

Bestimmung von Messunsicherheiten von Tischen und Masten nach CISPR 16-1-4

Dipl.-Ing. Jochen Riedelsheimer, Albatross Projects GmbH
 Dipl.-Ing. Friedrich, Wilhelm Trautnitz, Albatross Projects GmbH
 Dipl.-Ing. Bernd Woerl, SONY Deutschland GmbH

1. Einleitung

Nach den aktuellen Vorgaben der CISPR 16-1-4 muss die Unsicherheit durch den verwendeten Messtisch ermittelt werden und in der Unsicherheitsbetrachtung der Prüflingsmessung berücksichtigt werden. Obwohl solch eine Unsicherheitsbetrachtung für Antennenmasten nach CISPR 16-1-4 nicht explizit gefordert ist, wurde auch dies untersucht und darüber hinaus der Einfluss der Antennenausrichtung am Mast zum Prüfobjekt analysiert. Da dieser Einflussfaktor maßgeblich durch die Richtcharakteristik der Empfangsantenne beeinflusst wird, wurden typische Empfangsantennen ausgewählt, um die Unterschiede mit und ohne Neigung der Antenne zu betrachten. Ein Einfluss der Richtcharakteristik der Empfangsantenne ist nach CISPR 16-1-4 insbesondere bei Messentfernungen kleiner 10 m entweder durch Neigung oder durch Korrekturwerte in der entsprechenden Unsicherheitsbetrachtung zu berücksichtigen.

2. Einflussfaktor Prüftisch

2.1 Vorgaben zur Unsicherheitsbestimmung von Prüftischen

Die Bestimmung des individuellen Unsicherheitsbeitrages des verwendeten Prüftisches im Frequenzbereich ab 200 MHz ist bereits seit 2006 fester Bestandteil der Norm CISPR 16-1-4 zuerst nur im Frequenzbereich bis 1 GHz, später im Frequenzbereich bis 18 GHz.

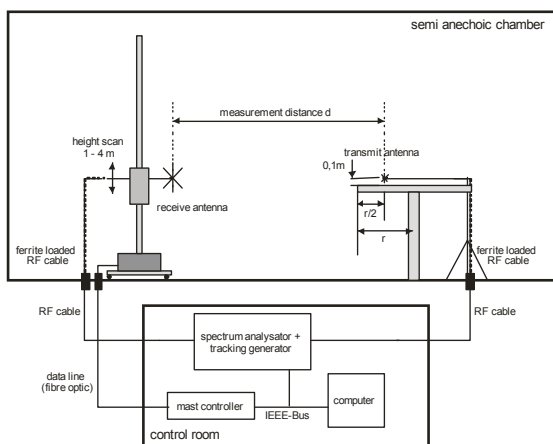


Bild 1: Messaufbau 200 MHz – 1 GHz

Als Sendeantenne ist hierzu eine hinreichend kleine Antenne mit omnidirektionaler Strahlungscharakteristik an einer vorgegebenen Position über dem Prüftisch zu positionieren und der Messpegel mit sowie ohne Prüftisch mit den angegebenen Frequenzschrittweiten, bei ansonsten unverändertem Prüfaufbau zu ermitteln.

$$\square(f) = |V_{R,with}(f) - V_{R,without}(f)|$$

mit: $V_{R,mit}(f)$ = maximale Spannung, gemessen mit Prüftisch
 $V_{R,ohne}(f)$ = maximale Spannung, gemessen ohne Prüftisch

Für weitere Berechnungen der Messunsicherheit ist die maximale Differenz Δ_{max} in dB, ermittelt aus den beiden vorangegangenen Messungen, zu verwenden

$$\square_{max} = \max |V_{R,with}(f) - V_{R,without}(f)|$$

Der Unsicherheitsbeitrag u_{Tisch} (dB) bedingt durch den Prüftisch ist mit einer Rechteckverteilung in der Messunsicherheitsbetrachtung zu berücksichtigen.

$$u_{table} = \frac{1}{\sqrt{3}} \square_{max}$$

2.2 Untersuchungsergebnisse zu verschiedenen Prüftischen

Im Folgenden werden Untersuchungsergebnisse mit verschiedenen Prüftischausführungen im Frequenzbereich 200 MHz – 18 GHz vorgestellt.

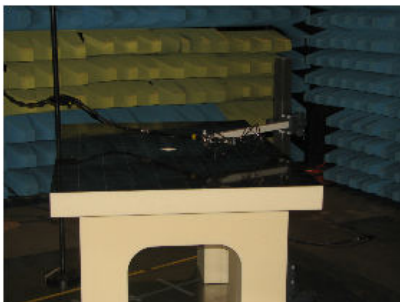


Bild 2: Messaufbau 200 MHz – 1 GHz

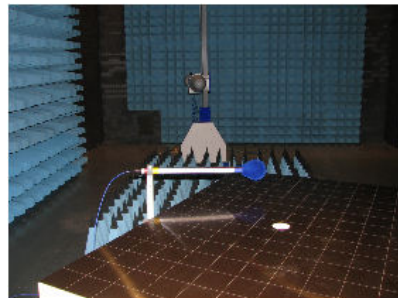


Bild 3: Messaufbau 1 -18 GHz

Der Prüftisch hatte eine Größe von 1,5 m x 1 m und eine Höhe von 0,8 m. Die Ergebnisse zeigen Messungen mit einem Holztisch, einem Tisch aus Styrodur, der mit und ohne Pertinaxdeckplatte getestet wurde. Im Frequenzbereich > 1 GHz wurden die maximalen Messpegel aus Messungen in 1 m, 1,2 m und 1,5 m Empfangsantennenhöhe ermittelt.

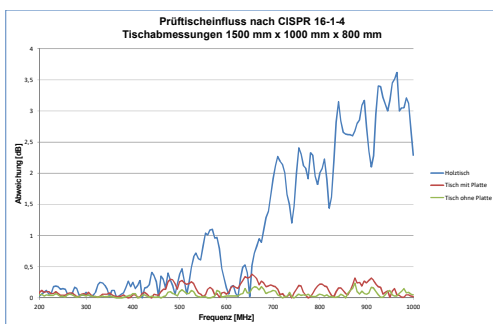


Bild 4: Messungen 200 MHz – 1 GHz

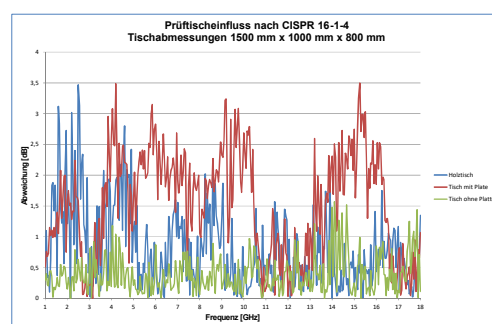


Bild 5: Messungen 1 -18 GHz

Die maximalen Abweichungen

| 200 – 1000 MHz | Holztisch | Tisch mit Platte | Tisch ohne Platte |
|--------------------|-----------|------------------|-------------------|
| Δ_{\max} | 3,6 dB | 0,4 dB | 0,2 dB |
| u_{Tisch} | 2,1 dB | 0,2 dB | 0,1 dB |

| 1 – 18 GHz | Holztisch | Tisch mit Platte | Tisch ohne Platte |
|--------------------|-----------|------------------|-------------------|
| Δ_{\max} | 3,5 dB | 3,5 dB | 1,6 dB |
| u_{Tisch} | 2,0 dB | 2,0 dB | 0,9 dB |

Nach den Vorgaben der Norm CISPR 16-4-2 wird bei der Messunsicherheitsbetrachtung im Frequenzbereich 200 – 1000 MHz ein Schätzwert von u_{Tisch} mit 0,29 dB angesetzt. Dieser Wert kann realistisch mit dem Styrodurtisch erreicht werden, der zusätzlich sogar mit einer stabilen Deckplatte ausgerüstet werden kann. In beiden Fällen wird der Schätzwert noch unterschritten, ganz im Gegensatz zu einem Prüftisch aus Holz, der stärkere Beeinflussung ab 500 MHz zeigt.

Im Frequenzbereich oberhalb von 1 GHz wird nach CISPR 16-4-2 ein Schätzwert für u_{Tisch} von 0,87 dB (1 – 6 GHz) bzw. 1,15 dB bis 18 GHz angenommen. Diese Werte können nur mit einem Tisch erreicht werden, dessen Material eine Dielektrizitätskonstante ϵ_r nahe 1 aufweist. Nur der Styrodurtisch ohne Deckplatte kann hier bessere Unsicherheitswerte als angenommen erreichen. Die 2 mm starke Pertinaxplatte zeigt ähnlich starke Beeinflussungen wie der verwendete Holztisch.

3. Einflussfaktor Mastsystem

3.1 Untersuchungsergebnisse zum Einfluss eines Mastsystems

Während der Einflussfaktor des Prüftisches in der Fehlerbetrachtung hinlänglich berücksichtigt wird und ein detailliertes Verfahren zur genauen Bestimmung des Unsicherheitsbeitrages in CISPR 16-1-4 enthalten ist, wird die Betrachtung des Einflusses des Mastsystems nicht für notwendig erachtet, da störende Einflüsse bereits bei der Messplatzvalidierung erfasst werden sollten. Im Detail ist dieser Einflussfaktor allerdings nur bei der Antennenkalibrierung für Antennen zur Messplatzvalidierung gefordert, wo sie in die Unsicherheitsbetrachtung einfließen. Die geschätzte Unsicherheit nach CISPR 16-1-4 liegt mit $\pm 0,15$ dB und einer Rechteckverteilung bei u_{AM} von 0,09 dB. Da bei der Messplatzvalidierung jedoch in der Regel andere Antennentypen als bei der Emissionsmessung verwendet werden und auch die Abstände der kritischen Antennenelemente vor dem Mast durchaus variieren können, ist eine sichere Bewertung des Unsicherheitsbeitrages nicht wirklich garantiert.

Um den Einfluss eines Neige-Mastsystems, genauer zu analysieren, wurde als Quelle eine kleine bikonische Sendeantenne im Frequenzbereich 30 MHz – 1 GHz verwendet, die in einer Höhe von 1 m mittig im Prüfvolumen angeordnet wurde. Die Empfangsantenne wurde auf einem Stativ in einer Höhe von 1 m positioniert und während den Messungen nicht verändert. Der Abstand Mast - Referenzpunkt der Antenne wurde in einem Abstand von 223 cm, 200 cm und 175 cm variiert und der Mast zum Abschluss ganz entfernt.

Der Einfluss des Antennenmastsystems (siehe Bild 6) zeigt in vertikaler Polarisation insbesondere im unteren Frequenzbereich, in dem der bikonische Teil der Antenne aktiv ist die stärkste Beeinflussung, bis zu 1,16 dB ($u_{AM} = 0,67$). In horizontaler Polarisation treten die maximalen Abweichungen dagegen erst im höheren Frequenzbereich auf, wenn das Feldstärkemaximum im Bereich der Empfangsantennenhöhe liegt.

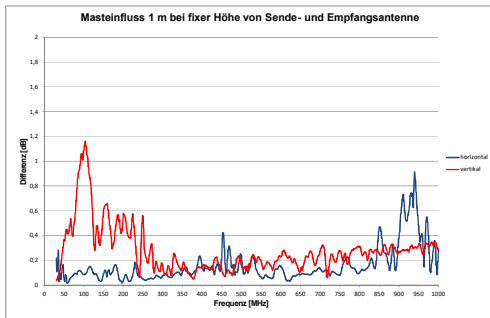


Bild 6: Masteinfluss durch Kopplungseffekte zur Antenne

3.2 Einfluss der Antennenausrichtung im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz

Als weiterer Einflussfaktor ist bei der Unsicherheitsbetrachtung nach CISPR 16-4-2 die Ausrichtung der Empfangsantenne bzw. der Einfluss des Strahlungsdiagrammes zu berücksichtigen, der zu einem systematischen Fehler führt. Im optimalen Fall sollte sowohl der direkte als auch der am Boden reflektierte Strahl innerhalb der 3-dB-Halbwertsbreite der Antennenhauptkeule liegen, was nur durch eine entsprechende höhenvariable Neigung der Antenne realisierbar ist. Wird keine Neigetechnik angewendet, so ist dies in der Unsicherheitsbetrachtung entsprechend zu berücksichtigen.

Nach CISPR 16-4-2 werden folgende Schätzwerte zur Richtwirkung bei 3 m Messabstand hinsichtlich der Unsicherheiten $u(x_i)$ ohne / mit Neigung angesetzt:

| $u(x_i)_{\text{CISPR 16-4-2}}$ | 30 – 200 MHz | | 200 – 1000 MHz | |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | horizontale Polarisation | vertikale Polarisation | horizontale Polarisation | vertikale Polarisation |
| 3 m ohne Neigen | 0,0 dB | 0,29 dB <130 MHz 0,58 dB >130 MHz | 0,58 dB | 1,8 dB |
| 3 m mit Neigen | 0,0 dB | 0,29 dB | 0,29 dB | 0,43 dB |

In den folgenden Untersuchungen soll der Einfluss der Neigetechnik auf die maximale Feldstärke sowie der Höhenverteilung der Maxima genauer analysiert werden.

3.2.1 Messungen mit der Sendeantenne in 1 m Höhe in der Mitte des Prüfvolumen

Bei dieser Untersuchung wurde als Sendeantenne, eine kleine bikonische Antenne (32 cm), in 1 m Höhe im Prüfvolumenzentrum positioniert. Als Empfangsantenne wurde eine bikonische log.-per. Antenne verwendet, die in Schrittweiten von 10 cm im Höhenbereich von 1 m – 4 m gescannt wurde. Die Messpegel wurden getrennt nach vertikaler und horizontaler Polarisation mit und ohne Neigung aufgenommen. Die Neigung der Antenne erfolgte stets auf die fixe Position der Sendeantenne. Bei der Messung ohne

Neigung erreichte der Antennenreferenzpunkt die vorgegebene Höhe von 4 m, mit Neigen dagegen nur eine maximale Höhe von ca. 3,2 m.

Die Unterschiede in den maximal gemessenen Pegelwerten beim Vergleich der Messungen mit bzw. ohne Neigen sind in Bild 7 - 8 dargestellt. In vertikaler Polarisisation sind die maximalen Unterschiede im Frequenzbereich 175 – 300 MHz zu beobachten.

Die Messung mit Neigung der Antenne führt zu einem zusätzlichen Messpegel von bis zu 2,7 dB. In horizontaler Polarisisation sind die Unterschiede mit einem zusätzlichen Pegelanstieg von max. 0,8 dB eher gering. Der verminderte Pegel unterhalb von 70 MHz ist auf die fehlende Scanhöhe bei Neigung zurückzuführen.

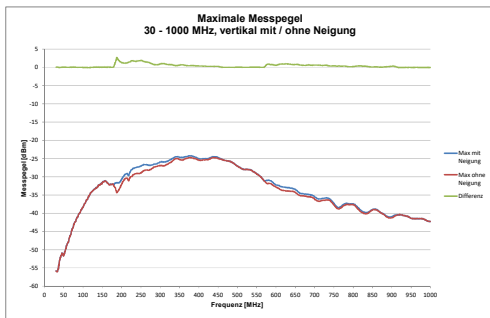


Bild 7: maximale Messpegel, vertikal

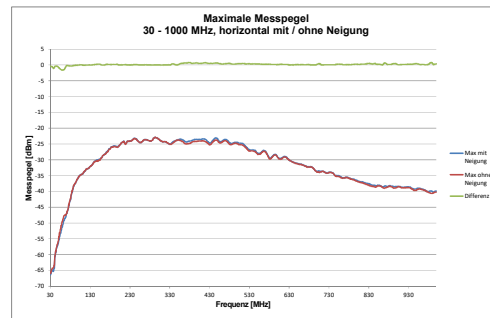


Bild 8: maximale Messpegel, horizontal

Bild 9 – 10 zeigt die Höhenverteilung der gemessenen Maxima mit sowie ohne Neigung der Antenne sowie im Vergleich dazu, die theoretische Verteilung der Maxima, die sich bei der Berechnung der NSA ergeben. Insbesondere bei der Messung in vertikaler Polarisisation ist zu erkennen, dass sich die Signalmaxima, die nach der Theorie in größeren Höhen liegen bei Neigung der Antenne noch weiter nach oben verschieben, was dem Strahlungsdiagramm der Antenne zuzuordnen ist.

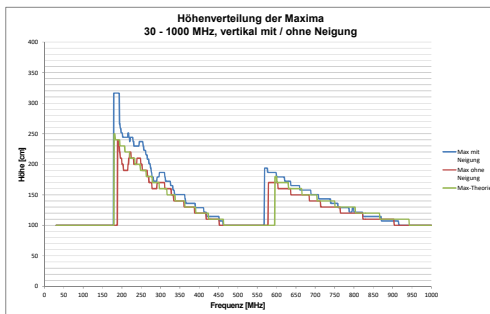


Bild 9: Höhenverteilung der Maxima, vertikal

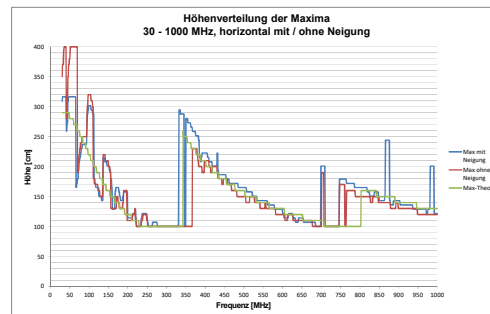


Bild 10: Höhenverteilung der Maxima, horizontal

Ein kontinuierlicher Scan im Maxhold, der zu Testzwecken durchgeführt wurde zeigte keine erwähnenswerte Veränderung der Messwerte gegenüber der Messung mit 10 cm Schrittweite.

3.2.2 Messungen mit Variation der Sendeantenne im Prüfvolumen

In den folgenden Messungen wurde die Sendeantenne innerhalb eines Prüfvolumens mit dem Durchmesser 2 m in den Höhen 1 m, 1,5 m und 2 m in der mittleren, der rechten, der linken und der vorderen Position im Prüfvolumen angeordnet.

Der Maximale Signalpegel in den Messpositionen wurde während eines Höhenscans mit sowie ohne Neigung der Antenne ermittelt. Die Neigung der Empfangsantenne erfolgte weiterhin auf das Zentrum des Prüfvolumens, 1 m über der ground plane.

In den Bilder 11 und 12 sind die Differenzen aus den entsprechenden Messungen mit und ohne Neigung dargestellt. Die größten Abweichungen treten dabei in den Außenpunkten mit bis zu 2,5 dB in vertikaler Polarisation auf. Die signifikanten negativen Abweichungen in vertikaler Polarisation bei 110 MHz waren bei einer Sendehöhe von 2 m, vor allem in den Außenpositionen zu beobachten. Die Messung mit geneigter Antenne liefert in diesem Fall einen geringeren Pegel aufgrund der Strahlungscharakteristik der Antenne. Bei stärkerem Neigungswinkel ist somit ein wachsender Fehler mit zunehmender Höhe der Quelle am Rand des Prüfvolumens zu erwarten.

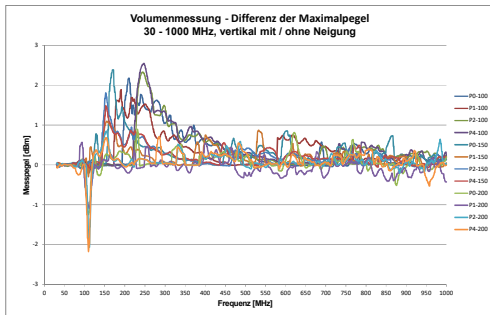


Bild 11: Differenz der max. Messpegel, vertikal

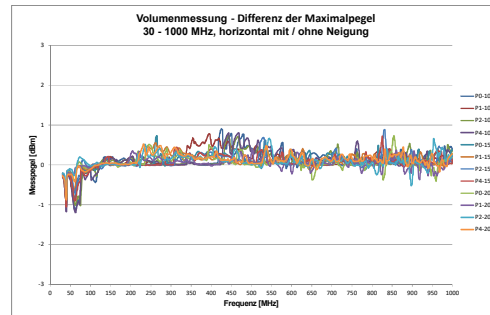


Bild 12: Differenz der max. Messpegel, horizontal

3.3 Messungen im Frequenzbereich von 1 GHz bis 6 GHz

Für Messungen oberhalb 1 GHz ist eine Höhenvariation der Empfangsantenne nur für den Fall vorgesehen, dass die 3-dB-Halbwertsbreite der Antennenhauptkeule nicht ausreicht, um die Höhe des Prüflings bei der gewählten Messentfernung komplett auszuleuchten. Der in CISPR 16-4-2 geschätzte Unsicherheitsbeitrag durch die Richtwirkung der Empfangsantenne liegt bei 0,87 dB. Aufgrund der oftmals fehlenden Detailinformationen zur tatsächlichen Strahlungscharakteristik der verwendeten Antenne stellt sich jedoch die Frage ab welchen Prüflingsabmessungen ein Höhenscan tatsächlich erforderlich wird.

Um den Einfluss eines Höhescans genauer zu untersuchen wurden auch im Frequenzbereich 1 – 6 GHz Messungen mit einer linear polarisierten omnidirektionalen Strahlungsquelle in 1 m Höhe in Prüfvolumenmitte (2 m Durchmesser) mit und ohne Neigung der Empfangsantenne durchgeführt. Als Empfangsantenne wurde eine Hornantenne verwendet. Die Messungen wurden in einer 3 m SAC unter Freiraumbedingungen durchgeführt. Dazu wurde der Boden mit zusätzlichen Pyramidenabsorbern ausgelegt. Die bei der Site VSWR Messung mit dem entsprechenden Messaufbau ermittelte maximale Abweichung lag bei 4,3 dB und zeigte keine signifikanten Stehwellen in der Absorberhalle.

Der Höhenscan wurde mit einer Schrittweite von 10 cm mit und ohne Neigung der Antenne auf den Punkt der Sendeantenne durchgeführt.

Da ein Höhenscan bei kleinen Prüflingen und entsprechendem Öffnungswinkel der Empfangsantenne nicht erforderlich ist, wurden die Pegelveränderungen mit und ohne Neigung der Antenne auf den Signalpegel bei 1 m Höhe normiert.

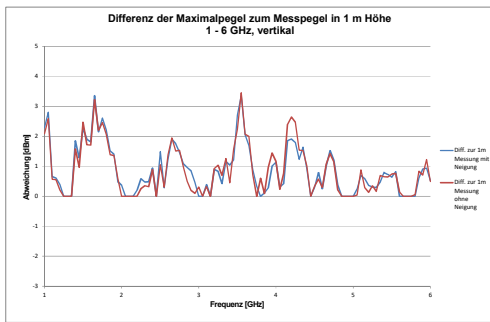


Bild 13: Abw. Maximalpegel zur 1m Messung

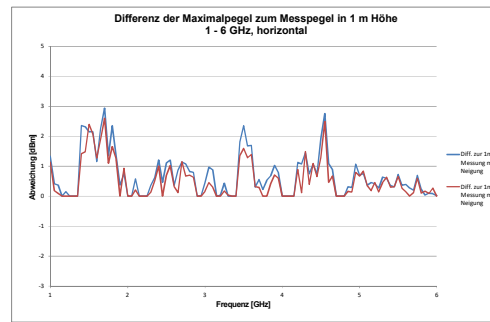


Bild 14: Abw. Maximalpegel zur 1m Messung

Die Messungen zeigen Pegelerhöhungen bis zu 3,5 dB in vertikaler und 3 dB in horizontaler Polarisation. Wobei der Einfluss der Antennenneigung eine untergeordnete Rolle spielt. Trotz der Pegelreduzierung, bedingt durch den verringerten Öffnungswinkel der Hornantenne, sind die Signalmaxima noch bis in Höhen von 2,3 m in vertikaler und 2,5 m in horizontaler Polarisation zu detektieren.

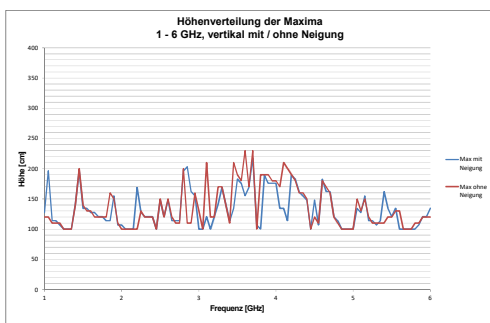


Bild 15: Höhenverteilung der Maxima, vertikal

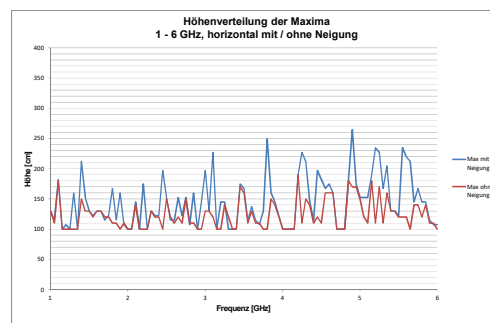


Bild 16: Höhenverteilung der Maxima, horizontal

Die gleiche Vorgehensweise wurde nochmals mit einer Sendehöhe von 2 m wiederholt. Die Neigung der Empfangsantenne wurde weiterhin auf den 1 m Mittelpunkt belassen. In diesem Fall wurden die Pegelveränderungen mit und ohne Neigung der Antenne jedoch auf den maximalen Signalpegel bei 1 - 2 m Höhenscan normiert.

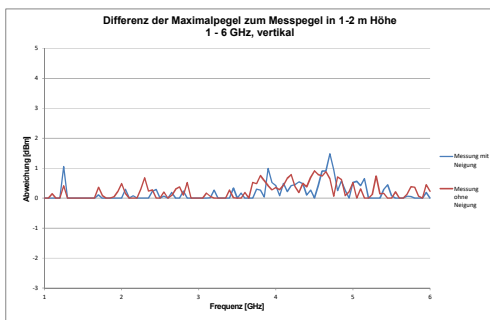


Bild 17: Abw. Maximalpegel zur 1-2m Messung

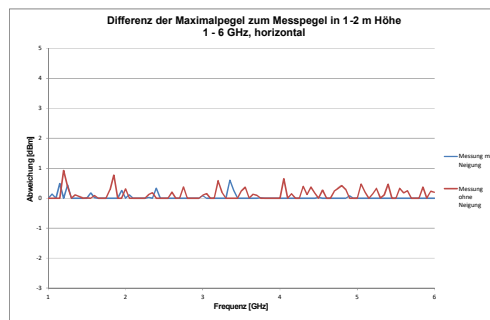


Bild 18: Abw. Maximalpegel zur 1-2m Messung

Die Messungen zeigen in diesem Messaufbau nur noch geringe Pegelerhöhungen, bis ca. 1,5 dB. Die Signalmaxima reichen in vertikaler Polarisation bis 3,4 m Höhe und 3,2 m in horizontaler Polarisation. Der Einfluss der Neigung wirkt sich in dieser Messkonfiguration nur noch geringfügig aus.

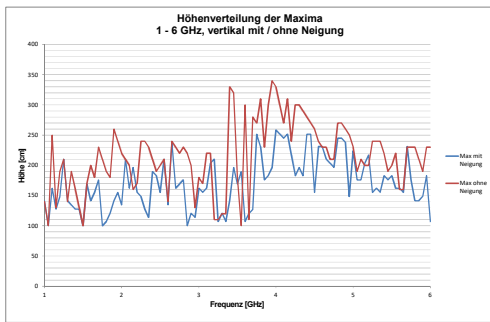


Bild 19: Höhenverteilung der Maxima, vertikal

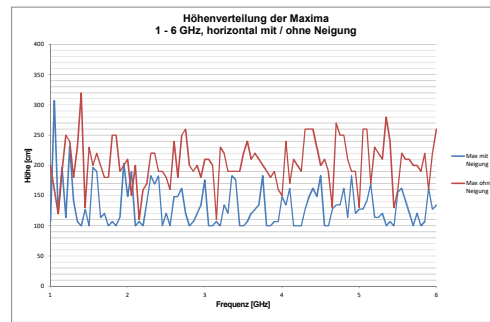


Bild 20: Höhenverteilung der Maxima, horizontal

4. Diskussion und Folgerungen

Die Untersuchung verschiedener Prüftische hat gezeigt, dass der angenommene Schätzwert der Messunsicherheit nach CISPR 16-4-2 erreicht werden kann, eine individuelle Bestimmung der Unsicherheit ist jedoch zu empfehlen.

Bzgl. der Beeinflussung der Messergebnisse durch Kopplungen zum Mastsystem ist eine Analyse, ähnlich der bei Prüftischen zu empfehlen, da sich dieser Einflussfaktor nicht zwingend und in entsprechender Weise in der Abweichung der NSA zeigt.

Die Untersuchungen zur Neigung der Antenne im Frequenzbereich 30 – 1000 MHz hat gezeigt, dass die Einstufung der Schätzwerte ohne Neigung in vertikaler Polarisation im Frequenzbereich 130 – 200 MHz etwas zu gering ausfallen, dagegen im Bereich >200 MHz tendenziell überbewertet sind. Die Messung mit mehreren Sendepositionen innerhalb des Volumens zeigt eine nahezu ähnliche maximale Pegelerhöhung, wie die Messung in Volumenmitte. Somit ist auch bei einer Veränderung der Störquelle im Volumen eine realistische Fehlerabschätzung gewährleistet. Durch den Einfluss der Strahlungscharakteristik der Antenne ist unter Umständen sogar eine Pegelverminderung bei Neigung möglich. Bei Messungen oberhalb 1 GHz ist eine signifikante Zunahme der Messpegel insbesondere durch den Höhenscan der Empfangsantenne zu beobachten. Eine deutliche Zunahme des Signalpegels durch eine zusätzliche Neigung der Antenne ist trotz der stärkeren Richtwirkung der Hornantenne nicht eindeutig zu beobachten. Ein Ringvergleich unter den akkreditierten EMV Laboren zur Messunsicherheit oberhalb 1 GHz, ähnlich dem im Jahre 2002 präsentierten Ringvergleich, könnte hier weiterführende Informationen liefern.

5. Literaturhinweise

❑❑ CISPR 16-1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements, Edition 3.1, 2012-07

❑❑ CISPR 16-2-3: Methods of measurements of disturbances and immunity - Radiated disturbance measurements, Edition 3.1, 2010-08

❑❑ CISPR 16-4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Measurement instrumentation uncertainty, Edition 2.0, 2011-06

[4]: IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 18-22, 2008, Detroit Michigan: Alexander Kriz, Calculation of Antenna Pattern Influence on Radiated Emission Measurement Uncertainty