

# Erfolgreiche Mission für TuPOD, ein innovativer TubeSats-Deployer, der von CRP USA mit dem 3D-Druckverfahren mit Windform hergestellt wurde

*TuPOD hat eine neue Ära für Wissenschaftler eingeläutet, die kleine, äußerst zuverlässige Satelliten nutzen wollen. Es handelt sich um den ersten, vollständig im 3D-Druck hergestellten Satelliten, der von der ISS aus gestartet wurde. Er wurde von CRP USA unter Verwendung von Windform gebaut, einem innovativen, mit Kohlefasern verstärkten Verbundmaterial für den 3D-Druck.*

Kleinsatelliten sind eine attraktive Alternative zu den teureren Großsatelliten. Aufgrund der steigenden Nachfrage müssen die Ingenieure diese „Nanosatelliten“, CubeSats genannt, anpassen, um neue Ziele zu erreichen.

Eines dieser Ziele ist die Freisetzung von TubeSats von der Internationalen Raumstation (ISS). Die TubeSats haben eine zylindrische Form und sind daher nicht mit der normalen CubeSat-Startplattform (P-POD) auf der ISS kompatibel. Daher wurde ein innovativer Nanosatellit, der TuPOD (Tubesat-POD), entwickelt, um diese Herausforderung zu meistern.

## Übersicht

Die Geschichte des TuPOD begann, als eine Gruppe brasilianischer Studenten ihren TubeSat TANCREDO-1 von der ISS aus starten wollte. Sie wandten sich an G.A.U.S. Srl (Group of Astrodynamics for the Use of Space Systems), ein italienisches Unternehmen mit engen Beziehungen zur Universität Rom, um ihnen bei der Bewältigung der Herausforderung zu helfen, ihren TubeSat von der ISS zu starten.

GAUSS stand vor der Herausforderung, ein innovatives System zu entwickeln, um die ersten TubeSats in die Umlaufbahn zu bringen, das sowohl als Satellit als auch als Startplattform dienen sollte. GAUSS begann mit der Evaluierung von Technologien, die es ermöglichen, ein System zu entwickeln, das zwei TubeSats an Bord nehmen und freisetzen kann, die strengen mechanischen Eigenschaften von Weltraumanwendungen erfüllt und gleichzeitig die Herausforderungen herkömmlicher Werkzeuge vermeidet. Zu diesem Zweck schloss sich GAUSS mit dem kalifornischen Unternehmen Teton Aerospace, LLC (Tetonsys) zusammen, dessen Mitbegründer Bob Twiggs auch der Gründer von Cubesat ist. Durch die Zusammenarbeit von GAUSS und Tetonsys wurde das TuPOD-Konzept entwickelt.

Das Hauptziel des TuPOD ist es, TubeSat die Möglichkeit zu geben, von der ISS aus gestartet zu werden, da es für diese Art von Satelliten keine Deployer oder Startvorrichtungen gibt.

Die endgültige Komponente wurde von Tetonsys gemäß den GAUSS-Richtlinien und mit Unterstützung von CRP USA und der Morehead State University (MSU) entworfen und gebaut, um in das J-SSOD-System integriert und vom japanischen KIBO-Modul auf der ISS ausgesetzt zu werden.

Die beiden TubeSats, die mit dem TuPOD gestartet wurden, waren:

- TANCREDO-1 im Rahmen des UbatubaSat-Projekts, das von brasilianischen Studenten der „Escola Municipal Presidente Tancredo de Almeida Neves“ zusammen mit dem INPE, dem brasilianischen Institut für Weltraumforschung entwickelt wurde
- OSNSAT, entwickelt von Open Space Network, einem kalifornischen Raumfahrtunternehmen.

Etwa 83 Stunden nach dem Start von der ISS und nachdem er in einer etwas niedrigeren Umlaufbahn als die ISS geflogen war, setzte der TuPOD seine beiden TubeSats an Bord, TANCREDO-1 und OSNSAT, frei. Danach begann der TuPOD mit der Aussendung eines Bakensignals (Morsecode) an die Amateurfunkgemeinschaft auf der Frequenz 437,425 MHz, mit einer Abweichung von +/- 10 kHz aufgrund der Dopplerverschiebung. Der Satellit sendete ein kleines FM-Morsesignal aus, das 4 Tage lang anhielt, bis die Hauptmission beendet und die Batterien erschöpft waren. Der TuPOD verließ die Umlaufbahn und verglühte sicher beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre.

## Entwicklung und Start eines CubeSat / Deployer

Die Entwicklung und der Bau eines funktionalen Satelliten, eines 3U CubeSat, der gleichzeitig als TubeSat-Deployer dienen sollte, erwies sich als Herausforderung. In Anbetracht der Grenzen herkömmlicher Fertigungstechnologien wurde die Möglichkeit erkannt, ein einzigartiges System auf der Grundlage additiver Fertigungstechnologien (AM) zu entwickeln. Additive Fertigungstechnologien in der Luft- und Raumfahrt stellen eine Chance, aber auch eine Herausforderung für Ingenieure und Wissenschaftler in der Branche dar. Die Möglichkeit, Teile und Komponenten mit Hilfe von additiven Fertigungstechnologien herzustellen, ist sowohl bei Metallen als auch bei Kunststoffen vielversprechend. Einerseits können die traditionellen subtraktiven Fertigungstechnologien Einschränkungen in Bezug auf die Designentwicklung und die Materialauswahl mit sich bringen.

Andererseits erweist sich die additive Fertigungstechnologie oft als schneller als die Entwicklung und Herstellung eines Werkzeugs, die bei den traditionellen Fertigungstechnologien verwendet werden. Darüber hinaus bot der 3D-Druck den Ingenieuren eine größere zeitliche Flexibilität, um Designverbesserungen vorzunehmen sowie die Möglichkeit, über die durch herkömmliche Werkzeuge verursachten Einschränkungen hinaus zu denken. Diese Entscheidung hat die Kosten erheblich gesenkt und sich im Vergleich zu herkömmlichen Produktionsmethoden als sehr zeiteffizient erwiesen. Die einzigartigen Eigenschaften des Materials Windform® XT 2.0 für die additive Fertigung ermöglichten die Optimierung des Systems, das somit die durch den begrenzten Raum und die extremen Startbedingungen bedingten Designanforderungen hervorragend erfüllen kann. Der Erfolg der TuPOD-Mission ist ein hervorragendes Beispiel für wissenschaftlichen Fortschritt und internationale Zusammenarbeit.

Die Anforderungen für den Bau des Mutterschiffs waren hoch. Der TuPOD ist ein 3U-CubeSat-Satellit, der vollständig aus dem Material Windform® XT 2.0 von CRP USA im 3D-Druck hergestellt wurde, mit 4 externen Schienen aus eloxiertem Aluminium (40 % des Gewichts einer entsprechenden Aluminiumstruktur). Stewart Davis, technischer Leiter bei CRP USA: „Das Freisetzungssystem der meisten CubeSats ist ein sogenannter P-Pod. Es handelt sich dabei um eine quadratische Vorrichtung, die nur Strukturen freisetzen kann, die mit den Einschränkungen kompatibel sind, die durch die vier Ecken der Vorrichtung gegeben sind. Die auf dem TuPOD angebrachten Schienen sollten es unter anderem ermöglichen, dass ein „runder Stift perfekt in ein quadratisches Loch passt““.

Der TuPOD musste wie ein 3U-CubeSat-Parallelepiped konstruiert werden, aber zwei TubeSats mit einem Durchmesser von 3,5" und einer Länge von 5" aufnehmen können, während er die CubeSat-Startinfrastruktur der JAXA auf der ISS nutzt. Dies war notwendig, um eine Schnittstelle zwischen einer zylindrischen Struktur wie dem TubeSat und einer parallelepipedischen Struktur wie dem 3U CubeSat zu schaffen. Dies wurde durch den Einsatz der additiven Fertigung und dem Material Windform® XT 2.0 möglich.

Dank dieser besonderen Art von Freisetzungsvorrichtung wurden zum ersten Mal zwei TubeSats (ein neuer Typ zylindrischer Nanosatelliten, nicht viel größer als eine normale Getränkedose) in den Weltraum gebracht. Bis dahin gab es keine Startmöglichkeiten für diese Art von Kleinsatelliten. Mit dem TuPOD-Projekt wurde eine neue und erschwingliche Startmöglichkeit für die Nutzer dieser neuen Art von Satelliten geschaffen.

Ein weiteres Problem, das es zu lösen galt, war die Entwicklung einer speziellen Form für die Elektronik. Ursprünglich war geplant, die von der Morehead State University, KY, USA, entwickelten PocketQube-Elektronikplatinen zu verwenden (Abbildung 3). Das Problem lag jedoch in der Komplexität der Verdrahtung zwischen mehreren Platinen auf so engem Raum. Tetonsys nutzte die Vorteile des elektronischen Layouts der PocketQube-Platinen und entwickelte eine einzige Platine (Abbildung 4), die die gleiche Leistung erbrachte, aber auf kleinerem Raum und an der Unterseite des TuPOD. Chantal Cappelletti, Projektleiterin bei GAUSS: „Im Inneren sieht der TuPOD wie ein glatter Zylinder aus, ohne Hohlräume, mit Ausnahme einer einzelnen Platine, die sich im unteren Teil des Zylinders befindet. Die einzelne Platine beherbergt die PocketQube-Elektronik und ist entsprechend vom Satelliten getrennt, um Beschädigungen während der TubeSat-Integration zu vermeiden.“ Die Einzelplatine erwies sich als exzellentes Design für einen doppelten Einsatz.

Beim TuPOD war das Design des Satelliten-BUS zwar komplex, aber einfach in der Herstellung, da das Teil direkt aus einer 3D-CAD-Datei hergestellt werden konnte, ohne dass Werkzeuge erforderlich waren. Bei der Technik der additiven Fertigung wird ein 3D-CAD-Modell am Computer entworfen und dann 3D gedruckt. Um das Teil für den endgültigen Einsatz zu optimieren, können Designänderungen am Teil vorgenommen und immer wieder produziert (oder gedruckt) werden, ohne die Probleme, die mit dem Gießen verbunden sind, da keine Werkzeuge oder sekundäre Bearbeitungen erforderlich sind.

Während die Herausforderung, das Mutterschiff (TuPOD) als ein einziges Bauteil zu entwerfen und herzustellen, durch den Einsatz der additiven Technologie gemeistert wurde, bestand der nächste Schritt darin, ein Material zu finden, das die strengen mechanischen Eigenschaften erfüllt, die für Raumfahrtanwendungen erforderlich sind. Auf dem Markt wurden mehrere Technologien angeboten, mit denen das TuPOD-Design hergestellt werden konnte, jedoch waren die Materialeigenschaften zu schwach und nicht mit der Dichte der gegossenen Struktur vereinbar.

Während des Evaluierungsprozesses und der Designüberprüfung entschied sich GAUSS für Windform® XT 2.0, ein robustes und hochfunktionales Material, das speziell für die additive Fertigung mit dem Verfahren der Pulverbettfusion (PBF) für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde.

„Das kohlefaserverstärkte Verbundmaterial für den 3D-Druck Windform® XT 2.0 wurde den Vertretern von GAUSS von Professor Twiggs von der Morehead State University und Mitbegründer von Tetonsys vorgestellt“, so Chantal Cappelletti. „Professor Twiggs hat das Windform Material in einem Projekt mit einem kleinen Satelliten verwendet und Windform® XT 2.0 hat die Erwartungen übertroffen. Deshalb haben wir uns entschieden, Windform® XT 2.0 auch für das TuPOD-Projekt zu verwenden.“

Amin Djamshidpour, Konstrukteur von TuPOD und Mitbegründer von Tetonsys, meint dazu: „Die Verwendung des Materials Windform® XT 2.0 für die 3D-Fertigung des TuPOD war eine der besten Entscheidungen, die wir je getroffen haben. Windform® XT 2.0 ist ein elektrisch leitfähiges Material und maschinell bearbeitbar. Während der Prototyping-Phase und sogar bei der endgültigen Herstellung fanden wir uns in zahlreichen Situationen wieder, in denen wir Löcher in das Teil bohren oder kleine Änderungen an der im 3D-Druck hergestellten Struktur vornehmen mussten, und die Arbeit mit Windform® XT 2.0 gab uns die Möglichkeit dazu.“

Prof. Twiggs: „Dieses einzigartige Projekt war nur dank des 3D-Drucks von CRP USA und des weltraumtauglichen Materials Windform® XT 2.0 möglich. Kurze Durchlaufzeiten, niedrige Kosten und Qualität waren die Schlüsselfaktoren für den Erfolg dieser Mission.“

Das TuPOD-Projekt stellte für CRP USA und die additive Fertigungstechnologie eine klare Herausforderung dar. Gleichzeitig schien die Umsetzung eines solchen Projekts ohne das CRP-Material und das Fertigungsverfahren unmöglich. Nach stundenlanger Analyse und Konstruktion durch Tetonsys war das endgültige CAD-Modell bereit für die Fertigung. Die CAD-Datei wurde unter Verwendung der Eigenschaften des Materials Windform® XT 2.0 entworfen, an CRP USA geschickt und das Teil hergestellt.

Das Ergebnis war ein einzelnes Bauteil mit einzigartigen Merkmalen, das durch additive Fertigung hergestellt wurde (siehe Abbildung 6) (spezielle Form für Batterien, Elektronik und Freisetzungsklappe) und an Tetonsys zur Integration der Elektronik und für Umwelttests geschickt wurde. Als Tetonsys den TuPOD erhielt, bemerkte es sofort den Unterschied in der Fertigungsqualität im Vergleich zu anderen additiven Technologien und war beeindruckt von der Tatsache, dass der TuPOD ein einsatzbereites Bauteil war, das keine weitere Bearbeitung erforderte. Dadurch sparte das Team sowohl Zeit als auch Geld.

Nach Abschluss der Integration der Elektronikplatine und der Durchführung mehrerer Funktionstests wurde der TuPOD zur Morehead State University geschickt, um dort abschließende Vibrations- und Thermovakuumtests durchzuführen.

Während der Evaluierung des TuPOD wurden zwei vollständige Serien von Umwelttests am TuPOD durchgeführt. Auf jeder Stufe wurden mehrere Funktions- und Einsatztests durchgeführt, um die Integrität der Struktur, der Elektronik und des Systems als Ganzes zu überprüfen.

Der TuPOD wurde dann zur endgültigen Integration der TubeSats in das Mutterschiff zu GAUSS nach Italien transportiert.

Anschließend wurde der TuPOD nach Japan gebracht, wo er im Tsukuba Space Center der JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) in der Präfektur Ibaraki von einem Team von GAUSS und JAXA in den CubeSat-Deployer J-SSOD (JEM Small Satellite Orbital Deployer) integriert wurde.

Der Deployer J-SSOD, der den TuPOD zusammen mit anderen Nanosatelliten enthielt, wurde in das autonome Raumfahrzeug H-IIB mit der Bezeichnung „KOUNOTORI 6“ für die HTV-6-Mission eingebaut, die Nachschub zur Internationalen Raumstation (ISS) brachte.

Die japanische HTV-6-Trägerrakete wurde vom Yoshinobu Launch Complex, Tanegashima Space Center, zur Internationalen Raumstation (ISS) geschickt.

„KOUNOTORI 6“ wurde vom Roboterarm der ISS (Canadarm-2, 17,6 Meter lang) eingefangen und an die ISS angedockt.

Nach dem Andocken an die ISS blieb das Raumfahrzeug sechs Wochen lang angedockt (während dieser Zeit führten die Astronauten Weltraumspaziergänge durch, um einige der ISS-Batterien durch neue, vom HTV-6 mitgeführte Batterien zu ersetzen).

Der TuPOD wurde dann mit Hilfe japanischer Astronauten vom japanischen Experimentmodul „KIBO“ aus an der ISS ausgesetzt.

TANCREDO I und OSNSAT wurden vom TuPOD-Satelliten/Deployer etwa drei Tage nach dem Start des TuPOD in die Umlaufbahn ausgesetzt, sobald der TuPOD weit genug von der ISS entfernt war.

Die Astronauten lösten den Start manuell aus, indem sie die JAXA-Freisetzungsvorrichtung „J-SSOD“ (Small Satellites Orbital Deployer) verwendeten, die speziell für die Freisetzung von Kleinsatelliten in die Umlaufbahn konzipiert ist.

Im Weltraum angekommen, übermittelten der TuPOD und TANCREDO-1 Telemetriedaten, die von Funkamateuren in aller Welt empfangen und entschlüsselt wurden.

„Die TuPOD-Mission“, so Chantal Cappelletti, Projektleiterin bei GAUSS, „war für eine Dauer von bis zu einer Woche geplant, dauerte aber länger als erwartet. Das System war nicht mit Solarzellen ausgestattet, so dass es unmöglich länger als ein paar Tage überleben konnte. Wir können die TuPOD-Mission als großen Erfolg betrachten, weil sie länger als erwartet Nachrichten übermittelt hat.“

„Während der Mission“, fügte Cappelletti hinzu, „hat Windform® XT 2.0 alle Flugqualifikationstests in komplexen Systemen, wie der Internationalen Raumstation, bestanden. Diese bis vor kurzem unvorstellbare Errungenschaft eröffnet zahlreiche Perspektiven für den Einsatz von Windform®-Materialien für Raumfahrtanwendungen.“

GAUSS ist insbesondere mit dem Verfahren der Pulverbettfusion mehr als zufrieden und betrachtet die Hochleistungsverbundwerkstoffe der Windform®-Familie als eine echte Revolution im Bereich der Kleinsatelliten. Außerdem setzt GAUSS sie für neue Projekte ein.“

Aus technischer Sicht stellt der TuPOD eine Innovation dar, da seine Struktur vollständig im 3D-Druck hergestellt wurde. Bei der Mission kam Spitzentechnologie zum Einsatz, und der TuPOD selbst stellt ein innovatives Produkt für den Weltraum dar, das entwickelt wurde, um eine neue Art von Pico-Satelliten, wie z. B. TubeSats, zu starten.

Stewart Davis erklärte: „Im Gegensatz zu vielen Technologien, die ursprünglich für die Luft- und Raumfahrt entwickelt und erst später für den Motorsport angepasst wurden, ist Windform® XT 2.0 ein Material, das speziell für den Motorsport entwickelt wurde.“ Windform® wurde ursprünglich von dem Partner von CRP USA, CRP Technology mit Sitz in Modena, Italien, für den Einsatz in der Formel 1 entwickelt, zunächst im Windkanal und dann auf der Rennstrecke. Davis kommentierte: „Unser Team freut sich sehr für Tetonsys, GAUSS, die Morehead State University, JAXA, das TANCREDO- und OSNAT-Team über den Erfolg ihrer Mission. Wir freuen uns darauf, auch weiterhin Komponenten für unsere Partner im Rennsport zu produzieren, und zwar mit einem Material, das sich sowohl auf der Rennstrecke bewährt hat als auch den zusätzlichen Bonus der Raumfahrt-Erfahrung mit sich bringt. TuPOD ist ein internationales Projekt, und die Windform®-Familie von Hochleistungsverbundwerkstoffen hat globalen Charakter. In der Tat decken wir vier Kontinente ab: Europa, Südamerika, Nordamerika und Asien.“

## Schlussfolgerungen

Diese Fallstudie zeigt, wie sich die Verwendung des ursprünglich für den Motorsport entwickelten Verbundwerkstoffs Windform® XT 2.0 in vielen Bereichen der Weltraumforschung durchsetzt.

Die Anwendung von theoretischem und praktischem Wissen war der Schlüssel zur Entwicklung und Herstellung des TuPOD. Die Kombination aus dem additiven Verfahren der Pulverbettfusion, Windform® XT 2.0 und CRP USA führte zu einem einteiligen, hochleistungsfähigen Kleinsatelliten, der gleichzeitig als Deployer dient und die hohen Anforderungen an Materialien in der Raumfahrt erfüllt.

Das Material Windform® XT 2.0 von CRP hat mit seinen laserzentrierten additiven Fertigungseigenschaften ein neues Spektrum an Möglichkeiten für Satellitenkonstrukteure geschaffen, die über standardisierte Anforderungen und Einschränkungen hinausgehen.

Windform-Materialien werden aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften häufig in Hochleistungsbereichen eingesetzt, und CRP USA ist der ideale Technologiepartner für den Einsatz von Windform® und additiver Fertigung.

CRP USA mit Sitz in Mooresville, North Carolina, befindet sich im Herzen des Industrie- und Fertigungszentrums des Südens und ist von einer wachsenden Luft- und Raumfahrtindustrie umgeben.

Mit mehr als einem Jahrzehnt Erfahrung im 3D-Druck und in der fortgeschrittenen Fertigung arbeitet CRP USA mit führenden Unternehmen der Branche zusammen, um funktionale Prototypen und Endkomponenten unter Verwendung der Hochleistungsverbundwerkstoffe aus der Windform®-Familie herzustellen.