

# FFS - Zur Entwicklung vogelschlaggefährdeter, multi-bandfähiger Radome für zukünftige UAVs

C. Brand, M. Calomfirescu, H. Meister, M. Rothenhäusler, M. Schlick  
Airbus Defence and Space GmbH, Military Aircraft, Manching, Deutschland

S. Heimbs, T. Wagner  
Airbus Group Innovations, Ottobrunn, Deutschland

U. Christ, T. Krell  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB),  
Erding, Deutschland

## Zusammenfassung

Moderne Leichtbau-Radome zum Schutz von Antennen für die Satellitenkommunikation (SatCom) in UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) müssen eine Reihe von strukturmechanischen und elektromagnetischen Anforderungen erfüllen. Dieses Paper gibt einen Überblick über die wesentlichen Anforderungen an ein multi-bandfähiges SatCom - Radom für ein UAV der Kategorie MALE (Medium Altitude Long Endurance). Dabei sind sowohl die elektromagnetische Transparenz in den gewünschten Frequenzen als auch Vogelschlagszenarien dimensionierende Anforderungen. Unterschiedliche Radombauweisen wurden untersucht und bewertet. Schwerpunkt des Papers ist die Definition eines Full-Scale SatCom Radom-Demonstrators und der Weg zur Erreichung des Technologiereifegrads (TRL) 6. Hierzu wird ein Überblick über experimentelle und numerische Untersuchungen gegeben. Dazu gehören elektromagnetische Simulationen und Messungen, sowie strukturmechanische Untersuchungen zur Abschätzung von Vogelschlagszenarien.

## 1. EINLEITUNG

Die operationellen Szenarien für künftige unbemannte und in netzwerkzentrierte Umgebungen eingebundene Flugsysteme (UAVs – Unmanned Aerial Vehicles) stellen weitreichende Anforderungen an die verwendeten Datenübertragungssysteme. Die zentralen Aufgaben dieser Systeme bestehen im Wesentlichen aus der Übertragung von C2 (Command & Control) Daten, navigationsrelevanten Informationen sowie der Übertragung von Sensordaten wie z.B. SAR (Synthetic Aperture Radar) Daten, Infrarot Daten oder der Daten elektro-optischer Sensoren. Die hierbei anfallenden umfangreichen Informationsmengen erfordern Datenübertragungssysteme mit hoher Frequenzbandbreite um eine schnelle und effiziente Weiterleitung der Daten an andere Plattformen oder Bodenstationen und somit eine zeitnahe Datenverarbeitung zu gewährleisten.

In der Konsequenz ergeben sich auch für die dazugehörigen Radomstrukturen (Radom = **R**adar **D**ome) weitreichende Forderungen nach elektromagnetisch hochtransparentem Verhalten sowie paralleler Abdeckung verschiedener Frequenzbänder (Multiband-Forderung).

Weitere Hauptforderungen an künftige UAV Radome sind u.a.:

- Mechanische Robustheit und Schadenstoleranz, insbesondere Resistenz gegen Vogelschlag
- Geringes Gewicht
- Geringe Herstellkosten
- Verarbeitbarkeit der verwendeten Materialien
- Resistenz gegen Witterungsbedingungen, insbesondere gegen Blitzschlag, Regen und Hagel
- Inspizierbarkeit und Reparierbarkeit
- Dichtigkeit

Um eine solide technologische Basis für künftige Radome zu schaffen, werden derzeit im Rahmen des Leitprojekts FFS (Fortschrittliche Flugzeugstrukturen) neue Radomtechnologien entwickelt und erprobt. Hierbei wurde ein generisches typisches SatCom Radom ähnlich z.B. dem SatCom Radom des geplanten unbemannten Höhenaufklärers MALE 2020 (MALE – Medium Altitude Long Endurance; siehe BILD 1) als eine repräsentative Zielstruktur als Grundlage für die Technologieentwicklung definiert.

Die Technologieentwicklungsarbeiten für das Radom werden gemeinschaftlich von Airbus Defence & Space, Airbus Group Innovations (AGI), dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR Braunschweig und DLR Stuttgart) durchgeführt. Die Fertigung des ersten Radom-Demonstrators erfolgt durch einen externen Composite-Hersteller.



BILD 1: Das SatCom Radom des MALE 2020

## 2. ENTWICKLUNGSPROZESS DES RADOMS

Für die Realisierung von Radomen kommen prinzipiell eine Vielzahl verschiedener Strukturtypen in Frage, dies sind im Wesentlichen:

- Monolithisches Radom, durchgängig bestehend aus nur einem Material.
- A-Sandwich Radom, hierbei handelt es sich um einen 3-Schicht-Aufbau bestehend aus zwei strukturellen Decklagen und einer Kernschicht (siehe BILD 2).
- C-Sandwich Radom, hierbei handelt es sich um einen 5-Schicht-Aufbau bestehend aus drei strukturellen Lagen und zwei Kernschichten (siehe BILD 2).

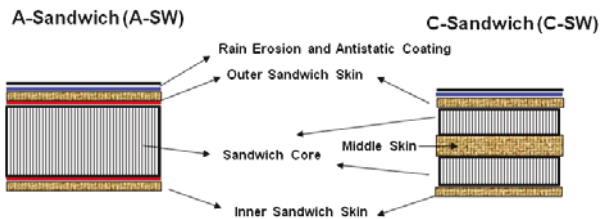


BILD 2: Sandwich-Radom-Strukturkonzepte

In der Anfangsphase des Projekts lag ein wesentlicher Schwerpunkt der Entwicklungsaktivitäten auf der Auswahl geeigneter Materialien sowie der Analyse des mechanischen Verhaltens und des elektromagnetischen Transparenzverhaltens der o.g. Radomtypen.

Nach sorgfältiger Abwägung aller relevanten Faktoren wie elektromagnetischer (EM) Transparenz, Gewicht, mechanischer Robustheit, fertigungstechnischer Umsetzbarkeit usw. wurde ein A-Sandwich-Radom mit Quarzglas/Epoxy (Prepreg) Deckschichten und einem Wabenkern als Basisconfiguration für die weitere Technologieentwicklung definiert.

Generell wird hierbei ein sogenannter „Building Block Approach“ angewandt, d.h. die in BILD 3 dargestellte Versuchspyramide wird Schritt für Schritt von unten nach oben abgearbeitet, um mit zunehmender Größe und Komplexität der Testkomponenten zu einem vertieften Verständnis des mechanischen und elektromagnetischen Verhaltens der Struktur zu gelangen.

Für weitere Details bzgl. der Bewertung und Auswahl des optimal geeigneten Radom-Strukturtyps für die hier zu realisierende Zielanwendung sei an dieser Stelle auf [1] und [6] verwiesen.

Die prinzipielle Zielsetzung des Entwicklungsprozesses besteht darin, für die SatCom-Radom Technologie einen technologischen Reifegrad von TRL 6 zu erreichen (TRL = Technology Readiness Level), der allgemein definiert ist

als eine Demonstration der Technologie in Form eines Prototypen in einer relevanten Umgebung [2]. Für die hier zugrunde gelegte Komponente bedeutet dies konkret:

- Elektromagnetische Auslegung des SatCom Radoms.
- Konstruktion des Radoms unter besonderer Berücksichtigung der variablen Kernschichtdickenverteilung.
- Statische Auslegung des Radoms mit Finite-Elemente (FE)-Methoden.
- Durchführung numerischer Vogelschlagsimulationen und eines Vogelschlagtests zum Nachweis der mechanischen Robustheit bei Impactbelastung.
- Herstellung eines Full-Scale Radom-Demonstrators zwecks Nachweis der fertigungstechnischen Umsetzbarkeit.
- Durchführung einer EM-Vermessung von Antenne und Radom zum Nachweis der „Electrical Installed Performance“ des Gesamtsystems.
- Durchführung von Blitztests zwecks Nachweis der Funktionsfähigkeit des integrierten Blitzschutzsystems.
- Durchführung von Reparaturtests am Radom zum Nachweis der Erfüllung der Forderung nach Reparierbarkeit.

Mit der Erreichung von TRL 6, welche für Anfang 2018 geplant ist, sind die grundlegenden Technologieentwicklungsarbeiten abgeschlossen und damit besteht die prinzipielle Möglichkeit, das SatCom Radom-Konzept in eine reale künftige Flughardware zu überführen.

In den folgenden Kapiteln sollen die o.g. Entwicklungs- und Testaktivitäten in größerer Detailtiefe dargestellt werden. Die Entwicklung des SatCom Radom-Blitzschutzsystems wird in einem separaten Paper behandelt, diesbezüglich sei an dieser Stelle auf [3] verwiesen.

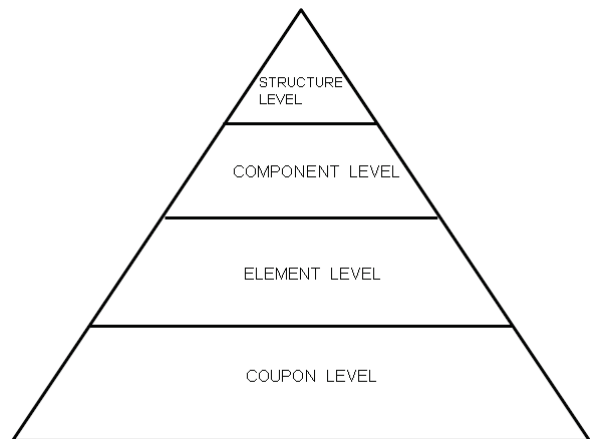


BILD 3: Testpyramide

## 3. FERTIGUNGSPROZESS DES RADOMS

Mit der Herstellung des Radom-Demonstrators sollen alle fertigungsrelevanten Aspekte nachgewiesen werden. Diese wurden auf Basis der Radom-Konstruktion und der betreffenden Anforderungen in einer detaillierten Fertigungsspezifikation zusammengestellt. Das Dokument umfasst:

- Geometrie und Abmessungen des Bauteils
- Zu verwendende Materialien und Hilfsmaterialien
- Definition des Übergangsbereichs von der Sandwichstruktur in den monolithischen Randbereich des Radoms
- Segmentierung des Wabenkerns
- Stabilisierung der Wabenkerne
- Lagenaufbau der Composite-Deckschichten
- Vakuumaufbau für den Aushärteprozess
- Anzuwendender Aushärtezyklus
- Fertigungsbegleitproben zur Qualitätssicherung
- Toleranzanforderungen
- Anforderungen an die Oberflächenrauigkeit
- Integration des Blitzschutzsystems
- Aufbringung des Regenerosionsschutz- und Antistatik-Lacks
- Qualitätssicherungsmaßnahmen

Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte der Radomherstellung im Detail vorgestellt:

**Konstruktion: Geometrie und Abmessungen**

BILD 4 zeigt ein typisches MALE SatCom Radom mit Parabolantenne. Der blaue Bereich markiert hierbei den Schwenkbereich der Antenne.

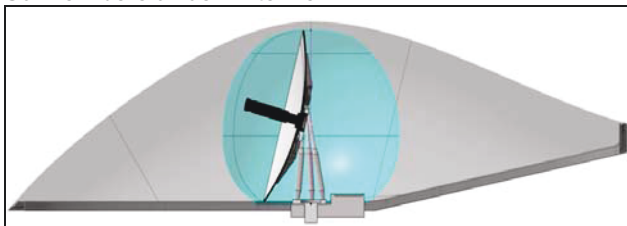


BILD 4: Radom- mit Parabolantenne

Das zugrunde gelegte SatCom Radom hat eine Länge von ca. 4 m. Aus Gründen der Vereinfachung und Kostenreduktion werden für den Radom-Demonstrator lediglich die vorderen 3 m realisiert, so dass sich für den Demonstrator Hauptabmessungen von ca. 3 m x 1.3 m x 1 m ergeben, siehe BILD 6.

Zur Konstruktion des Demonstrators gehören neben der Definition der Sandwich-Schale mit dem getaperten (d.h. dickenvariablen) Kern (die Dicke ist ortsabhängig um den Einfluss des Einfallswinkels des Antennenstrahls zu berücksichtigen) auch die Gestaltung der Randbereiche als Interface zur Struktur (BILD 5) und die Integration des Blitzschutzsystems, BILD 6. Außerdem ist eine Support-Struktur notwendig, auf der das Radom bei den verschiedenen Tests gelagert wird, BILD 7.

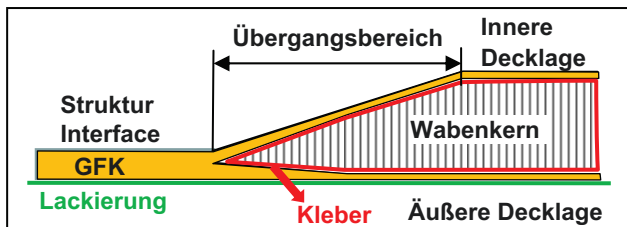


BILD 5: Interface zur Flugzeugstruktur

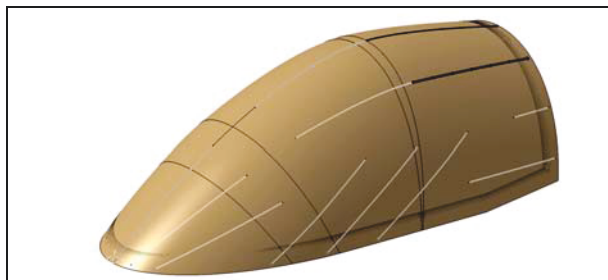


BILD 6: Radom-Demonstrator mit integriertem Blitzschutz

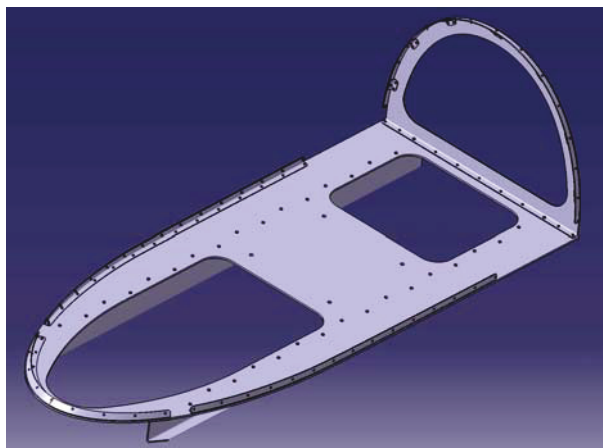


BILD 7: Support-Struktur zur Fixierung der GFK-Schale

**Materialien**

Wesentliche Kriterien bei der Auswahl der im Radom eingesetzten Materialien waren hohe elektromagnetische Transparenz, hohe Festigkeit, Temperaturstabilität und allgemeine Resistenz gegen Umwelteinflüsse sowie Verfügbarkeit. Im Wesentlichen werden bei der Herstellung des Radoms folgende Materialien verwendet:

- **Q-Glass/Epoxy Prepreg** für die monolithischen Bereiche des Bauteils, d.h. Decklagen und Interface zur Struktur,
- **Stabilisierte NOMEX-Wabe** als Sandwich –Kern,
- **Filmkleber** zur Stabilisierung und Verbindung von Wabe mit GFK-Decklagen,
- **Spleißkleber** zur Verklebung der Kernsegmente untereinander,
- **Primer und Lack** zur Oberflächenbehandlung,

Daneben werden Blitzableiterstreifen als Blitzschutzsystem verwendet.

**Herstellprozess**

Die weitergehende Detaillierung des Herstellprozesses erfolgt durch einen externen Composite-Zulieferer. Aufgrund des hohen Krümmungsgrades des Bauteils muss der Wabenkern segmentiert und jedes einzelne der fünf Segmente separat verformt werden. Die Decklagen bestehen ebenfalls aus mehreren Abschnitten, weil das verwendete Gewebeprepreg nur ca. 1 m breit ist. Für die in mehreren Schritten erfolgende Bearbeitung der einzelnen Kernsegmente werden bis zur Fertigstellung des Gesamtradoms verschiedene Werkzeuge benötigt:

- Zuschnittsschablone für den groben Wabenzuschnitt,
- Wabenverform-Tools, siehe BILD 8. Der Wabenkern wird mit Übermaß bei erhöhter Temperatur über das Werkzeug gezogen.

- CNC-Werkzeug für den Wabenzuschnitt / Konturbearbeitung
- GFK-Autoklav-Tool für das Gesamtradom (BILD 9) für die Herstellung des Gesamtkerns aus den einseitig stabilisierten Einzelzuschnitten, wobei die einzelnen Kernelemente mit einem Spleißkleber verklebt werden. Weiterhin wird das Werkzeug zur Herstellung des Gesamtradoms inklusive der Decklagen verwendet.
- CNC-Tool zur abschließenden Bearbeitung des Gesamtwabenkerns zur Erreichung der Endkontur, sowie abschließend zur Konturierung des fertigen Radoms und zum Bohren der Löcher für die Verbinder.

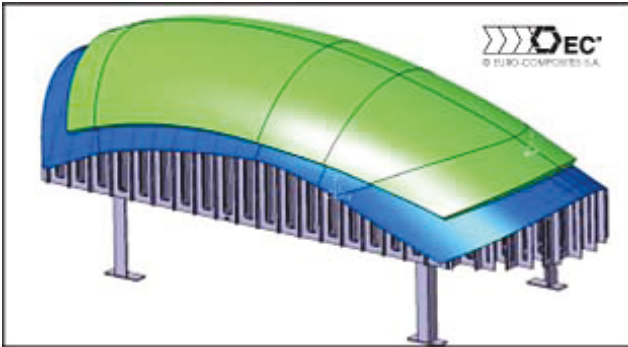


BILD 8: Konzept für das Wabenverform-Tool für den mittleren Bereich des Radoms (mit frdl. Genehmigung von Euro-Composites S.A., Echternach/Luxembourg)



BILD 9: Autoklav-Werkzeug (mit frdl. Genehmigung von Euro-Composites S.A., Echternach/Luxembourg)

Die Decklagen bestehen im Sandwichbereich aus nur drei Prepreg-Lagen wobei die Spleiße der verschiedenen Lagen aus Festigkeitsgründen einen Mindestabstand von 20 mm aufweisen müssen. Ein wichtiges Qualitätskriterium für den Drapierprozeß der Prepreg-Decklagen ist hierbei die konsequente Vermeidung von Faltenbildung. BILD 10 zeigt ein Beispiel für eine Bahn des abgelegten Prepregs (Drapier-Simulation). Wesentlich mehr Zuschnitte werden im Randbereich des Demonstrators benötigt, um die geforderte Wandstärke im Interfacebereich zu realisieren.

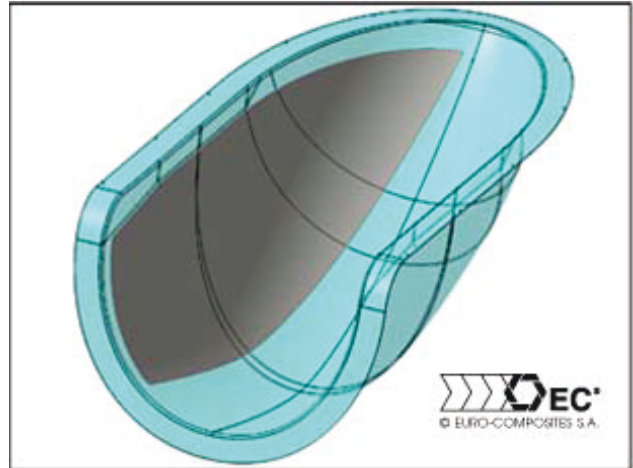


BILD 10: Beispiel für ein drapiertes Prepreg-Segment (mit frdl. Genehmigung von Euro-Composites S.A., Echternach/Luxembourg)

Der komplette Radome-Aufbau wird im Autoklav bei 180°C ausgehärtet.

Im nächsten Schritt wird das zweiteilige Blitzschutzsystem mit Schrauben am Radom befestigt, wobei die segmentierten Abschnitte der Blitzschutzstreifen zusätzlich mit dem Radom verklebt werden. Bei der abschließenden Lackierung des Radoms bleiben die metallischen Bereiche der Blitzableiterstreifen unlackiert, BILD 11.

Für weitere Details bzgl. Radom-Blitzschutz siehe [3].



BILD 11: Beispiel für segmentierten Blitzschutzstreifen

### Qualitätssicherung

Um eine hinreichende Fertigungsqualität sowie Einhaltung der spezifizierten Toleranzwerte sicherzustellen, wurden eine Reihe von Qualitätssicherungsmaßnahmen definiert, die nach der Fertigstellung des Radoms, bzw. zum Teil auch prozessbegleitend, durchgeführt werden. Es handelt sich hierbei um

- die Prozessdokumentation, diese beinhaltet im Wesentlichen:
  - die Autoklavmessschriebe (Druck- und Temperaturverlauf während der Aushärtung)
  - Material Batchdaten
  - Zuschnitte, Legefolge und Spleiße werden mit Fotos dokumentiert.
- Fertigungsbegleitproben durchlaufen dieselben Prozesse wie das Originalbauteil und dienen als Grundlage für die Durchführung von mechanischen (ILSS, Interlaminar Shear Strength) und chemischen (DSC, Differential Scanning Calorimetry) Tests zur Sicherstellung der gewünschten Materialeigenschaften.
- Konturvermessung  
Nach Abschluss der Fertigung erfolgt eine Laserkonturvermessung des Radoms zur Sicherstellung der Maßhaltigkeit.

- NDT (Non-Destructive Testing)

Die zerstörungsfreie Prüfung auf eventuelle Fertigungsfehler erfolgt durch eine auf akustischer Impedanz beruhende Klopfprüfung (engl.: coin-) tap test mit Hilfe eines entsprechenden Gerätes („Wood Pecker“). Die Methode ist geeignet, fehlerhafte Anbindungen zwischen Decklagen und Wabenkern zu finden und hat sich besonders bei der Prüfung von Sandwichbauteilen bewährt.

Prinzipiell käme auch eine deutlich aufwändigere automatisierte Ultraschallprüfung (AUTT – Automated Ultrasonic Through Transmission) in Frage, hierauf wurde aber aus Kosten-Nutzengründen verzichtet.

Für beide Methoden wird ein Referenzbauteil zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des Prüfverfahrens benötigt.

- Dichtigkeitstest

Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist eine etwaige Undichtigkeit der Decklagen, die z.B. an zu trockenen Stellen entstehen kann. Dies bringt das Risiko einer Feuchtigkeitsansammlung in den Wabenzellen mit sich. Tests zur Dichtigkeitsprüfung beruhen auf dem Prinzip, dass Gase sich bei steigender Temperatur ausdehnen. Die Stellen, an denen die Luft austritt, lassen sich mit einer schaumbildenden Flüssigkeit nachweisen.

#### 4. ELEKTROMAGNETISCHE AUSLEGUNG UND VERMESSUNG DES RADOMS

Die elektromagnetische Auslegung des Radoms erfolgte durch numerische Simulationen. Hierzu wurde in einem ersten Schritt der Lagenaufbau als vereinfachtes 2D-Modell durch ebene Wellen unterschiedlicher Einfallswinkel auf seine Transmissionseigenschaften hin untersucht. Dabei wurde die Lagendicke so verändert, dass die gewünschten Frequenzbereiche im X- und Ku-Band minimal gedämpft werden. Ein erster Ansatz mit drei Frequenzbereichen (X-, Ku- und Ka-Band) erwies sich als nicht realisierbar, da die internen Reflexionen bei der weiteren Analyse zu hoch waren. In einem zweiten Schritt wurden dann Proben mit den optimalen Lagendicken gefertigt und zur Verifikation des 2D-Modells sowie der Simulationsmethoden elektromagnetisch vermessen. Die nachfolgende Grafik zeigt die gemessene und simulierte Transmission in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedene Einfallswinkel [4].

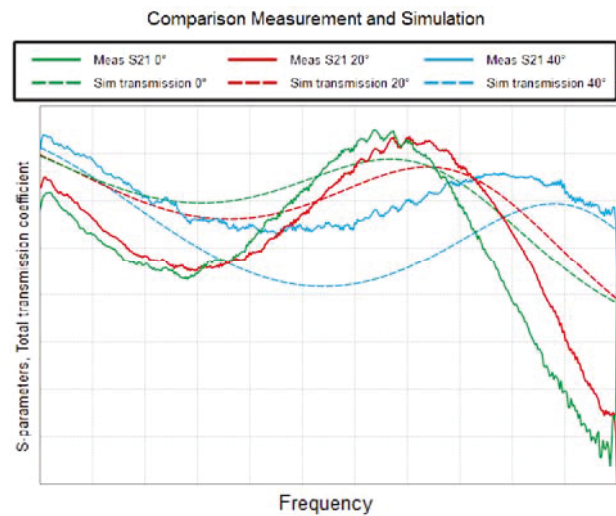


BILD 12: Messung und Simulation der Transmission

Obwohl die Transmissionsverluste des Lagenaufbaus für jeden Einfallswinkel berechnet und vermessen werden können, ist es unumgänglich, auch die reale dreidimensionale Form des Radoms mit in die Analyse einzubeziehen, da diese zusätzliche dynamische Randbedingungen einführt. Beispielsweise treten Effekte wie Phasenverschiebungen und interne Reflexionen auf, welche u.a. Einfluss auf die Keule der Hauptstrahlrichtung und die Höhe unerwünschter Nebenaussendungen in andere Raumwinkel haben können. In BILD 13 ist zu sehen wie sich das Antennendiagramm ohne Radom (rot) von dem mit Radom (blau) unterscheidet. Man sieht eine Nebenkeulenanhebung von bis zu 20 dB und leichte Transmissionsverluste in der Hauptkeule.

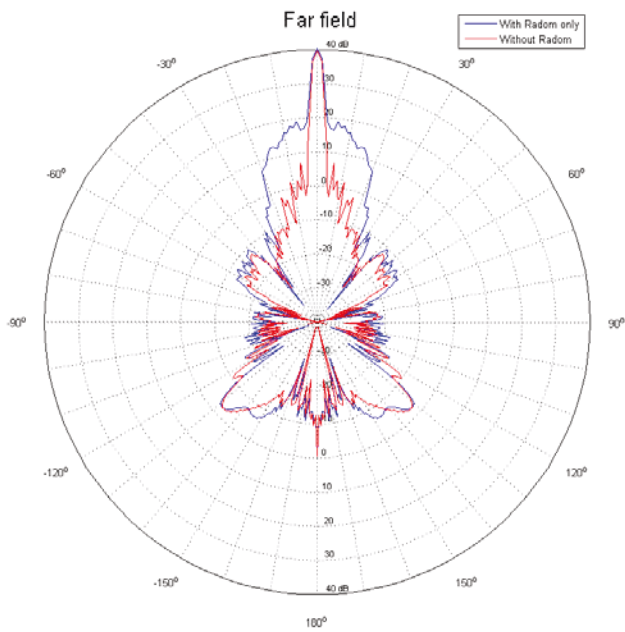


BILD 13: Fernfeld-Simulation mit (blau) und ohne (rot) Radom

Für die aufwändigen 3D-Simulationen wurde ein detailliertes elektromagnetisches 3D-Simulationsmodell erstellt. Als Simulationsmethode wurde auf ein optisches Verfahren (GO: Geometrical Optics) basierend auf Raytracing zurückgegriffen, da die elektrische Größe des Radoms (ca. 150x Wellenlänge) bei klassischen numerischen Methoden (z.B. Momentenmethode) zu extrem hohen Speicheranforderungen führt.

Auch der Einfluss der entwickelten Blitzschutzmaßnahmen (siehe [3]) auf die elektromagnetische Performance des Radoms wurde mit Hilfe der 3D-Simulation analysiert, indem diese entsprechend für die numerischen Simulationen modelliert und integriert wurden [5].

Somit wurde mit der numerischen Simulation ein mächtiges Werkzeug benutzt, um die reale Radomstruktur zu untersuchen und ohne aufwändige Fertigung von realen 3D-Modellen zu optimieren. Eine Fertigung und Vermessung des Radoms ist trotz der numerischen Simulation notwendig, da reale Klebe- und auch Fügebedingungen niemals 1:1 in einem numerischen Simulationsmodell abgebildet werden können.

Die elektromagnetische Vermessung des Radoms wird in einer Compact Range Antennenmesskammer durchgeführt (BILD 15), in welcher das Radom durch einen mechanischen Positionierer in die relevanten Azimut- und Elevationswinkel gebracht und hochpräzise vermessen wird.

Als Testantennen dienen zwei Parabolspiegel (jeweils für das X- und Ku-Frequenzband) mit hohem Gewinn, wie sie auch bei typischen SatCom-Anwendungen zum Einsatz kommen. Die Antennenkeulen werden dabei mit und ohne Radom vermessen, um dessen Beeinflussung auf die Abstrahlcharakteristik zu bestimmen.

Die wesentlichen Parameter sind dabei u.a.:

- Verluste der Transmission
- Verursachte Winkelfehler (Schiefehler)
- Weitere Beeinflussungen des Antennenpattern (z.B. Keulenbreite, Höhe der Nebenkeulen)

Unterstützt durch 2D- und 3D-Simulationen wurden die für die Vermessung relevanten Positionen der Testantennen festgelegt, an denen zum einen optimale aber auch sehr ungünstige Bedingungen der Transmissionseigenschaften des Radoms erwartet werden. Mit Hilfe dieser Vermessung soll danach die Genauigkeit der numerischen Simulation bestimmt und geprüft werden, ob die Bedingungen zur Satellitenkommunikation (siehe BILD 14) nach ITU eingehalten werden.

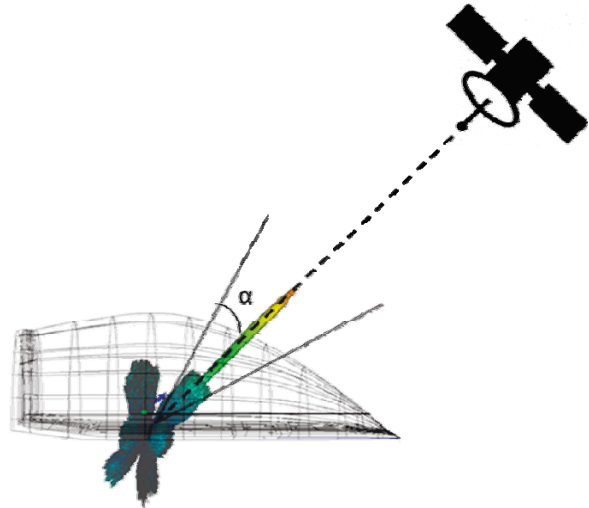


BILD 14: Prinzipdarstellung der Satellitenkommunikation und elektromagnetischen Performance



BILD 15: Compact Range Antennenmesskammer

## 5. VOGELSCHLAG-AUSLEGUNG UND -TEST DES RADOMS

Neben den konventionellen Luft- und Manöverlasten stellt der Nachweis der Vogelschlagresistenz besondere Anforderungen an die strukturelle Auslegung des SatCom Radoms. Numerische Simulationen basierend auf der Finite-Elemente-Methode werden für sol-

che Strukturauslegungen typischerweise eingesetzt [7], um aufwändige Vogelschlag-Versuchskampagnen zum Nachweis der Strukturresistenz gänzlich zu vermeiden oder zumindest durch vorige Simulations- und Parameterstudien auf lediglich einen erfolgreichen Beschussversuch zu reduzieren („Right First Time“). Im Rahmen dieses Projekts wurde die kommerzielle Software Abaqus/Explicit eingesetzt, um Simulationsmodelle für Vogelschlagberechnungen zu entwickeln und Schritt für Schritt entlang der Versuchspyramide mit zunehmender Komplexität mit experimentellen Testdaten zu validieren, um ein Maximum an Vorhersagegenauigkeit zu erzielen.

**Materialcharakterisierung und -modellierung auf Couponebene**

Als Basis für die Materialmodellierung wurden zunächst umfangreiche Couponversuchsreihen an den einzelnen Werkstoffen der Sandwichstruktur des Radoms durchgeführt.

Das Deckschichtmaterial, ein quarzglasfaserverstärkter Verbundwerkstoff, wurde hinsichtlich seines Zug-, Druck- und Schubverhaltens sowie des Delaminationsverhaltens charakterisiert (siehe BILD 16). Neben quasi-statischen wurden insbesondere auch hochdynamische Versuche an einer Schnellzerreißmaschine durchgeführt. Hiermit konnte ein ausgeprägter Dehnrateneffekt identifiziert werden, der signifikante Festigkeitszunahmen bei hohen Lastraten verursacht, die im Simulationsmodell zu berücksichtigen sind. Die Materialmodellierung der Deckschichten erfolgte mit Hilfe von 8-Knoten-Continuum Shell-Elementen für jede Einzellage mit ablösbaren Cohesive Contact Delaminations-Interfaces dazwischen. Hiermit können alle möglichen Schädigungsarten der Deckschicht im Modell abgebildet werden.

Der Honigwabenkern der Sandwichstruktur wurde ebenfalls in Couponversuchen unter Zug, Druck und Schub geprüft. Diese nichtlinearen Versuchsdaten bildeten die Eingabedaten für die homogenisierte, orthotrope Materialmodellierung des Kerns in Abaqus unter Verwendung von 8-Knoten-Volumenelementen. In einer zusätzlichen Prüferie wurden quasi-statische Eindrückversuche an Honigwabenproben vorgenommen und nachsimuliert (siehe BILD 17), um die korrekte Abbildung der Kerneindrückung separat zu validieren.



BILD 16: Couponversuche zur Charakterisierung des Sandwich-Deckschichtmaterials

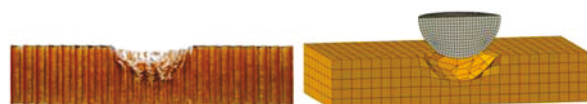


BILD 17: Eindrückversuch und -simulation zur Validierung des Sandwichkerns

**Fallturmversuche auf Deckschicht- und Sandwichproben**

Im nächsten Schritt der Modellerstellung und experimentellen Validierung stand das Impactverhalten von kleineren Proben unter geringer Impactgeschwindigkeit im Mittelpunkt. Hierfür wurden zunächst beim WIWeB (Erding) Impactversuche am Fallturm-Prüfstand an einzelnen Deckschichtproben inklusive anschließender zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) durchgeführt, um das Impact-Schädigungsverhalten der Deckschichten separat validieren zu können (siehe BILD 18). Anschließend wurden Kern- und Deckschichtmodellierung in Sandwichmodellen zusammengeführt und mit Fallturmversuchen an Sandwichproben validiert. Bei der Ergebnisauswertung wurde insbesondere darauf geachtet, dass sowohl qualitative Ergebnisse (Schadensgröße, Schädigungsart) als auch quantitative Ergebnisse (Kraft-Weg-Kurven) übereinstimmen.



BILD 18: Fallturmversuch und Simulationsmodelle der Deckschichtproben (oben) und Sandwichproben (unten)

**Vogelschlag auf Sandwichproben**

Als weiterer sinnvoller Zwischenschritt vor der Vogelschlaganalyse des finalen Radoms wurden Vogelschlagversuche auf ebene und einfach gekrümmte Sandwichstrukturen eingeführt, die eine weitere Validierungsgrundlage im Rahmen der Simulationsmethodenentwicklung bilden und die geometrische Komplexität von der flachen Struktur bis hin zum finalen zweifach gekrümmten Radom schrittweise erhöhen.

Der Vogel wurde in Abaqus als SPH-Körper (Smoothed Particle Hydrodynamics) [7] modelliert. Diese netzfreie Partikelmethode vermeidet Probleme mit Netzverzerrungen bei starken Deformationen, wie sie beim Vogelschlag auftreten. Da sich der Vogel bei den relevanten Impactgeschwindigkeiten im Grunde genommen wie ein Fluid verhält, wurde als Materialmodell eine Zustandsgleichung für Wasser mit erhöhter Porosität verwendet, die anhand von Vogelschlagversuchen auf instrumentierte Platten validiert wurde (siehe BILD 19).



BILD 19: Vogelschlagversuch auf instrumentierte Platten mit Simulationsmodell

Diese validierten Vogel- und Sandwichstrukturmodelle wurden anschließend für Impactsimulationen einer Vogelschlagbelastung auf eine ebene Sandwichstruktur (siehe BILD 20) sowie eine einfach gekrümmte Sandwichstruktur (siehe BILD 21) verwendet und mit den entsprechenden Versuchsdaten abgeglichen. Die simulative Vorhersage von Schädigungsart, -ausdehnung und Maximaldurchbiegung stimmte sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein. Deshalb wurden die Modellierungsmethoden als validiert und hinreichend akkurat eingestuft, um sie für Auslegungsstudien und finale Pre-Test-Simulationen des SatCom Radoms unter Vogelschlagbelastung zu verwenden.

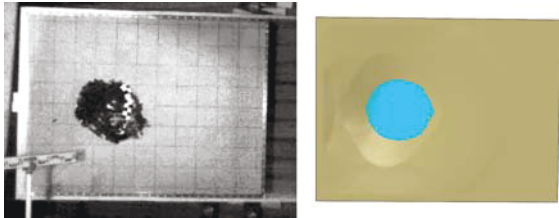


BILD 20: Vogelschlagversuch auf ebene Sandwichplatte mit Simulationsmodell

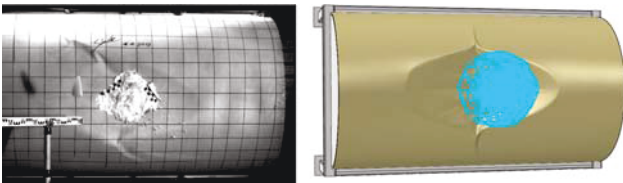


BILD 21: Vogelschlagversuch auf einfach gekrümmte Sandwichstruktur mit Simulationsmodell

#### Vogelschlag auf Radom mit Parameterstudien

Der Modellaufbau des Radoms erfolgte in Abaqus unter Verwendung der oben vorgestellten und validierten Modellierungsmethoden und berücksichtigt die innenliegende Antenne mitsamt kompletten Schwenkvolumen zur Kollisionsanalyse sowie eine metallische Unterstruktur. Der Vorteil des Simulationsmodells liegt in der effizienten Analyse unterschiedlicher Parametereinflüsse, die in dieser Weise und in diesem Umfang experimentell nicht durchführbar wären. Hierzu gehörten:

- Einfluss der Impactgeschwindigkeit
- Einfluss der (Nick- und Gier-)Winkelanstellung
- Einfluss der (horizontalen und vertikalen) Impactposition
- Einfluss der Steifigkeit der Unterstruktur
- Einfluss der Sandwichdicke
- Einfluss der fertigungsbedingten Drapierwinkel und Lagenstoßstellen.

Auf diese Weise konnte sowohl der kritischste Lastfall identifiziert werden, welcher zu einer maximalen Schädigung führt, als auch die finale Strukturauslegung vorgenommen werden. Dieser Lastfall, der in BILD 22 als Pre-Test-Simulation dargestellt ist, sollte dann als finaler experimenteller Nachweis im Vogelschlagversuch umgesetzt werden.

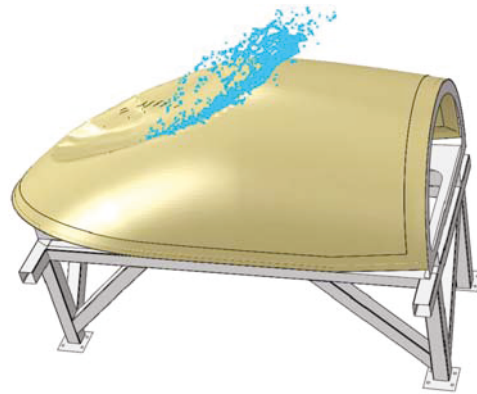


BILD 22: Vogelschlag auf SatCom Radom (Modell mit Versuchs-Unterstruktur)

#### Vogelschlagversuch

Der finale Vogelschlagversuch zum Nachweis der Impactresistenz und Genauigkeit der Simulationsmethoden auf ein Full-Scale SatCom Radom kann an dieser Stelle noch nicht vorgestellt werden, da er zum Zeitpunkt dieses Berichtswesens noch nicht durchgeführt war, sondern erst für Ende 2017 angesetzt ist.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für moderne Leichtbau-Radome zum Schutz von Antennen für die Satellitenkommunikation (SatCom) in UAVs stellen sich eine Vielzahl von weitreichenden strukturellen und elektromagnetischen Anforderungen. Im Rahmen dieses Papers wurde ein Überblick über die wesentlichen Anforderungen an ein multibandfähiges SatCom Radome für ein UAV der Kategorie MALE (Medium Altitude Long Endurance) gegeben, weiterhin wurden die wesentlichen Entwicklungsschritte bis zur Erreichung eines technologischen Reifegrades von TRL 6 (d.h. Demonstration der Technologie in einer relevanten Umgebung mittels eines Prototypen) dargestellt. Dies beinhaltet vor allem die Definition, Auslegung und Fertigung eines Full-Scale SatCom Radom-Demonstrators sowie die Durchführung eines umfangreichen Testprogramms mit dieser Komponente. Das Testprogramm umfasst dabei eine elektromagnetische Vermessung des Gesamtsystems Antenne / Radom, Blitzschlagtests, Vogelschlagtest und Reparaturtests.

Mit der Erreichung eines technologischen Reifegrades von TRL 6, welche für Anfang 2018 geplant ist, sind die grundlegenden Technologieentwicklungsarbeiten abgeschlossen und es besteht somit die prinzipielle Möglichkeit, das SatCom-Radom-Konzept in eine reale künftige Flughardware zu überführen.



## REFERENZEN

- [1] Meister, H.  
FFS – RADOME FÜR HÖHENAUFLÄRER ALS  
GROSSFLÄCHIGE, GEWICHTSOPTIMIERTE UND  
SCHLAGFESTE KOMMUNIKATIONSSTRUKTUREN  
*Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock 2015*
- [2] [https://de.wikipedia.org/wiki/Technology\\_Readiness\\_Level](https://de.wikipedia.org/wiki/Technology_Readiness_Level)
- [3] Karch, C.  
FFS: LIGHTNING STRIKE PROTECTION OF RADOMES –  
AN OVERVIEW  
*Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Munich 2017*
- [4] Groudas, A.; Schlick, M.; Rothenhaeusler, M.  
WIDEBAND, MULTIBAND RADOME INSTALLED  
PERFORMANCE  
Internal Report TA-S-R-2383 from 18.11.2014
- [5] Rogberg, F.; Rothenhaeusler, M.  
WIDEBAND, MULTIBAND RADOME INSTALLED  
PERFORMANCE WITH LIGHTNING PROTECTION  
Internal Report TA-S-R-2428 from 17.03.2016
- [6] Meister, H. et al.  
RADOMES – LARGE SIZED COMPOSITE STRUCTURES  
WITH MULTI-DISCIPLINARY REQUIREMENTS FOR  
UNMANNED RECONNAISSANCE AIR PLATFORMS  
*ECCM17 - 17th European Conference on Composite Mate-  
rials, Munich 2016*
- [7] Heimbs, S.  
COMPUTATIONAL METHODS FOR BIRD STRIKE  
SIMULATIONS: A REVIEW  
*Computers & Structures, Vol. 89, 2011, 2093-2112*