

Messungen und Simulation zur EMV und zum HF-Strahlenschutz auf einem Marineschiff

Dipl.-Ing. (FH) Holger Arends, ThyssenKrupp Marine Systems, TWF
Dr.-Ing. Harm-Friedrich Harms, ThyssenKrupp Marine Systems, TWF
Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Büscher, ThyssenKrupp Marine Systems, TWF

1. Funktionsnachweis EMV auf Marineschiffen

Auf modernen Marineschiffen gibt es besondere Anforderungen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit. Aufgrund der Vielzahl an leistungsstarken Sendern im Frequenzbereich von 1 MHz – 18 GHz sowie der Integration von hochsensibler Sensorik, ist die fehlerfreie Zusammenarbeit der Systeme wichtiger denn je. Zur Sicherstellung werden schon im Vorfeld vertraglich Grenzwerte für Systeme mit Unterauftragnehmern spezifiziert, wodurch eine potentielle Beeinflussung der Systeme zueinander verringert werden soll.

Um dem Kunden gegenüber wiederum die vertraglich zugesicherten Grenzwerte zu bestätigen, wird ein sogenannter Funktionsnachweis (FN-EMV) zum Ende der Bauphase, jedoch vor Abgabe des Schiffes, durchgeführt. Dieser Funktionsnachweis wird vor allem durch die folgenden Prüfpunkte charakterisiert:

1. Ermittlung von Störspannungen an Betriebsempfangsantennenanlagen
2. Simultanbetrieb / Zuschaltprüfung
3. Ermittlung von Feldstärken an Oberdeck

Durch die funktionelle Demonstration der zuvor genannten Prüfpunkte soll die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems garantiert werden. Während die Prüfpunkte 1 bis 3 ausschließlich die Leistungsfähigkeit des Schiffes in Bezug auf elektromagnetische Verträglichkeit sowie Funkempfangsqualität beschreiben, wird durch die Ermittlung von Feldstärken an Oberdeck ebenfalls eine Gefährdungsbeurteilung für Mensch und Munition an Oberdeck durchgeführt. Die Prüfpunkte werden bei deutschen Marineaufträgen typischerweise mit Unterstützung der WTD71 (Wehrtechnischen Dienststelle), im Rahmen von messtechnischen Verifikationen, durchgeführt.

2. Vorabsimulation

Um die vertraglich spezifizierten und zugesicherten Grenzwerte beim Funktionsnachweis einhalten zu können, werden schon während der Designphase umfangreiche numerische Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen haben gravierenden Einfluss auf die Antennen- sowie Sensorpositionierung. Folglich gibt es für die entsprechenden Prüfpunkte des Funktionsnachweises EMV auch Simulationsmöglichkeiten zur Abschätzung von potentiellen Beeinflussen und/oder Grenzwertüberschreitungen.

2.1 Störspannungen an den Betriebsempfangsantennenanlagen

Der Funkempfang kann durch eigens vom Schiff erzeugte Störungen deutlich in seiner Empfindlichkeit gemindert werden, daher existieren unter anderem Grenzwerte bezüglich der Störspannungen an Betriebsempfangsantennenanlagen gemäß Verteidigungsgeräte-Norm VG 95 370 Teile 16 und 26. Da die Störspannung an den Empfangsantennen stark von der direkten elektromagnetischen Umgebung selbiger abhängig ist und nicht jedes an Oberdeck positionierte Gerät auch den militärischen Anforderungen bezüglich der Störaussendung genügt, gilt es schon in der Antennen-/Sensorpositionierungsphase eine entsprechende Abschätzung zur möglichen Störspannung an der Empfangsantenne zu treffen.

Die Störspannung an Empfangsantennen lässt sich über numerische Verfahren unter Berücksichtigung eines numerischen Modells sowie zusätzlicher Annahmen aus den entsprechenden Normen bestimmen. Eine Methodik zur Bestimmung der Störspannung an Betriebsempfangsantennenanlagen kann dem Manuskript von Herrn Dr.-Ing. Harms „Ermittlung der Störspannung an HF-Antennen unter Einsatz der MoM“ entnommen werden.

2.2 Simultanbetrieb / Zuschaltprüfung

Da kein spezielles numerisches Verfahren zur Simulation des Simultanbetriebs existiert, wird in der Konstruktionsphase des Schiffes eine Beeinflussungsmatrix über den gesamten System- und Frequenzbereich des Schiffes generiert. Diese Beeinflussungsmatrix beinhaltet eine Aufstellung aller Störquellen (Transmitter) sowie Störquellen (insbesondere Sensorik und Empfangsantennen). Durch Definition aller Störquellen sowie Störquellen in einem numerischen Modell kann eine Berechnung der Feldstärken an den jeweiligen Störquellen durch Rechenmethoden wie die Momentenmethode (MoM), Multi-level Fast Multipol Methode (MLFMM) oder auch durch Anwendung von Fernfeldformeln erfolgen.

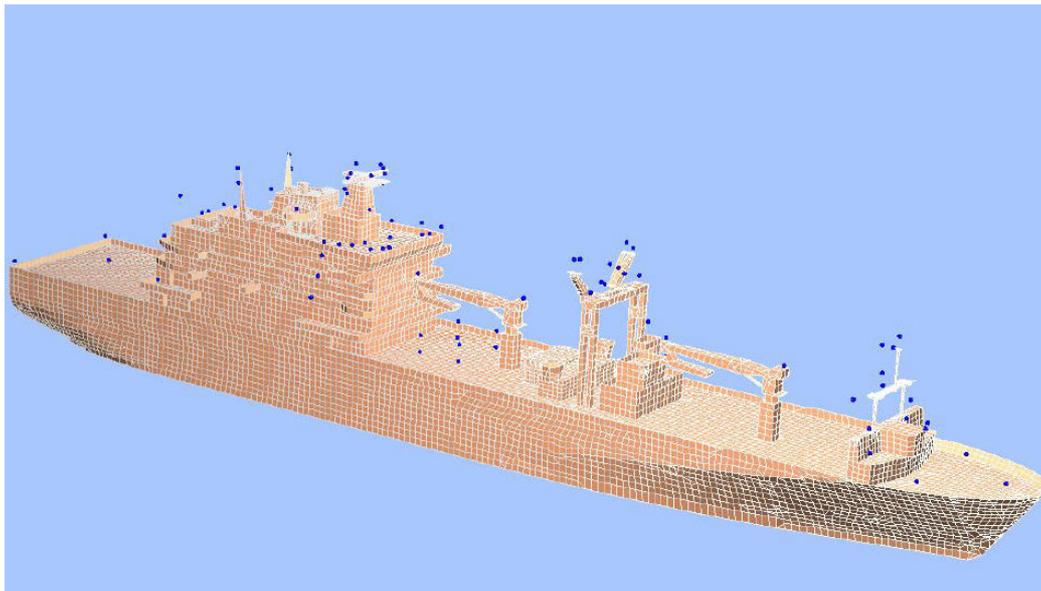


Bild 1: Beispiel zur Definition der Störquellen (Sensorik) an Oberdeck

| | | Störsenke | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 1 System 1 | 2 System 2 | 3 System 3 | 4 System 4 | 5 System 5 | 6 System 6 | 7 System 7 | 8 System 8 | 9 System 9 | System 10 | System 11 | System 12 | System 13 | System 14 | System 15 | System 16 | System 17 | System 18 | System 19 |
| Störquelle | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | System 10 | System 11 | System 12 | System 13 | System 14 | System 15 | System 16 | System 17 | System 18 | System 19 |
| 1 | System 1 | - | 27 | 27 | 31 | 23 | 6 | 5 | 39 | 2 | 11 | 52 | 4 | 57 | 88 | 34 | 66 | 23 | 23 | 12 |
| 2 | System 2 | 22 | - | 10 | 122 | 73 | 18 | - | 23 | 12 | 12 | 312 | 11 | 25 | 5 | 229 | 128 | 18 | 34 | 54 |
| 3 | System 3 | 213 | 33 | - | 123 | 22 | 12 | 36 | - | 36 | 177 | 44 | 54 | 24 | 113 | 106 | 159 | 4 | 20 | 55 |
| 4 | System 4 | 33 | 66 | 30 | - | 26 | 7 | 78 | 32 | 234 | 198 | 44 | 22 | 69 | 44 | 68 | 103 | 7 | 14 | 45 |
| 5 | System 5 | 44 | 8 | 7 | 5 | - | 4 | 54 | 63 | 28 | 55 | 21 | 21 | 79 | 159 | 14 | 28 | 2 | 2 | 85 |
| 6 | System 6 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | 5 | 6 | 34 | 4 | 7 | 9 | 45 | 10 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| 7 | System 7 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | - | 6 | 9 | 444 | 8 | 11 | 10 | 73 | 5 | 5 | 4 | 34 | 3 | |
| 8 | System 8 | 5 | 3 | 87 | 5 | 5 | 5 | 9 | - | 5 | 22 | 4 | 5 | 5 | 5 | 22 | 21 | 5 | 5 | 6 |
| 9 | System 9 | 7 | 7 | 3 | 56 | 56 | 5 | 9 | 4 | - | 66 | 4 | 5 | 5 | 5 | 21 | 22 | 5 | 5 | 7 |
| 10 | System 10 | 4 | 3 | 3 | 10 | 10 | 10 | 6 | 7 | 4 | - | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 55 | 14 | 4 |
| 11 | System 11 | 4 | 2 | 3 | 15 | 15 | 10 | 6 | 8 | 4 | 12 | - | 67 | 4 | 4 | 5 | 5 | 14 | 12 | 4 |
| 12 | System 12 | 11 | 2 | 2 | 4 | 5 | 6 | 9 | 12 | 15 | 21 | 15 | - | 17 | 20 | 11 | 11 | 7 | 7 | 2 |
| 13 | System 13 | 1 | 9 | 9 | 7 | 7 | 7 | 10 | 13 | 20 | 11 | 17 | 24 | - | 49 | 10 | 10 | 7 | 7 | 20 |
| 14 | System 14 | 7 | 6 | 6 | 43 | 51 | 19 | 11 | 6 | 7 | 29 | 7 | 7 | 8 | - | 10 | 10 | 19 | 27 | 5 |
| 15 | System 15 | 2 | 3 | 10 | 15 | 4 | 14 | 25 | 12 | 15 | 18 | 13 | 14 | 15 | 15 | - | 68 | 14 | 5 | 15 |
| 16 | System 16 | 39 | 12 | 12 | 10 | 5 | 10 | 5 | 17 | 6 | 32 | 22 | 12 | 23 | 28 | 15 | - | 10 | 10 | 6 |
| 17 | System 17 | 30 | 24 | 24 | 150 | 153 | 101 | 48 | 5 | 5 | 64 | 28 | 30 | 31 | 30 | 42 | 42 | - | 130 | 30 |
| 18 | System 18 | 67 | 34 | 34 | 32 | 32 | 32 | 43 | 47 | 12 | 2 | 67 | 12 | 116 | 81 | 44 | 47 | 32 | - | 77 |
| 19 | System 19 | 43 | 28 | 312 | 43 | 43 | 42 | 34 | 12 | 45 | 44 | 37 | 41 | 46 | 44 | 33 | 92 | 42 | 42 | - |
| 20 | System 20 | 45 | 27 | 5 | 19 | 19 | 66 | 5 | 9 | 40 | 4 | 56 | 65 | 67 | 46 | 26 | 26 | 19 | 19 | 53 |

Bild 2: Beispiel einer Beeinflussungsmatrix mit eingetragenen Feldstärken sowie farblicher Kennzeichnung potentieller Beeinflussungen

2.3 Ermittlung von Feldstärken an Oberdeck

Die Ermittlung von Feldstärken an Oberdeck ist notwendig zur Erfüllung der Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften / Regeln BGV B11 / BGR B11 zur Gefährdungsbeurteilung des Bordpersonals (HF-Strahlenschutz). Hinzu kommt die Bewertung der Gefährdung von Munition und Treibstoff durch elektromagnetische Exposition an Oberdeck. Die numerische Ermittlung dieser Gefährdungsbereiche lässt sich durch simple Definition von Feldpunktarealen in verschiedenen Höhenschnitten realisieren. Durch serielle Speisung aller Sendeantennen im numerischen Modell lassen sich Einzelfeldstärken für alle Höhenschnitte über den relevanten Frequenzbereich generieren. Die Beurteilung der Feldstärken wird wiederum durch die in BGV B11 / BGR B11 beschriebenen, frequenzabhängigen Grenzwerte sowie die Aufenthaltsdauer vorgenommen.

2.4 Unsicherheiten bei der Definition der Simulationsparameter

Für die Simulationsfälle 2.2 sowie 2.3 gibt es konkrete Unsicherheiten, was die Parameter der numerischen Simulation anbelangt. Diese Unsicherheiten werden weniger durch das numerische Modell selbst geprägt, als vielmehr durch die parametrische Gestaltung der Störquellen.

Je nach Auslegung des Worst-Case-Szenarios sind verschiedene Ansätze zu den Sendeparametern der Störquellen sowie deren Bewertung am Ort der Störsenke vorstellbar:

1. **Ausschließliche Abschätzung** der Feldstärken am Ort der Störsenke durch Fernfeldformeln im Freifeld ohne Berücksichtigung von metallischen Strukturen.

2. **Numerische Simulation** der Feldstärken am Ort der Störsenke bzw. im Oberdecksbereich unter Berücksichtigung eines ausreichenden Modells, dabei:
 - a. Berechnung der Feldstärke unter Berücksichtigung der maximalen Sendeleistung der Störquelle ohne Anpassverluste durch Anpassnetzwerke oder „Antenna Tuning Units“ (ATUs) (Simulation mit Nennleistung).
 - b. Berechnung der Feldstärke gemäß a. Berücksichtigung der Mehrfachexposition bei zeitgleichem Betrieb mehrerer Sendeantennen mit der gleichen Frequenz.
 - c. Berechnung der Feldstärke a. Berücksichtigung der Mehrfachexposition bei zeitgleichem Betrieb mehrerer Sendantennen mit der jeweiligen „worst-case“ Frequenz (jeweils höchste Einzelfeldstärke in Relation zum Grenzwert).

Erkennbar ist, dass die Feldstärken am Ort der Störsenke bzw. im Oberdecksbereich durch die entsprechenden Simulationsparameter der Staffelung nach deutlich in ihrer Intensität steigen.

2.5 Auswirkungen auf die Gefährdungsbereiche/Gerätepositionierung

Diese Simulationsannahmen führen einerseits nicht nur dazu, dass die Bordpersonal- bzw. Munitionsgefährdungsbereiche großzügig an Oberdeck ausgedehnt werden müssen, sondern andererseits auch dazu, dass das Oberdecksequipment in Form von Sensoren und Empfangsantennen den Simulationsergebnissen nach außerhalb der Störfestigkeitsspezifikationen betrieben werden muss. Bereits während der Konstruktionsphase werden daher häufig Umpositionierungen von Sensoren und Antennen vorgenommen, da unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse kein fehlerfreier, störungsfreier Betrieb gewährleistet werden kann.

Durch die immer weiter steigende Anzahl an hochsensibler Sensorik und aktiver Empfangsantennensysteme geraten die Konstrukteure durch diesen Umstand immer häufiger an die Grenzen der Positionierungsmöglichkeiten im Oberdecksbereich.

Zusätzlich muss die Marine durch die großflächigen Einschränkungen von begehbaren Bereichen immer häufiger auf organisatorische Maßnahmen zurückgreifen, um bei entsprechenden Manövern notwendiges Personal an Oberdeck bereitstellen zu können, zugleich allerdings auch den nötigen Funkverkehr und Überwachungsaufgaben sicherstellen.

3. Verifikation der Simulationsergebnisse

Nach Durchführung der Simulationen während der Konstruktionsphase sowie dem frühzeitigen Aufzeigen von Gefährdungsbereichen im Oberdecksbereich findet typischerweise im Anschluss im Rahmen des Funktionsnachweises EMV eine stichpunktartige Verifikation der zuvor aufgezeigten Gefährdungsbereiche statt. Da bei der messtechni-

schen Ermittlung der Feldstärken ebenfalls eine Aufnahme der hin- sowie rückfließenden Leistung zu der jeweils in Betrieb befindlichen Sendeantenne dokumentiert wird, kann im Nachhinein nicht nur eine Kontrolle der bereits zuvor ermittelten Gefährdungsbereiche erfolgen, sondern ebenfalls eine frequenz-/punktgenaue Verifikation der numerisch ermittelten Feldstärken.

Wie bereits in Kapitel 2.4 aufgeführt gibt es zahlreiche Ansätze, die zur numerischen Ermittlung von Gefährdungsbereichen vorstellbar sind. Da es sich bei der Festlegung von Gefährdungsbereichen ebenfalls lediglich um eine Berechnung von Feldstärken handelt, können somit auch Rückschlüsse auf die Bewertung von Störsenken wie Sensoren und deren Störfestigkeiten gezogen werden.

Durch die detaillierte Verifikation der Simulationen durch Messungen kann zukünftig eventuell ein optimierter Simulationsansatz zur Positionierung von Oberdecksequipment gefunden und damit die schwierige Aufgabe der konstruktiven Positionierung von Sensoren erleichtert werden.

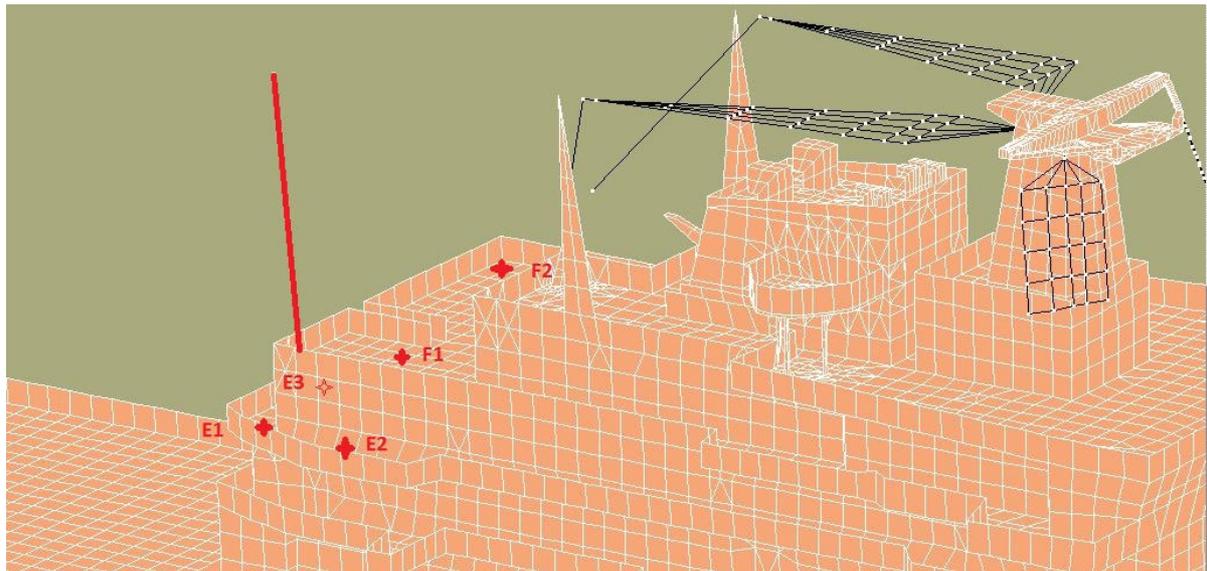
4. Verifikation am Beispiel Einsatzgruppenversorger 2. Los

Der Einsatzgruppenversorger, kurz EGV 2. Los, soll aufgrund der umfangreich durchgeführten Simulationen als Basis für die Verifikation der Gefährdungsbereiche und damit einhergehend der Feldstärken an Oberdeck dienen. Zur Ermittlung der Personengefährdungsbereiche wurden während der Konstruktionsphase decksübergreifend ca. 5500 Feldaufpunkte im Raster von einem Quadratmeter auf dem numerischen Modell des EGVs erzeugt. Im Anschluss wurde seriell jede Sendeantenne mit maximaler Leistung betrieben und die auf den Grenzwert bezogene, maximale Feldstärke sowie die zugehörige Frequenz in einer Datenbank verzeichnet. Abschließend fand eine Addition der jeweils durch den entsprechenden Sender erzeugten, höchsten Feldstärke eines Feldaufpunktes statt, um die Mehrfachexposition zu berücksichtigen. Diese Methode entspricht dem Worst-Case-Szenario zur Ermittlung von Gefährdungsbereichen an Oberdeck.

Die Verifikation der numerisch ermittelten Gefährdungsbereiche wurde stichprobenartig an 24 Messpunkten und unterschiedlichen Frequenzen durch geeignetes Mess-equipment an Oberdeck durchgeführt. Die hierbei verwendeten Messfrequenzen waren bereits Bestandteil der zuvor durchgeführten Simulationsdurchläufe. Die Feldstärken wurden für jede einzelne Sendeantenne am Messpunkt aufgezeichnet und die hin- sowie rücklaufende Leistung dokumentiert.

Der vollständige Vergleich aller Feldstärken lässt sich im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht aufführen, daher wurde ein vereinfachter Auszug der Feldstärken an verschiedenen Messpunkten (decksweise) für die Gegenüberstellung gewählt. Um die Verifikation auf unterschiedliche Sendeantennensysteme zu erweitern, wurden zudem Stab- wie auch Breitbandantennensysteme sendetechnisch betrieben und im Rahmen der Verifikation herangezogen.

4.1 Verifikation am Beispiel der achteren Stabantenne E-/F-Deck



| Messpunkt-Nr. | x | y | z | Frequenz / MHz | Simuliert mit Nennleistung (V/m) | Gemessen auf Nennleistung normiert (V/m) |
|---------------|----|----|------|----------------|----------------------------------|--|
| E1 | 25 | -7 | 20,9 | 2,00 | 47 | 15 |
| | | | | 8,19 | 19 | 12 |
| | | | | 27,40 | 4 | 34 |
| E2 | 29 | -8 | 20,9 | 2,00 | 37 | 55 |
| | | | | 8,19 | 13 | 13 |
| | | | | 27,40 | 12 | 21 |
| E3 | 25 | -2 | 20,9 | 2,00 | 16 | 5 |
| | | | | 8,19 | 9 | 6 |
| | | | | 27,40 | 21 | 6 |
| F1 | 30 | -4 | 23,7 | 2,00 | 120 | 42 |
| | | | | 8,19 | 17 | 11 |
| | | | | 27,40 | 20 | 17 |
| F2 | 27 | 6 | 23,7 | 2,00 | 11 | 8 |
| | | | | 8,19 | 19 | 17 |
| | | | | 27,40 | 9 | 6 |

Bild 3: Verifikation der Feldstärken für die achtere Stabantenne (modifiziert aus Geheimhaltungsgründen)

Erkennbar ist, dass durch die in Kapitel 2.4 vorgestellte Methode „2.a – maximale Sendeleistung ohne Anpassverluste – keine Mehrfachexposition“ (Simuliert mit Nennleistung) keinesfalls ein Worst-Case-Szenario bezüglich der Definition von Gefährdungsbereichen abgedeckt werden kann. Nach Normierung der entsprechend gemessenen Feldstärken auf die Nennleistung des Senders und damit einhergehend dem Abgleich mit den Simulationsparametern, ist für den konkreten Fall der Stabantenne faktisch eine Unsicherheit in der Bewertung von 20% feststellbar. Addiert man zusätzlich die Feldstärken, die von ihrer Intensität sehr dicht zusammen liegen, erhöht sich diese Unsi-

cherheit auf ca. 40% bezogen auf alle verglichenen Frequenzen eines Messpunktes. Um eine Abschätzung darüber vorzunehmen, inwieweit es zu einer Resonanzverschiebung der höchsten Feldstärke über den Frequenzbereich kommt, wurde eine zusätzliche Analyse für den Messpunkt mit der höchsten Abweichung (hier: E1) vorgenommen. Für diesen Vergleich wurden die insgesamt 130 simulierten Frequenzen im Frequenzbereich 1,5 MHz bis 30 MHz mit den 13 fest vorgegebenen und verwendeten Prüffrequenzen verglichen.

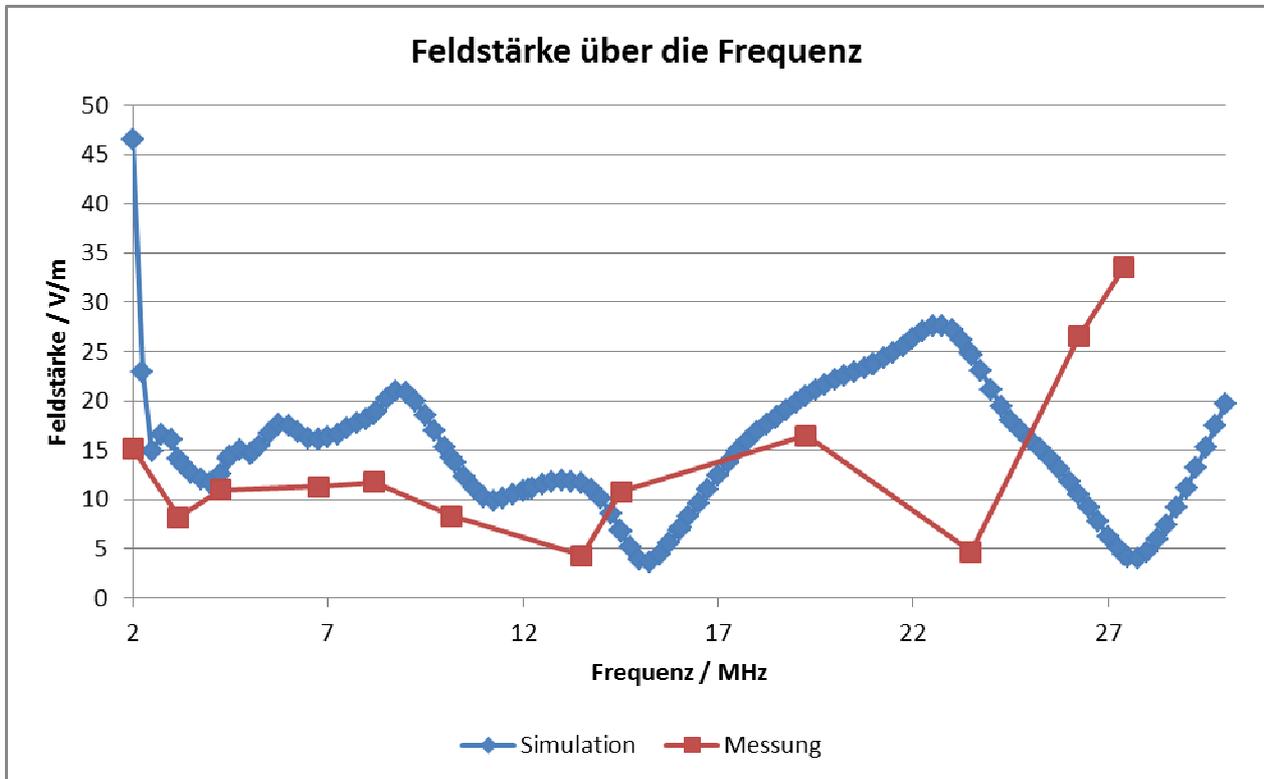


Bild 4: Feldstärkeverlauf am Messpunkt E1 über die Frequenz bei Betrieb der Stabantenne (modifiziert)

Der Feldstärkevergleich über die Frequenz zeigt keine auffälligen Ähnlichkeiten zwischen den simulierten sowie gemessenen Feldstärken. Eine eventuelle Verschiebung der höchsten Feldstärke über den Frequenzbereich ist nicht eindeutig feststellbar.

Das hier dargestellte Verhalten ergibt sich nicht nur ausschließlich für die Betrachtung von Stabantennen, sondern kann ebenfalls bei den Breitbandantennensystemen beobachtet werden.

Schlussendlich muss jedoch zur abschließenden Bewertung und Beurteilung eine systematische, detaillierte Gegenüberstellung aller Messpunkte und Frequenzen zwischen Simulation und Messung sowie eine statistische Auswertung über die Intensitäten und Überschreitungen der Feldstärken erfolgen.

5. Fazit bezüglich der Personengefährdungsbereiche

Dennoch konnte durch die Verifikation der Messpunkte mit den Simulationsergebnissen festgestellt werden, dass es zu einer guten Übereinstimmung zwischen den numerisch sowie messtechnisch ermittelten Gesamtgefährdungsbereichen kommt.

Die Ursache hierfür liegt in der frequenzmäßig fein „abgescannten“ numerischen Ermittlung der Feldstärken. Statistisch fällt auf, dass bei dem direkten Vergleich bezüglich der höchsten Feldstärke zwar nicht die identische Frequenz getroffen wird, der numerische Prüfpunkt jedoch an mindestens einer weiteren Scanfrequenz den Expositionsgrenzwert zum Personenschutz überschreitet.

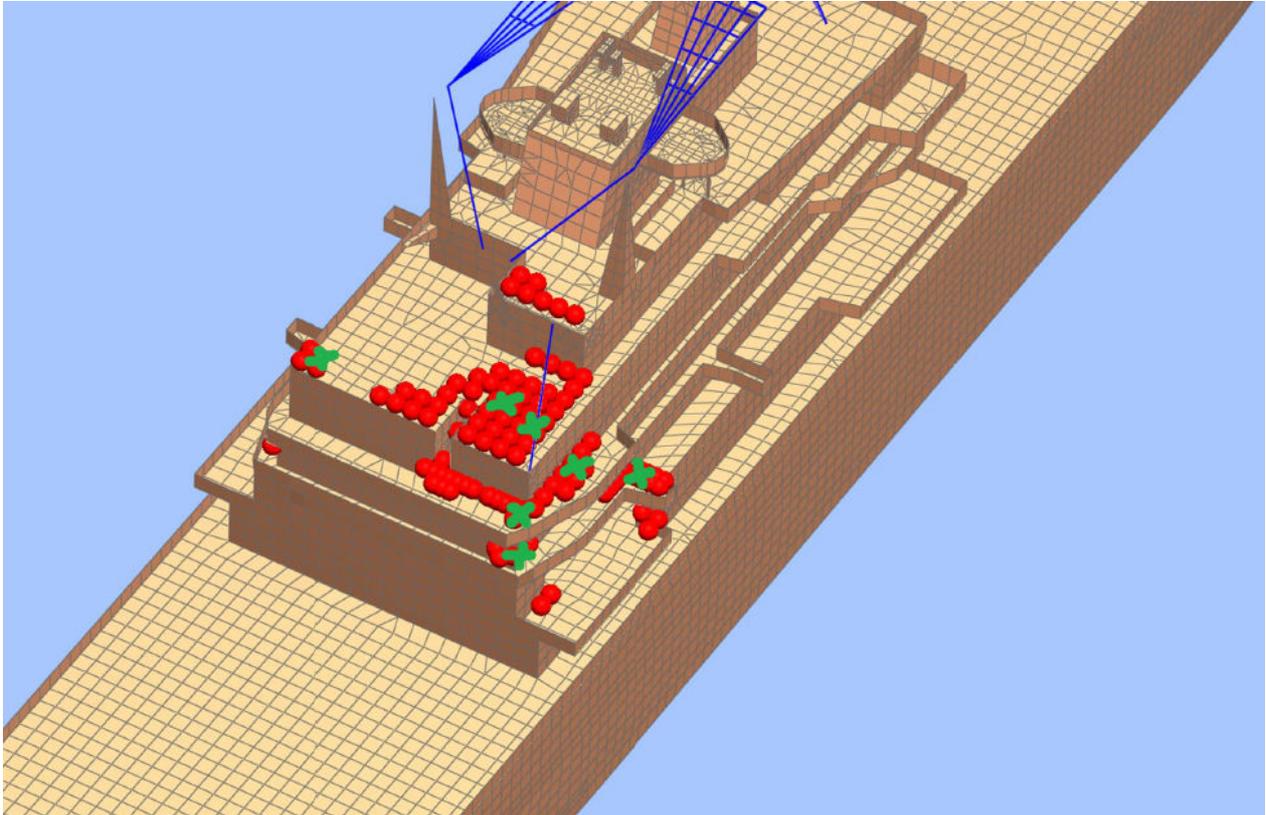


Bild 5: Verifikation der Gefährdungsbereiche am Beispiel achtere Stabantenne

In Bild 3 dargestellt sind die numerisch ermittelten Gefährdungsbereiche gemäß BGV B11 / BGR B11, hervorgerufen durch den Sendebetrieb der achteren Stabantenne. Die grünen Kreuze stellen dabei bestätigte, messtechnisch ermittelte Überschreitungen dar. Erkennbar ist hier die gute Übereinstimmung zwischen den numerisch ermittelten sowie messtechnisch verifizierten Gefährdungsbereichen, auch wenn, wie zuvor dargestellt, der Feldstärkevergleich der Einzelfrequenzen deutliche Unterschiede aufzeigt.

Um allen Anforderungen des Personenschutzes weiterhin gerecht zu werden, sollte zudem die Mehrfachexposition zur Feldstärkeermittlung an einem Standort Berücksichtigung finden.

Durch die Auswertung der Messpunkte kann jedoch ebenfalls festgehalten werden, dass für die Gerätepositionierung an Oberdeck keine Erleichterung stattfinden werden kann. Die Positionierung von Sensoren und Antennen sollte daher auch zukünftig unter Annahme der maximalen Leistung ohne Anpassungsverluste gemäß Kapitel 2.4 geschehen, um bereits im Vorfeld mögliche Beeinflussungen zwischen Oberdecksequipment zu vermeiden und damit den vertraglich spezifizierten Grenzwerten zu genügen.