

Charakterisierung eines Referenztestaufbaus für die HPEM-Normentwicklung

Dr. Thorsten Pusch, Fraunhofer INT, Elektromagnetische Effekte und Bedrohungen

Dr. habil Michael Suhrke, Fraunhofer INT, Elektromagnetische Effekte und Bedrohungen

Benjamin Jörres, Fraunhofer INT, Elektromagnetische Effekte und Bedrohungen

1 Einleitung

Mutwillige elektromagnetische Störversuche mit Quellen hoher Leistung finden außerhalb des gesetzlichen Schutzrahmens für Emission und Immission statt und stellen Versuche zur normativen Eingrenzung vor Herausforderungen. So ist neben diversen Signalformen auch ein mehrere Größenordnungen umfassender Dynamikbereich zu berücksichtigen, unter üblicherweise limitierten Ressourcen für die Gerätequalifizierung.

Beginnend im militärischen Bereich entstanden in der Vergangenheit Normenvorschriften im Bereich der High Power Electromagnetics (HPEM) [1, 4]. Seit einigen Jahren werden ergänzend auch im zivilen Bereich Regelwerke erarbeitet, die die mutwillige elektromagnetische Störung (engl. Intentional Electromagnetic Interference, IEMI) zur Grundlage haben [2, 3]. Bei deren Weiterentwicklung kommen unter anderem Alternativen zu etablierten Testumgebungen wie TEM-Wellenleiter und Modenverwirbelungskammer ins Spiel, was die Frage nach dem Transfer von Ergebnissen zwischen verschiedenen Testumgebungen aufwirft. Zudem könnten aus anderen Normentexten detaillierte Gestaltungsvorschriften für HPEM-Testaufbauten adaptiert werden.

Bei der Analyse von Testverfahren ist eine Bilanzierung aller Einflussfaktoren auf das Messergebnis erforderlich. Bei Empfindlichkeitstest ist insbesondere die Beschaffenheit des Prüflings eine maßgebliche Größe, zudem beeinflussen neben Positionierung und Orientierung auch sein Betriebszustand sowie sein Vorbelastung das Verhalten. An dieser Stelle setzt die Idee eines generischen Referenztestaufbaus an. Eine solche Eigenentwicklung soll sich für die Erhebung von Empfindlichkeitsprofilen im Rahmen von HPEM-Tests eignen, also möglichst reproduzierbar bei vielen Frequenzen und jeweils den gleichen Schwellfeldstärken Fehlerbilder zeigen. Dabei sollten Direkt- und Kabelkopplung sowie eine Kombination aus binären und abgestuften Effekten für eine phänomenologisch breit aufgestellte Systemreaktion zum Tragen kommen, mit der umfangliche Vergleiche zwischen Umgebungen und Laboren möglich werden.

In jüngerer Zeit wurden bereits Ansätze vorgestellt, solche Referenzaufbauten zu gestalten. Beispielsweise wurde für Round-Robin-Tests gemäß IEC 61000-4-3 ein PC-Gehäuse mit Mutterplatine als Referenzaufbau vorgeschlagen [6]. Allerdings wird hier an unbestromten Strukturen der eingekoppelte Störeintrag nachgemessen, die Überprüfung einer Systemreaktion im Betriebszustand ist nicht vorgesehen. Wiederum für vergleichende Tests nach eben dieser IEC-Norm wurde ein Aufbau vorgestellt, der über LED-Elemente den Systemzustand spiegelt [7]. Hier ist allerdings eine Videoüberwachung gefordert, welche nicht notwendigerweise vorausgesetzt werden kann. Zudem führen galvanisch koppelnde Anschlussleitungen zum Prüfling.

Wir haben in Zusammenarbeit mit unseren Kooperationspartnern, dem WIS Munster und dem schwedischen FOI, auf der Grundlage eines handelsüblichen Einplatinenrechners mit ergänzender Peripherie einen kompakten, akkubetriebenen Testaufbau entworfen, ausgestattet mit serieller, optischer Kommunikationsleitung zum Kontrollraum. In Vorabtests konnte er bereits mit guter Wiederholungsgenauigkeit konsistente Systemreaktionen aufzeigen, auch über mehrere Ersatzexemplare hinweg [5]. Hierbei wurden in einem TEM-Wellenleiter mit monofrequenten, radarartigen Pulsen Fehlerschwellen aufgenommen. Im Folgenden wollen wir den Aufbau weiter hinsichtlich seines Ansprechverhaltens charakterisieren. Dabei wird auf kleinere Unterschiede im Ansprechverhalten bei Änderung der Polarisierung eingegangen. Unter Variation der Messparameter gelingt die konsistente Erweiterung der Empfindlichkeitsprofile auf höhere Frequenzen, eine zeitliche Verdichtung der Signalbeaufschlagung senkt die Empfindlichkeitsschwellen in niedrigere Dynamikbereiche ab.

2 Konzeption des Testsystems

2.1 Referenztestaufbau

Der Referenzaufbau sollte in Struktur und Verhalten einen realen, zeitgemäßen Prüfling nachempfinden [5]. Die von uns als zentrale Komponente gewählten Einplatinenrechner stehen repräsentativ für moderne IT-Systeme, Kernmerkmale sind die Mehrkern-CPU, die dedizierte Grafikeinheit und die Anschlussmöglichkeiten für Peripherie. In der Schemazeichnung in Abbildung 1 ist in der linken oberen Ecke der quadratischen Sytrodur-Grundplatte mit 40 cm Kantenlänge der verwendete Single Board Computer (SBC) Raspberry Pi 3 Model B V1.2 zu sehen, auf der GPIO-Pfostenleiste sind zusätzlich eine Platine für serielle Kommunikation über Glasfaser sowie eine AD/DA-Wandlerplatine aufgesteckt. Diese speist Spannungsteiler auf der mit 60 cm Flachbankkabel verbundenen Zusatzplatine, deren Ausgangsspannungen wieder digitalisiert werden.

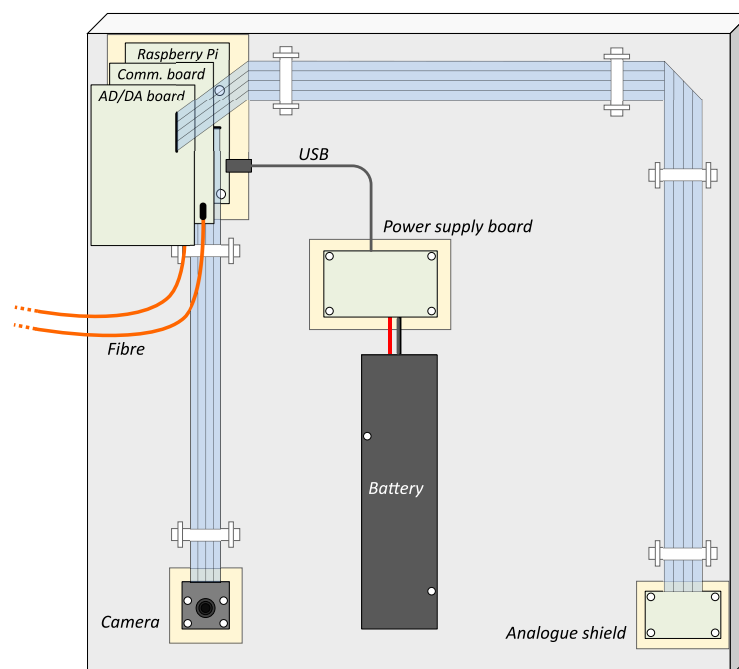


Bild 1: Schemazeichnung des Referenzprüfaufbaus [5].

Fehlerklasse	Beschreibung	Plotsymbol
1	Analogwerte außerhalb Toleranz	×
2	Videopixelwerte außerhalb Toleranz	*
3	Verlust der seriellen Verbindung unter Feld	□
4	Verlust der seriellen Verbindung erfordert Neustart	△

Tabelle 1: Definition der Fehlerzustände.

Neben dieser analogen Sensorplattform wird zusätzlich mit einem Kameramodul auch eine digitale Komponente eingebracht. Vervollständigt wird der Aufbau über eine akkugestützte Spannungsversorgung mit einer Platine zur Spannungswandlung. Dem erwartbaren Hardwareverschleiss bei Hochleistungstests wird über Bevorratung von Ersatzhardware entgegengewirkt. Die gemeinnützige Pi Foundation sagt zudem die Produktion des gewählten SBC-Modells bis 2026 zu.

2.2 Fehlerüberwachung

Vom Aufbau ausgehend ist eine Glasfaserverbindung bis zum Kontrollstand der jeweiligen Testeinrichtung vorgesehen, über die Systemdaten an einen weiteren Linux-Rechner gesandt werden. Über eine grafische Oberfläche werden dort Fehlerzustände sichtbar, zudem können Rohdaten in eine Logdatei geschrieben werden. Insgesamt wurden vier Fehlerzustände definiert, einen Kurzüberblick gibt Tabelle 1. Eine Abweichung der digitalisierten Spannungen um mehr als die vorgegebene Toleranz von den ohne Feldexposition aufgezeichneten Referenzwerten wird als Analogfehler vermerkt. Die regelmäßig erfassten Kamerabilder werden über Differenzbildung mit einem gemittelten Referenzbild verglichen, überschreitet die Anzahl an mehr als um eine Rauschtoleranz von der Referenz abweichenden Pixel einen Schwellwert, so liegt eine Videostörung vor. Schließlich kann der optische Link temporär während Exposition oder nachhaltig auch nach Abschalten der Felder ausfallen. Es liegt dann Kommunikationsunterbrechung beziehungsweise Kommunikationsabbruch vor.

3 Testprozedere zur Messung der Fehlerschwellen

Für die im Folgenden beschriebenen Messungen haben wir den Prüfaufbau in senkrechter Orientierung in einem TEM-Wellenleiter aufgestellt, die Vorderseite mit den Elektronikkomponenten weist dabei der heranlaufenden Welle entgegen, wie auch in Abbildung 2 zu sehen. Über den montierten Akku ist Batteriebetrieb über mehrere Stunden möglich, die einzige Zuleitung ist die optische Verbindung zur Prüflingsüberwachung.

Für die Empfindlichkeitstest im Wellenleiter wurde eine Hochleistungsquelle auf Grundlage von Triodeneinschüben verwendet, deren schalbandiges Ausgangssignal jeweils über einen mehrere Hundert MHz breiten Frequenzbereich verstimmt werden kann. Dadurch kann das Gesamtsystem einen Bereich zwischen 150 MHz und 3,4 GHz lückenlos abdecken. Für die Empfindlichkeitstest am Referenzaufbau wurde zunächst an amplitudenmodulierten, monofrequenten Signalen gearbeitet. Mit einer Wiederholrate von 1 kHz folgen Rechteckpulse von jeweils 1 μ s Länge aufeinander, von diesem Schema wurde teilweise für die Parameteruntersuchungen abgewichen. Von der prinzipbedingten Mindestleis-

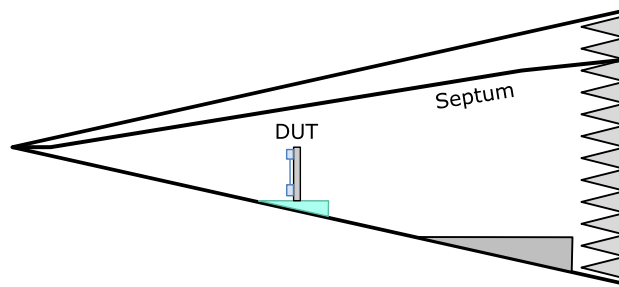


Bild 2: Testaufbau im TEM-Wellenleiter.

ung ausgehend wurde eine Leistungsrampe über 20 s bis zum maximal möglichen Wert gefahren, im Fehlerfall dann die Ausfallschwelle notiert. Durch schrittweises Abrastern des Frequenzbereichs wird das Empfindlichkeitsprofil des Referenzaufbaus im überprüften Dynamikbereich erfasst, hier immer angegeben in normierten Feldstärken.

4 Ergebnisse aus den Empfindlichkeitstests

In Anknüpfung an die Ergebnisse der ersten Studie, im Rahmen derer eine grundsätzliche Eignung des Aufbaus als Testreferenz gezeigt werden konnte [5], werden hier die Ergebnisse von ersten ergänzenden Parametermessungen vorgestellt. Über die weitergehende Charakterisierung des Systems können so zusätzliche Anwendungsbereiche erschlossen werden.

4.1 Vergleich zweier Polarisationsrichtungen

Für die Reaktion typischer Testgeräte spielt in Prüfumgebungen auf Basis ebener Wellen die Direktivität eine große Rolle, dies spiegelt sich auch in den diversen, in den Normentexten vorgeschriebenen und zu testenden Prüflingsorientierungen. Für die im Folgenden dargestellte Teiluntersuchung wurde der Testaufbau um 90° in Relation zu der in der Vorstudie verwendeten Orientierung aus Abbildung 1 gedreht und die Messung mit nun effektiv horizontal stehendem Feld wiederholt. Angesichts geringer Effekte durch Serienstreuung erschien es vertretbar, mit einer neuen, nicht potenziell durch Verschleiß vorbelasteten Garnitur der Kernkomponenten zu messen. Für einen Direktvergleich sind die Ergebnisse beider Messungen in Abbildung 3 aufgetragen.

Im unteren Frequenzbereich bis etwa 1 GHz treten nur marginale Unterschiede zwischen beiden Orientierungen auf. Man erkennt einen leicht steigenden Trend zu höheren Schwellen, also geringerer Empfindlichkeit. Dies könnte auf den mit steigender Frequenz schwindenden Einfluss der Kabelkopplung zurückzuführen sein. In beiden Orientierungen liegt je ein Segment Flachbandkabel von jeweils 30 cm Länge parallel zum Feld, in vertikaler Orientierung zusätzlich noch das Kamerakabel. In einer geometrischen Abschätzung kann für optimale Kopplung etwa die Hälfte der Wellenlänge mit der Kabellänge gleichgesetzt werden, was etwa 500 MHz als Koppelfrequenz ergibt, in Übereinstimmung mit dem lokalen Minimum der Schwellen in der grafischen Auftragung.

Im Bereich ab 825 MHz sind ausschließlich in horizontaler Polarisation temporäre Verbindungsunterbrechungen zu beobachten, ab 1 GHz dann fast ausschließlich in vertikaler

Orientierung, dafür aber bei im Vergleich geringeren und weiter fallenden Empfindlichkeitsschwellen. Ein lokales Minimum liegt bei etwa 1600 MHz, in vertikaler Orientierung entspricht das gemäß der obigen Abschätzung für Koppelfrequenzen den etwa 1750 MHz für die Längsabmessung des Raspberry Pi und der etwas kürzeren Kommunikationsplatine. Auch nachhaltige Kommunikationsabbrüche finden sich mit einer Ausnahme nur um 1450 MHz, hier scheint das Gesamtsystem in vertikaler Orientierung besonders anfällig.

Zwischen 1500 MHz und 2500 MHz tritt die Analogwertabweichung in horizontaler Orientierung bei deutlich kleineren Feldern und mehr Testfrequenzen auf. Hier liegt das unmittelbar an der Analogplatine angeschlossene Segment des Flachbandkabels parallel zum Feld, bei etwa 2 GHz findet sich das lokale Minimum bei etwa der vierten Harmonischen der eingangs festgestellten Koppelfrequenz für das 30 cm Leitungsstück. In vertikaler Richtung häufen sich dann wieder Verbindungsunterbrechungen bei etwa 2,7 GHz, ganz in der Nähe der ähnlich hohen Frequenzentsprechung der kurzen Seite des Raspberry Pi.

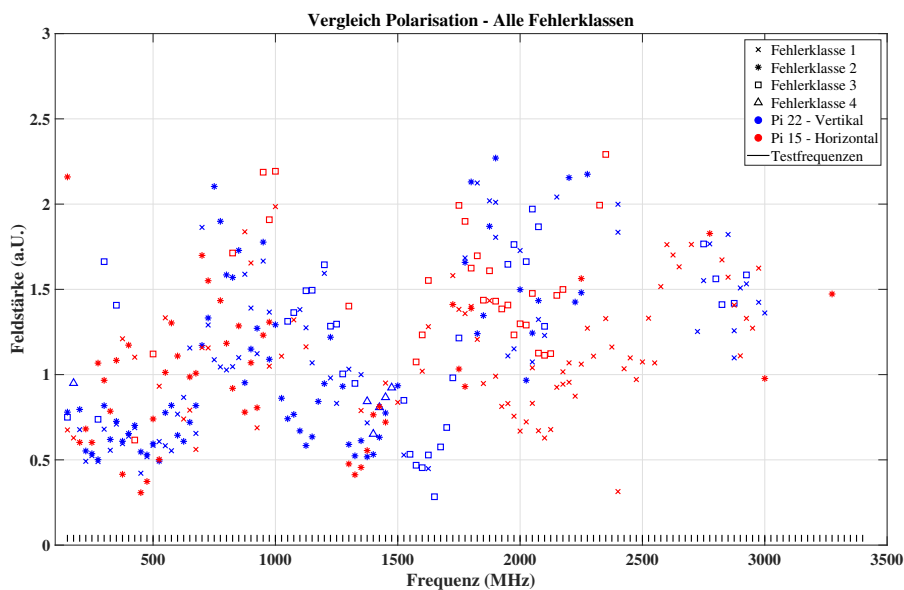


Bild 3: Empfindlichkeitsschwellen für horizontale und vertikale Polarisation.

4.2 Höhere Frequenzen

Die Vorabmessungen wurden alle im Frequenzbereich zwischen 150 MHz und 3,4 GHz durchgeführt, begrenzt durch die Bandbreite der Hochleistungspulserzeugung. Um das Verhalten des Aufbaus auch bei höheren Störfrequenzen zu untersuchen, wurde mit einem weiteren Leistungsverstärker ergänzend der Bereich von 4 GHz bis 8 GHz untersucht, auch hier in beiden Polarisationsrichtungen. Abbildung 4 zeigt die aufgezeichneten Fehlerschwellen.

Das allgemeine Verhalten scheint zunächst an die schon in Abbildung 3 zu beobachtende, leicht steigende Tendenz der mittleren Fehlerschwellen anzuknüpfen, bis ab etwa 5 GHz die Werte wieder abfallen. Ab 7,2 GHz sind im Dynamikbereich des Testsystems gar keine Fehler mehr erzeugt worden, zu beachten sind hier die allerdings noch einmal vergrößerten Schritte zwischen den einzelnen Testfrequenzen. Zwischen den Polarisationsrichtungen bestehen wenig Unterschiede, Fehler der Klasse vier treten allerdings in vertikaler Richtung erst ab 4,8 GHz auf, in horizontaler Richtung schon ab etwa 4,1 GHz. Ab etwa

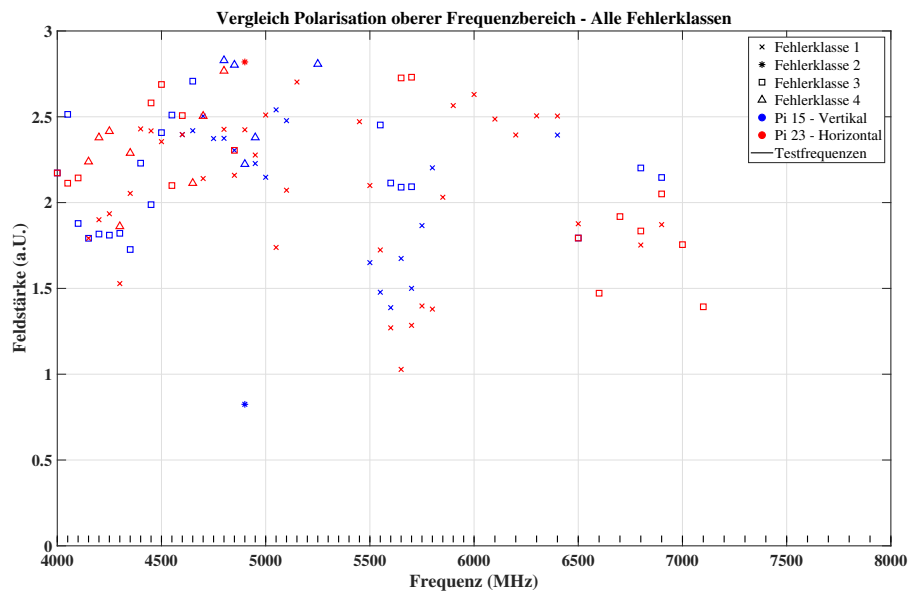


Bild 4: Empfindlichkeitsschwellen für horizontale und vertikale Polarisation, erweiterter Frequenzbereich.

6 GHz treten fast ausschließlich Fehler in horizontaler Richtung auf. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass auch im Bereich höherer Frequenzen innerhalb eines ähnlichen Dynamikbereich wie zuvor Effekte in ausreichender Zahl auftreten, um Referenzbetrachtungen in diesem Bereich sinnvoll erscheinen zu lassen.

4.3 Variation der Pulslänge

Die Erfahrung zeigt, dass Testgeräte durchaus unterschiedlich auf verschiedene Zeitstrukturen in der Pulsstörung reagieren. Mit einem für höhere Tastverhältnisse geeigneten Triodeneinschub haben wir den zugehörigen Frequenzbereich von 1,0 GHz bis 1,3 GHz in 25 MHz-Schritten abgerastert. Die Pulslänge wurde bei gleicher Wiederholrate zunächst verdoppelt, dann verdreifacht, bei entsprechend wachsendem Energieeintrag pro Zeiteinheit. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse.

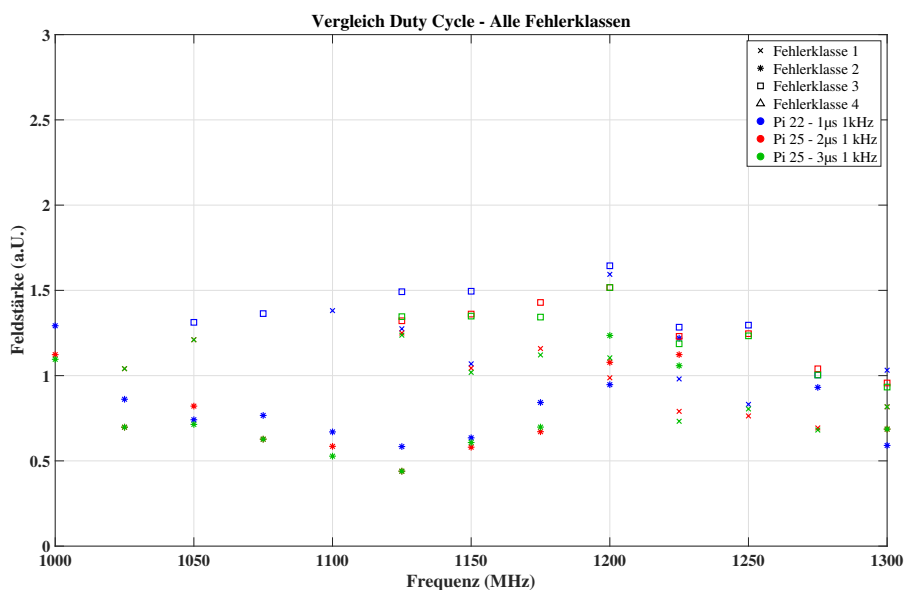


Bild 5: Empfindlichkeitsschwellen für verschiedene Pulsängen.

Ein systematischer Unterschied lässt sich nicht zuverlässig an Hand der Daten ablesen, eine leichte Tendenz fällt allerdings hin zu niedrigeren Fehlerschwellen bei längerer Pulsbelastung auf. So liegen beispielsweise für ein bestimmtes Fehlerbild die Datenpunkte für das kleinste Tastverhältnis fast immer bei den jeweils höchsten Schwellwerten, bei 1175 MHz, 1275 MHz und 1300 MHz konnte im Gegensatz zu den zwei anderen Pulslängen auch Fehlerklasse 3 gar nicht erzeugt werden.

4.4 Kontinuierliche Signale

In der systematischen Erhöhung des Energieeintrags kann von gepulsten Signalen schließlich zur CW-Beaufschlagung übergegangen werden, auch hierzu wurden in vertikaler Orientierung Empfindlichkeitsschwellen aufgenommen. In Abbildung 6 sind diese im Direktvergleich zu den in zwei separaten Frequenzbereichen vorliegenden Datensätzen zur Pulsstörung aus den Abbildungen 3 und 4 aufgetragen. Der verwendete Breitbandverstärker erlaubte die Abdeckung des gesamten Frequenzbereiches zwischen 150 MHz und 8 GHz, die eingetragenen Frequenzschritte beziehen sich auf die CW-Messung.

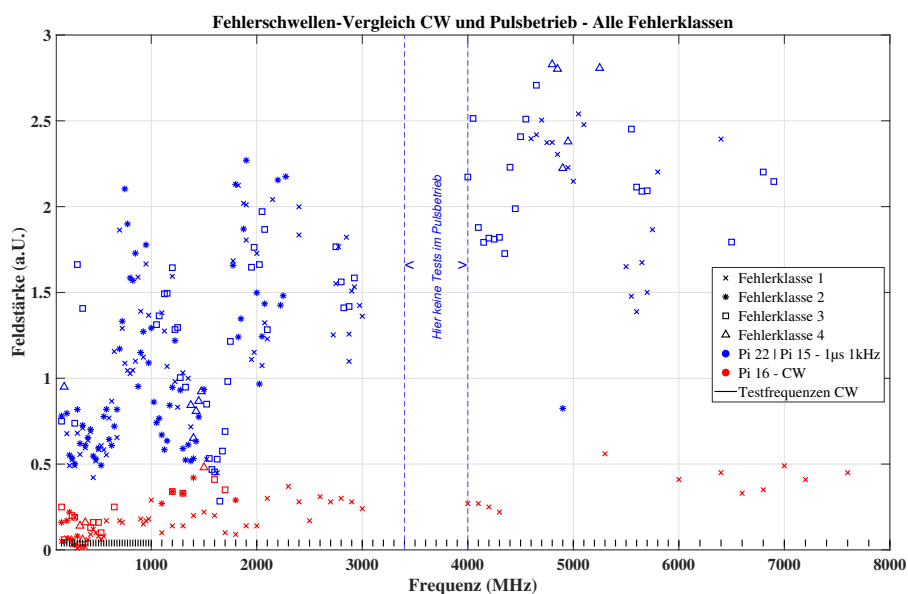


Bild 6: Empfindlichkeitsschwellen für CW-Signale im Direktvergleich mit gepulster Beaufschlagung.

Direkt augenfällig sind die im Vergleich zur Pulsstörung deutlich niedrigeren Störschwellen, zudem zeigt sich ein leichter Trend zu höherer Robustheit bei steigender Frequenz. Im Zweifel kann der Testaufbau also bei kontinuierlicher Beaufschlagung auch zuverlässig in einem deutlich niedriger gelegenen Feldstärkenbereich für Vergleichsuntersuchungen betrieben werden.

5 Zusammenfassung

Um Testumgebungen vergleichen und ganz allgemein die Weiterentwicklung von Normenvorschriften fördern zu können, ist ein Referenzprüfaufbau hilfreich, welcher es erlaubt, im komplexen Gesamtgefüge aus Signalerzeugung, Testeinrichtung und Testgerät die dritte Größe möglichst gut kontrollierbar herauszupräparieren. In der Vorstudie konnte eine gute Wiederholgenauigkeit für die Messung von Empfindlichkeitsschwellen auch über mehre-

re Exemplare der Testhardware hinweg bestätigt werden. In den hier vorgestellten Untersuchungen wurde die Charakterisierung des Referenzaufbaus weiter vorangetrieben, gerade was zentrale Aspekte wie die Direktivität angeht. Zudem konnte nachvollzogen werden, dass auch in einem nach oben hin erweiterten, in seiner Breite etwa verdoppelten Frequenzbereich geeignete Fehlereffekte für einen Methodenvergleich auftreten. Erste Untersuchungen zu Veränderungen der Signalparameter bis hin zur kontinuierlichen Beaufschlagung mit Testsignalen erlauben Rückschlüsse auf die Wirkung des Gesamtenergieeintrags pro Zeiteinheit auf die Testhardware. Für Einrichtungen mit beschränktem Dynamikbereich zeigten sich Dauerstrichsignale wegen der deutlich niedrigeren Fehlerschwellen als geeignet. Der beschriebene Aufbau wird in naher Zukunft in weiteren Umgebungen charakterisiert werden, so zum Beispiel in Modenverwirbelungskammern. Über Parameterstudien kann der herausfordernd weitgespannte Bereich möglicher Störsignalcharakteristika weiter erschlossen werden. Für interessierte Labore kann die technische Referenzbeschreibung zur Verfügung gestellt werden, so dass auf einer breiten Datenbasis eine bessere Einschätzung und Weiterentwicklung bestehender Messvorschriften möglich wird.

Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei unseren Projektpartnern am WIS (Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz) und am FOI (Swedish Defence Research Agency) für die gute Zusammenarbeit bedanken!

Literatur

- [1] DoD, U.S.: MIL-STD-461G:2015, "Military Standard: Electromagnetic Interference Characteristics Requirements For Equipment". (2015)
- [2] IEC: IEC 61000-5-9 Ed. 1.0: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-9: Installation and mitigation guidelines – System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM.
- [3] IEC: IEC, IEC 61000-4-36 Ed. 1.0: Electromagnetic compatibility (EMC) - Testing and measurement techniques - IEMI Immunity Test Methods for Equipment and Systems.
- [4] NATO: AECTP-500 Edition E Version 1:2016, "Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification". (2016)
- [5] PUSCH, T. ; WILLENBOCKEL, M. ; HURTIG, T. ; SUHRKE, M. ; RUGE, S. ; JÖRRES, B. ; JÖSTER, M.: A reference test setup to support research and development of HPEM testing schemes. In: *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE* (2019). <http://dx.doi.org/10.1109/EMCEurope.2019.8872105>
- [6] PYTHOUD, F. ; TAS, E.: Design of a reference device for radiated immunity inter-laboratory comparison. In: *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE* (2017). <http://dx.doi.org/10.1109/EMCEurope.2017.8094672>
- [7] S. SCHECK, C. P. ; WEBER, S.: Vergleichsuntersuchungen zwischen EMV-Laboratorien im Bereich der Störfestigkeitsprüfungen. In: *emv : Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf 2018* (2018). <http://dx.doi.org/10.15488/4335>