of the electromagnetic wave.
Nitrogen-vacancy (NV) center	Magnetic fields, electromagnetic waves, temperature, pressure, rotation	In a diamond structure, when one carbon atom is replaced by a nitrogen atom and an adjacent atomic site is left free, an NV center is created. Interaction with a force to be measured can affect the polarization of the spins of the atoms, which changes the fluorescence of the light emitted by the diamond.
Cold atom interferometer	Acceleration, gravity	When atoms are cooled to temperatures near the absolute zero, they begin to behave like waves. In an interferometer, the group of atoms is successively split by different lasers. External forces cause the groups to move in different directions and the strength of the force being measured determines the final size of the groups.
Atomic vapors	Magnetic fields, rotation, time/frequency	Lasers polarize the spin of atoms contained in a vapor container and this spin can subsequently be affected by external forces. Another laser can then be used to read this spin and determine the magnitude of the external force.

Research design

This research consisted mainly of a literature review and interviews with experts. Some of the interviews were aimed at getting informed by experts in the field of quantum- and

radiotechnology. The other interviews served to get a picture of current developments of the applications of quantum sensing. In particular, the interviews in this report contributed to the interpretation of recent publications and the expected developments.

Results

Research question 1. What is the state of the technique and what are the expected research developments over the next five years in the field of quantum sensors; in particular with respect to:

a) radiocommunication with quantum sensors;

In the field of radio communication, developments are happening in the areas of 1) electromagnetic quantum sensors (which can act as radio receivers) and 2) Analog-Digital Converters. Rydberg atoms and Nitrogen Vacancy (NV) centers can be used as radio receivers because they are sensitive to changes in the electromagnetic spectrum. Currently, however, these technologies are operational only in laboratories, and the expectations for the use of quantum sensors in radio communications the next five years are therefore low. This is mainly due to the fact that quantum sensors are both more sensitive to the signal as to the noise. As a result, the improvement in performance compared to current radio receivers is limited. There are also additional practical obstacles such as the size, weight and cost of the quantum sensor as a radio receiver.

SQUIDs, as part of an ADC, can convert the analog, oscillating electrical signal generated by the absorption of electromagnetic radiation to a digital signal. In theory, this could result in less noise and distortion of the signal than current ADCs.

b) quantum navigation and quantum-assisted satellite navigation;

Developments in the field of navigation using quantum sensors are taking place in two main areas: inertial navigation and magnetic-aided navigation. Inertial navigation is based on one's own motion: by measuring the acceleration and rotation relative to the starting position, a new position can be calculated. Cold atom interferometers are sensitive to both acceleration and rotation and thus can serve as the accelerometer and gyroscope in a quantum inertial navigation system. In theory, this quantum sensor should be more sensitive than current sensors, provide more long-term stability and, unlike current sensors, be able to provide an absolute measurement. However, there are still challenges to be solved such as providing the necessary bandwidth for navigation purposes. Nonetheless quantum inertial navigation systems are expected to be applied in specific sectors such as navigation in space in the next five years.

With magnetic-aided navigation, current navigation systems are supported by magnetometers and a map of the earth's magnetic field. Quantum sensors such as NV centers and atomic vapors are sensitive to changes in the magnetic field. The position on earth is characterized by small deviations in the magnetic field. By measuring the local magnetic field at adjacent positions the location on a map of the earth's magnetic field can be determined. Especially for long distances this method of navigation offers advantages. For short distances the level of detail of the map is not sufficient (magnetic field values often change gradually). The same principles apply to navigation based on a gravity field map. Navigation based on these fields will need to be supplemented by another mode of navigation, such as inertial navigation. A combination of these two forms of navigation offers a main advantage of not being dependent on GNSS. The coming five years, developments related to navigation on the earth's magnetic field will mainly focus on implementing the sensor in larger navigationsystems.

Research question 2. What are expected and possible applications of the above developments, including:

a) the degree, time frame and possibility of replacing current radio applications;

It is expected that the applications of quantum sensors in the field of radio and navigation over the next five to ten years will mainly be limited to the defense sector and to complement current radio applications. The reasons for the limitation of applications to the defense sector is threefold: First, research on quantum sensors is very expensive and the production of the applications will also involve high costs. Within certain defense sectors, large budgets are available for technological developments that can provide an advantage over the enemy, which is why research on quantum sensors is particularly prevalent here. Second, many quantum sensors operate under cryogenic conditions, which means that applications include large cooling systems. A large, heavy device that is difficult to move is in some cases not an obstacle for the defense sector, but to many other (commercial) sectors it is. Third, there are certain needs in defense for improvements in performance that are less prevalent in other contexts. For example, it is valuable for defense to have other forms of navigation besides GNSS, but it is less interesting for the commercial market to implement them if they are less accurate than GNSS.

b) the expected and possible new applications and user groups.

No new user applications or groups within the field of RDI for the next five to ten years emerged from this research. Research on quantum sensors focuses primarily on improving current applications for specific user groups. We also expect that due to the high cost applications based on quantum sensors will have that they will not appeal to new user groups within the next five to ten years.

Conclusions and recommendations

The purpose of this study was to identify the current state of technique and possible applications in the field of quantum sensing that may affect the use of frequency space over the next five to ten years. We conclude that the technology behind many quantum sensors will probably not yet be functional outside of laboratories within this time frame. To influence the frequency space, quantum sensors will also have to be incorporated in applications that make use of this frequency space. For applications based on quantum sensors, a trade-off applies with on the one hand a need for the new application and an improvement in performance of the new application and on the other hand the practical characteristics (size, weight, power requirements) and cost of the new application. Because of the large costs associated with (the development of) quantum sensors, the surrounding equipment such as the cooling and lasers that many quantum sensors require, and the (for now) small improvements in performance that quantum sensors have, we do not expect the field of RDI to be impacted in the next five to ten years.

However, developments in quantum technology are rapidly following one another, and we therefore do recommend that RDI continue to keep monitoring these developments, for example in the area of medical imaging. Particularly in the defense sector and in the field of magnetic-aided navigation developments are underway that will probably be of interest to RDI with regards to the use of the frequency space later on.

1 Introductie

1.1 Aanleiding

De ontwikkelingen op het gebied van kwantumtechnologie zullen naar verwachting op korte termijn grote gevolgen gaan hebben voor computers en algoritmen, veiligheid, modellering, communicatie en metrologie. Er wordt verwacht dat toepassingen op basis van kwantumsensoren eerder klaar voor de markt zullen zijn dan toepassingen die gebruik maken van prominentere kwantumtechnologieën, zoals kwantumcomputing [1]. De Rijksinspectie Digitale Infrastructuur (RDI) wilt daarom graag inzicht krijgen in de ontwikkelingen op het gebied van kwantumsensoren, om zich voor te bereiden op de mogelijke invloeden hiervan op het werkveld van de RDI. Dialogic is door de RDI gevraagd om met name de ontwikkelingen in kaart te brengen van toepassingen op basis van kwantumsensoren in de domeinen van radiocommunicatie en navigatie. Daarbij wordt er onder andere gekeken naar de effecten die deze ontwikkelingen kunnen hebben op het gebruik van frequentieruimte.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om in kaart te brengen wat de huidige stand van zaken is van de techniek, wetenschappelijke doorbraken en toepassingsmogelijkheden op het gebied van kwantumsensoren met een invloed op het gebruik van de frequentieruimte.

1.3 Onderzoeksvragen

Het onderzoek moet antwoord geven op de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat is de stand van de techniek en wat zijn de verwachte onderzoeksontwikkelingen in de komende vijf jaar op het gebied van kwantumsensoren; in het bijzonder ten aanzien van:
 - a. radiocommunicatie met kwantumsensoren;
 - b. kwantumnavigatie en kwantum-ondersteunde satellietnavigatie;
2. Wat zijn verwachte en mogelijke toepassingen van bovenstaande ontwikkelingen, waaronder:
 - a. mate, termijn en mogelijkheid van verdringing van huidige radiotoepassingen die zij teweeg brengen;
 - b. verwachte en mogelijke nieuwe gebruikstoepassingen en gebruikersgroepen.

Andere relevante ontwikkelingen die gedurende het onderzoek naar boven komen op het terrein van kwantumsensoren die relevant kunnen zijn voor RDI zullen ook gerapporteerd worden.

1.4 Leeswijzer

We starten dit rapport in hoofdstuk 2 met de gebruikte methodiek, gevolgd door een kort en globale introductie van kwantumtechnologie en kwantumsensoren in hoofdstuk 3. Vervolgens bespreken we in de daaropvolgende hoofdstukken achtereenvolgens de ontwikkelingen op het gebied van radio (hoofdstuk 4), navigatie (hoofdstuk 5) en overige ontwikkelingen (hoofdstuk 6). We eindigen dit rapport in hoofdstuk 7 met de conclusies en aanbevelingen. We beperken de bespreking van de ontwikkelingen tot degene die (mogelijk) van invloed zijn op het toekomstige spectrumgebruik.

2 Methodiek

De resultaten die gepresenteerd zullen worden in dit rapport zijn verkregen via een combinatie van interviews en literatuuronderzoek. Daarnaast is er ook een analyse gedaan van patentaanvragen van een aantal kwantumsensoren.

2.1 Interviews

Om te komen tot een beeld van zowel de laatste stand van zaken betreffende de ontwikkelingen op het gebied van kwantumsensoren als van de verschillende toepassingen hiervan, hebben we verschillende partijen geïnterviewd. Bijlage 1 toont een overzicht van de verschillende interviewrespondenten. Een deel van deze interviews (o.a. TNO) had als doel om ons door experts te laten informeren op het gebied van kwantum- en radiotechnologie. De andere interviews (o.a. Rydberg Technologies, QuantumDelta) diende om een beeld te krijgen van de huidige ontwikkelingen van toepassingen. De interviews in dit rapport hebben met name bijgedragen aan de interpretatie van recente publicaties en de hierbij te verwachten ontwikkelingen. Ook waren deze interviews van belang voor het toetsen van onze aannames.

Van alle interviews hebben wij een beknopt verslag gemaakt dat is teruggelegd bij de respondent ter validatie. De interviews en verslagen zijn vertrouwelijk behandeld. Dat wil zeggen dat (i) informatie alleen is gebruikt voor dit onderzoek, (ii) het interviewverslag niet is doorgestuurd aan derden of publiek is gemaakt, en (iii) in het eindrapport geen direct herleidbare quotes zijn opgenomen zonder overleg.

2.2 Literatuuronderzoek

Een groot deel van dit rapport berust op literatuuronderzoek. Dit betreft zowel nieuwsberichten over recente ontwikkelingen van kwantumsensoren als recente wetenschappelijke publicaties hierover. Beide typen bronnen zijn namelijk indicaties van de staat van de wetenschap op het gebied van kwantumsensoren. Binnen dit onderzoek is begonnen met literatuur die werd aangedragen door interviewrespondenten. Aan de hand van die publicaties is er verder gezocht naar de meest recente ontwikkelingen.

2.3 Analyse patentaanvragen

Data over patenten wordt vaak gebruikt om in kaart te brengen hoe bepaalde technologische ontwikkelingen verlopen. Bedrijven kunnen overigens ook van andere methoden gebruik maken ter bescherming van hun intellectueel eigendom. Patentanalyses geven dus geen compleet overzicht, maar kunnen wel een degelijke indicatie bieden. In deze rapportage hebben we gebruik gemaakt van data over patentaanvragen om dit kort voor kwantumsensoren te analyseren. Er is gebruik gemaakt van Google Patents om te zoeken naar patenten. Daarnaast gaat het hier om patentaanvragen (patent application) en niet per se om gehonoreerde patenten. Het idee van deze analyse is namelijk om de ontwikkelingen van kwantumsensortoepassingen te volgen en daarvoor is het minder relevant of deze ook daadwerkelijk is toegekend.

Per type sensor zijn de volgende zoekopdrachten gehanteerd:

Type sensor	Zoekopdracht
Rydberg atomen	("Rydberg atom") AND (("sensor") OR ("sensors") OR ("sensing"))
NV centers	((("NV center") OR ("Nitrogen vacancy center"))) AND (("sensor") OR ("sensors") OR ("sensing"))

Type sensor	Zoekopdracht
SQUIDs	((<code>"SQUID"</code> AND NOT (<code>"fish"</code> OR <code>"game machine"</code> OR <code>"slot machine"</code>))) OR (<code>"superconducting quantum interference device"</code>)) AND ((<code>"sensor"</code>) OR (<code>"sensors"</code>) OR (<code>"sensing"</code>))

3 Achtergrond

3.1 Kwantumtechnologie

Kwantumtechnologieën vertalen de principes van de kwantumnatuurkunde naar technologische toepassingen. Momenteel staan veel van deze technologieën nog in de kinderschoenen. Kwantumtoepassingen worden gebouwd op de kwantumprincipes van *qubits*, superpositie, en verstrengeling. Hieronder zullen we deze principes in het kort beschrijven.

Klassieke bits kunnen zich enkel in één mogelijke, binaire toestand bevinden (een 0 of een 1). Met die bits worden in een klassieke computer alle informatie gecodeerd. Een kwantumbit (een *qubit*) werkt net even anders. Een *qubit* kan zich namelijk tegelijkertijd in meerdere toestanden bevinden en op meerdere plekken zijn, een fenomeen genaamd *superpositie*. Pas wanneer het deeltje geobserveerd wordt, wordt de staat of de plek van het deeltje vastgelegd [2].

Een qubit kan geïllustreerd worden aan de hand van het welbekende voorbeeld van Schrödingers kat. In dit gedachtenexperiment bevindt deze kat zich in een afgesloten ruimte samen met een machine die een buisje bevat met een radioactief element. Elk uur kan er een atoom vervallen, maar de kans is net zo groot dat er geen atoom valt. Wanneer er een atoom valt wordt er een systeem in gang gezet dat een flesje blauwzuur stukslaat. Dit zal de kat direct vergiftigen. Totdat je deze ruimte betreedt, kun je niet weten of de kat nog leeft of al dood is. In de klassieke wereld leeft deze kat op elk moment wel of niet, ook al is de staat bij jou niet bekend tot het moment van observatie. In de kwantumwereld daarentegen leeft de kat zowel wel als niet, totdat deze geobserveerd wordt. Door de ruimte te betreden en de kat te observeren wordt de kwantumstaat 'ingestort' en convergeert het naar één van de twee mogelijkheden. Tot dat moment is de toestand van de kat zowel levend als dood.

Het tweede kwantumprincipe dat we hier zullen bespreken is dat van *verstrengeling*. Hierbij kunnen twee of meer kwantumdeeltjes samen één systeem vormen. Deze deeltjes lijken verbonden door een onzichtbare band, ongeacht de afstand tussen de deeltjes. Bij het meten van het ene deeltje weet je daarom direct meer over de toestand van het tweede deeltje. Hierdoor lijkt het alsof ze sneller dan het licht met elkaar communiceren en informatie uitwisselen (er worden nog discussies gevoerd over in hoeverre dat theoretisch mogelijk is) [2]. Als we dit principe toepassen op het gedachtenexperiment van Schrödingers kat dan verstrengelen we een tweede kat met de hiervoor aangehaalde kat. Deze tweede kat plaatsen we in een andere afgesloten ruimte. De superpositie van de totale toestand is dan 'beide katten zijn dood' en 'beide katten zijn levend'. Als we de toestand van één van de katten observeren, en die blijkt nog te leven, dan is de toestand van de andere kat ook onmiddellijk 'levend'. De toestanden van de twee katten zijn namelijk verstrengeld en het is niet mogelijk dat één leeft en één dood is [2].

Qubits en kwantumtoestanden zijn erg fragiel. De toestand van superpositie (een staat van *coherence*) blijft alleen bestaan als de *qubit* geen externe interacties heeft: aanraking met een externe kracht doet de kwantumtoestand instorten. Het instorten van een kwantumtoestand heet *decoherence* en is een grote uitdaging voor elk kwantumsysteem [3]. Hoe meer *qubits* er namelijk gebruikt worden in een systeem, hoe groter de kans is dat het systeem op elk moment kan instorten. *Qubits* zelf kunnen op verschillende manieren gemaakt, gecontroleerd en 'beveiligd' worden tegen invloeden van buitenaf.

3.2 Kwantumsensoren

Zoals net aangehaald zijn kwantumsystemen extreem gevoelig voor veranderingen in de omgeving. Voor veel (beoogde) kwantumsystemen en -toepassingen is deze sensitiviteit de grootste uitdaging. Echter wordt deze 'zwakte' door kwantumsensoren juist benut [4]. In theorie zouden kwantumsensoren door de kleinste veranderingen in de omgeving beïnvloed worden en zijn deze invloeden dus te detecteren en te meten. Dit zou verder gaan dan wat de meeste huidige, klassieke sensoren kunnen meten [1].

3.2.1 De definitie van een kwantumsensor

De definitie van een sensor is een "instrument of orgaan dat veranderingen kan waarnemen". Onze zintuigen zijn bijvoorbeeld goede voorbeelden van sensoren die veranderingen in fysische grootheden als licht en geluid waar kunnen nemen. Kwantumsensoren gebruiken de principes van de kwantumnatuurkunde om deze veranderingen waar te nemen en kunnen dit op verschillende wijzen doen. Een *kwantumsensor* kan vallen in één van de volgende categorieën:

- I. Fysische grootheden kunnen gemeten worden met behulp van verschillende energieniveaus in een kwantumsysteem. Wanneer dit kwantumsysteem interacteert met de fysische grootheid, vindt er een transitie tussen energieniveaus plaats.
- II. Fysische grootheden kunnen gemeten worden met behulp van kwantum *coherence* op basis van superpositie. Wanneer dit kwantumsysteem interacteert met de fysische grootheid, stort de staat van superpositie in.
- III. De sensitiviteit of de precisie van een meting kan verbeterd worden met behulp van verstrengeling. Wanneer het ene verstrengelde kwantumdeeltje interactie heeft met de fysische grootheid kan dat aan de hand van het tweede verstrengelde deeltje gemeten worden.

In dit onderzoek zal de focus liggen op kwantumsensoren die vallen in categorie I en II. Kwantumsensoren in categorie III kunnen in potentie de grootste invloed hebben, maar toepassingen van sensoren die op basis van verstrengeling werken, zijn nog ver weg [4]. Voorbeelden van sensoren die onder één of meerdere definities vallen zijn te vinden in Tabel 1.

3.2.2 De eigenschappen van een kwantumsensor

Een kwantumsysteem is een systeem dat bestaat uit deeltjes met specifieke eigenschappen op kwantumniveau. Een kwantumsysteem kwalificeert als kwantumsensor als het de volgende eigenschappen heeft [4, 5]:

1. Het kwantumsysteem moet discrete toestanden hebben. De overgang tussen de twee toestanden gaat gepaard met de opname of afgifte van energie met een bepaalde frequentie.
2. Het moet mogelijk zijn om het kwantumsysteem in een bepaalde toestand te brengen en deze toestand ook uit te lezen.
3. De tijd voordat het kwantumsysteem instort (*decoherence*) moet lang genoeg zijn om een meting uit te kunnen voeren.
4. Het kwantumsysteem moet interacteren met de te meten fysische grootheid. De interactie met deze grootheid moet leiden tot een overgang tussen de twee energieniveaus van het kwantumsysteem.

Toepassingen op basis van kwantumsensoren zullen met name gekarakteriseerd worden door eigenschap 4 van het kwantumsysteem: welke externe factor(en) beïnvloed(en) het

kwantumsysteem? Geladen systemen, zoals gevangen ionen, zullen gevoelig zijn voor elektrische velden, terwijl systemen op basis van de spin van atomen bijvoorbeeld reageren op magnetische velden [4].

3.2.3 Typen kwantumsensoren

Tabel 1 toont een overzicht van verschillende kwantumsensoren (Implementation), de *qubit* die de basis vormt van de sensor (Qubit(s)), de grootte die gemeten kan worden met de specifieke sensor (Measured quantity(ies)), de frequentie waarmee de kwantumsensor tussen de energieniveaus kan overgaan (Typical frequency), de manier waarop het kwantumsysteem in een aangeslagen toestand gebracht kan worden (Initialization), de manier waarop het systeem uitgelezen kan worden (Readout) en de definitie van kwantumsensoren waaraan de specifieke sensor voldoet (Type). De relevante kwantumsensoren lichten we verderop in dit rapport verder toe. Deze tabel laat zien dat er vele verschillende kwantumsensoren bestaan op basis van verschillende soorten *qubit(s)*, zoals de spin van atomen of elektronen. Met deze kwantumsensoren kunnen vervolgens fysische grootheden als magnetische velden, elektrische velden, zwaartekracht, rotatie en acceleratie gemeten worden.

3.2.4 Meten met kwantumsensoren

Om een bepaalde grootte te meten met behulp van kwantumsensoren moet de sensor eerst geïnitieerd worden, vervolgens heeft de sensor interactie met het signaal dat gemeten wordt en ten slotte moet de sensor worden uitgelezen en kan de grootte van het signaal geschat worden. De meeste kwantumsensoren volgen daarom de volgende stappen:

1. De kwantumsensor wordt geïnitieerd naar de bekende basisstaat, bijvoorbeeld het lage energie level.
2. De kwantumsensor wordt getransformeerd naar de gewenste begin *sensing* staat. Deze staat is vaak een vorm van superpositie.
3. Gedurende een bepaalde periode heeft de kwantumsensor interactie met het signaal dat gemeten moet worden. Het signaal kan bijvoorbeeld energie toevoegen aan het kwantumsysteem waardoor het overgaat naar een hoger energieniveau. Op tijd t bevindt de kwantumsensor zich dan in de uiteindelijke *sensing* staat.
4. De kwantumsensor wordt getransformeerd naar een staat die uitgelezen kan worden.
5. De uiteindelijke staat van de kwantumsensor wordt uitgelezen door bijvoorbeeld spanning, het aantal fotonen of de polarisatie te meten. Deze meting leidt vervolgens tot een binaire waarde: is de *qubit* gedurende de meettijd t van staat veranderd?

Een binaire waarde (0; niet veranderd, 1; wel veranderd) geeft echter nog geen indicatie van de grootte van het signaal dat gemeten moet worden. Waar naartoe gewerkt wordt is de waarde p : de kans dat een *qubit* van staat zal veranderen gedurende een bepaalde tijd. Om deze kans in te kunnen schatten moet bovenstaand protocol herhaald blijven worden:

6. Herhaal stappen 1-5 vele malen en neem het gemiddelde. Dit kan achtereenvolgens door hetzelfde kwantumsysteem gedaan worden of parallel door verscheidene, identieke kwantumsystemen.
7. De kans p dat het kwantumsysteem binnen tijd t overgaat naar een ander energieniveau kan worden gebruikt om de grootte van het signaal in te schatten.

Implementa-tion	Qubit(s)	Measured quan-tity(ies)	Typical fre-quency	Initializa-tion	Readout	Category
Neutral atoms						
Atomic vapor	Atomic spin	Magnetic field, Ro-tation, Time/Frequency	DC-10GHz	Optical	Optical	II-III
Cold clouds	Atomic spin	Magnetic field, Ac-celeration, Time/Frequency	DC-10GHz	Optical	Optical	II-III
Trapped ion(s)						
	Long-lived electronic state	Time/Frequency Rotation	THz	Optical	Optical	II-III II
	Vibrational mode	Electric field, Force	MHz	Optical	Optical	II
Rydberg atoms						
	Rydberg states	Electric field	DC, GHz	Optical	Optical	II-III
Solid state spins (ensembles)						
NMR sensors	Nuclear spins	Magnetic field	DC	Thermal	Pick-up coil	II
Nitrogen Vacancy center ensembles	Electron spins	Magnetic field, Elec-tric field, Temperature, Pres-sure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
Solid state spins (single spins)						
P donor in Si	Electron spin	Magnetic field	DC-GHz	Thermal	Electrical	II
Semiconductor quantum dots	Electron spin	Magnetic field, Elec-tric field	DC-GHz	Electrical, Optical	Electrical, Optical	I-II
Single NV center	Electron spin	Magnetic field, Elec-tric field, Temperature, Pres-sure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
Superconducting circuits						
SQUID	Supercur-rent	Magnetic field	DC-10GHz	Thermal	Electrical	I-II
Flux qubit	Circulating currents	Magnetic field	DC-10GHz	Thermal	Electrical	II
Charge qubit	Charge ei-genstates	Electric field	DC-10GHz	Thermal	Electrical	II
Elementary particles						
Muon	Muonic spin	Magnetic field	DC	Radioactive decay	Radioactive decay	II
Neutron	Nuclear spin	Magnetic field, Pho-non density, Gravity	DC	Bragg scat-tering	Bragg scat-tering	II
Other sensors						
SET	Charge ei-genstates	Electric field	DC-100 MF	Thermal	Electrical	I
Optomechanics	Phonons	Force, Acceleration, Mass. Magnetic field, Voltage	kHz-GHz	Thermal	Optical	I
Interferometer	Photons, (Atoms, Molecules)	Displacement, Re-fractive Index	-			II-III

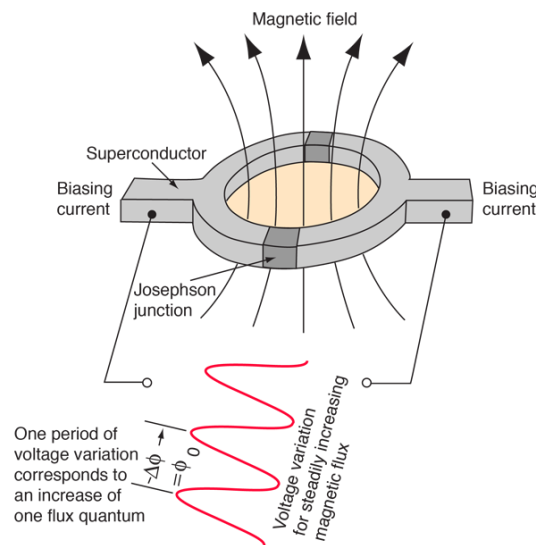
Tabel 1: Overzicht van kwantumsensoren. Bron: [4]

3.2.5 Voorbeelden van relevante kwantumsensoren

In deze sectie zullen we een aantal kwantumsensoren toelichten die in het vervolg van dit rapport aangehaald worden. Het doel hier is niet om de sensoren volledig te doorgronden, maar om ze op een korte en beknopte wijze te introduceren zodat de toepassingen die later besproken zullen worden op basis van deze sensoren in de goede context geplaatst kunnen worden. Daarnaast zal de implementatietijd van een bepaalde toepassing in veel gevallen bepaald worden door (de beperkingen van) het type sensor dat ze gebruiken.

SQUIDS

SQUID staat voor *Superconducting Quantum Interference Device*. SQUIDS behoren tegelijkertijd tot één van de oudste en de meest gevoelige magnetometers [4]. Een supergeleider (*superconductor*) is een materiaal dat bij een bepaalde (vaak extreem lage) temperatuur geen elektrische weerstand meer heeft. Een SQUID bestaat uit een ring van twee supergeleiders (*Figuur 1*) die gescheiden worden door dunne isolerende lagen, waarbij zogeheten *Josephson junctions* ontstaan. In deze *junctions* kan een stroom van elektronenparen (*Cooper pairs*) zich bewegen zonder een spanningsverschil te creëren. Door de toevoeging van een magnetisch veld (en een instelstroom) wordt een oscillerende spanning gecreëerd over de SQUID als functie van de magnetische flux. Eén periode van deze oscillatie correspondeert met de toename van één magnetische *flux quantum* (een constant getal voor elke superconductor) [6].

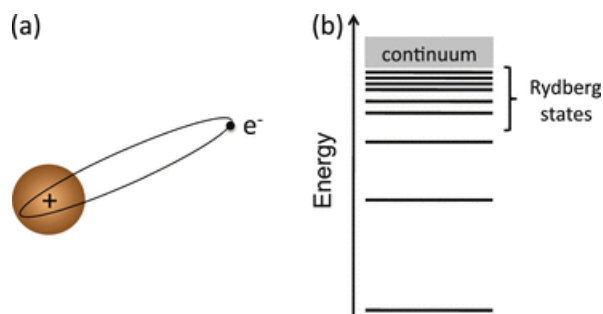


Figuur 1: SQUID magnetometer. Bron: [6]

Rydberg atomen

Rydberg atomen zijn atomen die een hoog *hoofdkwantumgetal* hebben. Dit betekent dat elektronen zich in een schil ver bij de atoomkern vandaan bevinden. Lasers kunnen het elektron van een atoom naar een elektronschil verder bij de atoomkern vandaan, en daarmee naar een hoger energieniveau, brengen. Elektromagnetische golven kunnen deze aangeslagen toestand vervolgens verstoren en de superpositie van de elektronen doen instorten. Een Rydberg atoom beschikt over vele mogelijke energieniveaus en overgangen. Het gaat hier dus niet om een lineaire, maar een discrete uitkomst. Hierdoor is het mogelijk om een Rydberg atoom te *tunen* naar vele discrete frequenties binnen het elektromagnetische spectrum [7]. Meetsystemen op basis van Rydberg atomen bevatten slechts één soort atoom. Dit

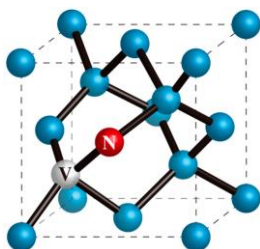
atoom zal zich waar dan ook en onder wat voor omstandigheden hetzelfde gedragen. Verwacht wordt daarom dat in de metrologie Rydberg atomen de standaard zullen gaan vormen voor het meten van elektromagnetische straling.



Figuur 2: (a) Klassieke weergave van een Rydberg atoom: Het elektron bevindt zich in een schil ver weg van de atoomkern. (b) Kwantum weergave van een Rydberg atoom: Het verschil in energie tussen de energieniveaus neemt af naarmate het elektron zich in verdere schillen van de atoomkern bevindt. Bron: [8]

NV (nitrogen-vacancy) centers

Diamanten zijn, normaliter, volledig transparant. Oneffenheden in de structuur van de diamant kunnen er echter voor zorgen dat deze een kleur krijgen. Een *nitrogen-vacancy* centrum geeft een diamant bijvoorbeeld een roze kleur. Een NV center kan kunstmatig gemaakt worden door in de diamantstructuur één koolstofatoom te vervangen met een stikstof (N) atoom en de plek van een verbonden atoom leeg te laten (vacancy; V) (zie Figuur 3). Als de diamant nu beschienen wordt met groen licht, wordt er rood licht uitgezonden. De spins van de elektronen kunnen vervolgens door middel van een laser gepolariseerd worden. De interactie met bijvoorbeeld een magnetisch veld kan dit verstoren, wat leidt tot een vermindering in de fluorescentie van het licht dat door de diamant wordt uitgezonden. Door deze fluorescentie te meten kan de aanwezigheid en de grootte van een magnetisch veld gemeten worden [9].

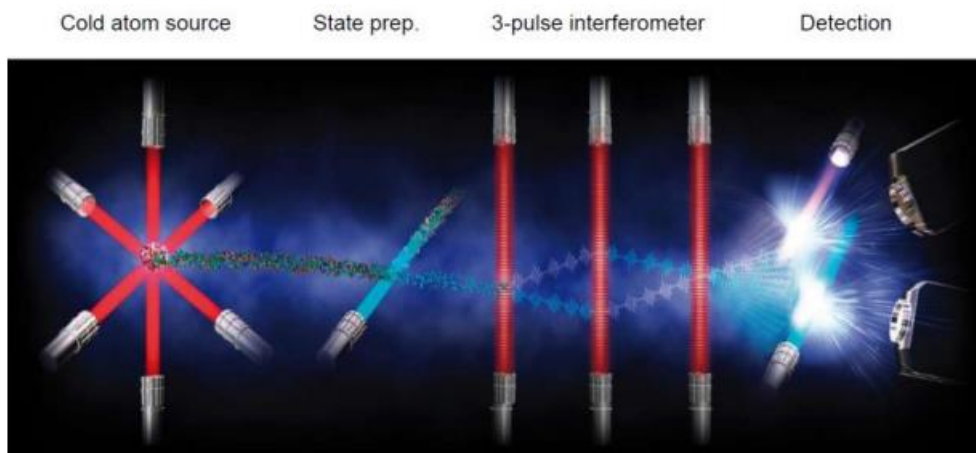


Figuur 3: Een schematische illustratie van een NV center in een diamant structuur met het stikstof atoom (rood), de vacancy (wit) en de koolstofatomen (blauw). Bron: [78]

Cold atom interferometer

Wanneer atomen worden gekoeld tot temperaturen nabij het absolute nulpunt, beginnen ze zich te gedragen als golven en vervangen de wetten van de klassieke natuurkunde [10]. Een interferometer op basis van *cold atoms* manipuleert deze golf functie. In de meest gangbare versies van deze sensoren (zie Figuur 4) worden de atomen gekoeld met lasers (*cold atom source*). Vervolgens wordt met behulp van een andere laser de atomen die zich niet in de juiste beginstand bevinden eruit gefilterd (*state prep*). De atomen die zich wel in het juiste energielevel bevinden gaan vervolgens de interferometer in. Deze interferometer bestaat uit drie laser pulsen achter elkaar (*3-pulse interferometer*). Het systeem is zo opgezet dat elke atoom uit de interferometer komt met een zekere kans

dat het is overgegaan naar een hoger energieniveau. Deze mogelijke overgang hangt af van de interactie met het te meten signaal (bijvoorbeeld de zwaartekracht). De wolk van koude atomen is daarmee gesplitst in twee aparte groepen: één groep bevindt zich nog in de begin toestand en de andere groep is overgegaan naar de aangeslagen toestand. De relatieve grootte van de twee groepen kan vervolgens gemeten worden (*Detection*) [11].

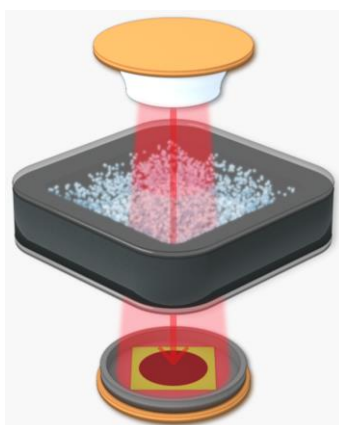


Figuur 4: Conceptueel overzicht van een cold atom interferometer. Bron: [11]

Atomic vapors

De spin van verschillende atomen die zich in een damp container bevinden kunnen door een laser (een *optical pump beam*) gepolariseerd worden. Dit betekent dat de spin van alle atomen in dezelfde oriëntatie wordt gezet. Een tweede laser (de *probe beam*) wordt vervolgens door deze damp gestuurd, en met een sensor aan de andere kant van de damp container wordt de polarisatie van het binnenkomende licht te meten.

Externe magnetische velden kunnen de spin van de atomen in het damp beïnvloeden, daarmee stort de kwantumtoestand van de atomen in. Wanneer er geen magnetisch veld aanwezig is blijft de oriëntatie van de spin van atomen behouden en is de polarisatie van de *probe beam* onveranderd. Wanneer er wel een magnetisch veld aanwezig is kan aan de polarisatie van de *probe beam* worden afgelezen hoe sterk en in welke richting het aardmagnetisch veld geweest moet zijn [12].

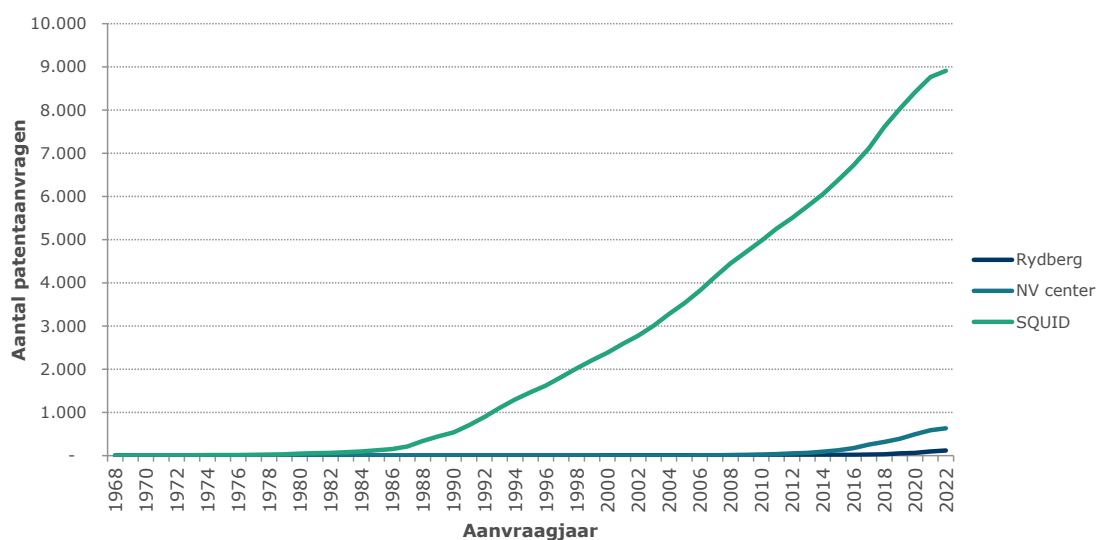


Figuur 5: In een versimpelde weergave van een atomic vapor cell, stuurt een laser licht door een groep atomen die in een luchtdichte container zitten. De eigenschappen van dit licht veranderen door de atomen en deze verandering kan door de sensor onderaan worden gemeten. Bron: [13]

3.2.6 Ontwikkelingen kwantumsensoren

Patentaanvragen kunnen een beeld geven van de ontwikkeling van kwantumsensoren (in het algemeen) over de afgelopen decennia. Met een patent kan een aanvrager binnen een bepaalde regio het alleenrecht krijgen om een bepaalde bedachte methode te commercialiseren. Het gaat hierbij dus vaak om een toepassing van bepaalde theoretische kennis binnen een bepaalde opstelling. Daarmee kan dit als goede indicator dienen om verder te kijken dan enkel theoretische ontwikkelingen. Toepassingen met kwantumsensoren werden al vanaf eind jaren 60 van de vorige eeuw uitgewerkt.

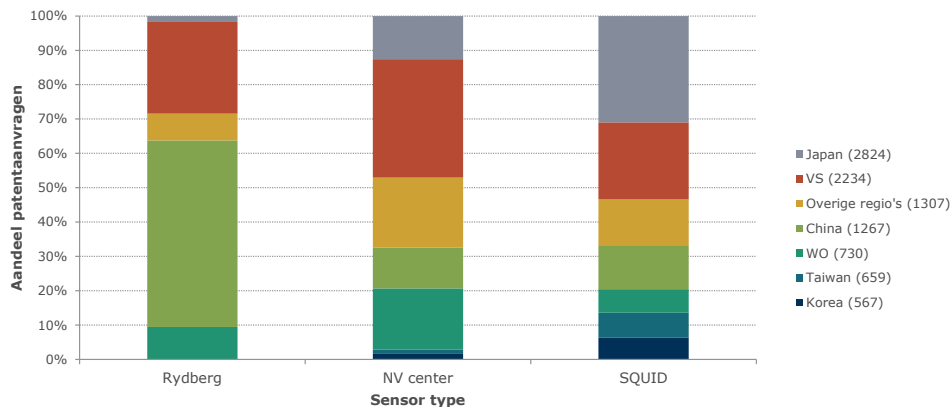
In Figuur 6 wordt ter illustratie de ontwikkeling van patentaanvragen voor SQUIDs, NV centers en Rydberg atomen getoond.¹ Hierin valt te zien dat toepassingen van de SQUIDs al veel langer worden bedacht en er anno nu al vele malen meer patenten voor zijn ingediend dan NV centers en Rydberg atomen. Patenten met NV centers kwamen pas rond 2010 op gang en ontwikkelingen op het gebied van Rydberg atomen zijn een ontwikkeling van de afgelopen jaren.



Figuur 6. Aantal patentaanvragen per type kwantumsensor (cumulatief)

Patentaanvragen voor toepassingen met SQUIDs en NV centers worden vooral in Japan, de VS en China ingediend (Figuur 7). Voor kwantumsensoren met Rydberg atomen lijken de ontwikkelingen zich in de VS, maar met name in China te voltrekken.

¹ De resultaten van de cold atom interferometer worden hier niet getoond omdat het aantal patentaanvragen <50 was sinds de eerste aanvraag in 2013.



Figuur 7. Aandeel ingediende patentaanvragen voor toepassingen met kwantumsensoren per indienregio (met tussen haakjes de totalen)²

Bovenstaande figuren laten zien dat de ontwikkelingen rondom de nieuwe generatie van kwantumsensoren (o.a. Rydberg atomen en NV centers) nog in de kinderschoenen staan en in veel gevallen alleen nog in de laboratoria bestaan. Ook laat het zien dat, in ieder geval op basis van de patentaanvragen, de ontwikkelingen zich veelal buiten Europa afspelen. Het *European Defence Fund* heeft recentelijk wel een groot project gesubsidieerd van een consortium van Europese private en publieke instellingen. Dit project heeft de volgende doelstelling [14]:

The project "Advanced, Disruptive and Emerging QUAntum technologies for DEfense" (ADEQUADE) aims at providing a breakthrough in different quantum-sensing domains which will develop capabilities with significant technological, operational and strategic advantages over existing defence products or technologies in different warfare areas.

Betrokkenen verwachten dat de uitkomsten van het project relatieve lage TRL's zullen hebben (*Technological Readiness Level*; voor een uitgebreide uitleg zie paragraaf 3.3.1 later). De hoop is dat het project zal leiden tot prototypes die in de relevante omgevingen getest en gebruikt kunnen gaan worden.³

3.3 Van technologie tot toepassing

De onderzoeksvragen die de basis vormen van dit rapport lopen langs twee sporen. Ten eerste is gevraagd om de technologische ontwikkelingen op het gebied van kwantumsensoren in kaart te brengen (met de focus op het gebied van radiocommunicatie en navigatie). Vervolgens is er gevraagd om de toepassingen op basis van deze kwantumtechnologieën te verkennen en te analyseren. In dit hoofdstuk bespreken we de frameworks waarmee we zowel de techniek als de toepassing zullen beoordelen. Ook illustreren we aan de hand van voorbeelden hoe nieuwe technologieën en toepassingen een disruptieve werking op de markt kunnen hebben.

² WO = Wereldorganisatie voor de Intellectuele Eigendom

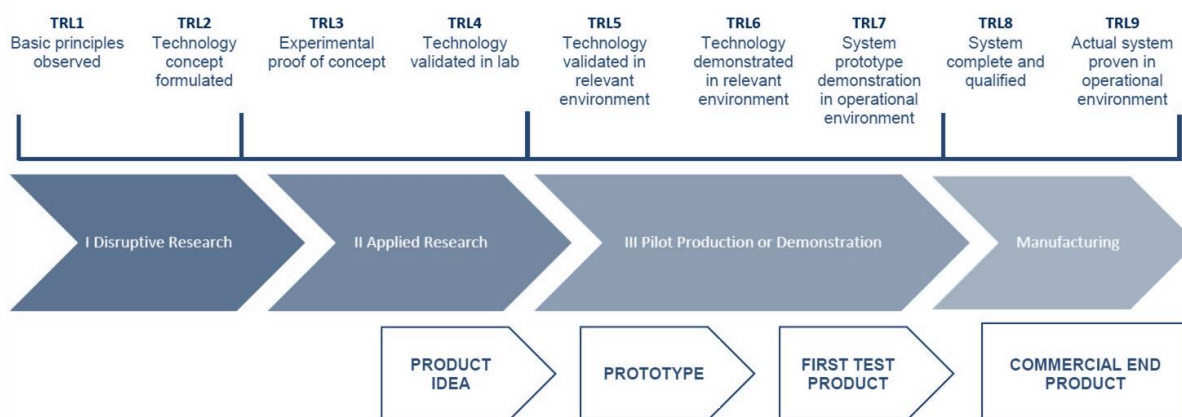
³ Bron: interviews

3.3.1 Analyse framework

In dit rapport zullen we onderscheid maken tussen een *technologie* en een *toepassing*. De technologie van een kwantumsensor kan bijvoorbeeld gereed zijn voor commercieel gebruik, maar voor opname in een gebruikstoepassing spelen er ook andere factoren. In deze sectie zullen we de frameworks bespreken aan de hand waarvan we de technologieën en toepassingen zullen beschrijven.

Technologie

De technologieën die besproken worden in dit rapport en gebruik maken van kwantumsensoren zullen beschreven worden aan de hand van een TRL. De **Technological Readiness Level (TRL) schaal** is een systematisch meetinstrument dat het mogelijk maakt de verschillende stadia van het technologische ontwikkelproces te kwantificeren op een schaal van 1 tot 9 [15]. Hierbij geeft een 1 aan dat de technologie nog aan het begin van zijn ontwikkeling staat en een 9 dat de technologie commercieel geïmplementeerd kan worden.⁴



Figuur 8: Technological readiness levels. Bron: [74]

Toepassing

Of de kwantumsensortechnologieën die commercieel gereed zijn ook daadwerkelijk geïmplementeerd zullen worden in gebruikstoepassingen door bepaalde groepen hangt niet alleen af van de *technological readiness*, maar ook van een aantal andere factoren als:

1. De **SWaP-C** (de *size, weight, power* en *cost*) van de toepassing
2. De (verbetering in) **performance** van de kwantumsensortechnologie (ten opzichte van de huidige technologie of andere technologieën)
3. De **noodzaak of behoefte** van een bepaalde gebruikersgroep voor een verbetering in *performance*

Verschiedende gebruikersgroepen zullen andere eisen stellen aan een toepassing wat betreft SWaP-C, *performance* en behoefte. Zo zal het voor grootschalig gebruik in de commerciële markt belangrijk zijn dat de kosten van de toepassing laag zijn en dat deze ook niet te groot en zwaar is, terwijl deze overweging minder van belang zal zijn voor toepassingen bij

⁴ De ontwikkelingen op het gebied van kwantumtechnologie gaan in rap tempo. De doorsnede van het veld die vandaag gemaakt wordt, en de geschatte TRL, kan hierdoor binnen een half jaar weer achterhaald zijn.

bijvoorbeeld defensie. Bij defensie kan een kleine verbetering in *performance* soms grotere, zwaardere en duurder toepassingen rechtvaardigen. Ook zal uit dit onderzoek blijken dat er niet voor alle gebruikersgroepen dezelfde noodzaak of behoefte is voor een nieuwe (verbeterde) toepassing.

3.3.2 Disruptieve innovatie

Kwantumtechnologie en toepassingen die gebruik maken van kwantumnatuurkundige principes worden vaak aangeduid als *emerging technologies* met de potentie voor disruptie. Disruptieve innovatie is het proces waarbij een kleinere onderneming met minder middelen (de *innovator*) in staat is om de gevestigde bedrijven succesvol uit te dagen. Gevestigde ondernemingen zijn vaak gericht op het verbeteren van hun huidige producten of diensten voor hun bestaande klanten. Hierdoor worden vaak de behoeften van vaak specifiekere segmenten van de markt genegeerd. De *innovators* richten zich vaak in eerste instantie op deze over het hoofd geziene segmenten. Door functionaliteit te bieden die aansluit bij de behoeften van deze segmenten krijgen ze toegang tot de markt. Als gevestigde ondernemingen hier niet krachtig op reageren, dan kunnen de nieuwkomers opschuiven in de markt door ook de al bestaande functionaliteit van de gevestigde ondernemingen aan te bieden en hun eigen voordelen te behouden. Wanneer klanten vervolgens massaal overstappen op het aanbod van de nieuwkomer is er sprake van disruptieve innovatie [16].

De iPhone

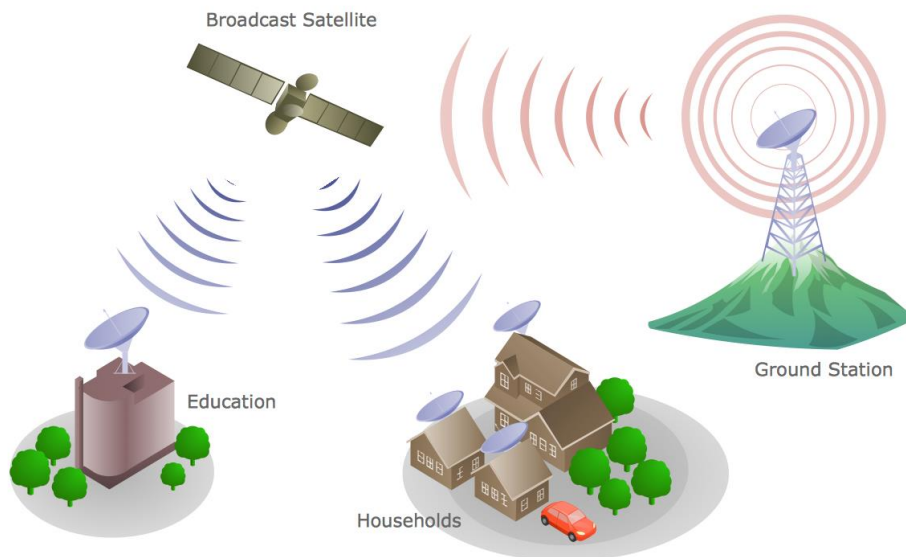
Een bekend voorbeeld van een disruptieve innovatie is de iPhone. Bij de lancering van de eerste iPhone in 2007 had de iPhone nog verschillende beperkingen. Zo was het lastig om erop te typen, was de e-mailfunctie nog niet toereikend, was er nagenoeg geen app-ondersteuning, had de iPhone een slechte telefoon- en luidsprekerkwaliteit en webbrowsing op het 2G-netwerk en had het een korte batterijduur. Voor de klant die een betrouwbare telefoon nodig had was de iPhone dus niet de beste keuze. De iPhone werd echter in de markt gezet als een telefoon, iPod en het internet in één. Hoewel andere telefoons in die tijd ook al toegang hadden tot het internet, boden ze niet dezelfde ervaring. Hiermee sprak de iPhone een nieuw segment van de markt aan en vond er uiteindelijk een disruptie van de telefoonmarkt plaats [17].

Box 1: Voorbeeld van disruptieve innovatie

Of kwantumsensoren ook de potentie hebben om disruptief te zijn zal op basis van de bevindingen in dit rapport in hoofdstuk 7 *Conclusies en aanbevelingen* besproken worden.

4 Ontwikkelingen op het gebied van radio

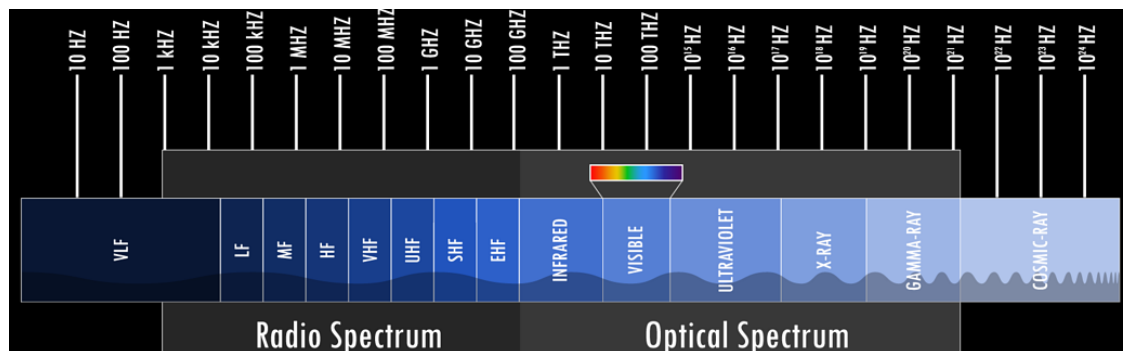
Radio is een techniek waarmee informatie draadloos kan worden overgedragen. Voor deze overdracht wordt gebruik gemaakt van elektromagnetische golven. Door een oscillerende elektrische spanning op een antenne aan te sluiten kan de antenne dergelijke radiogolven uitzenden. Door deze spanning te moduleren (in amplitude, frequentie en/of fase) kan er informatie meegegeven worden aan de radiogolven. Zodra deze golven een andere antenne bereiken, wordt een deel hiervan opgevangen en omgezet in een elektrisch signaal. Door verdere verwerking van dit signaal kan vervolgens de verzonden informatie weer uit dit elektrische signaal worden gehaald. Er is bij radiocommunicatie dus sprake van een zender én een ontvanger. Figuur 9 laat een voorbeeld zien van een communicatiesysteem met zenders en ontvangers. Hierbij kan het ontvangststelsel ook worden beschouwd als een sensor met een gevoeligheid voor elektromagnetische straling.



*Figuur 9: Voorbeeld van een telecommunicatie netwerk op basis van radiogolven met zenders (grond station en satelliet) en ontvangers (huishoudens, onderwijsgebouw).
Bron: [72]*

Meerdere verschillende radiotoepassingen kunnen tegelijkertijd, binnen elkaars bereik, gebruik maken van radiocommunicatie en het spectrum. Om ervoor te zorgen dat de golven van deze toepassingen elkaar niet verstoren, kan er worden gekozen om gebruik te maken van een andere **frequentie** (Hz). Alternatief kan er gekozen worden om uit te zenden op dezelfde frequentie, maar afspraken te maken over de tijden waarin een bepaalde zender of ontvanger actief mag zijn. Radiotoepassingen maken over het algemeen gebruik van frequenties tussen de 3 Hz en de 300 GHz (zie Figuur 10) [18]. Binnen dit spectrumbereik zijn verschillende frequentiebanden toegewezen aan bepaalde toepassingen. Die toewijzing gebeurt op internationaal niveau (door ITU). Verdere invulling daarvan wordt op meer regionaal niveau (bijvoorbeeld Europees of landelijk) vorm gegeven. Op die manier kan het radiospectrum tegelijkertijd gebruikt worden voor toepassingen van FM-radio en afstandsbedieningen tot mobiele netwerken en Wi-Fi. Hardware voor het ontvangen van radiosignalen is vaak

toegespitst op één specifieke frequentieband. Hierdoor is een ontvanger meestal niet in te zetten voor het ontvangen van signalen in andere frequentiebanden.⁵



Figuur 10: Elektromagnetisch spectrum. Bron: [19]

Het gebied tussen de laagst en de hoogst bereikbare frequentie van een ontvanger is het **frequentiebereik**. Zenders van radiogolven zenden hun signaal uit binnen een bepaalde frequentieband rondom een gekozen centerfrequentie. De term **instantane bandbreedte** verwijst naar de maximale continue bandbreedte die kan worden uitgezonden of ontvangen rondom deze centerfrequentie. De instantane bandbreedte wordt grotendeels bepaald door de signaal verwerkende elektronica die op de antenne aangesloten zijn [20].

Zodra radiogolven objecten tegenkomen, wordt het signaal **geabsorbeerd** of **weerkaatst**. Door deze absorptie en weerkaatsing verzwakt het signaal, wat het ontvangen ervan bemoeilijkt. Obstakels en de af te leggen afstand zijn dus twee factoren die bepalen of een verzonden radiosignaal op een bepaalde plek ontvangen kan worden. Ook is er voor signalen met een hogere frequentie (en daarmee een kleinere golflengte) meer energie nodig om het signaal over langere afstand nog te kunnen verzenden. Radiogolven kunnen zich in sommige gevallen, afhankelijk van het obstakel en de frequentie, wel door (kleine) obstakels heen verplaatsen.

Een hedendaagse ontvanger van radiogolven maakt gebruik van een **Analoog Digitaal Converter (ADC)**. Deze converter vertaalt het analoge, oscillerende elektrische signaal dat is opgewekt door de absorptie van de elektromagnetische straling naar een digitaal signaal. Deze functionaliteit kan ook vervuld worden door een kwantumcomponent, in theorie en onder specifieke omstandigheden zou dit kunnen leiden tot minder ruis en vervorming in het signaal. Een **Digitaal Analoog Converter (DAC)** doorloopt dit proces precies andersom. In een DAC komt een binaire, digitale code binnen die vertaald worden naar een analogo spanningssignaal.

In het vervolg van dit hoofdstuk bespreken we eerst hoe en welke kwantumsensoren invloed kunnen hebben op de radiocommunicatie. Door de inherente eigenschappen van een *sensor* zal de focus hier met name liggen op de ontvanger en niet de zender van radiosignalen.

⁵ Software-defined radio (SDR) is, in tegenstelling tot 'analoge', hardware matige radiocommunicatie systemen wel in staat om verschillende signaalfilters, modulatie en andere signaalverwerking te implementeren en flexibel te herconfigureren. Hierdoor kan er met een SDR vaak al op verschillende banden geluisterd worden. Hoewel softwarematig veel mogelijk is, blijkt een SDR die het gehele spectrum ontvangt minder praktisch: uiteindelijk hebben toepassingen op basis van verschillende frequenties namelijk andere technologische eisen (verschillende antennes, verschillende signaalversterkers, etc.).

Vervolgens gaan we in op de gebruikstoepassingen en welke invloed dit kan hebben op toekomstig spectrumgebruik.

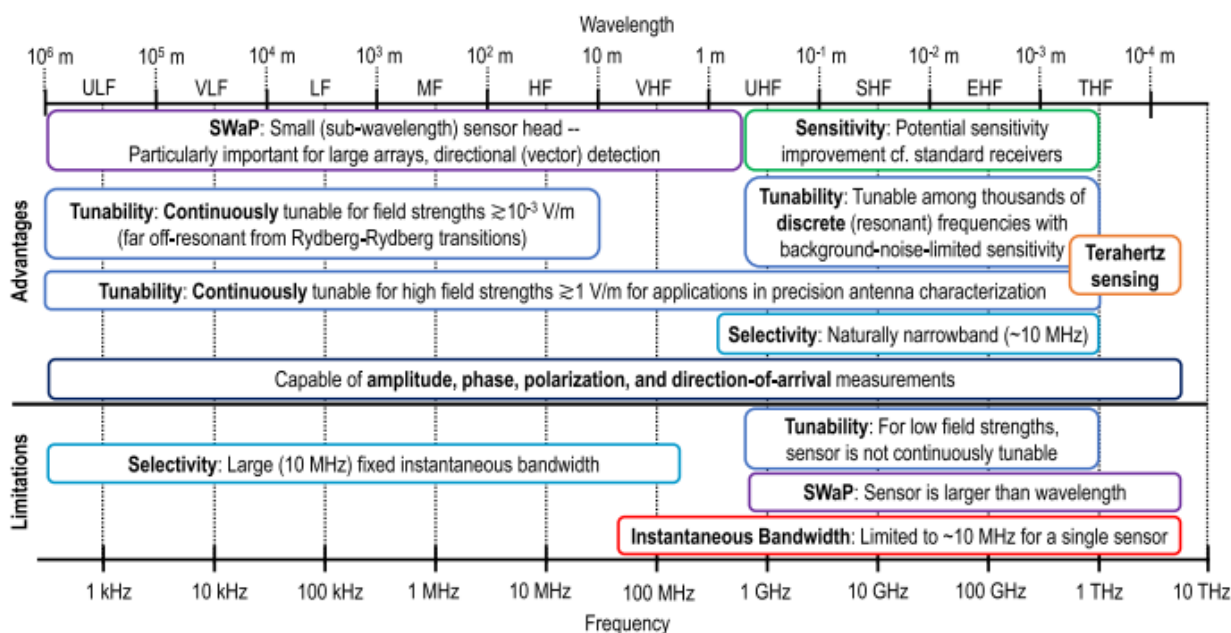
Stand van de techniek

Op het gebied van RF ontvangers vinden er momenteel met name ontwikkelingen plaats aan de hand van Rydberg atomen en NV centers. Beide kwantumsensoren zijn gevoelig voor veranderingen in het elektromagnetisch spectrum. Hierbij zijn Rydberg atomen alleen gevoelig voor de elektrische velden van een elektromagnetische golf en NV centers alleen voor de magnetische velden. SQUIDS kunnen daarnaast dienst doen als een basiscomponent in een ADC of DAC.

Rydberg atomen

Figuur 11 toont de potentiële voordelen en beperkingen van Rydberg atomen als radio-ontvangers. In theorie kunnen Rydberg atomen een aantal voordelen bieden:

- Ze hebben een **breder spectrumbereik** (*carrier spectral range; tunability*); Rydberg atomen kunnen inschakelen op veel verschillende frequenties;
 - o In opdracht van het Amerikaanse leger wordt er momenteel gewerkt aan een kwantumsensor bestaande uit Rydberg atomen, waarmee radiosignalen van 10 MHz tot aan 40 GHz kunnen worden ontvangen [21, 22].
- Ze hebben een hogere **precisie** (*selectivity*) in de hogere frequentiebanden;



Figuur 11: Voordelen (advantages) en beperkingen (limitations) van Rydberg atomen ten opzichte van conventionele RF ontvangers als functie van golf lengte (boven) en frequentie (onder). SWaP staat voor size, weight and power. Bron: [82]

Rydberg atomen zijn potentieel **gevoeliger** (*sensitivity*) in de hogere frequentiebanden. Echter wordt deze gevoeligheid momenteel alleen nog bewerkstelligd in specifieke opstellingen waarbij de Rydberg atoom fungeert als detector in een bestaande heterodyne ontvanger op een enkele middenfrequentie [22]. Daarnaast zijn ze **ook gevoeliger voor ruis**. Hierdoor zullen ze over het algemeen niet leiden tot een betere SNR. Ook hebben Rydberg atomen in de hogere frequentiebanden een relatief **kleine instantane bandbreedte** (*instantaneous bandwidth*) van 4 MHz rondom de ingeschakelde centerfrequentie [23].

Rydberg atomen als RF ontvangers hebben een TRL van 4 [24]. Dit houdt in dat de technologie alleen nog gevalideerd is in de laboratoria. Wel zijn er voor andere doeleinden als metrologie al systemen op basis van Rydberg atomen commercieel te verkrijgen⁶. Uit de interviews blijkt echter dat de gevoeligheid voor ruis een grote belemmering is bij het gebruik van onder andere Rydberg atomen als RF ontvangers. Deze zullen (in ieder geval voorlopig) dus niet leiden tot een verbetering van de radiocommunicatie.

NV centers

Net als Rydberg atomen kunnen NV centers door hun gevoeligheid voor veranderingen in het elektromagnetisch spectrum gebruikt worden voor radio-ontvangst. NV centers bieden grotendeels dezelfde voordelen als Rydberg atomen, maar hebben ook een **grotere instantane bandbreedte** ten opzichte van de huidige radio-ontvangers.

Een ander verschil tussen NV centers en Rydberg atomen is de temperatuur waarop ze gevoelig zijn voor het elektromagnetisch spectrum. Rydberg atomen functioneren het best onder cryogene omstandigheden - dicht bij het absolute nulpunt. Op kamertemperatuur zijn ze minder gevoelig voor veranderingen in het elektromagnetische spectrum. NV centers verliezen daarentegen veel minder aan gevoeligheid op kamertemperatuur. Doordat meetsystemen op basis van NV centers niet gekoeld hoeven te worden zoals Rydberg atomen, kunnen de systemen rondom NV centers voorlopig kleiner gemaakt worden en zijn ze te implementeren op een chip. Daarnaast is de diamantstructuur van de NV centers robuuster dan de gascontainers waarin de Rydberg atomen zich bevinden.⁷

NV centers hebben een TRL van 5-6, wat inhoudt dat de technologie gevalideerd en gedemonstreerd is buiten de laboratoria.

SQUIDS

De vertaalslag van een analoog naar een digitaal signaal in de ADC (of andersom in de DAC) kan gedaan worden met behulp van kwantumsensoren op basis van supergeleiders (SQUIDS). Supergeleiders zijn materialen die bij een bepaalde (vaak extreem lage) temperatuur geen elektrische weerstand meer hebben. Het gebruik van een SQUID ten opzichte van de 'klassieke' ADC/DAC heeft een aantal voordelen [25, 26]:

- Er kan ultrasnel **gekwantiseerd** worden van het analoge naar het digitale signaal
- Ze geven een grotere **gevoeligheid**
- Het levert kwantum **accuraatheid** op (minieme foutmarge, minder vervorming)
- Er is minder sprake van **ruis**

Over het gebruik van SQUIDS en supergeleiders als ADCs en DACs wordt al sinds de jaren '80 gefilosofeerd [27, 28]. In 2009 werd een op SQUIDS gebaseerde ADC op de markt gebracht, welke een multi-GHz bandbreedte had. Dit systeem woog door de benodigde cryogene koeling toen nog 180 kilogram [29]. Op dit moment bestaan er daadwerkelijke DAC opstellingen die gebouwd zijn met commercieel verkrijgbare SQUIDS [25]. ADC/DAC's op basis van SQUIDS hebben daarom een relatief hoge TRL van 7-8 waarbij de technologie in bepaalde omgevingen al gebruikt wordt.

⁶ Zie bijvoorbeeld [Rydberg Technologies | Rydberg RF Field Probe](#)

⁷ Bron: interviews

Gebruikstoepassingen

Zoals besproken in 3.3.1 bekijken we de mogelijke gebruikstoepassingen van kwantumsensoren op het gebied van radiocommunicatie op basis van de SWaP-C, de *performance* en de noodzaak of behoefte van een bepaalde gebruikersgroep.

Defensiesector

Veruit het meeste onderzoek op het gebied van kwantumsensoren relevant voor dit onderzoek vindt plaats binnen de militaire afdelingen van verschillende landen. Defensie afdelingen van verschillende landen hebben mogelijk de beschikking over een groot budget voor innovaties die kunnen leiden tot een strategisch voordeel ten opzichte van de 'tegenstander'. Het hebben van functionele kwantumsensoren zou mogelijk een voordeel kunnen zijn. Daarnaast zijn *size*, *weight*, *power* en *cost* (SWaP-C) ook minder een belemmering bij defensie. Grote, zware toepassingen die veel energie vereisen en veel kosten kunnen voor specifieke militaire doeleinden alsnog een waardevolle toevoeging zijn.

Een voorbeeld hiervan is de hierboven beschreven ADC's. Bij defensie is er een behoefte voor het direct digitaliseren van een radiosignaal, met een hoge *sampling rate* en een groot signaalbereik⁸. Met de huidige ADC/DAC is dit niet mogelijk, maar met een SQUID wel [28]. Supergeleiders als SQUIDs moeten echter wel dichtbij het absolute nulpunt gehouden worden om hun kwantumeigenschappen te behouden. Hierdoor hebben ze grote koelsystemen nodig en scoren ze slecht wat betreft SWaP-C. Omdat ze desalniettemin een behoefte vervullen en een verbetering in *performance* bewerkstelligen is deze toepassing interessant voor defensie doeleinden.

ESM staat voor *Electronic Support Measures* en wordt gebruikt om mee te luisteren naar communicatie op het elektromagnetische spectrum. Hiermee kan de communicatie van de vijand gedetecteerd, onderschept en geanalyseerd worden. Met de huidige ESM kan echter steeds maar op een stukje van het spectrum gezocht worden naar communicatie en er is een behoefte om op een groter deel van het spectrum tegelijkertijd mee te kunnen luisteren. De grote instantane bandbreedte van NV centers biedt deze mogelijkheid en zou daarmee tot een verbetering in *performance* ten opzichte van de huidige sensoren leiden.

Commerciële markt

Om voet aan de grond te krijgen in de commerciële markt is het voor een gebruikstoepassing van belang om lage SWaP-C score te hebben. Betrokkenen uit het veld die in het kader van dit onderzoek gesproken zijn, verwachten niet dat dit de komende tien jaar het geval zal zijn. Voor implementatie in IoT-devices bijvoorbeeld, zal de sensor maximaal tussen de één en vijf dollar mogen kosten⁹ en klein genoeg moeten zijn om op een chip te passen. Dit laatste is voor NV centers al wel mogelijk in het lab, maar deze zijn voor de commerciële markt te duur in vergelijking met de verbetering in *performance* die het oplevert.

De lage verwachtingen omtrent kwantumsensoren in het radio domein worden mede veroorzaakt door de lage TRL van de beschikbare kwantumontvangers. Bij communicatie is het van belang dat er data verstuurd en ontvangen kan worden. Om dit te bewerkstelligen is er een bepaalde **bit rate** nodig. De *bit rate* van de verschillende kwantumsensoren wordt momenteel nog nergens besproken en dit wordt experts in het telecomdomein gezien als indicatie van het feit dat de technologie nog niet gereed is als gebruikstoepassing in de communicatie. Desalniettemin wordt er wel geëxperimenteerd met Rydberg atomen als radio-ontvangers

⁸ Bron: interviews

⁹ Bron: interviews

om mogelijk in de toekomst de basis te vormen van ultra-sensitieve 5G of 6G ontvangers in een mobiel netwerk met een zeer laag energieverbruik [30].

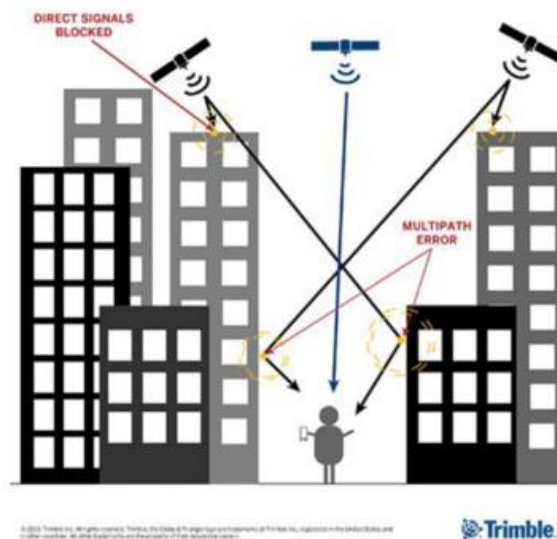
5 Ontwikkelingen op het gebied van navigatie

Naast radiotoepassingen focust dit onderzoek zich ook op de impact van kwantumsensoren op navigatie toepassingen; een toepassing die veel gebruik maakt van het spectrum. Momenteel wordt navigatie veelal gedaan aan de hand van satelliet signalen (Global Navigation Satellite System; GNSS). Een welbekende GNSS is de Global Positioning System (GPS) uit de Verenigde Staten, maar met GLONASS, Galileo en BeiDou bieden Rusland, de EU en China ongeveer hetzelfde aan. Bij GNSS cirkelen er verschillende satellieten rond de aarde met allen een atoomklok aan boord. Door met een apparaat op de aarde de tijd (en andere informatie, zoals de baan van de satelliet) vanuit meerdere satellieten te ontvangen, kan door de vertraging tussen de huidige tijd en de ontvangen tijd met triangulatie een locatie worden bepaald. Op de aarde staan ook verschillende stations met een atoomklok die als hoofdcontrole en beheer dienen en gebruikt worden voor correcties [31]. Voor satellietcommunicatie ten behoeve van navigatie wordt er gebruik gemaakt van het spectrum in verschillende frequentiebanden (L5, L2, E6 en L1; van ongeveer 1176 MHz tot en met 1602 MHz).

Plaatsbepaling aan de hand van deze GNSS signalen kan door grofweg vier soorten fouten onnauwkeurigheden opleveren [32]:

- **Ionosferische fouten.** De geïoniseerde atmosfeer kan de frequentie van een signaal dat er doorheen reist beïnvloeden.
- **Multipath error.** De omgeving, zoals gebouwen, bomen of rotswanden, kunnen het inkomende signaal reflecteren of blokkeren.
- **Satelliet banen en klokfouten.** De berekende satellietcoördinaten kunnen *outdated* zijn en de klok kan niet gekalibreerd zijn.
- **Fouten in de signaalmeting.** Er kunnen fouten optreden in de ontvanger bij de gebruiker die ruis of *bias* in het signaal introduceren.

Met name *multipath errors* maken het lastig om in een bebouwde of beboste omgeving accurate plaatsbepaling uit te voeren. Voor triangulatie moeten er van in ieder geval drie satellieten direct een signaal ontvangen worden. Deze directe signalen kunnen door de omgeving geblokt worden. Ook kan het gebeuren dat signalen die door de satelliet verzonden zijn door een obstakel gereflecteerd worden en op die manier alsnog bij de ontvanger terecht komen. Voor de ontvanger is het echter niet te onderscheiden of het signaal direct van een satelliet afkomstig is of gereflecteerd is door een obstakel. Figuur 12 demonstreert dat deze gereflecteerde signalen dus *langer* onderweg zijn naar de ontvanger. Hierdoor wordt de positie op basis van de combinatie van de tijdsindicaties van de drie satelliet signalen vervolgens verkeerd berekend door de ontvanger.



Figuur 12: Voorbeeld van een multipath error. Het signaal van de satelliet kan geblokkeerd worden of door een obstakel gereflecteerd worden. Bron: [32].

Naast het feit dat GNSS door de omgeving soms onnauwkeurig is, zijn er ook plekken en scenario's te bedenken waar GNSS helemaal niet beschikbaar is:

- **GNSS denied areas.** Dit zijn gebieden waar GNSS niet beschikbaar is omdat elektromagnetische golven daar überhaupt niet kunnen komen. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan ondergronds, onderwater of in een dichtbegroeid bos.
- **Spoofing of jamming.** Kwaadwillende personen zouden de signalen kunnen *spoofen* of *jammen*. *Spoofing* houdt in dat iemand valse GNSS signalen verstuurt naar de ontvanger, waardoor de locatie niet meer betrouwbaar kan worden vastgesteld. Bij *GPS jamming* wordt op dezelfde frequentie als het GNSS-signaal een ander sterk signaal uitgezonden: een stoorzender. Hierdoor is het signaal van de GNSS satellieten niet meer te onderscheiden van die van de *jammer* en ook dan is plaatsbepaling niet meer mogelijk.
- **Space weather.** De veranderende staat van de atmosfeer (door bijvoorbeeld zonnestormen) kan de satellieten en de satelliet signalen beïnvloeden. Hierdoor kan plaatsbepaling op basis van GNSS onmogelijk of onnauwkeurig worden. In extreme gevallen kunnen satellieten zelfs helemaal uitvallen.

De gevolgen van een falende GNSS variëren van onhandig tot catastrofaal. Vele actoren in onze huidige maatschappij zijn afhankelijk van GNSS voor hun functioneren voor plaatsbepaling of tijdsignalen, zoals het treinnetwerk, telecom en de hulpdiensten. Een episode van *spoofing*, *jamming* of *space weather* kan dus de gehele maatschappelijke infrastructuur ontwrichten.

Momenteel vindt het bulk van de navigatie plaats op basis van GNSS, maar navigeren kan op drie manieren: 1) aan de hand van satelliet signalen (zoals hierboven beschreven), 2) aan de hand van de eigen bewegingen of 3) aan de hand van een beschikbare kaart. In dit hoofdstuk zullen we voor elk van de drie manieren beschrijven hoe kwantumsensoren de navigatiemogelijkheden kunnen verbeteren, wat de stand van zaken is omtrent de toepassingen en voor welke gebruikersgroepen deze interessant kunnen zijn.

5.1 Navigatie aan de hand van satelliet signalen

Het verbeteren van navigatie aan de hand van satelliet signalen kan door 1) het ontvangen van het signaal te verbeteren of 2) de tijdsignalen zelf te verbeteren.

5.1.1 Verbeteren van de signaalontvangst

Op plekken waar satelliet signalen moeilijk te ontvangen zijn, zoals een tunnel of een bos, zouden kwantumsensoren met een verhoogde sensitiviteit mogelijk uitkomst bieden.

Stand van de techniek

De kwantumsensoren die elektromagnetische golven detecteren, en daarmee gebruikt worden voor het ontvangen van satelliet signalen, zijn dezelfde sensoren die in het vorige hoofdstuk besproken zijn voor radio-ontvangst. Hierbij gaat het over Rydberg atomen en NV centers. Deze sensoren hebben respectievelijk TRL's van 4 en 5-6.

Gebruikstoepassingen

Ter ondersteuning van navigatie bij verzwakte satelliet signalen zijn momenteel aan de hand van Assisted GNSS (A-GNSS) al oplossingen bedacht. Bij A-GNSS gebruikt een apparaat ook informatie uit een externe bron (zoals Wi-Fi netwerken of LTE-basestations) waardoor er sneller, nauwkeuriger of met minder bereik toch nog een locatie kan worden bepaald. Op veel mobiele telefoons vullen navigatie-apps dit ook nog aan met gegevens uit andere sensoren (accelerometer, gyroscoop), om de richting of de vervoersmodus te bepalen. Er lijkt daarom momenteel geen behoefte om hier ook kwantumsensoren voor te gaan gebruiken. Daarnaast wegen de ontwikkel- en implementatiekosten niet op tegen de verbeteringen in *performance*. Voor de meeste huidige gebruikers in de commerciële markt zal de huidige A-GNSS toereikend zijn. Daarnaast zullen kwantum RF ontvangers gevoeliger zijn voor ruis, waardoor de voordelen op het gebied van GNSS mogelijk tegen kunnen vallen.

Ook voor militaire toepassingen lijkt het meer voor de hand te liggen om te focussen op manieren van plaatsbepaling die onafhankelijk zijn van GNSS en geen last hebben van *GNSS denied areas, spoofing of jamming*.

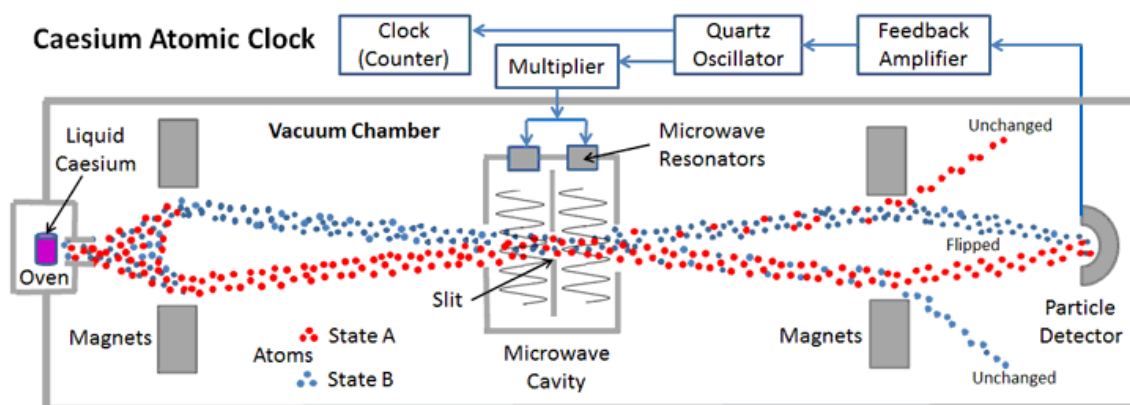
5.1.2 Verbeteren van het tijdsignaal

Een nauwkeurige tijdsynchronisatie is essentieel voor nauwkeurige plaatsbepaling en navigatie. Al jaren worden hier atoomklokken voor ingezet en GNSS satellieten hebben allemaal een gekalibreerde exemplaar aan boord.

Stand van de techniek

Figuur 13 toont schematisch hoe een atoomklok werkt. In een oven wordt vloeibare cesium verhit tot het overgaat naar een gas. Vervolgens schieten de cesium atomen op hoge snelheid uit de oven langs twee elektromagneten. Deze twee magneten splitsen de atomen naar twee groepen op basis van spin. Vervolgens worden deze twee stromen van atomen apart een microwave ruimte ingestuurd. In deze ruimte staat een oscillator die elektromagnetische golven met een frequentie van 9.1 GHz uitstuurt: de resonantie frequentie van cesium atomen. Deze golven worden door de atomen geabsorbeerd waardoor ze van spin staat veranderen. Echter gebeurt dit niet met allemaal: hoe dichterbij de frequentie van de oscillator bij de resonantie frequentie van de atomen ligt, hoe meer tussen de twee spin staten zullen overgaan. Na de microwave ruimte gaat de stroom van atomen vervolgens weer langs twee magneten die op dezelfde manier de atomen splitsen op basis van spin. De atomen die niet van staat zijn veranderd worden dus voor de tweede keer dezelfde kant opgestuurd en belanden niet in de detector. De atomen die wel van staat zijn veranderd convergeren op de

detector. Deze detector zet de stroom van atomen die binnenkomt vervolgens om in een elektrisch signaal dat in een feedback loop gebruikt wordt om de frequentie van de oscillator op hetzelfde level als die van de atomen te houden. Deze oscillator staat ook weer in connectie met een simpele teller, die vervolgens gebruikt kan worden als extreem nauwkeurige klok [33].



Figuur 13: Schematische weergave van de werking van een atoomklok. Bron: [56].

De precisie van de atoomklok hangt af van de resonantie frequentie van het atoom dat gebruikt wordt: hoe hoger de frequentie, hoe preciezer de klok. Atoomklokken op basis van bijvoorbeeld cesium atomen zijn zeer precies en de foutmarge wordt vaak niet groter dan een nanoseconde, maar een vertraging van een nanoseconde kan met de snelheid van het licht al een error in plaatsbepaling van 30 centimeter opleveren. Er zijn daarom ontwikkelingen gaande om *optische atoomklokken* te bouwen. Deze optische atoomklokken gebruiken lasers om de frequentie van atomen met een hogere resonantie te detecteren en zijn uitermate precies: ongeveer 100 keer nauwkeuriger dan de huidige atoomklokken [34, 35].

Wanneer GNSS satellieten een optische atoomklok aan boord zouden hebben, zouden ze dus preciezere tijdinformatie naar de ontvanger kunnen sturen, waardoor GNSS plaatsbepaling nog nauwkeuriger zou worden. Echter nemen deze optische klokken nu nog hele laboratoria in beslag, waardoor de technologie een TRL van 4 heeft. Momenteel zijn er wel projecten gaande om deze optische atoomklokken simpeler en mobiel te maken [36].

Gebruikstoepassingen

Commerciële markt

Een commerciële toepassing die in de toekomst betere tijdsignalen nodig zal hebben zijn de **autonome voertuigen**. Wanneer de dichtheid van deze voertuigen groter wordt, zal de zeer precieze tijdinformatie van optische atoomklokken noodzakelijk zijn om ongelukken te voorkomen. Dit moment zal echter hoogstwaarschijnlijk verder dan tien jaar in de toekomst liggen. Op dat moment zullen er ook andere verbeteringen aan de infrastructuur plaats moeten vinden (zoals bijvoorbeeld het versturen van tijdsignalen middels het glasvezelnetwerk en niet langer via satellieten, zie 6.2.2).¹⁰ De onnauwkeurigheid in plaatsbepaling op basis van GNSS wordt namelijk meestal niet veroorzaakt door de (im)precisie van de tijdinformatie, maar door multipath en obstructie errors. De winst die te behalen valt met het alleen verbeteren van het tijdsignaal is daarom minimaal.

¹⁰ Bron: interviews

5.2 Navigatie aan de hand van de eigen beweging

Wanneer er genavigeerd wordt aan de hand van de eigen beweging dan spreken we van een *inertial navigation system* (INS). Een INS bestaat uit drie bewegings- en drie rotatiesensoren in combinatie met een *computational unit*. Met de plaatsbepaling van het beginpunt en de meting van de versnelling in een bepaalde richting, kan een INS de nieuwe positie berekenen [37]. Deze berekende positie fungeert dan weer als beginpunt voor de volgende meting (dit proces heet *dead-reckoning*) [38]. In theorie kan INS onafhankelijk van een externe bron opereren en is het dus ook beschermd tegen *jamming* en *spoofing*.

Elke sensor heeft echter een bepaalde foutmarge. Door het proces van *dead-reckoning* wordt deze error in positiebepaling gepropageerd en daarmee steeds groter; de zogeheten **drift** in het systeem. Om deze drift te corrigeren, wordt de berekende positie in de huidige INS periodiek gecheckt tegen een extern systeem als GNSS [39].

Zowel de functie van de accelerometer (versnelling) als de gyroscoop (rotatie) in een INS kan door kwantumsensoren worden uitgevoerd (de *computational unit* kan ook door een kwantumcomputer worden vervangen, maar dat laten we hier buiten beschouwing).

Stand van de techniek

Cold atom interferometers (CAI; beschreven in 3.2.5) zijn onder andere gevoelig voor versnelling en rotatie en kunnen daardoor zowel dienen als gyroscoop en als accelerometer. CAI's hebben bieden een aantal fundamentele voordelen ten opzichte van de huidige mechanische of optische sensoren [40]:

- Ze hebben een **sensitiviteit** die een aantal ordes groter is [41, 42];
- Ze bieden **stabiliteit** over een langere termijn;
 - o In een CAI kwantumsensor zijn atomen de enige bewegende onderdelen. De eigenschappen van deze atomen veranderen niet over tijd, terwijl de onderdelen in de huidige inertia sensors (bijvoorbeeld *veren*) door gebruik verouderen en daarmee veranderen. Hierdoor treedt er onvermijdelijk een drift op en moet het systeem met steeds hogere frequentie opnieuw gekalibreerd worden.
- Ze bieden een **absolute meting** van de versnelling en de rotatie, terwijl andere systemen vaak de versnelling en rotatie ten opzichte van een referentie punt meten.

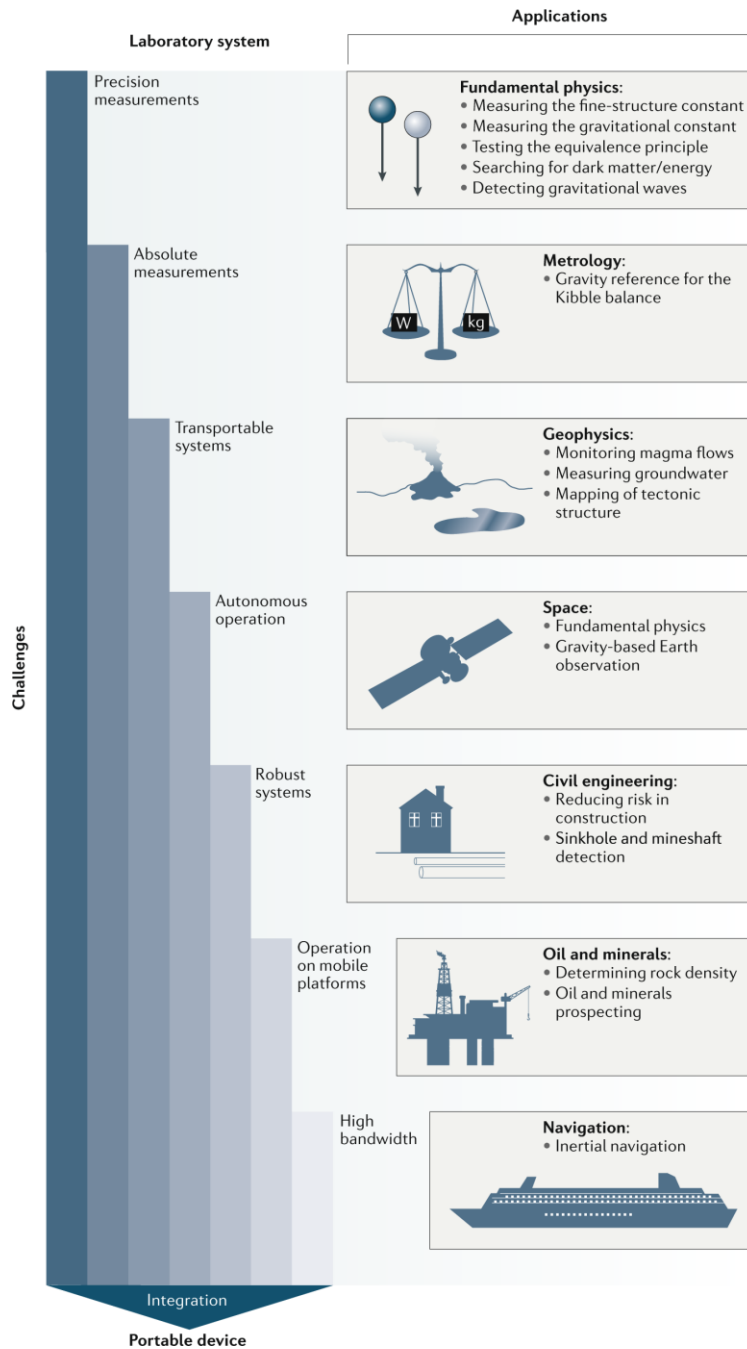
Kwantumsensoren op basis van *cold atom interferometers* bieden dus een aantal voordelen ten opzichte van de huidige, vaak mechanische, bewegingssensoren. Om deze bewegingssensoren vervolgens ook daadwerkelijk te integreren in een *inertial navigation system* moeten ze echter ook een groot dynamisch bereik hebben, een hoge bandbreedte en *repetition rate*, en moeten ze draagbaar, betrouwbaar en robuust zijn. Dit leidt ook tot een aantal nadelen ten opzichte van de huidige sensoren [40]:

- Het **dynamische bereik** van een sensor beslaat het aantal waardes dat de sensor kan meten zonder onzekerheden. CAI sensors hebben een beperkt bereik, omdat de output van de sensor een sinus is met een golflengte die correspondeert met een extreem klein signaal.
- De **bandbreedte** van een sensor verwijst naar de mogelijkheid van een sensor om een snel veranderd signaal te meten. De inverse van de bandbreedte staat ongeveer voor de tijd die nodig is voor de sensor om een enkele meting uit te voeren. Een grote bandbreedte betekent dat ook snel variërende signalen op een betrouwbare manier gemeten kunnen worden. In een CAI wordt de hoge gevoeligheid van de sensor alleen bereikt als de atomen zich voor langere tijd in de interferometer bevinden. Hierdoor ontstaat er een onvermijdelijke **trade-off tussen sensitiviteit en bandbreedte**.

- De **repetition rate** van een sensor geeft aan hoeveel metingen in een bepaalde tijd gedaan kunnen worden. Als er direct na een meting een nieuwe meting gedaan kan worden, dan wordt de *repetition rate* alleen bepaald door de bandbreedte. Met CAI sensors is het echter niet mogelijk om direct achter elkaar twee metingen uit te voeren. Tussen twee metingen zit een *dead time* waarin een nieuwe wolk van atomen gekoeld en geïnitieerd moet worden voordat ze de interferometer ingestuurd worden voor een meting.

Momenteel zijn er dus nog zowel theoretische als praktische belemmeringen voor het gebruik van kwantumsensoren voor inertia navigatie. Figuur 14 toont een *roadmap* voor de volgende stappen naar een draagbaar systeem dat gebruikt kan worden voor navigatie [43].

Accelerometers en gyroscopen op basis van CAI hebben een TRL van 4, wat inhoudt dat de prototypes gevalideerd zijn in de laboratoria, maar nog niet in de relevante omgevingen. CAI's die gebruikt kunnen worden voor navigatie (en die dus constant verplaatst kunnen worden) hebben een TRL van 3 (experimentele *proof of concept*). Voordat CAI's ter grootte van een chip met de benodigde precisie beschikbaar zijn, zullen er nog meerdere jaren (en mogelijk decennia) aan onderzoek en ontwikkelingen nodig zijn [40]. Wel is er de hoop dat er binnen een aantal jaar accelerometers ter grootte van een blikje frisdrank zullen bestaan [44].



Figuur 14: Een roadmap voor de ontwikkeling van draagbare inertia kwantumsensoren. Horizontaal staan de Challenges (uitdagingen) die de komende jaren opgelost moeten worden. Naast elke Challenge staat de toepassing die op basis van de technologie op dat moment gebouwd zouden kunnen worden. De eerste stap was een technologie die precieze metingen kon doen (Precision measurements), waarmee toepassingen in de fundamentele natuurkunde gebouwd konden worden. Met het toevoegen van Absolute measurements konden CAI's vervolgens ook gebruikt worden in de metrologie en door van de CAI een Transportable system te maken kon deze nu ingezet worden in binnen de geofysica. De komende jaren zal er gewerkt moeten worden aan het autonoom laten opereren van de CAI, deze robuust maken en operabel op mobiele platforms. De laatste uitdaging is het bewerkstelligen van een bandbreedte die hoog genoeg is voor navigatie doeleinden Bron: [43]

Gebruikstoepassingen

Net zoals bij voorgaande sensoren, vindt het meeste onderzoek naar inertia kwantumsensoren plaats binnen de defensiesector. Daar is er ook de noodzaak om niet volledig afhankelijk te zijn van GNSS. Ook in de ruimtevaart sector vindt hier onderzoek naar plaats.

Defensiesector

Vrijwel alle INS die momenteel bestaan, vinden hun plek bij defensie. Deze markt bestaat met name uit maritieme navigatie en strategische raketten (op weg naar een bepaald doelwit) en in mindere mate voor navigatie in de lucht of op het land [40]. Daarnaast kan er onderwater per definitie niet genavigeerd worden op basis van GNSS signalen, omdat deze signalen niet onder water door kunnen dringen, en er is mogelijk dus behoefte aan een INS.

In 2014 sprak DARPA¹¹ de wens uit om een navigatiesysteem te ontwikkelen met een *performance* van een navigatie error van 20 meter en een tijdserror van 1 microseconde per uur [45]. Het is echter onduidelijk hoe het momenteel met deze voornemens en vorderingen staat. Ook liggen er nog grote uitdagingen voor toepassingen van kwantum INS in het reduceren van de SWaP-C.

Ruimtevaart

Het merendeel van de ruimtevaarschepen en satellieten (onder ander de satellieten die onderdeel uitmaken van het GNSS netwerk) hebben gyroscopen aan boord om hun baan te monitoren. De *performance* van de huidige gyroscopen is hier over het algemeen voldoende voor, echter worden deze gyroscopen wel aangetast door de tijd en verliezen ze op termijn aan *performance*. Gyroscopen op basis van CAI bieden stabiliteit voor de langere termijn, waardoor ze langere tijd betrouwbaar zouden blijven. Verwacht wordt dat kwantum INS over vijf jaar aanwezig zal zijn in toepassingen in de ruimtevaart.¹²

Commerciële markt

Er wordt niet verwacht dat er binnen vijf tot tien jaar commerciële systemen beschikbaar zullen zijn voor navigatie op basis van de eigen beweging aan de hand van kwantumsensoren. Commerciële bedrijven die zich bezig houden met het ontwikkelen van de nieuwe generatie *inertial navigation systems* doen dit voornamelijk aan de hand van optische gyroscopen.¹³

5.3 Navigatie aan de hand van een kaart

Tenslotte is het ook mogelijk om te navigeren aan de hand van een kaart. In het simpelste geval kan dit een getekende kaart zijn van de omgeving, maar deze kaart kan ook gemaakt worden op basis van het magneet- of zwaartekrachtveld van de aarde. Kwantumsensoren die gevoelig zijn voor verandering in het magneet- of zwaartekrachtveld kunnen daarmee gebruikt worden voor navigatie.

5.3.1 Kaart van het aardmagneetveld

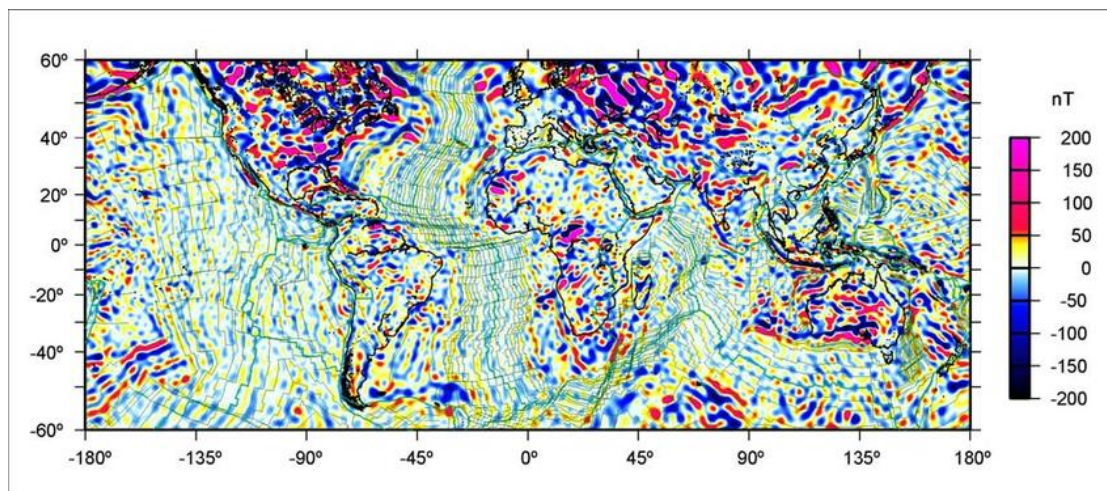
De National Oceanic and Atmospheric Association heeft de lokale afwijkingen (richting en sterkte) in het aardmagneetveld (zogenoeten anomalieën) in kaart gebracht [46]. Door achtereenvolgens het lokale magneetveld te meten en deze naast een referentiekaart te leggen,

¹¹ De *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) is de onderzoeksafdeling van het Amerikaanse ministerie van Defensie.

¹² Bron: interviews

¹³ Zie bijvoorbeeld [iXblue](#)

kan er plaatsbepaling plaatsvinden [47]. Deze techniek heet *map matching*: het vinden van je locatie op een kaart naar aanleiding van een serie metingen.



Figuur 15: Kaart van afwijkingen in het aardmagneetveld. Bron: [48]

Stand van de techniek

Voor het navigeren op het aardmagneetveld worden onder andere NV centers en *atomic vapors* gebruikt (zie 3.2.5 voor een beknopte uitleg).¹⁴

In 2019 is er op basis van NV centers een magnetometer ontwikkeld die relatief klein is (slechts 31 centimeter breed) genaamd *Dark Ice*. Deze magnetometer kan zowel de sterkte als de richting van het aardmagnetisch veld meten, waardoor deze geschikt is voor plaatsbepaling en navigatie [49]. Momenteel wordt er gewerkt aan een nieuwe, nog kleinere versie. Deze nieuwe versie moet een nauwkeurigheid van 200 meter ten opzichte van de GNSS-nauwkeurigheid halen [47, 50].

Daarnaast hebben onderzoekers van de US Air Force een vlucht in een F-16 van 1,5 uur gedaan op basis van MAGNAV: magnetic-aided navigation [51]. De magnetometer aan boord van deze vlucht was een *optically pumped cesium magnetometer*: een atomic vapor kwantumsensor [52]. Sinds de eerste vlucht zijn er meerdere vluchten uitgevoerd aan de hand van MAGNAV, met variërende mate van nauwkeurigheid.

De nauwkeurigheid van de navigatie wordt niet alleen bepaald door de sensitiviteit van de sensor, maar ook door drie andere factoren: de hoogte, de kalibratie en de kwaliteit van de kaart [53]:

- De **hoogte**-afhankelijkheid wordt veroorzaakt doordat de sterkte van het magneetveld verder weg afneemt en vervaagt; hoe hoger je vliegt, hoe minder gedetailleerd het magneetveld zal zijn. Deze afhankelijkheid kan niet vermeden worden.
- De **kalibratie** verwijst naar het verwijderen van het magnetische veld dat het voertuig (vliegtuig in dit geval) zelf veroorzaakt.
- Ook is het noodzakelijk om een **kaart van hoge kwaliteit** te hebben. Als de kaart weinig detail bevat dan zal het moeilijker zijn om twee aangrenzende plaatsen te onderscheiden.

¹⁴ SQUIDs zijn ook gevoelig voor het veranderingen in het magnetisch veld en zouden daarmee gebruikt kunnen worden voor navigatie doeleinden. Echter ligt in de praktijk de focus meer op NV centers en met name *atomic vapors* omdat die geen cryogene omstandigheden vereisen.

De kwantum magnetometers hier beschreven hebben een TRL van 6-7 [17]. Een TRL van 6-7 houdt in dat de technologie wordt getest en gedemonstreerd in de daadwerkelijke gebruiksomgeving.

Gebruikstoepassingen

Defensiesector

Bij de defensiesector is er de behoefte om navigatiesystemen te ontwikkelen die onafhankelijk van GNSS kunnen opereren. Om de hierboven *inertial navigation systems* te kunnen gebruiken moeten die of een minimale drift (propageren van de error in positiebepaling) hebben of een drift-correctie uitvoeren aan de hand van een externe bron. Driftvrije kwantum INS zullen op korte termijn nog niet beschikbaar zijn, maar het is wel mogelijk om de huidige INS te ondersteunen aan de hand van kaarten van het aardmagneetveld. Deze combinatie is niet afhankelijk van GNSS.

Plaatsbepaling op basis van het lokale aardmagneetveld en INS vullen elkaar goed aan. Op korte afstand is INS redelijk accuraat: de drift ontstaat gedurende de tijd en leidt tot een steeds grotere error. Navigatie op het aardmagneetveld op de korte afstand is daarentegen erg lastig: het aardmagneetveld varieert op de hoogte van bijvoorbeeld een vliegtuig nauwelijks tussen twee aangrenzende locaties. Voor lange afstanden is het detailniveau van het aardmagneetveld echter juist toereikend, terwijl de drift van INS het op lange afstanden lastig maakt ermee te navigeren. Hiermee zouden kwantum magnetometers ondersteuning kunnen bieden aan de huidige INS bij defensie.¹⁵

Voor toepassingen bij defensie zullen met name op het gebied van *performance*, van zowel de kwantum magnetometer als de kaart van het magneetveld, de komende jaren nog stappen gezet moeten worden voordat militaire vliegtuigen daadwerkelijk aan de hand van het aardmagneetveld (in combinatie met INS) zullen gaan navigeren. Voor deze toepassing is de SWaP-C niet langer de grootste belemmering (ook al is er op dat gebied ook nog vooruitgang mogelijk).

Commerciële markt

Voor navigatie op basis van het aardmagneetveld is het noodzakelijk dat de snelheid hoog is. Als de voortbeweging langzaam is, dan kan de ruis die opgevangen wordt net zo groot zijn als de variatie in het aardmagneetveld en zijn deze dus niet uit elkaar te houden. Ook is de verminderde nauwkeurigheid ten opzichte van GNSS voor navigatie op hoge hoogte mogelijk minder problematisch. Hierdoor zal aardmagneetveld navigatie waarschijnlijk landen bij de lucht- en scheepvaartsector en niet bij bijvoorbeeld de auto-industrie, waar auto's zich moeten verplaatsen door landschappen met een hoge dichtheid van obstakels.

Als het op kwantumnavigatie aankomt, dan zijn de verwachtingen omtrent navigatie op basis van het aardmagneetveld het hoogst. Dit geldt echter voor specifieke gebruikersgroepen zoals de defensiesector en de luchtvaart en niet voor de auto-industrie. Dit heeft een aantal oorzaken:

- **SWaP-C:** Verwacht wordt dat een magnetometer ten behoeve van navigatie in een auto niet meer dan €100 mag kosten.¹⁶ De productiekosten van een kwantum magnetometer liggen momenteel nog ver boven dat bedrag.
- **Performance:** Een kwantum magnetometer is erg gevoelig – ook voor de ruis. Wanneer deze sensor zich in een auto bevindt, zal deze zowel verstoord worden door het

¹⁵ Bron: interviews

¹⁶ Bron: interviews

magneetveld van de auto zelf, als alle magnetische objecten in de omgeving. Het lijkt (voorlopig) onmogelijk om wél de (kleine) veranderingen in het aardmagneetveld te detecteren, maar niet de ruis uit de omgeving. Ook zal de nauwkeurigheid van navigatie op basis van het aardmagneetveld nooit kunnen concurreren met GNSS.

5.3.2 Kaart van het zwaartekrachtveld

Voor plaatsbepaling op basis van het zwaartekrachtveld gelden gelijke principes (hoogteafhankelijkheid, kalibratie en kaart kwaliteit) als voor het aardmagneetveld. Ook het zwaartekrachtveld kent afwijkingen, voornamelijk veroorzaakt door geologische aspecten. Gebergten hebben bijvoorbeeld een hogere concentratie massa en daarmee een sterker zwaartekrachtveld [54].

Stand van de techniek

Kwantum gravitatiemeters zijn, net als de inertia sensors, vaak op basis van *cold atom interferometers*. Momenteel zijn er al gravitatiemeters commercieel verkrijgbaar. Deze wegen echter nog meer dan 100 kilogram, waardoor ze niet makkelijk kunnen worden verplaatst.¹⁷ Deze sensoren worden momenteel met name ingezet kunnen om ondergrondse objecten te identificeren en natuurlijke evenementen, zoals vulkaan uitbarstingen en aardbevingen, te voorspellen [55].

De kwantum gravitatiemeters hierboven beschreven hebben in de literatuur een TRL van 5-6 [24], wat inhoudt dat de technologie wordt getest in de daadwerkelijke gebruiksomgeving. Echter kregen CAI's in de context van *inertial navigation* eerder een TRL van 3 toegewezen (zie 5.2). Deze discrepantie komt ons inziens door het doeleinde van de sensor: het op zichzelf meten van het aardmagneetveld (TRL 5-6) of het continu meten van de eigen beweging, waardoor het ook een hoge bandbreedte moet hebben (TRL 3). Voor het navigeren op basis van het zwaartekrachtveld hebben CAI's daarom een TRL van 5-6.

Gebruikstoepassingen

Vooropgesteld moet worden dat betrokkenen uit het veld niet verwachten dat kwantum gravitatiemeters gebruikt zullen gaan worden voor navigatie doeleinden. Aan de ene kant komt dit doordat dezelfde sensoren ook ingezet kunnen worden als inertia sensor, waar, met name voor de ruimtevaart en defensie, meer aandacht naartoe gaat. Aan de andere kant zijn de ontwikkelingen omtrent magnetometers voor het doeleinde van navigatie verder gevorderd. Deze kwantum magnetometers zijn minder complex en hebben in potentie een betere SWaP-C score. Desalniettemin zijn we in dit onderzoek wel gestuit op een specifieke toepassing voor kwantum gravitatiemeters.

Spoorwegindustrie

In de spoorwegindustrie wordt geëxperimenteerd met kwantum gravitatiemeters op daarvoor speciaal gebouwde schokbestendige platforms (vanwege de schokgevoeligheid van de sensoren). Deze gravitatiemeters in de trein kunnen, onafhankelijk van GNSS, de locatie van de trein bepalen, maar ook bepaalde defecten in het spoor detecteren, waardoor er tijdig onderhoud gedaan kan worden [56].

¹⁷ Zie bijvoorbeeld [Muquans | Absolute Quantum Gravimeter](#)

6 Overige ontwikkelingen

In dit onderzoek lag de focus op de ontwikkelingen van kwantumsensoren en de toepassingen op het gebied van radio en navigatie (PNT). Gedurende het onderzoek zijn er echter ook nog ontwikkelingen aan het licht gekomen in andere gebieden. Deze ontwikkelingen, de bijbehorende toepassingen en de invloed op het werkveld van RDI zullen in dit hoofdstuk (kort) besproken worden.

6.1 Radar

Radar kan objecten lokaliseren door radiogolven uit te zenden en te meten hoelang het duurt voordat de weerkaatste radiogolf weer gedetecteerd wordt: Hoe verder het object, hoe langer de radiogolf onderweg is. Radar is wijdverspreid en wordt ingezet voor een breed spectrum aan toepassingen. De signal-to-noise ratio (SNR) van radar neemt echter af naarmate objecten verder weg zijn, waardoor de kans op detectie kleiner wordt [57].

Een kwantumradar maakt gebruik van verstrengelde fotonen. Hierbij wordt één van de twee verstrengelde fotonen uitgezonden, waarna de toestand direct afgelezen kan worden uit de foton die achterblijft. Kwantum radar kan theoretisch een verbetering van 6 dB (een verdubbeling) in signal-to-noise ratio (SNR) opleveren ten opzichte van de klassieke radar [58]. Dit zou kwantumradar geschikt maken voor het lokaliseren van objecten op grotere afstand.

Een theoretische winst in SNR van 6dB zou voor radartoepassingen een grote vooruitgang zijn. Echter zijn er in de praktijk problemen met de implementatie: radar op basis van enkele fotonen paren in het laboratorium is mogelijk, maar de schaalvergroting die nodig is om het ook buiten het laboratorium te implementeren blijkt erg lastig. Daarnaast is het signaalverlies over grotere afstand te groot, waardoor de verwachting is dat het (voorlopig) alleen voor *short-range* toepassingen gebruikt kan worden (zoals *medical imaging*).¹⁸ Ook zijn de kosten van een kwantumradar dusdanig hoog dat die niet opwegen tegen de verbetering in SNR [59].

De TRL van deze technologie is daardoor dus 1-2, met een ongespecificeerde tijdshorizon [24]. Een TRL van 1-2 betekent dat de eerste basis principes, concepten en toepassingen van de technologie zijn gedefinieerd.

6.2 Optische atoomklokken

In het vorige hoofdstuk is de optische atoomklok al kort besproken, die een precisie van 10^{-18} halen en in potentie 100 tot 100.000 keer nauwkeuriger zijn dan een atoomklok op basis van cesium atomen. Deze ontwikkelingen bieden een aantal mogelijke gebruikstoepassingen die invloed hebben op het spectrum gebruik. Dit zijn niet zozeer toepassingen op basis van kwantumsensoren, maar in de context van dit onderzoek alsnog interessant omdat ze invloed kunnen hebben op het gebruik van het spectrum.

6.2.1 Bi-statische radar

In de vorige sectie bespraken we kwantumradar aan de hand van verstrengelde fotonen. Echter zijn er ook traditionelere radar systemen die zouden kunnen profiteren van een betere tijdsynchronisatie. In een bi-statische radar opstelling kunnen de zender en ontvanger fysiek ver van elkaar verwijderd zijn, waardoor de kwetsbaarheid voor *jamming* of anti-straling

¹⁸ Bron: interviews

wapens sterk afneemt. Tijdsynchronisatie is echter vele malen belangrijker voor een bi-statische dan voor een mono-statische radar, waar de zender en ontvanger op dezelfde plek staan. Voor een accurate lokalisatie van objecten is het namelijk essentieel dat de ontvanger exact weet wanneer de puls door de zender is verzonden [64]. Optische atoomklokken zouden dus bij kunnen dragen aan het verbeteren van de detectie en het tracken van doelwitten met behulp van bi-statische radar opstellingen.

6.2.2 Super GPS

In 2022 is aangetoond dat plaatsbepaling ook mogelijk is op basis van het mobiele netwerk. In GNSS hebben de satellieten gekalibreerde atoomklokken aan boord. Deze satellieten zenden vervolgens (onder andere) tijdsinformatie uit. Echter is het ook mogelijk om deze tijdsignalen via een gesynchroniseerd glasvezelnetwerk te ontvangen. De tijdsynchronisatie aan de hand van atoomklokken en glasvezelnetwerk biedt sub nanoseconde precisie [60]. Wanneer zendmasten aangesloten worden op dit synchrone glasvezelnetwerk kunnen deze, in plaats van de satellieten, ook de tijdsinformatie uitzenden. Omdat deze zendmasten volledig gesynchroniseerd zijn, kunnen ze in potentie nauwkeurigere plaatsbepaling bieden dan GNSS [61].

Dit systeem maakt gebruik van hetzelfde soort signalen als mobiele telefoons en WiFi, en kan in de bestaande mobiele netwerkbanden worden geïmplementeerd.¹⁹ Wanneer dit systeem geïmplementeerd zou worden (verwacht wordt dat dit voor 2030 het geval kan zijn) kunnen nodes in kwantumnetwerken hun nauwkeurige tijdsynchronisatie 'uit de lucht' oppikken (via het mobiele netwerk) en hoeven ze zelf niet meer gekoppeld te worden aan een glasvezelnetwerk.

Voor navigatie toepassingen biedt plaatsbepaling op basis van het mobiele netwerk bovendien een oplossing voor de multipath en obstructie errors waar GNSS mee te maken heeft. Door het signaal over een bredere bandbreedte te sturen dan GNSS, is er een smallere tijdspuls nodig voor het versturen van de informatie. Door deze smallere tijdspuls is het beter mogelijk om de verschillende paden van het signaal te onderscheiden. Hierdoor kunnen multipath errors drastisch verminderd worden [61]. Deze grote vereiste bandbreedte kan onderverdeeld worden in meerdere kleinere banden, waardoor het mogelijk beter in het huidige spectrumlandschap geïmplementeerd kan worden. In hoeveel verschillende banden het signaal verspreid kan worden en hoe groot deze banden moeten zijn wordt nu onderzocht.²⁰

Gesprekspartners geven aan dat, wanneer deze technologie daadwerkelijk op grote schaal zou worden geïmplementeerd, dat een fundamentele verandering van (de functie van) het mobiele radiospectrum zou kunnen betekenen. Nu levert deze spectrumruimte nog voornamelijk connectiviteit, maar in de (nabije) toekomst zou het dus ook nauwkeurige navigatie signalen kunnen leveren. Dat kan een grote impact hebben op de strategische en economische waarde van dat radiospectrum.

6.2.3 Chronometric leveling

Geodesie is de wetenschap die zich bezighoudt met de bepaling van de vorm en de afmeting van de aarde en het aardse zwaartekrachtsveld. In dit veld wordt er geëxperimenteerd met optische atoomklokken voor het doen van meting. Specifiek worden optische atoomklokken gebruikt voor het meten van hoogteverschillen. De algemene relativiteitstheorie stelt namelijk dat klokken langzamer gaan tikken naarmate ze verder van de aarde zijn, door

¹⁹ Deze signalen worden al gebruikt ter ondersteuning van satellietnavigatie

²⁰ Bron: interviews

veranderingen in zwaartekracht. Wanneer klokken een precisie van 10^{-18} hebben, kunnen ze hierdoor gebruikt worden als sensor voor hoogteverschillen [62]. Klokken die op verschillende afstanden van de aarde geplaatst zijn zullen niet precies even snel meer lopen. Door dit verschil te meten kan bepaald worden wat het hoogteverschil is tussen de twee klokken. Deze nieuwe vorm van hoogtemetingen op basis van nauwkeurige klokken en het gravitatieveld word *chronometric leveling* genoemd. Hiermee is voor een hoogteverschil van 450 meter al een nauwkeurigheid van 4 centimeter behaald [35, 63]. Toepassingen van *chronometric leveling* zullen waarschijnlijk niet direct invloed hebben op het gebruik van de spectrumruimte, maar bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden voor de monitoring van de infrastructuur of het precies in kaart brengen van gebouwen.

6.2.4 Snellere netwerkverbindingen

Draadloze communicatie middels mobiele netwerken heeft net als PNT signalen last van multipath errors. Hierbij interfereren de weerkaatste signalen met het directe signaal. Om dit te voorkomen wordt er tussen het zenden van signalen een pauze ingelast; de *guard interval*. Wanneer de zender en de ontvanger echter nauwkeuriger gesynchroniseerd zijn, kunnen de indirecte (vertraagde) signalen er beter uitgefilterd worden. Dit betekent dat de guard interval omlaag kan. Als de guard interval korter is, kan informatie sneller verstuurd worden en gaat de spectrumbehoefte mogelijk omlaag.²¹ Daarnaast zou bij *single frequency networks* op een nauwkeurigere wijze de stoorzone bepaald kunnen worden en kan deze in theorie ook verkleind worden.

6.3 Biomedische sector

De focus van dit onderzoek lag op toepassingen van kwantumsensoren die uiteindelijk van invloed gaan of kunnen gaan zijn op het gebruik van de frequentieruimte. Er zijn echter ook ontwikkelingen gaande op het gebied van kwantumsensoren in andere sectoren, die de komende vijf jaar niet zullen leiden tot spectrumgebruik, maar waarvan de technologieën wel door kunnen dringen in andere sectoren (zoals radiocommunicatie of navigatie). Eén van die sectoren is de biomedische industrie, waar kwantumsensoren ingezet worden voor bijvoorbeeld *brain imaging* of spectroscopie van individuele cellen [65]. *Atomic vapors* worden momenteel bijvoorbeeld gebruikt in magneto-encefalografie (MEG) opstellingen, waarmee zwakkere hersenactiviteit of activiteit uit gebieden verder naar het centrum van de hersenen nog gemeten kan worden. NV-centers worden daarnaast bijvoorbeeld ingezet in een microscoop set-up voor het detecteren van kankercellen die *getagd* zijn met kleine magnetische deeltjes [65]. Deze techniek is al commercieel beschikbaar.²² Voor een recent overzicht van biomedische toepassingen op basis van kwantumsensoren verwijzen wij naar [65]. Deze ontwikkelingen zijn voor RDI interessant om in de gaten te houden, maar de komende vijf jaar voorzien wij geen invloed van deze ontwikkelingen op het spectrumgebruik. Voor gebruik in de biomedische industrie hoeven kwantumsensoren namelijk niet over langere afstanden te communiceren, in omgevingen met veel ruis te functioneren of een bandbreedte te hebben, iets wat voor veel toepassingen binnen het werkveld van RDI wel het geval is.

²¹ Dit geldt alleen als er gebruik gemaakt wordt van *time-division multiplexing*.

²² Zie bijvoorbeeld [QDTI](#)

7 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van dit onderzoek was om in kaart te brengen wat de huidige stand van zaken is van de techniek en toepassingsmogelijkheden op het gebied van kwantumsensoren die van invloed kunnen zijn op het **gebruik van de frequentieruimte** de komende **vijf tot tien jaar**. Tabel 3 toont een overzicht van de relevante kwantumsensoren die besproken zijn in dit rapport, het toepassingsveld en de TRL.

Tabel 3: Overzicht van kwantumsensoren, toepassingsvelden en TRL's.

Kwantumsensor	Toepassingsveld	TRL
Verstrengelde fotonen	Radar	1-2
Cold atom interferometer	Inertial navigation	3
Rydberg atoom	RF-ontvanger	4
NV center	RF-ontvanger	5-6
NV center	Aardmagneetveld navigatie	5-6
Cold atom interferometer	Zwaartekrachtveld navigatie	5-6
Atomic vapor	Aardmagneetveld navigatie	6-7
SQUIDs	ADC/DAC	7-8

Een kwantumsensor zal de komende vijf tot tien jaar alleen een mogelijke invloed gaan hebben op de frequentieruimte als de technologie binnen die tijd *ready* is. Dit houdt in dat de kwantumsensor binnen een tijdspanne van maximaal tien jaar een **TRL van minimaal 8** moet halen. Een TRL van 8 staat voor *system complete and qualified*. Op basis van de huidige TRL's en de gevoerde gesprekken in dit onderzoek lijkt het onwaarschijnlijk dat verstrengelde fotonen voor radar, *cold atom interferometers* voor *inertial navigation* en Rydberg atomen voor radio toepassingen deze TRL van 8 gaan halen.

Voor de overige kwantumsensoren (NV centers als RF-ontvanger en voor navigatie; *cold atom interferometer* en *atomic vapors* voor navigatie en SQUIDs als ADC's) geldt dat deze in de komende tien jaar mogelijk wel gereed zijn en een TRL van 8 zullen hebben (of zelfs al hebben in het geval van de SQUID).

Deze tweede groep kwantumsensoren zou in theorie dus van invloed kunnen gaan zijn op het werkveld van RDI de komende vijf tot tien jaar. Echter zullen deze technologieën dan ook **een toepassing** moeten vinden die gebruik gaat maken van de frequentieruimte. Voor toepassingen op basis van kwantumsensoren geldt een afweging met aan de ene kant de **behoefte en de verbetering in performance** van de nieuwe toepassing en aan de andere kant de **SWaP-C** (*size, weight, power and cost*) van de nieuwe toepassing: een toepassing waar veel behoefte aan is en die leidt tot een grootte verbetering in *performance* mag zwaarder, groter en duurder zijn dan een toepassing waar weinig behoefte aan is of die maar tot een kleine verbetering in *performance* leidt. De uitkomst van deze afweging kan verschillen per gebruikersgroep. In Tabel 4 zijn per kwantumsensor en toepassingsveld de uitdagingen met betrekking tot behoefte, *performance* en SWaP-C weergegeven.

Tabel 4: Overzicht kwantumsensoren, toepassingsvelden en uitdagingen.

Kwantumsensor	Toepassingsveld	Uitdaging
NV centers	RF-ontvanger	Performance, SWaP-C, Behoeft
NV centers	Aardmagneetveld navigatie	Performance, SWaP-C, Behoeft
Cold atom interferometer	Zwaartekrachtveld navigatie	Performance, SWaP-C, Behoeft
Atomic vapor	Aardmagneetveld navigatie	SWaP-C, Behoeft
SQUIDs	ADC/DAC	SWaP-C

Voor NV-centers geldt dat ze in theorie gebruikt kunnen worden als RF-ontvanger, maar dat daar vanuit het veld eigenlijk geen behoefte voor is. Dit wordt mede ingegeven door het gebrek aan *performance*: NV centers zijn zowel gevoeliger voor het signaal als voor de ruis, waardoor ze nauwelijks verbeteringen in SNR opleveren ten opzichte van de huidige RF-ontvangers. Innovaties in het telecomdomein worden met name verwacht aan de hand van andere technologieën dan kwantumsensoren.

Voor navigatie op basis van een aardmagneet- of zwaartekrachtveld zitten er met name nog uitdagingen in de *performance* en in de SWaP-C van de toepassingen. *Cold atom interferometers* hebben bijvoorbeeld grote koeling systemen nodig. Hierdoor zijn deze systemen meestal groot, zwaar en duur, wat de implementatie in gebruikstoepassingen voor de commerciële markt belemmerd. *Atomic vapors* kunnen daarentegen tegenwoordig zo groot zijn als een pen, maar zijn nog wel duur en vervullen nog geen (commerciële) behoefte. Voor navigatie op basis van het aardmagneet- en zwaartekrachtveld geldt daarnaast dat de *performance* afhankelijk is van de kwaliteit van de kaart, de hoogte en snelheid van de verplaatsing en de omgeving. Veel (stalen) objecten verstoren namelijk het magneetveld en dit signaal zal vele malen groter zijn dan de plaatselijke afwijkingen in het aardmagneetveld. Doordat deze sensoren voor navigatie doeleinden nog zowel uitdagingen op het gebied van *performance* als SWaP-C hebben wordt niet verwacht dat ze komende jaren een invloed gaan hebben op de frequentieruimte. **Wij raden RDI echter wel aan om deze ontwikkelingen in de gaten te houden, omdat daar met name in de defensiesector grote stappen gezet worden.**

SQUIDs worden in de defensiesector in sommige gevallen al gedemonstreerd als ADC in een radiosysteem. SQUIDs zijn echter superconductors die alleen onder cryogene omstandigheden functioneren. Dit betekent dat ze koelsystemen nodig hebben die de sensoren groot, zwaar en duur maken. Hierdoor wordt niet verwacht dat ze de komende jaren een plek in de commerciële markt zullen vinden en de invloed op de frequentieruimte zal dus ook beperkt blijven.

8 Verwijzingen

- [1] McKinsey (2021). *Shaping the long race in quantum communication and quantum sensing*
- [2] TNO. *Quantumtechnologie in ontwikkeling* [www.tno.nl]
- [3] Crockett, C. (2022). *More than one way to make a qubit* [www.symmetrymagazine.org]
- [4] Degen, C.L., Reinhard, F., en Cappellaro, P. (2017). *Quantum sensing*. 035002.
- [5] DiVincenzo, D.P. (2000). *The physical implementation of quantum computation*. [arxiv.org] Progress of Physics.pp. 771-783.
- [6] Hyper Physics. *SQUID Magnetometer* [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]
- [7] Adams, C.S., Pritchard, J.D., en Shaffer, J.P. (2019). *Rydberg atom quantum technologies*.
- [8] Lahaye, A., en Browaeys, T. (2013). *Interacting Cold Rydberg Atoms: A Toy Many-Body System* [www.researchgate.net]
- [9] Quantum Flagship. *NV Centers* [qt.eu]
- [10] University of Birmingham. *Cold Atoms* [www.birmingham.ac.uk]
- [11] Travagnin, M. (2020). *Cold atom interferometry sensors: physics and technologies* [www.researchgate.net]
- [12] NIST (2016). *Detecting Brain Waves with Atomic Vapor* [www.nist.gov]
- [13] National Institute for Science and Technology. *atomic vapor cell* [www.nist.gov]
- [14] Fund, E.D. (2021). *ADEQUADE* [defence-industry-space.ec.europa.eu]
- [15] NASA (2012). *Technology Readiness Level* [www.nasa.gov]
- [16] Christensen, C.M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail* Boston, MA: Harvard Business School Press.
- [17] Griffin, J. (2015). *Medium* [medium.com]
- [18] ITU (2020). *Radio Regulations 2020* [www.itu.int]
- [19] NASA (2018). *Electromagnetic Spectrum* [www.nasa.gov]
- [20] Anderson, M., en Hall, D. (2007). *Understanding RF Instrument Specifications Part 1* [www.eetimes.com]
- [21] Keller, J. (2021). *Honeywell to design quantum RF and microwave receiver technology for wideband precise sensors* [www.militaryaerospace.com]
- [22] U.S. Army DEVCOM Army Research Laboratory Public Affairs (2021). *Army researchers detect broadest frequencies ever with novel quantum receiver* [www.army.mil]
- [23] Meyer, D.H., Kunz, P.D., en Cox, K.C. (2021). *Waveguide-Coupled Rydberg Spectrum Analyzer from 0 to 20 GHz* [journals.aps.org] vol. 15,

- [24]Krelina, M. (2021). *Quantum technology for military applications* [epjquantumtechnology.springeropen.com] EPJ Quantum Technology.
- [25]Nakanishi, M. (2012). *Digital-to-analog converter using a superconducting quantum interference device* [aip.scitation.org]
- [26]Mukhanov, O.A., Gupta, D., Kadin, A.M., en Semenov, V.K. (2004). *Superconductor analog-to-digital converters* [ieeexplore.ieee.org] IEEE.pp. 1564-1584.
- [27](1993). *High-performance superconducting digital-to-analog converter employing double-junction squid flip-flops* [patents.google.com]
- [28]Mukhanov, O.A. (2012). *History of Superconductor Analogtodigital Converters* [www.researchgate.net]
- [29]Hypres (2009). *Advanced Digital-RF Receiver* [www.hypres.com]
- [30]BT Group (2022). *BT trials a new quantum radio to boost next-generation 5G & IoT Networks* [newsroom.bt.com]
- [31]ITU (2020). *GSTR-GNSS - Considerations on the use of GNSS as a primary time reference in telecommunications* [www.itu.int] ITU-T.
- [32]Munin, E. (2022). *Multipath errors in GPS signals.* [medium.com]
- [33]The Electropaedia. *Clock and Watch Movements* [www.mpoweruk.com]
- [34]Fritschy, Y. (2021). *Ultranaauwkeurige vergelijking atoomklokken brengt nieuwe seconde dichterbij* [www.newscientist.nl]
- [35]Global Geodetic Observing System. *Optical Atomic Clocks* [ggos.org]
- [36]iqClock. *iqClock* [www.iqclock.eu]
- [37]Tampere University of Technology. *Basic Principles of Inertial Navigation Seminar on inertial navigation systems* [www.aerostudents.com] Tampere.
- [38]Industry Articles (2020). *Inertial navigation: dead-reckoning* [www.oxts.com]
- [39]Christ, R., en Wernli, R. (2014). *Navigational Sensors* [www.sciencedirect.com] Butterworth-Heinemann.
- [40]Travagnin, M. (2020). *Cold atom interferometry for inertial navigation sensors. Technology assessment: space and defence applications.* [publications.jrc.ec.europa.eu] Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- [41]R. Geiger, A.L. S. M. a. F. P. D. S. (2020). *"High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors* [avs.scitation.org]
- [42]B. Barrett, P.G. E. C. L. A. A. B. (2014). *Mobile and remote inertial sensing with atom interferometers* [arxiv.org]
- [43]Bongs, K.H. M. V. J. B. P. C. G. R. E. S. C. S. W. a. R. A. (2019). *Taking atom interferometric quantum sensors from the laboratory to real-world applications.* [www.nature.com] Nature Reviews Physics.
- [44]Lee, J., Ding, R., Christensen, J., Rosenthal, R.R., Ison, A., Gillund, D.P., en Schwindt, P.D. (2022). *A compact cold-atom interferometer with a high data-rate grating magneto-*

- optical trap and a photonic-integrated-circuit-compatible laser system.* [www.nature.com] Nature.pp. 1-12.
- [45]Lutwak, R. (2014). *Micro-Technology for Positioning, Navigation, and Timing Towards PNT Everywhere and Always* [www.gps.gov] Stanford PNT Symposium ,
- [46](2020). *EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution)* [www.ngdc.noaa.gov]
- [47]Cameron, A. (2019). *Quantum magnetometer senses its place* [www.gpsworld.com]
- [48]Maus, S., Fairhead, B.J. D., Mogren, L.S., en Bournas, R.N. (2008). *EMAG3: A 3-arc-minute resolution global magnetic anomaly grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic data.* [library.seg.org] SEG Technical Program Expanded Abstracts.
- [49]Lockheed Martin. *Tech That's Cool as [Dark] Ice* [www.lockheedmartin.com]
- [50]Graps, A. (2022). *Quantum Magnetometers: Navigating Human Realms* [www.insidequantumtechnology.com]
- [51]Canciani, A., en Raquet, J. (2017). *Airborne Magnetic Anomaly Navigation* [ieeexplore.ieee.org] IEEE.pp. 67-80.
- [52]Inside GNSS (2020). *Magnetic Sensors in Flight Tests as Alternative PNT to GNSS* [insidegnss.com]
- [53]Canciani, A. (2022). *Magnetic Navigation on an F-16 Aircraft using*
- [54]Sharghi, K. (2013). *Mapping Earth's Gravity* [nasaviz.gsfc.nasa.gov] NASA visualization explorer.
- [55]Study Finds (2022). *Groundbreaking quantum gravity sensor may 'revolutionize geology, national security': 'Will transform society'* [studyfinds.org]
- [56]Swayne, M. (2022). *Quantum Sensor Research Project Aimed at Slashing Train Delays and Improve Passenger Experience* [thequantuminsider.com]
- [57]Yirka, B. (2022). *Phys.org* [phys.org]
- [58]Lam, J.W., Wee, W.H., Teo, M.H., Sum, Y.H., en Chong, C.Y. (2022). *A feasibility study on quantum illumination radar* [sondra.fr]
- [59]Daum, F. (2020). *A system engineering perspective on quantum radar* [ieeexplore.ieee.org] Washington, DC, USA: IEEE.
- [60]Serrano, J., Lipinski, M., Wlostowski, T., Gousiou, E., Van der Bij, E., Cattin, M., en Daniluk, G. (2013). *The white rabbit project* [cds.cern.ch]
- [61]Koelemeij, J.C., Dun, H., Diouf, C.E., Dierikx, E.F., Janssen, G.J., en Tiberius, C.C. (2022). *A hybrid optical-wireless network for decimetre-level terrestrial positioning.* [www.nature.com] Nature.pp. 473-478.
- [62]Tanaka, Y., en Katori, H. (2021). *Exploring potential applications of optical lattice clocks in a plate subduction zone* [link.springer.com] Journal of Geodesy.
- [63]Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N., Yahagi, T., Kokado, K., Shinkai, H., en Katori, H. (2020). *Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks* [www.nature.com] Nature.pp. 411-415.

- [64]Travagnin, M. (2021). *Chip-Scale Atomic Clocks* [www.cde.ual.es]
- [65]Aslam, N.Z. H. U. E. K. T. M. J. W. R. L. L. M. D. & P. H. (2023). *Quantum sensors for biomedical applications*Nature Reviews Physics.
- [66]DARPA (2020). *Harnessing Quantum Technologies at Room Temperature* [www.darpa.mil]
- [67]Dixon, B. (2020). *Are gravity maps & quantum navigation the future of safe shipping?* [fathom.world]
- [68]Orr, X. (2022). *Advanced navigation* [www.advancednavigation.com]
- [69]Hurrell, J.P., Pridmore-Brown, D.C., en Silver, A.H. (1980). *Analog-to-Digital Conversion with Unlatched SQUID's* [ieeexplore.ieee.org]
- [70]Feng, D. (2019). *Review of Quantum Navigation*IOP Publishing.
- [71]Overheid.nl (2022). *Nationaal Frequentieplan 2014* [wetten.overheid.nl]
- [72]Agentschap Telecom (2017). *Het Nederlandse Frequentiespectrum* [www.agentschaptelecom.nl]
- [73]conceptdraw.com. *Telecommunications network* [www.conceptdraw.com]
- [74]Electronics Tutorials. *Analogue to Digital converter* [www.electronics-tutorials.ws]
- [75]Thales (2021). *Thales unveils three quantum technologies set to revolutionise the world of tomorrow* [www.thalesgroup.com]
- [76]RedKnight. *An Introduction to Technology Readiness Levels (TRLs)* [redknightconsultancy.co.uk]
- [77]U.S. Department of Transportations. *What is Positioning, Navigation and Timing (PNT)?* [www.transportation.gov]
- [78]Engineering 360. *Inertial Navigation Systems Information* [www.globalspec.com]
- [79]Cox, K.C., Meyer, D.H., Fatemi, F.K., en Kunz, P.D. (2018). *Quantum-Limited Atomic Receiver in the Electrically Small Regime* [arxiv.org]
- [80]Brennenraedts, R., Van der Vorst, T., en Pieters, P. (2022). *Update argumenten bij en impact van afschakeling van FM-radio*Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- [81]Canciani, A. (2022). *Magnetic Navigation on an F-16 Aircraft using* [ieeexplore.ieee.org] IEEE.
- [82]Ishii, S., Saiki, S., Onoda, S., Masuyama, Y., Abe, H., en Ohshima, T. (2021). *Ensemble Negatively-Charged Nitrogen-Vacancy Centers in Type-Ib Diamond Created by High Fluence Electron Beam Irradiation*. [www.mdpi.com] Quantum Beam Science.p. 2.
- [83]Feng, D. (2019). *Review of Quantum navigation* [iopscience.iop.org] IOP Publishing.
- [84]Weyn, M. (2008). *A Wi-Fi Assisted GPS Positioning Concept* [www.researchgate.net]
- [85]Lin, J., en Singer, P.W. (2018). *China's latest quntum radar could help detect stealth planes, missiles* []
- [86]ZYXEL communications. *WiFi 6 More than just OFDMA and MU-MIMO* [service-provider.zyxel.com]

- [87]Bahder, T.B. (2004). *Quantum Positioning System* [www.researchgate.net]
- [88]Fancher, C., Scherer, D., St. John, M., en Scmittbergermarlow, B. (2021). *Rydberg Atom Electric Field Sensors for* [www.researchgate.net] IEEE Transactions.pp. 1-13.
- [89]Dwyer, D. . *What is an atomic clock and how does it work?* [science.howstuffworks.com]
- [90]Magaletti, S., Mayer, L., Roch, J., en Debuisschert, T. (2022). *A quantum radio frequency signal analyzer based on nitrogen vacancy centers in diamond* [www.nature.com] vol. 1, Nature.
- [91]Wang, G., Liu, Y., Schloss, J.M., Alsid, S.T., Braje, D.A., en Cappellaro, P. (2022). *Sensing of Arbitrary-Frequency Fields Using a Quantum Mixer* [journals.aps.org] vol. 12, Physical Review X.
- [92]Britting, K.R. (1971). *Inertial Navigation Systems Analysis* [books.google.nl] Michigan: Wiley-Interscience.
- [93]Le Sage, D., Arai, K., Glenn, D.R., DeVience, S.J., Pham, L.M., Rahn-Lee, L., Lukin, M.D., Yacoby, A., Komeili, A., en Walsworth, R.L. (2013). *Optical magnetic imaging of living cells.* [www.nature.com] Nature.
- [94]Robert M. Gagliardi, S.K. (1995). *Optical communications* [www.wiley.com] Wiley-Interscience.
- [95]Lin, Y., She, Z., Chen, Z., Li, X., Zhang, C., Liao, K., Zhang, X., Wei, H., Yan, H., en Zhu, S. (2022). *Terahertz Receiver based on Room-Temperature Rydberg-Atoms* [arxiv.org] arXiv.
- [96]USA Today Money. [eu.usatoday.com]
- [97]Wikipedia. *Diffusion of innovations* [en.wikipedia.org]
- [98]Rogers, E. (1962). *Diffusions Of Innovations*
- [99]Degen, C.L. R. F. & C. P. (2017). *Quantum sensing*.p. 035002.

Bijlage 1. Overzicht interviewrespondenten

Respondent	Organisatie	Functie	Bijzonderheden
Jeroen Koelemeij	Vrije Universiteit Amsterdam	Assistant Professor	SuperGPS
Gerard Janssen	TU Delft	Associate Professor	SuperGPS
Florian Schreck	Universiteit van Amsterdam	Professor	Schriftelijke respons; Optical clocks
David Anderson	Rydberg Technologies	CEO	
Jim Carey	Rydberg Technologies	Sr. Manager Quality Control	
Gabriele Bulgarini	TNO	Program Manager Quantum Technologies	
Jan van Rees	Inwilution	Telecomexpert	
Philippe Bouyer	QuantumDelta; iXblue; Muquans	Coordinator van het CAT3 programma: Quantum Sensing Applications; Senior Scientific Officer; Co-founder	
Melvyn Ho	Rohde & Schwarz	Technology Coordinator (Quantum)	
Fabian Kronowetter	Rohde & Schwarz	Junior Development Engineer Technology Development	
Marcel Tersteeg	Rohde & Schwarz Benelux	Account Manager	

Afbeelding kapt: Door CrAIyon (voorheen DALL-E mini) gegenereerde afbeelding van *Quantum sensors*



Contact:

Dialogic innovatie & interactie
Hooghiemstraplein 33-36
3514 AX Utrecht
Tel. +31 (0)30 215 05 80
www.dialogic.nl

