

Si meg, Hva er 5G, egentlig?

av Else Nordhagen og Einar Flydal, 24.04.2023



Reklamene på kino, TV, nettet – kort sagt over alt – lover at 5G skal gi oss alle fantastiske opplevelser og muligheter. Men hva er 5G egentlig? Og hva er visjon og hva er virkelighet? Her presenterer vi visjonen og hovedtrekkene i disse ulike teknologiene som skiller 5G fra 4G. Og vi kommenterer kort om grenseverdier og virkninger på biologiske systemer.

5G – «femte generasjons mobilkommunikasjon» – er først og fremst et markedsføringsbegrep fra telekomindustrien. 5G er en visjon som beskriver hvordan trådløs teknologi kan få en kvalitet og hastighet som gjør at den kan konkurrere i hastighet og svartid med kablede teknologier og gi grunnlag for helt nye anvendelser.

Men telekomindustriens framtidsvisjon er langt unna det teleselskapene leverer sine kunder i dag: 5G er ikke en enkelt teknologi med en lang rekke teknologier som teleselskaper kan velge å ta i bruk eller ikke.

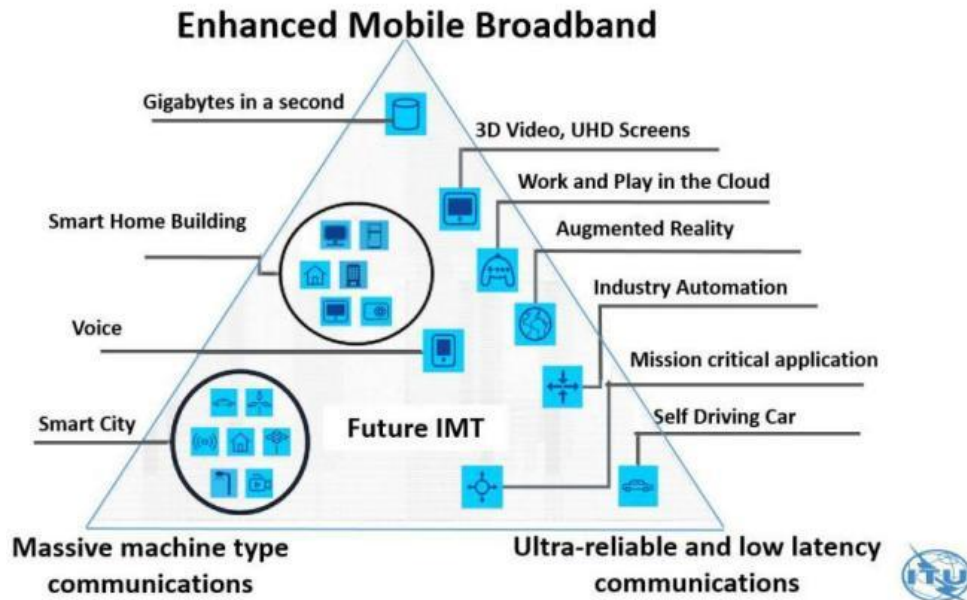
Visjonen

ITU – Den internasjonale telekommunikasjonsunionen – er FNs organ for å fremme telekommunikasjon i verden og har spilt en viktig rolle for utarbeidelse av standarder. I dag har ITU, med sine 193 land og 800 selskaper som medlemmer, en viktig rolle som markedsføringsapparat for trådløs kommunikasjon, ikke minst rettet mot de store og «umettede» markedene i utviklingsland. Der er budskapet først og fremst at telekom fremmer økonomisk utvikling. 5G markedsføres av ITU som den nye teknologien som overgår alle tidligere generasjoner.

Visjonen telekomindustrien har for 5G framgår av Figur 1, mens Figur 2 skal formidle at 5G inngår i et historisk utviklingsløp og er et stort sprang framover som skal gi oss alle:

- et svært raskt mobilt datanett som kan støtte svært mange samtidige brukere

- raskere kommunikasjon
- så rask respons at det kan støtte selvkjørende biler og busser
- kapasitet til «Tingenes Internett», og
- «ubegrenset» mulighet for å laste ned hva man vil, når man vil og hvor man vil.



Figur 1 Her vises ITUs visjon om tjenester som 5G skal gjøre mulig, men som tidligere generasjoner mobilkommunikasjon ikke kan klare. Tjenestene er plassert utfra hva ved 5G-teknologiene som er spesielt viktig for dem. Nede til venstre: massiv økning i maskin-til-maskin-kommunikasjon. Øverst: høy kapasitet i mobilnettet (tusener av ganger mer enn i dagens 4G-nett). Nede til høyre: svært pålitelig og rask nettforsindelse.







Figur 2 Historisk blikk på hvordan mobiltefonteknologien har gått fra «baby-stadiet» til «fullblods datamaskiner», og med 5G skal bli som en raket er i forhold til et menneske. Dette er en illustrasjon som går igjen i markedsføringsmateriale fra mange leverandører av 5G-teknologi.

Telekomindustrien skaper på denne måten et drømmescenario for innholdsindustrien: 5G skal gi dem muligheter til å selge ubegrenset med innhold alle steder, alltid. 5G er også en

gavepakke til politikerne: 5G gir dem en visjon for rasjonalisering av offentlige tjenester og av samfunnet forøvrig, og dermed velferdsvekst. 5G gjør det også billigere å bygge ut for nye arbeidsplasser i utkantsområder siden det er vesentlig billigere å bygge ut 5G enn å grave ned kabler i bakken.

Men det er ikke ITUs framtidvisjon som leveres i dag. I stor grad er det i stedet en oppgradert versjon av 4G, såkalt 4G+. Og ulike 5G-teknologier fases inn gradvis over lang tid. «Full 5G» fins bare i noen små testinstallasjoner.

		3G	4G	5G
	Deployment	2004-05	2006-10	2020
	Bandwidth	2mbps	200mbps	>1gbps
	Latency	100-500 milliseconds	20-30 milliseconds	<10 milliseconds
	Average Speed	144 kbps	25 mbps	200-400 mbps

Figur 3 Her sammenliknes 3G, 4G med fullt utbygget 5G. Årstallene viser utbyggingsstart (deployment). Derneft angis båndbredden, det vil si dataoverføringshastigheten. Økningen fra 4G til 5G er fra 200 mbps (megabits, dvs. milliarder bits, per sekund) til over 1 gbps (gigabits/sek). «Latency» betyr «Forsinkelse», dvs. «Ventetid i nettet». I nederste rad angis gjennomsnittshastigheten på nedlasting av data. Her ser vi at 5G er langt raskere ved optimale forhold. Dette er også en illustrasjon som går igjen i markedsføringsmateriale fra 5G-leverandører.

Figur 3 viser at 5G har større kapasitet (båndbredde) og er mye raskere enn tidligere teknologier. Dette er viktig når man raskt skal sende små meldinger, for eksempel når sensorer skal sende data og andre «smarte» komponenter må ha raske tilbakemeldinger – som hvis automatisk transport skal fjernstyres.

Men Figur 3 viser også at fordelene med 5G er sterkt overdrevet i mye markedsføringsmateriale: I Figur 2 framstilles 5G som en rakett i forhold til et menneske (4G). Men hastighetsforskjellen er tross alt under 20 ganger – i beste fall. Det hadde vært mer realistisk om 5G var illustrert med en sykkel.

Teknologiene som inngår i 5G-konseptet

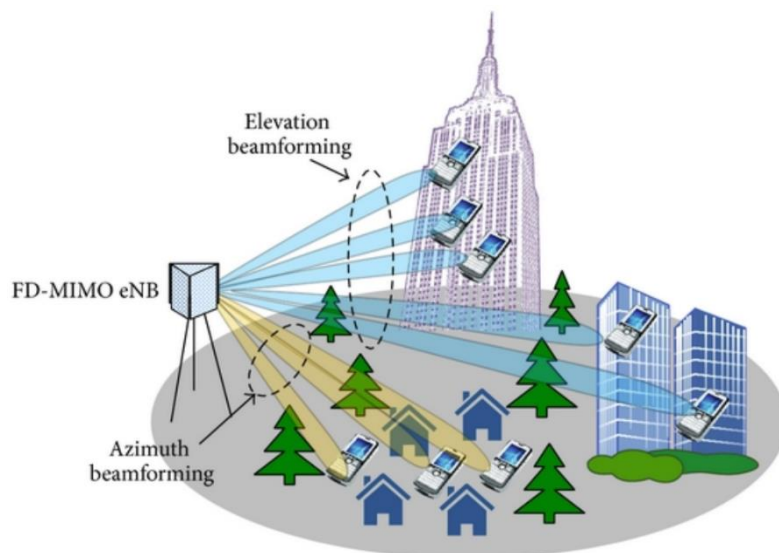
De første installasjonene av «5G» er svært like 4G, men etter hvert fases det inn flere teknologiske nyvinninger. Det er disse nyvinningene som gjør 5G-teknologien til dels svært forskjellig fra tidligere mobiltelefon-teknologier. De tekniske nyvinningene omfatter bl.a.:

- *MIMO* – «Massive In, Massive Out» - som betegner mange ulike teknologier som gjør at utstyr og antenner kan sende og motta mange forbindelser over samme frekvens samtidig, og over mange kanaler samtidig. Dermed økes kapasiteten.
- *Langt høyere frekvensområder* tas i bruk enn tidligere generasjoner mobilnettverk, også såkalte *millimeterbølger* (mmW, millimeter Waves, dvs. området fra 10 mm (30 GHz) til 1 mm (300 GHz)). De har kortere rekkevidde, men høyere kapasitet.

- «Småceller» – som gir små dekningsområder til bruk i områder med mange brukere og derfor store kapasitetsbehov for samtidig bruk. De lages ved å sette ut tett med antenner som har høy frekvens og kort rekkevidde.
- «Stråleforming» – som vil si å konsentrere mesteparten av den utstrålte energien mot enheten antenna skal kommunisere med. Dermed kan samme basestasjon ha mange flere forbindelser i gang samtidig, uten at den samlede strålingen i området blir svært høy.
- Programvare og driftssystemer som skal holde orden på det trådløse nettverket slik at man kan dele det opp forretningsmessig (f.eks. med private nettverk for en bedrift) og kople inn utstyr som gir en glidende overgang til private nett utenfor teleselskapenes kontroll, f.eks. til hjemmerutere. Teleselskapenes rolle blir ganske endret.

Under finner du en gjennomgang av en del av nyvinningene.

Stråleforming og MIMO



Figur 4 Hvordan en basestasjon kan betjene mange samtidig ved bruk av stråleforming (beamforming) uten at de må dele frekvensbånd. Illustrasjon fra https://www.researchgate.net/figure/Conceptual-diagram-of-FD-MIMO-system-realizing-high-order-MU-MIMO-by-utilizing-2D-antenna_fig7_282476872

MIMO i ulike versjoner har vært under utvikling siden 1970-tallet og brukes i dag i ulike varianter i en rekke trådløse systemer (bl.a. WiFi, 3G, WiMAX, og 4G).

En teknikk med basestasjoner som benytter flerbruker-MIMO (Multi User MIMO / MU-MIMO) i kombinasjon med stråleforming er kjernen i 5G NR (New Radio). Dette er den tekniske standarden for radiokommunikasjon i 5G. Frekvensene som skal tas i bruk, er 410 MHz – 7125 MHz og 24250 MHz – 71000 MHz (altså opp til 71 GHz).

5G NR vil gjøre det mulig å betjene 1 000 ganger flere kommuniserende enheter per flateenhet enn man kan med 4G, fordi man kan sende mange flere brukere ultra-raske datapakker med høyere presisjon og lavere forsinkelse.

Stråleforming er en teknologi hvor man bruker mange små, samhandlende antenner («fasearrangerte antennerekker», «phased arrays») som kan konsentrere en elektromagnetisk stråle slik at den treffer et forholdsvis lite område. En basestasjon med mange antennerekker kan dermed sende ut konsentrerte stråler til flere samtidig. Dette løser et kapasitetsproblem: Hvis man ikke konsentrere strålen vil alle mottakerne få det samme signalet, som fra en høyttaler alle kan høre. Nettoperatoren må derfor dele opp bruken i ørsmå tidsluker til hver mottaker. Stråleforming virker som om man har én høyttaler til hver, slik at man kan sende ulik lyd til hver bruker - samtidig. Se Figur 4.

Frekvensene og den lagdelte bruken

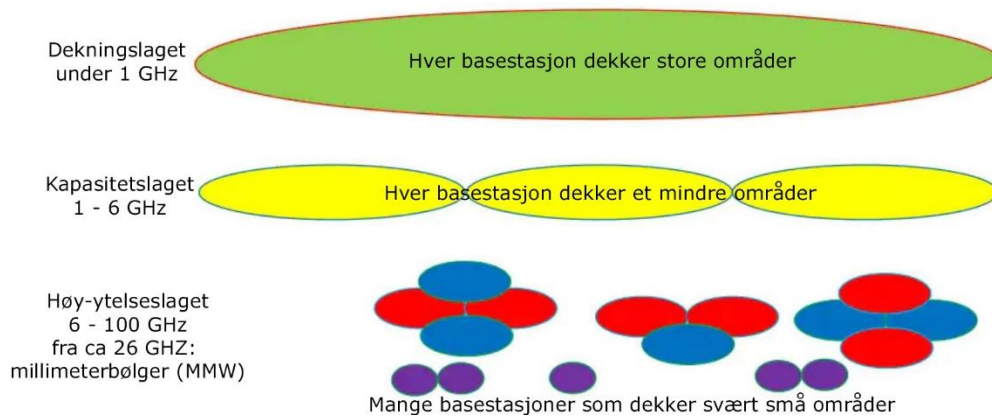
Trådløs kommunikasjon (og radar) bruker elektromagnetiske bølger. Bølgene kan ha frekvenser fra helt nede i 3 Hz (3 svingninger per sekund) og oppover. Antennene sender ut «bærebølger» som så forvrenses på forskjellige måter («moduleres») for å kode inn innholdet som skal overføres. Mottakeren fjerner bærebølgen og sitter igjen med det som er innholdet i forsendelsen.

I dag bruker mobiltelefoner og mobilmastene bærebølger med frekvenser under 3 GHz (3 milliarder svingninger per sekund). WiFi bruker 2,5 GHz og 5 GHz. («5 GHz» må ikke må forveksles med «5G».) Kommunikasjonen som går i «transportleddene» mellom mobilmaster og hovednettverket («stamnettet») er også ofte trådløse. De bruker «faste radiosamband» (radiolink) med langt høyere frekvenser på grunn av sitt høye kapasitetsbehov.

Med 5G bruker man bærebølger i flere ulike frekvensområder som gir ulik kapasitet og hastighet, alt etter hvor tett befolkningen er – og dermed kapasitetsbehovet. Teknologene tenker dette som forskjellige «lag». De er illustrert i Figur 5:

- 1) «Dekningslaget» består av mobilmaster med basestasjoner som gir en grunnleggende flatedekning over store områder, men med lav hastighet, typisk for spredtbygde områder. Her bruker man frekvenser under 1 GHz, som når flere kilometer av gårde. I Norge brukes gjerne 700 og 900 MHz. Dette gir utendørsdekning over store områder og slike frekvenser når langt inn i bygninger. De trenger bra gjennom fysiske hindringer, men gir ikke særlig store hastigheter eller økt kapasitet når det er flere samtidige brukere. Dette systemets teknologi er ganske likt 4G, men kan altså kalles «5G». Det bruker hverken MIMO eller stråleforming.
- 2) «Kapasitetslaget»: For å få større kapasitet, men innen et noe mer avgrenset område, bruker man bærebølger i frekvensområdet 1 – 6 GHz, gjerne frekvenser rundt 3,6 GHz, i kombinasjon med MIMO-systemet. I dette laget kan det også tas i bruk *stråleforming*.
- 3) «Superdatalaget» bygges ut etter hvert i områder der det er stort behov for mye kapasitet. Til dette bruker man bærebølger fra 6 GHz og oppover (millimeterbølger). Dette er frekvenser med svært begrenset rekkevidde og de blir lett stoppet av vegger og andre fysiske hindringer. I Norge har man tenkt å bruke frekvenser rundt 26 og 60

GHz. «Superdatalaget» bruker også stråleforming. Det er bare dette «superdatalaget» som kan gi slike datahastigheter som angis av ITU som toppytelsen. Man bygger slike småceller ved å sette ut mange små basestasjoner. De kan være ganske små og bygges inn i gatelykter og andre «møbler» i det offentlige rom.

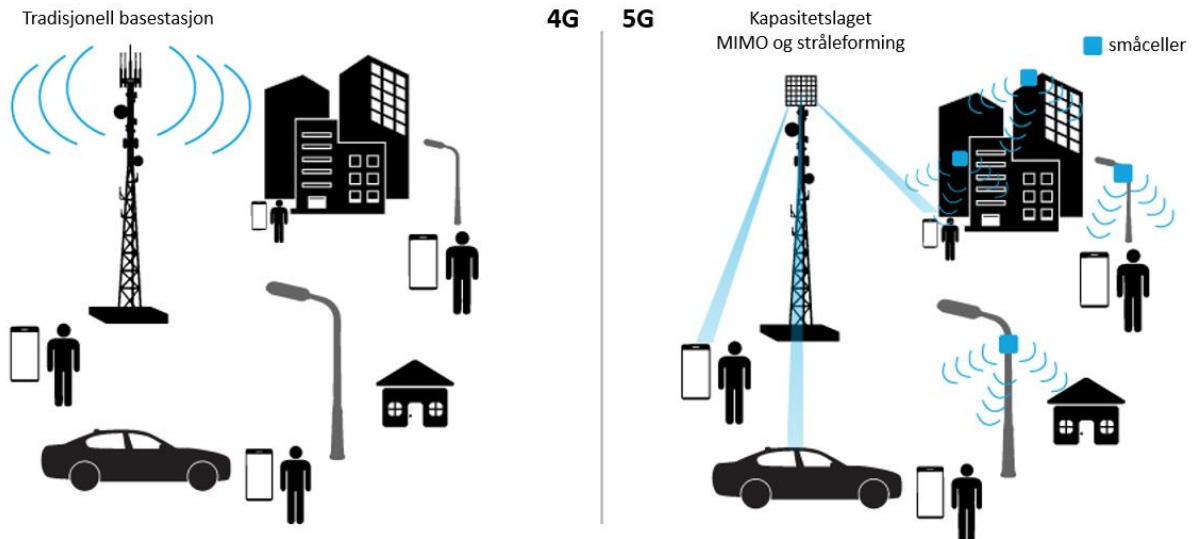


Figur 5 5G bruker ulike frekvensbånd for ulike behov. Høy ytelse krever høye frekvenser som må rekke kort ut fra basestasjonen. Det er derfor behov for svært mange basestasjoner. Basestasjoner med millimeterbølger kan nå noen hundre meter utendørs mens frekvenser som brukes i «dekningslaget» kan nå mange kilometer.

De ulike frekvensbåndene som brukes til 5G er altså delt opp i ulike bruksområder utfra hva de egner seg til. Når teleselskapene bygger ut «5G» i et område, bygger de først ut dekningslaget. (Kanskje blir det med det i et område der det er liten etterspørsel eller spredt bebyggelse.) Deretter kommer kapasitetslaget. Områder med småceller med 26 GHz eller 60 GHz er fortsatt ikke bygget ut i Norge. (Men 60GHz-området er frigitt og lisensfritt, så hvem som helst kan kjøpe utstyr og sette opp sendere og private nettverk som bruker denne frekvensen.)

Slike høye frekvenser som småceller skal bruke, er ikke i stand til å nå gjennom bygninger eller andre fysiske hindringer. De rekker derfor ikke langt. De rekker heller ikke langt av en annen grunn: Frekvensene småcellene skal bruke, 26 GHz og 60 GHz, er frekvenser som gir resonans i henholdsvis vannmolekyler og oksygenmolekyler. Det betyr at disse molekylene endrer seg når de treffes av slike stråler. Dermed absorberes energien i strålen og den stoppes.

For kommunikasjonsarkitektene som utformer nettverkene er den korte rekkevidden i mange sammenhenger en stor fordel, spesielt i tettbygde områder med stort kommunikasjonsbehov: Det er begrenset hvor mange enheter som kan betjenes innen én celle, uavhengig av om cellen når kort eller langt. Har man derfor tett med celler som når kort, kan man dele opp området i mange celler, og man kan gjenbruke de samme frekvensene uten at cellene forstyrrer hverandre.



Figur 6 Forskjellen på 4G og 5G. Kapasitetslaget leveres med MIMO og stråleforming fra en stor basestasjon. Vi ser også småceller som dekker små, avgrensede områder og kan f.eks. være plassert i lyktestolper. Disse bruker også stråleforming/MIMO teknologi. Illustrasjon hentet fra reklamemateriale fra teknologileverandøren Qorvo.

Status i dag

Det er vanskelig å få vite hvilke teknologier under navnet «5G» som er tatt i bruk ulike steder i Norge per dato. Teleselskapenes dekningskart viser ikke hvilke av de ulike teknologiene som er tatt i bruk.

I grisgrendte strøk kan vi regne med at bare dekningslaget er bygget ut, mens kapasitetslaget er bygget ut der det er 5G i mer tettbygde strøk. Høyttelseslaget er knapt bygget ut noen steder. Det skal visst være bygget ut en del småceller i Trondheim, Stavanger, Bergen, men dette har vi ikke nærmere informasjon om. Med utbygging av f.eks. gatebelysning med små sendere kan det dannes småceller. Slik gatebelysning bygges ut i flere områder i landet.

Det er direktoratet NKOM, Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (nkom.no), som styrer tildelingen av lisenser for de ulike frekvensene.

Grenseverdier for 5G: Umulig å vurdere om de brytes

Stiftelsen ICNIRP kom med nye retningslinjer og anbefalinger for hvordan man skal fastsette grenseverdier for elektromagnetisk stråling fra trådløs kommunikasjon i 2020 (ICNIRP 2020). Her er grenseverdier gjort slakkere enn tidligere for å gi rom for vesentlig høyere korttidseksposering fra 5G-teknologier. Uten at grenseverdiene ble gjort slakkere, ville det ikke vært mulig å bygge ut 5G-nettverk (Tørnevik 2017) andre steder enn langt fra folk og i land der man bruker ICNIRPs verdier for å hindre oppvarmingskader direkte som grenseverdier. (Flere land har lavere grenser eller tilleggsrestriksjoner, f.eks. forbud i barnehager mot WiFi, noe som i realiteten betyr en erkjennelse av at det trengs grenseverdier som ikke bare skal beskytte mot det ICNIRPs retningslinjer tar høyde for.)

Selv etter oppdateringen som ble gjort i 2020, spesifiserer retningslinjene fra ICNIRP kun målbare grenseverdier for sendere enkeltvis, og ikke en i praksis målbar grenseverdi for den samlede belastningen man opplever i dagens miljøer med mange sendere som sender samtidig. I tillegg vurderes kun skader som kan oppstå innen kort tid, maksimalt etter 30 minutters eksponering. Disse forskriftene adresserer derfor ikke dagens situasjon: Alle er normalt utsatt for en rekke sendere som driver trådløs kommunikasjon (Figur 7 – og figur 8 og 9):

Trådløse kommunikasjonsenheter:



Figur 7: I det daglige omgås vi mange enheter som kommuniserer trådløst.

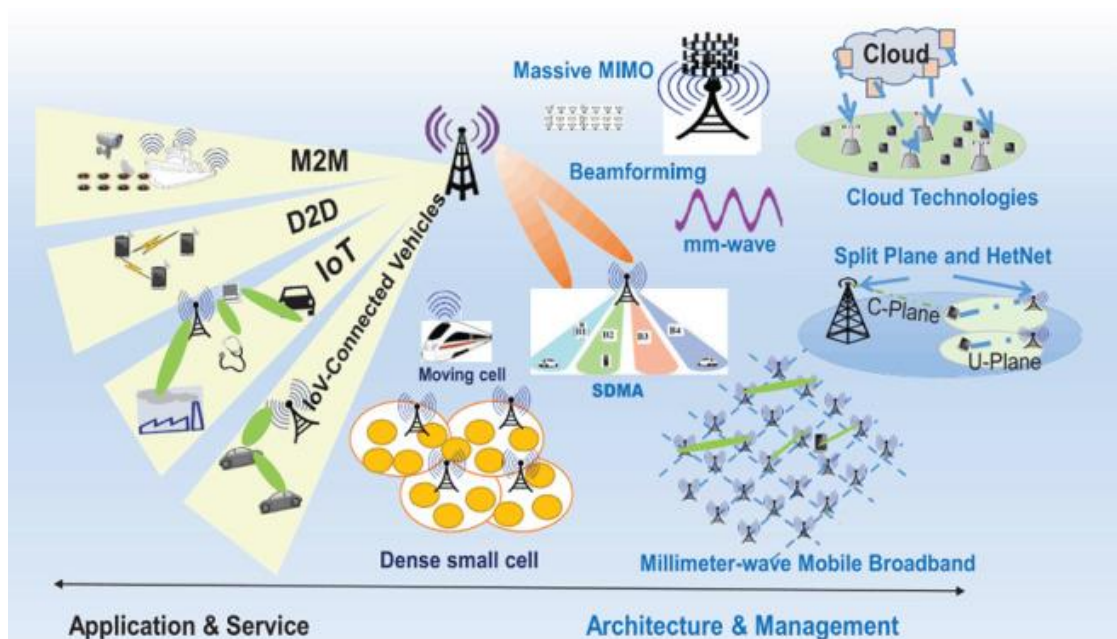
De fleste mennesker oppholder seg 24/7/365 i et miljø som i en «5G-verden» skal ha hundrevis av samtidige sendere, f.eks. i et «smarthjem», i et åpent kontorlandskap eller i en selvkjørende buss. En enkel opptelling viser at om hver person har en smartklokke med WiFi, 4G, Bluetooth, en PC med WiFi, Bluetooth, trådløs mus og tastatur, trådløse høretelefoner og kamera og en mobiltelefon med WiFi, GSM, 4G, 5G og Bluetooth, er man allerede oppe i 14 enheter per person.

Den delen av ICNIRPs 2020-retningslinjer som omhandler stråling fra flere kilder, baserer seg på at det er mulig å gjøre en beregning av hvor mye energi fra strålingen en person utsettes for de ulike kommunikasjonsenhetene i miljøet. Dette kan passe for dagens basestasjoner før 5G: De skaper en forholdsvis jevn «tåke» av et elektromagnetisk felt i forhold til hva som er tilfelle ved fullt utbygd 5G. En slik jevn tåke gir en ganske forutsigbar stråledose for de som oppholder seg i området. Dermed kan det beregnes med en viss troverdighet hvor stor stråledose en person blir eksponert for i et miljø med flere basestasjoner, og derfra hva som bør være maksimal eksponering. I slike beregninger antas det også gjerne at det fins én dominerende enhet man kan ta utgangspunkt i, som f.eks. en mobiltelefon *eller* en PC med WiFi, fordi denne enheten typisk kan stråle mer enn grenseverdiene. Man ignorerer da den totale belastningen med den begrunnelsen at hver enkelt av de andre enhetene stråler langt svakere enn grenseverdien.

Med stråleforming og MU-MIMO vil strålene skifte retning ettersom mobiltelefonen, bilen eller hva det er som kommuniser, flytter seg. Dette gir svært kompliserte eksponeringsbilder, fremfor alt på grunn av den kontinuerlige endringen i mengden stråling som kommer fra stråleformings-/MIMO-enheter som passerer hverandre. Eksponeringen vil også variere med refleksjoner fra vegger, tak og gulv eller annet i omgivelsene. Det blir dermed umulig å forutse hvor de rettede stråler treffer og f.eks. om og hvor og hvor lenge to eller flere stråler krysser hverandre slik at det blir «varme flekker» i krysningspunktet som samlet sett kan overskride grenseverdiene.



Figur 8 Visjonen om alt vi kan ha koblet til 5G-nettet og styre trådløst. Figur fra <https://www.cablelabs.com/blog/how-innovation-boot-camp-launched-the-idea-for-arc-hotspot>



Figur 9: Visjon om hvordan millimeter-frekvenser (mm-wave), MU-MIMO og stråleforming (Beamforming) kan gi store kapasitetsøkninger og muligheter for en rekke nye tjenester (til venstre i bildet). Fra (Yang, 2022).

En beregning av maksimal stråledose i et slikt miljø, kan ikke gi noe realistisk bilde av hva en tilfeldig person vil kunne bli eksponert for på et tilfeldig sted i et område hvor det benyttes stråleforming og MU-MIMO-teknologi.

Både blant forskere i akademia, innen telekomindustrien og hos reguleringsmyndigheter er det erkjent at dette problemet ikke er løst (se f.eks. Adda et.al. 2020).

Mange uavhengige forskere har gjentatte ganger pekt på at eksponeringsgrenser for 5G fastsettes på svært sviktende grunnlag og at det ikke fins metoder for å fastslå om de overholdes i et miljø der 5G er fullt bygget ut (Lin 2023, Blackman and Forge, 2019). Utsiktene til at dette skal kunne løses later til å være små.

Høykapasitets 5G: Lite kunnskap om helsevirkninger

ICBE-EMF, en nyetablert organisasjon av forskere med ambisjoner om å ta opp konkurransen med ICNIRP, har pekt på at ICNIRPs anbefalte eksponeringsgrenser baserer seg på en tradisjonell dose-respons-modell der det er mulig å knytte de vesentlige skadevirkningene fra overeksponering til en terskel for energiintensitet (ICBE-EMF 2022). ICBE-EMF peker på at dette ikke lar seg gjøre: Det er andre sider ved eksponeringen, så som innslaget av lavfrekvente pulser og deres relative variasjon og styrke som synes å stå for de viktigste helsevirkningene – både akutt og over tid. Disse er overhodet ikke hensyntatt i vurderingene av 5G og virkninger på mennesker og miljø. Det finnes en rettskraftig dom i USA som påpeker denne svakheten: at man ser kun på energiintensiteten og oppvarmingsfaren som utslagsgivende for vurderingen av helseskader (EHT vs. FCC 2021).

En viktig bekymring er også at det finnes svært lite relevant forskning på biologiske virkninger av millimeterbølget stråling (se f.eks. to større utredninger gjort for EU-parlamentet STOA 2021a og b). Dette er spesielt viktig for de to frekvensene som er tenkt brukt i Norge, 26 GHz og 60 GHz, siden disse påvirker hhv. vannmolekyler og oksygen, to særdeles viktige molekyler for alt liv.

Konklusjon

Konklusjonen er derfor at 5G består av en rekke ulike teknologier som til sammen bygger opp telekomindustriens visjon. Ikke alle delene av 5G vil bli tilgjengelig over alt. Høyteles 5G vil først og fremst bli plassert ut i områder med svært store kapasitetsbehov.

De delene av 5G som alt er eller vil bli plassert ut de fleste steder, vil være av omtrent samme type som tidligere teknologier og er godt utredet for helsevirkninger. For de mest banebrytende 5G-teknologiene, som er de som må til for å levere den lovede høye kapasiteten, er det ikke mulig å beregne om de samlet sett holder seg under grenseverdiene. Denne teknologien er heller ikke utredet for mulige biologiske virkninger. Det er derfor verken mulig å vurdere om grenseverdier overskrides eller om grenseverdiene er tilstrekkelige til å unngå helse- og miljøskader. Ingen kjenner derfor til på et vitenskapelig grunnlag de helse- og miljømessige konsekvensene som kommer i tillegg når man tar i bruk disse delene av 5G-teknologien.

Forfatterne

Else Nordhagen, PhD (informatikk), er fhv. forsker, seriegründer og IKT-utvikler med omfattende bakgrunn innen IKT, bl.a. fra Telenors forskningsenhet.

Einar Flydal, cand. polit. og MTS (Master of Telecom Strategy & Tech. Management), er fhv. forsker og strategirådgiver med bakgrunn fra bl.a. Telenors forskningsenhet og strategiledelse, og fra NTNU.

De skriver begge om tema knyttet til IKT, helse og miljø.

Denne artikkelen er utarbeidet uten noen form for støtte, oppdrag eller bindinger. Den ble publisert først den 24.04.2023 på <http://einarflydal.com> og kan lastes ned herfra: https://einarflydal.com/?sdm_process_download=1&download_id=77920.

Artikkelen kan re-publiseres fritt.

Referanser

Adda, Sara & Aureli, Tommaso & D'elia, Stefano & Franci, Daniele & Grillo, Enrico & Migliore, Marco & Pavoncello, Settimio & Schettino, Fulvio & Suman, Riccardo. (2020). A Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2998448.

Blackman C, Forge S. 5G Deployment: State of play in Europe, USA and Asia. In depth analysis requested by the ITRE committee. Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, Directorate General for Internal Policies. 2019; PE 631.060.

David T, Viswanath P. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press. 2005; Cambridge, UK.

EHT vs. FCC 2021, D.C. Circuit decision - Environmental Health Trust, et al. v. FCC & USA, No. 20-1025, <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-374936A1.pdf>

ICBE-EMF 2022: International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields (ICBE-EMF). Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G. *Environ Health* **21**, 92 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>

Lin, James C. Incongruities in recently revised radiofrequency exposure guidelines and standards, *Environmental Research*, Volume 222, 2023, 115369, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115369>.

STOA 2021a: Health impact of 5G – Current state of knowledge of 5G-related carcinogenic and reproductive/developmental hazards as they emerge from epidemiological studies and in vivo experimental studies, European Parliamentary Research Service, Scientific Foresight Unit (STOA), PE 690.012 – July 2021, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690012/EPRS_STU\(2021\)690012_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690012/EPRS_STU(2021)690012_EN.pdf)

STOA 2021b: Environmental impact of 5G. A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants, European Parliamentary Research Service, Scientific Foresight Unit (STOA), PE 690.021 – June 2021,

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690021/EPRS_STU\(2021\)690021_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690021/EPRS_STU(2021)690021_EN.pdf)

Törnevik, Christer: Impact of EMF limits on 5G network roll-out, ITU Workshop on 5G, EMF & Health, Warsaw, December 5 2017, https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/20171205/Documents/S3_Christer_Tornevik.pdf

Chen Yang, Peng Liang, Liming Fu, Guorui Cui, Fei Huang, Feng Teng, Yawar Abbas Bangash, Using 5G in smart cities: A systematic mapping study, Intelligent Systems with Applications, Volume 14, 2022, 200065, ISSN 2667-3053, <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200065>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305322000060>)