

# Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme. Abschlussbericht

Bearbeitet von  
Jürgen Ruth, Rainer Gump, Christian Heidenreich

1. Auflage 2012. Buch. 189 S.  
ISBN 978 3 8167 8639 9

[Weitere Fachgebiete > Technik > Baukonstruktion, Baufachmaterialien](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

**F 2801**

Jürgen Ruth, Rainer Gump, Christian Heidenreich

# **Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme**

**Fraunhofer IRB**  **Verlag**

**F 2801**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8639-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/bauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung)

Forschungsvorhaben  
Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme

## Forschungsergebnisse - Abschlussbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft  
Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7-09.8/II 3 - F20-09-072)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



### Projektpartner

<b>Bauhaus-Universität Weimar:</b>	Professur Tragwerkslehre Professur Entwerfen und Tragwerkskonstruktion
<b>SKZ - Das Kunststoff-Zentrum</b>	Kunststoff-Forschung und -Entwicklung gGmbH
<b>Datum:</b>	31. August 2011

<b>Bearbeiter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth Prof. Dipl.-Ing. Rainer Gump Dipl.-Ing. Christian Heidenreich
--------------------	--

## Kurzfassung

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive System (AFAS)“ vorgestellt.

Der Ansatz im Forschungsprogramm AFAS bestand darin, die Effektivität von Faser-verbundwerkstoffen für Anwendungen im Bauwesen zu untersuchen und durch den Einsatz innovativer Techniken zu steigern. Hierzu wurden zunächst verschiedene Recherchen zur Ausbildung faserverstärkter Strukturen in der Natur durchgeführt und geeignete Übertragungen dieser Erkenntnisse auf das Bauwesen diskutiert. Auf diese Weise können die zu verwendenden Materialien entsprechend ihrer Eigenschaften optimal genutzt werden.

Des Weiteren werden die Kenntnisse der Luft- und Raumfahrtindustrie in der Anwendung aktiver Materialien und Steuertechnik vorgestellt und die Übertragbarkeit auf Anwendungen im Bauwesen diskutiert.

Um die zuvor erarbeiteten Grundlagen effektiv für Anwendungen im Bauwesen zu nutzen, besteht die Notwendigkeit verschiedene Softwareprodukte zu nutzen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens AFAS wurden geeignete Schnittstellen entwickelt, welche einen kontinuierlichen Datenaustausch zwischen diesen Programmsystemen ermöglichen.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend an verschiedenen Verifikationsobjekten vorgestellt und die Möglichkeiten zusammengefasst.

## Abstract

In the final report of the research project „Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive System (AFAS)“ are the main results presented.

The approach in the research program AFAS was to investigate the effectiveness of fiber composites for building applications and increase the use of innovative techniques. So, first, various research on fiber-reinforced structures training conducted in the nature of these findings and discuss appropriate transfers to the building industry. This allows the materials to be used according to their properties can be optimally used.

Furthermore, the knowledge of aviation industry in the application of active materials and control technology presented and discussed the applicability to civil engineering applications.

To the previously elaborated bases to use it effectively for building applications, there is a need to use different software products. As part of the research project AFAS appropriate interfaces have been developed that allow a continuous exchange of data between these systems.

The gained knowledge are finally presented to various objects of verification and summarizes the possibilities.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>17</b>
<b>1. AFAS - Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für adaptive Systeme</b>	<b>19</b>
1.1. Das Forschungsvorhaben . . . . .	19
<b>2. Aufzeigen des derzeitigen Kenntnis- und Anwendungsstandes adaptiver technischer Systeme</b>	<b>21</b>
2.1. Smart materials für adaptive Systeme . . . . .	22
2.2. Aufzeigen von derzeitigen Anwendungen von adaptiver Systeme in der Luft- und Raumfahrt sowie im Maschinenbau . . . . .	25
2.2.1. Anwendungsgebiete von Piezokeramiken . . . . .	25
2.2.2. Anwendungsgebiete von Formgedächtnislegierungen . . . . .	27
2.2.3. Anwendungsgebiete Optischer Fasern . . . . .	28
2.3. Aufzeigen möglicher Einsatzgebiete aktiver Bauteile im Bauwesen . . . . .	29
2.3.1. Anwendungsgebiete von Piezokeramiken . . . . .	31
2.3.2. Anwendungsgebiete Magnetorheologischer Fluide . . . . .	36
2.3.3. Anwendungsgebiete von Formgedächtnislegierungen . . . . .	40
2.3.4. Anwendungsgebiete von Phasenwechselmaterialien . . . . .	43
2.3.5. Anwendungsgebiete Optischer Fasern . . . . .	45
2.4. Aufzeigen der Einsatzmöglichkeiten aktiver Bauteile im Bauwesen für spezielle Belastungen . . . . .	48
2.4.1. Erdbeben . . . . .	49
2.4.2. Begrenzung von Durchbiegungen und Schwingungen . . . . .	50
<b>3. Leichtbau und die Vorteile von Faserverbundstrukturen</b>	<b>59</b>
3.1. Leichtbau . . . . .	59
3.2. Biologische Faserverbundstrukturen . . . . .	61
3.3. Aktuelle Entwicklungen und Konzepte im Automobilbau . . . . .	66
3.4. Beispiele von FVK-Anwendungen im Bauwesen . . . . .	66
3.4.1. Faserverbundbauteile als lineare Bauteile . . . . .	67
3.4.2. Freiformschalentragwerke als Faserverbundstrukturen . . . . .	70
3.4.3. Entwicklung im Fassadenbau - Faserverbundwerkstoffe und Wandelbarkeit . . . . .	73
3.4.4. Freiformarchitektur ohne Schalungsaufwand . . . . .	76
3.4.5. Kunststoff-Faltwerke . . . . .	76
3.4.6. Modulare Bauweise - Vom vorgefertigten Einzelteil zum Bauwerk . .	81

3.5. Vergleichende Betrachtung von Stahlbetonschalen - Berechnungsannahmen und Systembildung . . . . .	82
3.5.1. Betonschalen . . . . .	82
3.5.2. Betonrippenschalen . . . . .	83
3.5.3. Betongitterschalen . . . . .	83
3.5.4. Lastannahmen für Schalentragerwerke - Schneelasten . . . . .	84
3.5.5. Lastannahmen für Schalentragerwerke - Windlasten . . . . .	84
3.5.6. Tragverhalten von Schalentragerwerken - Formfindung und historische Entwicklung . . . . .	85
3.5.7. Tragverhalten . . . . .	86
3.5.8. Stabilität . . . . .	86
3.5.9. Imperfektionen . . . . .	87
3.6. Strukturoptimierung . . . . .	88
3.6.1. Topologieoptimierung . . . . .	88
3.6.2. Formoptimierung und -findung . . . . .	89
3.6.3. Materialoptimierung - Faserorientierung . . . . .	90
<b>4. Innovative Planungswerkzeuge zur Generierung adaptiver Systeme</b>	<b>93</b>
4.1. Parametrik in Design und Berechnung . . . . .	93
4.1.1. Parametrisches Design . . . . .	93
4.1.2. Parameterbasierte statische und dynamische Berechnung . . . . .	96
4.2. Parametrische Design-, Berechnungs-, Optimierungs- und Steuerungssoftware — Werkzeuge . . . . .	98
4.2.1. Parametrische Designsoftware . . . . .	100
4.2.2. Parametrische Steuerungssoftware . . . . .	102
4.2.3. Parametrische Berechnungs- und Optimierungssoftware . . . . .	103
4.2.4. Simulation aktiver Prozesse mit Hilfe statisch-dynamischer Analysewerkzeuge . . . . .	109
4.3. Zukunftsweisende Nutzung moderner Programmtechnik und notwendige Schnittstellen zur Entwicklung optimierter Faserverbundstrukturen . . . . .	117
4.3.1. Entwicklung von Schnittstellen — Auslegung und Optimierung von Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen unter Berücksichtigung des Fasergehaltes und der Topologieoptimierung . . . . .	117
<b>5. Erstellung von Anwendungshilfen — Identifikation geeigneter intelligenter Materialien für verschiedene Anwendungszwecke</b>	<b>123</b>
5.1. Definition von im Bauwesen einsetzbarer aktiver Werkstoffe . . . . .	123
5.2. Piezoelektrische Keramiken . . . . .	126
5.2.1. Bauarten und aktuelle Entwicklungen piezoelektrischer Aktoren . . . . .	126
5.2.2. Auswahl von Piezoaktoren . . . . .	129
5.3. Formgedächtnislegierungen . . . . .	130
5.3.1. Formgedächtnislegierungsarten . . . . .	131
5.3.2. Anwendungen von Formgedächtnislegierungen . . . . .	136
5.4. Magnetische Formgedächtnislegierungen . . . . .	139

---

---

5.5. Anwendungshilfen . . . . .	140
5.5.1. Auswahlmatrix Sensorik . . . . .	141
5.5.2. Auswahlmatrix Aktorik . . . . .	141
<b>6. Demonstrationsobjekt</b>	<b>143</b>
6.1. Vorüberlegungen . . . . .	143
6.2. Relevante Entwurfskriterien . . . . .	147
6.3. Schalentragswerke - rechnerische Voruntersuchungen . . . . .	148
6.4. Demonstrationsobjekt - DO1 . . . . .	151
6.4.1. Definition der Geometrie- und Materialparameter . . . . .	151
6.4.2. Lastfälle . . . . .	152
6.4.3. Berechnungsergebnisse . . . . .	152
6.4.4. Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse und Optimierung . . .	161
6.4.5. Herstellung der Fuge - Zusatzintegrationsmöglichkeiten . . . . .	162
6.5. Demonstrationsobjekt - DO2 . . . . .	171
6.6. Demonstrationsobjekt - DO3 . . . . .	174
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>175</b>
7.1. Zusammenfassung . . . . .	175
7.2. Ausblick . . . . .	176
<b>Literatur</b>	<b>177</b>
<b>A. Projektzeitplan</b>	<b>185</b>
<b>B. Öffentlichkeitsarbeit</b>	<b>187</b>

---