

Validierungsverfahren von EMV-Messplätzen im Frequenzbereich von 18 – 40 GHz

Prof. Dr.-Ing. Sven Battermann, Fachhochschule Bielefeld, Campus Minden, Deutschland
Dr.-Ing. Markus Metzger, Conformitas GmbH & Co. KG, Deutschland
Dipl.-Ing. Jochen Riedelsheimer, Albatross Projects GmbH, Deutschland
Dipl.-Ing. Friedrich-Wilhelm Trautnitz, Deutschland

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurden Validierungsverfahren für EMV-Messplätze in den Frequenzbereichen 1 – 18 GHz und 9 kHz – 30 MHz entwickelt [1,2]. Das Validierungsverfahren unterhalb von 30 MHz befindet sich im Stadium des positiv abgestimmten CDV und der FDIS ist in Vorbereitung. Da Frequenzbereiche weit oberhalb 1 GHz bereits in Benutzung sind und sich 5G im Frequenzbereich 2 (FR2) oberhalb 24 GHz mindestens in der Erprobungsphase befindet, ist es dringend geboten, auch für den Bereich oberhalb 18 GHz Validierungsverfahren für EMV-Messplätze zu etablieren. Auf der letzten CISPR Präsenz Sitzung 2019 in Shanghai wurde dazu eine Arbeitsgruppe gebildet. Das Ziel ist es, ein Validierungsverfahren für EMV Messplätze im Frequenzbereich von 18 – 40 GHz auszuarbeiten. Dafür werden bekannte und eingeführte Verfahren wie das Site-VSWR, die NSA-Volumenmethode als auch Zeitbereichsmethoden untersucht, um das am besten geeignete Verfahren auszuwählen.

Dieser Artikel beschäftigt sich mit einem Vergleich des $TD S_{VSWR}$ Verfahrens nach ANSI C63.25.1 [1] mit dem S_{VSWR} Verfahren nach CISPR 16-1-4 [2]. Zunächst werden Messungen im Frequenzbereich von 1 – 18 GHz vorgestellt und verglichen. Danach werden Einflussfaktoren aufgezeigt, die bei dem Validierungsverfahren berücksichtigt werden müssen.

2 Beschreibung des Vorgehens

Aus den Erfahrungen mit den bisherigen Validierungsverfahren bis 18 GHz sind zur Qualifizierung und Bewertung der unerwünschten Reflexionen des Raumes Breitbandantennen mit einer möglichst dipolförmigen Strahlungscharakteristik erforderlich. Nur damit ist eine Ausleuchtung des Raumes möglich und die Reflexionseigenschaften des Raumes können detektiert und bewertet werden. Derartige Antennen mit gut charakterisierten Strahlungsdiagrammen sind für den Frequenzbereich von 18 – 40 GHz nur beschränkt oder im Prototypenstatus [3] verfügbar. Somit konzentriert sich dieser Beitrag auf den Frequenzbereich von 1 – 18 GHz, um Einflussfaktoren bei der Messung zu identifizieren. Für den Vergleich der S_{VSWR} Messung (CISPR) mit der $TD S_{VSWR}$ Messung (ANSI) wurde in einer Vollabsorberhalle nach diesen zwei Methoden mit verschiedenen Antennen gemessen.

Das S_{VSWR} Verfahren schreibt vor, dass der höchste Abstand der Frequenzstützstellen während der Messung 50 MHz betragen darf. Das war zur Zeit der Erstellung des Validierungsverfahrens ein Kompromiss zwischen Messzeit und –genauigkeit – wie auch die Wahl von nur 6 Positionen. Da durch die Unterabtastung im Frequenzbereich die Messunsicherheit steigt, wird auch mit einem verringerten Frequenzabstand gemessen, um die Abweichungen darstellen zu können.

Das $TD S_{VSWR}$ Verfahren (ANSI) nutzt vektorielle Netzwerkanalysatoren mit einer Zeitbereichserweiterung – diese können das messtechnisch im Frequenzbereich aufgenommene Signal zwischen Frequenz- und Zeitbereich transformieren. In der Zeitbereichsdarstellung kann das auf direkten Weg zwischen Sende- und Empfangsantenne empfangene Signal von unerwünschten Reflexionen getrennt werden, denn die Reflexionen sind aufgrund der längeren

Signallaufzeit zeitlich verzögert. Für das Verfahren werden Fensterungen im Zeit- und Frequenzbereich (Windowing) genutzt. Weiterhin erfolgt eine gleitende Mittelwertbildung, um die Vergleichbarkeit mit dem S_{VSWR} Verfahren zu ermöglichen. Diese Auswirkungen auf die Bewertung werden ebenfalls untersucht.

3 Messtechnische Untersuchung

3.1 Beschreibung des Messaufbaus

Die Messungen erfolgten in einer 3 m Vollabsorberkammer mit einem nach dem S_{VSWR} Verfahren validierten Prüfvolumen mit 1,5 m Durchmesser und 1,5 m Höhe (Test Volume 1). Um die Einflüsse der Kammer zu erhöhen, wurde das Prüfvolumen für diesen Vergleich auf einen Durchmesser von 2 m und eine Höhe von 2 m vergrößert (Test Volume 2).

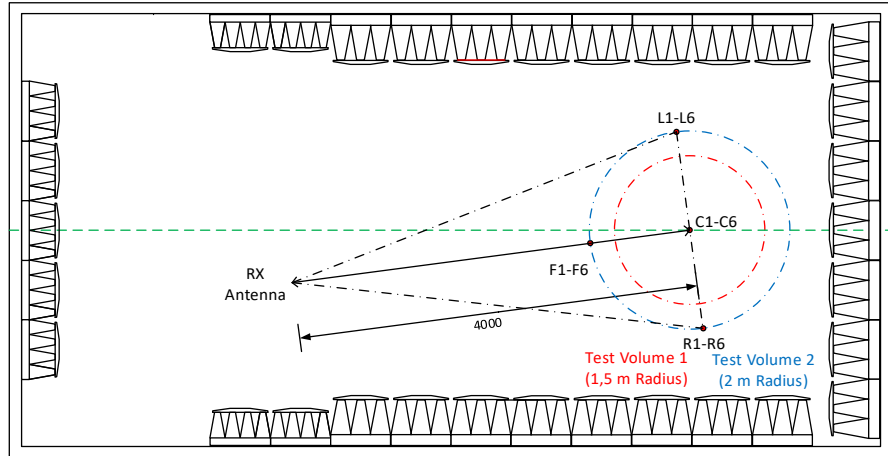


Bild 1: Messpositionen für die S_{VSWR} Messung (vergrößertes Prüfvolumen)

Damit ergeben sich die in Bild 1 dargestellten Messpositionen für das S_{VSWR} in der Höhe 1 und die Front Position in Höhe 2. Als Sendeantennen wurden die Präzisions-Omnidirektionalen-Dipole POD 16 und POD 618 verwendet. Die Messungen mit der bikonischen Mikrowellenantenne SBA 9112 sind aus Platzgründen nicht dargestellt. Als Empfangsantennen wurden u.a. eine Doppelsteg Breitband Horn Antenne HF907 und die V-type Log.-Per. Antenne HL050 verwendet. Die Messungen erfolgten mit verschiedenen Antennenkombinationen. Es wurde ein vektorieller Netzwerkanalysator (ZNB20) mit einer Ausgangsleistung von +8 dBm und einer Zwischenfrequenz-Bandbreite von 1 kHz eingesetzt. Auf den Einsatz von Vorverstärkern wurde verzichtet, um weitere Einflussfaktoren zu minimieren. Durch den Einsatz von dämpfungsarmen Koaxialkabeln und der zeitweisen Messung mit dem Netzwerkanalysator in der Vollabsorberkammer konnte ein Signal-Rauschabstand von ca. 30 dB erreicht werden. Die Positionierung der Sendeantenne erfolgte mit einem fernsteuerbaren Positionierer, wie in Bild 2 zu erkennen ist.

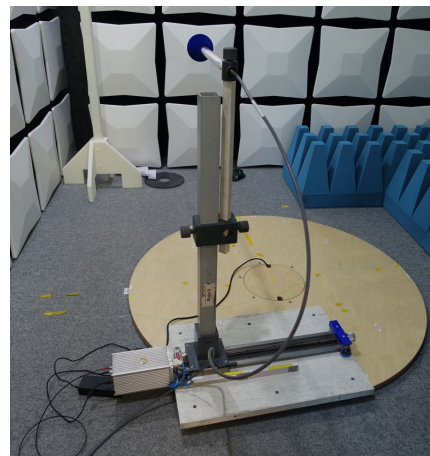
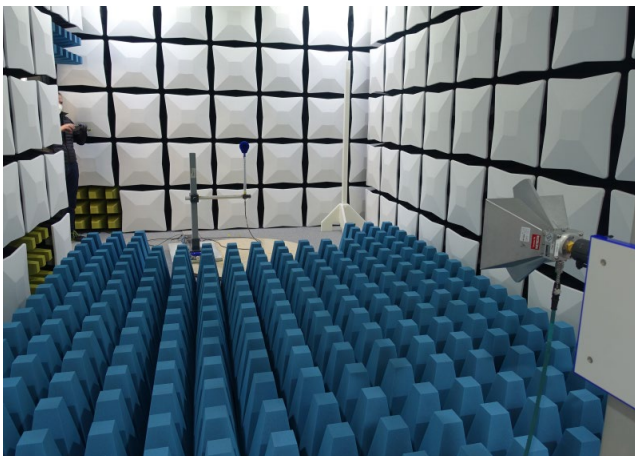


Bild 2: Messung mit POD-Antenne auf Positionierer und HF907

3.2 Messung des S_{VSWR} (CISPR) und Untersuchung der Frequenzschrittweite

Zunächst erfolgte die S_{VSWR} Messung nach CISPR 16-1-4 im Frequenzbereich von 1-18 GHz mit den POD-Antennen und der HF907. Zusätzlich wurde auch die Frequenzschrittweite gegenüber den geforderten 50 MHz laut Norm verändert, um den Einfluss quantifizieren zu können. Damit ist auch eine Vergleichs-Basis für die nachfolgende $TD S_{VSWR}$ Messung vorhanden. In Bild 3 ist das S_{VSWR} für die 1 MHz und in Bild 4 für die 50 MHz Frequenzschrittweite dargestellt. Jeweils links ist die horizontale und jeweils rechts ist die vertikale Polarisation dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit der geringeren Frequenzschrittweite höhere Maximalwerte erreicht werden. Diese treten bei dem 1 MHz Raster sogar an anderen Messpositionen auf, als es bei dem 50 MHz Raster der Fall ist (rote Pfeile). Der Effekt ist darin begründet, dass die stehende Welle im Raum mit den 6 Messpunkten auf 40 cm grob abgetastet wird. Die Reflexionen führen aber auch zu einer Welligkeit (Rippel) im Frequenzbereich, die mit einem feineren Frequenzraster besser abgetastet werden kann. Alternativ müssten bei gleicher Frequenzschrittweite mehr Positionen gemessen werden oder mit dem Positionierer eine Wegstrecke kontinuierlich abgefahren werden [4].

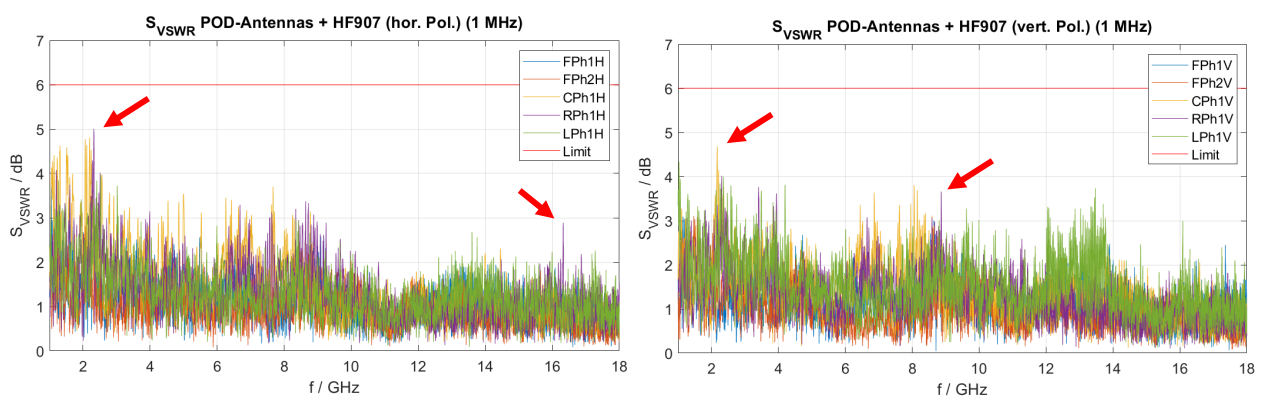


Bild 3: S_{VSWR} Verfahren mit 1 MHz Frequenzschrittweite (links hor. / rechts vert. Polarisation)

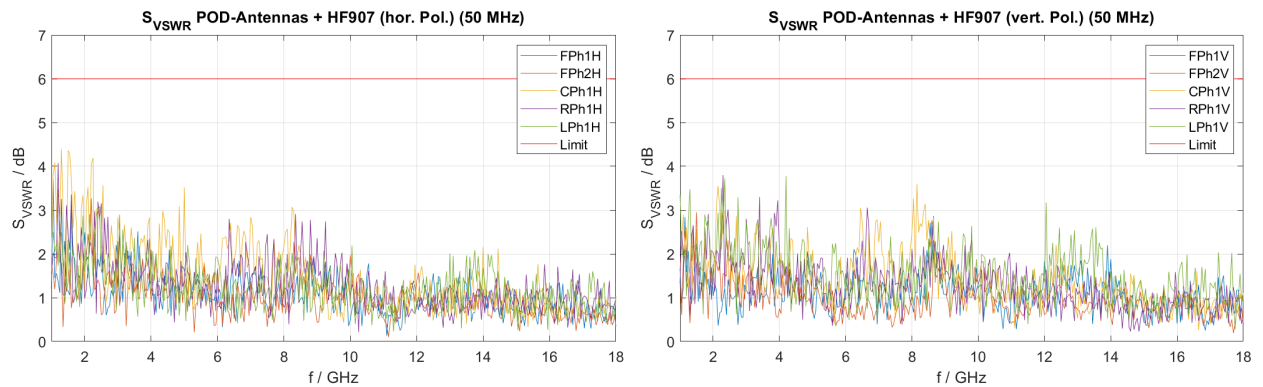


Bild 4: S_{VSWR} Verfahren mit 50 MHz Frequenzschrittweite (links hor. / rechts vert. Polarisation)

In Bild 5 sind die Veränderungen der maximalen Abweichung bei horizontaler (links) und vertikaler Polarisation (rechts) für die unterschiedlichen Frequenzschrittweiten dargestellt. Dazu wurden die vorhandenen Frequenzstützstellen aus der Messung von 1 (für die 1 MHz Schrittweite) bis 100 (für die 100 MHz Schrittweite) dezimiert. Bei der Messung mit der in CISPR geforderten 50 MHz Frequenzschrittweite ist eine Abweichung von ca. 1,6 dB gegenüber der Messung mit 1 MHz in beiden Polarisationen zu erkennen. Diese wird aufgrund der beschriebenen Unterabtastung nicht immer erreicht.

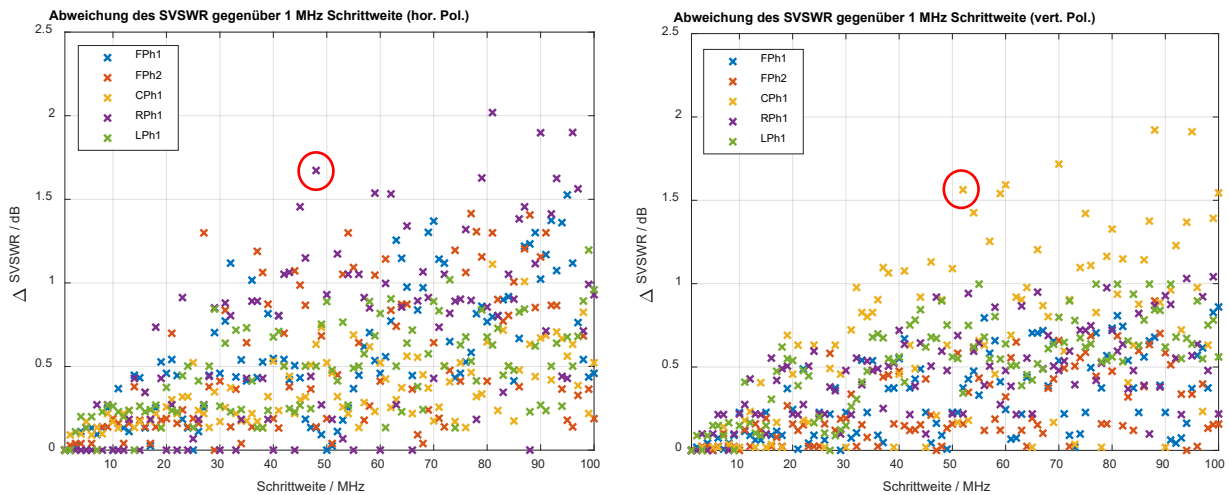


Bild 5: Abweichung des S_{VSWR} bei unterschiedlichen Frequenzschrittweiten (gegenüber 1 MHz)

3.3 Messung des $TD S_{VSWR}$ (ANSI)

Um die Entstehung der Diagramme des $TD S_{VSWR}$ nachvollziehen zu können, sind die einzelnen Schritte nach ANSI C63.25.1 für eine S_{21} Transmissionsmessung dargestellt. Es wurden eine SBA9119 mit einer HF907 verwendet. Bild 6 zeigt die S_{21} Messung im Frequenzbereich (links) und im Zeitbereich (rechts). Im Zeitbereich ist deutlich das Signal zu erkennen, das auf direktem Weg empfangen wurde – zeitlich verzögert treten Reflexionen auf. Diese Reflexionen sind auch im Frequenzbereich an den Rippeln zu erkennen [5].

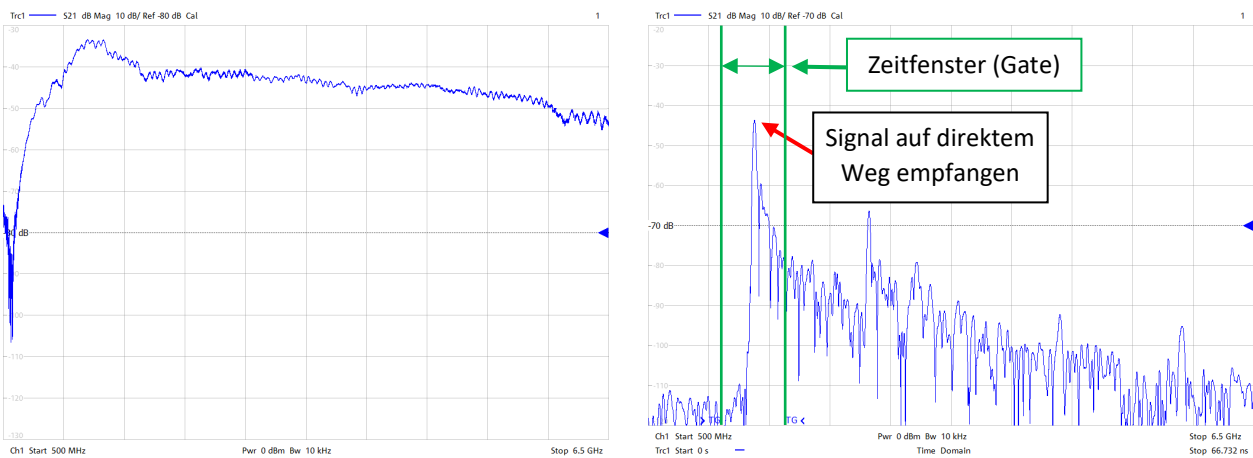


Bild 6: S_{21} im Frequenzbereich (links) und im Zeitbereich (rechts)

Jetzt wird ein **Fenster (Gate)** über **den Sprung des auf direktem Wege empfangenen Signals** S_{21} im Zeitbereich positioniert, was mit den grünen Linien im Diagramm hervorgehoben ist (Bild 6 – rechts). Nun wird die Gating-Funktion des Netzwerkanalysators genutzt, womit nur der Inhalt dieses Fensters in den Frequenzbereich transformiert wird und dort als G_{in} aufgenommen wird (Bild 7 – links). Die zeitlich verzögerten Reflexionen werden damit ausgeblendet. Es wird das Standard Hanning-Fenster des ZNB verwendet.

Im nächsten Schritt wird das gleiche Fenster im Zeitbereich auf die Notch- bzw. Ausblend-Funktion gestellt. Damit wird nur der Teil der Impulsantwort **ohne den Sprung** des auf direktem Wege empfangenen Signals erfasst, wie in Bild 7 (rechts) dargestellt. Nach der Transformation zurück in den Frequenzbereich wird das Signal als G_{out} aufgenommen.

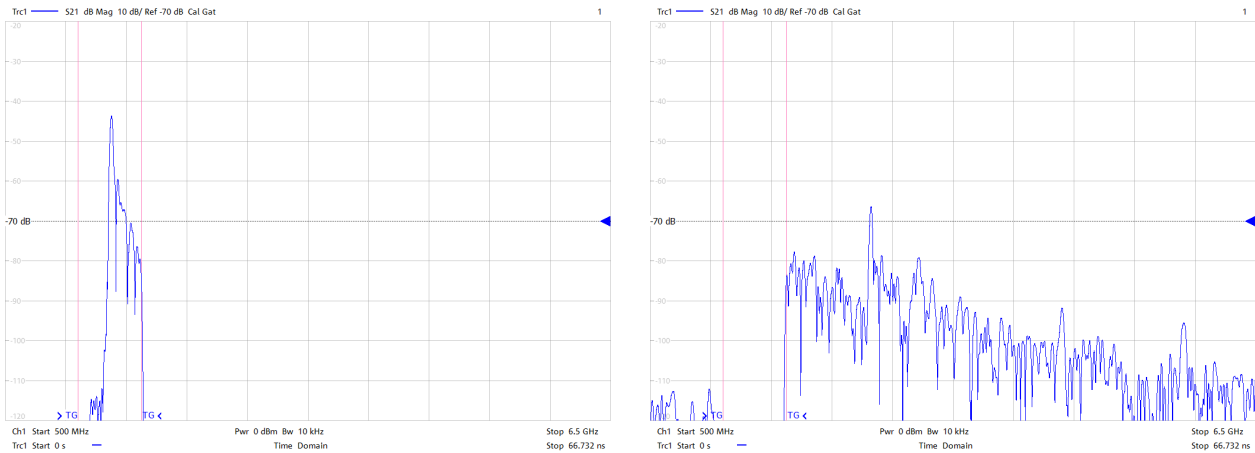


Bild 7: S_{21} im Zeitbereich mit Fenster auf dem Hauptsignal mit eingeschalteten Gating (links) / Gating mit eingeschalteter Notch-Funktion, um den Fensterinhalt auszublenden (rechts)

Das beschriebene Verfahren wird jetzt mit dem Aufbau nach 3.1 für die einzelnen Messpositionen angewandt. Bild 8 zeigt das für die Center Position mit der Kombination aus POD-Antennen und HF907. Da für den Frequenzbereich zwei POD Antennen eingesetzt werden müssen, werden zwei Frequenzbereiche betrachtet (blaue und rote Kurven). G_{in} und G_{out} ergeben als Quotient den Reflexionsfaktor $\Gamma = \frac{G_{out}}{G_{in}}$, der in das $S_{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$ umgerechnet wird und einmal linear und logarithmisch dargestellt ist. Im Anschluss wird zur Bestimmung des $TD S_{VSWR}$ noch eine gleitende Mittelwertbildung über 120 MHz und die Addition der bewerteten Standardabweichung durchgeführt $TD S_{VSWR}(k = 0,676) = TD_{m,avg} + 0,676 \cdot TD_{std}$.

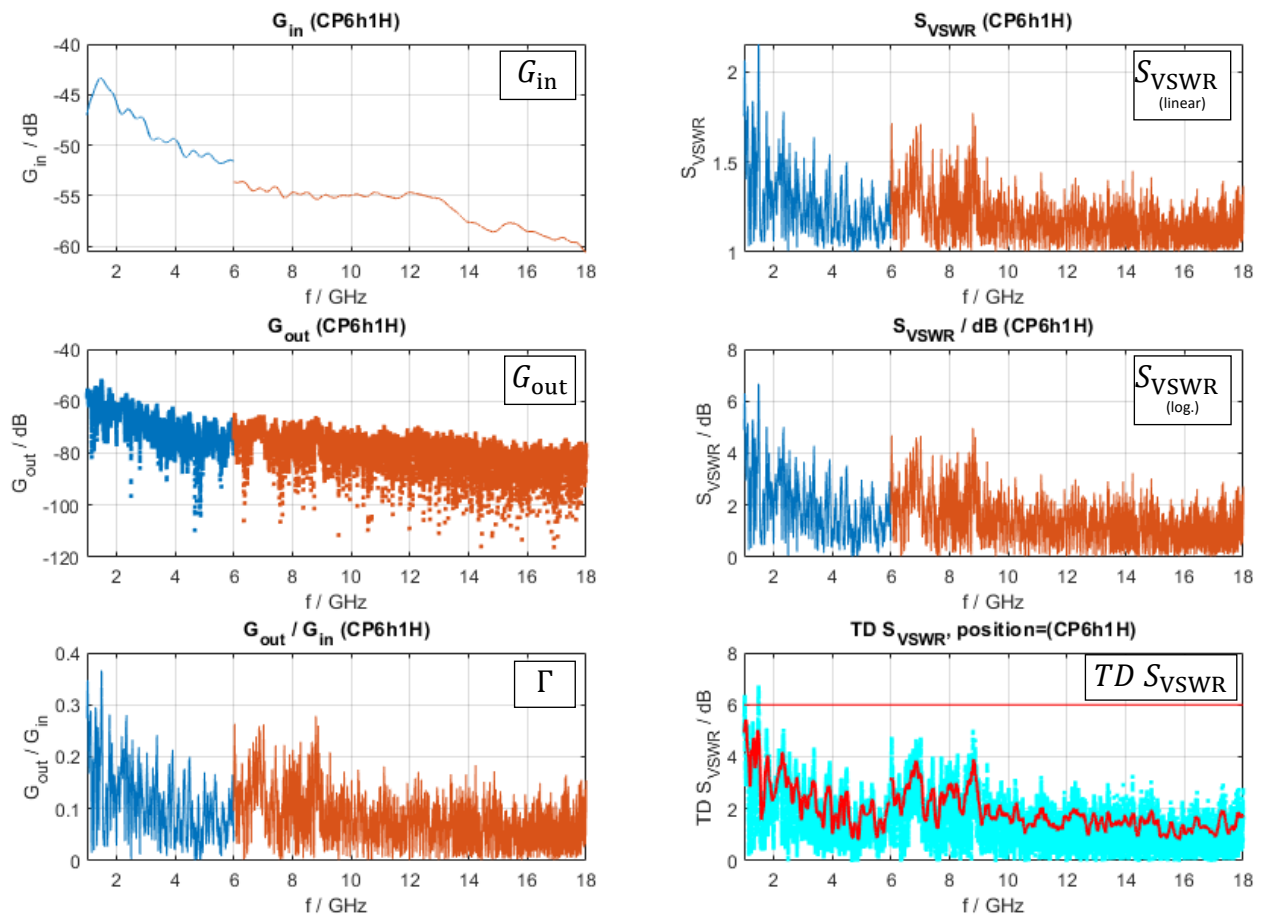


Bild 8: Teilgrößen zur Ermittlung des $TD S_{VSWR}$

Diese Umrechnung wird laut ANSI C63.25.1 durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit mit dem S_{VSWR} (CISPR) herzustellen. Bild 9 zeigt das $TD S_{VSWR}$ für die verschiedenen Positionen. Auf der linken Seite für die horizontale Polarisation und auf der rechten für die vertikale Polarisation.

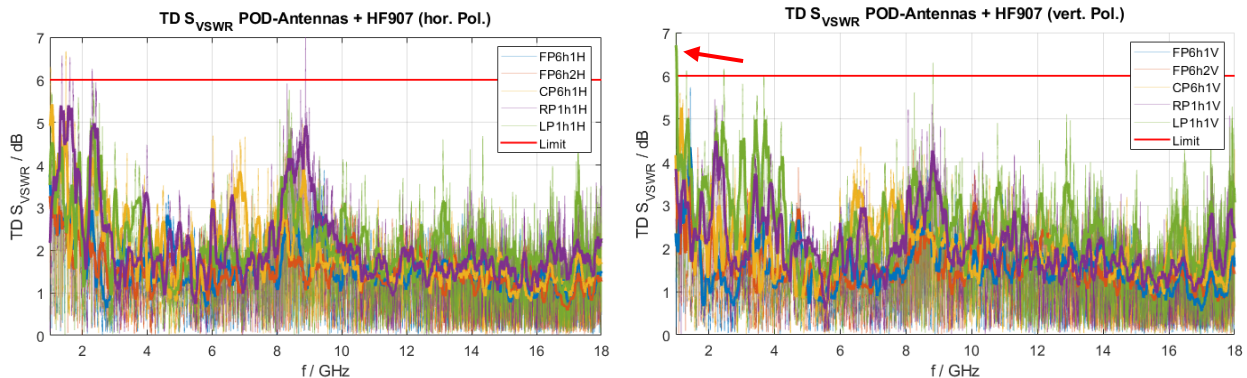


Bild 9: $TD S_{VSWR}$ (links hor. / rechts vert. Polarisation)

Ein Vergleich des in Bild 9 dargestellten $TD S_{VSWR}$ mit dem S_{VSWR} in Bild 3 (mit 1 MHz Frequenzraaster) bzw. Bild 4 (mit 50 MHz Frequenzraaster) zeigt aber nur eine partielle Übereinstimmung der Verläufe für einzelne Frequenzbereiche - selbst im Vergleich mit der höheren Auflösung im Frequenzbereich. Die Vollabsorberkammer würde bei 1 GHz in vertikaler Polarisation mit dem $TD S_{VSWR}$ Verfahren und der genutzten Fensterbreite nicht bestehen (Bild 7 – roter Pfeil). Mit dem S_{VSWR} Verfahren hat die Kammer selbst mit der 1 MHz Frequenzschrittweite bestanden. Bei der Messung war bereits der potentielle Einfluss der gewählten Breite des Zeitfensters aufgefallen, weshalb dieser Effekt detaillierter untersucht wurde.

3.4 Untersuchung des Einflusses der Breite des Zeitfensters (Gate) auf das $TD S_{VSWR}$

Die Breite des Zeitfensters (Gate) hat einen erheblichen Einfluss auf das $TD S_{VSWR}$. Das tritt auf, sobald eine Reflexionsstelle der Umgebung im Bereich des Zeitfensters liegt. Als Beispiel zur Verdeutlichung wurde eine Aluminiumplatte unter die Antennenstrecke gelegt (Bild 10). Wenn die Darstellung von S_{21} im Zeitbereich (Bild 10 – rechts) technisch richtig interpretiert wird, ist eine Unterscheidung zwischen Hauptsignal und Reflexion möglich.

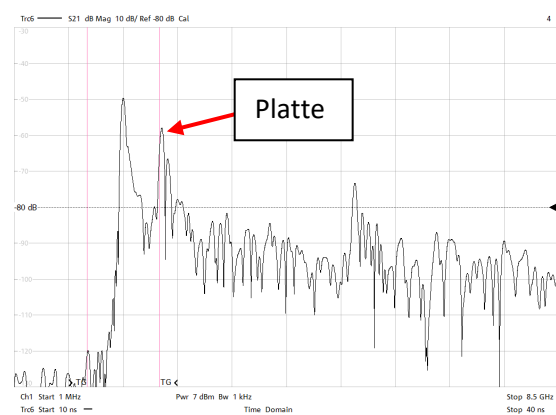
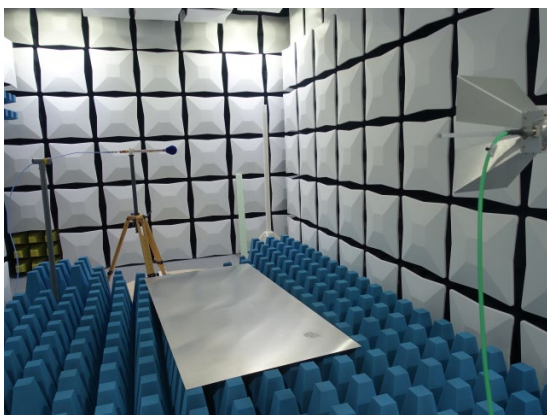


Bild 10: Metallische Platte unter der Strecke und S_{21} im Zeitbereich mit Fensterfunktion

Es ist aber zu berücksichtigen, dass nicht alle Antennen eine ausreichend kurze Impulsantwort besitzen, um überhaupt eine exakte Trennung zwischen Hauptsignal und Reflexionen zu gewährleisten. Der Laufzeitunterschied zwischen dem auf direktem Wege empfangenen und des reflektierten Signals nimmt mit größerer Messentfernung ab. Damit droht eine Unterbewertung der Reflexion. Falls ein Programm den Messablauf steuert, ist eine Sicherstellung der physikalischen Sinnhaftigkeit der Messung nicht möglich, da das Programm nur das Maximum des Hauptsignals bestimmen kann und dann das Fenster symmetrisch festlegt – ohne Bewertung des Inhaltes. Das

hat erhebliche Auswirkungen, wie Bild 11 zeigt. Dargestellt wird das $TD S_{VSWR}$ für die Konfiguration mit der Metallplatte unter der Antennenstrecke. Zwischen beiden Diagrammen wurde nur die Breite des Zeitfensters (Gate) verändert. Mit einer Breite des Zeitfensters von 4 ns (wie in Bild 10) tritt eine erhebliche Überschreitung der zulässigen 6 dB auf, wie mit der Metallplatte unter der Messtrecke zu erwarten ist. Mit einer Breite von 12 ns hingegen werden die normativen Anforderungen eingehalten.

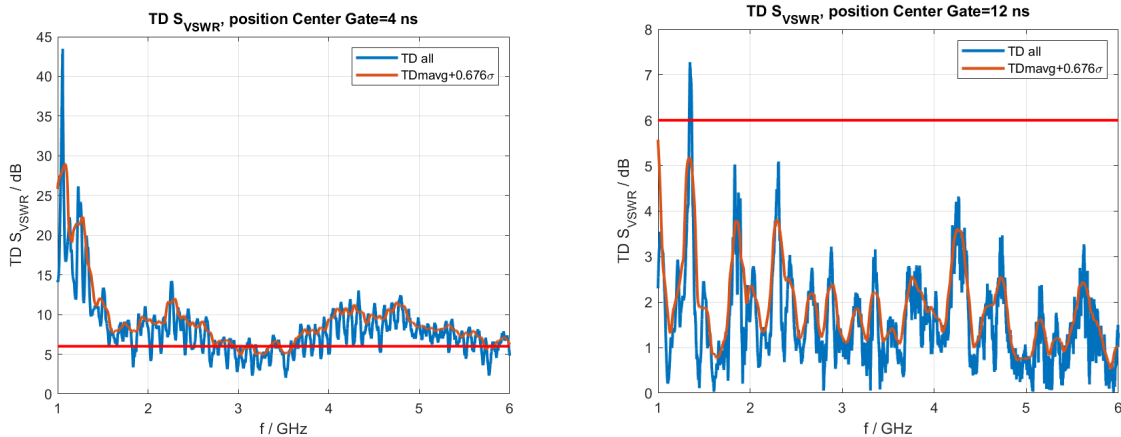


Bild 11: Einfluss der Breite des Zeitfensters (Gate)

Die Breite des Fensters im Zeitbereich (Gate) sollte etwa der doppelten Ring-Down-Time [1] der Antenne entsprechen. Die messtechnische Erfassung der Ring-Down-Time (Impulsantwort) der Empfangsantenne ist im Standard derzeit aber nur erläutert. Aus den aufgezeigten Auswirkungen der unterschiedlichen Fensterbreiten des Gates muss eine Festlegung im Standard erfolgen. Diese Defizite wurden auch bei ANSI erkannt und sollen ggf. zu einem modifizierten Validierungsverfahren führen [6]. Das Themengebiet und die aufgezeigten Probleme sind im Bereich der Antennentechnik nicht neu, wie beispielsweise [7] zeigt.

Die Ring-Down-Time ist eine Eigenschaft der verwendeten Antennen. Eine logarithmisch-periodische Antenne hat beispielsweise aufgrund ihrer Geometrie eine längere Impulsantwort bzw. eine stärkere Dispersion als eine bikonische Antenne. Das Phasenzentrum der abgestrahlten Welle liegt für niedrige Frequenzen am hinteren Ende der Antenne und für hohe Frequenzen weit vorne. Das verursacht eine Dispersion, die dazu führt, dass ein abgestrahlter Puls deutlich breiter wird und die Ortsauflösung verloren geht. Damit sind nicht alle Antennen für dieses Verfahren geeignet. Auch der verwendete Frequenzbereich der Antenne und des Netzwerkanalysators hat einen Einfluss. Nur bei großer Bandbreite und einer ausreichenden Anzahl Messpunkte im Frequenzbereich kann eine gute Auflösung im Zeitbereich erzeugt werden. Verfahren, die Repräsentationen des Signals im Zeit-Frequenz-Bereich nutzen, bieten ein erhebliches Potential zur Fehleranalyse und Bewertung der Messumgebung - aber um diese richtig einzusetzen, müssen die physikalischen Wirkmechanismen berücksichtigt werden.

4 Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt einen Vergleich der Messung des S_{VSWR} (CISPR 16-4-1) und des $TD S_{VSWR}$ (ANSI C63.25.1) im Frequenzbereich bis 18 GHz. Dabei sind folgende Punkte aufgefallen:

- Der Einfluss der Breite des Zeitfenster (Gate) und die Ring-Down-Time der Antenne sind von der systematischen Auswirkung auf das $TD S_{VSWR}$ unzureichend bestimmt.
- Mit dem in ANSI verwendeten gleitenden Mittelwert und der zusätzlich integrierten Standardabweichung ist es unklar, wie eine Messunsicherheitsbetrachtung abgeleitet werden soll. Falls das S_{VSWR} (CISPR) nach neuen Erkenntnissen als technisch unzureichend bewertet werden sollte (z. B. wegen der Abtastung) und eine systematische Messabweichung besitzt, warum wird das im $TD S_{VSWR}$ in der Berechnung berücksichtigt, um auf vergleichbare

Messwerte zu kommen? Falls keine Korrektur möglich ist, müsste das im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

- Hinsichtlich der Rückführbarkeit besteht das generelle Problem, dass es sich nur um eine relative Messung handelt. Wie äußert sich beispielsweise eine defekte Antenne?
- Der gleitende Mittelwert führt am oberen Ende des Frequenzbereiches zu einem Problem, denn viele Netzwerkanalysatoren haben eine obere Frequenzgrenze von 40 GHz. Damit ist die in [1] geforderte Überschreitung der Frequenzgrenze für den gleitenden Mittelwert nicht möglich. Die Verwendung der Antennen auf Frequenzen außerhalb ihrer Spezifikation (im unkalibrierten Frequenzbereich) ist hinsichtlich der Akkreditierung nicht zulässig bzw. führt zu Diskussionen im Audit.
- Die entstehenden Dynamikprobleme müssen durch Vorverstärker und Empfangsantennen mit hohem Gewinn kompensiert werden. Der gleichzeitig mit der Frequenz abnehmende Öffnungswinkel der Empfangsantennen wird bei kurzen Messentfernungen zu einer geringeren Bewertung der Reflexion führen, da das reflektierte Signal im Randbereich der Hauptkeule liegen wird.

Wie bei jedem neuen Mess- oder Validierungsverfahren müsste jetzt ein Round-Robin-Test und eine systematische Analyse der genannten Punkte erfolgen. Sobald Antennen mit dipolförmiger Strahlungscharakteristik im Frequenzbereich oberhalb von 18 GHz verfügbar sind, müssen diese Tests starten. Um oberhalb von 18 GHz eine Validierung der Messumgebung vornehmen zu können, müssen die systematischen Messabweichungen analysiert, ggf. korrigiert oder als zufällige Messabweichung berücksichtigt werden. Die beim $TD S_{VSWR}$ durch Gewichtungsfaktoren versuchte „Anpassung“ an die Größe S_{VSWR} ist keine messtechnisch valide Lösung, solange die Einflussfaktoren nicht hinsichtlich ihres systematischen oder zufälligen Verhaltens analysiert sind.

5 Literaturangaben

- [1] "American National Standard Validation Methods for Radiated Emission Test Sites, 1 GHz to 18 GHz," in ANSI C63.25.1-2018, pp.1-44, 29 March 2019, DOI: [10.1109/IEEESTD.2019.8675711](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8675711)
- [2] DIN EN IEC 55016-1-4:2021-08, VDE 0876-16-1-4:2021-08, Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit - Teil 1-4: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit - Antennen und Messplätze für Messungen der gestrahlten Störaussendung (CISPR 16-1-4:2019 + A1:2020); Deutsche Fassung EN IEC 55016-1-4:2019 + A1:2020
- [3] A. Adhyapak, "Evaluation of Site Validation Methods for EMC Chamber from 18 GHz to 40 GHz," 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), 2020, pp. 543-547, DOI: [10.1109/EMCSI38923.2020.9191657](https://doi.org/10.1109/EMCSI38923.2020.9191657)
- [4] Kriz, A. (2016). Messunsicherheitsberechnung in der Hochfrequenz- und EMV-Technik mittels Monte Carlo Methode, Dissertation, Technische Universität Wien DOI: [10.34726/hss.2016.28533](https://doi.org/10.34726/hss.2016.28533)
- [5] J. Appel-Hansen, "Reflectivity level of radio anechoic chambers," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 21, no. 4, pp. 490-498, July 1973, DOI: [10.1109/TAP.1973.1140524](https://doi.org/10.1109/TAP.1973.1140524)
- [6] Z. Chen and S. Gregson, "Intercomparisons of Site VSWR Measurement Methods using Mode Filtering, Time Domain and Spatial Sampling Techniques," 2021 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA), 2021, pp. 1-6, DOI: [10.23919/AMTA52830.2021.9620661](https://doi.org/10.23919/AMTA52830.2021.9620661)
- [7] R. A. M. Mauermayer and T. F. Eibert, "Time gating based on sparse time domain signal reconstruction from limited frequency domain information," AMTA 2016 Proceedings, 2016, pp. 1-4, DOI: [10.1109/AMTAP.2016.7806275](https://doi.org/10.1109/AMTAP.2016.7806275)