

Beeinflussung von WLAN-Verbindungen durch ISM-Anwendungen

M.Sc. Henrik Brech, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Leibniz Universität Hannover, Deutschland

Dipl.-Ing. Frank Deter, Miele & Cie. KG, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Leibniz Universität Hannover, Deutschland

1 Einleitung

Die Kommunikation in Form drahtloser, digitaler Datenübermittlung nimmt in der modernen Gesellschaft einen immer größer werdenden Stellenwert ein und wird stetig weiterentwickelt. Viele Kommunikationsstandards, wie beispielsweise IEEE 802.11, IEEE 802.15 und ANT, nutzen den Frequenzbereich der sogenannten ISM-Bänder. Diese Frequenzbänder wurden aber ursprünglich extra dafür festgelegt, dass hier Geräte Hochfrequenz ohne Rücksicht auf etwaige Funkstörungen anwenden können. Deshalb müssen Funkdienste wie beispielsweise WLAN im ISM Frequenzbereich zwischen 2400 MHz und 2500 MHz eigentlich Störungen durch ISM-Geräte hinnehmen (siehe hierzu [1]). Inzwischen hat sich allerdings die WLAN-Nutzung in diesem Frequenzbereich so weit verbreitet, dass es sinnvoll ist, die Verträglichkeit mit typischen ISM-Geräten wie beispielsweise einem Mikrowellengerät (MWG) zu untersuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte eine Messmethode entwickelt werden, welche

- a) die Beeinflussung einer WLAN-Kommunikation durch ein ISM-Gerät mit hoher Reproduzierbarkeit quantifiziert und
- b) innerhalb einer relativ kurzen Messzeit belastbare Ergebnisse erzeugt.

Diese kurze Zeitspanne ist notwendig, damit das Messverfahren in einen Entwicklungsprozess eingebunden werden kann. Das neue Verfahren, als Ablaufdiagramm dargestellt in Bild 1, beinhaltet eine Voruntersuchung mit anschließender Überprüfung der Übertragungseigenschaften und eine Hauptuntersuchung.



Bild 1: Schematischer Ablauf Messverfahren

2 Voruntersuchung

Der erste Schritt des Messverfahrens wird Voruntersuchung genannt. Anhand der gemessenen Störemission in verschiedenen Ausrichtungen des MWG werden in der Voruntersuchung mehrere Kombinationen aus WLAN-Übertragungskanal und Ausrichtung des MWG ermittelt, welche für die Hauptuntersuchung genutzt werden. Im Folgenden wird der dafür genutzte Messaufbau und das Vorgehen beschrieben sowie eine Eignung der gewählten Kombinationen durchgeführt.

2.1 Messaufbau Voruntersuchung

Die Möglichkeit zur Erfassung der Störemission eines MWG ist ein wichtiger Bestandteil der quantitativen Beurteilung ihres Störeinflusses. Die Anzahl der Einflussfaktoren auf die Störemission eines MWG sind vielfältig. Ein geeigneter Messaufbau zur Detektion ist somit

unverzichtbar und schematisch in Bild 2 dargestellt. Die verwendete Monopolanterne ist für den Versuchsaufbau gefertigt worden und wird auf dem Boden der GTEM-Zelle nahe dem Apex platziert. Sie besitzt eine auf das 2,4 GHz-ISM-Band abgestimmte $\frac{\lambda}{4}$ -Resonanz. Das MWG wird auf einem Drehteller positioniert, um die Ausrichtung automatisch ändern zu können, wie von Menßen et al. in [2] vorgestellt. Aufgrund der hohen Dynamik von Störemissionsausstrahlungen von MWG wird zur Detektion ein Echtzeitspektrumanalysator verwendet. In Bild 3 ist eine beispielhafte Störemissionsmessung eines MWG im Betrieb, unter Verwendung des Average-Detektors, dargestellt. Um die Komplexität und das zeitliche Verhalten der Störemission eines MWG im Betrieb zu verdeutlichen, ist in Bild 4 zusätzlich ein beispielhaftes Wasserfalldiagramm dargestellt.

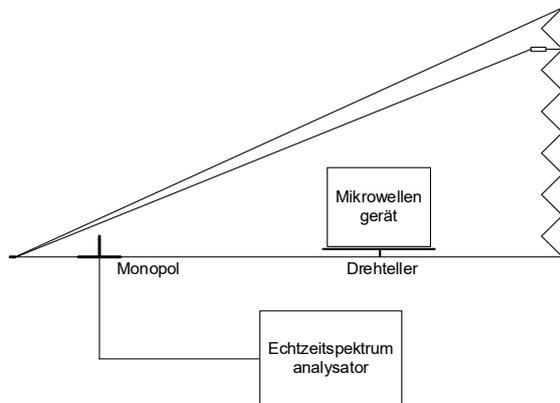


Bild 2: Aufbau Störemissionsmessung

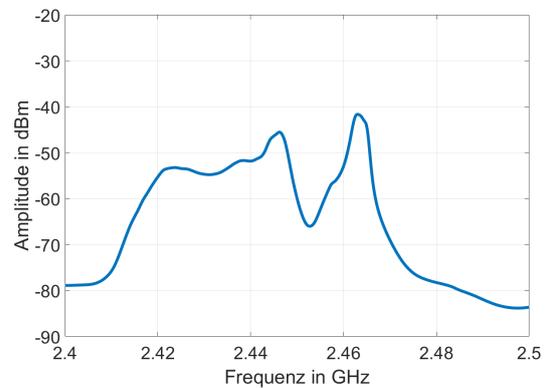


Bild 3: Beispiel einer Störemissionsmessung

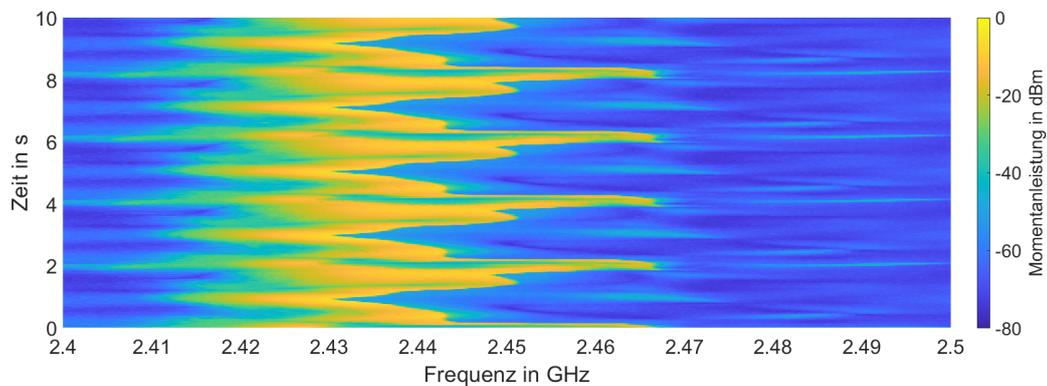


Bild 4: Beispielhaftes Wasserfalldiagramm eines MWG im Betrieb

Im Laufe der Untersuchungen wurden mehrere Einflussfaktoren auf die Störemission beobachtet. Die Form und Position der Wasserlast im Innenraum des MWG, die Feldenergie in thermische Energie umwandelt, besitzt einen Einfluss auf die gemessene Störemission. Aus diesem Grund wird ein Normbehälter mit einem Inhalt von einem Liter Wasser, wie in [3] beschrieben, verwendet. Die Position im Innenraum wird markiert, um beim Wechseln des Wassers reproduzierbar zu sein. Die Voruntersuchung wird mit niedriger Leistungsstufe des MWG durchgeführt, um einen Tausch der Wasserlast während der Durchführung und daraus resultierende Unsicherheiten der Messergebnisse zu vermeiden. Mit Hilfe des Messaufbaus zur Störemissionsdetektion lässt sich eine erste qualitative Abschätzung der Störemission eines MWG geben. Der Aufbau zur Störemissionsmessung wird im weiteren Verlauf zur Voruntersuchung im vorgestellten Messverfahren genutzt.

2.2 Auswahl zu untersuchender Kombinationen

Die Voruntersuchung ermittelt anhand der Störemission des MWG drei Kombinationen aus WLAN-Übertragungskanal und Ausrichtung des MWG zur weiteren Untersuchung. Die Störemission des MWG wird im Betrieb in 10°-Schritten von 90° bis -90° variiert, wobei 0° die Ausrichtung der Tür des MWG frontal zum Apex repräsentiert. In jeder Position wird die Störemission über eine Zeit von ca. 25 s mit dem Echtzeitspektrumanalysator mit Average-Detektor gemessen. Diese Zeit ist notwendig, um ausreichend viele Perioden des in Bild 4 zu erkennenden, sich wiederholenden Störemissionsmusters zu erfassen und einen verlässlichen Mittelwert zu erhalten. Insgesamt werden somit die spektralen Störemissionen für 19 Ausrichtungen ermittelt. Anschließend wird für jede der 19 spektralen Störemissionen die durchschnittliche Störleistung für jeden der 13 WLAN-Kanäle ermittelt. Dazu wird die lineare Leistung innerhalb der Bandbreite des WLAN Kanals wie folgt berechnet:

$$P_{\text{lin,Kanal } n} = \sum_{i=f_{\text{uG},n}}^{f_{\text{oG},n}} P_{\text{lin},i} \quad 1 \leq n \leq 13$$

Dabei stellt $f_{\text{uG},n}$ die untere und $f_{\text{oG},n}$ die obere Grenzfrequenz des WLAN-Kanals n dar. Das Ergebnis der Voruntersuchung ist somit eine 13×19-Matrix, die im Folgenden als Ausrichtungs-Kanal-Matrix bezeichnet wird. Aus dieser Ausrichtungs-Kanal-Matrix werden drei Kombinationen aus Ausrichtung und WLAN-Kanal ermittelt, die in der Hauptuntersuchung vermessen werden:

- 1) Worst Angle Channel Combination (WACC):
Das absolute Störleistungsmaximum der gesamten Ausrichtungs-Kanal-Matrix; repräsentiert den „Worst Case“ für die Störung einer WLAN-Verbindung
- 2) Median Angle Channel Combination (MACC):
Der Median aller Störleistungen der Ausrichtungs-Kanal-Matrix; repräsentiert die statistisch wahrscheinlichste Kombination aus Ausrichtung und WLAN-Kanal
- 3) Best Mean Channel Worst Angle (BMCWA):
Ermittlung des WLAN-Kanals mit geringster durchschnittlicher Störleistung, anschließend Ermittlung der Ausrichtung mit maximaler Störleistung für diesen Kanal; entspricht dem „Worst Case“ bei empfohlenem WLAN-Kanal

2.3 Eignungsprüfung ausgewählter Kombinationen mittels Transmissionsmessung

Durch die Beladung der GTEM-Zelle mit einem MWG kann die Wellenausbreitung innerhalb der GTEM-Zelle beeinflusst werden. In einigen Fällen kann es zu einer so starken Beeinflussung kommen, dass einige WLAN-Kanäle nicht mehr zur Übertragung eines Signals geeignet sind. Diese Beeinflussung ist abhängig von der Ausrichtung des MWG. Der schematische Aufbau zur Transmissionsmessung ist in Bild 5 dargestellt.

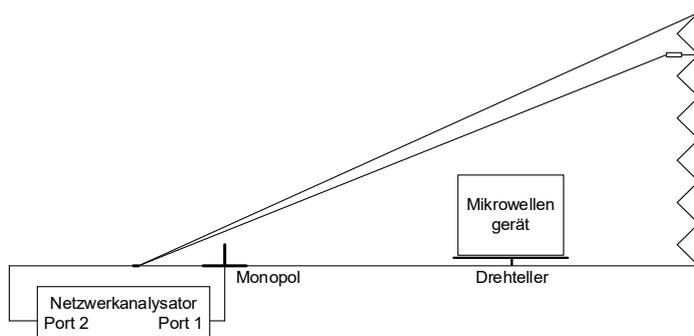


Bild 5: Aufbau Transmissionsmessung

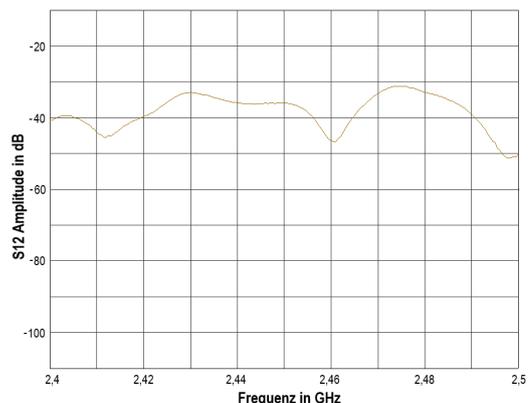


Bild 6: Beispiel für S_{12} -Parametermessung

Zwischen dem Apex der GTEM-Zelle und der Monopolantenne wird ein Netzwerkanalysator angeschlossen, das MWG befindet sich weiterhin in der zu untersuchenden Ausrichtung auf dem Drehteller, ist jedoch nicht in Betrieb. Die Transmissionsmessung anhand der Amplitude des S_{12} -Parameters für den Frequenzbereich von 2,4 GHz bis 2,5 GHz gibt Aufschluss über die Eignung als Übertragungsstrecke für ein WLAN-Signal. Starke Schwankungen des S_{12} -Parameters im gewählten WLAN-Kanal führen zur Unbrauchbarkeit als Übertragungsstrecke. Häufig reichen kleine Änderungen der Ausrichtung des MWG auf dem Drehteller, um wieder eine fehlerfreie Übertragung zu ermöglichen. Eine beispielhafte Messung der Amplitude des S_{12} -Parameters ist in Bild 6 dargestellt.

Zur Beurteilung des Einflusses auf die Übertragungseigenschaften wurde ein Kriterium definiert, welches für jede gewählte Kombination überprüft wird. Ist die Schwankung der Amplitude des S_{12} -Parameters innerhalb des gewählten WLAN-Kanals kleiner als 10 dB, so eignet sich diese Kombination für die weitere Nutzung. Wird das Kriterium nicht erfüllt, so wird die Ausrichtung des MWG um 1° variiert und eine erneute Überprüfung durchgeführt. Dieses Vorgehen wird so lange durchgeführt, bis für die Kombination das Kriterium erfüllt ist.

3 Hauptuntersuchung

Nach dem Abschluss der Voruntersuchung wurden drei Kombinationen aus WLAN-Kanal und Ausrichtung des MWG gewählt. Für diese drei Kombinationen wird eine WLAN-Übertragungsstrecke bezüglich ihrer Störfestigkeit untersucht.

3.1 Messaufbau Hauptuntersuchung

Die Untersuchung der Störfestigkeit einer WLAN-Verbindung benötigt einen angepassten Messaufbau. Der schematische Aufbau zur Störfestigkeitsmessung ist in Bild 7 dargestellt. Das MWG auf dem Drehteller sowie die Monopolantenne nahe des Apex werden aus dem Aufbau zur Störemissionsmessung beibehalten. Der Apex ist mit einem WLAN-Modul als Sender verbunden, welches ein kabelgebundenes Signal erzeugt. Ein Dämpfungsglied im Signalpfad ermöglicht die Variation der Signalamplitude. An die Monopolantenne ist ein weiteres WLAN-Modul angeschlossen, welches als Empfänger des WLAN-Signals agiert.

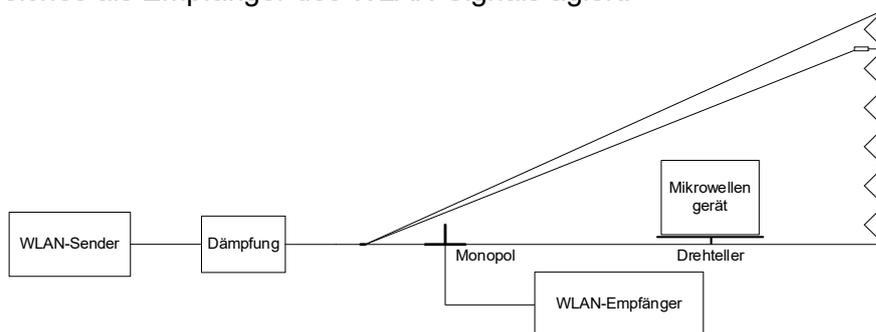


Bild 7: Aufbau Störfestigkeitsmessung

Das Grundprinzip der Störfestigkeitsmessung ist die Überlagerung der Störemission des MWG mit dem WLAN-Signal an der Monopolantenne. Die WLAN-Verbindung ist unidirektional und der WLAN-Kanal statisch. Der WLAN-Sender erzeugt eine feste Anzahl an WLAN-Datenpaketen auf einem zuvor definierten WLAN-Kanal. Der WLAN-Empfänger „horcht“ auf demselben WLAN-Kanal und detektiert die Anzahl der korrekt empfangenen WLAN-Pakete. Die Packet Error Rate (PER) wird anschließend wie folgt bestimmt:

$$\text{PER} = \frac{\text{Anzahl gesendeter Pakete} - \text{Anzahl fehlerfrei empfangener Pakete}}{\text{Anzahl gesendeter Pakete}}$$

Die PER eignet sich bei paketbasierter Übertragung gegenüber der Bit Error Rate (BER) als Kriterium zur Störfestigkeitsuntersuchung, da die PER Aufschluss darüber gibt, ob die Informationsübertragung unter Störeinfluss möglich ist. Die Interpretation der PER in der realen Welt ist jedoch anwendungsabhängig. Bei der Nutzung der BER ist der Störeinfluss u. a. abhängig von den genutzten Fehlerkorrekturalgorithmen.

Die Störfestigkeit des WLAN-Signals ist abhängig von der Modulationsart des Signals und somit dem genutzten Standard. Die zahlreichen IEEE 802.11-Standards bieten eine breite Auswahl, jedoch ist die einheitliche Nutzung einer Übertragungsform wichtig, wenn beispielsweise eine Vergleichbarkeit bei der Untersuchung verschiedener MWG gewährleistet werden soll. Gewählt wurden WLAN-Datenpakete nach dem IEEE 802.11n-Standard [4] mit dem Modulation Coding Scheme 5 (MCS5). Für die Übertragung wird eine Kanal-Bandbreite von 20 MHz genutzt, der Datenstrom wird nach dem Orthogonalen Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) in mehrere Subträger aufgeteilt und die Symbole mit einer 64-Quadraturamplitudenmodulation (64-QAM) moduliert. Theoretisch ist somit eine Übertragungsgeschwindigkeit von 52 Mbit/s möglich. Jedes Datenpaket besitzt einen Informationsgehalt von 100 Byte.

3.2 Ablauf Hauptuntersuchung

Nachdem in der Voruntersuchung die zu untersuchenden Kombinationen WACC, MACC und BMCWA ermittelt wurden und anschließend die Überprüfung der Übertragungseigenschaften durchgeführt wurde, erfolgt der zentrale Teil der Untersuchung der Störfestigkeit der WLAN-Verbindung. Das Vorgehen bei der Untersuchung zwischen den Kombinationen WACC, MACC und BMCWA unterscheidet sich nur in der Ausrichtung des MWG und der Wahl des WLAN-Kanals und wird im Folgenden beschrieben:

1. Die in der Voruntersuchung ermittelte Ausrichtung des MWG wird angefahren und WLAN-Sender und –Empfänger auf den zugehörigen WLAN-Kanal eingestellt.
2. Es wird eine Referenz-PER-Messung bei ausgeschaltetem MWG durchgeführt. Dazu werden 50000 WLAN-Datenpakete übersendet. Anschließend wird die Dämpfung um 10 dB erhöht. Diese Messung wird fortgesetzt, bis eine PER von 100 % erreicht ist.
3. Das MWG wird bei niedriger Leistungsstufe (300 W oder nächstgelegene) in Betrieb genommen. Während des Betriebs werden bei einer Dämpfung von 0 dB 50000 WLAN-Datenpakete übertragen, was in etwa 25 Sekunden benötigt. Anschließend werden erneut 50000 WLAN-Datenpakete bei 0 dB übertragen, um eine reproduzierbare Messung zu gewährleisten. Dies wird im Anschluss ebenfalls für die Dämpfungen 10 dB, 20 dB, 30 dB und 40 dB durchgeführt.
4. Die Messergebnisse werden als PER über der Dämpfung des WLAN-Signals aufgetragen. Somit entsteht ein Graph der Referenz-PER-Messung, der die optimale PER ohne Störeinfluss des MWG darstellt. Die PER bei Mikrowellenbetrieb wird aufgrund der doppelten Durchführung der WLAN-Paketübertragung als zwei Graphen dargestellt. Ein Beispiel für die Darstellung der Messergebnisse wird in Bild 8 aufgezeigt. Die Referenz-PER-Messung aus Schritt 2 ist gestrichelt und die PER-Messung bei Mikrowellenbetrieb aus Schritt 3 ist in Form von zwei Graphen dargestellt, anhand derer sich die Reproduzierbarkeit überprüfen lässt.
5. Die Schritte 3 und 4 werden für die für die mittlere Leistungsstufe (600 W oder nächstgelegene) wiederholt, um den Einfluss einer höheren Leistungsstufe auf die Beeinflussung der WLAN-Verbindung zu ermitteln.

Dieses Vorgehen wird für alle Kombinationen WACC, MACC und BMCWA angewendet.

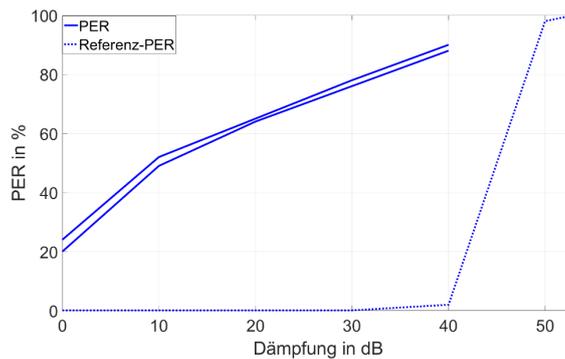


Bild 8: Beispiel der grafischen Darstellung der Messergebnisse

4 Vergleichsmessung zweier Mikrowellengeräte

Das zuvor vorgestellte Messverfahren soll nun anhand der Gegenüberstellung zweier Mikrowellengeräte verdeutlicht werden. Es werden die Messergebnisse aller Kombinationen WACC, MACC und BMCWA in den Leistungsstufen niedrig und mittel dargestellt. Die Messergebnisse der ersten Kombination WACC sind in Bild 9 bzw. Bild 10 dargestellt. Die Messergebnisse für MWG 1 sind in blau und die Messergebnisse für MWG 2 in rot angegeben. Für beide Leistungsstufen ist ein ähnliches Verhalten erkennbar, wobei die mittlere Leistungsstufe jeweils höhere PERs hervorruft. Außer bei ungedämpftem WLAN-Signal ist die von MWG 2 hervorgerufene PER deutlich höher als die durch MWG 2 erzeugte PER. In der Gesamtbetrachtung für die Kombination WACC lässt sich somit ein geringerer Einfluss von MWG 1 auf die WLAN-Verbindung beobachten.

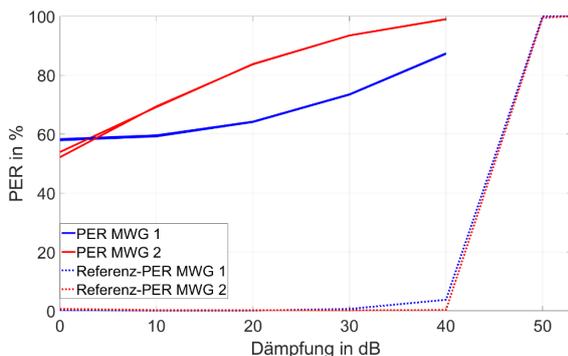


Bild 9: WACC Leistungsstufe niedrig

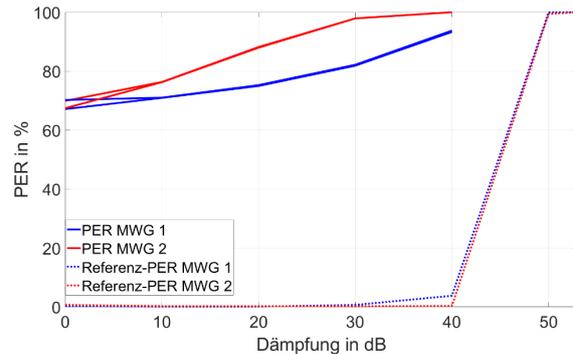


Bild 10: WACC Leistungsstufe mittel

In Bild 11 und Bild 12 sind die Messergebnisse der Kombination MACC für beide Leistungsstufen dargestellt. Augenscheinlich ist vor allem der sich stark unterscheidende Kurvenverlauf. Für MWG 1 kann für beide Leistungsstufen der Verlauf als annähernd linear beschrieben werden, wohingegen MWG 2 für höhere Dämpfungsstufen einen starken Anstieg der PER aufweist. Für die niedrige Leistungsstufe hängt die PER beim Vergleich beider MWG stark vom Dämpfungsgrad ab, bei mittlerer Leistungsstufe weist MWG 2 unabhängig vom Dämpfungsgrad eine höhere PER auf.

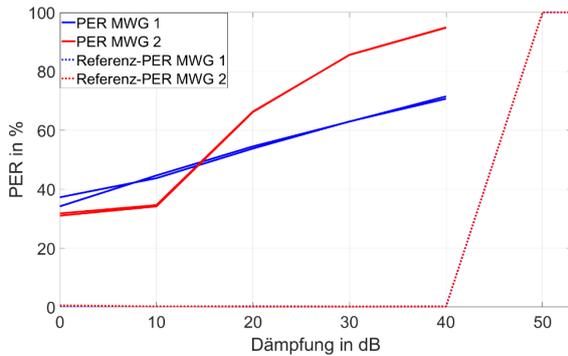


Bild 11: MACC Leistungsstufe niedrig

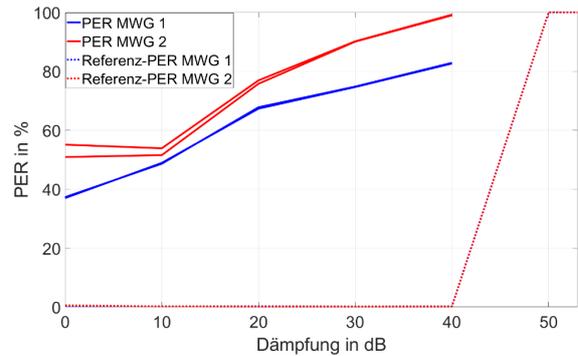


Bild 12: MACC Leistungsstufe mittel

Die Messergebnisse der letzten Kombination BMCWA sind in Bild 13 und Bild 14 dargestellt. Diese Messungen zeigen den Unterschied des Einflusses beider MWG besonders deutlich. MWG 1 stört in beiden Leistungsstufen die WLAN-Verbindung deutlich weniger als MWG 2. In der Kombination BMCWA kann somit eindeutig angegeben werden, dass MWG 1 im Betrieb weniger Störungen der WLAN-Verbindung hervorruft.

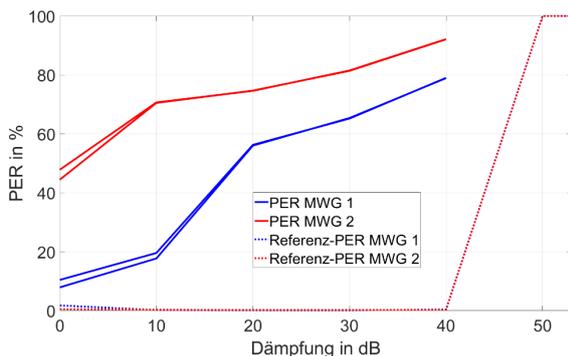


Bild 13: BMCWA Leistungsstufe niedrig

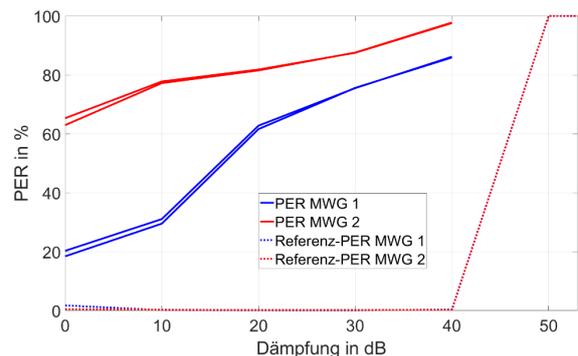


Bild 14: BMCWA Leistungsstufe mittel

Zusammenfassend weist MWG 1 in jeder untersuchten Kombination eine insgesamt geringere Beeinflussung der WLAN-Verbindung auf. Die Vergleichsmessungen verdeutlichen somit, dass das Messverfahren sich eignet, um den Einfluss unterschiedlicher MWG zu vergleichen und zu beurteilen.

5 Zusammenfassung

Drahtlose Kommunikationsverbindungen stellen in der realen Welt komplexe Topologien dar. Definiert im IEEE 802.11-Standard arbeiten die drahtlosen Datenverbindungen dabei im lizenzfreien ISM-Band. Innerhalb dieser Frequenzbänder muss die Kommunikation unter dem Einfluss der Störemission anderer ISM-Anwendungen arbeiten. Um den Einfluss einer ISM-Anwendung reproduzierbar quantifizieren zu können, wurde ein Messverfahren in der GTEM-Zelle entwickelt und vorgestellt. Dieses Messverfahren nutzt zur Datenübertragung eine unidirektionale WLAN-Verbindung und verwendet zur Beurteilung des Störeinflusses die Packet Error Rate. Die ISM-Anwendung wird durch ein Mikrowellengerät repräsentiert.

Neben der Beschreibung zur Durchführung des Messverfahrens wurden ebenfalls Vergleichsmessungen zweier Mikrowellengeräte durchgeführt und eine Beurteilung des Störeinflusses anhand der Messungen gegeben. Diese Messungen verdeutlichen den Nutzen des Messverfahrens, welches auch zu einem gut reproduzierbaren Vergleich der Störfestigkeit unterschiedlicher WLAN-Systeme gegen ISM-Anwendungen genutzt werden kann.

Danksagung

Die Autoren möchten sich für die gute Zusammenarbeit ganz herzlich bei Andreas Fabrizio und Timo Bangrazi von der Miele & Cie. KG bedanken.

Literaturangaben

- [1] Bundesnetzagentur, „Frequenzplan,“ 2021.
- [2] B. Menßen, T. Peikert. und H. Garbe, „Automatisiertes Messverfahren zur Bestimmung von Antennendiagrammen,“ emv : Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, 2016, doi: 10.15488/5261.
- [3] CISPR, „CISPR-11 - Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement,“ 2017.
- [4] „IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput,“ IEEE, 2009.