

TNO 2023 R11093 – juni 2023

Monitor Draadloze Technologie Voorjaar 2023



Auteurs	Dr. N.W. Keesmaat, Ir. R. Overduin, Dr. Ir. M.J.M. van Sambeek
Rubricering verslag	TNO Public
Titel	TNO Public
Verslagtekst	TNO Public
Aantal pagina's	39
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	Monitor Draadloze Technologie 2023
Projectnummer	060.55603

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding.....	4
1.1 De Monitor Draadloze Technologie.....	4
1.2 Het ‘draadloos speelveld’.....	4
2 De toekomst van de 6 GHz-band	6
2.1 Introductie	6
2.2 Mobiele communicatie in de 6 GHz-band.....	6
2.3 Wi-Fi in de 6 GHz-band.....	7
2.4 Ontwikkelingen in andere landen.....	8
3 Messaging in 4G- en 5G-netwerken	11
3.1 De oorsprong van messaging en de opkomst van SMS.....	11
3.2 Evolutie van SMS in 4G en de opkomst van M2M-communicatie.....	11
3.3 De opkomst van alternatieven	13
3.4 Messaging in 5G-netwerken: SMS, Rich Communication Services en MSGin5G.....	14
3.5 Europese maatregelen voor interworking en interoperabiliteit: de Digital Markets Act.....	15
4 NOOVA - missiekritische breedbandcommunicatie voor hulpdiensten in Nederland ..	17
4.1 Achtergrond.....	17
4.2 Het programma NOOVA.....	17
4.3 Beschouwde OOV-use cases.....	18
4.4 Technische achtergrond	19
4.4.1 C2000	19
4.4.2 3GPP-gestandaardiseerde Mission Critical-toepassingen	19
4.5 Huidige status en toekomstige planning	21
5 Terahertz-communicatie.....	22
5.1 Inleiding.....	22
5.2 Propagatie van terahertz-radiogolven.....	22
5.2.1 Algemeen	22
5.2.2 Propagatiemodellering.....	23
5.3 Inherente eigenschappen en communicatietoepassingen van terahertz-radiogolven	25
5.4 Realiseerbaarheid van terahertz-communicatiesystemen en perspectieven.....	27
5.5 Regelgeving en standaardisatie.....	28
5.6 Terahertz-communicatie vergeleken met Visible Light Communication.....	28
5.7 Op hoofdlijnen.....	28
6 Intelligent Reflective Surfaces voor draadloze communicatie	30
6.1 Inleiding.....	30
6.2 Fysische begrenzingen van het IRS-concept.....	32
6.2.1 Verre-veld conditie	32
6.2.2 Verlies van LOS.....	33
6.2.3 Deformatie van de vorm van de radiogolf.....	33
6.3 Vergelijking van IRS met alternatieven	34
6.4 Algemene use cases	34
6.5 Implementatie-aspecten.....	36
6.6 Enkele betrokken partijen en activiteiten.....	38
6.7 Concluderend	39

1 Inleiding

Om overzicht te bieden in het speelveld van de diverse draadloze technologieën, stelt TNO sinds een aantal jaren een Monitor Draadloze Technologie samen. Hierin worden ontwikkelingen in de technologie en de markt gevolgd.

In dit inleidende hoofdstuk worden de scope en de opzet van de Monitor Draadloze Technologie behandeld.

1.1 De Monitor Draadloze Technologie

Met de Monitor Draadloze Technologie (kortweg ‘de Monitor’) wil TNO een degelijk, actueel en toegankelijk overzicht bieden van de stand van zaken ten aanzien van de ontwikkeling en inzet van draadloze technologie. De Monitor Draadloze Technologie tracht diverse doelgroepen te bedienen bij overheid en bedrijfsleven in Nederland. Dit impliceert dat de Monitor erop gericht is om informatief te zijn voor lezers met een algemene achtergrond in de telecommunicatie. In principe worden wereldwijde ontwikkelingen gevolgd, vanuit een nationaal perspectief.

Evenals vorige jaren is gekozen voor de schriftelijke rapportagevorm om de informatie te ontsluiten. Deze bestaat uit twee (halfjaarlijkse) edities, zodat beter kan worden aangesloten op recente trends en ontwikkelingen:

- Een overzicht van ontwikkelingen vanuit voornamelijk technologisch perspectief. Per technologie wordt kort de stand van zaken beschreven. Dit wordt gedaan in de voorjaarseditie, de editie die u nu leest;
- Een editie die met name gaat over een aantal thema's, trends en toepassingen van draadloze communicatietechnologie. Dit is de zogenaamde najaarseditie.

TNO hecht eraan te benadrukken dat de Monitor slechts een momentopname is van een complex en snel veranderend speelveld. Het is daarom mogelijk dat opgenomen informatie op het moment van lezen niet meer up-to-date is, of niet langer relevant. Daarnaast valt niet te ontkomen aan enige willekeur in de keuze van geschetste ontwikkelingen. Het kan dus zijn dat ontwikkelingen die in de ogen van een specifieke lezer zeer relevant zijn, niet worden beschreven. TNO staat open voor suggesties of aanbevelingen voor verdere verbeteringen.

1.2 Het ‘draadloos speelveld’

In de Monitor voorjaarseditie van 2022 is stilgestaan bij wat werd genoemd de onderlinge stimuleringspiraal van vraag naar- en aanbod van geavanceerde technologie in de context van de mogelijke inhoud van de zesde generatie draadloze communicatie (6G). Daarbij werd de focus vooral gericht op wat algemene concepten zoals AI (Artificial Intelligence), blockchain- en quantumtechnologie zouden kunnen betekenen voor moderne draadloze technologie. In deze voorjaarseditie van 2023 gaat de aandacht vooral uit naar de specifiekere radiofrequente concepten terahertz-communicatie en IRS (Intelligent Reconfigurable Surfaces) ofwel RIS (Reflective Intelligent Surfaces) en hun perspectieven voor 6G.

In deze editie komen eerst onderwerpen aan bod die naar verwachting eerder van belang worden. Zo gaat Hoofdstuk 2 in op de toekomst van de 6 GHz-band waarin de internationale bestemmingsproblematiek rond Wi-Fi en mobiele communicatie wordt belicht. Vervolgens werpt Hoofdstuk 3 licht op het onderwerp messaging in 4G- en 5G-netwerken. Het bleek inzichtelijk om deze uiteenzetting te doen vanuit historisch perspectief om tenslotte te eindigen bij concrete moderne messaging-technieken.

Vervolgens handelt Hoofdstuk 4 over het programma rond het nieuwe communicatiesysteem voor de nationale missie-kritische breedbandcommunicatie voor hulpdiensten, bekend onder de werknaam NOOVA (Nationale Openbare Orde en Veiligheid Architectuur). In dit hoofdstuk worden zowel technische als organisatorische aspecten rond NOOVA besproken.

Tenslotte is het in de hoofdstukken 5 en 6 de beurt aan de aangekondigde onderwerpen terahertz-communicatie en IRS/RIS.

2 De toekomst van de 6 GHz-band

2.1 Introductie

5G en Wi-Fi zijn belangrijke technologieën voor mobiele en draadloze communicatie. Beide technologieën ontwikkelen zich om in de toekomst hogere datasnelheden te ondersteunen door efficiënter gebruik van spectrum en door toegang tot meer spectrum.

Met 6 GHz-band wordt de frequentieband bedoeld van 5.925 tot 7.125 MHz, dus in totaal 1.200 MHz. Wereldwijd vinden discussies plaats over het toekomstig gebruik van deze band waarbij er in bepaalde regio's zoals Europa nog geen definitieve routekaart is voor het gebruik op de lange termijn. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de onderste band van 5.925-6.425 MHz (500 MHz) en de bovenste band van 6.425-7.125 MHz (700 MHz). In de EU is door de Europese Commissie in juni 2021 besloten dat de band 5.945-6.425 MHz beschikbaar moet zijn voor Wi-Fi¹. Op basis van dit besluit is deze band van 480 MHz per 1 december 2021 in Nederland – door een wijziging in het Nationaal Frequentieplan – inzetbaar voor licentievrij gebruik door Wi-Fi. In het Nationaal Frequentieplan is de bovenste band in de 6 GHz-band momenteel bestemd voor vaste verbindingen² en voor vaste satellietverbindingen van aarde naar ruimte en wel op basis van vergunningen.

In dit hoofdstuk kijken we specifiek naar de ontwikkelingen wereldwijd in de band 6.425-7.125 MHz. De implicaties van 6 GHz-beslissingen zijn cruciaal omdat deze specifieke band in de nabije toekomst het grootste resterende blok vertegenwoordigt van het middenband-spectrum van 1 tot 6 GHz voor licentie-gebonden mobiele diensten. De 6 GHz-band is een van de locaties in de middenband om én naadloze brede dekking én verbindingen met hoge capaciteit te bieden. Zowel de mobiele industrie als de Wi-Fi industrie beschouwt deze band daarom als belangrijk.

Op de komende ITU World Radio Communication Conference 2023 (WRC-23) van 20 november tot 15 december 2023 in Dubai, wordt dit onderwerp besproken onder agendapunt 1.2^{3,4}. De volgende aanvullende banden worden dan in overweging genomen voor mobiele communicatie (aangeduid als International Mobile Telecommunications of IMT): 3.300-3.400 MHz, 3.600-3.800 MHz, 6.425-7.025 MHz, 7.025-7.125 MHz en 10,0-10,5 GHz. Deze overweging omvat daarmee mobiele communicatie in de 6 GHz-band, de band die dus ook de belangstelling heeft van de Wi-Fi industrie.

2.2 Mobiele communicatie in de 6 GHz-band

Voor mobiele communicatie in landelijke mobiele netwerken worden licentie-gebonden frequentiebanden gebruikt. De Europese Unie heeft drie voorkeursfrequenties voor 5G

¹ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/6ghz-harmonisation-decision-more-spectrum-available-better-and-faster-wi-fi>

² STM-1 netwerken, duplex mode

³ www.itu.int/wrc-23/wrc-23-agenda/

⁴ TNO2022-P12274, Monitor Draadloze Technologie, december 2022, blz. 19

aangewezen: 700 MHz, 3,5 GHz en 26 GHz. Deze frequentiebanden hebben elk een verschillende functie. In 2020 verdeelde de Rijksinspectie Digitale Infrastructuur (RDI, voorheen Agentschap Telecom) vergunningen voor frequenties van mobiele communicatie op de 700, 1.400 en 2.100 MHz-banden. De 3,5 GHz band is ook een belangrijke band voor mobiele communicatie. Op het moment van schrijven is nog niet duidelijk wanneer deze band in Nederland beschikbaar komt.

Voor toekomstig mobiel gebruik is internationaal afstemming nodig over nieuwe frequentiebanden die voor 5G en 6G beschikbaar kunnen komen. Zoals opgemerkt, is de 6 GHz-band een optimale band qua bereik en datasnelheid waarin zowel de Wi-Fi- als de mobiele industrie belang stellen (hierbij kan worden opgemerkt dat het benodigde bereik voor Wi-Fi weliswaar kleiner is dan voor 5G, maar voor beide technologieën is het aantrekkelijk dat deze frequentie een redelijke doordringbaarheid door bijvoorbeeld deuren en glas biedt). De wereldwijde organisatie voor mobiele communicatie, GSMA (Global System for Mobile Communications Association), roept dan ook op om in de periode van 2025 tot 2030 minimaal 2 GHz in de middenfrequentie extra vrij te geven voor 5G en 6G. GSMA pleit voor het toewijzen van de band 6.425-7.025 GHz (dus 600 MHz) voor 5G⁵ en ook om, afhankelijk van de behoeften van landen, ervoor te zorgen dat de onderste helft van het 6 GHz-bereik op 5.925-6.425 MHz (500 MHz) zou kunnen worden geopend op een vergunningvrije basis met technologie-neutrale regels.

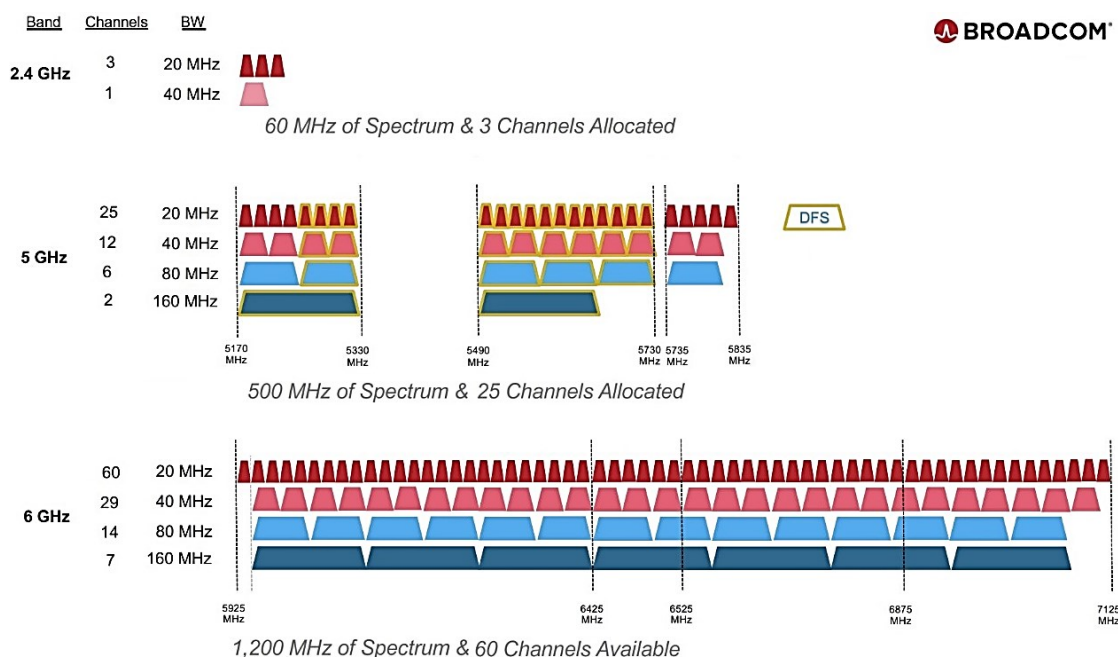
3GPP (Third Generation Partnership Project), de wereldwijde standaardisatie-organisatie voor de mobiele netwerkindustrie, is in januari 2022 begonnen met de standaardisatie van U6G (Upper6G: 6.425-7.125 MHz) als een nieuwe IMT-frequentieband. Omdat dit spectrumdeel voor 5G nieuw is, is het nodig om de bijbehorende radiofrequente eigenschappen van basisstations en gebruikersapparatuur hiervoor te definiëren, c.q. te standaardiseren zodat de toepassingen goed kunnen werken. Tijdens de plenaire vergadering van 3GPP (RAN#96) in juni 2022 voltooidde 3GPP het standaardisatiewerk voor gebruik van 5G in het bovenste 6 GHz-spectrum (U6G, genummerd als n104) als onderdeel van Release 17. 3GPP keurde de RF-specificaties van deze band goed voor zowel netwerk- als gebruikersapparatuur. Tijdens deze 3GPP-vergadering werd ook een resolutie ingediend met betrekking tot de voortzetting van de lopende inspanningen binnen 3GPP om ook de volledige 6 GHz-band (5.925-7.125 MHz) voor IMT te specificeren als onderdeel van 3GPP Release 18. Dit kan worden gezien als een belangrijke mijlpaal om gebruik van 5G in de volledige 6 GHz-band technisch mogelijk te maken. Dit vormt de basis voor de industrie om producten voor dit spectrum te ontwikkelen die vervolgens kunnen worden gebruikt conform de toegewezen (delen van) de 6 GHz-band in de drie ITU-regio's.

2.3 Wi-Fi in de 6 GHz-band

Wi-Fi-oplossingen zijn momenteel beschikbaar voor gebruik in verschillende licentievrije banden. De belangrijkste zijn: 2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz en 60 GHz. In figuur 1 is aangegeven welke bandbreedte en aantal kanalen van 20, 40, 80 en 160 MHz mogelijk zijn in de 2,4 GHz, 5 GHz en 6 GHz-band. Indien de volledige 1.200 MHz in de 6 GHz-band voor Wi-Fi beschikbaar is kan Wi-Fi 6E worden gebruikt tot 14 extra 80 MHz-kanalen en zeven extra 160 MHz-kanalen in de 6 GHz-band ten opzichte van 5 GHz.

In de 5 GHz-band gelden aanvullende restricties voor Wi-Fi om interferentie met radarsystemen zoals weerradar en defensieradars te voorkomen: bij outdoor gebruik in de 5 GHz-band zijn aanvullende functies nodig voor radardetectie en Dynamic Frequency Selection (DFS) en Transmit Power Control (TPC).

⁵ www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2021/05/6-GHz-Capacity-to-Power-Innovation.pdf



Figuur 1: Kanaal- en bandindelingen voor Wi-Fi op 2,4 GHz, 5 GHz en 6 GHz [bron (aangepast): Broadcom]

De band 5.945-6.425 MHz is eind 2021 in Nederland toegewezen voor licentievrij gebruik door Wi-Fi met vermogensrestricties tot 200 mW EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) indoor en tot 25 mW EIRP outdoor. In deze 480 MHz kan Wi-Fi 6E met 3 kanalen van 160 MHz worden gebruikt. Met Wi-Fi 7 zal de behoefte aan spectrum verder toenemen.

De Wi-Fi Alliance (WFA)⁶ is de belangrijkste pleitbezorger voor Wi-Fi. Op de website is een overzicht⁷ beschikbaar met de status van de verschillende landen die Wi-Fi in de 6 GHz-band mogelijk hebben gemaakt of dit overwegen. De Verenigde Staten, Canada en Brazilië zijn voorbeelden van landen die de volledige 6 GHz-band hebben vrijgegeven voor Wi-Fi.

2.4 Ontwikkelingen in andere landen

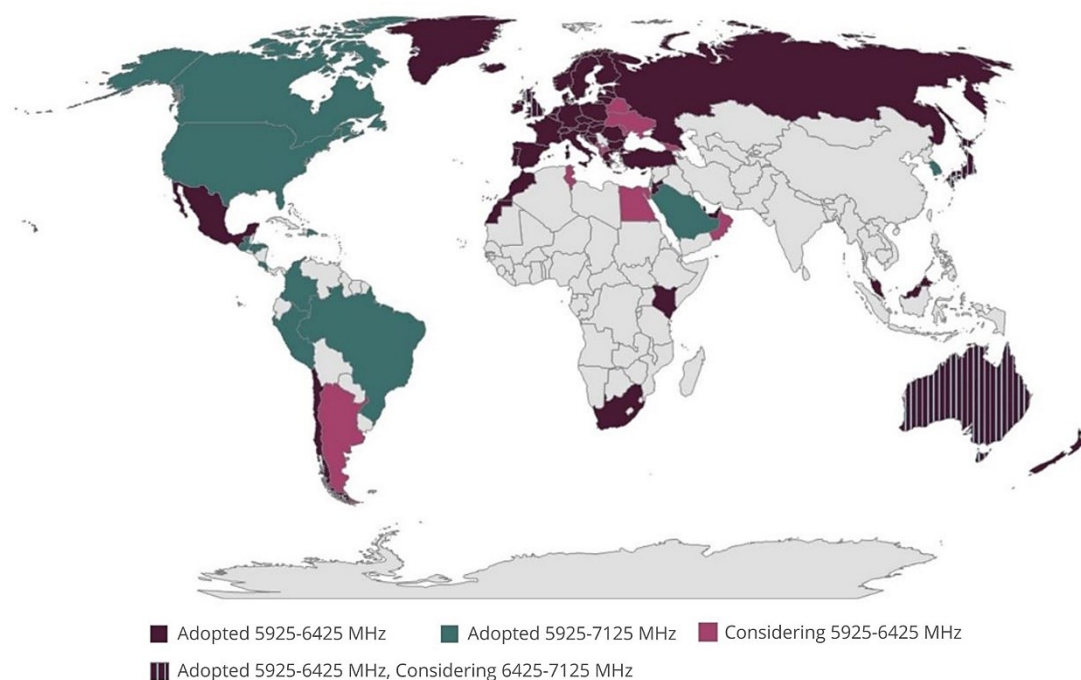
Tot op heden hebben we gezien dat 6 GHz-benaderingen in landen en regio's variëren van het:

1. Toewijzen van de volledige band voor gebruik zonder licentie tot
2. Een hybride optie waarbij het onderste deel (5.925-6.425 MHz) licentievrij is en het bovenste deel (6.425-7.125 MHz) licentie-gebonden is.

In figuur 2 is aangegeven hoe, volgens het inzicht van de Wi-Fi Alliance, de diverse opties voor Wi-Fi-gebruik over de landen en regio's zijn verdeeld.

⁶ www.wi-fi.org

⁷ www.wi-fi.org/countries-enabling-wi-fi-in-6-ghz-wi-fi-6e



Figuur 2: Mondiaal overzicht van inzetbenaderingen van de 6 GHz-band voor Wi-Fi
[bron: Wi-Fi Alliance, aangepast]

In landen zoals de Verenigde Staten (per april 2020), Canada, Brazilië, Saoedi-Arabië en Zuid-Korea is de volledige 1.200 MHz beschikbaar voor licentievrij gebruik (o.a. voor Wi-Fi). In China is de volledige 6 GHz-band door de regelgever toegewezen aan licentie-gebonden gebruik voor mobiel (5G), waarbij de band van 5.925-6.125 GHz beschikbaar is voor licentie-gebonden private 5G-netwerken voor de industrie. In landen zoals India wordt de band extensief gebruikt voor satelliet-TV, en de Indiase wetgever wil dit gebruik beschermen. Op WRC-19 is het voorstel van China om de 6 GHz-band in Azië toe te kennen voor 5G afgewezen door India en andere Aziatische landen.

In de EU is door de Europese Commissie besloten om de onderste band beschikbaar te maken voor Wi-Fi. Voorafgaand aan dit EU-besluit heeft CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) in opdracht van de Europese Commissie onderzoek gedaan naar de mogelijke technische voorwaarden waaronder draadloze toegangssystemen zoals Wi-Fi kunnen werken en naast elkaar kunnen bestaan met de bestaande oplossingen in de 5.925-6.425 band⁸. Op basis van deze studie is besloten om Wi-Fi toe te staan in de onderste band en onder welke voorwaarden (zoals het maximale vermogen voor indoor gebruik).

Tijdens de vorige WRC in 2019 is Resolutie 245⁹ aangenomen waarin regelgevers in de verschillende regio's onderzoeken uitvoeren om in 2023 een besluit te kunnen nemen over gebruik van mobiele communicatie in de verschillende banden:

- 3.600-3.800 MHz en 3.300 – 3.400 MHz (regio 2)
- 3.300-3.400 MHz (regio 1)
- 7.025-7.125 (alle regio's)
- 6.425-7.025 (regio 1)
- 10,0-10,5 GHz (regio 2)

⁸ ECC Report 302: *Sharing and compatibility studies related to Wireless Access Systems including Radio Local Area Networks (WAS/RLAN) in the frequency band 5925-6425 MHz*, 2019

⁹ www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0C/OA/ROCOA00000F0083PDFE.pdf

Europa is onderdeel van regio 1, samen met onder andere Afrika en Rusland. Noord-en-Zuid-Amerika vormen samen regio 2.

Op 26 mei 2023 heeft CEPT een toelichting¹⁰ gegeven op de status van hun voorbereiding van de WRC-23. Hierin is ook het voorlopige standpunt gepresenteerd van CEPT op het toestaan van IMT in de band 6.425-7.025 MHz. Dit voorlopige standpunt van CEPT (en zijn 46 leden) geeft aan dat bestaand gebruik beschermd moet blijven en dat er vooralsnog vanuit CEPT geen duidelijk standpunt is voor toewijzing van delen van de bovenste 6 GHz-band voor mobiel gebruik (IMT) of licentie-vrij gebruik (Wireless Access Systems (WAS)/ Radio Local Area Networks (RLAN)).

De Britse regelgever Ofcom heeft in december 2022 het voorlopige standpunt¹¹ afgegeven om tijdens WRC-23 geen wijziging door te voeren in het frequentieplan en het besluit daarmee door te schuiven naar de toekomst. Dit standpunt is hiermee niet in tegenspraak met het voorlopige standpunt van de CEPT.

¹⁰ [https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2023/Documents/2023-05-26%20Status%20of%20CEPT%20preparation%20for%20WRC-23%20\(26%20May%202023\).pdf](https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2023/Documents/2023-05-26%20Status%20of%20CEPT%20preparation%20for%20WRC-23%20(26%20May%202023).pdf)

¹¹ www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0028/248770/update-on-upper-6hz-band.pdf

3 Messaging in 4G- en 5G-netwerken

3.1 De oorsprong van messaging en de opkomst van SMS

Bij het ontwerp van 2G (GSM) mobiele netwerken is min of meer toevallig de mogelijkheid voor consumenten geschapen voor het snel versturen van korte tekstberichten, ofwel de *short messages* via de Short Message Service (SMS). Het versturen van SMS-berichten vond in 2G-netwerken plaats door signaleringberichten via het MAP (Mobile Application Part) protocol met de zogenoemde Circuit Switched (CS) techniek die al voor gesprekken werd toegepast. In 2G-netwerken vond de signalering, nodig voor het opzetten en afbreken van gesprekken, plaats met deze techniek omdat ten behoeve van de gesprekskwaliteit voor ieder (*interactive voice*) gesprek een vast *end-to-end* pad ofwel *circuit* werd gereserveerd. In 2G-netwerken werden de SMS-berichten verstuurd vanaf een toestel naar een SMS Center (SMSC) in het eigen netwerk en vandaaruit doorgestuurd naar het bestemmingstoestel in het bestemmingsnetwerk.

Alhoewel de SMS-techniek eigenlijk bedoeld was als techniek voor de ondersteuning van monteurs, werd de dienst al spoedig populair en konden operators er al snel geld mee verdienen. Eén van de succesfactoren was de algehele beschikbaarheid op toestellen en de universele bereikbaarheid: bij gebruik van SMS kon elk toestel elk andere toestel bereiken. Aanvankelijk was er nog wel het probleem van het invoeren van een tekstbericht via een numeriek toetsenbord maar daar was al snel een oplossing voor en wel in de vorm van herhaald intoetsen waardoor letters ingetikt konden worden (vervolgens werd via woordvoorspelling in het T9-systeem het maken van tekstberichten bespoedigd). Wel bracht de populariteit van SMS zo z'n problemen, bijvoorbeeld in de vorm van spam. Vooral voor operators was het nodig om maatregelen te nemen om binnenkomende SMS-berichten, dat wil zeggen van SMSCs uit andere netwerken, in de hand te houden en frauduleuze SMS-berichten tegen te houden.

De invoering van 3G (UMTS)-netwerken vereiste geen nieuwe technieken voor het leveren van de SMS-dienst aangezien 3G-netwerken nog steeds de CS-techniek ondersteunden.

3.2 Evolutie van SMS in 4G en de opkomst van M2M-communicatie

Bij de ontwikkeling van 4G (LTE)-netwerken moest er iets verzonnen worden voor de ondersteuning van SMS vanwege het verdwijnen van het CS-domein. 4G-netwerken ondersteunen alleen het Packet Switched (PS) domein waarmee dataverbindingen efficiënt geleverd kunnen worden.

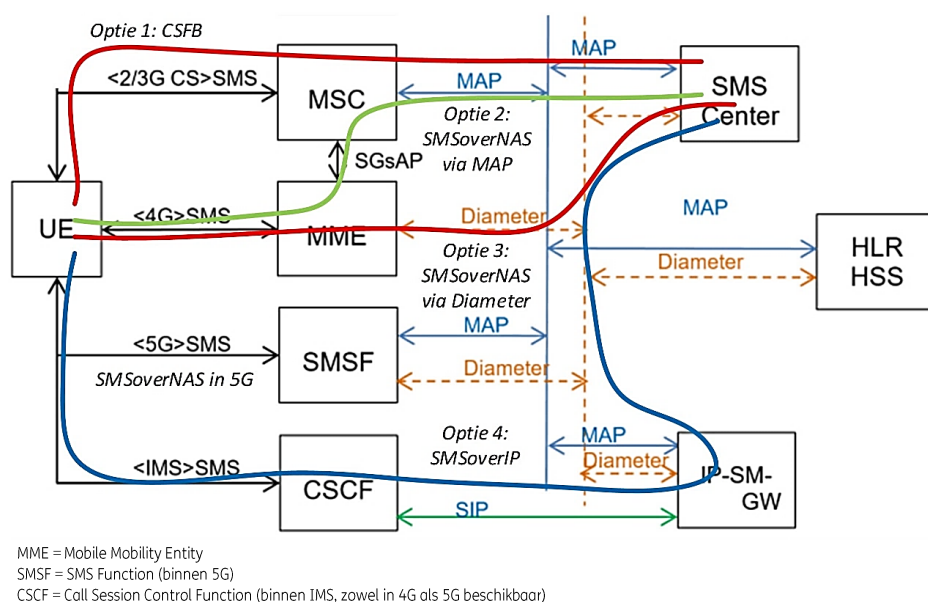
Voor het ondersteunen van SMS in 4G-netwerken heeft de GSM Association (GSMA) de mogelijkheden op een rij gezet in het document *SMS Evolution*, versie 2.0, NG.111¹². De

¹² www.gsma.com

GSMA beschouwt daarbij Rich Communication Services (RCS, ook Rich Communication Suite genoemd) als de primaire techniek voor messaging in 5G-netwerken¹³ en niet langer SMS. Later in dit hoofdstuk zal RCS nader ter sprake komen.

De opties voor de ondersteuning van SMS in 4G-netwerken zijn grafisch weergegeven in figuur 3¹⁴ en betreffen:

1. Circuit Switched Fallback (CSFB). Bij deze optie worden SMS-berichten door het mobiele toestel gestuurd via 2G of 3G Circuit Switched-netwerken en via MAP-signalering tussen 2G/3G Mobile Switching Centers (MSCs) en SMSCs uitgewisseld;
2. SMSoverNAS (SMS over Non-Access Stratum) via MAP. Bij deze optie worden SMS-berichten door het mobiele toestel over 4G signalering (NAS) gestuurd via het 4G Packet Switched-netwerk naar een 4G Mobile Mobility Entity (MME) en vervolgens via een 2G/3G MSC via MAP-signalering uitgewisseld met een SMSC. Deze uitwisseling vindt met gebruikmaking van het SGsAP-protocol plaats via de zogenoemde SGs-interface tussen MME en MSC;
3. SMSoverNAS via Diameter. Bij deze optie worden SMS-berichten door het mobiele toestel over 4G-signalering gestuurd naar een 4G MME die vervolgens via het Diameter protocol rechtstreeks communiceert met een SMSC. Het Diameter protocol is een protocol uit de internetwereld, die in 4G-netwerken gebruikt wordt voor onder andere de communicatie tussen MME en de Home Subscriber Server (HSS), en ook voor communicatie tussen MME en SMSC. In tegenstelling tot het 'binaire' protocol MAP, die een onderdeel vormt van de Signalling System 7 (SS7) protocolverzameling uit het CS-domein, is Diameter 'tekst-georiënteerd' zoals veel van de nieuwere protocollen uit de internetwereld;
4. SMSoverIP via IP Multimedia Subsystem (IMS). Bij deze optie worden SMS-berichten door het mobiele toestel via IMS-signalering verzorgd door het Session Initiation Protocol ofwel SIP, gestuurd naar een IP Short Message Gateway (IP-SM-GW). Deze IP-SM-GW communiceert vervolgens via MAP of Diameter met een SMSC, afhankelijk van de keuze van de operator en de mogelijkheden van de SMSC en de IP-SM-GW in het netwerk van de operator.



Figuur 3: De opties voor de ondersteuning van SMS in 4G-netwerken [bron (aangepast): GSMA]

¹³ Messaging in the 5G era, June 2021

¹⁴ Modificatie van GSMA NG.111, Figure 21

Volledigheidshalve is in figuur 3 ook een optie voor SMS binnen 5G aangegeven. Deze SMSoverNAS in 5G kan beschouwd worden als variant van de derde optie voor SMS in 4G-netwerken en zal worden toegelicht in Paragraaf 3.4.

Op dit moment worden door Nederlandse operators de eerste twee opties ondersteund voor alle toestellen. Er is echter aarzeling voor de ondersteuning via Diameter (optie 3) vanwege veiligheidsproblemen met dit protocol. Met de komst van de eveneens op IMS gebaseerde VoLTE (Voice over Long Term Evolution) dienstverlening en de groeiende ondersteuning in toestellen van SMSoverIP wordt in netwerken optie 4 steeds vaker ondersteund.

Zoals te zien is uit het bovenstaande verandert met de komst van nieuwe generaties mobiele netwerken (4G, 5G, et cetera) wel de techniek voor het transport van SMS-berichten vanaf het toestel naar het mobiele *core network*, maar blijft de functionaliteit zoals die geleverd wordt door SMS Centers ongewijzigd. Er worden protocolconverters tussengevoegd (zoals de IP-SM-GW), maar de SMS-dienstverlening blijft hetzelfde, dat wil zeggen zoals het ook is ontworpen, namelijk met de inherent beperkte lengte van berichten zonder aflevergarantie, zonder transport van multimedia, zonder *group messaging*, et cetera. Dit geldt ook voor SMS over 5G-netwerken zoals hierna zal worden toegelicht. Deze beperktheid van de SMS-dienstverlening en de afhankelijkheid van *legacy* protocollen maakt dat operators op zoek zijn naar vervanging, c.q. uitfasering van SMS op de langere termijn. Bij het beschouwen van het gebruik van SMS is het nuttig om de volgende drie use cases te onderscheiden:

- P2P (Person to Person): SMS-verkeer tussen twee (menselijke) gebruikers;
- A2P/P2A (Application to Person/ Person to Application): SMS-verkeer gestuurd door applicaties naar gebruikers en van gebruikers naar applicaties. Deze use case is bekend van authenticatietechnieken (het sturen van code via SMS voor inloggen in websites) en SMS-diensten zoals *voting*;
- M2M (Machine to Machine): SMS-verkeer tussen applicaties en machines. Dit is vooral bekend bij het gebruik van slimme meters. Een belangrijke functionaliteit waar SMS voor gebruikt wordt in deze use case is het (her)activeren of *triggeren* van machines c.q. *devices* die lange tijd op standby staan om energie te besparen. Deze apparaten hoeven alleen incidenteel verbinding te maken met het netwerk en sturen vaak maar een kleine hoeveelheid data. Bij deze use case is het tijdig en gegarandeerd aankomen van een zogenoemde *trigger SMS* belangrijk, maar de SMS-dienst is daar niet voor ontworpen. Voor 5G wordt daarom gewerkt aan een beter alternatief. Voorsnog gaat dit type verkeer dan ook meestal niet via SMS maar via gewone dataverbindingen.

Voor de eerste twee use cases is de focus van operators op Rich Communication Services (RCS) als alternatief van SMS. Voor de derde use case gaat de aandacht van operators uit naar de nieuwe techniek van MSGin5G die speciaal gericht is op ondersteuning van M2M-communicatie met gegarandeerde en tijdige aflevering, broadcasting en group casting, et cetera. Op zowel RCS als MSGin5G zal in Paragraaf 3.4 verder worden ingegaan.

3.3 De opkomst van alternatieven

Met de opkomst van smartphones en de beschikbaarheid van apps kwamen ook *over-the-top* (OTT) alternatieven voor SMS op die gebruikers meer mogelijkheden gingen bieden zoals *group chat* en het versturen van foto's en video's. Naast het bekende Whatsapp, Blackberry Messenger, 'pingen' en in het Apple-domein de iMessage/Facetime functies zijn er inmiddels meerdere alternatieven zoals Signal, Viber, WeChat, Threema, Telegram, Google Chat, Facebook Messenger, et cetera.

Naast de rijkere mogelijkheden kenmerken de alternatieven zich helaas door de vaak beperkte mogelijkheden voor uitwisseling tussen de alternatieven: communiceren binnen de

community is eenvoudig, communiceren met gebruikers buiten de community is vaak niet mogelijk of soms erg lastig.

Een kenmerk van de *over-the-top* (OTT) applicaties is dat het vaak niet altijd duidelijk is of ze geschikt zijn voor het versturen van (privacy-)gevoelige berichten. Is het bijvoorbeeld wel vertrouwd voor huisartsen om medische informatie te sturen naar patiënten via Whatsapp? Of is het verantwoord om deze diensten te gebruiken voor het anoniem melden van misstanden en misdaden? Hoe anoniem blijft de communicatie? Bedrijven en overheden verbieden soms het gebruik van Whatsapp voor het uitwisselen van bedrijfs- of overheidsinformatie of laten Whatsapp alleen toe zonder koppeling met adresboeken zodat Whatsapp niet automatisch volledige adresboeken van bedrijven of overheden tot zijn beschikking krijgt. Wel is end-to-end-encryptie de afgelopen jaren in opkomst geraakt en wordt inmiddels door menig chat-app ondersteund.

Het bovenstaande is niet per se anders voor SMS-diensten maar regelgeving verbiedt operators ten strengste om de inhoud van SMS-berichten te zien. Hier wordt ook regelmatig op ge-audit. RCS is wel *by design* meer ingericht voor anoniem en veilig communiceren, waarover meer in de volgende paragraaf.

3.4 Messaging in 5G-netwerken: SMS, Rich Communication Services en MSGin5G

Op het gebied van messaging in 5G-netwerken zijn er naast SMS nog een tweetal andere technieken beschikbaar: Rich Communication Services (RCS) en MSGin5G.

Bij het beschrijven van SMS in 5G-netwerken moet bedacht worden dat 5G-netwerken momenteel in twee varianten geleverd worden: 5G NSA (Non StandAlone) en 5G SA (StandAlone). Bij 5G NSA wordt de 5G-dienst geleverd via een 5G-radionetwerk in combinatie met een 4G core network, waarbij alle signalering nog steeds gebaseerd is op die van 4G. Bij 5G SA is ook het core network gebaseerd op 5G en wordt er gebruik gemaakt van 5G-signalering.

De ondersteuning van SMS in 5G NSA-netwerken vindt plaats op dezelfde manier als voor 4G-netwerken omdat de signalering volledig gebaseerd is op 4G.

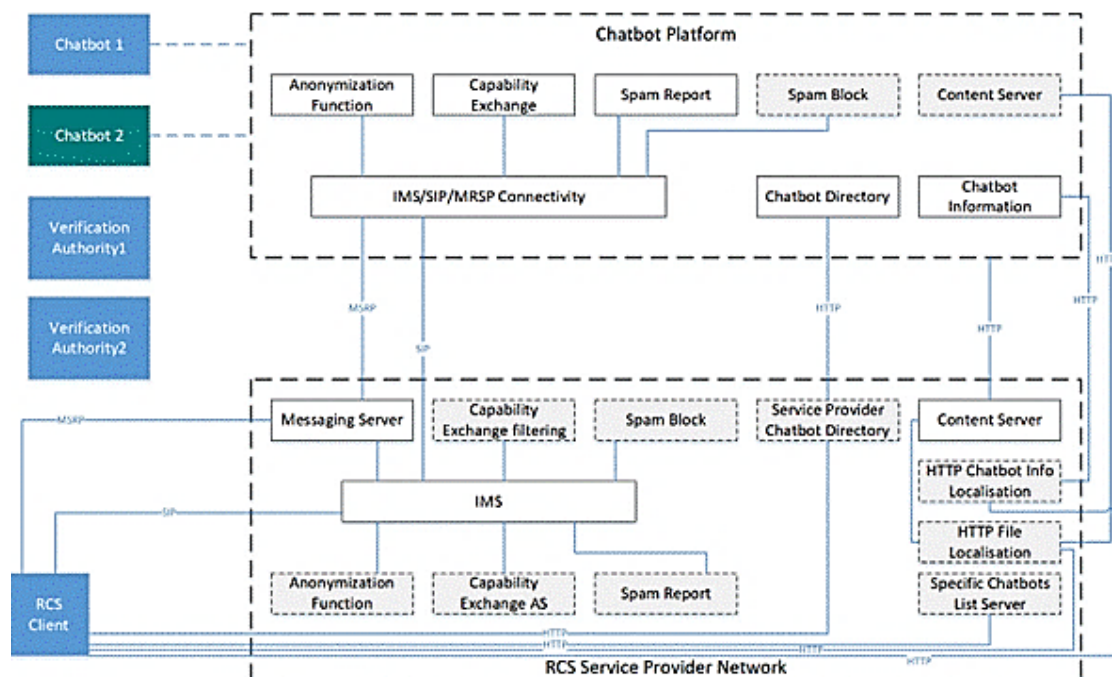
Voor de ondersteuning van SMS in 5G SA-netwerken wordt gebruik gemaakt van een zogenoemde SMSF (SMS Function) die SMS-berichten uitwisselt via 5G-signalering (SMSoverNAS in 5G) met mobiele toestellen, maar communiceert met een SMSC via de 2G/3G MAP-signalering of de 4G Diameter-signalering zoals aangegeven in figuur 3. Net als bij de IP-SM-GW hebben we hier dus weer te maken met een protocolconverter waarbij de SMS-dienstverlening: korte berichten zonder aflevergarantie en zonder multimedia hetzelfde blijft.

Binnen de GSMA is SMS niet langer de primaire techniek voor P2P- en A2P/P2A-messaging, alhoewel SMS als beperkte basisdienst nog wel ondersteund wordt in 5G core networks. De opvolgende techniek die door de GSMA is gestandaardiseerd is de eerdergenoemde Rich Communication Services¹⁵. Deze techniek heeft dezelfde rijke functionaliteit als de app-gebaseerde alternatieven zoals *group chat* en beeld/video messaging. Naast het feit dat de GSMA RCS verplicht heeft gesteld voor 5G is ook de intentie uitgesproken om RCS via het Europese standaardisatieorgaan ETSI om te zetten in een Europese standaard. Hierdoor kan RCS in principe uitgroeien tot het algemene, *default* messaging-middel op mobiele telefoons met universele bereikbaarheid en interconnectie tussen netwerken én tussen RCS en SMS. Vanwege het feit dat het een operatordienst is en door het ontwerp van RCS kunnen er ook gemakkelijker veiligheids- en privacy-garanties gegeven worden aan gebruikers.

¹⁵ Zie bijvoorbeeld GSMA RCC.71 en aanverwante specificaties zoals RCC.07, RCC.08, RCC.10, RCC.11, RCC.14, RCC.15, RCC.20

Of RCS de default messaging tool wordt op telefoons of niet is nu nog niet te zeggen. Er zijn veel marktpartijen die elk hun eigen belang zullen proberen te verdedigen. Waarschijnlijk zullen OTT-applicaties nog blijven bestaan (zoals dat nog steeds is gebleken), maar voor bepaalde toepassingen van messaging, bijvoorbeeld waar vertrouwelijkheid of privacy een rol speelt, kan RCS een rol gaan vervullen.

Een high level-architectuur van RCS¹⁶ is in figuur 4 als impressie weergegeven.



Figuur 4: High-level architectuur van Rich Communication Services (RCS) [bron: GSMA]

Zonder specifiek op details in te gaan, is in bovenstaand diagram te zien hoe RCS een uitgebreide dienstverlening biedt via Chatbot - denk aan *chat groups*, maar bijvoorbeeld ook aan messaging-menu's à la *voice mail menus*. Tot deze dienstverlening behoort ook *capability discovery* (wat ondersteunt mijn communicatiepartner?), met ondersteuning van anonimiteit en spamblocking. Ook is in figuur 4 te zien hoe RCS op IMS gebaseerd is, hetgeen inpassing in de huidige operatornetwerken vergemakkelijkt.

Voor de support van messaging voor M2M-communicatie is het oog momenteel gericht op de nieuwe 5G messaging-techniek MSGin5G waar in 3GPP (3G Partnership Project) aan gewerkt wordt¹⁷. De MSGin5G-techniek moet ondersteuning bieden aan het traditionele gebruik van trigger SMS en small datacommunicatie met gegarandeerde en tijdige aflevering, maar ook mogelijkheden bieden voor 5G-dienstverlening, zoals ultra-low-latency, massive/high-density Internet of Things (mIoT), en broadcast/groupcast, bijvoorbeeld als alternatief naast NLAAlert.

3.5 Europese maatregelen voor interworking en interoperabiliteit: de Digital Markets Act

Binnen de Europese Unie erkent men de problemen van de interworking en interoperabiliteit van digitale diensten zoals messaging en de groeiende invloed van een aantal grote spelers.

¹⁶ GSMA RCC.07, Figure 9

¹⁷ 3GPP TS 23.554

Om die reden is de zogenoemde Digital Market Act (DMA) in het leven geroepen. De DMA heeft onder meer tot doel om grote spelers, de *Gatekeepers*, te stimuleren of zelfs te verplichten om interconnectie tussen diensten mogelijk te maken.

Binnen de regelgeving wordt onderscheidt gemaakt tussen:

- Number Independent Interpersonal Communication Service (NI-ICS);
- Number Based Interpersonal Communication Service (NB-ICS).

De scope van de DMA is NI-ICS: de nummeronafhankelijke, interpersoonlijke communicatiediensten. In deze eerste groep worden OTT-diensten geschaard zoals Whatsapp, en in de tweede groep operatordiensten zoals SMS, maar ook RCS. Vanuit gebruikersperspectief is het onderscheid tussen de twee klassen diensten vreemd en onlogisch (is bijvoorbeeld Whatsapp niet gebaseerd op 06-nummers?) en levert dit ook een scheve regelgeving op. Zo zijn NI-ICS diensten niet verplicht om aftappen mogelijk te maken maar NB-ICS diensten moeten dat wel ondersteunen. Hierdoor zijn NI-ICS diensten vrijer in hun innovatie: ze kunnen bijvoorbeeld *end-to-end* encryptie bieden zonder daarbij rekening te hoeven houden met aftapverplichtingen.

Ondanks de focus van DMA op NI-ICS, wordt wellicht RCS toch aanbevolen als *intermediate* tussen de verschillende messaging-diensten omdat RCS gezien wordt als een wereldwijde, via GSMA gestandaardiseerde techniek.

operatordiensten zoals SMS, maar ook RCS. Vanuit gebruikersperspectief is het onderscheid tussen de twee klassen diensten vreemd en onlogisch (is bijvoorbeeld Whatsapp niet gebaseerd op 06-nummers?) en levert dit ook een scheve regelgeving op. Zo zijn NI-ICS diensten niet verplicht om aftappen mogelijk te maken maar NB-ICS diensten moeten dat wel ondersteunen. Hierdoor zijn NI-ICS diensten vrijer in hun innovatie: ze kunnen bijvoorbeeld *end-to-end* encryptie bieden zonder daarbij rekening te hoeven houden met aftapverplichtingen.

Ondanks de focus van DMA op NI-ICS, wordt wellicht RCS toch aanbevolen als *intermediate* tussen de verschillende messaging-diensten omdat RCS gezien wordt als een wereldwijde, via GSMA gestandaardiseerde techniek.

4 NOOVA – missiekritische breedbandcommunicatie voor hulpdiensten in Nederland

4.1 Achtergrond

C2000, gebaseerd op de standaard TETRA (Terrestrial Trunked Radio), is het huidige communicatiesysteem voor de hulpdiensten binnen de Openbare Orde en Veiligheid (OOV). Meer dan 80.000 hulpverleners binnen politie, brandweer, ambulancediensten, onderdelen van het ministerie van Defensie zoals de Koninklijke Marechaussee en daaraan gekoppelde organisaties gebruiken het digitale systeem voor hun mobiele communicatie. Met C2000 kunnen hulpverleners snel mondeling informatie met elkaar delen via groepsgesprekken en direct de meldkamer bereiken door een noodknop op hun portofoon¹⁸. De mogelijkheid tot datacommunicatie binnen C2000 is beperkt tot SDS (Short Data Service), een specifiek soort SMS-dienst van C2000. Er is ook een paging-functie die wordt geleverd door P2000, een ander gesloten netwerk in de VHF-band dat ook indoor-dekking biedt. C2000 is ontworpen voor het realiseren van outdoor-dekking, zie verder Paragraaf 4.4.1.

Hulpverleners hebben een groeiende behoefte aan toepassingen waarmee data via moderne technieken verstuurd kan worden, zoals real-time locatiebepaling, bodycams, de inzet van drones, het gebruik van sensoren, maar ook het gebruik van messaging-diensten en het snel kunnen delen van beelden. Het TETRA/C2000-netwerk is niet geschikt om aan deze behoefte te voldoen. Voor dit type verkeer maken hulpverleners nu gebruik van mobiel (4G en 5G) internet via hun smartphones. Het huidige mobiele internet werkt in normale omstandigheden goed maar biedt geen voorrang aan dataverkeer van hulpverleners als het netwerk overbelast is. Door de behoefte aan een toekomstbestendige, robuuste en veilige missiekritische communicatievoorziening voor de hulpdiensten én de eindige levensduur van het C2000-netwerk (zie Paragraaf 4.5), heeft de Minister van Justitie en Veiligheid in 2019 een verkenning geïnitieerd naar een mogelijke opvolger van het C2000-netwerk. Dit programma staat bekend onder de werknaam NOOVA (Nationale Openbare Orde en Veiligheid Architectuur).

4.2 Het programma NOOVA

Een multidisciplinair team onder leiding van het Ministerie van Justitie en Veiligheid en met vertegenwoordigers van de vier hoofdgebruikers van C2000 (politie, brandweer, ambulancezorg en Defensie) is in 2019 met de verkenning aan de slag gegaan. In deze verkenning is gekeken naar de mogelijkheden voor missiekritische communicatie voor

¹⁸ www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/communicatie-hulpdiensten-c2000/c2000

spraak en breedbandige data. Een voorziening gebaseerd op mobiel breedband, dat wil zeggen 4G en hoger, bleek het meest aan te sluiten bij de wensen en behoeften van de huidige gebruikers van C2000. Mobiel breedband op basis van open standaarden (3GPP) is toekomstbestendig, schaalbaar en biedt ruimte voor innovatie en ontwikkeling. De verkenning heeft ook opgeleverd dat de overgang naar een nieuw missiekritisch systeem gefaseerd moet worden uitgevoerd.

In een haalbaarheidsstudie¹⁹ zijn verschillende toekomstige scenario's onderzocht om vanaf 2025 gebruik te kunnen maken van missiekritische breedbandcommunicatie in Nederland. Hierbij is onderzocht of de overheid zelf een nieuw netwerk dient te bouwen en te beheren, zoals met C2000 maar dan gebaseerd op 4G/5G, of dat men beter gebruik kan maken van de bestaande mobiele netwerken in Nederland van KPN, T-Mobile en VodafoneZiggo met aanvullende functies ter ondersteuning van missiekritische communicatie. De Nederlandse mobiele 4G- en 5G-netwerken behoren immers tot de beste van de wereld²⁰.

De eerste optie werd als niet haalbaar beschouwd door:

1. De grote investeringen en operationele lasten in dit scenario, dit is grofweg tweemaal zo duur als het gebruik van capaciteit van MNOs (Mobiele Netwerk Operators);
2. De lange(re) doorlooptijd om een eigen netwerk op te bouwen, dat wil zeggen de selectie van de leverancier en de realisatie van een radionetwerk met voldoende antenne-opstelpunten;
3. Onvoldoende allocatie van radiospectrum in het Nationale Frequentieplan (NFP) voor een eigen breedbandig 4G/5G-netwerk²¹.

Bovendien zijn de risico's van een project waarin een nieuw mobiel radionetwerk moet worden gerealiseerd voor de overheid groot. Er zijn wel aanvullende functies nodig in de huidige mobiele netwerken om missiekritische communicatie te ondersteunen, bijvoorbeeld dat hulpverleners - vanuit optimale radiodekking en beschikbaarheid - niet afhankelijk zijn van één enkele MNO maar gebruik kunnen maken van meerdere netwerken. In de praktijk is dit mogelijk middels nationale roaming op de drie netwerken, waarbij men gebruik maakt van NOOVA als Mobiele Virtuele Netwerk Operator (MVNO) voor OOV-gebruikers.

Ook in andere landen zoals het Verenigd Koninkrijk, België, Frankrijk, Finland en de Verenigde Staten is gekozen voor mobiel breedband via bestaande mobiele radionetwerken met een gefaseerde migratie. De indruk bestaat dat landen in de regel besluiten tot het gebruik van bestaande mobiele netwerken omdat een eigen OOV-netwerk eenvoudigweg te kostbaar wordt.

4.3 Beschouwde OOV-use cases

Bezien vanuit de hulpdiensten draait missiekritische communicatie om de uitwisseling van informatie die onmisbaar is voor hun tactische en operationele inzet. Dit betreft informatie over de locatie, situatie en context zodat de hulpverlener weet wat hij ter plaatse kan verwachten en welke hulpverlening nodig is. Hulpverleners maken gebruik van de operationele informatiesystemen die gekoppeld zijn met bron-databases en de meldkamer.

De nieuwe mobiele breedbandvoorziening die binnen NOOVA wordt ontwikkeld, dient zowel de bestaande communicatie: spraak via telefonie of mobilofoon (*push-to-talk*), paging en SDS te ondersteunen als nieuwe vormen van informatie-uitwisseling zoals real-time locatiebepaling, bodycams, de inzet van drones, het gebruik van sensoren, maar ook het gebruik van moderne messaging-diensten en het snel kunnen delen van beelden. Ook het

¹⁹ "Haalbaarheidsonderzoek naar de toekomst van missiekritische breedbandcommunicatie in Nederland", Strict/VKA, juni 2020

²⁰ https://www.umlaut.com/uploads/documents/Reports-Certificates/2023_Mobile-Network_Test_NL_umlaut.pdf

²¹ 2x 3 MHz in 700 MHz-band en 2x 5 MHz in de *guard band*

toekomstig gebruik van Augmented en Virtual Reality-toepassingen voor OOV is in NOOVA voorzien. Ook mobiele communicatie binnen gebouwen is essentieel bij uitval van indoor-netwerken en elektriciteitsvoorzieningen. Dit is vooral ook voor de brandweer van belang.

Naast de aangewezen gebruikers politie, brandweer, ambulance en Defensie is de wens dat op termijn ook gelieerde gebruikers zoals de wegininspecteurs van Rijkswaterstaat, reddingsbrigades, stadswachten en crisispartners (waterschappen, drinkwaterbedrijven, energieleveranciers en telecomaanbieders) bij calamiteiten gebruik kunnen maken van NOOVA.

4.4 Technische achtergrond

4.4.1 C2000

Zoals opgemerkt is C2000 gebaseerd op de standaard TETRA (Terrestrial Trunked Radio) en biedt extra mogelijkheden ten opzichte van GSM, bijvoorbeeld op het gebied van groepsgesprekken en directe communicatie tussen de portofoons, de zogenaamde DMO (*Direct Mode Operation*). Het C2000-systeem heeft op dit moment een radiodekking van 97,8%. Nederland behoort daarmee in Europa tot de landen met de beste TETRA-netwerkdrukking voor OOV. C2000 maakt gebruik van eigen zendmasten. Dit zijn er ruim 600 met masthoogten van 45 tot 53 meter. Daarnaast zijn er aanvullende voorzieningen voor indoor-dekking op grotere openbare locaties (*special coverage locations* zoals Schiphol, winkelcentra, treinstations en tunnels).

C2000 bestaat uit drie componenten:

- Het T2000 (TETRA) netwerk voor de spraak- en datacommunicatie (in de spreektaal wordt met C2000 meestal het T2000-systeem bedoeld);
- Het P2000 (Paging) alarmeringsnetwerk en
- Het meldkamerbedieningssysteem M2000.

T2000 wordt door alle disciplines gebruikt terwijl P2000 met name is bedoeld voor brandweer- en ambulancepersoneel die met dit systeem 'opgepiept' kunnen worden. T2000 en P2000 zijn volstrekt gescheiden. Voor T2000 zijn de frequentiebanden 380-385 MHz (mobiel) en 390-395 MHz (vast) in gebruik. P2000 maakt gebruik van de frequentie 169,650 MHz.

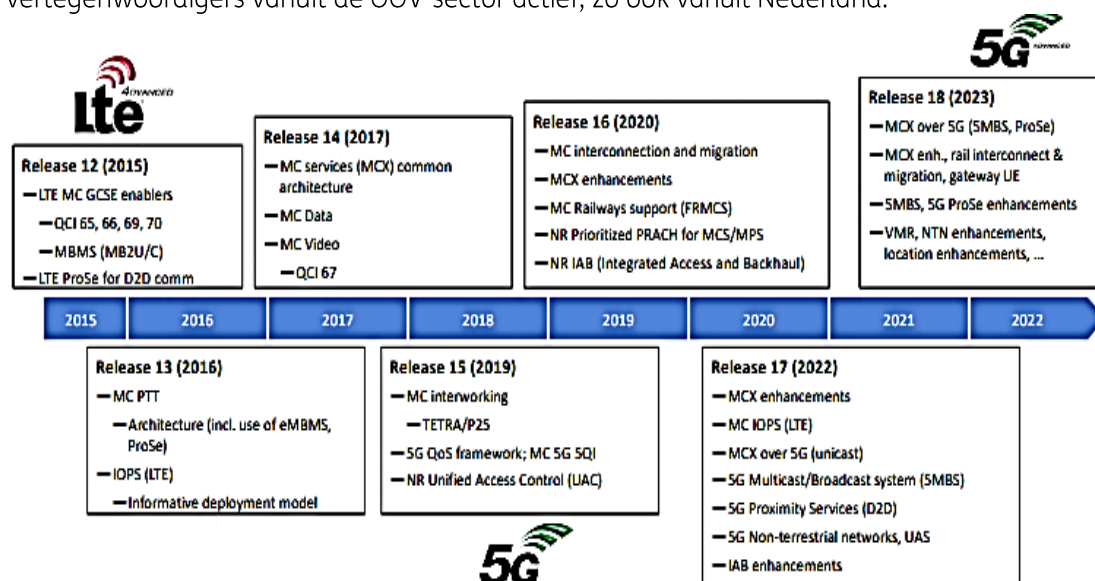
C2000 is als technologie uitontwikkeld en niet geschikt voor breedbandige datacommunicatie.

4.4.2 3GPP-gestandaardiseerde Mission Critical-toepassingen

Om aan de verwachtingen van de OOV-sector te voldoen, werd binnen het 3rd Generation Partnership Project (3GPP) gestart met het specificeren van Mission Critical (MCX)-toepassingen via 4G (LTE) en 5G. MCX-toepassingen verwijzen naar breedbandkritieke communicatietoepassingen en de onderliggende infrastructuur die de OOV en rampenbestrijding ondersteunt. De standaardisatie van MCX-toepassingen werd in 2013 geïnitieerd door de oprichting van een nieuwe werkgroep, System Architecture WG6 - SA6. Deze groep is binnen 3GPP verantwoordelijk voor de technische specificaties voor MCX te definiëren, ontwikkelen en onderhouden.

MCX-toepassingen bestaan uit Mission Critical Push-To-Talk (MCPTT), Mission Critical Data (MCData) en Mission Critical Video (MCVideo)-toepassingen. De eerste wereldwijde MCPTT-standaard werd gepubliceerd in 2016 (Release 13) en is verder geëvolueerd met

verbeteringen in Releases 14 t/m 18, zie figuur 5. In de SA6-groep zijn ook vertegenwoordigers vanuit de OOV-sector actief, zo ook vanuit Nederland.



Figuur 5: MCX-functionaliteit in verschillende 3GPP-versies, vanaf Release 12 [bron: 3GPP]

In de specificaties is vastgelegd op welk manier MCX-verkeer prioriteit krijgt op 4G- en 5G-netwerken. Er zijn ook aanvullende specificaties voor groepscommunicatie en voor directe communicatie tussen randapparaten (*device-to-device* ofwel D2D, vergelijkbaar met DMO binnen C2000) en relay-functies, waarbij een randapparaat als relay node fungeert richting het mobiele netwerk. Het bereik van D2D via mobiele toestellen is beperkt door restricties van het zendvermogen en de relatief geringe effectieve antennehoogte van toestellen. Om het bereik van D2D te vergroten wordt gewerkt aan aanvullende specificaties voor randapparatuur voor de OOV-sector, de zogenoemde High-Power UE (User Equipment).

Het succes van deze op 3GPP gebaseerde MCX-standaarden heeft de basis gevormd voor wereldwijde commerciële uitrol van kritische communicatie-oplossingen in toonaangevende markten zoals in Korea, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten. In de Verenigde Staten maakt de OOV-sector sinds 2018 gebruik van FirstNet (*First Responders Network*), het landelijke mobiele netwerk voor de OOV-sector. De federale overheid heeft hiervoor in maart 2017 een contract voor 25 jaar gesloten met AT&T. Deze mobiele operator heeft het NPSBN (*Nationwide Public-Safety Broadband Network*) uitgerold in alle 50 staten sinds 2018. Het radionetwerk van AT&T voor FirstNet maakt gebruik van de 700 MHz-band (band 14) waarin 2x10 MHz beschikbaar is voor OOV. Dit is vastgelegd in een wettelijk besluit, de Spectrum Act, uit 2012. Band 14 mag door AT&T ook commercieel gebruikt worden voor andere dan FirstNet-gebruikers, maar FirstNet-gebruikers hebben te allen tijde voorrang. In december 2021 waren er meer dan 19.500 openbare veiligheidsinstanties en -organisaties met meer dan 3 miljoen aansluitingen, c.q. toestellen die gebruik maakten van FirstNet. De radiodekking van FirstNet was meer dan 95%.

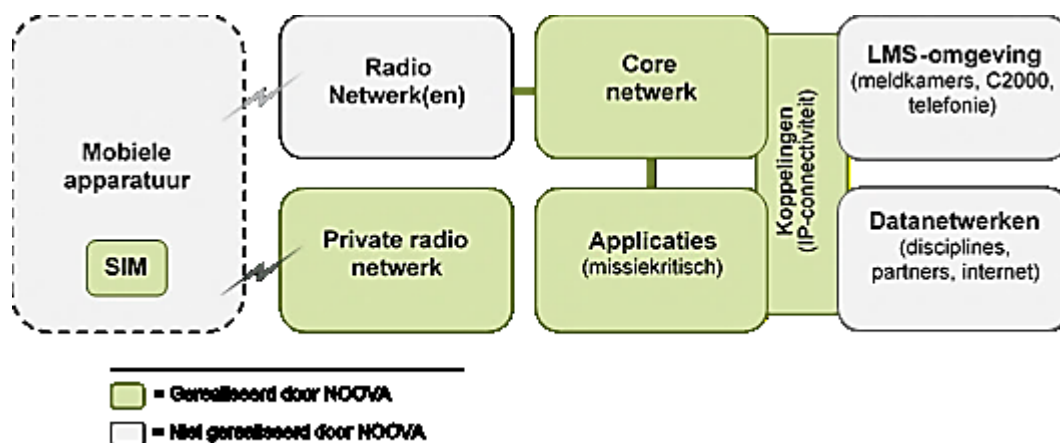
Binnen Europa worden ook MCX-netwerken uitgerold, zoals het Emergency Services Network (ESN) via de mobiele operator EE in het Verenigd Koninkrijk en Astrid in België. Astrid functioneert via alle mobiele operators, met prioriteit op het Proximus netwerk.

4.5 Huidige status en toekomstige planning

Het huidige contract van het C2000-netwerk dat sinds 2020 met leverancier Hytera is afgesloten, loopt tot mei 2025 met een optie tot verlenging tot mei 2027. Naar verwachting kan zonder grote financiële investeringen het C2000-netwerk na mei 2027 niet operationeel blijven. Tot 2025 wordt het bestaande netwerk in stand gehouden met de mogelijkheid tot uitbreidingen van zowel outdoor- als indoor-opstelpunten mochten er nieuwe dekkingsproblemen ontstaan zoals bij nieuwbouw.

De hulpverleners kunnen sinds enige jaren ook al gebruikmaken van een push-to-talk-app op smartphones als terugvalvoorziening indien C2000 onverhoopt niet werkt. Deze app is te gebruiken via (*best effort*) mobiel internet of via indoor Wi-Fi-netwerken.

Het NOOVA-programma heeft tot taak om de missiekritische communicatie voor OOV via spraak, push-to-talk en breedbandige data beschikbaar te maken in 2025. Binnen het programma is een architectuur opgesteld met bouwblokken die onderdeel zijn van de nieuwe missiekritische voorziening NOOVA, zie figuur 6.



Figuur 6: Scope van NOOVA met 'bouwblokken' die binnen NOOVA worden gerealiseerd [bron: NOOVA]

In december 2022 is een marktverkenning gestart. Hierin zijn marktpartijen bevraagd naar hun zienswijze betreffende de technische mogelijkheden voor deze voorziening. De uitkomsten van de marktverkenning worden gebruikt voor de verwerving van de nieuwe missiekritische voorziening. Deze zal bestaan uit verschillende onderdelen: nationale roaming-diensten met prioriteit via de MNOs, koppeling naar een eigen (mobiele) infrastructuur voor OOV-gebruikers en generieke en specifieke randapparatuur.

Bij de verwerving zullen aanvullende technische oplossingen worden geëist naast prioriteit voor spraak- en dataverkeer bij zowel regulier gebruik, grote evenementen als bij calamiteiten en maatregelen voor hogere beschikbaarheid zoals noodstroomvoorzieningen van zendmasten. Denk hierbij aan oplossingen voor indoor-dekking zoals D2D en relay-voorzieningen, ondersteuning van *air-to-ground* communicatie voor helikopters en drones en standalone-oplossingen voor voertuigen of in drones voor connectiviteit op locaties zonder- of met zeer slechte 4G- of 5G-dekking zoals op de Veluwe. Doordat de invoering gefaseerd zal plaatsvinden, kunnen OOV-organisaties overstappen bij beëindiging van lopende mobiele contracten en wanneer nieuwe MCX-functies beschikbaar komen voor de migratie van C2000 naar NOOVA.

5 Terahertz-communicatie

5.1 Inleiding

Anders dan de aanduiding misschien suggereert, wordt gesproken over (draadloze) terahertz-communicatie als hiervoor radiofrequenties van 300 GHz tot 10 THz (10.000 GHz) worden gebruikt. Als ondergrens wordt ook wel 100 GHz gehanteerd. In dat geval is er wel wezenlijke overlap met de ITU-definitie van millimetergolffrequenties ofwel mmWave-frequenties van 30-300 GHz. Van 100 tot 300 GHz wordt wel het sub-terahertz-gebied genoemd. Het frequentiegebied van 300 GHz tot 1 THz wordt soms aangeduid met *lower terahertz* terwijl het frequentiedomein daarboven, tot 10 THz, bestempeld wordt als *higher terahertz* of *true terahertz*.

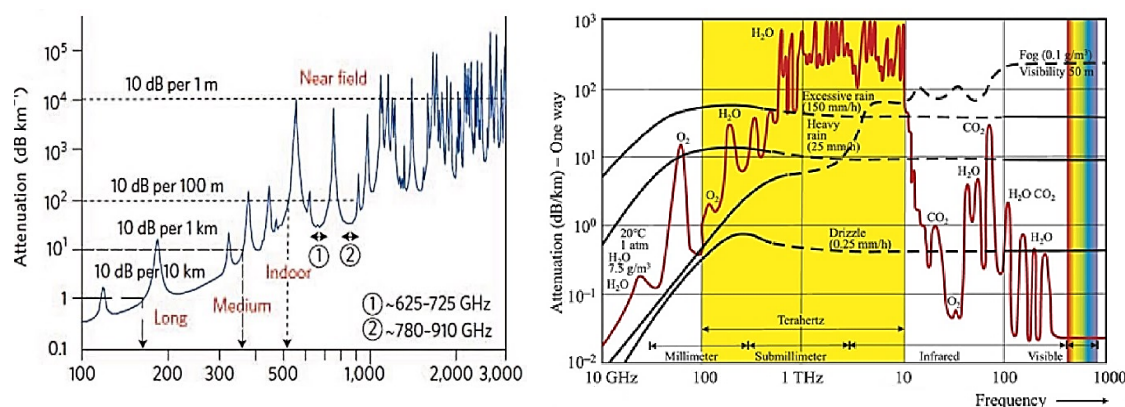
Algemeen wordt voorzien dat terahertz-frequenties een rol gaan spelen in 6G, niet alleen omdat dan de capaciteit ten opzichte van 5G minstens een ordegrrootte kan toenemen maar ook door de specifieke kenmerken van radiogolven op frequenties in deze band die vooral zijn gerelateerd aan hun propagatie-eigenschappen. Paragraaf 5.2 bespreekt deze propagatie-effecten waarbij ook de stand van zaken rond propagatiemodellering wordt aangegeven. In Paragraaf 5.3 komen inherente eigenschappen van terahertz-communicatie en een aantal communicatietoepassingen aan bod zoals deze nu zijn vastgesteld, met name in het kader van 6G. Vervolgens wordt in Paragraaf 5.4 ingegaan op de technologische realiseerbaarheid van terahertz-communicatie, de spelers en perspectieven voor de toekomst. Paragraaf 5.5 geeft de stand van zaken aan rond regelgeving en standaardisatie van terahertz-communicatie. In kort bestek gaat Paragraaf 5.6 in op de positie van terahertz-communicatie ten opzichte van die van VLC (Visible Light Communication). Paragraaf error! reference source not found. sluit dit hoofdstuk samenvattend af.

5.2 Propagatie van terahertz-radiogolven

5.2.1 Algemeen

Zoals op andere radiofrequenties neemt ook op terahertz-frequenties de signaaldemping op het directe pad tussen zender en ontvanger progressief toe met de lengte van dit pad. Daarbij hangt de demping ook af van de radiofrequentie, ook dit is geen ongewoon fenomeen. Deze reguliere vorm van propagatiedemping wordt vaak aangeduid met vrije-ruimtedemping of uitbreidingsdemping, verwijzend naar de sferische spreiding van de elektromagnetische golfenergie.

Specifieker voor mmWave-frequenties en hoger is dat naast uitbreidingsdemping sprake is van een tweede dempingscomponent als gevolg van absorptie van de elektromagnetische energie door atmosferische gasmoleculen, zie figuur 7. Deze gasabsorptie door bijvoorbeeld zuurstof en vooral waterdamp piekt op bepaalde radiofrequenties waar opname van elektromagnetische energie door de moleculen gepaard gaat met resonantie.



Figuur 7: Verloop van gasabsorptie in de terahertz-band (l) en in de bredere frequentie-omgeving (r)
[bron: NDR, 2016]

De potentieel bruikbare frequenties voor communicatie bevinden zich gewoonlijk tussen deze pieken, bijvoorbeeld in de transmissievensters 1 en 2, links in figuur 7. Zoals ook op lagere radiofrequenties, bijvoorbeeld rond 60 GHz, neemt de signaaldemping door dit absorptiefenomeen toe met de afstand. In het terahertz-gebied echter, worden sommige pieken pas op bepaalde afstanden manifest²². Zo zijn bij toename van de afstand van 1 tot 10 meter de transmissievensters, dat wil zeggen die delen van het frequentiespectrum waarin transmissie nog mogelijk kan zijn, een orde-grootte verminderd. De frequentieselectiviteit en daarmee de beschikbare bandbreedte zijn dus afhankelijk van de afstand van de ontvanger tot de bron.

De totale trajectdemping is door bovenbeschreven twee fenomenen in het terahertz-domein zodanig dat deze uitgaande van realistische kenmerken van gebruikersapparatuur de reikwijdte beperkt tot circa 50 meter²³. Een belangrijk uitgangspunt voor deze maximale richtwaarde is dat (effectief) sprake is van een symmetrische richtverbinding tussen bron en ontvanger; als één van de antennes omni-directioneel is, zou het bereik wezenlijk dalen, tot circa twee meter. Wel moet worden opgemerkt dat de aangegeven waarde van 50 meter een ruwe indicatie is. De werkelijk haalbare reikwijdte is, zoals ook in andere frequentiegebieden, afhankelijk van meerdere factoren zoals de radiofrequentie, bandbreedte, zendvermogen, ontvangstgevoeligheid en de versterkingswaarden van de toegepaste antennes (*gains*). Zo kon in de zomer van 2021 in Berlijn een statische outdoor punt-puntverbinding op frequenties in het sub-terahertz-gebied worden gerealiseerd over 100 meter²⁴.

De beperkte reikwijdte zorgt soms voor bedenkingen bij het gebruik van terahertz-golven: staat door de toepassing van terahertz-frequenties de openbare omgeving straks niet vol met antennes en reflecterende elementen- nog meer dan bij 5G²⁵?

5.2.2 Propagatiemodellering

Propagatiemodellering is het zodanig karakteriseren van de voortplanting ofwel propagatie van radiogolven in een bepaald frequentiegebied dat voor een gegeven fysieke omgeving een voorspelling kan worden gedaan rond de signaalkwaliteit van de draadloze verbindingen

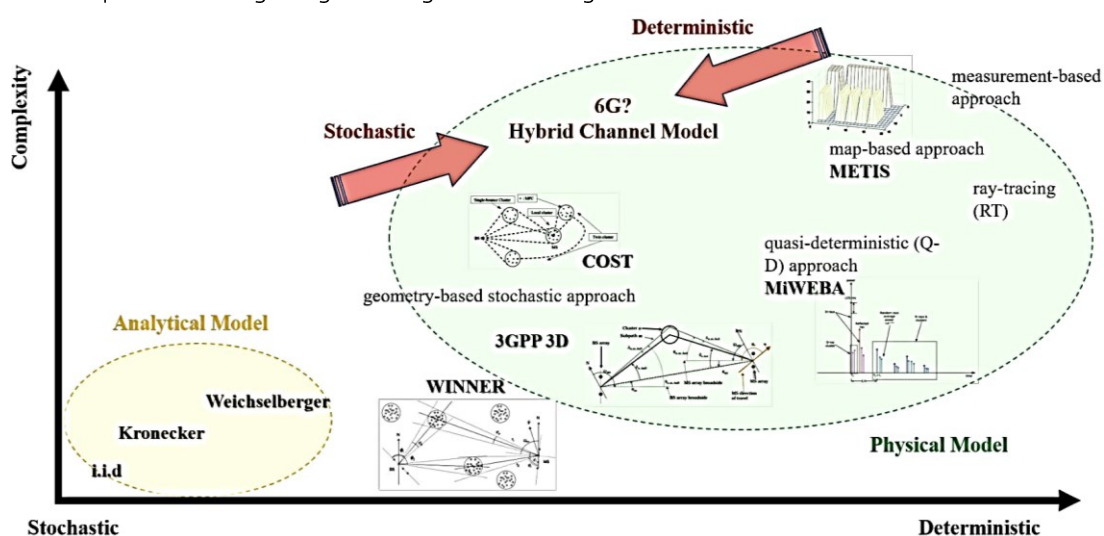
²² H. Sardedde et al: *An overview of signal processing techniques for terahertz communications*, IEEE proc. 2021

²³ I. Siaud: *THz Communications: an overview and challenges*, <https://wave-and-thz-com-66.webself.net>

²⁴ <https://tweakers.net/nieuws/185864/lg-verstuurt-data-over-honderd-meter-met-thz-verbinding-voor-6g-test.html>

²⁵ <https://www.ad.nl/tech/providers-slaan-alarm-burgers-in-het-geweer-tegen-5g-masten~a1bade5a/>

in dit frequentiegebied. Zo kan de afhankelijkheid van deze verbindingsskwaliteit van factoren zoals radiofrequentie, te overbruggen afstand en locatie van zender en ontvanger in een bepaalde omgeving, in kaart worden gebracht. De uitkomsten van berekeningen of computersimulaties aan de hand van dit model geven aan welke maatregelen bij het ontwerp van een draadloos (deel)systeem op die frequentie(band) moeten worden genomen om de verbindingsskwaliteit te verbeteren waar en wanneer dat nodig is. Essentieel bij modelvorming (in het algemeen) is wat, en in welke nauwkeurigheid het model moet beschrijven ten behoeve van de karakterisering van het uiteindelijke (deel)systeem, in casu van 6G. Er bestaan twee basisbenaderingen, zie figuur 8: de statistische ofwel stochastische en de deterministische. De eerste aanpak vindt vooral toepassing bij het testen en de ontwikkeling van specifieke systemen, de deterministische benadering met name bij site-planning voor MNOs. Deterministische modellering wordt vooral toegepast als in een specifieke omgeving een hoge nauwkeurigheid is vereist.



Figuur 8: Methoden voor kanaalmodellering en bestaande modellen [bron: IEEE 2022]

Voor statistische of stochastische benaderingen zijn veel metingen nodig waarvan de resultaten ten grondslag liggen aan relatief eenvoudige analytische en qua executie snelle modellen. Het gaat hier vooral om zeer complexe processen die zich moeilijk kwantitatief laten beschrijven, bijvoorbeeld omdat nog niet alles theoretisch goed genoeg wordt doorgrond.

Deterministische modellen zijn daarentegen gestoeld op theoretisch inzicht, in casu op de toepassing en numerieke oplossing van de fundamentele veldvergelijkingen van Maxwell. Voorbeelden hiervan zijn *ray tracing* (RT) en *finite-domain time-domain* (FDTD). Er zijn in principe geen metingen nodig maar de mathematische complexiteit voor de kwantitatieve beschrijving is hoog en de modelexecutie duurt daardoor lang. Beide basisbenaderingen hebben dus hun eigen voor- en nadelen. figuur 8 illustreert de onderlinge dualiteit van deze benaderingen.

De geringe golflengte van terahertz-golven van 30 μm tot 1 mm bemoeilijkt de propagatiemodellering. Naast de interactie met gasmoleculen zoals hierboven beschreven, is sprake van een sterk dopplereffect, een zeer groot transmissieverlies door lichamen en objecten en van verstrooiing aan ruwe oppervlakken. Deze effecten zijn niet alleen sterker in het terahertz-domein dan voor lagere radiofrequenties maar vele hebben ook een statistisch karakter²⁶. Als startpunt voor terahertz-propagatie kan voor met name site-

²⁶ <https://ieeexplore.ieee.org/document/9794668>

planningsdoeleinden een deterministisch model genomen worden maar dit zal voor terahertz-golven in principe niet voldoende zijn. Het gevolg is dat er voor dit frequentiegebied een keuze moet worden gemaakt voor een samengestelde benadering, die deels deterministisch en deels stochastisch is. Voor deze hybride methode zijn meerdere methoden beschikbaar die variëren in aard en complexiteit, zie figuur 8. Voor 6G is naast de modellering van radiokanaaleigenschappen zoals demping, delay spread, capaciteit et cetera, in het algemeen adequate modellering nodig van UM-MIMO (Ultra-Massive Multiple Input Multiple Output) en van de effecten door micro-mobiliteit (*small-scale mobility*), dat wil zeggen de draaibeweging van de gebruikersterminal (de vereiste nauwkeurigheid van het (deel)model hangt af van het doel waarvoor het gebruikt wordt. Zo zul je bijvoorbeeld in micro-mobiliteit eerder als UE-ontwikkelaar geïnteresseerd zijn dan als MNO). Voor beide aspecten is het dan ook noodzakelijk dat zowel de *line-of-sight* (LOS) propagatie, inclusief bijdragen van multipad-componenten, wordt beschreven als de invloeden van terahertz-antennearrays die voor UM-MIMO kunnen bestaan uit honderden tot duizenden antenne-elementen. Overigens is in terahertz-communicatie de bijdrage van multipadsignalen kleiner dan op mmWaves: de eerste- en tweede orde-paden zijn al verzwakt met gemiddeld respectievelijk 5 dB en 15 dB²⁷. Hoe dan ook dient het effect van de in de tijd variërende omgeving in het model mee te worden genomen, statistisch dan wel deterministisch. Uit het voorgaande volgt dat de modellering van een laag-mobiele situatie, zoals bij Terahertz (THz)-WLAN het geval kan zijn, een extra uitdaging vormt.

Vooralsnog bestaat dus ten behoeve van 6G de trend naar een hybride modelbenadering waarmee tevens een compromis tussen nauwkeurigheid en efficiëntie wordt bereikt. Het aantal modellen die statistische en geometrische modellen combineren, de zogenoemde GSCMs (Geometry-based Stochastic Channel Models)²⁸, groeit gestaag. Geometrische modellen zijn bijvoorbeeld nodig om verbanden tussen veranderingen van radiogolfrichtingen en gebruikersverplaatsingen of de correlaties tussen radioverbindingen voor meerdere gebruikers te beschrijven. Voorbeelden hiervan zijn er sinds het quasi-deterministische kanaalmodel (Q-D) uit 2000 tot het recente Beyond 5G Channel Model (B5GCM), 3GPP Spatial Channel Model (SCM) en WINNER II. Onderzoek naar propagatiemodellen voor terahertz-frequenties wordt onder meer uitgevoerd door de NextG Channel Modeling Alliance²⁹.

5.3 Inherente eigenschappen en communicatietoepassingen van terahertz-radiogolven

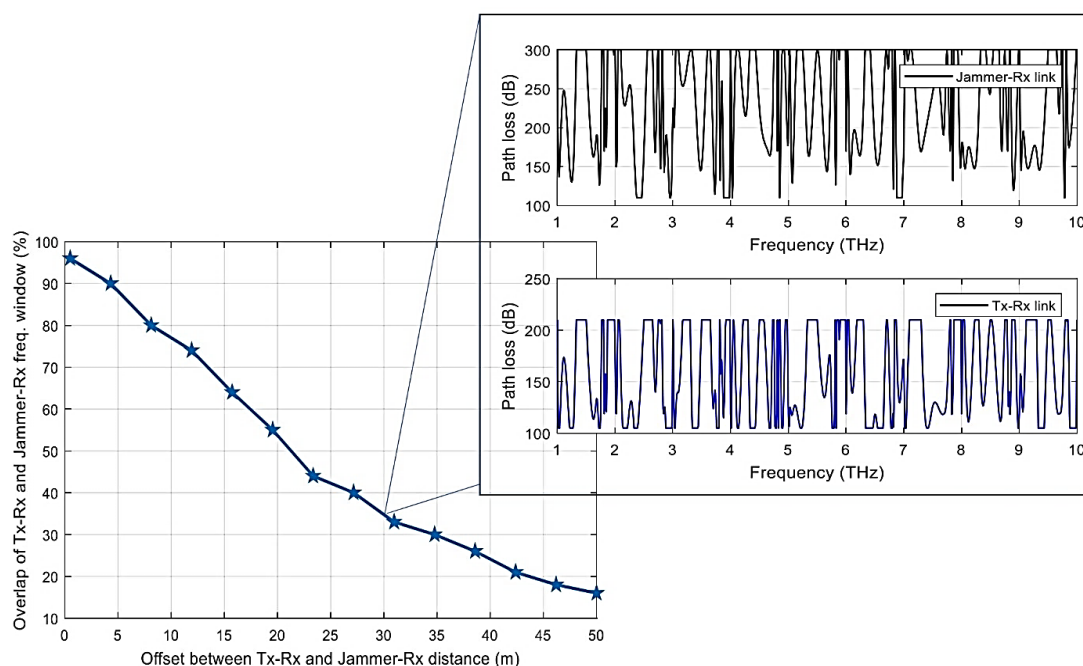
Door de afstandsafhankelijke frequentieselectiviteit zijn de spectrumkenmerken van de trajectdemping tussen een bepaalde zender en ontvanger al snel uniek in vergelijking tot die van het pad tot een andere zender of ontvanger³⁰. In de literatuur spreekt men dan ook wel van *molecular fingerprint*. Dit impliceert dat de ontvanger al minder gevoelig wordt voor interferentie of opzettelijke storing als de afstand tot de gewenste communicatiepartner niet veel verschilt van de afstand tot de verstoorder. Dit effect is aangegeven in figuur 9.

²⁷ H. Srieddeen et al.: *An overview of signal processing techniques for terahertz communications*, IEEE proc. 2021, blz. 8

²⁸ <https://ieeexplore.ieee.org/document/9794668>, blz. 17

²⁹ <https://nextg.nist.gov/>

³⁰ A. Mukherjee: *Jamming Vulnerability of Terahertz Wireless Networks*, MILCOM 2022



Figuur 9: Afnemende spectrumcorrelatie van trajectverliezen met toenemend afstandsverschil tot een terahertz-ontvanger [bron: MILCOM 2022]

In dit voorbeeld is sprake van een opzettelijke verstoorder ofwel een *jammer* maar het principe geldt ook voor onbedoelde interferentie.

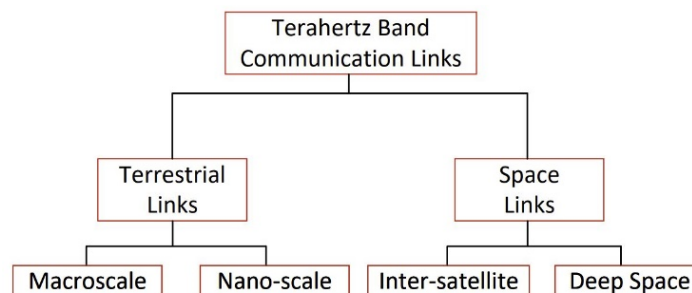
Een tweede inherent gevolg van terahertz-communicatie is dat voor niet-ultrakorte afstandstoepassingen gebruik gemaakt kan worden van zeer nauwe antennebundels van circa 1° . Deze zijn nodig om de trajectdemping deels te compenseren en enig radiobereik te kunnen realiseren. De richtverbindingen die hierdoor ontstaan, ondersteunen in veel gevallen verder de lage gevoeligheid voor al dan niet opzettelijke interferentie zoals hierboven beschreven. Het voldoende snel elektronisch uitrichten en volgen van dergelijke bundels is in het terahertz-domein niet mogelijk met conventionele *phased arrays* en moet uitgeweken worden naar alternatieve concepten zoals Leaky Wave Antennas (LWAs), zie hiervoor verder Hoofdstuk 6.

Zoals eerder aangegeven, kunnen terahertz-antennes bestaan uit vele primaire stralers waardoor MU-MIMO mogelijk wordt. Deze antennes zijn tevens *enablers* voor cell-free MU-MIMO (CFMM, zie Monitor Draadloze Technologie, voorjaar 2022³¹), waar een groot aantal basisstations tegelijkertijd en in dezelfde frequentieband een relatief groot aantal gebruikers kan bedienen; in 5G zijn dit er in de *dual-mode connectivity* slechts twee. De voor CFMM benodigde stringente onderlinge synchronisatie tussen basisstations en de hoge *backhaul*-bandbreedte zijn vooralsnog onderwerpen voor 6G.

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk opgemerkt, zijn op terahertz-frequenties hoge transmissiecapaciteiten mogelijk. Dit is evident toe te schrijven aan de potentiële hoge bandbreedtes in het terahertz-gebied. Uiteraard is de transmissiecapaciteit afhankelijk van de *use case* maar gedacht kan worden aan de orde-grootte van 1 GHz. Zelfs voor de laagste terahertz-frequentie betekent dit een relatieve bandbreedte van slechts 1% met voordelen voor de processing (modulatie en codering). Over de gehele band bezien is de propagatie binnen lagere relatieve bandbreedtes immers minder wisselend dan binnen hogere bandbreedtes.

³¹ TNO 2022 R10816, blz. 36

De beschikbaarheid van de terahertz-band voor communicatie opent in principe de mogelijkheid voor draadloze systemen in diverse omgevingen en toepassingen²⁶ zoals de al genoemde THz-WLAN ofwel Tera-Wi-Fi, draadloze communicatie binnen een apparaat (bijvoorbeeld tussen modules, chips of zelfs binnen een chip), communicatie voor hogesnelheidstreinen, voertuig-tot-voertuigcommunicatie (V2V), communicatie via Uncrewed Aerial Vehicles (UAVs), Tera-IoT in draadloze data centers, *immersive* Virtual Reality, Integrated Access Backhaul (IAB) draadloze terahertz-netwerken en ultra-breedbandcommunicatie tussen satellieten (Tera-Spacecom); in de ruimte is immers geen (wezenlijke) gasabsorptie. Deze grotendeels nog visionaire mogelijkheden laten zich samenvatten in onderstaande taxonomie van terahertz-communicatietoepassingen (figuur 10).



Figuur 10: Taxonomie van terahertz-toepassingen [bron: CRC Press]

5.4 Realiseerbaarheid van terahertz-communicatiesystemen en perspectieven

De realisatie van draadloze systemen in de zin van zendontvangers in het terahertz-domein kan gaan via de elektronische, optische (met een optische signaalgenerator en fotomixer) en de hybride ofwel elektro-optische weg³². Met optische technologieën kunnen hoge bandbreedtes en daardoor navenante transmissiesnelheden worden bereikt, terwijl elektronische radiofrequente schakelingen het voordeel bieden van het realiseren van een relatief hoog zendvermogen.

Hybride systemen zijn zogenoemde plasmonische systemen waarin licht en elektronen van nanodeeltjes met elkaar interacteren. Hierbij worden vooral nieuwe materialen gebruikt zoals grafene²⁶.

Dankzij de vooruitgang in efficiënte terahertz-zendontvangers en -antennes in het laatste decennium worden punt-punt, statische terahertz-communicatiesystemen haalbaar. Zo zijn eind 2022 op 300 GHz met een zogenoemde *microresonator frequency comb*-technologie in combinatie met een ultrasnelle fotodiode, breedband-zendontvangers ontwikkeld met relatief hoog zendvermogen, lage faseruis en een hoge gevoeligheid voor draadloze communicatie³³. Wel moet worden opgemerkt dat ondanks de vorderingen in het terahertz-domein zowel de vermogens als de efficiëntie van vermogensversterkers (in de orde van een paar procent) nog heel beperkt zijn. Hier ligt dus nog een uitdaging ten aanzien van de energie die nodig is voor praktische terahertz-systemen. Verder kan vermeld worden dat LG in samenwerking met Fraunhofer al in 2021 een vermogensversterker heeft ontwikkeld waarmee tussen 155 GHz en 175 GHz een stabiel signaal van maximaal 15 dBm (31 mW) kon worden gegenereerd²⁴. Deze technologie biedt mogelijkheden voor *backhaul*-

³² H. Srieddeen et al.: *Next Generation Terahertz Communications: a Rendezvous of Sensing, Imaging, and Localization*, IEEE Communications Magazine, May 2020, blz. 69-75

³³ <https://arxiv.org/pdf/2210.15881.pdf>

verbindingen met ultra-hoge capaciteit, tot in de Tbits/s. Deze toepassing is later, in 2022, verder uitgewerkt voor nog grotere afstanden³⁴. De meer mobiele toepassingen zoals genoemd in de vorige paragraaf, zullen echter nog jaren op zich laten wachten. Zo is de aanvankelijke gedachte om terahertz mobiele communicatie een onderdeel van 6G te laten zijn, recent in een publicatie in twijfel getrokken³⁵.

5.5 Regelgeving en standaardisatie

De ITU Radio Regulations adresseert nog nauwelijks het terahertz-spectrum: vele frequentiebanden tussen 275 en 1000 GHz worden geïdentificeerd voor gebruik door passieve diensten zoals radioastronomie, aardobservatie en ruimteonderzoek³⁶. Wel heeft in de Verenigde Staten de Federale Communications Commission (FCC) nieuwe experimentele licenties op 95 GHz en 3 THz uitgebracht³⁷.

Op het gebied van standaardisatie kan worden opgemerkt dat al in 2017 een 300 GHz draadloze communicatiestandaard werd uitgebracht: IEEE 802.15.3d-2017 voor 100 Gbit/s in de band van 252-321 GHz. Recente inspanningen zijn erop gericht om het frequentiegebied te vergroten naar ongeveer 450 GHz³⁸.

5.6 Terahertz-communicatie vergeleken met Visible Light Communication

In vergelijking met optische media of Visible Light Communication (VLC, circa 400-800 THz) hebben terahertz-signalen minder last van uitlijningsproblemen, omgevingslicht en atmosferische verschijnselen zoals turbulentie, scintillatie en mist. Hierdoor kan terahertz-communicatie aanvullend zijn op VLC (en mmWave-communicatie) omdat met VLC-schakelingen nog meer bandbreedte is te realiseren dan met terahertz-hardware en uiteraard het VLC-kanaal zichtbaar is. Specifiek voor de toepassing van intra-chip communicatie biedt elektronische terahertz-hardware het voordeel dat hetzelfde materiaal kan worden gebruikt.

Voor draadloze communicatie aan de hoge kant van het terahertz-bereik zal door de aanzienlijke waterdampabsorptie boven 1 THz er in principe een gat blijven bestaan met het infrarode spectrum.

5.7 Op hoofdlijnen

Radiopropagatie in het terahertz-domein is veel complexer dan voor lagere frequentiegebieden. Hierdoor bestaan naast de intrinsieke hoge transmissiecapaciteit ook theoretische mogelijkheden voor fysieke-laag-beveiliging en interferentiebestrijding maar wordt de realisatie van bepaalde toepassingen, met name van laagmobiele communicatie zoals THz-WLAN ook aanmerkelijk bemoeilijkt.

De modelvorming van terahertz-propagatie is navenant complex en is nog volop in ontwikkeling. Hetzelfde geldt ook voor de terahertz-hardware, hoewel goede stappen worden gezet in met name de realisatie van hogere zendvermogens. Voorziene eerste toepassingen zijn dan ook backhaul punt-punt-verbindingen met ultra-hoge capaciteit en

³⁴ Sen et al.: *Multi-kilometre and multigigabit-per-second sub-terahertz communications for wireless backhaul applications*, Nat. Electron. 6, 2022, blz. 164–175; doi:10.1038/s41928-022-00897-6

³⁵ <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frcmn.2023.1151324/full>

³⁶ https://www.itu.int/dms_pub/itu-s/opb/jnl/S-JNL-VOL2.ISSUE7-2021-A03-PDF-E.pdf

³⁷ <https://arxiv.org/pdf/2208.01235.pdf>

³⁸ I. Hosako, T. K. (2022): IEEE 802.15.3ma channel plan, IEEE 802.15-22-0414-00- 03ma-ieee

verbindingen binnen apparatuur, met name binnen en tussen chips. De efficiëntie waarmee terahertz-golven worden gegenereerd, is nog beperkt tot enkele procenten zodat op dit terrein nog een wezenlijke uitdaging ligt.

De internationale regulering anticipeert nog niet echt op terahertz-communicatie. Anderzijds is THz-WLAN al gestandaardiseerd en is deze nog in ontwikkeling. Het ziet ernaar uit dat deze standaardisatie ver vooruit loopt op de technologie, gezien recente verwachtingen dat laagmobiele terahertz-communicatie eerder iets voor 7G zal worden dan voor 6G. VLC vormt dan ook vooralsnog een reële concurrent van terahertz-communicatieverbindingen hoewel eigenschappen van beide media veelal onderling aanvullend zijn. Het is dan ook te verwachten dat op lange termijn VLC- en terahertz-oplossingen naast elkaar zullen bestaan. Vanwege de aanzienlijke waterstofabsorptie tussen 1 THz en het infraroodgebied lijkt hier sprake te zijn van een intrinsiek on-exploiteerbaar spectrumdeel.

6 Intelligent Reflective Surfaces voor draadloze communicatie

6.1 Inleiding

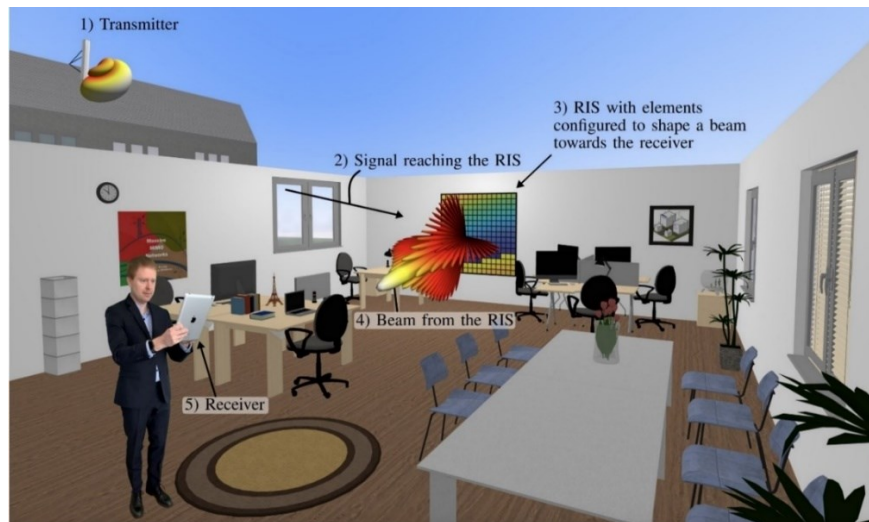
Een Intelligent Reflective Surface (IRS) bestaat uit een dun en goedkoop, behangachtig oppervlak dat met behulp van software dynamisch en in *near real-time* de voortplanting van radiogolven die dat oppervlak treffen kan beïnvloeden. Het doel van IRS is om de bereikbaarheid en ontvangstefficiëntie van radiogolven bij het gebruikerstoestel ofwel UE (User Equipment) te verbeteren en hiermee ook de netwerkcapaciteit.

Een IRS wordt ook wel aangeduid met RIS (Reconfigurable Intelligent Surface, letterlijk vertaald een her-configureerbaar intelligent oppervlak). In dit hoofdstuk is de arbitraire keuze gemaakt om primair IRS en sporadisch RIS te gebruiken. In de literatuur wordt ook wel gesproken van *software-controlled metasurfaces* hoewel hiermee eigenlijk een implementatievorm wordt aangeduid.

De beïnvloeding van de radiovoortplanting vindt plaats door de reflecterende elementen van de IRS voor elke invallende radiobundel gelijktijdig te configureren. Afhankelijk van de uitvoering (zie Paragraaf 6.5) kunnen de afmetingen van deze elementen (in horizontale- en verticale richting) ongeveer een vijfde tot een tiende van de golflengte bedragen. Een en ander betekent dat IRS pas realistisch inzetbaar wordt voor SHF (Super High Frequency)-frequenties en hoger. SHF ligt tussen 3 en 30 GHz en correspondeert met een golflengte van 1 tot 10 cm. Hoewel IRS meestal in verband wordt gebracht met 6G, impliceert dit dat IRS ook toepasbaar kan zijn voor de 5G-frequenties 3,5 GHz en 26 GHz.

Om de radiogolf te bundelen en te richten wordt zonder dat per element een aparte (radiofrequente) actieve unit nodig is, de fase van elk element van de IRS zodanig veranderd dat het signaal in de richting van de ontvanger wordt gebundeld. Hierdoor wordt de signaalsterkte bij de gewenste ontvanger geoptimaliseerd terwijl het signaal in de richting van andere gebruikers juist wordt onderdrukt. Hierdoor wordt multi-user (MU) interferentie tegengegaan. Afhankelijk van de uitvoering van een element is het ook mogelijk om andere golfkenmerken zoals amplitude en polarisatie te beïnvloeden.

In figuur 11 is het IRS/RIS-principe geïllustreerd voor een veel beschouwde *use case* waarin een indoor-gebruiker door een IRS in dezelfde kamer wordt bediend via een geoptimaliseerd radiopad. De in deze figuur aangegeven kleurcode op de IRS geeft een indicatie voor de fasedraaiing die nodig is om de bundel te sturen in de gewenste richting.

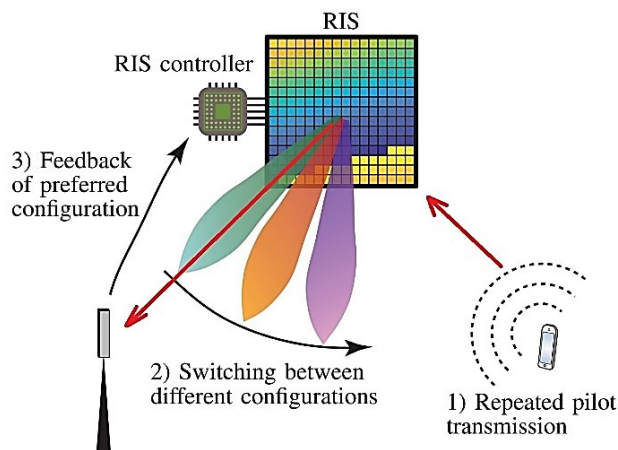


Figuur 11: Principe van IRS/RIS, in casu voor het bedienen van een indoor-gebruiker vanuit een basisstation
[bron: Björnson et al, IEEE 2020]

De bundel- en richtfunctie van IRS is analoog aan die van *smart beamforming* maar daar vindt deze functie alleen in de zender en ontvanger plaats. Hierbij is zowel energie nodig als een vrij-zichtlijn ofwel LOS (*line-of-sight*) tussen zender en ontvanger. De energie voor sturing van een IRS is verwaarloosbaar klein; een IRS is dus nagenoeg passief. De benodigde energie voor de dynamische configuratie van de elementen zou bij een relatief eenvoudige besturing geleverd worden door bijvoorbeeld zonnecellen of zelfs door andere radiogolven in de directe omgeving (zie Paragraaf 6.4). De bundelvormende eigenschap van IRS wordt dan ook wel *passive beamforming* genoemd, als onderscheid met phased array- en MIMO-concepten waar sprake is van *active beamforming*. De IRS-besturing kan ook geavanceerder en accurater, zoals hierna zal blijken. In dat geval neemt echter ook het energieverbruik navenant toe.

Fundamenteel gezien beïnvloedt IRS-technologie de radiosignaalpropagatie tussen zender en ontvanger. Dit betekent dat mogelijk zelfs via meerdere IRS-oppervlakken, via gezamenlijke instelling van IRS, zenders en ontvangers, in een multi-user omgeving het geheel aan propagatiecondities wordt geoptimaliseerd. In dit verband wordt dan ook gesproken van *controllable radio environments*. Omdat deze optimalisatie nagenoeg real-time moet verlopen, is dit een zeer complexe aangelegenheid die veel rekenkracht vergt. Voor de sturing van een IRS is *channel state information* (CSI) ofwel actuele statusinformatie van het radiokanaal nodig. Voor het verkrijgen van CSI bestaan twee opties:

- 1) Op de IRS zelf een aantal sensoren aanbrengen. Hierdoor wordt de IRS niet meer nagenoeg passief. In het frequentiedomein wordt dan in een aantal, ruimtelijk gezien nabijgelegen kanalen gemeten die tezamen een geëxtrapoleerd beeld moeten geven van het radiokanaal over de hele band. Dit houdt in dat het kanaal goed gemodelleerd en geparametriseerd moet kunnen worden. Zoals in Hoofdstuk 5 aangegeven, is dit voor mmWaves en terahertz-golven nog een uitdaging;
- 2) Een andere benadering is om via de UE periodiek pilotsignalen uit te zenden en het ontvangen signaal te meten in verschillende IRS-configuraties, bijvoorbeeld door in een bepaald patroon IRS-elementen aan- en uit te schakelen. Het basisstation bepaalt dan de meest optimale IRS-configuratie en voert deze uitkomst terug naar de IRS/RIS-controller die op zijn beurt de IRS instelt, zie figuur 12.



Figuur 12: Regeling via pilotsignalen en standaardconfiguraties [bron (aangepast): Björnson et al, IEEE 2020]

Zelfs als de IRS sensorelementen heeft, is een *feedback loop* nodig om gezamenlijk de IRS-elementen en de bundelvorming bij de zender en ontvanger te configureren. Gedachten gaan dan ook uit naar de toepassing van vormen van AI (Artificial Intelligence) voor de ondersteuning van deze gezamenlijke optimalisatie op basis van het samengestelde pad van UE naar het basistation via de IRS³⁹. De vraag is of de benodigde rekenkracht hiervoor dan toch wezenlijk energieverbruik tot gevolg heeft.

6.2 Fysische begrenzings van het IRS-concept

Ondanks de potentie van het IRS-concept voor de efficiëntieverbetering van signaalontvangst, zijn er fysische aspecten die deze verbetering ook aan banden leggen. Hier wordt niet altijd in de literatuur goed bij stilgestaan hetgeen zou kunnen leiden tot overspannen verwachtingen⁴⁰. Deze relevante fysische processen worden dan ook in deze paragraaf toegelicht.

6.2.1 Verre-veld conditie

Alleen als de afstand van de IRS tot de ontvanger of zender veel groter is dan de grootste afmeting van de IRS, is de ontvangst en reflectie van de golfenergie evenredig met het IRS-oppeervlak en dus met het aantal reflecterende elementen. Met andere woorden: deze afstand moet dus vanuit de IRS gezien, als ‘verre veld’ zijn te beschouwen. Bij het ontvangen en heruitzenden van de samengestelde radiogolf ontstaat zo een *gain* die, zoals bij phased arrays, onder verre veld-conditie evenredig is met het aantal reflecterende elementen. Alleen in deze situatie kan de ontvangen signaalsterkte (of signaal-ruis verhouding) evenredig zijn met het kwadraat van het aantal IRS-elementen.

In het voorbeeld van figuur 11 legt de plaatsing van de IRS in een kamer praktische beperkingen op aan de grootte van het oppervlak ofwel het aantal elementen en daarmee aan de te bereiken efficiëntie. Bij de toepassing van hogere radiofrequenties (met name terahertz-frequenties) kan weliswaar voor een bepaalde, maximaal haalbare omvang van de IRS het aantal elementen toenemen maar tegelijk neemt de trajectdemping meer dan evenredig toe. Bovendien is sprake van demping door het glas van het raam in figuur 11. Dit

³⁹ M. Awais et al: *Deep Residual Denoising Network for IRS-Cascaded Channel Estimation with a Receiver Impairment*, ICTC-2022, Nov. 2022, blz. 1744-1746

⁴⁰ <https://arxiv.org/pdf/2006.03377.pdf>

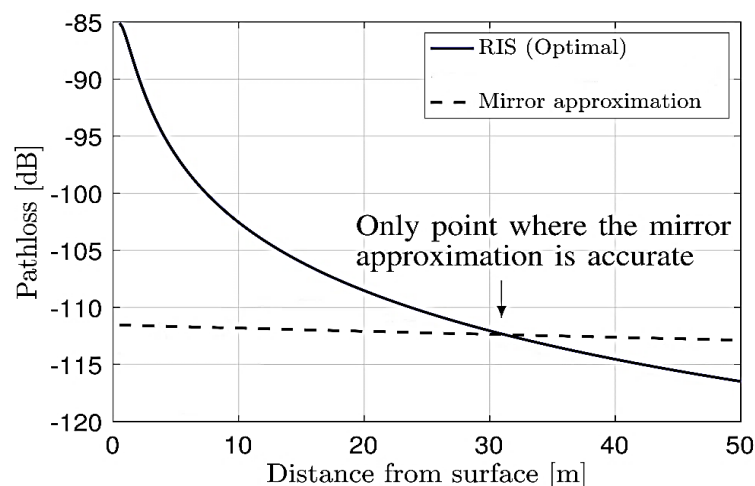
laatste geldt met name voor bepaalde moderne ruitsoorten⁴¹ en varieert per glastype en frequentie met een gemiddelde van rond 20 dB op 100 GHz⁴². Het is dus zeer de vraag of toepassing van zeer veel elementen, ook aangeduid met *holographic RIS* ⁴³, wel altijd zinvol is.

6.2.2 Verlies van LOS

Een ander aspect van de ‘outdoor-indoor use case’ is dat in figuur 11 sprake is van LOS tussen de IRS en de ontvanger. In praktische omstandigheden hoeft dit niet of niet altijd het geval te zijn. Deze kan immers door verplaatsing van de ontvanger tijdelijk of door inrichtingselementen permanent zijn verbroken. In dit geval zullen de IRS-elementen geconfigureerd worden op grond van het optimale indirecte pad dat door reguliere reflectie aan een oppervlak in de ruimte ontstaat. Hierbij is dus sprake van reflectieverlies en een langere propagatieafstand. In theorie zou dit deels kunnen worden gecompenseerd door een tweede IRS op het samengestelde radiopropagatie-pad van basisstation naar UE⁴⁴.

6.2.3 Deformatie van de vorm van de radiogolf

Een andere beperking van IRS/RIS heeft paradoxaal genoeg te maken met de bundeling in de richting van de ontvanger. Anders dan een gewone spiegel waar voor licht de wet van Snellius opgaat (‘de hoek van terugkaatsing is gelijk aan de hoek van inval’), is dit in geval van IRS gewoonlijk niet het geval door het sturen van de terugkaatsrichting van radiogolven. De IRS verandert daarbij ook de vorm van de radiogolf: de golf is niet langer meer, in goede benadering, planair ofwel een oppervlaktegolf. Voor een geoptimaliseerde IRS zal daardoor voor kortere afstanden van de ontvanger tot de IRS de totale demping veel groter zijn dan voor een, ten opzichte van de golflengte, groot spiegelend oppervlak. figuur 13 geeft dit effect met een kwantitatief voorbeeld aan: ook vanwege dit effect is dus een minimale afstand tot de IRS wenselijk.



Figuur 13: Totale uitbreidingsdemping bij geoptimaliseerde IRS/RIS vergeleken met die bij een ideale spiegel [bron (aangepast): Björnson et al, IEEE 2020]

⁴¹ P. Ängskog et al: *Measurement of Radio Signal Propagation through Window Panes and Energy Saving Windows*, EMC Europe 2015, augustus 2015

⁴² J. Medbo et al: *Frequency Selectivity of Window Attenuation up to 100 GHz*, EuCAP 2019, mei 2019
2108.08104.pdf

⁴⁴ R. Liang et al: *A Cascaded Multi-IRSs Beamforming Scheme in mmWave Communication Systems*, IEEE Access, Vol. 9, 2021, blz. 99193-99200

6.3 Vergelijking van IRS met alternatieven

IRS is niet het enige middel om de radiopropagatie in mobiele- en andere draadloze netwerken te beïnvloeden. Dit is al decennia lang mogelijk met *radio repeaters* of *relays*. Deze zijn in de loop van de jaren verder ontwikkeld tot geavanceerdere vormen ten behoeve van *cooperative communications* met technologieën zoals adaptieve modulatie- en codering, *beamforming* en *power control*.

Er zijn twee vormen van *repeating*: transparant en regeneratief relayeren. Transparant relayeren is de meest simpele vorm waarbij signalen in beide communicatierichtingen kunnen worden gezonden maar niet tegelijkertijd (half-duplex). Het radiosignaal wordt versterkt en iets vertraagd doorgezet. Bij regeneratief relayeren wordt het signaal eerst gedemoduleerd en met aangepaste modulatie en/of codering versterkt heruitgezonden. Van oorsprong vond dit, zoals bij transparant relayeren, half-duplex plaats maar inmiddels zijn er ook regeneratieve repeaters op de markt die in full-duplex functioneren⁴⁵. Sinds 3G wordt de repeater-mogelijkheid ook in 3GPP-standaardisatie ondersteund⁴⁶. Vooral vanuit kosten-batenoverwegingen vond de daadwerkelijke toepassing door MNOs echter geen algeheel aftrek⁴⁰.

In technisch opzicht zijn er duidelijke verschillen tussen de eigenschappen van repeaters en van IRS. IRS biedt in principe een kosteneffectieve, full-duplex en passieve manier van transparant relayeren. Bij een gegeven frequentieband is een repeater kleiner dan een IRS maar heeft complexere, actieve hardware nodig voor de verwerking en versterking van het radiosignaal. Hiervoor moet energie toegevoerd worden. Verder is een radio repeater een duurdere oplossing dan IRS en biedt vooral toepassing voor signalen in de lagere banden, tot ruwweg 1 GHz⁴⁷ waar IRS onpraktisch groot zou worden. Ook zijn radio repeaters hier ten opzichte van IRS in het voordeel omdat in deze lagere frequentiebanden de benodigde relatieve bandbreedte vaak wezenlijk groter is dan voor hogere radiofrequenties. Alle elementen van een IRS moeten namelijk over de gehele bandbreedte hetzelfde kunnen worden geconfigureerd en dat wordt moeilijker naarmate de relatieve bandbreedte groter wordt.

Voor SHF-frequenties en hoger biedt IRS het unieke, gecombineerde voordeel van eenvoud en kosten maar hiervoor is een groter reflecterend oppervlak nodig dan dat van een relay-antenne. Daarbij moet bovendien worden opgemerkt dat vooral voor IRS een doordachte dimensionering in samenhang met de omgeving en het gebruik geboden is, zoals uit Paragraaf 6.2 duidelijk is geworden.

6.4 Algemene use cases

In analogie met de use case van de verbeterde indoor-dekking die in figuur 11 is afgebeeld, is het ook voorstelbaar dat de verbetering van outdoor-dekking zinvol is in een omgeving waar deze door obstructie niet of onvoldoende geboden wordt. Dit kan bijvoorbeeld in een urbaan hoogbouwgebied zijn of in het algemeen daar, waar een UE zich op de rand van dekking bevindt⁴⁸. Het belang van deze laatste situatie neemt af wanneer in de toekomst sprake is van cell-free MIMO, waar geografisch gespreide antennes samenwerken om dekking tot stand te brengen. Hier is IRS voor mmWave en terahertz-golven waarschijnlijk goed bruikbaar vanwege de veelheid aan alternatieve radiopaden op deze banden. Wel

⁴⁵ www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2436

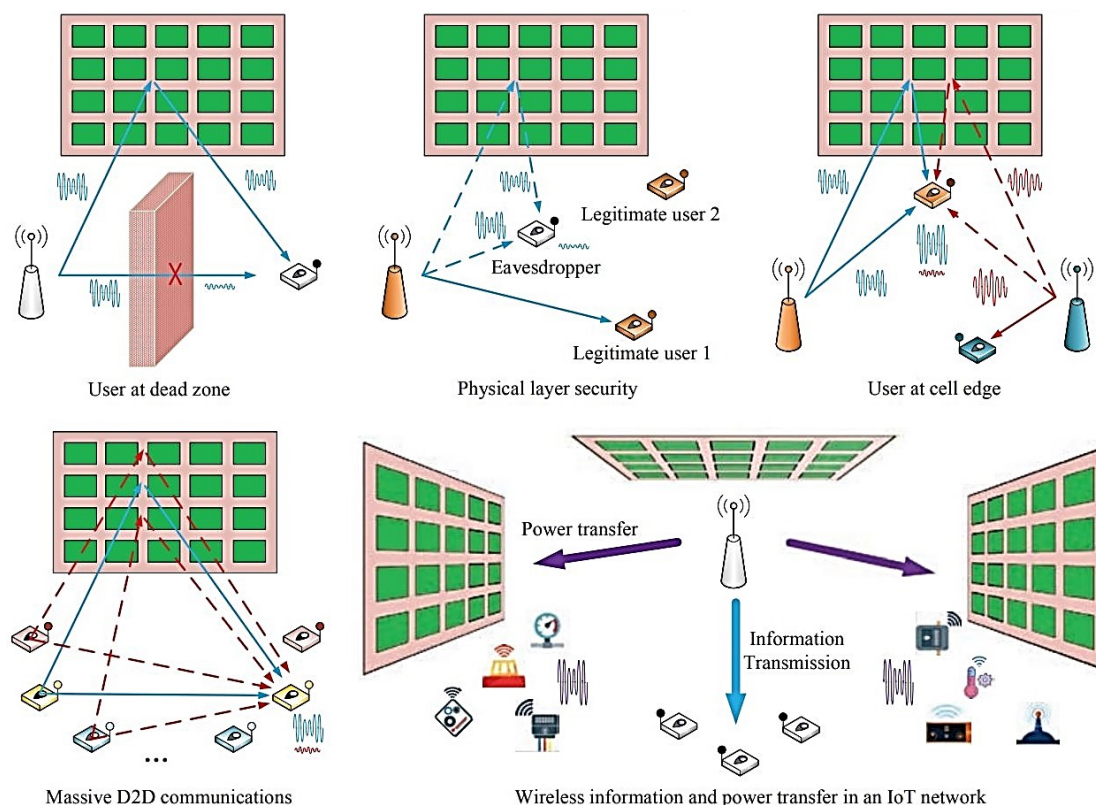
⁴⁶ M. Dohler and Y. Li, *Cooperative Communications: Hardware, Channel and PHY*, John Wiley & Sons, 2010

⁴⁷ Bijvoorbeeld radioamateur- en Wi-Fi-repeaters in de 900 MHz-band

⁴⁸ E.F. Ibrahim (Luleå University of Technology): *Intelligent Reflecting Surfaces: Fundamentals and Applications*, sheet 12

moet daarbij worden aangetekend dat zeker in het terahertz-domein het realiseren van coherente radiomodules een uitdaging is en de geringe reikwijdte in deze band sowieso vraagtekens zet bij menig praktische use cases rond de toepassing van terahertz-golven in combinatie met IRS.

Verder worden als specifieke use cases voor de verbetering van dekking gesuggereerd: ondersteuning voor UAVs, voor *device-to-device* (D2D)-communicatie⁴⁵ en voor IoT in industriële toepassingen (Industry 5.0)⁴⁹. figuur 14 geeft een overzicht van veel aangehaalde use cases⁵⁰.

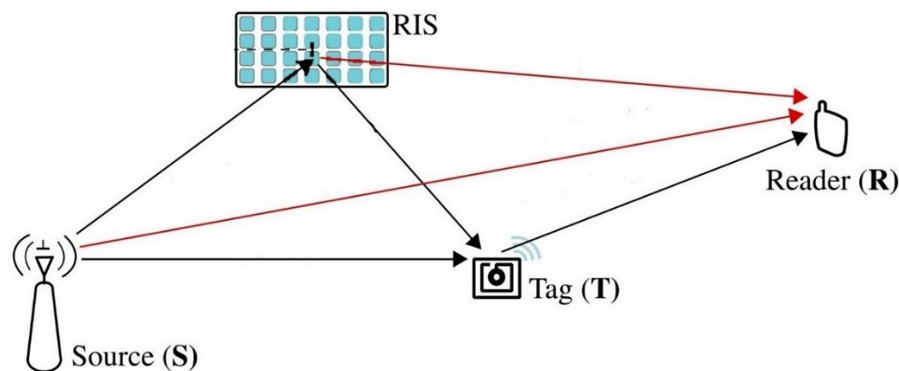


Figuur 14: Enkele mogelijke use cases voor IRS
[bron: Q. Wu & R. Zhang, IEEE Communications Magazine 2020]

IRS heeft de inherente eigenschappen van bundeling in een gewenste richting en verzwakking in de andere richtingen gemeen met alle *phased array* antennes. In deze zin is in Paragraaf 6.1 al de bestrijding van multi-user (MU) interferentie door IRS genoemd. Deze eigenschap kan ook worden ingezet voor het tegengaan van afluisteren en voor *spatial modulation*. Zelfs is toepassing van IRS voor de draadloze overdracht van energie⁴⁰ denkbaar. Een concreet geval van dit laatste is de toepassing voor *ambient backscatter* communicatie in IoT (Internet-of-Things)-systemen ten behoeve van passieve tags, die via verstrooiing uit de radiofrequente omgeving hun energie verzamelen om te kunnen functioneren. Tegelijkertijd moet interferentie in dit ambient backscatter-systeem worden tegengegaan. De IRS wordt dus geoptimaliseerd om het signaal naar een tag te richten en tegelijk zowel de directe als indirecte radio-interferentie (aangegeven met rode pijlen in figuur 15) te onderdrukken.

⁴⁹ <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815179>

⁵⁰ <https://ieeexplore.ieee.org/document/8910627>



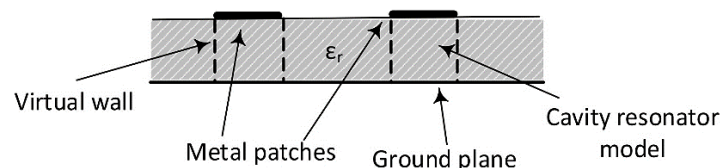
Figuur 15: Toepassing van IRS/RIS in ambient backscatter communicatiesystemen
[bron (aangepast): D. Loku Galappaththige et al, IEEE2023]

Een eerste onderzoek wijst uit dat op deze manier 150 tot 250% energiewinst is te behalen⁵¹.

6.5 Implementatie-aspecten

Voor het goed werken van het IRS-concept is het nodig dat de signaalbandbreedte voldoende klein is om de frequentierespons van het IRS-element in amplitude en tijdsvertraging nagenoeg constant te houden over de signaalband. Alle elementen moeten immers op een gelijke manier over de gehele bandbreedte kunnen worden aangestuurd.

Een traditionele phased array voorziet hierin en de passieve variant, dus zonder actieve fasedraaier voor elk element, is dan ook een van de twee klassen IRS-implementaties. Deze categorie wordt vaak aangeduid met *reflectarray*. Een van de vele implementaties die in deze categorie valt is de bekende microstrip patch (array) antenne⁵² die dan uiteraard als reflector wordt gebruikt. Deze antennereflector bestaat uit metalen vierkanten patches (de IRS-cellen) die zich op een bepaalde onderlinge afstand van elkaar bevinden. Deze patches zijn gemonteerd op een diëlektricum, zie figuur 16.



Figuur 16: IRS microstrip patch array
[bron (aangevuld): V. Tapio et al, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking]

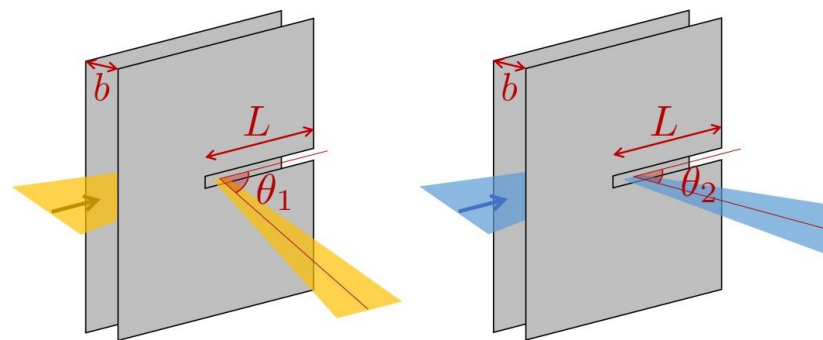
Dit diëlektricum is op zijn beurt weer op een metalen grondplaat aangebracht. Onder elke patch ontstaat zo een denkbeeldige resonantieruimte waarvan de karakteristieken beïnvloed kunnen worden door een via CMOS-technologie geïntegreerde varactor diode, Positive-Intrinsic-Negative (PIN) diode of *radiofrequency switch*. Effectief staat deze parallel geschakeld aan deze 'resonantieruimte'. Door nu de biasspanning van bijvoorbeeld de varactor te veranderen, kan de faseresponsie en daarmee de reflectiehoek van de uitgaande golf worden gewijzigd.

Voordeel van deze IRS-implementatie is de relatieve eenvoud en de geschiktheid voor relatief lage frequenties (onder 10 GHz, tot aan circa 2 GHz). Een nadeel van deze

⁵¹ <https://ieeexplore.ieee.org/document/9940483>

⁵² <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-021-02048-5>

implementatie is dat de afstand tussen de array patches in de orde ligt van een halve golflengte en daarmee wordt de antenne dus relatief groot. Voor hoge mmWave-frequenties en vooral in het terahertz-domein worden traditionele reflectarrays in CMOS-technologie zoals microstrip patcharrays zeer moeilijk implementeerbaar. Voor dergelijke radiofrequenties kan uitgeweken worden naar Leaky-Wave Antennas (LWAs) waar bundelsturing plaatsvindt via een geringe frequentie-offset ten opzichte van de centrale frequentie⁵³. Het verband tussen hoekverdraaiing en frequentie-offset is dan in goede benadering lineair. De bundelbreedte van elke cel wordt bepaald door de demping per meter in de zin dat een kleinere waarde hiervan een smallere elementaire bundelbreedte betekent. In figuur 17 is geïllustreerd dat de richting van de elementaire bundel afhangt van de input-frequentie terwijl de bundelbreedte constant blijft.



Figuur 17: Bundelsturing bij LWA-implementatie van een IRS-antenne: de frequentie-offsets links en rechts zijn verschillend [bron: C.Y.Yeh et al, Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks, juli 2020]

Een tweede categorie van IRS-implementaties betreft die van meta-oppervlakken of *metasurfaces*. Metasurfaces zijn opgebouwd uit metamaterialen die door toepassing van nanotechnologie eigenschappen hebben die in de natuur niet voorkomen, zoals een negatieve brekingsindex. Deze coatings zijn elektrisch dunner dan de conventionele reflectarrays en bestaan uit dichte, tweedimensionale arrays van elementen met afmetingen tussen een vijfde en een tiende golflengte. De elektromagnetische eigenschappen van elk element worden bepaald door hun materiaalsamenstelling. De wijze van aansturing is ook hier mogelijk via halfgeleiderelementen zoals varactors die geïntegreerd zijn met de materialen in de metasurfaces. Voor terahertz- tot optische frequenties kan de afstembaarheid worden gerealiseerd door bijvoorbeeld transparante geleidende oxiden, ferro-elektrische materialen, vloeibaar kristal, grafeen en fase-veranderende materialen. Bij metasurfaces is de koppeling tussen de IRS-cellen groter dan bij de reflectarrays waardoor de sturing complexer is.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van relevante eigenschappen van de reflectarray- en metasurface-implementaties van IRS.

⁵³ <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3395351.3399365>

Tabel 1: Vergelijking van eigenschappen van twee IRS-implementatiesoorten
[bron (aangevuld): V. Tapio et al, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking]

Werking wordt doorgrond, relatief gemakkelijk te modelleren	Moeilijk te modelleren
Eenvoudig te fabriceren	Moeilijker te fabriceren maar potentieel zijn er meer geavanceerdere functies
Eenvoudige aansturing	Complexere aansturing door grotere onderlinge cel-koppeling
Gemakkelijk beschikbare technologie	Herconfigureerbare metasurfaces zijn in onderzoeksfase
Geschikt voor frequenties vanaf circa 2 GHz	Geschikt voor mmWave- en terahertz-frequenties

Een belangrijke conclusie uit tabel 1 is dat de herconfigureerbare metasurfaces zich nog in de onderzoeksfase bevinden en commercieel nog niet beschikbaar zijn.

6.6 Enkele betrokken partijen en activiteiten

Monidaal zijn de nodige activiteiten rond IRS voor telecommunicatie gaande of gepland.

In Europees verband is binnen het H2020-project MetaWireless (Future Wireless Communications Empowered by Reconfigurable Intelligent Meta-Materials) samengewerkt op onder meer het gebied van de ontwikkeling van IRS voor mmWave-frequenties. Partners zijn: Aalto-korkeakoulusäätiö, National Centre for Scientific Research "Demokritos", Greenerwave en Wave Up⁵⁴. MetaWireless heeft gelopen van 1 december 2020 tot 1 december 2022. In dit project zijn (niet-commerciële) implementaties boven 9 GHz gerealiseerd.

Verder is eind 2022 binnen het programma HORIZON.2.4 (Digital, Industry and Space) een *call for proposal* uitgegaan, specifiek voor terahertz reconfigurable Metasurfaces (TERRAMETA: TERahertz Reconfigurable METAsurfaces for Ultra-high Rate Wireless Communications)⁵⁵.

Daarnaast zijn op het gebied van metasurfaces meerdere Aziatische partijen actief, waaronder uit Japan Kyocera en NTT Docomo. Deze laatste realiseerde al in 2017 als eerste een transparante reconfigureerbare metasurface op 28 GHz⁵⁶, een *smart glass*-uitvoering geschikt voor montage op reclameborden en muren.

In de Verenigde Staten houdt Kymeta zich bezig met de ontwikkeling van metasurfaces.

⁵⁴ <https://h2020-msca-itn-metawireless.cnit.it/>

⁵⁵ <https://www.developmentaid.org/organizations/awards/view/403158/terahertz-reconfigurable-metasurfaces-for-ultra-high-rate-wireless-communications-terrameta>

⁵⁶ <https://www.jpier.org/pier/pier.php?paper=21081109>

In het Verenigd Koninkrijk hebben 5GIC (5G Innovation Centre) en later 6GIC van de University of Surrey in 2020 en 2021 IRS-metasurface prototypes ontwikkeld op 3,5 GHz waarmee uiteindelijk één gebruiker continue gevolgd kon worden⁵⁷, zie figuur 18.



Figuur 18: Metasurface IRS voor de 3,5 GHz-band tijdens een prototypedemonstratie in 2021
[bron: 6GIC/ Youtube]

6.7 Concluderend

Intelligent Reflective Surface (IRS) ofwel Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) lijkt een veelbelovende nieuwe technologie die tegelijkertijd in het perspectief van fysieke beperkingen in praktische toepassingen moet worden beschouwd om overspannen verwachtingen te voorkomen. Technische uitdagingen zijn vooral snelheid van herconfiguratie en kanaalinschatting.

Het IRS-concept is vooral veelbelovend voor hogere mmWave- en terahertz-frequenties maar het is twijfelachtig of voor de hogere UHF- en SHF-frequenties zoals toegepast in 5G de IRS-benadering wel praktisch en wezenlijk concurrerend is ten opzichte van moderne radio repeaters. Dit moet gezien worden in het licht van voor IRS overtuigende use cases die vooralsnog lijken te ontbreken en de toepassing hiervan in concrete praktische omgevingen en -situaties met meerdere gebruikers. Toekomstige pilots zouden hieromtrent het benodigde inzicht kunnen leveren.

IRS in de uitvoering van herconfigureerbare metasurface is nog niet commercieel verkrijgbaar. Hieraan wordt door diverse internationale partijen gewerkt. Vooralsnog lijken metasurface-realisaties voor mmWave en terahertz-frequenties, van belang voor 6G, vooralsnog onderzoeksonderwerpen. Een van de vragen daarbij is of de benodigde rekenkracht voor adequate (bij)sturing van de IRS-elementen toch gepaard zal gaan met wezenlijk energieverbruik.

Prototypes tonen aan dat de realisatie van IRS voor 5G-frequenties in de hogere UHF- en in de SHF-band technisch mogelijk is maar deze realisatievorm ondervindt concurrentie van de meer traditionele reflectarrays en sowieso van moderne radio repeaters.

⁵⁷ <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9668918>