

# Untersuchungen zur korrekten Immissionserfassung von gepulsten Signalen mit dem SRM-3006 am Beispiel von 5G

M. Sc. Thomas Kopacz, RWTH Aachen, Deutschland  
Dr.-Ing. Christian Bornkessel, TU Ilmenau, Deutschland  
Dipl.-Ing. Sascha Schießl, RWTH Aachen, Deutschland  
Prof. Dr.-Ing. Dirk Heberling, RWTH Aachen / Fraunhofer FHR, Deutschland

## 1 Abstract

Hinsichtlich der Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung von 5G-Basisstationen ist der SS/PBCH Block (SSB) ein geeigneter Kandidat für eine Hochrechnung. Im vorliegenden Beitrag wird die Eignung der verschiedenen Betriebsarten des SRM-3006 hinsichtlich einer korrekten Immissionserfassung von stark gepulsten Signalen anhand eines WLAN-Bakensignals sowie eines gepulsten Sinussignals, das vom Zeitverlauf einen 5G-SSB nachbildet, analysiert und Auswirkungen auf die praktische Messdurchführung beschrieben.

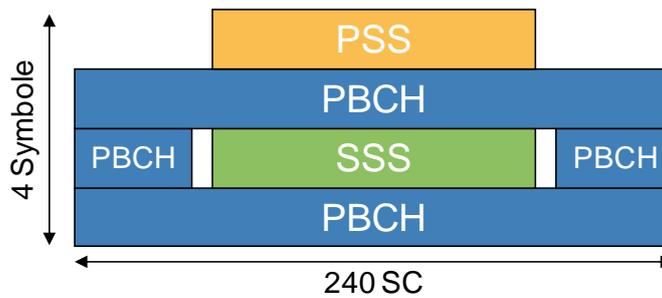
## 2 Hintergrund und Motivation

Im Zuge der Weiterentwicklung des Mobilfunks werden derzeit erste Basisstationen der fünften Generation 5G ausgerollt. Wie bei den bisherigen Mobilfunkstandards der 2. bis 4. Generation (GSM, UMTS, LTE) soll es gemäß der 26. BImSchV [1] auch bei 5G möglich sein die Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung bestimmen zu können. Wie bei 2G bis 4G soll sie basierend auf definiert abgestrahlten Signalen ermittelt werden, die unabhängig von der Verkehrslast sind und die somit eine Extrapolation auf maximale Auslastung ermöglichen. Ein möglicher Kandidat dafür ist der sogenannte Synchronization Signal Block (SS/PBCH Block oder SSB). Im Rahmen dieser Arbeit wird basierend auf dem Immissionsmessgerät SRM-3006 von Narda Safety Test Solutions untersucht, in welchen Betriebsarten und mit welchen Messparametern der SSB korrekt gemessen werden kann.

### 2.1 Physical Layer bei 5G

Wie bereits bei LTE ist das 5G-Signal OFDM-moduliert, d.h. es besteht aus einer Vielzahl von schmalbandigen Trägern. Der Trägerabstand ist hierbei flexibel zwischen 15 kHz (wie bei LTE) und 240 kHz einstellbar [2]. Im Folgenden wird ein Trägerabstand von 30 kHz angenommen, dabei beträgt die Symboldauer ca. 35,7  $\mu$ s. Der größte Unterschied zu LTE ist die Verwendung aktiver Antennen, die Beamforming erlauben. Damit ist es möglich verschiedene Signale mit verschiedenen Abstrahlcharakteristika der Antenne, d.h. auch in unterschiedliche Richtungen abzustrahlen.

Zum Einbuchten von Endgeräten in die Zelle, sendet die Basisstation periodisch den Synchronization Signal Block (SS/PBCH Block, SSB) aus – auch im Leerlauf. Der SSB hat wie in Bild 1 dargestellt eine Dauer von vier Symbolen im Zeitbereich (142,9  $\mu$ s) und



**Bild 1:** Darstellung eines SSB bestehend aus 4 Symbolen im Zeitbereich und maximal 240 Unterträgern (SC) im Frequenzbereich.

je nach Symbol eine Breite von 127 bis maximal 240 Unterträgern (Subcarrier, SC) im Frequenzbereich [2], was bei dem angenommenen Trägerabstand von 30 kHz einer Bandbreite von 7,2 MHz entspricht. Die vier Symbole setzen sich aus den Signalen PSS (Primary Synchronization Signal), SSS (Secondary Synchronization Signal) und PBCH (Physical Broadcast Channel) zusammen. Im einfachsten Fall wird der SSB analog zu den bisherigen Mobilfunkgenerationen mittels eines statischen Beams abgestrahlt, der den kompletten Zellsektor versorgt. In diesem Fall besteht das SSB Burst Set lediglich aus einem SSB. Für das Sub-6-GHz-Band sind bis zu acht Beam-Ausrichtungen für den SSB möglich. In diesem Fall besteht das zugehörige SSB Burst Set aus 8 SSBs, die mit diskret einstellbarer Periodizität abgestrahlt werden. Standardmäßig beträgt sie 20 ms [3].

## 2.2 Funktionsweise des SRM-3006 und Auswirkungen auf vorliegende Aufgabenstellung

Für die Immissionsmessungen wird das Messgerät SRM-3006 von Narda Safety Test Solutions inklusive einer dreiachsigen E-Feld-Messantenne für den Frequenzbereich 420 MHz bis 6 GHz ausgewählt. Dabei handelt es sich um einen FFT-Analysator, der die Messung im Zeitbereich durchführt. Für die nachfolgenden Untersuchungen werden die drei Betriebsarten Spectrum, Level Recorder sowie Scope verwendet.

Zur Vereinfachung wird zunächst angenommen, dass die Messungen einachsigermaßen erfolgen, d.h. ohne automatische Umschaltung der drei orthogonalen Achsen der Messsonde. Im Messmodus Spectrum wird das zu vermessende Spektrum je nach Größe im Sinne eines Überlagerungsempfängers in mehrere Frequenzbänder unterteilt, für die dann jeweils eine Messung im Zeitbereich vorgenommen wird [4]. In diesem Messmodus kann das Messgerät zu einem bestimmten Zeitpunkt somit lediglich die Immission des momentan eingestellten Frequenzbands messen. Des Weiteren ist das Messgerät während der Umschaltzeiten zwischen den zu vermessenden Frequenzbändern sowie aufgrund von Nachverarbeitungsschritten „blind“ gegenüber dem aktuellen Signal [5]. Signale, die in diese „Blindzeit“ fallen, können folglich nicht erfasst werden. Die Zeit pro Messdurchlauf (Sweep-Zeit) lässt sich deutlich reduzieren, wenn der Span so eingestellt wird, dass das Spektrum mit lediglich einer FFT bestimmt werden kann. Dies hat insbesondere bei stark gepulsten Signalen mit einem sehr geringen Duty Cycle den Vorteil, dass die Pulse verglichen mit dem Fall mehrerer zu messender Frequenzbänder mit einer höheren Wahrscheinlichkeit „getroffen“ werden können. Für das Videofilter, das zur zeitlichen Glättung von rauschartigen Signalen (RMS-Wert) verwendet wird, werden beim SRM-3006 mehrere FFT-Fenster zu 75 % überlappt und auf diese Weise ein Mittelwert gebildet [5]. Im Falle eines stark gepulsten Signals muss dieses je nach Sweep-Zeit und

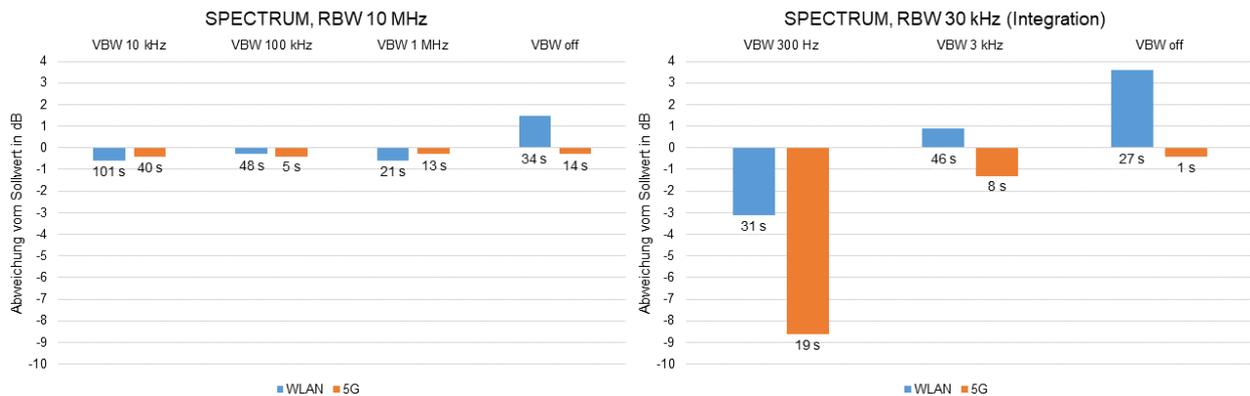
Blindzeiten nicht zwingend in jedem FFT-Fenster enthalten sein, so dass hier theoretisch ein zusätzlicher Fehler entstehen kann.

In den Betriebsarten Level Recorder und Scope wird das Signal unmittelbar im Zeitbereich analysiert; somit entfallen die FFT-Nachverarbeitungszeiten des Messmodus Spectrum. Des Weiteren entfallen Umschaltungen zwischen aufeinanderfolgenden Frequenzbändern, weil die Messung auf einer festen Frequenz mittels eines Analysefilters mit einer festen Bandbreite erfolgt. Somit handelt es sich um eine zeitlich lückenlose Signalerfassung. Die Bandbreite des Analysefilters sollte bei der Messung möglichst die gesamte Signalbandbreite abdecken, um die Immission pegelrichtig erfassen zu können. Im Falle einer dreiachsigen Messung, die beim SRM-3006 automatisch erfolgen kann, kommen Umschaltzeiten zwischen den Messachsen von jeweils 20 ms hinzu [5]. Außerdem kann die triaxiale Messsonde während der Messung einer Raumachse nicht simultan die Immission der anderen Raumachsen messen. Für gepulste Signale hat dies zur Konsequenz, dass ein Puls in einem Durchlauf nicht zwingend von allen Messachsen aufgenommen werden muss. Nachfolgend beschriebene Messungen wurden zunächst einachsig durchgeführt.

### **3 Labormessungen zur Untersuchung der Betriebsarten des SRM-3006**

Für die Untersuchungen, wie das SRM-3006 in verschiedenen Betriebsarten mit stark gepulsten und ggf. mit einem Crest-Faktor behafteten Signalen zurechtkommt, wurden zwei gepulste Signale vermessen: Im ersten Aufbau wurde das Bakensignal eines im Leerlauf betriebenen WLAN Access Points FRITZ!Box WLAN 3050 gemessen (550  $\mu$ s Pulsbreite, 100 ms Periodizität, 14 MHz 10-dB-Signalbandbreite). Im zweiten Messaufbau wurde das Ausgangssignal eines Signalgenerators Agilent N9310A gemessen, der ein gepulstes Sinussignal erzeugte, das vom zeitlichen Verlauf einem SSB (143  $\mu$ s) pro Periode (20 ms) entspricht [2][3]. Verglichen wurden die Messwerte mit Sollwerten, die durch Messungen mit dem Laborspektrumanalysator ESR-7 von Rohde & Schwarz (für WLAN) sowie durch Messungen des ungepulsten Sinussignals (5G) gewonnen wurden. Die Messungen zeigen, dass in allen untersuchten Betriebsarten des SRM-3006 in Abhängigkeit von den weiteren Einstellungen Messergebnisse ermittelt werden können, die nah am Sollwert liegen.

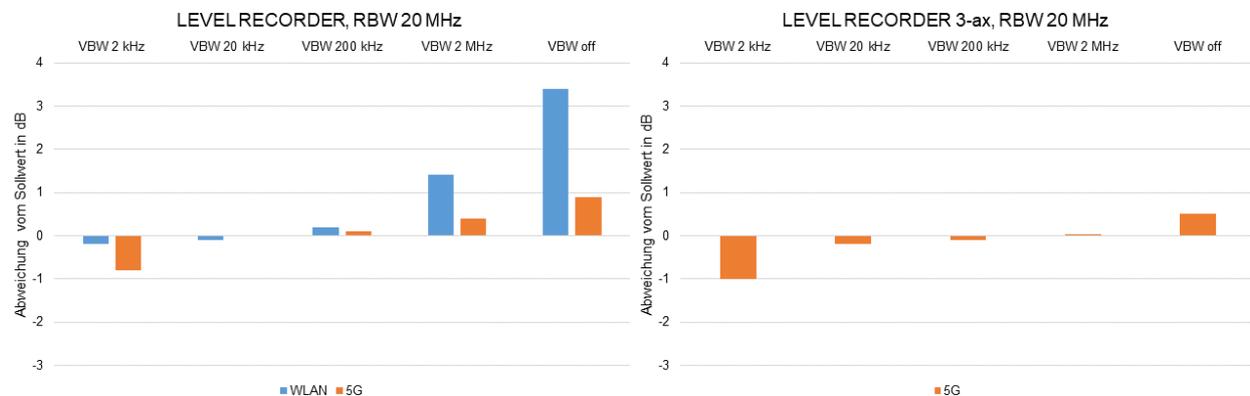
Bei der Betriebsart Spectrum (siehe Bild 2) werden teilweise bereits nach kurzer Zeit die Pulse detektiert, jedoch kommt es erst nach Messzeiten von bis zu einigen 10 Sekunden zu Messwerten, die nah am Sollwert liegen. Dabei liefern die Messungen mit einer hohen Auflösungsbandbreite von 10 MHz deutlich geringere Abweichungen vom Sollwert als die mit einer geringen Auflösungsbandbreite von 30 kHz und anschließender spektraler Integration. Während der Messungen kommt es dabei teilweise zu plötzlichen Sprüngen der Messwerte um mehrere dB nach oben, weil die Pulse aufgrund ungünstiger Kombinationen von Sweep-Zeiten und Pulsperiodizität erst nach mehreren Durchläufen korrekt erfasst werden. Die Messdauer zur Erlangung eines stabilen Messwertes hängt sehr stark von den Messeinstellungen ab, insbesondere aber von der Videofilterbandbreite. Beim SSB-ähnlichen Signal kommt es trotz der schmalen Pulse jedoch zu niedrigeren Messdauern, da die Pulse gegenüber dem WLAN-Signal fünfmal häufiger auftreten.



**Bild 2:** Betriebsart Spectrum - Abweichungen der Messungen des WLAN-Signals (blau) und 5G-Signals (orange) vom Sollwert in Abhängigkeit von der Videofilterbandbreite (VBW) für eine hohe Auflösebandbreite von 10 MHz (linker Teil) sowie 30 kHz mit anschließender spektraler Integration (rechter Teil). Zusätzlich sind die zur Ermittlung eines stabilen Messwertes benötigten Zeiten angegeben.

Die Betriebsart, die am schnellsten korrekte Ergebnisse liefert, ist jedoch der Level Recorder bei gleichzeitiger Aktivierung des Videofilters mit den Bandbreiten RBW/10, RBW/100, RBW/1.000 und RBW/10.000 (entspricht VBW von 2 MHz bis 2 kHz, siehe linker Teil von Bild 3). Größere Videobandbreiten (z.B. RBW/10 bei WLAN) bzw. deaktivierte Videofilter führen hingegen zu Werten, die eher dem Peak-Detektor eines klassischen Spektrumanalysators entsprechen. Aufgrund der fehlenden Blindzeiten in dieser Betriebsart werden die korrekten Messwerte unmittelbar nach Beginn der Messung angezeigt. Auch die Betriebsart Scope, die ähnlich wie der Level Recorder arbeitet, liefert verlässliche Ergebnisse und scheint grundsätzlich für derartige Messungen geeignet zu sein. Allerdings ist damit lediglich eine einachsige Messung möglich.

Aufgrund der langen Messzeiten zur Ermittlung eines verlässlichen Messwertes ist die Verwendung der Schwenkmethode bei der Betriebsart Spectrum zur räumlichen Abtastung nicht geeignet. Auch die Durchführung von isotropen Messungen (automatisches Durchschalten aller Messachsen und Summation aller Beiträge) scheint bei diesen Betriebsarten nicht verlässlich anwendbar zu sein, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Puls während der Messung jeder Achse auftritt. Anstatt der dreiachsigen Isotropmesssonde lassen sich an das SRM-3006 jedoch auch einachsige Antennen anschließen. Anders sieht die Problematik der Isotropmessung bei der Betriebsart Level Recorder aus: Aufgrund der kurzen Messdauer von 20 ms und der fehlenden Blindzeit ist ein räumliches Schwenken zur Maximalwertsuche möglich. Soll



**Bild 3:** Betriebsart Level Recorder - Abweichungen der Messungen des WLAN-Signals (blau) und 5G-Signals (orange) vom Sollwert in Abhängigkeit von der Videofilterbandbreite (VBW) für eine Auflösebandbreite von 20 MHz und eine einachsige Messung (linker Teil) sowie für eine dreiachsige Messung (rechter Teil, nur 5G).

zusätzlich isotrop gemessen werden ist zu beachten, dass bei jedem Umschalten eine Blindzeit von 20 ms hinzukommt, sodass ein Messdurchlauf insgesamt 120 ms dauert [5]. Eine derartige Messung mit dem SRM-3006 wurde für das SSB-ähnliche Signal durchgeführt. Die Ergebnisse in Bild 3 zeigen, dass auch diese Messung innerhalb kurzer Zeit verlässliche Werte für Videobandbreiten von RBW/10, RBW/100 und RBW/1.000 liefert, deren Abweichungen vom Sollwert maximal 0,2 dB betragen. Bei einem WLAN-Bakensignal hingegen liefert eine dreiachsige Messung per se falsche Ergebnisse, da die Pulsperiode mit 100 ms wesentlich größer ist als die Messzeit von 20 ms pro Achse

#### 4 Theoretische Überlegungen zur optimalen Wahl der Videobandbreite (VBW) im Betriebsmodus Level Recorder

Nachdem mit dem Level Recorder der optimale Messmodus beim Narda SRM-3006 identifiziert wurde, ist die optimale Wahl der Geräteeinstellungen der nächste Schritt für die korrekte Messung der Signale. Da es sich bei 5G-Sendesignalen aufgrund des verwendeten OFDM-Modulationsverfahrens um rauschähnliche Signale handelt, die Immissionsschutz-grenzwerte jedoch auf dem thermischen Äquivalent beruhen, ist zur korrekten Bewertung nicht der kurzfristig auftretende Maximalwert des Signals, sondern der leistungsbezogene Mittelwert maßgebend.

Zur Glättung der rauschartigen Signalschwankungen wird in einem bei Verwendung eines Laborspektrumanalysators in der Regel der RMS-Detektor eingesetzt, der die innerhalb der Verweildauer pro Pixel einlaufenden statistisch unabhängigen Mess-Samples leistungsbezogen mittelt und dem entsprechenden Bildschirmpixel als Ausgabewert zuordnet [6]. Der Narda SRM-3006 verfügt jedoch über keinen RMS-Detektor. Eine zeitliche Mittelung der rauschähnlichen Signalfluktuationen erfolgt im Modus Level Recorder alternativ durch ein Videofilter mit einstellbarer Videobandbreite (VBW). Die Signalglättung per Videofilter führt in einem Laborspektrumanalysator auf eine Unterbewertung um etwa 2,5 dB, da schaltungstechnisch das Videofilter hinter dem Logarithmierer realisiert ist; somit wird über den Logarithmus der Leistung gemittelt [5]. Aufgrund anderer schaltungstechnischer Realisierung erfolgt im SRM-3006 die Mittelung korrekt über lineare Leistungswerte.

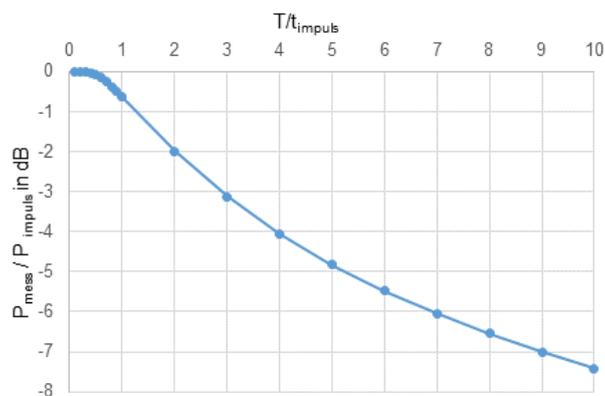
Gerade bei gepulsten, rauschartigen Signalen, wie z.B. den SSB-Bursts bei 5G, ist die Wahl der korrekten VBW von entscheidender Bedeutung für einen korrekten Anzeigewert. Denn über die VBW wird nach Gleichung 1 die Mittelungszeit  $T$  festgelegt [5]:

$$T = \frac{1}{\pi \cdot VBW} \quad (1)$$

Für die Wahl eines sinnvollen Wertebereiches für die Mittelungszeit und daraus resultierend für die VBW wird dabei von folgenden Grundüberlegungen ausgegangen: Einerseits darf die Mittelungsdauer im Verhältnis zur Pulsdauer des Pulses  $t_{\text{impuls}}$  nicht zu kurz sein, da ansonsten die Glättung der Signalfluktuationen des rauschähnlichen Signals nur unzureichend ist. Andererseits darf aber die Mittelungsdauer auch nicht zu groß werden, da ansonsten nicht nur über den Puls, sondern auch die nachfolgende Pause gemittelt und deswegen die Pulsamplitude unterbewertet wird. Dies würde generell bei Mittelungszeiten passieren, die länger als die Pulsdauer sind. Da im SRM-3006 ein Videofilter mit exponentieller Impulsantwort implementiert ist, ergibt sich die Unterbewertung der gemessenen Leistung  $P_{\text{mess}}$  im Vergleich zur „tatsächlichen“ mittleren Pulsleistung  $P_{\text{impuls}}$  nach [6] zu:

$$P_{mess} = P_{impuls} \cdot (1 - e^{-2\pi \cdot VBW \cdot t_{impuls}}) \quad (2)$$

In Bild 4 sind die Werte von  $P_{mess}/P_{impuls}$  für verschiedene Verhältnisse von Mittelungszeit zu Pulsdauer angegeben. Negative dB-Werte entsprechen dabei einer Unterbewertung. Die Auswertung von Gleichung 2 bzw. Bild 4 zeigt, dass für den Grenzfall einer Mittelungsdauer, die exakt der Pulsdauer entspricht, bereits eine Unterbewertung von etwa 0,6 dB existiert. Entspricht die Mittelungsdauer hingegen der halben Pulsdauer, beträgt die Unterschätzung nur noch 0,1 dB. Allerdings wird die reduzierte Unterschätzung mit einem Fehler bei der Glättung der Signalfluktuationen erkauft, da nicht mehr alle Messwerte des Pulses in die Mittelung eingehen, sondern nur noch die Hälfte. Zu vermeiden sind hingegen deutlich über der Pulsdauer liegende Mittelungszeiten, da diese wie in Bild 4 dargestellt zu erheblichen Unterbewertungen führen können. Je nach Pulslänge bzw. Anzahl aufeinanderfolgender OFDM-Symbole mit gleicher Amplitude lässt sich damit die im Sinne einer pegelrichtigen Immissionsmessung optimale Videobandbreite ableiten.



**Bild 4:** Unterbewertung eines gepulsten Hochfrequenzsignals mit rauschartig schwankender Momentanleistung im Puls als Verhältnis zwischen gemessener Leistung und mittlerer Leistung in Abhängigkeit von Pulsdauer und Mittelungszeit für ein Videofilter mit exponentieller Impulsantwort, nach Gleichung 2.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge des 5G-Rollouts ergibt sich Notwendigkeit der Entwicklung eines Mess- und Hochrechnungsverfahrens zur Bestimmung der Maximalimmission von 5G-Basisstationen, die der Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung entspricht. Als Basis für eine Hochrechnung bei 5G kann der SS/PBCH-Block (SSB) verwendet werden. Der rauschähnliche SSB weist eine Länge von 142,9  $\mu$ s auf und wird periodisch mit standardmäßig 20 ms abgestrahlt.

Basierend auf dem Immissionsmessgerät SRM-3006 von Narda Safety Test Solutions wurden unter Berücksichtigung von dessen Funktionsweise die Eignung der Betriebsmodi Spectrum sowie Level Recorder für verschiedene Videobandbreiten bei Speisung mit einem WLAN-Bakensignal sowie eines hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs dem SSB ähnlichen gepulsten Sinussignal untersucht. Dabei hat sich bereits bei einachsigen Messungen ohne Umschaltzeiten der Antenne gezeigt, dass der Betriebsmodus Spectrum aufgrund der langen Sweep- und Blindzeiten die Pulse erst nach einigen zehn Sekunden überhaupt erfassen konnte. Bei einer kleinen Auflösebandbreite (RBW) und anschließender spektraler Integration kam es zusätzlich zu teilweise signifikanten

Fehlbewertungen des Signalpegels. Im Modus Level Recorder wurden die Pulse aufgrund der mit 20 ms geringeren Sweep-Dauer umgehend erkannt und pegelrichtig dargestellt. Selbst eine dreiachsige Messung des SSB-ähnlichen Signals führte zu plausiblen Ergebnissen, sodass sich dieser Modus prinzipiell auch für Feldmessungen und ein Schwenken der Sonde zur räumlichen Maximalwertsuche eignet.

Hinsichtlich des Einflusses des nachgeschalteten Videofilters des SRM-3006, das analog zu einem RMS-Detektor bei einem Laborspektrumanalysator eine zeitliche Glättung des stark fluktuierenden Signals durchführt, wurde ein Zusammenhang zwischen Unterbewertung der Immission und Pulsdauer des SSB bzw. Mittelungsdauer des Videofilters abgeleitet, wonach die Mittelungsdauer etwa zwischen einer ganzen und einer halben Pulsdauer liegen soll, um das Optimum zwischen Unter- und Überbewertung des Pegels zu erreichen. Der theoretische Zusammenhang ist anhand von Feldmessungen unter möglichst definierten Bedingungen zu validieren. Mittelfristig werden die bis dato frequenzselektiv durchgeführten Messungen durch codeselektive Messungen zu ersetzen sein, wenn die 5G-Zellen eine realistische Zellauslastung aufweisen und das SSB-Spektrum zusätzlich durch Verkehr belegt sein wird.

## Literatur

- [1] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV). Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266)
- [2] 3GPP TS 38.211, 5G; NR; Physical channels and modulation, Version 15.3.0, Rel. 15
- [3] 3GPP TS 38.213, 5G; NR; Physical layer procedures for control, Version 15.3.0, Rel. 15
- [4] Helmut Keller: Principles of the Selective Radiation Meter SRM-3006, Application Note, Narda Safety Test Solutions GmbH, 22.12.2009
- [5] Helmut Keller: Bewertung rauschartiger Impulse moderner Kommunikationssysteme, NIR 2011, *Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. (2011)*, S. 209-223.
- [6] Christoph Rauscher: Grundlagen der Spektrumanalyse, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 4. Auflage, München (2008).