KLEBEN IM WELTRAUM

Prof. Dr. Christian Hühne

Institut für Systemleichtbau DLR e.V.

26. Klebkolloquium Köln, 10.02.2026

DLR

Übersicht

Klebtechnische Fragestellungen

Bildquelle: DLR intern, KI unterstützt

Übersicht

Klebtechnische Fragestellungen

Bildquelle: DLR intern, KI unterstützt

Sieht nach einer geklebten Struktur aus, oder?

Bildquelle: DLR intern

Sehen Sie die 66 Niete?
Bildquelle: DLR

Motivation

Warum nicht alles kleben?

- **Zulassungsbedingungen**
  - Oberflächenvorbehandlung kritisch
  - Unfälle in der Vergangenheit führen zu strengen Regeln
- **Virtuelle Zertifizierung**
  - Komplexe Versagensmechanismen
  - Präzise Materialdaten notwendig
  - Simulationen zur Vorhersage notwendig
- **Strukturmonitoring**
  - Klebstoffe sind anfällig für Ermüdung

Bildquelle: DLR intern

Motivation

Zertifizierungsanforderungen

CS 25.601

The aeroplane may not have design features or details that experience has shown to be hazardous or unreliable. The suitability of each questionable design detail and part must be established by tests

CS 23.573(a)(5)

For any bonded joint, the failure of which would result in catastrophic loss of the aeroplane, the limit load capacity

AC20-107B

qualified
onded
rst
r the
ed to a
y
cur
t
tests to
ct weak
o
e
l
open for
ve
which
uch
l

Zertifizierte Klebung

Every primary bonded joint needs to be certified by…

i) Disbonds of each bonded joint greater than the maximum critical disbonding must be prevented by **design features**.

ii) Full single part testing of bonded joints

iii) Repeatable and reliable non-destructive inspection techniques must be established that ensure the strength of each joint.

Bildquelle: DLR intern

Vom gebolzten zum geklebten Rissstopp

Oberflächenzähmodifikation

Bildquelle: DLR intern

Surface Toughening

Ohne Oberflächenzähmodifikation

Spannungskonzentrationen führen zu Anriss

Mit Oberflächenzähmodifikation

Duktiles Material nimmt Dehnungen auf und reduziert Spannungskonzentrationen

Bildquelle: DLR intern

Übersicht

Klebtechnische Fragestellungen

Hochfliegende Plattform

Bildquelle: DLR intern, KI unterstützt

DLR HAP alpha – Hochfliegende Autonome Plattform

Bildquelle: DLR intern

DLR HAP alpha – Hochfliegende Autonome Plattform

Fakten

- 27 m Spannweite
- 135 kg MTOW
- 38 kg Strukturmasse
- 22 km Flughöhe
- 90 Tage Flugzeit

- Extreme Leichtbaugüte mit robustem Design!

Bildquelle: DLR intern

DLR HAP alpha – Hochfliegende Autonome Plattform

Verbindungskonzept

- Gewickelte Holme werden mittels Schäftungen verklebt
- Schäftung besitzt höchstes Leichtbaupotential bei maximaler Komplexität

Bildquelle: DLR intern

DLR HAP alpha – Hochfliegende Autonome Plattform

Verbindungskonzept

- Gewickelte Holme werden mittels Schäftungen verklebt
- Schäftung besitzt höchstes Leichtbaupotential bei maximaler Komplexität

Montage auf Formwerkzeug

PVDF Streifen im Laminat

Detailausschnitt vom PVDF Streifen

Bildquelle: DLR intern

DLR HAP alpha – Hochfliegende Autonome Plattform

Nachweis mittels Strukturtest

27m HAP Flügel

Flügel im Strukturtest

Bildquelle: DLR intern

Flügel im Strukturtest

Bildquelle: DLR intern

Übersicht

Klebtechnische Fragestellungen

Bildquelle: DLR intern, KI unterstützt

Flüssigwasserstofftank

Einmalig

Ähnliche Fragestellung... …verschiedene Anforderungen

20-30 Jahre Laufzeit

Bildquelle: DLR intern

Randbedingungen

Geklebte Tan … **n sich für:**

- hochrate
- automat
- Tankkor
- Hohe L

DLR Projektträger

Projektträger für das
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG IGF

Schweißen
Name der FV

Antragsnummer aus PT-Outline

Beschreibung zum Forschungsantrag

1. **Forschungsthema**

Vereinfachte Methodik zur Reduktion von Oberflächenanalysen und zerstörenden Prüfungen bei extremen Niedrigtemperaturen

Im Forschungsvorhaben „VROZEN“ werden Prüfmethoden und Simulationsmodelle zur Kennwertermittlung von klebtechnischen Fügeverbindungen in kryogenen Atmosphären entwickelt. Der Fokus liegt auf der Weiterentwicklung der Prüfmethodik für die Wasserstofftechnologie und der Lagerung von flüssig Gasen unterhalb von -200 °C. Um den erheblichen Prüf- und Messaufwand von Fügeverbindungen bei diesen Temperaturen zu umgehen, wird auf Basis des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips ein Extrapolationsmodell zu Temperaturen unterhalb von -200 °C entwickelt. Dafür werden Fügeverbindungen mittels Zugscherprüfung unter Flüssigstickstoff und Flüssighelium charakterisiert und Zugscherfestigkeiten an einer Schnellzerreißprüfmaschine ermittelt. Zudem werden Einflussfaktoren auf die Adhäsionseigenschaften von Klebstoffen in Flüssigstickstoffumgebung identifiziert und durch Oberflächenvorbehandlungen die Adhäsion in der Fügeverbindung optimiert. Ein Schwerpunkt liegt zudem auf der Entwicklung eines (faser-) optischen Sensorensystems zur Erfassung von Rißlängen innerhalb einer bruchmechanischen Prüfung unter Flüssigstickstoff-Bedingungen. Um die Materialeigenschaften der Klebstoffe in kryogener Atmosphären zu erfassen und zu optimieren, wird zudem ein Simulationsmodell auf Basis von Messwerten aus der dynamisch mechanischen Analyse und des Kerbschlagbiegeversuchs entwickelt.

Die Projektskizze wurde im Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik (GAK) in der Sitzung am 18.06.2025 mit sehr hoher Priorisierung eingestuft, was die große industrielle Relevanz des Forschungsthemas für die industrielle Gemeinschaftsforschung deutlich macht.

Vorhabenbeschreibung „VROZEN“

1

CFK Strukturen mittels kleben benötigt:

- Klebst … eteilcharakterisierung
- Verständnis über Lastfälle und Fertigungstoleranzen
- Geeignete Analyse- und Auslegungsmethoden

Bildquelle: DLR intern

Übersicht

Klebtechnische Fragestellungen

Bildquelle: DLR intern, KI unterstützt

MMX-Rover (2024)

- Erforschung der Mondoberfläche des Marsmondes Phobos

Bildquelle: DLR intern

Fertigungsumgebung und Material

Verwendete Klebstoffe

- 2K Epoxidklebstoffe als Strukturklebstoff
- 2K RTV-Silikone als Dehnungsausgleich zwischen Hybridstrukturen
- Adhesive Tapes als Kantenversiegelung

Bildquelle: DLR intern

Hot/cold - Klassisches CTE Mismatch

Steifer Klebstoff

Rissbildung bei starker Temperaturerhöhung/-verringerung

Elastischer Klebstoff

<u>Keine</u> Rissbildung → Klebstoff kann untersch. Verformung ausgleichen

Bildquelle: DLR intern

MASCOT (2011)

Raketenstart

- Strukturgewicht 500 gr, 11 kg Einsatzmasse
- Raketenstart: 150 g Beschleunigung, entspricht 1650 kg Belastung im Shakertest

Bildquelle: DLR intern

Autonome Strukturfertigung im Weltraum

Projekt: AMOCSIS

- Autonome Strukturfertigung im Weltall spart Masse und deutlich Kosten
- Additiv gefertigte Verbindungsknoten ermöglichen hohe Designfreiheit

Bildquelle: DLR intern

Kleben als Verbindungsenabler

Kleben als Strukturenabler

- 0,1 mm CFK Halbzeug mit beschichtetem Hot-Melt Film im Magazin
- Klebstoff verbindet dünne aufgerollte CFK Lagen zu steifem Rohr
- Kontinuierliche Rohrfertigung mit variablen Maßen möglich

Fertigungskonzept

Bildquelle: DLR intern

Ausblick - Wiedereintritt

Gezielte Teilung beim Wiedereintritt

Bild: intern

Bildquelle: DLR intern, KI unterstützt

„Debonding on demand“

A: Verbrennen von klassischen Epoxid Harzen

B: Aufschmelzen durch Thermoplast – Composite Material

Hybrid Struktur: PEEK/LM-PEAK

C: Aufspaltung durch Thermally Expanding Particles (TEP)

TEPs – Expandierende Micropartikel

Bildquelle: DLR intern, KI unterstützt

KLEBEN IST DER ENABLER FÜR DIE LUFT- UND RAUMFAHRT

DLR e.V.

Impressum

Thema:	**Kleben im Weltraum**
Datum:	2026-02-10
Autor:	Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne
Institut:	Institut für Systemleichtbau
Bildcredits:	Alle Bilder „DLR (CC BY-NC-ND 3.0)“, sofern nicht anders angegeben