

Adaptronische Komponenten für den Maschinenbau

Elmar Breitbach, Hans Peter Monner, Stephan Algermissen
Institut für Strukturmechanik,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.,
Braunschweig

1. Einleitung

Die Adaptronik ist eine interdisziplinäre Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert. Ziel ist die Realisierung so genannter adaptiver Struktursysteme. Voraussetzung dafür ist die Integration von Sensoren und Aktuatoren auf der Basis aktivierbarer Materialien in die lasttragende Struktur.

Als aktivierbare Materialien haben sich piezoelektrische Werkstoffe zur Realisation von strukturintegrierten Sensoren und Aktuatoren in vielen Anwendungsfällen bewährt. Sie werden applikationsabhängig in Form von diskret wirkenden Piezostapelaktuatoren oder als Piezomodule mit flächiger Kraftereinleitung verwendet. Die Vorteile von piezokeramischen Werkstoffen sind hohe Steifigkeiten, große Stellkräfte, schnelle Ansprechzeiten und ein großer nutzbarer Frequenzbereich. Die Nachteile dieser Werkstoffe wie sprödes Materialverhalten und Nichtlinearität des Piezoeffekts können durch geeignete Konstruktionen und Ansteuerungen beherrschbar gemacht werden.

Kombiniert man dieses Sensor-Aktuator-System mit einer geeigneten Regelungs- und Leistungselektronik, so lassen sich adaptronische Gesamtlösungen für die vielfältigsten Anforderungen generieren.

Unerwünschte Schwingungen und Verformungen sind in nahezu allen Bereichen der industriellen Anwendung zugegen, sodass sich im Bereich der aktiven Schwingungsreduktion für die Adaptronik ein weites Aufgabenfeld ergibt. Aufgrund dieser breiten Ausrichtung ist es wichtig und nahezu unerlässlich, interdisziplinär zu arbeiten, damit in den jeweiligen Branchen neue und auch geeignete Lösungsansätze für die verschiedensten Anwendungen gefunden werden können.

Um die Vielfältigkeit der Adaptronik aufzuzeigen, sind in diesem Beitrag einige aktuelle und bereits abgeschlossene Projekte des Instituts für Strukturmechanik des DLR auf diesem Gebiet beschrieben.

2. Piezomodule

Voraussetzung für die Entwicklung adaptiver Strukturen sind geeignete multifunktionale Werkstoffsysteme, die lasttragende, sensorische und aktuatorische Eigenschaften in sich vereinen. Erreicht werden diese Eigenschaften durch die Kombination von sensorisch und aktuatorisch wirksamen piezokeramischen Materialien mit lasttragenden Werkstoffen wie z.B. Stahl und CFK. Dies kann durch Applikation (Stahl) oder Integration (CFK) erfolgen.

Aufgrund ihrer Beschaffenheit sind piezokeramische Werkstoffe extrem spröde. Dadurch ist die Handhabung und Weiterverarbeitung von dünnen ($d = 200\mu\text{m}$) piezokeramischen Folien mit einem hohen Aufwand und entsprechendem Fertigungsrisiko verbunden. Während Piezokeramiken sehr große Druckbelastungen problemlos ertragen können, sind Zugbelastungen unbedingt zu vermeiden. Dies kann durch die Platzierung der Piezokeramik in ausschließlich druckbelastete Bereiche erfolgen oder durch geeignete konstruktive Maßnahmen, die den piezokeramischen Körper mit einer Druckvorspannung versehen. Neben den Anforderungen die sich aus der mechanischen Beschaffenheit der Piezokeramiken ergeben, kommen weitere elektrische Randbedingungen hinzu. Damit der Werkstoff als elektromechanischer Wandler genutzt werden kann, müssen Elektroden, Kontaktierungen und elektrische Anschlüsse vorgesehen werden. Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb ist eine ausreichende elektrische Isolierung des Wandlers vorzusehen.

Um eine industriegerechte Weiterverarbeitung der empfindlichen und nur gering belastbaren Piezokeramiken zu ermöglichen, und um Probleme hinsichtlich der Kontaktierung und Isolierung zu lösen, stellt die Kapselung der piezokeramischen Folien inklusive aller erforderlicher Komponenten ein vorteilhaftes Konzept dar.

Im Institut für Strukturmechanik des DLR wurde daher eine neue modulare Technologie zur Einbettung piezokeramischer Folien in Polymere entwickelt. Die so entstandenen Wandlerelemente werden als Piezomodule, s. Abb. 1, bezeichnet und können durch Variation der einzelnen Komponenten aufgabengerecht angepasst werden, s. Abb. 2.

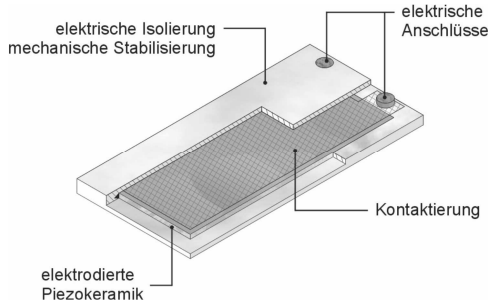


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Piezomoduls

Durch die Einbettung in das Polymer wird die Keramik mit einer mechanischen Stabilisierung und einer elektrischen Isolierung versehen. Die Piezomodule beinhalten weiterhin die elektrische Kontaktierung und die elektrischen Anschlüsse. Für den Aufbau eines Piezomoduls werden kommerziell erhältliche piezokeramische Folien mit standardmäßigen Abmessungen von $50 \times 25 \times 0,2 \text{ mm}^3$ verwendet. Diese Folien sind beidseitig mit vollflächig gesputterten Metallisierungsschichten versehen. Durch diese Art der Elektrodiierung wird der piezoelektrische Quereffekt (d_{31}) genutzt.

Zur Kontaktierung der vollflächigen Elektrode der Piezomodule wird ein dünnes Metallnetz verwendet, das die Elektrode vollständig abdeckt. Durch diese Art der Abdeckung wird gewährleistet, dass im Falle eines Bruches der Keramik durch eine mechanische Überlastung des Moduls, alle Bruchstücke weiterhin angesteuert werden können. Somit kann selbst im Schadensfall das Piezomodul im dynamischen Betrieb mit nahezu gleichbleibenden Leistungswerten betrieben werden.

Ferner sind die Piezokeramik und die Kontaktierung mit einer isolierenden Bettungsmasse umgeben. Diese Bettungsmasse schützt die empfindliche piezokeramische Folie vor äußeren Einflüssen und gewährleistet die Dehnungsübertragung von der Keramik auf die Struktur.

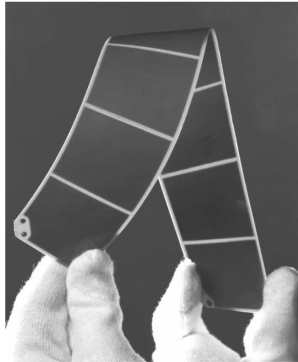


Abbildung 2: Entsprechend den Anforderungen maßgeschneidertes Piezomodul

Mit den so gekapselten Piezokeramiken können die Piezomodule in vielen Bereichen der Industrie und Forschung durch Integration und Applikation flexibel eingesetzt werden. Die möglichen Anwendungsgebiete reichen von der Schwingungsunterdrückung über die Schwingungsanregung bis hin zur Formkontrolle.

3. Parallelroboter FÜNFGELENK

Die zunehmende Automatisierung im Bereich der Handhabung und Montage erfordert langfristig eine Verminderung der Zykluszeiten bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit im Sinne von Prozessqualität. Diese ambitionierten Ziele können durch Parallelkinematiken erreicht werden, die mit ihren geringeren Massen bei gleich bleibender Genauigkeit höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als konventionelle Roboterstrukturen erlauben. Durch Kombination von gestellfesten Antriebseinheiten mit parallelen Kinematiken entstehen leichtere Führungsketten, d.h. Leichtbaulösungen mit höherer Gesamtsteifigkeit.

Insbesondere die gegensätzlichen Ziele hoher Geschwindigkeiten und hoher Genauigkeiten erfordern adaptronische Lösungen. Die Effizienzverbesserungen durch den Einsatz von Parallelstrukturen mit adaptronischen Konzepten werden im DFG - Sonderforschungsbereich 562 „Robotersysteme für Handhabung und Montage“ gemeinsam mit der TU Braunschweig untersucht.

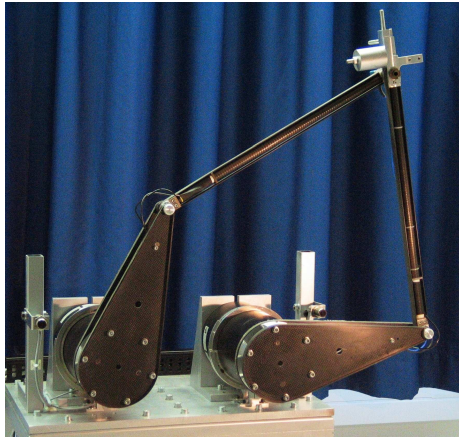


Abbildung 3: Parallelroboter FÜNFGELENK

Die Modellierung von Parallelstrukturen für die Steuerung, Regelung, Kalibrierung und Analyse im Rahmen der Strukturentwicklung erfordert die Erstellung kinematischer und dynamischer Modelle auf der Basis eines Mehrkörpersimulationssystems. Analyse und Synthese ermöglichte die Ermittlung spezieller Eigenschaften, wie z.B. Arbeitsraum oder Positioniergenauigkeit. An der TU Braunschweig wurde für den gesamten Arbeitsraum für verschiedene Strukturkonfigurationen ein Ansatz entwickelt, einen Parallelroboter aktiv und kollisionsfrei durch Singularitäten zu bewegen.

Für die Umsetzung adaptiver Komponenten zur Schwingungskompensation war der Einsatz multifunktionaler Aktuatoren und Sensoren erforderlich. Durch deren Integration in die lasttragenden Elemente konnten die wesentlichen Leichtbauanforderungen erfüllt werden. Es wurde ein aktiver Stab als „intelligentes“ Roboterglied entwickelt, dessen modularer Aufbau eine flexible Implementierung in verschiedene Parallelkinematiken ermöglicht. Die Leistungsdaten der aktiven Stäbe wurden experimentell überprüft und die Ergebnisse mit den Auslegungsdaten abgeglichen. Die wesentlichen Strukturbauteile sind in Faserverbundbauweise ausgelegt und gebaut. Sie wurden in den Demonstrator FÜNFGELENK, s. Abb. 3, einen Parallelroboter mit ebener Struktur, eingebaut.

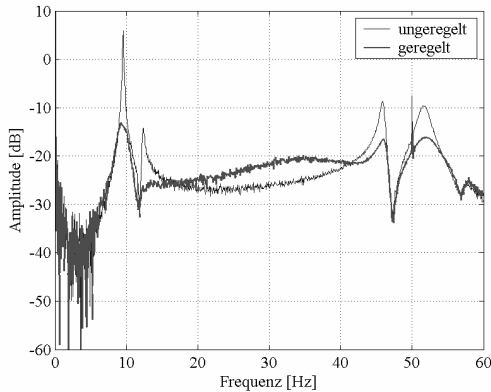


Abbildung 4: Frequenzgang der Störübertragungsfunktion

Mit den im aktiven Stab integrierten Piezo-Aktuatoren und einer positionsabhängigen H_∞ -Regelung konnte eine signifikante Schwingungsreduktion während des Betriebs erreicht werden. Die Abbildung 4 zeigt als Beispiel den Frequenzgang der Störübertragungsfunktion im geregelten und unregelten Fall.

Im nächsten Förderungszeitraum des Sonderforschungsbereiches 562, der im Jahre 2006 endet, wird der Parallelroboter PARAPLACER II konzeptioniert, konstruiert und aufgebaut. Das besondere an diesem Roboter, im Vergleich zum FÜNFGELENK, ist die große Nähe zu den Anforderungen die die Industrie an einen Handhabungs- und Montageroboter stellt. Als Besonderheit wird der PARAPLACER II mit Adaptronik in Form von Piezomodulen als Biegeaktorik ausgestattet sein. Einen ersten Eindruck vermittelt die Abbildung 5 die den Roboter mit applizierten Piezomodulen auf beiden Gliedern als Konzeptstudie zeigt.

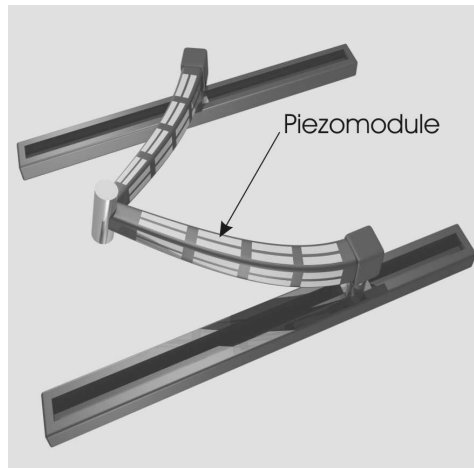


Abbildung 5: Studie des PARAPLACERS II zur Applikation von Piezomodulen

4. Adaptives Cabriolet

Die dynamische Steifigkeit einer Karosserie bestimmt wesentlich den Fahrkomfort eines Fahrzeugs. Durch möglichst hohe Frequenzen der ersten Karosseriemoden wird die Entkopplung der Karosserie von Motor und Fahrwerk angestrebt. Bei Cabriolets liegen diese Karosseriemoden aufgrund des fehlenden Daches in einem Bereich, der Koppelschwingungen mit Motor und Fahrwerk zulässt. Die Folge ist Karosseriezittern, das der Fahrer insbesondere durch Lenkradschwingungen und Zittern des Rückspiegels spürt.

Identifiziert man durch eine experimentelle Modalanalyse die signifikanten Eigenmoden der Karosserie, so stellt sich heraus, dass die Eigenfrequenz des ersten Torsionsmodes nahe der Motor- und Achseneigenfrequenz liegt. Dieser Mode kann somit durch Motor- und Achsschwingungen leicht angeregt werden und wirkt sich daher auf den Fahrkomfort besonders kritisch aus.

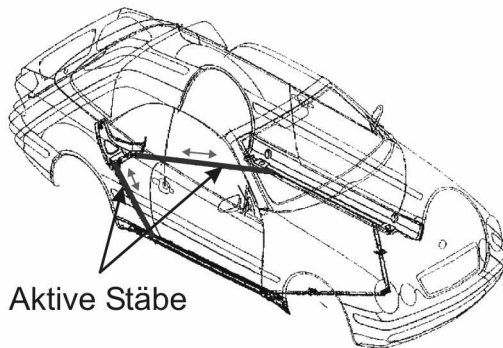


Abbildung 6: Anordnung der aktiven Stäbe in der Cabrio-Karosserie

Aus diesem Ergebnis ist abzuleiten, dass es das Ziel der dynamischen Auslegung sein muss, durch eine möglichst hohe Karosseriesteifigkeit die Eigenfrequenz zu erhöhen. Dabei ist eine der wirksamsten passiven Methoden der Einsatz von Diagonalstreben. Auch eine Vergrößerung der Längsquerschnitte, eine Optimierung der Übergänge vom Längsträger auf A- und B- Säule und eine Einbindung der Rückwand in den Kraftfluss der Torsion wirken sich positiv auf die Erhöhung der Torsionssteifigkeit aus. Ferner werden bei fast allen auf dem Markt befindlichen viersitzigen Cabriolets Karosserietilger mit Massen von 8,5 bis 14 kg zur Kompensation der Torsionsschwingungen eingesetzt. Da sich durch das Schließen des Verdecks die Eigenfrequenz um ca. 1 Hz erhöht, kann ein passiver Tilger nicht gleichzeitig für das geschlossene und für das geöffnete Fahrzeug optimal ausgelegt werden. Dies stellt einen großen Nachteil dieser passiven Schwingungskompensation dar. Außerdem erhöhen alle passiven Maßnahmen das Rohbaugewicht, sodass trotz des fehlenden Daches der Rohbau eines Cabriolets um ca. 50 kg schwerer als der einer entsprechenden Limousine ist.

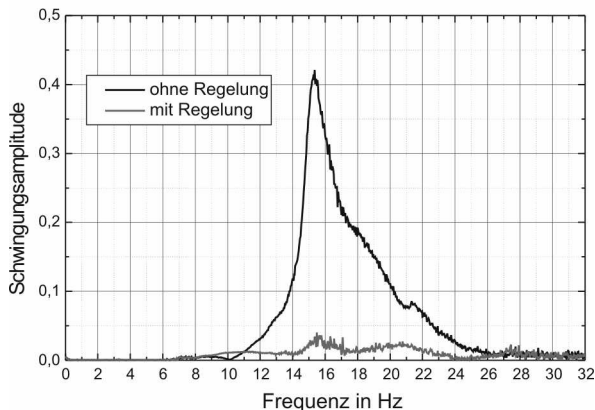


Abbildung 7: Querbeschleunigungen des Rückspiegels mit und ohne Regelung

Zur Umgehung all dieser Probleme wurde im Auftrag der Firma Karmann ein aktives System zur Schwingungskomfortoptimierung untersucht, s. Abb. 6, das für ein Cabriolet einen mit Coupé oder Limousine vergleichbaren Schwingungskomfort erzielt. Dabei werden durch Aktuatoren Kompensationsschwingungen erzeugt, die das Karosseriezittern minimieren und dadurch dem Fahrer einen höheren Komfort bieten. Die Abbildung 7 zeigt die signifikante Reduktion der Torsionsschwingungen durch den Einsatz aktiver Stäbe.

Die Weiterentwicklung dieses Konzeptes wird von der ERAS GmbH, Göttingen in Zusammenarbeit mit Karmann betrieben. Derzeit besteht in dieser Form der Schwingungskompensation, gerade im Hinblick auf den Großserieneinsatz, noch Forschungsbedarf. Es kann jedoch in ein bis zwei Jahren mit der Markteinführung gerechnet werden.

5. Active Twist Blade (ATB)

Ziel der Arbeiten im DLR-ONERA-Projekt Active Twist Blade (ATB) ist die Entwicklung eines Rotorblattes, bei dem durch Einleiten einer Verwindung um die Längsachse eine Variation des Anstellwinkels im Bereich von $\pm 2^\circ$ an der Blattspitze erreicht werden kann. Die Ansteuerung erfolgt durch in die Haut integrierte, verteilte



Abbildung 8: Vereinfachte Teststruktur mit applizierten Piezomodulen

piezoelektrische Aktuatoren bei der dritten und fünften Harmonischen der Rotordrehzahl. Die angestrebte Amplitude lässt, basierend auf Erfahrungen aus früheren experimentellen und numerischen Untersuchungen (z.B. HART, HART II, ...), eine Reduktion des durch Blattwirbelinteraktionen verursachten Lärms von ca. 6dB, eine Reduktion von Vibrationen des Rumpfes um etwa 90%, sowie eine Leistungssteigerung von ca. 3% erwarten. Die Arbeiten umfassen die Optimierung des strukturellen Blattaufbaus im Zusammenspiel mit der Aktuatorik (angestrebte Betriebsspannung 200-400V) sowie Konstruktion und Bau eines Modellrotorblattes einschließlich der Erarbeitung der notwendigen Fertigungstechnologien. Der Nachweis der Funktionalität des aktiven Modellrotorblattes unter Luft- und Zentrifugalkraftbelastung soll in Windkanal- und Schleudertests erbracht werden.

Im Rahmen einer Konzeptionsphase wurden, basierend auf einer Sichtung der vorhandenen Fachliteratur sowie eigenen Parameterstudien, zunächst das grundsätzliche Wirkprinzip der Aktuatorik, der Lagenaufbau der passiven Blatthaut und die innere Blattstruktur ausgewählt. Bereits zu diesem Zeitpunkt flossen Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen verschiedener Aktuatorbauformen in die Überlegungen ein.

Im Anschluss daran erfolgte die Optimierung der Aktuatorik und des Lagenaufbaus anhand eines numerischen Modells. Zur Validierung des Rechenmodells wurden begleitende experimentelle Untersuchungen an geometrisch vereinfachten Teststrukturen, s. Abb. 8, durchgeführt und auf der Grundlage eines Vergleichs der Ergebnisse mit den numerischen Vorhersagen eine Anpassung von Modellparametern vorgenommen. Parallel dazu wurde im Rahmen der Herstellung der Teststrukturen eine Fertigungstechnologie zur Integration der Aktuatorik in die Rotorblatthaut entwickelt. Ziel des iterativen Optimierungsprozesses der Aktuatorik und des Lagenaufbaus war

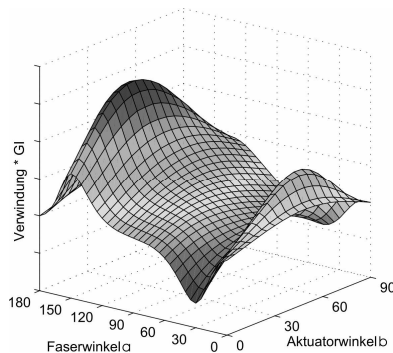


Abbildung 9: Verwindung des Rotorblattes über dem Faser- und Aktuatorwinkel

zunächst die Realisierung einer möglichst großen Blattverwindung bei Einhaltung der Massen- und Steifigkeitsverteilung des als Referenz verwendeten BO105-Rotorblattes. Als Ergebnis wurden zwei Varianten für ein Rotorblatt mit aktiver Verwindung auf der Grundlage der Blattgeometrie des BO105-Modellrotors erarbeitet.

Um Aussagen über die rotordynamische Stabilität sowie die aerodynamischen und akustischen Eigenschaften zu erhalten, wurde im Institut für Flugsystemtechnik des DLR das dynamische Verhalten beider Blattvarianten unter dem Einfluss von Zentrifugal- und Luftkräften numerisch simuliert. Aus den Ergebnissen konnten Hinweise für die derzeit laufende weitergehende Optimierung abgeleitet werden, die auch Festigkeitsaspekte und fertigungstechnische Gesichtspunkte beinhaltet. Weiterhin wurde die zu erwartende Leistungsfähigkeit des Rotorblattes beurteilt und damit die Erreichbarkeit der Projektziele positiv bewertet.

Die abschließende Bewertung des Konzeptes der aktiven Blattverwindung soll auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen (Windkanal und Rotorprüfstand) erfolgen. Der hierzu notwendige Demonstrator befindet sich im Bau. Ein Messverfahren zur dreidimensionalen optischen Verformungsmessung am rotierenden Blatt wird derzeit erprobt.

Mittlerweile sind die Aktivitäten des Instituts für Strukturmechanik im Bereich des adaptiven Rotors in das EU-IP „FRIENDCOPTER“ eingebunden worden, wodurch die Bedeutung dieser Thematik unterstrichen wird.

Literaturverzeichnis

- [1] ALGERMISSEN, S., M. ROSE, R. KEIMER und E. BREITBACH: *High-Speed Parallel Robots with Integrated Vibration-Suppression for Handling and Assembly*. In: *11th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, Kalifornien, USA, März 2004. SPIE.
- [2] ALGERMISSEN, S., M. ROSE und R. KEIMER: *Angewandte Robuste Regelung zur Schwingungsunterdrückung am Parallelroboter mit adaptronischen Komponenten*. In: *Adaptronic Congress 2004*, Hildesheim, April 2004.
- [3] HESSELBACH, J. und B. HELM: *Adaptronics in Machine Tools*. In: *Production engineering*, Bd. VII/1, S. 83–86. 2000.
- [4] KALINKE, P., U. GNAUERT UND H. FEHREN: *Einsatz eines aktiven Schwingungsreduktionssystems zur Verbesserung des Schwingungskomforts bei Cabriolets*. In: *Adaptronic Congress 2001*, Berlin, April 2001.
- [5] RIEMENSCHNEIDER, J., P. WIERACH und S. KEYE: *Preliminary Study on Structural Properties of Active Twist Blades*. In: *29th European Rotorcraft Forum*, Friedrichshafen, September 2003.
- [6] WIERACH, P., H. C. GOETTING und A. SCHÖNECKER: *Development of Encapsulated PZT Patches for Adaptive Structures*. In: *Adaptronic Congress 2000*, S. 91–95, Potsdam, April 2000.
- [7] WIERACH, P.: *Entwicklung Multifunktionaler Werkstoffsysteme mit piezokeramischen Folien im Leitprojekt Adaptronik*. In: *Adaptronic Congress 2003*, Wolfsburg, April 2003.
- [8] *Sonderforschungsbereich 562 - Robotersysteme für Handhabung und Montage*. Finanzierungsantrag, TU Braunschweig und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig, 2003.
- [9] *Active Twist Blade (ATB) Quartalsbericht 2/2004*. 2004.