

Antennensimulationen in der Automobilindustrie für Spezialfahrzeuge

Melanie Rohe, Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH, Entwicklung Elektrik
Sascha Dietrich, Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH, Qualität Produktion
Martin Hellmann, Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH, Qualität Produktion
Sebastian Schreiber, Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH, Qualität Produktion

1 Einleitung

Die EMV gewinnt beim Schutz von Geräten und Systemen gegenüber elektromagnetischen Bedrohungsformen zunehmend an Bedeutung. Durch die steigende Anzahl an Helferlein wie Kommunikations- und Navigationssystemen in Fahrzeugen auf geringem Bauraum muss die gegenseitige Beeinflussung möglichst gering gehalten werden. Spezialfahrzeuge der Automobilindustrie sind sehr umfangreich mit Ortungssystemen, Störsendern und Sende-Empfangseinrichtungen ausgestattet. In der Entwicklungsphase ist die Positionierung der Antennen ein wesentlicher Faktor. Willkürliche Änderungen der Antennenpositionen in der Umsetzungsphase sind mit einem hohen Kostenaufwand verbunden und würden den finanziellen und zeitlichen Rahmen sprengen. Bereits während der Definitions- und Konzeptphase können die Abstrahlcharakteristika und Feldverteilungen der verschiedenen Antennenformen analytisch untersucht werden. Gleichzeitig kann der Personenschutz betrachtet werden, indem untersucht wird, wie hoch die elektrischen Feldstärken an den typischen Aufenthaltsorten von Personen sind. Hier werden beide Kriterien bewertet – die Abstrahlcharakteristik der Antennen sowie der Personenschutz gegenüber Strahlungsfeldern.

2 Fahrzeug – HX

Die HX-Varianten sind geländegängige Fahrzeuge der militärischen Sonderentwicklung. Aber sie werden nicht nur bei der Bundeswehr, sondern auch in zivilen Einrichtungen - wie dem Technischen Hilfswerk (THW) – eingesetzt (Bild 1).



Bild 1 Logistikfahrzeug HX im militärischen (links) und im zivilen Bereich (rechts)

Zwecks verschiedener Kommunikationssysteme und GPS-Systeme hat das Fahrzeug mehrere Antennen. Der Frequenzbereich liegt zwischen 30 MHz und 2 GHz. Bei der Positionierung muss darauf geachtet werden, dass die Antennenkopplung möglichst gering und der Personenschutz gewährleistet ist.

Simulationsmodell

Das Fahrzeug der Baureihe HX besteht aus einem tragenden Chassis, dem Fahrerhaus und einem Lastzug zum Transport. Für Kommunikations- und Ortungssysteme sind an dem Fahrzeug sechs VHF- bzw. UHF-Antennen angeordnet. Vier Antennen sind auf einer Halterung an der Fahrzeugfront und zwei weitere auf dem hinteren Teil des Fahrerhausdaches angebracht. Entscheidend in dem Simulationsmodell sind die Fahrerkabine, das tragende Chassis sowie die sechs Antennen für die Funk-, Ortungs- und Kommunikationssysteme. Das CAD-Modell ist in Bild 2 dargestellt (ohne Antennen).

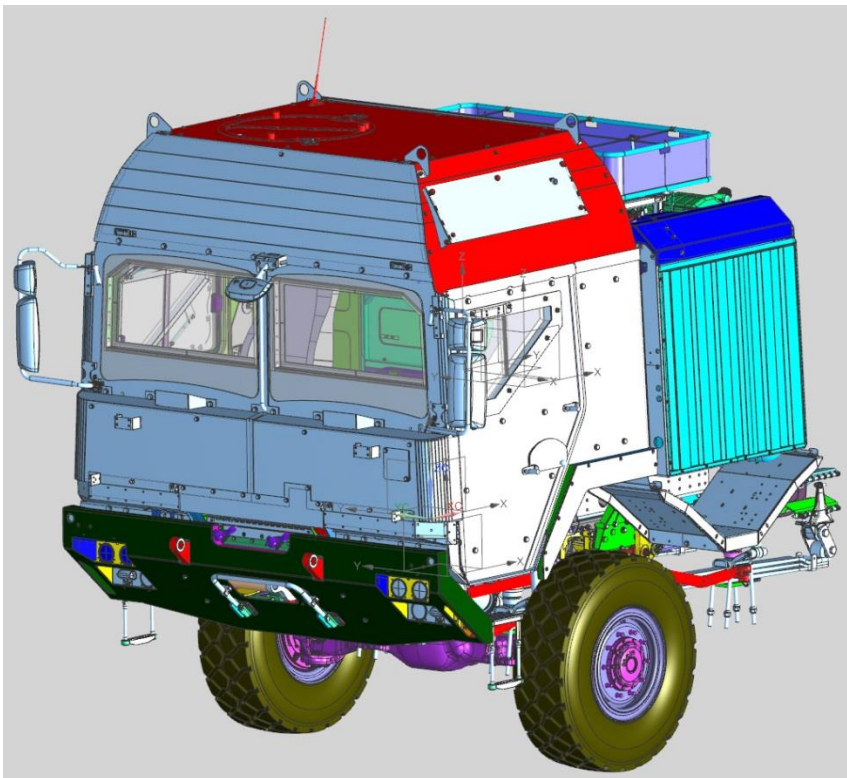


Bild 2 CAD-Modell des HX

Bedingt durch die Größenordnung des Fahrzeuges, die hohe Anzahl von Komponenten, die Verlegung von Kabeln sowie die Modellierung jeder Schraube, erfordert es einen enormen Rechenaufwand. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, werden die genannten Bauteile – insbesondere die im Innenraum der Fahrerkabine – nicht modelliert. Lediglich die Feldverteilung um das Fahrzeug sowie die maximale Feldstärke in der Fahrerkabine sind relevant. Bild 3 zeigt das angepasste Simulationsmodell.

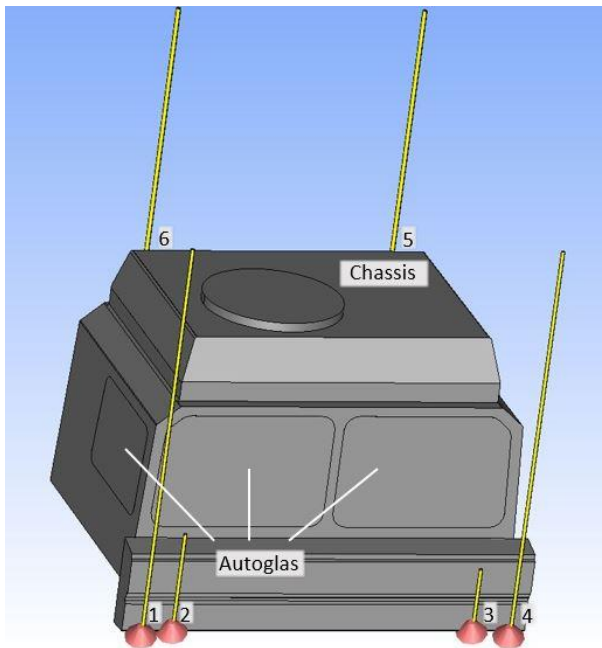


Bild 3 Simulationsmodell HX

Gekennzeichnet sind die Antennen (hier Monopolantennen) mit den Nummerierungen 1 bis 6, die wie folgt definiert sind:

- 1 ECM 1, V/UHF, 30 – 512 MHz (Comrod)
- 2 ECM 4, 800 – 1000 MHz (Cobham)
- 3 ECM 3, 1,7 – 1,9 GHz (Cobham)
- 4 ECM 2, V/UHF, 30 – 512 MHz (Comrod)
- 5 VHF 2, 30 – 88 MHz (Comrod)
- 6 VHF 1, 30 – 88 MHz (Comrod)

Bei der Antennenanordnung müssen verschiedene Kriterien bewertet werden. Aufgrund der Antennenkopplung sollte es einen Mindestabstand geben, der einem Viertel der Wellenlänge der kleinsten Frequenz entspricht, also $\lambda/4$. Hier ist $f = 30$ MHz die kleinste Frequenz und entspricht einer Wellenlänge von $\lambda = 10$ m. Das erfordert einen Mindestabstand von 2,5 m, das bei dem Fahrzeug nicht möglich ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Personenschutz. Um die Mindestanforderungen zu erfüllen, muss der Befestigungspunkt möglichst weit von den „typischen“ Aufenthaltsorten des Menschen entfernt sein. Das sind die Luke auf dem Dach und der Fahrer- und Beifahrersitz. Daraus ergeben sich die in Bild 3 dargestellten Anordnungen. VHF 1 und 2 sind auf den Dachkanten mit möglichst großem Abstand zur Dachluke platziert. Die Antennen ECM 1 bis 4 sind auf geringer Distanz zueinander und an den Außenkanten des Stoßfängers angebracht, um den Personenschutz zu gewährleisten und das Sichtfeld des Fahrers/Beifahrers nicht einzuschränken.

Für den Vergleich werden nach der Änderung der Befestigungspunkte lediglich die Antennen ECM 1 und ECM 2 betrachtet. Denn bedingt durch das begrenzte Volumen des Chassis und Fahrerhauses gibt es nicht viele Optionen für die Befestigungspunkte.

3 Simulationsergebnisse

Die numerische Analyse erfolgte mit der Simulationssoftware CST Studio Suite. Im Vordergrund stehen die vier Antennen ECM 1 bis 4. In den Simulationsergebnissen

werden die beiden VHF-Antennen auf dem Fahrzeugdach nicht betrachtet. Zum einen werden sie nicht abgeschattet, und zum anderen stellen sie in erster Linie keine Bedrohung für den Personenschutz innerhalb der Fahre kabine dar.

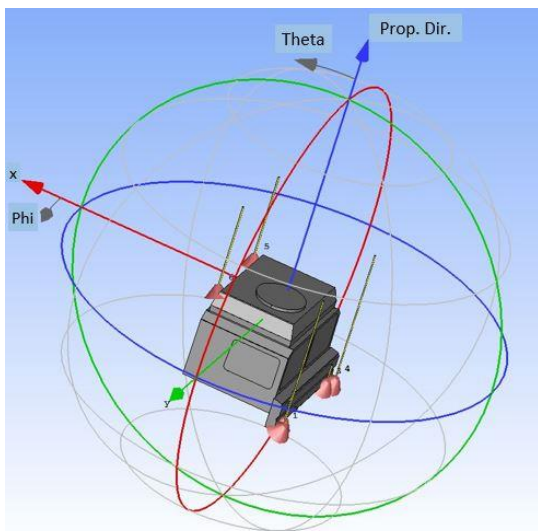


Bild 4 Perspektive der Simulationsergebnisse

Neben den Abmaßen müssen die Materialeigenschaften des Modells definiert sein. Beim Fahrzeug wird Panzerstahl eingesetzt, dessen Eigenschaften in einer Spezifikation beschrieben sind. Allerdings sind lediglich die mechanischen und klimatischen Eigenschaften angegeben. Die elektrische Leitfähigkeit ist nicht bekannt. Aufgrund dessen wurde als Material ein verlustbehafteter Stahl gewählt. Die Antennen bestehen aus Aluminium, das ebenfalls verlustbehaftet ist. In der Materialbibliothek wurden auch die Eigenschaften von Glas definiert, das für die Front- und Seitenscheiben gewählt wurde. Gezeigt werden die Simulationsergebnisse aus der Perspektive nach Bild 4.

3.1 Antennenposition 1

In dem ersten Simulationsmodell befinden sich alle vier Antennen an der Fahrzeugfront, das in Bild 5 als Seiten- und Frontansicht dargestellt ist.

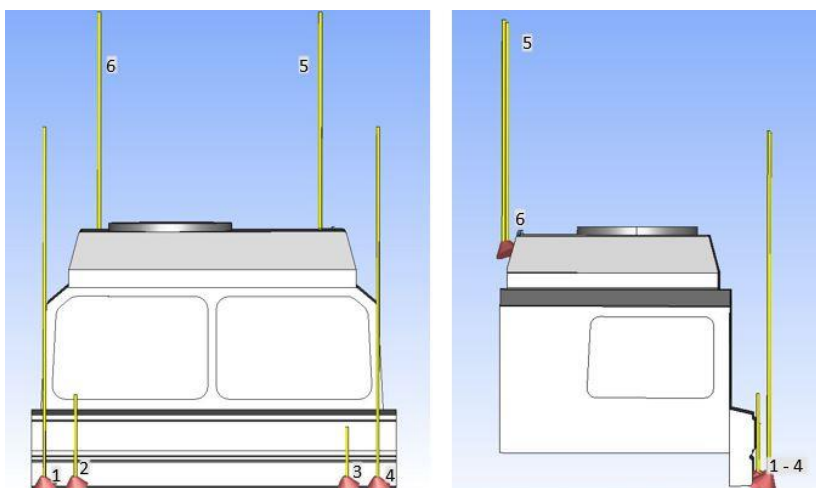


Bild 5 Antennenposition 1, Front- (links) und Seitenansicht (rechts)

Gezeigt werden die Feldverteilungen und Richtdiagramme aus der in Bild 4 dargestellten Perspektive. Die ersten Simulationsergebnisse in Bild 6 zeigen die Abstrahlcharakteristik der ECM 1 (V/UHF, 30 – 512 MHz) bei einer Frequenz von 400 MHz. Die Feldverteilung entspricht - wie erwartet - der einer typischen Monopolantenne.

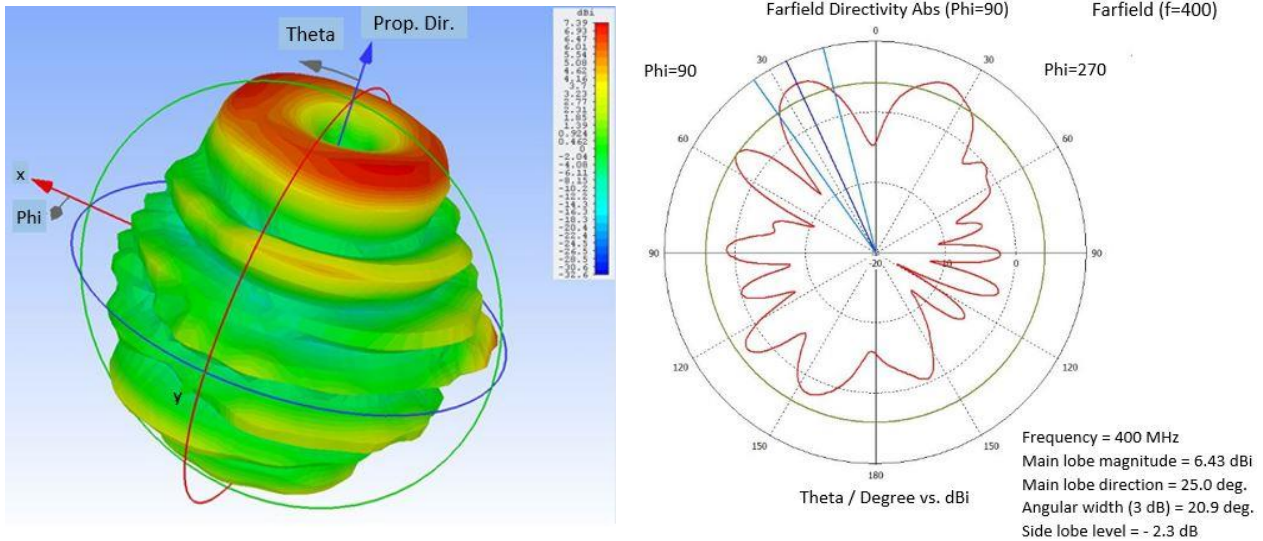


Bild 6 Feldverteilung (links) und Richtdiagramm (rechts) der ECM 1, Außenseite rechts der Fahrzeugfront

Die Hauptkeule zeigt in Richtung $\vartheta = 25^\circ$ (Theta), hat ein Maximum von 6,43 dBi und einen Öffnungswinkel von $20,9^\circ$. In dem Richtdiagramm zeigt sich eine relativ hohe Anzahl von Nebenkeulen, die durch Reflexionen am Fahrzeug verursacht werden.

Wie zu erwarten weist die linke äußere Antenne ECM 2 (V/UHF, 30 – 512 MHz) die annähernd gleichen Abstrahleigenschaften auf – die Hauptkeule, der Öffnungswinkel, die maximale Amplitude und die Bildung von Nebenkeulen. Hier sind in Bild 7 die Feldverteilungen von der anderen Fahrzeugseite dargestellt.

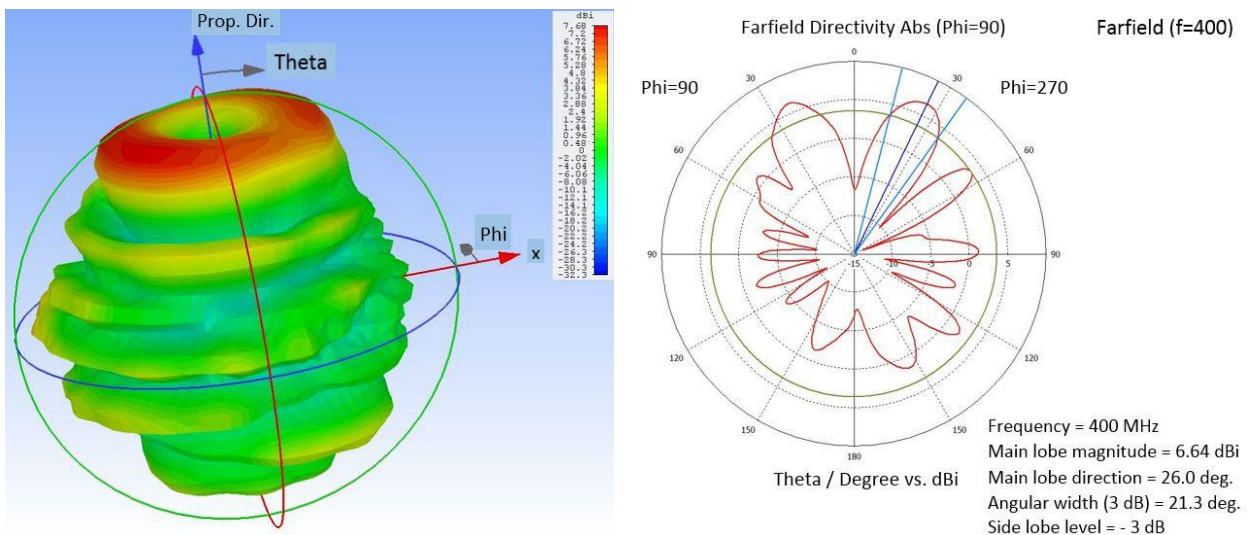


Bild 7 Feldverteilung (links) und Richtdiagramm (rechts) der ECM 2, Außenseite links der Fahrzeugfront

Bild 8 und Bild 9 zeigen die Simulationsergebnisse für die ECM 4 (800 – 1000 MHz) und ECM 3 (1,7 – 1,9 GHz). Erkennbar sind wesentlich mehr Nebenkeulen im Vergleich zu den beiden äußeren Antennen ECM 1 und 2.

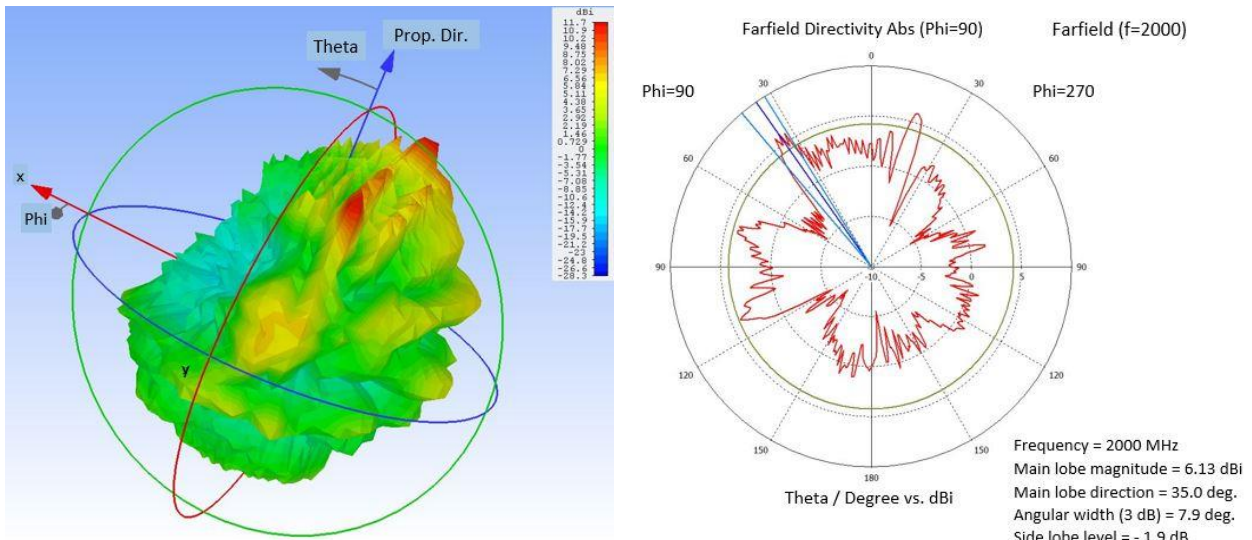


Bild 8 Feldverteilung (links) und Richtdiagramm (rechts) der ECM 3, Innenseite links der Fahrzeugfront

Ursache ist der geringere Abstand der beiden UHF-Antennen zum Fahrzeug - im Vergleich zu den beiden Antennen ECM 1 und 2 an den Außenseiten der Halterung. Die Folgen sind wesentlich größere Reflexionen am Chassis. Um die effizienteste Optimierung der Abstrahlungscharakteristik einer Antenne zu erreichen, müssen die Abstände zwischen Antennen und umgebenen Objekten möglichst groß sein, das hier nicht gegeben ist.

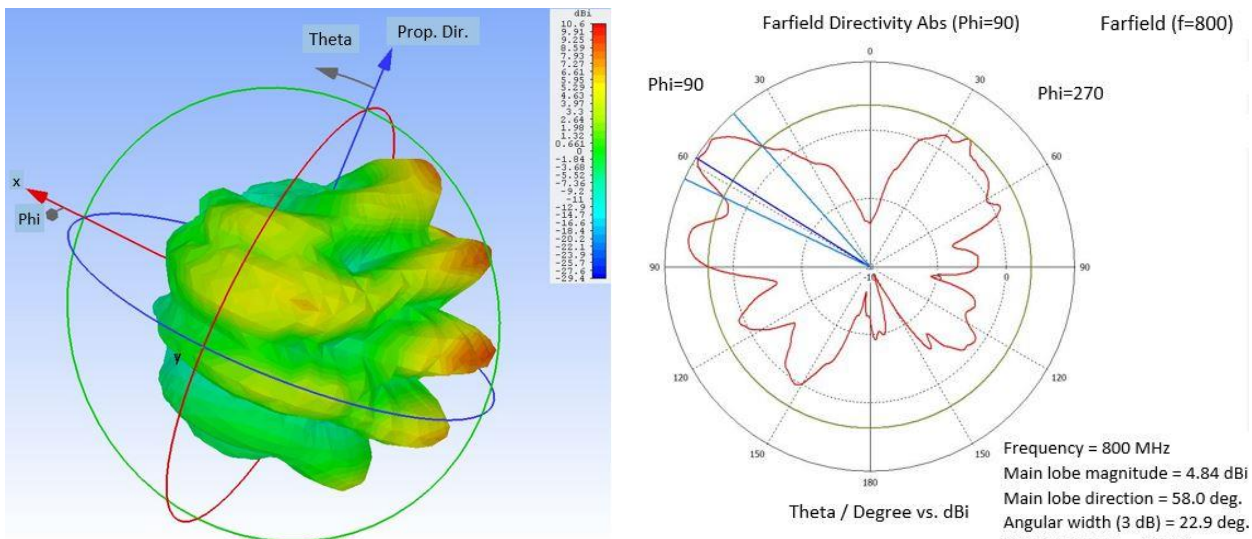


Bild 9 Feldverteilung (links) und Richtdiagramm (rechts) der ECM 4, Innenseite rechts der Fahrzeugfront

Weiterhin ist interessant, wie die Verteilung des Gesamtfeldes ist. Für die Bewertung des Worst-Case wird angenommen, dass alle Antennen gleichzeitig im SendebetrieB sind. Das muss für alle Frequenzpunkte jeder einzelnen Antenne betrachtet werden. Hier wird die Analyse auf einem Frequenzpunkt begrenzt, weil es den Umfang der hier

beschriebenen Untersuchungen sprengen würde. Bild 10 zeigt die Feldverteilung und das Richtdiagramm des Gesamtfeldes bei einer Frequenz von 400 MHz.

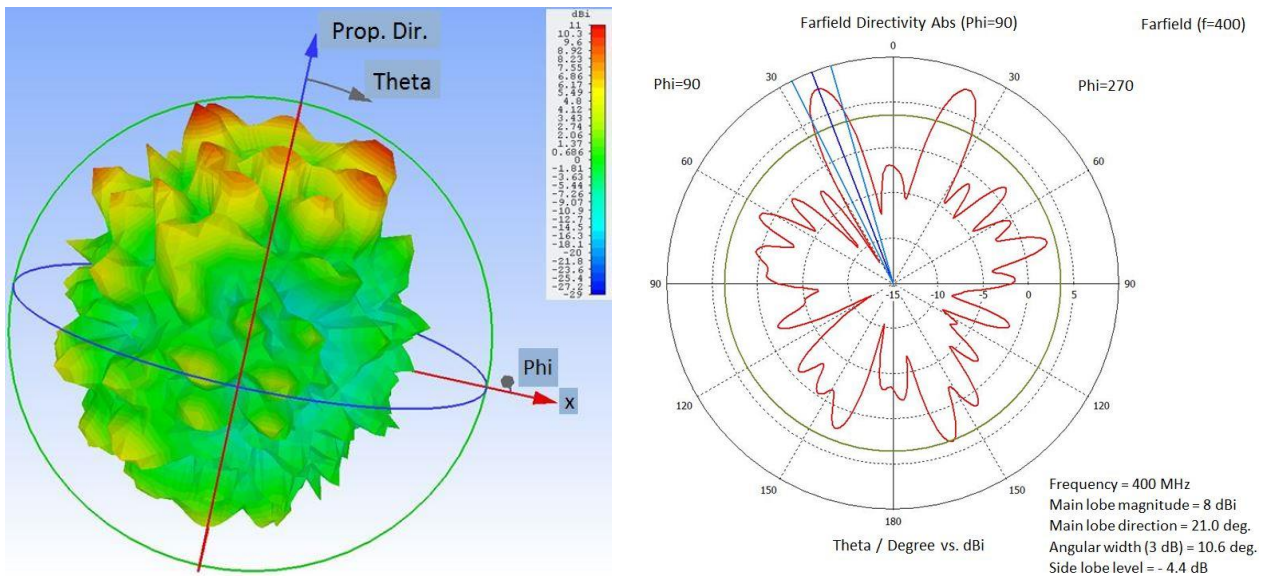


Bild 10 Feldverteilung (links) und Richtdiagramm (rechts) des Gesamtfeldes

Die Abbildungen zeigen, dass sich aufgrund der gewählten Frequenz die Hauptkeulen der beiden V-/UHF-Antennen ECM 1 und 2 deutlich hervorheben. Der nächste Schritt ist die Positionsänderung der ECM 1 und 2, deren Abstrahlcharakteristik im nächsten Abschnitt untersucht wird. Hier wird die Verteilung des Gesamtfeldes nicht bewertet, weil es die gleichen Eigenschaften aufweisen wird.

3.2 Antennenposition 2

Wie bereits beschrieben ändern sich die Befestigungspunkte der Antennen ECM 3 und 4 in dem zweiten Simulationsmodell nicht. Lediglich die beiden V/UHF-Antennen an den Außenseiten der Fahrzeugfront werden versetzt. Das ist in Bild 11 dargestellt.

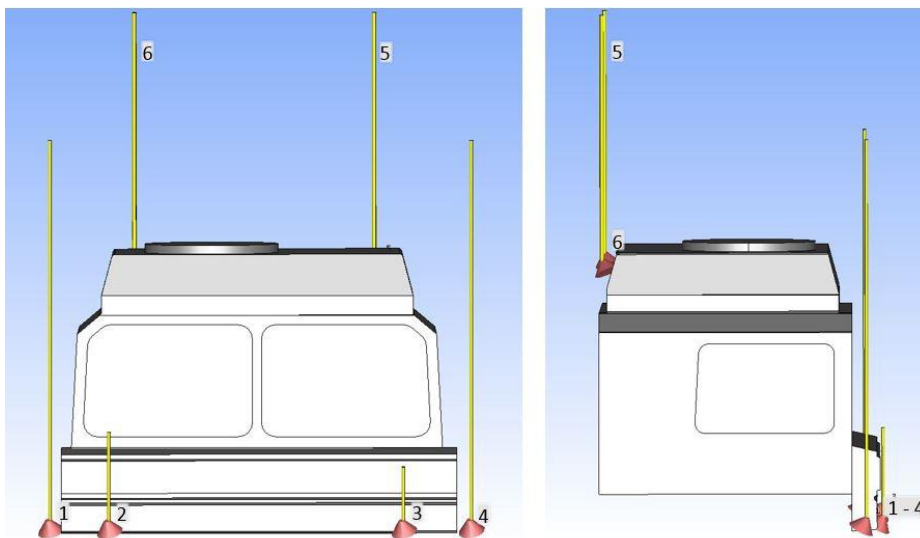


Bild 11 Antennenposition 2, Front- (links) und Seitenansicht (rechts)

Bild 12 und Bild 13 zeigen die Feldverteilungen und Richtdiagramme der ECM 1 und 2 nach Änderung der Befestigungspunkte.

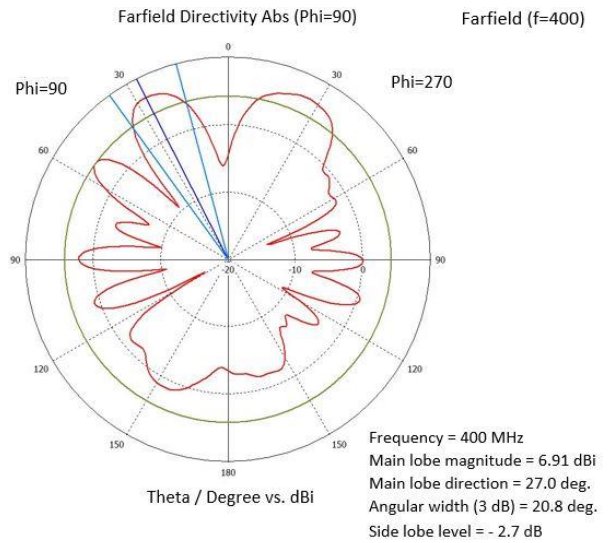
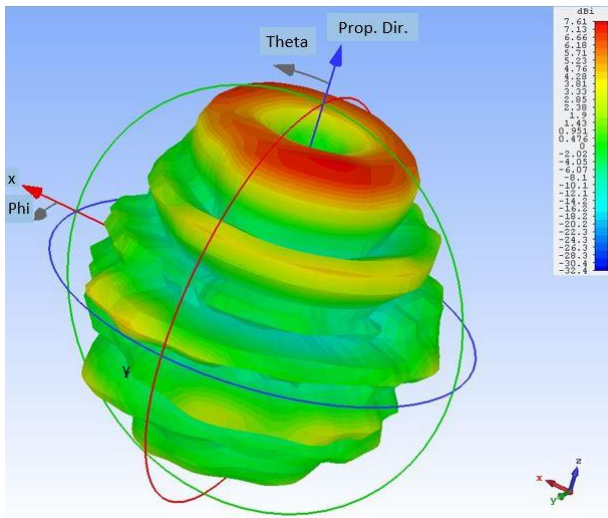


Bild 12 Feldverteilung (links) und Richtdiagramm (rechts) der versetzten Antenne ECM 1

Die Hauptkeulen, die maximalen Amplituden und die Öffnungswinkel ändern sich nicht. Auffällig sind jedoch eine leichte Reduzierung von einzelnen Nebenkeulen sowie die Verlagerung von deren Maxima.

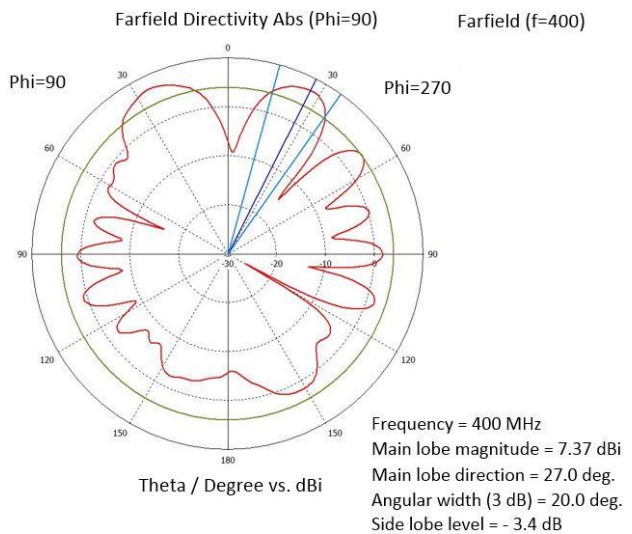
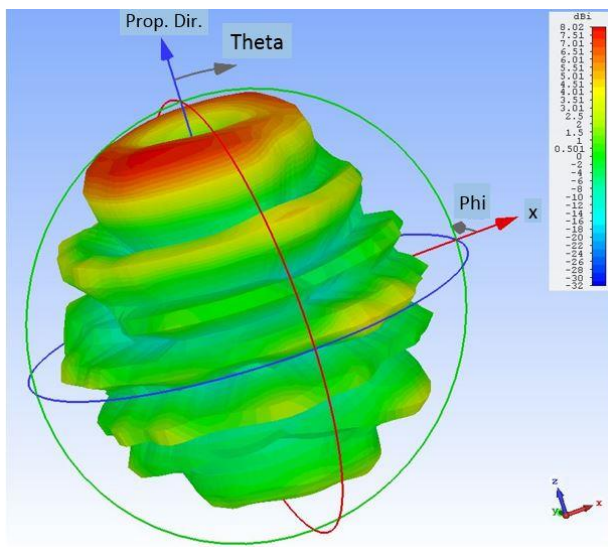


Bild 13 Feldverteilung (links) und Richtdiagramm (rechts) der versetzten Antenne ECM 2

Die Ursachen sind zum einen der größere Abstand zu den benachbarten Antennen, zum anderen eine veränderte Abschattung durch die Halterung an der Fahrzeugfront. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der Personenschutz. Im nächsten Abschnitt wird die Feldverteilung gemäß gesetzlicher Vorschriften untersucht.

4 Bewertung des Personenschutzes

Zur Bewertung des Personenschutzes wird die DGUV Vorschrift 15 (Deutsche gesetzliche Unfallversicherung) – Elektromagnetische Felder – herangezogen [1]. International ist die sogenannte ICNIRP – International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection – gültig, das im Wesentlichen die gleichen Messvorschriften beinhaltet. Es gibt keine festdefinierten Messpunkte. Die Positionierung der Feldsonden wird durch die typischen Aufenthaltsorte des Menschen bestimmt. Das sind zum Beispiel der Fahrer- und Beifahrersitz sowie die Dachluke. Die Messungen erfolgen auf Kopfhöhe, weil das Gehirn die empfindlichste Stelle des menschlichen Körpers ist.

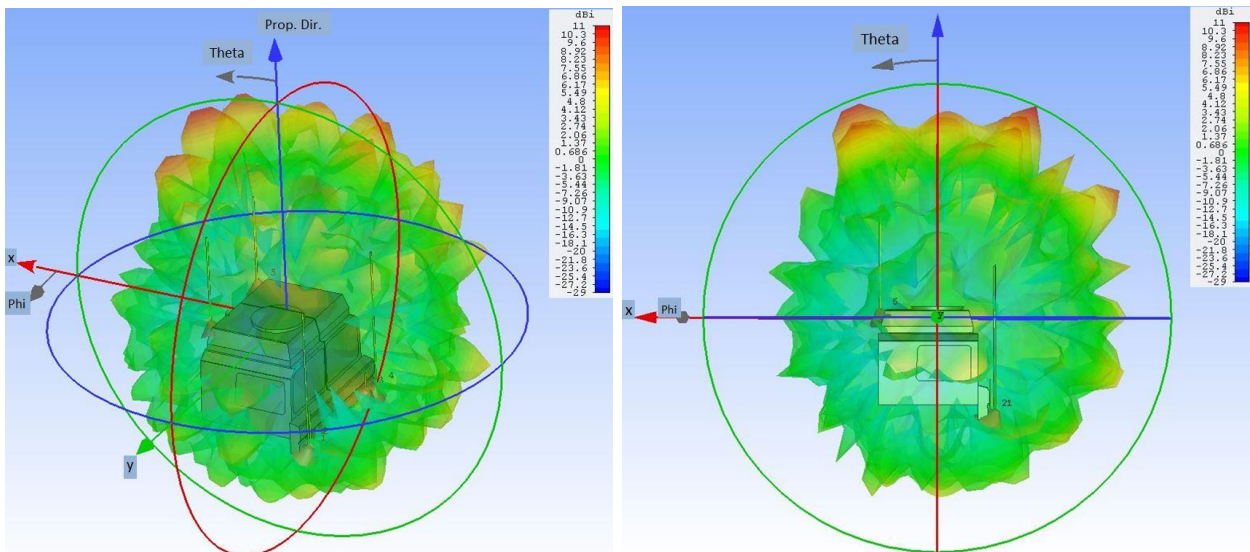


Bild 14 Feldverteilung um das Fahrzeug in Vogelperspektive (links) und Seitenansicht (rechts)

Die Feldsonde misst die elektrische Feldstärke auf 0,85 m Höhe über dem Fahrersitz und 0,15 m Entfernung von der Kopfstütze. Für die Bewertung müssen alle Frequenzbereiche der sechs Antennen berücksichtigt werden. Bedingt durch den großen Aufwand wird lediglich ein Frequenzpunkt – hier 400 MHz – gewählt, in dem das Feld beim Sendebetrieb der sechs Antennen betrachtet wird. In Bild 14 ist das Fahrzeug HX mit den Feldverteilungen - Vogelperspektive und Seitenansicht - dargestellt. Gemäß der DGUV wird eine Bewertung für mehrere Frequenzen durchgeführt. Als nicht kritisch wird es bewertet, wenn folgende Bedingung nach [1] eingehalten wird:

$$\sum_k \left(\frac{E_k}{E_{a,k}} \right)^2 \leq 1.$$

Darin bedeuten:

E_k = gemessene Effektivwerte der elektrischen Feldstärke

$E_{a,k}$ = zulässige Werte der elektrischen Feldstärke

Nach [1] beträgt der maximal zulässige Wert der elektrischen Feldstärke 61 V/m.

Bild 15 zeigt, dass die maximale elektrische Feldstärke E außerhalb der Fahrerkabine in etwa 35 V/m beträgt und damit wesentlich geringer als der maximal zulässige Wert ist.

Dieser Wert wird auf dem hinteren Teil des Fahrzeugdaches sowie vor dem Fahrzeug unterhalb der Halterung festgestellt.

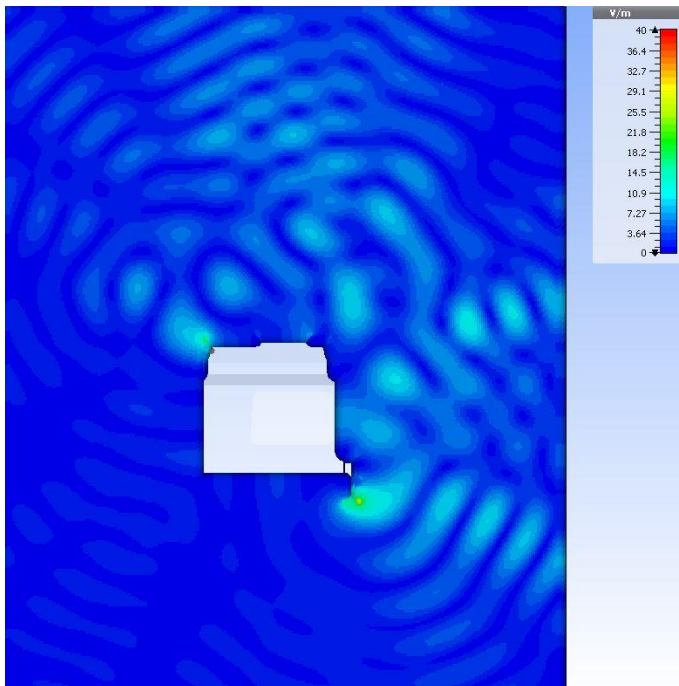


Bild 15 Feldverteilung um das Fahrzeug (Seitenansicht, rechts), hier: elektrische Feldstärke E in V/m, $E_{max} \approx 35$ V/m

Da die Feldstärke aufgrund einer geschlossenen Kabine innerhalb des Fahrerraums noch geringer ist, ist hier der Personenschutz gewährleistet.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung logistischer Radfahrzeuge der Baureihe HX wurden bereits während der Definitions- und Konzeptphase numerische Feldberechnungen durchgeführt. Untersucht wurde die Positionierung von Antennen, die den Kommunikations- und GPS-Systemen dienen. Ziel war es die Abstrahlcharakteristik der Fahrzeugantennen zu untersuchen. Das wurde für einzelne Frequenzpunkte der Antennen durchgeführt. Die Anzahl möglicher Befestigungspunkte von Antennen an Chassis sind aufgrund der Rüstsätze begrenzt. Hier wurden zwei mögliche Anordnungen der Antennen untersucht. Zunächst waren vier Antennen an der Fahrzeugfront befestigt. Eine weitere Option war die Positionierung von zwei der vier Antennen an der linken bzw. rechten Seite des Stoßängers. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass sich die Hauptkeulen, die maximalen Amplituden und die Öffnungswinkel nicht ändern. Hingegen war auffällig, dass leichte Reduzierungen von einzelnen Nebenkeulen auftraten sowie eine Verlagerung derer Maxima erfolgte.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Bewertung des Personenschutzes, die nach der „Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder“ der DGUV erfolgte. Entscheidend waren die maximalen Feldstärken innerhalb der Fahrerkabine sowie die in der Nähe der Dachluke. Hier zeigte sich, dass der ausreichende Personenschutz gegeben war.

6 Literaturverzeichnis

- [1] DGUV - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder, Vorschrift 15, Juni 2001