

ADDITIVE FERTIGUNG FÜR FEEDSYSTEME AKTIVER SATELLITENANTENNEN

M. Kilian, Airbus Defence and Space GmbH, Robert Koch Str. 1 Taufkirchen, Deutschland
P. Kohl, Airbus Defence and Space GmbH
M. Schneider, Airbus Defence and Space GmbH
C. Hartwanger, Airbus Defence and Space GmbH

Zusammenfassung

Durch den fortschreitenden Wechsel von Analog- auf Digital-TV hat sich die Anzahl der zu übertragenen Kanäle deutlich erhöht, da die Mehrzahl der Sender lokale und regionale Inhalte verbreitet. Um die verfügbare Leistung über dem gewünschten Ausleuchtungsgebiet zu verteilen, muss die zur Verfügung stehende Kapazität an den tatsächlichen Datenbedarf flexibel angepasst werden können. Die Umsetzung mit klassischen Antennen ist nur bedingt möglich und mit steigenden Kosten, einem deutlich erhöhtem Integrations- und Testaufwand sowie erhöhter Gesamtmasse verbunden. Aus diesem Grund sind neue, disruptive Veränderungen nötig. Durch additive Fertigungsverfahren und aktive SSPAs werden der notwendige Aufwand, die Masse sowie die Gesamtkosten für die erforderlichen Feedcluster drastisch gesenkt. Dies resultiert in einem guten Verhältnis zwischen Kosten und Übertragungsrate (Kosten pro Bit).

1. EINLEITUNG

Durch den Übergang auf Digital-TV hat sich die Anzahl der Kanäle erheblich vergrößert, da die Mehrzahl der Sender lokale und regionale Inhalte verbreitet (Abbildung 1).

Um die verfügbare Leistung anwendungsspezifisch und effektiv über dem Ausleuchtungsgebiet zu verteilen, muss die zur Verfügung stehende Kapazität an den tatsächlichen Datenbedarf flexibel angepasst werden können. Nur auf diese Art und Weise kann eine Verschwendung von HF-Leistung über Ausleuchtungsgebieten, in denen es nur wenige oder keine Kunden gibt vermieden werden. Für die Umsetzung solcher flexiblen Antennenszenarien wird eine erheblich größere Anzahl von Feeds auf dem Satelliten benötigt. Aufgrund der dadurch steigenden Gesamtmasse sowie höheren Kosten, bedingt durch den erhöhten Test- und Integrationsaufwand, resultiert die Notwendigkeit von disruptiven Veränderungen in der Fertigungs- und Prozesskette.

Durch additive Fertigungsverfahren kann der Aufwand im Rahmen der Fertigungsvorbereitung sowie im Weiteren für Test- und Integrationsarbeiten drastisch gesenkt werden. Dies trägt zu einer Kostenreduktion bei und verbessert dadurch das Verhältnis zwischen Kosten und Übertragungsrate (Kosten pro Bit) deutlich.

Zur Umsetzung der gewünschten Flexibilität finden variabel einstellbare Solid State Power Amplifier (SSPA) Anwendung, die mit den Feedsystemen

verschraubt oder direkt in die passive Struktur integriert werden können.

Regeln für fertigungs-orientierte Designs unter Berücksichtigung von Raumfahrt-Anwendungen, die konsequente Nutzung digitaler Modelle und die Zusammenarbeit mit Universitäten und KMUs sind der Schlüssel für aktuelle Entwicklungen.

Durch die Verbundvorhaben Maverik und Akradia wurde nachgewiesen, dass die additive Fertigung ein geeignetes Herstellungsverfahren für Hohlleiterbauteile mit integrierten mechanischen und thermalen Funktionen ist.

Darüber hinaus wurden im Rahmen von Asterix aktive Verstärker entwickelt, die im Weiteren in SSPAs oder direkt in die passiven Feeds integriert werden können. Dadurch kann der Forderung nach Flexibilität von Satellitenantennen nachgekommen werden.

2. UMSETZUNG FLEXIBLER ANTENNENSZENARIEN

Zur Realisierung von flexiblen Antennenszenarien sind Arrayantennen oder arraygespeiste Reflektorantennen notwendig. Zur Umsetzung dieser beiden Konzepte wird eine hohe Anzahl von Einzel-Speisesystemen benötigt. Diese bestehen aus Hörnern, Polarisatoren, Orthogonal-Moden Transformatoren, Filtern sowie Verteilnetzwerken. Mittels klassischer Fertigung sind die Entwicklungen, der Zusammenbau, die Tests sowie die dazugehörige Dokumentationsarbeit mit viel Aufwand und hohen Kosten verbunden. Darüber

hinaus sind im Rahmen der Montage händische Schraubarbeiten notwendig. Schraubverbindungen wirken sich negativ auf die Gesamtmasse aus und können die Fehleranfälligkeit beeinflussen.

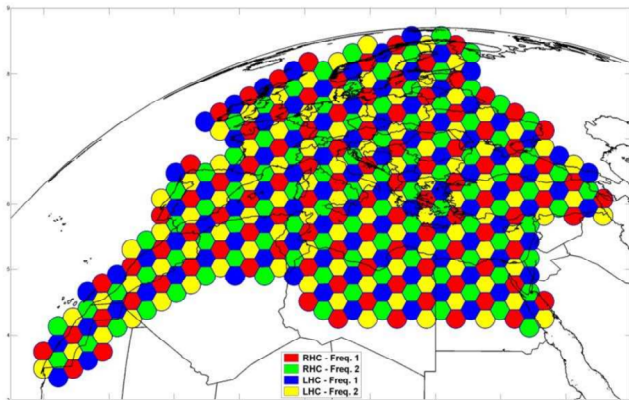


Abbildung 1: Exemplarisches Ausleuchtungsgebiet für aktive Antennenszenarien

Es liegt nahe, diese Herausforderung mittels additiven und hybriden Fertigungsverfahren einfacher und kostengünstiger zu lösen. Diese Fertigungsverfahren versprechen monolithische und damit schraubenlose Antennencluster.

Im Weiteren entfallen bei monolithisch gefertigten Komponenten thermische Barrieren und die Wärmeabfuhr wird begünstigt.

3. VERBUNDVORHABEN AKRADIA-FO

3.1. Typische Randbedingungen

Aktuelle Antennenkonstellationen für Internetsatelliten versorgen bis zu 100 starr festgelegte Abdeckungsgebiete auf der Erde.

Für die nächste Generation derartiger Satelliten verspricht die Nutzung von vielen kleinen, flexibel änderbaren Spots (> 1000 Stück) eine deutliche Steigerung der Effizienz über die Gesamtbetriebszeit des Satelliten. Durch die Möglichkeit, Spots auf der Erde zu verschieben sowie Spots unterschiedlich zu priorisieren, kann auf Urbanisierung sowie kurzzeitige Peaks (z.B. Großveranstaltungen) reagiert werden. Durch die steigende Anzahl der Spots reduziert sich das Abdeckungsgebiet jeder einzelnen Einheit auf etwa 0.20° und die abgestrahlte Leistung pro Feed wird reduziert.

Um das Fliegen von ungenützter Hardware zu vermeiden und verfügbare Ressourcen so effizient wie möglich auszunutzen, sind neue technologische Lösungen erforderlich. Die Speisesysteme müssen eine variable Zuordnung der Sendeleistung an einzelnen Spots ermöglichen.

Typische Ansätze sind:

- Fokussierte Array-Reflektorantennen mittels Multiple-Feed-pro Beam (MFB) Prinzip
- Defokussierte Array-Reflektorantennen mittels MFB Prinzip
- Imaging Phased Arrays (IPA)
- Direkt Strahlende Array Antennen (DRA)

Für MFB-Antennen liefern dedizierte Einzelstrahler ihren Beitrag zur Bildung eines kumulierten Spots, wohingegen bei IPAs und DRAs, alle Strahlerelemente zur Erzeugung eines Spots beitragen können.

Die Verteilung der Leistung eines Wanderwellenverstärkers (TWTA) (typischerweise > 130 Watt) auf viele Substrahler ist komplex, unflexibel und ineffizient. Stattdessen bietet es sich an, die erforderliche Leistung mit SSPAs zur Verfügung zu stellen. Im Rahmen der Verwendung von SSPAs sind die herkömmlichen, thermalen Konzepte nicht länger anwendbar. Hier sind neue Entwicklungen notwendig.

Bisher befanden sich die aktiven Komponenten im Inneren des Satelliten und die Schnittstellen zu den passiven Komponenten bestanden aus verschraubten Flanschverbindungen. Zukünftige Feed-Arrays bestehen aus einer Vielzahl von Einzelstrahlern, wobei für jeden einzelnen Strahler zwei SSPAs (einer pro Polarisation) erforderlich sind. Die SSPAs müssen direkt an die Strahler (außerhalb des Satelliten) angeschlossen oder direkt in den Strahler integriert werden, um Nachteile in Punkto Masse und Integrationskosten zu vermeiden.

Vorangegangene Veröffentlichungen zeigen große Fortschritte in der Entwicklung effizienter SSPAs [2] [3], des dahinter stehenden thermalen Konzeptes [4], sowie des dazugehörigen Verteilnetzwerkes [5]. Aktuell finden additive Fertigungsverfahren, wie beispielsweise 3D-Pulverbettmethoden [6] großen Gefallen, aber auch Hybridmethoden wie Metallpulveranwendungen [7] bieten ein breites Spektrum an Vorteilen, um die beschriebenen Anforderungen für zukünftige Satellitenantennen zu erfüllen. Die Eignung der Technologien wird mit Hilfe des im Folgenden beschriebenen Modells validiert, das aus einem monolithischen, passiven Frontend und dem aktiven Teil besteht.

3.2. Hybrides Fertigungsverfahren - Metallpulver Auftragsverfahren

Die Polarisatoren und das Verteilnetzwerk konnten aufgrund des hybriden Metall Pulver Auftragsverfahrens (MPA) als monolithische und somit schraubenlose Komponente realisiert werden. Im Rahmen des MPA Fertigungsverfahrens werden konventionelle Technologien (Fräsen, Drehen) sowie additive Verfahren vereint, um die jeweiligen Vorteile

der einzelnen Disziplinen zu nutzen.

Auf der verwendeten Fertigungsmaschine des deutschen Werkzeugherstellers Berthold Hermle AG werden große Teile des Werkstückes gefräst und im Anschluss offene Hohlleiterstrukturen mittels additiven Verfahren geschlossen. Dabei können Werkstücke mit einer Kantenlänge von bis zu 600 mm realisiert werden.

Abbildung 2 zeigt den Produktionsraum der verwendeten, hybriden Fertigungsmaschine der Berthold Hermle AG. Links neben dem Fräser ist die entsprechende Düse zum additiven Auftrag von Aluminium abgebildet.

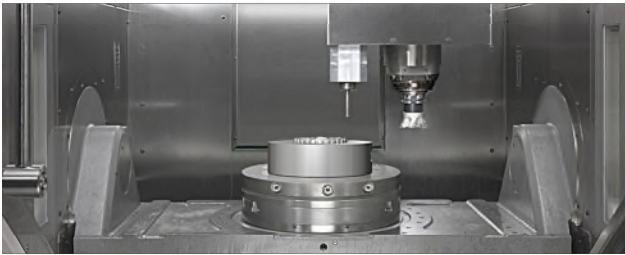


Abbildung 2: Hybride Fertigungsmaschine für MPA Anwendungen

3.3. SSPA Entwicklung

Für die technische Umsetzung des SSPAs findet ein, im Rahmen des DLR geförderten Verbundvorhabens Asterix, entwickelter MMIC Anwendung. Der 20 W K-Band MMIC wurde von der Technischen Universität Hamburg entwickelt und in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF und der Tesat Spacecom GmbH & Co. KG aufgebaut und gemessen. Die dabei gewonnen Testdaten bestätigen die Ergebnisse aus Simulation und On Waver Test. Die gute Übereinstimmung der Simulation und des gemessenen Großsignalfalls bilden die Grundlage für eine möglichst präzise SSPA Systemauslegung mit Blick auf Leistung, Wirkungsgrad und Linearität unter Einhaltung von maximalen Strömen und Temperaturen.

3.4. Realisierung der Hardware

Das für Akradia-FO entwickelte, passive Feedarray wird in Abbildung 3 gezeigt. Gefertigt wurde die Komponente bei deutschen mittelständischen Unternehmen mittels Weiterentwicklung des Metall Pulver Auftragsverfahren für weltraum-geeignetes Aluminium.

Einsatz finden kann dieses Array in großen, direkt strahlenden Arrays (Durchmesser bis ca. 2.0 Meter) oder in Arrays zur Ausleuchtung sehr großer Reflektoren (3.5 - 8.0 Meter).

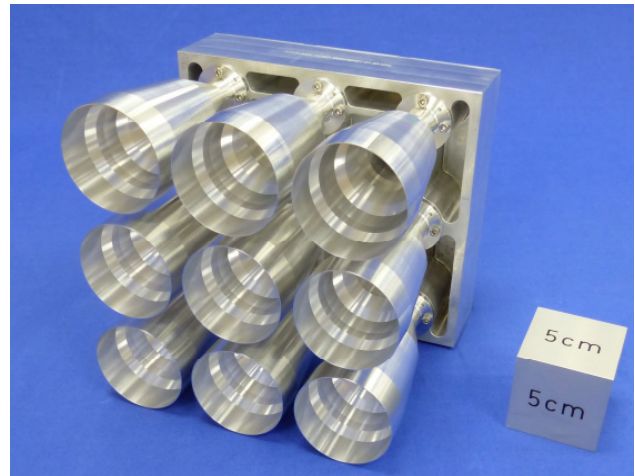


Abbildung 3: Passives Frontend des Akradia-FO Feedarrays

4. VERBUNDVORHABEN MAVERIK

4.1. Typische Spezifikationen

Neben dem in Kapitel 3 vorgestellten Szenario für typische Internet Spotbeam-Anwendungen im Ka-Band, werden für Fernsehsatelliten typischerweise Ku-Band Satelliten mit abweichenden Anforderungen benötigt.

Einzelne, linguistische Spots haben einen typischen Durchmesser von etwa $1,5^\circ$, die gesamte Abdeckung in der Regel weniger als 6° . Im Ku-Band erfordert dies einen Aperturdurchmesser von etwa 1,5 m bis 2,0 m. Aufgrund des kleinen Scan-Winkels können Hörner mit relativ großen Aperturen verwendet werden, ohne dass negative Auswirkungen durch "Grating Lobes" zu erwarten sind. Für ein europäisches Szenario werden daher etwa 100 dual polarisierte Speiseketten benötigt. Dies resultiert bei einer eingangsseitigen Speiseleistung von 20 Watt (dual polarisiert) in einer Gesamt HF Leistung von 4 kW.

Im Gegensatz zu Internetsatelliten haben Rundfunksatelliten eine geringere Anzahl von Strahlern und deshalb eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für unterschiedlicher Kapazitätsanforderungen der beiden orthogonalen Polarisationen. Dieser Zustand resultiert in ungleichen Verstärkungsfaktoren der SSPAs und verhindert die effektive Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen.

Die Zuhilfenahme eines Matrixleistungsverstärkers, welcher die orthogonalen Signale auf beide zur Verfügung stehenden SSPAs aufteilt und nach der Verstärkung wieder trennt, realisiert die effektive Nutzung der vorhandenen Hardware.

Das DLR-geförderte Programm Maverik (Akronym für Matrix Power Amplifier Integrated in a Ku-band feed) befasst sich mit der Entwicklung eines Technologie-Demonstratormodells für eine solche

Speisekette. Horn, Polarisationselement und Gehäuse der aktiven Komponenten bilden eine monolithische Einheit mit offensichtlichen Vorteilen für die mechanischen, thermalen und elektrischen Eigenschaften.

4.2. Konzept

Das Ku-Sendeband des Satelliten deckt den Frequenzbereich zwischen 10,70 GHz und 12,75 GHz ab. Wegen der leichteren Verfügbarkeit von monolithischen integrierten Mikrowellenschaltkreisen (MMICs) wurde für das Demonstratormodell das Frequenzband, unter Berücksichtigung von Wärmeausdehnung und Fertigungsunsicherheiten, auf 9,0 GHz bis 11,0 GHz skaliert. Später kann die Entwicklung mit Entwicklungs- und Qualifizierungsmodellen für das tatsächliche Frequenzband fortgesetzt werden. Matrix-Endstufen haben normalerweise eine Butler-Matrix, welche aus zwei 90°-Hybriden (vor und nach den Verstärkern) bestehen. Die Verwendung anderer orthogonaler Koppler wäre möglich.

Um Kosten, Masse und Platz einzusparen wurde das polarisierende Element direkt in die Butler-Matrix integriert. Dabei findet ein Branchlinekoppler auf der Leiterplatte (PCB) des SSPAs mit einem Septumpolarisator Anwendung. Das entsprechende Blockschaltbild ist in Abbildung 4 dargestellt.

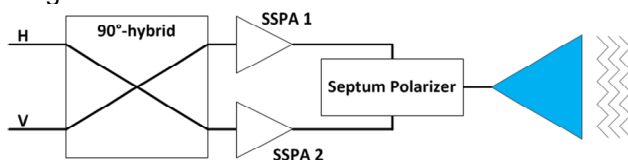


Abbildung 4: Blockschaltbild des Matrixverstärkers

4.3. Realisierung der Hardware

Für die Fertigung der passiven Hardware, sowie des Gehäuses, wurde 3D-Druck angewendet. Dabei konnten der Polarisator, das Horn sowie das Gehäuse für den Verstärker als einzelner monolithischer Block realisiert werden. Für die Integration der SSPAs musste der Gehäusedeckel separat gedruckt werden. Im Boden des Gehäuses ist eine Heatpipe integriert, um eine effiziente Wärmeableitung der Verlustleistung zu ermöglichen. Die Gesamthöhe der Speisekette beträgt ca. 320 mm. Sie wurde stehend, in der Standardlegierung AlSi10Mg gedruckt. Um Überhänge zu vermeiden, haben die horizontalen Wellenleiter zwischen Polarisator und Gehäuse einen dachförmigen Querschnitt. Das Gehäuse ist kleiner als der Querschnitt des Horns, so dass die Speiseketten lückenlos zu einem Cluster zusammengebaut werden konnten (Abbildung 5).

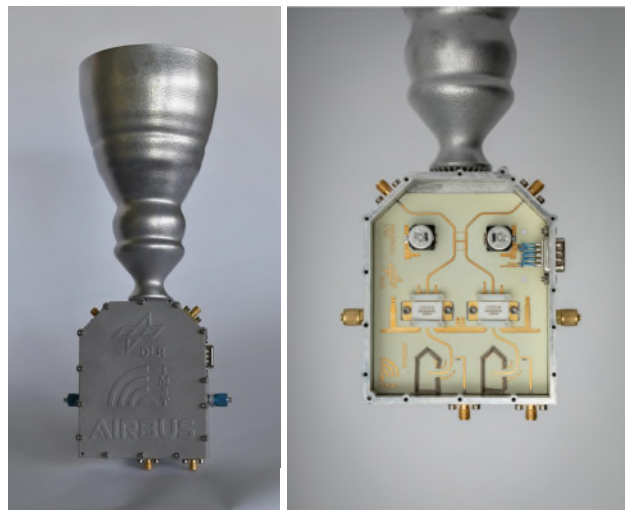


Abbildung 5: Maverik Hardware

5. UMSETZUNG UND AUSBLICK

Aktuell stehen Airbus Defence and Space für die Auslegung von Satelliten zwei große Plattformen zur Verfügung:

- Eurostar NEO, bis 25kW, ca. 4.5t
- OneSat, bis 16kW, ca. 3.0t

Aufgrund der verschiedenen zur Verfügung stehenden Leistungen, sowie den unterschiedlichen Massenspezifikationen, wird die jeweilige Plattform nach der spezifischen Anwendung ausgewählt. Die aktuellen Entwicklungen und Anforderungen von Kundenseite zeigen aber deutlich, dass kurze Lieferzeiten, geringe Kosten und harte Anforderungen an Abmessungen und Masse gestellt werden.

Die genannten Forderungen können durch additive Fertigungsverfahren, z.B. direktes Laserschmelzen, Additive Layer Manufacturing sowie hybride Verfahren wie MPA erfüllt werden. Neue Herausforderungen bestehen jetzt darin, aktuell vorhandene Komponenten und Modelle auf die neuen Randbedingungen dieser Fertigungstechnologien anzupassen und in enger Absprache den Gesamtprozess zu optimieren.

6. DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Tesat Spacecom GmbH & Co. KG und der IMST GmbH für die gute Zusammenarbeit in den vorgestellten Verbundvorhaben sowie allen in den Projekten involvierten Mitarbeitern.

Die Programme Maverik und Akradia-FO wurden vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) gefördert, mit Zustimmung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen 50YB1911, 50RK1933).

Besonderer Dank gilt Herrn Dirk Krischker für die

Unterstützung und die wertvollen Diskussionen im Rahmen der Projektdurchführung.

7. REFERENZEN

[1] C. G. Zimmermann, F. Schlerka, C. Nömayr, R. Müller, H. Nesswetter, A. Ubner, M. Gruber and C. Grünwald, "Development and qualification of the eurostar neo solar array," in European Space Power Conference (ESPC), pp. 1–5, 2019.

[2] P. Feuerschütz, C. Friesicke, R. Quay, and A. F. Jacob, "A Q-band power amplifier MMIC using 100 nm AlGaIn/GaN HEMT," 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), London,(pp. 305–308, 2016).

[3] C. Friesicke, P. Feuerschütz, R. Quay, O. Ambacher, and A. F. Jacob, "A 40 dbm AlGaIn/GaN HEMT power amplifier MMIC for SatCom applications at K-band," IEEE MTT-S International (Symposium (IMS), San Francisco, CA, pp. 1–4, 2016).

[4] A. Schulz et al., "3D printed ceramic structures based on LTCC: Materials, processes and characterizations," 21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, Warsaw, pp. 1–5, 2017.

[5] S. Spira, M. Schneider, T. Welker, J. Müller and M. A. Hein, "Compact three-dimensional four-way vectorial steering module for Ka-band multiple feeds-per-beam satellite payload applications" IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, pp 1-4, 2016.

[6] A. Sommer, A. Schinagl-Weiss, C. Hartwanger, M. Kilian and M. Schneider, "Multiple spot beam reflector antenna for high throughput Satellites with high demands on carrier-to-interference ratio" 39th ESA Antenna Workshop on Multibeam and Reconfigurable Antennas for Space Applications, 2018.

[7] (2019) Hermle AG - Besser fräsen mit dem Technologieführer aus Gosheim [Online]. Verfügbar: <https://www.hermle.de/>