



## Entwicklung einer Hochtemperatur S-Band- Sendeantenne für Hyperschall Wiedereintrittskörper zu Mess-Datenübertragung

F. Haßenpflug, M. Hörschgen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Mobile Raketen Basis  
Oberpfaffenhofen, D-82234 Wessling

### Einführung

Im Rahmen des Programms SHEFEX, bei dem unter anderem ein neues Temperaturschutzkonzept für hypersonische Flugbedingungen erprobt wurde, entstanden bei der Mobilten Raketenbasis (MORABA), die für die Durchführung des eigentlichen Flugversuchs verantwortlich war, neue und anspruchsvolle Anforderungen für die Übertragung der Experimentdaten per Telemetrie zum Boden.

Während der Experimentphase von SHEFEX, die während des stabilen Wiedereintritts des Flugkörpers im Höhenbereich von 90 bis 200 km stattfand, sollte eine vollständige Telemetrie-Datenübertragung der Sensoren und Experimente gewährleistet sein. Darin enthalten waren die Daten zur Positionsbestimmung über GPS. Seitens der Telemetrie wurden hierzu bisher üblicherweise Blade-Antennen im S- Bandbereich (2.25 GHz) eingesetzt. Da jedoch bei einer stabil eintretenden Nutzlast sehr hohe thermische Belastungen auch der Antennen selbst zu erwarten waren, wurde ein angepasstes Design der Antenne notwendig. Auch können bei sehr hohen Geschwindigkeiten Realgaseffekte wie Teilchenionisation und Plasmabildung auftreten, die Beeinträchtigungen bei der Datenübermittlung über elektromagnetische Felder nach sich ziehen. Dies wurde insbesondere in den späteren, weiter fortschreitenden, Flugexperimenten des Programms signifikant. Um diese Effekte zu berücksichtigen, abzuschwächen oder die Datenübertragung anderweitig robust und zuverlässig zu gestalten, waren weitergehende Untersuchungen notwendig.

Der überwiegende Anteil der Nutzlasten von Höhenforschungsraketen ist den Forschungsbereichen „Forschung unter Welt-raumbedingungen“ oder „Atmosphären-

physik“ zuzuordnen. In beiden Fällen ist die Experimentphase üblicherweise abgeschlossen, bevor die Nutzlast auf dem absteigenden Teil der Flugbahn wieder auf ingenieurstechnisch relevante Atmosphären-dichten trifft. Dies ist bei aerodynamischen oder aerothermodynamischen Versuchen zur Hyperschallströmung nicht der Fall – hier ist das „Experimentalfenster“ meist genau innerhalb der ingenieurstechnisch relevanten Atmosphäre während des Wiedereintritts, zwischen 90 und 20 km Höhe. Während normale Nutzlasten in diesem Teil der Atmosphäre instabil ausgelegt sind, also unkontrolliert taumeln sollen, um so möglichst stark abzubrem-sen und die Energie auf den gesamten Körper zu verteilen, ist dies bei Hyperschallnutzlasten nicht möglich. Jedoch haben auch bei Versuchen mit instabil ausgelegter Nutzlast Untersuchungen von geborgenen Raketenutzlasten gezeigt, dass es ein stabiles Eintrittsverhalten geben kann. Dieses führte durch lokale Konzentration der eingebrachten Energie teilweise zu Degradation (Abschmelzen des Antennenleiters und Isolierung) im Antennenkernbereich. Im Gegensatz zu konventionellen Höhenforschungsmissionen, bei denen der wissenschaftliche Schwerpunkt hauptsächlich im exoatmosphärischen Flugbereich liegt, müssen somit für das SHEFEX- Programm und ähnliche Flüge entsprechende Vorkehrungen getroffen werden.

### Anforderungen an Telemetrie-, GPS- und Telekommando- Antennen

Zur Echtzeit- Datenübertragung werden für diese Mission zum einen vier Blade-Antennen eingesetzt, die, gleichmäßig verteilt über den Umfang, parallel zur Längsachse ausgerichtet, an der Außen-

struktur der Nutzlast angebracht sind. Das Antennen- Strahlungsdiagramm zeigt somit eine vollständige Abdeckung. Während der Wiedereintrittsphase dürfen sich die Antennen nur in einem sehr engen Bereich mechanisch und elektrisch verändern. Um eine systemseitige Redundanz des Telemetriesystems sicherzustellen, waren zwei zusätzliche Patch-Antennen im Experimentkörper vorgesehen, die zur Datenübermittlung im Frequenzdiversity-Verfahren dienen. Bezüglich des Telekommando-Systems ist ebenfalls eine Redundanz implementiert, bei der jeder Empfänger seine eigene Antenne besitzt und unabhängig voneinander Telekommandos empfangen kann. Die Hochfrequenz-Strahlungsfeld Abdeckung der Telekommandoantenne entspricht einer Hemisphäre, wobei durch eine gegenüberliegende Anordnung der zwei Antennen ein allseitig vollständiger HF-Empfangsbereich erreicht wird. Die verwendete Telekommandoantenne ist mit einer HF-durchlässigen, hitzebeständigen, aerodynamischen Abdeckung aus hochtemperaturfestem Kunststoff versehen.

Das GPS Antennensystem besteht aus 2 GPS L-Band Flugkörperantennen gleichen Typs wie die S-Band Flugkörperantennen.

## Standard S-Band Antenne

Die bisherige S-Band Flugkörperantenne ist bereits aus einer hochtemperaturfesten Kupfer-Beryllium-Legierung (CuBe, Schmelzpunkt bei ca. 1030°C) gefertigt. Der HF-Anschluss besteht aus einer SMA-Buchse, deren Innenleiter auch aus der Kupfer-Beryllium-Legierung besteht. Dieser Innenleiter ist durch ein Teflon-Rundstück geschützt und kontaktiert die Antenne im oberen Teil. Diese Verbindung ist der Versorgungsanschluss der Antenne und bringt die Hochfrequenzenergie an den Antennenstrahler. Abb. 1 zeigt ein Modell der Standard-S-Band Flugkörperantenne. Bis heute sind über 500 Antennen dieses Typs auf Flügen der MORABA eingesetzt worden.

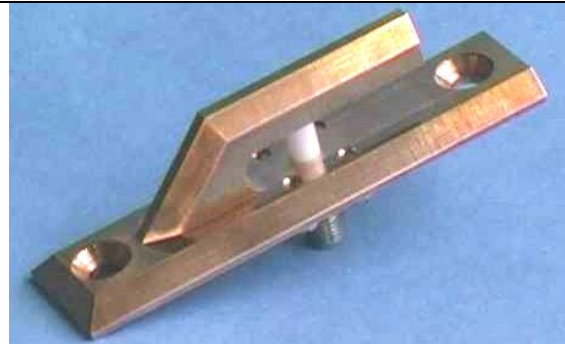


Abbildung 1 S-Band Flugantenne Standard

Einen guten Eindruck über die thermischen Belastungen der Antennen während der Mission zeigen die folgenden Abbildungen von geborgenen Antennen.

Abb. 2 und 3 verdeutlichen eine Degradation des Antennenanschlusses am Beispiel einer geborgenen Antenne einer Mikrogravitationsnutzlast (MAXUS). Er versorgt die Antenne mit der zu abstrahlenden HF Energie.

Hier ist der Extremfall bei einer sehr großen Flughöhe gezeigt. Man erkennt Verfärbungen der Legierung, durch die sich Rückschlüsse auf besondere Temperaturbelastungen und Strömungsverläufe anstellen lassen. Der Innenleiter und die Teflon-Isolation sind geschmolzen.



Abbildung 2 Geborgene S-Band Flugantenne Standard



Abbildung 3 Abgeschmolzener Antennen-Anschluss (MAXUS)

Diese hohen Temperaturen müssen punktuell und kurzzeitig aufgetreten sein, da das untere Teflonstück unversehrt ist. Aus den Verfärbungen lässt sich eine Seitliche Anströmung auf die Antenne ableiten, bei der der Innenleiter außerhalb des Strömungsschattens des Vorkörpers liegt. Dies

geschieht bei einem unkontrollierten Wiedereintritt, meist im sogenannten Flat Spin. Befindet sich der Innenleiter im Schutz des Vorkörpers, bleibt er unverseht, wie vergangene Flüge zeigen (TEXUS, MASER, MAXUS).

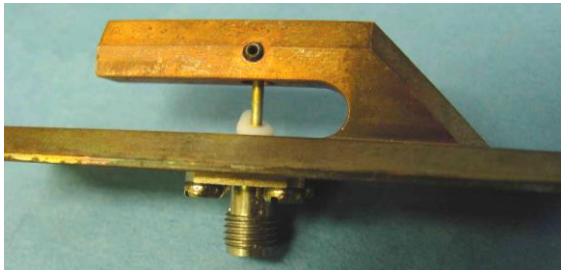


Abbildung 4 Abgeschmolzener Tefloneinsatz

In Abb. 4 lässt einen seitlichen Anströmwinkel von ca.  $35^\circ$  erkennen. Hier liegt der Innenleiter nicht mehr im Schutz des Vorkörpers. Das Abschmelzen des Teflonstücks lässt auf eine Temperatur von über  $300^\circ\text{C}$  bis unter  $900^\circ\text{C}$  schließen. Der Innenleiter ist leicht angelaufen, das innere Teflonstück der SMA-Buchse jedoch ist unverseht. Der obere Teil der Antenne zeigt kräftige Anlauffarben von schwarz bis violett. Man erkennt an den Anströmungsspuren das Strömungsverhalten, die in diesem Fall den Innenleiter noch unverseht lassen. Diese Erkenntnisse unterstützen das neue Antennen Design für höhere Temperatur Belastung.

## Neuentwicklung einer S- Band- Telemetrie und GPS Flugantenne

Um die Funktionalität der Antenne bei extremer Temperaturbelastung im Hyperschallbereich zu erhöhen, wurden verschiedene Überlegungen angestellt und Änderungen eingebracht, die zu einem Neudesign geführt haben. Abb. 5 zeigt ein S-Band Antennen Modell HT01 (Hoch Temperatur) Entwurf.

Der Vorkörper der Standard- Antenne erzeugt bei optimalen Anströmungsbedingungen (Anstellwinkel  $\alpha=0^\circ$ ) in seinem Nachlauf ein Rezirkulationsgebiet, in welchem durch Reduzierung der Machzahl höhere Temperaturen herrschen, und durch Verwirbelungen eine starke Konvektion entsteht. Das generelle Auftreten die-

ses Windschattenbereichs lässt sich durch den Aufbau der Antenne an sich kaum vermeiden. Der Vorkörper der Antenne wurde jedoch dahingehend modifiziert, dass die Verbreiterung und anschließende konische Verjüngung am Ende der Expansionsbereich vergrößert und nach vorne verlagert wird. So wird die direkte Expansion am Radius der Oberkante des Vorkörpers für den dahinter liegenden Strahler abgeschwächt. Vorkehrungen zur besseren thermischen Isolierung des Leiters können hier zusätzlich helfen. Die Teflon-Isolierung kann durch Oxydkeramik ausgetauscht werden, jedoch nicht ohne entsprechende Leistungsanpassung der Antenne für den gewünschten Frequenzbereich.

Schon bei leicht schrägen Anströmungsbedingungen ( $\alpha=1-10^\circ$ ) ist der Antennen-zentralbereich der Standardantenne der freien Anströmung ausgesetzt., Vergrößert sich der Anströmwinkel an der abge-schrägten Bodenplatte der Antennenunterseite, wird ein Verdichtungsstoß erzeugt, der, je nach Strömungsgeschwindigkeit, voll am Antennenleiter Dielektrikum liegt. Der im Modell HT01 nun keil-förmig ausgebildete Vorkörper mit einem Öffnungswinkel von  $30^\circ$  schützt den Leiter bei Anströmungswinkeln von bis zu jeweils  $15^\circ$  durch die größere Abschattung. Zusätzlich soll die Abrundung der Bodenplatte zu einem abgelösten Stoß bei Schräganströmung führen, der die Stoßwellen weiter vom Kernbereich entfernt.

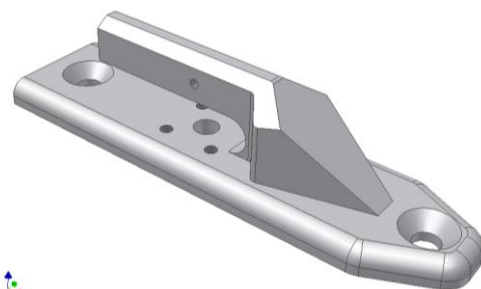


Abbildung 5 Entwurf der S- Band Flugantenne HT01

Die Thermalverteilung innerhalb von Vorkörper und Antennenstrahler wurde bisher nicht untersucht. Eine massivere Auslegung des Vorkörpers vergrößert dessen thermische Masse, so dass dieser den wesentlichen Anteil der durch die Anströ-

mung eingetragenen Energie aufnimmt. Weiterhin soll dies eine bessere Wärmeableitung in die Bodenplatte und auch in die Nutzlaststruktur bewirken.

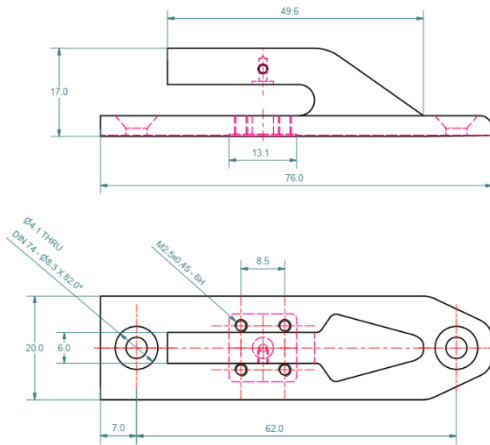


Abbildung 6 Abmessungen Entwurf S-Band Antenne HT01

Des Weiteren wurde der Pfeilungswinkel der Vorderkante von 45° auf 35° reduziert und die Auflagefläche der Bodenplatte vergrößert, für eine verbesserte Wärmeableitung an die Nutzlastaußenstruktur. Abb. 6 erläutert die Abmessungen des Antennenentwurfs HT01.

Eine Diskussion über anliegende und abgelöste Verdichtungsstöße hat zu einer zweiten Variante des Antennenentwurfs geführt, bei dem sämtlichen zuvor scharfe Kanten über einen Radius von 1.5 mm verfügen; Abb. 7 zeigt das entsprechende Modell HT02.

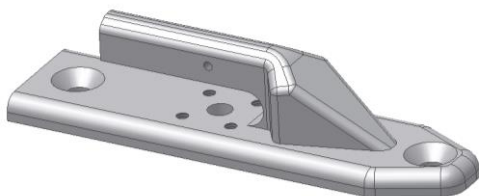


Abbildung 7 Entwurf S- Band Flugantenne HT02 abgerundet

Analog zur S-Band Antenne wurde eine GPS Flugkörperantenne entwickelt und hergestellt. Basierend auf dem S-Band Antennentyp HT01 wurde eine vorhandene zuvor vielfach bei Höhenforschungsmissionen eingesetzte GPS-Antenne in analogem Verfahren zu einer Hochtemperatur- GPS- Flugkörperantenne weiterentwickelt. Abb. 8 zeigt eine Darstellung.

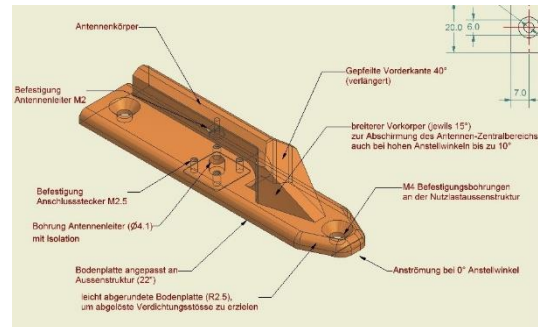


Abbildung 8 Entwurf GPS Antenne HTG01

## HF-Messungen

Bei der MORABA wurden verschiedene Messungen im Hochfrequenz-Bereich durchgeführt, um zunächst die einwandfreie elektrische Funktion der Neuentwicklungen zu bestätigen.

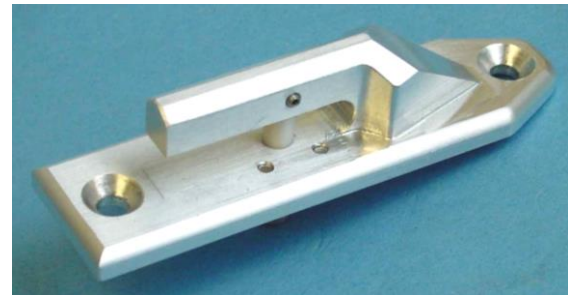


Abbildung 9 Prototyp Entwurf HT01A1

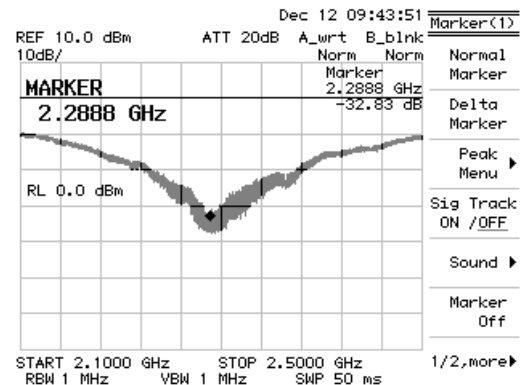


Diagramm 1 Reflexionsdämpfung Entwurf HT01A1

Für die Hochfrequenz-Messungen des Resonanzverhaltens und der Reflexionsdämpfung wurden zunächst von den beiden Prototypentwürfen Aluminiummodelle gefertigt.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der HF-Messungen der beiden Antennen Entwürfe eine Reflexionsdämpfung von >

20 dB bei einer Nutzbandbreite von 160 MHz.

Abb. 9 zeigt den Al-Prototyp des Antennenentwurfs HT01AI, Diagramm 1 stellt die zugehörige Reflexionsdämpfungskurve dar.

Der Al-Prototyp des Antennenentwurfs HT02AI ist in Abb. 10 gezeigt, die zugehörige Rückflussdämpfungskurve in Diagramm 2. Für eine Bandbreite von 120 MHz ergibt sich eine Anpassung von mehr > 20 dB Reflexionsdämpfung.



Abbildung 10 Prototyp Entwurf HT02AI

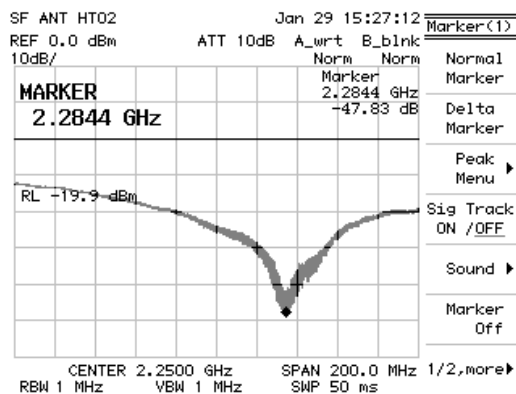


Diagramm 2 Reflexionsdämpfung Entwurf HT02AI

Die Flughardware- Antennen wurden entsprechend den Entwürfen HT01/02 aus der Kupfer- Beryllium- Legierung (CuBe) hergestellt Für sie ergeben sich die folgenden Kenndaten (siehe Abb. 11 und Tabelle 1).



Abbildung 11 S-Band Flugkörperantenne HT04 in CuBe

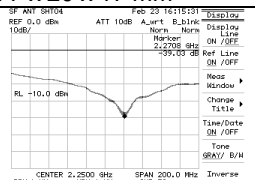
Antenna Type	S-Band Antenne HT
S/N	HT04
Frequency Range	2210-2330 MHz
Gain	0 dB
Polarization	linear
Pattern Coverage	hemispherical
Input Impedance	50 Ω
Return Loss	> 10 dB
RF Power	50 W CW
RF Connector	SMA female (VA2)
Material	CuBe
Mass	0.070 kg
Dimensions	77 x 20 x 17 mm
Return Loss	
Resonance at	2271MHz
Temperature Range	TBD

Tabelle 1: Antennendaten SBHT23/HT04

Bei den GPS-Flugkörperantennen sind zunächst als Aluminium-Prototyp vermessen worden und zeigten die gewünschten HF-technischen Ergebnisse.

Antennentyp	GPS HT Antenne
S/N	SXG3
Frequenzbereich	1535-1655 MHz
Return loss	besser 10 dB
Leistung	50 W
Antennendiagramm	hemispherical
Polarisation	linear
Gewinn	0 dBi
Material	CuBe
Anschluß	SMA Buchse (VA 2)
Temperaturbereich	-200 bis 1000 °C *
Gewicht	100 g
Abmessungen	93,5x20x20
* Temperaturbereich gültig für kontrollierten ballistischen Flug	

Tabelle 2: Antennendaten GPS HT

Tabelle 2 zeigt die im Labor gemessenen Daten der GPS-Flugkörperantenne.

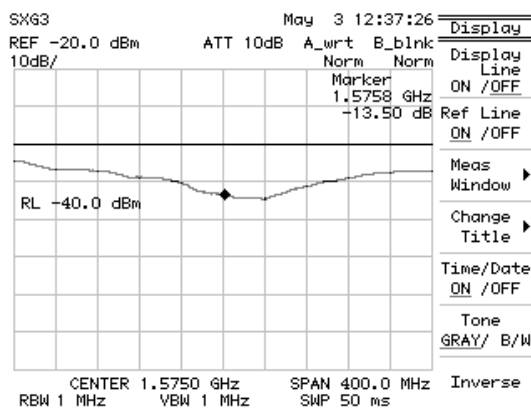


Diagramm 3 Reflexionsdämpfung GPS-Flugkörperantenne SXG3

Eine GPS-Antenne wird als Empfangsantenne verwendet und ist mit einem Reflexionsfaktor von 13 dB ausreichend (siehe Diagramm 3).



Abbildung 12 GPS-Flugkörperantenne SXG3 in CuBe.

## Windkanal-Messungen

Um die konstruktiven Änderungen qualitativ und quantitativ bewerten zu können, sind Vergleichsmessungen der drei verschiedenen S-Band-Flugkörperantennen (Standard, HT03 und HT04/R05) im Windkanal durchgeführt worden, wobei der Schwerpunkt auf den Temperaturmessungen lag. Hierzu wurden drei spezielle PT100-Thermoelemente, entsprechend platziert am Antenneninnenleiter im Kernbereich, am Antennenanschluss Teflon und an der Bodenplatte. Zusätzlich wurden Infrarotaufnahmen erstellt und mit Pyrometer-Messungen ergänzt (oberhalb 550°C). Auch wenn absolute Temperaturaussagen für stabile Wiedereintrittsbedingungen nur schwer zu gewinnen sind, ist eine relative Betrachtung der Antennen in jeder Hinsicht aufschlussreich für die Optimierung.

Die Umgebungsbedingungen für einen stabilen Wiedereintritt variieren in einem Machzahlbereich von Mach 7-8 und einer Zeitspanne von 30 sec bis zu einer Minute. Abschätzungen der damit verbundenen thermischen Belastungen liegen grob bei einer Aufheizung der Antenne bis ca. 800°C, wobei sich natürlich lokal deutliche Überhöhungen einstellen können. Für einen Wiedereintrittspunkt in 40 km Höhe ergeben sich folgende Parameter und Anströmbedingungen:

Machzahl

$$M = 7.5 \quad (v = 2350 \text{ m/sec})$$

Referenzlänge

$$l_{ref} = 0.076 \text{ m} \quad (l_{refStd} = 0.070 \text{ m})$$

Dynamische Viskosität

$$\eta_{40km} = 1.6009 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

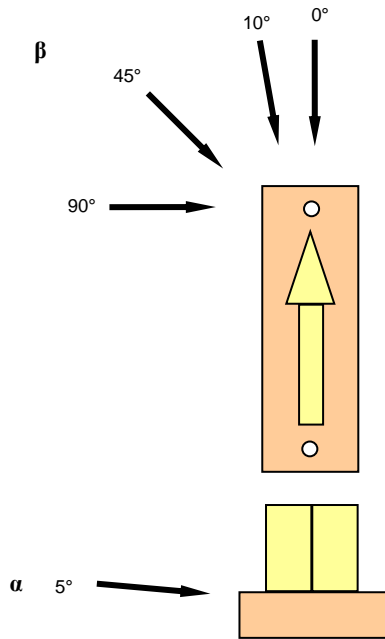
Dichte

$$\sigma_{40km} = 0.0066487 \text{ kg/m}^3$$

Reynoldszahl

$$Re = 7.4 \cdot 10^4 \text{ bzw. } Re_m = 9.7 \cdot 10^5$$

Die Darstellung 1 verdeutlicht die verschiedenen Anströmbedingungen bei den Versuchen, wobei der Anstellwinkel Alpha konstant bei +5° kanalbedingt bleibt und der Gierwinkel (Drehwinkel Beta) diskret variiert wird, um verschiedene Fluglagen zu simulieren.



Darstellung 1: Variation des Gierwinkels (Drehwinkel Beta) bei konstantem Anstellwinkel (Alpha)

Die Versuche wurden in dem lichtbogenbeheizten Windkanal L3K des DLR (Bild 17), Abteilung AS-HYP, in Köln-Porz durchgeführt und unterstützt (weitere Informationen im Internet unter [Lichtbogenbeheizter Windkanal \(L3K\) - DLR Portal](#)). Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Leistungsdaten des Windkanals.



Abbildung 13 L3K, DLR AS-WK Köln- Porz

Elektrische Leistung	6 MW
Düsenaustrittsdurchmesser	100, 200, 300 und 400 mm
Machzahl	5 bis 10
P <sub>tot</sub> -Druck	15 bis 350 hPa
Reynoldszahl	bis 10 <sup>5</sup> m <sup>-1</sup>
Totalenthalpie	6 bis 25 MJ/kg
Kaltwand-Wärmefluss	bis 4000 kW/m <sup>2</sup>
Testdauer	bis 30 Minuten

Tabelle 3: Leistungsdaten L3K

Die Versuche wurden jeweils beendet, wenn die Temperatur des Thermoelement

Teflon zwischen Antennenboden und Teflonteil den Wert von 300°C überstieg. (mit Ausnahme des ersten Versuchslaufs Standard-Antenne bei Beta= 0°).

Das Thermoelement Antenne war direkt am Antennenstrahlerelement mit einer Stiftschraube befestigt und wurde als Messpunkt für die Maximaltemperatur gewählt.

## Messergebnisse

Zunächst wurde eine Betrachtung des Standard-Antennentyps (Standard) für verschiedene Anströmungsbedingungen durchgeführt. Bild 18 zeigt die gemessene Antennenkerntemperatur (Thermoelement Antennenleiter) in Abhängigkeit der Messzeit für Beta = 0°, 10°, 45° und 90°. Generell ist bei den Winkeln größer 10° des Gierwinkels Beta zu sehen, dass die gemessenen Temperaturen im Antennenkernbereich schneller ansteigen und auch größere Werte erreichen (Maximaltemperatur bei  $\beta=90^\circ$   $T_{\max}= 800^\circ\text{C}$ ), je größer die Schräganströmung ist. Der Antennenvorkörper verliert somit seine schützende Wirkung. Die Temperaturdifferenz zwischen optimaler Anströmung bei 0° und dem Extremfall 90° liegt bei Abbruch der Messung nach 25 sec bei über 390°C. Der Abbruch erfolgte bei 300°C am Thermoelement Antennenanschluss Teflon.

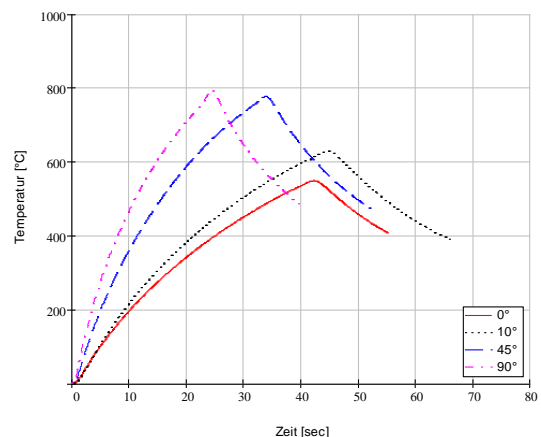


Diagramm 4 Temperatur der Standard-Antenne unter verschiedenen Drehwinkeln, Temperatursensor ist am Antennenstrahler.

Diagramm. 4 bis 7 stellen eine Übersicht der drei getesteten Antennen jeweils bei den gleichen Anströmbedingungen ( $\beta=0^\circ$ ,

45° und 90°) dar. Die Temperaturmessungen bestätigen hier die Vorüberlegungen der Entwürfe.

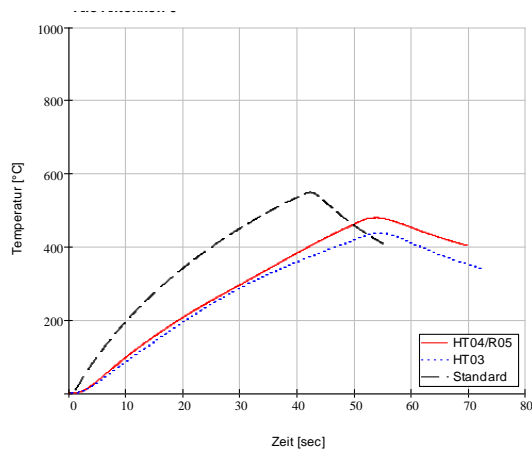


Diagramm 5 Temperaturen der Antennen HT03, 04 und Standard mit dem Drehwinkel  $\beta = 0^\circ$

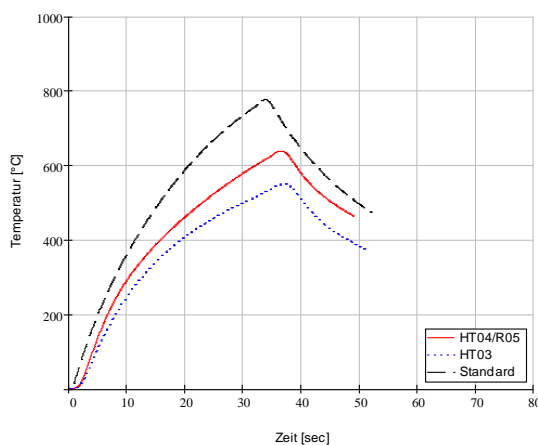


Diagramm 6 Temperaturen der 3 Antennen mit dem Drehwinkel  $\beta = 45^\circ$

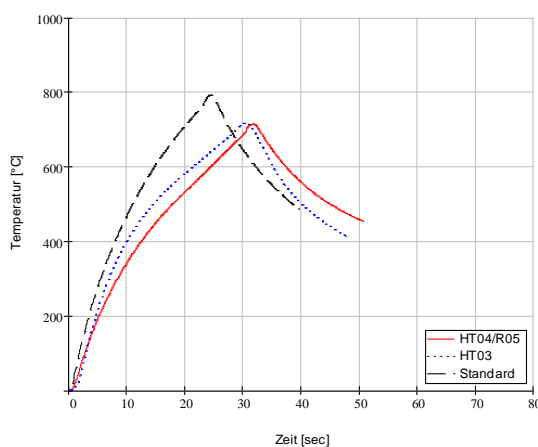


Diagramm 7 Temperaturen der 3 Antennen mit dem Drehwinkel  $\beta = 90^\circ$

Die Wärmeenergie kann bei den Antennenmodellen HT03 und HT04 deutlich

besser an die Außenstruktur abgegeben werden, was zu einer geringeren Steigung beim Temperaturanstieg führt. Zudem erkennt man die verbesserte Schutzwirkung des Antennenvorkörpers und Modifikation der Bodenplatte, die auch bei schräger Anströmung guten Thermalschutz bieten. Auffallend ist, dass bei 45° Anströmwinkel das Antennenmodell HT03 (scharfkantig) Vorteile bietet, wogegen bei 90° Anströmwinkel der Antennenentwurf HT04R05 (abgerundete Kanten) geringfügig besser ist. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die Temperaturdifferenzen bei Beendigung der Versuche gegenüber der Standard-Antenne.

Drehwinkel $\beta$	Zeitpunkt sec.	Temperaturdifferenz zur Standard-Antenne
0°	40	$\Delta T = 175^\circ\text{C}$ (HT03)
45°	30	$\Delta T = 236^\circ\text{C}$ (HT03)
90°	25	$\Delta T = 187^\circ\text{C}$ (HT04)

Tabelle 4: Übersicht der Temperaturdifferenzen zwischen HT und Standard Antennen

Die Zeit bis zum Erreichen der kritischen Temperaturen 300°C, am Thermoelement Teflon gemessen, lassen sich durch die neuen HT Antennen um bis zu 15 Sekunden verlängern, was bei Einsatzzeiten des Wiedereintritts von 30 bis 60 Sekunden entscheidend sein kann.

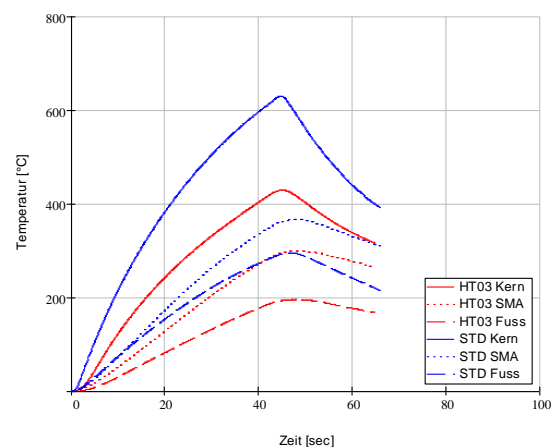


Diagramm 8 Vergleich der Temperatursensoren mit Antenne Standard und HT03 bei  $\beta = 10^\circ$

Diagramm 8 stellt abschließend noch eine Übersicht über alle drei Temperaturmesspunkte an den Versuchsantennen Standard und HT03 bei einem Drehwinkel  $\beta$  von 10° dar. Die gleichen Beobach-



tungen, die für die Antennenkerntemperatur angestellt wurden, lassen sich auch bei den Temperaturmessstationen am SMA-Anschluss und Antennenfuß bestätigen. Unterstützend zu den Temperaturmessungen wurden Infrarot-Videoaufnahmen aufgezeichnet (Minolta Pyrometer). Eine quantitative Auswertung ist hier kaum möglich, jedoch bieten die Aufzeichnungen eine gute Möglichkeit qualitative Aussagen zu ‚Hot Spots‘ zu treffen.

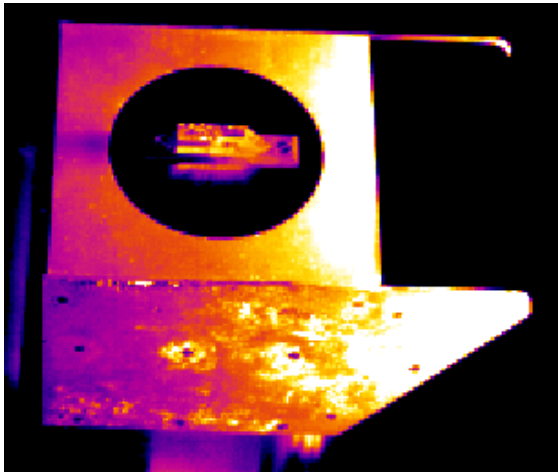


Abbildung 14 Eine IR- Aufnahme der Standard-Antenne,  $\text{Beta} = 0^\circ$ ,  $t = 40\text{sec}$  (Minolta Pyrometer)

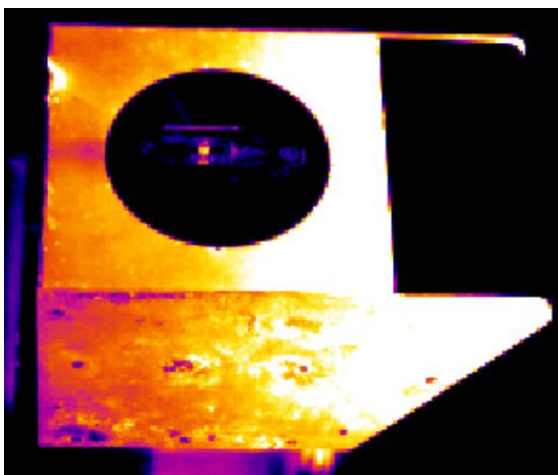


Abbildung 15 Eine IR- Aufnahme der Antenne HT04R05,  $\text{Beta} = 0^\circ$ ,  $t = 40\text{sec}$  (Minolta Pyrometer)

Die Abb. 14 zeigt die Standard- Antenne auf dem Probenhalter bei dem Drehwinkel  $\text{Beta} = 0^\circ$ . Auf der Abb.15 sieht man die Antenne HT04R05, ebenfalls bei  $\text{Beta} = 0^\circ$ . Die Aufnahmen entstanden kurz vor Beendigung der Messung bei  $t = 40$  Sekunden und verdeutlichen die starke thermische

Belastung des gesamten Antennenkörpers der Standard-Antenne, während bei Antenne HT04R05 nur gering erwärmte Bereiche am Antennenarm und im Zentralbereich zu erkennen sind.

## Flugversuche

Bei einem Testflug einer neuen Höhenforschungsrakete im Oktober 2004 in Alcantara, Brasilien, hat die MORABA vier Testantennen an der Außenstruktur eines 14“ Nutzlastmodule montiert und während des Fluges testen können. Die Testantennen bestanden jeweils aus zwei Antennenpaaren, die zueinander leicht versetzt im geringen Abstand zueinander montiert waren (Abb.16), um möglichst gleiche Anströmungsbedingungen zu gewährleisten.



Abbildung 16 Montage der Testantennen an der Nutzlaststruktur

Für die Aufstiegsbahn des Vehikels ergab sich ein stabiler Flugzustand mit einem maximalen Anstellwinkel von bis zu  $2^\circ$ . Während des Wiedereintritts kam es jedoch zu einer Trudelbewegung der Nutzlast mit ständig wechselnden Bedingungen, was keine großen thermischen Belastungen für die Antennen erlaubte. Antennenpaar 1 bestand aus einer Standard-Antenne (STD) und einer HT Antenne (SBHT23), in die im Antennenzentralbereich jeweils ein Thermoelement PT 100 mit Teflon- Ummantelung integriert war.



Abbildung 17 S-Band Testantennen mit Teflonummantelter Temperatursensor

Antennenpaar 2 bestand aus den gleichen Flugkörperantennen, jedoch ohne Teflon-Schutz des Thermoelements.



Abbildung 18 S-Band Testantennen ohne Teflon-Ummantelung

Diagramm 9 und 10 stellen die zwei interessanten Phasen des Fluges beim Aufstieg und Wiedereintritt heraus. Ähnlich wie bei den Versuchen im Windkanal erkennt man auch in der Aufstiegsphase einen deutlichen Unterschied beim Anstieg der Temperatur. Die neuen HT Antennen zeigen eine langsamere Erwärmung und auch bis zu 30°C geringere Spitzentemperaturen. Generell kommt es beim Antennenpaar 2 ohne den Teflon-Schutz zu einer schnelleren Erhitzung.

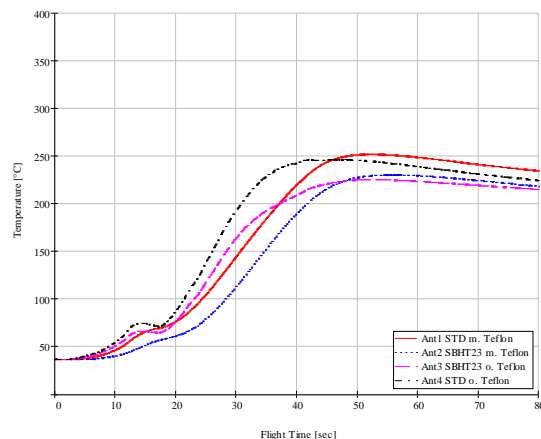


Diagramm 9 Flugversuch Aufstiegsphase

In Diagramm 10 sieht man die gemessenen Temperaturen während des Wiedereintritts der Nutzlast in die Erdatmosphäre. Auch bei einem instabilen Flugzustand kann man gut erkennen, dass für die einzelnen Antennenpaare annähernd die gleichen Anströmungsbedingungen gelten. Antennenpaar 1 ist hier einer Schräganströmung ausgesetzt und zeigt höhere Temperaturen.

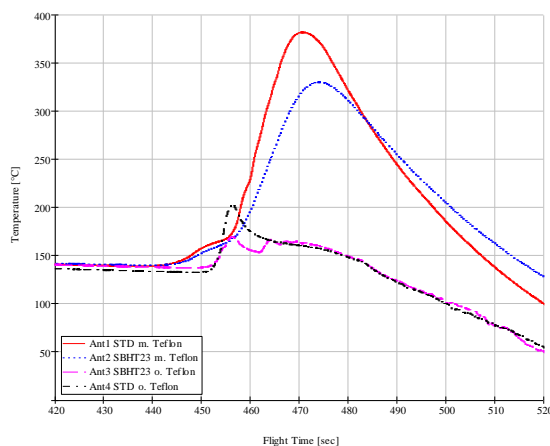


Diagramm 10 Flugversuch Wiedereintritt

Aber auch hier bestätigen sich die Windkanalmessungen mit geringeren Temperaturen für die Neuentwicklungen. Allerdings liegen die hier gemessenen Temperaturen weit unter den für einen stabilen Wiedereintritt typischen Werten.

Im Oktober 2005 (SHEFEX 1) und Juni 2012 (SHEFEX 2) wurden die SHEFEX Flugexperimente erfolgreich gestartet. Die Auswertung der vom Flug gewonnenen Qualitativ lässt sich sagen, dass die Datenübertragung mit den neuen Hochtemperatur- S-Band- und GPS -Antennen ei-



nen permanente Datenübertragung und die Navigationslösung während des gesamten stabilen Wiedereintrittsfluges gewährleistet werden konnte. Hierbei wurden Spitzentemperaturen am Experimentstau- punkt von 1600°C gemessen.

## Zusammenfassung

Die verschiedenen durchgeführten Windkanaltests, sowie zwei Testflüge auf Höhenforschungsraketen konnten die im Vorfeld angestellten Überlegungen zur Entwicklung einer hochtemperaturbeständigen S-Band Telemetrie- und GPS-

Antenne bestätigen. Es konnte eine deutliche Verbesserung bei der Wärmeableitung in die Struktur, und auch geringere Empfindlichkeit bei schräger Anströmung erzielt werden. Die zum Einsatz kommenden Antennen sind S-Band sowie GPS-Antennen des Typs SBHT 23 bzw. GPS HT. Im Hinblick auf die Hochfrequenz technischen Eigenschaften zeigten sich bei den Testflügen keine wesentlichen Unterschiede gegenüber der Standardantennen. Die Herstellungskosten sind gegenüber dem Standardmodell unwesentlich größer. Dieser Antennentyp wurde 2007 patentiert (Patentschrift DE 10 206 024 129 B3 2007.09.27)