

# Ermittlung der Störspannungen an HF-Antennen unter Einsatz der MoM

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

## 1. EMV auf Marineschiffen

Aufgrund der zahlreichen elektrischen und elektronischen Geräte und Anlagen hat die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) einen hohen Stellenwert auf Marineschiffen. Im Rahmen der EMV werden auch die Thematik des HF-Strahlenschutzes (Personengefährdung) sowie die Vermeidung der Gefährdung von Kraftstoffen und Munition betrachtet.



**Bild 1:** Marineschiff mit Antennenstrukturen.

### 1.1 Externe Kommunikation auf Marineschiffen

Neben der offensichtlichen Funktion als Aufklärungs- und als Waffensystem stellen moderne Marineschiffe insbesondere schwimmende Kommunikationszentralen dar. Daher hat innerhalb der EMV gerade die Betrachtung des ungestörten Funkempfangs einen hohen Stellenwert. In den militärischen Normen (Verteidigungsgeräte, VG) sind Messverfahren und Grenzwerte niedergelegt, die die Verfahren zur Sicherstellung des Funk-

empfangs beschreiben. Es handelt sich dabei um die „Störspannungen an den Betriebsempfangsantennenanlagen“ gemäß VG 95 370 Teil 16 (Verfahren) und Teil 26 (Grenzwerte) [1].

Für die Kommunikation mit Schiffen allgemein hat die Satellitenkommunikation eine essentielle Bedeutung. Schiffe sind weltweit, jederzeit problemlos zu erreichen. Diese Satelliten könnten im Krisenfall jedoch nicht mehr verfügbar oder manipuliert sein. Daher ist insbesondere im militärischen Bereich die Kommunikation über Kurzwelle (hier 1,5 MHz bis 30 MHz) immer noch unverzichtbar. Der Vorteil besteht darin, dass eine direkte Kommunikation zwischen den Einheiten ohne die Zwischenschaltung von Satelliten möglich ist. Prinzipiell ist auch über Kurzwelle eine weltweite Kommunikation möglich. Der Nachteil dieser Kommunikation besteht in einer deutlich geringeren Datenübertragungsrate.

Aufgrund dieser Relevanz des Kurzwellenbereichs für die Marinekommunikation beschränken sich die folgenden Untersuchungen auf diesen Bereich (1,5 MHz bis 30 MHz). Basierend auf den Frequenzbereichen der VG-Norm wurde der Bereich von 150 kHz bis 30 MHz untersucht, wobei der Fokus auf die Spanne zwischen 1,5 MHz bis 30 MHz gelegt wurde.

## 1.2 Störspannungen an den Betriebsempfangsantennenanlagen

Der Grundgedanke der Begrenzung dieser Störspannungen besteht darin, dass der Betreiber des Schiffes, die Marine, die volle Empfindlichkeit ihrer Betriebsempfangsantennenanlagen ausnutzen möchte. Der Betrieb des Schiffes sollte den aus der Umgebung stammenden Rauschpegel idealerweise gar nicht, oder zumindest nicht wesentlich anheben. Um objektive, vergleichbare Messungen möglich zu machen, wird jedoch nicht dieser Rauschpegel bei „totem Schiff“ (alle Geräte und Anlagen außer Betrieb) als Referenz herangezogen. Stattdessen werden die Grenzwertkurven gemäß VG 95 370 Teil 26 zwischen dem Auftragnehmer (der Werft) und dem Auftraggeber (der Marine) vereinbart.

Die VG-Normen liefern Hinweise für die Konstruktion des Schiffes und für die anzustrebenden EMV-Eigenschaften der Geräte und Anlagen. Bei ihrer EMV-Vermessung müssen diese in Abhängigkeit von Ihrer elektromagnetischen Umgebung unterschiedliche Grenzwertklassen (GWK) von 1 bis 4 einhalten. Sowohl bei den Störaussendungen als auch bei der Störfestigkeit repräsentiert die Grenzwertklasse 1 innerhalb der VG-Normen die höchste, die Grenzwertklasse 4 die niedrigste Anforderung.

Die empfindlichen Antennensysteme (potentielle Störsenken) sind im Oberdecksbereich der Schiffe installiert. In ihrer (unmittelbaren) Umgebung befinden sich viele elektrische / elektronische Systeme die potentielle Störquellen darstellen. Ein Blick auf den Antennenplan moderner Marineschiffe zeigt, dass es kaum Möglichkeiten gibt, eine elektromagnetische Entkopplung von potentiellen Störquellen und Störsenken über eine Vergrößerung des Abstandes zu erzielen. Nicht nur die reine Anzahl, sondern auch die Funktionalität schränkt die Möglichkeiten zur Positionierung erheblich ein. Eine GPS-Antenne sollte z.B. nicht neben einem Mast(-haus) installiert werden, da dieses die „Sicht“ auf weite Teile des Himmels und damit die Empfangsmöglichkeit von GPS-Satelliten erheblich einschränkt.

Bezüglich der Störaussendungen (SA) der Geräte und Anlagen in der Nähe von Antennen schlägt die VG-Norm folgendes vor um an der Antenne die Grenzwertklasse 1 bezüglich SA06S einzuhalten (Tabelle 1):

1. GWK: Keine Schirmung und keine entkoppelnden Metallflächen zwischen Gerät/Anlage und Antenne.
  - Schiff: Gilt für Geräte/Anlagen in unmittelbare Antennennähe.
2. GWK: Keine wesentliche Schirmung, jedoch entkoppelnde Metallflächen vorhanden oder räumlich großer Abstand zwischen Gerät und Antenne.
  - Schiff: Grundforderung für Geräte/Anlagen im Oberdeck
3. GWK: Sowohl Schirmung als auch entkoppelnden Metallflächen vorhanden.
  - Schiff: Grundforderung für Geräte/Anlagen im Unterdeck.
4. GWK: Geschlossener Schirm oder mehrfache Schirmung, z.B. durch zwei ineinander liegende Schirme.
  - Schiff: Z.B. Geräte im geschirmten Maschinenraum.

**Tabelle 1:** Vorgabe der Gerätegrenzwerte gemäß VG-Norm.

Die spezifische geometrische Anordnung der potentiellen Störsenken und Störquellen und die Umgebung die einen Einfluss auf die Feldverteilung nehmen kann sind hier noch nicht berücksichtigt. Vielmehr geht diese Tabelle von einem „worst-case“-Szenario aus, die Einhaltung der Störspannungen sollte für alle realen Fälle möglich sein. Für spezielle Anordnungen sind separate Untersuchungen durchzuführen.

## 2. Untersuchung der Störspannungen

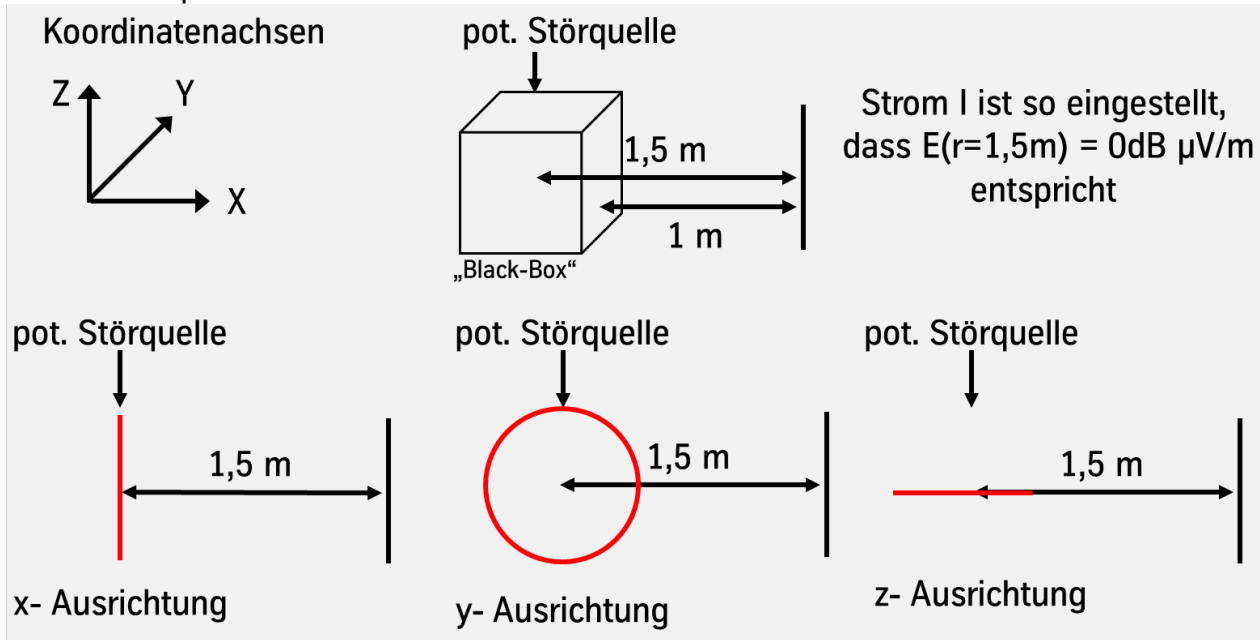
Verantwortlich für die Störspannungen an den Antennen sind die gestrahlten elektrischen und magnetischen Störaussendungen der Geräte und Anlagen in der Umgebung der Antenne. Während der EMV-Vermessung dieser G/A werden für den hier relevanten Frequenzbereich Messungen im Abstand von 1 m von der Oberfläche durchgeführt. Gemäß Prüfprozedur ist die Ausrichtung und Position der Messantenne in Relation zum Prüfling zu verwenden, die die größte Spannung liefert. Diese maximale Abstrahlung („worst-case“) ist die Basis für alle weiteren Betrachtungen zur Störspannung.

Handelt es sich bei der potentiellen Störquelle um ein Gerät, das sich aufgrund seiner Funktion dreht, so würde es beliebig komplex werden, die reale Abstrahlung dieses Gerätes zu betrachten. Um wiederum den ungünstigsten Fall abzudecken liegt es daher nahe, die potentielle Störquelle durch einen isotropen Kugelstrahler [2] nachzubilden. Ein isotroper Kugelstrahler ist eine künstliche Referenzantenne, die nicht realisierbar ist. Auch mit dem verwendeten Simulationswerkzeug CONCEPT II der TUHH, das auf der Momentenmethode (MoM) basiert, war dies nicht möglich.

### 2.1 Simulation der potentiellen Störquelle

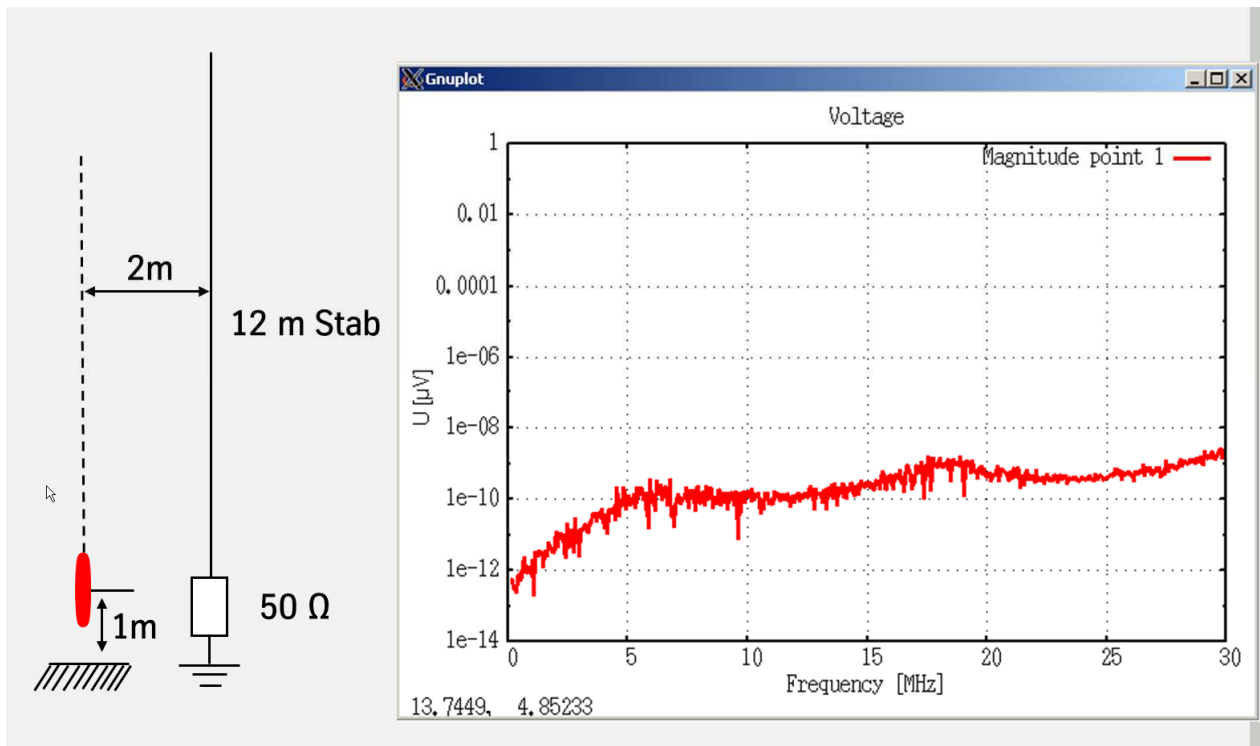
Im ersten Ansatz ging es um die Auswirkung der magnetischen Einstrahlung in die Empfangsantenne. Da sich ein isotroper Kugelstrahler nicht darstellen ließ, wurde ein anderer Elementarstrahler genutzt, ein magnetischer Dipol, modelliert durch eine kleine Loop-Antenne. Typische Geräte und Anlagen im Oberdecksbereich weisen Abmessungen von ca. 1 m x 1 m x 1 m auf. Da die Feldstärke in 1 m Abstand von der Oberfläche

dieser Geräte gemessen wird, wurde der Speisestrom der Loop-Antenne so eingestellt, dass sich in 1,5 m Abstand von der Quelle eine Feldstärke von 0 dB $\mu$ V/m ergibt (Bild 2). Um den unterschiedlichen Strahlungsrichtungen der potentiellen Störquellen Rechnung zu tragen, wurden in drei aufeinanderfolgenden Simulationen jeweils ein magnetischer Dipol mit einer x-, y- und einer z-Ausrichtung verwendet. Die Simulation mittels der Momentenmethode (MoM) liefert somit drei Kurven, die die Abhängigkeit der Störspannung von der Frequenz darstellen.

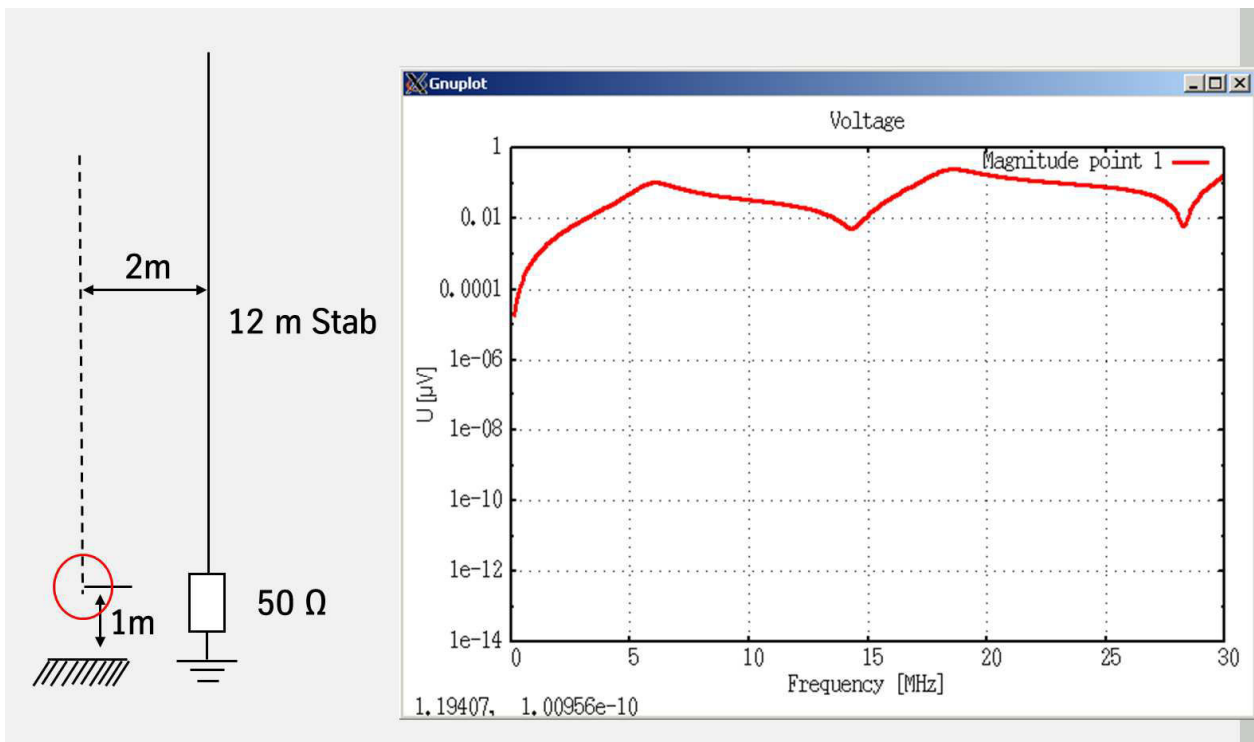


**Bild 2:** Störquelle wird durch eine Loop nachgebildet, die in alle Koordinatenachsen gelegt wird.

## 2.2 Verifikation des Modells an einer typischen Schiffskonfiguration

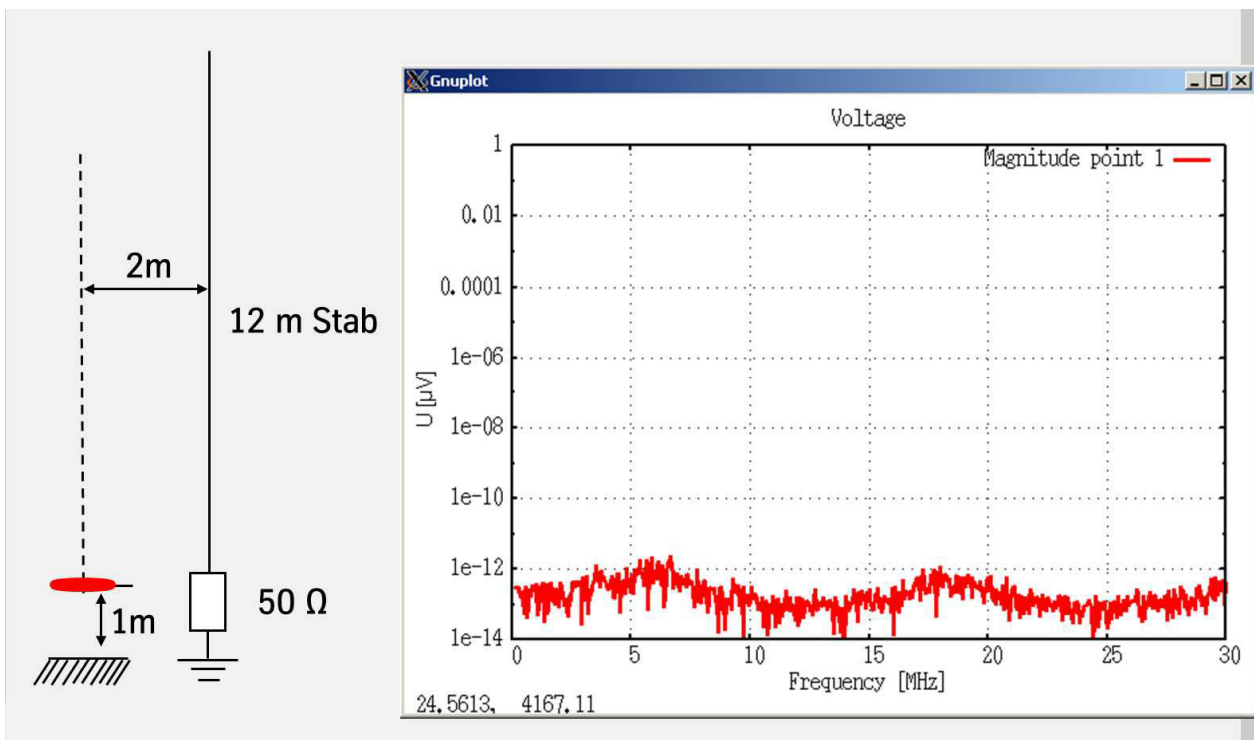


**Bild 3:** Störquelle mit x-Ausrichtung.



**Bild 4:** Störquelle mit y-Ausrichtung.

Um das Modell zu verifizieren wurde eine Untersuchung an einem Monopol mit einer Länge von 12 m (einer typischen HF-Schiffsantenne) durchgeführt. Die Quelle befindet sich in einer Höhe von 1 m über der leitenden Ebene in einem Abstand von 2 m vor dieser Antenne (Bilder 3, 4 und 5). Die 12 m-Stabantenne ist mit 50 Ohm abgeschlossen.



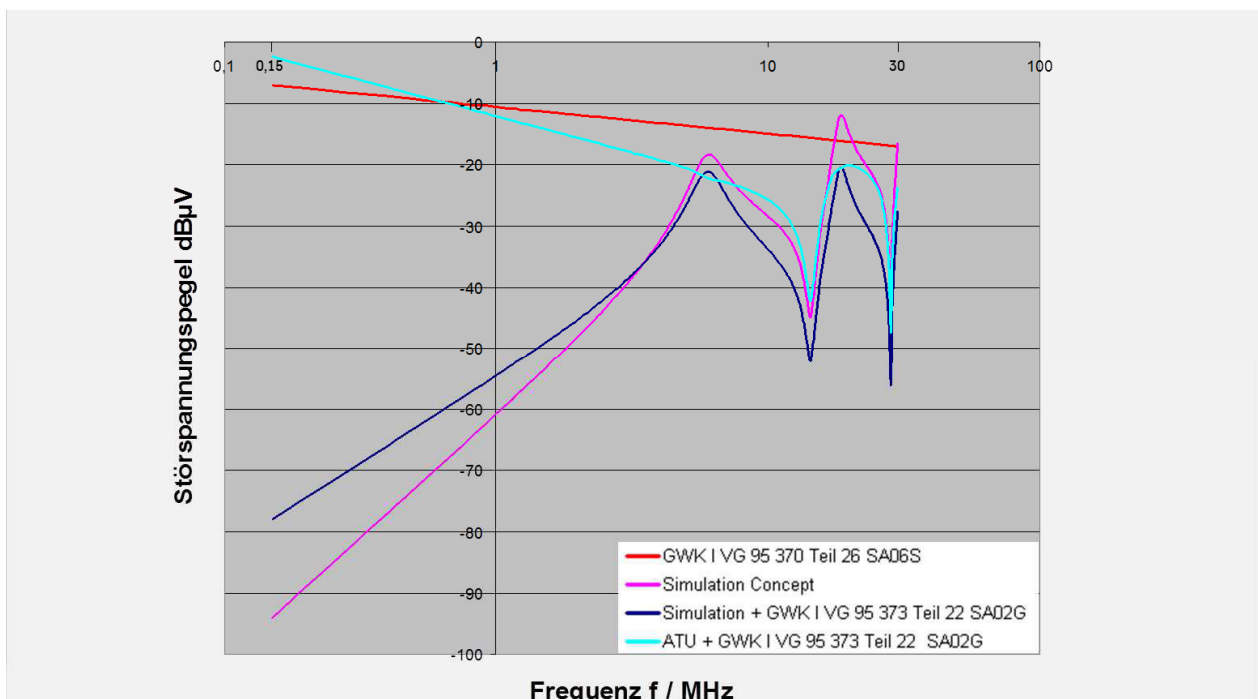
**Bild 5:** Störquelle mit x-Ausrichtung.

Die Bilder 3 bis 5 zeigen die am Abschlusswiderstand bestimmten Spannungen. Wie zu erwarten war, liefert nur eine y-Ausrichtung (Bild 4) der Quelle eine nennenswerte Spannung. Die Diagramme der Bilder 3 und 5 zeigen vernachlässigbare Spannungen, die um mehr als 120 dB unter den Werten gemäß Diagramm 4 liegen. Diese Spannungsverläufe haben keinen physikalischen Hintergrund und sind als numerisches Rauschen aufzufassen.

### 2.3 Verarbeitung der Simulationsergebnisse

Für die weitere Auswertung wurde lediglich die y-Ausrichtung des magnetischen Dipols berücksichtigt (Bild 4; Bild 6, Simulation Concept). Auf das Ergebnis der Simulation wird der Wert der zulässigen frequenzabhängigen Störaussendung gemäß GWK1 VG 95 373 Teil 22 SA02G addiert. Es ergibt sich der Verlauf der Spannung wie er bei einem 50 Ohm Abschlusswiderstand zu erwarten ist.

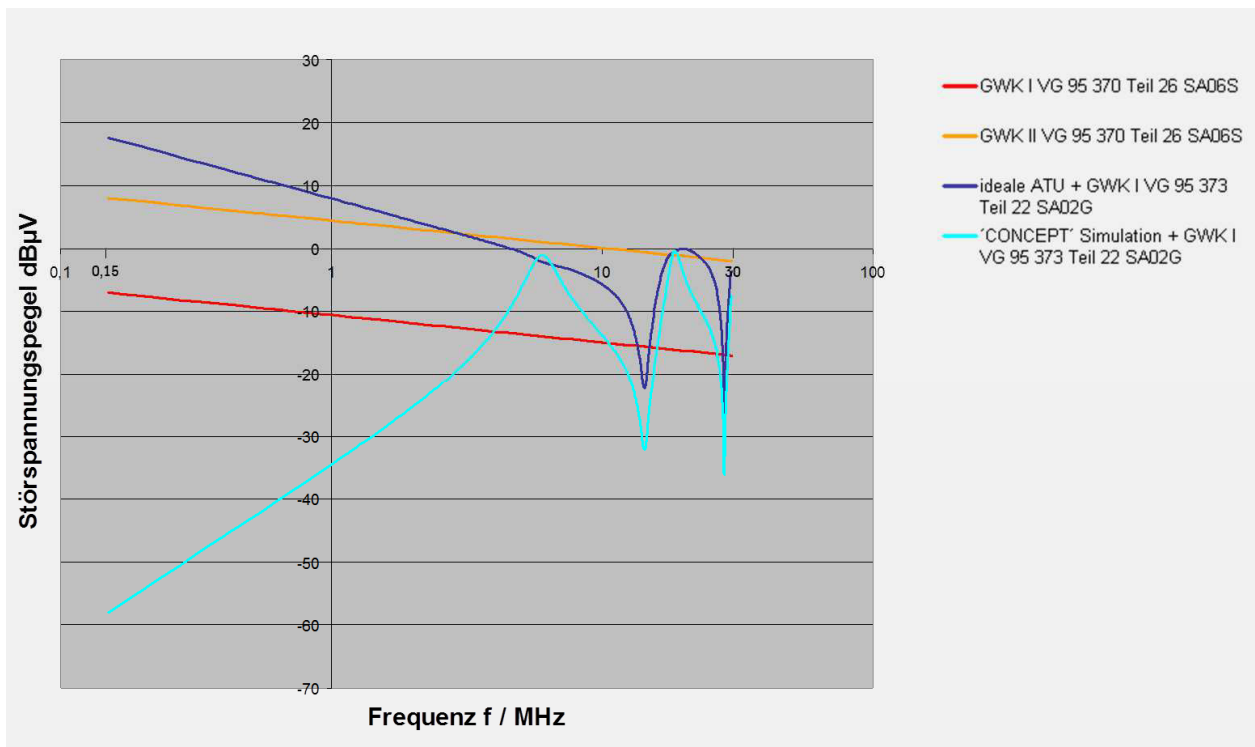
In Realität besitzt diese Antenne jedoch ein abstimmbares Antennenanpassnetzwerk (Antenna Tuning Unit, ATU) welches im Sendefall die frequenzabhängige Impedanz der Antenne an die Impedanz des Senders anpassen soll. Dieses Netzwerk führt diese Anpassung auch im Empfangsfall durch. Daher wurde die ermittelte Kurve nochmals für den Fall einer idealen, verlustlosen Leistungsanpassung umgerechnet (ATU + GWK1 VG 95 373 Teil 22 SA02G). Es ist bekannt, dass ATUs im unteren Frequenzbereich vor der ersten Resonanz der Antenne einen schlechten Wirkungsgrad aufweist. Daher wird in der Realität der tatsächliche Verlauf zwischen den beiden ermittelten Kurven, 50 Ohm Abschluss und ATU-Abschluss) liegen.



**Bild 6:** Störspannung an der 12 m-Stabantenne bei Abschluss mit 50 Ohm bzw. bei idealer Leistungsanpassung mittels Antennenanpassnetzwerk (Antenna Tuning Unit, ATU) bei Störaussendungen gemäß Grenzwertklasse 1.

Aus Bild 6 ist ersichtlich, dass, sofern das Gerät die GWK 1 für den Gerätegrenzwert gemäß SA02G einhält, an der Antenne der Systemgrenzwert SA06S mit der GWK 1 oberhalb von 1 MHz sicher eingehalten wird. Bild 7 zeigt die Verhältnisse für den Fall,

dass das Gerät die Störaussendungen gemäß Grenzwertklasse 2 einhält. Zwar zeigen sich hier leichte Überschreitungen, aber unter Berücksichtigung des geringen Wirkungsgrades der ATU im unteren Frequenzbereich kann auch hier davon ausgegangen werden, dass dann die GWK 2 des Systemgrenzwertes SA06S eingehalten wird.



**Bild 7:** Störspannung an der 12 m-Stabantenne bei Abschluss mit 50 Ohm bzw. bei idealer Leistungsanpassung mittels Antennenanpassnetzwerk (Antenna Tuning Unit, ATU) bei Störaussendungen gemäß Grenzwertklasse 2.

## 2.4 Auswertung der Resultate

Die Verifikation hat gezeigt, dass das gewählte Verfahren realistische Werte für die Störspannungen an den Betriebsempfangsantennenanlagen liefern kann. Die Ergebnisse korrespondieren mit den in den VG-Normen gemachten EMV-Grenzwertvorgaben für die Geräte und Anlagen für die unterschiedlichen Montageorte an Bord des Schiffes (Tabelle 1). Insofern scheint das Verfahren geeignet für die Untersuchung des Schiffdesigns.

## 3. Einsatz des Verfahrens für Schiffe

Das dargestellte Vorgehen wurde genutzt um Simulationen für einen konkreten Schiffsentwurf durchzuführen. Dazu wurde neben der dargestellten Betrachtung der magnetischen Kopplung auch die elektrische Kopplung betrachtet. Basis sind hier die Störaussendungen gemäß SA03G gemäß VG 95 373 Teil 22. Als Störquelle wurden elektrisch kurze Dipole verwendet, die jeweils in x-, y- und z-Richtung ausgerichtet werden um eine Feldabstrahlung der potentiellen Störquelle in alle Raumrichtungen anzunähern.

Aufgrund der komplexen Struktur des Oberdecks eines Schiffes kann nicht wie im Beispiel des 12 m-Monopols davon ausgegangen werden, dass nur eine Ausrichtung der Elementarstrahler eine Spannung an einer Antenne bewirkt. Bereits durch die Schiffsstruktur als solche kommt es zu starken Verzerrungen des Feldes. Hinzu kommt die Ausrüstung des Oberdecks die für weitere Beeinflussungen der Feldverteilung sorgen.

Die Resultate der Simulationen in den drei Raumrichtungen wurden nach den drei Einzelsimulationen zusammengefasst. In der Auswertung wurde dazu jeweils nur die höchste Spannung berücksichtigt. Zur Bewertung einer möglichen Überschreitung von Grenzwerten wurden somit für die Konstellation einer potentiellen Störquelle und einer potentiellen Störsenke jeweils zwei Diagramme generiert, eins für die Betrachtung der Verkopplung durch das elektrische Feld und eins für die Bewertung der Verkopplung durch das magnetische Feld.

Das dargestellte Vorgehen wurde in einem konkreten Fall für die Untersuchung einer kritischen Konstellation einer potentiellen Störquelle und einer empfindlichen Empfangsantenne genutzt. Die Kritikalität der Anordnung konnte mittels der Untersuchungen bestätigt werden. Die Untersuchung von weiteren Kombinationen von potentiellen Störquellen und potentiellen Störsenken bestätigte jeweils die Ergebnisse des Vorgehens gemäß der Vorgaben in der VG (Tabelle 1).

#### **4. Zusammenfassung**

Das dargestellte Vorgehen wurde in einem aktuellen Auftrag genutzt um in einem kritischen Fall eine Prognose für eine Störspannung zu erhalten. Ein Vergleich zu Messungen konnte noch nicht erfolgen, da der Auftrag noch nicht so weit fortgeschritten ist, als dass Messungen möglich wären. Diese Messungen werden voraussichtlich erst während des EMV-Funktionsnachweises durchgeführt werden. Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen wurden jedoch zusätzlich EMV-Maßnahmen zur Reduktion der Störaussendung der potentiellen Störquelle initiiert. Zudem wurde unter Einbeziehung des Kunden eine Kompromisslinie zwischen der Funktionalität der beiden betroffenen Subsysteme und den Anforderungen der Elektromagnetischen Verträglichkeit gesucht und gefunden. Auf Basis der Messungen während des Funktionsnachweises EMV werden dann gemeinsam Entscheidungen getroffen um die Elektromagnetische Beeinflussung möglichst gering zu halten. In der Konstruktion des Schiffes konnten diese Maßnahmen in dem frühen Stand der Konstruktion noch ohne großen Mehraufwand berücksichtigt werden.

Da das Verfahren recht aufwändig ist, sollte es nur für kritische Konstellationen von potentiellen Störsenken und Störquellen genutzt werden. Es müssen für jede Kombination aus Störsenke und -quelle 6 Simulationsläufe durchgeführt werden. Um sie in größerem Rahmen anzuwenden müsste man den gesamten Ablauf andernfalls automatisieren.

#### **5. Literatur**

- [1] DIN-Taschenbuch 516 - Elektromagnetische Verträglichkeit 2, Beuth Verlag, 1996
- [2] Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, H.H. Meinke, F.W. Gundlach, Springer Verlag Berlin, 1992