



Immissionsmessungen mit Breitbandmessgeräten der baubiologischen Messtechnik

Das 5G-Netz mit erstmalig eingeführten, ungewöhnlichen Systemeigenschaften stellt die Messtechnik vor ganz neue Herausforderungen. Dies gilt sowohl für die „Königsdisziplin“, die Spektrumanalyse, als auch für Breitbandmessungen mit den in der baubiologischen Messtechnik üblichen Geräten.

Zentrale Eigenschaften der 5G NR-Technik mit massive MIMO/aktivem Beamforming (5G fast)

Die Technik von 5G NR (5G New Radio, Radio = Funk) basiert prinzipiell auf der 4. Mobilfunkgeneration LTE bzw. LTE Advanced. Dennoch gibt es etliche gravierende Besonderheiten gegenüber LTE, die ganz neue Herausforderungen für die Messtechnik zur Folge haben:

- Während bei LTE die Kanalbandbreiten einer Basisstation zwischen 5 MHz und maximal 20 MHz liegen, können sie bei 5G NR zurzeit bis zu 100 MHz betragen. In einigen Jahren, wenn 5G NR auch im Frequenzbereich über 24 GHz eingeführt wird, werden dort Bandbreiten bis zu 400 MHz möglich sein.
- Im so genannten Frequenzbereich 3,6 GHz (genau: 3,4 - 3,7 GHz) sind die Kanalbandbreiten pro Provider unterschiedlich: In Deutschland Vodafone und Telekom je 90 MHz, Telefónica 70 MHz und Drillisch 1&1 50 MHz.

- Dabei werden an Mast- und Dachstandorten neuartige „Smarte“ Antennen mit so genanntem „aktivem Beamforming“ bzw. „massive MIMO (mMIMO)“ eingesetzt (MIMO: **M**ultiple **I**nput – **M**ultiple **O**utput). Diese Antennen „leuchten“ einen Raumbereich (Sektor) nicht – wie bei konventionellen Sektorantennen üblich – zeitunabhängig mit der stets gleichen räumlichen Verteilung aus, sondern der Hauptstrahl („Beam“) wird aktuell auf den Nutzer bzw. eine räumlich zusammenhängende Nutzergruppe fokussiert und folgt seiner Bewegung in der Fläche. Befinden sich mehrere räumlich getrennte Nutzer im Sektor, so wird der Beam entsprechend in mehrere Teil-Beams gesplittet (typischerweise maximal bis zu acht). Der Aufbau einer solchen mMIMO-Antenne wird sehr anschaulich in einem Video bei YouTube gezeigt [1].



← Abb. 1: 5G NR-Antenne 3,6 GHz mit mMIMO/Beamforming oben (mit Kreismarkierung); darunter zwei konventionelle Sektorantennen 2G - 4G, die aber auch für 5G verwendet werden können – allerdings ohne Beamforming.

- Die nutzlastunabhängigen Synchronisierungs-Signale (**P**rimary **S**ynchronization **S**ignal PSS und **S**econdary **S**ynchronization **S**ignal SSS) sowie der **P**hysical **B**roadcast **C**hannel PBCH werden gemeinsam in einem so genannten **S**ynchronization **S**ignal **B**lock (SSB) übertragen, der in einem eigenen, nicht so stark fokussierten Beam in mehreren Stufen (im Frequenzbereich 3 GHz bis 8 GHz bis zu acht) gleichmäßig über den Sektorbereich schwenkt. Die SSB-Wiederholfrequenz beträgt dabei 50 Hz.

Der lastabhängige Traffic (Nutzerdaten) wird nach erfolgter Aufsynchronisation des Mobilteils in einem eigenen, wesentlich stärker fokussierten, dynamischen Beam mit hoher Geschwindigkeit in kurzer Zeit übertragen. Ist die aktuelle Datenübertragung beendet, so wird der Traffic Beam auf einen anderen Nutzer gerichtet oder – im Leerlauf der Basisstation, wenn sie ohne Verkehrslast ist – abgeschaltet. Dann ist nur noch der SSB-Beam aktiv; dies stellt den Zustand der Minimal-Immission dar. Die lokale Strahlungsdichte des Traffic Beams hängt u.a. von der Lage des Immissionspunkts in Relation zum Antennenstandort ab und kann im vollen Focus bis zu 10 dB (d.h. Faktor 10 für die Strahlungsdichte) und mehr höher sein als die des SSB-Beams [2].

- Die Bandbreite des SSB ist von der Konfiguration der Basisstation anhängig und folgt der so genannten 5G NR-Numerologie. Typisch sind zurzeit SSB-Bandbreiten von 3,6 MHz bei einem Subcarrier

Spacing (SCS) des OFDM-Multicarrier-Signals von 15 kHz (wie bei LTE, Kanalbandbreiten unter 50 MHz und 7,2 MHz bei einem SCS von 30 kHz (Kanalbandbreiten von 50 MHz bis 100 MHz).

- Die Signalbandbreite unter Nutzlast ist vom Bandbreitenbedarf der aktiven Endgeräte abhängig und kann bis zu 98 % der Kanalbandbreite betragen. Da die Kanalbandbreiten providerabhängig unterschiedlich sind, sind auch die Signalbandbreiten entsprechend unterschiedlich.
- Die maximale Strahlungsdichte bzw. Feldstärke an einem Immissionspunkt wird bei Volllast der Basisstation im Focus des Traffic Beams erreicht. In einem 90 MHz breiten Frequenzkanal beträgt die Signalbandbreite $90 \text{ MHz} \cdot 0,98 = 88,2 \text{ MHz}$. Rechnet man auf Basis der zugehörigen SSB-Bandbreite von 7,2 MHz in einem Zwischenschritt auf die maximale Signalbandbreite hoch, so ergibt sich ein Faktor von $88,2 \text{ MHz} / 7,2 \text{ MHz} = 12,25$ (entsprechend 10,9 dB).
- Nun ist noch zu berücksichtigen, dass der SSB nur über eine Polarisationsrichtung übertragen wird, die Verkehrslast jedoch kreuzpolarisiert in zwei senkrecht aufeinander stehenden Polarisations Ebenen. Mit einer nicht-isotropen Messantenne kann man aber nicht beide Polarisations Ebenen mit ihrem Maximum gleichzeitig empfangen, sondern je nach Antennenausrichtung nur eine. Die gemessene Strahlungsdichte des SSB muss daher verdoppelt bzw. um 3 dB erhöht werden (die isolierte Messung des SSB ist natürlich nur mit einem Spektrumanalysator bzw. einem 5G NR-code-selektiv arbeitenden Analysator möglich, nicht mit einem Breitband-Messgerät, wenn der Auslastungszustand der Basisstation nicht bekannt ist). Der Hochrechnungsfaktor für die maximale Signalbandbreite verdoppelt sich damit auf $2 \cdot 12,25 = 24,5$ bzw. erhöht sich um 3 dB auf $10,9 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 13,9 \text{ dB}$.

Berücksichtigt man nun noch, dass im Focus des Traffic-Beams die Strahlungsdichte bis zu zehnmal so hoch (oder mehr) sein kann wie beim SSB-Beam, so ergibt sich als Faktor zwischen minimaler und maximaler Strahlungsdichte an einem Immissionspunkt ein Wert von $24,5 \cdot 10 = 245$ bzw. $13,9 \text{ dB} + 10 \text{ dB} = 23,9 \text{ dB}$. Bei den Mobilfunkdiensten 2G (GSM) und 4G (LTE) liegt dieser Faktor typischerweise lediglich bei 4.

- Auch in den übrigen, bisher bereits genutzten Mobilfunkbändern unter 3 GHz kommt 5G NR zum Einsatz, auch gemischt mit dem etablierten Mobilfunksystem LTE (DSS Dynamic Spectrum Sharing. In den Bändern unter 3 GHz gibt es dabei kein aktives Beamforming; hier werden die konventionellen LTE-Sektorantennen verwendet.

Konsequenzen für die baubiologische Breitband-Messtechnik

Aus diesen technischen Eigenschaften von 5G NR ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Konsequenzen für die Verwendung von Breitband-Messgeräten der baubiologischen Messtechnik.

- Die weit verbreiteten Breitbandmessgeräte mit einer oberen Grenzfrequenz von 3,0 bis 3,3 GHz reichen für 5G NR nicht mehr aus. Es werden andere Geräte mit höherer Grenzfrequenz (6 GHz oder 10 GHz) benötigt.
- Bei den Geräten des Herstellers Gigahertz Solutions überlappen sich die Frequenzbereiche der Basisgeräte 27 MHz - 3,3 GHz und 2,4 GHz - 6 GHz bzw. 10 GHz im Bereich 2,4 GHz - 3,3 GHz. Um 5G NR im 3,6 GHz-Band sauber von Funkdiensten im Bereich 2,4 - 3,3 GHz unterscheiden zu können (WLAN 2,4 GHz sowie LTE 2,6 GHz), empfiehlt sich die Verwendung eines Hochpassfilters mit einer Eckfrequenz von 3,3 GHz.

Hierfür stehen zwei Modelle zur Verfügung:

- Modell HP 33

Die Durchgangsdämpfung dieses Hochpasses liegt bei 1,5 - 2 dB (Abb. 2). Dies ist beim Messergebnis oder bei der Angabe der Messunsicherheit zu berücksichtigen.

Der Hochpass ist für Gleichstrom (DC) nicht durchgängig, was bei Verwendung einer passiven logarithmisch-periodischen (log per) Antenne ohne Bedeutung ist. Aktive Antennen, die zum Betrieb eine Stromversorgung benötigen, können jedoch in Verbindung mit diesem Hochpass nicht

betrieben werden. Der Einsatz aktiver Antennen mit horizontaler Rundum-Charakteristik im Rahmen von Langzeitaufzeichnungen könnte aber die grundsätzliche Problematik von 5G NR-Messungen mit Breitbandmessgeräten entschärfen, wie weiter unten noch ausgeführt wird.

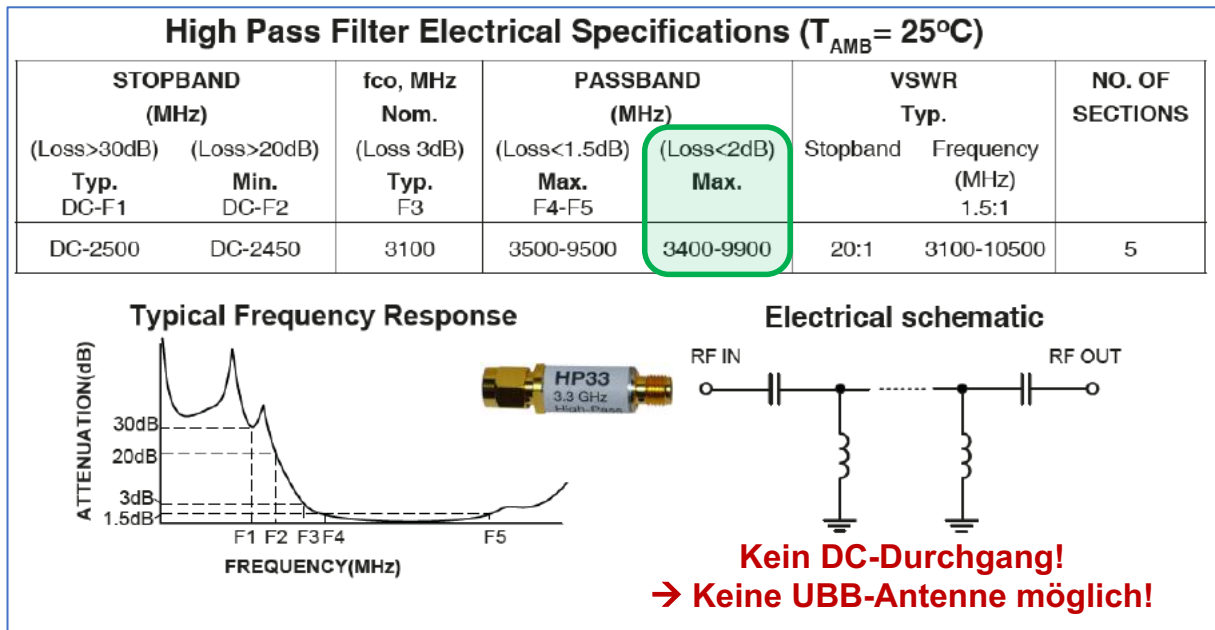


Abb. 2: Hochpassfilter Gigahertz Solutions HP33; das Filter lässt nur Signale über 3,3 GHz passieren; kein DC-Durchgang! → Anders als in Abb. 3, 5 und 6 ist hier die Dämpfung invers dargestellt.

Für den Einsatz einer aktiven Antenne wird daher ein Hochpass benötigt, der auch Gleichstrom passieren lässt.

- o Modell HP33_G10

Dieser Hochpass ist für Gleichstrom (DC) durchgängig; aktive Antennen können daher in Verbindung mit diesem Hochpass betrieben werden.

Die Durchgangsdämpfung des Hochpasses liegt bei 0,7 - 1,5 dB (Abb. 3). Dies ist beim Messergebnis und bei der Angabe der Messunsicherheit zu berücksichtigen.

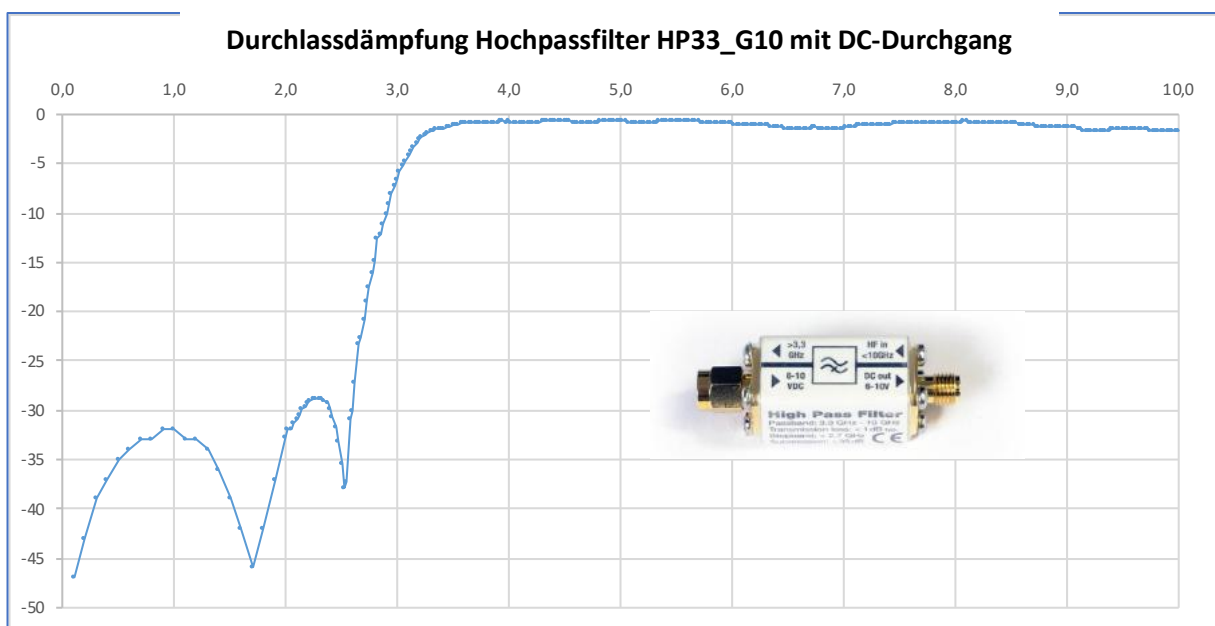


Abb. 3: Hochpassfilter Gigahertz Solutions HP33_G10; das Filter lässt nur Signale über 3,3 GHz passieren; zusätzlicher DC-Durchgang zum Betrieb einer aktiven Antenne

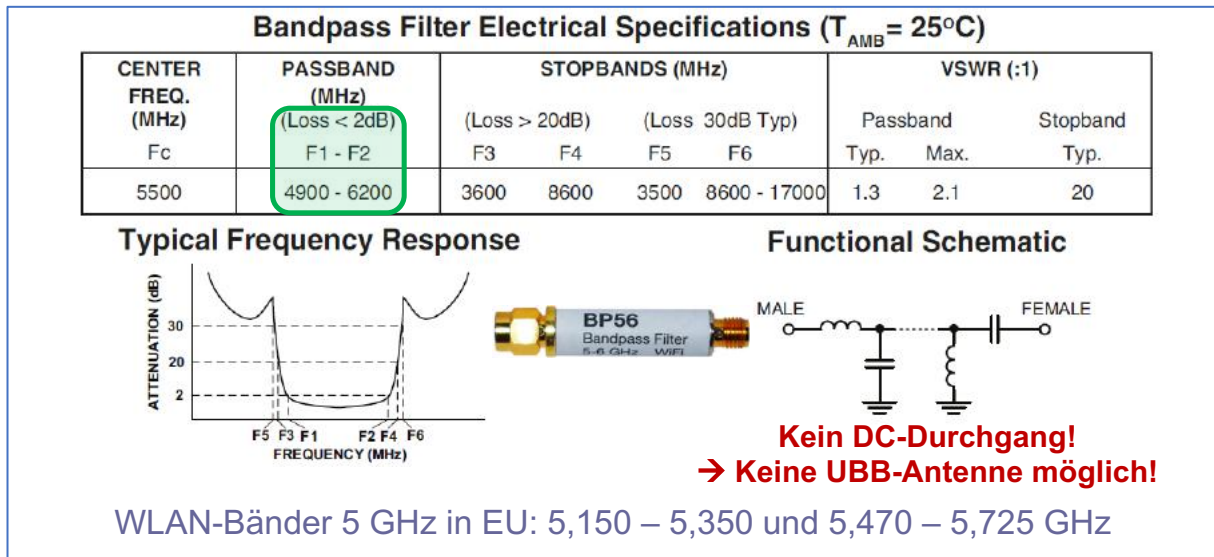


Abb. 4: Bandpassfilter Gigahertz Solutions BP 56; dieses Filter lässt nur Signale zwischen 4,9 - 6,2 GHz passieren; kein DC-Durchgang! → Anders als in Abb. 3, 5 und 6 ist hier die Dämpfung invers dargestellt.

- Zusätzlich sollte überprüft werden, ob im Frequenzbereich über 3,3 GHz keine Immissionen von WLAN-Geräten im Frequenzbereich 5 GHz vorliegen (5,150 - 5,350 GHz und 5,470 - 5,725 GHz). Hierfür steht der Bandpass BP56 zur Verfügung (Abb. 4). Er muss natürlich nach der Überprüfung auf WLAN-Signale für die Messung von 5G NR wieder entfernt werden.

Hinweis 1: Auch der Bandpass ist für Gleichstrom nicht durchgängig; aktive Antennen können daher in Verbindung mit dem Bandpass nicht betrieben werden.

Hinweis 2: In näherer Zukunft wird es WLAN-Anwendungen auch in einem weiteren Frequenzbereich um und oberhalb von 6 GHz geben: Der künftige Standard Wi-Fi 6E, voraussichtliche Frequenzbereiche 5,925 - 6,425 GHz und 6,525 - 6,875 GHz. Diese Bänder werden parallel für Richtfunkverbindungen und für Anwendungen der Satellitenkommunikation (Uplinks) genutzt. Um diese Immissionen messen zu können, benötigt man ein Messgerät, das theoretisch mindestens bis 7 GHz spezifiziert ist – in der Praxis bedeutet dies bis 10 GHz.

- Für die Breitbandmessgeräte des Herstellers ROM-Elektronik stehen auf Anfrage auch entsprechende Hochpassfilter zur Verfügung: VHF-2700 (Abb. 5) und VHF-3100+ (Abb. 6).

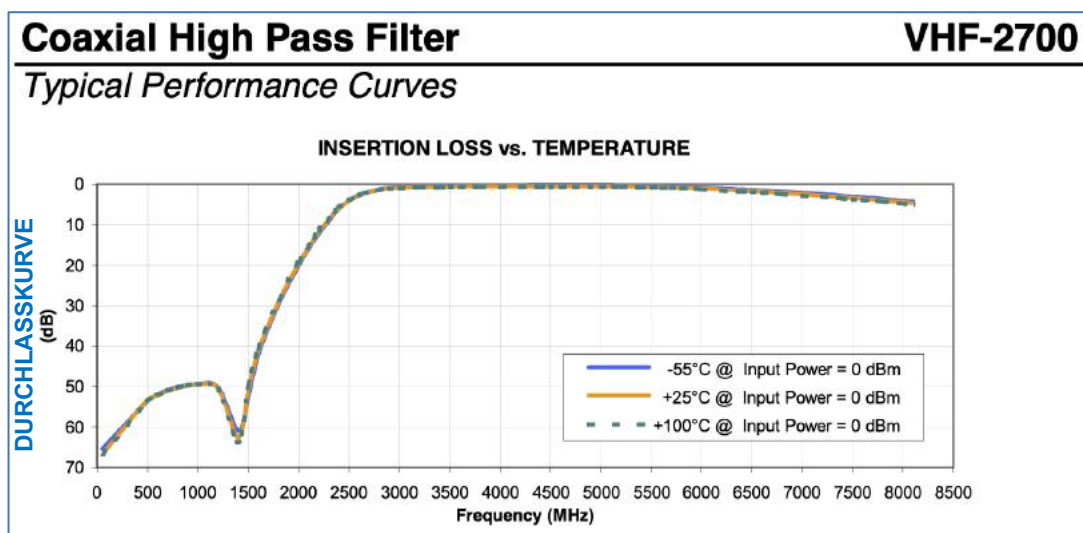


Abb. 5: Hochpassfilter ROM-Elektronik VHF-2700; dieses Filter lässt nur Signale über 2,7 GHz passieren

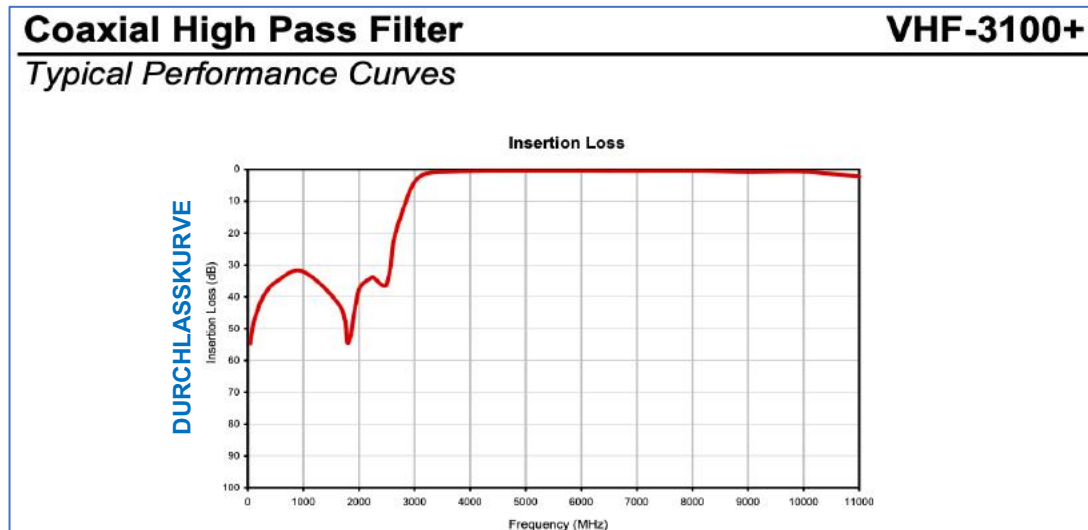


Abb. 6: Hochpassfilter ROM-Elektronik VHF-3100+; dieses Filter lässt nur Signale über 3,1 GHz passieren

- Hinsichtlich der Signalcharakteristik hat 5G NR große Ähnlichkeit mit LTE. Es handelt sich in beiden Fällen um ein Signal mit einem erheblichen Crestfaktor in der Größenordnung von ca. 10 dB (der Crestfaktor stellt das Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert dar). Bei Breitbandmessgeräten mit vom Hersteller empfohlenen, funkdienstabhängigen Korrekturfaktoren sind diese unbedingt auch bei 5G NR-Signalen anzuwenden; sonst kann es zu einer Unterbewertung der Strahlungsdichte bis zum Faktor 10 kommen.
- Auch 5G NR verwendet für die Übertragung der Verkehrslast kreuzpolarisierte Sendeantennen. Die gemessene Strahlungsdichte ist daher zu verdoppeln (+3dB).

Wie oben gezeigt wurde, kann der Strahlungsdichte-Unterschied zwischen Leerlauf (nur SSB-Immission) und Vollast im Traffic-Beam bei 5G NR in dem betreffenden Beispiel mit 90 MHz Kanalbreite bis zum Faktor 245 betragen – in Extremfällen aber auch noch deutlich mehr. Da man bei Anwendung der Breitband-Messtechnik nicht weiß, in welchem Betriebszustand der Basisstation aktuell gemessen wurde, ist die Messunsicherheit sehr groß. Wurde beispielsweise zufällig im Leerlauf nur der SSB gemessen, so beträgt die maximal mögliche Strahlungsdichte bis zum 245-fachen des Messwertes. Wurde dagegen zufällig in einem Moment von Vollaustlastung im Focus des Traffic-Beams die Maximal-Immission gemessen, so liegt möglicherweise über große Zeitspannen die Strahlungsdichte nur bei einem oder wenigen Prozent des gemessenen Wertes.

Die folgende, bewusst pointierte Darstellung dieses Sachverhalts soll deutlich machen, wie wenig hilfreich Messungen mit einer solch hohen Messunsicherheit tatsächlich sind. Der Einfachheit halber sei angenommen, es wurde bei einer Untersuchung im Frequenzband 3,6 GHz aktuell eine 5G NR-Immission von $245 \mu\text{W}/\text{m}^2$ gemessen. Nun müsste man dem Auftraggeber sagen, dass dies eventuell der überhaupt mögliche Maximalwert sei und die Minimal-Immission, die in lastschwachen Zeiten wie z.B. nachts auftreten könne, nur $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ betrage. Andererseits könnten aber die gemessenen $245 \mu\text{W}/\text{m}^2$ auch den Zustand der Minimal-Immission darstellen, und die maximale Immission läge dann bei $245 \cdot 245 \mu\text{W}/\text{m}^2 = 60.025 \mu\text{W}/\text{m}^2$, also gut $60 \text{ mW}/\text{m}^2$. Bei dieser enorm hohen möglichen Schwankungsbreite des „Messergebnisses“ zwischen $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ und $60 \text{ mW}/\text{m}^2$ dürfte man sich nicht wundern, wenn sich der Auftraggeber sehr wundert und sich zu Bemerkungen verleiten ließe wie: Da hätte er ja gleich Kaffeesatz lesen können und wäre dann genau so schlau wie nach dieser „Messung“ – hätte dann aber wenigstens einen Kaffee.

Mögliche Wege aus dem Dilemma

- Hier stellt sich die Frage, wie unter baubiologischen Aspekten mit dieser hohen Messunsicherheit vernünftig umgegangen und das Problem entschärft werden kann.

Eine Möglichkeit wäre die Messung in Form einer Langzeitaufzeichnung, wobei eine Antenne mit Rundum-Charakteristik zu verwenden ist, wenn man den genauen Standort der 5G-Basisstation nicht kennt. Wenn man die 5G NR-Immission über eine längere Zeit aufzeichnet – eine Stunde, mehrere Stunden oder über Nacht –, erkennt man die am Messpunkt in der Praxis relevante Schwankungsbreite der Strahlungsdichte, sieht Minimum und Maximum im aufgezeichneten Intervall und kann den Mittelwert und/oder – wie bei den niederfrequenten magnetischen Wechselfeldern – das 95. Perzentil berechnen. Mit diesen Informationen lässt sich schon ein deutlich klareres Bild der tatsächlichen Immissionssituation zeichnen (s. Abb. 7).

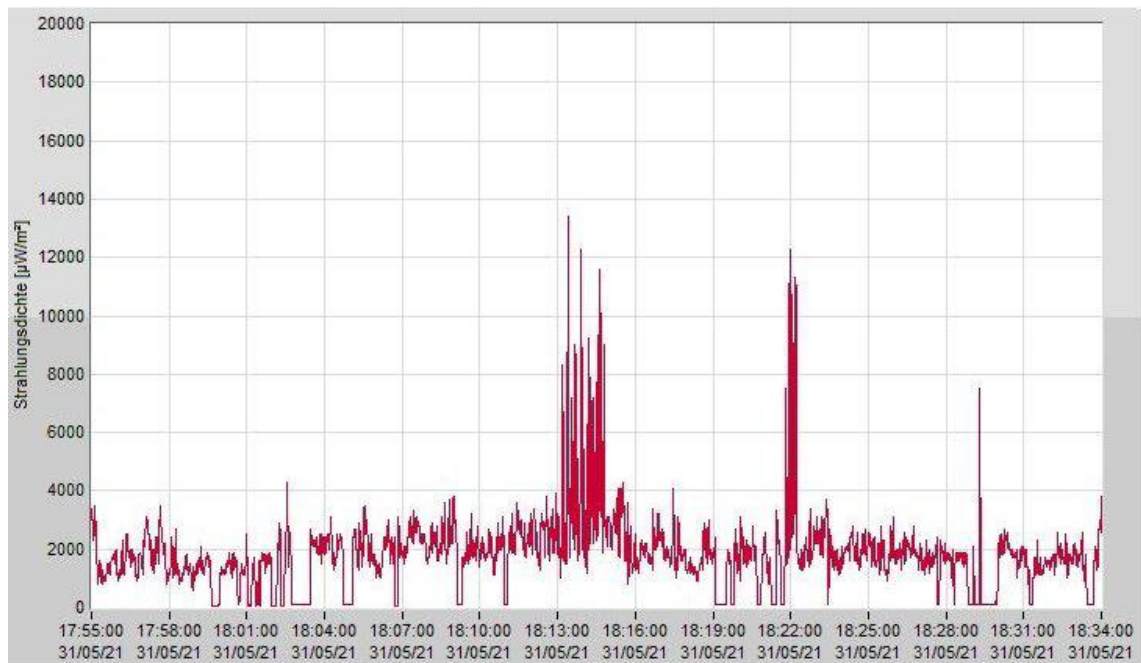


Abb. 7: Exemplarische Aufzeichnung der 5G NR-Immissionen mit mMIMO mittels Breitbandmessgerät über knapp 40 Minuten. Deutlich erkennt man die große Schwankungsbreite der Immissionen je nachdem, ob nur der SSB Beam aktiv ist (Minima von ca. $50 \mu\text{W}/\text{m}^2$) oder in welche Richtung beim Betrieb mit Verkehrslast der Traffic Beam zeigt (Maxima von bis zu $13.400 \mu\text{W}/\text{m}^2$). Der hier gemessene Faktor der Schwankungsbreite von ca. 268 entspricht sehr gut dem oben theoretisch berechneten um 245. Die Messung erfolgte in ca. 250 m Entfernung von der 5G-Antenne mit direktem, frontalem Sichtkontakt.

Auch bei einer solchen Langzeitaufzeichnung besteht natürlich das grundsätzliche Problem der Breitbandmesstechnik, dass nicht zwischen den Immissionen von Basisstationen und Endgeräten unterschieden werden kann.

Eine Langzeitaufzeichnung mit einem Breitband-Messgerät könnte auch als Ergänzung zu einer aktuellen Messung mittels Spektrumanalyse hilfreich sein. Denn die Auflösebandbreiten (RBW) von Analysatoren, die in der baubiologischen Messtechnik üblich – und erschwinglich – sind, liegen zwischen 1 MHz und maximal 20 MHz; benötigt würden aber für eine Langzeitbetrachtung in der Betriebsart „Zero Span“ (Analyse des Zeitbereichs) Bandbreiten von 50 MHz bis 100 MHz.

- Natürlich sind der apparative und der Zeitaufwand für solch eine Langzeitaufzeichnung sehr hoch: Man benötigt neben dem Breitbandmessgerät mit einem Frequenzbereich, der deutlich über 3 GHz hinausgeht, eine passende Antenne mit Rundumcharakteristik in der Horizontalebene und einen Datenlogger, der am DC-Ausgang des Breitbandmessgerätes angeschlossen wird.

Um das Messergebnis eindeutig dem Funkdienst 5G NR im Frequenzbereich 3,6 GHz mit aktivem Beamforming/Massive MIMO zuordnen zu können, sollte ein Hochpass mit einer unteren Grenzfrequenz von 2,9 - 3,3 GHz eingesetzt werden. Handelsübliche Hochpässe sperren aber nicht nur Frequenzen unterhalb der Eckfrequenz, sondern auch Gleichstrom, so dass aktive Rundum-

Antennen hiermit nicht betrieben werden können. Zur Stromversorgung der aktiven Antenne mit Rundum-Charakteristik ist daher ein Hochpass erforderlich, der in Richtung Antenne für Gleichstrom „durchlässig“ ist. Als Zubehör für Geräte der Fa. Gigahertz Solutions steht ein solches Filter mit der Bezeichnung HP33_G10 zur Verfügung. Ein zusätzlicher Bandpass 5 - 6 GHz zur Identifizierung möglicher WLAN-Immissionen in diesem Frequenzbereich wird empfohlen.

- Um die lokalen Immissionen von „5G fast“ orientierend mit denen des übrigen Mobilfunks vergleichen zu können, der über konventionelle Sektorantennen unter 3 GHz abgestrahlt wird, empfiehlt sich die parallele Aufzeichnung beider Frequenzbereiche mit zwei entsprechenden Breitbandmessgeräten. Als gerätetechnische Ausrüstung werden hierfür allerdings benötigt (s. Abb. 8):
 - Ein Breitbandmessgerät für den Frequenzbereich von – mindestens – 700 MHz bis 3 GHz bzw. 3,3 GHz mit zugehöriger horizontal omnidirektionaler Antenne,
 - ein Breitbandmessgerät für den Frequenzbereich bis 6 oder 10 GHz mit zugehöriger horizontal omnidirektionaler Antenne,
 - ein Hochpass mit einer Eckfrequenz zwischen 2,9 und 3,3 GHz, der auch Gleichstrom zur Versorgung der aktiven Rundum-Antenne passieren lässt,
 - ein Datenlogger mit (mindestens) zwei DC-Spannungseingängen zur Langzeitaufzeichnung der beiden Strahlungsdichte-proportionalen Ausgangssignale der Breitbandmessgeräte,
 - zugehörige Verbindungskabel, Netzgeräte oder ggf. externe Akkus,
 - optional (empfohlen) ein Bandpass 5 - 6 GHz zur Identifizierung möglicher WLAN-Immissionen in diesem Frequenzbereich.

Wichtig für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse in den beiden Frequenzbereichen ist, dass beide Breitbandmessgeräte auf den gleichen Messbereich („Vollausschlag“) und den gleichen Übertragungsfaktor des DC-Ausgangssignals ($V_{DC} / \mu W/m^2$) eingestellt sind.

Dieser gerätetechnische Aufwand ist nicht unerheblich und sicher nicht von jedem Messtechniker zu leisten.

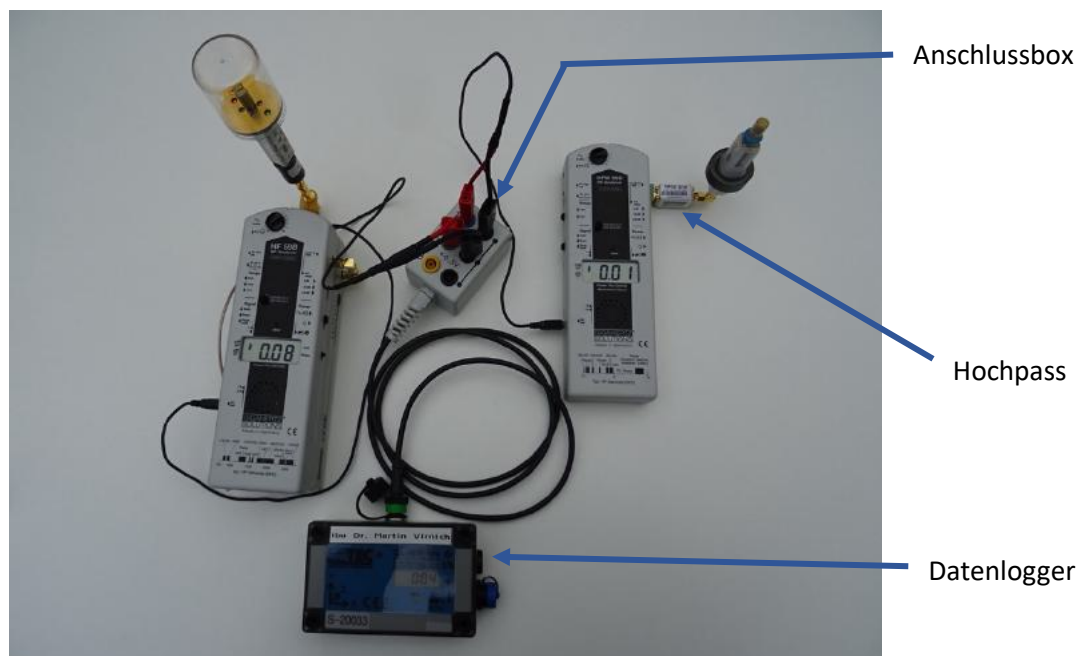


Abb. 8: Breitband-Messgerätesatz mit aktiven Rundum-Antennen für die Frequenzbereiche 27 MHz - 3,3 GHz (links) und 3,3 - 10 GHz (rechts, Beschneidung des Frequenzgangs nach unten mit Hilfe eines 3,3GHz-Hochpasses, der auch Gleichstrom zur Versorgung der aktiven Antenne passieren lässt); Aufzeichnung der Ausgangssignale an den Strahlungsdichte-proportionalen DC-Ausgängen der Breitbandmessgeräte mittels Datenlogger und Anschlussbox, die hier über maximal drei Spannungseingänge verfügt.

- Zur direkten Ermittlung der Maximalimmission kann der folgende Weg hilfreich sein. Er gilt im Prinzip für Breitband-Messtechnik und Spektrumanalyse gleichermaßen. Voraussetzungen für dieses „Lockvogel-Prinzip“ sind ein 5G-fähiges Smartphone, SIM-Karten der relevanten Netzbetreiber mit hohem Datenvolumen und eine spezielle App, die der Basisstation im Download das Maximum an Datenrate und Leistung abverlangt („Provozierte Maximalimmission“). Damit ist es möglich, den Traffic Beam an den Messpunkt „heranzulocken“ und mit einem üblichen HF-Messgerät zu messen. Dabei ist allerdings Folgendes zu beachten:
 - Die Datenübertragungsrate ist bei 5G NR extrem hoch, die Dauer der Datenübertragung daher nur kurz. Um genügend Zeit für die Messung des Traffic Beams zu haben, muss daher das herunterzuladende Datenvolumen groß sein, was u.a. auch einen Kostenfaktor bedeutet, und die Messung muss schnell vorgenommen werden.
 - Für Breitbandmessungen muss man sich im Vorfeld informieren, welcher Provider die zu untersuchende 5G NR-Basisstation betreibt, da die SIM-Karte entsprechend ausgewählt werden muss. Die Netzabdeckungskarten der Provider können hierbei ggf. hilfreich sein. Bei der Spektrumanalyse ist diese Vorabinformation nicht erforderlich, da man die Provider bei der Messung vor Ort anhand der Frequenzen identifizieren kann.
 - Die aktuelle „Lockvogel-Messung“ Messung sollte mit einer log-per Antenne vorgenommen werden, die auf die 5G NR-Antenne der Basisstation ausgerichtet ist. Dabei ist der bekannte Effekt zu berücksichtigen, dass die Messergebnisse mit einer log-per Antenne und einer Antenne mit Rundum-Charakteristik (wie sie bei der Langzeitaufzeichnung verwendet werden soll) nicht unmittelbar miteinander verglichen werden können; die Ergebnisse mit der log-per Antenne sind typischerweise um 2 dB bis 3 dB niedriger (Faktor 1,5 bis 2 für die Strahlungsdichte).
 - Es ist dafür Sorge zu tragen, dass die Immission des Endgerätes am Messpunkt deutlich niedriger ist als die des Traffic Beams, um das Messergebnis nicht zu verfälschen. Dazu muss das Endgerät hinter dem Messgerät mit log-per Richtantenne und der messenden Person platziert werden, auf keinen Fall zwischen Messgerät und Basisstation. Ggf. ist es hilfreich, das Endgerät zusätzlich noch abzuschirmen (z.B. mit Abschirmgewebe); hierzu müssen aber erst noch Erfahrungen gesammelt werden.

Im Frequenzbereich 3,6 GHz und bei den ungepaarten Bändern im Bereich 2,6 GHz arbeitet 5G NR mit dem Duplexverfahren TDD (Time Division Duplex), d.h. Uplink und Downlink benutzen die gleiche Frequenz. Bei der Spektrumanalyse kann man daher die Immissionen von Endgerät und Basisstation nur in der Zeitdarstellung (Zero Span) unterscheiden, nicht jedoch in der Betrachtung des Spektrums (Filter Sweep). Mit der Breitbandmesstechnik ist keine Unterscheidung möglich.
- Bei allen Langzeitaufzeichnungen ist zu beachten, dass bei dieser Vorgehensweise das Messgerät mit der Antenne nicht geschwenkt wird. Die Antenne befindet sich zufälligerweise an einem bestimmten Punkt – inwieweit dies der Ort des lokalen Interferenzmaximums ist, weiß man nicht. Es kann also durchaus zu deutlichen Unterbewertungen der Immission kommen.
- Hinweis: Ein Praxis-Workshop zum „Lockvogel-Prinzip“ mit Breitbandmessgeräten findet erstmalig am 7. Mai 2024 bei den Iphöfer Messtechnik-Seminaren IMS statt [3].
- Zum Schluss noch ein erfreulicher Aspekt: Mit der akustischen Analyse des Hüllkurvensignals lassen sich 5G NR-Signale anhand der typischen 50 Hz-Pulsfrequenz des ständig aktiven SSB relativ leicht und eindeutig identifizieren und von den Signalen der Mobilfunkdienste 2G - 4G unterscheiden.
- Einige typische Geräuschbeispiele von 5G NR-Signalen, die mittels Breitbandmessgerät aufgenommen wurden, stehen frei unter [4] zur Verfügung.

5G ohne Massive MIMO/Beamforming („5G wide“)

Der flächendeckende Ausbau von 5G erfolgte nämlich zunächst gar nicht im Bereich 3,6 GHz, sondern auf den etablierten Mobilfunk-Frequenzen unterhalb von 3 GHz. Hier werden Antennen mit aktivem Beamforming nicht eingesetzt, weil aufgrund der größeren Wellenlänge die Antennen viel zu groß und

zu schwer wären. In den **bekanntesten Bändern 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz und 2100 MHz** werden die bisher für LTE (4G) eingesetzten konventionellen Sektorantennen einfach weiterverwendet.

Dann hat man in diesen Frequenzbändern auch 5G, aber nicht mit den extrem großen Bandbreiten von 50, 70 oder 90 MHz, sondern eher im „LTE-Format“ um 10 oder 20 MHz und vor allem: **Ohne massive MIMO und ohne aktives Beamforming**. Die Sektoren werden also ganz konventionell „ausgeleuchtet“, wie man es vom Mobilfunk bisher kennt; es gibt hier keinen sich bewegenden, stark fokussierten Beam. Das Duplexverfahren bei „5G wide“ ist FDD, bei dem zwei unterschiedliche (gepaarte) Frequenzbänder für Up- und Downlink verwendet werden, im Gegensatz zu „5G wide“ mit TDD (ungepaart).

SSB-Beam und Traffic-Beam haben hier die gleiche Richtcharakteristik. Bei der Betrachtung der Messunsicherheit für Messungen mit Breitband-Geräten entfällt somit der bei Massive MIMO mögliche Unterschied von 10 dB (Faktor 10 für die Strahlungsdichte) und mehr zwischen SSB-Beam und Traffic-Beam.

Der im obigen Beispiel für 90 MHz Kanalbandbreite berechnete Faktor von 245 für den maximalen Unterschied zwischen Leerlauf (nur SSB-Immission) und Volllast im Traffic-Beam reduziert sich bei Antennen ohne Beamforming also auf 24,5 aufgrund der Bandbreiten-Hochrechnung plus 3 dB Zugschlag für die Kreuzpolarisation des Traffic-Signals. Auch dies ist noch sehr viel im Vergleich zu den Mobilfunkdiensten 2G und 4G, wo dieser Faktor typischerweise lediglich bei 4 liegt.

Der erste Bereich, in dem großflächig auf „5G wide“ umgestellt wurde, ist der ehemalige UMTS-Frequenzbereich 2100 MHz (Telekom), gefolgt vom 700er Band (Vodafone). UMTS (3G) ist als erstes Mobilfunksystem in Deutschland bereits abgeschaltet: Telekom und Vodafone haben zum Ende Juni 2021 den Betrieb eingestellt, Telefónica folgte Ende Dezember 2021. Jetzt gibt es im Frequenzbereich 2100 MHz gemischten Betrieb von LTE und 5G NR.

Sieht man einmal von den Ballungszentren und Großstädten ab, wo 5G NR im Bereich 3,6 GHz bereits in großem Umfang installiert ist („5G fast“), so ist die Wahrscheinlichkeit in der Fläche und in den Nicht-Großstädten auf 5G-Signale zu stoßen, im Frequenzbereich unter 3 GHz größer („5G wide“).

Auch bei Small Cells wird kein aktives Beamforming eingesetzt – der Aufwand stünde in keinem Verhältnis zum Nutzen. Small Cells arbeiten typischerweise mit 4-fach MIMO.

5G in fünf Kapiteln

Der Autor hat das umfangreiche und vielseitige Thema „5G New Radio“ in insgesamt fünf Beiträgen behandelt, die gemeinsam unter dem übergeordneten Titel „5G in fünf Kapiteln“ im „baubiologie magazin“ des Instituts für Baubiologie und Nachhaltigkeit IBN (Rosenheim) erschienen sind [5]. Der hier vorliegende Beitrag befasst sich mit dem speziellen Thema von 5G Immissionsmessungen mit Breitbandmessgeräten der baubiologischen Messtechnik.

Weitere vertiefende Themen sind:

- 5G Aus den Augen, aus dem Sinn – Stadtmöbel als Verstecke für Small Cells
- 5G Mobilfunk und Internet per Satellit – Der Strahlungsgrill von oben?
- 5G NR Technische und messtechnische Aspekte (Entwurf der neuen VDB-Richtlinie „5G NR“)

Der Beitrag

- Volle Beschleunigung mit 5G – Einsatzgebiete, Ziele und Eigenschaften des Mobilfunksystems der 5. Generation

dient hingegen übergeordnet der orientierenden Einführung in die Thematik.

Literatur und Internetadressen

- [1] Deutsche Telekom: Eine Frage: Was ist eine 5G Antenne?;
<https://www.youtube.com/watch?v=neSNVBjPloY>
- [2] Bornkessel, Christian: Konzepte für zuverlässige Immissionsmessungen an 5G-Basisstationen mit massivem MIMO; in: ITG-News 1/2020; S. 8-10;
<https://www.vde.com/resource/blob/1937474/1bfedb494c510507af28571e548811b0/itg-news-januar-2020-pdf-data.pdf>
- [3] Iphöfer Messtechnik-Seminare IMS Dr. Dietrich Moldan: QS-Verifizierungs-Workshop – HF-Breitbandmessungen für 5G im Frequenzbereich 2,4 bis 3,7 GHz – „Lockvogel-Prinzip“ am 07.05.2024;
<https://www.drmoldan.de/seminare/iphoefer-messtechnik-seminare-ims/>
- [4] Virnich, Martin: 5G NR – Signalcharakteristiken und funkdiensttypische akustische Muster;
<https://baubiologie-virnich.de/category/audio-analyse-von-funksignalen/>
→ Scrollen bis „Zusätzliche Funksignale“
- [5] Virnich, Martin: 5G in fünf Kapiteln; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Februar 2024;
<https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln>

2. Update, Februar 2024

© Dr.-Ing. Martin H. Virnich
ibu – Ingenieurbüro für Baubiologie und Umweltmesstechnik
Mönchengladbach, Februar 2024