



Wenn es heiß hergeht

Keramische Materialien für die Raumfahrt

Von Prof. Heinz Voggenreiter

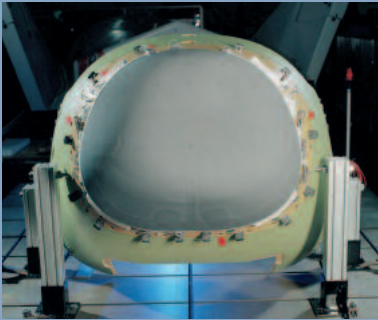
Das Ziel ist ehrgeizig: Die Ingenieure und Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt wollen die Leistungsfähigkeit von Wiedereintrittsfahrzeugen und Fluggeräten entscheidend verbessern. Gelingen soll das mit neuen keramischen Werkstoffen, so genannten faserverbundkeramischen Verbundmaterialien. Zugleich treiben neue Leichtbauweisen die technische Evolution hinsichtlich der Funktionalität, der Schadenstoleranz und der Herstellbarkeit voran. Anhand erfolgreicher Entwicklungen, aufwändiger Versuche und Flugeinsätze in der Raumfahrt, aber auch in der Luftfahrt und der Verkehrstechnik, konnten mit industriellen und universitären Partnern die Vorteile keramischer Werkstoffe als Hochtemperaturwerkstoff bereits eindrucksvoll gezeigt werden.

Der Autor ist Direktor der DLR-Institute für Bauweisen- und Konstruktionsforschung sowie für Werkstoff-Forschung.

Als weitere Experten für keramische Materialien in der Raumfahrt haben an diesem Beitrag mitgewirkt:

Dr. Hermann Hald, Leiter der Abteilung „Raumfahrt Systemintegration“ und **Hendrik Weihs**, Leiter des DLR-Projektes „SHEFEX-II“, beide vom Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung.

Dr. Jürgen Göring, Leiter der Abteilung „Keramische Struktur- und Funktionswerkstoffe“ und **Bernhard Heidenreich**, Leiter der Abteilung „Keramische Verbundstrukturen“, beide vom Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung.



X-38: Nasenkappe nach der Integration an X-38 in Houston im Oktober 2001

X-38 war als Technologie-Demonstrator der NASA für das Rettungsboot CRV (Crew Return Vehicle) für die internationale Raumstation ISS vorgesehen. Platziert auf einer Trägerrakete sollte später eine Weiterentwicklung zu einem eigenständigen Crew Transport Vehicle (CTV) möglich sein. Innerhalb des nationalen TETRA Programms (Technologien für zukünftige Raumtransportsysteme) wurden wesentliche Bauteile für das Thermalschutzsystem des Raumgleiters X-38 entwickelt, getestet, qualifiziert und an die NASA ausgeliefert. Neben der deutschen Industrie war auch das DLR in die Entwicklung von Bauteilen eingebunden.



SHEMIC: ein facettiertes Konzept für REX

Das SHEMIC Konzept (Sharp Edge Microgravity Capsule) ist ein Vorschlag für eine wieder verwendbare, frei fliegende Forschungskapsel für Experimente unter Schwerelosigkeit. SHEMIC nutzt konsequent alle im SHEFEX-Programm entwickelten und qualifizierten Technologien und kombiniert kostengünstige Bauweisen mit guten aerodynamischen Eigenschaften, die eine kontrollierte Rückkehr ermöglichen. Für die Forschung unter Schwerelosigkeit soll dem Experimentator für mehrere Tage eine sehr gute Forschungsumgebung mit möglichst geringen Restbeschleunigungen bei vertretbaren Missionskosten angeboten werden.

Schon seit Ende der 1980er Jahre sammeln die Ingenieure und Wissenschaftler des DLR-Instituts für Bauweisen- und Konstruktionsforschung in Stuttgart und des DLR-Instituts für Werkstoff-Forschung in Köln umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit den kohlenstofffaserverstärkten und oxidfaserverstärkten Verbundkeramiken. Faserkeramiken zeichnen sich im Gegensatz zu den metallischen Werkstoffen durch eine wesentlich geringere Dichte aus und sind auch im Temperaturbereich von 1.300 bis 1.800 Grad Celsius (°C) mechanisch noch voll belastbar.

Diese enorm leichten Verbundwerkstoffe werden daher überwiegend für den Hochtemperatureinsatz entwickelt und lassen sich durch Modifikationen in den Ausgangsmaterialien und Herstellprozessen gezielt für die spezifischen Einsatzbedingungen konditionieren. Neben der guten Hochtemperaturfestigkeit sorgt die geringe thermische Ausdehnung für eine hohe Formbeständigkeit bei extremsten Temperaturen verbunden mit exzellenter Thermoschockbeständigkeit.

Besonders hervorzuheben ist die für einen keramischen Werkstoff hohe Schadenstoleranz. Das von der konventionellen Keramik bekannte spröde Bruchversagen wird durch das Zusammenspiel der Kohlenstofffasern und der Matrix vermieden. Die Verbundkeramik widersetzt sich dem Bruch, in dem die entstehenden Risse durch die Fasern im Wachstum behindert werden. Der Fachmann spricht hier von einem quasi-duktilen Verhalten.

Wie gelangen diese verstärkenden Fasern ins Material? C-Faser verstärkte Keramiken werden zunächst



Wiedereintrittsfähiger Flugkörper SHEFEX – die zweistufige Trägerrakete auf der Startrampe

als Faserverbundkunststoff (FVK) hergestellt. Dessen Wärmebehandlung bei einer Temperatur von mehr als 1.600 °C in Stickstoffatmosphäre und eine anschließende Infiltration mit Silizium wandelt den Kunststoff in eine C-Faser verstärkte SiC-Keramik um. Für die oxidische Faserkeramik werden Oxidfaserbündel, in der Regel Aluminiumoxid, mit einer keramikhaltigen Emulsion infiltriert und zum Bauteil gewickelt. Im nachfolgenden Sinterprozess entsteht die Faserkeramik.

Das skizzierte Eigenschaftsprofil der Faserkeramik macht diese Werkstoffklasse zu einem idealen Kandidaten für die Anwendung in wiedereintrittsfähigen Raumfahrzeugen. Robuste, schadenstolerante und leichte Thermalschutzsysteme (Thermal Protection System – TPS) ermöglichen dem Raumfahrzeug einen unbeschädigten Wiedereintritt in die Atmosphäre der Erde oder anderer Planeten. Die faserkeramischen Eigenschaften erlauben den Konstrukteuren, dabei völlig neue Wege beim Strukturdesign zu beschreiten. Bis dahin ist es jedoch ein weiter Weg in der Materialentwicklung und der Materialanalyse. So lassen Anteil, Lage und die Länge der Fasern eine gezielte Einstellung der Materialeigenschaften zu und beeinflussen damit das Bauteildesign. Die Eignung des resultierenden Materials für den Wiedereintritt muss sich schließlich im Plasmawindkanal unter wiedereintrittsähnlichen Bedingungen erweisen.

Ende der 90er Jahre wurden im Auftrag der europäischen Raumfahrtbehörde ESA die Grundlagen für eine großflächig einsetzbare TPS-Struktur aus faserkeramischen Paneelen, Befestigungselementen, flexiblen Dichtungen und Isolation entwickelt, ge-

baut und getestet. Die Verfahrenstechnik, die Designkonzepte und die ausgeklügelten Verbindungselemente zwischen der heißen Außenhaut und der kalten metallischen Unterstruktur des Raumfahrzeugs stellen weltweit anerkannte Schlüsseltechnologien dar. Das Potenzial der Faserkeramik zeigte sich zudem bei der Realisierung und Qualifizierung der Nasenkappe für den NASA-Raumgleiter X-38 sowie bei der erfolgreich im atmosphärischen Wiedereintritt geflogenen TPS-Struktur auf der Außenstruktur der russischen Raumkapsel FOTON-M2. Ziel dieser Entwicklungen war ein möglichst robustes und schadenstolerantes Gesamtsystem, das unter operationellen Bedingungen zuverlässig arbeitet.

Die außergewöhnlichen Eigenschaften der Faserkeramiken führten im Zusammenspiel mit neuesten aerodynamischen Erkenntnissen zu grundlegend neuen Designkonzepten zukünftiger wiedereintrittsfähiger Raumfahrzeuge. Die Auflösung der bisherigen aerodynamisch gekrümmten Formen in eine facettierte Bauweise mit wenigen ebenen Strukturereichen und scharfen Vorderkanten ermöglicht eine signifikante Einsparung bei den Herstellungs- und Wartungskosten und verbessert die aerodynamischen Eigenschaften.

Die resultierenden Temperaturüberhöhungen an den Facettenkanten können dabei weitgehend von den Faserkeramiken ertragen werden. Die extrem belasteten Vorderkanten erfordern jedoch entweder innovative Kühltechniken oder einfache Bauweisen für ablativ strukturelle Elemente. Faserkeramiken ermöglichen durch ihre Mikroporosität und ihr gutmütiges Erosionsverhalten auch bei extremen thermischen Überlasten



Effusiv gekühlte Verbundwerkstoff-Mikrobrennkammer – mit einer Dichte zwischen 1,3 und 1,6 g/cm³ sind die Verbundwerkstoffe etwa fünf mal leichter als die heute eingesetzten Metalle



Belastungstest einer Hochleistungsbrems-scheibe aus Faserverstärkter Keramik



Keramische Radbrems-scheibe mit einem Durchmesser von 720 mm für Hochgeschwindigkeitszüge mit gefügten Kraft-einleitungselementen

vielversprechende Möglichkeiten, die in Testanlagen schon nachgewiesen wurden.

Die Forschungsarbeiten zu den Wiedereintrittsstrukturen gipfelten 2005 in der Entwicklung und im Flug des Fluggeräts SHEFEX-I (Sharp Edge Flight Experiment). Durch diese Flugmission konnte neben der Gewinnung aerodynamischer Flugdaten die Funktionalität des neuen Facettendesign-Prinzips nachgewiesen werden. Auf der Basis der ersten Erkenntnisse dieses 20 Sekunden dauernden Wiedereintrittsflugs von SHEFEX-I bei Mach 6 wird dieses Strukturkonzept konsequent vorangetrieben. Der in der Entwicklung befindliche leistungsgesteigerte Experimentalflugkörper SHEFEX-II zeichnet sich durch eine Verdoppelung der Geschwindigkeit sowie Dauer des nutzbaren Zeitfensters beim Wiedereintritt aus und wird voraussichtlich 2010 abheben. Neben der Erweiterung des Flugbereichs wird die Nutzlastspitze gegenüber SHEFEX-I deutlich vergrößert. Ein Schlüsselexperiment ist dabei ein Flugregelungssystem mit keramischen Steuerflossen (Canards), das in der Eintrittsphase eine aerodynamische Flugkontrolle ermöglicht.

Die Experimentphase beginnt mit dem Eintritt in zirka 100 Kilometern Höhe und während der Messphase wird etwa 11- bis 12-fache Schallgeschwindigkeit (etwa drei Kilometer pro Sekunde) erreicht. Bei dieser hohen Machzahl werden besonders an der Nutzlastspitze sowie an den scharfen Vorderkanten der Canards und Stabilisierungsflossen extreme

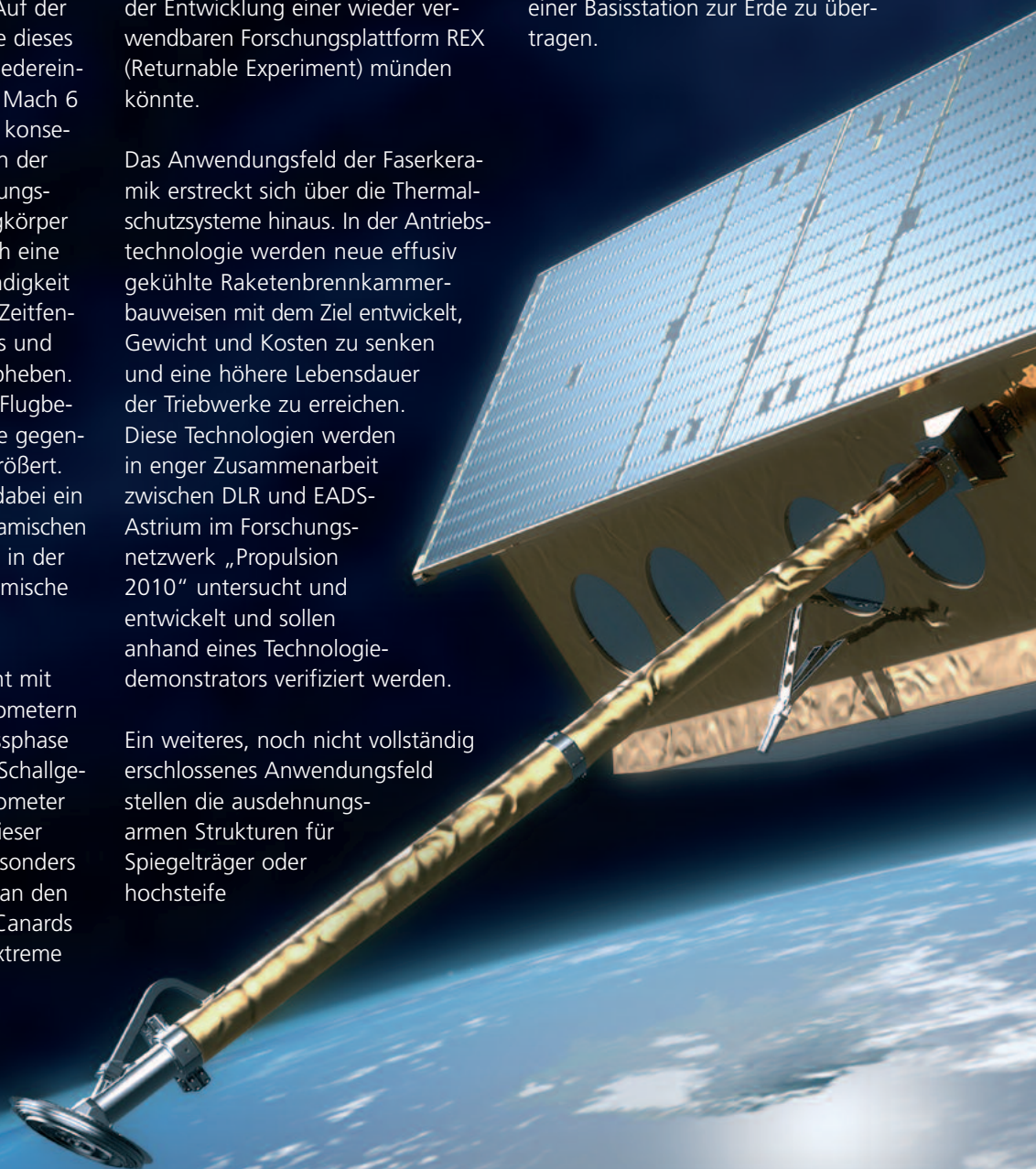
Wärmeflüsse erzeugt, die die Strukturen auf über 1.800 °C erhitzen. In Kombination mit dem Staudruck von bis zu vier bar stellt das eine enorme thermomechanische Belastung für die faserkeramischen Strukturen dar.

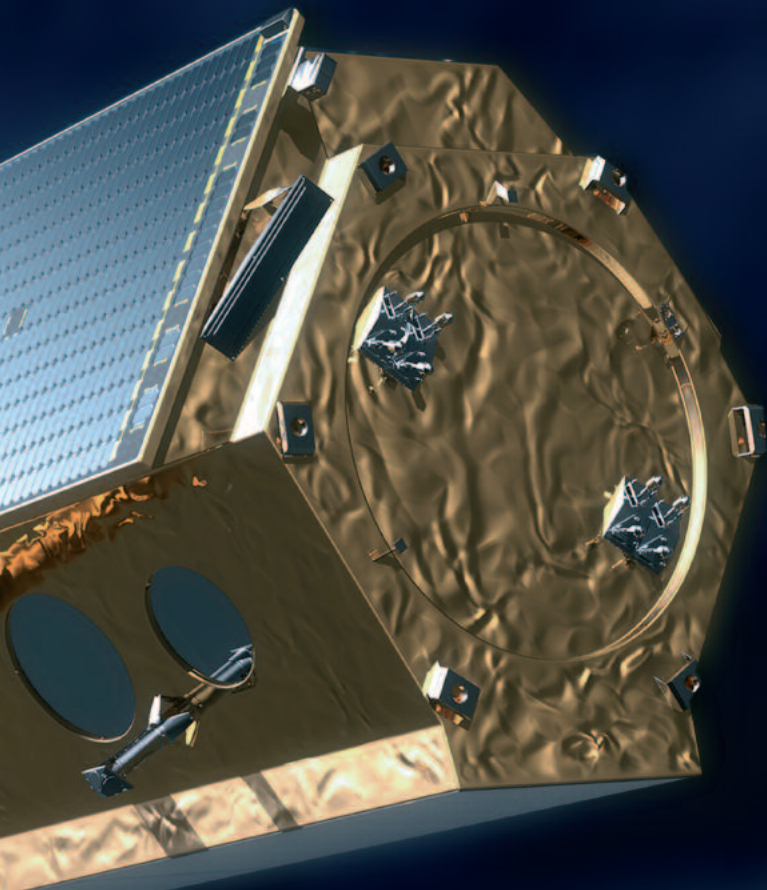
SHEFEX-II ist ein weiterer, wichtiger Schritt innerhalb der programmatischen Strategie zur Hyperschall- und Wiedereintritts-Technologieentwicklung, die in der nächsten Dekade in der Entwicklung einer wieder verwendbaren Forschungsplattform REX (Returnable Experiment) münden könnte.

Das Anwendungsfeld der Faserkeramik erstreckt sich über die Thermalchutzsysteme hinaus. In der Antriebstechnologie werden neue effusiv gekühlte Raketenbrennkammerbauweisen mit dem Ziel entwickelt, Gewicht und Kosten zu senken und eine höhere Lebensdauer der Triebwerke zu erreichen. Diese Technologien werden in enger Zusammenarbeit zwischen DLR und EADS-Astrium im Forschungsnetzwerk „Propulsion 2010“ untersucht und entwickelt und sollen anhand eines Technologie-demonstrators verifiziert werden.

Ein weiteres, noch nicht vollständig erschlossenes Anwendungsfeld stellen die ausdehnungsarmen Strukturen für Spiegelträger oder hochsteife

Teleskoprohre dar. Ein solches Teleskoprohr wird derzeit für den Laserkommunikationsterminal (LCT) der TerraSAR-X-Mission eingesetzt und wurde in Kooperation mit der Firma Zeiss Optroniks entwickelt. Die aus Faserkeramik endkonturnah gefertigte Rohrstruktur von 150 Millimetern Durchmesser und zwei Millimetern Wandstärke eignet sich auf Grund ihres ausdehnungsarmen Verhaltens bestens, um mittels Laser Daten zu einer Basisstation zur Erde zu übertragen.





Teleskoprohr für ein Laserkommunikations-terminal für TerraSAR-X (Zeiss Optroniks)

Wiedereintrittsfähiger Flugkörper SHEFEX

Folgende DLR-Institute und -Einrichtungen sind an SHEFEX-II beteiligt:

- Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Braunschweig und Göttingen und Abteilung Windkanäle, Köln
- Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, Stuttgart
- Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig
- Institut für Werkstoff-Forschung, Köln
- Institut für Raumfahrtssysteme, Bremen
- Mobile Raketenbasis (MORABA), Raumflugbetrieb und Astronauten training, Oberpfaffenhofen