Schlussbericht
zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF

ILKA

Integrierte, entfaltbare Leichtbau Manpack Komplett-Antenne

Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München

Vorhabenslaufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2024
Förderkennzeichen: 50YB2110

Garching, 26.09.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

I KURZE DARSTELLUNG

I.1 Aufgabenstellung

Kommerzielle Parabolbodenantennen werden häufig für Ersteinsatzkräfte, Katastrophen- und Krisenmanagement, militärische Operationen, Nachrichtenteams und Journalisten oder für wissenschaftliche Expeditionen verwendet. Die wichtigsten Anforderungen, die all diese Anwendungen gemeinsam haben, sind: die Notwendigkeit eines schnellen Einsatzes, ausgezeichnete Transportfähigkeit und ein sehr geringes Gewicht. Das X- und Ku-Frequenzband für die Satellitenkommunikation ist für die oben genannten Szenarien geeignet und wird derzeit am meisten verwendet. Durch die nun hohe Verfügbarkeit eines Ka-Band Satellitenkanals steigt die Nachfrage an entsprechenden Bodenterminals. Herkömmliche Bodenantennen, die auf dem Markt verfügbar sind, können jedoch nicht zeit- und platzsparend gefaltet werden, da die Antenne in der Regel ein einteiliger oder manchmal ein mehrteiliger segmentierter Reflektor ist. Infolgedessen ist die Antenne aufgrund mehrerer Koffer schwer zu transportieren und zeitaufwändig in die Betriebskonfiguration zu bringen. Es gibt zwar einige Konzepte für entfaltbare Reflektoren alleine – auch HPS hat hierzu schon Untersuchungen angestellt – jedoch ein hochintegriertes Komplettsystem bestehend aus Reflektor, Elektronik, Ausrichtsystem, Stromversorgung und Packsystem, und das alles entfalt- und ausrichtbar in sehr kurzer Zeit, gibt es noch nicht.

Zielsetzung des Vorhabens war daher die Untersuchung einer:

- Integrierten, entfaltbaren Leichtbau Manpack Komplett-Antenne (Reflektorschüssel, alle HF Elektronikbauteile, Energieversorgung, Stativ und Rucksacksystem) mit einem
- Reflektor-Durchmesser von 1,2 m,
- einem Gesamtgewicht von weniger als 25 kg (engagierter Zielwert),
- einem extrem kleinen Packmaß,
- für hohe Frequenzbänder (Baseline Ku-Band, mit Ziel Ka – Band),
- für Bodenanwendungen in unwegsamen Gelände,
- unter Berücksichtigung von Design- und Material-Aspekten für eine Serienfertigung.

Im Rahmen des Vorhabens wurde gemeinsam mit den Verbundpartnern ein komplett ausgestattetes Labormuster (Reflektor-Durchmesser ca. 1,2m) gefertigt an welchem das untersuchte Konzept und dessen Potential mit Hilfe eines umfangreichen Testprogramms analysiert wurde.

Die anspruchsvollsten, technischen Herausforderungen des Vorhabens lagen

- in der Entwicklung geeigneter Strukturkonzepte und
- der Akkommodation aller elektronischer Bauteile,
- bei gleichzeitig extrem schneller Inbetriebnahme,
- sehr hoher Antenneneffizienz und minimaler Strukturmasse.

Dazu mussten unter der technischen und organisatorischen Leitung des Verbundkoordinators HPS,

- innovative Werkstoffe und Fertigungsprozesse angewendet und charakterisiert werden (Schwerpunkt bei der Technischen Universität München und bei Blackwave), die sowohl hohen mechanischen Anforderungen genügen und Formstabilität als auch ausreichend gute Hochfrequenzeigenschaften zur Reflektion elektromagnetischer Wellen besitzen.

- Die Frage nach der Skalierbarkeit des Antennenkomplettsystems von 1,2m bis 3,6m in Verbindung mit geeigneten Materialien sowie deren Fertigungstechnologien insbesondere bei einer Serienproduktion ist dabei eine weitere Problemstellung, die es zu lösen galt (alle Verbundpartner sind beteiligt).
- Ebenfalls war zu klären, ob ein mobiler Austausch des Feedsystems für eine Datenübertragung im Ku-Band und im X-Band, sogar bis hin zum Ka-Band zu implementieren ist (Schwerpunkt bei HPS).
- Die elektronischen Elemente unter Berücksichtigung der Gewichts- und Raumanforderungen geschützt und modular zu integrieren (Schwerpunkt bei Mtex).

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die am Projekt beteiligten Partner sind in Abbildung 1 dargestellt.

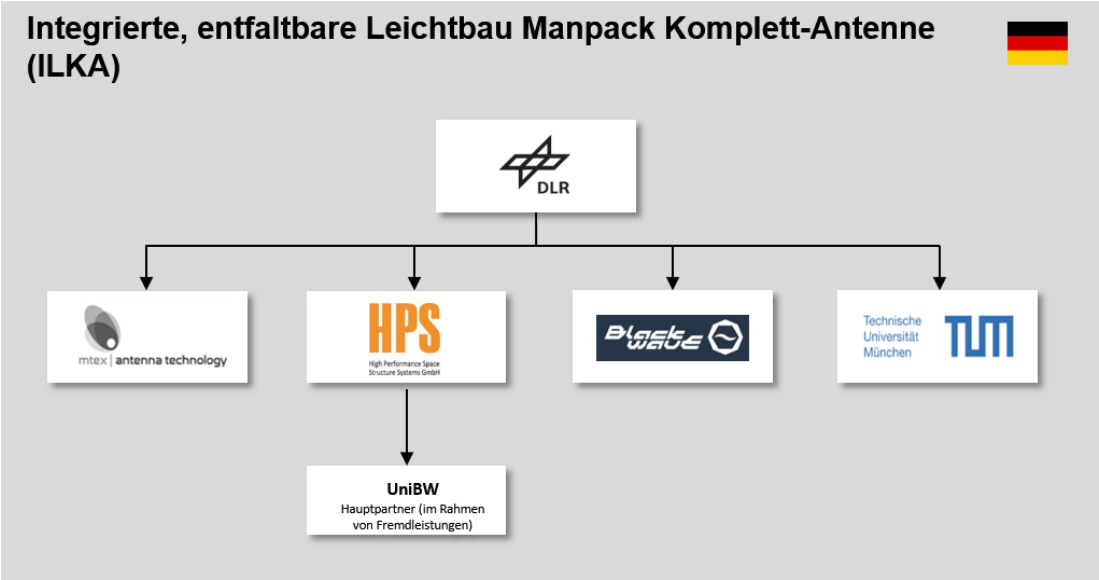

Abbildung 1: Projektpartner

Als Spezialist für Systeme im Bereich der Satellitenkommunikation hat HPS bereits in vorangegangenen Vorhaben entfaltbare Reflektorsysteme untersucht. Aufgrund dieser technologischen Erfahrungen wie auch der Kenntnisse des Marktes trat HPS im Verbundvorhaben als Koordinator auf.

Die Mtex Antenna Technology GmbH war aufbauend auf vorherigen Kooperationen verantwortlich für die Entwicklung der Elektronik-Komponenten sowie deren Einhausung und Integration in die Struktur des Systems. Die Blackwave GmbH konnte ihre Erfahrungen im Bereich der Serienfertigung von CFK-Strukturen in pressengestützten Prozessen einbringen, um die Entwicklung eines serientauglichen Herstellprozesses für die Struktur- und Reflektorbauteile voranzutreiben. Der Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München brachte seine Expertise im Bereich der Faserverbund-Werkstoffe im Rahmen der Entwicklung einer Ultraleicht-Variante für die Reflektorteile ein.

Die Universität der Bundeswehr trug als Fremdleistung zu HPS zu dem Vorhaben bei und unterstützte insbesondere im Bereich der Anforderungsdefinition und der Validierung des Labormusters.

Die Förderung des Projekts erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Projektträger war das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), das Projekt wurde im Rahmen der Fördermaßnahme Raumfahrtmanagement – Nationales Raumfahrtprogramm im Förderbereich Technologietransfer und Innovation durchgeführt.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Projektbeginn war der 01.04.2021, das Vorhaben war zunächst auf eine Laufzeit von 18 Monaten geplant. Im Laufe des Projekts wurde dieses zweimal kostenneutral verlängert und letztendlich zum 31.03.2024 abgeschlossen.

Ursächlich für die Verlängerung waren verschiedene Faktoren: Bei der Entwicklung des Bauteildesigns waren zusätzliche Design-Iterationen nötig, um ein optimales Konzept hinsichtlich Entfaltmechanik, Leichtbau und Handhabung des System zu gewährleisten. Weiterhin zeigte sich im Projektverlauf, dass auch im Bereich der Prozessentwicklung und Fertigung der Labormuster-Bauteile zusätzliche Iterationen erforderlich waren, um den hohen Geometrieanforderungen gerecht zu werden. Zuletzt traten Verzögerungen bei der Lieferung der benötigten Fertigungsmaterialien sowie des Formwerkzeugs auf.

Inhaltlich war das Vohaben in insgesamt 9 Hauptarbeitspakete unterteilt:

1000 Antennen Spezifikation mit variablen Nutzeranforderungen
2000 Reflektor & Feed Designuntersuchung
3000 CFK Fertigungsprozessuntersuchung
4000 In-Mold-Bonding von Carbon-Bauteile und C-SMC
5000 Untersuchung eines integrierten Antennensystems und Akkomodation der Elektronik
6000 Design & Fertigung eines Labormusters
7000 Labormuster Testkampagne
8000 Testauswertung & Entwicklungsplan
9000 Koordination Verbundvorhaben

Die Arbeitspakete mit Beteiligung der TUM sind hervorgehoben dargestellt. Die Abstimmung bezüglich der Schnittstellen in der Zusammenarbeit mit den Partnern innerhalb der Arbeitspakete wie auch AP-übergreifend erfolgte im Rahmen regelmäßiger gemeinsamer Termine im Konsortium, ebenso wie im Rahmen von bilateralen Terminen zwischen einzelnen Partnern.

So wurde beispielsweise AP 1000 in häufiger Abstimmung gemeinsam zwischen allen Konsortialpartnern und mit Unterstützung der UniBW durchgeführt.

Im Rahmen von AP3000 wurde der Fertigungsprozess für die CFK-Bauteile der Struktur untersucht.

Zunächst wurden in AP3100 unterschiedliche Bauweisenkonzepte für die faltbaren Reflektorteile (Blätter) entwickelt und gegenübergestellt. Dabei wurden bereits Anforderungen der Kinematik (AP3200) berücksichtigt, auch die Herstellbarkeit in Serienprozessen wurde zeitgleich mit eingebracht (AP3300). Ursprünglich war vorgesehen, dass Blackwave die Grundplatte des Reflektors in einem Carbon / C-SMC-Prozess fertigen sollte. Während der Untersuchungen der Fertigungskonzepte für die Reflektorblätter wurden zwei Konzepte für unterschiedliche Rahmenbedingungen herausgearbeitet: Eine wirtschaftlich und gut automatisierbar herstellbare Variante basierend auf einer SMC-Struktur und einer Reflektoroberfläche im Prepreg Compression

Moulding-Verfahren wurde als „Standardvariante“ für größere Stückzahlen definiert. Diese Variante wurde durch Blackwave anstelle der Grundplatte weiter verfolgt und die zu betrachenden Inhalte an diesem Bauteil erforscht. Aufgrund der Notwendigkeit für nur eine Grundplatte wurde entschieden, diese im Projekt als Aluminium-Frästeil auszuführen.

Dieser Standardvariante gegenüber wurde eine Ultra-Leichtbau-Variante mit einem lastpfadgerecht unidirektional faserverstärkten, vorkonfektionierten Hartschaum-Sandwichkern als Struktur und einer dünnen, aus CFK-Prepreg bestehenden Reflektoroberfläche festgelegt. Der erwarteten Gewichtseinsparung dieser Variante standen deutlich höhere Kosten und ein wesentlich größerer manueller Aufwand gegenüber. Gemeinsam im Konsortium und in Abstimmung mit dem Projektträger wurde beschlossen, beide Konzepte weiter zu verfolgen: Die „Standardvariante“ als Ersatz für die Baseplate für Blackwave, die Leichtbau-Variante durch die TUM. Es wurde aus Kapazitätsgründen festgelegt, im Projekt die Standardvariante zu einem vollständigen Labormuster zu integrieren und die Leichtbau-Variante lediglich in einer reduzierten Stückzahl herzustellen, um für eine etwaige spätere Anwendung den Prozess und die zu erwartenden Toleranzen zu untersuchen.

Aufgrund des heterogenen Materials sowie der Aushärtekinematik der verwendeten duroplastischen Matrixsysteme kommt es bei Composites regelmäßig zu Verzug beim Aushärten der Bauteile. Daher wurde in diesem Rahmen definiert, dass zur Sicherstellung der engen Formtoleranzen die Zeitplanung um zusätzliche Iterationen bei den Formwerkzeugen für beide Konzepte erweitert werden musste.

AP3200 widmete sich der Entwicklung der Kinematik. Unterschiedliche Konzepte wurden gegenübergestellt und letztendlich ein Faltmechanismus mir nur einer Rotationsachse pro Blade entwickelt, der dennoch eine kleinstmögliche Faltung der Struktur erlaubt.

Weiterhin wurde im Rahmen von AP3400 unterschiedliche Materialien auf ihre Eignung in den vorgesehenen Prozessen (Prepreg Compression Moulding, SMC, Prepreg/Autoklav) untersucht und die reflektiven Eigenschaften einiger Laminate (beschichtet und unbeschichtet sowie in unterschiedlichen Prozessvarianten hergestellt) für die relevanten Frequenzbereiche untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Reflektivität der Laminate in allen Prozessvarianten auch ohne Beschichtung für den vorgesehenen Einsatz ausreichend ist.

In AP6000 wurden nach Abschluss der Bauweisenentwicklung und Materialcharakterisierung die Bauteile im CAD konstruiert und anschließend mit Abaqus CAE hinsichtlich der Deformation unter einer angenommenen Windlast simuliert und der Lagenaufbau entsprechend angepasst. Zielgröße war dabei die Deformation der Reflektoroberfläche, um einen guten Wirkungsgrad des Reflektors zu gewährleisten. Um die Verwendung der gleichen Baseplate für beide Blattvarianten sicherzustellen, waren in diesem Rahmen mehrere Iterationen in enger Abstimmung zwischen den Partnern nötig.

Basierend auf dem Bauteildesign wurde anschließend das Formwerkzeug konstruiert und extern beauftragt. Aufgrund der angepassten Fertigungskonzepte wurde das Werkzeugbudget nicht voll ausgeschöpft, so dass dadurch frei werdende mittel genutzt werden konnten, um ein an der TUM vorhandenes optisches Messsystem (GOM ATOS Capsule) um eine Optik zu erweitern, die es anschließend ermöglichte, die produzierten Bauteile mit höherer Genauigkeit zu vermessen. Während der Lieferzeit des Werkzeugs wurden Prozess-Vorversuche durchgeführt, um den Herstellprozess zu definieren. Die definierten Materialien ließen dabei eine Härtung im Ofen nicht ohne starke Qualitätsmängel zu, so dass für die Bauteilherstellung auf eine Autoklavenhärtung ausgewichen werden musste.

Nach der Lieferung des Werkzeugs wurde dann der skizzierte Bauteilherstellungsprozess optimiert, und Bauteile für die geometrische Vermessung produziert. Anschließend an die Vermessung wurde der ermittelte Verzug im Werkzeug konstruktiv kompensiert und die Werkzeugüberarbeitung beauftragt.

Nach Lieferung wurde eine weitere Prozessparameterstudie zur Optimierung der Bauteilqualität durchgeführt und einige Labormuster-Bauteile produziert. Die Oberflächen dieser Teile wurde vermessen und eine deutliche Verbesserung der Geometrietreue festgestellt. Im Hinblick auf eine spätere Serienfertigung wurden weitere Entwicklungsschritte und Potentiale aufgezeigt.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.4.1 Flexible Lamellenbauweise

Oberflächenkonzepte aus flexiblen Faserverbundwerkstoffen (z.B. CFRS, Kohlenstofffaser verstärktes Silikon) benötigen keine oder deutlich weniger komplexe formgebende Strukturelemente. Durch die Kombination von Membran- also auch Schaleneigenschaften (Biegesteifigkeit) solcher Laminate in Verbindung mit meist doppelt gekrümmten Oberflächen (Paraboloide) sind solche Konzepte in der Lage ihre ursprüngliche Form selbstständig nach der Entfaltung wiederherzustellen. Die Verwendung flexibler Matrixwerkstoffe wie beispielsweise Elastomere bietet weiterhin die Möglichkeit einer sehr platzsparenden Faltung der Oberfläche.

Steife Oberflächenwerkstoffe wie beispielsweise Metalle oder duroplastische CFK – Verbundverbundwerkstoffe bieten zwar eine sehr hohe Oberflächengenauigkeit auf Komponenteneben erfordern jedoch aufgrund ihrer nicht vorhandenen Faltbarkeit sehr komplexe Gelenkmechanismen. Zum Erreichen der Faltbarkeit sowie eines möglichst kleinen Packmaßes ist eine Vielzahl von Gelenken notwendig, was zu einer deutlichen Steigerung der Strukturmasse und Komplexität führt.

Die hauptsächlichen Untersuchungs- und Entwicklungsschwerpunkte aus dem Gebiet der entfaltbaren Antennenkomponenten liegen auf deren Einsatz für Weltraumanwendungen mit dem Ziel möglichst großer Antennendimensionen. Die Auswahl geeigneter Werkstoffe und Konzepte, deren Analysen und Fertigungsmethoden sind bis heute stark von Weltraumanwendungen geprägt. Daher wurde in diesem Vorhaben versucht, die Werkstoffeigenschaften vorhandener, weltraumtauglicher Materialien auch durch kostengünstigen Materialien für Bodenanwendungen zu realisieren.

Der Lehrstuhl für Carbon Composite der TU München konnte hierzu als Unterauftragnehmer im KEAN Vorhaben zum Stand der Technik beitragen. Die Reflektorsegmente wurde als dünnwandige Schalenbauteile ausgelegt und gefertigt.

Abbildung 2: KEAN

Im Praxistest zeigten sich jedoch noch Schwächen am Konzept: Zum einen wurde nicht die gewünschte Signalgüte erreicht, denn die geometrischen Unstetigkeiten auf der Reflektoroberfläche durch Einschnitte und Überlappungen an den Kanten sorgen für Übertragungsverluste. Außerdem erschweren die scharfkantigen Übergänge und Einschnitte den Ein/Ausklappvorgang durch mechanische Reibung. Auch wenn der KEAN Reflektor bereits vielversprechende Eigenschaften, wie ein geringes Packmaß und niedriges Gewicht aufzeigt, können für ein Reflektordesign mit flexiblen Lamellen noch weitere Optimierungspotentiale genutzt werden, z.B. bei der Auslegung der graduellen Steifigkeit der Segmente oder bei der Steuerung der Segmentbewegung im Raum während dem Einklappvorgang.

I.4.2 Sandwichbauweisen

Die Sandwich-Bauweise eignet sich ideal für Leichtbauanwendungen. Eine Sandwich Struktur besteht aus zwei dünnen Decklagen, die mit einem im Vergleich zu den Deckschichten relativ dicken Kern verbunden sind. Bei Biegelasten ist der Mittenbereich des Laminats (neutrale Faser) gering belastet, somit können an dieser Stelle Fasern eingespart werden. Ziel des Sandwichaufbaus ist, an dieser Stelle eine Kernlage mit möglichst geringer Dichte einzubringen. Somit werden die Fasern optimal ausgenutzt, indem sie nur in der Randzone des Bauteils vorliegen, wodurch ihre herausragenden mechanischen Eigenschaften durch den hohen Steiner Anteil am stärksten zum Tragen kommen (s. Tab. 1).

	t	2t	4t
Relative stiffness	100	700	3700
Relative strength	100	350	925
Relative weight	100	103	106

Tab. 1: Influence of the core thickness on bending behavior [15]

Die Deckschichten bestimmen vor allem die Biege- und in-plane Kennwerte des Sandwichwerkstoffs, während die Kernlage folgende Aufgaben hat:

- Positionierung der Decklagen entfernt von der neutralen Faser
- Übertragung der transversalen (out-of-plane) Schubkräfte zwischen den Deckschichten
- Verhindern des Ausbeulens der Decklagen

Vorteile von Sandwich Strukturen:

+ Äußerst Gewichtseffizient bei Biege- und Druckbelastung
+ Akustisch und thermisch isolierend
+ Geringe Beulanfälligkeit
+ Gleichmäßige Aussteifung ohne lokale Steifigkeitsspitzen durch Verrippungen

Nachteile von Sandwichkonstruktionen:

- Ggf. problematische lokale Lasteinleitung (Schub-& Druckstabilität des Kernwerkstoffs)
- Aufwendige Auf-/Nachbereitung von Fügestellen und Ausschnitten im Laminat
- Notwendigkeit von Kantenabschlüssen
- Wasseraufnahme des Kernwerkstoffs

Der transversale Schubmodul muss hoch genug sein, andernfalls kann das Laminat nicht mehr als Balken oder via CLT betrachtet werden. Die Annahme „Querschnitt senkrecht zur Balkenachse“ wäre dann nämlich nicht mehr erfüllt. Bei der Auslegung müssen also immer Schub- und Biegelasten zusammen analysiert werden.

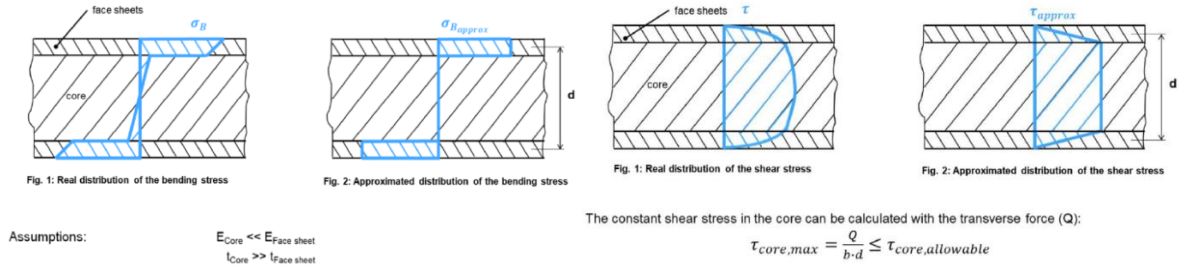

Abbildung 3: Lasten im Sandwichverbund

Die Zieleigenschaften von Kernwerkstoffen sind: geringe Dichte, hoher Schubmodul und Schubfestigkeit, Steifigkeit und Festigkeit senkrecht zu den Decklagen, thermisch und akustisch isolierend.

Zu gängigen Sandwichkernwerkstoffen zählen:

- Wellkerne
- Wabenkerne aus Aluminium oder Aramidpapier (Nomex)
- Hartschaumstoffe z.B. auf Basis von PET/PVC (Airex), PMI (Rohacell), Polystyrol (Depron)
- Holz (Balsa-Stirnholz)
- Kernlagenvlies/ Wabenvlies

Globale und lokale Versagensmechanismen bzw. Auslegungsregeln zur Vermeidung finden sich z.B. in [VO8]. Besonders die belasteten Ränder und Querschnittsänderungen eines Sandwich-Bauteils müssen beachtet werden. Schrägliegende Decklagen sind aufgrund des Kräftegleichgewichts und ihrer exponierten Lage höher belastet und müssen verstärkt werden. Als Startpunkt für eine Optimierung kann hier die Daumenregel 1/3 zu 2/3 angewendet werden. Ein gestaffeltes Auslaufen der Lagen vermeidet Spannungsspitzen:

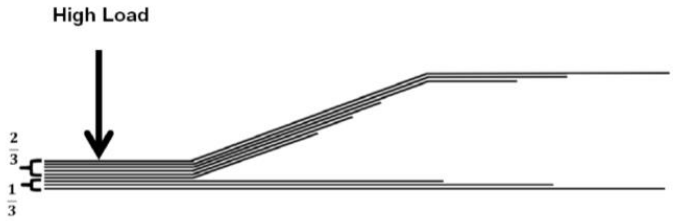

Abbildung 4: Schrägliegende Decklagen

Neben einem Zusammenführen der Decklagen am Rand des Sandwiches gibt es in [VO11,14] noch weitere Konzepte zu Randabschlüssen und Lasteileitungsstellen mit vorgefertigten Profilen und Inserts:

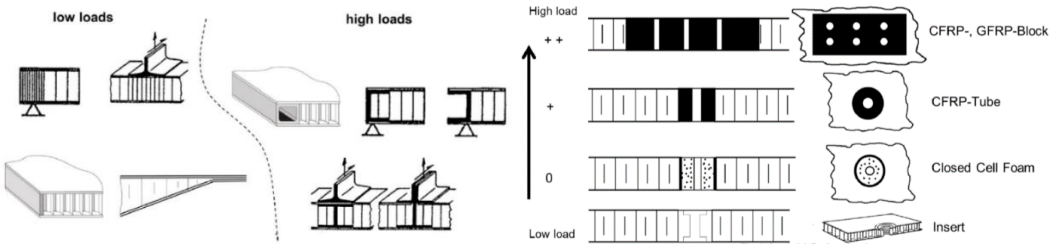

Abbildung 5: Inserts für Sandwichteile

Sandwichbauteile sind in der Regel auf flächig wirkende Lasten ausgelegt, wie Windlasten oder Auftriebsverteilungen. Sobald punktuelle Lasten (z.B. Verschraubungen) wirken, muss ein Sandwich lokal verstärkt werden, damit die zulässige Belastung am Krafteinleitungspunkt nicht überschritten wird. Spezielle Einsätze, Füllstoffe und das Aufdicken von Lagen helfen dabei, die Last großflächig in das Sandwichlaminat einzuleiten.

Quellen:

- R&G Katalog 2011
- Lange+Ritter Katalog 2019
- Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer, 2007
- [VO8] Peters, S. T., Handbook of Composites, Springer Verlag, 1997
- [VO11, 14] Luftfahrttechnisches Handbuch (LTH)
- Wiedemann, J.: Leichtbau – Elemente und Konstruktion, Springer, 2007

I.4.3 Fertigungsmethoden für Sandwichbauteile

Die Fertigungsverfahren für Sandwichlaminate werden maßgeblich durch das verwendete Kernmaterial bestimmt. Seine Temperatur und Druckfestigkeit schränkt die Prozesslandschaft ein. Besonders kritisch ist die Verbindung zwischen dem Sandwichkern und seinen Decklagen. Es muss von vornherein im Prozess eine gute Verklebung sichergestellt werden, denn Fehlklebungen sind nachträglich schwer festzustellen und nicht mehr korrigierbar. In der manntragenden Luftfahrt werden Sandwiches deshalb oft durch Verklebung von bereits ausgehärteten Decklagen mit einem Filmklebstoff mit dem Kernmaterial verbunden. Es sind jedoch auch Nasslaminer-, Nasspress- (Co-Curing) oder Infusionsverfahren möglich. Hier wird die überschüssige Matrix aus den Decklagen als Klebstoff verwendet. Voraussetzung für eine gute Adhäsion zwischen der Klebschicht und der

Kernlage ist immer eine auf das Kern- und Matrixmaterial abgestimmte Oberflächenvorbehandlung (Ätzen von Metallen, Entfetten, Auftrag von Primern,…). Weiterhin kann sich eine gute Verklebung ohne Eigenspannungen nur dann ausbilden, wenn auch die Kernlage möglichst nahe der Endkontur geformt ist - sie sich also wie das Faserhalbzeug gut in die Form drapieren lässt. Dazu müssen die Kernlagen spanend bearbeitet (alle Kernwerkstoffe) werden oder können unter Temperatureinwirkung umgeformt (Schaumkerne) werden.

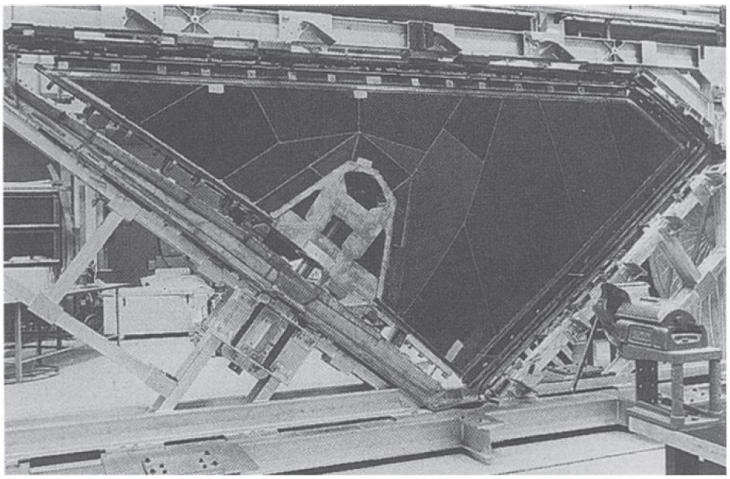

Abbildung 6: Fertigung von Sandwichteilen

Bei der Verwendung von einfach zu verarbeitenden Prepregs sind oft höhere Temperaturen >120 °C und Drücke zur Aushärtung nötig, was bei den Kernmaterialien zu ungewollter Verformung führen kann. Um solch hohe Belastungen zu vermeiden und Autoklave oder Heizpresse einzusparen bieten sich deshalb auch spezielle ooa-Prepregs (ooa = out-of-autoclave) zur Herstellung von kostengünstigen Sandwichstrukturen an.

Quellen:

- Flemming, Ziegmann, Roth, Faserverbundbauweisen, Springer, 1996

I.4.4 Kinematische Synthese

Die Kinematische Synthese ist die Transformation einer Bewegungsidee in Hardware (Hartenberg&Denavit). Darunter versteht man eine Sammlung von Methoden, zum Entwurf jener Elemente einer Maschine, welche die gewünschte Bewegung bei vorgegebenen Randbedingungen sicherstellen. Durch sie wird die Form und Abmessung für Bauteile der kinematischen Kette bestimmt bzw. quantifiziert. Somit ist die kinematische Synthese das Gegenstück zur kinematischen Analyse, die darauf abzielt, das Bewegungsverhalten eines bereits vorliegenden Mechanismus zu ermitteln.

Typische Anwendungsgebiete sind z.B. Roboter, Getriebe, Kurbeltriebe, Falt- und Klappmechanismen. Jede Bewegungsaufgabe (z.B. Generierung von An- & Abtriebscharakteristiken oder Bahnplanung) ist immer auf eine Führungsaufgabe eines Starrkörpers rückführbar. Daher macht eine Einteilung in die drei fundamental unterschiedlichen Bewegungsgruppen Sinn:

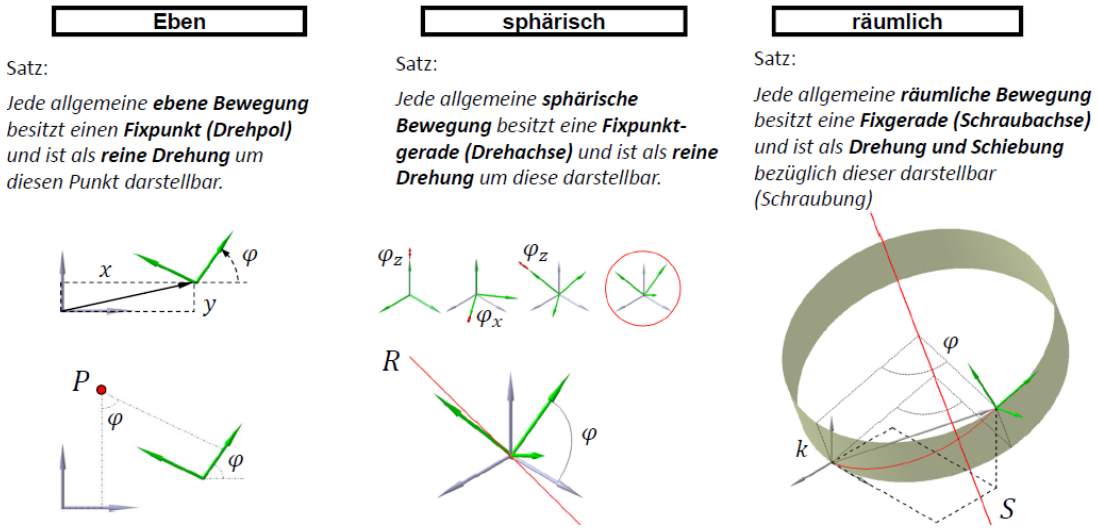

Abbildung 7: Bewegungsgruppen

Zur Lösung einer Bewegungsaufgabe werden Starrkörper und Gelenke systematisch zu Gelenkstrukturen mit einer definierten Beweglichkeit kombiniert (Struktursynthese). Während es bei den Starrkörpern keine a priori Geometrie gibt, kann bei den Gelenkelementen auf Grundformen (Schubgelenk, Drehgelenk, Dreh-Schubgelenk, T-Gelenk, Kugelgelenk, u.a.) zurückgegriffen werden. Die Gelenke schränken die Freiheitsgrade des mit ihnen verbundenen Starrkörpers bzw. des Gesamtmechanismus entsprechend ein. Angenommen, es gibt in einer Gelenkstruktur immer ein mit der Umgebung fest verbundenes Glied, so lässt sich die Grübler'sche Gleichung zur Bestimmung des Freiheitsgrads (F) des Mechanismus formulieren:

$$F = d \cdot (n - 1 - g) + \sum_{i=1}^{g} b_i, \quad d = \begin{cases} 3 & \text{Ebene, Sphäre} \\ 6 & \text{Raum} \end{cases}$$

„Freiheitsgrad = Anzahl zu Definierender Antriebe im System"

Worin b_i die Gelenkfreiheiten, n die Anzahl der bewegten Starrkörper und g die Anzahl der Gelenke sind.

Beispiele für Gelenkgetriebe:

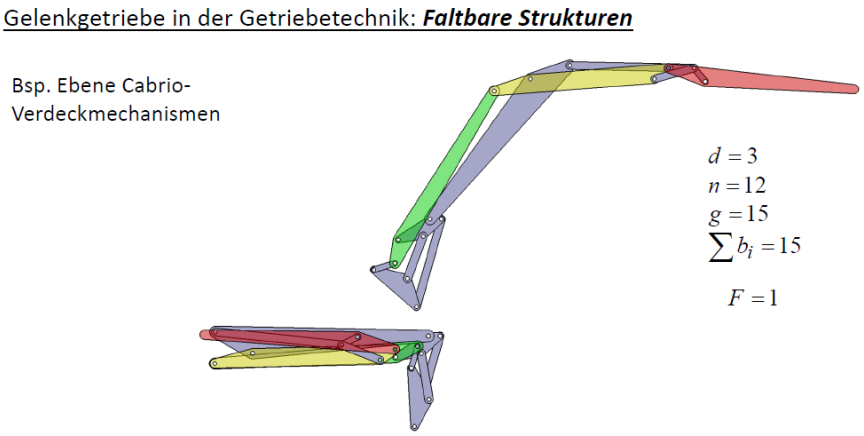

Abbildung 8: Gelenkgetriebe: Faltbare Strukturen

Greif und Positioniermechanismus: Ermittlung der Spurkurven der Achsen der Lagerung auf der Kugeloberfläche der Gelenkverbindungen

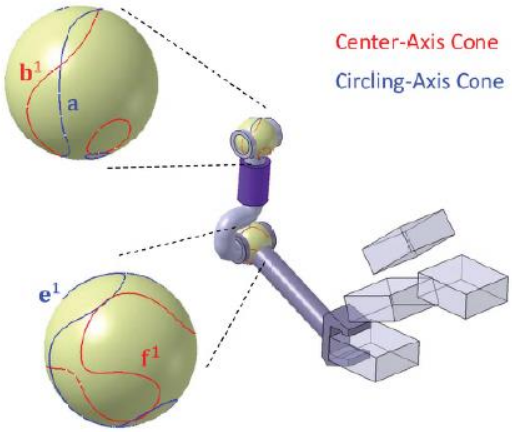

Figure 4.23.: Center-axis and circling-axis cones obtained from four-orientation synthesis of spherical RR chains

Abbildung 9: Spurkurven

Die einzelnen Teilschritte zur Lösung von Bewegungsaufgaben definieren einen iterativen Prozess, den kinematischen Auslegungsprozess.

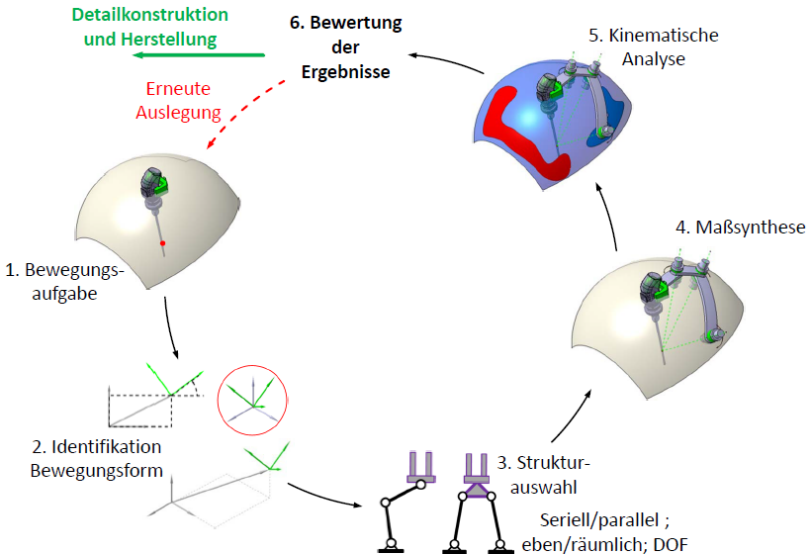

Abbildung 10: Lösung von Bewegungsaufgaben

Bei komplizierten Mechanismen bietet sich die Anwendung von kommerziellen Tools wie Matlab zum Lösen der Gleichungssysteme und zur Bewegungsoptimierung an. In Catia v5 DMU Kinematik kann die Struktur simuliert werden.

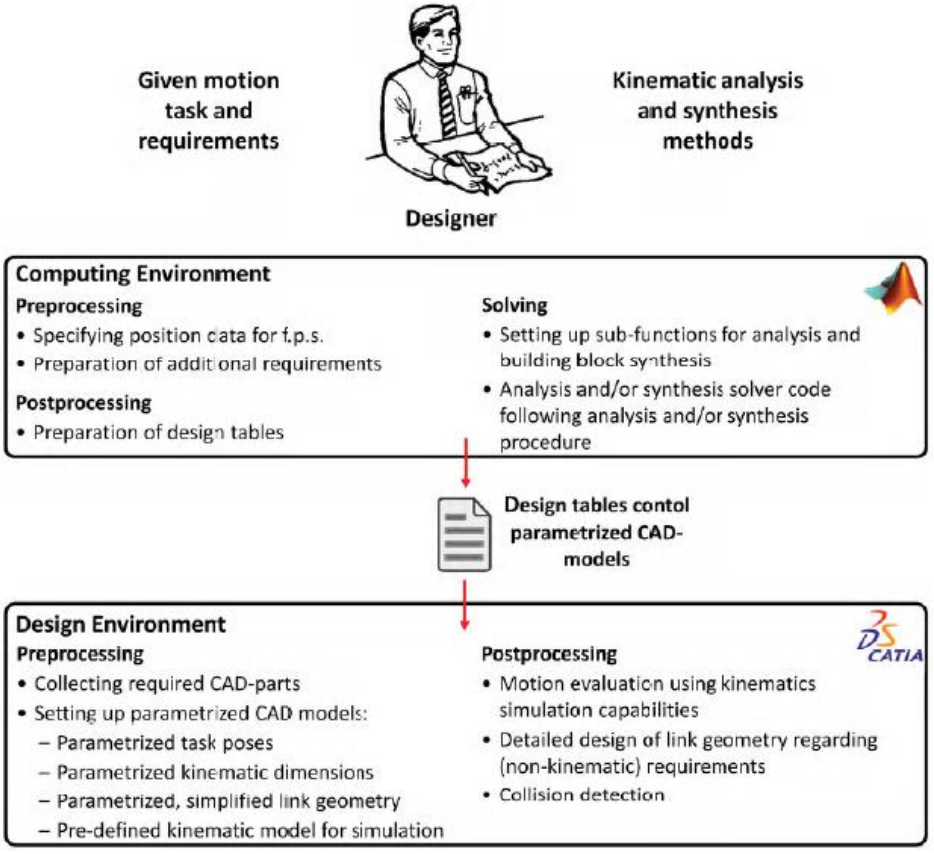

Abbildung 11: Kinematische Struktursimulation

Quellen

- https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/58640
- Meeth, Schuth, Bewegungssimulation mit Catia v5, Hanser, 2008
- Abdul-Sater, K. P.,Task-Based, Computer-Aided Kinematic Design of Spherically Constrained Kinematic Chains, PhD Thesis, TUM, 2016
- Kinematische Auslegung von Gelenkstrukturen mit Matlab und Catia, Vorlesung, MIMED, TUM

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes konnten nicht alle notwendigen Arbeiten bei den Partnern (inkl. UniBW) direkt ausgeführt werden.

Der Lehrstuhl für Carbon Composites der TUM arbeitete im Rahmen des Projekts mit folgenden weiteren Stellen zusammen:

- TUM Lehrstuhl für Produktentwicklung und Leichtbau: Nutzung der Autoklaven-Infrastruktur
- Engineering Consultancy Prof. Dr. Fasold: RF-Charakterisierung der Laminate

II 2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Anforderungsdefinition

Während der ersten Projektmonate wurden die Spezifikationen und Anforderungen des Antennensystems gemeinsam im Konsortium erarbeitet. Für die TUM betraf das primär die Spezifikationen und Anforderungen an die Struktur und Geometrie der faltbaren Reflektorstruktur. Dabei wurden Ansätze für die Struktur und Faltmechanik der CFK-Bauteile aus vorhergehenden Projekten näher untersucht, gegenübergestellt und mit den zeitgleich festgelegten technischen und geometrischen Anforderungen an das Gesamtsystem abgeglichen.

Konzepte für die Reflektorstruktur

Die gegenübergestellten Konzepte können dabei bezüglich der Beschaffenheit der Reflektoroberfläche in drei Gruppen unterteilt werden: Flexible, semi-flexible und rigide Reflektorteile. Während flexible Reflektorstrukturen durch Verformung der Reflektoroberfläche beim Falten eine Reduzierung der Anzahl der Bauteile ermöglichen, wurden sie wegen zu geringer Stabilität gegen äußere Lasten (Wind, Regen, Schnee) im Weiteren nicht berücksichtigt. Semi-flexible Reflektoren (vgl. Struktur Vorprojekt „KEAN“) werden beim Falten und während des Transport elastisch verformt, um die Konfiguration der Gelenke einfach zu halten. Nach Recherchen zu den Eigenschaften unterschiedlicher Harzsysteme wurde dieses Konzept verworfen, da nicht zu erwarten war, dass Harzsysteme gefunden werden können, die auch bei länger anhaltender elastischer Verformung unter erhöhten Temperaturen nicht zum Kriechen und entsprechenden unzulässigen dauerhaften Deformationen neigen. Für das Projekt ausgewählt wurde daher eine Struktur aus rigiden Reflektorteilen, die mit einer (im Vergleich zu den anderen Konzepten) entsprechend aufwändigeren Gelenkstruktur verbunden werden.

Entwicklung Bauweisen und Auswirkungen auf eine Serienfertigung

Seitens TUM wurden unterschiedliche Konzepte für die Bauweise entwickelt und gegenübergestellt. Für leichte, steife Strukturen eignen sich Sandwich-Bauweisen in hohem Maße, da das Flächenträgheitsmoment eines Querschnitts mit steigendem Abstand der tragenden Strukturen vom Flächenschwerpunkt wesentlich vergrößert wird (Steinersche Sätze). Bei gleicher Masse eines Bauteils kann also mit einem möglichst dicken Kern eine größere Steifigkeit erzielt werden. Dementsprechend wurde zunächst eine konventionelle Sandwichbauweise in Betracht gezogen. Diese Bauweisen zeichnen sich durch hohen Produktionsaufwand aus, da die Kernmaterialien vor der Ablage der Verstärkungsfaser in Form gefräst werden und (je nach Materialauswahl) zusätzlich mit einem Klebefilm versehen werden müssen. Um die Anzahl der Produktionsschritte zu reduzieren, wurden Prozesse untersucht, bei denen die Herstellung des Schaums im gleichen Prozessschritt mit der Konsolidierung und Aushärtung der Decklagen durchgeführt wird. Der notwendige Druck für die Verpressung der Decklagen wird durch die Expansion des Schaums erzeugt. Prinzipnachweise entsprechender Prozesse mit unterschiedlichen Verfahren zur Schaumherstellung sind Stand der Technik, es konnte keine Publikation gefunden werden, die entsprechende Verfahren im Einsatz für reale Bauteile beschreiben. Diese Verfahren wurden verworfen, da sie einerseits keine ausreichende technische Reife aufweisen, vor allem aber, weil die mit diesen Verfahren erzeugten Schäume eine vergleichsweise hohe Dichte haben und anhand einfacher Abschätzungen erkennbar

war, dass die gesetzten Ziele hinsichtlich Gewicht der Reflektorstruktur nicht erreicht werden könnten.

Konkurrierend zu Sandwichbauweisen wurden monolithische Rippenbauweisen betrachtet. Auf den Fall der Reflektorstruktur übertragen wird dabei die Steifigkeit einer monolithischen Reflektorfläche mit einer (ebenfalls monolithischen) Rippenstruktur erhöht.

Eine weitere Steigerung des Leichtbaupotenitals kann dabei erreicht werden, indem die Verstärkungsstrukturen in lokaler Sandwichbauweise umgesetzt werden. Dabei ist möglich, die jeweilige Verstärkungsstruktur jeweils für die vorliegende Belastung (z.B. Biegung, Torsion) gezielt zu versteifen, indem z.B. bei Biegebelastung unidirektionale Verstärkungslagen auf Ober- und Unterseite eines Schaumkerns aufgebracht werden.

Die beiden letztgenannten Konzepte wurden für die weitere Betrachtung im Projekt ausgewählt. Sandwich-rippenverstärkte Strukturen werden gelegentlich im Modellbau verwendet, sind davon abgesehen aber nicht weit verbreitet. Ein entsprechender Prozess unter Verwendung von vorimprägnierten Textillagen (Prepreg) und Faserbündeln (Towpreg) sowie manuell zugeschnittenen Sandwichkernen konstanter Dicke mit manueller Ablage der Lagen und Aushärtung im Ofen oder Autoklav wurde skizziert. Eine entsprechende Bauteilherstellung wird als möglich angesehen, ist aufgrund der vielen manuellen Arbeitsschritte und langwierigen Aushärtezyklen in diesem Prozess allerdings für große Stückzahlen unrealistisch.

Eine Struktur in monolithischer Rippenbauweise kann auch für größere Stückzahlen wirtschaftlich und reproduzierbar mittels einer Kombination aus einer gepressten Prepreg-Reflektorfläche und Rippen aus kohlenstofffaserverstärktem Sheet Molding Compound (SMC) hergestellt werden. Diese Prozesse gehören zum Know-How der Firma Blackwave, die im Projekt ursprünglich für die Basisplatte der Reflektorstruktur vorgesehen war.

Daher wurde für den weiteren Verlauf des Projekts entschieden, zwei Varianten der Reflektorbauteile zu entwickeln, wobei Blackwave die Entwicklung einer Prepreg-SMC-Struktur für eine „Standardvariante“ der späteren Satellitenantenne und die TUM eine Leichtbauvariante der Bauteile entwickelt hat, die jeweils satzweise an der gleichen Antennengrundplatte montierbar und somit austauschbar sind. Diese Entwicklung wurde mittels eines entsprechenden Änderungsantrags beim Fördergeber angezeigt und genehmigt.

Entwicklung der Gelenkstruktur

Im nächsten Schritt war die Gelenkstruktur zu definieren. Dieses Arbeitspaket wurde primär von HPS durchgeführt, da dort in der Zwischenzeit entsprechende Expertise aufgebaut worden war. Diese Tätigkeiten wurden seitens TUM unterstützt, etwa bei der Erarbeitung von Konzepten zur Lagerung und zu Anbindungslösungen zwischen Faserverbund und metallischen Strukturelementen.

Material- und Prozessuntersuchungen

Weiterhin wurde auf Basis des Änderungsantrags eine detailliertere Untersuchung der HF-Eigenschaften unterschiedlicher Laminate angestoßen. Im Rahmen einer Literaturrecherche zur Reflektivität von CFK-Laminaten in Abhängigkeit relevanter Materialparameter (z.B. Fasertype, Faservolumengehalt) konnte keine vorangehende Studie gefunden werden, auf deren Basis die HF-Eigenschaften hätten abgeschätzt werden können. Daher war die Herstellung von Probekörpern und zur Charakterisierung dieser Eigenschaften notwendig. Mit dem Ziel, diese Probekörper möglichst

ähnlich zu den späteren Labormusterteilen herstellen zu können, sollte anhand von Versuchen ein Satz von Prozessparametern gefunden werden, der eine Herstellung möglichst fehlerfreier Bauteile zulässt. Im Rahmen einer umfangreichen Versuchsreihe unter Variation der relevanten Prozessparameter (v.A. Temperaturen, Aufheiz- und Abkühlraten und Haltezeiten) wurde dabei entgegen den Angaben des Materialherstellers festgestellt, dass eine Aushärtung unter Vakuum im Ofen keine zufriedenstellende Bauteilqualität zulässt. Dabei zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Oberflächenqualität vom Ablagematerial: Je schlechter der Wärmeübergang zur Unterseite des Laminats, also je kälter die Oberfläche des Ablagewerkzeugs, desto mehr Fehlstellen waren zu beobachten.

Dies wurde bei Aushärteversuchen im Autoklav bestätigt: Die auf einer Kunststoff-Platte hergestellten Probeplatten wiesen deutliche Fehlstellen auf, während die im gleichen Zyklus hergestellten Platten auf einer Aluminium-Platte nahezu fehlstellenfrei waren, sodass für die Labormusterteile eine Autoklavhärtung auf einem Aluminiumwerkzeug vorgesehen ist. Da das ursprünglich gewählte Schaummaterial für die im Autoklav auftretenden Belastungen nicht geeignet ist, muss die Auswahl des Materials für weitergehende Versuche sowie für das Labormuster korrigiert werden.

Bauteildesign

Anschließend wurde mit dem Design der Leichtvariante der Reflektorbauteile begonnen. In der Konzeptphase war definiert worden, dass die Leichtbau-Blades der TUM aus einer dünnen Reflektorschicht mit geringer Biegesteifigkeit und einer als Gitter aufgebrachten unidirektional verstärkten Sandwich-Verstärkungsstruktur bestehen sollte. Für die Definition der Verstärkungsstruktur wurden zunächst rudimentäre Simulationen durchgeführt, um erste Erkenntnisse über den Einfluss unterschiedlicher Längs- und Diagonalverstärkungen auf das Biegeverhalten unter Flächenlast zu gewinnen. Auf dieser Basis wurde ein erstes detailliertes CAD-Modell für das Blade erstellt. Anhand dieses CAD-Modells wurde ein Kinematik-Modell für die Kollisionsprüfung aufgebaut und anhand diesem wo notwendig die Stärke, Länge und Ausläufe der Verstärkungsstruktur angepasst, um eine kollisionsfreie Entfaltung der Struktur zu gewährleisten. Im gleichen Zuge wurden auf Basis von Lösungen, wie sie im Flugmodellbau für die Ansteuerung von Steuerflächen verwendet werden, einstellbare Verbinder für die Blades an deren Enden definiert.

Auf Basis des CAD-Modells wurde zur Definition des Lagenaufbaus ein CAE-Modell aufgebaut. Zunächst war vorgesehen, lediglich ein Blade oder eine Gruppe von drei Blades zu simulieren, jedoch erwies sich aufgrund der Reibkontakte an den Übergängen der Blades die Definition der zyklischen Randbedingungen als nicht umsetzbar, so dass alle 20 Blades abgebildet wurden. Nach Aufbau des Modells wurden unterschiedliche Konfigurationen für den Lagenaufbau der Skin sowie die Lagenanzahl der unidirektionalen Verstärkungsstruktur simuliert, um für die vorgegebene maximale Deformation aufgrund der Windlast die am besten geeignete Laminatkonfiguration zu ermitteln. Definiert wurde dabei ein Aufbau von ±45° / 0/90° / ±45° zur längs verstärkten Blattkante für die Skin sowie eine torsionsversteifende ±45°-Lage um die Längsversteifung und zwei Lagen UD-Verstärkung jeweils auf und unter dem Schaum.

Schnittstelle zur Baseplate

An der Blattwurzel befindet sich ein Towpreg-umwickeltes Aluminium-Frästeil („Fingeranschluss“), das bei der Ablage mit eingewickelt und im Werkzeug positioniert wird und dann im fertigen Bauteil verbleibt. An dieses Teil wird nach der Aushärtung und Endbearbeitung ein weiteres Aluminium-

Frästeil („Finger“) verstiftet und angeschraubt, das seinerseits das Verbindungsteil zur Reflektor-Grundplatte darstellt.

Für das Design des Fingeranschlusses wurden folgende Rahmenbedingungen und Anforderungen berücksichtigt:

- Geometrischer Übergang von paraboloider Skin-Rückseite zu planer Anschlussseite für Finger
- Definierte Positionierung im Aushärtewerkzeug bei gegebener Entformbarkeit
- Umwickelbarkeit ohne Faltenbildung des Towpregs
- Gewährleistung der Positionierung und Befestigung des Fingers durch Verstiftung und Verschraubung
- Geringer Materialeinsatz, um das Bauteilgewicht möglichst niedrig zu halten
- Vermeidung von Kollisionen während des Faltungsvorgangs

Das Design des Fingers beruht vor dem Hintergrund der Austauschbarkeit der Standard- und Leichtbau-Blades von Blackwave und TUM sowie der gegebenen Geometrie der Baseplate auf dem Design des Fingers für die Blackwave-Blades. Eine Verwendung von Gleichteilen war dabei aufgrund der abweichenden Geometrien der jeweiligen Fingeranschlüssse nicht möglich. Daher wurden die für den Anschluss an die Baseplate relevanten Flächen des Blackwave-Fingers als Rahmenbedingungen herangezogen und eine passende Anschlussgeometrie für den TUM-Fingeranschluss entwickelt. Dabei wurde der Finger ebenfalls in die Kollisionsanalyse mit eingebunden, um eine störungsfreie Faltung und Entfaltung der Struktur zu gewährleisten.

Form- und Lagetoleranzen für die relevanten Geometrien der Frästeile wurden auf Basis einer Analyse der Toleranzkette und der zulässigen Geometrietoleranzen am Blattende festgelegt.

Konstruktion und Herstellung Formwerkzeug

Konzept und Prozess, die für die TUM-Variante der Blades definiert wurden, erfordern nicht die Verwendung unterschiedlicher Formwerkzeuge in unterschiedlichen Prozessschritten: Ursprünglich antizipiert waren ein Preformwerkzeug, ein Werkzeug für die Steckungselemente und ein Formwerkzeug für die Antennensegmente, allerdings kommt der im Laufe des Projekts definierte Prozess für die Leichtbau-Variante mit einem Formwerkzeug für die Bauteilhärtung im Autoklav (inkl. einer Korrekturschleife, s.u.) aus.

Nach Festlegung des Designs wurde daher mit der Konstruktion des Formwerkzeugs begonnen. Folgende Rahmenbedingungen mit Begründung wurden berücksichtigt:

- Werkzeugmaterial: Aluminium (aufgrund von Festigkeit, Wärmeleitung und Herstellkosten). Dies wurde auch während der Prozess-Vorversuche als am besten geeignetes Material ermittelt.
- Bauteil-Herstellprozess: Prepreg/Towpreg/Autoklav, Maximaltemperatur 130°C
- Formschlüssige Positionierung des Fingeranschlusses unter Berücksichtigung der Notwendigkeit von Harz-Abflusskanälen
- Hinterschnittfreie Werkzeuggestaltung für eine Fräsbarkeit auf 3-Achs-Maschinen
- Vorsehen der Möglichkeit zur Werkzeugumarbeitung (Härteverzugskorrektur)

Aufgrund der Größe des vorgesehenen Autoklaven waren keine einschränkenden Randbedingungen bezüglich der Werkzeuggröße zu berücksichtigen.

Nach Abschluss der Werkzeugkonstruktion wurde das Formwerkzeug auf Basis der fertiggestellten Konstruktionsdaten erneut bei mehreren Werkzeugbauern angefragt und der am besten geeignete Anbieter ausgewählt. Bei der Herstellung des Werkzeugs kam es aufgrund unerwartet eingeschränkter Fertigungskapazitäten seitens des Formenbauers zu Verzögerungen. Während die Oberflächenqualität des Werkzeugs äußerst zufriedenstellend war, wurden einige Gravurlinien deutlich zu tief und zu breit ausgeführt. Diese beeinflussen jedoch die finale Bauteiloberfläche nur marginal und die Bauteiloberfläche selbst nicht, so dass die Härteverzugsmessungen mit den so produzierten Bauteilen uneingeschränkt durchgeführt werden konnten. Bei der Umarbeitung des Werkzeugs wurden die Gravuren konstruktionsgerecht ausgeführt.

Härteverzug – Optimierung der Formgenauigkeit

Nach Lieferung des Werkzeugs wurden zwei Blades hergestellt. Ziel dieser Produktion war die Vermessung des Härteverzugs der Bauteile während und nach der Aushärtung im Autoklaven, um diesen im Rahmen einer Umarbeitung des Werkzeugs zu kompensieren.

Für Composites ist bekannt, dass es bei der Aushärtung zum Verzug der Bauteile kommt. Dieser ist systematisch, allerdings ist eine analytische bzw. simulative Abschätzung des Verzugs aufgrund einer Vielzahl von Einflussfaktoren (Bauteildicke und -geometrie, Materialkombination im Bauteil sowie Werkzeugmaterial, Prozessparameter wie Verarbeitungstemperaturen und deren Rampen etc.) mit vertretbarem Aufwand nicht möglich und auch nicht Stand der Technik. Üblicherweise werden daher Bauteile produziert, vermessen und der Verzug dann anhand der Messungen korrigiert. Dieser Ansatz wurde auch für ILKA gewählt.

Bauteilherstellung:

Die Herstellung des ersten Bauteils wurde mit dem in den Vorversuchen definierten Herstellprozess durchgeführt.

Vorbereitungen:

- Eintrennen des Werkzeugs mit mehreren Schichten Trennmittel, anschließendes Ablüften lt. Datenblatt
- Zuschnitt der Prepreg-Lagen für Skin und Torsionsversteifung der Längsverstärkung
- Zuschnitt des Profils für Längs- und Diagonalverstärkung aus PMI-Schaum
- Zuschnitt und Auftauen von Prepreg und Towpreg entsprechend den Herstellervorgaben
- Zuschnitt und Bereitlegen der Hilfsstoffe: Dichtband, Vakuumfolie, Lochfolie, Saugvlies

Herstellung:

- Ablage der Prepreg-Lagen für die Skin. Als Anlegekante wurde dabei die an der Längsverstärkung befindliche Kante der Skin herangezogen.
- Ablängen, Umwicklung (mit Torsionsversteifungslage) und Schäftung (Enden des Schaums) des Profils für die Längsverstärkung
- Ablängen und Schäftung des Schaums für die Diagonalverstärkung
- Ablage der Towpreg-Streifen für die Unterseite der Diagonalverstärkung anhand der im Werkzeug eingebrachten Gravurlinien
- Ablage der Towpreg-Streifen für die Längsverstärkung anhand der im Werkzeug eingebrachten Gravurlinien
- Einbringen des Fingeranschlusses

- Ablage der umwickelten Längsverstärkung
- Ablage und Positionierung der Schaum-Profilstücke für die Diagonalverstärkung
- Ablage der Towpreg-Streifen für die Oberseite der Diagonalverstärkung
- Ablage der Lochfolie und des Saugvlieses auf der Bauteilrückseite
- Einbringen der Anschlüsse für das Vakuumsystem des Autoklaven
- Aufbringen und Befestigung der Vakuumfolie mit Dichtband
- Vakuum-Test
- Beginn des Härtezyklus
- Manuelle Berandung mit Schere und Bandschleifer nach Entnahme aus dem Werkzeug

Optische Qualitätsuntersuchung:

Nach Herstellung der Bauteile wurden drei Qualitätsmängel festgestellt:

- Pinholes
  Die Reflektorseite der Bauteile war unterhalb der Schaumverstärkung nicht porenfrei. Aufgrund der Porengröße des Schaums sowie der weiten Evakuierungspfade konnten diese Bereiche nicht restlos evakuiert werden. Für das zweite Bauteil wurde der Schaum mit einer dünnen Schicht Kunstharz versiegelt, wodurch die Qualität etwas optimiert werden konnte. Für die Herstellung der Labormuster-Bauteile ist vorgesehen, die Schaumoberfläche mit thixotropiertem Harz einzustreichen und diese auf einer glatten Oberfläche härten zu lassen, um eine glatte Unterseite der einzubringenden Schaumprofile zu gewährleisten.

- Verzug des Schaums an den Stößen
  Aufgrund des lateralen Drucks auf die Schaumenden und der Schrägen der gestückelten Schaum-Profilstücke wurden einige von deren Stößen zusammengeschoben. Dadurch begründet kam es zur Bildung von Unregelmäßigkeiten und Ondulationen des Towpregs. Für die Labormusterteile ist vorgesehen, die Schaum-Profilstücke vorab positioniert zu verkleben. Eine entsprechende Vorrichtung zur Ablängung und Positionierung der Profilstücke wurde bereits konstruiert und im 3D-Druck-Verfahren (FFF) hergestellt.

- Verbleib von Resten der Lochfolie in Innenkanten des Bauteils
  An einigen der Innenkanten des Schaums (Übergang Schaumprofil zu Skin) wurden Teile der Lochfolie unter den Schaum gezogen und konnten dort nicht restlos entfernt werden. Für die Labormuster-Bauteile ist vorgesehen, diese Kanten einzeln mittels Klebeband zu verschließen, um ein Hineinziehen der Lochfolie zu verhindern.

Bauteilvermessung:

Im Anschluss an die Bauteilherstellung wurde der Härteverzug mittels eines optischen Messsystems (GOM ATOS Capsule) ermittelt.

Aufgrund der Größe der ILKA-Blades waren diese Messungen mit dem vorhandenen Equipment an der TUM nicht durchführbar, dies wurde im Rahmen der Anpassung der Konzepte und Aufteilung der Varianten sowie auch im Rahmen der Optimierung der Maßhaltigkeit des Reflektors bzw. der Prozessplanung im Rahmen von AP3100 deutlich.

Für das an der TUM vorhandene Messsystem bisher vorliegende Optiken sind nur für kleinere Bauteile geeignet, für die ILKA-Blades hätte hier eine Vielzahl von Messungen zusammengesetzt werden müssen. Aufgrund sich addierender Toleranzen insbesondere in der für den Verzug der Blades relevanten Richtung stellte sich das Messsystem wie vorhanden daher als ungeeignet heraus. Daher wurde es um einen Satz weitwinkligerer Objektive erweitert, um die Anzahl der nötigen Messungen auf ein Minimum zu reduzieren und dadurch die Messgenauigkeit zu verbessern.

Mit diesem Messsystem wurden beide produzierten Bauteile vermessen. Bei den Messungen fiel auf, dass die Ergebnisse über die Erwartungen hinaus von der Positionierung und Lagerung der Bauteile auf dem Messtisch abhängig sind. Es zeigte sich, dass eine Bewegung des Bauteils unter dem feststehenden Messsystem zu schnelleren, aber deutlich weniger präzisen Ergebnissen führt als Messungen eines unbewegten, gut gelagerten Bauteils mit einem bewegten Messsystem. Bei den Messungen beider Bauteile wurden Abweichungen der Bauteilgeometrie von ca. 2mm festgestellt, die Abweichungen stellten sich dabei als sehr ähnlich dar, so dass von einer guten Wiederholbarkeit und Systematik des Härteverzugs ausgegangen wird. Die Verzugsrichtung entspricht dabei einer Verkleinerung der Brennweite des Reflektors. Ergebnis der Vermessungen ist ein Vektorfeld, das für ein regelmäßiges Punkteraster Reflektoroberfläche den Verzug von Soll- zur Istgeometrie beschreibt.

Verzugskorrektur und Werkzeug-Umkonstruktion:

Das genannte Vektorfeld kann aus der Vermessungssoftware (GOM INSPECT) in die Konstruktionssoftware (DSS CATIA) importiert werden. Je nach Auswahl der Korrekturparameter werden dabei primär globale oder lokale Verzugsvektoren berücksichtigt. Durch Parametervariation wurde für die vorliegenden Daten und Werkzeuggeometrie ein Satz Korrekturparameter definiert, der eine möglichst gute Verzugskompensation erlaubt. Die entsprechend korrigierte Werkzeugoberfläche wurde zur Optimierung der Positionierung des Fingeranschlusses leicht abgewandelt, bevor die Konstruktionsdaten gemeinsam mit dem Formwerkzeug zur Werkzeugüberarbeitung an den Formenbauer übergeben wurden. Bei der Umarbeitung wurden die o.g. Gravuren auf der Werkzeugoberfläche mit deutlich besserer Qualität ausgeführt als bei der ursprünglichen Werkzeugherstellung. Aufgrund der Nichteinhaltung von Lieferterminen seitens des Werkzeugbauers sowie aufgrund Mängeln auf der Werkzeugoberflächen (Fräsriefen) notwendiger Nacharbeit (sowohl beim Werkzeugbauer als auch an der TUM) an der Werkzeugoberfläche war das Formwerkzeug nicht nach Zeitplan einsatzfähig, sondern konnte erst verspätet eingesetzt werden. Dies wurde im Rahmen der zweiten Projektverlängerung mit berücksichtigt, hatte für sich letztendlich aber keinen Einfluss auf die Projektlaufzeit.

Nach Lieferung des Werkzeugs und Nacharbeit wurde dieses erneut gereinigt und durch Trennmittelauftrag für die Fertigung vorbereitet.

Entwicklung und Konstruktion einer Vorrichtung für die Vorbereitung der Schaumkerne

Für die Herstellung der Vorversuchs-Bauteile wurden die einzelnen Schaumsegmente manuell zugeschnitten und im Werkzeug positioniert. Es wurde festgestellt, dass die beim Ablageprozess sowie während der Härtung im Autoklav wirkenden Kräfte zu einem Verrutschen des Schaumkerns führen, weiterhin erwies sich der manuelle Zuschnittprozess als sehr zeitaufwändig. Um diese Probleme zu optimieren, wurde eine Vorrichtung entwickelt, in der die vorab vorbereiteten Schaum-Profile präzise angeschlagen, fixiert und zugeschnitten werden konnten. Dies geschah durch Abwicklung der gekrümmten Werkzeugoberfläche, Nachkonstruktion der Schaum-Struktur auf

dieser Oberfläche und der Konstruktion einer Vorrichtung um diese abgewickelte Struktur. Dabei wurden Anschlagsflächen für die Ablage und Fixierung der Schaum-Elemente und zur Führung von Cutterklingen für den präzisen Beschnitt des Schaums vorgesehen.

Die so entwickelte Vorrichtung wurde anschließend auf den lehrstuhleigenen 3D-Druckern (Prusa mk3) aus PLA gedruckt und für die Herstellung aller Kernstrukturen für die Labormuster-Blades verwendet. Hierdurch konnte die Herstellungszeit der Schaumkern-Strukturen etwa halbiert und die Genauigkeit deutlich verbessert werden.

Materiallieferung Labormuster-Bauteile

Aufgrund von Lieferschwierigkeiten seitens des Herstellers für das Prepreg-Material der Skin musste zunächst auf überlagertes Material aus der ersten Werkzeugschleife zurückgegriffen werden. Dieser verzögerte Liefertermin für das Material war letztendlich einer der ausschlaggebenden Punkte für die zweite Projektverlängerung.

Herstellung des ersten Labormuster-Bauteils, Prozessparameterstudie

Bei der Bauteilherstellung wurde zunächst der bereits für die Vorversuche verwendete Herstellprozess herangezogen, lediglich der Autoklavdruck wurde von 2,5 auf 4 bar erhöht, um die bei den vorangehenden Prozessstudien beobachten Oberflächenporen („Pinholes“) zu optimieren. Dies führte nicht zu einer Verbesserung des Fehlerbildes, so dass für das zweite Bauteil manuell zusätzliches Harz aufgetragen und ein Abreißgewebe verwendet wurde (das auch das Einklemmen der Lochfolie verhindern sollte). Bei diesem Bauteil war die Bauteilqualität noch weniger zufriedenstellend, so dass wiederum auf Plattenebene weitere Parameter- und Layup-Studien durchgeführt werden mussten.

Dabei wurde der Laminataufbau der Labormuster-Bauteile vereinfacht auf einer Platte abgelegt und folgende Prozessparameter variiert:

- Manueller Auftrag von zusätzlichem Epoxidharz mit einem dem Prepreg-Harz ähnlichen Härtungszyklus (SIKA CR80 / CH80-10) an unterschiedlichen Stellen auf dem Laminat
- Variation von Lochfolie, Abreißgewebe und Saugvlies

Bei einem Auftrag des Zusatz-Harzes direkt auf der Werkzeugoberfläche und ohne Verwendung von Abreißgewebe konnte eine gute Oberflächenqualität erreicht werden. Durch die offene Struktur des Prepreg-Gewebes und den Einsatz von Lochfolie und Saugvlies im Autoklavzyklus wurde dabei die Abführung überschüssigen Harzes sichergestellt. Diese Layup-Konfiguration wurde dann für alle folgenden Bauteile verwendet.

Produktion der Labormuster-Bauteile

Mit den ermittelten Prozessparametern wurden insgesamt fünf weiteren Blades produziert. Bei zweien dieser Bauteile (Bauteil 5 und 7) wurde der Härtungszyklus aufgrund der Verfügbarkeit des Autoklaven erst nach jeweils ca. 1,5 h unter Vakuum gestartet. Diese Bauteile sind annähernd pinhole-frei.

Sonstige Prozessanpassungen: Schrauben

Ursprünglich vorgesehen und an Bauteilen 1-5 durchgeführt war die Verwendung von Zylinderkopfschrauben als Platzhalter an den Gewindeeinsätzen während des Härtungszyklus.

Trotz sorgfältigem Eintrennens konnten diese nicht bei allen Bauteilen nach dem Härtungszyklus aus dem Gewinde entfernt werden, so dass bei Bauteilen 4 und 5 keine Verbindungselemente eingesetzt werden konnten. Für Bauteile 6 und 7 wurden dann direkt die Kugelkopf-Schrauben der Blade-Verbinder eingesetzt.

Sonstige Prozessanpassungen: Lochfolie

Bereits bei den Vorversuchs-Bauteilen war zu beobachten, dass die Lochfolie lokal unter die Sandwich-Struktur geklemmt wurde und nach der Härtung nicht zu entfernen war. Zunächst wurde bei Bauteil 2 versucht, dies durch Verwendung eines Abreißgewebes zu vermeiden. Durch die Saugfähigkeit dieses Materials wurde dadurch allerdings die Bildung von Pinholes auf der Bauteiloberfläche weiter verstärkt, so dass dieser Ansatz verworfen werden musste. Für die weiteren Bauteile (3-5) wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt, die Lochfolie vorkonfektioniert faltenfrei aufzulegen, die jedoch auch zu keinen gravierenden Verbesserungen führten. Aufgrund des hohen Aufwands wurde dies für die letzten Bauteile wieder verworfen. Es wird erwartet, dass durch Verwendung einer stärkeren (biegesteifere und zugfestere) Lochfolie das Einklemmen deutlich reduziert werden kann. Diese stand im Projekt nicht zur Verfügung.

Geometrische Vermessung und Ergebnisse

Mit Ausnahme von Bauteil 2, das mit Abreißgewebe hergestellt wurde, sind die Oberflächen aller Bauteile hinsichtlich ihrer Geometrie innerhalb der Toleranz bzw. liegen Toleranzverletzungen lediglich lokal in den biegeweichen, unverstärkten Bereichen vor. Für diese Bereiche wird erwartet, dass sie im Assembly durch Aufliegen auf dem jeweils nächsten Blade innerhalb der Toleranz liegen. Daher wird bis zur Überprüfung der Geometrie im Assembly (diese war aufgrund der reduzierten Bauteilanzahl im Projektrahmen nicht möglich) keine weitere Überarbeitung des Werkzeugs empfohlen.

Festgestellt wurde ein Verzug/Verschwimmen des Frästeils („Fingeranschluss“) um mehrere Millimeter. Dies ist im Werkzeug formschlüssig positioniert, aber nicht fixiert. Durch diese Lageabweichung wird die präzise Ausrichtung des Blades an der Baseplate beeinträchtigt. Die Folge ist sowohl eine Behinderung der Faltungskinematik als auch der Reflektoroberfläche. Als Optimierungsstrategie wurde für eine mögliche Werkzeugumarbeitung eine Fixierung dieses Frästeils am Werkzeug für den Härtungszyklus konstruiert.

Ebenso wurde bei manchen Bauteilen ein Verzug des längs an der Bauteilkante liegenden Sandwich-Schaums beobachtet. Diese Kante konnte im Werkzeug aufgrund mangelnder Anlege-Konturen nicht so genau positioniert werden wie erwartet. Durch Einbringen einer entsprechenden Erhöhung im Werkzeug kann diese Kante bei der Ablage angelegt und dadurch werkzeugfallend positioniert werden.

Ausfertigung

Für die Labormuster wurden die Bauteile mit Schere und Bandschleifer berandet. Dies ist anhand der Gravuren auf dem Bauteil auch mit ausreichender Präzision möglich, allerdings aufgrund der Staubentwicklung für eine industrielle Herstellung explizit nicht empfohlen. Eine Fixierung in einer entsprechenden Vorrichtung und maschinelle Befräsung reduziert die durch den Schleifstaub entstehenden Gesundheitsrisiken und erhöht die Genauigkeit der Bauteilkontur. Weiterhin könnte so der „Finger“ nach der Härtung, aber vor der Befräsung an Blade angebracht werden und dessen

relevante Geometrien präzise und exakt an der durch die Vorrichtung ausgerichteten Bauteiloberfläche platziert werden.

Zusammenfassung der Erkenntnisse und Optimierungspotentiale

- Flächenabweichungen
  Lediglich in unverstärkten Bereichen wurden Toleranzverletzungen der Oberflächengeometrie festgestellt. Durch Auflage auf den Benachbarten Blades wird deren Korrektur erwartet, so dass eine erneute Überarbeitung der Werkzeugoberfläche nicht als notwendig erachtet wird.

- Geometrieabweichung Frästeil
  Gravierende Abweichungen der Positionierung des Frästeils erfordern eine Fixierung desselben während des Härtungszyklus, für die eine konstruktive Lösung entwickelt wurde.

- Verzug des Kerns an der verstärkten Kante
  Mangels ausreichend prominenter Konturen am Werkzeug war eine präzise Ablage der Sandwich-Struktur an der verstärkten Kante nicht möglich. Für eine Umarbeitung des Formwerkzeugs wird die Einbringung einer entsprechenden Kante empfohlen.

- Schaumkern
  Für eine industrielle Produktion der Schaumkerne ist der im Projekt gewählte Weg (Herstellung von Profilen, manueller Zuschnitt und Verklebung zur Schaum-Struktur) nicht zielführend. Durch eine Befräsung der Struktur aus den Platten kann die erforderliche Arbeitszeit wesentlich reduziert und die Genauigkeit der Kernstrukturen gesteigert werden.

- Ausfertigung
  Durch eine maschinelle Befräsung der gehärteten Bauteile kann das staubbedingte Gesundheitsrisiko für die ausfertigende Person reduziert und die Genauigkeit der Befräsung erhöht werden. Weiterhin wird dadurch eine optimal zur Bauteiloberfläche ausgerichtete Endbefräsung der Schnittstellenkonturen des Fingers zur Baseplate ermöglicht.

- Kugelkopf-Schrauben zur Verbindung benachbarter Blades
  Eine Verklebung der Kugelkopf-Schrauben bereits während des Härtungszyklus verschlankt den Prozess und reduziert das Ausschussrisiko, da keine Platzhalter mehr entfernt werden müssen

- Lochfolie
  Durch Verwendung einer dickeren und entsprechend biegesteiferen und zugfesteren Lochfolie wird eine Reduktion eingeklemmter / nicht entfernbarer Folienstücke erwartet

Der Bauteil-Herstellungsprozess sowie die hier erwähnten Kenntnisse wurden in einem ausführlichen Bericht zusammengefasst und HPS zur Verfügung gestellt.

II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position des zahlenmäßigen Nachweises der TUM entfällt auf die Beschäftigung des wissenschaftlichen Mitarbeiters, der das Projekt bearbeitet hat.

Weitere wichtige Positionen waren das für die Herstellung der Ultraleicht-Variante der Blätter verwendete Aluminium-Formwerkzeug (sowie dessen Überarbeitung zur Kompensation des Härteverzugs) sowie eine Optik für ein an der TUM bereits bestehendes optisches Messsystem, die verwendet wurde, um die Geometrie der Reflektoroberfläche zu vermessen (zunächst, um den Härteverzug zu quantifizieren, anschließend um die Geometrie der korrigierten Blätter zu verifizieren).

II.3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die im Projekt durchgeführte Forschung und Entwicklung an Antennensystemen für das Ku-Band (und perspektivisch für das Ka-Band) hilft dabei, Einsatzkräften etwa bei humanitären Hilfseinsätzen, im Katastrophenschutz, bei militärischen Einsätzen oder auch Journalisten und Wissenschaftlern, in abgelegenen Regionen der Welt zukünftig einfacher als bislang mittels Breitband-Satellitenverbindungen den informationstechnischen Kontakt zu wahren. Im Vorhaben wurde ein System entwickelt und geprüft, das diesen Anforderungen gerecht wird und deutlich leichter ist als andere am Markt verfügbare Systeme.

Durch die TUM wurden dabei zwei unterschiedliche Bauweisen für die Reflektor-Bauteile entwickelt und eine davon bis zum fertigen Bauteil ausdetailliert sowie die nötigen Schritte bis zu einer Serienfertigung dargestellt. Somit trug das Projekt ILKA im Ganzen und die TUM als wichtiger Teil davon zur Verbesserung des Angebotes am Markt für die o.g. Systeme und damit auch zu einer Beschleunigung des Informationsaustauschs bei entsprechenden Einsätzen und Expeditionen bei.

II.4 Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Für die TUM als Forschungspartner liegt der hauptsächliche Nutzen des Projekts in der Gewinnung von Erkenntnissen über die untersuchten Materialien und Prozesse. Diese werden im Rahmen des Hochschulpraktikums „Composite-Bauweisen“ weiter zur Anwendung gebracht sowie sind in die Vorlesung „Fertigungstechnologien für Composites“ eingeflossen. Somit kann gewonnene Wissen im Rahmen der Lehrtätigkeiten des LCC an die Studierenden weitergegeben werden.

Die erreichten Ergebnissse werden voraussichtlich zumindest teilweise in die Dissertationsschrift des bearbeiteten Mitarbeiters eingehen.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens an anderen Stellen

Insbesondere in den von der TUM bearbeiteten Arbeitspaketen wurden keine das Projekt betreffenden, relevanten Forschritte anderer Stellen bekannt.

II.6 Veröffentlichungen

Das Projekt und die bis dahin vorliegenden Ergebnisse (inkl. Bauweisen und Materialuntersuchungen) wurden von HPS auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress in Dresden (27.-29.09.2022) mit Vortrag und Paper vorgestellt.

III 3 ERFOLGSKONTROLLBERICHT

III.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die im Projekt erfolgten Entwicklungen und Innovationen wurden im Projektrahmen den anderen Partnern zur Verfügung gestellt. Insbesondere wurden die im Projekt entwickelten Bauweisen mit allen Partnern sowie der entwickelte Herstellungsprozess für die Leichtbau-Bauteile mit HPS geteilt und HPS somit in die Lage versetzt, entsprechende Bauteile selbst herzustellen. Somit trug die TUM zum Wissenstransfer an deutsche KMU (hier vornehmlich Blackwave und HPS) bei. Während der Bearbeitung des Projekts wurde weiterhin eine neue Kooperation zwischen HPS und dem LCC der TUM im Rahmen eines weiteren gemeinsamen Verbundprojekts ins Leben gerufen.

Einem wissenschaftlichen Mitarbeiter der TUM wurde durch das Projekt der Einstieg in ein Promotionsvorhaben ermöglicht. Es wird erwartet, dass diese (aktuell nicht abgeschlossene) Dissertation zum Teil auf Ergebnisse des Projekts ILKA zurückgreifen wird.

Die gewonnenen Erkenntnisse flossen (und fließen weiterhin) in die Lehre am LCC ein und dienen somit auch der Ausbildung junger Wissenschaftler und Ingenieure und der deutschen Raumfahrt-Nachwuchsförderung.

III.2 Wissenschaftliche-technische Ergebnisse des Vorhabens

Folgende wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse wurden im Rahmen des Vorhabens von der TUM generiert:

Design- und Bauweisenkonzepte

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Design- und Bauweisenkonzepte für die Struktur des Antennensystems untersucht und gegenübergestellt. Die Verwendung der ursprünglich vorgesehenen Sandwich-Strukturen wurden aufgrund der hochaufwändigen Bearbeitung (Befräsung) der Kerne als nicht zielführend erachtet. Daher wurden andere Bauweisen ausgearbeitet, um (im Hinblick auf eine spätere Serienproduktion der Segmente) bei vertretbarem Fertigungsaufwand geometrisch komplexe, qualitativ hochwertige Bauteile mit geringem Gewicht herstellen zu können. Es wurden im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche Konzepte evaluiert, die eine Herstellung des Sandwich-Schaums in Endkontur ermöglichen, optimalerweise bei gleichzeitiger Aushärtung der Decklagen auf dem Schaum. Diese Fertigungsprozesse sind jedoch noch Gegenstand aktueller Forschung (an anderen Instituten) und können insbesondere den hohen Anforderungen seitens Leichtbau nicht gerecht werden. Letztendlich waren die beiden ausgewählten Konzepte (s. 2.1) Ergebnis dieser Studien und unterschiedliche Wege, den verschiedenen, teils widersprüchlichen Anforderungen gerecht zu werden: Die Standardvariante (im Projekt weiter von Blackwave verfolgt) als serienmäßig in großer Stückzahl herstellbares Bauteil mit etwas höherem Gewicht und die (im Projekt von der TUM verfolgte) Leichtbauvariante auf Basis einer unidirektional verstärkten, lokal applizierten Sandwichstruktur zur maximalen Ausschöpfung des Leichtbaupotentials von Verbundwerkstoffen, jedoch mit einem manuell deutlich aufwändigeren, energieaufwändigeren und letztlich auch wesentlich teureren Fertigungsprozess.

Material- und Prozessparameteruntersuchungen

Die im Projekt ausgewählten Materialien für die Leichtbauvariante wurden bislang von der TUM nicht verwendet. Somit bestand keine Erfahrung hinsichtlich deren Anwendung und der für die Herstellung hochwertiger Bauteile zu verwendender Prozessparameter. Im Rahmen mehrerer Parameterstudien wurde untersucht, wie aus den gewählten Materialien qualitativ hochwertige Laminate / Bauteile hergestellt werden können. Dabei wurden auch Kombinationen bekannter Prozesse untersucht (z.B. Handlaminat / Prepreg). Letztendlich konnte mit der Zeit unter Vakuum vor Start des Autoklavenzyklus ein Parameter identifiziert werden, der für die Herstellung hochwertiger Bauteile einflussgebend ist.

Verzugskompensation

Im Projekt wurde identifiziert, dass es bei gekrümmten Bauteilen zu nennenswertem Verzug während der Härtung der Laminate kommt. Es wurden Untersuchungen bezüglich des Härteverzugs gemacht und dieser im Werkzeug kompensiert, so dass die Bauteile der zweiten Iteration innerhalb der geometrischen Toleranzen lagen. Der gemessene Härteverzug war u.A. abhängig von der unter der Oberfläche liegenden Verstärkungsstruktur. Daher wurde festgestellt, dass eine simulative Vorhersage des Verzugs nur unter erheblichem Aufwand und unter Einbeziehung der vollständigen Geometrie und des Lagenaufbaus eines zu untersuchenden Bauteils möglich ist. Aufgrund dieses Aufwands ist dieser aktuell nicht Stand der Technik.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Es wurden seitens TUM keine Schutzrechtsanmeldungen angestrebt und die TUM verfolgt keine wirtschaftlichen Absichten an den Projekterkenntnissen.

Ein unmittelbarer Anschluss an die Arbeiten im Zuge eines Folgeprojekts ist aktuell seitens TUM nicht geplant.

Die Erkenntnisse im Bereich der Fertigungsprozesse für Composites fließen in die Lehre des LCC ein und werden voraussichtlich zumindest teilweise auch für die Dissertationsschrift des bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiters herangezogen werden. Weiterhin werden sie in Teilen im Rahmen eines Hochschulpraktikums auch den Studierenden der TUM zugänglich gemacht und es ist vorgesehen, die entwickelten Prozesse auch im Rahmen zukünftiger Projekte weiter zu entwickeln.

III.4 Nicht zielführende Arbeiten

Im Bereich der Konzeptentwicklung für Reflektorstruktur sowie für die Fertigungsverfahren der Antennensegmente wurden mehrere Konzepte evaluiert und detailliert untersucht, die letztendlich aus fertigungs- oder gewichtstechnischen Gründen nicht zur Anwendung kommen konnten.

Das verwendete Prepreg-Gewebe verfügt aufgrund des niedrigen Faserflächengewichts über einen hohen Harzanteil. Da die elektrische Leitfähigkeit eines Laminates (und somit auch die reflektiven Eigenschaften für hochfrequente Strahlung) mit dem Fasergehalt steigen, wurde untersucht, ob durch Einbringung zusätzlicher, trockener Faserlagen der Fasergehalt (und somit die Reflektivität) gesteigert werden könnte. Da kein nennenswerter Einfluss dieses Verfahrens auf die Reflektivität der Laminate festgestellt werden konnte, jedoch die Bauteilqualität durch das verstärkte Auftreten von Oberflächendefekten („Pinholes“) stark abnahm, wurde dieser Ansatz verworfen.

Weiterhin haben sich im Rahmen der Prozessoptimierung einige der verwendeten Prozessparametersätze als nicht zielführend (im Sinne der Erreichung einer hohen Bauteil- und Oberflächenqualität) erwiesen.

III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Das entwickelte System wurde und wird von HPS als Konsortialführer an verschiedenen Stellen vorgestellt. Details sind dem Erfolgskontrollbericht von HPS zu entnehmen.

III.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Im Rahmen von Umwidmungen wurden im Projekt Anpassungen an der Ausgabenplanung durchgeführt. Eine erwähnenswerte Anpassung war dabei die Reduzierung der Werkzeugkosten (bedingt durch das Fertigungskonzept) und die Umwidmung der freiwerdenden Mittel für die Erweiterung eines optischen Messsystems an der TUM. Der insgesamt vorgesehene Kostenrahmen wurde dabei eingehalten.

Im Vergleich zur ursprünglichen Zeitplanung wurde das Vorhaben in Absprache mit dem Projektträger insgesamt um 18 Monate verlängert. Ursache dafür waren erhöhte Aufwände in der Ausarbeitung des Systemdesigns sowie Lieferverzögerungen bei den verwendeten Materialien.