

# Qualitative Unterschiede von Messempfängern im Hinblick auf Out-of-Band Signale und resultierende Hochfrequenzmischprodukte

Jan, Weber, Universität Duisburg-Essen, Deutschland  
Martin, Kurka, Universität Duisburg-Essen, Deutschland  
Prof. Dr. Holger, Hirsch, Universität Duisburg-Essen, Deutschland  
Max, Weber, Universität Duisburg-Essen, Deutschland

## 1 Einleitung und Problemstellung

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) stützt sich auf zwei grundlegende Prinzipien: Ausreichend geringe Störaussendung und hinreichende Störfestigkeit. Zum Nachweis dieser Eigenschaften wird auf eindeutig normativ definierte Prüfverfahren zurückgegriffen, welche durch nationale und internationale Gremien erarbeitet werden. Zur Prüfung der Störaussendungen wird der Prüfling als Quelle elektromagnetischer- (EM-) Felder verstanden und in einer definierten elektromagnetischen Umgebung die Aussendungen des Prüflings erfasst. Die Messergebnisse werden im Anschluss gegen einen vorgeschriebenen Grenzwert verglichen und dürfen diesen nicht überschreiten. Bei Störfestigkeitsprüfungen wird die Prüfkette umgedreht. Der Prüfling wird mit vorgeschriebenen EM-Störgrößen beaufschlagt und überprüft, ob dieser sich durch die Einwirkung beeinflussen lässt. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn es zu keiner oder nur einer zulässigen Reaktion kommt. Zulässige Reaktionen sind dabei ebenfalls normativ je Prüfling vorgegeben.

Beide Prüfverfahren werden im Labor separat zueinander durchgeführt. Bei erfolgreichem Abschluss gilt der Prüfling als elektromagnetisch verträglich. In der Realität, außerhalb des Labors, wirken dann verschiedenste Störgrößen zeitgleich auf den Prüfling ein, während dieser seine Störaussendungen in die Umgebung emittiert. Es wird angenommen, dass im Fall dieser Superposition der Status „elektromagnetisch verträglich“ seine Gültigkeit behält. Dies wäre auch der Fall, wenn Systeme mit ausschließlich linearen Eigenschaften betrachtet werden. Sobald nichtlineare Systemeigenschaften auftreten, müssen zusätzliche Phänomene berücksichtigt werden, sodass die Annahme der Superposition diskutabel wird.

In nichtlinearen Elementen muss unter Einwirkung einzelner sinusförmiger Signale, wie in Störfestigkeitsprüfungen, mit der Bildung von Harmonischen (H) gerechnet werden. Als Harmonische werden zusätzliche additive Signale bezeichnet, welche jeweils mit ganzzahligen Vielfachen der Grundsignalfrequenz auftreten. Wird ein weiteres sinusförmiges Signal, mit einer anderen Frequenz, dem ersten additiv überlagert, kommen zu den Harmonischen zusätzlich Mischprodukte, wie Intermodulationsprodukte (IMP) hinzu, welche bei verschiedenen Linearkombinationen der einwirkenden Frequenzen auftauchen.

Abbildung 1-1 zeigt verschiedene Szenarien, mit welchen in der Realität gerechnet werden kann.

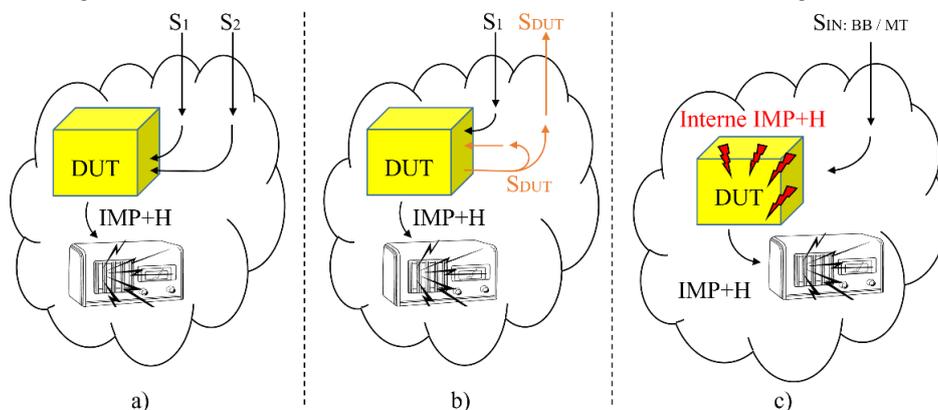


Abbildung 1-1: Szenarien, wie ein Prüfling mit nichtlinearen Eigenschaften unter Belastung mit verschiedenen Signalen mit seiner EM-Umgebung interagieren und andere Geräte stören kann.[1]

Wirken zwei sinusförmige Signale ( $S_1$  und  $S_2$ ) auf einen Prüfling mit nichtlinearen Elementen, wie in Abbildung 1-1 a) gezeigt, können sowohl Harmonische als auch Intermodulationsprodukte entstehen. Werden diese in die EM-Umgebung emittiert können dort befindliche Geräte unzulässig belastet und infolgedessen gestört werden. Vergleichbares kann auch bei einem einzelnen einwirkenden Signal auftreten, wenn der Prüfling selbst ein Signal ( $S_{DUT}$ ) in die Umgebung abgibt, wie in Abbildung 1-1 b) gezeigt. Hier kann das einwirkende Signal  $S_1$  allein nur Harmonische anregen, durch die Mischung mit  $S_{DUT}$  kann es aber erneut zur Ausbildung von Intermodulationsprodukten kommen wie im Fall a). Ist  $S_{DUT}$  nicht einfach sinusförmig, sondern beliebiger Form, sprich ein Mehrtonsignal ( $S_{MT}$ ) oder breitbandig ( $S_{BB}$ ), kann es zu einer Vielzahl von resultierenden Mischprodukten kommen. Ähnliches gilt für den in Abbildung 1-1 c) gezeigten Fall. Hier muss allerdings neben den in die Umgebung emittierten auch mit zusätzlichen internen IMP und H gerechnet werden.

Für keines der beschriebenen Szenarien gibt es bislang normativ definierte Prüfverfahren oder -methoden. Aktuell ändert sich dies für das unter Fall c) beschriebene Szenario für interne Störungen, hervorgerufen durch breitbandige Störgrößen. Sowohl die Internationale Organisation für Normung (ISO) als auch die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) arbeiten aktuell an Störfestigkeitsprüfverfahren mit breitbandigen Störgrößen. Eine Überprüfung der durch einen Prüfling erzeugten und in die Umgebung emittierten Störungen, auf Basis einwirkender Störgrößen aus der Umgebung, ist bislang allerdings nicht vorgesehen. Es bleibt bei der separaten Betrachtung von Störfestigkeit und Störaussendung, was in Zukunft aufgrund des steigenden Einsatzes von nichtlinearen Bauteilen und der wachsenden Anzahl an Nutzfrequenzen zu Problemen führen könnte. Die sich hier auftuende Lücke wächst und sollte, im Hinblick auf die Sicherstellung elektromagnetischer Verträglichkeit, geschlossen werden. Erste Ergebnisse von Untersuchungen zur Relevanz und Prüfmöglichkeiten wurden bereits in [2] vorgestellt.

Es zeigt sich, dass eine Vielzahl von Herausforderungen mit der Aufgabenstellung einhergeht. Bereits bei der Erzeugung von passenden synthetischen Testsignalen und deren Einkopplung auf einen Prüfling sind im Rahmen der Untersuchungen Mischprodukte aufgefallen, welche direkt dem passiven Testaufbau zuzuordnen waren. Diese würden eine spätere Bewertung des Prüflings im Hinblick auf dessen Mischeigenschaften erheblich erschweren, weshalb weiterführende Untersuchungen zum Testaufbau in [1] durchgeführt wurden.

Bei diesen hat sich allerdings ein weiteres Problem über den Testaufbau hinausgehend, gezeigt. Manche Mischprodukte werden scheinbar durch den Messempfänger selbst erzeugt, sobald Mehrtonsignale anliegen. Der Effekt ist bei verschiedenen Geräten aufgetreten, allerdings in unterschiedlichem Maße. Besonderes Augenmerk sollte auf das Szenario gerichtet werden, wenn solche Mischprodukte durch Signale erzeugt werden, welche außerhalb des gemessenen Bereiches liegen. Dieser Bereich, der im Rahmen einer typischen Störaussendungsprüfung nicht gemessen wird, wird hier als Out-of-Band Bereich bezeichnet. Der gemessene Bereich dagegen wird mit dem Begriff In-Band beschrieben.

Bislang wurden Szenarien betrachtet bei denen sowohl die extern einwirkenden Signale als auch die resultierenden Harmonischen und Intermodulationsprodukte im In-Band liegen. ([1], [2]) Die sich ergebenden zusätzlichen Komponenten können in der Regel eindeutig den Ursprungssignalen zugeordnet werden. Bei Harmonischen oder Intermodulationsprodukten, welche durch Out-of-Band Signale erzeugt werden, ist eine Zuordnung zu den Ursprungssignalen dagegen kaum möglich, da diese nicht miterfasst werden. Diese Out-of-Band Signale können im Labor zum Beispiel durch den Prüfling selbst, oder durch notwendige Peripherie, eingebracht werden. Die resultierenden Signale würden bei einer normativen Störaussendungsprüfung dem Prüfling zugeordnet werden, resultieren aber eigentlich aus dem Mischeffekt des Messempfängers angeregt durch die Out-of-Band Signale. Sind die Pegel solcher systemeigener additiver Frequenzkomponenten so hoch, oder überlagern sich konstruktiv mit denen des Prüflings, dass Grenzwerte überschritten werden, kann dies fälschlicherweise zum Nichtbestehen der Prüfung führen. Darüber hinaus ist es umso wichtiger, wenn künftig die Mischeigenschaften von Prüflingen bewertet werden müssen, dass die verwendeten Messinstrumente keinen Beitrag zu diesem leisten. Alternativ sollte der Beitrag und ggf. Maßnahmen zur Beseitigung bekannt sein. Aus diesem Grund wird hier das Mischverhalten von Messempfängern im Hinblick auf Out-of-Band Testsignale und deren Auswirkung auf den In-Band-Bereich untersucht.

## 2 Definition Mischprodukte

Bevor auf die Auswirkungen von den bereits erwähnten Mischprodukten eingegangen werden kann, muss zunächst erläutert werden, was unter Mischprodukten zu verstehen ist. Der Begriff Mischprodukte steht hier stellvertretend für Harmonische der Grundsignale sowie für Intermodulationsprodukte. Zu Harmonischen kann es immer dann kommen, wenn ein Signal über einen nicht linearen Übertragungsweg geleitet wird. Für Intermodulationsprodukte gilt das Gleiche, wobei hier mindestens zwei Signale unterschiedlicher Frequenz gleichzeitig wirken müssen. Ein nichtlinearer Übertragungsweg zeichnet sich dadurch aus, dass im Gegensatz zum linearen nicht nur Amplitude und Phase des Signals verändert, sondern außerdem neue Frequenzkomponenten hinzugemischt werden. [3, 4]  
Im hier diskutierten Kontext wird primär ein Signalgemisch  $x(t)$  aus zwei Sinussignalen betrachtet.

$$x(t) = A \cdot \cos(2\pi f_1 \cdot t + \varphi_A) + B \cdot \cos(2\pi f_2 \cdot t + \varphi_B) \quad (1)$$

Für die angegebenen Parameter gilt, dass die Amplituden der enthaltenen Signale größer null sind ( $A > 0$ ,  $B > 0$ ), die Frequenzen entsprechend  $f_2 > f_1$  angenommen werden und die angegebene Phase beliebig und zufällig ist. Zur Berechnung der resultierenden Harmonischen und Intermodulationsprodukte wird ein Polynom  $y(t)$  fünften Grades (2) genutzt.

$$y(t) = x(t) + x(t)^2 + x(t)^3 + x(t)^4 + x(t)^5 \quad (2)$$

Entsprechend des zugrundeliegenden Exponenten werden resultierenden zusätzlichen Komponenten Ordnungen zugewiesen. Wird im Folgenden ein Ergebnis zum Beispiel mit IMP5 benannt, ist dieses InterModulationsProdukt rechnerisch mittels des Abschnittes  $x(t)^5$  aus (2) als eine der möglichen Linearkombinationen berechenbar.

## 3 Messaufbau und Testsignal

Da bereits der Messaufbau einen nicht unerheblichen Beitrag bei der Generierung von Mischprodukten hat, wurden in [1] Vorschläge erarbeitet, um diesen für die Analyse von Intermodulationsprodukten und Harmonischen zu optimieren. Ausgehend von den Ergebnissen wurde für die durchgeführten Untersuchungen der Aufbau, in Übereinstimmung mit [1] wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt, genutzt.

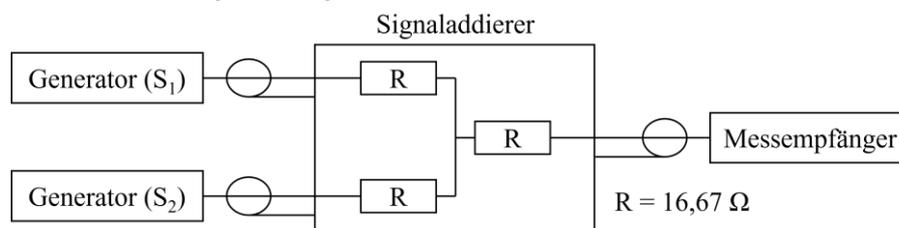


Abbildung 3-2: Messaufbau zur Erzeugung eines Zweitonsignals mittels Ohm'schen Signaladdierer und zwei vorab selektierter Sinussignalgeneratoren

Aus [1] geht hervor, dass die größten Abweichungen bei Mischprodukten zwischen Messempfängern mit und ohne schnelle Fourier-Transformation (eng. fast Fourier transform) FFT-Funktion auftreten. Exemplarisch werden hier daher zwei Messempfänger miteinander verglichen, welche im Folgenden als Messempfänger 1 (ME 1) und ME 2 bezeichnet werden. Bei ME 1 handelt es sich um einen klassischen Messempfänger ohne FFT-Funktion, während ME 2 eine entsprechende Funktion beinhaltet. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde hier allerdings auf diese Funktion verzichtet.

Als Testsignale, welche im geschilderten Szenario in der Realität als Störsignale auftreten würden und daher hier so bezeichnet werden, dienen zwei Sinussignale unterschiedlicher Frequenz, der Form (1), gezeigt in Kapitel 2. Deren Pegel werden jeweils so eingestellt, dass am Messempfänger die Signale mit jeweils 90 dB( $\mu$ V) anliegen. Resultierende Intermodulationsprodukte und Harmonische, wie im theoretischen Teil beschrieben, können mit (2) berechnet und so unterschieden werden.

Die Signalgeneratoren wurden aus einem Pool verschiedener Generatoren ausgewählt, mit dem Ziel, möglich geringe Harmonische im Ausgangssignal zu generieren. Die Auswahl erfolgte anhand von Messungen und nicht anhand von Angaben im Datenblatt. Alle Komponenten sind mittels koaxialen Kabeln miteinander verbunden.

Zur Bewertung wird der Spitzenwertdetektor verwendet. Die verwendeten Messparameter, aufgeführt in Tabelle 3.1, werden CISPR16-1-1 [5] für die Bänder B bis E entnommen. Einzige Abweichung zu den vorgeschlagenen Messparametern besteht bei der Messzeit, welche einheitlich zu 50 ms gewählt wird.

Tabelle 3.1: Übersicht über die betrachteten Frequenzbänder zur Unterscheidung von In-Band und Out-of-Band. (\*Band E wird begrenzt durch die maximale Messfrequenz von ME 2)

Band	B	C	D	E
Startfrequenz (MHz)	0,15	30	300	1000
Stopfrequenz (MHz)	30	300	1000	3600*
Frequenzschritt (kHz)	5	50	50	500
Messzeit (ms)	50	50	50	50
Messbandbreite (kHz)	9	120	120	1000

Die Betrachtung des Einflusses von Breitbandsignalen, in Form von bandbegrenztem Rauschen, erfolgt ohne Signaladdierer unter Verwendung eines Vektorsignalgenerators mit Arbiträrfunktion. Dieser wurde direkt mittels koaxialem Kabel an die Messempfänger angeschlossen.

#### 4 Vorstellung und Bewertung der Messergebnisse

Zur Bestimmung des Einflusses von Out-of-Band Signalen auf den In-Band Bereich können verschiedene Szenarien konstruiert werden. Ausgehend von zunächst zwei sinusförmigen Störsignalen, können diese entweder beide unterhalb, oberhalb oder jeweils eines unter- und eines oberhalb des In-Band Bereiches auf das System einwirken.

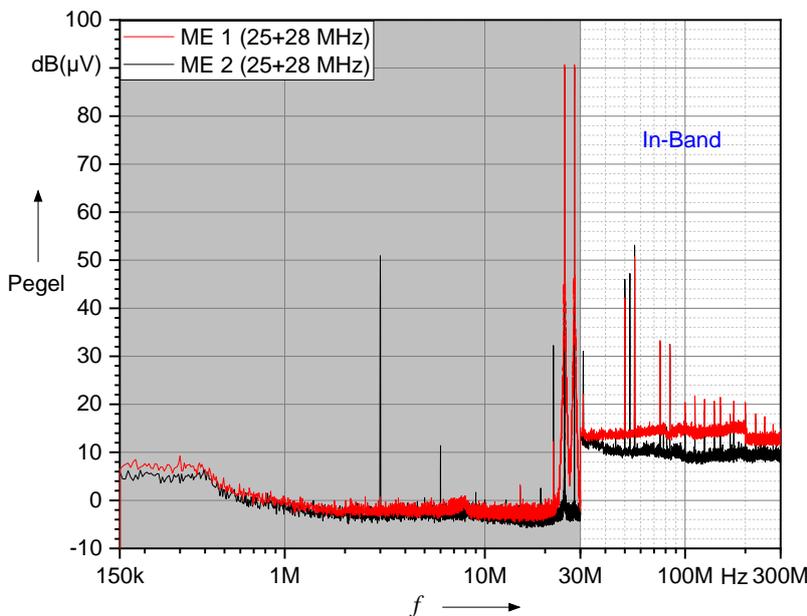
Darüber hinaus können Breitbandsignale, hier als bandbegrenztes Rauschen realisiert, in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Diese können sowohl unterhalb als auch oberhalb des In-Band-Bereiches appliziert werden. Unter der theoretischen Annahme unendlich vieler Einzelsignale im Rauschen, müssten diese alle untereinander wechselwirken und zu Intermodulationsprodukten und diversen Harmonischen führen.

Die folgenden Unterkapitel zeigen, sowohl grafisch als auch tabellarisch, die gemessenen Pegel beider Messempfänger bei Einwirkung der genannten Testsignale. Alle theoretisch möglichen Intermodulationsprodukte (IMP) sowie Harmonischen (H), bis einschließlich fünfter Ordnung, der einwirkenden Grundfrequenzen wurden aus den Messergebnissen extrahiert und verglichen. Die Messwerte, bei denen eine Pegelabweichung von mehr als 3 dB zwischen den Messempfängern aufgetreten ist, sind aufgrund ihrer angenommenen Relevanz in den Tabellen aufgeführt. In den Tabellen befindet sich die Ordnung (Ord.) sowie die Frequenz ( $f$ ) des jeweiligen Mischproduktes. Darauf folgen die gemessenen Werte der hier verwendeten Messempfänger (ME) und in der letzten Spalte die Abweichung zwischen den Werten (Abw.). Abweichungen größer als 6 dB wurden durch Unterstreichung hervorgehoben. Bei Abweichungen von mehr als 10 dB wurden die Messwerte zusätzlich **rot** eingefärbt. Der Vollständigkeit halber sind sowohl In-Band als auch Out-of-Band Abweichungen in der Tabelle enthalten. Der jeweilige hier fokussierte In-Band Bereich ist weiß, während der Out-of-Band Bereich, in welchem das Störsignal appliziert wird, grau hinterlegt ist. Die zugrunde liegenden eingekoppelten Grundsignale sind **fett** hervorgehoben. Alle Messbereiche wurden in den genannten Szenarien getestet. Die folgenden Ergebnisse zeigen hier allerdings primär die Resultate der Versuche im Bereich der Frequenzbänder B und C, sowie ergänzend Band D in Kapitel 4.3. Dies liegt darin begründet, dass es hier zu großen Abweichungen der gemessenen Pegel je Messempfänger gekommen ist, welche zur Diskussion gestellt werden müssen. In den höheren Bändern konnten ähnliche Phänomene, hinsichtlich der Pegelabweichung, nur in nicht signifikanter Höhe beobachtet werden.

#### 4.1 Zwei Out-of-Band Störsignale unterhalb des Inbandbereiches

Bei Out-of-Band Störsignalen, welche unterhalb des In-Band-Bereiches appliziert werden, treten In-Band sowohl Harmonische als auch Intermodulationsprodukte auf. Da im Versuchsaufbau keine nichtlinearen Strukturen im Übertragungsweg existieren oder anderweitig Mischprodukte hervorgerufen werden können, müssen diese durch den Messempfänger selbst verursacht werden. Zumal, je nach verwendetem Messempfänger, unterschiedliche Messwerte erfasst und zum Teil starke Abweichungen je Mischprodukt auftreten.

Der erste Blick fällt auf das Out-of-Band auftretende Mischprodukt, das Intermodulationsprodukt zweiter Ordnung bei 3 MHz, da es sehr stark hervorsteicht und die stärkste Pegelabweichung zwischen den Ergebnissen der Messempfänger aufweist. Aber auch In-Band treten erhebliche Pegelabweichungen zwischen den Messempfängern auf. In-Band sticht das Intermodulationsprodukt zweiter Ordnung (IMP2) bei 53 MHz heraus, welches mit 33,72 dB Pegelabweichung in Beispiel 4-1 zu erkennen ist. Dazu kommt das IMP3 bei 31 MHz, wo die Abweichung mit 8,95 dB allerdings verglichen mit dem IMP2 erheblich kleiner ist. Absolut betrachtet ist eine Abweichung von rund 9 dB nicht zu vernachlässigen. Eine Abweichung bei den auftretenden Harmonischen ist nur bei H2-I erkennbar. Es dominieren, im negativen Sinn, die Intermodulationsprodukte. Zu verzeichnen ist, dass es zu erheblich unterschiedlichen Ausprägungen von IMP und H bei den betrachteten Messempfängern kommt, wenn Out-of-Band Signale unterhalb des In-Band Bereiches einwirken.

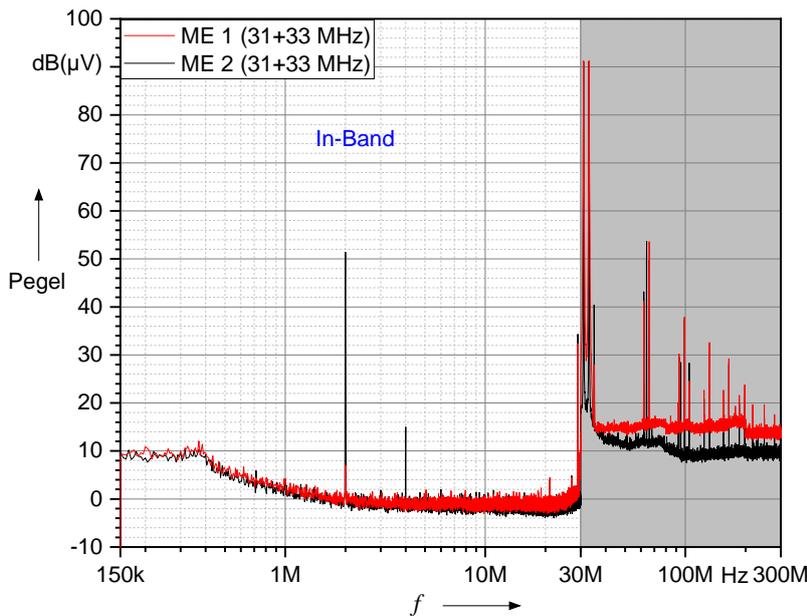


Ord.	f	ME 1	ME 2	Abw.
	MHz	dB(µV)	dB	dB
IMP2	3	0,69	50,92	<u>50,23</u>
IMP4	6	-1,94	11,41	<u>13,35</u>
IMP5	19	-3,74	2,52	<u>6,26</u>
IMP3	22	12,22	32,21	<u>19,99</u>
f1	25	<b>90,66</b>	<b>90,07</b>	<b>0,59</b>
f2	28	<b>90,66</b>	<b>90,07</b>	<b>0,59</b>
IMP3	31	22,08	31,03	<u>8,95</u>
IMP4	47	13,32	10,28	3,05
H2-I	50	42,17	46,04	3,87
IMP2	53	13,52	47,24	<u>33,72</u>
IMP5	72	15,18	10,09	5,09
IMP5	87	14,08	9,95	4,13
IMP4	103	14,52	9,38	5,14
IMP4	106	14,08	8,86	5,22
IMP4	109	14,08	9,48	4,60
IMP5	128	14,17	8,40	5,77
IMP5	131	14,17	8,64	5,53
IMP5	134	14,17	9,29	4,88
IMP5	137	14,35	8,94	5,41

Beispiel 4-1: Einwirkung von 2 Störsignalen in Band B und deren Wirkung in Band C

#### 4.2 Zwei Out-of-Band Störsignale oberhalb des In-Band-Bereiches

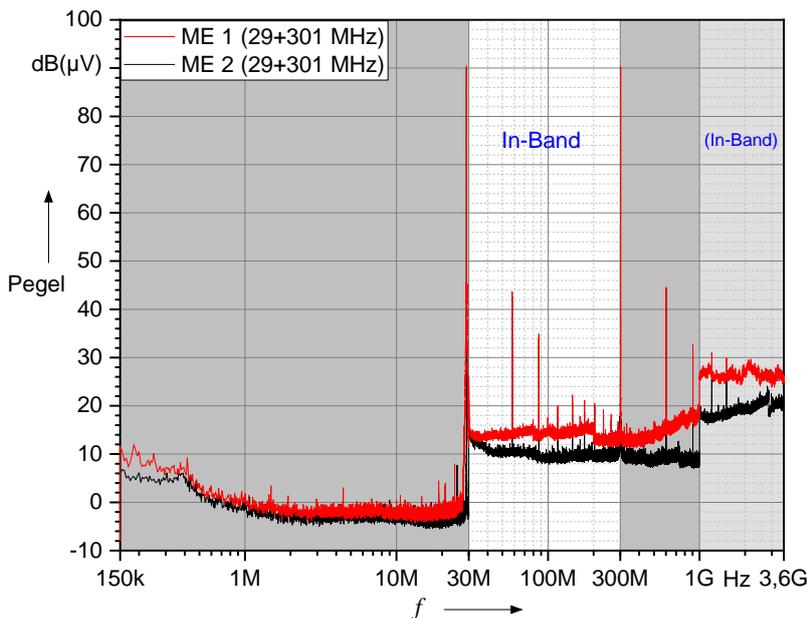
Relativ betrachtet treten In-Band hier erheblich weniger Mischprodukte auf, da zum Beispiel keine Harmonischen auftreten und Intermodulationsprodukte nach theoretischer Berechnung mit zunehmender Ordnung höhere Frequenzen aufweisen. Die Mischprodukte, die in den In-Band-Bereich fallen, sind allerdings nicht zu vernachlässigen, da diese aufgrund der geringen Ordnung erhebliche Signalpegel, abhängig vom Pegel der Grundsignalen, aufweisen können. Im gezeigten Beispiel 4-2 fallen besonders die Intermodulationsprodukte zweiter Ordnung auf, ähnlich wie im Szenario im vorherigen Abschnitt. Das In-Band IMP2 ist für ME 2 sehr stark ausgeprägt. Bei ME 1 tritt es zwar auch auf, allerdings erheblich kleiner, wodurch eine starke Pegelabweichung zwischen beiden ME entsteht.



Ord.	f	ME 1	ME 2	Abw.
	MHz	dB(µV)		dB
IMP2	2	6,98	51,42	<u>44,44</u>
IMP4	4	-1,08	14,99	<u>16,07</u>
<b>f1</b>	<b>31</b>	<b>91,23</b>	<b>91,10</b>	<b>0,12</b>
<b>f2</b>	<b>33</b>	<b>91,23</b>	<b>91,16</b>	<b>0,06</b>
IMP3	35	27,90	40,39	<u>12,50</u>
IMP2	64	16,09	53,61	<u>37,52</u>
H2-II	66	53,59	49,75	3,84
IMP5	91	14,35	10,51	3,84
IMP3	95	14,78	9,25	5,53
IMP3	97	14,86	9,45	5,41
IMP5	101	15,95	8,34	7,61
IMP4	126	14,35	8,81	5,54
IMP4	128	14,52	8,67	5,85
IMP4	130	15,18	9,09	6,09
IMP5	157	15,18	8,90	6,28
IMP5	159	14,86	9,25	5,61
IMP5	161	15,26	10,57	4,70
IMP5	163	15,18	9,20	5,99

Beispiel 4-2: Einwirkung von 2 Störsignalen in Band C und deren Wirkung in Band B

#### 4.3 Out-of-Band Signal zeitgleich unter- und oberhalb des In-Band-Bereiches



Ord.	f	ME 1	ME 2	Abw.
	MHz	dB(µV)		dB
<b>f1</b>	<b>29</b>	<b>90,40</b>	<b>90,00</b>	<b>0,40</b>
IMP5	185	15,26	9,27	6,00
IMP4	214	12,39	9,18	3,21
IMP3	243	13,80	10,59	3,21
<b>f2</b>	<b>301</b>	<b>90,31</b>	<b>90,07</b>	<b>0,24</b>
IMP4	388	12,82	9,19	3,63
IMP5	515	15,02	8,57	<u>6,45</u>
IMP4	544	13,32	8,65	4,68
IMP3	573	14,78	9,50	5,27
IMP3	631	15,18	8,42	<u>6,76</u>
IMP4	660	16,23	9,29	<u>6,94</u>
IMP5	689	15,72	9,51	<u>6,22</u>
IMP5	845	16,37	7,85	<u>8,53</u>
IMP4	874	16,98	8,65	<u>8,33</u>
IMP4	932	16,98	8,46	<u>8,52</u>
IMP5	961	17,78	8,49	<u>9,29</u>
IMP5	1175	27,54	18,23	<u>9,31</u>
H4-II	1204	31,04	27,37	3,67
IMP5	1233	25,72	16,97	<u>8,75</u>
H5-II	1505	29,87	25,49	4,38

Beispiel 4-3: Einwirkung von einem Störsignal ober- und einem unterhalb des In-Band-Bereiches.

Wird ein Störsignal oberhalb und eines unterhalb des In-Band-Bereiches appliziert, sind die Abweichungen der Messergebnisse tendenziell kleiner und es liegen keine Extrema oberhalb der fiktiven 10 dB Grenze für Abweichung vom Pegel vor. In-Band ist eher mit Harmonischen der unteren Grundfrequenzen zu rechnen als mit relevanten Intermodulationsprodukten.

Der Bereich oberhalb von 1 GHz ist als zweiter In-Band-Bereich zu Beispielzwecken deklariert, da auch hier Harmonische, allerdings des oberen Grundsignals f2 (301 MHz), „(In-Band)“ auftauchen. Diese treten allerdings vergleichbar für ME 1 und ME 2 auf, weshalb keine starke

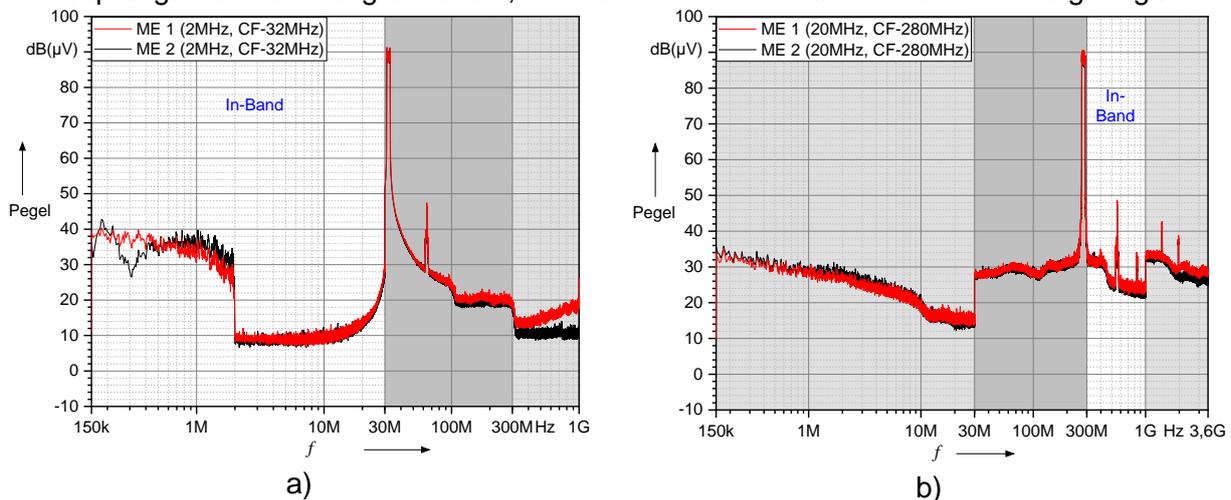
Abweichung zwischen den Messempfängern tabellarisch aufgeführt ist. Die Abweichungen für IMP5 bei 1,175 GHz bzw. 1,233 GHz sind der Differenz im Rauschen zuzuschreiben und somit nicht signifikant, obwohl sie aufgrund der Schwelle von 3 dB bzw. 6 dB als relevant hervorgehoben sind.

#### 4.4 Einfluss von Out-of-Band-Breitbandsignalen auf den In-Band-Bereich

Abschließend wird hier noch ein kurzes Resümee zu Breitbandsignalen im Hinblick auf die Erzeugung von internen Mischprodukten in verschiedenen Messempfängern gezogen. Wie in Kapitel 3 erläutert, wird zur Überprüfung des Einflusses von Breitbandsignalen ein Arbiträrgenerator direkt mit dem jeweiligen Messempfänger verbunden.

In den Abbildungen zu Beispiel 4-4 werden exemplarisch zwei der Messergebnisse jeweils für beide Messempfänger, unter Anregung eines Breitbandsignals, gegenübergestellt. In beiden Fällen ist die Ausbildung von Harmonischen erkennbar, wobei für Beispiel 4-4 b) Harmonische bis dritter Ordnung sichtbar sind, wenn von der Harmonischen der Mittenfrequenz abgesehen wird. In der Abbildung zu Beispiel 4-4 a) dagegen sind nur die Harmonische erster Ordnung im Bereich von 64 MHz zu erkennen.

Eindeutige berechenbare Intermodulationsprodukte, wie in den vorangegangenen Kapiteln, sind nicht zu erkennen. Dies lässt sich zum einen durch die große Anzahl der Grundsignale und damit einhergehenden Mischprodukten begründen und zum anderen durch die endliche zur Verfügung stehende Leistung des Generators erklären. Dass es zur Ausprägung von Intermodulationsprodukten kommt, ist dennoch zu erkennen. In der Abbildung in Beispiel 4-4 a) im Bereich von ca. 100 MHz. Der Pegel fällt sprunghaft ab, ohne dass sich die Messbandbreite geändert hat bevor es ins Rauschen übergeht, welches verglichen mit den vorangegangenen Ergebnissen deutlich erhöht ist. Dies entsteht durch höhere Leistung, welche zur Erzeugung des Referenzpegels von 90 dB( $\mu$ V) bei der jeweiligen Mittgenfrequenz notwendig ist. Ausblickend könnte hier für einen direkten Vergleich der Pegel bei der Mittenfrequenz mit einem Sinussignal, wie in den Beispielen vorher, eingeregelt werden und das Breitbandsignal anschließend mit der ermittelten Leistung eingebracht werden. So ließen sich die Ergebnisse von zwei Sinussignalen und dem Breitbandsignal, aufgrund der kontinuierlichen Leistung, direkt miteinander vergleichen. Aufgrund der ausbleibenden Unterschiede im Messergebnis ist hier allerdings fragwürdig, ob der Messempfänger die Mischung vornimmt, oder der Generator selbst für die Mischung sorgt.



Beispiel 4-4: Einwirkung von bandbegrenztem Rauschen oberhalb mit einer Bandbreite von 2 MHz a) bzw. unterhalb mit einer Bandbreite von 20 MHz b) des jeweiligen In-Band-Bereiches

Die starke Anhebung des Pegels im jeweils unteren Bereich der gezeigten Grafiken sind auf den Vektorsignalgenerator zurückzuführen. Das erzeugte Basisband, welches im Anschluss an die entsprechende Mittenfrequenz (CF – Centre Frequency) gemischt wird, wird hier bereits herausgegeben und ist sichtbar.

## 5 Diskussion und Fazit

Werden Signale, bestehend aus mindestens zwei Sinussignalen direkt auf einen CISPR16-1-1 [5] konformen Messempfänger gegeben, kann dieser Mischprodukte erzeugen. Diese Mischprodukte können, wie hier gezeigt wurde, von einem Messempfänger als In-Band-Signale angezeigt werden. Diese lassen sich nur bei Kenntnis über die einwirkenden Grundfrequenzen berechnen. Sind die Grundfrequenzen nicht bekannt, weil sie als Out-of-Band Signale nicht erfasst werden oder die Existenz aus anderen Gründen nicht bekannt, werden die durch den Messempfänger generierten Mischprodukte fälschlicherweise dem Prüfling zugeschrieben.

Die Vermutung liegt nahe, dass der Diodenringmischer genau die Aufgabe wahrnimmt, für die er verbaut wird - Signalmischung. Neben der gewünschten Frequenzbereichsanpassung mischt er nur zusätzlich auch eintreffende Signale untereinander, wodurch es zu Intermodulationsprodukten und Harmonischen in den Messdaten kommt. Der Präselektionsfilter sollte solche Phänomene eigentlich verhindern, was hier scheinbar nicht erfolgt. Ein Vergleich der zugehörigen Kenndaten aus den Datenblättern der ME erklärt dies. Der Filterbereich von ME 2 ist im Frequenzbereich unterhalb von 100 MHz spektral erheblich breiter als der von ME 1. Hier können sowohl Störsignale als auch entstehende Mischprodukte gleichermaßen ungehindert passieren. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Abschnitten 4.1 und 4.2 mit denen aus Abschnitt 4.3 zeigt, dass es gerade der Bereich unter 100 MHz ist, der anfälliger für Mischprodukte ist, da hier die Abweichungen erheblich sind. Dies kann, vor allem bei Out-of-Band wirkenden Störungen, zu Fehleranfälligkeit führen. Eine Reproduzierbarkeit in anderen Laboren, mit ggf. anderen Messgeräten, kann fraglich werden.

Es stellt sich die Frage, welche Maßnahmen unternommen werden können, um solche Probleme zu vermeiden. Normativ werden die vorgestellten Phänomene bislang nicht oder, wie in [5], nur unzureichend im Hinblick auf die diskutierte Thematik überprüft. Bei Verdacht von Out-of-Band Störsignalen müssten diese zunächst eindeutig in Erfahrung gebracht werden.

Existiert ausreichende Kenntnis über die Störsignale, könnten diese durch entsprechende Filtermaßnahmen vor dem Eingang des Messempfänger reduziert werden. Alternativ könnte bei Kenntnis über die fälschlicherweise gemessenen In-Band Signale entsprechende Frequenzen ausgeblendet werden. Im Hinblick auf mehrfaches Mischen der Eingangssignale und etwaigem erneutem mischen mit Mischprodukten, wie aus dem Beispiel mit den Breitbandsignalen postuliert werden kann, könnte dies allerdings auch nur bedingt Abhilfe schaffen. Außerdem besteht das Risiko, dass infolgedessen echte Störaussendungen des Prüflings nicht erkannt werden und der Prüfling falsch bewertet wird.

Auch die Anwendung kleinerer Filterbereiche, wie bei älteren Geräten ohne FFT Funktion (ME 2) üblich, die nachweislich weniger Mischprodukte erzeugen, ist schwierig, da diese FFT-Geräte funktionsbedingt größere Passbereiche benötigen, um ihre Stärken im Hinblick auf die absolute Messzeit auszuspielen.

### Literatur

- [1] J. Weber, H. Hirsch, M. Kurka und M. Weber „Investigation of the influence of standard test instruments on the production of radio frequency mixed products in EMC context“, in EMC Europe 2023, Krakau, Polen, September 2023, ISBN: 979-8-3503-2400-6/23
- [2] J. Weber und H. Hirsch, „Grenzen der klassischen Störaussendungs- und Störfestigkeitsmessungen: Beeinflussung des Störspektrums durch nichtlineare Elemente“ EMV 2020, Köln/Onlinekongress (17.-19. März 2020), S 499-503, ISBN: 978-3-86359-826-6
- [3] J. C. Pedro and N. B. Carvalho, „Intermodulation Distortion in microwave and wireless circuits,“ Artech House, London, ISBN 1-58053-356-6
- [4] H. Ulrich and H. Weber, „Laplace-, Fourier- und z-Transformation Grundlagen und Anwendungen“, 10 extended edition, Regensburg: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, September 2017, ISBN 978-3-658-03449-8
- [5] CISPR 16-1-1:2019 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus