



Aktuatorische Verbundwerkstoffe

Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider, Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius,
Dipl.-Ing. Peter Wierach

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Kolloquium Innovative Konstruktionswerkstoffe
12. Januar 2009



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Direktor: Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann
Stellv. Direktor: Prof. Dr.-Ing. J. M. Sinapius

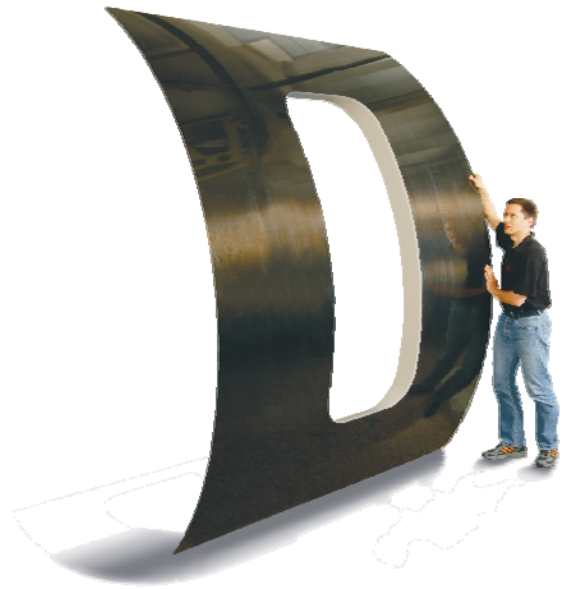
Hochleistungsleichtbau
anpassungsfähig – effizient – tolerant

Wir sind die Experten für Entwurf
und Realisierung innovativer
Leichtbausysteme.

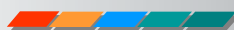
Unsere Forschung dient der
Verbesserung von

- Sicherheit
- Kosteneffizienz
- Funktionalität
- Komfort
- Umweltverträglichkeit

Wir schlagen die Brücke
zwischen Grundlagenforschung
und industrieller Anwendung



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

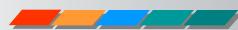


Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 2

Die Prozesskette des Hochleistungsleichtbaus



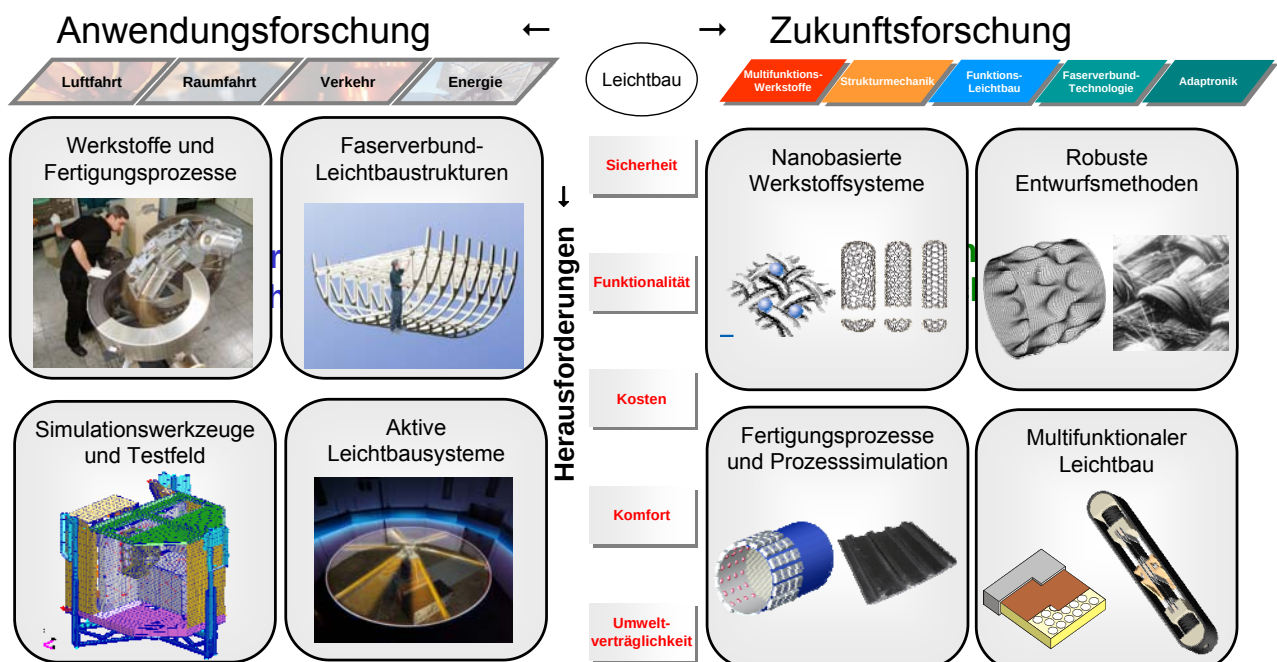
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



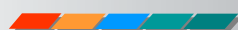
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

3

Forschungsgebiete des Instituts



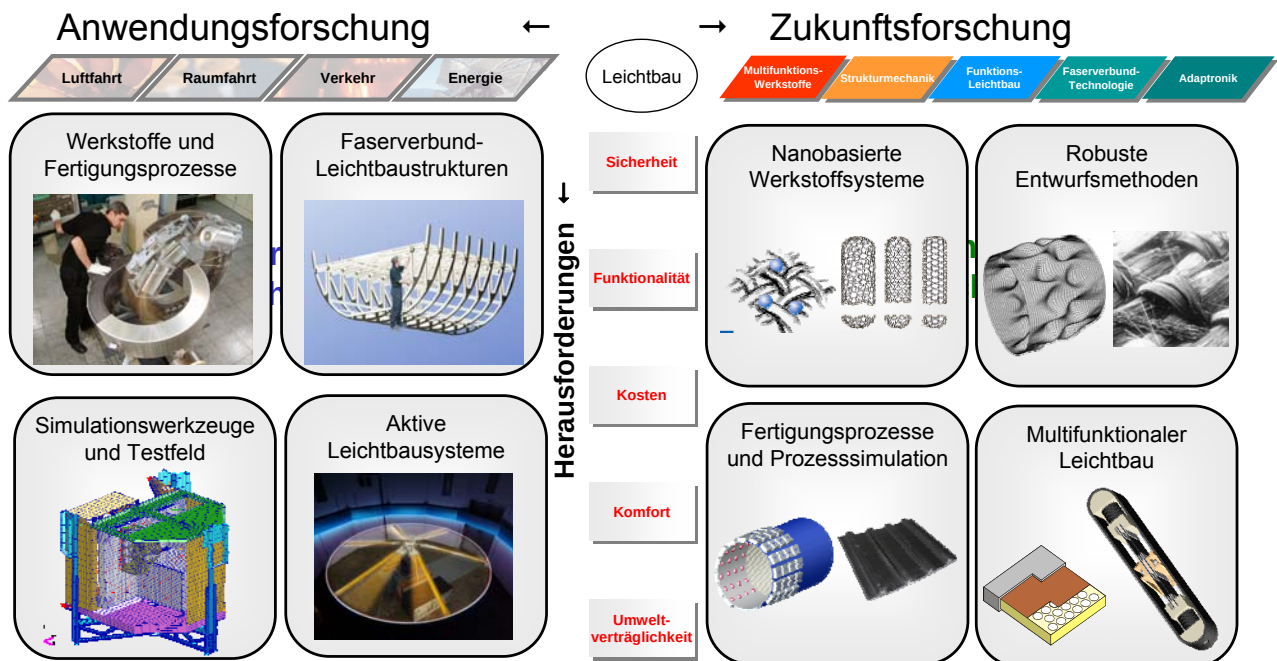
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



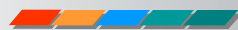
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

4

Forschungsgebiete des Instituts

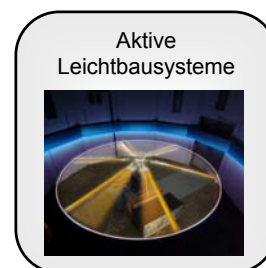
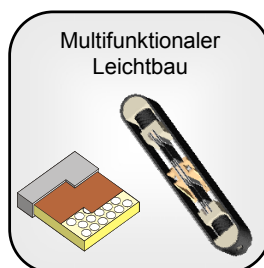
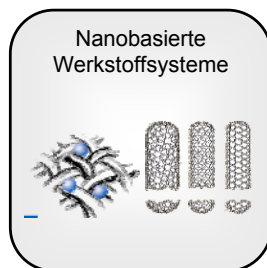


Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

5

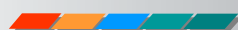


Aktuatorische Verbundwerkstoffe anisotrop, lasttragend, sensorisch und aktuatorisch

- **Aktivierbare Faserverbunde**
 - Piezokomposite
 - Carbon-Nanotubes
- **Nutzung aktuatorischer Faserverbunde**
 - Parallelrobotik
 - Integrierte Bauteilüberwachung
 - Aktiv verwindbarer Rotor



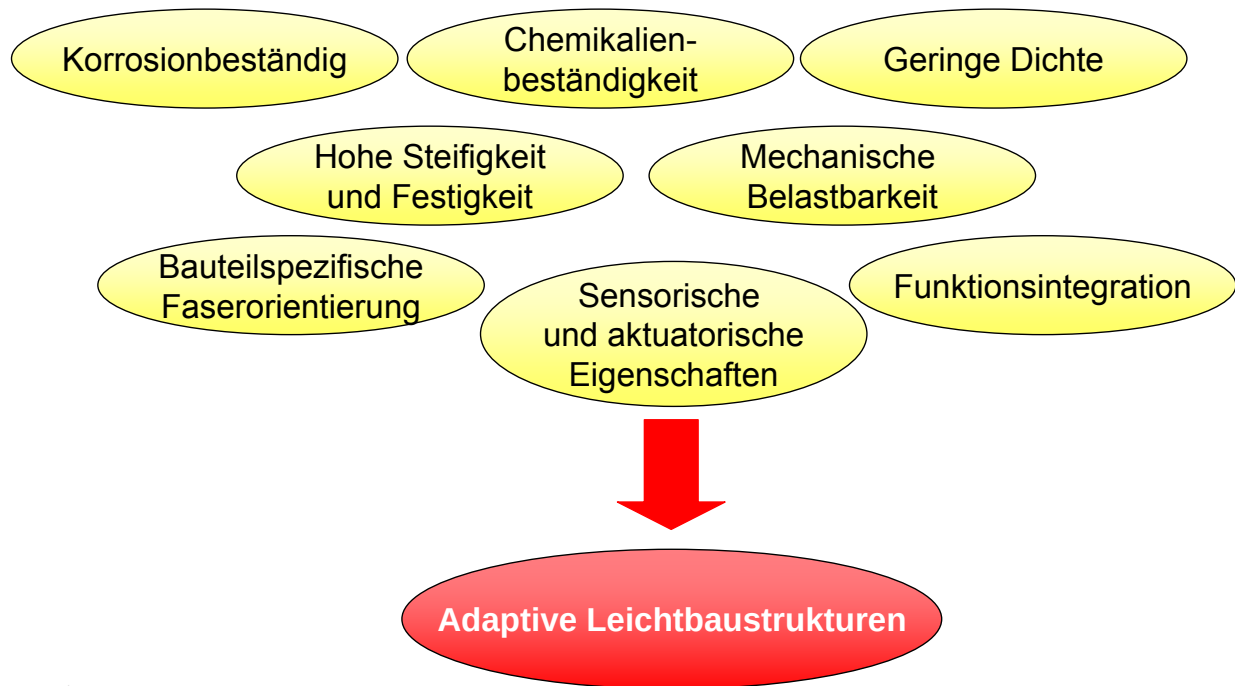
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



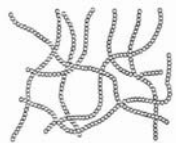
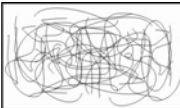
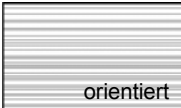
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

6

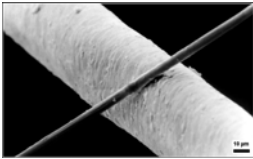
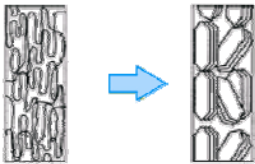
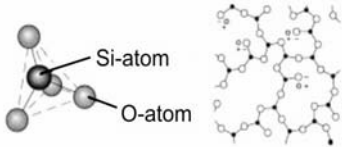
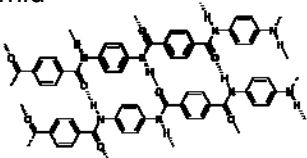
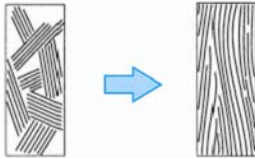
Aktuatorische Verbundwerkstoffe



Aufbau von adaptiven Faserverbundwerkstoffen

Matrix	Fasern	Funktionswerkstoffe
➤ Duroplaste ➤ Thermoplaste ➤ Metall ➤ Keramik	➤ Glas ➤ Kohlenstofffaser ➤ Aramid ➤ etc.	➤ Piezokeramik ➤ Formgedächtnisleg. ➤ etc.
amorph  Teilkristallin 	Kurzfaser   orientiert Endlosfaser   orientiert	Fasern  Folien 

Eigenschaften der wichtigsten Fasertypen

Faser	Struktur	Eigenschaften
Kohlenstoff 		➤ 2D kovalente Bindungen ➤ Semikristallin (100%) ➤ Hohe Orientierung
Glas 		➤ Kovalente Bindung zwischen Si und O ➤ 3D-Vernetzung ➤ Isotropes Verhalten
Aramid 		➤ 1D kovalente Bindung ➤ Wasserstoffbrücken und v.d.Waals Bindungen ➤ Semikristallin

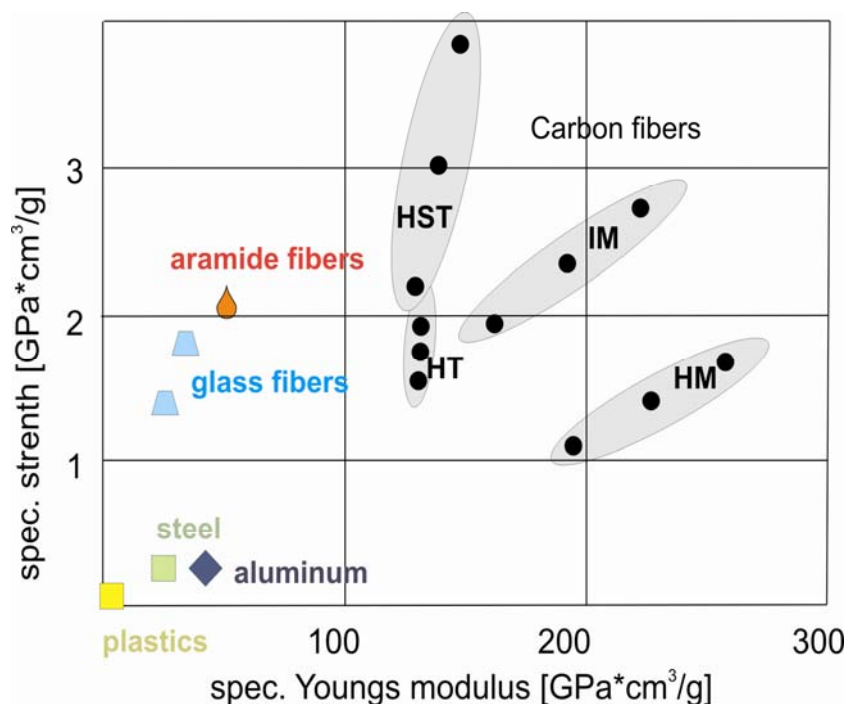


Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

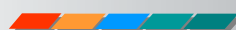


Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 9

Steifigkeiten und Festigkeiten der unterschiedlichen Fasern im Vergleich mit Metalleigenschaften



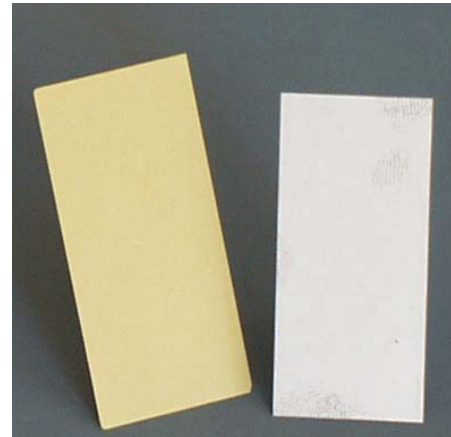
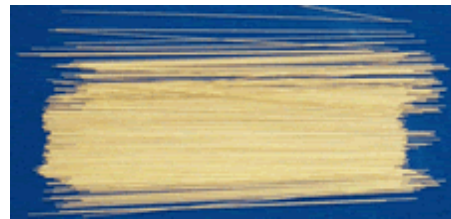
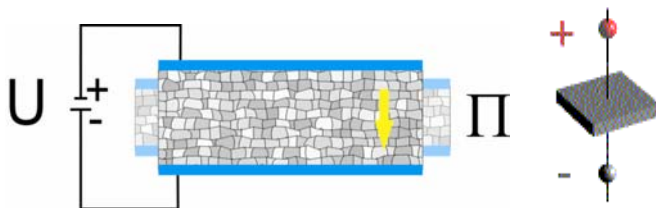
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 10

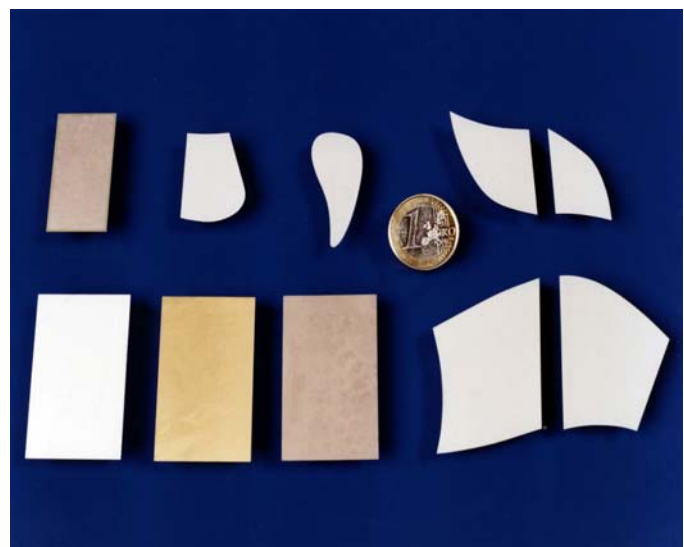
Aktive Funktionswerkstoffe für aktuatorische Verbunde

- Eine große Vielzahl von aktiven Funktionswerkstoffen sind in der Forschung und Entwicklung
- **Piezokeramik ist am weitesten verbreitet und entwickelt**
- Geringe aktive Dehnung
- Packaging als Piezokomposite eröffnet ein weites Feld für Anwendungen



Piezokeramische Halbzeuge für Flächenaktuatoren

- Piezokeramische Folie (Platten/Scheiben)
- Standardformen
 - Rechteckscheiben
 - Kreisscheiben
 - Lochkreisscheiben
- Freiformen mit Laser- oder Wasserstrahlschneiden möglich
- typische Dicken: 100-500µm
- typische Abmessungen für
 - Rechteckscheiben: 50x30mm²
 - Sondergrößen bis 150mm
 - Kantenlänge

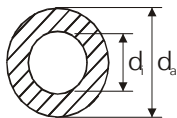


Piezokeramische Fasern für Flächenaktuatoren

- Piezokeramische Fasern
- Durchmesser: 30-800µm
- Länge: bis 200 mm
- Andere Querschnittsformen
 - Streifen
 - Hohlfasern

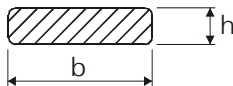


$$d = 30..800\mu\text{m}$$



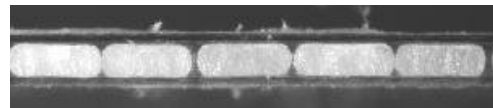
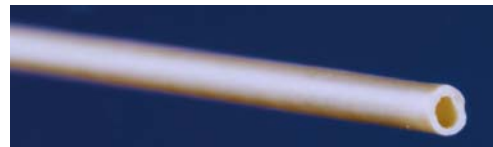
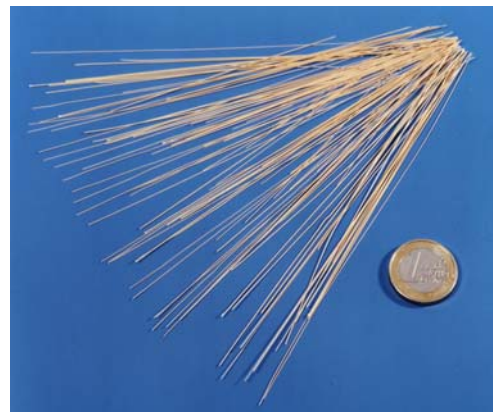
$$d_i = 200..400\mu\text{m}$$

$$d_a = 400..800\mu\text{m}$$



$$h = 100..800\mu\text{m}$$

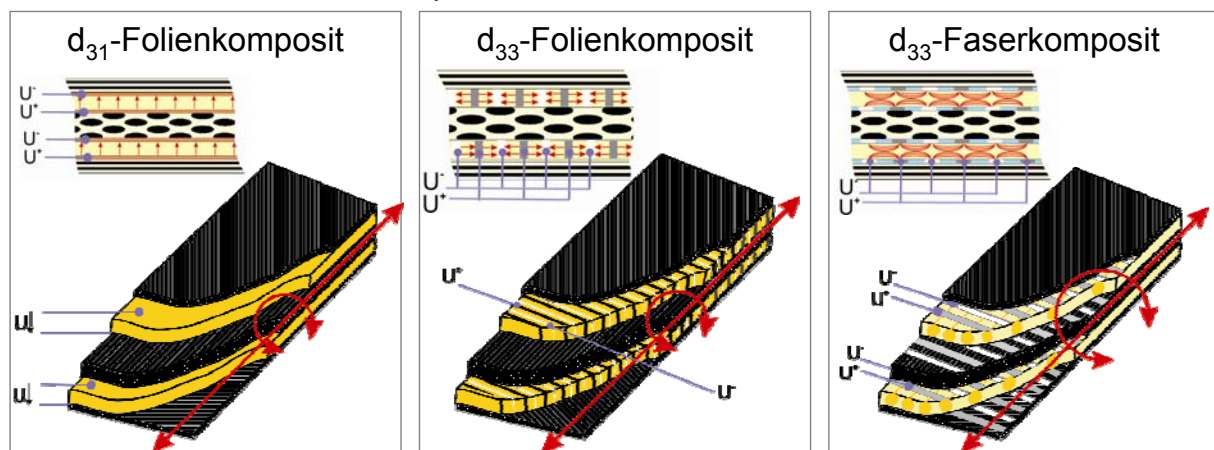
$$b = 400..1000\mu\text{m}$$



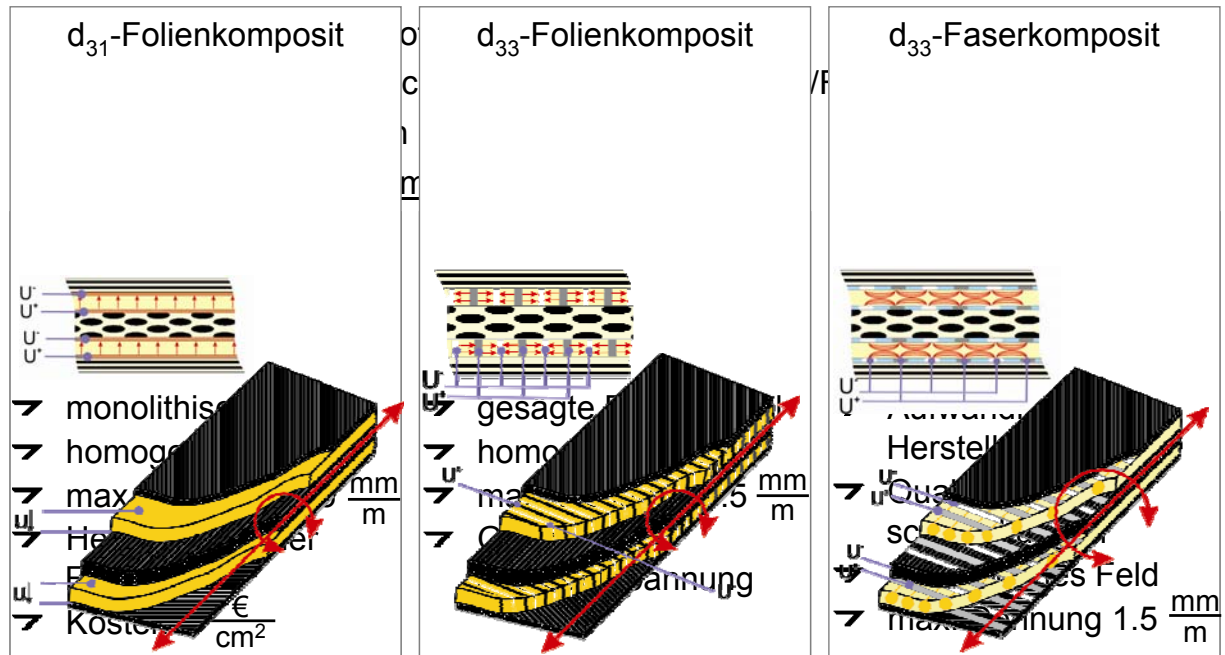
Aktivierung von Faserverbunden durch Einbettung von Piezokeramiken

- Lasttragende Kohlenstofffaser
- Aktuatorische/sensorische Piezokeramische Faser/Folie
- Kraftübertragung durch Polymer/Klebstoff (Schub)

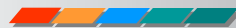
Bauformen von Flächenkompositen:



Aktivierung von Faserverbunden durch Einbettung von Piezokeramiken



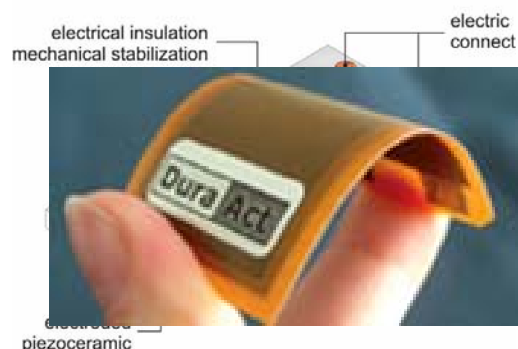
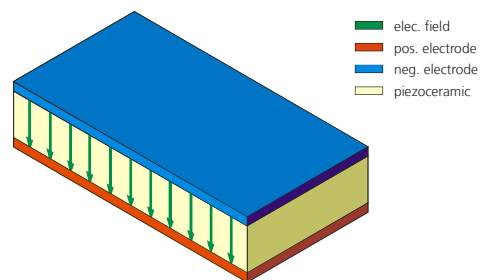
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 15

Piezokomposite als strukturintegrierbare Aktuatoren Folienaktuator

- Flächige Lasteinleitung
- Schutz der spröden Piezokeramik
- Druckvorspannung
- Großer Frequenzbereich
- Akustische Impedanzanpassung
- Behinderung von Rissausbreitung
- Isolation und einfache Kontaktierung
- Realisierung komplexer Architekturen



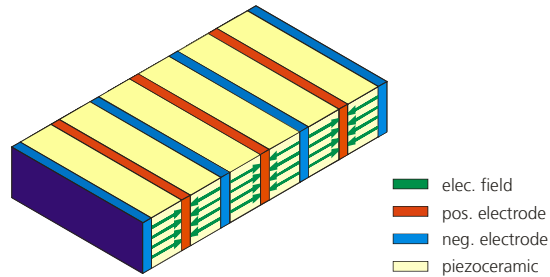
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



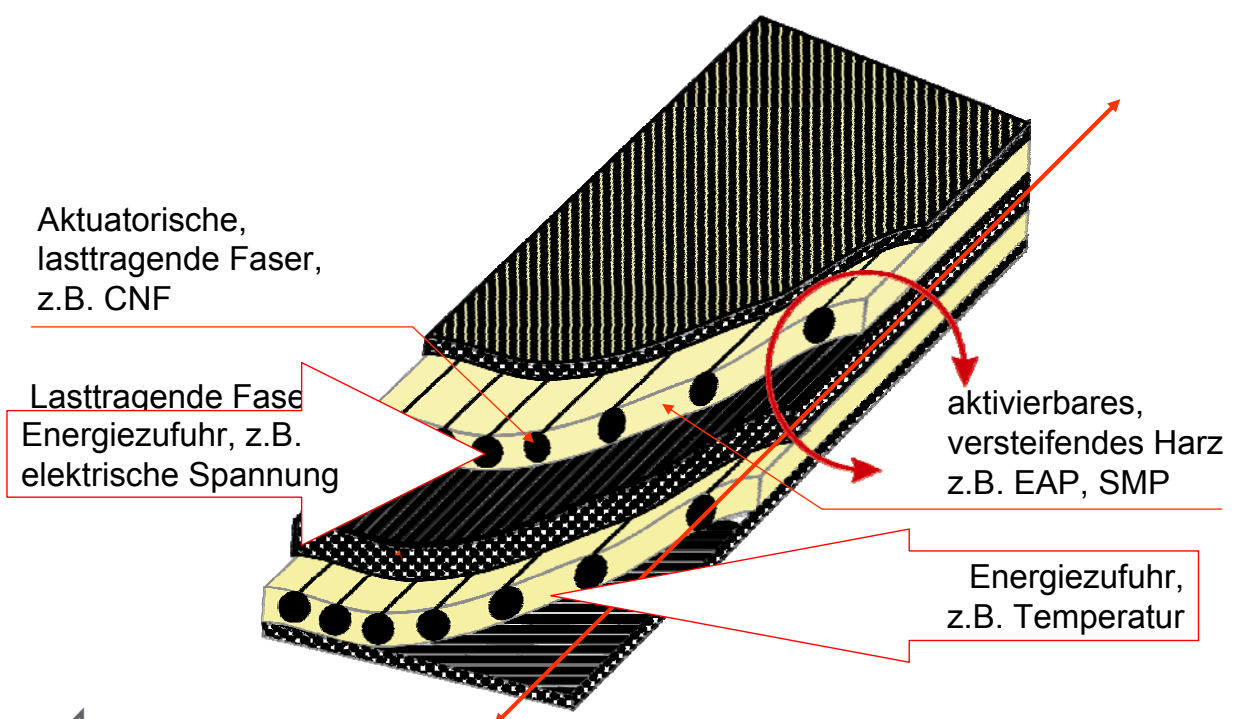
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 16

Piezokomposite als strukturintegrierbare Aktuatoren Multilayerflächenaktuator

- Ausgangsprodukt Multilayer-Stapelaktuator
- Kontaktierung mit leitfähigem Epoxidharz
- Zersägen in 0.3mm Scheiben
- Einbettung in Verbund
- Signifikante Absenkung der Ansteuerspannung (400 V → 120 V)
- Größere aktive Dehnung



Perspektiven adaptronischer Faserverbunde

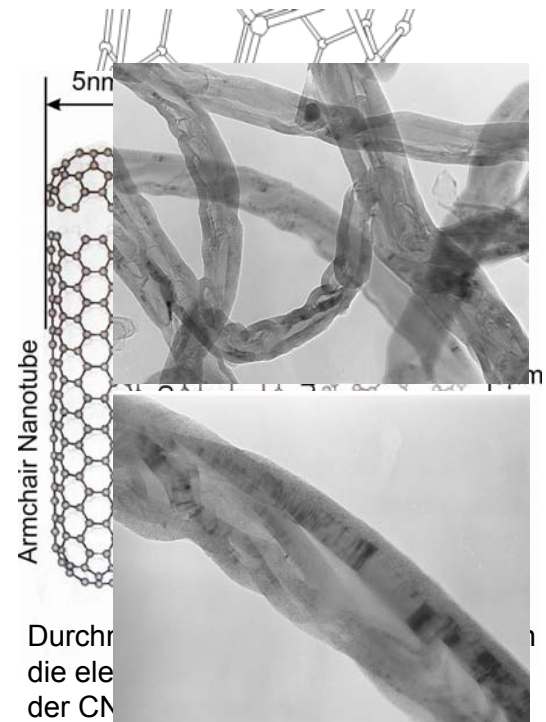


Carbon Nanotubes und Carbon Nanofibres

- Entdeckung der CNT 1991
- Graphitische, zylindrische/konische Röhren
- Chirale und achirale Strukturen
- Verspinnung zu Fasern (CNF)
- Nachweis der CNT-Aktivierbarkeit 1999

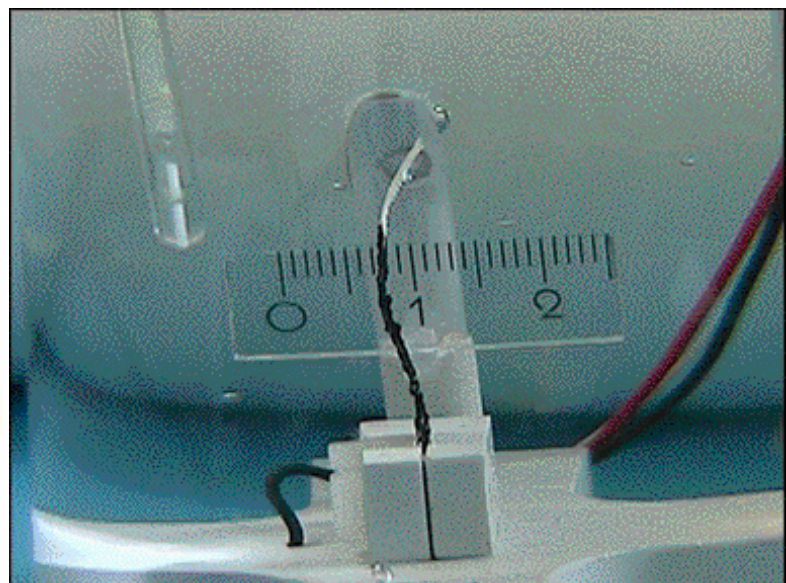
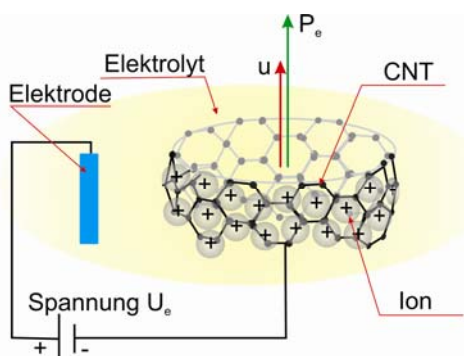
Eigenschaften

- Niedrige Dichte: $1,33 \text{ g/cm}^3$
(Piezokeramik $7,76 \text{ g/cm}^3$)
- E-Modul: 640 GPa
(Piezokeramik 64 GPa)
- Aktive Dehnung: 1%
(Piezokeramik: 0,1%)
- Temperaturbeständigkeit: $> 1000^\circ\text{C}$
(Piezokeramik : 150°C)
- Energiedichte: 32000 kJ/m^3
(Piezokeramik: 32 kJ/m^3)



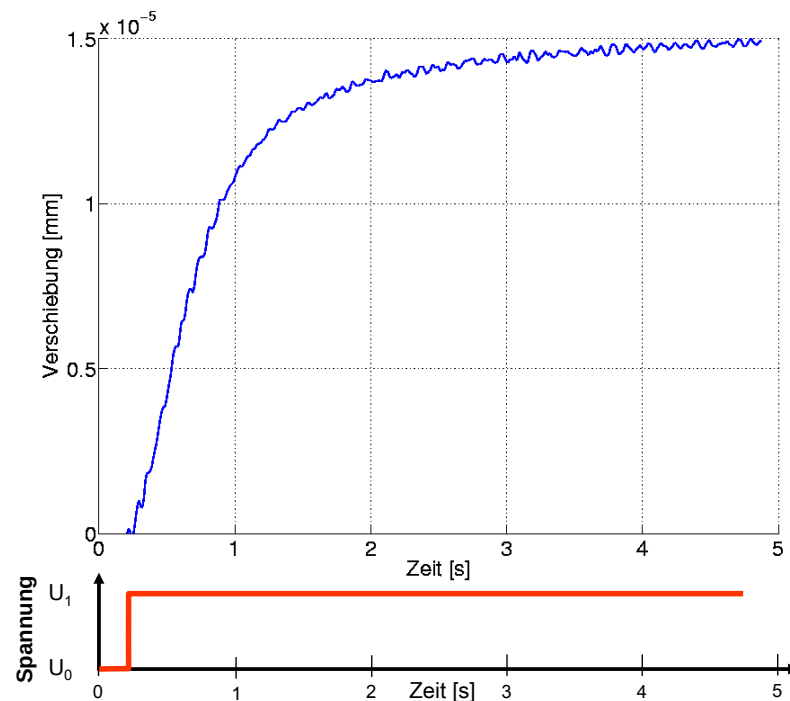
Aktivierbarkeit der CNT's

- Elektrolytionen bilden „double layer“
- Carbon Nanotubes können sich nur ausdehnen



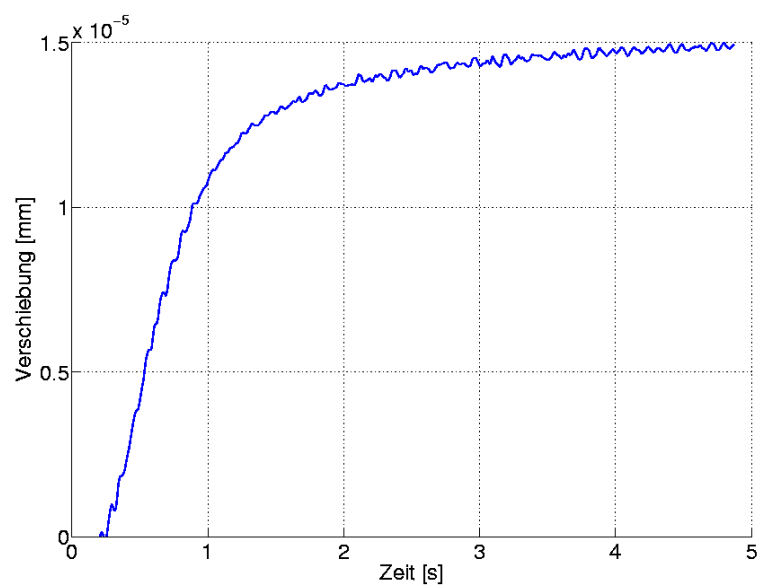
Sprungantwort (R-Kurve)

- Sprungantwort auf Spannungssprung



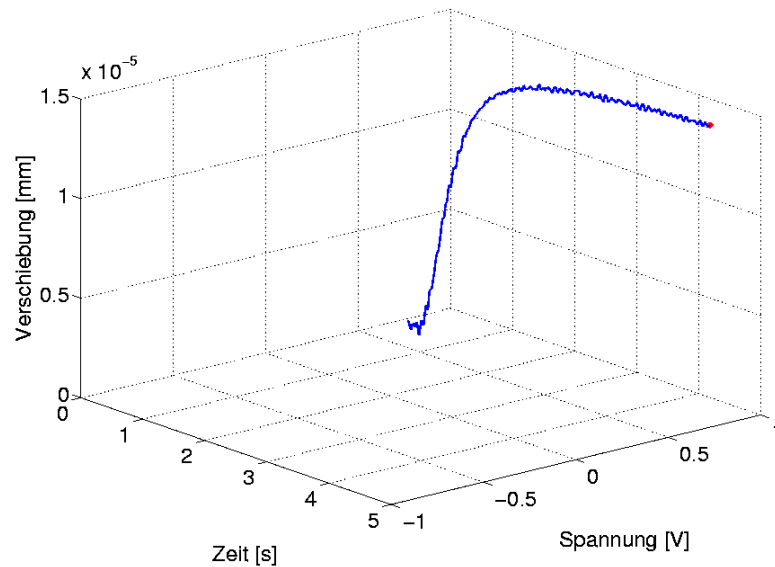
Sprungantwort (R-Kurve)

- Sprungantwort auf Spannungssprung



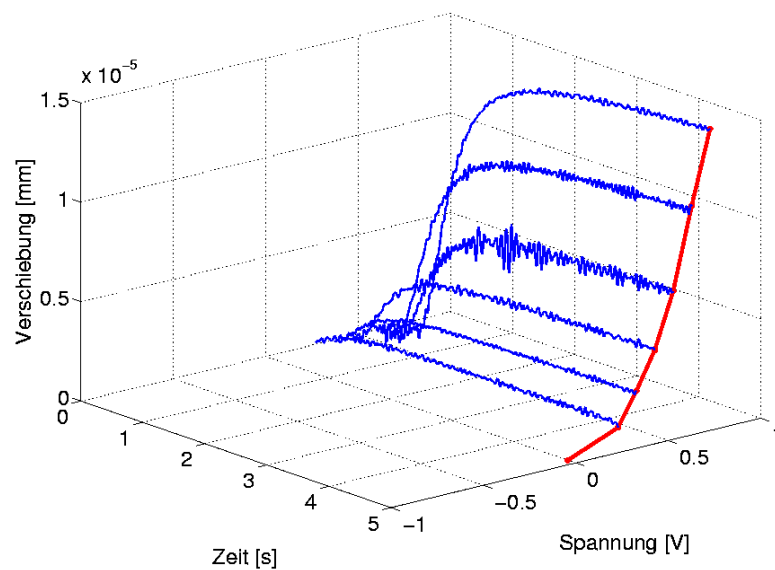
Sprungantwort (R-Kurve)

- Sprungantwort auf Spannungssprung
- Verbindung der Endauslenkungen



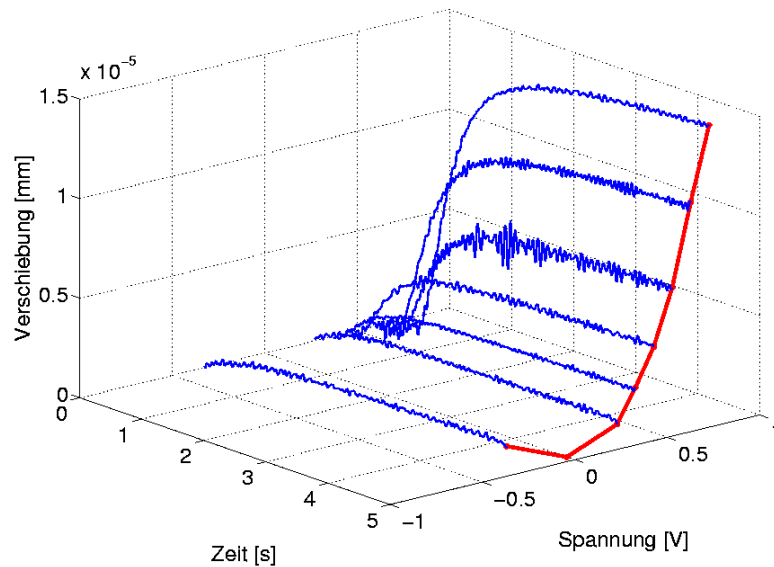
Sprungantwort (R-Kurve)

- Sprungantwort auf Spannungssprung
- Verbindung der Endauslenkungen
- Hinzufügen der Null für $\Delta U=0$



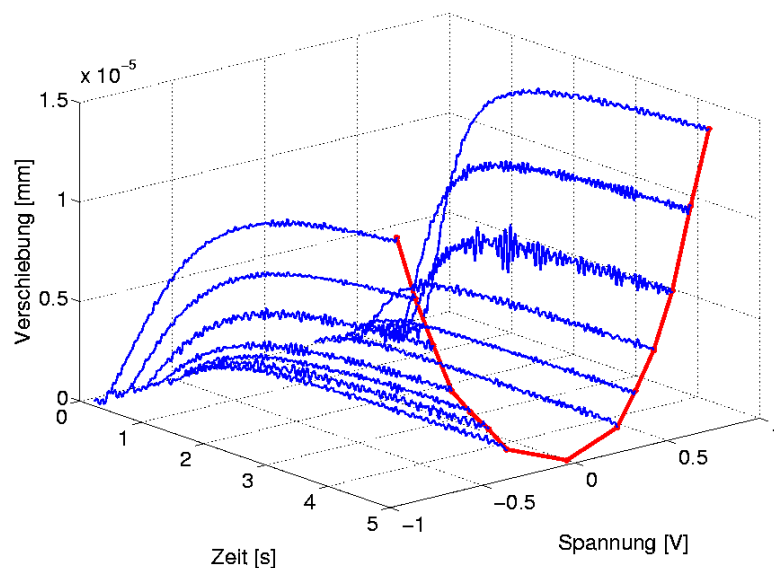
Sprungantwort (R-Kurve)

- Sprungantwort auf Spannungssprung
- Verbindung der Endauslenkungen
- Hinzufügen der Null für $\Delta U=0$



Sprungantwort (R-Kurve)

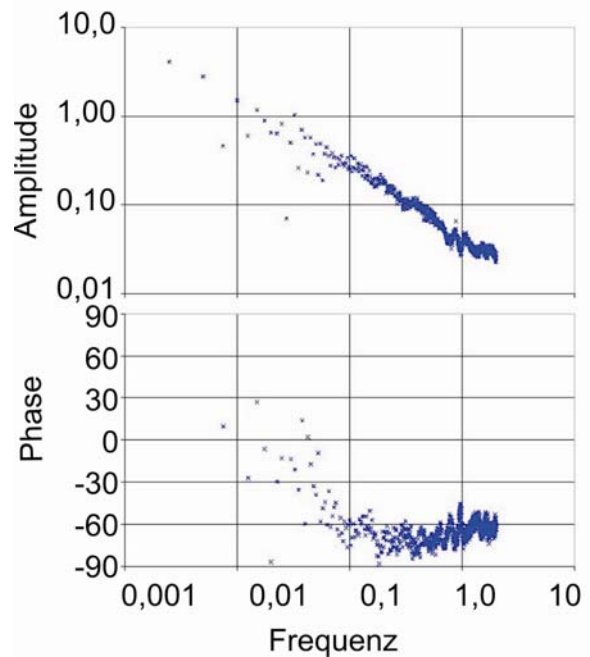
- Sprungantwort auf Spannungssprung
- Verbindung der Endauslenkungen
- Hinzufügen der Null für $\Delta U=0$
- Entstehung der Repräsentativen Kurve



Repräsentative Kurve

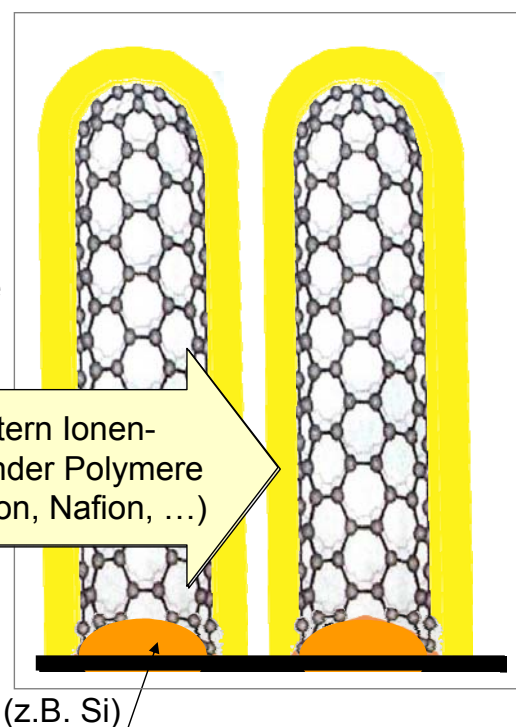
Dynamische Eigenschaften der CNT's

- Dehnungsantwort auf angelegte Wechselspannung
- Für niedrige Frequenzen ($f < 0.1$ Hz) Verhalten eines Kondensators:
abfallender Amplitudengang
Phasendrehung um 90°
- Für höhere Frequenzen Verhalten eines Widerstandes
- Dynamisches Verhalten von Ionenbewegung dominiert



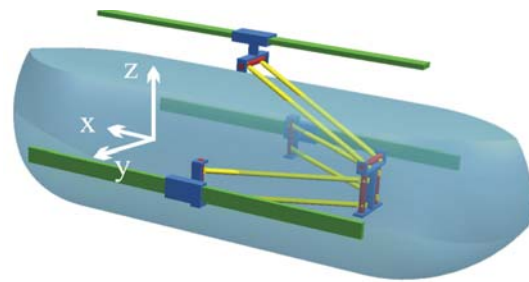
Ziel: Integrierte Herstellung von CNT-Aktuatoren

- **Verfahren für CNT-Herstellung:**
 - Lichtbodenentladung (MWCNT)
 - Laserverdampfen (MWCNT)
 - katalytische chemische Dampfphasenabscheidung (C-CVD)
 - katalytische Plasma-aktivierte chemische Dampfphasenabscheidung (C-PECVD)
- **Anforderungen für die Herstellung makroskopischer CNT-Aktuatoren:**
 - Gerichtetes Wachstum
 - Single Walled Nanotubes
 - Hohe Reinheit
 - In situ Einbringung des Elektrolyten
 - Selbstorganisierter Prozess

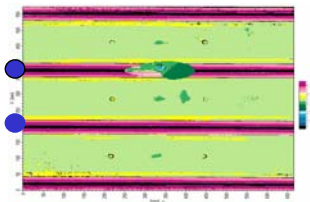


Anwendungsbeispiele für den Einsatz aktuatorischer Verbundwerkstoffe

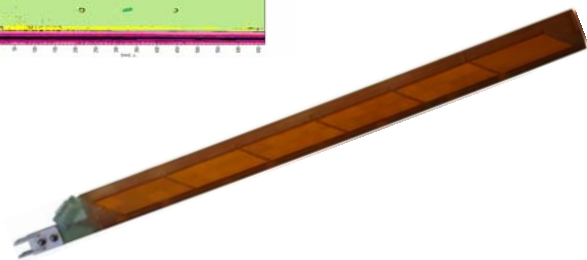
➤ Parallelrobotik



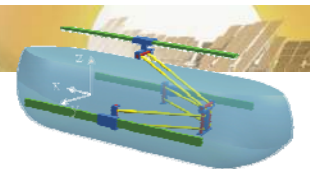
➤ Integrierte Bauteilüberwachung



➤ Aktiv verwindbares Rotorblatt



Anwendungsbeispiel 1: Parallelrobotik



Ziele in der Automatisierung von Produktionsprozessen mit Robotern:

- Reduktion der Zykluszeiten
- Steigerung der Prozessqualität

Parallelroboter erhöhen

- Gesamtsteifigkeit
- Beschleunigungen

Problematik:

- Hohe Beschleunigungen induzieren Schwingungen in den Robotern



Vibrationsminderung mit adaptiven Maßnahmen

Untersuchungen am TRIGLIDE

- 4 Freiheitsgrade
(3 translatorische und ein rotatorischer FHG)
- Aktive Stäbe mit je 3 Gelenken
- Maximale Beschleunigung des Endeffektors: 10 g
- Positionsabhängiges strukturdynamisches Verhalten
- Geringe Strukturdämpfung



Anwendungsbeispiel 2: Integrierte Bauteilüberwachung

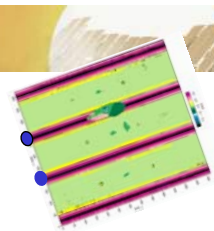
Verbreitung von Faserverbundwerkstoffen mit spezifischen Bauteilschäden und Forderungen nach

- bedarfsgerechten Wartungsintervallen
- Kosteneffizienz durch zeitlich optimierten Betrieb
- erhöhter Betriebssicherheit

führt zum Wunsch nach

➡ Integrierter Bauteilüberwachung

Generierung von Lambwellen mit Hilfe strukturintegrierter piezoelektrischer Aktuatoren
Analyse der Wellenausbreitung

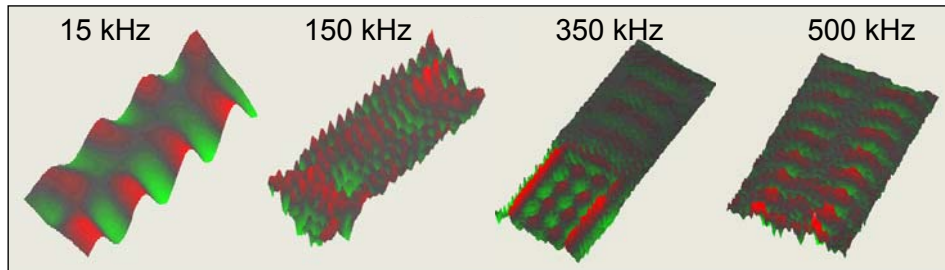


Quelle: Siemens AG

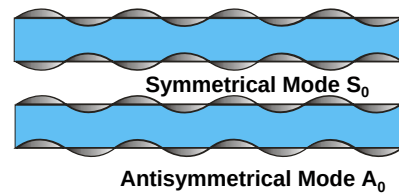
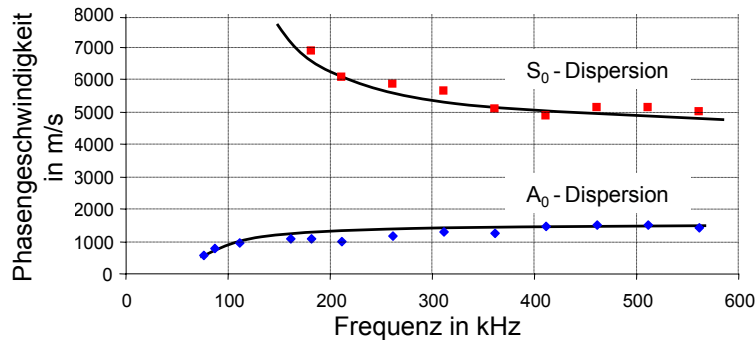


Quelle: Airbus

Lambwellenmoden in Faserverbunden



CFK-Platte,
Gewebe,
DP-RTM -
Fertigung



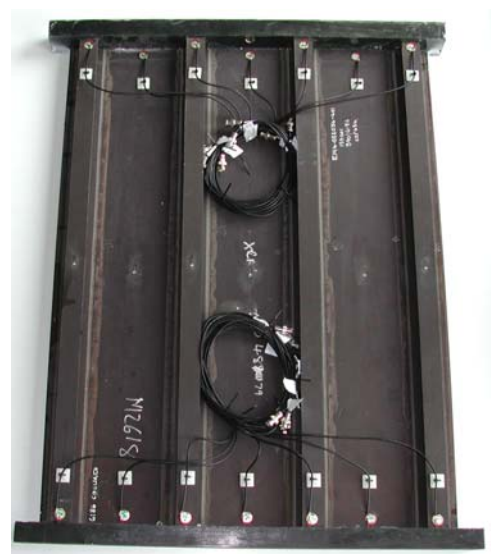
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 33

Schadensdetektion

- Ziel: Detektion typischer Schäden in CFK-Bauteilen (Delamination, Stringerablösung, ...)
- Beispiel: Stringerablösung an einem versteiften CFK-Panel unter Drucklast (Beulverhalten)
- Impulsartige Signale mit applizierten piezokeramischen Flächenaktuatoren



Stringerversteiftes CFK-Panel

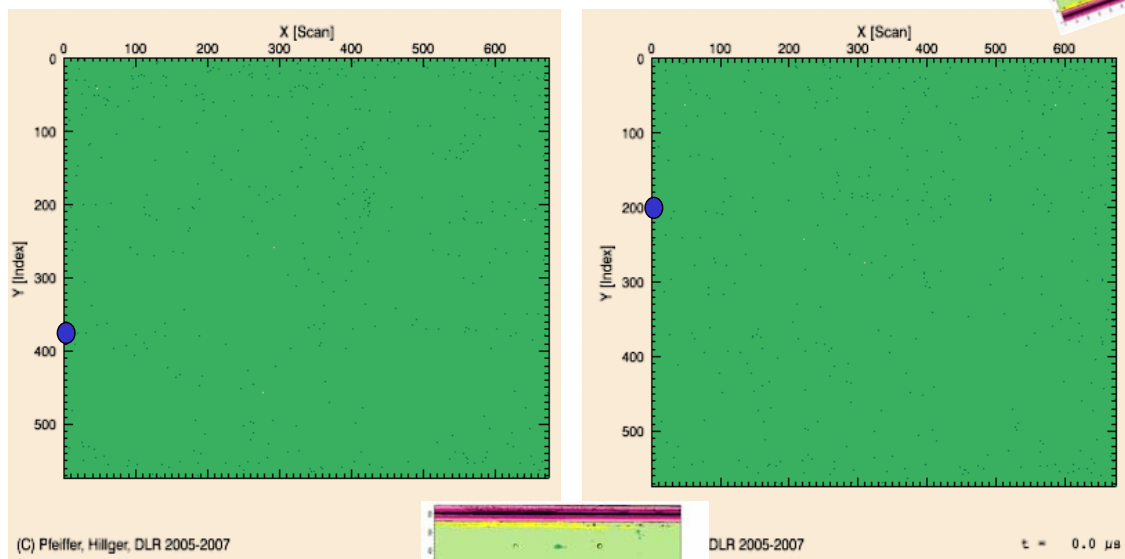


Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 34

Berechnete Animationen aus Messungen



Intakter Stringer

Abgelöster Stringer

Anwendungsbeispiel 3: Aktiv verwindbares Rotorblatt

Herausforderung:

Höherharmonische Verwindung ($\pm 2^\circ$)
eines Hubschrauberrotorblattes zur
Reduktion von Lärm und
Vibrationen und zur
Leistungssteigerung

Lösung:

- Integration von gerichtet wirkenden Flächenaktuatoren in eine anisotrope Rotorblatthaut (Zug-Torsionskopplung)
- Entwicklung/Bau eines Modellrotorblattes zur Verifikation der Ergebnisse im Schleudertest und im Windkanal



ren

als

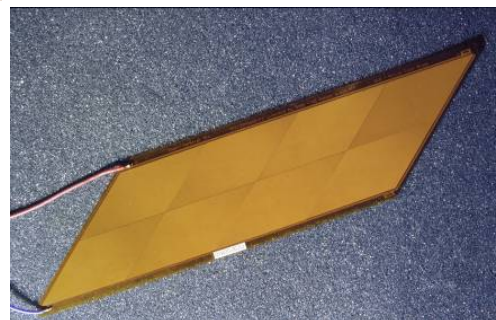
Orthotropierichtungen der Einzelschichten

ϕ

φ – Orthotropierichtung	Υ – Werkstoffelastizität
k – Kopplungskoeffizient	E – Energieeintrag
T – Temperatur	I – Trägheitsmomente



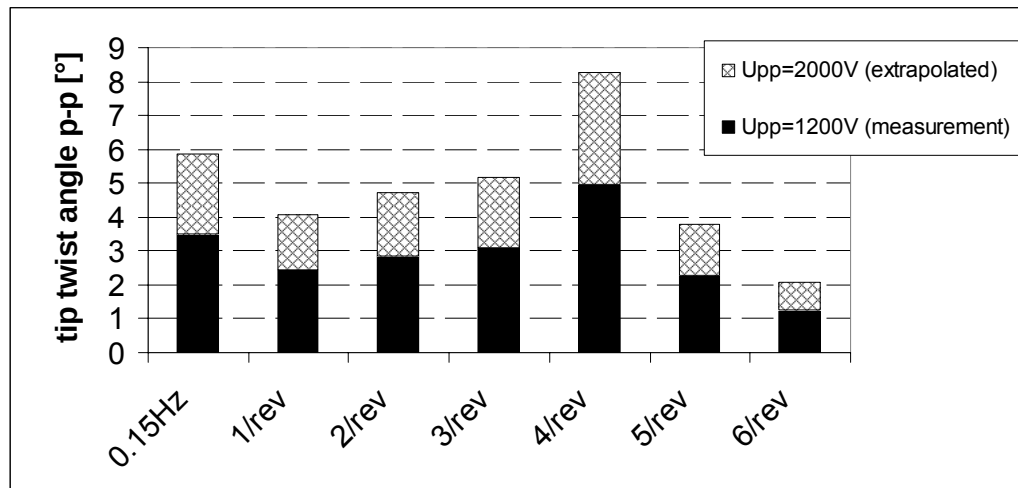
- Referenz: BO-105 Rotor
 spezielle Aktuatorgeometrie (40°)
 Aktivierung der 6 Segmente
 individuell möglich
 Sensoren in die Haut integriert
 Aktuatorfläche: 1600 cm^2
 Zug-Torsionskopplung
-



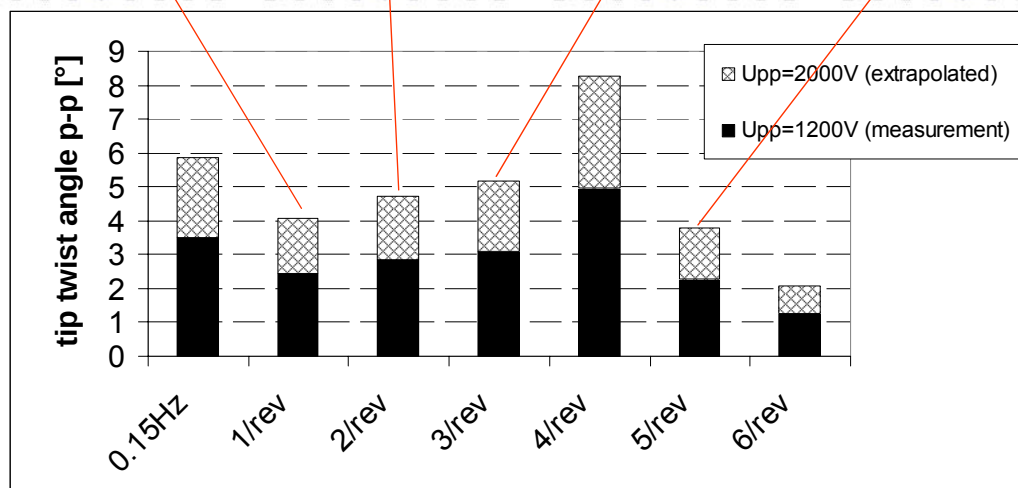
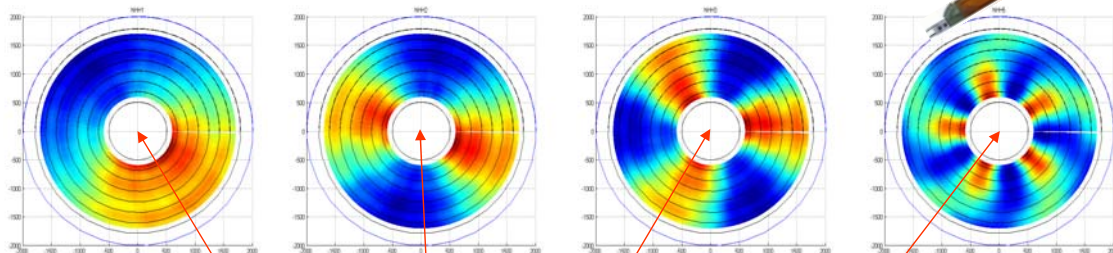
Experimentelle Ergebnisse

➤ Ergebnisse der Schleuderversuche

- Höher harmonische Blattspitzenverwindung unter Zentrifugallasten (Reduzierte Aktuatorspannung, $n=1043$ rpm)



Verteilung des Torsionsmomentes



Schleudertest des aktiv verwindbaren Rotorblattes



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

