

FFS – RADOME FÜR HÖHENAUFLÄRER ALS GROßFLÄCHIGE, GEWICHTSOPTIMIERTE UND SCHLAGFESTE KOMMUNIKATIONSSTRUKTUREN

Heinz Meister

Airbus Defence & Space, Military Aircraft, Manching, Germany

Zusammenfassung

Hochfliegende unbemannte Aufklärungsplattformen müssen ihre gesammelten Informationen unter anderem auch über Satellitenkommunikation an zentrale Verarbeitungsstellen weiterleiten können.

In dieser Kommunikationskette haben Radome einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbaren Übertragungsraten. Die Anforderungen an diese Komponente sind hoch, weil sie neben bestmöglicher elektromagnetischer Transparenz, mit Multiband- und Breibandfähigkeit, auch mechanische Stabilität und Beständigkeit gegen Umwelteinflüssen bei möglichst niedrigem Gewicht aufweisen soll. Um Technologien für solche Bauteile gemeinsam zu entwickeln, haben sich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) aus Braunschweig und aus Stuttgart, das Wehrwissenschaftliche Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) in Erding sowie Airbus Defence & Space im Rahmen des Leitprojektes FFS (Fortschrittliche Flugzeug Strukturen) zusammengeschlossen.

Für die Entwicklung eines Radoms, welches alle genannten Eigenschaften möglichst optimal erfüllt, müssen unterschiedliche Einzelaspekte der möglichen Bauweisen betrachtet werden. Am Anfang steht die Suche nach erfolgversprechenden elektromagnetischen Lösungen. Bei der Betrachtung verschiedener Bauweisen, zeigen sowohl A-Sandwich als auch C-Sandwich Potenzial. Diese Lösungen werden durch Abstimmung der geeigneten Materialien und Herstellverfahren weiterentwickelt, mit dem Ziel, auch die weiteren Anforderungen, besonders die der Festigkeit zu erfüllen. Dabei werden Demonstratoren steigender Komplexität gebaut um den Fortschritt der Technologieentwicklung zu zeigen.

1. EINLEITUNG

Eine wesentliche Fähigkeit unbemannter Aufklärungsplattformen, allgemein als UAV bezeichnet (Unmanned Air Vehicle), ist es, die vor Ort gesammelten Informationen verzögerungsarm an die Nutzer übermitteln zu können. Hierzu wird üblicherweise auch Satellitenkommunikation (SatCom) eingesetzt, die gleichzeitig auch zur Kontrolle der UAV dienen kann. Für eine Informationsübermittlung mit den geforderten hohen Datenraten sind leistungsfähige, d.h. hochtransparente Radome, die als Schutzstruktur für die Antenne unverzichtbar sind, mit entscheidend.

Die Randbedingungen für SatCom sind zunächst von den zur Verfügung stehenden Satelliten im geostationären Orbit gesetzt. Durch sie werden die zu berücksichtigenden Frequenzen definiert. Weitere Einflussparameter im Gesamtsystem sind die geographische und die räumliche Position des Fluggerätes, die zur Verfügung stehenden elektrischen Leistungen und die Verluste in den einzelnen Kommunikationsgliedern.

Die Anforderungen an die Struktur eines Radoms sind außer der bestmöglichen elektromagnetischen Transparenz, das Ertragen aller auftretenden mechanischen und umweltbedingten Lasten über die gesamte Lebensdauer.

Ziel der hier dargestellten Arbeiten ist es, eine technologische Basis mit einem definierten Reifegrad für die Entwicklung eines UAV SatCom Radoms zur Verfügung zu stellen. Dazu leisten im Rahmen des

Leitkonzeptes FFS verschiedene Partner ihre Beiträge: DLR Braunschweig und DLR Stuttgart im Bereich der Fertigungstechnologie, WIWeB und Airbus Group Innovations führen mechanische Tests durch. Airbus Defence & Space ist für die Auslegung und Analyse der einzelnen Funktionalitäten zuständig.

2. EINEBETTUNG IM GESAMTSYSTEM

Als Gesamtsystem soll in diesem Zusammenhang ein unbemanntes Aufklärungsflugzeug angesehen werden, dessen Mission es ist, in einem vorgegebenen geographischen Gebiet, mit Hilfe der Bordsensoren möglichst vielfältige Informationen zu erfassen und diese mittels Satellitenkommunikation an den Bedarfsträger weiterzuleiten.

Bei der Kommunikation über Satelliten werden die Signale von einer gerichteten Antenne zu einem im geostationären Orbit positionierten Satelliten übertragen. Die Güte der Kommunikationskette, d.h. die Fähigkeit, die Daten mit der notwendigen Rate zu übertragen, wird –neben der verfügbaren Sendeleistung– von folgenden Faktoren wesentlich beeinflusst, BILD 1:

- 1) Der Sendeantenne und dem dazugehörigen Antennengewinn,
- 2) dem Radom und seinem Transmissionsverhalten,
- 3) den Verlusten in der Atmosphäre, bzw. der Entfernung vom Satelliten,
- 4) der Empfangsantenne und dem dazugehörigen Antennengewinn.

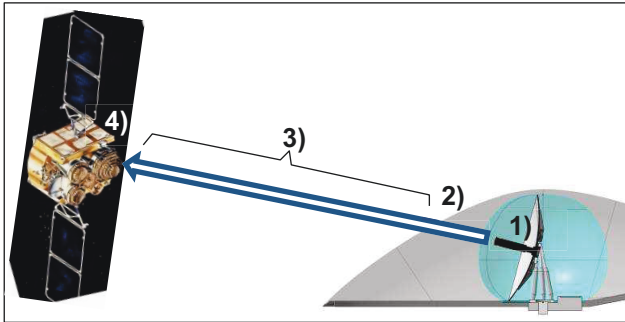


BILD 1. Kommunikationskette

Die Summe der Verluste wird in einem sogenannten „Link Budget“ für die gesamte Kommunikationskette ermittelt, wobei verschiedene Szenarien durchgespielt werden.

Ziel ist es, den Beitrag des Radoms zu den Energieverlusten zu minimieren, d.h. eine hohe elektromagnetische Transparenz in den relevanten Frequenzbereichen zu erzielen.

Die vom Radom verursachten Transmissionsverluste werden von verschiedenen Parametern beeinflusst:

- Bauweise des Radoms und den dafür verwendeten Materialien,
- Frequenz f , bzw. Wellenlänge λ des Trägersignals,
- Polarität der elektromagnetischen Strahlung,
- Einfallswinkel θ , siehe BILD 3.

Das Radom ist aber gleichzeitig struktureller Teil des Flugzeuges und damit relevant für die Flugfähigkeit des Gerätes. In dieser Funktion hat es eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen, die auf den ersten Blick den elektromagnetischen Forderungen nach hoher Transparenz entgegen stehen. Die Auslegung des Gesamtsystems wird damit zu einer Aufgabe die eine Vielzahl teilweise kontroverser Forderungen berücksichtigen muss und nur iterativ gelöst werden kann.

So wird z.B. das Bauteilgewicht wesentlich von der Bauweise bestimmt. Es hängt aber auch von der zugewiesenen Geometrie ab, die wiederum von der Aerodynamik und auch von den elektromagnetischen Eigenschaften des Radoms beeinflusst wird.

Die sich ergebende Aufgabe besteht nun darin, eine strukturelle, fertigbare Lösung für das Bauteil zu finden, die alle gestellten Anforderungen erfüllt. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze, die auf sich grundsätzlich unterscheidende monolithische bzw. Sandwichbauweisen hinauslaufen.

Die in diesem Vorhaben ermittelten und dargestellten Zusammenhänge sollen zukünftig bei der Auslegung der Plattform im Gesamtsystem unterstützen und Werkzeuge für die Entwicklung von spezifischen Radomen bereitstellen.

3. ELEKTROMAGNETISCHE CHARAKTERISTIKEN

Die ein Radom maßgeblich charakterisierende Eigenschaft ist seine Transparenz in Bezug auf elektromagnetische Strahlung. Im Zusammenhang mit dem oben beschriebenen Szenario werden drei

Frequenzbänder, jeweils mit Down-Link und Up-Link gefordert, BILD 2.

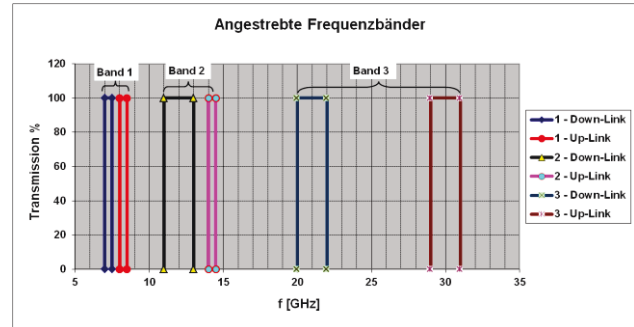


BILD 2. Geforderte Kommunikationsfrequenzen

3.1. Radom-Bauweisen

Die hier im Zusammenhang betrachteten Bauweisen beziehen sich auf Radome, die in Flugzeugen eingesetzt werden und entsprechend ihren speziellen Eigenschaften an verschiedenen Stellen Verwendung finden.

3.1.1. Werkstoffe

Wesentliches Element bei der Konzipierung eines Radoms ist die Auswahl der einzusetzenden Werkstoffe. Sie sollen elektromagnetisch transparent und möglichst verlustfrei sein, was sich in den Materialkennwerten der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r und des Verlustfaktors $\tan(\delta)$, widerspiegelt. Andererseits sollen die Materialien auch die mechanischen Anforderungen erfüllen, d.h. eine möglichst hohe Festigkeit, (R_m) und Steifigkeit (E-Modul) besitzen. Weiterhin müssen sich die Materialien ausreichend gut verarbeiten lassen und dürfen unter den gegebenen Umweltbedingungen keinen Schaden nehmen.

Nachstehend sind einige typische Werkstoffe mit ihren Kennwerten genannt.

TAB 1. Typische Radomwerkstoffe

Material	ϵ_r [-]	$\tan(\delta)$ [-]	R_m [MPa]	E [GPa]
Q-Glas Gewebe in Epoxy	3,2	0,06	600	20
S2-Glas Gewebe in Epoxy	4,0	0,08	600	20
HMPE-Gewebe in Epoxy	2,9	0,02	400	7
Syncore Sandwichkern	1,9	0,016	33	2,7
synt. Schaum, Cyanester	1,24	0,003	3	
ROHACELL® HF	1,07	0,01	2	0,05
Wabe Sandwichkern	1,1	0,0015	2,4	0,14

3.1.2. Monolithische Bauweise

Die monolithische Bauweise ist dadurch gekennzeichnet, dass der elektromagnetische Strahl nur eine Materialschicht durchdringen muss, BILD 3. Hierbei handelt es sich typischerweise um einen glasfaserverstärkter Verbundwerkstoff, es könnten aber auch Keramiken oder andere nichtleitende Werkstoffe verwendet werden. Der Strahl muss zwei Grenzflächen zwischen zwei Medien (Luft und Monolithwerkstoff) passieren, wobei es je nach Wellenlänge, Werkstoffeigenschaften und Materialdicke zu Interferenzen kommt, die sich letztlich auf die Transparenz auswirken.

Diese Bauweise wird dann gewählt, wenn höhere Festigkeit und Robustheit gefordert wird, wie z.B. bei Frontradomen von militärischen Flugzeugen. Auch lassen sich die Grenzflächen sehr genau bearbeiten, so dass Störeffekte minimiert werden können. Andererseits wird diese Bauweise schwer, weil sich die Dicken im Bereich eines Vielfachen der halben Wellenlänge der eingesetzten Strahlungsfrequenz bewegen und auch die mechanischen Anforderungen berücksichtigt werden müssen.

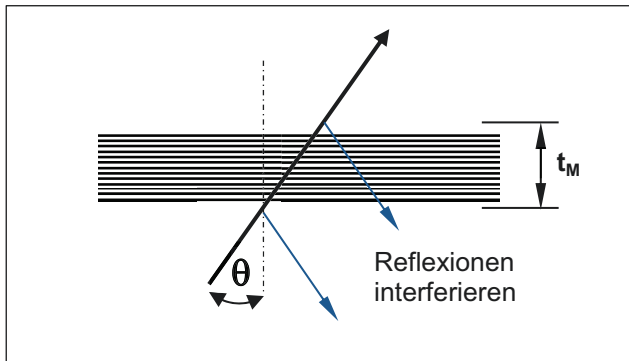


BILD 3. Monolithische Bauweise

3.1.3. A-Sandwich (A-SW)

In der Sandwichbauweise werden mehrere elektromagnetisch transparente Schichten eingesetzt. Mit A-SW wird der Aufbau bezeichnet, bei dem sich ein leichter Kernwerkstoff, z.B. Waben, oder Schäume, zwischen zwei dünnen monolithischen Decklagen mit der Dicke t_D befindet, BILD 4. Hier muss der elektromagnetische Strahl vier Grenzflächen passieren, wobei jedes Mal interferierende Reflexionen entstehen, die sich auf die Transparenz auswirken. Prinzipiell gibt es dadurch mehr Parameter (die Dicken der einzelnen Lagen) die für die Auslegung eines A-SW genutzt werden können. Üblicherweise werden aber die Decklagen so dünn wie möglich gehalten um den Gewichtsvorteil der Sandwichbauweise ausnutzen zu können. Sehr dünne Decklagen ($< 5\% \lambda$) wirken sich dann auf den Strahlungsdurchgang nur noch wenig aus, so dass das Transmissionsverhalten dem der monolithischen Bauweise ähnlich wird. Den Gewichtsvorteil erkauft man sich aber mit strukturellen Problemen, die sich in geringerer Durchschlagfestigkeit, geringerer Schadenstoleranz, oder Problemen mit der Feuchtigkeitsaufnahme im Wabenkern äußern. Beispiele für A-SW Bauweise bei Radomen sind die Frontradome der großen zivilen Passagierflugzeuge.

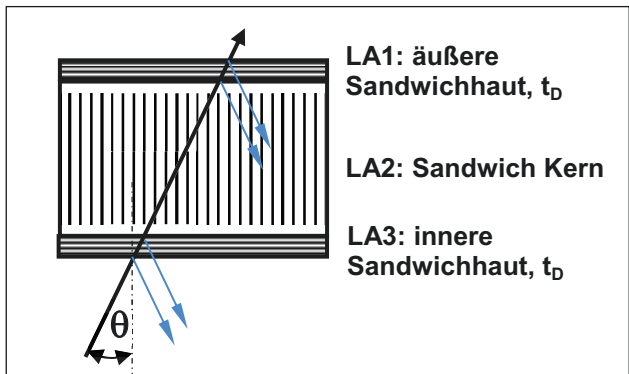


BILD 4. A-SW Bauweise

3.1.4. C-Sandwich (C-SW)

Ein C-SW besteht im Prinzip aus zwei übereinander gelegten A-SW, d.h. zwei Decklagen, zwei Sandwichkernen und eine mittige Monolithschicht, BILD 5.

Prinzipiell hat man hier noch mehr Möglichkeiten, die Transparenz über der Frequenz zu beeinflussen. Dieser Vorteil gegenüber dem A-SW muss mit erhöhter Komplexität, auch in der Fertigung, erkauft werden.

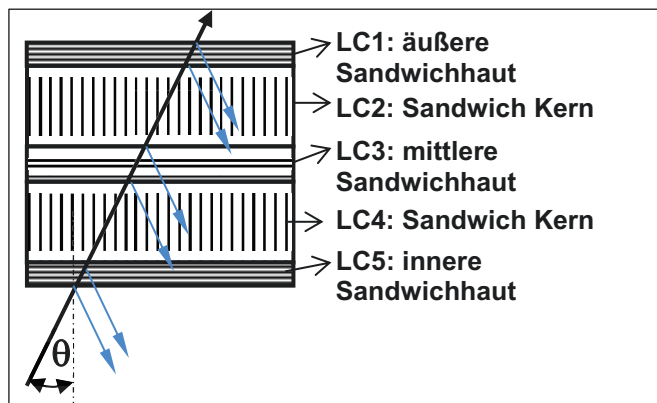


BILD 5. C-SW Bauweise

3.2. Modellbildung

Der für die elektromagnetische Auslegungsrechnung und zur Erstellung der Diagramme aus BILD 6 bis BILD 12 verwendete Algorithmus beruht auf dem Fresnelschen Modell der Transmission und Reflexion einer ebenen elektromagnetischen Welle an einer ebenen Grenzfläche zwischen zwei Medien. Es werden die elektromagnetischen Eigenschaften der Einzelschichten und deren Dicken berücksichtigt, sowie der Einfallswinkel und die Polarisation der Welle.

Diese vereinfachte Darstellung ist ausreichend, um sich einen Überblick über das Verhalten einzelner Lösungen für die jeweiligen Bauweisen zu verschaffen und dazu passende Materialien auszuwählen.

3.3. Transparenzverhalten

Je nach Anzahl der Freiheitsgrade, die man für die Auslegung bei den einzelnen Bauweisen verwenden kann, gibt es verschiedene elektromagnetische Lösungen, die es auch im Zusammenhang mit den restlichen Anforderungen zu bewerten gilt. Wie sich in diesem Kapitel noch zeigen wird, sind diese Lösungen nicht beliebig untereinander verschiebbar und skalierbar, sondern es gibt für gute elektromagnetische Transparenz nur eng begrenzte Parameterfelder, die so akzeptiert oder verworfen werden können.

Das Transparenzverhalten einer bestimmten Bauweisenkonfiguration (vorgegebene Werkstoffe, eventuell Decklagendicken,...) kann in einem Höhenlinien-Diagramm dargestellt werden. Allen Konfigurationen ist gemein, dass optimale Transparenz bei unterschiedlichen Einfallswinkeln nur durch Anpassung der Dicken an den entsprechenden Stellen des Radoms erzielt werden kann (Taperung). Außerdem ist der Schwerpunkt auf senkrechte Polarisation gelegt, weil diese bei höheren Einfallswinkeln der kritischere Fall ist.

3.3.1. Monolith

In BILD 6 ist der Transmissionsverlauf in einem Frequenz – Wandstärkendiagramm in Form von Höhenlinien dargestellt, wobei die helleren Bereiche für bessere Transparenz stehen. Gleichzeitig sind die relevanten Frequenzbereiche aus BILD 2 hervorgehoben. Es ist zu erkennen, dass mit der Wandstärke t_M (Ordinate) als einzige freie Variable, nur Lösungen gefunden werden können, die jeweils nur in einem der Frequenzbereiche eine gute Transmission aufweisen:

- **M1:** $t_M = 10\text{mm}$, für Frequenzbereich 1, mit einem Flächengewicht von ca. 17 kg/m^2
- **M2:** $t_M = 6\text{mm}$ für Frequenzbereich 2, mit einem Flächengewicht von ca. 11 kg/m^2
- **M3:** $t_M = 8\text{mm}$ für Frequenzbereich 3, mit einem Flächengewicht von ca. 14 kg/m^2

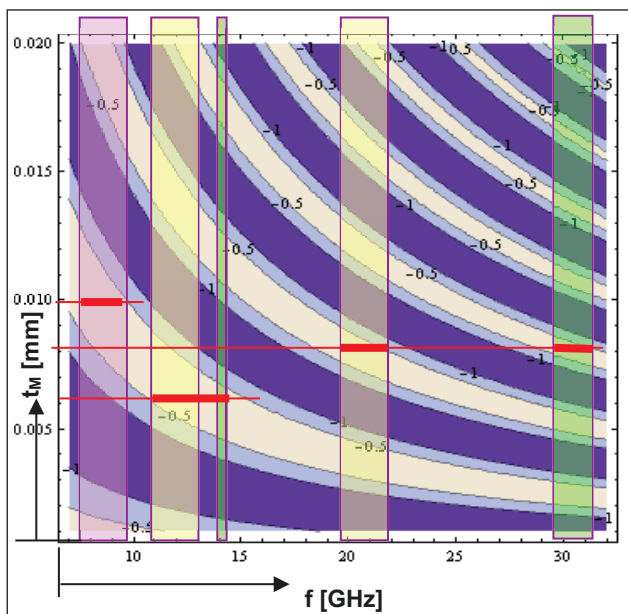


BILD 6. Transmissions-Höhenliniendiagramm für Monolithen

BILD 7 zeigt den Transparenzverlauf für die monolithische Bauweise mit angepassten Dicken für den Frequenzbereich 3 (20 GHz und 30 GHz). Die Dicken sind für die Einfallswinkel 0° , 40° und 60° mit jeweils 8mm, 8,8mm und 9,3mm optimal.

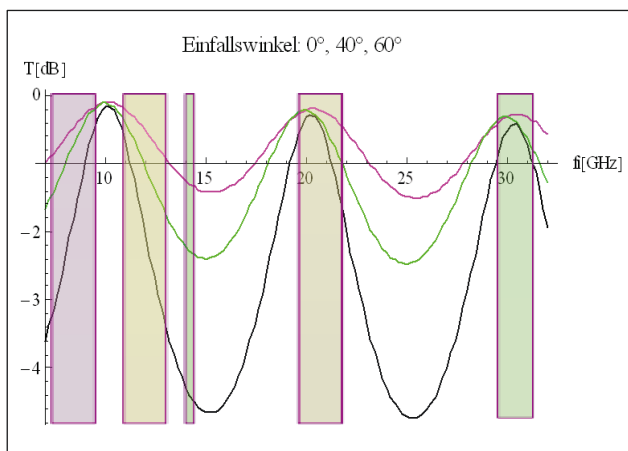


BILD 7. Transmission über Frequenz mit $t=8\text{mm}$

3.3.2. A-SW

Da das A-SW mit im Vergleich zur Wellenlänge dünnen Decklagen sich im Prinzip so verhält wie ein Monolith, sieht das Transmissions-Höhenliniendiagramm ähnlich aus, wie in BILD 6. Man kann für diese Konfiguration verschiedene Lösungen finden, die unterschiedliche Qualität haben. D.h. man muss bei steileren Einfallswinkeln beziehungsweise im Randbereich der einzelnen Frequenzbänder Einbußen in der Transmission hinnehmen.

Interessant ist z.B. die Variante A1, BILD 8, mit $t_D = 1\text{mm}$ Decklagendicke und einer Kerndicke t_K von ca. 14mm bei 0° Einfallswinkel. Bei $\theta = 60^\circ$ ergibt sich ein t_K von ca. 24mm .

In den relevanten Frequenzbereichen lässt sich teilweise gute Transmission erzielen.

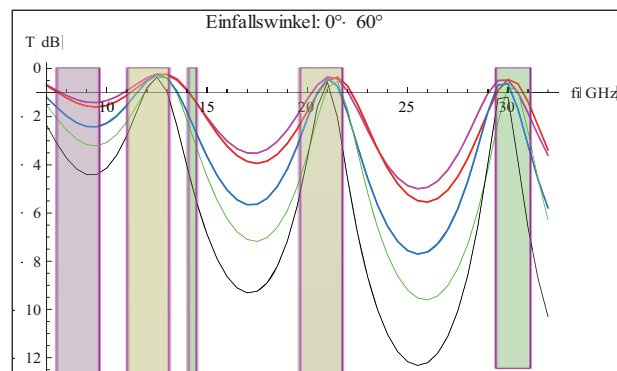


BILD 8. Transmissionsverhalten der A-SW-Variante A1

Es gibt aber auch andere Lösungen. Z.B. sieht das Transmissions-Höhenliniendiagramm mit einer Decklagendicke im Bereich von gut 2mm (BILD 9) anders aus als in BILD 6. Hier gibt es im Bereich von 30 GHz für alle Kerndicken eine akzeptable Transparenz.

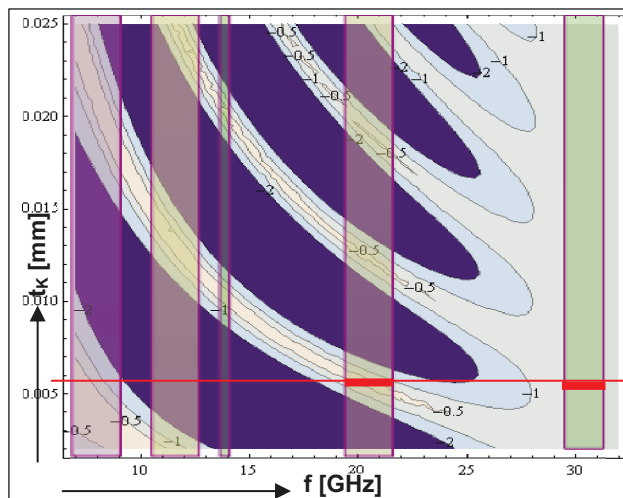


BILD 9. A-SW Transmissionsdiagramm für LA1 = $2,2\text{mm}$ und für $\theta = 0^\circ$

In BILD 10 ist die Variante A2 zu sehen, die im Frequenzband 3 gutes und bezüglich der Bandbreite ausbaufähiges Transmissionsverhalten zeigt. Es werden die unterschiedlichen Lösungen der einzelnen Lösungen deutlich, zumal Band 1 nur eingeschränkt und Band 2 gar nicht nutzbar ist. Durch den relativ dünnen Kern von t_K ca 5 mm ergeben sich auch aus mechanischer Sicht

relevante Unterschiede zwischen den beiden Schalen.

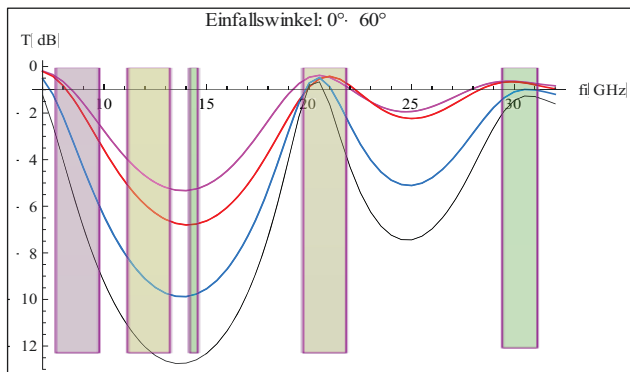


BILD 10. Transmissionsverhalten der A-SW-Variante A2

Für das A-SW ergeben sich noch weitere Lösungen in unterschiedlicher Qualität und mit unterschiedlichen Gewichten:

- **A1:** $t_K = 14\text{mm} - 24\text{mm}$, für die Frequenzbereiche 1, 2 und 3 mit einem Flächengewicht von ca. 5 kg/m^2
- **A2:** $t_D = 2\text{mm}$ und $t_K = 5\text{mm}$ für Frequenzbereich 1 und 3, mit einem Flächengewicht von ca. 9 kg/m^2
- **A3:** $t_D = 2\text{mm}$ und $t_K = 20- 33\text{mm}$, für Frequenzbereich 1 und 3, mit einem Flächengewicht von ca. 10 kg/m^2
- **A4:** $t_D = 2\text{mm}$ und $t_K = 12- 22\text{mm}$, für Frequenzbereich 3, mit einem Flächengewicht von ca. $9,5\text{ kg/m}^2$

3.3.3. C-SW

Die Transmissionsdiagramme beim C-SW zeigen größere Bereiche mit guter Transparenz.

In BILD 11 sind die Lösungen C1 und C2 erkennbar. C1 zeigt ein sehr gutes Transparenzverhalten in den Frequenzbändern 1 und 2, welches auch bei Variation des Einstrahlwinkels θ erhalten bleibt (siehe BILD 12).

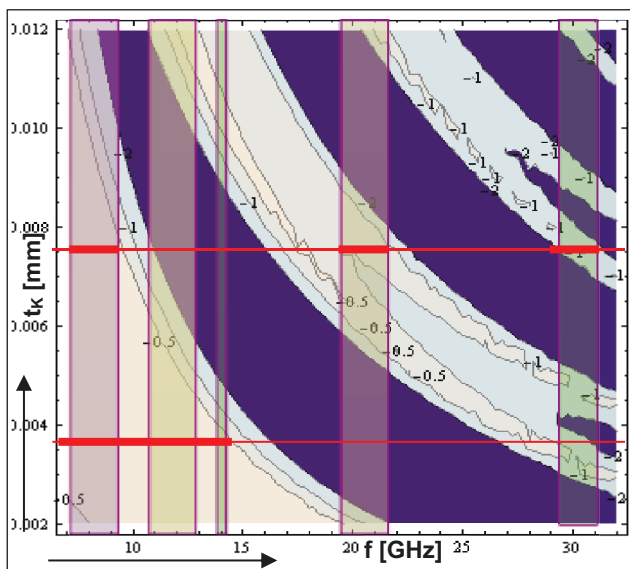


BILD 11. C-SW Transmissionsdiagramm für $\theta = 0^\circ$, Varianten C1 und C2

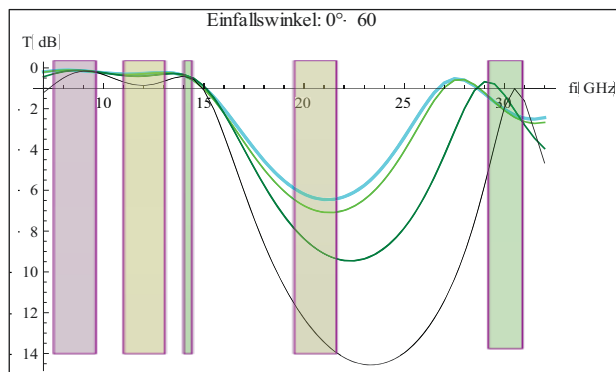


BILD 12. Transmissionsverhalten der C-SW-Variante C1

Eine Lösung mit akzeptabler Transmission in allen Frequenzbändern kann mit dieser Konfiguration nicht gefunden werden. Soll F3 genutzt werden, stellt C2 eine Lösung dar, die gleichzeitig die Nutzung von F1 erlaubt.

Da die Gesamtdicke des Radoms Einschränkungen sowohl nach oben als auch nach unten unterliegt, können die einzelnen Schichtdicken nur in bestimmten Bereichen variiert werden. Dicke monolithische Anteile (BILD 5: LC1 und LC5 mit t_D , bzw. LC3 mit t_m) bedeuten hohes Gewicht. Zu dünne Kerne (LC2 und LC4 mit t_K) ergeben eine im Hinblick auf die Festigkeitskriterien insgesamt zu dünne Schale. Die gefundenen elektromagnetischen Lösungen sind daher generell auch unter mechanischen Aspekten zu betrachten:

- **C1:** $t_D = 1\text{mm}$ $t_K = 4-5\text{mm}$ $t_m = 2\text{mm}$, für die Frequenzbereiche 1, und 2 mit einem Flächengewicht von ca. $7-10\text{ kg/m}^2$
- **C2:** $t_D = 1\text{mm}$ $t_K = 7-11\text{mm}$ $t_m = 2,2\text{mm}$, für die Frequenzbereiche 1, und 3 mit einem Flächengewicht von ca. $10-13\text{ kg/m}^2$
- **C3:** $t_D = 2,2\text{mm}$ $t_K = 4-7\text{mm}$ $t_m = 3,5\text{mm}$, für die Frequenzbereiche 1, und 3 mit einem Flächengewicht von ca. $15-17\text{ kg/m}^2$
- **C4:** $t_D = 3\text{mm}$ $t_K = 10-15\text{mm}$ $t_m = 3,5\text{mm}$, für die Frequenzbereiche 2, und 3 mit einem Flächengewicht von ca. $19-23\text{ kg/m}^2$

3.4. Bewertung

Aus elektromagnetischer Sicht lassen sich für die einzelnen Bauweisen eine Reihe von Lösungen finden, die für ein oder mehrere Frequenzbänder gute oder zumindest akzeptable Transparenzen ergeben.

BILD 13 zeigt eine Übersicht der gefundenen Lösungen für alle drei Bauweisen mit der Zuordnung der Flächengewichte. Die Bandbreite im Sinne von nutzbaren Frequenzbändern und Flächengewichten ist relativ groß, wobei aber nicht die Qualität der einzelnen Lösungen zu erkennen ist. Über diese muss im Einzelfall in Bezug auf eine mögliche Anwendung entschieden werden. Es ist aber deutlich, dass es für die betrachteten Bauweisen, außer A1, keine Lösung gibt, die für alle Frequenzbänder brauchbare Transparenzen zeigt. Aber auch A1 kann nicht alle Anforderungen vollständig erfüllen. Das bedeutet, dass es entweder Einschränkungen in der Anwendung gibt, oder man ausreichend Überschussleistung vorhalten muss.

A1 als Vertreter der A-SW Bauweise und C1 für die C-SW Bauweise stellen zunächst die jeweils attraktivsten Optionen dar und werden beispielhaft weiter verfolgt.

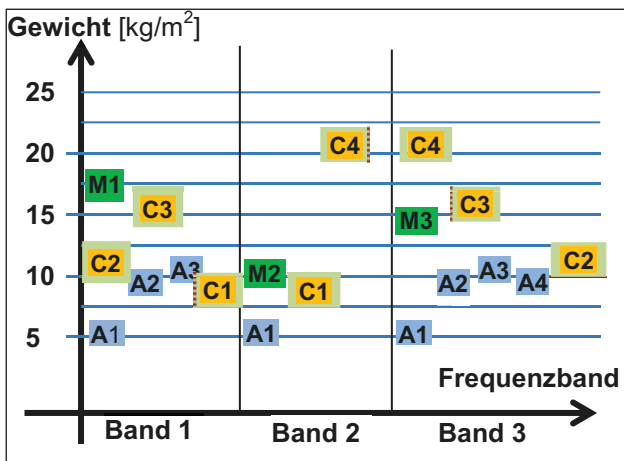


BILD 13. Transparenzlösungen und dazugehörige Gewichte.

4. STRUKTURELLE ASPEKTE

Außer der elektromagnetischen Funktionalität muss das Bauteil noch weitere Anforderungen erfüllen, wovon viele mit den strukturellen Eigenschaften des Radoms zusammenhängen. Dazu zählen Fertigbarkeit, Kompatibilität der Werkstoffe und deren dauerhafte Haltbarkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung unter allen definierten Belastungs- und Umweltbedingungen.

Außerdem müssen sich die Konstruktionen durch zerstörungsfreie Prüfungen untersuchen lassen.

4.1. Herstellprozesse

Bei dem Herstellprozess müssen alle Anforderungen an das Bauteil berücksichtigt werden. Um im Rahmen der Technologieentwicklung einen geeigneten Herstellungsprozess zu entwickeln wurde ein mehrstufiger Ansatz gewählt. Auf Basis von im ersten Loop ausgewählten Werkstoffen werden mehrere Demonstratoren gebaut, bei denen sukzessive die Komplexität und der technologische Reifegrad erhöht wird. Die Demonstratoren dienen dazu, einzelne Aspekte des Herstellungsprozesse zu untersuchen, aber gleichzeitig auch um weitere Tests mit dem gebauten Muster durchführen zu können.

Für die Herstellung von A-SW und C-SW Bauweisen werden unterschiedliche Fertigungstechnologien verfolgt, wobei die Werkstoffe mit den Herstellprozessen kompatibel sein müssen.

Für das A-SW gilt der Ansatz, die Decklagen aus Quarzglas/Epoxy Prepreg-Gewebe herzustellen und den Wabenkern nach Bedarf zu verformen und gegebenenfalls zu spleißen. Die A-SW Technologie wird vom DLR in Stuttgart verfolgt.

Hierzu werden bekannte Werkstoffe verwendet, mit denen es schon Erfahrungen gibt. Epoxidharz, Wabenkern und Kleber sind als 180°C - System etabliert. Aus Sicht der Materialauswahl und der Fertigung hat das A-SW einen höheren technologische Reifegrad im Vergleich zum C-SW.

Nachdem zunächst Drapierversuche an einem kleineren, zweifach gekrümmten Demonstrator (Schikanebauteil) durchgeführt wurden, wurde die Handhabbarkeit größerer

Bauteile an einem Halbzylinderbauteil (BILD 14) gezeigt. Der Halbzylinder hat einen Durchmesser von ca. 1,1m und eine Länge von ca. 2m und wird zusätzlich für einen Vogelschlagversuch verwendet.



BILD 14. A-SW Halbzylinder

Bei der C-SW Technologie kommt ein zusätzlicher Aspekt zum Tragen, nämlich die Forderung nach hochpräziser Fertigung der getaperten Lagendicken. Dabei setzt der beim DLR in Braunschweig entwickelte Prozess darauf, dass die Sandwichschichten einzeln aufgebracht und ausgehärtet werden, um sie dann jeweils in einem hochgenauen Fräsportal mechanisch zu bearbeiten. Um die Genauigkeit nach einem Wechsel der Bearbeitungsstellen zu gewährleisten, wird ein besonderes Werkzeugsystem verwendet, das den Namen „Zero-Clamp-Tool“ erhalten hat. Es soll sicherstellen, dass sich das Werkstück im System der Werkzeugmaschine immer an derselben Stelle befindet.

BILD 15 zeigt einen Demonstrator, bei dem die Drapierbarkeit der trockenen Fasern mit anschließender Infiltration, die Applikation der unterschiedlichen Schichten und die hochpräzise mechanische Bearbeitung im Vordergrund steht. Das Werkstoffsystem ist allerdings noch nicht festgelegt. Angestrebt wird ein Quarzglas/Cyanatester System in Kombination mit syntaktischem Schaum für optimale Transparenzeigenschaften.



BILD 15. C-SW Demonstratorschale des DLR Braunschweig

4.2. Festigkeit

Die in TAB 1 aufgeführten Werkstoffe sind einzeln betrachtet für Radomanwendungen anwendbar, weil sie nach Datenlage aus elektromagnetischer Sicht und aufgrund mechanischer Anforderungen für das Bauteil geeignet sind. Eine Überprüfung der Kennwerte erfolgt zunächst über die Herstellung von Proben, an denen z.B. mechanische Eigenschaften getestet werden. Die Festigkeit und die strukturelle Integrität des Bauteils müssen unter den verschiedensten Bedingungen

gewährleistet sein. Diese Bedingungen sind in einem Anforderungskatalog definiert. Dazu gehören:

- Festigkeiten bei Raumtemperatur (RT) und unter hot/wet Bedingungen,
- Verhalten unter Schlagbelastung / Schadenstoleranz, wobei das Verhalten bei erhöhter Dehnrates relevant wird, sowie bleibende Deformationen, eventuelles Risswachstum oder entstehende Undichtigkeiten,
- Verhalten bei verschiedenen Lastniveaus (Nennlast, Bruchlast,...)
- Im weiteren Sinne auch Chemikalienbeständigkeit.

Wenn man das Bruchverhalten einer Sandwichschale betrachtet, BILD 16, die z.B. nach einem Vogelschlagversuch keine äußeren Zeichen eines Schadens erkennen ließ, wird die Notwendigkeit deutlich, das Verhalten des Sandwichkerns unter derartigen Belastungen genauer zu charakterisieren.

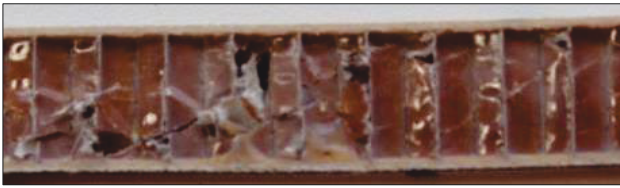


BILD 16. Wabenbruch nach Vogelschlagversuch

Folgende Parameter und Belastungsarten wurden im entsprechenden Testprogramm untersucht:

- Zug-, Druck- und Schubbelastung,
- Konditionierung und höhere Testtemperatur,
- Variation der Dehnrates.

Dabei wurden 50mm x 50mm-Proben aus einer konventionellen Sandwichplatte mit einem 14,5mm dicken Kern ausgearbeitet und nach DIN-53292, Zugversuch, bzw. DIN-53291 Druckversuch getestet. Die Schubproben mit 50mm x 200mm wurden nach DIN-53294, Schubversuch, geprüft.

Das folgende BILD 17 zeigt den Spannungs-Dehnungs-Verlauf repräsentativer Druckproben, die konventionell mit 0,2mm/min Verfahrensgeschwindigkeit, bzw. mit 10mm/min als erhöhter Geschwindigkeit getestet wurden. Die Diagramme sind aus den Maschinendaten abgeleitet.

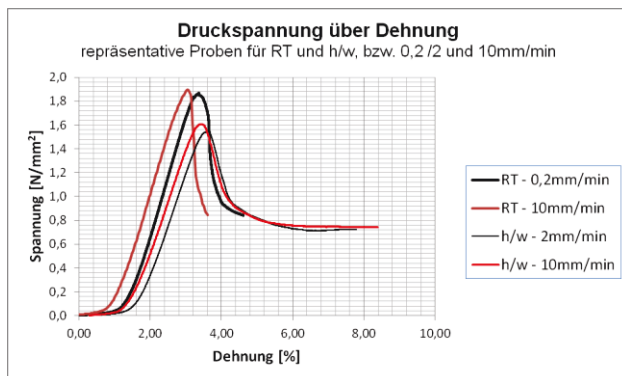


BILD 17. Spannungs-Dehnungs-Diagramme repräsentativer Druckproben mit den Parametern Dehnrates und Konditionierung bei erhöhter Testtemperatur

Es ist ein deutlicher Abfall der Festigkeit und ein geringer Abfall der Steifigkeit aufgrund der Konditionierung und der

erhöhten Testtemperatur zu erkennen. Es ist aber kein Einfluss der Zuggeschwindigkeit im untersuchten Dehnratesbereich zu sehen.

Bei den Zugproben sind die Verhältnisse anders, dort ist kein Einfluss von hot/wet zu erkennen, allerdings erhöht sich die Festigkeit bei der höheren Dehnrates leicht um ca. 10%.

4.3. Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung einer Bauweise, ist es, Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung zu haben. Das gilt einerseits für die Qualitätssicherung in der Produktion und andererseits für den Betrieb, wo Schäden, z.B. nach einem Impact, inspiziert und beurteilt werden müssen.

Ein Sandwich ist aufgrund seiner Inhomogenität den üblichen ZfP – Methoden eher nicht so gut zugänglich. Hier ist der Nachweis erforderlich, dass die geforderte Inspezierbarkeit kein Ausschlusskriterium wird. Für das A-SW kommt die Luftultraschallprüfung in Transmissionstechnik in Betracht, wobei das Bauteil von beiden Seiten zugänglich sein muss und die beiden Ultraschallköpfe sich genau gegenüber stehen müssen. Die Applikation an einer zweifach gekrümmten großen Schale kann daher aufwendig werden. Als zusätzliche Möglichkeit kommt die Mikrowellen Defektoskopie in Frage, mit der sich z.B. Verformungen aufgrund von Impact nachweisen lassen.

Entsprechende Untersuchungen am C-SW sind Gegenstand zukünftiger Arbeiten.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Einbettung des Radoms in einer Satelliten-Kommunikationskette zeigt dessen Bedeutung im Gesamtzusammenhang eines Aufklärungsszenarios.

Um die elektromagnetischen Transparenzanforderungen zu erfüllen, konnten verschiedene Bauweisen und Lösungsvorschläge dargestellt werden. Deren Vor- und Nachteile müssen aber sorgfältig abgewogen werden, wenn man das Bauteil in einem Flugzeugentwurf integrieren möchte. Besondere Relevanz haben dabei das Bauteilgewicht, Festigkeitsaspekte, Werkstoffkompatibilität und Herstellbarkeit. Hierzu konnten entscheidende Beiträge geliefert werden.

In einem nächsten Schritt gilt es, die A-SW Technologie genauer bezüglich der Erfüllung der Anforderungen abzuklopfen, z.B. durch Ermittlung der Veränderung des Antennendiagramms mit Hilfe von 3D-Algorithmen, oder die Simulation der Vogelschlagfestigkeit anhand eines realistischen 3D-Modells.

Für das C-Sandwich müssen stimmige Materialsysteme gefunden werden und die Grenzen der Technologie bezüglich ihrer Anwendung auf größere Bauteile abgeschätzt werden.

6. REFERENZEN

- [1] DLRK2012_281241, „Fortschrittliche Konzepte für großflächige gewichtsoptimierte und schlagfeste Kommunikationsstrukturen als multidisziplinäre Herausforderung – FFS“, P. Starke, H. Meister, Dr. J. Wolfrum.