

## Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme.

Bearbeitet von  
Jürgen Ruth, Rainer Gump, Christian Heidenreich

1. Auflage 2015. Taschenbuch. 189 S. Paperback  
ISBN 978 3 8167 9442 4

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

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beack-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.

BAUFORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS, BAND 113

Jürgen Ruth, Rainer Gump, Christian Heidenreich

# Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme (AFAS)

Fraunhofer IRB Verlag

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem  
Förderkennzeichen SF 10.08.18.7-11.10/ II 3-F20-10-1-096  
vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, mit Mitteln der  
Forschungsinitiative Zukunft Bau gefördert. Für den Inhalt sind allein die Verfasser  
verantwortlich.

**Druck und Weiterverarbeitung:**

IRB Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **Fraunhofer IRB Verlag**, 2015

ISBN 978-3-8167-9442-4

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Telefon 0711 970-2500, Telefax 0711 970-2508

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

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

**Alle Rechte vorbehalten**

Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warennamen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen werden oder aus ihnen zitiert werden, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

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 Schalentragwerke - Schneelasten . . . . .	84
3.5.5. Lastannahmen für Schalentragwerke - Windlasten . . . . .	84
3.5.6. Tragverhalten von Schalentragwerken - 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 Steuersoftware — Werkzeuge . . . . .	98
4.2.1. Parametrische Designsoftware . . . . .	100
4.2.2. Parametrische Steuersoftware . . . . .	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>

---