

# HeiDAS UH – EIN HEISSDAMPFAEROSTAT MIT ULTRA-HEISS-PERFORMANCE

Alexander Bormann; Stefan Skutnik  
Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Marchstr. 12, 10587 Berlin

## 1 ÜBERSICHT

Das HeiDAS Projekt untersucht den Einsatz von überhitztem Wasserdampf als alternatives, vergleichsweise preiswertes und leistungsfähiges Traggas für moderne Aerostaten.

HeiDAS steht für Heißdampf-aerostat und UH für Ultra-Heiß.

Innovative Materialien und Bauweisen sowie moderne Rechen- und Simulationen ermöglichen heute erfolgreich in die Tat umzusetzen, was schon vor hundert Jahren erdacht und patentiert worden war [1].

Der erste HeiDAS Erprobungsträger erhob sich am 7. Mai 2003 mit einer Dampf-temperatur von etwas mehr als 100°C in die Lüfte [2]. Diese Welt-premiere demonstrierte einerseits die Tragfähigkeit des Dampfes und bestätigte andererseits die Isolationswirkung des Folienisolators und die Ergebnisse der numerischen Simulationen [3, 4]. Eben jene CFD Analysen gaben später im Rahmen von Parameterstudien auch die Empfehlung, dass durch die Anhebung des Temperaturniveaus z.B. am Wärmetauscher von 140°C auf 220°C unter Beibehaltung des kondensatfreien Betriebs eine drastische Reduktion der Isolation möglich ist [5]. Dieser Empfehlung folgend wurde der HeiDAS UH, ein Ballon aus Polymerwerkstoffen mit einer Temperaturbeständigkeit von bis zu 350°C, innerhalb eines Jahres entwickelt, gebaut und getestet.

Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über die Anforderungen, Entwicklungsstufen und Leistungsdaten der wesentlichen Komponenten und schließt mit einem Vergleich der HeiDAS Dampfballone mit konventionellen Heißluftballonen ab.



*Bild 1: HeiDAS UH während eines Dampf- flugs.*

## 2 NEUE HÜLLENWERKSTOFFE

Konventionelle Hüllenwerkstoffe für Heißluft- oder Gasballone bestehen aus leichtem Polyester- oder Polyamidgewebe, welches insbesondere zum Zwecke der Gasdichtigkeit beschichtet ist.

Als Gasballone bezeichnet man gemeinhin Helium oder Wasserstoffballone. Stoffe für diese Ballone, mit Butyl oder Polyurethan beschichtet, werden bei der Fertigung der Hülle verklebt bzw. geschweißt.

Stoffe für Heißluftballone müssen luftundurchlässig sein und müssen Hüllentemperaturen von bis zu 140°C und intensiver UV Einstrahlung widerstehen. Bild 2 zeigt die Temperaturverteilung an der Hülle eines Heißluftballons in Fahrt. Die maximalen Temperaturen treten hier in der Nähe des Brenners und (obwohl nicht gezeigt) am Scheitelpunkt in der Nähe des Parachute Verschlusses auf. Große Bereiche einer Ballonhülle weisen jedoch deutlich geringere Temperaturen auf.

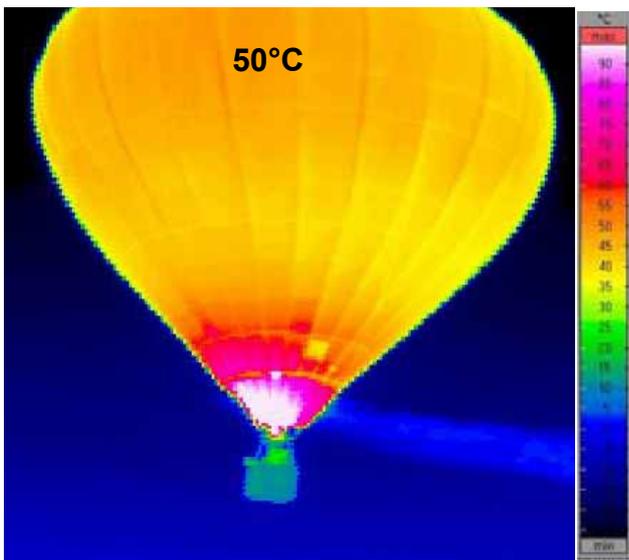


Bild 2: Thermographie eines Heißluftballons in Fahrt bei Brennerbetrieb.  $V = 3000 \text{ m}^3$ ,  $\varepsilon = 1.0$ ,  $T_{\text{amb}} = 16^\circ\text{C}$ ,  $m_{\text{TO}} = 768 \text{ kg}$  [6].

Bei Heißluftballonen haben sich Polyamid und Polyestergewebe mit Beschichtungen aus Silikon bzw. aus Silikon/PU Mix bewährt. Die einzelnen Bahnen werden lediglich vernäht. Die Haltbarkeit der Hüllen liegt bei ca. 500 Betriebsstunden.

Die Hülle eines Dampfballons ist mindestens den gleichen Temperaturen ausgesetzt. Wenn keine Kondensation des auftreten soll, so müssen im Innern des Dampfbehälters nicht weniger als 100°C vorherrschen. Die maximalen Hüllentemperaturen liegen jedoch bis zu 20°C über den Minima.

Damit während des Fluges das Temperaturniveau erhalten bleibt und der Dampf nicht abgekühlt besitzt der Dampfballon eine Beheizung. Der Teil der Hülle, der die Beheizung durch Heißluft von dem Traggas trennt fungiert als Wärmetauscher. Hier werden bisher übliche Temperaturbereiche bei weitem überschritten. Für einen praktikablen Betrieb

des Dampfballons werden am Wärmetauscher dauerhaft Temperaturen von 260°C angestrebt. Kurzzeitige Spitzenwerte können auch darüber liegen.

Um einerseits Brennstoff zu sparen und andererseits die Minimaltemperaturen für kondensatfreien Betrieb zu garantieren, ist eine Isolation erforderlich. Der für den HeiDAS optimierte Super-Isolations-Flock-Dämmstoff (AeroSIFD) weist eine Wärmeleitfähigkeit von nur 0.0275 W/mK bei einer Dichte von 8.5 kg/m<sup>2</sup> auf und ist allen marktüblichen Dämmstoffen hinsichtlich Leichtigkeit, Temperaturbeständigkeit und reversibler Komprimierbarkeit überlegen [2, 7].

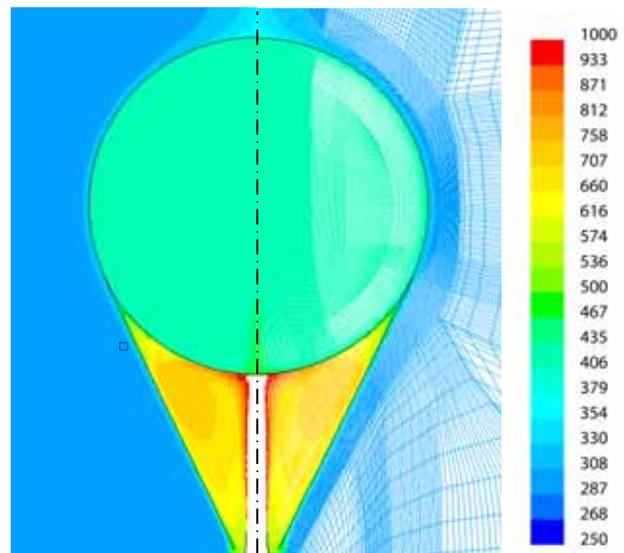


Bild 3: Berechnete Temperaturverteilung im Innern des HeiDAS UH Dampfballons.  $\log(T)$  in K. (Fluent 6.1, axi, dp, sst-k- $\omega$ ).

Bild 3 zeigt die mittels CFD Analyse bestimmte Temperaturverteilung im HeiDAS UH (näheres zur CFD Simulation befindet sich in [5]).

Obwohl im Bereich der Beheizung Temperaturen von über 1000°K bestimmt werden, erreicht der Beheizungsrand am unteren Scheitel im Sektor von +/- 15 Grad im Mittel „nur“ 230°C. Dabei werden Dampftemperaturen von 150°C erreicht.

Das Hauptproblem bei der Materialwahl insbesondere der Gaszelle, stellt nicht die Temperatur sondern vielmehr die Beanspruchung durch Wasserdampf dar, welches als aggressives und korrosives Medium bekannt ist. Wasserdampf bewirkt in Verbindung mit Wärme eine relativ schnelle Degradierung der meisten Kunststoffe. Die Folge sind Versprödung und Festigkeitsverlust. Zudem diffundieren Wasserdampfmoleküle aufgrund ihrer Polarität trotz relativer Größe wesentlich schneller

durch Barrierschichten hindurch, als atomare Traggase wie Helium oder die winzigen Wasserstoffmoleküle. [8]

Die erfolgreiche Entwicklung eines dampfdichten sowie dampf- und temperaturbeständigen Materialverbunds markiert somit einen wichtigen Meilenstein in der HeiDAS Entwicklung.

Bild 4 zeigt die gewichtsspezifische Dampfdichtigkeit der HeiDAS Hüllen-Basisfolie im Vergleich zu klassischen Ballonstoffen und anderen Polymerfolien.

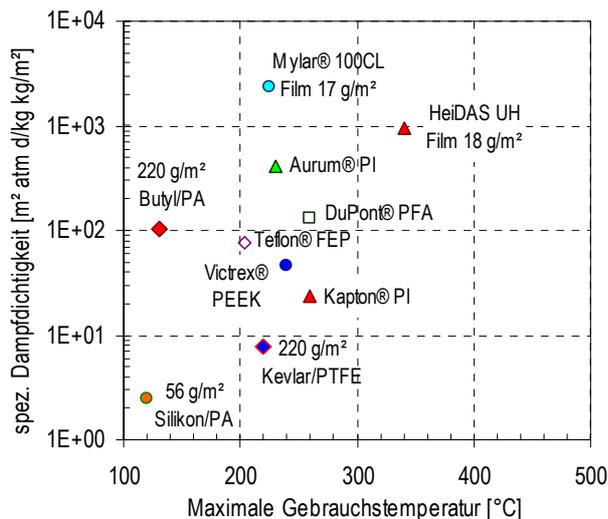


Bild 4: Spezifische Dampfdichtigkeit versus maximale Gebrauchstemperatur von Folien und beschichteten Geweben.

Die spezifische Dichtigkeit ist ein Maß für jene Fläche eines Stoffs mit einem Einheits-Flächengewicht von einem  $\text{kg}/\text{m}^2$  durch welche ein Kilogramm Dampf am Tag bei 1,013 Bar Partialdruckunterschied entweicht. Zu Vergleichszwecken wurde die Dampfdichtigkeit nach DIN 53122 bzw. ASTM E96 bei  $38^{\circ}\text{C}$  bestimmt und den Katalogwerten der Folienhersteller gegenübergestellt.

Für Heißluftballone übliche gasdichte Silikon-Beschichtungen weisen eine extrem geringe Dampfdichtigkeit auf. Wasserdampf entweicht aus einer solchen Hülle etwa 200-mal so stark, wie Helium. Verwendet man hingegen butylbeschichtete Stoffe, so erhält man die 40-fache spezifische Dichtigkeit. Da diese Stoffe mit  $220 \text{ g}/\text{m}^2$  jedoch etwa viermal so schwer sind, entweicht nur noch  $1/160$ tel des Dampfes. Nachteil der butylbeschichteten Polyamidgewebe ist die vergleichsweise geringe Gebrauchstemperatur von  $120^{\circ}\text{C}$ .

Die höchste Dampfdichtigkeit in dieser Gegenüberstellung erreicht Mylar®, welches bis  $220^{\circ}\text{C}$  beansprucht werden darf. Jedoch lassen die Festigkeits-

werte von Mylar® bei hohen Temperaturen schnell nach und der Werkstoff degradiert bei Dampfbeanspruchung sehr stark.

Der für den HeiDAS UH ausgewählte Barrierefilm hat mit  $340^{\circ}\text{C}$  die bei weitem höchste Gebrauchstemperatur. Aufgrund der sehr hohen Festigkeitsreserven (Bild 5) und einer geringeren Neigung zur Degradierung weist dieser Stoff auch nach über 1000 Betriebsstunden noch ausreichende Festigkeit auf.

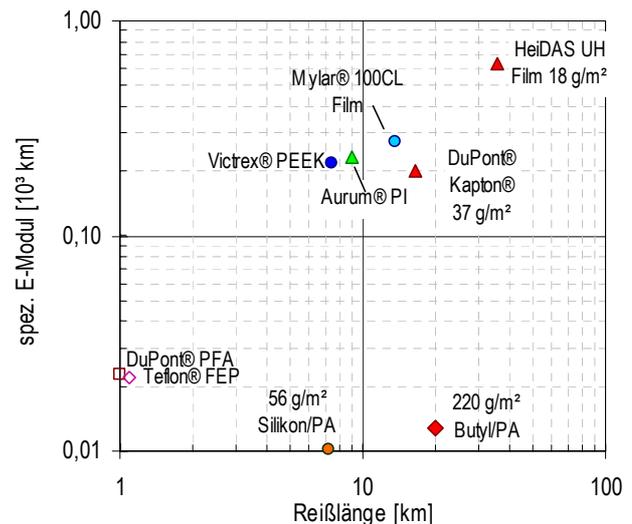


Bild 5: Gewichtsspezifische Festigkeit und Steifigkeit verschiedener Folien und beschichteter Gewebe.

Die Dampfdichtigkeit und Dampfbeständigkeit bei höheren Temperaturen wurde anhand von Langzeitversuchen mittels Schlauchproben im Autoklaven bestimmt.



Bild 6: Schlauchproben zur Untersuchung der Dampfdichtigkeit, Beständigkeit und Festigkeit.

Mit zunehmender Temperatur nimmt die Permeabilität der Hüllensstoffe erwartungsgemäß zu. Neben der Permeabilität des Flächengebildes wird in

dieser Anordnung auch jene Undichtigkeit bestimmt, die sich aus der Fügung ergibt.

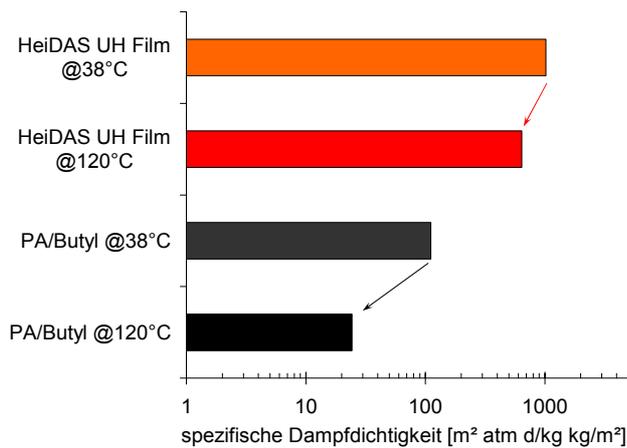


Bild 7: Abfall der spez. Dampfdichtigkeit mit zunehmender Temperatur.

Wie die Dichtigkeit, sinkt auch die Festigkeit und Steifigkeit mit steigender Temperatur. Einige Hersteller geben die Materialfestigkeiten bei erhöhten Temperaturen an. Für den Einsatz am Dampfballon wurde die Festigkeit jedoch zusätzlich unter Dampfbeanspruchung des Hüllensstoffs mitsamt der verwendeten Fügung untersucht.

Bild 8 zeigt die Versagenslasten der Schlauchproben im Vergleich zu den Festigkeitsgrenzen des Hüllenswerkstoffs für verschiedene Klebesysteme.

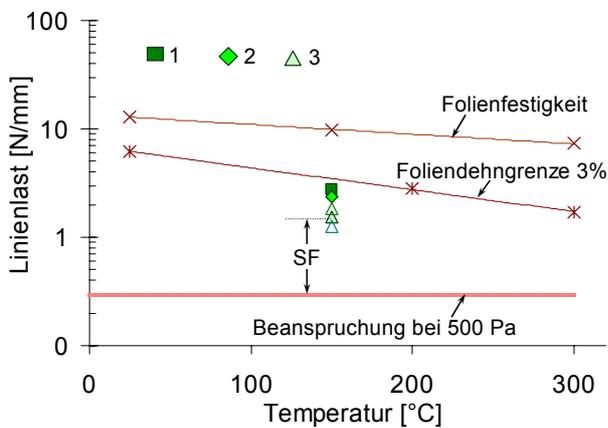


Bild 8: Abnahme der Festigkeit des Hüllenswerkstoffs mit zunehmender Temperatur sowie Versagenslast von Schlauchproben bei 150°C unter Innendruck mit verschiedenen Klebesystemen sowie nach Dampfbeanspruchung.

Hier wird deutlich, dass die konfektionierten Proben unter praxisnaher Beanspruchung nur einen Bruchteil der prospektierten Materialfestigkeiten erreichen. Einerseits treten bei der Verarbeitung unvermeidbar Vorschädigungen auf, andererseits

versagte bis auf eine Ausnahme von 10 Proben stets das Klebesystem.

Aus Gewichts- und Fertigungsgründen wurde für den HeiDAS UH Erprobungsträger das Klebesystem 3 eingesetzt, wenngleich es im Versuch mit einer mittleren Versagenslast von 7,5 daN/5 cm die geringste Festigkeit aufwies. Der Sicherheitsfaktor SF = 5 gegenüber den im Betrieb bei 500 Pa Innendruck auftretenden Nennbelastungen deckt den Streubereich der Ergebnisse bei einer Standardabweichung des relativen Fehlers von 20% ab.

Für größere Dampf-aerostaten ist das Klebesystem 1 geeignet. Dieses versagte im Versuch nicht, jedoch scheiterte eine Erhöhung des Innendrucks an Undichtigkeiten der Einspannung des Schlauchendes.

Die HeiDAS Materialentwicklung und Erprobung ist komponentenbezogen und vollzieht sich auf mehreren Ebenen. Für jeden Bereich des Aerostaten kann das Materialkonzept aufgrund der stark unterschiedlichen Beanspruchungen angepasst werden. Ein hohes Maß an Flexibilität garantieren dabei die Folien-Verbundwerkstoffe, ähnlich, wie Sie im Bereich der Hochleistungssegel eingesetzt werden. Für Bereiche, die nicht den extrem hohen Temperaturen oder dem aggressiven Dampf ausgesetzt sind, stehen nach wie vor herkömmliche beschichtete Gewebe zur Verfügung.

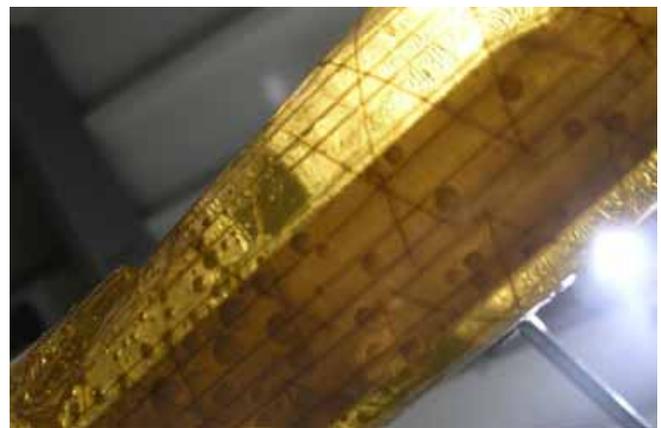


Bild 9: Beispiel eines Hochleistungsverbundwerkstoffs beim Praxistest im Siedebetrieb unter direkter Beflammung.

Der jetzige Erprobungsträger verwendet aus Gewichtsgründen nur zwei Varianten der Basisfolie. Zukünftige Verbundfolien werden jedoch schon heute vorab in realitätsnahen Belastungszuständen erprobt bevor sie in künftigen Prototypen zum Einsatz kommen (Bild 9).

### 3 BRENNERENTWICKLUNG

Bild 10 zeigt das typische Flambild eines konventionellen Ballon-Brenners, welcher mit flüssigem Propan gespeist wird.



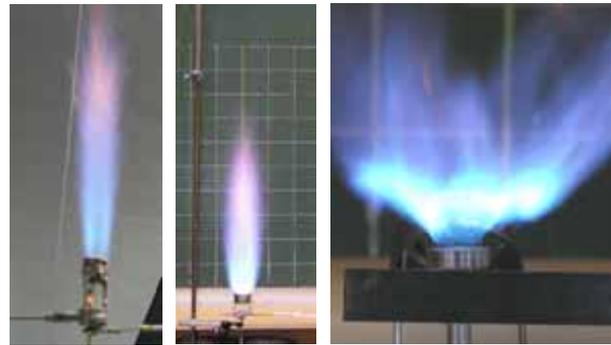
*Bild 10: Heißluftballon im Brennerbetrieb.*

Ein typisches Brennersystem besteht aus Tank, Ventil, Zufuhrleitungen, Überhitzerwendeln und Einspritzdüsen. Ggf. kommen noch Drosselblenden und Systeme zur Flammstabilisierung hinzu. Die Vermischung von Brennstoff und Sauerstoff findet nach dem Austritt des gasförmigen Propan aus der Düse quasi in einem offenen Brennraum statt.

Die Gestaltung eines eigenen Brenners war erforderlich, da die Roziärenbauform insbesondere beim skalierten Erprobungsträger nur einen geringen Abstand zwischen der Gondel und der Hülle am Wärmetauscher zulässt. Bei herkömmlichen kerzenförmigen Flammen (Bild 11 links) ist die lokale Temperaturspitze zu groß. Da eine Begrenzung der Temperatur notwendig ist, verbleibt dem Wärmeintrag eine zu geringe Fläche.

Ziel der Brennerentwicklung und -optimierung war die Verbesserung des Flambildes und Erlangung

einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung am Wärmetauscher. Dies wird beim HeiDAS UH Brenner durch eine besondere Düsenform erreicht, welche eine optimierte Durchmischung des Brennstoffs mit der Umgebungsluft erreicht.



*Bild 11: Generische Brennerentwicklung. V.l.n.r.: Brenner mit paralleler Einströmung und Flammscheibe, HeiDAS Brenner mit Dralldüse, HeiDAS UH Brenner.*

Alle in Bild 11 gezeigten Brenner haben, gemessen am Verbrauch, in etwa die gleiche thermische Leistung. In der erzielten Temperaturverteilung unterscheiden Sie sich jedoch erheblich. Beim Brenner Bild 11 (links) strömt das gasförmige Propan axial aus einer Düse mit einer oder mehreren Öffnungen. Unterhalb des Überhitzers befindet sich eine so genannte Flammscheibe. Hier erhält die zur Verbrennung angesaugte Luft einen gewissen Drall und die Flamme wird stabilisiert. Der Brenner in Bild 11 (mittig) erzeugt einen Drall mittels Düsenbohrungen. Eine Flammscheibe zur Stabilisierung ist nicht mehr erforderlich. Die erzielte Flamme ist etwas kürzer.



*Bild 12: Durchmischungsgebiet im Abstrom eines Brenners mit Dralldüse.*

Bild 12 visualisiert zu diesem Brenner das Durchmischungsgebiet. Dort wo die sich mischende Luft hohe Temperaturunterschiede aufweist ändert sich der Brechungsindex und das bei der Aufnahme mit Blitz reflektierte Licht hinterlässt Schlieren. Außerhalb dieses Schlieregebietes weist die Luft einen annähernd konstanten, bzw. gleichmäßigen Temperaturverlauf auf. Das Durchmischungsgebiet misst in 1 m Abstand von der Düse einen Durchmesser von etwa 45 cm.

Für den Brenner aus Bild 11 (rechts) zeigt diese Art der Visualisierung in Bild 13 sehr deutlich, wie sich durch die Änderung der Düsengeometrie auch der Durchmesser des Durchmischungsgebietes verdoppelt hat.

Die Ursache der Aufweitung des Flammkegels die Ausbildung eines Rückstromgebietes und damit die Vergrößerung des Durchmischungsgebietes liegt in einer optimierten Abstimmung des Verhältnisses der axialen Strömungskomponente im Verhältnis zum Drallanteil. In [9] wird dieses Problem am Beispiel der Zufuhr des Luftmassenstroms in eine Brennkammer behandelt und ein Zusammenhang zwischen den axialen und rotatorischen Anteilen des Massenstroms und den geometrischen Größen von Umlenkschaufeln, welche den Drall erzeugen, hergestellt.

Der resultierende HeiDAS UH Brenner hat eine (gedrosselte) thermische Leistungsaufnahme von 68 kW bei einem Gewicht von nur 58 Gramm. Dies entspricht in etwa der dreifachen gewichtsspezifischen Leistung, wie sie handelsübliche Brenner liefern. Deren Leistung liegt jedoch im Bereich von 6 bis 7 MW.

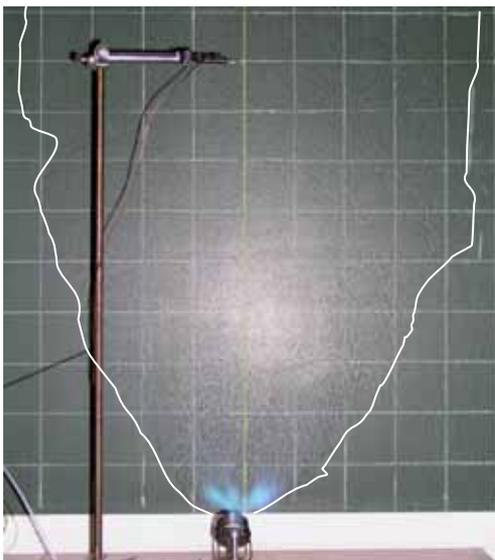


Bild 13: Durchmischungsgebiet im Abstrom eines Brenners mit Drall-Rückstromdüse.

## 4 MESSFAHRTEN IM LABOR

Der HeiDAS UH Erprobungsträger hat zahlreiche Flüge mit Dampf unter verschiedenen Bedingungen absolviert. Um die Betriebsergebnisse quantitativ beurteilen und mit den rechnerischen Erwartungen vergleichen zu können werden ausgewählte Temperaturen, das verbleibende Ballongewicht und der Brennstoffverbrauch während der Messfahrten gemessen.

Die Sensorpositionen wurden vorab mit Hilfe der CFD Analysen ausgewählt. So wird mit einem Sensor der Bereich minimaler Hüllentemperatur erfasst. Beim Versuch wird der Ballon am Scheitel mittels Umlenkrollen an einem Kraftsensor befestigt und solange ballastiert, bis sich das berechnete Abhebegewicht von z.B. 50 N einstellt.

Bild 14 zeigt einen repräsentativen Messschrieb. Die Versuche gliedern sich in eine Vorwärmphase, die Dampfbefüllung, eine Flugphase und die Entleerung bzw. Trocknung.

Haben die Temperaturen im Gasbehälter und am Wärmetauscher das gewünschte Niveau erreicht, wird mit der Spülung mittels Wasserdampf begonnen. Nach dem Flug wird der Dampf in umgekehrter Weise mit Warmluft herausgespült. Dieses etwas umständlich anmutende Verfahren ergibt sich, da der sehr empfindliche Erprobungsträger und der Betrieb im Labor nur die vertikalen Anordnungen gestatten.

Das Spülvolumen des Wasserdampfs betrug im gezeigten Versuch etwa 20 m<sup>3</sup> also das Dreifache des Volumens des Gasbehälters. Wir gehen davon aus, dass sich der Konzentrationsaustausch im Innern relativ schnell vollzieht und dass durch diese Spül-Befüllung eine Dampfkonzentration von 95 bis 98 Prozent erreicht wird.

Die Gastemperatur im Dampfbehälter GZ0 wird in 40 cm Abstand von der Hüllwand bestimmt. Messungen der Hüllentemperaturen erfolgen mit Thermoelementen deren Schweißpunktdurchmesser wenige zehntel Millimeter beträgt unmittelbar an der Membran.

Die Thermoelemente am Wärmetauscher WT1...WT4 sind äquidistant vom unteren Pol bis zum Ansatz des Beheizungskegels fixiert, ein Sensor misst die Temperatur unter der Isolation am oberen Scheitelpunkt GZ1 und ein weiterer am so genannten Cold Spot GZ2, dem Bereich von dem die niedrigsten Temperaturen und die höchste Gefahr der Kondensatbildung erwartet wird.

Der horizontale Verlauf der Auftriebskurve zeigt, dass der Ballon die erwartete Tragkraft von 50N erreicht hat. Die Dampftemperatur betrug dabei 155°C, am Scheitelpunkt des Wärmetauschers wurden 220°C, am Meridian aufwärts sogar 250°C gemessen. Dabei ist bemerkenswert, wie dicht die Dampftemperaturen im Innern sowie an völlig verschiedenen Positionen der Hülle beisammen liegen.

Der Maximalwert der Temperatur am Wärmetauscher betrug bei der gezeigten Messung 273°C. Dies ist wohl die höchste jemals an einer Ballonhülle im Flug erreichte Temperatur – welche absichtlich hervorgerufen wurde.

Diese Messfahrt enthält bereits erste Manöver, wobei durch kurzzeitige Abkühlung der Auftrieb um etwa 10% gesenkt wurde, ohne dass die minimale Wandtemperatur im Gasbehälter unter 130°C gesun-

ken ist. Auf die Fülle der Ergebnisse einzugehen sprengt den Rahmen dieses Beitrags, jedoch gibt der gezeigte Messschrieb dem interessierten Betrachter genug Stoff zur Interpretation.

Im Vergleich mit den numerischen Simulationen liegen die gemessenen Temperaturen etwas höher, als vorab bestimmt. Allerdings gehen die bisherigen CFD Simulationen von Vereinfachungen aus. Die Wärmeleitfähigkeit der Isolation wurde bisher mit konstant mit 0,03 W/mK angenommen. Bei geringeren Mittentemperaturen trifft dieser Wert auch zu. Im HeiDAS UH Erprobungsträger werden jedoch tatsächlich Mittentemperaturen von bis zu 100°C erreicht. Dann liegt der rechnerisch und experimentell Kennwert für den Isolator jedoch bei 0,035 W/mK.

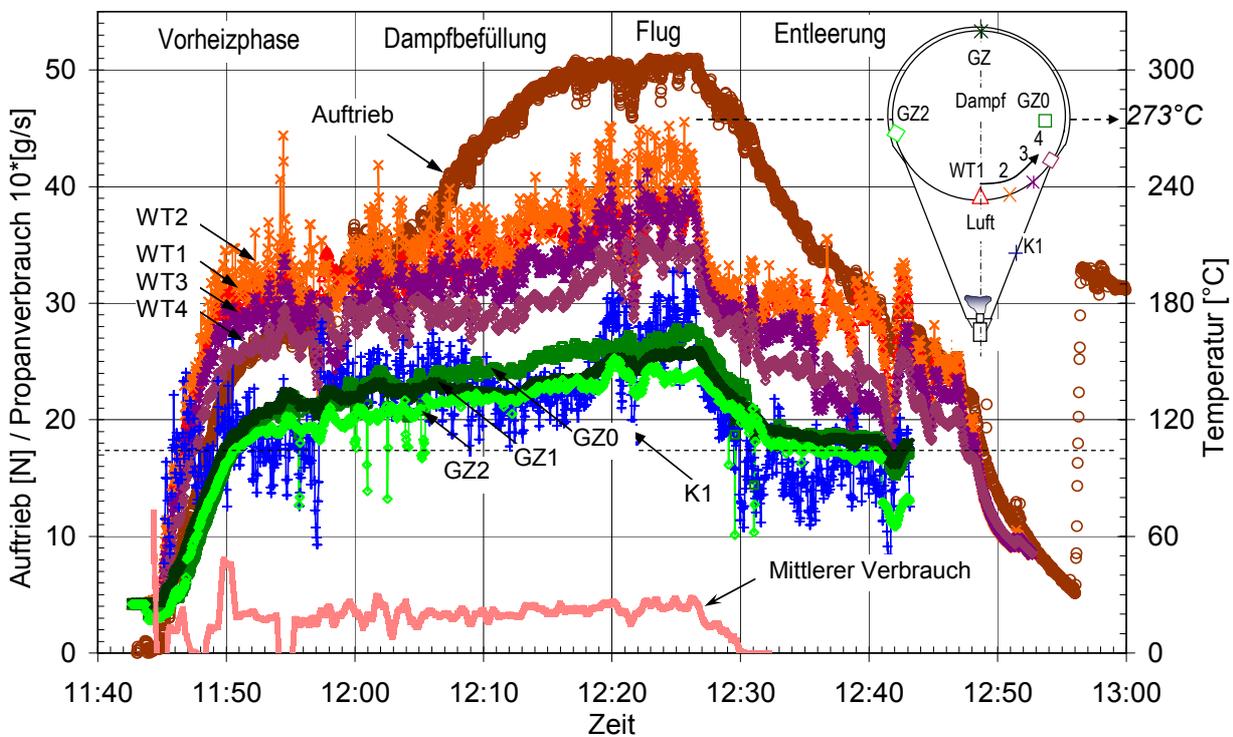


Bild 14: Messschrieb des HeiDAS UH Ballons im Dampfbetrieb.

## 5 FAZIT UND AUSBLICK

Der spezifische auf das Gasvolumen bezogene Auftrieb beträgt beim HeiDAS UH 0.735 kg/m<sup>3</sup>. Damit reicht die Leistungsfähigkeit von Heißdampfballonen bereits dicht an die Tragkraft von Heliumballonen mit etwa 1kg/m<sup>3</sup> heran. Konventionelle Heißluftballone erreichen einen Nennauftrieb von lediglich 0.275 kg/m<sup>3</sup>.

Bild 15 veranschaulicht den deutlichen Unterschied im Temperaturniveau von Dampfaerostaten im Vergleich zu klassischen Heißluftballonen. Desweiteren wird der große Entwicklungsfortschritt deutlich, der mit der 2. HeiDAS Generation erreicht wurde.

Durch das gesteigerte Temperaturniveau reduziert sich die Isolationsdicke von 23 mm auf 7,5 mm. Da die minimalen Temperaturen im Ballon noch immer

weit über dem Kondensationspunkt liegen, ließe sich die Isolation noch weiter reduzieren. Dies hätte jedoch auch einen Anstieg des Brennstoffverbrauchs über den jetzigen Wert von etwa 1.4kg/Stunde zur Folge. Andererseits kann durch Hinzunahme von Isolation der Brennstoffverbrauch deutlich gesenkt werden, was längere Flugdauern ermöglicht.

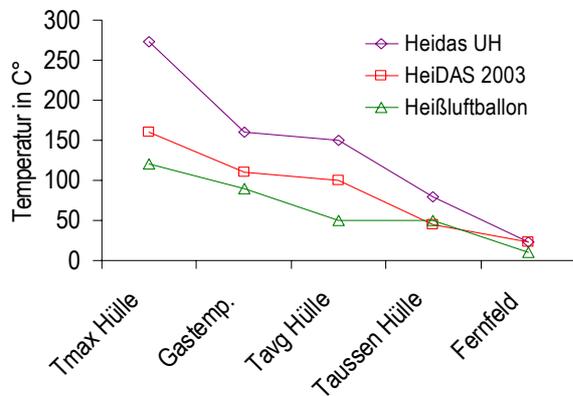


Bild 15: Vergleich von gemessenen Temperaturen am Dampfaerostaten HeiDAS und HeiDAS UH mit charakteristischen Temperaturen von Heißluftballonen.

Das begonnene Testprogramm dient der praxisnahen Einsatzerprobung der Komponenten und Materialien, sowie der systematischen Bestimmung der Betriebsparameter. Letztere werden in einem Kennfeld für verschiedene Drücke, bzw. Füllgrade des Dampfbehälters aufgetragen. Ein Kennfeld bildet die Grundlage für ein sicheres kontrolliertes und automatisiertes Steuerungs- und Betriebskonzept, welches in naher Zukunft auch Fahrten des ferngesteuerten Dampfballons außerhalb des Labors ermöglicht.

Gemessene integrale Größen wie Auftrieb und mittlere Temperaturen stimmen bereits jetzt gut mit den rechnerischen Vorhersagen überein. Damit die Aussagen des Erprobungsträgers auch auf spätere Baugrößen übertragen werden können, muss nach einer detaillierten Analyse der Messdaten auch das numerische Modell angepasst, bzw. verbessert werden.

Im Bereich der Material- und Brennerentwicklung, der Traggaserwärmung und der Isolation von Aerostaten gewonnenen Erfahrungen lassen sich auch in anderen Bereichen der Leichter als Luft Technologie sinnvoll nutzen.

Durch die langjährigen Entwicklungsarbeiten im Rahmen des HeiDAS Projekts ist der Bau und Betrieb tragfähiger Dampfaerostaten bereits jetzt in greifbare Nähe gerückt.

## DANKSAGUNG

Wir danken der FESTO AG & Co. KG für die freundliche finanzielle Unterstützung des HeiDAS Projekts. Ein weiterer Dank geht an Dr. Paulus, Hr. Kißler und Dr. Knoche für die Bereitstellung der Hydronic Wasserstoff-Sauerstoff-Dampferzeuger.

## SCHRIFTUM

- [1] Erdmann, Dr. H.: Füllgas für Luftfahrzeuge. 1908. Patentschrift Nr. 214019; Klasse 77h; Gruppe 3. Patentiert im Deutschen Reiche vom 14. August 1908 ab. Kaiserliches Patentamt. Ausgegeben den 2. Oktober 1909
- [2] Bormann, A.; Hermann, J.P.; Skutnik, S.: HeiDAS – Der Heißdampfaerostat. Entwicklung eines Erprobungsträgers zur Untersuchung alternativer Traggassysteme. In: DGLR Workshop VI. Flugsysteme leichter als Luft“, 2003.
- [3] Bormann, A.; Hermann, J.P.; Skutnik, S.: Alternative Buoyancy Concepts: First Numerical and Experimental Results from a Hot Steam Balloon (HeiDAS). In: 3rd Annual Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [4] Bormann, A. ; Skutnik, S.: HeiDAS – Messungen am Heißdampfaerostaten zur Validierung numerischer Simulationen. In: DGLR Workshop VII: „Flugsysteme leichter als Luft“, Nordholz, 25./26. 06. 2004.
- [5] Bormann, A., Skutnik S. und M. Staufer. Numerische Simulationen zur thermischen Performance von Rozièren-Bauformen. DGLR-Workshop VII: „Flugsysteme leichter als Luft“, Nordholz, 25./26. 06. 2004.
- [6] Schlag, H.-J.: Ingenieurbuero für Thermografie, Freiburg, 1997. www.ballonflug.com.
- [7] Freudenberg, Christiane: Systematische Untersuchungen zur konstruktiven Gestaltung innovativer Dämmstoffstrukturen, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2003.
- [8] Scholles, C.: Gasdurchlässigkeit von Luftschiffhüllenmaterial und Traggasreinigung mit Membranen. DGLR-Workshop VIII: „Flugsysteme leichter als Luft“, DLR Köln-Porz, 17./18. 06. 2004.
- [9] Lefebvre, Arthur H.: Gas turbine combustion. McGraw-Hill, New York u.a., 1983, S. 126 ff.