

Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 10 00
F +31 70 328 09 61

TNO-rapport

TNO 2018 R10557 | 1.0

Monitor Draadloze Technologie Voorjaar 2018



Datum	1 juni 2018
Auteur(s)	Ir. R. Overduin, Dr. A.V. Pais, Dr. H. Zhang
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	25 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	Monitor Draadloze Technologie 2018
Projectnummer	060.30841

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Het 'draadloos speelveld'	3
1.2	De Monitor Draadloze Technologie	4
2	Ontwikkelingen in draadloze technologie.....	5
2.1	Nota Mobiele Communicatie: de stand van zaken	5
2.2	Het flexibel delen van spectrumgebruik.....	6
2.3	5G technologie-update	12
2.4	Li-Fi	19
3	Tot besluit.....	25

1 Inleiding

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

Dit inleidende hoofdstuk geeft de opzet en de scope van de Monitor Draadloze Technologie aan.

1.1 Het 'draadloos speelveld'

Op het gebied van draadloze technologie speelt een diversiteit aan ontwikkelingen. Zo heeft ook in het afgelopen jaar de sterke groei van het mobiele dataverkeer als gevolg van een toenemend gebruik van smartphones, doorgezet. Om in deze groei te kunnen voorzien wordt door mobiele providers fors geïnvesteerd in de verbetering van hun 4G (LTE)-netwerk. Wi-Fi (Wireless Fidelity) en andere draadloze technologieën voor lokaal gebruik hebben een belangrijke plaats ingenomen bij het laagdrempelig aanbieden van draadloze toegang over kortere afstanden. Daarbij nemen de toepassingsmogelijkheden van met name Wi-Fi als drager van een grotere diversiteit aan diensten gestaag toe. De opkomst van Li-Fi (Light Fidelity), min of meer een variant van Wi-Fi die licht toepast als drager in plaats van radiogolven, is vooral interessant omdat deze technologie de mogelijkheid kan bieden om radiospectrum voor lokaal gebruik te ontlasten en dit bovendien op energie-efficiënte wijze realiseert. In het algemeen is de belasting van het radiospectrum een toenemend probleem waarvoor sinds enkele jaren een aantal flexibiliseringstechnieken is ontwikkeld voor efficiënter gebruik van het radiospectrum. Zowel Li-Fi als spectrumflexibilisering komen dan ook in deze voorjaarseditie aan bod.

Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat richt haar beleid op deze groei door frequenties voor mobiele communicatie in de komende jaren voor mobiel dataverkeer vrij te maken en bijbehorende maatregelen daarvoor te nemen.

De standaardisatie van de volgende generatie mobiele technologie, 5G, heeft het afgelopen jaar doorgang gevonden en zal in de komende jaren verder gestalte krijgen. Hierbij is het verschijnen van de eerste 5G-standaard medio dit jaar een wezenlijke mijlpaal omdat hiermee ook het startschot is gelost voor verdere 5G releases die binnen 3GPP gepland staan en waarin sprake zal zijn van de benutting van millimetergolf (mmWave) frequenties. Op deze vervolg-releases vooruitlopend wordt in deze voorjaarseditie specifiek ingegaan op de perspectieven om op kosteneffectieve wijze de mmWave-technologie te kunnen fabriceren die aan de standaard zal kunnen voldoen.

Gezien het toenemend gebruik van 4G mobiele eindapparatuur bij *video-on-demand*-omroepdiensten zullen eerst de verwachte ondersteuningsmogelijkheden hiervoor door 5G worden besproken.

Het gevaar van deze ontwikkelingen is dat de diverse belanghebbenden aan markt- en overheidszijde die ontwikkelingen, ook in onderling opzicht, niet goed meer kunnen beoordelen op basis van de mogelijk gekleurde informatie vanuit de markt. Zij kunnen het overzicht verliezen en onzeker zijn over hun oordeel. Een objectief overzicht op basis van betrouwbare en zo actueel mogelijke informatie kan dan in een behoefte voorzien.

1.2 De Monitor Draadloze Technologie

Met de Monitor Draadloze Technologie 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 tracht verschillende doelgroepen te bedienen bij overheid en bedrijfsleven in Nederland. Dit betekent 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.

Voor 2018 zal de Monitor Draadloze Technologie bestaan uit de volgende twee schriftelijke rapportages:

- Een overzicht van ontwikkelingen vanuit technologisch perspectief. Per technologie wordt kort de stand van zaken beschreven. Dit is de rapportage die nu voor u ligt, de zogenaamde voorjaarseditie;
- Een editie die met name gaat over een aantal toepassingen van draadloze communicatietechnologie. Omdat medio 2018 de eerste 5G Release wordt verwacht zal daarnaast de status en planning van 5G aan bod komen. Deze najaarseditie wordt voorzien in november.

De scope van de monitor omvat technologieën die de basis vormen voor draadloze verbindingen waarmee aan eindgebruikers elektronische communicatie- en omroepdiensten kunnen worden aangeboden. Naast de ontwikkelingen die voorzien in de accommodatie van de algemene groei in mobiel dataverkeer wordt in de voorjaarseditie eerst in kort bestek de status van de Nota Mobiele Communicatie besproken.

TNO hecht eraan te benadrukken dat de Monitor Draadloze Technologie 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 de lezer zeer relevant zijn, niet worden beschreven. TNO staat open voor suggesties of aanbevelingen voor verdere verbeteringen.

2 Ontwikkelingen in draadloze technologie

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de ontwikkelingen in een aantal relevante draadloze technologieën. Het eigenlijke overzicht wordt voorafgegaan door een meer algemene sectie die kort ingaat op de stand van zaken rond de totstandkoming van de Nota Mobiele Communicatie, waarvan de consultatieversie uit begin 2017 via internet beschikbaar is¹.

2.1 Nota Mobiele Communicatie: de stand van zaken

De Nota Mobiele Communicatie (NMC) wordt uitgebracht door het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK). Deze nota beschrijft voorstellen voor het beleid voor de verdeling van frequenties voor mobiele communicatie in de komende jaren en bijbehorende maatregelen. Hiermee wordt zowel effectiviteit als efficiëntie beoogt zodat voor een specifieke bestemming de juiste frequenties ter beschikking komen en niet meer dan nodig is.

De zogenaamde consultatieversie van de NMC is begin 2017 uitgebracht. De reacties hierop waren divers. Vooral werd verschillend aangekeken tegen de voorgestelde toekomstige toewijzing en verdeling van spectrum zoals met name het bestemmen van twee banden van elk 10 MHz in de 2100 MHz voor vergunningsvrij gebruik waardoor dit spectrumdeel dus niet in de multiband-veiling van 2019 zou worden opgenomen. Het Ministerie van EZK wilde hiermee tegemoet komen aan de vraag naar bandbreedte voor bedrijfsspecifieke toepassingen en wel door op deze wijze de drempel voor het gebruik van de frequenties te verlagen. Over dit onderwerp werd dan ook aanvullend extern onderzoek uitgevoerd. Inmiddels is besloten om geen ruimte beschikbaar te stellen in de UMTS-band voor vergunningsvrije toepassingen. Deze gehele band wordt dus geveild.

Het zijn de mobiele operators die vooral zouden zien dat het Ministerie van EZK naast spectrumruimte voor accommodatie van de transformatie van 3G naar 4G, spectrale mogelijkheden creëert voor de ontwikkeling van 4,5G en 5G. De mobiele operators staan op het standpunt dat hiertoe de ruimte van 3,4 – 3,8 GHz zou kunnen worden gebruikt. Daarbij moet eerst de interferentie-kwestie met de Defensie-afluisterpost in Burum worden opgelost. Voor ruraal gebruik stelt het Ministerie voor dat ruimte in de 700 MHz-band kan worden toegepast en streeft naar landelijke beschikbaarheid in 2020. Deze is nu nog bestemd voor televisie. Verder zal de nationale beschikbaarheid van 26 GHz voor 5G mmWave plaatsvinden, volgend op een positieve besluitvorming hierover door de EU. Tenslotte is advies van ACM (Autoriteit Consument en Markt) omtrent eventuele markt-regulerende maatregelen en commentaar op de invoering van de zogenaamde spectrum caps voor de multiband-veiling ontvangen en verwerkt.

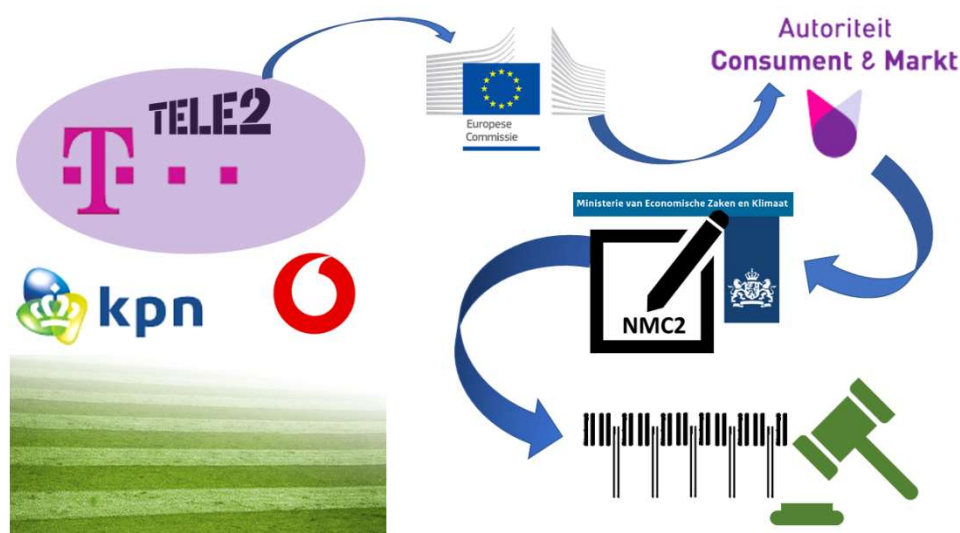
Oorspronkelijk werd voorzien dat de bijstelling van de NMC zou leiden tot vertraging van de definitieve versie tot eind 2017. Juist in die periode werd echter de voorgenomen overname van mobiele operator Tele2 door T-Mobile bekend gemaakt. Hierdoor zal het aantal mededingers voor spectrum op de multiband-veiling dalen van vier naar drie. Indien respectievelijk de EU en de ACM deze overname goedkeuren, zal dit aantal beneden het gestelde minimum komen

¹ https://www.internetconsultatie.nl/nota_mobiele_communicatie

waardoor de opzet van deze veiling niet meer zou gelden.

Het afnemen van het aantal mobiele operators heeft ook direct gevolgen voor de positie van MVNO's (Mobiele Virtuele Network Operators), die daardoor nog afhankelijker worden van de mobiele operators dan nu. Verwacht mag immers worden dat de (onafhankelijke) MVNO's, waarvan er in Nederland tientallen zijn, onder minder gunstige voorwaarden netwerktoegang af kunnen nemen. Het gevolg hiervan is dat zij minder goed kunnen concurreren op dienstniveau hetgeen leidt tot hogere kosten voor de consument.

Na goedkeuring van genoemde overname zal op grond van het voorgaande duidelijk zijn dat vervolgens de veranderende marktsituatie met minder concurrenten noodzaakt tot wederom aanpassing van de NMC; zo zijn de spectrumcaps zoals nu voorzien voor de multiband-veiling van 2019 nog op vier mededingers afgestemd. Het Ministerie van EZK buigt zich nu over de problematiek en is begin mei 2018 een consultatie gestart ten aanzien van de veiling die inzichten moet opleveren om de belangrijkste randvoorwaarden voor het veilingmodel en de veilingregels vast te stellen. Aan de hand van een gedragen inzicht kan in afwachting van de formele toestemmingen van de EU en ACM alvast de veiling worden voorbereid zodat de vertraging enigszins kan worden beperkt. De totale procesgang naar de herziene frequentieveiling met de volgorde en de betrokken organisaties is grafisch samengevat in Figuur 1.



Figuur 1: Totstandkoming van de herziene frequentieveiling en de betrokken organisaties

Al met al wordt op het moment van schrijven rond de zomer van 2018 de definitieve versie *Nota Mobiele Communicatie 2* verwacht. Zoals Figuur 1 aangeeft is het aanvangsmoment van het proces afhankelijk van de besluitvorming van de EU omtrent de overname van Tele2 door T-Mobile. Wanneer dit te lang op zich laat wachten, zal in het uiterste geval de frequentieveiling moeten worden uitgesteld.

2.2 Het flexibel delen van spectrumgebruik

2.2.1 Inleiding

Van oorsprong gebruiken mobiele netwerkoperators (MNO's) frequentiebanden waarvoor zij vergunning hebben om hun draadloze diensten aan te bieden. Hierdoor hebben zij het *exclusieve* gebruik van deze frequentiebanden. Zo zijn er

mondiaal meer dan 40 gelicenseerde frequentiebanden beschikbaar voor 4G (LTE). In Nederland worden momenteel de 800 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz en 2,6 GHz-banden gebruikt voor 4G (LTE) terwijl verschillende andere gelicenseerde banden worden gebruikt voor 2G (GSM) en 3G (UMTS). Verder zullen gelicenseerde banden beschikbaar worden gesteld voor 5G.

Het belangrijkste voordeel van gelicenseerd spectrum is dat de MNO's volledige controle hebben op de hun toegewezen frequentiebanden. Hierdoor kunnen zij een gegarandeerd serviceniveau aanbieden. Daar staat echter tegenover dat het schaarse spectrum niet volledig wordt benut, vooral niet op 'rustige' tijden van de dag zoals 's avonds en 's nachts op bedrijfsterreinen en in kantoorgebouwen. In dergelijke gevallen is het denkbaar dat ongebruikt spectrum voor andere gebruikersgroepen beschikbaar wordt gesteld.

Een dergelijk gedeeld gebruik wordt over het algemeen aangeduid met *flexible spectrum sharing* en beslaat mechanismen en technologieën die niet-exclusieve toegang tot het spectrum mogelijk willen maken. Dit betekent dat verschillende partijen het spectrum onder bepaalde voorwaarden kunnen delen. Twee paradigma's voor *flexible spectrum sharing* zijn:

- Gedeeld gebruik van gelicenseerd spectrum en
- Gedeeld gebruik van vergunningsvrij ofwel ongelicenseerd spectrum.

Dit is weergegeven in Figuur 2, respectievelijk midden en rechts.



Figuur 2: De drie paradigma's voor frequentiespectrumgebruik²

2.2.2 Gedeeld gebruik van gelicenseerd spectrum

In de afgelopen vijf jaar zijn twee nieuwe paradigma's voor het delen van gelicenseerd spectrum ontstaan³:

- **Licensed Shared Access (LSA)** in Europa, bedoeld voor de band 2,3 – 2,4 GHz en
- **Citizens Broadband Radio Service (CBRS)** in de Verenigde Staten, bedoeld voor de band 3,5 – 3,7 GHz.

Zowel LSA als CBRS faciliteren de toegang voor extra licentiehouders in banden die reeds in gebruik zijn door gevestigde gebruikersgroepen (*incumbent users*) zoals de openbare orde en veiligheidsorganisaties en de krijgsmacht. Deze toegang wordt verleend onder overeengekomen voorwaarden.

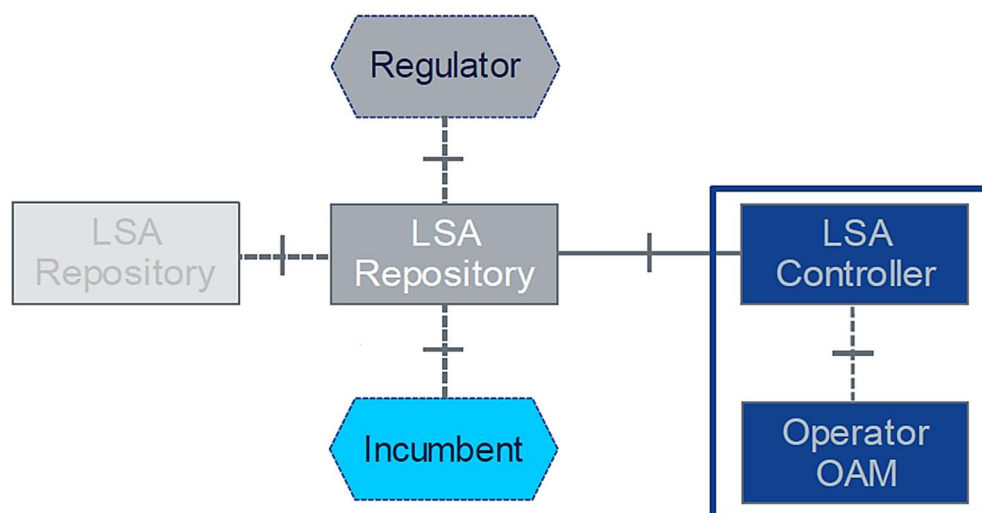
² <https://www.qualcomm.com/documents/5g-spectrum-sharing>

³ "License Shared Access evolution enables early access to 5G spectrum and novel use cases", Seppo Yrjola, Heikki Kokkinen, <https://www.researchgate.net/publication/321756011>

Enigszins vrij vertaald heeft de Europese Unie LSA⁴ als volgt gedefinieerd: "een methode van regelgeving om de invoering te vergemakkelijken van radiocommunicatiesystemen die door een beperkt aantal vergunninghouders worden geëxploiteerd in het kader van een individuele vergunningsregeling in een frequentieband die reeds is toegewezen of naar verwachting zal worden toegewezen aan een of meer gevestigde gebruikers. Volgens de LSA-benadering zijn de nieuwe gebruikers gemachtigd om het spectrum of een deel hiervan te gebruiken volgens de regels voor het delen van spectrum zoals deze zijn opgenomen in hun gebruiksrechten van het spectrum. Hierdoor worden alle geautoriseerde gebruikers, waaronder de gevestigde, in staat gesteld een bepaalde Quality-of-Service (QoS) te kunnen aanbieden."

De regels voor het delen van spectrum kunnen de vergunninghouder het gebruik van de frequentieband opleggen binnen een geografisch gebied in de tijd, dat wil zeggen het moment en de duur.

Standaardisatie van LSA is uitgevoerd door zowel ETSI als 3GPP waarbij ETSI de *System Reference, Requirements and Architecture* heeft opgesteld en 3GPP de mobiele netwerkspecificaties. In Figuur 3 is een LSA-architectuur vereenvoudigd weergegeven. Deze architectuur is gebaseerd op het LSA-referentiemodel van ETSI⁴.



Figuur 3: LSA-architectuur gebaseerd op het LSA-referentiemodel van ETSI⁵

In het midden van de LSA-architectuur is de *LSA repository* aangegeven. Hierin wordt informatie die relevant is voor het delen van het spectrum ingevoerd en opgeslagen. De *LSA repository* omvat informatie rond bijvoorbeeld de beschikbare frequentiebanden in de tijd, de operationele condities en regels en de vereiste beschermingsmaatregelen voor de gevestigde operator tegen interferentie. De lichtgrijs gekleurde *LSA repository* geeft een equivalente database van een buurland aan. De nationale *LSA repository* deelt en coördineert de nodige informatie met de *LSA repository* van het buurland voor het vaststellen van de spectrumbeschikbaarheid in grensgebieden.

⁴ ECC Report 205

⁵ https://www.researchgate.net/publication/321756011_Licensed_Shared_Access_evolution_enables_early_access_to_5G_spectrum_and_novel_use_cases

De twee blauwe blokken in het omkaderde vak rechts in Figuur 3 worden gehost binnen het domein van een MNO. De *LSA controller* bevindt zich ook binnen het MNO-domein en communiceert met de *LSA repository* om een licentie aan te vragen voor het gebruik van frequentiebanden onder bepaalde voorwaarden. Indien de licentie wordt verleend, zal het gebruik ervan via de operator OAM (*Operation, Administration and Maintenance*) worden geëffectueerd. De *LSA controller* is ook betrokken bij het vrijgeven van de frequentiebanden.

Er zijn veldproeven uitgevoerd in Finland, Italië, Frankrijk, Finland en Nederland om het LSA-systeem te valideren in de band 2,3 – 2,4 GHz⁶. In Nederland werd van 2016 tot 2017 een *pilot* uitgevoerd om toegang tot het gedeelde spectrum mogelijk te maken voor de Programme Making & Special Events (PMSE) sector. Inmiddels is deze omgezet naar operationeel gebruik.

CBRS⁷, gedefinieerd door de FCC voor gebruik in de 3,5 – 3,7 GHz-band in de Verenigde Staten, lijkt op LSA in de zin dat spectrum onder bepaalde voorwaarden met gevestigde gebruikers wordt gedeeld. CBRS gebruikt echter een andere architectuur. Een belangrijk verschil met LSA is dat CBRS geen twee maar drie niveaus kent voor het delen van spectrum. De spectrumtoegang voor verschillende gebruikers is in volgorde van prioriteit aldus gedefinieerd:

- Gevestigde gebruikersgroepen (*incumbent users*): in het bijzonder de Amerikaanse maritieme radargebruikers, zouden eerste prioriteit hebben. Dit is vooral van toepassing op kustgebieden;
- Toegang met prioriteit (*priority access*): een organisatie, bijvoorbeeld een operator, krijgt een frequentiereservering voor een beperkt geografisch gebied en voor een bepaalde tijd (bijvoorbeeld drie jaar);
- Algemeen geautoriseerde toegang (*general authorised access*): een standaardservice waarbij iedere gebruiker het spectrumdeel kan gebruiken wanneer dit niet wordt gebruikt door de hogere niveaus, d.w.z. de gevestigde gebruikersgroepen of gebruikers die een licentie hebben aangeschaft.

In de Verenigde Staten hebben T-Mobile⁸ en Verizon⁹ CBRS-beproevingen aangekondigd voor 2018.

2.2.3 Gedeeld gebruik van vergunningsvrij spectrum

In geval van vergunningsvrij spectrum kan iedere gebruiker onder bepaalde voorwaarden toegang tot het spectrum krijgen. Deze voorwaarden zijn nodig om wederzijdse interferentie te beperken. Oorspronkelijk was het vergunningsvrij spectrum voorbehouden voor Wi-Fi en zogenaamde draadloze *backhaul*-verbindingen: dit zijn de verbindingen tussen draadloos toegangsnetwerk en de vaste communicatiestructuur.

In de loop van de laatste vijf jaar zijn echter verscheidene nieuwe technologieën ontwikkeld en gestandaardiseerd voor toegang van 4G (LTE) tot vergunningsvrij

⁶ <https://www.cept.org/ecc/topics/lsa-implementation>

⁷ "CBRS: New Shared Spectrum Enables Flexible Indoor and Outdoor Mobile Solutions and New Business Models", 2017 whitepaper
https://docs.wixstatic.com/ugd/0c1418_3c0025f3ecbd40f0948902eebec41cfc.pdf

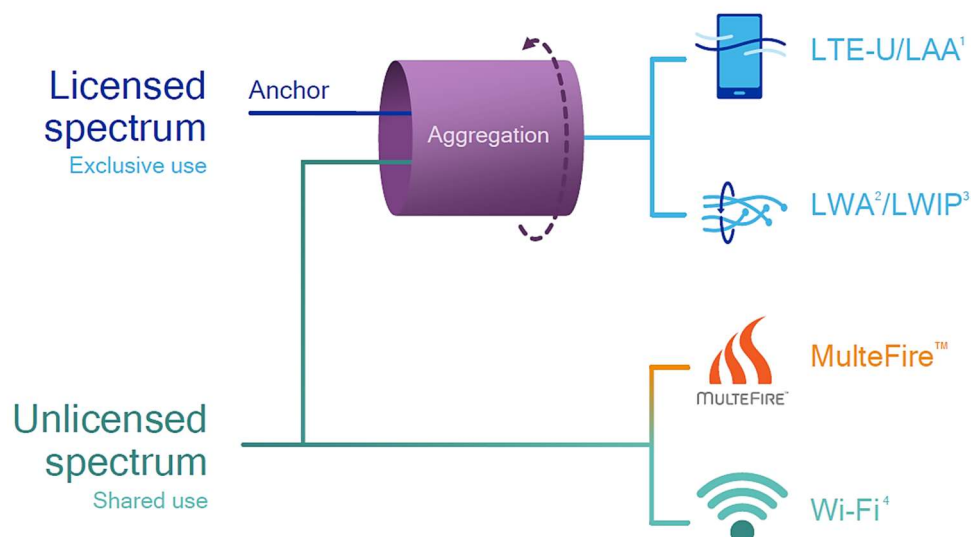
⁸ <https://www.fiercewireless.com/wireless/t-mobile-continues-tests-3-5-ghz-cbrs-band-seeks-extension-sta-vegas>

⁹ <https://www.rcrwireless.com/20180322/network-infrastructure/verizon-cbrs-florida-tag4>

spectrum. Dit werd gedreven door de schaarste van gelicenseerd spectrum; voor MNO's bieden vergunningsvrije frequentiebanden aanvullende spectrumcapaciteit. Tot nu toe heeft men zich daarbij vooral gericht op de vergunningsvrije 5 GHz-band vanwege het lage gebruiksniveau ten opzichte van dat van de 2,4 GHz-band.

Figuur 4 geeft een overzicht van verschillende technologieën voor het delen van vergunningsvrij spectrum die 4G (LTE) capaciteit aanvullen:

- **License Assisted Access (LAA).** LAA maakt gebruik van *carrier aggregation* om LTE in de vergunningsvrije 5 GHz-band te combineren met LTE in de gelicenseerde band. Deze aggregatie kan zowel in de downlink als in de uplink tot stand worden gebracht;
- **LTE/ Wi-Fi Aggregation (LWA).** LWA aggregereert LTE en Wi-Fi carriers. Dit is zinvol voor MNO's met bestaande Wi-Fi implementaties;
- **MulteFire.** Deze technologie biedt directe LTE-gebaseerde toegang tot vergunningsvrij spectrum zonder dat daarvoor, zoals bij LAA, een gelicenseerde carrier ofwel ankerfrequentie nodig is. De MulteFire Alliance is opgericht door Nokia, Qualcomm, Ericsson en Intel.



Figuur 4: 4G-gebaseerde technologieën voor gedeeld gebruik van vergunningsvrij spectrum²

Nadat begin 2016 Qualcomm en Deutsche Telekom claimden 's werelds eerste LAA *over-the-air trial*¹⁰ te hebben georganiseerd, volgden in de jaren erna meerdere LAA beproevingen in Europa, de Verenigde Staten en Azië en in de laatste twee werelddelen ook *roll-outs*:

- Verizon Wireless kondigde in 2017 aan dat het LAA-technologie in de Verenigde Staten commercieel zou uitrollen. Hierbij werd vier-kanaals *carrier aggregation* toegepast met drie kanalen in het vergunningsvrije spectrum¹¹;
- In november 2017 kondigde AT&T de commerciële uitrol aan van LAA in het centrum van Indianapolis in Indiana, Verenigde Staten. Hierbij werd drie-kanaals *carrier aggregation* toegepast¹²;

¹⁰ <https://www.qualcomm.com/news/releases/2016/02/02/worlds-first-lte-licensed-assisted-access-over-air-trial>

¹¹ <https://www.rcrwireless.com/20170804/carriers/verizon-starts-nationwide-laa-deployment-tag4>

¹² http://about.att.com/story/commercial_lte_licensed_assisted_access_indianapolis.html

- Medio 2017 claimde Telecom Italia met behulp van LAA een datasnelheid van 1 Gbit/s binnen haar 4G-netwerk bereikt te hebben¹³;
- Eind 2017 meldde SingTel dat door LAA-technologie in hun 4G-netwerk tijdens een LAA-beproeving met Ericsson in Singapore de 1 Gbit/s-grens doorbroken werd¹⁴;
- Nokia en T-Mobile kondigden in 2018 download datasnelheden aan van 1,3 Gbit/s, bereikt met behulp van vijf-kanaals LAA *carrier aggregation*¹⁵.

Veel van bovenstaande resultaten zijn bereikt via MIMO met vier antennes aan de gebruikers- en vier antennes aan de basisstation-zijde. Verder is een geavanceerde modulatietechniek toegepast (dit betreft: 256QAM. Dit is zogenaamde Quadrature Amplitude Modulation met 256 symbolen).

Tot op het moment van schrijven is nog geen daadwerkelijk commerciële uitrol van LAA in Europa gemeld; hooguit incidentele aankondigingen voor commerciële rollouts¹³. Op mondiale schaal is nog weinig activiteit ontplooid rond beproevingen met en implementaties van LWA en MulteFire. Daarbij moet worden opgemerkt dat sommige leden van de MulteFire Alliance zoals Qualcomm en Ericsson (ook) volop zijn betrokken bij recente LAA-proeven.

Toekomstige ontwikkelingen

Het commerciële succes van LSA (Europa) en CBRS (Verenigde Staten) staat nog te bezien. Voor MNO's in Europa zal dit grotendeels afhankelijk zijn van de perspectieven om in een LSA-situatie een bevredigend serviceniveau aan te kunnen bieden ondanks de beperkingen van het gebruik van de LSA-frequentiebanden. In de Verenigde Staten geldt dit ook in geval van toepassing van CBRS.

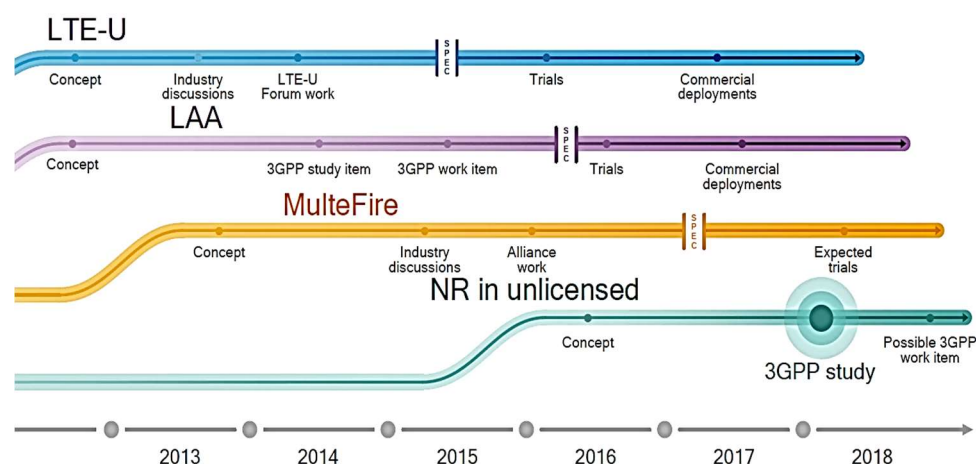
Sinds 2017 lijkt LAA bij de industrie momentum te winnen: de technologie is inmiddels in productvorm beschikbaar en in de Verenigde Staten vinden de eerste commerciële uitrollen plaats.

Figuur 5 geeft mogelijke *roadmaps* van de verschillende technologieën voor gedeeld gebruik van vergunningsvrij spectrum. Deze roadmaps moeten vooral als indicatief worden geïnterpreteerd en geven vooral een beeld van hun *onderlinge* ontwikkeling in de tijd.

¹³ <https://www.mobileeurope.co.uk/press-wire/tim-hits-1gbps-over-lte-using-ericsson-laa-tech>

¹⁴ <http://www.zdnet.com/article/singtel-and-ericsson-hit-4g-gigabit-speeds-with-laa/>

¹⁵ <https://globenewswire.com/news-release/2018/02/22/1380164/0/en/Nokia-and-T-Mobile-achieve-1-3-Gbps-speeds-using-Licensed-Assisted-Access.html>



Figuur 5: Technologie-roadmaps voor gedeeld gebruik van vergunningsvrij spectrum²

Flexible spectrum sharing zal naar verwachting een belangrijk element van 5G worden, in Figuur 5 aangeduid met NR (5G New Radio). 5G NR sec en 5G NR in de vergunningsvrije band zijn nog in ontwikkeling. Binnen 3GPP worden de eerste studies naar 5G NR in de vergunningsvrije band al uitgevoerd. Meer dynamische mechanismen voor het delen van spectrum tussen MNO's om het spectrumgebruik te verhogen worden reeds overwogen^{2,16}. Hierbij zullen de *LSA repository* en *LSA controller* door een *spectrum broker*-functie worden vervangen om het daadwerkelijk gebruik in de tijd af te stemmen op actuele spectrumbehoeften. Hiervoor zijn *spectrum sensing* technieken nodig en een cognitieve radiofunctie⁵.

Een belangrijk onderdeel van 5G is mmWave-technologie. De band 64-71 GHz is dan ook reeds bestemd voor gedeeld, vergunningsvrij gebruik in zowel Europa als de Verenigde Staten. Daarnaast zouden de gelicenseerde banden 71-76 GHz en 81-86 GHz voor een dynamische vorm van LSA kunnen worden overwogen¹⁶.

2.3 5G technologie-update

2.3.1 Inleiding

Deze update van 5G-technologie zal vooral gericht zijn op de haalbaarheid om 5G mmWave-technologie te kunnen implementeren. Omdat dit specifieke materie is, zal eerst als 'primer' een zeer korte introductie worden gegeven van enkele belangrijke technieken binnen 5G New Radio met de gangbare terminologie en hun afkortingen. Vervolgens zal worden ingegaan op de ondersteuningsmogelijkheden die 5G mmWave-technologie naar verwachting gaat bieden voor omroepdiensten.

2.3.2 5G New Radio

Binnen 3GPP is men bezig met de ontwikkeling van de 5G radiotechnologiestandaard, aangeduid met 5G *New Radio* (5G NR). Deze beslaat zowel het radiofrequentiegebied beneden de 6 GHz als daarboven: de mmWave-frequenties.

5G NR zal gebruik maken van een variant van een gangbare technologie om signalen flexibel in het spectrum te verdelen en wel in deelbanden en bijbehorende draaggolven (*sub-carriers*). Dit betreft OFDM (Orthogonal Frequency Division

¹⁶ http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/249476/local_249476.pdf

Multiplexing) en wordt al in met name 4G toegepast. Het verschil met OFDM voor 5G NR is dat de ruimte tussen de deelbanden (de *sub-channel spacing* of SCS) niet vast is zoals bij 4G maar variabel. Voor de SCS is een aantal gestandaardiseerde waarden die toegepast kunnen worden, naar gelang de specificaties van de mobiele gebruikersapparatuur of *user equipment* (UE). Een grote SCS zal bovendien een stabiel radiofrequentsignaal mogelijk maken (een uitleg hiervan voert te ver; het komt erop neer dat bij grotere SCS de snelle, ruisachtige variaties van de signaalperiode (*jitter*) gemakkelijk kunnen worden gecompenseerd). Ook is in 5G NR sprake van een code per band, de zogenaamde *cyclic prefix* (CP), die ongewenste effecten als gevolg van gereflecteerde radiogolven aan onder meer gebouwen, kan verminderen.

De energie-efficiëntie is in 5G NR cruciaal verbeterd door het concept van *Bandwidth Parts* (BWP). Hierdoor kunnen UE's hun operationele bandbreedte beperken tot het minimum dat nodig is voor de ondersteuning van een bepaalde dienst.

Daarnaast zijn er andere, nieuwe technische 5G NR-componenten die momenteel ontwikkeld worden waaronder een dynamische vorm van TDD (Time Division Duplex; het scheiden van signaalstromen in de tijd, bijvoorbeeld up- en downstreamsignalen), *self-contained* framestructuur, diverse verbeteringen in downlink (DL)/uplink (UL) controlemechanismen en de ondersteuning van de coëxistentie van 5G NR met 4G (LTE)¹⁷.

Andere technieken die belangrijk zijn voor mmWave binnen 5G NR komen in Paragraaf 2.3.4 over de technische realiseerbaarheid ter sprake en zullen daar, waar nodig, worden toegelicht.

2.3.3 Ondersteuning van de omroep in 5G

Op dit moment wordt de meerderheid van de gemiste/vertraagde televisie-uitzendingen ('uitzending gemist') geleverd aan 4G smartphones en tablets. Hierdoor mag verwacht worden dat in de toekomst ook 5G een relevante rol op het gebied van (gepersonaliseerde) publieke en in principe ook regionale omroepdiensten zal spelen. In 5G wordt deze dienst gerealiseerd door de *enabling service* genaamd 'flexible broadcast/multicast service', waar 'flexibele' verwijst naar aspecten zoals dekkinggebied, capaciteit, kwaliteit en gelijktijdige coëxistentie met andere diensten.

'Flexible broadcast/multicast service' is geïdentificeerd door 3GPP als een van de basiscapaciteiten van 5G (in technische specificatie TS 22.261). In 5G NR wordt de ondersteuning van (multimedia) broadcast/multicast ook als eis vermeld in het 3GPP technische rapport over scenario's en eisen voor 5G (TR 38.913). Deze ondersteuning is echter uitgesteld door de grote druk op de specificatie van de 5G NR-standaard en wordt nog niet opgenomen in de eerste versie van de 5G-standaard: Release 15, gepland medio 2018. Momenteel wordt evaluatie van de 'flexible broadcast/multicast service' binnen 3GPP voorzien voor Release 16 (2019) of anders zelfs Release 17 die gepland staat van 2020 tot en met het eerste kwartaal van 2021.

Belangrijke eisen voor 'flexible broadcast/multicast service' zoals gespecificeerd door 3GPP zijn:

¹⁷ <https://arxiv.org/pdf/1712.09724>

- Ondersteuning van omroep in een breed geografisch gebied (de 'klassieke' omroep, zonder uplink) of in een specifiek geografisch gebied zoals een cel-sector, een cel of een groep cellen;
- Mogelijk maken dat de volledige transmissiecapaciteit beschikbaar komt voor de levering van een omroepprogramma ('content');
- Mogelijk maken dat een UE een omroepprogramma ontvangt via een 5G-radiokanaal terwijl gelijktijdig een datasessie over een ander radiokanaal plaatsvindt;
- De operator de mogelijkheid bieden om meerdere kwaliteitsniveaus (video resoluties) in te stellen voor de uitzending van content via dezelfde dienst als door een *stand-alone* 3GPP broadcast/multicast systeem wordt aangeboden;
- Ondersteuning van de gelijktijdige overdracht van content met diverse kwaliteitsniveaus (video resoluties) voor een bepaalde dienst naar dezelfde gebruikersterminal waarbij rekening wordt gehouden met bijvoorbeeld radiokenmerken van de UE (met name de bandbreedte) en de toepassing;
- Ondersteuning van de gelijktijdige overdracht van meerdere omroepdiensten naar een UE;
- Ondersteuning van een *stand-alone* broadcast/multicast-netwerk bestaande uit meerdere cellen die maximaal 200 km van elkaar verwijderd zijn.

2.3.4 *De technologische realiseerbaarheid van 5G mmWave*

In deze paragraaf wordt verkend welke perspectieven er zijn om daadwerkelijk de mmWave-technieken en technische radiofrequent (RF)-eisen voor 5G NR op een betaalbare manier te implementeren. Daaraan voorafgaand worden eerste de huidige 5G mmWave-technieken en hun uitdagingen kort besproken.

2.3.4.1 *Technieken en uitdagingen*

Tot nu toe heeft 3GPP de volgende 5G mmWave-banden gespecificeerd:

- 24.250 MHz – 27.500 MHz, ofwel de '26 GHz-band';
- 26.500 MHz – 29.500 MHz, ofwel de '28 GHz-band';
- 37.000 MHz – 40.000 MHz, ofwel de '39 GHz-band'.

Alle worden in de TDD-modus gebruikt (zie 3GPP TS 38.104), met mogelijke bandbreedtes van 50, 100, 200 of 400 MHz per OFDM sub-carrier.

Daarnaast kunnen enkele specifieke mmWave-banden worden gespecificeerd voor 5G-gebruik in een later stadium, met name in Release 16 en verder. Dit betreft bijvoorbeeld de banden 31,8-33,4 GHz, 40,5-47 GHz en 64-71 GHz die al zijn geïdentificeerd als mogelijke 5G-banden in de verschillende gebieden van de wereld.

Naar verwachting zijn vooral de volgende technieken en technologieën belangrijk voor de implementatie van mmWave binnen 5G NR:

- Massive MIMO (mMIMO). Dit antenneconcept maakt gebruik van arrays van vele basisantennes en automatische bundelvorming (*beamforming*). Hierdoor kan het nadeel van het hogere propagatieverlies voor mmWave ten opzichte van het propagatieverlies in de lagere spectrumbanden, verminderd worden. Tot voor kort werd verondersteld dat tegelijkertijd mMIMO vanwege de smalle antennebundels de volgende effecten vermindert:
 - interferentie met meerdere gebruikers en
 - *inter-symbol interferentie* (ISI), het uiteindelijke resultaat van de ontvangst van gereflecteerde 'duplicaten' van het gewenste radiosignaal, zogenaamde meerwegs- of multipad-propagatie. Dit moet echter nog worden bevestigd,

aangezien sommige recente metingen juist aangeven dat deze mitigatie niet wordt bereikt omdat in bepaalde situaties sterke reflecties aan gebouwen kunnen optreden die in de antennebundel worden ontvangen;

- Adaptieve bundelvorming (*adaptive beamforming*). Dit reduceert het effect van snel variërende radiokanalen in de mmWave-band;
- Meervoudige connectiviteit. Door het mogelijk te maken dat een enkele UE met meerdere basisstations in verbinding kan staan, kan het effect van verzwakking van het radiosignaal door de hand die de mobiel vasthoudt grotendeels worden opgelost;
- *Multi-User connectivity* (MU-MIMO) waardoor een basisstation-antenne tegelijkertijd automatisch gericht kan worden op meerdere gebruikers of gebruikersgroepen. Dit wordt mogelijk door het in drie dimensies realiseren van meerdere gelijktijdige, onafhankelijke antennebundels;
- Coördinatie met een carrier in de lagere band, dat wil zeggen beneden 6 GHz. Op netwerk-functieniveau in een lagere band kan bijvoorbeeld dekking en betrouwbaarheid worden gegarandeerd, terwijl op een ander functieniveau in de mmWave-band extra netwerkcapaciteit toegekend kan worden.

De volgende grote uitdagingen en overwegingen rond compromissen voor een effectieve uitvoering van 5G mmWave worden voorzien:

- Verkrijgen van kanaalstatus-informatie voor adaptieve bundelvorming binnen grootschalige antennes. Voor FDD (Frequency Division Duplex) vereist dit zogenaamde pilotsignalen bij elke uitzending vanuit elk van de array-elementen hetgeen resulteert in een zeer hoge overhead. Dit verklaart waarom TDD over het algemeen wordt gezien als meer veelbelovend voor 5G mmWave. Aangezien éénzelfde radiofrequentieband in TDD wordt gebruikt, zijn de radiokanaalkarakteristieken voor de downlink en uplink hetzelfde waardoor in TDD pilotsignalen overbodig zijn;
- Hardware complexiteit, kosten en energieverbruik in de mmWave-band. Dit motiveert het gebruik van zogenaamde hybride bundelvorming voor 5G mmWave. Hierbij wordt bundelvorming gedeeltelijk gerealiseerd in de basisband (zogenaamde 'digitale bundelvorming') en gedeeltelijk in het RF-deel ('analoge bundelvorming'). Deze verhouding wordt bepaald door een afweging tussen netwerkflexibiliteit en de hardware-kosten. Onderstaand geeft Figuur 6 de hybride architectuur vereenvoudigd weer;

waarbij over een afstand van 1,2 km een transmissiesnelheid van meer dan 4,52 Gbit/s downlink en 1,55 Gbit/s uplink is bereikt¹⁹.

De transmissie-afstand van 5G mmWave hangt grotendeels af van of de UE zich binnen of buiten bevindt en van de radiopropagatie-omstandigheden die vooral het gevolg zijn van Line-of-Sight (LOS) of Non-Line-of-Sight (NLOS) condities. Tabel 1 geeft indicatieve waarden van haalbare transmissie-afstanden in verschillende gevallen²⁰ voor 28 GHz. Blijkbaar richt Tabel 1 zich hoofdzakelijk op NLOS-condities die ten opzichte van LOS-condities de meeste beperkingen geven. Specifiek kan worden geconcludeerd dat in geval van indoordekking de invloed van ruiten bij mmWave-frequenties significant is.

Tabel 1: Indicatieve haalbare afstanden in diverse omstandigheden²⁰

	Coverage range at 100 Mbps cell edge throughput		Coverage range at 1 Gbps cell edge throughput	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
Outdoor-to-outdoor		354		219
Outdoor-to-Indoor (standard multi-pane glass)	1260	128	428	66
Outdoor-to-Indoor (IRR glass)	140	37	51	18

5G mmWave is vooral geschikt voor het realiseren van Enhanced Mobile Broadband (eMBB) diensten, waarvoor een hoge datasnelheid en grote bandbreedte benodigd is. Bovendien kan mmWave-FWA worden gebruikt als een alternatieve oplossing voor vaste draadloze internettoegang, voor zowel residentieel gebruik als voor kantoorgebouwen.

5G mmWave state-of-the-art RF front-end technologie

Een voorbeeld van een *state-of-the-art* front-end realisatie is de 5G mmWave FWA-oplossing van Samsung die in februari 2018 door de FCC is goedgekeurd²¹. In diezelfde maand lanceerde Movandi zijn 'Beamx' voor de 28 GHz en 39 GHz mmWave-banden. Dit betreft een volledig geïntegreerd 5G front-end, bestaande uit een vermogensversterker en alle gangbare ontvangstmouders.

'Beamx' beschikt onder meer over²²:

- Schaalbaarheid in de vorm van ondersteuning van 16 tot 256 antennearray-elementen voor diverse apparaten zoals mobiele telefoons, tablets en basisstations;

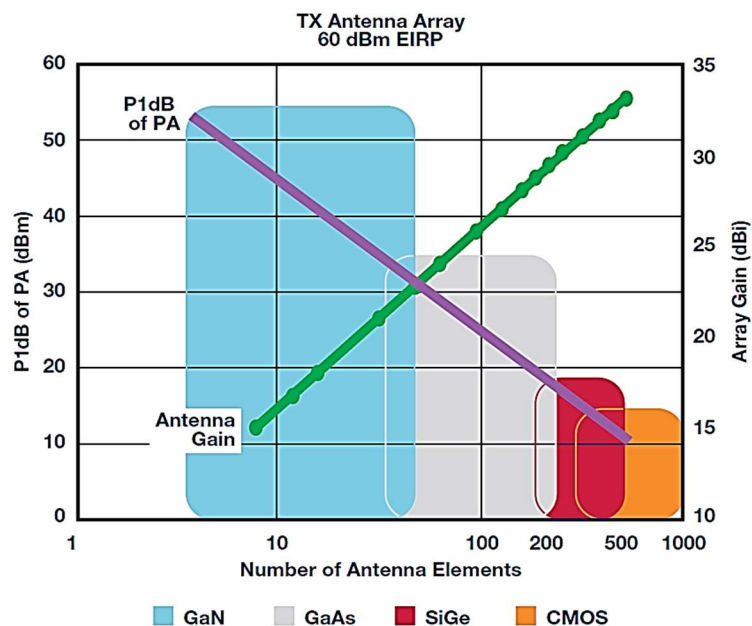
¹⁹ <http://www.microwavejournal.com/articles/29498-huawei-and-ntt-docomo-trial-28-ghz-long-distance-link-for-5G>;

²⁰ <http://frankrayal.com/wp-content/uploads/2017/10/The-Critical-Dimensions-for-5G-mmWave-Access-.pdf>;

²¹ <http://www.zdnet.com/article/mwc-2018-samsung-5G-fixed-wireless-gains-fcc-approval/>;

²² <https://globenewswire.com/news-release/2018/02/22/1379576/0/en/Movandi-Unveils-BeamX-5G-RF-Front-End-28-GHz-and-39-GHz-Millimeter-Wave-Solutions.html>;

- Ondersteuning van de volledige 5G-bandbreedtes zoals hierboven aangeduid en van 256QAM zodat geanticipeerd wordt op compatibiliteit met Releases na Release 15;
- Gelijktijdige en onafhankelijke antennepolarisaties. Gelijktijdig kunnen tot 32 antennebundels met onderling onafhankelijke polarisatie worden gerealiseerd;
- Online (*on-the-fly*) kalibratie met 5G-apparaten;
- Snelle schakeling tussen antennebundels;
- Automatische, in fase en frequentie gesynchroniseerde sub-antennearrays;
- Modulair en kosteneffectief ontwerp gebaseerd op CMOS en standaardsubstraten voor antennes en *system boards*.



Figuur 7: Verband tussen totale antenne-winst, het minimaal vereiste uitgangsvermogen van de individuele vermogensversterkers en de geschikte RF-chiptechnologieën

Bovenstaand toont Figuur 7 een belangrijk resultaat van de analyse van Analog Devices over de relatie tussen de totale antenne-winst (*antenna gain*), het minimaal vereiste uitgangsvermogen van de individuele vermogensversterkers en de geschikte RF-chiptechnologieën²³.

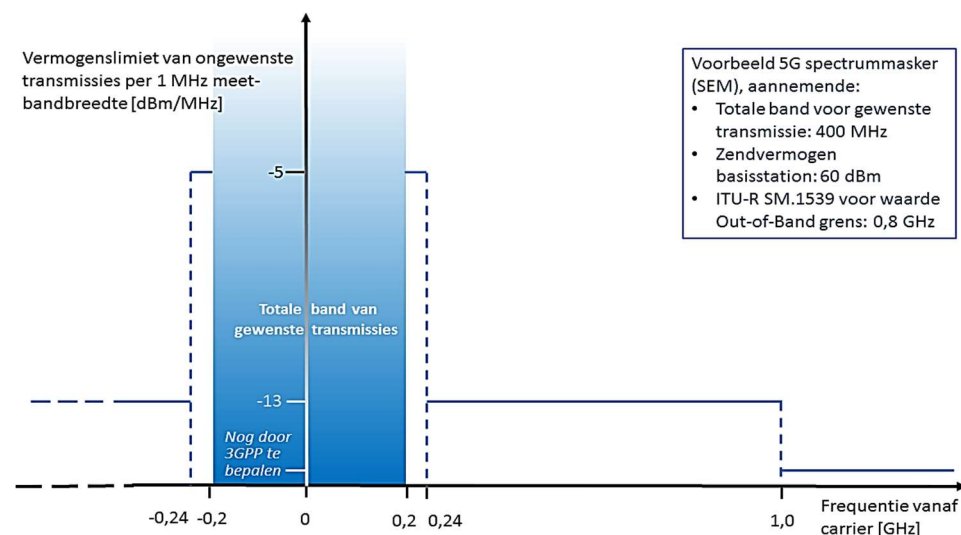
Volgens deze analyse kan een typische basisstation-antenne die uitzendt op 28 GHz met 60 dBm EIRP (Effective Isotropic Radiated Power: het effectief uitgezonden vermogen ten opzichte van dat van een rondstralende antenne) het beste worden uitgevoerd met behulp van een silicium-germanium (SiGe) BiCMOS-integratietechnologie. Dit is een technologie die CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) en bipolaire halfgeleidertechnologieën combineert om een combinatie van de gunstige eigenschappen van de afzonderlijke technologieën te verkrijgen. Hierbij zijn zowel het stroomverbruik als de integratie vormfactor (niet weergegeven in Figuur 7) in beschouwing genomen. Als een antenne overwogen wordt met lager zendvermogen, wordt CMOS een haalbare optie. CMOS- en SiGe-technologieën worden dan ook algemeen gezien als bouwstenen voor goedkope 5G mmWave-circuits.

²³ <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/white-papers/RF-Technology-for-the-5G-Millimeter-Wave-Radio.pdf>;

3GPP specificeert de maximaal toegestane ongewenste uitzending van 5G mmWave-zenders (om precies te zijn, in TS 38.104. In technisch detail: hierin is begrepen *out-of-band* en *spurious* emissies, als gevolg van bijvoorbeeld faseruis en circuit niet-lineariteiten). De maximaal toegestane ongewenste emissie in de frequentieband om de totale band van gewenste transmissies wordt gedefinieerd door een *spectrum emission mask* (SEM).

Bepaling van de definitieve details van de SEM voor 5G mmWave is nog steeds onderwerp van discussie binnen 3GPP die wordt gedreven door de verwachtingen van alle betrokken industrieën op wat zij beschouwen als haalbaar en wenselijk om in de markt te zetten.

Op dit moment worden verschillende mmWave SEM-variaties gedefinieerd, afhankelijk van het type basisstation (ofwel de klasse), het zendvermogen en de radiofrequentie. Figuur 8 toont een voorbeeld van een SEM in de 28 GHz-band en een bandbreedte van 400 MHz. Zoals voor Figuur 7 is voor het effectieve (uitgezonden) zendvermogen ook weer uitgegaan van een typische basisstation-configuratie.



Figuur 8: Voorbeeld van een 5G-spectrummasker

Ten behoeve van de duidelijkheid is vanwege de symmetrie van het masker ten opzichte van de carrier, alleen het rechterdeel volledig weergegeven.

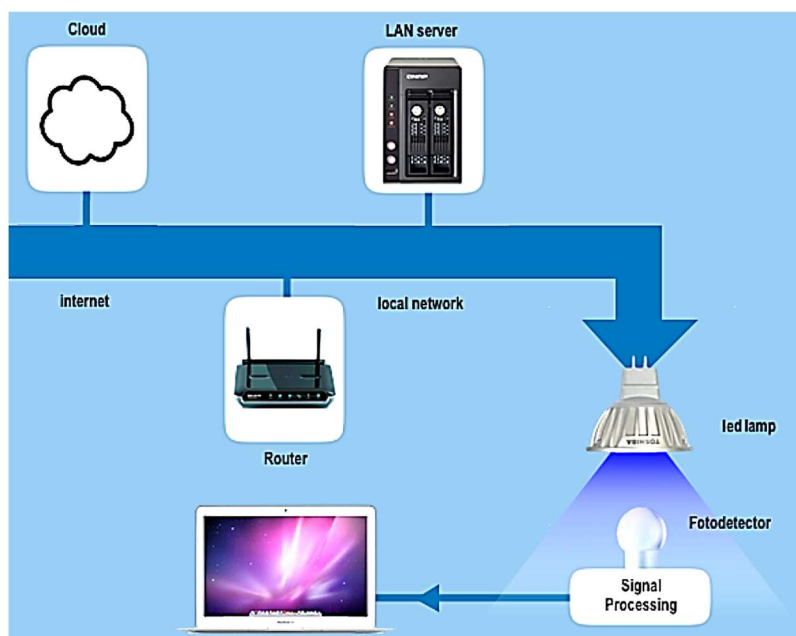
2.4 Li-Fi

2.4.1 Wat is Li-Fi en waarvoor kan dit gebruikt worden?

Wi-Fi is één van de meest succesvolle draadloze technieken op dit moment: de totale *installed base* bedraagt circa 9 miljard apparaten. Iedere laptop, smartphone of tablet is voorzien van Wi-Fi. Het gebruik van deze apparatuur, met name voor breedbandige toepassingen, zal naar verwachting nog toenemen. Het gevolg daarvan is dat in de vergunningsvrije banden waarin Wi-Fi werkt, het spectrumgebruik zodanig toeneemt dat in drukke gebieden zoals stadscentra, kantoorruimten en publieke ruimtes zoals stationshallen, congestie kan optreden waardoor niet meer iedereen bediend kan worden. Hier zou een WLAN-systeem dat in andere banden werkt, uitkomst kunnen bieden.

Een mogelijke kandidaat hiervoor is (*near*) *Visible Light Communications*, kortweg VLC (in de eerste versie van de WLAN-standaard was al infrarood als medium opgenomen, maar dit heeft tot op heden niet geleid tot implementaties). VLC werd in 1999 in Japan geïntroduceerd als systeem dat de leds van verkeerslichten gebruikte om draadloos spraakberichten te verspreiden naar auto's²⁴. VLC is meer de algemene term geworden voor communicatie via leds. De huidige VLC-technologie wordt aangeduid met Li-Fi (Light Fidelity). Dit begrip is medio 2011 voorgesteld en inmiddels bestaan systemen die als Li-Fi producten worden aangemerkt.

Doordat Li-Fi gebruik maakt van zichtbaar led-licht als transmissiemedium is Li-Fi niet onderhevig aan vergunningen en biedt bovendien veelvouden aan spectrale ruimte ten opzichte van de hoogste WLAN-bandbreedtes: het VLC-spectrum biedt 400.000 GHz ofwel 400 THz aan beschikbare bandbreedte. Afhankelijk van de gebruiksomstandigheden is de praktisch realiseerbare capaciteit van deze technologie momenteel tenminste die van Wi-Fi. Dit geeft aan dat er nog veel ruimte is voor de ontwikkeling van technologie en van standaardisatie.



Figuur 9: Werking van Li-Fi in een geïntegreerde setting met led-verlichting²⁵

De basisgedachte achter Li-Fi is dat het kan worden geïntegreerd met inherent energiezuinige led-lampen, zoals aangegeven in Figuur 9. Zo wordt de functionaliteit van lichtbron gecombineerd met het voorzien van transmissiecapaciteit waardoor dit laatste nauwelijks energie kost. Deze lampen worden voorzien van speciale armaturen waarin Li-Fi wordt ondergebracht. Het zichtbare licht wordt gemoduleerd met de over te brengen informatie. Dit gaat zo snel, dat het menselijk oog dit niet waarneemt. Omdat leds snel aangestuurd kunnen worden, is ook de vertraging van de informatieoverdracht zeer gering en te vergelijken met die van Wi-Fi verbindingen.

²⁴ G. Pang, T. Kwan, C.-H. Chan, and H. Liu: *Led traffic light as a communications device*, IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, Tokyo, Japan, pp. 788-793, 1999

²⁵ https://www.ripublication.com/irph/ijict_spl/ijictv4n16spl_11.pdf

Omdat de downloadsnelheid het knelpunt is van bestaande technologieën zoals Wi-Fi, is de belangrijkste toegevoegde waarde van Li-Fi het leveren van een downlink met grote capaciteit. Een Li-Fi uplink is in theorie wel mogelijk maar het is tot op heden praktischer en goedkoper deze te leveren door een infrarode verbinding. Een Li-Fi uplink via infrarood beperkt de complexiteit en omvang van de gebruikersapparatuur.

Het gebruik van licht als medium maakt dat Li-Fi verder bij uitstek toegepast kan worden waar en wanneer sprake is van één of meer van de volgende situaties²⁶:

- Behoeftte aan zeer grote transmissiecapaciteit. Naast al genoemde omgevingen is het goed denkbaar dat Li-Fi gebruikt kan worden voor bijvoorbeeld het entertainmentsysteem aan boord van vliegtuigen, waarbij tevens het gewicht van kabels aan boord wezenlijk verminderd wordt;
- Het gebruik van het radiomedium is niet of liever niet gewenst, bijvoorbeeld in operatiekamers. Ook kan gedacht worden aan het verminderen van de blootstelling aan elektromagnetische velden om mensen die aangeven van dergelijke blootstelling klachten te ondervinden, tegemoet te komen²⁷;
- Elektromagnetische interferentie moet worden vermeden zoals in geavanceerde productiehallen met robots (*smart industry*);
- Het gebruik van RF-apparatuur is niet toegestaan zoals op specifieke industriële omgevingen, in vliegtuigen tijdens de vlucht of op sommige militaire locaties;
- Beperking van draadloze transmissie tot een indoor-omgeving is vanuit oogpunt van beveiliging of privacy gewenst zoals een huiskamer, hotelkamer, vergaderzaal of een kantoorgebouw.

Bovenstaande kan de indruk wekken dat Li-Fi alleen toepassing vindt in indoor-omgevingen. Outdoor gebruik is echter, ondanks de grote verstoring door zonlicht, niet op voorhand uit te sluiten. Het gaat ook dan om kleine afstanden zoals voor de communicatie van (zelfrijdende) voertuigen met wegkantsystemen zoals led-verkeerslichten om het verkeersmanagement te optimaliseren. Ook kan gedacht worden aan de communicatie tussen voertuigen voor onder meer het voorkomen van botsingen en het doorgeven van lokale verkeersinformatie.

Een verdere outdoor-toepassing van Li-Fi is die van hot-spot geïntegreerd met straatlantaarns en de eerder genoemde verkeerslichten die werken op basis van leds²⁸. Een aantal toepassingsomgevingen van Li-Fi is weergegeven Figuur 10.

Vooralsnog is de enig denkbare outdoor-toepassing van Li-Fi over grotere afstanden is het bieden van een alternatief voor akoestische onderwatercommunicatie. De doordringbaarheid van licht in water is beperkt waardoor voor communicatie via leds een datasnelheid van 10 Mbit/s bij circa 20 m worden verwacht²⁹. Dit biedt perspectieven voor toepassingen zoals spraak-, data-

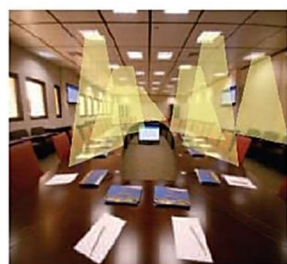
²⁶ Ir. S. van der Gaast et al (Stratix en TU/e): *Optical Wireless Communication: options for extended spectrum use*, Hilversum, 22 december 2017

²⁷ <http://luxreview.com/article/2017/07/the-surprising-reason-this-german-island-is-experimenting-with-li-fi>

²⁸ <https://www.lifi.nl>

²⁹ S. Revathy et al: *Li-Fi Based Data Transfer in Underwater System*, Standard International Journals Transactions on Computer Science Engineering & its Applications (CSEA), Vol. 5, No. 4, May 2017

en beeldcommunicatie tussen duikers onderling en mogelijk ook (via blauwe laserverbindingen) tussen duikers en het vaartuig waar zij vanaf zijn gedoken.



Connectiviteit in een vergaderzaal



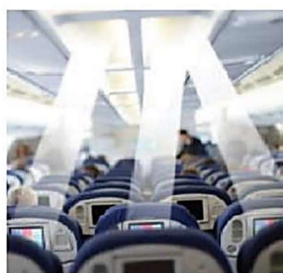
Ondersteuning van een industrieel productieproces



Connectiviteit in een operatiekamer



Communicatie tussen voertuigen



Connectiviteit in een vliegtuig



Communicatie onderwater

Figuur 10: Een aantal toepassingsomgevingen van Li-Fi^{26,30,31}

Voor dergelijke toepassingen zijn radiogolven onder water niet haalbaar. Akoestische onderwatercommunicatie is specifiek en kan op zich wel veel grotere afstanden overbruggen maar heeft wezenlijk minder capaciteit dan Li-Fi waardoor de diensten veel beperkter zijn. Zo duurt het 5 seconden voordat een foto van lage kwaliteit over 5 km verzonden is³².

Veelzeggend voor het belang van de onderwater-toepassing van Li-Fi is dat de Amerikaanse marine sinds 2014 de haalbaarheid van Li-Fi onderwater-verbindingen tussen onderzeeërs onderzoekt³³.

2.4.2 Beperkingen van Li-Fi

Om via Li-Fi data te kunnen versturen moeten de leds aan blijven. Dit nadeel is echter beperkt omdat het mogelijk is de leds te dimmen tot op een niveau dat het lijkt of ze zijn uitgeschakeld. In dat geval is alleen hun functie van lichtbron uitgeschakeld terwijl Li-Fi nog kan werken en daarbij minder energie te verbruiken dan Wi-Fi.

Wi-Fi heeft een zeer grote *installed base* (er zijn meer apparaten met Wi-Fi dan mensen). Alleen al hierdoor zullen in de komende jaren beide technologieën naast elkaar bestaan. Hiervoor is echter ook een fundamentele reden. In het algemeen functioneert Li-Fi via vrijzicht-verbindingen, terwijl deze niet nodig zijn voor RF. Hierdoor is Li-Fi inherent aanvullend op Wi-Fi.

Een belangrijke beperking van Li-Fi systemen is dat deze gevoelig zijn voor interferentie door allerlei lichtbronnen, waaronder zonlicht. Hierdoor is het bereik van Li-Fi verbindingen circa een derde van dat van Wi-Fi³⁴.

³⁰ <http://www.nextlifi.com/underwater-communications-system/>

³¹ <https://www.slideshare.net/AbdallahMansour3/lifi-technology-presentation-62616653>

³² <https://www.economist.com/news/technology-quarterly/21572920-networking-emerging-undersea-data-networks-are-connecting-submarines-aquatic>

³³ <https://gizmodo.com/the-navys-new-underwater-internet-1538179183>

³⁴ <http://pubs.sciepub.com/jcn/4/1/3> (Section 13)

2.4.3 *Standaardisatie*

Omdat optische draadloze communicatie een opkomende technologie is, is op het moment van schrijven Li-Fi nog geen formele standaard. Het meeste werk rond VLC werd gestart binnen IEEE 802.15.7 (VLC als onderdeel van WPAN: Wireless Personal Area Networks). Er werd onder deze noemer echter onvoldoende industriële samenwerking gecreëerd en is voorgesteld VLC (als Li-Fi) onder de Wi-Fi IEEE 802.11-standaard te plaatsen. Hierdoor kunnen onderdelen uit Wi-Fi ook gemakkelijk worden hergebruikt voor de Li-Fi standaard.

In juli 2017 heeft IEEE de *Light Communications Study Group* opgericht om *use cases* en scenario's op te stellen. Vervolgens zal men zich in mei 2018 buigen over de Li-Fi standaard als deel van IEEE 802.11. Daarbij zal ook gekeken worden naar hergebruik van de standaard ITU-T G.hn voor thuisnetwerken, vooral ten behoeve van de definitie van de *interworking* met PLC (Power Line Communications).

2.4.4 *Partijen en producten*

Eind 2011 werd het Li-Fi consortium opgericht door de technologiepartners Fraunhofer IPMS, Supreme Architecture, IBSENtelecom en TriLumina om de ontwikkeling en distributie van optische draadloze communicatie- en navigatie- en positioneringstechnologieën te bevorderen.

In 2012 werd het Schotse bedrijf **PureLiFi** opgericht. Dit is de OEM (Original Equipment Manufacturer) van Li-Fi producten zoals LiFi-X (2016) en LiFi-XC (oktober 2017). LiFi-X was de eerste dongel en ondersteunde symmetrisch verkeer op 42 Mbit/s. LiFi-XC is een USB-gebaseerd *access point* voor integratie in een laptop, tablet of smartphone en levert tot 43 Mbit/s.

Naast PureLiFi zijn enkele voorbeelden van huidige bedrijven en producten²⁶:

- **Lucibel.** Dit Franse bedrijf levert Ores LiFi dat enigszins vergelijkbaar is met LiFi-X maar die tevens hand-over biedt;
- **Philips** biedt een asymmetrische Li-Fi (5 Mbit/s uplink en 20 Mbit/s downlink) en een Li-Fi plaatsbepalingssysteem aan. Zo kan door middel van een app winkelend publiek producten lokaliseren of korting krijgen op basis van het gangpad of de producten die ze bekijken. Op grond van de locatie van de klant in de winkel kan de winkelier gericht informatie naar deze klant versturen. Ook in het Boerhaave museum in Leiden is deze technologie al beproefd;
- **Basic6** uit de VS levert ook Li-Fi plaatsbepaling waarbij de functionaliteit sterk overeenkomst met die van het systeem van Philips. Van het systeem van Basic6 is bekend dat deze bovendien statistische gegevens produceert rond verblijftijden in de winkel, interacties met winkelpersoneel et cetera;
- **SLUX.** Deze Zwitserse fabrikant legt zich toe op producten die gebruik maken van gereflecteerde signalen, waardoor vrijzicht-verbindingen niet strikt noodzakelijk zijn en waarbij symmetrische verbindingen van elk 15 Mbit/s gerealiseerd kunnen worden.

Naast deze fabrikanten zijn nog andere partijen actief zoals *start-ups* en onderzoeksorganisaties die prototypes beproeven. Hierbij worden vaak haalbare datasnelheden van rond 1 Gbit/s geclaimd. Situaties en vooral de overbrugbare afstanden kunnen daarbij wel erg variëren (van centimeters tot enkele tientallen meters).

2.4.5 *Regulering*

Voor het gedeeld gebruik van het infrarode en zichtbare licht bestaan geen regels. Het gebruik van dit spectrum is alleen onderworpen aan wetgeving als het gaat om de beperkingen van bronnen ten behoeve van de gezondheid, namelijk van de intensiteit en het impuls-verloop van de lichtsignalen.

2.4.6 *Toekomstige ontwikkelingen*

Hoewel Li-Fi al een hoog *technical readiness level* heeft, zijn er zoals eerder aangegeven al testen gedaan waarbij verbindingen gerealiseerd zijn rond 1 Gbit/s. Dit aspect tezamen met de *use cases* en scenario's zullen een belangrijke input vormen voor de definitie van de toekomstige Li-Fi standaard als belangrijke basis voor interoperabele Li-Fi apparatuur met wezenlijk hogere capaciteit dan de huidige producten.

Of Li-Fi op een vergelijkbare schaal als Wi-Fi de markt zal veroveren, hangt af van uiteenlopende factoren zoals de snelheid waarmee genoemde Li-Fi standaardisatie tot stand gebracht wordt, de ontwikkeling van de groei van het dataverkeer waardoor de noodzaak voor Li-Fi stijgt, de definitie van nieuwe vermogenslimieten voor RF-systemen waardoor Li-Fi aantrekkelijker wordt, productiekosten, et cetera. Een belangrijke factor is de positie ten opzichte van mogelijk alternatieve systemen zoals die infrarode systemen, waarbij meer infrarode bundels tegelijk automatisch naar gebruikers gericht kunnen worden. Hiermee kan gemakkelijker dan bij Li-Fi een nog grotere datasnelheid (circa 10 Gbit/s per bundel) worden behaald in combinatie met een relatief groot bereik bij een betere energie-efficiëntie. De complexiteit van dit systeem en daardoor de aanzienlijke productiekosten zijn echter nog belangrijke nadelen.

Tenslotte zijn de RF-gebaseerde technologieën zoals 5G en Wi-Fi nog steeds in ontwikkeling. De concurrentie die Li-Fi daarvan ondervindt, zal dan ook wezenlijk zijn. Wel mag verwacht worden dat de diverse draadloze systemen op grond van hun inherente, vaak onderling aanvullende eigenschappen naast elkaar zullen bestaan.

3 Tot besluit

Voor eventuele vragen of opmerkingen naar aanleiding van deze Monitor Draadloze Technologie kunt u contact opnemen met TNO, via e-mail adres monitordraadlozetechnologie@tno.nl.

Graag wijzen wij u op de mogelijkheid om deze Monitor Draadloze Technologie, of delen daarvan, door TNO te laten presenteren voor doelgroepen binnen de Nederlandse telecommunicatiesector. Voor verdere informatie hierover verzoeken wij u contact op te nemen via bovengenoemd e-mail adres, of met één van de auteurs van dit rapport.