



Erfassung der Immissionen im Umfeld von 5G Massive-MIMO-Basisstationen

Science Brunch 35 – Herausforderungen bei der Erfassung der Exposition gegenüber EMF

02.06.2023

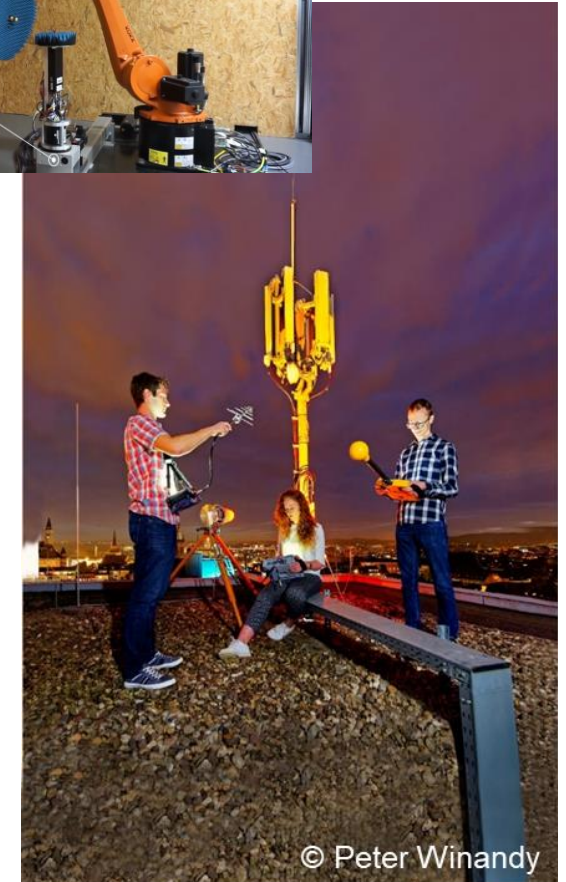
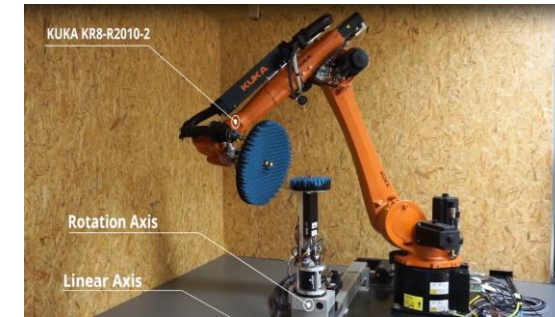
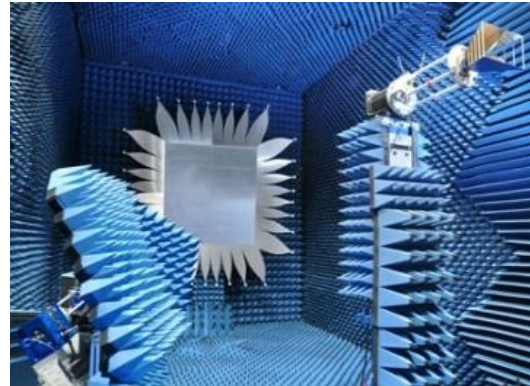
**Institut für Hochfrequenztechnik
RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing Dirk Heberling**





Institut für Hochfrequenztechnik (IHF)

- Forschungsfelder
 - Immissionen des Mobilfunks (EMVU)
 - Antennen- und Radarmesstechnik
 - Antennen- und HF-Schaltungsdesign
- Erfahrungen im Bereich EMVU:
 - Fokus: Mobilfunknetze (2G – 5G)
 - Zusammenarbeit mit Dr. Christian Bornkessel (TU Ilmenau) und Prof. Matthias Wuschek (TH Deggendorf, EM-Institut)
 - Seit 2014 Durchführung von Projekten und Forschungsvorhaben zu aktuellen Mobilfunkthemen
 - Mobilfunknetzbetreiber
 - Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
 - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) NRW
 - Uniklinikum Düsseldorf



© Peter Winandy



Studium:

- 1981 – 1987 Studium der Elektrotechnik, RWTH Aachen
- 1987 – 1993 Promotion mit Auszeichnung, RWTH Aachen

Beruflicher Werdegang:

- 1987 – 1993 Wissenschaftlicher Angestellter am IHF, RWTH Aachen
- 1993 – 2008 Gruppenleiter bzw. Abteilungsleiter IMST GmbH, Kamp-Lintfort
- 2008 – jetzt Lehrstuhlinhaber und Leiter des IHF, RWTH Aachen
- 2016 – jetzt Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Hochfrequenzphysik und Radartechnik

Gremien und Ämter (Auszug):

- Seit 1998 Mitglied des ITG-Fachausschuss 7.1 “Antennen”
- Seit 1998 Mitwirkender der europäischen Antennen-Kompetenzprojekte COST 260, COST 284, IC0603 und IC1102
- 2003 Organisator der internationalen Antennenkonferenz INICA 2003, Berlin
- Seit 2008 Mitglied des Steering Committees der European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)
- 2014 General Chair und Organisator der German Microwave Conference GeMiC 2014, Aachen
- Seit 2016 Mitglied des Board of Directors der Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)
- Seit 2016 Fachkollegiat DFG Nachrichten- und Hochfrequenztechnik, Kommunikationstechnik und –netze, Theoretische Elektrotechnik



Prof. Dr.-Ing Dirk Heberling

Gliederung

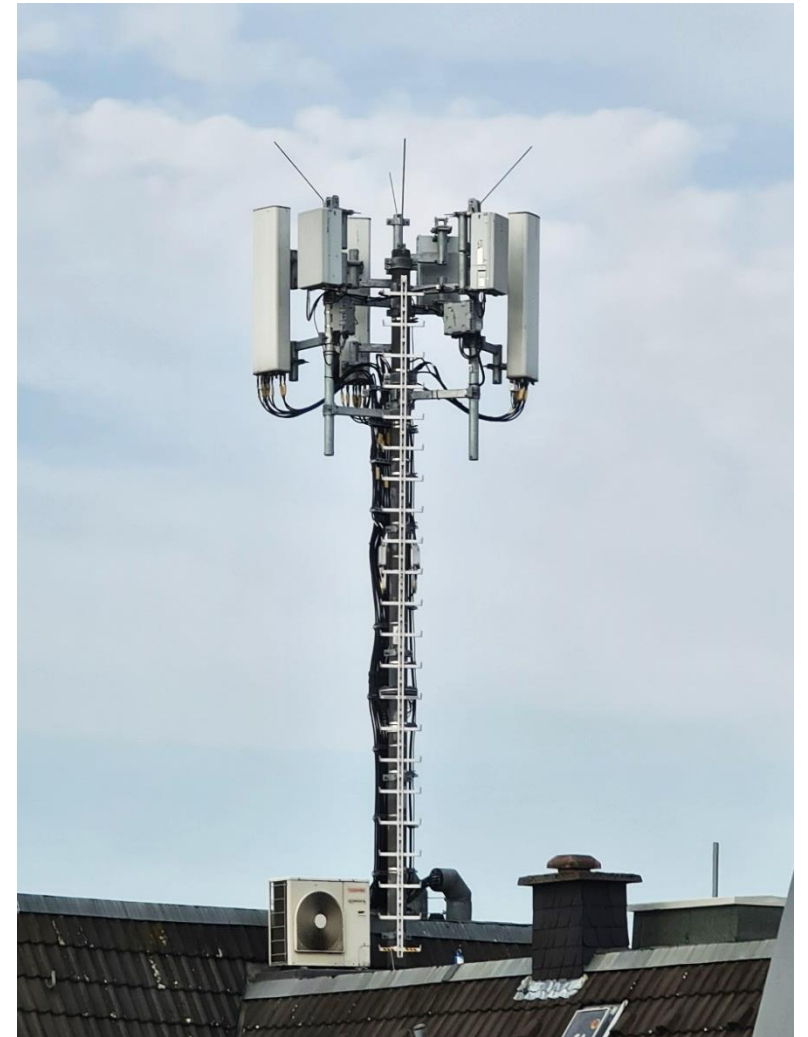
- Grundlagen zu 5G aus der Sicht der Immissionssmessung
 - Frequenzen, Bandbreiten und Numerologie
 - Unterschiede zu LTE
 - Massive-MIMO-Antennen
- Abschätzung der theoretisch maximalen Immission
 - Grundlegende Fragen zur Bewertung der Worst-Case-Immission
 - Frequenz- vs. codeselektive Messungen
 - Extrapolation auf die theoretisch maximale Immission und Validierung



- **Grundlagen zu 5G aus der Sicht der Immissionssmessung**
 - Frequenzen, Bandbreiten und Numerologie
 - Unterschiede zu LTE
 - Massive-MIMO-Antennen
- Abschätzung der theoretisch maximalen Immission
 - Grundlegende Fragen zur Bewertung der Worst-Case-Immission
 - Frequenz- vs. codeselektive Messungen
 - Extrapolation auf die theoretisch maximale Immission und Validierung

Frequenzbereiche und Kanal-/ Signalbandbreiten nach 3GPP

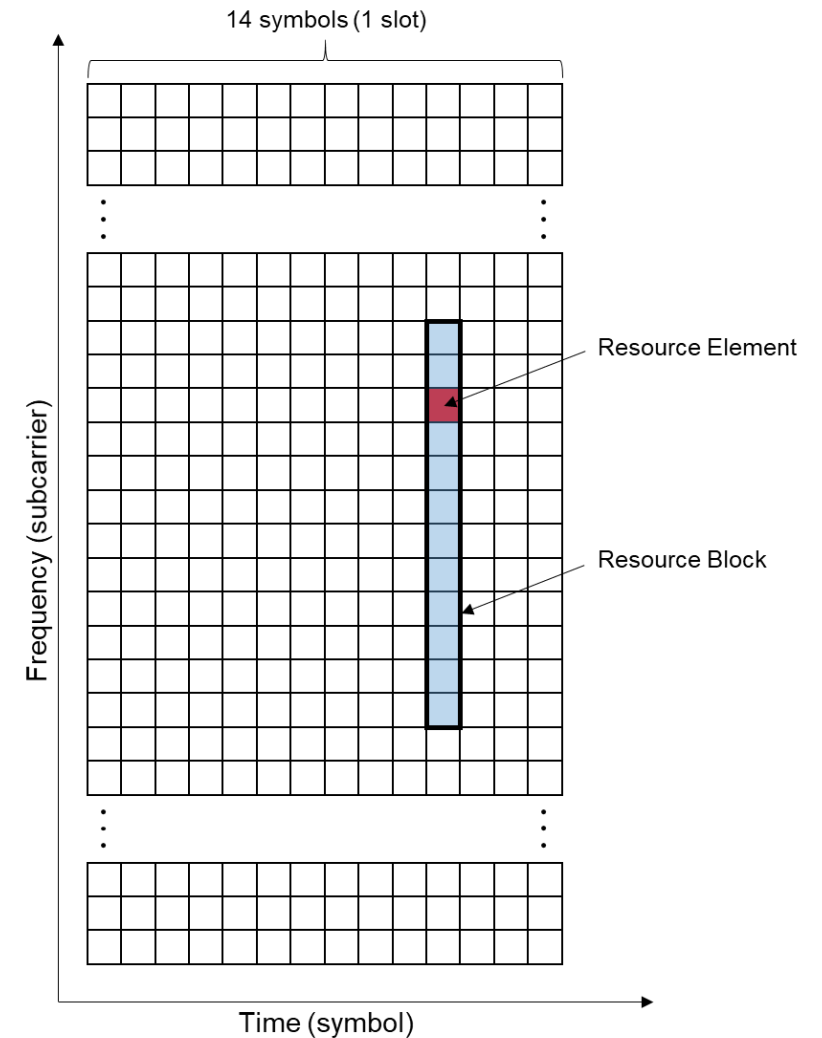
- Frequency Range 1 (FR1): 450 MHz – 7.125 MHz
 - “Sub 6 GHz Band”
 - Insgesamt 32 spezifizierte Frequenzbänder
 - Kanalbandbreiten zwischen 5 MHz und 100 MHz
- *Frequency Range 2 (FR2): 24.250 MHz – 52.600 MHz*
 - „mm-Wellen“
 - Insgesamt 5 Frequenzbänder sind spezifiziert
 - Kanalbandbreiten zwischen 50 MHz und 400 MHz





Resource Grid

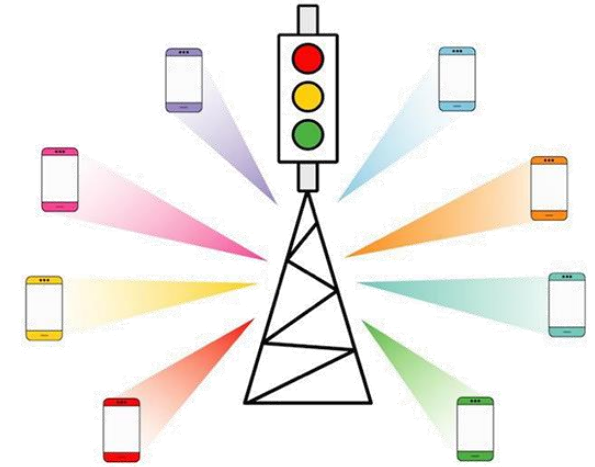
- 5G basiert wie LTE auf OFDMA
- Resource Grid im Frequenz-Zeit-Bereich
- Diskretisierung:
 - Frequenzbereich: Träger (Subcarrier)
 - Zeitbereich: Symbol
- Die kleinste Einheit im Frequenz-Zeit-Bereich ist ein Resource Element (RE)
- Die kleinste zuteilbare Einheit ist ein Resource Block (RB)
 - 1 Symbol (im Gegensatz zu LTE)
 - 12 Träger





Unterschiede zu LTE

- Ähnliche Wellenform, aber flexible Frame-Struktur
 - Bislang: Trägerabstände (Subcarrier Spacing/SCS) von 15 kHz (DSS) und 30 kHz (3,6 GHz) → LTE: 15 kHz
 - Bei SCS = 30 kHz ist die Symboldauer verglichen mit LTE nur halb so lang (35,7 μ s)
- Höhere Kanalbandbreiten möglich
- In Band n78 (3,6-GHz-Band), ist die Nutzung von TDD vorgeschrieben
 - Anteile von Uplink und Downlink können von Slot zu Slot flexibel angepasst werden (theoretisch)
 - Praxis: TDD-Periodizität von 5 Slots mit einer festen Belegung für Uplink und Downlink
- Möglichkeit zur Nutzung von Beamforming (Massive-MIMO-Antennen)
 - Die Abstrahlung von Signalisierung und Verkehr erfolgt durch unterschiedliche Beams (Broadcast und Traffic Beams)
 - Begrenzung der abgestrahlten Leistung in Zellbereiche, wo Versorgung benötigt wird



Quelle: spectrum.ieee.org



In Deutschland aktuell betriebene 5G-Frequenzbänder

Band	Frequenzbereich (bei FDD Downlink)	Duplex- Verfahren	5G oder 4G/5G (DSS)	Antennentyp
n28	758 - 788 MHz	FDD	5G (TEF) 4G/5G (DT, VF)	passiv
n3	1,805 - 1,88 GHz	FDD	4G/5G (TEF, VF)	passiv
n1	2,11 - 2,17 GHz	FDD	4G/5G (DT)	passiv
n78	3,4 - 3,7 GHz	TDD	5G (DT, TEF, VF)	aktiv

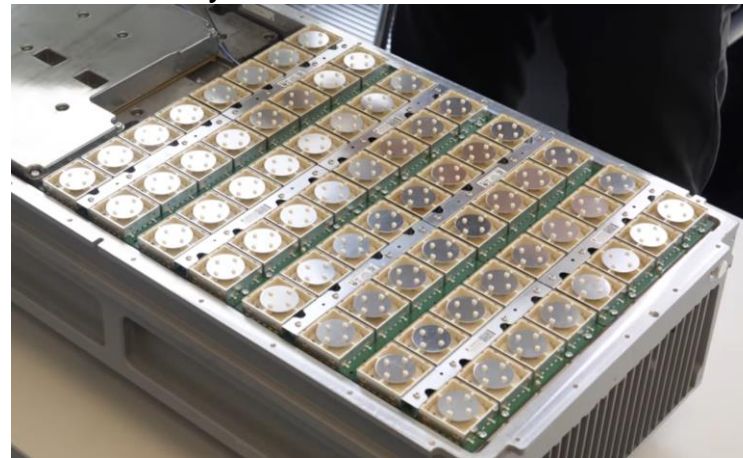
- Dynamic Shared Spectrum (DSS): parallele Nutzung von 4G und 5G im gleichen Frequenzband
→ Verfügbare Bandbreite wird dynamisch zwischen 4G und 5G aufgeteilt
- Flächenmäßig ist DSS (4G/5G) am besten ausgebaut, da bestehende Anlagen verwendet werden



Beamforming

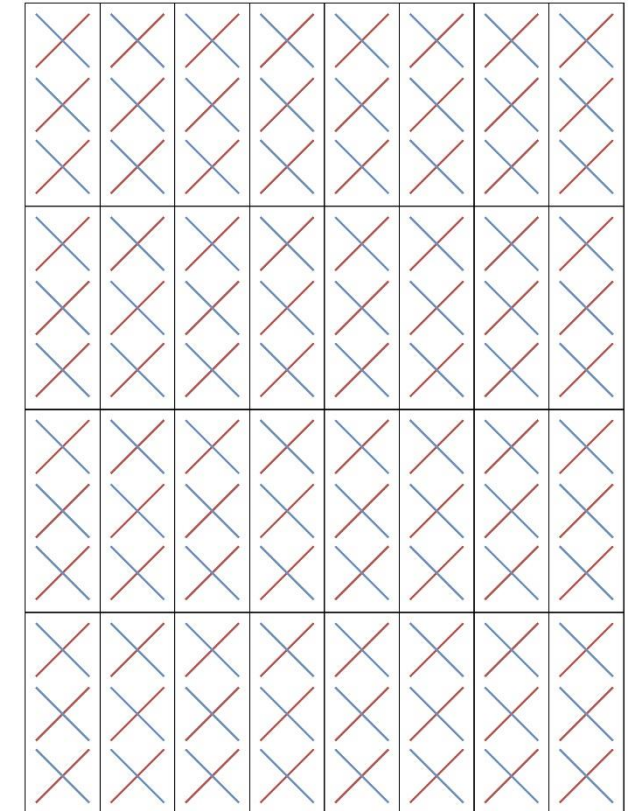
- Massive-MIMO-Antennen sind planare Antennen-Arrays (MIMO = Multiple Input Multiple Output)
- Hohe Anzahl von Antennenelementen führt zu einem hohen Gewinn
- Beams können horizontal und vertikal ausgerichtet werden:
 - Codebook-basiertes Beamforming: Diskrete Beam-Ausrichtungen
 - Reziprozitätsbasiertes Beamforming: Optimales Abstrahlverhalten, um den Übertragungskanal maximal auszunutzen
- Es ist möglich mehrere Beams gleichzeitig abzustrahlen (allerdings jeweils mit reduzierter EIRP)

Array aus 8x8x2 Elementen



Quelle: youtube/Telekom Netz

Beispiel einer 64 TRx (4x8x2) Antenne





- Grundlagen zu 5G aus der Sicht der Immissionssmessung
 - Frequenzen, Bandbreiten und Numerologie
 - Unterschiede zu LTE
 - Massive-MIMO-Antennen
- **Abschätzung der theoretisch maximalen Immission**
 - Grundlegende Fragen zur Bewertung der Worst-Case-Immission
 - Frequenz- vs. codeselektive Messungen
 - Extrapolation auf die theoretisch maximale Immission und Validierung



„Worst-Case“ Immission

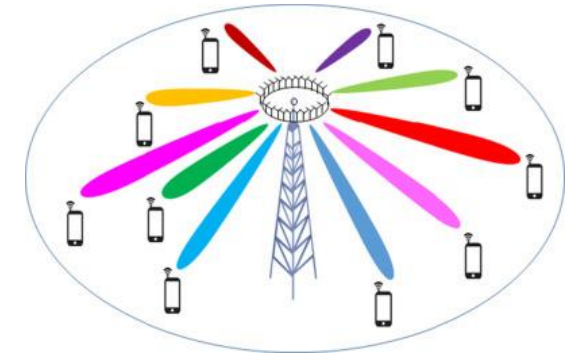
- Immission einer Anlage bei höchster betrieblicher Auslastung
- Üblicherweise kann die Anlage nicht künstlich in den Zustand maximaler Anlagenauslastung versetzt werden
 - Entwicklung geeigneter Mess- und Hochrechnungsverfahren
 - Idealerweise ohne Eingriff in den regulären Wirkbetrieb
- Grundsätzlicher Ansatz für die Hochrechnung auf Maximalimmission:
 1. Messung der Immission eines verkehrslastunabhängigen Signals E_{signal}
 2. Hochrechnung auf Maximalimmission E_{max} mit dem Faktor $\sqrt{\frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{signal}}}}$



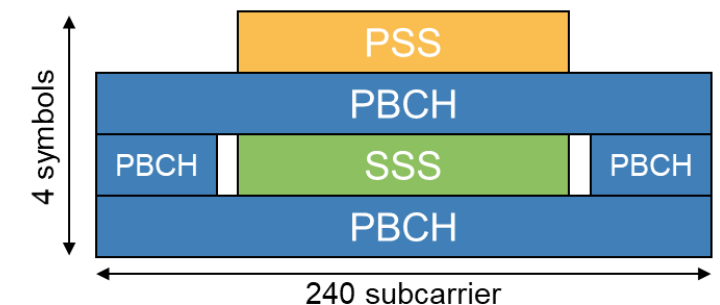


Grundlegende Fragen zur Bewertung der Worst-Case-Immission bei 5G

- Welche Beam-Konfiguration erzeugt die höchste Immission an einem bestimmten Messpunkt?
- Wie geht man mit nicht-stationären Beams und der Trennung von Broadcast- und Traffic-Beam um?
- Welche verkehrslastunabhängigen Signale sind für die Extrapolation der Immission der Basisstation auf ihr theoretisches Maximum verfügbar?



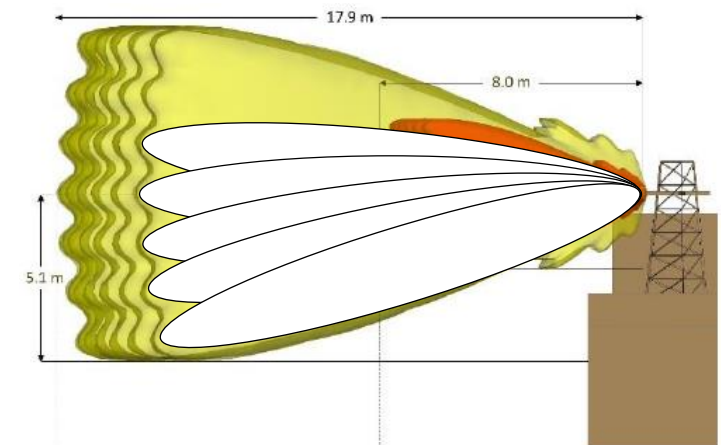
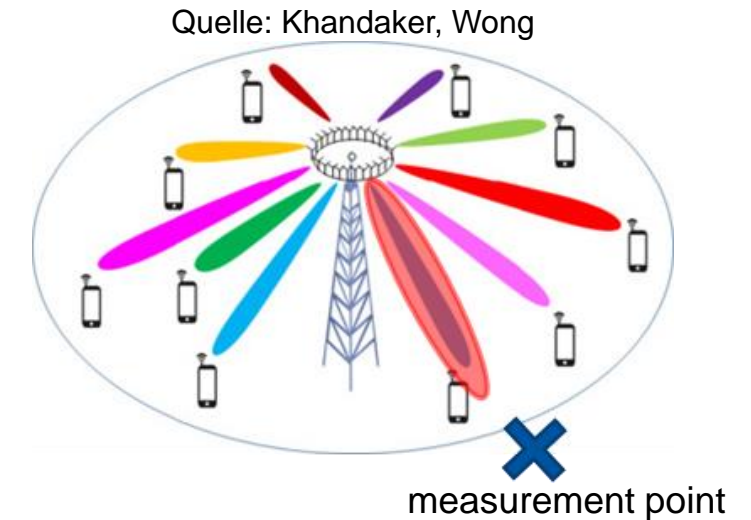
Quelle: Khandaker, Wong





Worst-Case Beam Configuration

- Die ungünstigste Strahlkonfiguration ist
 - ein einzelner Beam
 - mit maximalem Antennengewinn
 - der mit der maximal möglichen Sendeleistung ausgesendet wird
- und den Messpunkt über einen LOS-Pfad erreicht
- Auswirkungen auf Standortzertifikatsanwendungen: Die Hüllkurve über alle möglichen Strahlkonfigurationen muss berücksichtigt werden

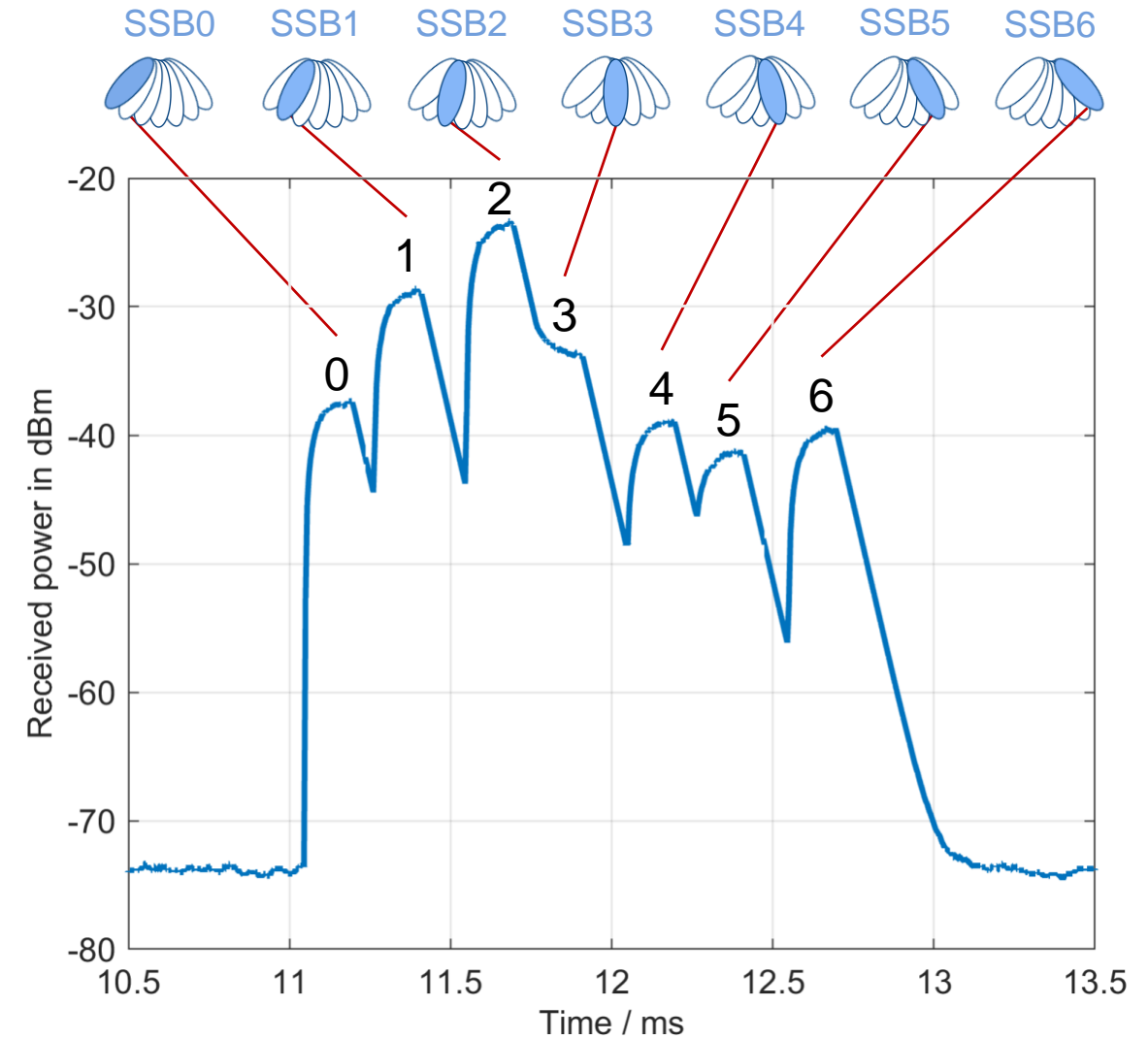


Quelle: Ericsson



Broadcast und Traffic Beams

- Unterschiedliche Richtcharakteristika für Signalisierung und Verkehr
 - Signalisierung: Broadcast Beams (SSB Beams)
 - Verkehr: Traffic Beams
- Broadcast Beams:
 - Ausgesendetes Signal: SS/PBCH Block (SSB)
 - Jeder SSB in einem Burst Set korrespondiert mit einer Beam-Ausrichtung
 - Max. Anzahl von Beams: 8 (FR1) bzw. 64 (FR2)
- Traffic Beams:
 - Ausgesendetes Signal: PDSCH (unter anderem)
 - Abstrahlung mithilfe von Codebook- oder reziprozitätsbasiertem Beamforming





Trennung von Broadcast- und Traffic-Beam (horizontaler Schnitt)



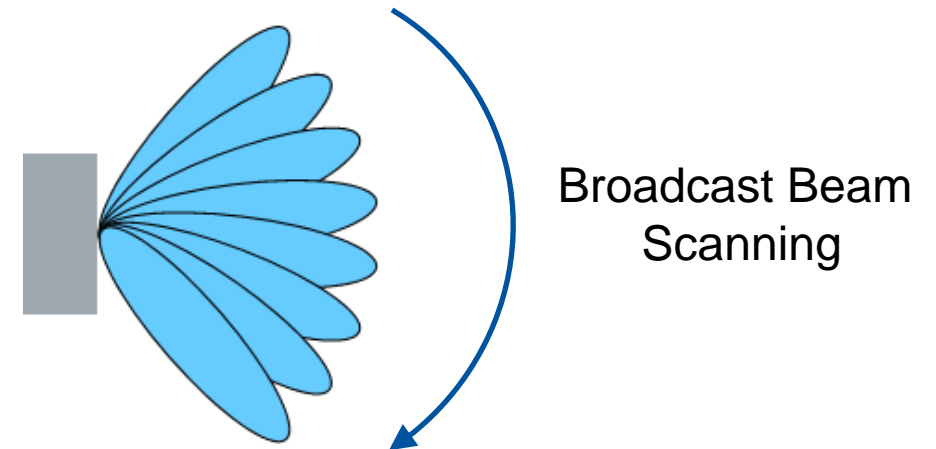
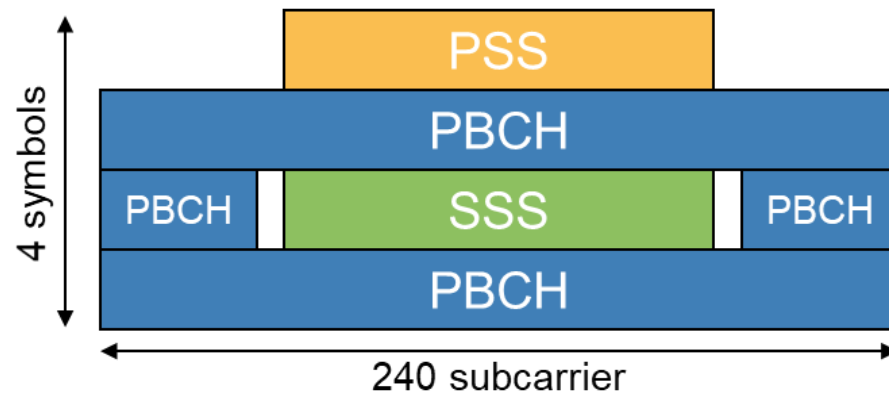
Idee: Messung der Immission von lastunabhängigen Signalen in **Broadcast Beams** und Extrapolation zu **Traffic Beams**

from: C. Bornkessel, T. Kopacz, S. Schießl, D. Heberling and M. Hein, "Challenges to Assess Human Exposure to 5G Massive MIMO Base Stations", BioEM 2019.



Verkehrslastunabhängiges Signal: SS/PBCH Block (SSB)

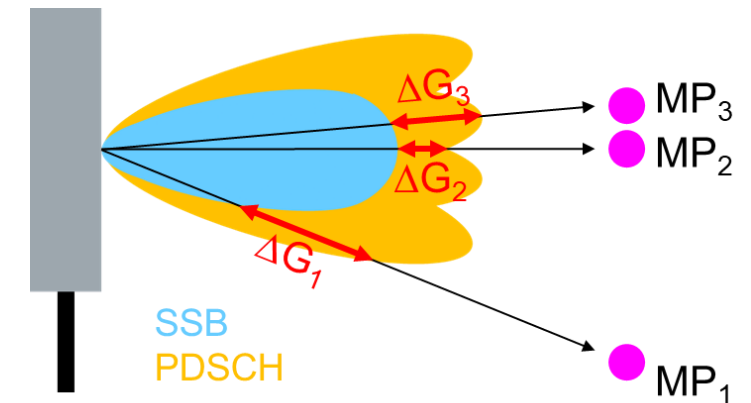
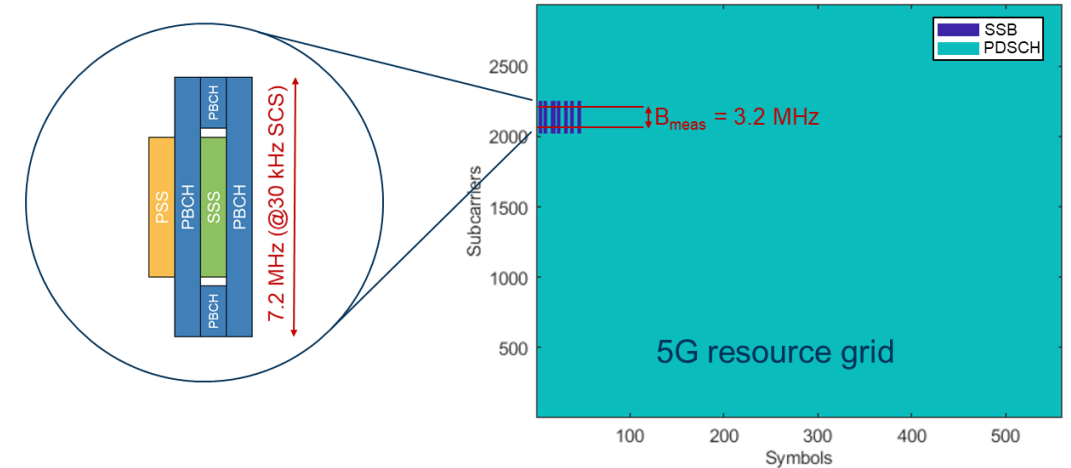
- In 5G gibt es kein zellspezifisches Referenzsignal mehr
- Der verkehrslastunabhängige SSB eignet sich als Signal für ein Messverfahren zur Hochrechnung
 - Bandbreite von max. 240 Trägern und Dauer von vier Symbolen
 - Wird üblicherweise mit einer Periodizität von 20 ms ausgesendet
 - Abstrahlung über einen oder mehrere Broadcast Beams
- Frequenz- oder codeselektive Erfassung der Immission des SSBs





Hochrechnungsverfahren

- Ziel: Entwicklung eines Verfahrens ohne Eingriff in den gewöhnlichen Wirkbetrieb der Basisstationen (d.h. ohne Unterstützung des jeweiligen Netzbetreibers bzw. Systemtechnikherstellers)
- Abbildung des Worst-Case:
 - Maximale Sendeleistung (alle Resource Blocks)
 - Maximal möglicher Antennengewinn aus Sicht des Messpunktes
- Zu berücksichtigende Faktoren:
 - Spektrale Hochrechnung auf Volllastung (K_B)
 - Berücksichtigung des Downlink Duty Cycles (K_{TDD})
 - Nur für Beamforming-Antennen: zusätzlich Berücksichtigung der unterschiedlichen Abstrahlcharakteristika von Traffic- und Broadcast-Beams durch messpunktabhängigem Korrekturfaktor ($K_{Ant(\varphi,\theta)}$)

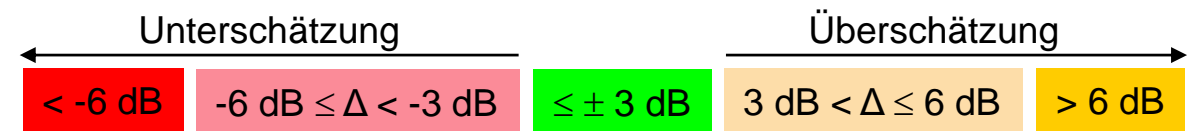
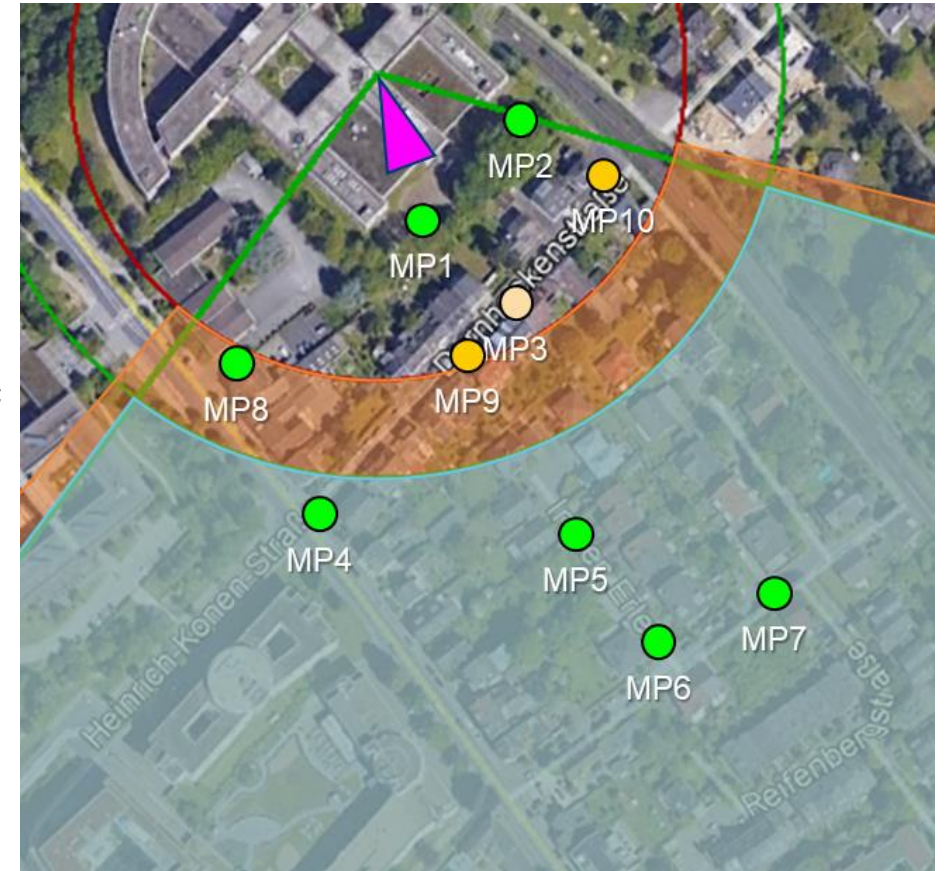




Validierung

- Messtechnische Ermittlung einer Referenz für die Maximalimmission
 - Provozierung der Ausrichtung eines Traffic Beams auf den Messpunkt durch aktives 5G-fähiges Endgerät am Messpunkt
 - Erzeugung des Worst-Case aus Immissionssicht (vollausgelasteter Traffic Beam) durch FTP-Download
- Ergebnisse
 - An den meisten Messpunkten hohe Übereinstimmung zwischen Hochrechnung und Referenzwert
 - Zellmitte
 - Sichtverbindung zur 5G-Antenne
 - Tendenziell Überschätzung der Immission am Zellrand und ohne Sichtverbindung zur Basisstationsantenne

Beispiel einer Validierungsmessung





Fazit: Anwendbarkeit des messpunktspezifischen Hochrechnungsverfahrens

- Neben den konventionellen Anlagendaten (Höhe, elektrischer und mechanischer Downtilt, Bandbreite, ...), müssen bei Massive-MIMO auch die Antennendaten zur Verfügung stehen
 - Antennendiagramme von Broadcast und Traffic Beams für verwendete Frequenz, ggf. eingestellten elektrischen Tilt
 - Trotzdem ist eine Diskrepanz zwischen bereitgestelltem und tatsächlich vorliegendem Abstrahlverhalten nicht vermeidbar
- Für den messpunktspezifischen Antennengewinnunterschied müssen der relative Azimut- und Elevationswinkel zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt bekannt sein
 - Bestimmung der Winkel ist nur mit begrenzter Genauigkeit möglich
 - Messpunkte ohne Sichtverbindung zur Basisstationsantenne bzw. Indoor-Messpunkte werden ohnehin nicht unmittelbar von einem Beam versorgt

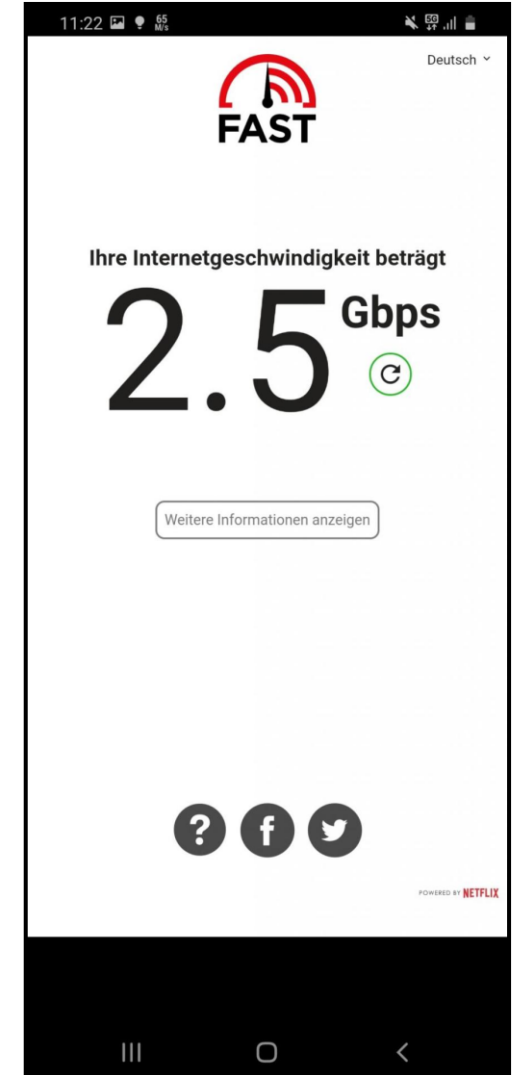


- 1) Datenabfrage wie bei LTE zzgl. der Antennendiagramme
- 2) Erhöhter Aufwand bei der Nachverarbeitung der Messergebnisse



Direkte Bestimmung bei provozierter Vollauslastung durch ein Endgerät

- Messungen zur Validierung des Hochrechnungsverfahrens haben sich bislang als verlässlich erwiesen, um die Maximalimmission direkt zu bestimmen
- Vergleich mit berechneter Immission (Freiraumausbreitung + 3 dB) zeigt eine gute Übereinstimmung für Messpunkte mit Sicht zur 5G-Antenne
- Vorteile:
 - Das Messverfahren ist robust gegenüber einer nicht vollen Belegung aller *Träger im Frequenzbereich* sowie einer nicht vollen Belegung aller *Symbole im Zeitbereich*
 - Zur Bestimmung der Maximalimmission basierend auf der zur Messzeit eingestellten Anlagenkonfiguration werden keine Anlagendaten benötigt
- Nachteile:
 - Das Verfahren greift in den Wirkbetrieb der Basisstation ein
 - Es ist unklar, ob das Messverfahren bei höheren Netzauslastungen weiterhin verlässlich funktionieren wird





Fazit

- Grundsätzliche Vorgehensweise (Messung eines Signalisierungssignals und Hochrechnung auf höchste betriebliche Anlagenauslastung) kann auch bei 5G weiter verfolgt werden
- Als Basis für die Hochrechnung eignet sich der SSB. Die Messung erfolgt
 - frequenzselektiv (Summenimmission aller SSB, Überdeckung durch Traffic möglich, Vorsicht bei Messeinstellungen) oder
 - codeselektiv (sektorspezifisch, verkehrslastunabhängig, keine speziellen Messeinstellungen notwendig)
- Bei der Hochrechnung muss für Beamforming-Antennen zusätzlich der Unterschied zwischen den Antennendiagrammen von Broadcast und Traffic Beams berücksichtigt werden
- Die Maximalimmission lässt sich (derzeit) auch verlässlich durch direkte Messung bei provozierter Vollaustung durch ein Endgerät am Messpunkt bestimmen



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**

heberling@ihf.rwth-aachen.de