



Technical Sciences
Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

www.tno.nl
T +31 88 866 00 00

TNO-rapport 2016 R10467

Monitor Draadloze Technologie

Voorjaar 2016

Datum	april 2016
Auteurs	Onno Mantel, Adrian Pais, Toon Norp, Marcel van Sambeek, Ljupco Jorguseski, Frank den Hartog, Jan Doeven, Henk Dekker
Aantal pagina's	43

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.

Deze rapportage is tot stand gekomen dankzij een bijdrage van het Ministerie van Economische Zaken.

© 2016 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Het “draadloos speelveld”	5
1.2	De Monitor Draadloze Technologie	5
2	Ontwikkelingen in draadloze technologie.....	7
2.1	WRC2015	7
2.2	4G	8
2.3	5G	11
2.4	Wi-Fi.....	16
2.5	LoRa/SigFox	21
2.6	Technologieën voor kortere afstanden	25
2.7	Digitale omroep.....	32
2.8	Satellietcommunicatie	38
3	Ter afronding.....	43

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 de ontwikkelingen in de technologie en de markt gevolgd.

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

1.1 Het “draadloos speelveld”

Op het gebied van draadloze technologie spelen diverse ontwikkelingen. Zo vindt al een aantal jaar een sterke groei plaats van het mobiele dataverkeer, als gevolg van een toenemend gebruik van smartphones. Om in deze groei te kunnen voorzien wordt door mobiele providers fors geïnvesteerd in de uitrol en verbetering van het 4G (LTE) netwerk. Wi-Fi en andere draadloze technologieën zoals Bluetooth en Zigbee hebben een belangrijke plaats ingenomen bij het laagdrempelig aanbieden van draadloze toegang over kortere afstanden. Aan de omroepkant zijn diverse digitale systemen ontwikkeld, zoals DVB-T en DAB, ieder met hun eigen specifieke sterkte en beoogd gebruikersprofiel. In de toekomst lijkt een verdere integratie plaats te gaan vinden, waarbij klassieke omroepdiensten ook via bijvoorbeeld LTE kunnen worden aangeboden. Inmiddels wordt gewerkt aan de standaardisatie van de volgende generatie mobiele technologie 5G. Een belangrijk toepassingsgebied van 5G, het Internet of Things, is een groeimarkt die snel in belang toeneemt en waarvoor nu al verschillende netwerken worden uitgerold, o.a. gebaseerd op LoRa en SigFox technologie.

Het gevaar van deze ontwikkelingen is dat de diverse belanghebbenden aan markt- en overheidszijde door de bomen het bos niet meer zien en niet zeker zijn over hun eigen oordeel op basis van de mogelijk gekleurde informatie vanuit de markt. 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.

In de afgelopen jaren bestond de Monitor Draadloze Technologie uit een (eenmalige) schriftelijke rapportage en daarnaast een website waarop een aantal belangrijke draadloze technologieën werd beschreven aan de hand van een aantal vaste criteria. Gebleken is echter dat deze website slechts beperkt in een behoefte voorzorg, terwijl de schriftelijke rapportage zelf dit duidelijk wel doet. Voor dit jaar is er daarom voor gekozen om het accent te verleggen naar de schriftelijke rapportage. Deze wordt uitgebreid tot twee (halfjaarlijkse) edities, zodat beter kan worden aangesloten op recente trends en ontwikkelingen.

Voor 2016 zal de Monitor Draadloze Technologie bestaan uit de volgende twee schriftelijke rapportages:

- Een overzicht van ontwikkelingen vanuit technologisch perspectief (april). Per technologie wordt kort de stand van zaken beschreven. Dit is de rapportage die nu voor u ligt.
- Een overzicht van ontwikkelingen belicht vanuit een aantal specifieke toepassingsgebieden (oktober). Denk hierbij bijvoorbeeld aan Intelligent Transport Systems (ITS), sensornetwerken, of het gebruik van “wearables”.

De scope van de monitor omvat radiofrequente technologieën die de basis vormen voor draadloze verbindingen waarmee aan eindgebruikers elektronische communicatie- en omroepdiensten kunnen worden aangeboden. Voor het eerst is dit jaar ook een kort overzicht opgenomen van ontwikkelingen in satellietcommunicatie.

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 sectiegewijs een overzicht gegeven van de ontwikkelingen in een aantal relevante draadloze technologie. Het overzicht wordt voorafgegaan door een meer algemene sectie die kort ingaat op de uitkomsten van de laatste World Radio Conference.

2.1 WRC2015

Afgelopen november vond in Genève de World Radio Conference (WRC) plaats. Deze conferentie wordt eens in de drie tot vier jaar gehouden, en heeft tot doel om nieuwe afspraken te maken over het frequentiegebruik. Deze afspraken worden vastgelegd in een internationaal verdrag, de Radio Regulations. Aan de WRC werd deelgenomen door zo'n 3300 afgevaardigden uit 162 van de 193 bij de ITU aangesloten landen. De besluiten van de WRC vormen het uitgangspunt voor het spectrumbeleid in de individuele landen, zoals ook Nederland.

Enkele belangrijke uitkomsten van de WRC2015:

- De 700 MHz frequentieband (694-790 MHz) is in Regio 1 (waaronder ook Europa valt) definitief mede bestemd voor mobiele breedbandtoepassingen. De 700 MHz band is nu wereldwijd beschikbaar voor mobiel gebruik. Hiermee komt dus extra capaciteit beschikbaar in een relatief lage frequentieband. De frequentieband 470-694 MHz blijft tot in ieder geval 2023 exclusief bestemd voor omroep.
- Daarnaast is ook ander spectrum aangewezen voor mobiele breedband. Het betreft de blokken 1427-1452 MHz en 1492-1518 MHz in de L-band, en spectrum in de C-band (3,4-3,6 GHz).
- In voorbereiding op de WRC2019 zullen studies worden verricht om additioneel spectrum voor mobiele breedbandtoepassingen te identificeren boven de 6 GHz. Voorzien wordt dat dit spectrum nodig is om ook op de langere termijn te kunnen voorzien in de behoefte aan capaciteit.
- Er is overeenstemming bereikt over het gebruik van spectrum voor *Global Flight Tracking*, het volgen van vliegtuigen. Voor deze toepassing bestaat veel aandacht, onder meer na de verdwijning van een vliegtuig van Malaysia Airlines in maart 2014. De frequentieband 1087,7-1092,3 MHz is aangewezen voor communicatie tussen vliegtuig en satellieten, zodat vliegtuigen ook in meer afgelegen gebieden gevolgd kunnen worden.
- Er is extra spectrum aangewezen dat kan worden gebruikt voor Openbare Orde en Veiligheid (OOV), onder meer voor de apparatuur van politie, brandweer en ambulances. Het bestaande afstembereik van 380-470 MHz is uitgebreid met 694-894 MHz. Ook wordt het gebruik van deze banden meer techniek-neutraal gedefinieerd.
- Er is een aantal nieuwe afspraken gemaakt voor satellietcommunicatie. Zo wordt extra spectrum beschikbaar gesteld voor vaste satellietdiensten en is besloten om studies te doen naar frequentiegebruik voor kleine (nano- en pico-) satellieten die worden ingezet tijdens kortdurende ruimtemissies. Ook is besloten de toepassing van zogeheten "Earth Stations in Motion" te vereenvoudigen, d.w.z. het leveren van breedbandige satellietconnectiviteit

naar schepen, treinen en vliegtuigen. De bijbehorende frequentiebanden zijn 19,7-20,2 GHz en 29,5-30,0 GHz.

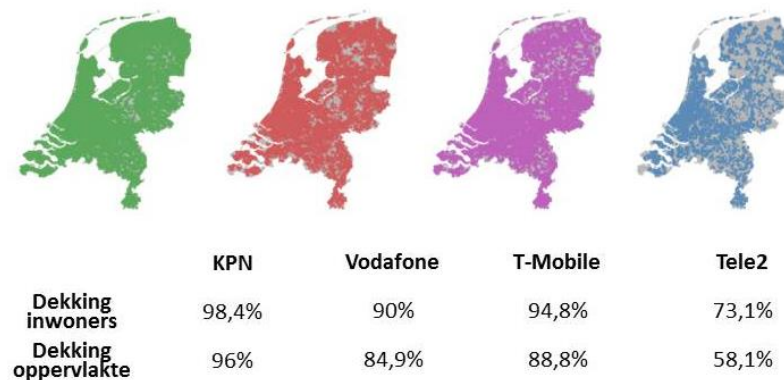
Voor meer informatie over de uitkomsten van de WRC wordt verwezen naar de website van de ITU¹ en naar een nieuwsbericht van Agentschap Telecom.²

2.2 4G

In deze sectie geven we een overzicht van de status en ontwikkelingen in de 4G mobiele netwerken.

Status van 4G in Nederland

4G mobiele netwerken gebaseerd op de Long Term Evolution (LTE) standaard zijn nu grootschalig uitgerold in Nederland en andere ontwikkelde landen. De 4G dekking van de drie Nederlandse providers KPN, Vodafone en T-Mobile bedraagt tenminste 95% van de bevolking en tenminste 89% van het oppervlak, volgens cijfers van 4gdekking.nl (zie Figuur 2-1). Tele2 loopt wat achter met 73% dekking van de bevolking en 58% van het oppervlak.



Figuur 2-1: 4G dekking in Nederland per mobiele provider.³

De 4G mobiele netwerken bieden een theoretische pieksnelheid van rond 150 Mbit/s bij 20 MHz spectrum bandbreedte. In werkelijkheid wordt deze snelheid zelden bereikt omdat de beschikbare capaciteit wordt gedeeld met vele gebruikers. Gebruikelijke downloadsnelheden in Nederland liggen in de orde van 30 Mbit/s.

4G met LTE-Advanced wordt uitgerold in Nederland

De meeste mobiele providers in Nederland hebben dus inmiddels een hoge mate van dekking gerealiseerd. De uitdaging ligt nu in het kunnen verwerken van de sterke groei in het dataverkeer zonder dat dit ten koste gaat van de gebruikerservaring. Om in de toenemende vraag naar data te voorzien wordt de netwerkcapaciteit verhoogd door het gebruik van LTE-Advanced technologie. Met LTE-Advanced kunnen datasnelheden gehaald worden tot zo'n 300 Mbit/s door gebruik te maken van technieken zoals Carrier Aggregation (het samenvoegen van bandbreedte), MIMO (verschillende datastromen over meerdere antennes) en

¹ <http://www.itu.int/en/ITU-R>

² <https://www.agentschaptelecom.nl/actueel/nieuws/2015/wrc-2015-voor-nederland-succesvol-verlopen>

³ <http://www.4gdekking.nl>

CoMP (Coordinated Multipoint, het afstemmen van zenden en ontvangen tussen basisstations).

KPN past Carrier Aggregation toe door samenvoeging van de 800 MHz en de 1800 MHz frequentiebanden. Onlangs heeft het plannen bekendgemaakt om nog een band hieraan toe te voegen, zodat in feite sprake is van “tri-carrier aggregation”. Dit kan zowel de 2100 MHz⁴ als de 2600 MHz⁵ band zijn. Een test met deze technologie laat zien dat snelheden tot 391 Mbit/s gehaald kunnen worden.⁵ Ook Vodafone heeft aangekondigd dat het testen doet met tri-carrier aggregation, door combineren van de 800, 1800 en 2600 MHz banden.⁶ Tele2, dat sinds 2013 een LTE-netwerk heeft, zou carrier aggregation toepassen voor de 800 en 2600 MHz banden.⁷

Naar verwachting zal in de toekomst verdere samenvoeging van frequentiebanden plaatsvinden. Dit wordt mogelijk gemaakt door de 3GPP standaard die samenvoeging van vijf banden toestaat, tot een maximale gecombineerde bandbreedte van 100 MHz.⁸ Bovendien zal de invoering van interferentiebeperkende technieken zoals CoMP leiden tot hogere datasnelheden voor gebruikers aan de rand van de mobiele netwerkceld.

Kleine cellen leiden tot verdere toename van netwerkcapaciteit

Verwacht wordt dat in de komende paar jaar in toenemende mate kleine cellen zullen worden ingezet om een verdere verbetering van netwerkcapaciteit en datasnelheid te bereiken. Kleine cellen hebben een bereik tot ongeveer 200 meter en bestaan uit kleine, lichte basisstations met een laag vermogen die zowel binnen als buiten kunnen worden geïnstalleerd. Ze kunnen gebruik maken van dezelfde frequentieband als het “gewone” macrocel netwerk of van een eigen frequentieband. Providers zullen kleine cellen met name inzetten om capaciteits- of dekkingproblemen in dichtstedelijk gebied op te lossen, zoals bijvoorbeeld in winkelstraten of op treinstations.

In Nederland heeft KPN plannen bekendgemaakt om kleine cellen in te zetten met gebruik van een zogeheten “Cloud-RAN” architectuur waarbij de kleine cellen volledig worden geïntegreerd met het macrocel netwerk.⁹ Ook Vodafone heeft gemeld dat het kleine cellen inzet op drukke locaties in de Randstad.¹⁰ Door de beperkte afmetingen van de apparatuur hoeft doorgaans geen ingewikkelde vergunningsprocedure doorlopen te worden, waardoor kleine cellen snel en flexibel ingezet kunnen worden.

Gebruik van nieuwe banden en technologieën – LAA en LSA

Begin 2016 is *License Assisted Access (LAA)* gestandaardiseerd door 3GPP. Het is beschikbaar vanaf Release 13. LAA richt zich op het gebruik van LTE in vergunningvrije frequentiebanden, met name de 5 GHz ISM¹¹ band. LAA bouwt voort op het carrier aggregation concept waarbij de vergunningvrije LTE frequentie

⁴ <http://www.telecompaper.com/nieuws/kpn-maximum-downloadsnelheid-op-4g-netwerk-naar-375-mbps--1132187>

⁵ <http://www.telecompaper.com/nieuws/kpn-haalt-391-mbps-in-live-test-met-4g--1133195>

⁶ <http://www.telecompaper.com/nieuws/vodafone-test-3-carrier-aggregatie--1118082>

⁷ <http://tweakers.net/nieuws/106263/tele2-activeert-4g+-op-al-zijn-zendmasten.html>

⁸ <https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/lte-carrier-aggregation>

⁹ <http://www.telecompaper.com/nieuws/kpn-wil-netwerk-verder-verdichten-met-nieuwe-small-cells--1127037>

¹⁰ <http://www.telecompaper.com/nieuws/vodafone-plaatst-small-cells-in-amsterdam--1021372>

¹¹ ISM staat voor Industrial, Scientific and Medical

niet apart kan worden ingezet maar alleen in combinatie met een andere, gelicenseerde frequentie. Ericsson, Vodafone en Qualcomm hebben testen in een commercieel netwerk uitgevoerd met deze technologie.¹² De testen vonden plaats in het Vodafone netwerk in Nederland, met 20 MHz gelicenseerd spectrum in de 1800 MHz band en 20 MHz spectrum in de vergunningvrije 5 GHz band.

Een andere ontwikkeling is Licensed Shared Access (LSA), dat ook wordt gestandaardiseerd binnen 3GPP. LSA betekent dat frequentiebanden die zijn toegewezen aan een bepaalde instantie (bijvoorbeeld defensie of een andere publieke organisatie) ook kunnen worden ingezet door andere partijen zoals mobiele providers. Vaak betreft het frequentiebanden die niet permanent in gebruik zijn of slechts in beperkte gebieden. LSA is een gestandaardiseerd raamwerk en technologie welke het mogelijk moet maken om frequentiebanden te delen en zo de spectrale efficiëntie en flexibiliteit te verhogen. Begin 2016 is een proef aangekondigd in Frankrijk, waarin Ericsson, Qualcomm en RED Technologies deelnemen.¹³ Deze proef, die wordt georganiseerd door de Franse toezichthouder Arcep, moet mobiele providers in staat stellen om de 2,3-2,4 GHz band te hergebruiken. Deze band is momenteel exclusief toegewezen aan het Franse Ministerie van Defensie. In Nederland organiseert Agentschap Telecom dit jaar een proef met LSA in dezelfde frequentieband. De proef richt zich op gebruikers van mobiele videosystemen, en is onder meer bedoeld om ervaring op te doen met het praktisch gebruik van een systeem voor het automatisch uitgeven van tijdelijke vergunningen.

Nieuwe toepassingen en diensten: Internet of Things

Los van de noodzaak om de netwerkcapaciteit te verhogen in antwoord op de data-explosie, zijn mobiele providers ook op zoek naar nieuwe mogelijkheden in de markt. Eén van die mogelijkheden is het *Internet of Things*, waarvan verwacht wordt dat het de nieuwe revolutie is in mobiele netwerken. Voorspeld wordt dat er in 2022 een geschat aantal van maar liefst 20 miljard apparaten verbonden zal zijn.¹⁴ Een veelheid van diensten in verschillende sectoren wordt voorzien, denk bijvoorbeeld aan smart meters, snoepautomaten, auto's, medische apparatuur, etc.¹⁵

De huidige mobiele netwerken voldoen niet aan de eisen voor het Internet of Things. Denk met name aan de benodigde lange levensduur van de batterij in de UE (~10 jaar), de behoefte aan goedkope devices, en de noodzaak om een groot aantal devices in een beperkt gebied te kunnen ondersteunen. Daarom wordt binnen 3GPP op dit moment aan verschillende standaarden gewerkt die moeten zorgen voor betere ondersteuning voor het Internet of Things.¹⁶

- LTE-M, dat bedoeld is om binnen de bestaande LTE technologie ondersteuning te bieden aan goedkope sensoren met laag zendvermogen.
- EC-GSM, een smalbandige oplossing binnen de bestaande GSM technologie gericht op onder meer verbetering van de batterijduur.
- Narrow-band LTE (NB-LTE), een nieuwe smalbandige radiotechnologie voorheen ook wel aangeduid als "clean slate" (schone lei). NB-LTE kan

¹² <http://www.telecompaper.com/nieuws/vodafone-nl-test-met-4g-in-wifi-spectrum--1114130>

¹³ <http://www.lightrading.com/mobile/spectrum/ericsson-red-tech-qualcomm-conduct-lsa-pilot/d-id/720259>

¹⁴ http://www.neul.com/neul/wp-content/uploads/2014/02/Neul_Machina_Research_White_Paper.pdf

¹⁵ Nokia Networks, LTE-M – Optimizing LTE for the Internet of Things, White Paper, 2015

¹⁶ 4G Americas, Cellular Technologies Enabling the Internet of Things, November 2015

gezien worden als het antwoord van de mobiele industrie op de uitrol van de LoRa en SigFox netwerken (zie ook Sectie 2.5).

De nieuwe IoT functionaliteiten zijn opgenomen in 3GPP Release 13. Producten gebaseerd op deze release komen naar verwachting in 2017 op de markt.

2.3 5G

Op het Mobile World Congress in Barcelona – de grote jaarlijkse beurs op het gebied van mobiele telecommunicatie – was dit jaar veel aandacht voor 5G.¹⁷ Op veel van de stands waren demonstraties van 5G technologie te zien. Ook kondigden diverse fabrikanten en providers samenwerkingen aan op het gebied van proeven met 5G. Het lijkt alsof er een race is ontstaan om als eerste met 5G testen te komen.¹⁸ Ook in Nederland heeft een aantal partijen aangekondigd om, in Groningen, met een 5G testbed te komen.¹⁹ Van de andere kant zijn we in Nederland nog maar net een paar jaar bezig met 4G technologie. In hoeverre is er nu al behoefte aan een volgende generatie? Hier wordt een kort overzicht gegeven van wat 5G ons gaat brengen en wanneer we het mogen verwachten.²⁰

Voor een groot deel is 5G nog toekomstmuziek. Het is nog niet duidelijk hoe 5G er precies uit gaat zien. De diverse proeven worden dan ook vooral opgezet om technologieconcepten uit te proberen die in 5G een rol kunnen gaan spelen. Dit is onderdeel van onderzoek en ontwikkeling op het gebied van 5G technologie die onder andere in Europese (H2020) projecten wordt uitgevoerd.

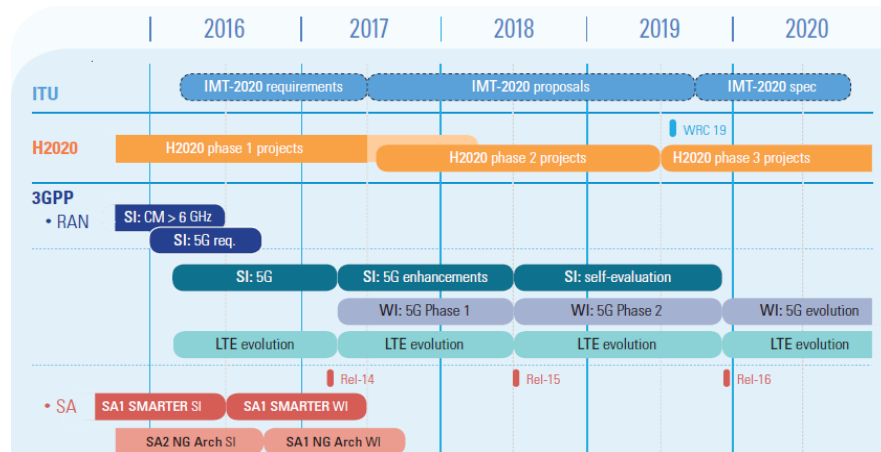
Wat 5G daadwerkelijk moet gaan bieden en welke eisen er aan 5G technologie worden gesteld is onderdeel van de wereldwijde standaardisatie van 5G. Die standaardisatie vindt plaats in organisaties zoals de ITU en 3GPP. Met die standaardisatie van 5G staan we nog maar aan het begin. Tot nu toe is er in 3GPP vooral gewerkt aan studies om de eisen aan 5G te inventariseren. Aan het daadwerkelijk specificeren van de eisen begint men nu in 2016 toe te komen. Op basis van die eisen kan vervolgens worden begonnen met het standaardiseren van 5G radio- en netwerktechnologie. De eerste studies naar mogelijke 5G technologieoplossingen zijn inmiddels begonnen.

¹⁷ www.engadget.com/2016/02/27/5g-is-finally-taking-shape-this-year/

¹⁸ <http://www.telecoms.com/469251/the-5g-partnership-news-keeps-coming-from-mwc-2016/>

¹⁹ www.agentschaptelecom.nl/sites/default/files/5groningen_leaflet_english_-_20160215.pdf

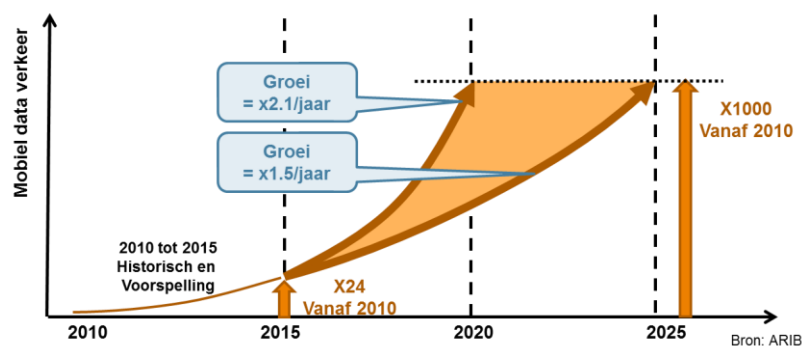
²⁰ www.nos.nl/artikel/2088623-5g-is-nu-nog-toekomstmuziek-maar-wat-kunnen-we-straks-verwachten.html



Figuur 2-2: Tijdschema voor 5G standaardisatie in ITU en 3GPP en het Europese H2020 onderzoek naar 5G.²¹

Een tijdschema voor de standaardisatie van 5G wordt weergegeven in Figuur 2-2. De standaardisatie van een nieuwe generatie mobiele telecommunicatie is een veelomvattende klus. 3GPP heeft daarom besloten om het specificeren van 5G technologie op te knippen in twee fases. De eerste 3GPP standaarden worden verwacht in 2018. Op basis hiervan kan dan een eerste, op 3GPP standaarden gebaseerd 5G netwerk worden uitgerold voor de Olympische Spelen in Tokyo in 2020. Pas de tweede fase van 5G standaarden zal naar verwachting aan alle 5G eisen voldoen. Op basis van de specificaties van eind 2019 zal 3GPP een 5G technologie voorstellen aan de ITU. Het is dan aan de ITU om te bepalen of de 3GPP technologie voldoet aan alle eisen die de ITU aan 5G technologie stelt en officieel 5G mag heten.

Eén van de belangrijkste doelstellingen van 5G is om te voldoen aan de groei van mobiele data. De verwachtingen laten zien dat er rond 2020 bij het begin van 5G ongeveer 1000 keer meer mobiele dataverkeer is dan in 2010 bij het begin van 4G. Zie Figuur 2-3. Die groei aan dataverkeer moet worden opgevangen zonder dat het mobiele netwerk duizend keer duurder wordt, er duizend keer meer basisstations nodig zijn of het netwerk duizend keer meer energie gebruikt. 5G technologie zal daarom een stuk efficiënter moeten zijn dan 4G technologie. Daarnaast moeten 5G netwerken ook geschikt zijn om de groei van het aantal mobiele devices op te vangen.

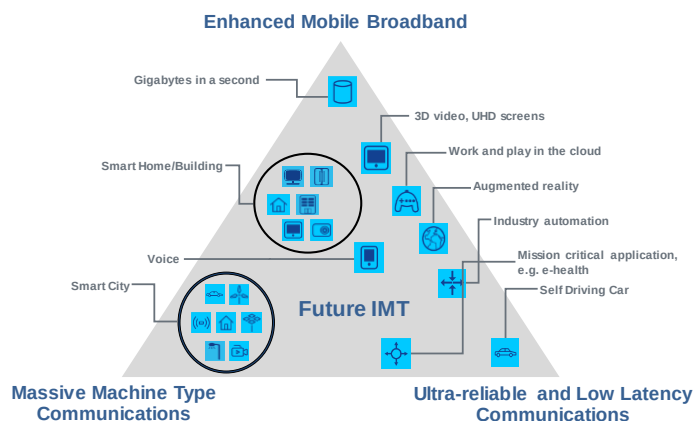


Figuur 2-3: Verwachte groei van mobiel dataverkeer op basis van groeicijfers uit Japan.²²

²¹ 5G empowering vertical industries, 5G-PPP whitepaper, 2016 (www.5g-ppp.eu/roadmaps)

Zeker zo belangrijk voor 5G is ook het ondersteunen van allerlei sectoren zoals energiebedrijven, industrie, logistiek, openbaar vervoer, gezondheidszorg en media.²³ Mobiele telecommunicatie krijgt een steeds belangrijkere rol in de samenleving. Alleen maar sectoren kunnen in de toekomst niet meer zonder mobiele telecommunicatie. Auto's worden via 5G op de hoogte gehouden van hun omgeving en kunnen straks zelfstandig rijden. Hartpatiënten kunnen hartbewaking op afstand krijgen. En in industriële processen communiceren sensoren met actuatoren en besturingssystemen via mobiele netwerktechnologie. De bedoeling is niet dat voor ieder van die toepassingen allemaal aparte netwerken worden opgetuigd. 5G moet op een flexibele manier al deze verschillende toepassingen – met vaak zeer verschillende eisen – kunnen ondersteunen.

Het grote verschil aan eisen – van gasmeters die vele jaren met een batterij moeten kunnen tot teleconferentieapparatuur met meerdere 4k Ultra High Definition videokanalen – betekent dat waarschijnlijk meerdere smaken van 5G ontwikkeld zullen worden. Het is zeer goed mogelijk dat er meerdere radiotechnologieën komen die samen 5G vormen. Ieder van die radiotechnologieën kan dan toegesneden worden op een aantal specifieke toepassingsgebieden. De ITU heeft verschillende toepassingen weergegeven op een driehoek met op de punten van deze driehoek de belangrijkste toepassingsgebieden. Zie Figuur 2-4. Ook 3GPP maakt van deze driehoek gebruik om de eisen aan 5G vanuit verschillende toepassingsgebieden vorm te geven.



Figuur 2-4: Belangrijkste toepassingsgebieden van 5G.²⁴

Bij *enhanced mobile broadband*²⁵ gaat het vooral om meer capaciteit (1000 keer meer data) en hogere datasnelheden. Voor toepassingen in bijvoorbeeld kantoren worden datasnelheden tot 1 Gbit/s per gebruiker verwacht. In buitengebieden en bij hoge snelheden (tot 500 km/h) moet altijd nog minstens 50 Mbit/s kunnen worden gegarandeerd.

Om dergelijke hoge datasnelheden mogelijk te maken zal mede gebruik gemaakt worden van spectrum met veel hogere frequenties dan nu gebruikelijk is voor

²² ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group Whitepaper: "Mobile Communications System for 2020 and beyond"

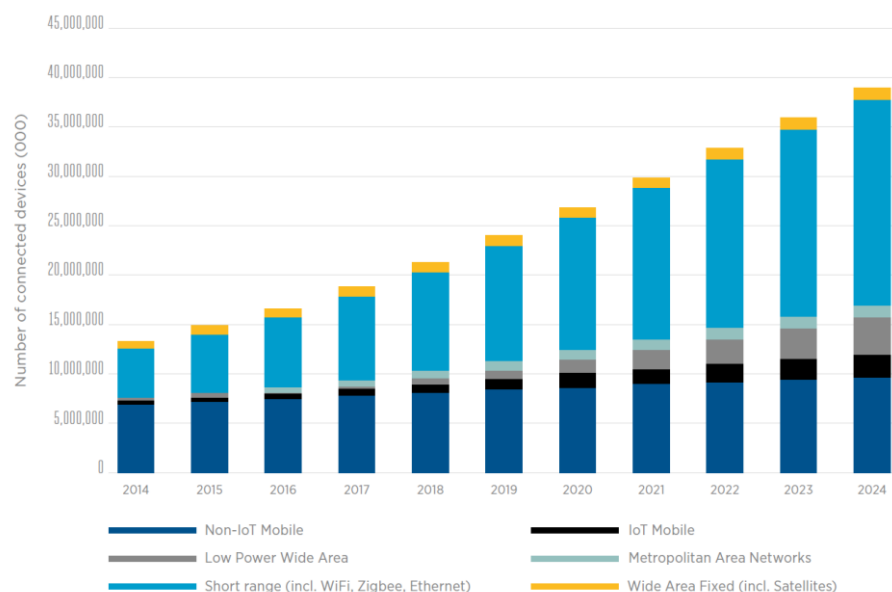
²³ 5G empowering vertical industries, 5G-PPP whitepaper, 2016 (www.5g-ppp.eu/roadmaps)

²⁴ Bron: ITU.

²⁵ 3GPP TR 22.863 "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers - Enhanced Mobile Broadband" (www.3gpp.org/DynaReport/22863.htm)

mobiele telecommunicatie. In de zogeheten *millimeter wave* frequentiebanden van 30 GHz tot 100 GHz is nog veel spectrum beschikbaar dat voor 5G gebruikt kan worden. Het vinden van frequentieruimte voor mobiel breedband in deze banden staat op de agenda van de WRC2019. Deze hoge frequenties brengen echter wel fundamenteel andere karakteristieken mee voor radiopropagatie en planning. Door gebruik te maken van antennearrays met heel veel antenne-elementen (MIMO – Massive Input Massive Output) kunnen radiobundels specifiek op mobiele apparaten gericht worden. Daarmee kan interferentie worden verminderd, wat tot een groter bereik leidt. Daarnaast is het door bundelvorming mogelijk dezelfde frequenties voor verschillende apparaten te hergebruiken, wat een grotere capaciteit oplevert.

Bij *Massive Machine Type Communications* is het vooral van belang om zeer grote aantallen apparaten te kunnen ondersteunen.²⁶ De verwachtingen voor de groei van het aantal op Internet aangesloten apparaten lopen enigszins uiteen. Machina Research verwacht dat er in 2020 ongeveer 25 miljard *connected devices* zijn (zie Figuur 2-5), maar er worden ook aantallen van 50 miljard genoemd. 3GPP heeft als eis opgenomen dat de technologie van 5G in staat moet zijn om één biljoen aangesloten apparaten aan te kunnen. Dat zal voldoende moeten zijn om ook na 2020 nog tientallen jaren met 5G technologie vooruit te kunnen.



Figuur 2-5: Wereldwijd aantal op Internet aangesloten apparaten.²⁷

Huidige 4G mobiele netwerken hebben vooral problemen met een grote dichtheid aan mobiele apparaten. Voor 5G worden dichtheden tot 1 miljoen per vierkante kilometer, en lokaal in fabrieken zelfs tot 100 per vierkante meter, verwacht. Dat betekent dat een enkel basisstation veel meer apparaten tegelijkertijd moet aankunnen dan nu het geval is. Daarnaast moeten ook het batterijverbruik (tot 10 jaar op een enkele AA batterij) en de bedekking binnenshuis (tot in de meterkast) verbeterd worden.

²⁶ 3GPP TR 22.861 "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers for Massive Internet of Things" (www.3gpp.org/DynaReport/22861.htm)

²⁷ Bron: Machina Research.

Ondersteuning van het Internet of Things gaat echter verder dan het ondersteunen van *Low Power Wide Area* toepassingen zoals sensoren en tracking & tracing. Zoals in Figuur 2-5 wordt weergegeven wordt voor het merendeel van de apparaten een draadloze technologie voor de korte afstand gebruikt. Voor 5G zal 3GPP misschien een eigen versie van draadloze technologie ontwikkelen of anders combinatie met andere draadloze technieken ondersteunen. Het moet mogelijk zijn om apparaten in het Internet of Things te kunnen adresseren en bereiken zonder dat de gebruiker eerst moet weten via welke technologie dat apparaat is aangesloten.

*Ultra reliable and low latency communication*²⁸ omvat vooral de eisen van zakelijke en industriële toepassingen. Wanneer bijvoorbeeld treinbegeleiding of de elektriciteitsvoorziening gebruik gaat maken van een mobiel netwerk, dan moet dat mobiele netwerk een hoge mate van betrouwbaarheid en beschikbaarheid hebben. Ook de eisen aan de mobiele bedekking zijn hoog. Voor bijvoorbeeld hartbewaking op afstand is het niet acceptabel wanneer bij sommige patiënten de bedekking onvoldoende is.

Minder vertraging in het netwerk is een eis die een grote impact op 5G zal hebben. Voor toepassingen als virtual reality, chirurgie op afstand, en industriële besturing zijn zeer lage vertragingen van maximaal 1 tot 5 ms noodzakelijk. Om dergelijk lage vertragingen te kunnen realiseren moeten zowel de radio interface als het netwerk worden aangepast. Bij een radioverbinding levert momenteel foutencorrectie teveel vertraging op. In 5G moet dezelfde betrouwbaarheid dus met minder foutencorrectie worden gerealiseerd. Omdat netwerktransport via optische kabels over 200 km ook al een vertraging van 1 ms oplevert moet het mobiele netwerk anders ingericht worden. Applicaties die een lage vertraging nodig hebben zullen lokaal (d.w.z. in de buurt van de apparaten) worden uitgevoerd. Dat leidt tot een veel meer gedecentraliseerd netwerk.

Naast de eisen vanuit diverse toepassingsgebieden worden er ook nog eisen aan 5G gesteld op het gebied van *network operations*.²⁹ Zo moet een mobiel netwerk flexibel om kunnen gaan met de diverse eisen van verschillende toepassingen. Voor een toepassing met hoge eisen aan betrouwbaarheid en lage vertragingen moeten specifieke maatregelen genomen worden waaraan kosten verbonden zijn. Het moet niet zo zijn dat diezelfde maatregelen en kosten dan ook voor bijvoorbeeld normale mobiele Internettoegang gaan gelden. Door toepassing van het concept van *slicing* is het mogelijk om verschillende virtuele netwerken per toepassing of zelf per klant op dezelfde infrastructuur te ondersteunen. Zo houdt een mobiele provider de flexibiliteit om aan verschillende wensen van klanten te voldoen.

De conclusie is dat we nog maar aan het begin staan van de ontwikkeling van 5G. Wel staat nu al vast dat 5G in toenemende mate in het nieuws zal zijn. Voor iedereen die geïnteresseerd is in mobiele telecommunicatie in het algemeen en in 5G in het bijzonder staat een interessante tijd te wachten.

²⁸ 3GPP TR 22.862 "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers - Critical Communications" (www.3gpp.org/DynaReport/22862.htm)

²⁹ 3GPP TR 22.864 "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers – Network Operations" (www.3gpp.org/DynaReport/22864.htm)

2.4 Wi-Fi

De afkorting Wi-Fi wordt in de dagelijkse praktijk vaak gebruikt als synoniem voor 'draadloos thuisnetwerk'. Veel consumenten maken thuis gebruik van Wi-Fi voor toegang tot Internet omdat het 'gratis' is, d.w.z. zonder beperkingen / kosten voor datagebruik zoals bij mobiele communicatie via een openbaar netwerk. Tegenwoordig wordt er in toenemende mate ook gebruik van gemaakt voor streaming diensten vanaf Internet. De vraag naar streaming audio- en video-inhoud wordt gedreven door de komst van diensten zoals b.v. Netflix, YouTube en Spotify. Veel gebruikers vragen om *high-definition* (HD) video op tv's, laptops, en op hun mobiele apparaten zoals smartphones en tablets. Wi-Fi netwerken met nieuwe producten die 802.11n en 802.11ac ondersteunen in de 5 GHz band zijn geschikt om deze diensten te ondersteunen in thuisnetwerken.

Wi-Fi, ook wel aangeduid als Wireless LAN (WLAN), wordt buitenshuis ook ingezet in o.a. publieke ruimtes (zoals vliegvelden, stadions, winkelcentra, restaurants & cafés), bedrijfsnetwerken, Wi-Fi hotspot netwerken en in zogeheten 'home spots' van b.v. KPN en Ziggo waarbij een tweede Wi-Fi 'gastnetwerk' beschikbaar is op het kabel- of DSL modem van de consument. Daarnaast zijn Wi-Fi varianten beschikbaar in losse producten waarmee directe communicatie tussen terminals mogelijk is voor bijvoorbeeld media streaming (zoals Wi-Fi Direct, WiGig of Miracast). Daarnaast wordt een op 802.11 gebaseerde techniek (802.11p) gebruikt in het domein van Intelligent Transport Systems (ITS) waar directe coöperatieve communicatie op basis van 802.11p tussen (autonoom rijdende) auto's wordt gebruikt om de veiligheid en doorstroming op de weg verder te vergroten.

2.4.1 IEEE 802.11 standaard

Wi-Fi producten zijn gebaseerd op de IEEE 802.11 standaard. De ontwikkeling van de 802.11 standaard is ca. 25 jaar geleden gestart, en de eerste release uit 1997 had tot doel om draadloze communicatie tot 1-2 Mbit/s mogelijk te maken. De 802.11 standaard is nog steeds in ontwikkeling. Momenteel wordt er o.a. gewerkt aan een variant om snelheden tot 20 Gbit/s mogelijk te maken. Wi-Fi kent verder twee opties: (i) ad-hoc communicatie waarbij randapparaten direct met elkaar communiceren zonder infrastructuur en (ii) infrastructuur-gebaseerde communicatie waarbij wordt gewerkt met basisstations, in 802.11-termen *Access Points* (AP) genoemd.

2.4.2 IEEE 802.11a/b/g/n/ac

Binnen IEEE zijn, sinds de eerste variant in 1997, meerdere varianten ontwikkeld voor gebruik in de 2,4 en 5 GHz band: 802.11a, b, g, n en ac. De theoretisch maximale doorvoersnelheid neemt toe bij de nieuwe varianten door de toepassing van nieuwe radiotechnieken, zoals (i) *channel bonding* waarbij meerdere 20 MHz kanalen (momenteel 2 tot 4) in de 2,4 of 5 GHz band worden gebruikt tussen terminal en AP, (ii) 'hogere' modulatie technieken en (iii) (MU)-MIMO antennetechnologie met gebruik van meerdere antennes. In Tabel 2-1 wordt een overzicht gegeven van de varianten, met een aantal kenmerken.

Tabel 2-1: Overzicht van 802.11 varianten.

802.11	Datum	Frequentie-band	Max. snelheid	Channel (bonding)	Aantal MIMO streams
802.11-legacy	1997	2,4 GHz	1-2 Mbit/s	20 MHz	1
802.11a	Sep. 99	5 GHz	54 Mbit/s	20 MHz	1
802.11b	Sep. 99	2,4 GHz	11 Mbit/s	20 MHz	1
802.11g	Jun. 03	2,4 GHz	54 Mbit/s	20 MHz	1
802.11n	Okt. 09	2,4 + 5 GHz	72/150 Mbit/s	20/40 MHz	4
802.11ac	Dec. 13	5 GHz	87/200/433/867 Mbit/s	20/40/80/160 MHz	8

De feitelijke doorvoersnelheid is in de praktijk lager dan de maximale snelheid, doordat het spectrum gedeeld wordt door meerdere gebruikers. Bovendien worden niet alle technieken (bonding, MIMO) in producten toegepast.

2.4.3 Frequenties en zendvermogen

Wi-Fi-apparatuur valt binnen de EU onder de CEPT-regeling voor *Short Range Devices*. Oorspronkelijk is Wi-Fi ontwikkeld voor gebruik in de vergunningvrije ISM (*Industrial, Scientific and Measurement*) band op 2,4 GHz; de 5 GHz band is later toegevoegd. Binnen de 2,4 GHz band zijn in Europa 13 kanalen (20 MHz) beschikbaar, waarvan 3 niet-overlappend (kanaal 1, 6 en 11). Door het succes van Wi-Fi zijn er op drukke locaties (zoals stadscentra en hoogbouw) meer en meer problemen met de kwaliteit van Wi-Fi (met name de doorvoersnelheid) in de 2,4 GHz band. Een mogelijke oplossing is om gebruik te maken van producten op basis van 802.11n of ac voor de 5 GHz band waarin 19 (niet overlappende) kanalen beschikbaar zijn, waarvan 8 alleen voor indoor. De voorwaarden voor licentievrij gebruik stellen beperkingen aan het uitgezonden vermogen. In Europa is dit 100 mW e.i.r.p. (*equivalent isotropically radiated power*) voor de 2,4 GHz-band, 200 mW e.i.r.p. voor de 8 banden van 5,1-5,3 GHz (binnenshuis) en 1 W e.i.r.p. voor de banden van 5,4-5,7 GHz (voor gebruik buiten).

Naast de 802.11a/b/g/n/ac varianten zijn ook toevoegingen ontwikkeld die in Europa in andere banden werken zoals in de 'sub-1GHz' band (802.11ah, voor EU in de 868,8MHz ISM band), 60 GHz (802.11ad, voor directe communicatie voor video streaming) en 5,9 GHz (802.11p voor ITS toepassingen).

2.4.4 Beveiliging

De 802.11i standaard is gericht op beveiliging van Wi-Fi netwerken. De Wi-Fi Alliance heeft de specificaties WPA (Wi-Fi Protected Access) en de opvolger WPA2 ontwikkeld, die zijn gebaseerd op 802.11i. WPA kent meerdere varianten, zoals WPA Personal en WPA Enterprise.

Naast de 802.11i standaard voor beveiliging zijn er ook 802.11 varianten ontwikkeld voor een betere ondersteuning van mobiliteit in een netwerk, zoals *Fast Roaming* (802.11r), *Intelligent Awareness* (802.11k+v) en *Fast Link setup* (802.11ai, link setup is <100ms). Deze functies zijn met name van belang om een goede gebruikerservaring te creëren bij gebruik van Wi-Fi in bijvoorbeeld publieke hotspot netwerken of in Wi-Fi bedrijfsnetwerken.

2.4.5 Toekomstige IEEE standaarden

Binnen IEEE 802.11 worden verschillende toevoegingen (met een eigen letter(combinatie)) ontwikkeld in werkgroepen. Periodiek worden nieuwe toevoegingen in een 802.11 revisie samengevoegd. In 2016 staat de derde revisie (802.11REVmc) gepland voor formele goedkeuring binnen IEEE. In deze 802.11REVmc zijn wijzigingen t.a.v. REVmb en de toevoegingen 802.11aa/ac/ad/ae/af opgenomen. Momenteel wordt er binnen IEEE verder gewerkt aan nieuwe toevoegingen. De belangrijkste zijn:

- 802.11ax (*High Efficiency WLAN*): 802.11ax is de opvolger van 802.11ac en zal de efficiëntie van de WLAN-netwerken vergroten, met als doel het bieden van 4 maal de doorvoer van 802.11ac d.w.z. ongeveer 20 Gbps. De IEEE werkgroep voor 802.11ax is begonnen in maart 2014 en de voorwaardelijke IEEE goedkeuring is gepland voor maart 2019. Het formele proces om tot een internationale standaard te komen duurt daarna nog minimaal 12 maanden.
- 802.11ay (*Next Generation 60GHz*): 802.11ay is een standaard die een nieuwe fysieke laag voor 802.11-netwerken definieert voor gebruik in het 60 GHz-spectrum. Het zal een uitbreiding zijn van de bestaande 802.11ad variant. De overdrachtssnelheid van 802.11ay zal tenminste 20 Gbps bedragen. De belangrijkste toevoegingen om dit te bereiken zijn technieken zoals *channel bonding* (2, 3 en 4 kanalen), MIMO en hogere modulatieschema's. De IEEE werkgroep voor 802.11ay is begonnen in maart 2015. Een voorwaardelijke IEEE goedkeuring is gepland voor december 2019.
- 802.11az (*Next Generation Positioning*): deze standaard is gericht op verbeterd gebruik van Wi-Fi voor indoor locatiebepaling op basis van Wi-Fi netwerken. Wi-Fi netwerken worden nu al gebruikt voor locatiebepaling in smartphones. Deze werkgroep heeft tot doel om een nauwkeurigheid van beter dan 1 meter te behalen, bij efficiënt batterijgebruik en gebruik in drukke omgevingen (zoals stadions). De werkgroep is in september 2015 gestart en een voorwaardelijke IEEE goedkeuring staat gepland voor maart 2020.

2.4.6 Wi-Fi Alliance

Wi-Fi (en het bijbehorende logo, zie Figuur 2-6) is formeel een merknaam van de Wi-Fi Alliance (WFA)³⁰, een industrieconsortium dat in 1999 is opgericht en nu ca. 600 bedrijven als lid kent. WFA is de organisatie die zorgt voor specificatie en certificering van Wi-Fi producten, onder het Wi-Fi CERTIFIED programma. Producten die de Wi-Fi merknaam en/of logo voeren (zoals smartphones, tablets en xDSL- of kabelmodems met Wi-Fi access points) zijn goedgekeurd door de WFA. Een product komt in aanmerking voor het Wi-Fi logo als door een onafhankelijk certificatiebureau is aangetoond dat aan bepaalde eisen ten aanzien van functionaliteit, prestatie en interoperabiliteit is voldaan. Met name het laatste is van belang voor de consument, omdat dit garandeert dat producten met het Wi-Fi logo samenwerken met producten van andere fabrikanten. De specificaties van WFA zijn gebaseerd op de IEEE 802.11 standaard. Naast Wi-Fi heeft de WFA ook andere merknamen geregistreerd, zoals Wi-Fi Direct, WMM, Miracast, WPS, WPA/WPA2, WiGig, Wi-Fi Aware en Passpoint. Begin 2016 is hier de merknaam Wi-Fi HaLow

³⁰ <http://www.wi-fi.org>

toegevoegd voor 802.11ah producten, die bedoeld zijn voor toepassing in Long Range Low Power (LRLP) netwerken, vergelijkbaar met LORA.



Figuur 2-6: Logo's van de Wi-Fi Alliance (links) en de Wireless Broadband Alliance (rechts).

2.4.7 *Wireless Broadband Alliance*

Naast de Wi-Fi Alliance is de Wireless Broadband Alliance (WBA)³¹ een tweede, relevante organisatie gericht op interoperabiliteit (voor logo zie Figuur 2-6). WBA is opgericht door verschillende partijen uit de Wi-Fi industrie om de interoperabiliteit tussen Wi-Fi netwerken van providers te bevorderen en hierbij te zorgen voor een uitstekende gebruikerservaring. WBA biedt een set van *Next Generation Hotspots* (NGH) of *Hotspot 2.0* richtlijnen voor Wi-Fi netwerk providers over de manier waarop randapparaten (zoals smartphones en tablets) eenvoudig en op een veilige manier verbinding kunnen maken met elkaars netwerken. De ondersteuning van NGH in mobiele randapparatuur (Apple iOS, Android) en Wi-Fi neemt nog steeds toe, waardoor roaming op Wi-Fi netwerken van derden eenvoudiger wordt en o.a. handmatige netwerkselectie en invoer van gebruikersnaam/wachtwoord overbodig worden. De NGH technologie wordt momenteel o.a. in de VS toegepast door Boingo Wireless om hun Wi-Fi netwerken op een aantal internationale vliegvelden open te stellen voor klanten van de mobiele provider Sprint.³²

2.4.8 *De rol van Wi-Fi binnen mobiele netwerken in Nederland*

Wi-Fi heeft een belangrijke rol in netwerkstrategieën van mobiele providers. Al een aantal jaar is Wi-Fi voor mobiele providers in beeld als een belangrijke manier om de verkeerslast op hun netwerk te verminderen ('*Offloading*'). Mobiele providers zien Wi-Fi als aanvulling op hun mobiele netwerk, d.w.z. dataverkeer wordt - naast Wi-Fi thuisnetwerken – afgehandeld via Wi-Fi hotspot netwerken van (veelal gelieerde) providers. Zowel KPN (via "KPN Wi-Fi" en "KPN Hotspots") als Ziggo (via Ziggo "Wi-FiSpots") kiezen momenteel voor een grootschalige inzet van Wi-Fi binnen hun diensten, middels hun 'hotspot' aanpak via (i) 'home spots' en (ii) publieke hotspots. Bij de 'home spots' worden alle kabelmodems (Ziggo) of DSL/glas modems (KPN) van de eigen klanten voorzien van een tweede Wi-Fi Access Point (virtueel, door toevoegen van een extra SSID) waarop andere klanten van dezelfde provider als gastgebruiker ook kunnen inloggen. Deze gastverbindingen kennen beperkingen (bijvoorbeeld in de maximaal toegestane bandbreedte per gebruiker per AP of het maximaal aantal gelijktijdige gastgebruikers), zodat dit niet ten koste gaat van de bandbreedte van de abonnee zelf. Daarnaast heeft Ziggo de strategie om dekking te bieden in stedelijke gebieden via publieke hotspots, door straatkasten te voorzien van AP's als

³¹ <http://www.wballiance.com>

³² <http://newsroom.sprint.com/news-releases/sprint-and-boingo-bring-seamless-wi-fi-to-millions-of-sprint-travelers.htm>

aanvullende “WiFiSpots”. Deze AP's werken op dit moment in de 5 GHz-band en hebben een bereik van 50-100 m.

2.4.9 *Wi-Fi Calling*

Bellen over Internet (ook wel VoIP genoemd) via b.v. Skype, Viber, Facebook Messenger, Apple's Facetime audio en WhatsApp is al langere tijd mogelijk over mobiele en/of Wi-Fi datanetwerken. De kwaliteit en betrouwbaarheid op onbeheerde Wi-Fi netwerken wordt door mobiele providers nog vaak als onvoldoende gezien. Echter, sinds de aankondiging van Apple in juli 2014 over ondersteuning van *Wi-Fi Calling* in iOS8 en het gebruik door T-Mobile US is er een verschuiving zichtbaar bij mobiele providers. *Wi-Fi Calling* is de term voor een technologie die de mogelijkheid biedt om vanuit de gewone telefoniefunctie op een smartphone (*native calling*) ook via Wi-Fi netwerken te bellen en niet via een aparte app. *Wi-Fi Calling* wordt meer en meer gezien als een nuttige technologie om de kwaliteit van telefonie te verbeteren, met name op locaties waar de dekking van het mobiele netwerk slecht is (b.v. in bedrijfspanden, hoogbouw, of zogeheten witte vlekken in een mobiel netwerk met slechte dekking, i.e. 'non-spots'). In de VS bieden momenteel alle vier de mobiele providers de mogelijkheid tot het gebruik van *Wi-Fi Calling*. Ook in Europa zijn er meer en meer voorbeelden van providers die deze functie bieden, deels gekoppeld aan de uitrol van VoLTE waarbij spraak ook over een LTE data netwerk getransporteerd wordt. LTE kent namelijk in tegenstelling tot UMTS geen aparte kanalen (*bearers*) voor circuit-geschakelde spraakdiensten.

2.4.10 *Wi-Fi in 4G en 5G*

Binnen 5G is de huidige strategie gericht op de ondersteuning van meerdere, complementaire radiotechnologieën (*multi-RAT*), omdat de voorspelde explosieve groei van dataverkeer in de komende jaren onmogelijk via mobiele netwerken - met een beperkt aantal, licentie-gebonden spectrumbanden - afgehandeld kan worden. Wi-Fi is hierin een belangrijke technologie. Momenteel zijn er al ontwikkelingen in de LTE 3GPP standaard om verkeer te aggregeren over Wi-Fi en LTE netwerken, in de *LTE-Wi-Fi Aggregation* (LWA) specificatie. Het is de verwachting dat deze ontwikkeling in 5G verder zal worden doorgezet. Naast LWA zijn er ook initiatieven rondom het gebruik van LTE in ISM banden, met name *unlicensed LTE* in de vergunningvrije 5GHz band, waarin Wi-Fi nu ook werkt. Het gebruik van LTE in de 5 GHz band staat momenteel sterk in de belangstelling vanuit wetgevers in met name de Verenigde Staten en er lopen initiatieven (o.a. via WFA en LTE-U Forum) om het effect van LTE en Wi-Fi in de 5 GHz band objectief vast te stellen en eventueel specificaties aan te passen, zodat er geen negatieve effecten ontstaan.

2.4.11 *Andere toepassingen van Wi-Fi*

Naast het gebruik van Wi-Fi als draadloze technologie voor Internettoegang zijn er specifieke gebieden waarin Wi-Fi wordt gebruikt. De belangrijkste zijn:

- Long Range Low Power (LRLP): de 802.11ah standaard en de bijbehorende WFA Wi-Fi HaLow merknaam kan worden gezien als een alternatief voor huidige, *proprietary* LORA oplossingen voor IoT netwerken. De eerste Wi-Fi HaLow producten worden eind 2016 verwacht. Binnen IEEE is in september 2015 ook een verkennende studie gestart voor een opvolger van 802.11ah, die na 2020 gereed zou kunnen zijn.

- Intelligent Transport Systems (ITS): er wordt reeds 15 jaar gewerkt aan ITS systemen voor communicatie tussen voertuigen en tussen voertuigen en de kant van de weg. De standaard hiervoor heet ITS-G5 en wordt in Europa ontwikkeld door ETSI ITS en CEN, in samenwerking met ISO. Voor de radiolaag wordt gebruik gemaakt van IEEE802.11p als standaard, een variant gebaseerd op 802.11a, waarbij de mechanismen voor authenticatie en beveiliging zijn weggehaald om – via radio broadcast – ad-hoc communicatie mogelijk te maken tussen voertuigen. In Europa zijn er speciaal kanalen (momenteel 3x10 MHz) vrijgemaakt voor ITS, in de 5,9 GHz band.

2.5 LoRa/SigFox

De “wide-area Internet of Things (IoT)” toepassingen worden gezien als de volgende grote bron van dataverkeer in draadloze communicatiesystemen. Deze toepassingen worden gekenmerkt door:

- grotere uitrolgebieden (bijvoorbeeld een wijk of stad, provincie, land of meerdere landen),
- veelsoortige apparaten die data versturen (bijvoorbeeld eenvoudige sensoren en alarmen, containers, slimme meters, machines, auto's, etc.),
- een kleine hoeveelheid data per datatransactie, gecombineerd met lage datasnelheden,
- minimaal energieverbruik voor datacommunicatie (met name voor sensoren die werken op batterijen)

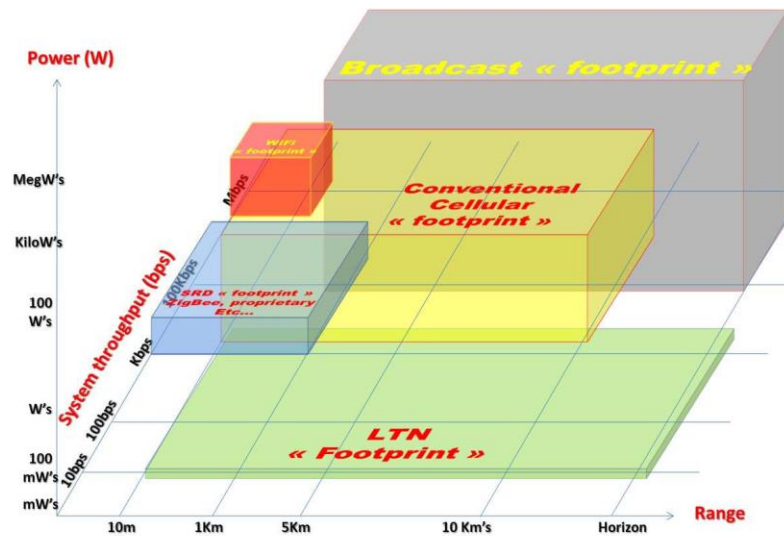
LoRa^{TM,33} en SigFox³⁴ zijn draadloze systemen die de “wide-area IoT” toepassingen mogelijk maken.

Een goede positionering van LoRaTM and Sigfox draadloze systemen is te zien in Figuur 2-7 van ETSI³⁵ waar deze systemen worden aangeduid als Low Throughput Networks (LTN). De bepalende LTN eigenschappen zijn het bereik van enkele tientallen meters tot tientallen kilometers, datasnelheden van enkele (tientallen) bit/s tot tientallen kbit/s en vermogens van enkele tientallen milliwatts. Dit is een duidelijk verschil met ‘short-range’ draadloze systemen die een bereik hebben tot enkele tientallen meters en datasnelheden tot honderden kbit/s of zelfs Mbit/s. Zie hiervoor ook Sectie 2.6. Cellulaire draadloze systemen hebben een bereik tot enkele kilometers en datasnelheden tot honderden Mbit/s, zie hiervoor ook Sectie 2.2 en Sectie 2.3.

³³ <https://www.lora-alliance.org/>

³⁴ <http://www.sigfox.com/>

³⁵ <http://www.etsi.org/>

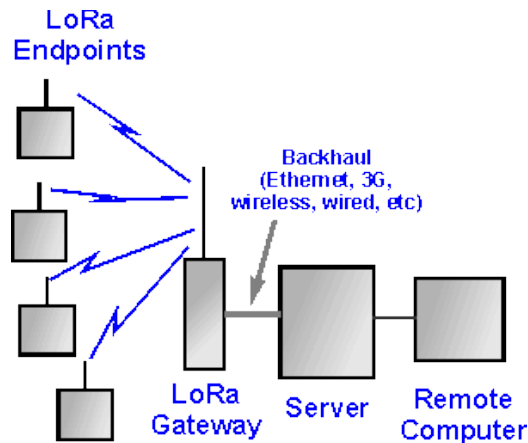


Figuur 2-7: Positionering van Low Throughput Network (LTN) zoals LoRaTM and Sigfox wat betreft bereik, vermogens en data snelheden.³⁶

Het wide area network, opgebouwd uit eindnodes (bijvoorbeeld sensoren) die communiceren via LoRaTM radio technologie met zogenoemde gateway nodes, die vervolgens via een backhaulstelsel verbonden zijn met de netwerk server en uiteindelijk met de applicatie computer, wordt aangeduid met de term LoRaWAN. LoRaWAN heeft doorgaans een “sterarchitectuur”, vergelijkbaar met Wi-Fi of cellulaire netwerken, waarbij meerdere eindnodes verbonden zijn met de gateway zoals schematisch weergegeven in Figuur 2-8. De authenticatie en beveiliging worden geregeld door de LoRaWAN systeemeigenaar via communicatie tussen de netwerkserver en de eindnode door middel van de distributie van een eindnodesleutel en een netwerksleutel. Het voordeel van deze procedure is dat de sensornodes geen SIM-kaart nodig hebben. De LoRaTM radiolink tussen de sensor en de gateway wordt gelegd via spread-spectrum radiotechnologie met een instelbare “spreading factor”, een instelbare bandbreedte (bijv. 125 kHz, 250 kHz, en 500 kHz) en een specifieke modulatie/codering functionaliteit geïntroduceerd door SemTech.³⁷ Door de juiste selectie van deze instelbare parameters is de datasnelheid van de link adaptief (tussen 0,3 en 50 kbit/s). De keuze voor de instellingen wordt gemaakt door de netwerkserver afhankelijk van de implementatievoorwaarden zoals bereik, air-time (of eigenlijk batterijgebruik) en gewenste datasnelheid.

³⁶ ETSI GS LTN 002 v1.1.1, “Low Throughput Networks (LTN); Functional Architecture”, September 2014

³⁷ <http://www.semtech.com/wireless-rf/lora.html>



Figuur 2-8: LoRaWAN systeem architectuur.³⁸

SigFox netwerken zijn net als LoRaWAN opgebouwd in een ster-architectuur met behulp van eindnodes (sensoren), een SigFox gateway en een netwerkserver. De draadloze communicatie tussen de SigFox sensor en de gateway is anders dan LoRaTM spread-spectrum communicatie. SigFox gebruikt namelijk zogenoemde ultra-narrow-band transmissie met een zeer kleine bandbreedte (bijvoorbeeld 100 Hz).³⁹ Net als bij LoRaTM systemen worden de authenticatie en beveiliging geregeld via distributie van sleutels, dus zonder SIM-kaart bij de sensoren.

LoRaTM en SigFox systemen werken in vergunningvrije ISM spectrumbanden (868 MHz in Europa en 915 MHz in de Verenigde Staten). Het voordeel van deze banden is het grote bereik en de vrije beschikbaarheid. Een nadeel is dat de interferentie onvoorspelbaar is omdat iedereen van deze banden gebruik kan maken. Een tweede nadeel is dat er geen wereldwijde coördinatie plaatsvindt (in tegenstelling tot bijvoorbeeld de 2,4 GHz band voor Wi-Fi/Bluetooth).

Samengevat maken de volgende LoRaTM en SigFox eigenschappen deze twee systemen geschikt voor wide-area IoT uitrol:

- a) Groot bereik door de lage datasnelheden, zeer kleine bandbreedtes (SigFox) en spread-spectrum technologie (LoRaTM), en gebruik van een relatief lage frequentieband.
- b) Lange levensduur van de batterij door minimale activiteit (of air-time) van de eindnodes (sensoren) en verzenden en ontvangst van het radiosignaal met zo weinig mogelijk signaalverwerking. Een nadeel hiervan is wel dat de sensor doorgaans alleen bereikbaar is vanuit het netwerk als deze actief is om data te versturen.⁴⁰
- c) Geminimaliseerde overhead bij het versturen van kleine hoeveelheden databerichten.
- d) Lage systeemkosten door eenvoudige hardware en gebruik van vergunningvrij spectrum.

Op dit moment worden op veel plaatsen LoRaTM en SigFox netwerken uitgerold. Deze netwerken bieden traditionele wide-area IoT diensten voor toepassingen met kleine datahoeveelheden van sensoren met een lange batterijlevensduur. Denk

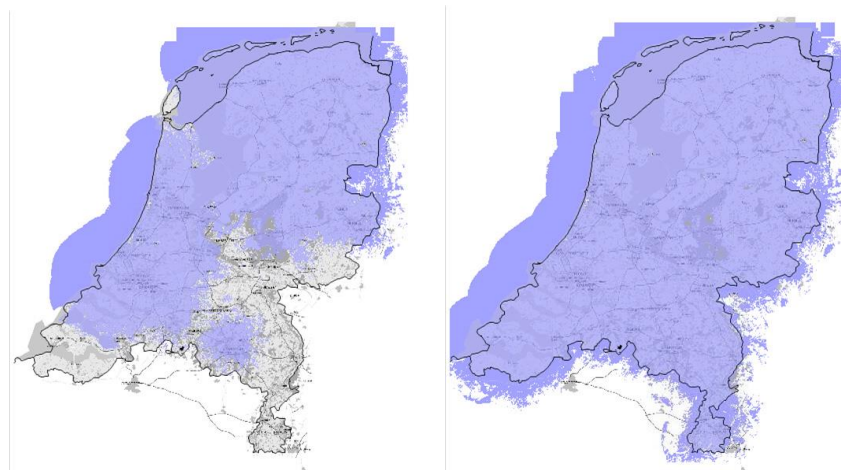
³⁸ <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/lorawan-network-architecture.php>

³⁹ Dit is 2000 keer minder bandbreedte dan een standaard GSM radio kanaal van 200 kHz.

⁴⁰ LoRaTM heeft sensoren met verbeterde downlink bereikbaarheid i.e. Class B en Class C sensoren ten koste van grotere batterij verbruik, zie <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>.

bijvoorbeeld aan het volgen van goederen, slimme meters voor energieverbruik, sensoren in de transportsector en “slimme steden”. Denk bij dit laatste bijvoorbeeld aan slimme straatverlichting, gebouwbeheer wat betreft toegang, luchtkwaliteit, monitoring van lekkages in waterleidingsystemen, monitoring van elektriciteitsnetwerken, etc.

De LoRaTM operators zijn vaak mobiele providers (bijvoorbeeld KPN⁴¹ in Nederland, Orange en Bouygues in Frankrijk, Proximus in België, etc.) maar er zijn ook initiatieven zoals The Things Network via crowdsourcing om een wide area IoT netwerk te bouwen.⁴² Volgens KPN, zie ook Figuur 2-9, is de uitrol van hun landelijk dekkende LoRaTM netwerk in Nederland versneld door de grote vraag vanuit de markt en zal deze in juni 2016 afgerond zijn. Voorbeelden van applicaties die ondersteund kunnen worden via het LoRaTM netwerk zijn beheer van buiten (straat)verlichting, parkeerterreinen, waterdetectie voor boten, volgen van de locatie van je fiets, etc.



Figuur 2-9: LoRaTM dekking via KPN in Nederland; links voor april 2016 (280 sites); rechts voor juni 2016 (641 sites).⁴³

Met het investeren in LoRaTM netwerken voor IoT naast de meer traditionele netwerken zoals GSM, UMTS en LTE willen de mobiele operators waarschijnlijk aan de vraag van verschillende partijen voor IoT toepassingen voldoen totdat de IoT aanpassingen in 3GPP standaardisatie en commerciële producten beschikbaar komen.

De uitrol van SigFox netwerken loopt via partnerbedrijven (bijvoorbeeld Aerea in Nederland).⁴⁴ Volgens SigFox is er binnen Europa landelijke dekking in Portugal, Spanje en Frankrijk. Daarnaast is er dekking in grote gebieden van België, Nederland en Ierland.⁴⁵

De grootste concurrent voor LoRaTM en SigFox systemen zijn de geëvolueerde 3GPP cellulaire netwerken die gebruik maken van nieuwe ontwikkelingen in de

⁴¹ <https://www.kpn.com/zakelijk/grootzakelijk/oplossingen/infrastructuur-en-connectiviteit/internet-of-things.htm>

⁴² <http://thethingsnetwork.org/>

⁴³ <https://www.kpn.com/zakelijk/grootzakelijk/oplossingen/infrastructuur-en-connectiviteit/internet-of-things/lora.htm>

⁴⁴ <http://www.aerea.nl/sigfox-m2m-en-iot/>

⁴⁵ <http://www.sigfox.com/coverage>

standaard. 3GPP heeft inmiddels de wide-area IoT marktbehoeftes en de sterke kanten van LoRaTM en SigFox herkend en vervolgens de gewenste functionaliteiten geïntroduceerd in GSM en LTE. Daarnaast wordt nu ook een volledig nieuw systeem ontwikkeld, aangeduid als de narrow-band IoT (NB-IoT) variant.⁴⁶ Onderzoeksbureau Gartner verwacht dat NB-IoT op langere termijn de dominante technologie zal worden.⁴⁷

Enkele belangrijke verschillen van de toekomstige 3GPP systemen ten opzichte van LoRaTM/SigFox :

- Ondersteuning van meer symmetrische communicatie 'uplink' versus 'downlink'
- Hogere datasnelheden
- Groter ecosysteem van industriële partijen waarbinnen wereldwijde coördinatie plaatsvindt
- Gebruik van duurder gelicenseerd spectrum waardoor de interferentie beheerst kan worden door goede netwerkplanning en -optimalisatie

De wat tragere standaardisatie en beschikbaarheid van commerciële producten op de markt worden gezien als een nadeel voor de 3GPP systemen. Inmiddels zijn er wel al pre-commerciële trials met NB-IoT technologie, bijvoorbeeld in een samenwerking tussen Huawei en Vodafone.⁴⁸

In de komende jaren zal de praktijk gaan uitwijzen of de 3GPP systemen vergelijkbare prestaties kunnen leveren als LoRaTM en SigFox netwerken en ook of het commerciële aanbod van de mobiele operators concurrerend kan zijn met dat van andere partijen die gebruik maken van LoRaTM of SigFox.

2.6 Technologieën voor kortere afstanden

Het merendeel van deze Monitor Draadloze Technologie gaat over beheerde grootschalige digitale communicatienetwerken, waarbij het draadloze deel een bereik heeft van minimaal zo'n 100 meter. Er zijn echter ook veel technologieën ontwikkeld voor kortere afstanden ('short range'). Voorbeelden zijn DECT, Bluetooth, NFC, RFID, Zigbee, Z-wave, Thread, Wireless M-bus, WirelessHD en ook het hiervoor al behandelde Wi-Fi. Deze voorbeelden zijn allemaal min of meer gestandaardiseerd. Daarnaast bestaan er nog vele fabrikanteigen technologieën. Hoe dan ook komen al deze technologieën met elkaar overeen dat ze louter gebruik maken van licentievrije frequentiebanden. Maar verder verschillen de technologieën erg veel met betrekking tot:

- de gebruikte band (868 MHz, 2,4 GHz, 60 GHz, ...),
- de gebruikte protocollen (CSMA, TDMA, OFDM, MAC, wel/niet IP, ...),
- de ondersteunde netwerkconfiguraties (punt-punt, ster, vermaasd (mesh), ...),
- de ondersteunde diensten (multimedia, computernetwerken, domotica, energiebeheer, telefonie, authenticatie, afstandsbediening, ...).

⁴⁶ http://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP_Standards_for_IoT.pdf

⁴⁷ <http://www.gartner.com/newsroom/id/3221818>

⁴⁸ <http://mobileeurope.co.uk/press-wire/vodafone-and-huawei-complete-first-commercial-trial-of-pre-standard-nb-iot>

In deze paragraaf behandelen we DECT, Bluetooth, Zigbee en NFC in meer detail. Maar ook de andere genoemde technologieën zijn relevant, omdat ze allemaal wel een zeker marktaandeel hebben, al is het maar voor een niche markt.

De hier behandelde technologieën worden doorgaans gebruikt in relatief kleinschalige netwerken (soms alleen punt-punt verbindingen) en ter ondersteuning van eenvoudige diensten. Vaak noemen we dergelijke netwerken onbeheerd, omdat ze niet centraal worden aangestuurd door een netwerk provider. In werkelijkheid worden deze netwerken natuurlijk wel degelijk beheerd, namelijk door de eindgebruiker zelf, of door de IT afdeling van het bedrijf dat de technologie toepast in zijn bedrijfsnetwerk. Ook de fabrikant van de apparatuur heeft vaak een rol in het beheer, bijvoorbeeld door het bieden van ondersteuning middels software updates.

Het bereik van de draadloze verbindingen varieert van enkele centimeters tot ca. 100 meter, maar verschilt sterk tussen de genoemde technologieën. Dit hangt o.a. af van de gebruikte frequentieband, het zendvermogen, de eigenschappen van de omgeving en de ondersteuning van allerlei vormen van ruisonderdrukking en slimme antenntechnieken.

Een belangrijke trend is dat genoemde technologieën ook voor traditionele netwerk providers steeds belangrijker worden. Dit kan het best geïllustreerd worden aan de hand van Wi-Fi. Wi-Fi is in eerste instantie ontwikkeld als draadloze variant van Ethernet voor toepassing in bedrijfsnetwerken. Nu, 20 jaar later, is Wi-Fi een onmisbare aanvulling op mobiele netwerken en home gateways geworden. Een van de gevolgen daarvan is dat eindgebruikers de provider bellen als ze denken dat er iets mis is met het Wi-Fi netwerk, ook als dat Wi-Fi netwerk niet door die operator wordt geleverd en beheerd. Dit is een jaarlijks stijgende kostenpost voor providers. Hier zien we ook een belangrijk verschil met DECT: DECT is van begin af aan ontwikkeld vanuit de eisen die operators aan een dergelijk netwerk stellen (namelijk goed genoeg om een telefoondienst met hoge betrouwbaarheid te kunnen ondersteunen) en dat heeft geleid tot een technologie die weliswaar relatief duur is in aanschaf maar daarnaast lage operationele kosten heeft.

TNO verwacht dat net als Wi-Fi ook Bluetooth, NFC en Zigbee steeds belangrijker gaan worden voor providers, omdat ze een onlosmakelijk onderdeel gaan vormen van nieuwe geavanceerde internetdiensten. Zo zien we onder andere nu al dat NFC net als Bluetooth en Wi-Fi steeds vaker standaard ingebouwd wordt in mobiele telefoons. Zowel NFC en Zigbee worden in de toekomst mogelijk ingebouwd in home gateways.^{49,50} Wat de impact hiervan gaat zijn op de operationele kosten voor de provider valt te bezien.

2.6.1 DECT

DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) is een protocol voor draadloze communicatie dat vooral veel wordt gebruikt voor draadloze (niet-mobiele) telefoons en babyfoons. Het protocol is gestandaardiseerd door ETSI (werkgroep ETSI TC DECT) als EN 300 175⁵¹ en beschrijft alle lagen van de OSI stack. De standaard wordt voortdurend uitgebreid voor nieuwe toepassingen. De

⁴⁹ HGI-RD038: *HG requirements for local reading of smart meters* (2015), www.homegatewayinitiative.org

⁵⁰ HGI-RD057: *Wi-Fi system requirements for Home Gateways: NFC pairing, guest access, hotspot* (2016), www.homegatewayinitiative.org

⁵¹ ETSI EN 300 175: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Common Interface (CI); parts 1-8* (2015)

ETSI werkgroep wordt daarvoor gevoed vanuit verscheidene industriële allianties, zoals het DECT Forum en de ULE Alliance, die respectievelijk verantwoordelijk zijn voor de recentelijk ontwikkelde ULE (Ultra-Low Energy) en Cat-iq varianten van DECT.

DECT ULE is ontworpen voor het gebruik van DECT voor toepassingen in de sfeer van domotica, beveiliging en klimaatbeheersing. Hiermee kunnen ook apparaten die bijvoorbeeld op batterijen werken uitstekend communiceren met DECT zonder dat de batterijen hierdoor veel te snel leeg raken. ULE hergebruikt de huidige ETSI DECT specificatie voor de fysieke laag (EN 300 175-1) en de DECT Packet Radio Service (DPRS) ETSI EN 301 649 specificatie⁵², maar heeft de ETSI DECT specificaties voor de hogere communicatielagen uitgebreid en heeft daarnaast een eigen applicatieprofiel gedefinieerd in ETSI TS 102 939-1⁵³. Dit zorgt ervoor dat de feitelijke communicatie zo efficiënt mogelijk plaatsvindt. Een onderdeel hiervan is de ondersteuning van een eigen protocol op de applicatielaag en een bijbehorend datamodel welke is gepubliceerd onder een open source licentie.⁵⁴

De charme van deze aanpak ligt in het feit dat bestaande DECT basisstations alleen een firmware update nodig hebben om ook ULE te kunnen ondersteunen. Daarnaast hebben ULE apparaten in principe hetzelfde bereik als alle andere DECT apparatuur, welke met ruim 30 meter indoor aanzienlijk meer is dan de concurrerende technologieën Bluetooth LE, Wi-Fi en Zigbee. DECT hoeft voor het bereiken van een dergelijke dekking dus geen gebruik te maken van mesh networking architecturen. DECT kan dat ook niet.

In tegenstelling tot de markt voor draadloze telefoons en babyfoons, die verzadigd lijkt te zijn, is ULE een belangrijke groeimarkt voor DECT. De eerste apparaten die aan de ULE standaard voldoen zijn inmiddels geproduceerd en gecertificeerd. Daarmee heeft ULE wel een achterstand in de markt op de concurrerende technologieën en het is nog de vraag of ULE die kan inhalen.

Cat-iq staat voor Cordless Advanced Technology—internet and quality en is een reeks uitbreidingen op DECT die gespecificeerd zijn in ETSI TS 102 527.⁵⁵ Deze uitbreidingen betreffen het ondersteunen van spraak met zeer hoge kwaliteit, Voice-over-IP, en ook IP datadiensten zoals web browsen en content download. Wat betreft de datadiensten zijn de feitelijke toepassingen echter beperkt, omdat DECT niet meer dan enkele Mbit/s datasnelheid kan verwerken.

Een belangrijke technische eigenschap van DECT is dat het een eigen frequentieband heeft. De band van 1880-1900 MHz is weliswaar vergunningvrij, doch gereserveerd voor het gebruik van alleen DECT. Dit maakt dat DECT geen interferentie heeft te duchten, wat de betrouwbaarheid en het bereik ten goede komt. De VS heeft overigens een eigen band voor DECT, en ook pas sinds 2005. Dat maakt dat DECT nooit een groot marktaandeel in de VS heeft weten te bereiken en dat Amerikaanse DECT producten ook niet kunnen samenwerken met Europese.

⁵² ETSI EN 301 649 V2.3.1: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); DECT Packet Radio Service (DPRS)* (2015)

⁵³ ETSI TS 102 939-1 V1.2.1: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Ultra Low Energy (ULE); Machine to Machine Communications; Part 1: Home Automation Network (phase 1)* (2015)

⁵⁴ 'HF-Protocol', 'HF-Service', 'HF-Interface', 'HF-Profile', version 1.0 (2014), available for free after registration at <http://www.ulealliance.org/registration.aspx?f=11>.

⁵⁵ ETSI TS 102 527: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); New Generation DECT; parts 1-5* (2007-2015).

DECT heeft van oudsher een beveiligingsprotocol ingebouwd dat gebruik maakt van drukknoppen op basisstation alsook eindapparaat voor wederzijdse authenticatie. Deze methode is later ook door andere technologieën geadopteerd, zoals bijvoorbeeld Wi-Fi.

2.6.2 *Bluetooth*

Het Bluetooth protocol is gestandaardiseerd door de Bluetooth Special Interest Group (SIG) en beschrijft alle lagen van de OSI stack. De laatste versie van de standaard is Bluetooth v4.2 uit 2014.⁵⁶

Bluetooth wordt heden ten dage vooral gebruikt voor draadloze hoofdtelefoons, hands-free systemen, computeraccessoires (vervanging van bedrade seriële dataoverdracht zoals met RS-232), draadloze speakers en tegenwoordig ook smart watches (slimme horloges). Dit zijn in feite allemaal punt-punt toepassingen, hoewel met Bluetooth in principe ook beperkte mesh-netwerken kunnen worden gebouwd. Deze zogeheten piconet en scatternet functionaliteit wordt in de praktijk echter vrijwel nooit gebruikt.

Bluetooth werkt in de zeer druk gebruikte 2,4 GHz ISM band is daardoor gevoelig voor ruis. Het protocol is daarom gebaseerd op frequency hopping, waarbij de twee communicerende nodes zeer snel van frequentie (sub-band van de 2,4 GHz band) wisselen en er dus zeer regelmatig een frequentie wordt gevonden die op zijn minst voor even ruisvrij is. Dat maakt Bluetooth verbindingen zeer robuust, maar ook relatief langzaam: de sub-banden zijn vrij smal (1 MHz) en de klokken van beide apparaten moeten nauwkeurig gesynchroniseerd zijn. Dat maakt dat Bluetooth doorgaans niet meer dan enkele Mbit/s datatransfer aankan. Dat is meer dan genoeg voor geluid maar niet voor video of bulk datatransport.

Het bereik van Bluetooth is onder andere afhankelijk van de vermogensklasse waarvan de chip gebruik maakt. De meeste mobiele apparatuur voor consumenten (telefoons, headset, etc.) maakt gebruik van klasse 2, welke maximaal 2,5 mW uitzendt en binnenshuis een bereik heeft van 5 tot 10 meter. Klasse 1 apparatuur (100 mW) haalt ruim 20 meter en wordt hier en daar toegepast in de industrie.

De eerste twee relevante versies van Bluetooth (v1.1 en v1.2) zijn voor wat betreft de onderste communicatielagen ook gestandaardiseerd als IEEE 802.15.1, maar voor de hogere versies heeft de Bluetooth SIG daarvan de meerwaarde niet ingezien en IEEE 802.15.1 dus ook niet verder onderhouden.

Bluetooth heeft de belangrijke eigenschap dat het van oorsprong, in 1999, al is ontwikkeld voor energiezuinig gebruik door apparaten met een batterij. Dat maakt Bluetooth bij uitstek geschikt voor toepassing in het Internet of Things domein. Echter, omdat de eisen rond energiezuinigheid in de loop van de jaren nog stringenter zijn geworden dan in 1999, heeft de Bluetooth SIG, als onderdeel van de Bluetooth v4.0 standaard, het Bluetooth Low Energy (BLE) profiel ontwikkeld. Dit is echter geen verplicht onderdeel van de Bluetooth v4.x standaard en het is ook een volslagen ander protocol dan het klassieke Bluetooth. De beide protocollen kunnen ook niet samenwerken, dus bij het ontwikkelen van communicatiesystemen met Bluetooth moet er goed op gelet worden dat de juiste Bluetooth profielen over en weer zijn geïnstalleerd. De verschillen tussen de het klassieke Bluetooth en Bluetooth LE worden geïllustreerd in Figuur 2-10. Interessant is dat BLE niet zo

⁵⁶ Bluetooth Specification Version 4.2,

https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=286439

heel veel minder radiovermogen gebruikt dan klassiek Bluetooth (waardoor het bereik vergelijkbaar is), maar vooral veel efficiënter met verkeer omgaat.

	Bluetooth V2.1	Bluetooth Low Energy
Standardization Body	Bluetooth SIG	Bluetooth SIG
Range	~30 m (class 2)	~50 m
Frequency	2.4–2.5 GHz	2.4–2.5 GHz
Bit Rate	1–3 Mbit/s	~200 kbit/s
Set-Up Time	<6 s	<0.003 s
Voice Capable?	Yes	No
Max Output Power	+20 dBm	+10 dBm
Modulation Scheme	GFSK	GFSK
Modulation Index	0.35	0.5
Number of Channels	79	40
Channel Bandwidth	1 MHz	2 MHz

Figuur 2-10: Verschillen tussen het klassieke Bluetooth v2.1 protocol en Bluetooth LE.⁵⁷

In het algemeen kan gezegd worden dat gebrekkige interoperabiliteit Bluetooth altijd parten heeft gespeeld. In sommige gevallen is gebrekkige implementatie van de standaard in de chips daarvan de oorzaak. Maar in de meeste gevallen verwachten gebruikers interoperabiliteit waar die er simpelweg niet is, omdat apparaten verschillende versies van de standaard en/of verschillende profielen van de standaard hebben geïmplementeerd. Alleen apparaten met veel rekenkracht voor algemene toepassingen (computers, sommige telefoons, ...) kunnen alle Bluetooth profielen ondersteunen. Kleine “embedded devices” ondersteunen alleen de profielen voor de toepassing waar de fabrikant ze voor gemaakt heeft. Momenteel zijn er 35 verschillende profielen gedefinieerd.⁵⁸

Ook gebruiksvriendelijkheid is lang een probleem geweest voor de adoptie van Bluetooth in de markt. Met name het veilig linken van twee apparaten aan elkaar (“pairing”) is lang een moeizaam en langdurig proces geweest. Met de hogere versies van Bluetooth is dit geleidelijk aan verbeterd.

2.6.3 Zigbee

Zigbee is de eerste serieuze standaard voor draadloze sensornetwerken: de eerste versie van de standaard is reeds verschenen in 2003. Een van de belangrijkste kenmerken is de ondersteuning van het vormen van mesh netwerken van tot 65000 apparaten groot. Daarnaast is dit protocol van begin af aan ontworpen voor laagvermogend verbruik, met radiovermogens van 1 mW (of hoger, tot 100 mW, voor apparaten die gevoed worden). Zigbee wordt onderhouden door de Zigbee

⁵⁷ *Too Many Cooks in the 2.4 GHz Kitchen?*, National Instruments Newsletter (2013), <http://www.ni.com/newsletter/51685/en/>

⁵⁸ <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/Profiles.aspx>

Alliance en is voor de onderste lagen van de OSI stack gebaseerd op de IEEE 802.15.4 standaard.⁵⁹

Sensornetwerken bestaan voor een grote verscheidenheid aan toepassingen en zo is er ook een net zo grote verscheidenheid aan toepassingsprofielen ontworpen voor Zigbee. De meest populaire zijn Zigbee Home Automation (voor huisautomatisering), Zigbee Light Link (voor lichtbesturing) en Zigbee Smart Energy Profile (voor slimme meters en toepassingen rond energiebeheer). Voor sommige van deze toepassingsprofielen zijn er ook nog verschillende netwerklagen ontwikkeld binnen de Zigbee Alliance en ook is er de keuze tussen verschillende frequentiebanden: zowel de 868 MHz band (in Europa) als de 2,4 GHz band (wereldwijd) zijn beschikbaar. Zo maakt bijvoorbeeld de Philips Hue lamp gebruik van het Zigbee Light Link profiel, de Zigbee IP netwerklaag en de 868 MHz band. De Samsung SmartThings hub voor Internet of Things toepassingen gebruikt het Zigbee Home Automation profiel met de Zigbee PRO netwerklaag, op 2,4 GHz. De verschillende profielen worden ook onafhankelijk van elkaar doorontwikkeld binnen de Zigbee Alliance en hebben dus bijvoorbeeld verschillende versienummers. De belangrijkste standaarden van dit moment (welke na inschrijving gratis gedownload kunnen worden van www.zigbee.org) zijn:

- Zigbee Home Automation 1.2
- Zigbee Light Link
- Zigbee 2030.5
- Zigbee PRO
- Zigbee IP

Zigbee 2030.5 is in feite Smart Energy Profile 2.0 toegepast op de Zigbee IP netwerklaag. Smart Energy Profile 2.0 is namelijk onafhankelijk van de onderliggende netwerklagen gedefinieerd en kan ook op powerline communicatie of Wi-Fi worden toegepast. Hoe dan ook is het voor de gemiddelde gebruiker doorgaans onduidelijk of Zigbee apparaten al of niet interoperabel zijn met elkaar, want dat hangt dus sterk af van de gebruikte profielen, frequenties en netwerklagen. De Zigbee Alliance zal daar in de loop van 2016 meer duidelijkheid in proberen te verschaffen met de publicatie van een geünificeerde standaard Zigbee 3.0.

De rapportages over de prestaties van Zigbee lopen nogal sterk uiteen. Ten eerste ligt dat aan het feit dat implementaties die gebruik maken van de 2,4 GHz band sterk beïnvloed worden door andere technologieën in diezelfde, zeer populaire ISM band. Tevens maakten fabrikanten in het begin nogal wat implementatiefouten en werd er door de Zigbee Alliance maar beperkt op interoperabiliteit getest. De 868 MHz band is vooralsnog minder vervuild en ook het bereik is er beter: 50-70 meter bij 868 MHz, tegen 10-20 m bij 2,4 GHz, indoor. Echter, de maximale datatransfer snelheid op 868 MHz is maar 20 kbit/s, tegen 250 kbit/s op 2,4 GHz.

Zigbee heeft veel concurrentie in de verschillende markten waarin het wordt toegepast. In de huisautomatisering met name van Z-wave⁶⁰, in het energiebeheer

⁵⁹ IEEE 802.15.4-2011: *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)* (2011)

⁶⁰ SDS10243: *Z-Wave Protocol Overview*, Zensys A/S (2006),

https://wiki.ase.tut.fi/courseWiki/images/9/94/SDS10243_2_Z_Wave_Protocol_Overview.pdf

vooral van Thread⁶¹ en ook Z-wave, en in de industriële netwerken vooral van WirelessHART.⁶² Desalniettemin kan Zigbee bogen op een redelijke populariteit in de markt. Behalve in de eerdergenoemde systemen voor verlichting en Internet of Things toepassingen vinden we Zigbee ook terug in veel slimme meters, met name in de landen waar het gebruik van Zigbee daarvoor verplicht is gesteld, zoals het Verenigd Koninkrijk. Dat heeft Zigbee onder andere te danken aan de relatief hoge mate van standaardisatie en openheid in vergelijking met zijn concurrenten. Daarnaast is er een hele generatie netwerkingenieurs afgestudeerd met kennis van Zigbee, doordat veel programmeerbare sensornetwerk nodes die in de universitaire vakgroepen gebruikt worden voor onderzoek naar het gedrag van ad-hoc- en mesh netwerken op Zigbee zijn gebaseerd.

2.6.4 NFC

Near-Field Communication (NFC) technologie is een door het NFC Forum gestandaardiseerde vorm van communicatie die gebruik maakt van Radio Frequency IDentification (RFID) Tags. RFID Tags zijn labels die aan producten kunnen worden bevestigd en die hun informatie draadloos digitaal kunnen communiceren met RFID Readers over een afstand van typisch enkele centimeters. Er worden al veel verschillende vormen van RFID communicatie in praktijk gebracht, die doorgaans technisch niet uitwisselbaar zijn.

Het NFC Forum heeft een communicatie stack gestandaardiseerd voor RFID systemen die werken in de 13,56 MHz ISM band, waardoor NFC Readers in principe in staat zijn alle NFC Tags te kunnen lezen, met een datatransfer snelheid van enkele honderden kbit/s. Daarmee kunnen NFC Readers dus bijvoorbeeld in mobiele telefoons worden ingebouwd en gebruikt worden voor een veelheid van toepassingen. De belangrijkste zijn smart card toepassingen voor bijvoorbeeld het verlenen van toegang aan ruimtes (in Nederland bijvoorbeeld de OV-chipkaart) en het doen van contactloze betalingen (in Nederland zijn de meeste bankpassen inmiddels voorzien van een NFC Tag). Ook wordt NFC steeds vaker gebruikt om de authenticatieprocessen in Bluetooth en Wi-Fi netwerken te vergemakkelijken [2]. Het idee daarbij is dat twee apparaten automatisch met elkaar een Bluetooth of Wi-Fi verbinding opzetten als ze bij elkaar in de buurt worden gebracht. De Wi-Fi Alliance heeft dit mechanisme gespecificeerd in de nieuwste versie (2.0.5) van de Wi-Fi Protected Setup (WPS) standaard.⁶³

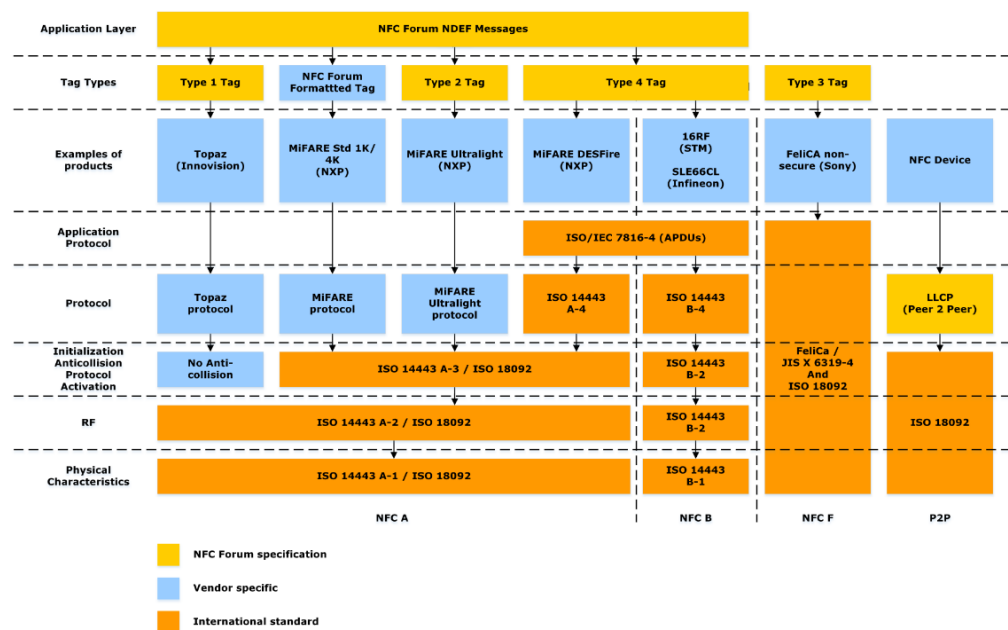
Een belangrijke eigenschap van de NFC Tags is dat ze in het geheel niet gevoed hoeven te worden, ook niet door een batterij. De energie die ze nodig hebben om hun informatie te verzenden wordt verkregen uit de radiosignalen die een Tag ontvangt van de Reader. In veel gevallen kan de informatie op de Tag ook herschreven worden, door gebruik te maken van een speciaal apparaatje of een speciale app op de mobiele telefoon, of doordat de Tag ingebed is in een apparaat en met een microprocessor in verbinding staat via een interne communicatie interface.

⁶¹ *Thread Stack Fundamentals*, Thread Group (2015), http://www.threadgroup.org/Portals/0/documents/whitepapers/Thread%20Stack%20Fundamentals_v2_public.pdf

⁶² IEC 62591:2016: *Industrial networks - Wireless communication network and communication profiles - WirelessHART™*

⁶³ *Wi-Fi CERTIFIED Wi-Fi Protected Setup™: Easing the User Experience for Home and Small Office Wi-Fi® Networks* (2014), Wi-Fi Alliance (2014), <http://www.wi-fi.org/file/wi-fi-certified-wi-fi-protected-setup-easing-the-user-experience-for-home-and-small-office-wi>

De NFC communicatieprotocollen worden grotendeels (fysieke laag tot en met applicatielaag) beschreven in de internationale standaarden ISO 14443⁶⁴, ISO 18092⁶⁵ en ISO/IEC 7816-4.⁶⁶ Daarbovenop definieert het NFC de syntax en semantiek van de berichten die met deze protocollen verstuurd kunnen worden. Ook heeft het NFC Forum een Link Layer Control Protocol (LLCP) gedefinieerd voor peer-to-peer (P2P) communicatie tussen NFC Readers. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 2-11. Tag types 1-4 verschillen vooral in geheugencapaciteit. Type 3 is alleen geschikt voor Japanse systemen (NFC F). Er wordt ook nog onderscheid gemaakt tussen NFC A en NFC B systemen, die verschillende signaalcoderingstechnieken gebruiken.



Figuur 2-11: Standaarden waaraan verschillende delen van het NFC protocol voldoen.⁶⁷

2.7 Digitale omroep

In 1995 werd de Europese DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) standaard voor transmissie van aardse digitale TV vastgesteld, in 2007 gevolgd door DVB-T2. DVB-T was niet de eerste aardse digitale omroepstandaard. Twee jaar eerder werd de Europese T-DAB (Terrestrial-Digital Audio Broadcasting) standaard voor digitale radio vastgesteld, in 2006 gevolgd door het verbeterde DAB+. In Nederland werd in 2003 begonnen met operationele DVB-T uitzendingen onder de naam Digitenne. De Digitenne vergunning, nu in het bezit van KPN, loopt op 31 januari 2017 af en het Ministerie van Economische Zaken is de voorbereiding gestart om in de loop van 2016 deze vergunning via een veiling opnieuw ter beschikking te stellen aan de markt.

⁶⁴ ISO/IEC 14443: *Identification cards -- Contactless integrated circuit cards -- Proximity cards*, parts 1-4 (2008-2016)

⁶⁵ ISO/IEC 18092:2013: *Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- Near Field Communication -- Interface and Protocol (NFCIP-1)* (2013)

⁶⁶ ISO/IEC 7816-4:2013: *Identification cards -- Integrated circuit cards -- Part 4: Organization, security and commands for interchange* (2013)

⁶⁷ Erik Hubers – Eigen werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37867764>

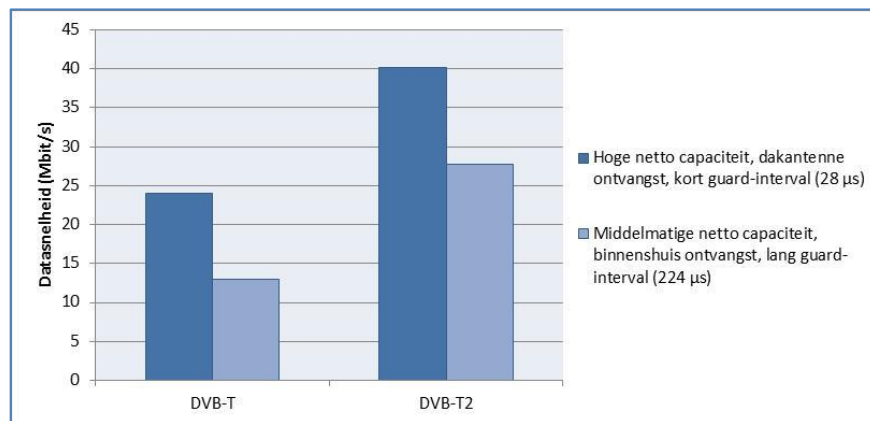
De invoering van DVB-T in Europa ging aanvankelijk langzaam en met onderbrekingen. In sommige landen, zoals het Verenigd Koninkrijk en Spanje, werd zelf na enige jaren een herstart van DVB-T gemaakt, omdat aanvankelijk de acceptie bij het publiek te gering was. Dat lag niet aan de technologie, maar vooral aan het businessmodel. Het programmapakket bestond uit dure betaalkanalen die minder aantrekkelijk werden gevonden dan de betaalkanalen via de satelliet. De kracht van DVB-T bleek toch vooral te liggen in het aanbieden van een pakket populaire programma's voor iedereen in een "free-to-air" model of, zoals in Nederland, een combinatie van vrij te ontvangen publieke programma's en een pakket commerciële programma's met een relatief lage abonnementsprijs.

Door de ontwikkelingen van digitale omroep, het beschikbaar komen van grote LCD schermen en de opkomst van internetdiensten en breedbandige telecommunicatieverbindingen zijn de kijk- en luistergewoontes veranderd, wat zijn weerslag heeft op de technologie en de regelgeving. De dynamiek van deze veranderingen is groter bij digitale televisie dan bij digitale radio. Dit artikel beperkt zich verder tot aardse digitale televisie. De voornaamste kenmerken van het DVB-T(2) systeem, de zendernetwerken en het gebruik van frequentiespectrum worden beschreven. Tenslotte wordt aandacht besteed aan de relatie tussen digitale TV omroep en breedband transmissie en wordt een voorspelling gemaakt over de positie van digitale televisieomroep over 10 jaar.

2.7.1 *Het DVB-T(2) systeem*

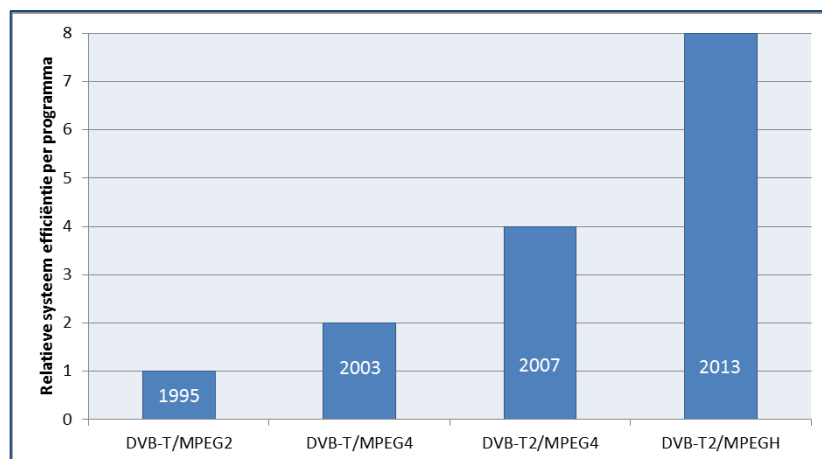
Het DVB-T en DVB-T2 systeem heeft een groot aantal parameters waarmee een afweging mogelijk is tussen robuuste ontvangcondities enerzijds en hoge netto transmissiecapaciteit (payload) anderzijds. Bijvoorbeeld, in landen waar voornamelijk van dakantennes gebruikt wordt gemaakt en dus relatief stabiele ontvangstcondities voorkomen, zoals in het Verenigd Koninkrijk, wordt voor een hoge capaciteit gekozen, met als consequentie een relatief hoge signaal-ruis verhouding (C/N). In landen waar binnenshuis ontvangst van overwegend belang is, ligt de keus meestal bij een lagere C/N en een langer guard-interval (zie Sectie 2.7.2) met als consequentie een lagere transmissiecapaciteit. Voorbeelden van de netto datasnelheid bij DVB-T en DVB-T2 zijn aangegeven in Figuur 2-12. In de beide toepassingen is de nettocapaciteit aangegeven bij gelijke C/N in DVB-T en DVB-T2. De DVB-T netto datasnelheid in Nederland is circa 15 tot 20 Mbit/s, waardoor een relatief hoge C/N nodig is.

Afhankelijk van de keuze van de systeemp parameters is de capaciteit van DVB-T2 circa 1,7 tot 2 maal zo groot als van DVB-T.



Figuur 2-12: Voorbeeld netto datasnelheid van DVB-T en DVB-T2.

Opeenvolgende beeldcompressie systemen MPEG2, MPEG4 en MPEGH (ook wel HEVC genoemd) zijn steeds ongeveer een factor twee efficiënter. Efficiëntere compressie systemen gecombineerd met DVB-T of DVB-T2 maken het mogelijk om per kanaalbandbreedte meer programma's uit te zenden. Figuur 2-13 geeft de relatieve efficiëntie per uitgezonden programma van de verschillende combinaties van compressie- en transmissie systemen aan. Het resultaat is dat met DVB-T2/MPEGH ongeveer acht keer zo veel programma's met standaard kwaliteit (SDTV) uitgezonden kunnen worden als met het oorspronkelijke DVB-T/MPEG2 systeem. In plaats van meer SDTV programma's biedt de capaciteitsvergroting de mogelijkheid HDTV uit te zenden. HDTV vraagt om een circa vier maal hogere datasnelheid dan standaard beeldkwaliteit (SDTV). Ook bieden de efficiëntere systemen de mogelijkheid tot een beperkter programmapakket in minder spectrumruimte (zie Sectie 2.7.3).



Figuur 2-13: Relatieve efficiëntie van digitale TV systemen en het jaar van standaardisatie.

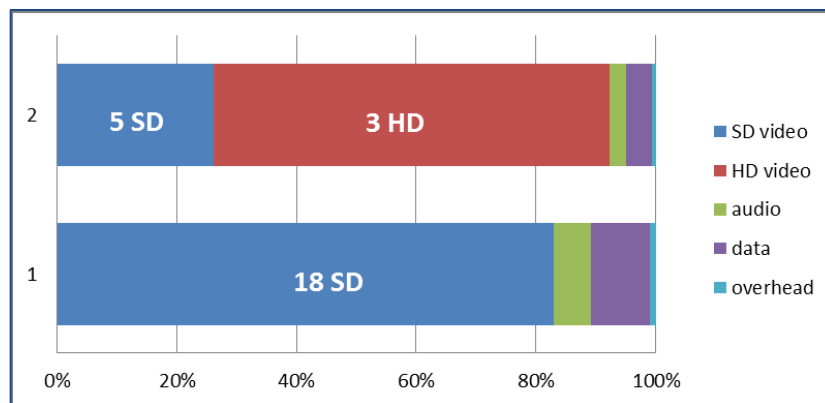
In Figuur 2-13 is ook het jaar van standaardisatie aangegeven. Het duurt meestal een aantal jaren na de standaardisatiedatum voordat gunstig geprijsde ontvangers volop beschikbaar zijn. De toepassing van de systeemcombinaties in Europa is verschillend en is afhankelijk van het jaar waarin digitale TV werd gestart of met HDTV werd begonnen. Op dit moment (voorjaar 2016) worden proeven met DVB-

T2/MPEGH uitgevoerd in Duitsland.⁶⁸ Naar verwachting komt in de loop van 2016 DVB-T2/MPEGH ontvangapparatuur beschikbaar.

De invoering van de verbeterde systemen is complex, omdat ontvangstapparatuur de eerdere versie niet kan ontvangen. Alle digitale ontvangers (set-top-boxen) moeten dus vervangen worden en geïntegreerde digitale ontvangers moeten worden voorzien van een set-top-box. Om de kijker daartoe in de gelegenheid te stellen zouden beide versies gedurende een bepaalde tijd uitgezonden moeten worden, waarvoor doorgaans de frequentieruimte ontbreekt. Om consumenten te stimuleren tot snelle overgang naar het nieuwe systeem is een programmapakket noodzakelijk dat aantrekkelijker is dan in de oude situatie.

2.7.2 Digitale TV netwerken

Een TV-sigitaal bestaat uit beeld en bijbehorende audiokanalen. Bovendien worden datasignalen meegezonden, onder meer voor service-informatie waarmee de ontvangstapparatuur de elektronische programmagids (EPG) produceert. De beeld- en geluidssignalen uit de omroepstudio worden gecomprimeerd en samengevoegd met datasignalen in een datastroom die overeenkomt met de nettocapaciteit die is ingesteld bij de zenders. Dit gebeurt in multiplexers die meestal zijn ingericht als “statistische” multiplex en de datasnelheid dynamisch toedelen aan de programma’s afhankelijk van de beeldinhoud. Het efficiëntievoordeel is afhankelijk van het aantal programma’s en kan oplopen tot meer dan 25% bij tien of meer programma’s. Voorbeelden van de samenstelling van de datastroom, ook wel multiplex genoemd, voor een netto transmissie capaciteit van 27,7 Mbit/s en MPEG4 beeldcompressie zijn weergegeven in Figuur 2-14. Meer programma’s zijn mogelijk als een grotere nettocapaciteit wordt gekozen, een lagere beeldkwaliteit wordt geaccepteerd of een betere compressie (MPEGH) wordt toegepast.



Figuur 2-14: Voorbeelden van een multiplex samenstelling (DVB-T2, payload 27,7 Mbit/s, beeldcompressie MPEG4).

Meestal zijn per zenderopstelplaats meerdere zenders geïnstalleerd; elk van deze zenders heeft zijn eigen datastroom (multiplex). Door de meerdere zenders per opstelplaats ontstaan “netwerklagen”.

Een zendernetwerklage kan ingericht zijn als “Multi Frequency” netwerk (MFN), of met “Single Frequency” netwerken (SFN). In een MFN hebben zenders binnen een bepaalde afstand van elkaar verschillende frequenties. In een SFN heeft elke zender dezelfde frequentie. SFNs hebben echter hun beperkingen. Een

⁶⁸ Voor meer informatie, zie Informationsportal der Initiative DVB-T2 HD; <http://www.dvb-t2hd.de>

voorwaarde is dat de uitgezonden informatie op elk moment hetzelfde moet zijn. In geval van regionale programma's, of per regio verschillende programma's gedurende een bepaalde tijd in een landelijk programma en door landsgrenzen wordt de omvang van een SFN beperkt. Verder is de afstand tussen zenders in een SFN beperkt door de lengte van het guard-interval, één van de te kiezen systeem parameters. In Nederland bestaat een netwerklaag uit meerdere SFNs, waarbij het grootst mogelijke guard-interval dat DVB-T biedt (224 μ s) wordt toegepast.

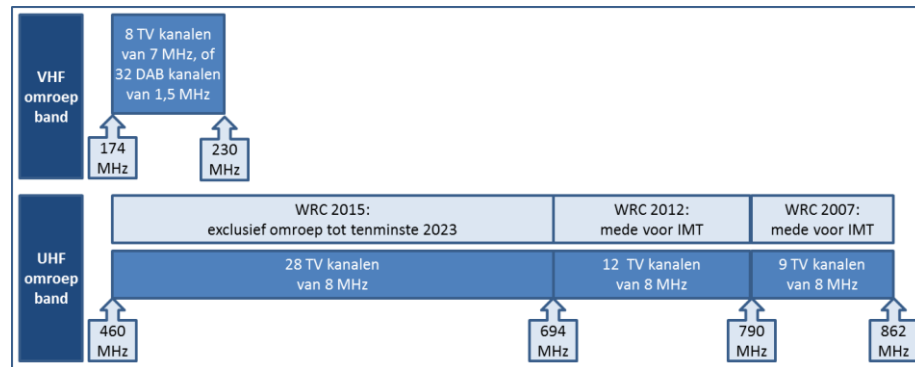
DVB-T2 biedt een grotere keuze en langere guard-intervals dan DVB-T. Met DVB-T2 zijn daarom SFNs van grotere omvang te realiseren. SFNs zijn frequentie-efficiënter dan MFNs, in de praktijk wordt 15% tot 25% bespaard op het spectrumgebruik.⁶⁹ Dit gaat ten koste van de netto datasnelheid omdat SFNs een groter guard-interval nodig hebben.

MFNs worden vooral toegepast in landen waar de zendernetwerken worden geoptimaliseerd op een hoge transmissie capaciteit in combinatie met overwegend dakantenne ontvangst. In landen waar binnenshuis ontvangst van belang is worden doorgaans SFNs toegepast. Voor binnenshuis ontvangst is een hogere veldsterkte nodig (een factor duizend of meer) dan voor dakantenne ontvangst vanwege de geringere ontvangstantenneversterking, de lagere ontvangthoogte, de gebouwdemping en de onstabiele ontvangstcondities (Rayleigh fading). Om binnenshuis ontvangst in een groot gebied te realiseren wordt het vermogen verdeeld over meerdere zenders op dezelfde frequentie. Bovendien treedt netwerk versterking op doordat signalen van meerdere zenders binnen een SFN bijdragen aan een hoger ontvangen signaalniveau en een grotere ontvangstkans. In Nederland is de zenderdichtheid vrij hoog omdat én binnenshuis ontvangst in vrijwel het hele land gewenst is én een relatief hoge C/N wordt toegepast (zie Sectie 2.7.1).

2.7.3 *Frequentiespectrum*

Het frequentiegebruik van DVB-T(2) wordt geregeld in het Verdrag van Genève van 2006. Voor digitale TV zijn twee frequentiebanden voorzien. Het VHF bereik van 174 MHz tot 230 MHz is deels ook voor digitale radio bestemd. Het UHF bereik van 470 tot 862 MHz was in 2006 geheel voor digitale TV bestemd. Opeenvolgende World Radio Conferences (WRC) hebben echter eerst het 800 MHz deel en vervolgens het 700 MHz deel van deze band mede toegewezen aan mobiele breedband diensten (4G), in ITU aangeduid als IMT. Figuur 2-15 geeft een overzicht van de frequentiebanden. DVB-T(2) en mobiele diensten kunnen niet samen gebruikmaken van dezelfde frequentieband. In de meeste landen, inclusief de EU, is besloten deze banden voor mobiele diensten te gebruiken. Op de WRC van 2015 is besloten om de band van 470 tot 694 MHz exclusief voor digitale TV te behouden tot tenminste 2023. Dit geeft omroeporganisaties zekerheid om te investeren in nieuwe systemen die in minder spectrum meer capaciteit bieden (zie Sectie 2.7.1).

⁶⁹ Zie SFN – Myths and reality, EBU Technology fact sheet, 1 November 2014.



Figuur 2-15: VHF en UHF TV omroepbanden.

Doordat de UHF TV band in twee stappen met meer dan 40% is gereduceerd is grootschalige frequentie herplanning van DVBT(2) nodig in Europa. Deze herplanning betreft niet alleen de frequenties maar kan ook andere zenderlocaties, andere zenders en andere zendantennes tot gevolg hebben.

2.7.4 Omroep en breedband

De kerneigenschap van omroep is van oudsher dat een pakket populaire kanalen met hoge beeld- en geluidskwaliteit wordt verzonden aan iedereen in vrijwel het hele land. De inhoud van de kanalen en de volgorde van de programma's wordt bepaald door de omroeporganisatie. Dit wordt ook wel "lineaire TV" genoemd. Dankzij de beschikbaarheid van vaste en mobiele breedbandverbindingen kan de consument via het open internet op ieder moment een veelvoud aan andere programma's bekijken. Deze programma's kunnen van dezelfde omroeporganisaties zijn, zoals "Uitzending gemist", van andere professionele aanbieders, zoals Netflix, of korte videoclips. Breedband TV wordt vooral bekeken met tablets en TV omroep op grote schermen. Grote TV schermen worden steeds vaker voorzien van internet toegang ("connected TV") en tablets kunnen DVB-T(2) ontvangen via een USB-stick. Het is niet uitgesloten dat in de toekomst op steeds meer tablets geïntegreerde DVB-T(2) ontvangst mogelijk is. Tablets worden ook gebruikt als "tweede scherm" om te reageren op programma's op het hoofdscherm of om meer achtergrondinformatie te verkrijgen.

"Connected TV" biedt de mogelijkheid tot integratie van omroep en breedband distributie. Er zijn verschillende technologieën om dit naadloos te laten verlopen, zoals de HbbTV standaard die in Europa veel wordt toegepast.

Onderzoek⁷⁰ in verschillende landen heeft uitgewezen dat gemiddeld vier uur per dag TV wordt gekeken. Het aandeel hierin van niet-lineair TV kijken neemt toe van circa 10% in 2015 tot naar verwachting circa 20% in 2020, maar dat kan per land verschillen. Dit niet-lineaire aandeel bestaat, behalve uit breedbandontvangst, ook voor een belangrijk deel uit het kijken naar eerder opgenomen programma's met de hard-disk recorder (Personal Video Recorder, PVR).

Gezien de vraag naar lineaire TV en de uitkomst van de WRC-2015, wordt verwacht dat in de komende tien tot vijftien jaar TV omroep een belangrijk distributiemiddel blijft. Het belang van aardse digitale TV zal afhangen van de marktcondities en regelgeving per land. Gezien de beschreven ontwikkelingen zal aardse TV omroep wel veranderingen ondergaan in de komende jaren zoals:

⁷⁰ Zie Roadmap for the evolution of DTT – a bright future for TV, Analysis Mason & Digitag, 2014.

- De integratie tussen omroep en breedbanddiensten zal verbeteren;
- HDTV wordt de norm voor elke uitzending;
- Efficiëntere systemen worden toegepast om HDTV programma's in een verkleinde frequentieband (470 tot 694 MHz) uit te zenden;
- Volledige frequentie her-planning wordt doorgevoerd om landelijke dekking met minder netwerklagen te realiseren;
- De consument zal zijn ontvangstapparatuur moeten vernieuwen om de efficiëntere uitzendsystemen te kunnen ontvangen;
- Veel zendstations zullen worden aangepast of vernieuwd.

2.8 Satellietcommunicatie

Bij satellietcommunicatie wordt gebruikt gemaakt van een satelliet in een baan om de aarde die signalen verzonden vanaf terminals op (of boven) de aarde ontvangt, versterkt en weer uitzendt naar terminals op (of boven) de aarde. Door de grote afstanden die daarbij moeten worden overbrugd zijn de propagatieverliezen erg hoog en moet de versterking van de satelliet hoog zijn om dit te compenseren. Om daarbij 'rondzingen' te voorkomen, wordt gebruik gemaakt van aparte frequentiebanden voor ontvangst (uplink) en uitzenden (downlink).

2.8.1 Frequentiebanden

Satellieten kunnen gebruik maken verschillende frequentiebanden, afhankelijk van de dienst die ze bieden, zoals fixed satellite services (verbindingen tussen vaststaande terminals), mobile satellite services (verbindingen waarbij minstens één terminal mobiel is, waarbij nog onderverdeling wordt gemaakt naar land, maritiem en aeronautical) en broadcast satellite services (TV-uitzendingen). Daarnaast zijn er specifieke frequentiebanden voor civiel en militair gebruik.

De meest algemeen gebruikte civiele frequentiebanden zijn:

- L-band: 1,5 GHz downlink / 1,6 GHz uplink (mobile services)
- C-band: 4 GHz downlink / 6 GHz uplink (fixed services)
- Ku-band: 11 GHz downlink / 14 GHz uplink (fixed services)
- Ka-band: 19 GHz downlink / 30 GHz uplink (fixed & mobile services)

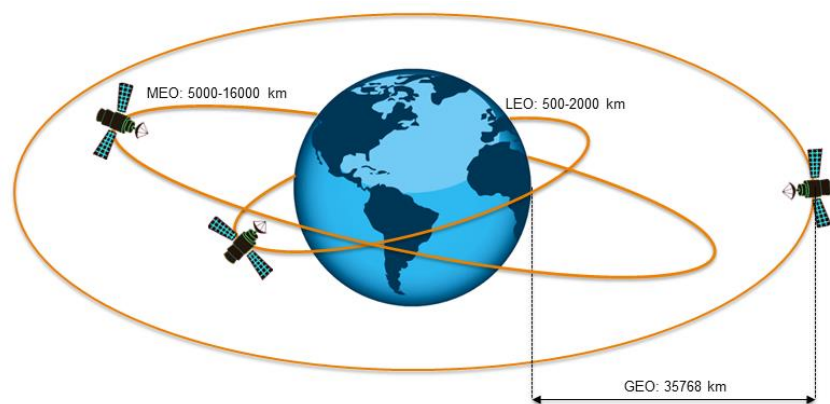
Gebruik van de lagere frequentiebanden heeft als voordeel dat de propagatieverliezen lager zijn en dat er vrijwel geen extra damping plaats vindt door neerslag. De hogere frequentiebanden hebben daarentegen het voordeel dat er meer bandbreedte beschikbaar is (dit gaat van tientallen MHz in de L-band op tot enkele GHz in de Ka-band). Bij smalbandige diensten die gebruik maken van kleine terminals (zoals een Iridium telefoon) wordt om deze redenen de L-band toegepast, terwijl voor zeer breedbandige verbindingen (tot enkele tientallen Mbit/s) steeds meer de Ka-band wordt toegepast.

2.8.2 Satellietbanen

De hoogte (boven de aarde) waarop de satelliet zich kan bevinden wordt praktisch beperkt door de atmosfeer en de zogeheten Van Allen gordels. Op lage hoogtes (< 300 km) is door de wrijving die de satelliet ondervindt van de atmosfeer veel brandstof nodig om de satelliet in zijn baan te houden, waardoor de levensduur wordt beperkt. De Van Allen gordels bestaan uit twee gordels rond de aarde waar hoog energetische deeltjes, elektronen en protonen afkomstig van de zon (zonnwind), ingevangen worden door het aardmagnetisch veld. De binnengordel

bevindt zich op tussen circa 1000 en 6000 km hoogte en de buitengordel tussen circa 13000 tot 60000 km. De hoog-energetische deeltjes hebben een nadelig effect op de elektronische componenten in de satelliet. De efficiëntie van bijv. zonnepanelen zal snel degraderen als deze zich in de van Allen gordels bevinden waar de dichtheid van hoog-energetische deeltjes groot is. Afscherming tegen deze deeltjes ("hardening") is slechts beperkt (vanwege het hoge extra gewicht) of niet mogelijk (bijv. zonnepanelen). Om deze reden worden de gebieden in de Van Allen gordels waar de dichtheid van hoog energetische deeltjes hoog is vermeden. Satellieten in circulaire banen zijn dan ook onder te verdelen in drie typen (zie Figuur 2-16):

- LEO (Low Earth Orbiting) satellieten, op 500 tot 2000 km hoogte;
- MEO (Medium Earth Orbiting) satellieten, op 5000 tot 16000 km hoogte;
- GEO (Geostationary Earth Orbiting) satellieten op 35768 km hoogte.



Figuur 2-16: Schematische weergave van LEO, MEO en GEO satellietbanen.

Over het algemeen is voor communicatie via een satelliet op zeer grote hoogte meer zendvermogen nodig (van zowel terminals als satelliet) en neemt ook de vertraging (delay) toe. GEO satellieten maken gebruik van de geostationaire baan, die zich bevindt in het evenaarsvlak op een hoogte van 35768 km hoogte. Satellieten in deze baan hebben dezelfde omloopsnelheid als de aarde zelf. Vanaf de aarde gezien staan deze satellieten daardoor stil aan de hemel, wat het grote voordeel heeft dat richtantennes veelal geen mechanisme nodig hebben om de satelliet te volgen.

Naast circulaire banen zijn er ook elliptische banen. Deze worden echter niet veel gebruikt. De meeste communicatiesatellieten zijn GEO of LEO satellieten, waartoe we ons hier verder zullen beperken.

De belangrijkste voordelen van GEO (t.o.v. LEO) satellieten zijn:

- ze zijn zichtbaar vanaf een groot deel (circa 1/3) van de aarde, zodat met een drietal satellieten nagenoeg wereldwijde dekking kan worden geboden (met uitzondering van de polen). Om hetzelfde te bereiken met LEO satellieten zijn er tientallen nodig.
- ze staan stil aan de hemel (vanaf de aarde gezien), waardoor richtantennes veelal geen richtmechanisme nodig hebben.
- door bovengenoemde voordelen zijn er geen hand-overs nodig zoals bij LEO satellieten, die vanaf een bepaald punt op de aarde slechts gedurende

korte tijd zichtbaar zijn, waarna er moet worden overgeschakeld naar een andere satelliet die wel in het zicht is (komen te staan).

De belangrijkste voordelen van LEO (t.o.v. GEO) satellieten zijn:

- ze ondervinden als gevolg van de kleinere afstand tot de aarde een veel kleinere vertraging in de datacommunicatie, een tiental ms tegenover circa 250 ms voor GEO satellieten,
- er is minder zendvermogen nodig van zowel de terminals als de satelliet om een communicatieverbinding te maken, door de lagere propagatieverliezen die optreden bij lagere hoogtes.

2.8.3 *Voor- en nadelen van satellietcommunicatie*

Het grote nadeel van satellietcommunicatie zijn de kosten. Ten opzichte van aardse communicatiesystemen is het relatief duur. Dit is o.a. het gevolg van de hoge kosten die gepaard gaan met het ontwikkelen, maken, testen en in de ruimte brengen van de satelliet (deze moet zeer betrouwbaar blijven werken gedurende lange tijd (10-15 jaar), omdat reparatie niet mogelijk is).

Het grote voordeel van satellietcommunicatie is de dekking. Aardse draadloze communicatiesystemen hebben een relatief klein bereik (tussen randapparaat en basisstation) en om verbindingen over grotere afstanden mogelijk te maken dienen de basisstations onderling verbonden te worden (de vaste infrastructuur bestaande uit koper- en glasvezelverbindingen).

2.8.4 *Toepassingsgebieden*

Geschikte toepassingsgebieden voor satellietcommunicatie zijn nagenoeg direct uit het bovengenoemde voor- en nadeel af te leiden:

- voor communicatie van/naar gebieden waar geen vaste infrastructuur aanwezig is, zoals op oceanen (maritieme communicatie, maar ook aeronautical op bijv. intercontinentale vluchtroutes);
- voor communicatie van/naar gebieden waarin aanleg van een vaste infrastructuur erg duur is, zoals in moeilijk begaanbare/bereikbare en/of zeer dun bevolkte gebieden (bergketens, woestijnen, steppengebieden);
- voor communicatie in situaties waarbij de vaste (communicatie)infrastructuur overbelast of zelfs uitgevallen kan zijn, zoals tijdens grote evenementen of rampen;
- voor zeer betrouwbare communicatie (beschikbaarheid van 99,9% en hoger) over grote afstanden;
- voor het verspreiden van (dezelfde) informatie naar een groot publiek, gebruik makend van de inherente broadcast mogelijkheden van satellietcommunicatie, waarbij kosten over een groot aantal deelnemers kunnen worden verdeeld.

2.8.5 *Tenslotte*

Alle diensten die over aardse communicatiesystemen worden aangeboden, kunnen (en worden) in principe ook via de satelliet aangeboden. Ten opzichte van aardse communicatiesystemen zijn de kosten echter nog steeds hoger en hebben geostationaire satellieten nog steeds het nadeel van een hogere delay. Met de toepassing van LEO satellieten, hogere frequentiebanden (Ka-band), geavanceerde antennetechnologie, inter-satellite links, on-board processing, adaptive modulation and coding (AMC), adaptive power control (APC) en efficiëntere access technologieën (zoals Multi-Frequency-Time Division Multiple

Access (MF-TDMA)) worden de mogelijkheden die satellietcommunicatie biedt steeds beter en bruikbaarder voor een groter aantal toepassingen. Satellietcommunicatie kan hierdoor ook steeds beter een aanvullende rol spelen voor aardse communicatiesystemen in hierboven genoemde toepassingsgebieden (zoals bijvoorbeeld voor LTE).

3 Ter afronding

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 direct via één van de auteurs van dit rapport.