

Beeinflussung der Emissionsmessung >1 GHz und des Höhenscans nach CISPR 32 durch Absorberreduktion auf dem Drehtisch

Prof. Dr.-Ing. Sven Battermann, Hochschule Bielefeld, Campus Minden, Deutschland
Dipl.-Ing. Jochen Riedelsheimer, Albatross Projects GmbH, Deutschland

1 Einleitung

Um den in CISPR 32 [1] eingeführten Höhenscan der Empfangsantenne von 1 m bis 4 m bei der Emissionsmessung oberhalb 1 GHz gegenüber dem Messverfahren nach DIN EN 55016-2-3 [3] (ohne Höhenscan) technisch zu diskutieren, wurde eine Joint Task Force (JTF A/I) eingerichtet. Diese beschäftigt sich mit den Messverfahren zur Detektion der maximalen Emission und mit dem Einfluss der Messumgebung auf den Höhenscan, wie auch in [4] bis [6] erläutert.

Ein wichtiger Diskussionspunkt ist der signifikante technische Unterschied zwischen Vollabsorberkammern (FAR) und Halbabsorberkammern (SAC) mit zusätzlich eingefügten Bodenabsorbern für Messungen oberhalb 1 GHz (FS-OATS gemäß CISPR 32). Typischerweise befindet sich ein Messtisch auf dem Drehtisch, was die Auslegung von Bodenabsorbern und den Zugang zum Prüfling und den Anschlussleitungen erschwert. Bei Geräten, die auf dem Boden stehen, sind keine Absorber unterhalb des Prüflings möglich. Aus diesen praktischen Erwägungen heraus wird daher oft von einem Absorberbelag des metallischen Drehtisches in der SAC verzichtet. Es werden stattdessen nur die Absorber zwischen Antenne und Drehtisch entsprechend der Messplatzvalidierung eingesetzt. Im Gegensatz zum metallischen Drehtisch der SAC hat der Drehtisch in der FAR auch ohne zusätzliche Absorber bereits einen Ferrit-Belag und das Prüfvolumen beginnt typischerweise in einer Höhe von 0,75 m über dem Ferritboden.

Um den Einfluss von Bodenreflexionen auf die Emissionsmessergebnisse in den verschiedenen Messumgebungen genauer zu analysieren, wurden in der Arbeitsgruppe DKE/GAK 767.4.1 „Feldstärke“ (AHF) Vergleichsmessungen in der FAR und der SAC mit zusätzlich eingefügten Bodenabsorbern auf dem Drehtisch durchgeführt. Es wird gezeigt, welchen Einfluss Absorber auf dem Drehtisch auf den Höhenscan und auf das elektrische Feld in der FAR und der SAC besitzen, wenn sich die Sendeantenne auf der Center-Position des Site-VSWR-Verfahrens (S_{VSWR}) [7] befindet.

Weiterhin werden Feldberechnungen durchgeführt, um den Einfluss des metallischen Drehtisches in einer SAC auf die in 3 m Messentfernung gemessene elektrische Feldstärke darzustellen. Diese werden im Anschluss den Messungen gegenübergestellt. Die Auswirkungen des Drehtisches und der Messumgebung auf die Emissionsmessung und das Strahlungsdiagramm werden dargestellt.

Der Beitrag schließt mit einer Diskussion der Erkenntnisse und einem Ausblick auf die fortzuführenden Messaktionen.

2 Messtechnische Untersuchung

2.1 Beschreibung der Messumgebungen

Die Messungen werden in einer Halbabsorberkammer (Semi-anechoic chamber - SAC) und einer Vollabsorberkammer (Fully anechoic room - FAR) durchgeführt. Beide Messumgebungen sind nach dem S_{VSWR} Verfahren [7] validiert. Die in Abbildung 1 schematisch dargestellte SAC hat einen metallischen Drehtisch mit einem Durchmesser von 2 m und einem Prüfvolumen mit 2 m Höhe. Das sind die typischen Dimensionen einer SAC für eine 3 m Messstrecke. Es können Höhenscans der Antenne von 1 m bis 4 m durchgeführt werden. Die in Abbildung 2 dargestellte FAR hat einen Drehtisch mit Ferritbelag mit einem Durchmesser von 1,5 m und einem Prüfvolumen mit 1,5 m Höhe. Auch das sind typische Dimensionen für eine FAR mit 3 m

Messstrecke. Die Abmessungen einer FAR sind in der Regel so gewählt, dass eine Höhenvariation der Empfangsantenne bis zur Oberkante des Prüfvolums möglich ist. Nur wenige FARs erlauben einen Höhen-scan der Antenne bis 4 m. Da die Öffnungswinkel der verfügbaren Empfangsantennen bei den beschränkten Prüfvolumenabmessungen jedoch meist schon ausreichend sind, um in 3 m Messentfernung das gesamte EUT zu erfassen, kann aktuell noch mit einer fixen Position der Empfangsantenne in der mittleren Höhe des Prüfvolums gemessen werden.

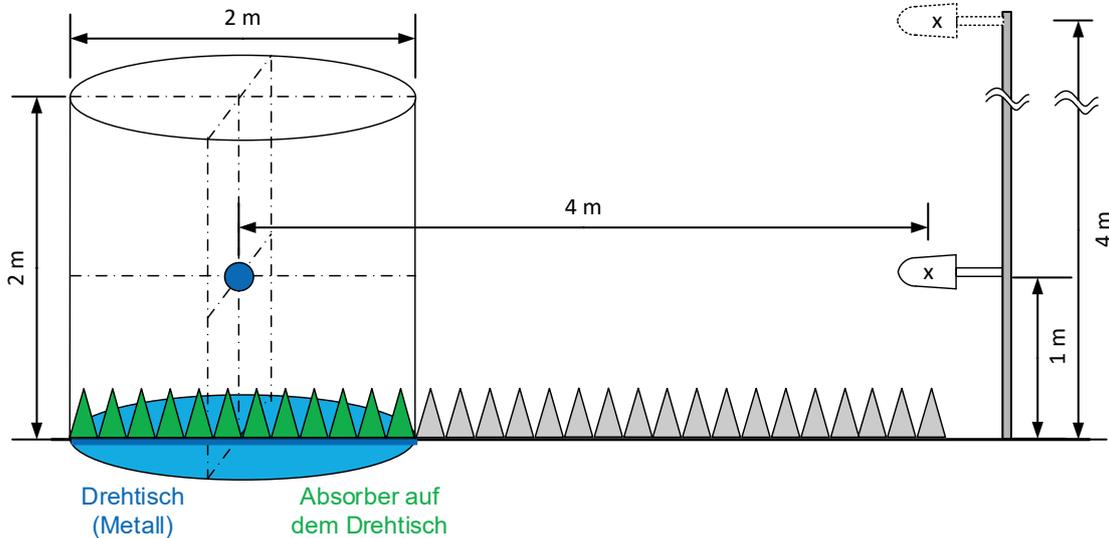


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus in der Teilabsorberkammer (SAC) mit einem metallischen 2 m Drehtisch (FS-OATS mit Bodenabsorbern >1GHz)

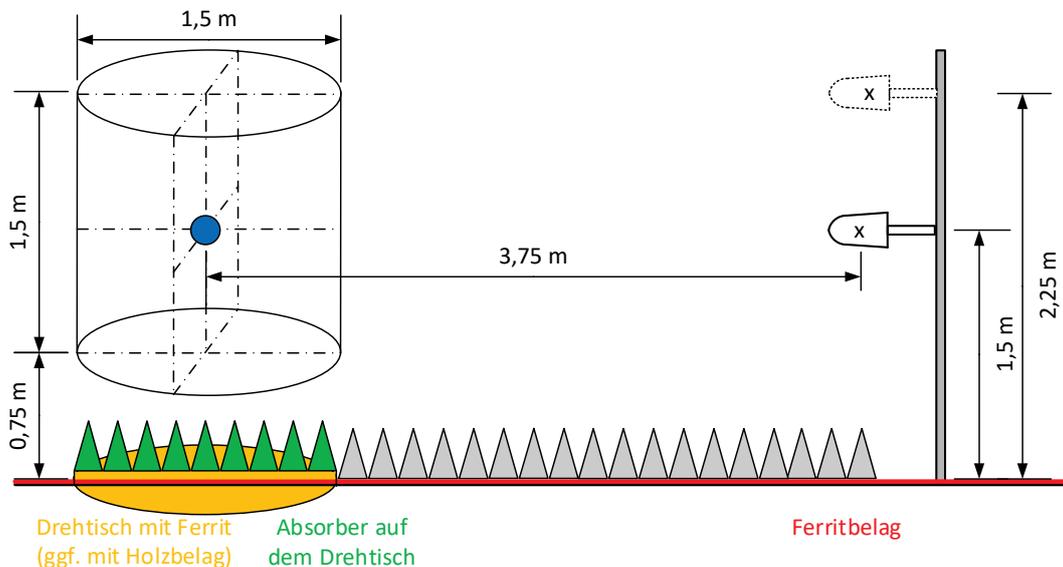


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Messaufbaus in der Vollabsorberkammer (FAR) mit einem 1,5 m Drehtisch mit Ferritbelag (und ggf. einer Holzauflage)

2.2 Verwendete Antennen und Messgeräte

Als Empfangsantennen werden die gestockte logarithmisch periodische Antenne HL050 und die Doppelsteg-Breitband-Horn-Antenne HF907 eingesetzt. Die Empfangsantennen werden beim Höhen-scan nicht zum Prüfling geneigt (kein Tilting), da es in der CISPR 32 [1] nicht gefordert ist. Es ist bekannt, dass aufgrund des mit der Frequenz abnehmenden Öffnungswinkels der Antenne bei größeren Höhen der Empfangsantenne nur noch ein reduzierter Anteil der Emission des Prüflings erfasst werden kann. Als Signalquelle wird die breitbandige POD16 verwendet, die ein dipolförmiges Strahlungsdiagramm besitzt. Die Sendeantenne befindet sich auf einer

Positioniereinrichtung. Diese Kombination wird typischerweise zur Bestimmung des S_{VSWR} [4] eingesetzt. Die Messungen erfolgen mit dem Spektrum Analysator FSV 40 unter Verwendung des eingebauten Mitlaufgenerators. Mit einer Zwischenfrequenz-Bandbreite von 1 kHz beträgt der Signal-Rauschabstand >40 dB.

2.3 Untersuchung des Einflusses des Absorberbelags auf dem Drehtisch

2.3.1 Einfluss auf das S_{VSWR} in der Center Position

Die Sendeantenne POD16 befindet sich in der Mitte des Prüfvolumens auf der Center-Position des S_{VSWR} Validierungsverfahrens (SAC auf 1 m Antennenhöhe; FAR auf 1,5 m Antennenhöhe). Jetzt wird der Signalpegel an der Empfangsantenne bei 3 m Messabstand für die zwei verschiedenen Absorberanordnungen auf dem Drehtisch aufgenommen. Wie in Abbildung 3 (SAC) und Abbildung 4 (FAR) dargestellt, erfolgt die Messung zunächst ohne Absorber auf dem Drehtisch (links) und dann mit Absorbern auf dem Drehtisch bis unter die POD16 Sendeantenne (rechts).

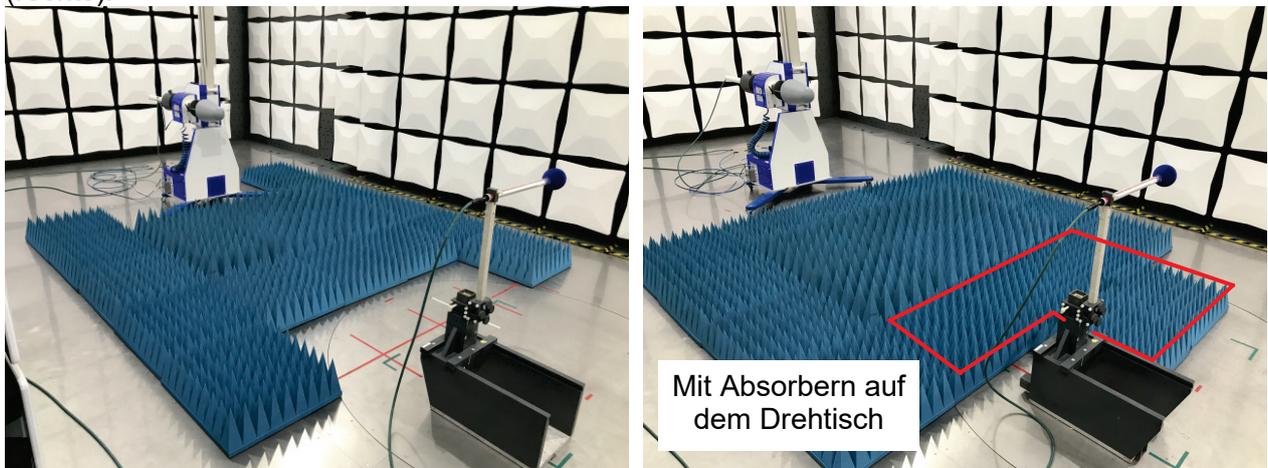


Abbildung 3: Bild vom Messaufbau in der SAC mit bzw. ohne Absorber auf dem metallischen Drehtisch in horizontaler Polarisation



Abbildung 4: Bild vom Messaufbau in der FAR mit bzw. ohne Absorber auf dem Drehtisch in horizontaler Polarisation

Die Abbildung 5 zeigt den Einfluss des Absorberbelags auf dem Drehtisch auf den in der Center-Position des S_{VSWR} -Verfahrens gemessenen Signalpegel für die SAC (links) und die FAR (rechts). Erwartungsgemäß haben die Absorber auf dem metallischen Drehtisch der SAC einen deutlich höheren Einfluss als in der FAR, die bereits eine Ferritauskleidung besitzt. Bei der SAC treten Abweichungen in der Center-Position von ca. ${}^{+1,7}_{-1,5}$ dB auf. In der FAR sind es nur $\pm 0,5$ dB.

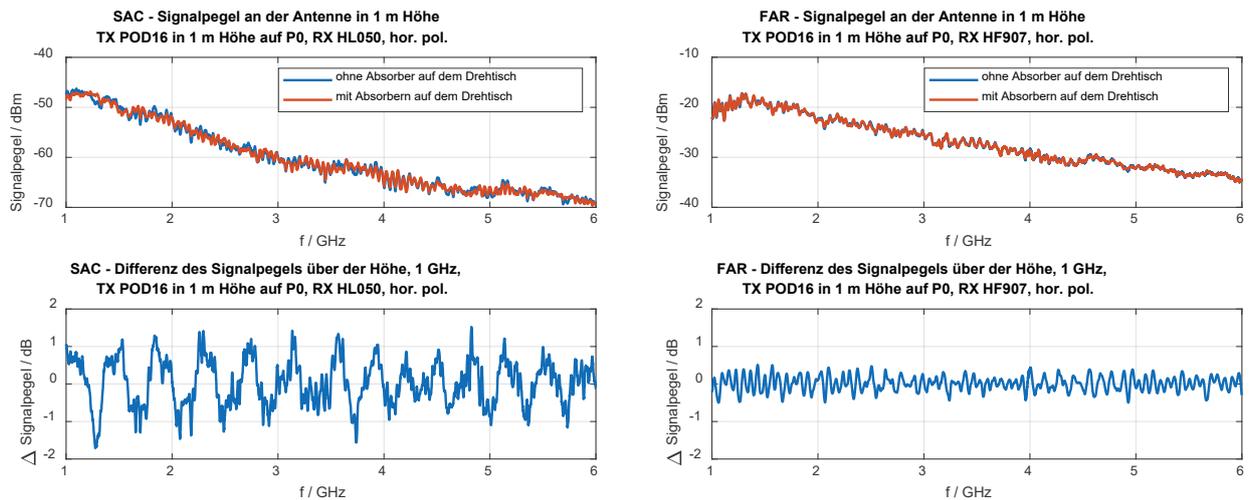


Abbildung 5: Unterschiede der Signalpegel durch Absorber auf dem Drehtisch in der SAC (links) und der FAR (rechts) in horizontaler Polarisation (Sendeantenne auf der Center-Position)

Um den Einfluss der Absorberreduktion auf dem Drehtisch zu ermitteln, könnte die Bestimmung des Unterschiedes der gemessenen Felder mit einer dipolförmigen Sendeantenne in der Center-Position jeweils mit bzw. ohne Absorberbelag auf dem Drehtisch ein mögliches Kriterium sein.

2.3.2 Einfluss auf den Höhenscan in der SAC

Jetzt wird der Einfluss des Absorberbelags auf dem metallischen Drehtisch in der SAC beim Höhenscan der Empfangsantenne von 1 m bis 4 m untersucht. Die Empfangsantenne wird dazu in 5 cm Schritten verfahren. In Abbildung 6 sind die gemessenen Signalpegel exemplarisch für die Frequenzen 1 GHz und 3 GHz über der Höhe der Empfangsantenne dargestellt. Wie zu erwarten, zeigt der Signalpegel bei der nur teilweise belegten metallischen Reflexionsfläche am Boden eine deutlich höhere Welligkeit. In der im unteren Diagramm dargestellten Differenz ist das durch die Reflexion des metallischen Drehtisches gebildete Interferenzmuster deutlich zu erkennen.

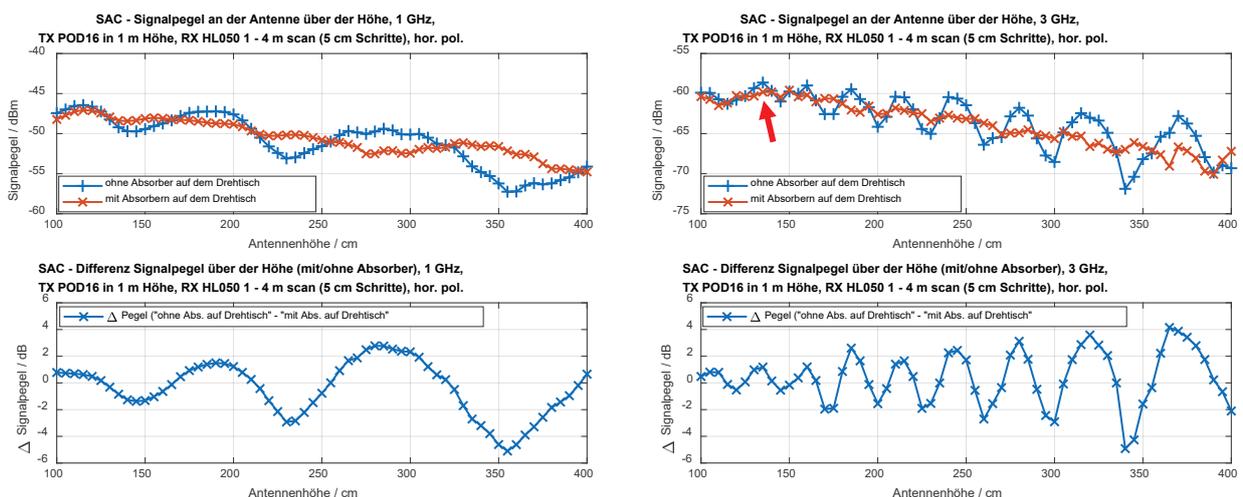


Abbildung 6: Gemessener Pegel über die Antennenhöhe von 1 m bis 4 m bei 1 GHz (links) und 3 GHz (rechts) - mit bzw. ohne Absorberbelag auf dem Drehtisch der SAC in hor. Polarisation

3 Feldberechnung zur Visualisierung und Vergleich mit den Messungen in der SAC

3.1 Beschreibung des Modells

Durch die Reflexion des Bodens bzw. des Drehtisches wird die Strahlungscharakteristik des Prüflings bzw. der hier eingesetzten Sendeantenne beeinflusst. Um die resultierende Feldverteilung im Bereich der Empfangsantenne zu visualisieren, ist mit dem auf der Momentenmethode basierenden Feldberechnungsprogramm CONCEPT-II [8] das Strahlungsdiagramm eines kurzen Dipols in horizontaler Polarisation im freien Raum und eines kurzen Dipols über einem metallischen Drehtisch mit 2 m Durchmesser exemplarisch für 3 GHz berechnet worden. Die Sendeantenne befindet sich in 1 m Höhe und der Betrag des elektrischen Feldstärkevektors ist im Abstand von 4 m von der Sendeantenne bestimmt worden, was einer Messentfernung von 3 m entspricht. Der metallische Drehtisch ist als idealer Leiter modelliert worden, der sich im ansonsten freien Raum befindet.

3.2 Beeinflussung der Strahlungsdiagramme durch den Drehtisch

Abbildung 7 (links) zeigt das der Theorie [9] und [10] entsprechende Strahlungsdiagramm eines kurzen Dipols sowie die elektrische Feldstärke in 3 m Messentfernung von 0 m bis 4 m im freien Raum. Die elektrische Feldstärke ist normiert auf das beim Höhengscan ermittelte Maximum. Das Maximum der elektrischen Feldstärke tritt bei 1 m auf, wenn sich die Empfangsantenne auf der Höhe der Sendeantenne befindet. Abbildung 7 (rechts) zeigt das Strahlungsdiagramm des kurzen Dipols und des metallischen Drehtisches sowie das elektrische Feld in 3 m Messentfernung. Durch den metallischen Drehtisch ist das Strahlungsdiagramm aufgefächert und besitzt viele Nebenkeulen. Es ist ein Interferenzmuster in der Feldverteilung zu erkennen, wie auch bereits bei der Messung in Abbildung 6 (rechts) zu erkennen ist. Es ist zu berücksichtigen, dass das Modell nur den metallischen Drehtisch und nicht den weiteren metallischen Boden in der SAC dargestellt, was das Interferenzmuster noch weiter verstärken würde.

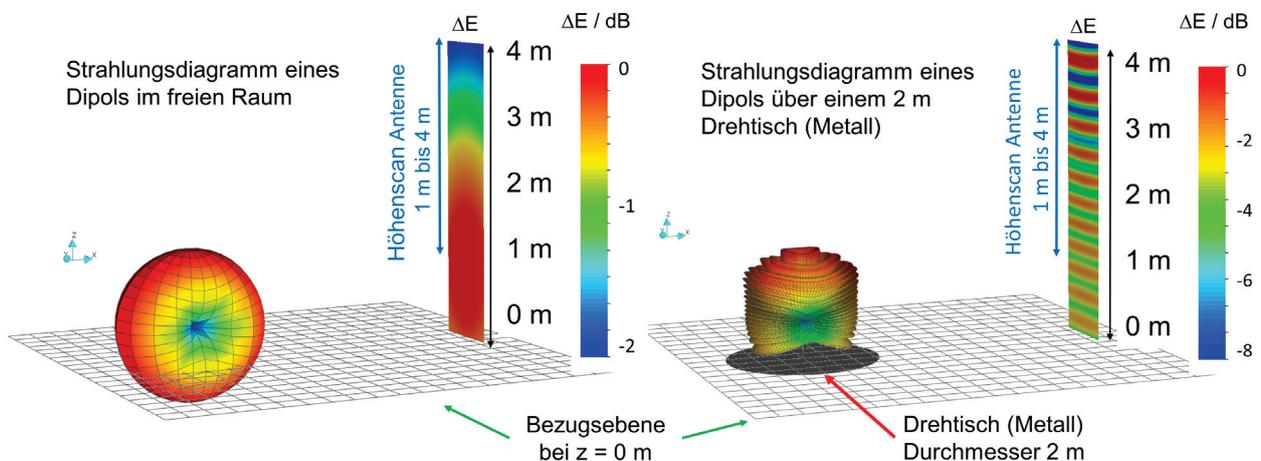


Abbildung 7: Strahlungsdiagramme und erzeugte elektrische Feldstärke durch einen kurzen Dipol in 3 m Messentfernung bei 3 GHz (links – freier Raum / rechts – mit 2 m metall. Drehtisch)

3.3 Vergleich mit den Messungen in der SAC

In Abbildung 8 ist dargestellt, welche Nebenkeulen des Strahlungsdiagramms bzw. der Emission beim Höhengscan der Antenne von 1 m bis 4 m erfasst werden können. Das vom Höhengscan betrachtete Winkelsegment ist leicht verschoben, da sich das Zentrum des Strahlungsdiagramms in 0,5 m Höhe in der Mitte zwischen Sendeantenne und Drehtisch befindet. Die auch bereits bei der Messung ermittelten 9 Maxima (Abbildung 6 – rechts) enthalten nicht das absolute Maximum der Emission, wie im 2D Bild des Strahlungsdiagramms mit der Normierung auf das Maximum der elektrischen Feldstärke erkennbar ist. Die absoluten Maxima treten noch oberhalb des Bereiches des Höhengscans auf.

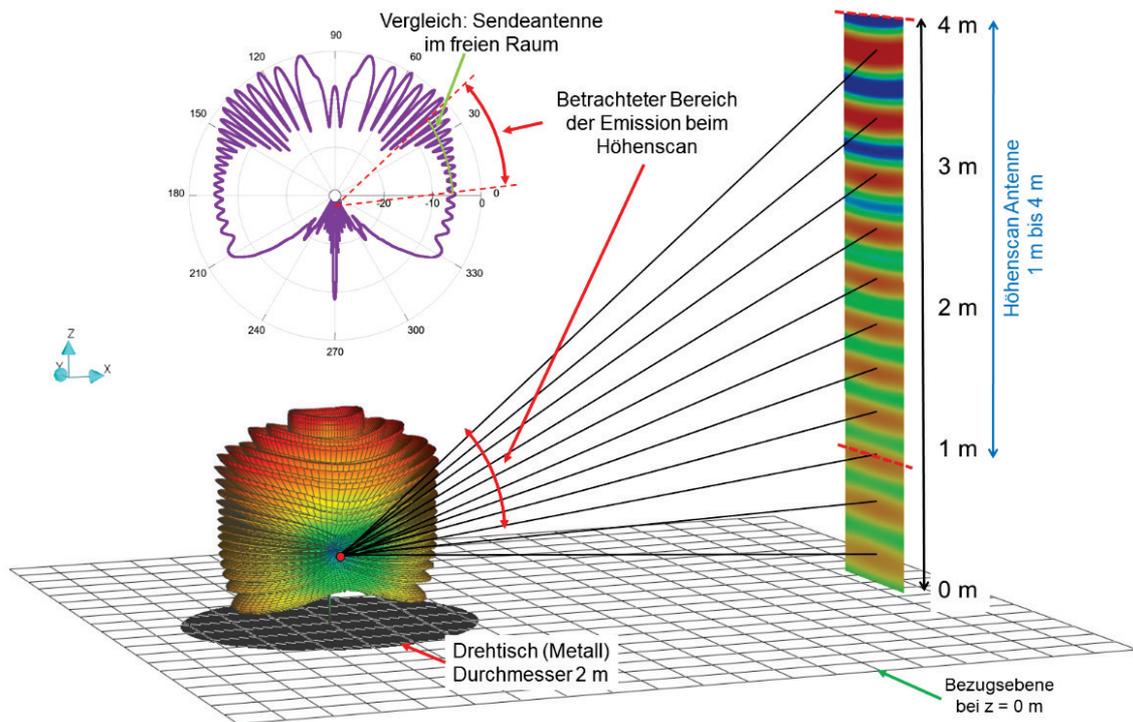


Abbildung 8: Strahlungsdiagramm (elektrischen Feldstärke) im Abstand von 4 m von der Sendeantenne (1 m über dem metallischen Drehtisch) und betrachteter Bereich beim Höhengscan (3 GHz)

Es fällt auf, dass die Messung (Abbildung 6 – rechts) mit einer Antennenhöhe oberhalb 1,5 m geringere Feldstärkewerte aufweist als darunter. Die Simulation zeigt hingegen höhere Werte für die Feldstärke in einer größeren Höhe. Das liegt an dem Öffnungswinkel der Empfangsantenne. Da diese entsprechend CISPR 32 nicht geneigt wird, ist die Keule der Sendeantenne außerhalb des 3 dB Öffnungswinkels der Empfangsantenne. Es ist zu berücksichtigen, dass die hier verwendete HL050 bereits einen sehr großen Öffnungswinkel besitzt – mit anderen Antennen, die einen kleineren Öffnungswinkel besitzen, wird der Effekt noch stärker auftreten.

3.4 Vergleich der maximalen Emission im Freiraum und in der SAC

Das Maximum der beim Höhengscan ermittelten elektrischen Feldstärke (3 GHz) liegt bei der Messung bei ca. 1,35 m (roter Pfeil in Abbildung 6). Diese Keule hat laut Strahlungsdiagramm (Abbildung 8) aber bereits eine Reduktion gegenüber dem absoluten Maximum der Emission von etwa 5 dB. Betrachtet man den Mittelwert der lokalen Maxima und Minima (Rippel) beträgt die Abweichung zum Maximum ca. 6 dB. Bei der hier betrachteten Konstellation mit einer dipolförmigen Strahlungsquelle liegt die ermittelte Feldstärke auf Höhe der Sendeantenne bei der Mittelung der dort auftretenden Minima und Maxima aber nahezu bei den ermittelten Werten für die gleiche Sendeantenne im freien Raum. Zum Vergleich ist der Auszug aus dem Strahlungsdiagramm der Sendeantenne im freien Raum in grün eingefügt. Das deckt sich auch mit den Messungen (Abbildung 6). Bei Einbringung der Absorber auf dem Drehtisch werden die Abweichungen verringert, da die Interferenz verringert wird.

Würde die Emission der Sendeantenne ohne Bodenabsorber über die gesamte Kugeloberfläche in 4 m Abstand aufgenommen werden können, dann wird das ermittelte absolute Maximum um ca. 6 dB über der Emission der Sendeantenne im freien Raum liegen. Das ist aber eine Rückwirkung der Messumgebung und keine Eigenschaft des Prüflings.

Da die Emission und das Strahlungsdiagramm eines realen EMV-Prüflings a priori nicht bekannt sind, sollte der Einfluss des metallischen Drehtisches auf die Emission des Prüflings durch Absorber auf dem Drehtisch verringert werden, um die dargestellten Reflexionen und Interferenzen zu vermeiden.

4 Zusammenfassung, Ausblick und Diskussion

4.1 Ergebnis

Mit einer Sendeantenne mit dipolförmigen Strahlungsdiagramm in der Center-Position wurde der Unterschied der elektrischen Feldstärke für eine 3 m Messentfernung sowohl mit als auch ohne Absorberbelegung der metallischen Drehscheibe untersucht. In einer SAC mit 2 m Drehscheibe kann ein Unterschied von ca. $\begin{matrix} +1,7 \\ -1,5 \end{matrix}$ dB gemessen werden. In einer typischen Vollabsorberkammer (FAR) mit einem in 75 cm Höhe beginnenden Prüfvolumen und einer Empfangsantennenhöhe von 1,5 m ist der Einfluss von zusätzlichen Pyramidenabsorbern auf dem Drehtisch dagegen mit weniger als $\pm 0,5$ dB deutlich geringer. Um den Einfluss der Absorberreduktion auf dem Drehtisch zu ermitteln, könnte die Bestimmung des Unterschiedes der gemessenen Felder mit einer dipolförmigen Sendeantenne in der Center-Position jeweils mit bzw. ohne Bodenabsorber auf dem Drehtisch ein mögliches Kriterium sein.

Die Untersuchung zeigt auch auf, dass mit einer Absorberbelegung von Drehtischen vor allem in der SAC mit Bodenabsorbern (FS-OATS gemäß CISPR 32) die Abweichungen zwischen der Messung in einer festen Höhe gegenüber dem Höhenscan der Antenne reduziert werden können. Die Maxima treten in geringen Höhen auf, wenn die Halleneigenschaften ausreichend gut sind bzw. die Drehtischoberfläche nur geringe Reflexionen aufweist. Die Untersuchungen zeigen auch, dass selbst ohne Absorberauslegung auf dem Drehtisch ein Höhenscan der Empfangsantenne bis zur Oberkante des Prüfvolumens als ausreichend erachtet werden kann. Das bestätigt auch den bisherigen Ansatz, dass ein Höhenscan nicht unbedingt erforderlich ist, sofern der 3 dB Öffnungswinkel der ausgewählten Empfangsantenne die Prüflingsgröße abdeckt. Aus diesen technischen Gründen und zur Reduktion des Zeitaufwandes einer Messung wird daher von deutscher Seite in der JTF die Position vertreten, dass zumindest in der FAR von einem Höhenscan der Antenne abgesehen werden soll, da das bisherige Verfahren ausreichend ist. Der ursprüngliche Ansatz, dass ein Höhenscan maximal bis zur Oberkante des Prüfvolumens erforderlich sein sollte, wurde erneut bestätigt. Weitere Vergleichsmessungen in SACs und FARs sollen hierzu folgen.

4.2 Diskussion

Die Einführung des Höhenscans der Empfangsantenne in CISPR 32 beruht auf der Vermischung verschiedener technischer Effekte. Die Verkopplung des Prüflings mit dem metallischen Drehtisch bzw. die Reflexion des Drehtisches in einer SAC führt zu einem veränderten Strahlungsdiagramm des Prüflings und zu dem beim Höhenscan erkennbaren Interferenzmuster. Getrennt von diesem Effekt besitzen Prüflinge >1 GHz aber auch Strahlungsdiagramme, die eine erhebliche Richtcharakteristik aufweisen können [11]. Selbst mit einem zeitaufwendigen Höhenscan der Antenne kann jedoch nur ein kleiner Teil dieses Strahlungsdiagramms gemessen werden und damit ist ein zusätzlicher Nutzen bei der Konformitätsbewertung offen. Das ist unbefriedigend, da die Sicherstellung des reproduzierbaren Betriebszustandes des Prüflings bereits einen immer größeren Zeitaufwand erfordert [4].

Der Höhenscan ist auch eine Änderung des Messverfahrens. Dieses darf nur in Verbindung mit der Betrachtung des Stör-Kopplungsmodells erfolgen [12]. Dazu gehört auch die Definition der physikalischen Messgröße und des Grenzwertes. Prüfling können >1 GHz Strahlungskeulen mit einer hohen Amplitude besitzen, die jedoch nur in einem relativ kleinen Raumwinkel wirksam sind. Daher ist auch die Wahrscheinlichkeit gering, dass sich ein Störpfer im Bereich dieser Strahlungskeule befindet. Das ist beispielsweise der Faktor p_1 der Wahrscheinlichkeit im Störkopplungsmodell. Das ist aber nur ein Faktor aus 10 verschiedenen Faktoren, der nicht allein betrachtet werden darf. Diese Keulen dürfen auch nicht durch unzureichende Freiraum-Bedingungen der Messumgebung generiert werden, wie im Beitrag gezeigt.

Ggf. ist auch eine technische Diskussion erforderlich, ob das Maximum der elektrischen Feldstärke die richtige Messgröße oberhalb 1 GHz zur Charakterisierung der EMV-Emissionseigenschaften ist. Auch die Reverberation Chamber könnte in diesem Frequenzbereich eingesetzt werden, um die EMV-Eigenschaften von Prüflingen zu bewerten. Damit kann die Emission des Prüflings ermittelt werden, ohne einen zeitaufwändigen Scan der Prüflingsoberfläche vornehmen zu müssen. Die Messgröße ist die gesamte abgestrahlte Leistung. Diese ist schneller zu ermitteln, aber es fehlt die Information, in welcher Raumrichtung die maximale Emission auftritt. Das kann bei der Beseitigung der Emissionsprobleme eines Prüflings problematisch sein und erfordert ggf. die Nachmessung mit einer Nahfeldsonde.

Das Ziel muss sein, dass die Messungen technisch valide, reproduzierbar und effizient erfolgen können.

5 Literaturangaben

- [1] CISPR 32:2015+AMD1:2019 CSV, Consolidated version, Electromagnetic compatibility of multimedia equipment - Emission requirements
- [2] DIN EN 55032:2022-08; VDE 0878-32:2022-08, Elektromagnetische Verträglichkeit von Multimediageräten und Einrichtungen - Anforderungen an die Störaussendung (CISPR 32:2015 + COR1:2016 + A1:2019); Deutsche Fassung EN 55032:2015 + AC:2016 + A11:2020 + A1:2020
- [3] DIN EN 55016-2-3:2020-11; VDE 0877-16-2-3:2020-11, Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit - Teil 2-3: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit - Messung der gestrahlten Störaussendung (CISPR 16-2-3:2016 + A1:2019); Deutsche Fassung EN 55016-2-3:2017 + A1:2019
- [4] S. Battermann, K. Hemmerlein, and M. Stecher, "Discussion of the height scan introduced in CISPR 32 for measuring emissions above 1 GHz," in 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 2023, pp. 1–6, DOI: [10.1109/EMCEurope57790.2023.10274182](https://doi.org/10.1109/EMCEurope57790.2023.10274182)
- [5] S. Battermann and K. Hemmerlein, "Diskussion des in CISPR 32 eingeführten Höhenscans bei der Emissionsmessung oberhalb 1 GHz," 2020, DOI: <https://doi.org/10.15488/10013>
- [6] J. Petzold, M. Magdowski and R. Vick, "Investigation of the Impact of Height Scans in Fully Anechoic Rooms on Detection of Maximal Radiated Field Strength Using Monte Carlo Simulation," 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Gothenburg, Sweden, 2022, pp. 846-850, DOI: [10.1109/EMCEurope51680.2022.9900950](https://doi.org/10.1109/EMCEurope51680.2022.9900950)
- [7] 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
- [8] C. Schuster, „CONCEPT-II“ unter: <https://www.tet.tuhh.de/concept/> (abgerufen am 14.01.2023)
- [9] W. Mathis, A. Reibiger, "Küpfmüller Theoretische Elektrotechnik", 20. Auflage, 2017, Springer Berlin Heidelberg, DOI: [10.1007/978-3-662-54837-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54837-0)
- [10] R. C. Johnson, "Antenna Engineering Handbook", 3rd Edition, 1993, McGraw-Hill, New York
- [11] P. Wilson, "Emission and immunity testing: test object electrical size and its implication," 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Silicon Valley, CA, USA, 2004, pp. 349-352 vol.2, DOI: [10.1109/ISEMC.2004.1349813](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2004.1349813)
- [12] CISPR TR 16-4-4:2007/AMD2:2020 "Amendment 2 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling - Statistics of complaints and a model for the calculation of limits for the protection of radio services"