

# Entwicklung eines Immissionsmessverfahrens für Funkdienste mit Frequenzsprungverfahren

M. Sc. Willi Hofmann, TU Ilmenau, willi.hofmann@tu-ilmenau.de;  
Dr.-Ing. Christian Bornkessel, TU Ilmenau, christian.bornkessel@tu-ilmenau.de;  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Matthias A. Hein, TU Ilmenau, matthias.hein@tu-ilmenau.de

## 1 Einleitung

Die zunehmende Durchdringung des täglichen Lebens mit Funktechnologien sehr unterschiedlicher Reichweiten steigert die Relevanz der Thematik der persönlichen Exposition durch elektromagnetische hochfrequente Felder. Neben leistungsstarken, ortsfesten Sendeanlagen wie Mobilfunkbasisstationen können auch Endgeräte im körpernahen Umfeld sowie bei Körperkontakt signifikante Beiträge zu dieser persönlichen Exposition liefern. Um Aufschluss über Größe und Zusammensetzung der Immission zu erlangen, müssen die verwendeten Messverfahren funkdienstspezifisch sein. Nur so können aus den jeweiligen expositionsrelevanten Signalparametern korrekte Immissionswerte abgeleitet werden.

Da insbesondere die Exposition durch Mobilfunk im Fokus vergangener Forschungsarbeiten stand, gibt es in diesem Bereich bereits angepasste Messverfahren (z.B. für den Standard 4G der Mobilkommunikation, LTE [1]). Für viele andere Funkdienste existieren trotz vielfältiger Anwendungsgebiete noch keine zuverlässigen, normgerechten und zugleich praktikablen Immissionsmessverfahren. Zu diesen Diensten zählt Bluetooth®, welches sich durch die Verwendung eines Frequenzsprungverfahrens (engl. *frequency hopping*) auszeichnet. Bei diesem Verfahren variiert die Signalfrequenz viele hundert Mal pro Sekunde über einen breiten Frequenzbereich. Dabei können Frequenzbereiche von mehreren 10 MHz gleichzeitig in Benutzung sein, die bei einer Messung analysiert werden müssen, was eine messtechnische Erfassung der Immission erheblich erschwert.

In [2] wird die *Bandpower*-Funktion eines Spektrumanalysators zur Immissionsmessung von Bluetooth vorgeschlagen. Dabei wird die spektrale Leistungsdichte eines Messdurchlaufs über die Systembandbreite aufsummiert, um die momentane Signalleistung des Gesamtbands zu erhalten. Ein breitbandiger thermischer Leistungsmesskopf dient dabei zur Ermittlung eines Referenzwertes. Die Untersuchungen in dieser Studie basieren überwiegend auf leitungsgebundenen Messungen; Aussagen zur Immission realer Funkverbindungen müssen künftig aus weiteren Studien abgeleitet werden.

Ziel dieses Beitrags ist es, ein Messkonzept am Beispiel von Bluetooth® vorzustellen, welches es ermöglicht, die momentane Immission, sowie die Immission unter maximalen Sendebedingungen von Funkdiensten mit Frequenzsprungverfahren zu erfassen. Als Messgerät dient das kompakte *Selective Radiation Meter* SRM-3006 der Firma *Narda Safety Test Solutions*, um auch Mobilität für In-situ-Messungen zu gewährleisten [3].

## 2 Identifikation expositionsrelevanter Signalparameter

Ausgehend von den ICNIRP-Richtlinien [4], hat eine Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 2,4 bis 2,5 GHz eine primär

thermische Wirkung auf den menschlichen Organismus. Da die thermische Wirkung der Exposition neben anderen Faktoren direkt vom zeitlichen Mittelwert der Signalleistung abhängt, ist die korrekte messtechnische Erfassung dieser Größe besonders kritisch für die Entwicklung eines Immissionsmessverfahrens für Funkdienste im entsprechenden lizenzfreien ISM – Band (ISM – Industrial, scientific, medical). Viele Funkdienste konkurrieren dort um die begrenzten Ressourcen, weshalb einige wie Bluetooth oder verschiedene WLAN-Standards auf Frequenzsprungverfahren zur Verbesserung der Störanfälligkeit gegenüber frequenzselektiven Störern zurückgreifen. Im Folgenden werden einige relevante Signaleigenschaften von Bluetooth vorgestellt und deren Einfluss auf eine Immissionsbewertung analysiert.

## 2.1 Allgemeines über Bluetooth

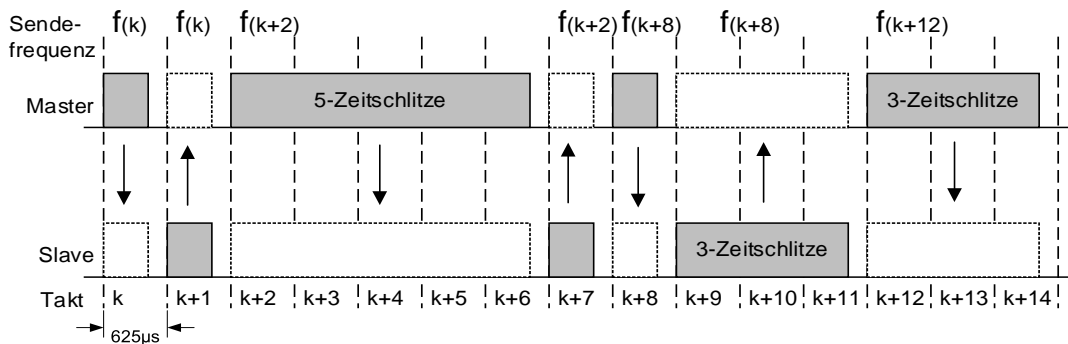
Bluetooth ermöglicht die drahtlose Kommunikation eines *Master*-Geräts mit einem oder mehreren *Slave*-Geräten. Der grundlegende Bluetooth-Standard wird von der *Bluetooth Special interest group* veröffentlicht und beinhaltet neben der Version *Basic Rate/Enhanced Data Rate* (BR/EDR) auch das neuere Konzept *Bluetooth Low Energy* (BLE) [5]. Letzteres wurde unter anderem für einen besonders geringen Energiebedarf im Sendefall entwickelt, weshalb entsprechend geringere Expositionswerte zu erwarten sind als bei der Basisversion. Tabelle 1 fasst grundlegende Kenndaten beider Standards zusammen, die anschließende Beschreibung beschränkt sich auf BR/EDR.

**Tabelle 1:** Übersicht technischer Signalparameter von Bluetooth [5]

	Basic Rate/Enhanced Data Rate	Bluetooth Low Energy
Frequenzbereich	2400 ... 2483,5 MHz	2400 ... 2483,5 MHz
Kanalanzahl	79	40
Signalbandbreite	1 MHz	2 MHz
Modulationsarten	GFSK, DPSK	GFSK
Sendeleistung (EIRP)	≤ +20 dBm, teilweise mit Leistungsregelung	
Kanalzugriff	Zeitduplex /-multiplex, Zeitschlitzlänge = 625 µs	

## 2.2 Das Frequenzsprungverfahren

Nach der Datenübertragung vom Master zum Slave und entsprechender Antwort kommt es zum Wechsel der Übertragungsfrequenz, bevor das nächste Paket versendet wird. Ein möglicher Ausschnitt des Zeitduplexschemas für zwei Teilnehmer ist in Abb. 1 dargestellt. Eine aktive Verbindung kann zeitversetzt alle 79 zur Verfügung stehenden Frequenzkanäle nutzen. Die Nutzung erfolgt dabei seriell, d.h. es ist immer nur ein Kanal zu einem Zeitpunkt in Verwendung. Bei spektralen Messungen mit Geräten, welche das Frequenzspektrum nicht gesamtheitlich erfassen, sondern stückweise auswerten, können diese Frequenzwechsel dazu führen, dass Signal- und Messfrequenz nicht übereinstimmen und ein Signal somit nicht detektiert wird. Entsprechend kann die Signalfrequenz bei einem Messdurchlauf auch mehrfach der Messfrequenz entsprechen und würde folglich als Vorhandensein mehrerer Signale fehlinterpretiert werden. Eine Immissionsbewertung an Hand dieser fehlerhaften Messdaten würde eine Unter- bzw. Überbewertung verursachen. Eine lückenlose Messung der Signalleistung wäre mittels Nachverfolgung der Signalfrequenz denkbar, dieses ist für externe Geräte allerdings nicht möglich, da die Kanalauswahl pseudozufällig und damit unvorhersehbar erfolgt. Ein übliches Vorgehen in der Immissionsmessung ist es, die Auflösungsbandbreite (RBW) größer als die Signalbandbreite zu wählen, um ein Signal vollständig zu erfassen und so ein Momentanwert der hochfrequenten Signalleistung erhalten.



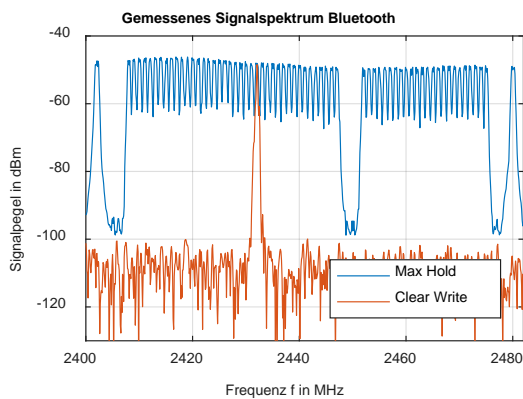
**Abb. 1:** Beispiel des Wechselschemas beim Frequenzsprungverfahren von Bluetooth. *Master* gibt die Trägerfrequenz  $f(k)$  an *Slave*, diese bleibt konstant, bis der *Master* erneut in Sendebetrieb wechselt. Die alternierende Sende-/Empfangsabfolge wird durch Pakete mehrerer Duplexschlitze verzögert, aber nicht unterbrochen, und richtet sich immer nach dem festen 625 µs-Raster [5].

Die notwendige Einstellung einer Auflösungsbandbreite von mindestens 79 MHz übersteigt jedoch die Möglichkeiten gängiger Spektrumanalysatoren (z.B. ESR7, Rohde&Schwarz) bei weitem. Abb. 2 zeigt ein mittels SRM-3006 gemessenes Frequenzspektrum einer typischen Bluetoothverbindung. Der *Max-Hold* Modus kann dabei genutzt werden, um über mehrere Messdurchläufe eine vollständige Abbildung des belegten Spektrums zu erhalten. Tatsächlich ist aber immer nur ein Träger aktiv, wie die orangefarbige Kurve bei nur einem Messdurchlauf des Analysators zeigt. Da alle Kanäle mit annähernd gleichem Maximalpegel abgestrahlt werden, trägt jeder Kanal zu gleichen Teilen zur mittleren Signalleistung bei und weitere Betrachtungen können ohne expliziten Verweis auf die Frequenz erfolgen.

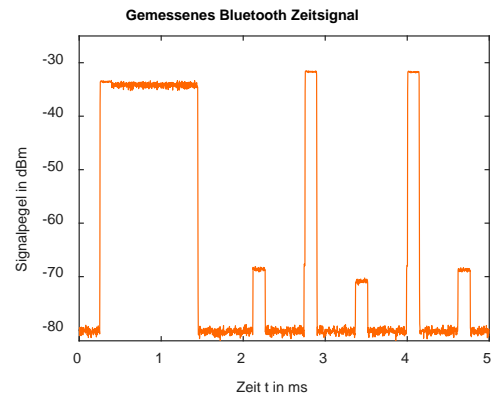
In Abb. 2 sind drei Bereiche erkennbar, in denen trotz der Messdauer von 5 s (ca. 2500 Messdurchläufe) kein Nutzsignal detektiert wurde. Ursache hierfür ist eine Besonderheit des Frequenzsprungverfahrens, nämlich dessen Anpassungsfähigkeit. Sie bewirkt, dass ein Kanal oder Frequenzbereich zeitweise ausgelassen wird, sollte eine unzureichende Verbindungsqualität zu den Teilnehmern festgestellt werden. Die Bewertung bezüglich der Verwendbarkeit wird für alle Kanäle in einer Kanalliste (engl. *channel map*) festgehalten und von den Teilnehmern aktualisiert. Bewertungskriterien können verschiedene Parameter wie beispielsweise die Bitfehlerrate sein [5]. Bei frequenzselektiven Messungen von Bluetooth wurden Zeiten bis zur Aktualisierung der *channel map* und Änderung der Kanalbelegung zwischen 30 s und 900 s beobachtet. Für Messzeiten kürzer als dieses Aktualisierungsintervall kann im Einzelfall von einer konstanten Kanalliste ausgegangen werden. Wegen des speziellen Auswahlalgorithmus konvergiert die Auftretshäufigkeit der Kanäle im Fall konstanter Kanalbelegung gegen eine Gleichverteilung, unabhängig von der Kanal Gesamtanzahl [6].

Das zugehörige Zeitsignal mit deutlich erkennbarer Rechteckpulsstruktur als Folge des Zeitduplexschemas ist in Abb. 3 dargestellt. Durch den dauerhaften Frequenzwechsel ist technisch bedingt nicht der gesamte Zeitschlitz von 625 µs belegt, sondern lediglich ein Teil davon zur Datenübertragung nutzbar (maximal 366 µs). Längere Pakete (bis ca. 2866 µs) entstehen mit der Zuordnung von 3 oder 5 benachbarten Zeitschlitzen zu einem Teilnehmer. Pakete über mehrere Zeitschlitze beeinflussen auch das Frequenzwechselschema, sodass die Sendefrequenz länger gehalten wird. Erst nach der vollständigen Übertragung eines Pakets erfolgt eine Änderung der Frequenz (vgl. Abb. 1).

Diese variierenden Paketlängen führen zum Teil zu starken Schwankungen des Tastverhältnisses (duty cycle) in der Beobachtungszeit von fünf Zeitschlitzen. Da das Tastverhältnis direkten Einfluss auf Signalleistung hat, sind sinnvolle Angaben nur zu deren Maximalwert oder zeitlichem Mittelwert möglich und entsprechend bei der Immissionsbewertung zu berücksichtigen.



**Abb. 2:** Das gemessene Frequenzspektrum zeigt im *Max-Hold* (blau) mehrerer Messdurchläufe alle beim Frequenzsprungverfahren genutzten Kanäle. Nicht aktive Kanäle sind als Lücken erkennbar. Der Modus *Clear Write* (orangefarbene Kurve) zeigt, dass immer nur ein Kanal aktiv genutzt wird.



**Abb. 3:** Im Zeitsignal sind verschiedene Paketlängen erkennbar. Das erste Paket belegt 3 Zeitschlitz, ab 2 ms tritt ein Zeitduplex mit einfacher Schlitzlänge (625  $\mu$ s) auf. Unterschiedliche Signalpegel erlauben hierbei eine Zuordnung zu den beiden Verbindungsteilnehmern.

### 3 Eignung des Messgeräts

Um die Eignung des Messgeräts SRM- 3006 für die Expositionsbestimmung von Bluetoothdiensten sowohl qualitativ als auch quantitativ zu bewerten, wurden die identifizierten Signaleigenschaften mit Hilfe von kommerziellen Signalgeneratoren nachgebildet und gewonnene Messwerte mit den definierten Eingangssignalen verglichen. Folgende Messmodi sind dabei relevant:

- *Spectrum Analysis* zur Auswertung des Frequenzspektrums, das abschnittsweise durch Fouriertransformation des abgetasteten Zeitsignals gewonnen wird; Länge und Anzahl dieser Abschnitte werden gerätintern festgelegt, sodass die Möglichkeit zur Nichtdetektion von Signalen mit Frequenzsprungverfahren entsteht.
- *Scope*, um Zeitverläufe von Signalen in Echtzeit zu erfassen; Auflösungsbandbreite (maximal 32 MHz) und Messfrequenz sind während der Messung konstant
- *Level Recorder* liefert bei lückenloser Messung Spitzen- und Leistungsmittelwerte bei konstanter Auflösungsbandbreite (max. 32 Hz) und Messfrequenz, ohne weitere Auflösung oder Darstellung des Messsignals

Da die Modulation, insbesondere die verwendete Phasendifferenz-Modulation (DPSK), einen signifikanten Crest-Faktor aufweisen kann, ist unabhängig vom Messmodus ein RMS-Detektor bzw. einer leistungsbezogenen Messdatenauswertung erforderlich. Andere Detektoren würden eine Überbewertung der Signalleistung bewirken.

Anderer Eigenschaften, wie die wechselnde Signalfrequenz können durch eine deterministische, ungeordnete Frequenzliste im Generator nachgestellt werden. Die Listeneinträge enthalten Informationen zu Signalfrequenz/-pegel am Generatorausgang und werden im eingestellten Zeitraster (hier 625  $\mu$ s) abgearbeitet. Jede Frequenz ist nur in einem Eintrag enthalten, wodurch ein periodischer Listendurchlauf zur gleichverteilten Auftretshäufigkeit wie bei Bluetooth führt. Das Umschalten der Signalfrequenz erzeugt wie bei Bluetooth zwangsweise Signalpausen, wie Abb. 4 und 5 für das Generatorsignal im Frequenz- und Zeitbereich zeigen. Beeinflussungen durch Mehrwegeausbreitungen wurden vermieden, indem leitungsgebunden gemessen wurde. Im Messmodus *Level Recorder* wurden zuverlässig der vom Generator erzeugte Spitzenwert (PK) und der

Leistungsmittelwert (RMS) entsprechend des Tastverhältnisses erfasst; alle eingestellten Trägerfrequenzen lagen dabei innerhalb der gewählten Auflösungsbandbreite.

Um auch das Verhalten zu untersuchen, wenn das Signal zeitweise außerhalb des Messbereichs liegt, wurde anschließend die Mittenfrequenz des Analysefilters bei konstanter Auflösungsbandbreite verändert.

Auch dabei wird der korrekte PK-Wert ( $P_{\text{Gen}} = -30\text{dBm}$ ) entsprechend der Einstellungen am Signalgenerator detektiert, solange mindestens ein Kanal vollständig innerhalb des Messfilterbereichs liegt. Das Ergebnis ist sowohl unabhängig von der Kanalanzahl im Messbereich  $n$ , als auch von der Gesamtzahl aktiver Kanäle  $m$ .

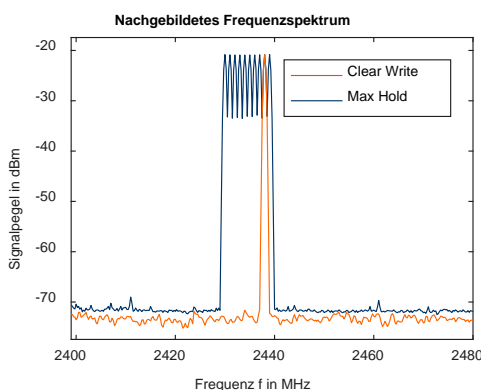
Im Gegensatz dazu ist der RMS-Messwert stark vom Verhältnis der Zahl der detektierbaren zu Gesamtzahl der Kanäle abhängig. Der angezeigte Leistungswert entspricht nur dann dem tatsächlichen Leistungsmittelwert des Signals, wenn alle Frequenzanteile vollständig erfasst werden. Aktive Trägerfrequenzen außerhalb des Messfilterbereichs liefern keinen Beitrag zur Messung und verursachen eine Unterbewertung der Signalleistung durch den RMS-Anzeigewert des SRM-3006. Dieser Effekt würde durch die große Systembandbreite von Bluetooth bei Immissionsmessungen ebenfalls auftreten. Bei Kenntnis der Auflösungsbandbreite und der Gesamtbandbreite des Signals kann eine fehlende Messbandbreite jedoch mittels Quotient aus Signalbandbreite und Rauschbandbreite des Messfilters rechnerisch korrigiert werden [7]. Bei Bluetooth ist diese Methode in ähnlicher Weise anwendbar, da die Kanäle mit gleicher Leistung belegt werden und somit zu gleichen Teilen zur mittleren Signalleistung beitragen. Die diskrete Aufteilung der Bandbreite in Kanäle ermöglicht der Korrekturfaktor  $\delta$  in dB direkt aus  $n$  und  $m$ :

$$\delta = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{n}{m}\right) \quad (1)$$

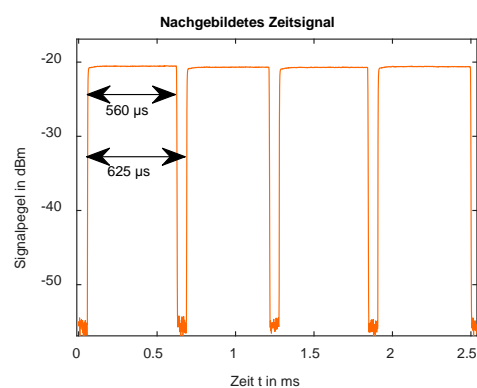
Die entsprechende, korrigierte mittlere Signalleistung  $P_{\text{RMS,Signal}}$  in dBm wird aus der gemessenen mittleren Signalleistung  $P_{\text{RMS,Messwert}}$  in dBm bestimmt:

$$P_{\text{RMS,Signal}} = P_{\text{RMS,Messwert}} - \delta \quad (2)$$

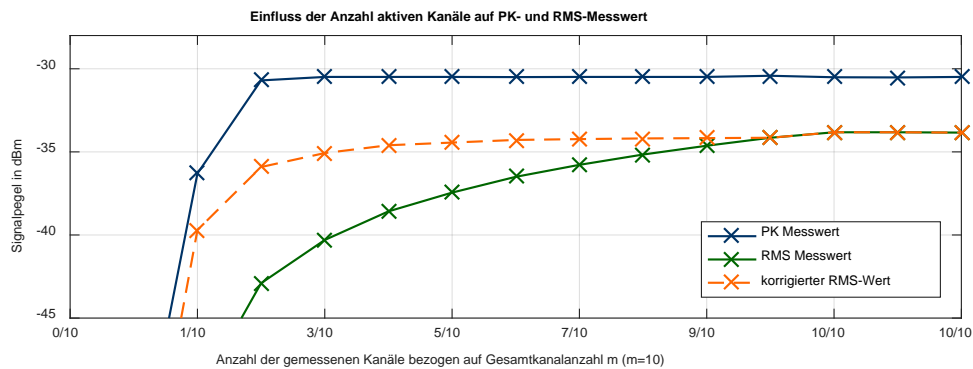
Abb. 6 zeigt das Ergebnis einer Messung für PK- und RMS-Werte bei verschiedenen Verhältnissen von  $n$  zu  $m$ . Der mittels  $\delta$  korrigierte Leistungswert ist ebenfalls dargestellt und zeigt ist unabhängig von der gemessenen Kanalanzahl. Einfluss hat somit nur noch das Tastverhältnis, welches Einfluss auf den Abstand von Leistungsmittelwert und Spitzenwertkurve hat, jedoch nicht direkt messbar ist.



**Abb. 4:** Frequenzspektrum des für Testmessungen generierten Signals. Wie bei Bluetooth ist nur ein Träger zeitgleich aktiv. Im *Max Hold* sind 10 seriell generierten Frequenzkanäle erkennbar (2430...2439 MHz mit 1 MHz Kanal-abstand).



**Abb. 5:** Mittels Signalgenerator erzeugtes Zeitsignal; die Auflösungsbandbreite ist entsprechend groß gewählt, sodass alle Trägerfrequenzen erfasst werden und ein lückenloses, periodisches Zeitsignal entsteht.



**Abb. 6:** Gemessener Signalpegel als Funktion des Verhältnisses aus gemessenen Kanälen  $n$  zu allen aktiven Kanälen  $m$ . Der Spitzenwert (PK - blau) ist konstant, unabhängig von der Kanalanzahl; der PK-Wert bei 1/10 ist 6 dB geringer als die übrigen Werte, da dieser genau auf die 6 dB-Grenzfrequenz des Messfilters fällt. Leistungsmittelwert (RMS - grün) ist stark abhängig von der Anzahl der erfassten Kanäle und steigt stetig, bis alle Kanäle innerhalb des Filters liegen. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors  $\delta$  lässt sich diese Abhängigkeit deutlich reduzieren (orange), sodass die tatsächliche mittlere Signalleistung ermittelt werden kann, ohne alle Kanäle explizit zu messen [8].

## 4 Immissionsmessungen

Im Weiteren werden anhand der Signaleigenschaften Messkonzepte für die augenblickliche Immission (Momentanimmission) und die Immission bei maximal möglicher Auslastung (Maximalimmission) vorgestellt.

### 4.1 Momentanimmission

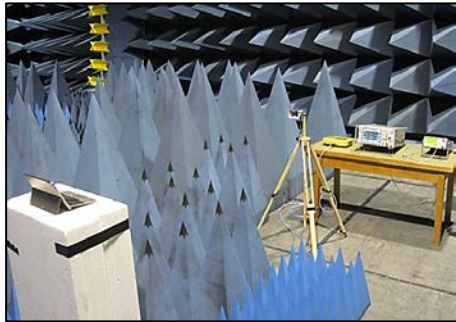
Aufbauend auf Gl. 2 kann aus RMS-Messwerten bei beliebiger Kanalnutzung die Momentanimmission im *Level Recorder* Modus bestimmt werden. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der für Gl. 1 notwendigen Parameter zur Kanalnutzung  $n$  und  $m$ .

Der Korrekturfaktor  $\delta$  ist dabei nur dann zutreffend, wenn jeder Kanal gleich viel Leistung überträgt. Um die notwendige gleichverteilte Auftretshäufigkeit der Frequenzkanäle annehmen zu können, muss eine hinreichend große Anzahl von Frequenzwechseln stattfinden. In [6] wurde gezeigt, dass dieses bereits nach einer Zeitdauer von 6 s gegeben ist, weshalb 6 s als Mittelungszeit gewählt wird. Diese Mittelung verringert zudem den Einfluss von Tastverhältnisschwankungen auf die Messung wodurch Messwerte typisch nur im Bereich von  $\pm 0,5$  dB variieren. Durch Vergleich des Spektrums vor Beginn und nach Ende der Leistungsmessung kann eine konstante Kanalverteilung für die Dauer der Messung überprüft werden, die für die Gültigkeit von  $\delta$  notwendig ist.

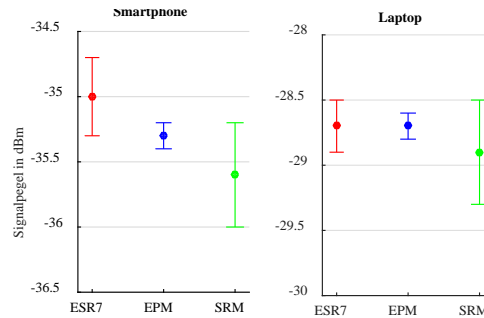
Im Experiment wurden Immissionsmessungen einer typischen Bluetoothverbindung zwischen Smartphone (*Samsung Galaxy A3*) und Laptop (*Asus Transformer Book*) durchgeführt und mit Referenzwerten verglichen. Als Referenz dienten dabei zum einen die *Bandpower* eines Messempfängers (ESR 7 Rohde & Schwarz) und ein Leistungsmessgerät mit thermischem Messkopf (EPM 441A und 8482A, HP) nach [2]. Als Empfangsantenne wurde eine Doppelsteghornantenne (Typ BBHA 9120 C, Schwarzbeck) im Abstand von 3 m zum Messobjekt verwendet. Das für die Bluetoothverbindung notwendige zweite Endgerät wurde in größerem Abstand (5 m) zur Messantenne aufgestellt und die Sichtverbindung zwischen beiden mit Pyramidenabsorbieren verhindert, um möglichst nur Signalleistung des zu untersuchenden Bluetoothgeräts zu erfassen. Zum Relativvergleich wurden die Messgerät nacheinander mit der Antenne verbunden, ohne den weiteren Aufbau zu verändern. Störeinflüsse durch

weitere Funkquellen und Reflexionen wurden vermieden indem die Messungen in einer Absorberkammer stattfanden [9]. Abb. 7 zeigt den prinzipiellen Messaufbau, während Abb. 8 die Ergebnisse der drei Messverfahren gegenübergestellt.

Bei der Messung von Absolutwerten ist es nicht wie für den Vergleich zwischen den Messgeräten ausreichend eine Polarisationsebene zu messen. Mit einer näherungsweise isotropen Antenne des SRM-3006 kann die E-Feldstärke in drei Feldebeneen seriell gemessen werden. Die Signalleistung wird dann unabhängig von der Ausrichtung des E-Feld-Vektors im Raum durch leistungsmäßige Summation der Achsenbeiträge bestimmt.



**Abb. 7** Messaufbau in geschirmter Halbabsorberkammer; zur Vergleichbarkeit wurde eine Antenne für alle drei Messgeräte verwendet, indem diese nacheinander an jedes Messgerät angeschlossen wurde, ohne die Messanordnung zu verändern [8].



**Abb. 8** Messergebnisse der mittleren Signalleistung für zwei Testobjekte bei gleicher Mittelungszahl mit verschiedenen Messgeräten (ESR 7; EPM...thermischer Leistungsmesskopf; SRM). Die angezeigten Schwankungsintervalle bis zu  $\pm 0,5$  dB entstehen durch Variationen im Tastverhältnisses [8].

## 4.2 Maximalimmission

Die Maximalimmission stellt die Obergrenze der Immission dar, entsprechend ist die größtmögliche Signalleistung zu berücksichtigen. Wie erwähnt hat das Tastverhältnis Einfluss auf den Abstand zwischen Spitzen- und mittleren Leistungswert des Signals. Sein Maximum erreicht es bei Bluetooth im Fall einer Aneinanderreihung der längsten, möglichen Pakete. Im Zeitsignals können diese leicht als 1-, 3- oder 5-Schlitzpakete voneinander unterschieden werden, woraus sich das entsprechende maximale Tastverhältnis ableitet. Die Maximalimmission kann somit durch Verringerung des Signalspitzenwert um das festgestellte maximale Tastverhältnis ermittelt werden. Wie gezeigt wurde, tritt der gleiche Spitzenwert bei allen Kanälen auf, es ist somit ausreichend den Spitzenwert eines aktiven Kanals zu messen. Abhängig von der maximalen zulässigen Sendeleistung eines Bluetoothgeräts kann eine Sendeleistungssteuerung notwendig sein, wodurch sich ein weiterer Einflussfaktor für die Maximalimmission ergibt. In den durchgeführten Messungen wurde der Funkkanal zwischen den Endgeräten gezielt durch Hochfrequenzabsorber verschlechtert, um die maximale Sendeleistung statt des Verbindungsabbruchs zu provozieren. Die so erreichte Messwerte konnten  $\pm 0,5$  dB Variation reproduziert werden und lagen damit im Bereich der typischen Messunsicherheit ( $< \pm 1,2$  dB) des SRM-3006 [3].

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Obwohl Funkgeräte mit Frequenzsprungverfahren im Alltag allgegenwärtig sind und einen signifikanten Teil zur individuellen Gesamtimmission beitragen können, existierte bisher

noch kein etabliertes Immissionsmessverfahren. Diese Lücke wird mit vorliegendem Beitrag geschlossen, in dem anhand detaillierter Signaluntersuchungen solche Verfahren zur Bestimmung der momentanen und maximalen Immission von Bluetooth als typischer Vertreter von Funkdiensten mit Frequenzsprungverfahren beschrieben wurden. Auf Basis des Messgerätes Narda SRM-3006 kann durch rechnerische Korrektur des Spitzenwerts auf das maximale Tastverhältnis die Maximalimmission bestimmt werden. Obwohl die Schwierigkeit besteht, in realen Szenarien die maximale Sendeleistung einiger Bluetoothgeräte eindeutig zu identifizieren, konnte im Laborversuch die maximale Sendeleistung durch Erhöhung der Pfaddämpfung der Testverbindung erreicht werden. Durch Einführung eines Korrekturfaktors  $\delta$  kann die Momentanimmission zuverlässig aus der Messung eines Teilspektrums ermittelt werden, was in Kombination mit der Mobilität des Messgeräts Untersuchungen realer Expositionsszenarien erlaubt.

Beide Methoden wurden in Messungen an verschiedenen Endgeräten getestet, wovon zwei vorgestellt wurden. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Reproduzierbarkeit und Genauigkeit. Der vorliegende Beitrag stellt damit ein neues, funkdienstspezifisches Messverfahren bereit, um konsistente und quantitativ zuverlässige Expositionsmessungen von Funkdiensten wie Bluetooth durchzuführen, die Frequenzsprungverfahren nutzen.

### **Danksagung**

Das hier beschriebene Vorhaben wurde im Rahmen von 2015 FGR 0088 durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Freistaates Thüringen und des Europäischen Sozialfonds gefördert.

### **Literaturangaben**

- [1] C. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek: Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 2013
- [2] G. Schmid et al.: Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren im Haushalt und Büro, Zweiter Zwischenbericht, Deutsches Mobilfunkforschungsprogramm, 2004
- [3] Narda Safety Test Solutions GmbH: Operating Manual SRM-3006, [www.narda-sts.com](http://www.narda-sts.com)
- [4] ICNIRP Guidelines, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Physics, vol. 74 no. 4, 1998, S. 494-522
- [5] Bluetooth Special Interest Group: Bluetooth Core Specification v5.0, [www.bluetooth.com](http://www.bluetooth.com)
- [6] K. Morsi, X. Huagang, G. Qiang: Performance estimation and evaluation of Bluetooth frequency hop-ping selection kernel, *Joint Conferences on Pervasive Computing (JCPC)*, Taipei, 2009, S. 461-466
- [7] Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post: Reg TP MV 09/EMF/3 Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärke; <http://emf3.bundesnetzagentur.de>, 2003
- [8] W. Hofmann: Untersuchungen zur hochfrequenten elektromagnetischen Exposition von Personen in alltagstypischen Szenarien, TU Ilmenau, 2017
- [9] M. A. Hein et al., "Emulation of virtual radio environments for realistic end-to-end testing for intelligent traffic systems," *2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, Heidelberg, 2015, S. 1-4