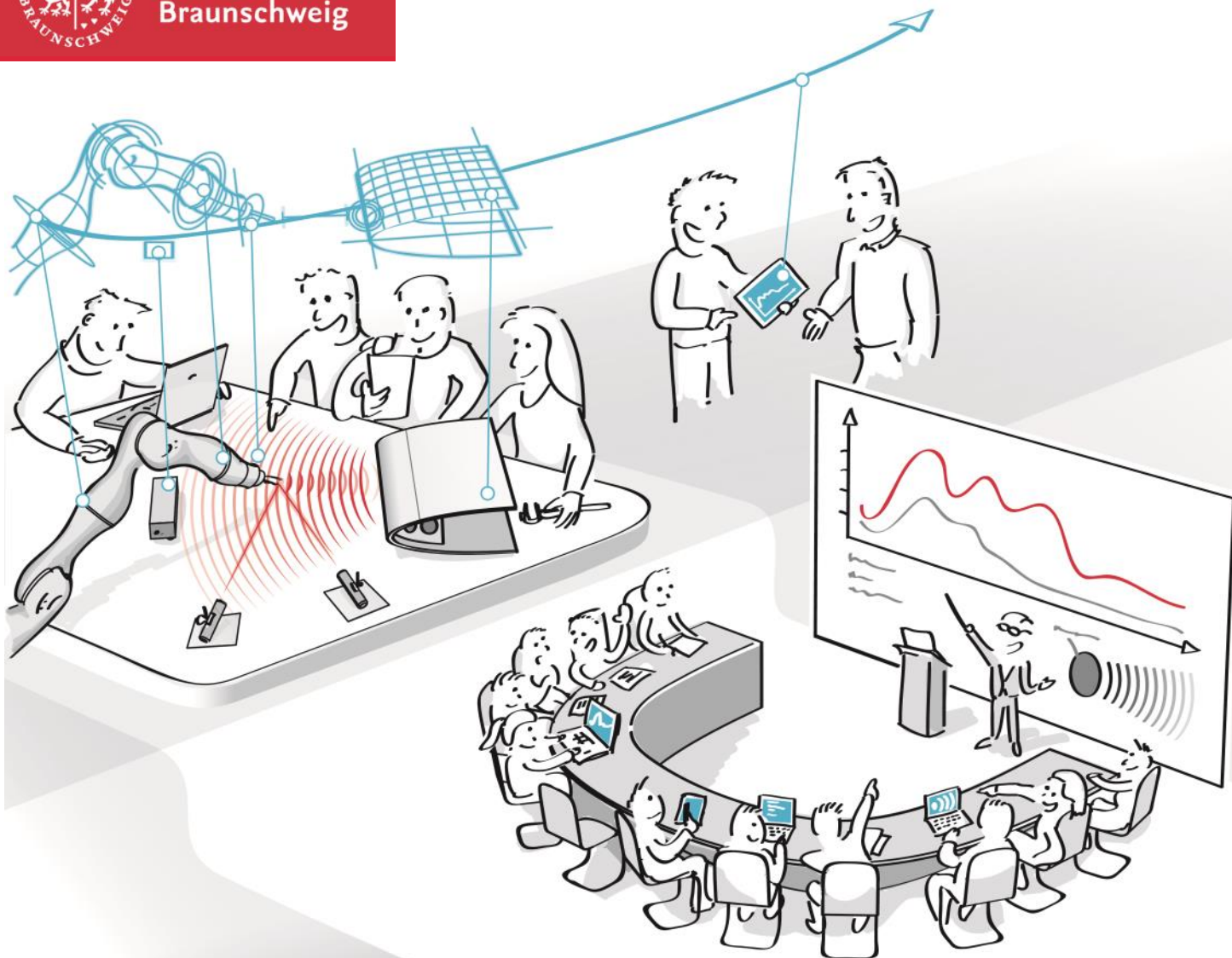




Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Adaptronik und
Funktionsintegration



Lernen und Forschen 2018



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Faserverbund-
leichtbau und Adaptronik



Technische
Universität
Braunschweig

Vorwort

Liebe Freunde und Partner des Instituts für Adaptronik und Funktionsintegration!
Liebe Studierende!

Seit nunmehr 6 Jahren gibt es das Institut für Adaptronik und Funktionsintegration in der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig.

Das Institut wurde Anfang 2012 als jüngstes Institut der Universität gegründet. Seit Beginn arbeitet es in enger Kooperation mit dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig.

Adaptronik ist eine interdisziplinäre Wissenschaft des Ingenieurwesens. Sie befasst sich mit der Erforschung und Entwicklung sich selbst anpassender Bauteile und Konstruktionen aus dem gesamten Bereich des Maschinenbaus. Adaptronik beinhaltet eine Integration von neuen Funktionen in tragende Bauteile durch die Kombination konventioneller Konstruktionswerkstoffe mit aktiven Werkstoffsystemen. Aktorische und sensorische Eigenschaften ermöglichen in Verbindung mit adaptiven, schnellen Reglern die optimale Selbstanpassung an die jeweilige Betriebsumgebung. Mit den Methoden der Adaptronik können leichte, kompakte Bauteile und Konstruktionen entwickelt werden, die gleichzeitig vibrations- und lärmarm oder auch formstabil, sowie mit integrierter Bauteilüberwachung ausgestattet sind.

Ziel der Adaptronik ist die aktive Beeinflussung des elastomechanischen Verhaltens technischer Konstruktionen des Maschinenbaus. Adaptronische Lösungen sind durch eine Funktionsintegration und ein besonderes Maß an Funktionsverdichtung gekennzeichnet, d.h. eine strukturkonforme Integration der sensorisch-aktorischen Eigenschaften bzw. Komponenten. Zielfelder der Adaptronik sind insbesondere:

- die Schwingungsreduktion,
- die Lärminderung,
- die Formkontrolle und die Feinpositionierung und
- die strukturintegrierte Bauteilüberwachung.

Unsere Hauptarbeitsgebiete orientieren sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette adaptronischer Systeme.

- Aktive Funktionswerkstoffe: Adaptive Faserverbunde

- Faserverbundwerkstoffe: Dual Matrix Composites, Nanocomposites, Hybride Materialien
- Strukturmechanik: Mechanik adaptiver Verbunde, Strukturdynamik, strukturelle Nichtlinearitäten
- Adaptiver Leichtbau: Funktionsintegrierender Leichtbau, Innovative Hochauftriebssysteme
- Faserverbundtechnologie: Funktionsintegration, adaptive und selbstregulierende Faserverbundfertigung
- Adaptive Systeme: Aktive Formkontrolle, Adaptive Schwingungsunterdrückung, Active Structural Acoustic Control, Integrierte Bauteilüberwachung (Structural Health Monitoring)
- Produktionstechnik: Selbstregulierende Produktionsprozesse für polymere Faserverbunde

Mit diesem Bericht stellen wir das Profil unseres Instituts vor, das wir in den letzten Jahren entwickelt haben. Dazu geben wir Einblicke in die Forschungsprojekte, in denen wir gegenwärtig arbeiten, stellen die letzten Promotionen vor und zeigen unser Engagement in der Ausbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren des Maschinenbaus, der Luft- und Raumfahrttechnik, der Kraftfahrzeugtechnik und der Messtechnik/Analytik.

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann

Unsere Vision

Unser Leitbild

Unsere Vision ist eine **Neue Schule des Leichtbaus** durch

- Strukturkonforme Integration von Funktionen von der Materialebene bis hin zum Bauteil
- Adaptivität an Umgebungsbedingungen und wechselnde Anforderungen
- Selbstregulierende Fertigungsprozesse
- Gleichzeitige Sicherstellung von Robustheit und Fehlertoleranz.

Wir

- ... sind Pioniere des anpassungsfähigen Hochleistungsleichtbaus
- ... bilden die Studierenden durch eine konsequente Verbindung von Theorie und Experiment aus
- ... erweitern in gemeinsamer Spitzenforschung mit dem DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik unser Wissen
- ... sind zuverlässige und seriöse Partner
- ... arbeiten prozessorientiert und professionell
- ... gehen fair, menschlich und sachlich miteinander um
- ... pflegen den offenen Dialog
- ... leben die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis
- ... schaffen Freiräume für Kreativität und persönliche Entwicklung
- ... bauen auf die intrinsische Motivation



Das Institut für Adaptronik und Funktionsintegration

Multifunktionale Klebschichten für den Leichtbau

Klebeverbindungen als Füge-technologie von Faserverbundwerkstoffen (FVW) sind notwendig um das Leichtbaupotential der FVWs vollständig ausnutzen zu können. Jedoch ist die Qualität von Klebeverbindungen von zahlreichen Prozessparametern abhängig, sodass es trotz strenger Prozesskontrollen bisher nicht möglich ist, die Lebensdauer einer Klebung zuverlässig vorherzusagen. Aus diesem Grund darf in der Luftfahrt kein Strukturelement mit einer reinen Klebeverbindung gefügt werden, dessen Versagen unmittelbar zum Verlust des Gesamtsystems führen würde. Ein wesentliches Problem ist die geringe Schadenstoleranz der üblicherweise eingesetzten Klebstoffe aus Epoxidharz. Kommt es zu einem Anriss in der spröden Epoxidschicht, kann diese der Rissausbreitung nichts entgegensetzen, sodass es relativ schnell zu einem Totalversagen der Klebschicht kommt.

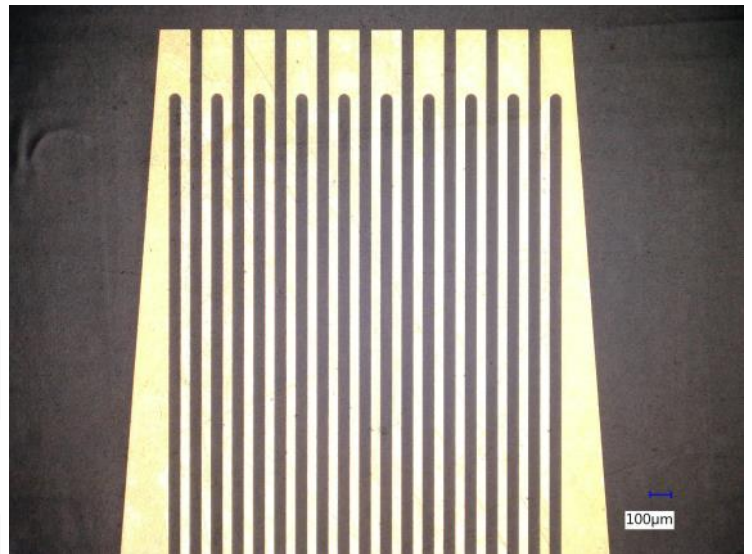
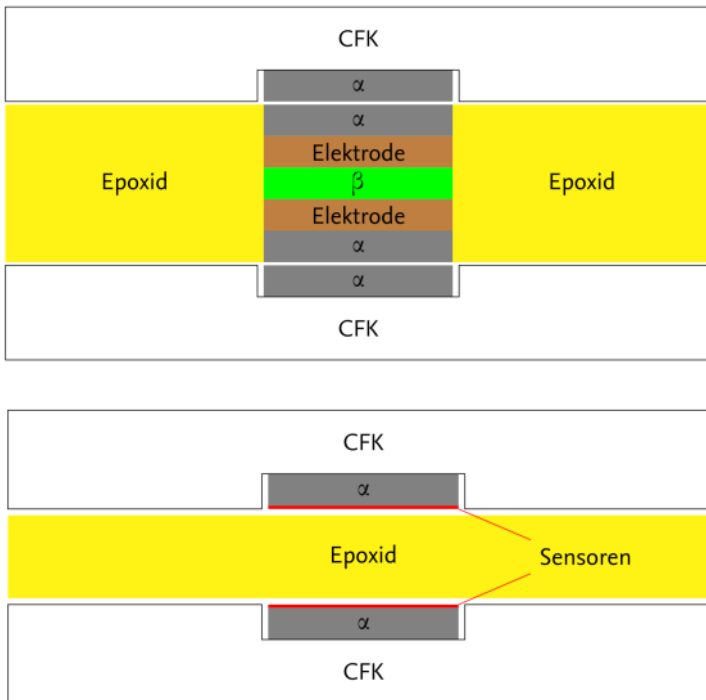
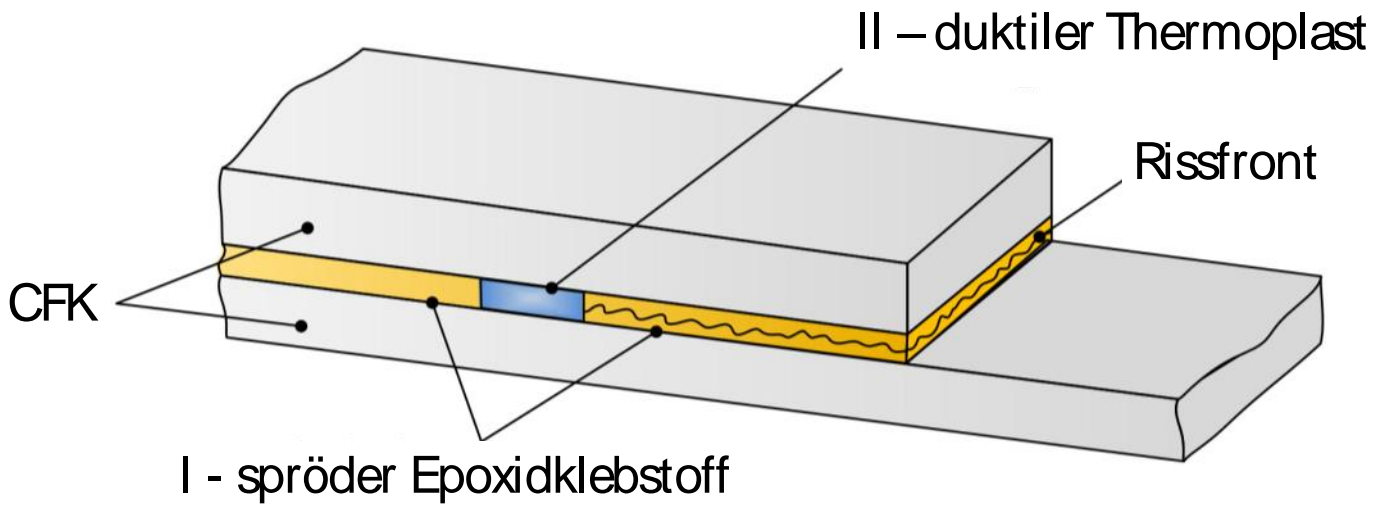
Löbel hat in seiner Dissertation mit der Entwicklung einer hybriden Klebschicht einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Schadenstoleranz von Klebeverbindungen geleistet. Die hybride Klebschicht besteht neben dem Epoxidharz aus Thermoplaststreifen. Da sich der duktile Thermoplast und das spröde Epoxidharz nicht vermischen, wird die Epoxidschicht in mehrere Bereiche unterteilt. Der Thermoplast, der aufgrund seiner hohen Duktilität deutlich später reißt als das Epoxidharz, bildet damit eine physikalische Barriere, an der ein Riss im Epoxidharz zum Stehen kommt. Als Folge dessen muss erst ein neuer Anriss entstehen, damit der Riss sich weiter in der Klebschicht ausbreiten kann. Eine wesentliche Limitierung des Konzepts stellen jedoch Risse dar, die um die Oberfläche des Rissstopps herum durch das Laminat laufen, weil diese Delaminationen durch das Rissstoppelement nicht unterbrochen werden können.

Die multifunktionale Klebschicht soll dieses Problem lösen, indem Anrisse in der Klebschicht über die Implementierung eines Structural Health Monitoring (SHM) Systems sensorisch erfassen werden. Mit dem SHM-System werden nicht nur Risse, die um das Rissstoppelement herumlaufen, sondern auch andere Schädigungen der Klebschicht frühzeitig erkannt. Damit einhergehend können Wartungsintervalle signifikant erhöht und Lasthistorien in der Klebschicht aufgenommen werden.

Das Ziel ist es ein SHM-System zu entwickeln, das nicht zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu einer intakten hybriden Klebschicht führt. Diesbezüglich wird die Hypothese untersucht, dass die Störung der Sensorik umso kleiner ist, desto weniger Fremdmaterial in die Klebschicht eingebracht wird. Aus diesem Grund werden Konzepte verfolgt, in denen die komplette Sensorik im robusten Thermoplast integriert wird. Dadurch bleibt die Epoxidschicht, welche den Großteil der Lasten überträgt, unbeeinträchtigt.

Die Risserkennung beruht darauf den Spannungsgradienten in der Klebschicht zu messen. Da sich dieser bei einem vorhandenen Riss ändert, ließe sich so auf eine Beschädigung der Klebschicht schließen. Der erste Ansatz besteht darin dünn-schichtige Sensoren auf eine Thermoplastfolie zu schreiben, die anschließend in das Rissstoppelement integriert wird. In Zusammenarbeit mit dem TU Institut für Mikro-technik werden dafür zunächst dünn-schichtige Dehnungssensoren entwickelt.

In der von Löbel umgesetzten hybriden Klebschicht wird Polyvinylidenfluorid (PVDF) als Thermoplast eingesetzt. PVDF ist ein Material, das piezoelektrische Eigenschaften aufweisen kann. Gelingt es diese nutzbar zu machen, ist es möglich das ohnehin vorhandene PVDF direkt als Sensor zu nutzen. Insgesamt sind bisher fünf verschiedene kristalline Phasen des PVDFs bekannt, von denen der unpolare α -Phase und der polare β -Phase die größte Bedeutung zukommen. Während Erstere aus der Schmelze entsteht, verfügt Letztere über die besten piezoelektrischen Eigenschaften. Bei der Herstellung der hybriden Klebschicht muss das PVDF jedoch aufgeschmolzen werden, weil mehrere Lagen PVDF miteinander verschweißt werden. Der für die Herstellung der β -Phase üblicherweise genutzte Reckprozess ist im Anschluss jedoch nicht mehr möglich. Aus diesem Grund handeln aktuelle Arbeiten am iAF davon, die β -Phase über den Klebprozess hinaus zu erhalten. Ein Ansatz ist es, nur die α -Phase des PVDF im Klebprozess gänzlich aufzuschmelzen. So kann der verbliebene Teil der β -Phase als Nukleus für die Rekristallisation dienen. Alternativ ist eine Manipulation des PVDFs mit Nanopartikeln, z.B. Carbon Nanotubes, denkbar, um zu erreichen, dass die Kristalle direkt in Form der β -Phase erstarren.



Oben: Hybride Klebschicht in einschnittiger Verbindung als Rissstoppkonzept nach Löbel

Unten links: Konzept mit einem Stapel aus α und β -PVDF, der sowohl das Verschweißen des PVDFs ermöglicht als auch einen sensorischen Teil in der Mitte aufweist (oben) und das Alternativkonzept bei dem auf das α -PVDF Sensorstrukturen aufgeschrieben werden (unten).

Unten rechts: Am IMT hergestellter Mikro-Dehnungsmesstreifen auf einer PVDF-Folie

Gefördert durch



Autor des Beitrags: M.Sc. Julian Steinmetz



Geregelte Pultrusion: Optimierung eines endlosen Prozesses

Die zunehmende Verbreitung von Faserverbundbauteilen in Bereichen, die klassisch eher Metall verarbeitet haben, sorgt für einen gestiegenen Kostendruck hin zu günstigen Bauteilen. Dabei wird allerdings gerade im Bereich Automobil zusätzlich eine hohe Stückzahl bei gleichzeitig guter Qualität gefordert. Gerade RTM Prozesse werden so schnell zum Flaschenhals der Produktion. Eine gute Alternative für die Fertigung prismatischer Geometrien stellt die Pultrusion dar. Bei dieser handelt es sich um ein Verfahren, welches als Analogie zum Strangguss in der Faserverbundherstellung betrachtet werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit des Pultrusionsprozesses ist direkt mit seiner Geschwindigkeit und Ausschussrate verknüpft. Während die meisten herkömmlichen Fertigungsverfahren mit einer Vielzahl von Sensoren die Geschwindigkeit des Verfahrens optimieren und die Qualität der Bauteile während der Fertigung sicherstellen, wird in der Pultrusion noch darauf verzichtet. Die Komplexität der inneren Wirkzusammenhänge und die hohen Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit lassen Fertiger oft vor einer Implementierung zurückschrecken. Gerade der Aushärtegrad spielt hier eine zentrale Rolle. So sorgt eine zu niedrigere Geschwindigkeit für eine geringe Wirtschaftlichkeit, während eine zu hohe Geschwindigkeit zu unvollständiger Aushärtung, Formabweichungen und höherem Ausschuss führen kann.

Genau an dieser Stelle setzt unser Forschungsprojekt an. Ziel ist ein Reglersystem, das die Geschwindigkeit der Anlage mit dem ortsauflösten Aushärtegrad des Matrixharzes verknüpft. Dafür müssen Sensoren und Messprinzipien entwickelt werden, welche auf die besonderen Umgebungsbedingungen der Pultrusion abgestimmt sind und dabei robust genug sind, auch das raue Betriebsklima bei Werkzeugwechseln und Dauerbetrieb zu überstehen. Gleichzeitig müssen sowohl die Sensoren, als auch das zugrundeliegende Messprinzip einfach auf eine Vielzahl von Werkzeugen anpassbar sein und einen häufigen Werkzeugwechsel unterstützen.

Viele etablierte Verfahren zur Aushärtungsmessung, wie dielektrische Sensoren, benötigen direkten Werkstückkontakt, was in der Pultrusion aufgrund der großen Abrasion nicht realisiert werden kann. Eine gute Alternative stellt hier die Ultraschallaushärtungsüberwachung dar. Sie verwendet das Werkzeug als Schallleiter und benötigt somit keinen direkten Zugang zum Pultrudat. Da aufgrund der Möglichkeit der Herstellung von Hohlprofilen das klassische

pulsgestützte Durchschallungsverfahren zur Aushärtungsüberwachung nicht zum Einsatz kommen kann, wäre es notwendig das Impuls-Echo-Verfahren zu verwenden. Dies benötigt jedoch sehr schnelle und sehr genaue Elektronik, was die Anlagenwirtschaftlichkeit negativ beeinflussen würde.

Um die Probleme des klassischen pulsgestützten Ultraschallverfahrens zu umgehen, wurde im Rahmen unseres Forschungsprojektes ein neues Verfahren vorgeschlagen und untersucht. Es nutzt die vorhandene Werkzeuggeometrie zur Generierung von lokalen Resonanzen innerhalb des Werkzeugs. Wenn die Schwingung dieser Resonanz in Kontakt mit dem Bauteil steht, ist ihre Amplitude abhängig vom dessen Aushärtegrad. Durch Messung der Schallabstrahlung dieser Resonanz kann so der lokale Aushärtegrad unter der Resonanz bestimmt werden. Zur Auswertung der Signale kann dabei auf Erfahrungen aus der Radiotechnik zur Amplitudendmodulation zurückgegriffen werden. Dies reduziert deren Kosten enorm. Außerdem kann die Messgeschwindigkeit stark reduziert werden. So ist es möglich, von hochspezialisierter Hardware auf simplere Standardhardware auszuweichen.

Als Versuchsbasis steht im iAF eine kleinere Pultrusionsanlage zur Verfügung. Diese ist für den Forschungsbetrieb umgerüstet worden und erlaubt eine Vielzahl unterschiedlichster Versuche bei fast konstanten Laborbedingungen.

Auf Basis der so gewonnenen Sensordaten wird ein Reglermodell entwickelt, welches dazu in der Lage ist, die Geschwindigkeit der Pultrusion so anzupassen, dass das Bauteil das Pultrusionswerkzeug mit einem optimalen und konstanten Aushärtegrad verlässt. Auf diese Weise sollen langwierige Experimentalprozesse in der Produktion umgangen werden.

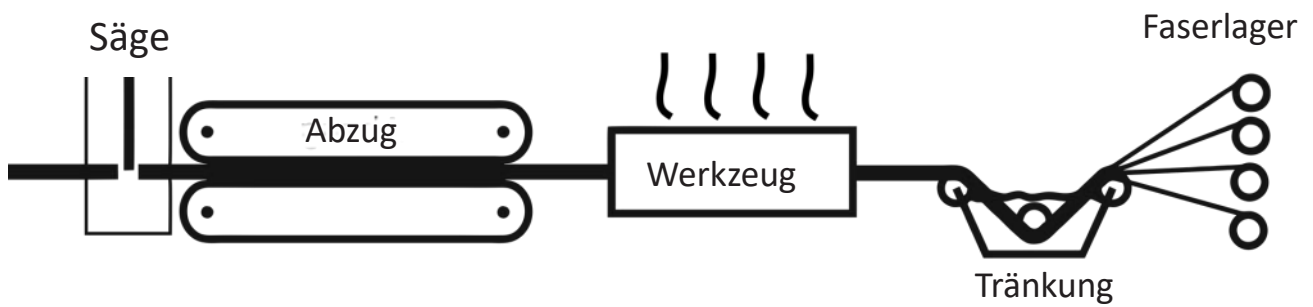


Abbildung oben: Experimentalpultrusionsanlage am iAF

Abbildung unten: Prinzip Pultrusion

Gefördert durch

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft



Autor des Beitrags: Dipl.-Ing. Christian Pommer

Integrierte Überwachung pultrudierter Bauteile

Hintergrund

Die Faserverbundtechnologie erfreut sich seit vielen Jahren wachsender Beliebtheit. Hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten führen in vielen Anwendungsbereichen zu Bauteilen mit hohen Leichtbaugütern. Die Nutzung von Faserverbunden ist allerdings im Vergleich mit anderen Materialien vergleichsweise teuer. Neben hohen Materialkosten ist insbesondere auch der Fertigungsprozess vergleichsweise kostenintensiv. Die Pultrusion zeichnet sich in diesem Themenfeld als besonders kostengünstiges Verfahren zur Herstellung von Faserverbunden mit geringer geometrischer Komplexität aus. Am Institut für Adaptronik und Funktionsintegration wird aus diesem Grund an Methoden zur überwachten Herstellung von Faserverbunden im Pultrusionsverfahren geforscht. Besondere Möglichkeiten ergeben sich bei der Nutzung von Kohlenstofffasern. Kohlenstofffasern werden insbesondere aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringer Dichte eingesetzt. Im vorliegenden Projekt wird eine weitere Eigenschaft der Fasern—ihre elektrische Leitfähigkeit—genauer betrachtet.

Forschungsansatz

Unser grundlegender Forschungsansatz besteht darin, die elektrischen Eigenschaften der Pultrudate zu überwachen, um damit auf den mechanischen Belastungszustand rückzuschließen. Beispielsweise können mechanische Dehnungen durch Messung des elektrischen Widerstandes der Fasern gemessen werden. Die Dimensionsänderungen der Fasern und ihre piezoresistiven Eigenschaften führen dazu, dass sich der Widerstandswert mit der mechanischen Dehnung ändert. Verschiedenste Vorarbeiten der Vergangenheit zeigen, dass zur effektiven Ausnutzung dieser Eigenschaften eine besonders gerade Faserausrichtung mit minimaler Welligkeit vorteilhaft ist. Das Pultrusionsverfahren kann diese gerade Faserausrichtung aufgrund der prozessinhärenten Zugvorspannung der Fasern gewährleisten und kann daher außerordentlich geeignet zur Herstellung von kohlenstofffaserbasierten Sensoren sein.

Eine integrierte Bauteilüberwachung ermöglicht eine Auskunft über den aktuellen Zustand des Bauteils. Schädigungen können erkannt und bewertet werden, bevor sie optisch erkennbar sind. Das erhöht die Sicherheit bei der Bauteilauslegung und ermöglicht dadurch einen effizienteren Leichtbau. Im vorliegenden Projekt

wird dieses Konzept anhand dünnwandiger Pultrudate evaluiert.

Aktuelle und zukünftige Arbeiten

Zum vollständigen Verständnis dieses Forschungsfeldes müssen verschiedenste Fragestellungen beantwortet werden. Neben einem vertieften Verständnis der komplexen elektrischen Leitungspfade in den Pultrudaten müssen auch die durch mechanische Dehnung auftretenden Änderungen im Material genau verstanden werden. Darüber hinaus müssen praktikable Wege gefunden werden, diese Änderungen messtechnisch zu erfassen. Aktuelle Arbeiten umfassen dabei:

- Pultrusion dünnwandiger Kohlenstofffaserprofile mit hohen Faservolumengehalten
- Überwachung des Pultrusionsprozesses zur reproduzierbaren Herstellung von Pultrudaten
- Analytische Beschreibung der komplexen elektrischen Leitungspfade in einem pultrudierten Bauteil
- Experimentelle Bestimmung der Piezoresistivität verschiedener Kohlenstofffasern und ihrer Verbunde
- Signalverarbeitung, -analyse und -zusammenführung von Widerstandsmessungen
- Entwicklung einer Elektronik zur Messdatenaufnahme
- Konzeptstudien zur Nutzung Kohlenstofffaserbasierter Sensoren in hybriden Bauteilen

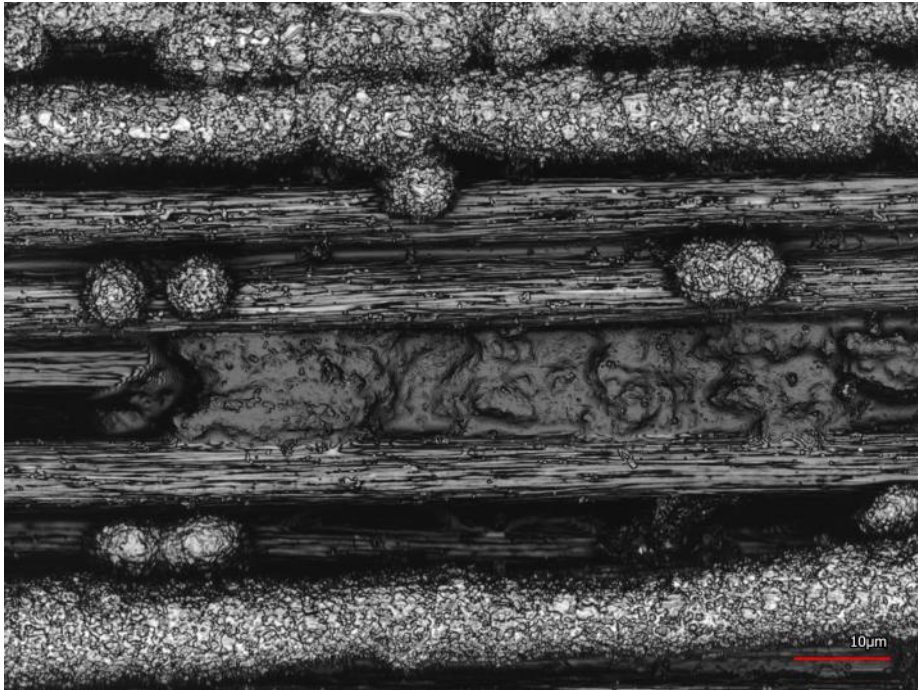


Abbildung oben: Partiiell kupferbeschichtetes Pultrudat (Mikroskopbild)

Abbildung unten: Fertiges Pultrudat mit prototypischer Pultrusionsanlage im Hintergrund

Gefördert durch



Autor des Beitrags: M.Sc. Patrick Scholle



Leistungssteigerung in der CFK-Fertigung: Kombination von AFP und ALM

Heutzutage sind automatisierte Verarbeitungstechniken wie das Automated Fibre Placement (AFP) oder Automated Tape Laying (ATL) etablierte Technik der Faserverbundfertigung. Es gibt jedoch noch Potenzial in diesen Verfahren bessere Ergebnisse zu erzielen. Bei unseren Forschungsarbeiten wird die Problemstellung beim Automated Fibre Placement gezeigt und anschließend ein neuer Weg vorgestellt. Beim Ablegen von Faserverbundwerkstoffen insbesondere auf doppelt gekrümmten Flächen entstehen Lücken zwischen den Bändern. Eine Untersuchung des American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) zeigt, dass eine Lücke von 0.76 mm die Laminat-Druckfestigkeit bis zu 27 % reduzieren kann. Um diese unvermeidbare Schwachstelle des ATL- bzw. AFP-Verfahrens zu kompensieren, werden mehrere Faserverbundschichten aufeinandergelegt, um die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen zu erhöhen. Das bedeutet, dass die Bauteile schwerer und teurer werden.

In unserem Forschungsansatz wird die Additive Layer Manufacturing Technologie (ALM) eines 3D Druckers mit endlosfaserverstärkten thermoplastischem Kunststoff in einen mobilen thermoplastischen Ablegekopf integriert. Nach dem Ablegen der thermoplastischen Prepregs an den Flächen werden die Lücken durch einen Profilsensor detektiert. Die Lücken werden mit Hilfe eines 3D-Druckers mit endlosfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen ausgefüllt. Durch die Kombination der beiden Verfahren können die Bauteile homogener gefertigt werden. Dadurch werden die Bauteile wegen der Vermeidung der zusätzlichen Schichten schneller, günstiger und noch leichter produziert.

Abbildung 1 zeigt typische Lücken aus einem AFP-Ablegeprozess. Je komplexer die Oberfläche des Bauteiles, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass größere Lücken entstehen.

Unsere ersten Voruntersuchungen widmeten sich der Fragestellung, inwieweit die Verluste an Steifigkeit und Festigkeit durch Lücken mit der Kombination von AFP und ALM kompensiert werden können. Dazu eignen sich zunächst einfache Couponversuche.

In Abbildung 2 ist deutlich zu erkennen, dass Lamine mit gedrucktem UD-CFK hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften den Laminen ohne Lücken sehr nahe kommen. Damit sind die Vorteile für den neuen Fertigungsprozess deutlich erkennbar. Durch die Anwendung der Methoden des Automated Fiber Placement kann die

abgelegte Struktur ohne Lücken erstellt werden und es können so die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Dies hätte einerseits den Vorteil, eine leichtere Struktur ablegen zu können, andererseits ist ein hoher Freiheitsgrad für einen erfolgreichen Ablageprozess besonders bei komplizierteren Strukturen gegeben.

Durch die ersten grundlegenden Vorversuche wurde das Potenzial der Kombination von AFP und ALM betrachtet, vor allem um die erzielbaren mechanischen Eigenschaften der Kombination zu untersuchen. Dabei wurde zunächst bestätigt, dass sich die mechanischen Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe (FVW) durch Lücken zwischen den Bändern ändern. Anschließend wurde untersucht, wie sich die mechanischen Eigenschaften der FVW bei der gedruckten endlosfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen ändern an den Stellen, an denen die Lücken liegen.

Mit der Integration eines 3D-Druckkopfes mit endlosfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen in einem automatisierten Ablegekopf werden die Voraussetzungen für eine spaltfreie Herstellung von CFK-Bauteilen mittels Tapeleger geschaffen. Zur Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander und der Kommunikation zwischen Tapelegerkopf, Roboter und 3D-Druckkopf soll ein standardisiertes Kommunikationsprotokoll eingesetzt werden. Abbildung 3 stellt das standardisierte Kommunikationsprotokoll dar, das zur Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander und der Kommunikation zwischen AFP, ALM und einem mobilen Roboter eingesetzt werden soll.

Der Einsatz der anvisierten neuen Technologie der Kombination von Automated Fibre Placement mit Additive Layer Manufacturing und mobiler Robotik, wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist, verspricht eine weitere Leistungssteigerung der Faserverbundfertigung mit gleichzeitig erhöhter Flexibilität.

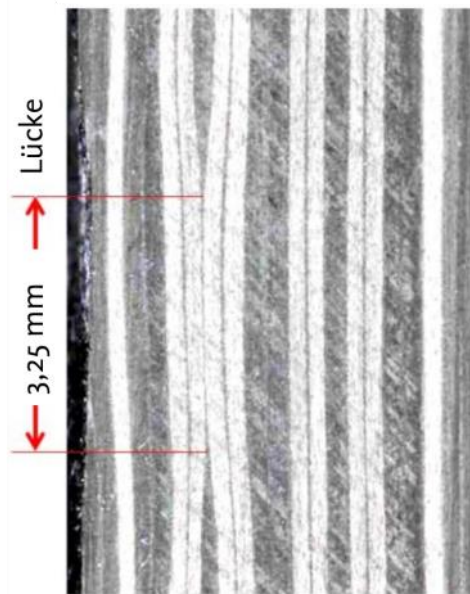


Abbildung 1

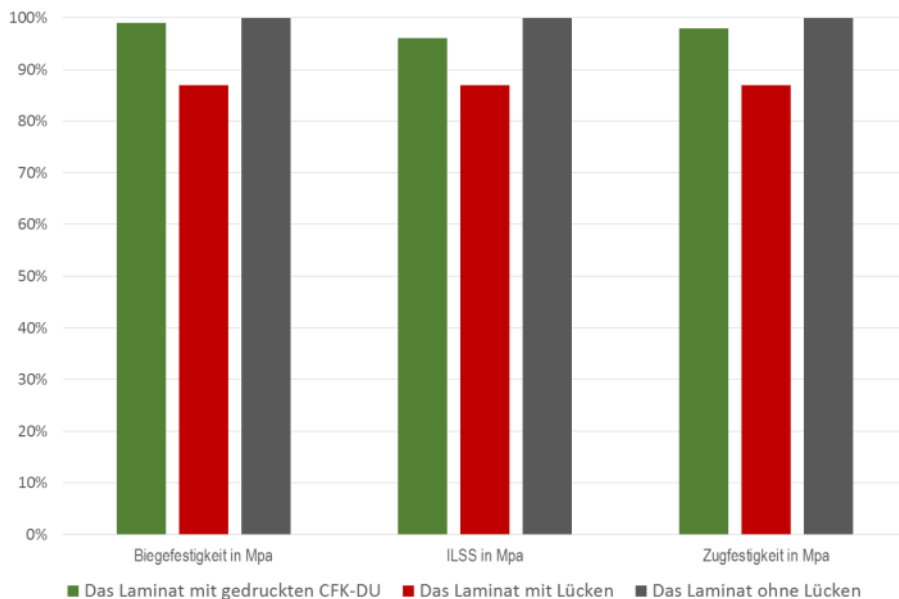


Abbildung 2

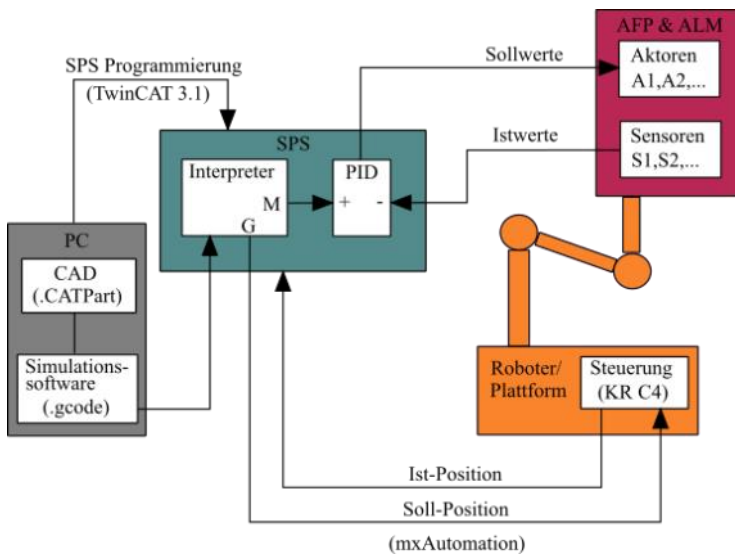


Abbildung 3

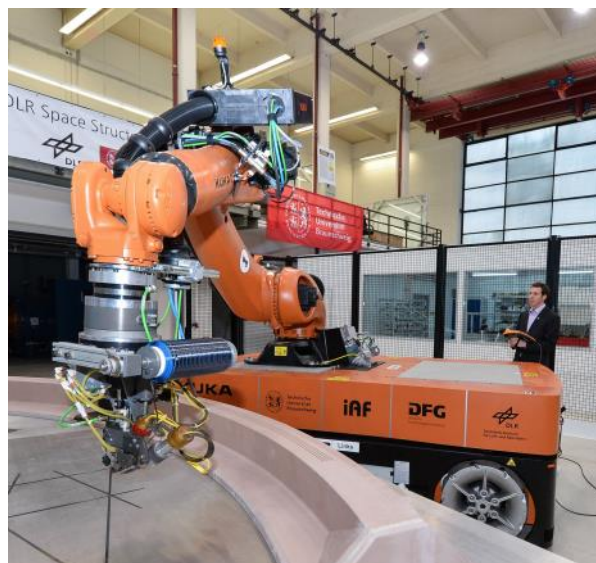


Abbildung 4

Abbildung 1: Typische Lücken aus AFP-Prozess (Quelle: Marrouze, J.P. et al. (2013): Effect of Manufacturing Defects and Their Uncertainties on Strength and Stability of Stiffened Panels, ICCM 19)

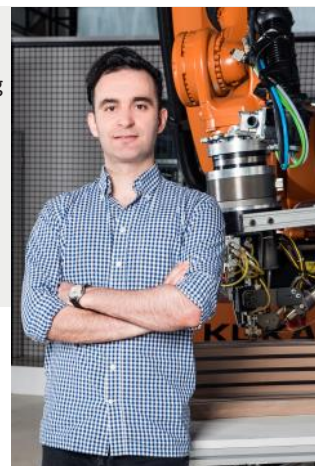
Abbildung 2: Verringerung der Festigkeit in % im Vergleich zum Laminat ohne Lücken

Abbildung 3: Prinzip der Kommunikation der einzelnen Geräte
 Abbildung 4: Vereinfachtes 3D-Modell des mobilen 3D-Druckkopfs mit endlosfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen

Gefördert durch



Autor des Beitrags: M.Sc. Mohammad Rakhshbahar



Steigerung der Bahngenauigkeit von Robotern auf mobilen Plattformen

Mobile Robotik für den Leichtbau

Mobile Robotik weist das Potential auf, viele neue Anwendungsszenarien in der Robotik zu erschließen: Aktuell werden Roboter in hoch spezialisierten Fertigungsstraßen für die Produktion von großen Stückzahlen eingesetzt. Im Gegensatz dazu bietet mobile Robotik die Chance, Produktionsstätten flexibler zu gestalten. Damit kann der Einsatz von Robotern auch schon bei kleineren Stückzahlen wirtschaftlich sinnvoll sein.

Wir beschäftigen uns am IAF mit der Entwicklung und Produktion von faserverstärkten Leichtbaustrukturen. Dabei wird das gesamte Produktionsspektrum, von der Bauteilfertigung bis hin zur Endmontage ganzer Flugzeuge, betrachtet. Besonders im Bereich der Produktion von faserverstärkten Bauteilen sind hohe Bahngenauigkeiten während der Faserablage oder dem anschließenden Besäumen der Bauteile notwendig. Daher fokussiert sich unsere Forschung zur mobilen Robotik auch auf diesen Bereich.

Für stationäre Roboter ist umfangreiches Wissen zur Bahngenauigkeit vorhanden. Ursächlich für diese Bahnabweichungen sind in der Regel Geometrieabweichungen und Verformungen der Roboterstruktur. Die Geometrieabweichungen resultieren aus Fertigungstoleranzen und thermischen Ausdehnungen und werden somit nicht durch die mobile Plattform beeinflusst.

Die Verformungen hingegen entstehen durch die auftretenden Prozesslasten und die Nachgiebigkeit des Roboterarmes. Konstruktiv kann die Steifigkeit und damit die Bahnabweichung des Roboters nicht verändert werden, ohne die Schlankheit und damit die Flexibilität der Roboter zu senken. Da die Bahnabweichung durch Verformung einen systematischen Fehler darstellt, kann diese kompensiert werden. In der Regel wird dies während der Inbetriebnahme des Roboters manuell durchgeführt. Weil Roboter für gewöhnlich sich häufig wiederholende Tätigkeiten ausführen, stellt dieses Vorgehen kein Problem dar. Bei mobilen Robotern, welche für die Produktion von Leichtbaustrukturen eingesetzt werden, ist mit deutlich geringeren Wiederholraten zu rechnen. Es ist daher ersichtlich, dass es nicht mehr praktikabel ist, jeden Roboterprozess manuell zu kompensieren. Darüber hinaus wird durch die Plattform die Fundamentsteifigkeit stark gesenkt, wodurch mit deutlichen Einflüssen auf das Eigenverhalten des Roboters zu rechnen ist.

Die Ziele unseres Forschungsprojektes sind, die Einflüsse der Plattform auf die Genauigkeit des Roboters zu erforschen sowie Methoden zu entwickeln, um die Bahngenauigkeit zu erhöhen. Dazu werden im ersten Schritt die Bahngenauigkeiten des mobilen Roboters mit einem LaserTRACER vermessen, um die Ausgangsgenauigkeit festzuhalten. LaserTRACER sind hochgenaue 3D-Messsysteme. Mit ihnen kann die Roboterbahn μm -genau vermessen werden.

Diese Daten werden anschließend mit einem Regelkreis in die Robotersteuerung zurückgeführt, um den Bahnfehler auszugleichen. Dieser Aufbau stellt den maximalen Ausbauzustand nach dem aktuellen Stand der Technik dar. Mit diesem System sind geringe Bahnabweichungen zu erwarten.

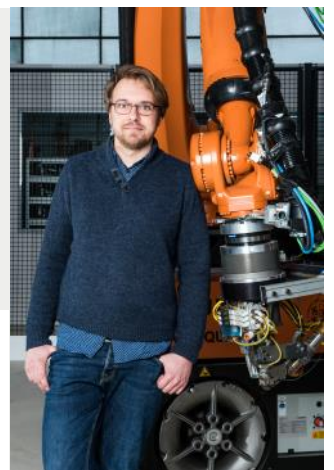
Steigerung der Genauigkeit durch Adaptronik

Dennoch bestehen technologische Grenzen für dieses System. So gibt es Limitierungen in der Lösbarkeit der kinematischen Gleichungen, den Steuerungsmöglichkeiten und der Dynamik der Antriebe. Darüber hinaus wird das Eigenverhalten des Roboters vernachlässigt. Um diese Effekte zu untersuchen ist es sinnvoll, ein Mehrkörpermodell des Roboters aufzubauen. Durch eine Parameteridentifikation können die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Bahngenauigkeit des mobilen Roboters abgebildet werden. Anhand dieses Modells lässt sich beurteilen, ob die Bahngenauigkeit durch adaptive Interfaces gesteigert werden kann.



Forschungsplattform des IAF: Kuka KMR Quantec

Autor des Beitrags: M.Sc. Maximilian Neitmann



Lasertracer als Bahnsensor für mobile Robotik

Ein vielversprechender Ansatz zur Erhöhung der Bahngenauigkeit von Industrierobotern ist die Vermessung der Bahn des Roboters während des Prozesses. Mit diesen Daten kann die Bahnabweichung in Echtzeit durch eine Regelung ausgeglichen werden.

Vor- und Nachteile der optischen Bahnvermessung

Ein wichtiger Bestandteil des Bahnregelsystems ist der Bahnsensor. In unserem Forschungsprojekt wird das Multitrace-System der Etalon AG untersucht. Dieses ist in der Lage die Bahn hochgenau ($U(95\%) < 3 \mu\text{m}$) und hochdynamisch (7 kHz) zu vermessen. Das Multitrace-System besteht aus vier Lasertracern, welche den Abstand zu einem gemeinsamen Reflektor messen. Dabei werden drei Lasertracer benötigt, um die drei Raumfreiheitsgrade des Reflektors zu bestimmen. Der vierte Lasertracer erzeugt redundante Informationen und ermöglicht damit die Selbstkalibrierung des Systems. Bei einer Bahnregelung mit diesem Messsystem ist zu erwarten, dass Bahngenauigkeiten in der Größenordnung der Wiederholgenauigkeit erreicht werden können.

Damit ist der Aufbau zwar sehr leistungsfähig, er hat jedoch einige Nachteile: Da der Messlaser im Prozess nicht unterbrochen werden darf, bestehen hohe Anforderungen an die Sichtbarkeit des Reflektors im Prozess. Außerdem sind Lasertracer sehr teuer. Daher ist es das Ziel des Projektes, die Anzahl der benötigten Lasertracer zu reduzieren. Dabei kann die Tatsache genutzt werden, dass die Genauigkeit für den vom Roboter durchzuführenden Prozess nicht in allen Raumrichtungen von gleicher Bedeutung ist. So wird z.B. beim Ablageprozess von Kohlenstofffasern der Kopf mechanisch direkt am Werkstück geführt, weshalb die Richtung senkrecht zur Oberfläche nicht durch ein unabhängiges Messsystem unterstützt werden muss. Hingegen sind die Richtungen entlang der Oberfläche von großer Bedeutung um eine gleichmäßige und geordnete Faserablage zu gewährleisten. Gleiches gilt z.B. auch für das Bohren von leicht gekrümmten Paneelen oder Flügeln: Die Bohrtiefe ist weniger entscheidend als die Lage der Bohrung.

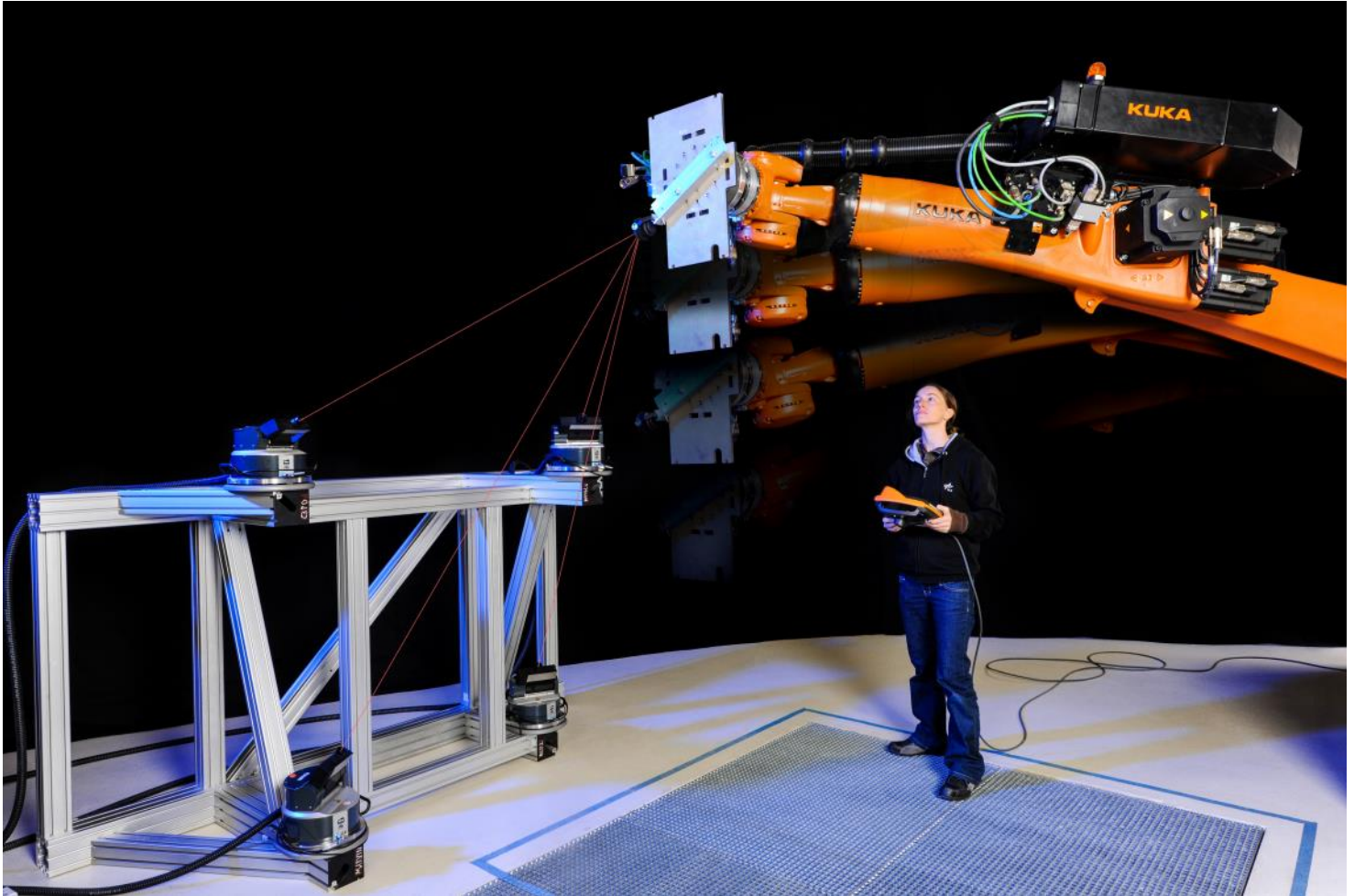
Forschungsansatz Datenfusion

Bei diesen Prozessen ist es denkbar, mit zwei Lasertracern nur die


Position in der Ebene zu überwachen und für die Tiefe auf bereits vorhandene Sensoren des Roboters zurückzugreifen. Um aus diesen Daten die Bahnabweichung für die Bahnregelung zu bestimmen, sollen Verfahren der Sensordatenfusion eingesetzt werden. Mit diesen Verfahren werden die verschiedenen Sensoren zu einem virtuellen Sensor vereint. Dabei werden auch die unterschiedlichen Messunsicherheiten der Sensoren berücksichtigt. Monte-Carlo-Simulationen werden dabei dazu genutzt, die zu erwartende Messabweichung in jeder Raumrichtung anzugeben. Zur Validierung dieser Methoden kann dabei auf den bereits etablierten Aufbau mit vier Lasertracern zurückgegriffen werden.

Umsetzung

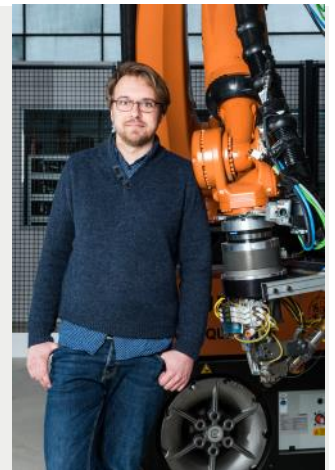
Mit einer neu zu entwickelnden Schnittstelle werden die Lasertracer an eine SPS angeschlossen. Dazu werden die bestehenden Regler zur Nachverfolgung des Reflektors beibehalten. Es werden lediglich die Interferometer-Messergebnisse in Echtzeit auf einem Feldbus zur Verfügung gestellt. Um die Entwicklung der Sensordatenfusionsalgorithmen möglichst effizient zu gestalten, werden diese zunächst offline, also ohne Nutzung des Roboters, entwickelt. Um die Sensorfusion zwischen den Lasertracer-Messergebnissen und Roboter-Encodern zu ermöglichen und anschließend online eine Bahnkorrektur durchführen zu können, soll eine echtzeitfähige bidirektionale Schnittstelle zum Robotersystem entwickelt werden.



Messsystem: Etalon Multitrace mit Forschungsplattform Kuka KMR
Quantec

Gefördert durch  ZIM
Zentrales
Innovationsprogramm
Mittelstand

Autoren des Beitrags:
Dipl.-Ing. Barbara Beykirch,
M.Sc. Maximilian Neitmann



Intelligente Computersysteme für die industrielle Fertigung

Digitale Prozesse erobern mittlerweile weite Teile der industriellen Fertigung und Montage. Dabei finden virtuelle Prozesse und Cloud-Basierte Arbeitsplattformen immer mehr Anwendung. Dies trifft, im speziellen auf industrielle Prozesse und Prozessketten zu.

Unser Forschungsprojekt hat das Ziel die notwendigen Methoden zu entwickeln, um die industrielle Fertigung und Montage in Echtzeit abbilden und optimieren zu können. Das Resultat ist eine virtuelle, sensorbasierte Plattform, die die reale Fertigung und Montage bis ins Detail plan- und steuerbar macht. Durch neue Optimierungsverfahren können damit Fehler frühzeitig erkannt, vermieden und Produktionszyklen verkürzt werden.

Der Weg zur fertigen Baugruppe führt vorbei an der Toleranzanalyse für Einzelkomponenten dem Zusammenbau und der Montage. Dieser Arbeitsablauf wird in Zukunft immer mehr automatisiert und fusioniert. Basis dafür ist eine adäquate Auswertung von Messdaten und die Entwicklung von adaptiven Algorithmen. Diese müssen jedes Bauteil nach Kriterien zwischen Ausschuss, Nachbearbeitung und fertigem Bauteil bewerten.

Automatische Bauteil- und Objekterkennung

Ein zentrales Problem stellt hierbei die automatische Bauteil- und Objekterkennung dar. Ein Gebiet ist dabei das maschinelle Sehen, das anhand von optischen Daten Objekte identifizieren kann. Zum Einsatz können hier, neben fest definierten mathematischen Algorithmen, auch die Informationsverarbeitung mit neuronalen Netzwerken kommen. Neuronale Netzwerke haben den entscheidenden Vorteil, dass sie keine statische Programmierung besitzen und im Betrieb kontinuierlich dazulernen.

Objekterkennung muss aber nicht allein auf optischen Signalen basieren. Zusätzliche Informationsquellen können u.a. akustische, magnetische, induktive oder kapazitive Daten enthalten. Die jeweilige optimale Informationsquelle ist abhängig von den Bauteileigenschaften.

Neben der Bauteilerkennung ist auch die Erkennung von Bauteileigenschaften, sog. Features, notwendig. Hierbei werden Eigenschaften wie zum Beispiel Radien, Bohrungen, Ecken und Bauteilkanten als Feature bezeichnet.

Korrelation zwischen Messdaten und CAD-Bauteil

Mit der Bauteil- und Featureerkennung wird es möglich ein konsistentes Referenzsystem zu konstruieren. Ein Referenzsystem ist ein Koordinatensystem, welches in allen Messdaten gleich ist und aufgrund von Bauteileigenschaften berechnet wurde. Das Referenzsystem wird dabei mit Hilfe von Korrelation zwischen Messdaten und CAD-Bauteil bestimmt. Damit wird es möglich genaue Toleranzanalysen durchzuführen und Bauteile untereinander zu vergleichen. Der Vergleich mit CAD Daten ermöglicht eine Bestimmung der Fertigungsgenauigkeit. Zusätzlich lässt sich die Lage und Ausrichtung im Raum eindeutig ermitteln.

Die Bauteilerkennung und deren Lagebestimmung ermöglicht die adaptive Anpassung auf unterschiedliche Situationen bei Montage und Fertigungsaufgaben. Der Weg geht hier weg von fest vorgeschriebenen Arbeitsschritten, z.B. im Sinne von CNC, hin zu Arbeitsaufträgen, welche vom System selbstständig erledigt wurden. Das beinhaltet die eigenständige Aufgabenplanung und Optimierung, basierend auf Informationen wie Sensordaten und Kamerabildern.

Zukünftige Computersysteme und Roboter werden also in der Lage sein Bauteile zu erkennen, dessen Lage zu berechnen und deren Zusammenbau mit anderen Bauteilen zu planen, zu optimieren und durchzuführen. Dabei führen sie Bauteilvermessung und Toleranzanalysen durch und erledigen die Bauteil-Nachbearbeitung. Aufgrund der gesammelten Daten während des Produktionsprozesses erfolgt dann die optimierte Endmontage.

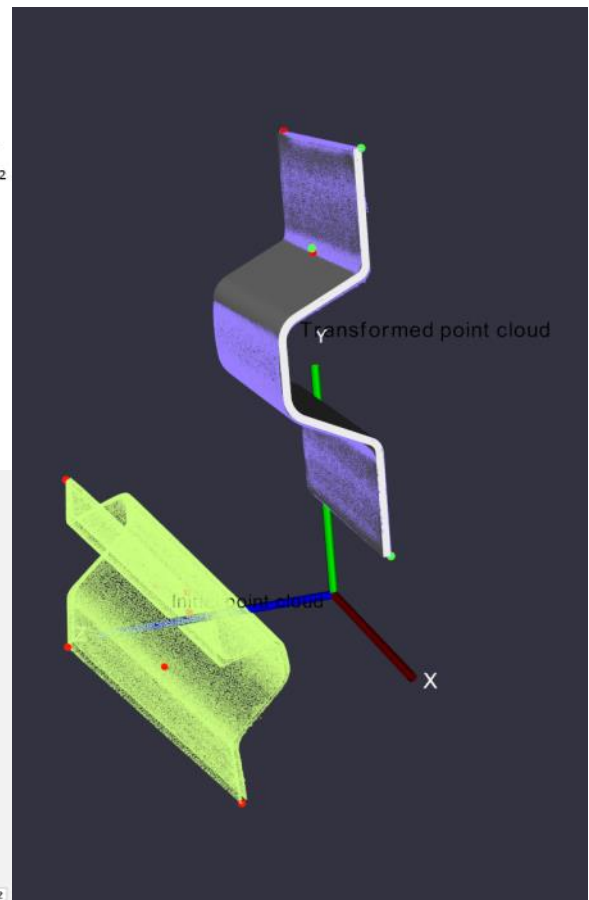
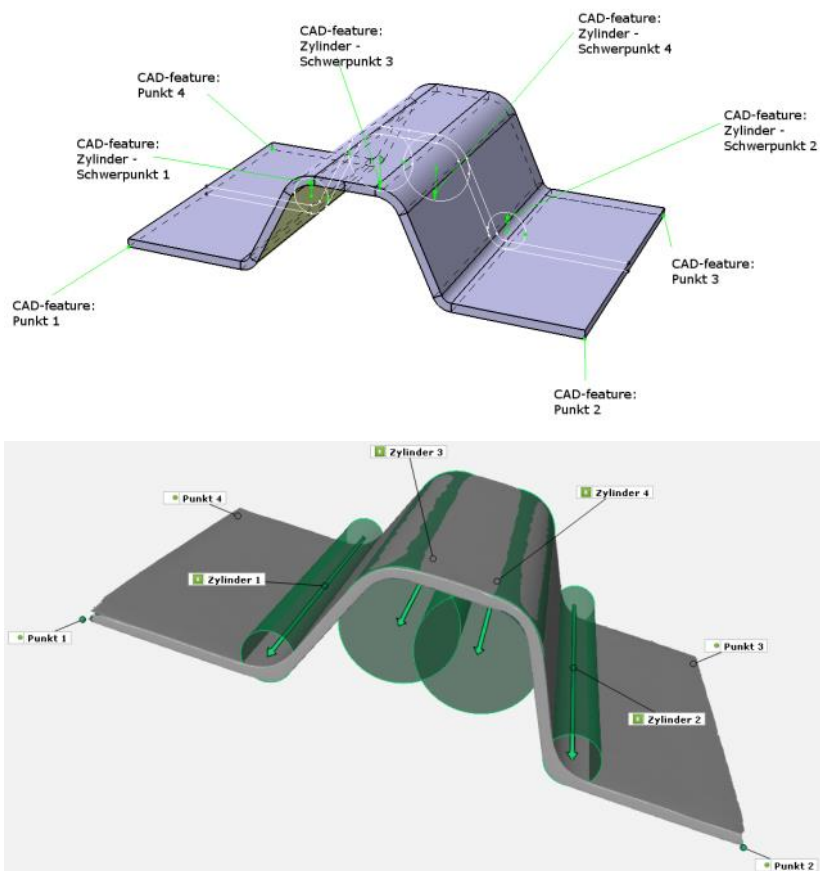


Abbildung oben links: CAD Konstruktion mit Definition von Features wie Punkten und Zylinder-Schwerpunkten.

Abbildung unten links: Rekonstruierte Punktwolke, die gleichen Features des CAD Teils müssen auch hier konstruiert werden.

Abbildung rechts: Mit Hilfe von Korrelations- und Orientierungs-Algorithmen kann die Punktwolke (gelb, initial point cloud) anhand ihrer Features (rote Punkte) in das CAD Teil (grau) gelegt werden. Die ausgerichtete Punktwolke (violett, transformed point cloud) orientiert sich dabei an den Feature Punkten des CAD Teils (grüne Punkte).

In Kooperation mit:



Autor des Beitrags : M. Sc. Marco Brysch



Eigenstressungen in intrinsischen Hybridverbunden

Faserkunststoffverbunde (FKV) weisen trotz ihrer hohen spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten sowie ihrer geringen Ermüdung einige Schwächen, wie beispielsweise eine vergleichsweise geringe Lochleibungsfestigkeit, hohe Schlagempfindlichkeit und sprödes Bruchverhalten auf. Um diesen Schwächen zu begegnen, wird zunehmend an hybriden Werkstoffverbunden aus FKV und Metall, sogenannten Fibre Metal Laminates (FML) geforscht. Grundsätzlich unterscheiden sich FML von hybriden Strukturen oder Mischbauweisen durch einen Materialmix innerhalb des Laminates. Der Laminataufbau besitzt demzufolge mindestens eine Lage FKV und mindestens eine Lage Metall. Im Sprachgebrauch hat sich die Bezeichnung der „Intrinsischen Hybridlaminats“ etabliert. Mit einem „Intrinsischen Verbund“ ist ein FML gemeint, dessen Einzellagen bei der Aushärtung der Kunststoffkomponente des FKV verbunden werden und bei dem keine weiteren Klebprozesse notwendig sind.

Intrinsische Hybride aus Faserverbundkunststoff und Metall in einem Schichtaufbau können mit Hilfe von Materialauswahl, Anpassung der Materialanteile und Veränderung der Lagendiskretisierung an ganz unterschiedliche Anforderungen angepasst werden. Die Verbindung der Einzelkomponenten stellt dabei eine der größten Herausforderungen dar. Die Herstellung findet durch das sogenannte „co-cure bonding“ statt. Die Verbindung der beiden Materialien erfolgt im Urformprozess der Kunststoffkomponente ohne einen nachfolgenden Fügeprozess. Die Temperatur, bei der sich die Einzelkomponenten verbinden, hängt folglich von der Aushärtetemperatur der Kunststoffmatrix ab. Da die Aushärte- bzw. Fügetemperatur über der Einsatztemperatur liegt, kommt es infolge der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner unweigerlich zu Eigenstressungen, die unmittelbar vom Lagenaufbau abhängen und die Festigkeit des Hybridlaminats herabsetzen können. Während sich diese Spannungen bei symmetrischen Laminaten einlagern, werden sie bei asymmetrischen Lagenanordnungen teils als Verformung sichtbar.

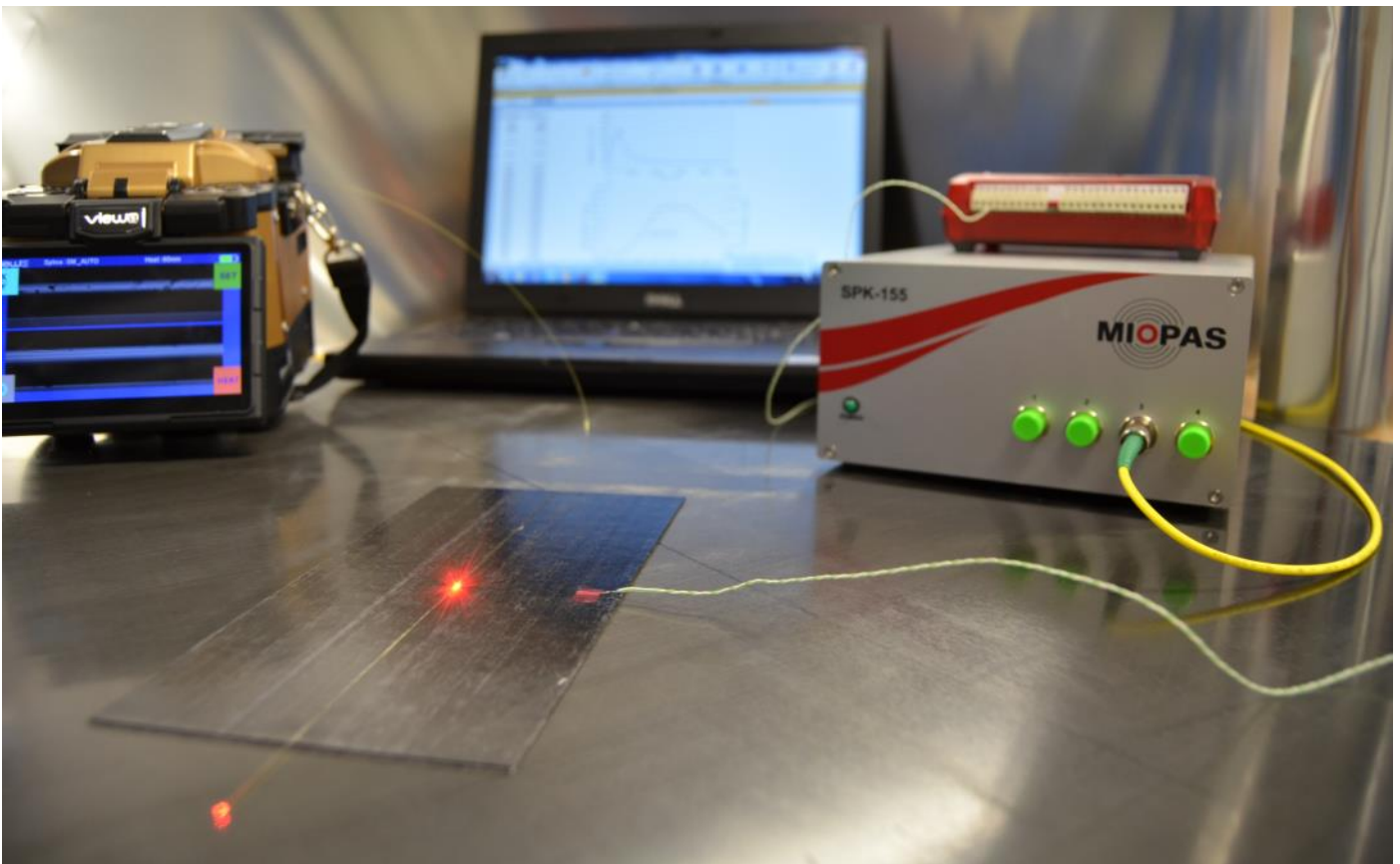
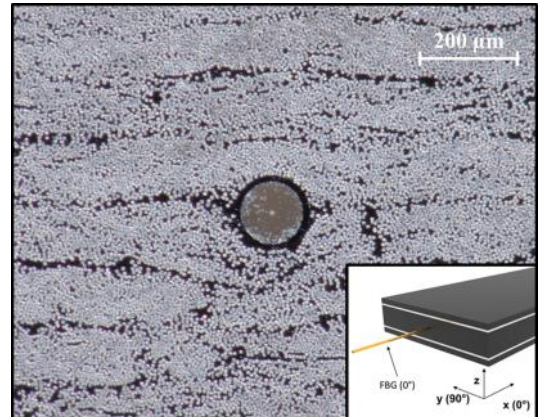
Aktuell erfolgt die Hybridisierung unverändert zum Aushärtprozess der reinen Faserkunststoffkomponente. Ziel unseres Forschungsvorhabens ist ein Erkenntnisgewinn über die Mechanismen zur Eigenstressausbildung und den Wechselwirkungen zwischen den Einzellagen während des Herstellungsprozesses. Daraus sollen Einflussparameter auf den Eigenstresszustand identifiziert werden und in der Folge so angepasst werden, dass eine Minimierung der auftretenden Eigenstressungen erzielt werden kann.

Um diese Einflussfaktoren zu analysieren und angepasste Aushärtprozesse abzuleiten, können unterschiedliche Messmethoden verwendet werden. So lassen sich die Spannungen zum Beispiel anhand von Zugversuchen, durch die Verformung asymmetrischer Bi-

Materialstreifen oder mit Hilfe von eingebetteten Faser-Bragg-Gitter (FBG) Sensoren ermitteln. Zusätzlich wurde ein kombiniertes Verfahren aus FBG- und Krümmungsmessung entwickelt. In einem nachgestellten Prozessschritt werden durch das gezielte Entfernen von Einzellagen asymmetrische Laminats erzeugt. Deren charakteristische Krümmung und die gemessene Änderung der Eigendehnung durch die FBG-Sensoren bei Raumtemperatur ermöglichen quantitative Aussagen über den Eigenstresszustand.

Für die gezielte Anpassung des Aushärtprozesses hinsichtlich eines eigenstressreduzierten Hybridlaminats ist die simultane Messung von Dehnungen während der Aushärtung, wie es die FBG-Sensoren erlauben, äußerst hilfreich. Die Einbettung der faserförmigen FBG-Sensoren erfolgt in das noch unausgehärtete CFK-Laminat. Das in den Kern der Faser eingeschriebene 2 mm lange Bragg-Gitter (periodische Änderung des Brechungsindex) reflektiert exakt eine Wellenlänge des eingesendeten Lichts (1520 nm-1580 nm). Äußere Einflüsse wie Dehnung und Temperatur führen zur Veränderung des Gitters und somit zur Verschiebung der reflektierten Wellenlänge. Die Sensoren liefern ein vollständiges Dehnungsprofil über den gesamten Herstellungsprozess. Dies erlaubt die Ermittlung von Auswirkungen und Mechanismen von veränderten Prozessparametern (Druck, Temperatur, Fertigungsumgebung), zeigt den Zeitpunkt der Stressübertragung zwischen den Metall- und CFK-Lagen und ermöglicht daraus die Ermittlung der eingelagerten Spannungen.

Zusätzlich ermöglichen die Sensoren eine gezielte Anpassung der Prozessparameter. Erste Untersuchungen mittels in-situ überwachten „smart-cure-cycles“ zeigen Eigenstressreduktionen von bis zu 30 %. Dabei wird gezielt eine Zwischenabkühlung im Aushärtprozess eingeführt. Unter Ausnutzung der Trägheit der exothermen Vernetzungsreaktion können auf diese Weise die thermalen Eigenstressungen gezielt reduziert werden. Die Sensoren ermöglichen die Anpassung des Zwischenabkühlungszeitpunktes, die Einstellung der Aufheiz- und Abkühlraten, sowie die Möglichkeit zur Bewertung der Eigenstressreduktion.



Oben: GFRP-Stahllaminat zur Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit in der Wurzel eines Windkraftrotorblattes (links), Schliffbild eines Hybridlaminats mit integriertem FBG-Sensor (rechts)

Unten: Messaufbau der faseroptischen Messtechnik mit FBG-Sensoren: Integration eines FBG-Sensors (Visualisierung des Messgitters mittels Prüflaser)

Gefördert durch



Autoren des Beitrages: Dipl.-Ing. Robert Prussak (Foto), Dr.-Ing. Daniel Stefaniak (DLR)



SHM mit geführten Ultraschallwellen in Faserverbund-Metall-Laminaten

Structural Health Monitoring

Structural Health Monitoring (SHM) mit geführten Ultraschallwellen nutzt Wellenphänomene in Festkörpern, um auf den Zustand der Struktur zu schließen. Dabei wird eine auf die Struktur applizierte Aktorik dazu genutzt, um gezielt Ultraschallwellen in der Struktur anzuregen. Integrierte bzw. applizierte Sensorik dient der Erfassung der Schwingungen. Dabei können Sensoren unterschiedlicher Prinzipien genutzt werden, so z.B. piezoelektrische Sensoren, optische Sensoren etc. Die Art und Weise, wie sich akustische Wellen in den Körpern ausbilden, lässt Schlüsse auf Struktureigenschaften zu. So verursachen große Impedanzsprünge durch Schädigungen Wellenreflexionen, welche sensorisch erfasst werden können. Schädigungsvorgänge verursachen akustische Emissionen, welche über die Signalanalyse im Frequenzbereich nachweisbar sind.

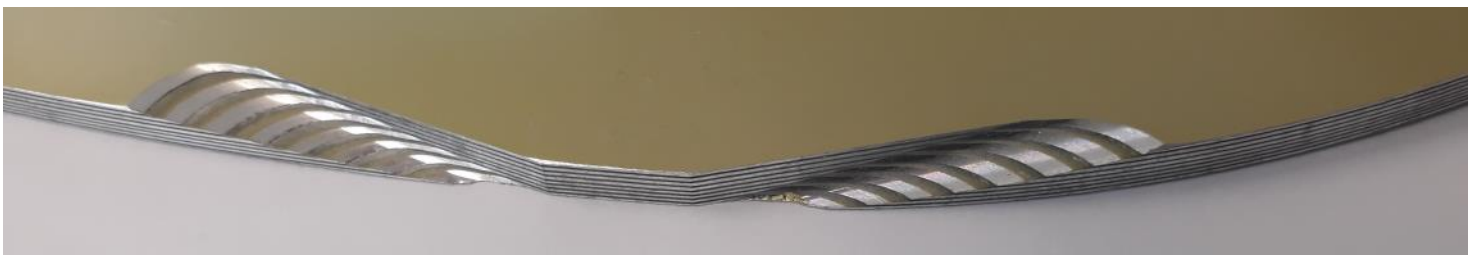
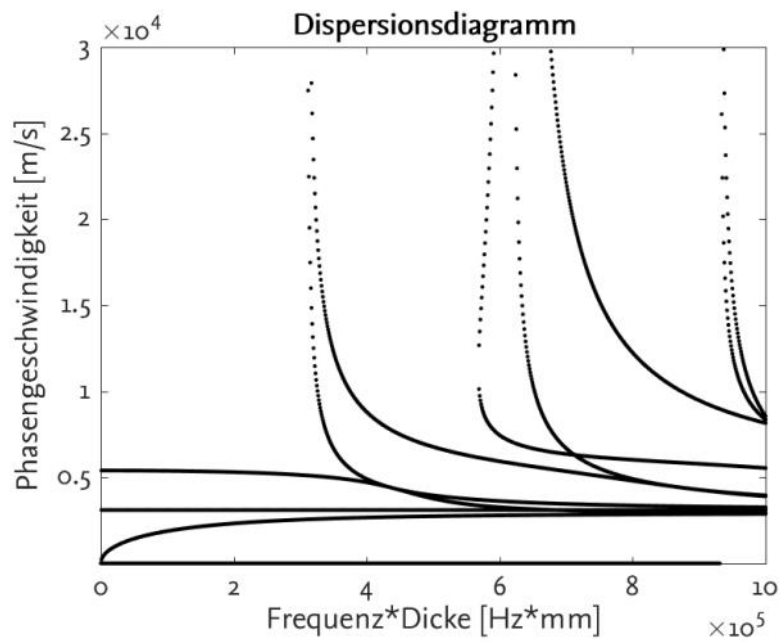
Wellenphänomene in plattenförmigen Strukturen

Ist ein Festkörper sehr dünn im Verhältnis zu seiner Länge und Breite, können aufgrund der Reflexionen der Festkörperwellen an den Grenzflächen sowie deren Überlagerung weitere Wellenphänomene auftreten – sogenannte geführte Wellen. Diese geführten Wellen sind sehr empfindlich gegenüber Strukturinhomogenitäten, wie z.B. Rissen und Schlagschäden und bieten den Vorteil der hohen Reichweite bei gleichzeitig geringem Energieverlust. Auf diese Art ist die Überwachung weitläufiger Strukturen über geführte Ultraschallwellen möglich und bereits bei rein isotropen bzw. rein anisotropen Materialien vielfach untersucht. Abhängig von der Anregungsfrequenz und der Strukturdicke können unterschiedliche Wellenmoden auftreten. Die Wahl des Aktors beeinflusst ebenfalls die auftretenden Wellenmoden in ihrer Amplitude. In Dispersionsdiagrammen wird der Zusammenhang zwischen Anregungsfrequenz, Plattendicke und Ausbreitungsgeschwindigkeit der verschiedenen Wellenmoden dargestellt. Die Lösung der zugrundeliegenden Gleichungen erfolgt bis auf wenige Ausnahmen numerisch.

Faserverbund-Metall-Lamine

Faserverbund-Metall-Lamine (FML) sind Verbundwerkstoffe, welche abwechselnd aus Metallschichten und Faserverbundkunststofflagen (FVK) zu einem Laminat aufgebaut sind. Sie werden dabei dem Wunsch nach Optimierung von mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung von Gewicht gerecht. Sie können sich in der Anzahl der Lagen, der Faserorientierung im Faserverbundkunststoff sowie dem verwendeten Metall unterscheiden und können entsprechend ihres Anwendungsfalls ausgelegt werden. Ein bekanntes Beispiel ist GLARE, ein Aluminium-Glasfaserkunststoff-Laminat, welches bereits in der Luftfahrt Anwendung findet, z.B. im Airbus A380 als Segmente im oberen Rumpfbereich. Aufgrund der Kombination duktiler Metalle mit sprödem FVK ist ein spezifisches Werkstoffverhalten für FML zu erwarten. Insbesondere im Hinblick auf Schädigungen ist dies von Bedeutung. Wird ein FML schlagartig geschädigt, tritt der Schaden als Kombination aus Riss und Verformung auf. Dieses Verhalten beeinflusst nachgewiesenermaßen die Restfestigkeit des Materials. Eine spezifische Wellenausbreitungscharakteristik ist folglich zu erwarten. Im Hinblick auf das SHM in FML ist folglich eine Charakterisierung der Schäden und der Vergleich zu rein isotropen bzw. rein anisotropen Materialien notwendig.

Im Rahmen unserer Forschungstätigkeit wird das bislang unbekannte Wellenausbreitungsverhalten in FML untersucht und beschrieben. Auch soll unter anderem die Wellenausbreitung im Innern der Lamine untersucht werden, weil durch die hohen Impedanzunterschiede der Komponenten ein anderes Ausbreitungsverhalten zu erwarten ist als in homogenen Werkstoffen. Die Charakterisierung ist notwendig, um eine eindeutige Interpretation der gemessenen Signale zu ermöglichen. Das Ziel unserer Forschung ist, die Eignung der Materialien für SHM über geführte Ultraschallwellen zu untersuchen und die charakteristischen Schäden in FML über SHM-Systeme zu erfassen.



Oben: Aluminiumplatte mit applizierten Piezoscheiben zum Anregen und Empfangen von akustischen Wellen

Mitte: Dispersionsdiagramm für eine Aluminiumplatte, Dicke 5mm

Unten: Aufbau von GLARE am Beispiel eines Fensterausschnittes des Airbus A380



Ermüdung von Faserverbunden unter thermischer Zyklierung

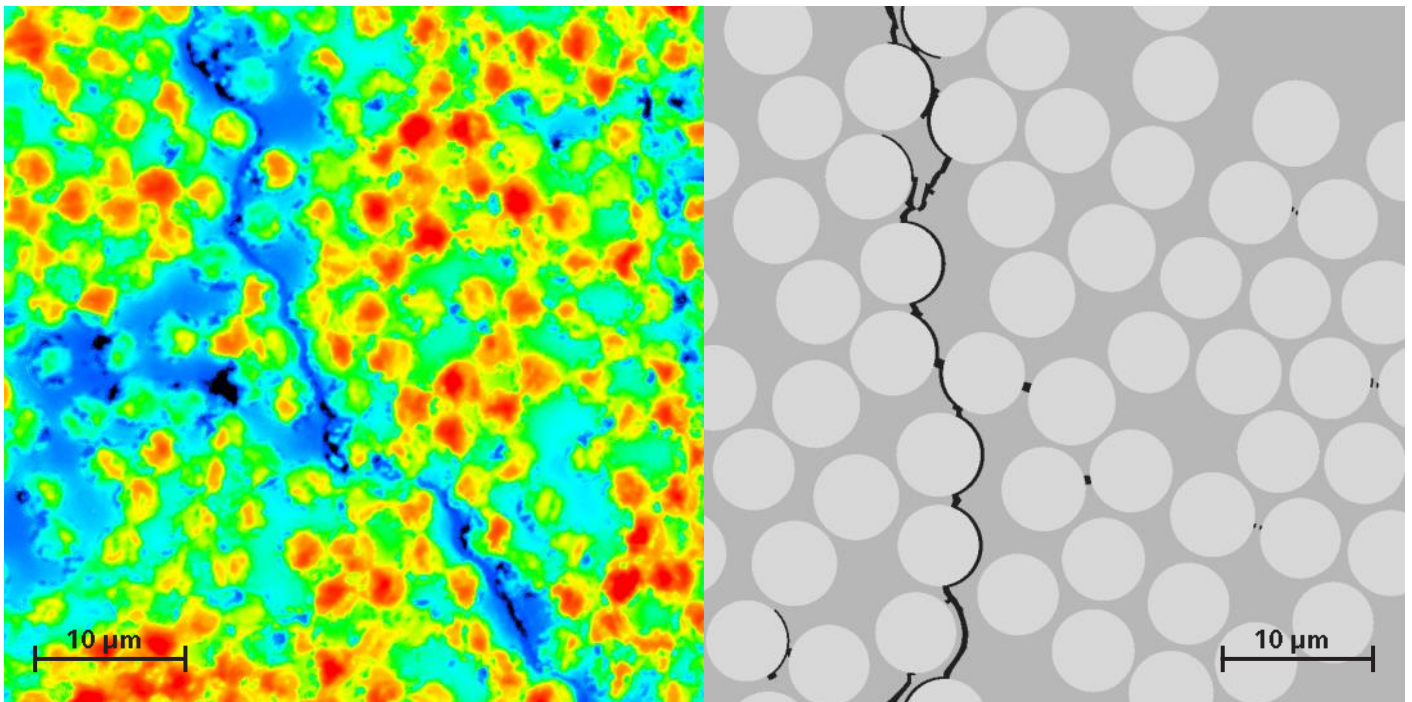
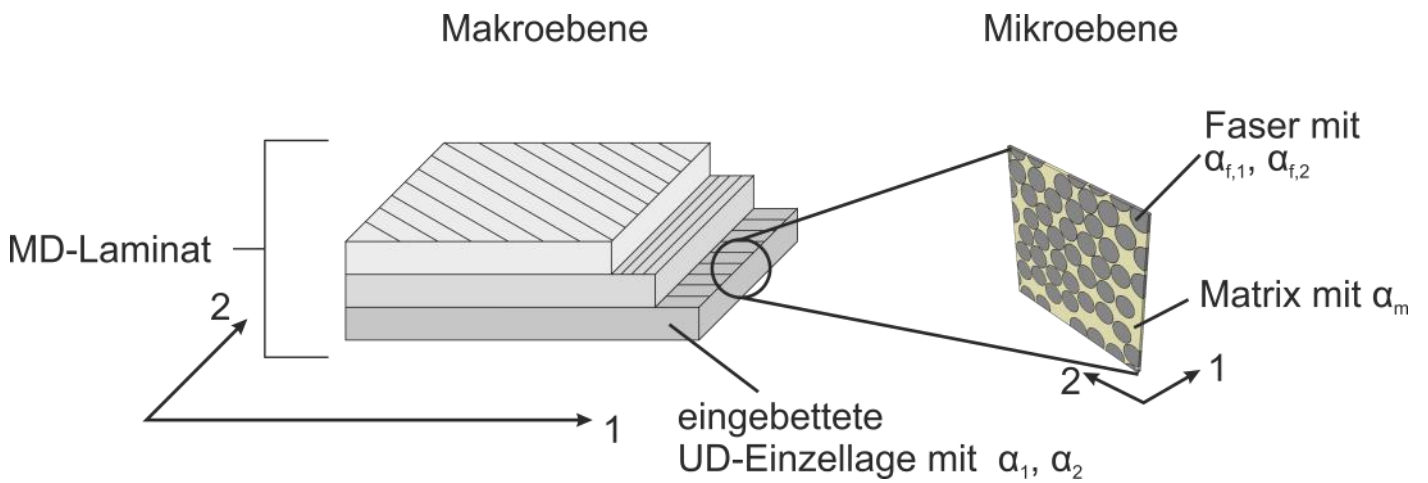
Wegen ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften verbunden mit ihrer geringen Dichte werden FKV (Faserkunststoffverbunde) vermehrt als Konstruktionswerkstoffe für Leichtbauanwendungen aller Art eingesetzt. Mit Fokus auf alternativen Antriebskonzepten und Leichtbau in der Automobilbranche werden beispielsweise Druckbehälter aus CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) zur Wasserstoffspeicherung untersucht. Neben mechanischen Lasten durch den Innendruck sind besonders die durch den flüssigen Wasserstoff (-240 °C) induzierten thermischen Beanspruchungen für die Auslegung relevant, da die Wärmeausdehnung der beteiligten Materialien unterschiedlich ist. Zusätzlich wird die Struktur durch Betankung und Entnahme des flüssigen Wasserstoffs zyklischen Lasten ausgesetzt. Im Ergebnis kann es sowohl durch den wechselnden Innendruck als auch durch die zyklischen thermisch induzierten Spannungen zu Mikroschäden und zur Ermüdung des Materials kommen. Beispiele für ähnlich starke zyklische thermische Lastfälle finden sich in Strukturelementen von Satelliten, die zeitlich veränderlicher Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.

Die zyklische thermische Belastung erzeugt in dem FKV wechselnde Beanspruchungen auf unterschiedlichen Größenskalen. Auf der Faser-Matrix-Ebene (Mikroebene) werden Spannungen in Faser, Matrix und in der Faser-Matrix-Grenzfläche hervorgerufen, da die beteiligten Materialien verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten und Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Die unterschiedliche Ausdehnung von Fasern und Matrix führt zu einer anisotropen Wärmeausdehnung der nächst höheren Strukturebene, der unidirektionalen (UD) Einzellage. Schließlich entstehen thermisch induzierte Spannungen auch auf der Ebene des Gesamtverbundes (Makroebene) aufgrund der behinderten Wärmeausdehnung der verschieden orientierten Einzellagen, besonders an den Übergängen der Einzellagen. Die übliche Homogenisierung der Einzellage in der Ermüdungsberechnung kann die mikromechanischen Effekte nicht berücksichtigen. In unserem Forschungsansatz soll die thermische Beanspruchung auf Mikroebene im makroskopischen Ermüdungsschädigungsmodell über einen äquivalenten mechanischen Spannungszustand berücksichtigt werden. Dieser Ansatz setzt vergleichbare Schädigungsmechanismen unter thermischer und mechanischer Zyklierung voraus. Deshalb werden die Mechanismen der Ermüdung bei thermischer Zyklierung auf der Faser-Matrix-Ebene bis hin zur Ebene des multidirektionalen (MD) Lami-

nats systematisch erforscht.

Es werden experimentelle Untersuchungen auf den verschiedenen Materialebenen zur Identifikation der Schädigungsmechanismen und deren Auswirkungen auf die Eigenschaften des Verbundes durchgeführt. Die modellhafte Beschreibung der Phänomene auf den verschiedenen Ebenen erweitert den Erkenntnisgewinn aus den Experimenten, in dem die Phänomene in den Simulationen nachvollzogen und erklärt werden.

Die Entdeckungsfahrt durch die Materialskalen beginnt bei der Charakterisierung und Modellierung des Materialverhaltens der Verbundkomponenten „Faser“ und „Matrix“. In Einzelfaser-Auszugsversuchen und deren Simulation wird anschließend der Einfluss thermischer Zyklierung auf die Faser-Matrix-Haftung erforscht. Weiter geht es auf die Mikroebene, auf der Faser und Matrix in der Modellierung diskret aufgelöst und beschrieben werden. Mikroskopische Untersuchungen an thermisch zyklerten Verbundproben geben Aufschluss über die auf Mikroebene auftretenden Schadensbilder bei thermischer Ermüdungsbelastung. In der mikromechanischen Simulation lassen sich die Schädigungsmechanismen erkennen, nachvollziehen und mit denen bei mechanischer Ermüdungslast vergleichen. Gleichzeitig werden die Auswirkungen der verschiedenen Belastungsarten auf die Materialkennwerte des Verbundes gegenübergestellt und eine mechanisch zyklische Beanspruchung ermittelt, die die gleiche Materialdegradation hervorruft wie eine thermische Zyklierung. Dieser äquivalente Spannungszustand wird in der Modellierung auf der Makroebene genutzt, um die Wirkung mikromechanischer Effekte trotz homogener Betrachtung der Einzellagen zu erfassen.



Oben: Betrachtete Größenskalen

Unten: Matrixriss in einer thermisch zyklerten Probe unter dem Konfokal-Laserscanningmikroskop (links) und berechneter Matrixriss unter mechanischer Last (rechts)

Gefördert durch



Autorin des Beitrags : Dipl.-Ing. Caroline Lüders



Piezelektrische 0-0-3 - Komposite

Die aktuelle internationale Forschung beschäftigt sich mit strukturell integrierten Systemen für das Structural Health Monitoring (SHM), die verdeckte Schäden in Polymerverbundstrukturen erkennen können. Diese Systeme verbessern die Sicherheit von Leichtbaustrukturen und tragen durch angepasste Wartungsintervalle zu einer höheren Wirtschaftlichkeit bei. Die Vision für SHM-Systeme ist ein autonomer Betrieb, bei dem piezokeramische Sensoren / Aktoren zur Energiegewinnung für den SHM-Betrieb eingesetzt werden können. Darüber hinaus kann die umgebende Struktur genutzt werden, um Energie außerhalb der SHM-Betriebszeit zu erzeugen.

Der Mechanismus der mechanisch-elektrischen Umwandlung von Schwingungsenergie in Polymerverbundwerkstoffen durch strukturintegrierte Funktionswerkstoffe wird untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf piezoelektrischen Verbundwerkstoffen, die aus mehrschichtigen faserverstärkten Polymeren aufgebaut sind. Im Vergleich zu auf die Oberfläche geklebten Flächenwandlern ist der Hauptvorteil dieser Konfiguration eine minimale Wechselwirkung mit den geführten Ultraschallwellen. Darüber hinaus könnte eine intelligente Materialintegration innerhalb einer Struktur die Signalinterpretation im Hinblick auf Strukturschäden verbessern.

Unsere Forschung verfolgt zwei Ziele. Das erste Ziel ist ein umfassendes Verständnis piezoelektrischer Polymerkomposite aus piezoelektrischem Pulver und duroplastischem Harz, die für Kohlenstoff-FKV (CFK) oder Glas-FKV (GFK) verwendet werden. Das zweite Ziel ist die experimentelle Verbesserung der Permittivität von piezoelektrischen Verbundwerkstoffen durch eine dritte Phase, d.h. Partikel aus Kohlenstoffmodifikationen. Relevante piezoelektrische Eigenschaften der modifizierten piezoelektrischen Verbundwerkstoffe werden eingehend untersucht. Es werden alternative Polarisationsverfahren untersucht, die auf FKV mit integrierter piezoelektrischer Schicht anwendbar sind. Insbesondere werden alternative bleifreie Materialien mit piezoelektrischen Eigenschaften in Betracht gezogen. In einem zweiten Schritt werden Methoden zur Komposition des piezoelektrischen Verbundes mit Fasern erforscht. Als geeignetes Verfahren gilt die Harzfilminfusion (RFI). Der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe muss bewertet werden.

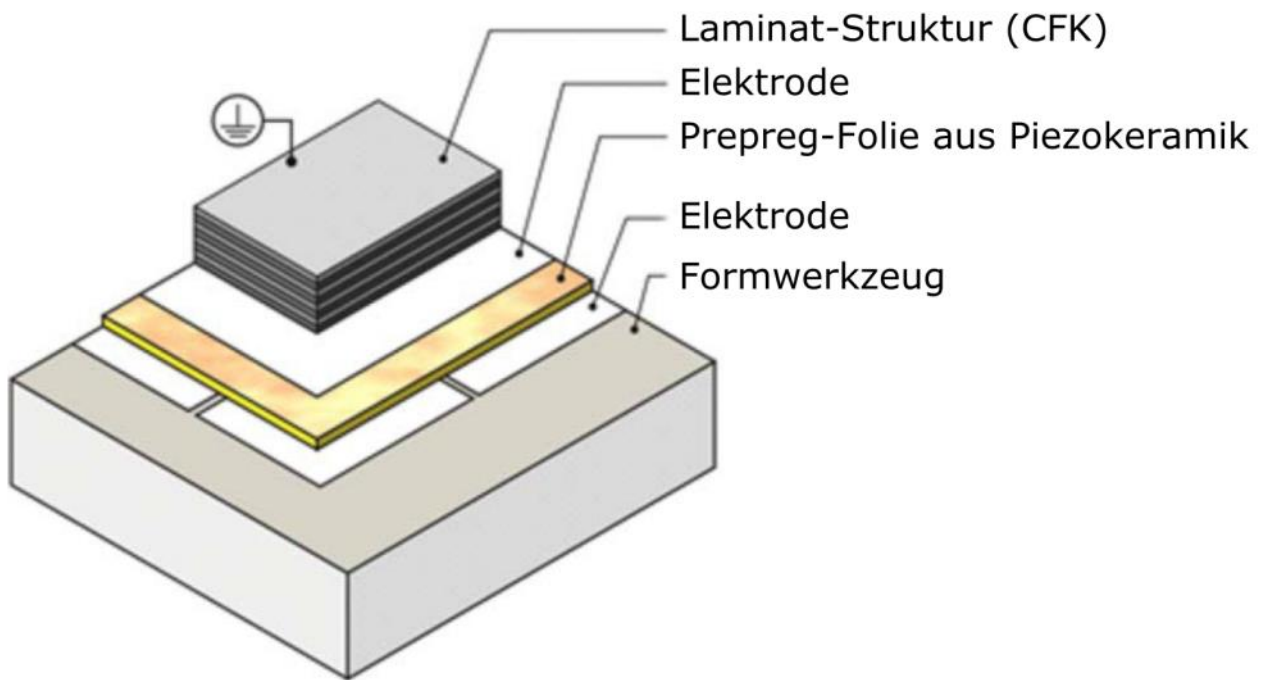
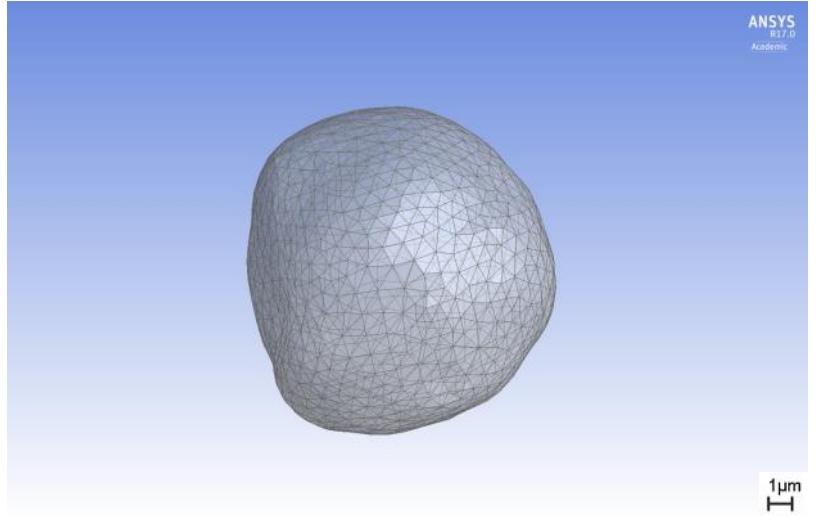
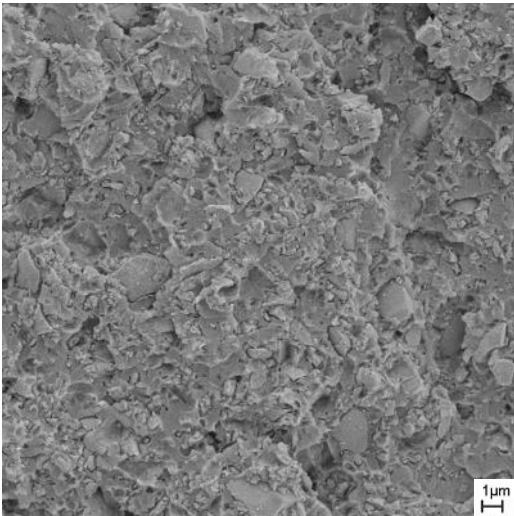
Die mikroskalige Modellierung für die entsprechende Probe liefert uns ein Verständnis über Piezoelektrizität bei piezoelektrischen Kompositen. Die Probe besteht aus einem überwiegenden Anteil der piezoelektrischen Partikel und Epoxidharz als Matrix. Eine Drittphase mit Kohlenstoffmaterialien wird auch eingeführt.

Mittels der Finite-Elemente-Methode werden die elektromechanischen Eigenschaften untersucht. Die entscheidenden Parameter für den piezoelektrischen Effekt sind die Permittivität, die piezoelektrische Ladungskonstante und der elektromechanische Kopplungsfaktor. Das Modell wird aus spezifischen Gesetzen der Kontinuumsmechanik entwickelt.

Die experimentell gewonnene Partikelgeometrie lässt sich numerisch mit rechnerunterstützter Software reproduzieren. Form und Größe der Partikel werden statistisch beschrieben. Durch ein Mikro-CT wird das Objekt mit hoher Detailauflösung mittels der aufgenommenen Röntgenprojektionen numerisch rekonstruiert. Da alle heutigen CTs kleine Voxel erzeugen können, ist eine hohe räumliche Auflösung in beliebigen Raumrichtungen möglich. Eine Auflösung im Mikro/Sub-Mikro-Bereich ist für die Beschreibung der Partikel-Geometrie geeignet. Die numerische Beschreibung basiert auf einer parametrischen Darstellung der Form und Größe. Dazu wird auch der Volumenanteil berücksichtigt.

Piezoelektrische Komposite mit einem Gewichtsanteil von über 60% piezoelektrischen Partikeln erzielen Wandlereigenschaften, die etwa 10% der reinen Piezokeramik betragen. Wir erwarten durch das Hinzufügen einer dritten Phase eine Verbesserung um den Faktor 3.

Letztendlich wollen wir die piezoelektrischen Komposite im faserverstärkten Kunststoff integrieren. Als Laminat können piezoelektrische Komposite mit isolierten Schichten gut mit CFK kombiniert werden. Eine Produktionsmethode für FKV mit piezoelektrischen Kompositen wird untersucht. Der Zusammenhang zwischen elektromechanischen Eigenschaften und Partikeltyp, Größe, Verteilung sowie drittphasigen Materialien wird bewertet.



Oben links: PZT-Partikeln im SEM-Bild

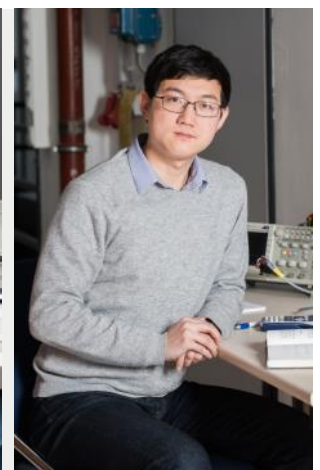
Oben rechts: PZT-Partikel im FE-Modell

Unten: Konfiguration eines Laminats mit piezoelektrischen Kompositen

Gefördert durch



Autoren des Beitrags : M.Sc. Rytis Mitkus, M.Sc. Ye Zhao



Nanopartikelverstärkte Faserverbundkunststoffe

Im kostengünstigen Injektionsverfahren hergestellte, endlosfaserverstärkte Verbundkunststoffe (FVK) besitzen im Vergleich zu im Prepreg-Verfahren hergestellten FVK eine reduzierte Schadenstoleranz, geringere Druckfestigkeit sowie eine verringerte Formstabilität. Diese Eigenschaftsdefizite im Vergleich zu Prepreg-FVK lassen sich sowohl auf die größere Harzschwindung als auch auf Abweichungen von idealen Faserwinkeln zurückführen. Eine Möglichkeit die Eigenschaftsdefizite auszugleichen ist die Matrix mit nanoskalierten Partikeln zu modifizieren. Am Institut erzielte Forschungsergebnisse aus systematisch durchgeführten Reihenuntersuchungen an nanomodifizierten FVK zeigen, dass sich vor allem die matrixdominierten Eigenschaften durch eine Modifizierung der Matrix mit Nanopartikeln signifikant verbessern. Die Ursache dafür ist nicht nur ein gesteigertes Eigenschaftsniveau der Matrix. Im Vergleich zum unmodifizierten FVK verändert sich durch die Nanopartikel ebenfalls das Versagensverhalten aufgrund von neuen partikelinduzierten Schädigungsmechanismen, die dazu führen, dass unter anderem die Risszähigkeit und die Beständigkeit gegen Schlagbeanspruchung des FVK signifikant ansteigen.

Im Rahmen dieses Forschungsschwerpunktes beschäftigen wir uns mit der Analyse mechanischer Eigenschaften und des Versagensverhaltens von nanomodifizierten FVK. Die mechanischen Eigenschaften werden mit Hilfe von quasistatischen Versuchen auf Coupon Ebene analysiert. Der Einfluss der Nanoadditive auf das Versagensverhalten wird mit Hilfe von Untersuchungen von Riss- und Bruchflächen mittels elektronenmikroskopischer Verfahren analysiert. Zur Herstellung der Probekörper wird ein mit keramischen Nanopartikeln modifiziertes Epoxidharzsystem verwendet. Die Versuche unterteilen sich in zwei Kategorien: Versuche am 2-Phasen-System (modifiziertes Harzsystem) und Versuche am 3-Phasen-System (modifizierter FVK). 2-Phasen-Probekörper werden mittels konventionellen Gießverfahren hergestellt und 3-Phasen-Probekörper mittels Differential Pressure Resin Transfer Molding (DP-RTM) Verfahren.

Mit Hilfe des DP-RTM Verfahrens können qualitativ hochwertige Prüfplatten mit einem hohen Faservolumengehalt (60 Vol%) hergestellt werden. Abbildung 1 zeigt eine schematische Skizze dieses Verfahrens. Die Herstellung der Prüfplatten wird in einem Autoklaven realisiert. Dabei wird das modifizierte Harz in einem Behälter außerhalb des Autoklaven gelagert. Die Faserlagen werden durchtränkt indem das modifizierte Harz mit Hilfe von Vakuum in den Versuchsaufbau transportiert wird.

In Abbildung 2 ist die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Rissfläche eines nanomodifizierten FVK abgebildet. Bei entsprechender Vergrößerung (rechts) sieht man deutlich die in die Matrix eingebetteten Nanopartikel. In diesem Fall handelt es sich um nanoskaliges Böhmit mit einer Primärpartikelgröße von 14 nm. Die Auswertung der bisher untersuchten Riss- und Bruchflächen lässt darauf schließen, dass ein Ablösen der Partikel von der Matrix einen wesentlichen Anteil an der aufgrund der Nanopartikel signifikant angestiegenen Risszähigkeit hat.

Die durchgeführten Arbeiten zielen ebenfalls darauf ab den Einfluss der Partikel-Matrix-Interphase, also den Übergangsbereich zwischen Partikel und Matrix, zu untersuchen. Um dies zu realisieren werden Partikel mit unterschiedlichen Oberflächenreaktivitäten eingesetzt. Mit Reaktivität wird die Eigenschaft des Partikels mit der umgebenen Matrix chemische Bindungen einzugehen adressiert. Die Reaktivität einer Oberfläche kann mit einer gezielten Modifikation in Form von funktionellen Gruppen (OH-Gruppe) oder Molekülen (Carbonsäure) beeinflusst werden. Ergebnisse aus Untersuchungen an Faserverbundkunststoffen mit unterschiedlich oberflächenmodifizierten Nanopartikeln zeigen, dass eine Oberflächenmodifikation des Nanopartikels einen signifikanten Einfluss auf die mechanische Performance des FVK besitzt. Primär konnte das an rissdominierten Eigenschaften des FVK (interlaminare Energiefreisetzungsrate und Delaminationsverhalten) nachgewiesen werden. Abbildung 3 zeigt die Delaminationsfläche nach Schlagbeanspruchung in Abhängigkeit der Schlagenergie für FVK mit einem Gewichtsanteil von 10 % Nanoböhmit. Den größten Delaminationssschaden nehmen FVK ohne Nanopartikel. Wird der FVK mit Nanopartikeln modifiziert, sinkt der Delaminationssschaden deutlich ab und kann sogar noch weiter gesenkt werden indem die Oberfläche des Nanopartikels gezielt modifiziert wird.

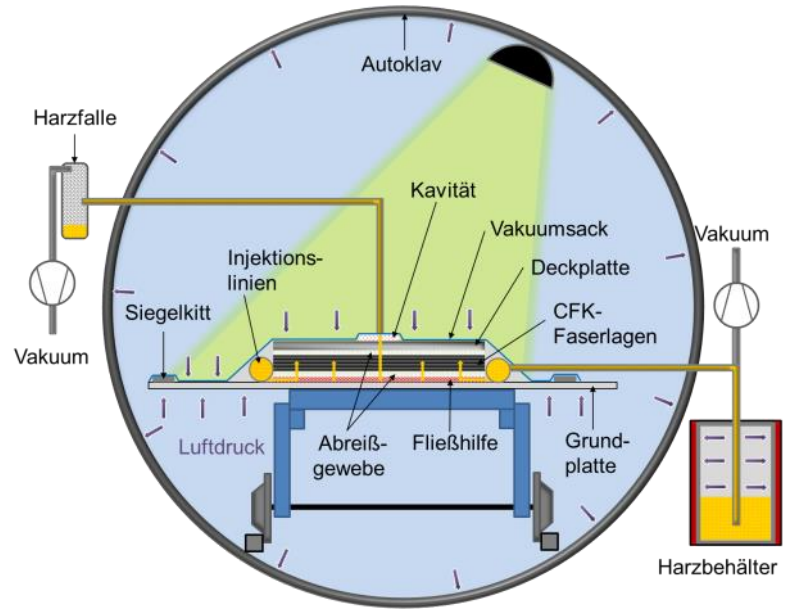


Abbildung 1

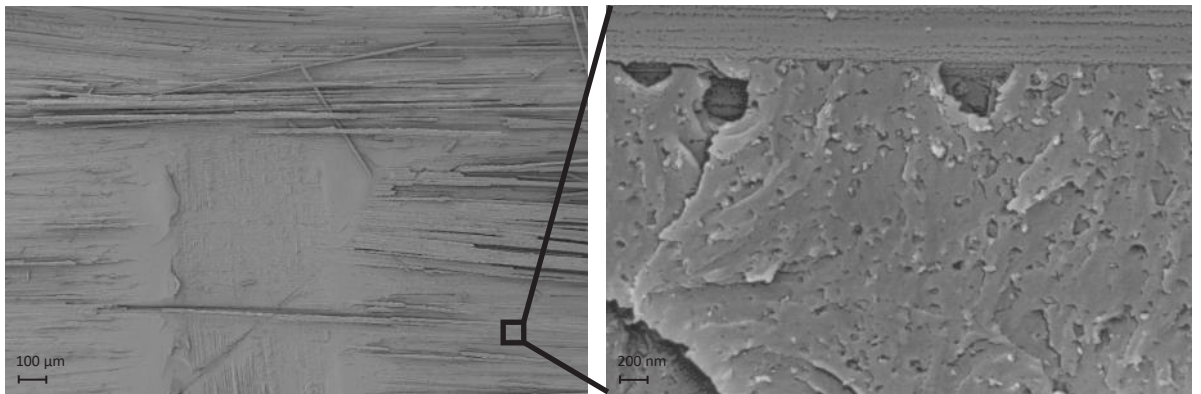


Abbildung 2

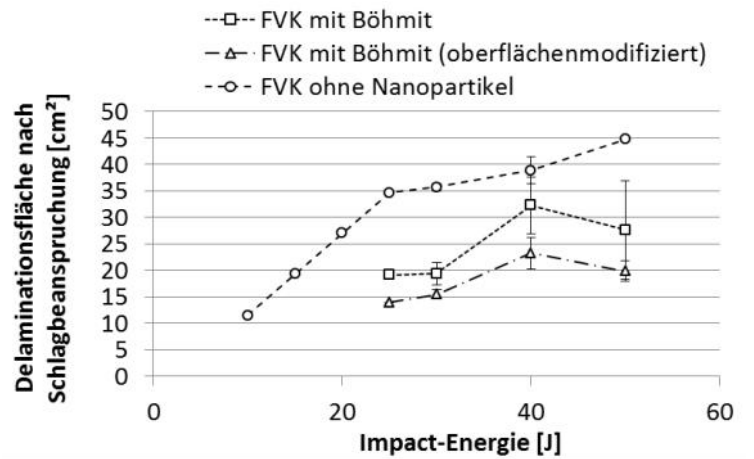


Abbildung 3



Abbildung 1: Schematische Skizze des DP-RTM Verfahrens zur Herstellung von nanomodifizierten Faserverbundkunststoffen

Abbildung 2: REM-Aufnahme von einer Rissfläche eines nanoböhmitmodifizierten Faserverbundkunststoffes

Abbildung 3: Delaminationsfläche nach Schlagbeanspruchung in Abhängigkeit der Impact-energie für FVK mit einem Gewichtsanteil von 10 % Nanoböhmit

Gefördert durch



Modellierung polymerer Nanoverbunde mittels TFA

Um die Eigenschaften von Hochleistungsverbunden zu verbessern und die Nachteile von Harzinfusionsverfahren und anderen alternativen Techniken zu überwinden, wird als neuartige Methode die Verwendung von Nanopartikeln als Matrixadditive vorgeschlagen. Das Einbringen von Nanopartikeln erhöht die Leistungsfähigkeit von Epoxidharzen, die in Kohlenstofffaser-verstärkten Kunststoffen (CFK) verwendet werden, signifikant.

Das Ziel unserer Forschungsarbeit im Rahmen der Forschergruppe 2021 „Wirkprinzipien nanoskaliger Matrixadditive für den Faserbundleichtbau“ ist die Entwicklung von mathematischen Modellen, sowohl analytisch als auch numerisch, um die stark heterogenen Nanokomposite, wie Abbildung (1) zeigt, auf mehreren Skalen untersuchen zu können. Die Methoden werden genutzt, um den Effekt der Nanomodifikation auf die Steifigkeit und Festigkeit von Flugzeugstrukturen, z.B. Flügelkasten oder Rumpfstrukturen, zu untersuchen. Dabei sparen die Methoden im Vergleich zu den heute verwendeten Multiskalenansätzen enorm an Rechenzeit.

Indem die von Dvorak et. al. entwickelte Transformation Field Analysis (TFA) die Felder der internen Variablen auf Nanoebene als abschnittsweise konstant annimmt, kann sie auf eine elegante Weise die internen Variablen auf Mikroebene reduzieren.

Die TFA ist eine Methode zur inkrementellen Lösung von Spannungsproblemen in nicht elastischen heterogenen Materialien und Verbunden.

Die Anwendung der TFA auf ein elastisch-plastisches Nanokomposite ist in Abbildung (2. a) illustriert. Das Einheitszellenmodell besteht aus einem elasto-plastischen Epoxid (LY556) mit elastischen Nanopartikeln (Böhmit) und besitzt einen Partikelgehalt von 7-10%.

Die über die TFA berechnete Spannungs- und Dehnungsantwort der Einheitszelle unter verschiedenen mechanischen und thermischen Belastungen deckt sich mit der direkten Auswertung der Dehnungen und Spannungen aus einer elastisch-plastischen Finite Elemente (FE) Berechnung mittels ABAQUS. Die Effizienz der TFA gegenüber der FE-Berechnung wird über die benötigte CPU-Zeit bewertet.

Beschleunigte mehrskalige Analyse von stark heteroge-

nen Nanoverbunden

Das TFA-Tool wird im Bereich der Modellierung mehrskaliger repräsentativer Volumenelemente (RVE) in FE-Berechnungen angewendet und ist von Natur aus ein „Mikro-Makro“-Ansatz. Um auch lokale „Nano-Mikro“-Effekte abzubilden, wird eine zusätzliche nanoskalige TFA verwendet. So können die mechanischen Eigenschaften von Nanoverbunden mit dem in Abbildung (2. a - c) gezeigten FE-Framework charakterisiert werden. In dem Fall wird der Verbund aus Partikeln und Matrix homogenisiert und durch den TFA-Ansatz effektive Materialeigenschaften der modifizierten Matrix bereitgestellt.

Der TFA -Ansatz ist als nutzerdefinierte Materialsubroutine in das Mikromodell eines RVE integriert. In diesem REV ist die nanomodifizierte Matrix durch einen gewissen Volumenanteil an parallel ausgerichteten Fasern verstärkt. Die mikromechanische Berechnung des RVE liefert die effektiven Eigenschaften des Verbundes und repräsentiert einen Punkt in einer unidirektionalen Lage.

Michel und Suquet schlagen eine erweiterte Methode, die nicht-konstante TFA (NTFA), vor. Diese berücksichtigt eine nicht konstante Verteilung der inelastischen Dehnungen im Material.

In unseren weiteren Forschungsarbeiten soll die aktuelle Methode mittels der NTFA erweitert werden und somit einen neuen Horizont für die beschleunigte mehrskalige Analyse von stark heterogenen Nanoverbunden eröffnen.

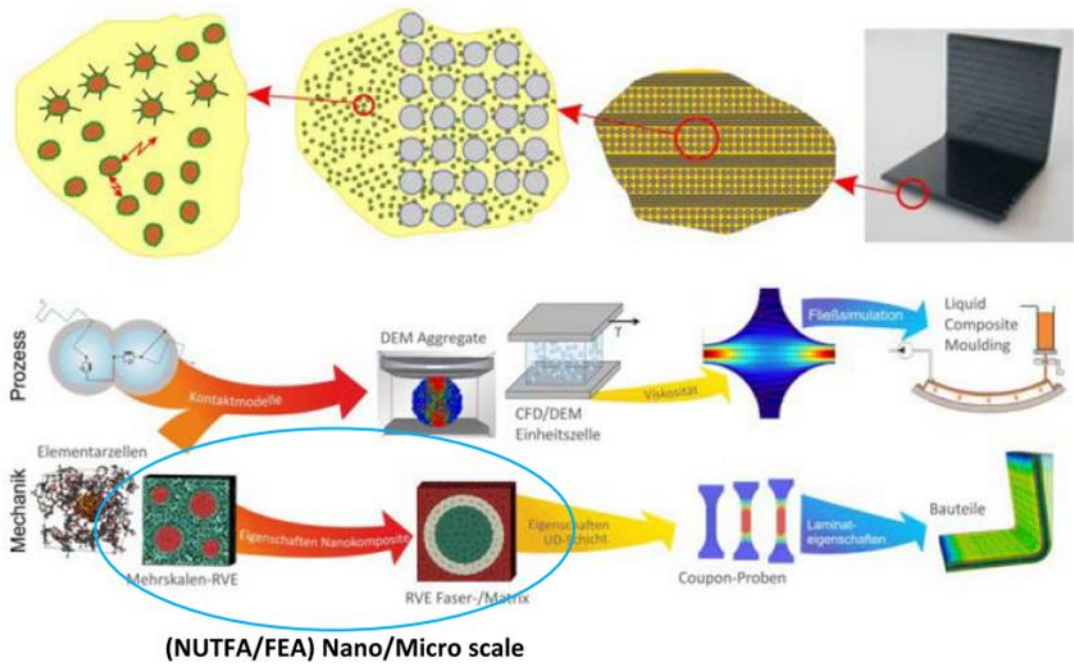


Abbildung . 1.

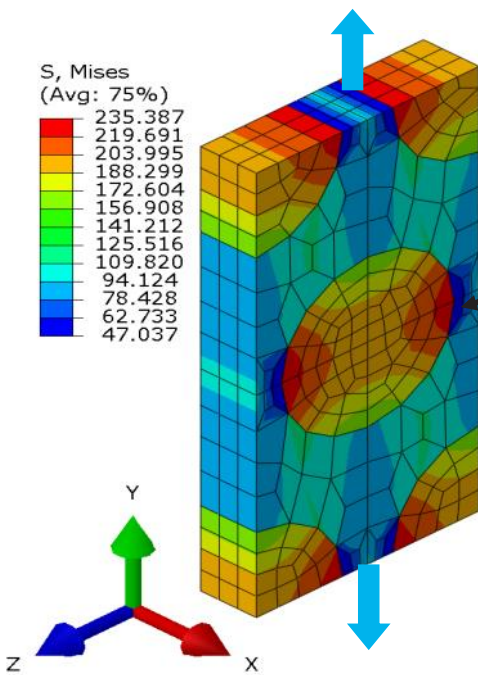


Abbildung . 2. b)

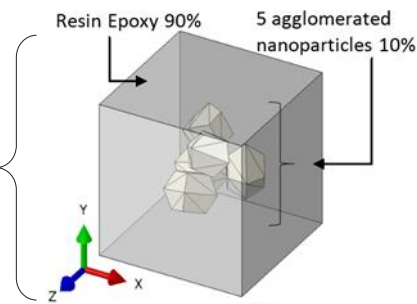


Abbildung .2 .a)

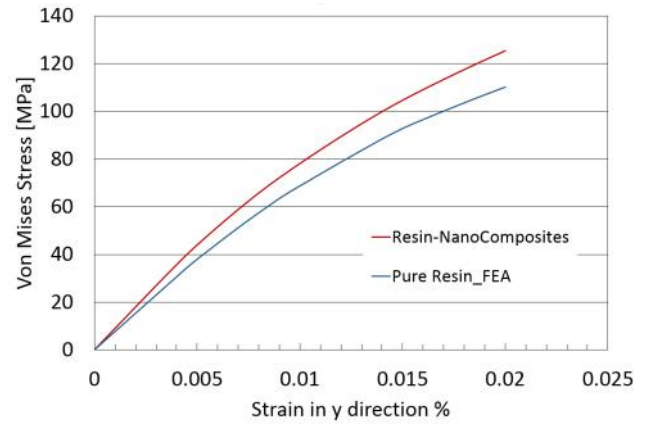


Abbildung . 2. c)



Abbildung . 1. Schlüsselfragen der Forschergruppe 2021.

Abbildung . 2. a) Nanoskala (RVE-TFA) Ein repräsentatives Volumenelement (RVE) besteht aus 90% (Gewichtsanteil) Harz-Epoxy- und 10% Agglomerat-Boehmit-Nanopartikeln.

Abbildung . 2. b) Mikroskala (RVE-FEA).

Abbildung . 2. c) Reaktion des RVE unter Verschiebungsbelastung in y-Richtung $\epsilon_y = 0.02\%$.

Gefördert durch



Autor des Beitrags : Dr.-Ing. Imad Aldin Khattab



Flugzeugvereisung: Eiserkennung und Enteisung während des Flugbetriebes

Vereisung von Flugzeugkomponenten in der Luftfahrt entsteht nicht nur am Boden, sondern auch während des Flugbetriebs. Dabei treffen unterkühlte Wassertropfen (Tropfentemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes) auf die Flugzeugstruktur und frieren je nach Umgebungsbedingungen komplett oder teilweise an dieser an. Die dabei entstehende Eisschicht reduziert den Auftrieb, erhöht den Widerstand und die Masse des Flugzeuges, was bis zum Verlust der Steuerbarkeit führen kann. Während des Fluges ist eine Enteisung von außen durch Besprühen der betroffenen Komponenten mit Enteisungsflüssigkeit, die am Boden typisch ist, nicht möglich und es müssen andere Enteisungsverfahren zum Einsatz kommen, um die Flugsicherheit zu gewährleisten. Dabei sind in Verkehrsflugzeugen thermische Systeme am weitesten verbreitet. Diese basieren in der Regel auf dem Prinzip der Widerstandsheizung oder heizen die betreffenden Strukturen durch Entnahme von heißer Luft aus den Triebwerken auf. Für kleinere Flugzeuge existieren auch mechanische Enteisungssysteme. Der am weitesten verbreitete Vertreter ist dabei das „Pneumatic Boots“-System, das durch Aufpumpen von segmentierten Gummimatten auf der Flügelvorderkante angelagertes Eis entfernt. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs thermischer Systeme und der Verwendung von Leichtbaustrukturen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit, sowie geringerer thermischer Belastbarkeit im Vergleich zu metallischen Werkstoffen und der nicht immer zuverlässigen Enteisung der „Pneumatic Boots“, erforschen wir elektro-mechanische Enteisungssysteme und deren Wirkprinzipien.

Enteisung durch Resonanzanregung

Das Wirkprinzip des zunächst betrachteten Systems beruht auf der dynamischen Anregung von vereisten Strukturen. Dabei werden besonders dünnwandige Strukturen adressiert, die für den Leichtbau typisch sind. Durch eine ausgewählte Aktorik wird die Struktur in ihren Eigenfrequenzen angeregt. Bei der verwendeten Aktorik aus den Versuchen an einfachen Versuchskörpern und an einem NACA0012-Profil handelt es sich um piezokeramische Flächenaktoren. Dabei wird der inverse piezoelektrische Effekt genutzt. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes wird eine Verformung der Keramik hervorgerufen. Werden die Flächenaktoren außerhalb der neutralen Phase der Struktur appliziert, erzeugen diese eine Biege-

verformung der Struktur. Durch dynamische Aktuierung können so Biegewellen in die Struktur eingeleitet werden.

Durch Anregen der Strukturresonanzen muss die Aktorik nur die Struktur-/ Materialdämpfung überwinden, wodurch ein hoher Energieeintrag gewährleistet werden kann. Die induzierten Biege- wellen erzeugen Schub- und Normalspannungen in der Kontaktfläche zwischen Substrat und Eis und dem Eis selbst, was zu Rissen im angelagerten Eis und zur Delaminationen des Eises führt und somit zur Enteisung der Struktur. Die durchgeführten Funktionsversuche an einfachen Strukturen und Flügelvorderkantenprofilen haben bestimmte Grenzen der Methode aufgezeigt und ebenso neue Fragestellungen in Bezug auf Auslegungskriterien, dem Enteisungsmechanismus und der angepassten Ansteuerung (Autonomie) aufgeworfen, die weiterhin untersucht werden.

Um darüber hinaus eine Autonomie des Enteisungssystems zu erreichen, muss die Anregung der Strukturschwingungen auf die veränderlichen Umgebungsbedingungen reagieren und sich anpassen. Diese Veränderungen werden unter anderem durch die entstehende Eisschicht erzeugt, welche Masse, Steifigkeit und Dämpfung verändert. Eine Anpassung an die durch die Vereisung veränderten Eigenschaften kann mithilfe einer automatisierten Eigenfrequenzsuche realisiert werden.

Thermomechanische Enteisung

Das zweite Enteisungssystem ist ein thermo-mechanisches System, das sich der Wirkungsweise der Formgedächtnislegierung (FGL) bedient. FGL zählen zu den Funktionswerkstoffen (*Smart Materials*). Mithilfe einer thermischen Aktivierung findet eine Martensit-Austenit-Phasentransformation statt, wobei die Austenitphase einen höheren Elastizitätsmodul aufweist. Aufgrund der temperaturbedingten Phasenänderung kann dem Material eine „erlernte“ Formänderung aufgeprägt werden, welche, wie im Folgenden beschrieben, zur thermo-mechanischen Enteisung genutzt werden soll.

Die Umsetzung sieht einen ringförmig, in eine Elastomerschicht eingebetteten FGL-Draht mit einer aufgebrachten Vordehnung von ca. 4% vor. Wird der FGL-Draht von elektrischem Strom durchflos-

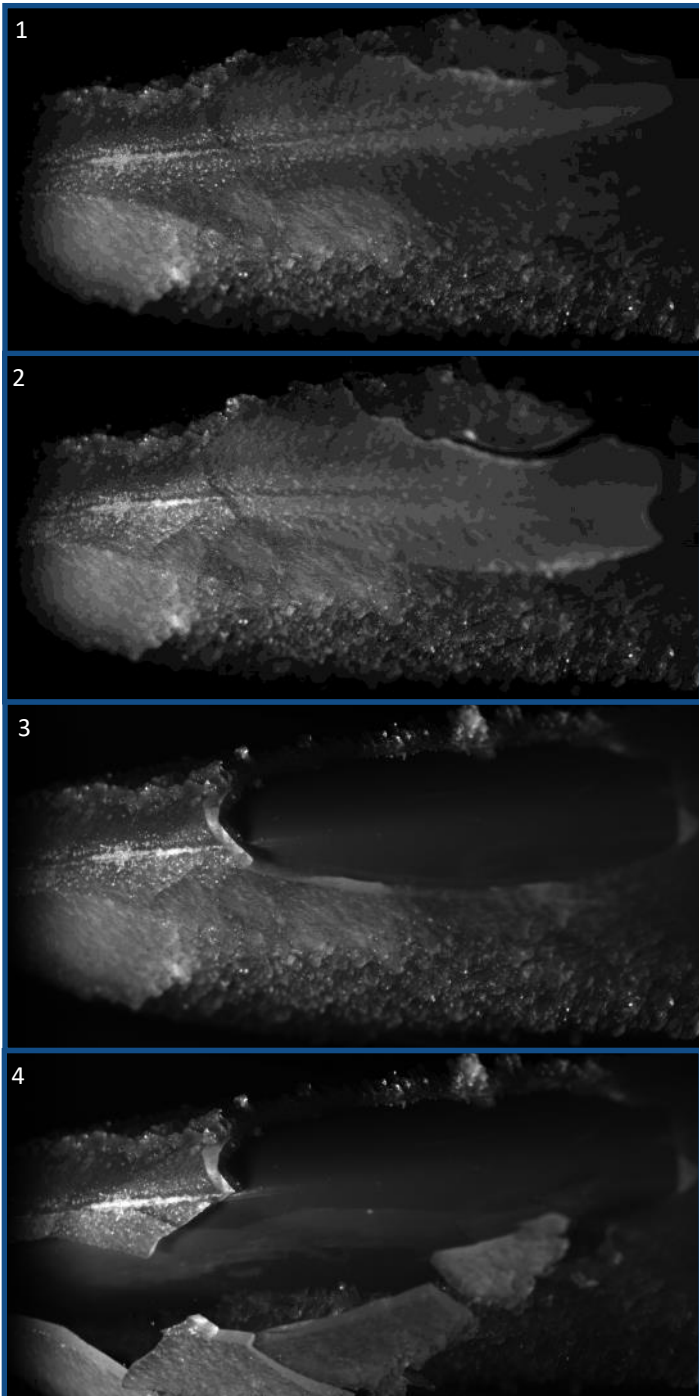


Abbildung 1:

↑ Enteisungsvorgang durch resonante Struktur-
regung bei -10°C auf einem NACA0012-Profil

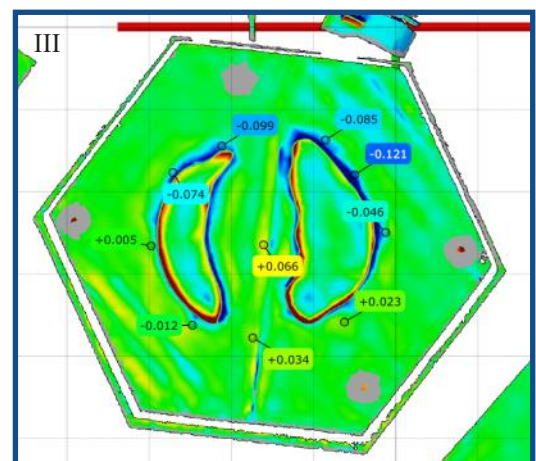
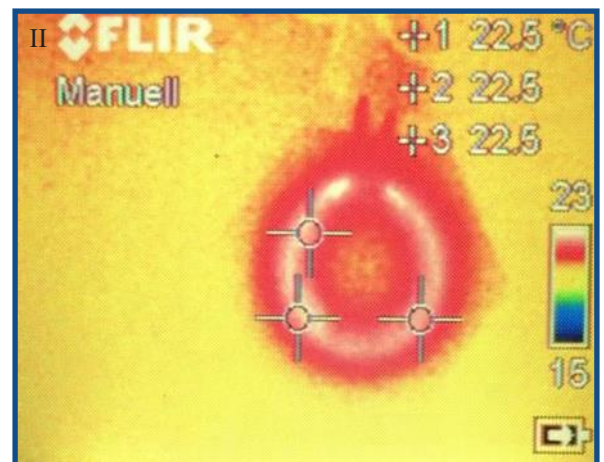
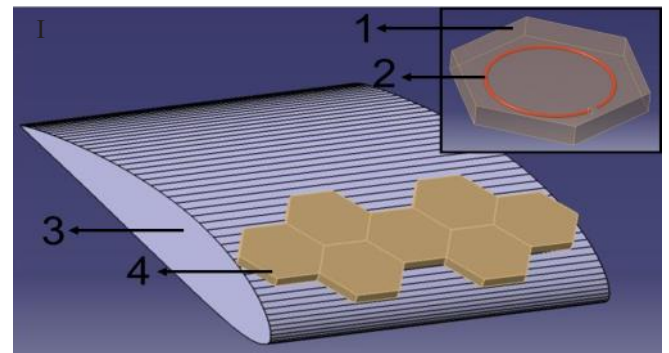


Abbildung 2

I: Modell für FGL-Ring (1. Elastomer, 2. FGL-Ring, 3.
Aerodynamisches Profil, 4. Enteisungssegment)

↑ II: Messung für die Oberflächentemperatur

III: Oberflächenverformung

Fortsetzung:

Flugzeugvereisung: Eiserkennung und Enteisierung während des Flugbetriebes

sen, so erwärmt sich dieser und verformt sich in die zuvor erlernte, originale Form. Die so erzeugte Kontraktion, resultiert in einer Ausbeulung des Elastomers. Die Wärme der thermischen Aktivierung erhöht zusätzlich die Oberflächentemperatur und trägt damit zur Eisablösung bei. Durch die Superposition des mechanischen (Ausbeulung) und des thermischen Effektes (Temperaturerhöhung) soll angelagertes Eis entfernt werden. Wird der Stromfluss unterbrochen, ist der FGL-Draht nicht mehr aktiv und kühlt ab. Aufgrund der Federkraft des Elastomers verformt sich der FGL-Draht nach der Phasenrücktransformation in seine Anfangsposition zurück. Dieses Funktionsprinzip wird als *extrinsischer Zweiwegeffekt* bezeichnet. Als möglicher Anwendungsbereich dieses Enteisungsprinzips wird die Enteisierung einer Flügelvorderkante adressiert. Dabei sollen mehrere Enteisungssegmente an der Vorderkante positioniert werden.

Eiserkennung

Eiserkennung ist ein dritter Schwerpunkt unserer Forschung. Flugunfälle in Folge von Vereisung sind glücklicherweise selten. Doch treten sie ein, ist die Unkenntnis der Cockpitbesatzung über den vorhandenen Vereisungszustand meist der Hauptgrund für einen Absturz. Ein direkt messendes Eiserkennungssystem kann hier Abhilfe schaffen. Es misst den Vereisungszustand direkt am Ort der vereisten Struktur und könnte somit noch vor Beginn über einen vorhandenen Eisansatz informieren. Während des Reiseflugs wäre es, neben der Informationsweitergabe, in der Lage, das automatisierte Ein- und Ausschalten des Enteisierungssystems zu initiieren. Verschiedene Konzepte und Prinzipien für ein geeignetes System wurden von uns untersucht. Nach Vorversuchen mit aufgebrauchten Eisschichten wurden zwei Systeme ausgewählt, als Konzeptaufbauten realisiert und in den vorhandenen Prüfständen getestet. Im Enteisungsprüfstand des iAF und im Mehrphasenwindkanal des Instituts für Strömungsmechanik (ISM) wurden Wassertropfen bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes eingesprüht und somit die in der Luftfahrt auftretenden Eisarten Klar- und Raueis auf Probekörpern erzeugt. Die Probekörper waren dabei mit einem System zur Erkennung des Vereisungsprozesses und einem System zur Eisschichtenkennung einer ausgerüstet.

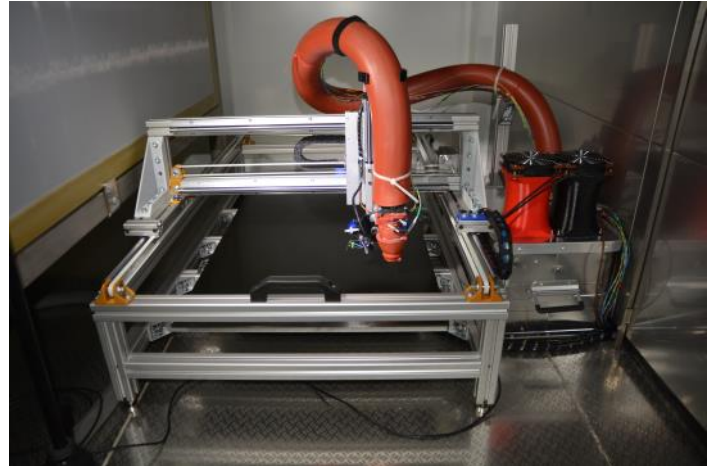
Ersteres reagiert auf die sich ändernde Wärmebilanz an der vereisenden Oberfläche. Die Änderung ist in der beim Phasenübergang des Wassers von flüssig nach fest freiwerdenden Wärme begründet. Das System zeigt sich als sehr sensitiv gegenüber dem Eisbildungsprozess und wird in weiteren Versuchen mit sehr geringen

Wasseranteilen in der Luft getestet werden, um dessen Grenzen zu ermitteln.

Das zweite System arbeitet mit geführten Ultraschallwellen, welche sich in der zu überwachenden Struktur ausbreiten. Die Ultraschallwellen interagieren dabei mit der Eisschicht und kommen in abgeschwächter Form oder zu einem anderen Zeitpunkt am Empfänger an. Die Sensitivität gegenüber einer Eisschicht steigt dabei mit deren Dicke und der Größe der vereisten Fläche. Steigt hingegen die Dicke der zu überwachenden Struktur, so senkt dies die Sensitivität. In Versuchen mit einem 1 mm dicken Flügelvorderkantenmodell wurden Eisschichten ab einer Dicke von 1 mm sicher erkannt.

Da die Bestimmung einer vorhandenen Eisschichtdicke, wegen der sich individuell ausbildenden Eisgeometrie an einem aerodynamischen Profil nicht exakt durchgeführt werden kann, werden in Zukunft Eisschichten mit einem am IAF/DLR entwickelten neuartigen Eisdrucker erzeugt. Die Eisdickenverteilung und die Eisart können hierbei deutlich homogener abgebildet werden. Somit werden Referenzmessungen auf Probeplatten möglich, die das volle Potential der Eiserkennungsmethode aufzeigen sollen. Zu jedem potentiellen Lagenaufbau einer Flügelvorderkante kann ein Ebenbild in Plattenform in den Eisdrucker eingelegt und vereist werden. Die Kombination aus minimaler Eisdicke und vereister Fläche, ab der eine Detektion möglich ist, kann damit ermittelt werden.

→
Abbildung 3: Eisdrucker in der Tiefkühlzelle mit eingelegter Platte aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (schwarz).



→
Abbildung 4: Abscheidung eines Tropfennebels aus der Düse (rot) am Beispiel des iAF-Logos.



→
Abbildung 5: Draufsicht auf den Eisdruckprozess. Hier: Druck des DLR-Logos.

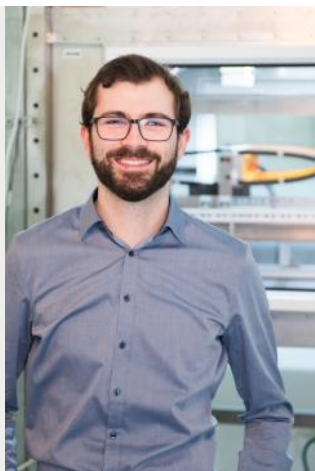


Gefördert durch



Autoren des Beitrags:

Dipl.-Ing. Matthias Endres,
M.Sc. Ozan Tamer,
Dipl.-Ing. Christian Mendig



Adaptive Folienlager für die Lagerung schnell laufender Rotoren

Folienlager sind aerodynamische Gleitlager, die sich für die Lagerung kleiner, hochtouriger Rotoren (z.B. in Verdichtern, Kühlturbinen, Kleingasturbinen, etc.) gut eignen und hier gegenüber den ölgeschmierten Gleitlagern im Vorteil sind. Durch die Verwendung von Luft oder des gasförmigen Arbeitsmediums der Turbomaschine entfallen die sonst bei öl- oder fettgeschmierten Lagern erforderlichen Dichtungen, was den nötigen Bauraum und den apparativen Aufwand verringert. Auch fällt die Reibleistung im Lager vor allem bei hohen Drehzahlen aufgrund der niedrigen Viskosität des gasförmigen Schmiermediums deutlich niedriger aus als bei entsprechend ölgeschmierten Lagern. Damit können bei Einsatz einer aerodynamischen Lagerung höhere Wirkungsgrade erreicht werden. Alternativ sind für hochtourige Anwendungen noch Lagerungen aus aktiven Magnetlagern möglich, die aber in der Regel deutlich teurer und bei sehr hohen Drehzahlen in regelungstechnischer Hinsicht schwierig zu beherrschen sind.

Merkmale eines Folienlagers sind eine adaptive Lagerschalenstruktur und eine äußere Lagerdämpfung. Durch die relativ geringe Struktursteifigkeit können thermische und elastische Verformungen und Fertigungstoleranzen im Lagerbereich weitgehend kompensiert werden, so dass sich das relativ kleine Lagerspiel nur wenig ändert.

Betriebssicherheit und dynamische Lagerstabilität

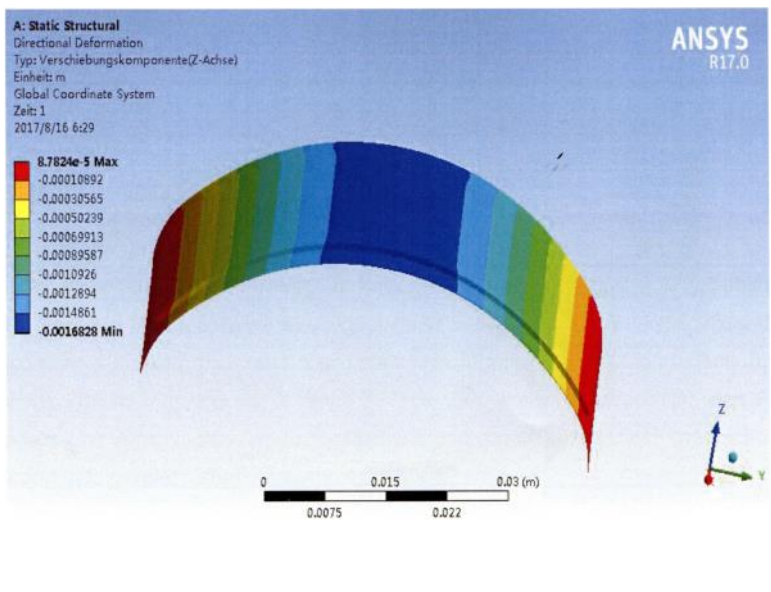
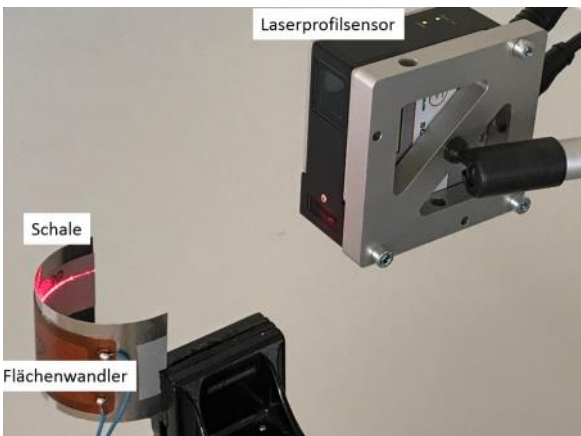
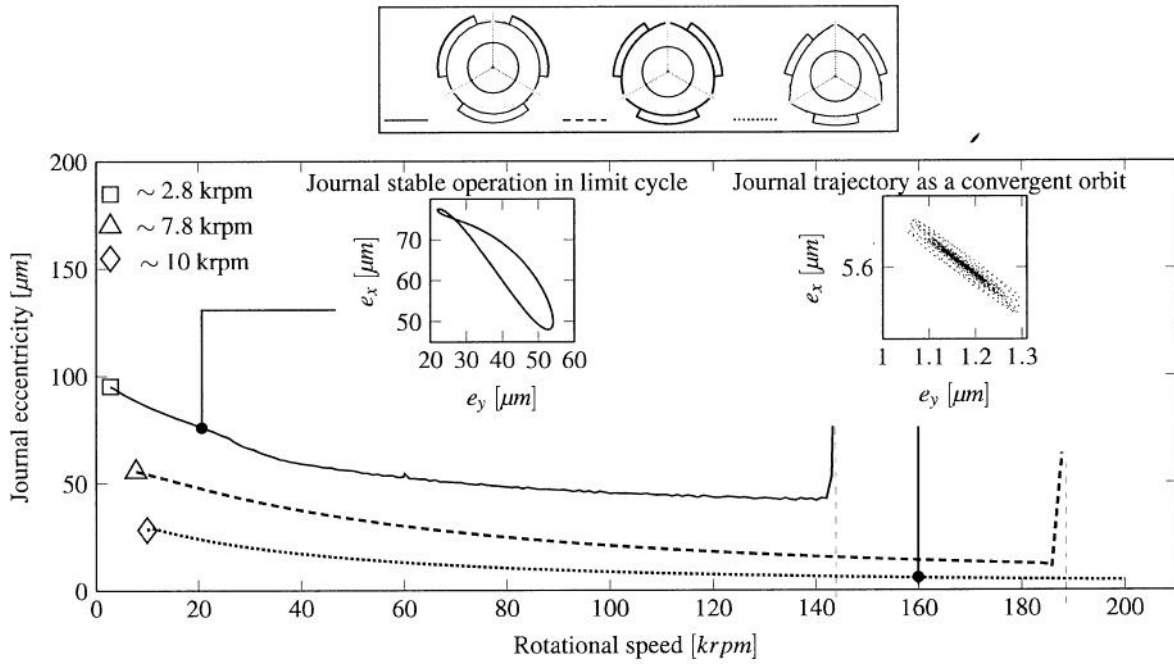
Für die Betriebssicherheit solcher aerodynamischen Rotorlagerungen ist eine niedrige Abhebedrehzahl wichtig, um den Verschleiß in den Lagern beim An- und Abfahren der Maschine auf ein Minimum zu reduzieren. Außerdem ist die dynamische Lagerstabilität mindestens bis zur Betriebsdrehzahl zu gewährleisten. Die Lagerstabilität ist gegeben, solange die Rotordrehzahl tiefer liegt als die Stabilitätsgrenze. Oberhalb der Stabilitätsgrenze kommt es zur Lagerinstabilität durch Anregung subsynchroner Rotorschwingungen mit entsprechend großen Schwingungsamplituden. Diese können schnell das vorhandene Lagerspiel erreichen und damit zu einem Lagerschaden führen. Ziel der Auslegung von Folienlagern sind daher eine möglichst niedrige Abhebedrehzahl sowie eine möglichst hohe Stabilitätsgrenze (deutlich oberhalb der höchsten Nenndrehzahl).

Für gegebene Lagergeometrie und gegebene Lagerlast hängt der Druckaufbau im gasgeschmierten Radiallager vom Schmiermedium

(Viskosität) und von der Drehzahl, sowie von den Randdrücken an den Lagerrändern ab. Für ein sogenanntes kreiszylindrisches Lager, bei dem die Krümmung der Lagerschalen derjenigen der Wellenoberfläche entspricht, stellt sich der maximale Druckaufbau ein, so dass sich das kreiszylindrische Lager durch eine relativ niedrige Abhebedrehzahl auszeichnet. Dagegen neigt das kreiszylindrische Radiallager bei hohen Drehzahlen verstärkt zu subsynchronen Schwingungen und zur Lagerinstabilität. In dieser Hinsicht ist das Radiallager mit Profilierung der Lagerschalen (Krümmung der Lagerschalen ist deutlich größer als auf der Wellenoberfläche) gegenüber dem kreiszylindrischen Lager im Vorteil, da selbst bei zentrischer Lage des Wellenzapfens im Lager die Profilierung der Lagerschalen zu einer Einspannung des Rotors zwischen den Lagerschalen führt und für Stabilität sorgt. Das profilierte Lager hat im Anfahrbereich allerdings einen merklichen kleineren Druckaufbau als das kreiszylindrische Lager und damit eine höhere Abhebedrehzahl als das kreiszylindrische Lager.

Um sowohl einen hohen Druckaufbau und ein schnelles Abheben beim Anfahren zu gewährleisten, als auch den rotordynamisch stabilen Lauf des Rotors bei hohen Drehzahlen sicher zu stellen wird als Forschungsansatz das formvariable Folienlager verfolgt, bei dem sich die Lagerschalenkontur aktiv mittels Flächenaktuatoren verändern lässt. Dieses wird in dem von der DFG geförderten Projekt „Formvariable Folienlager“ untersucht.

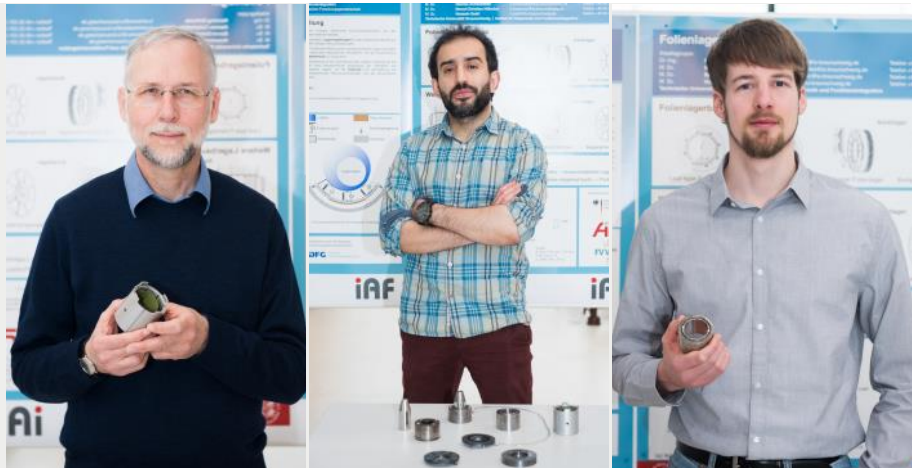
Im Rahmen eines vom BMWi finanzierten und von der FVV über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Forschungsvorhabens werden die Grundlagen für die richtige (optimierte) Auslegung von aerodynamischen Folienlagern entwickelt.



↑
 Oben: Verlauf der Zapfenexzentrizität im Bump-type Folienlager
 Unten: Messung der Folienkrümmung mittels Profilsensor (links), berechnete Folienerformung bei Aktuierung des Flächenwandlers
 gefördert durch :



Autoren des Beitrags:
 Dr. Henning Schlums, M.Sc. Hossein Sadri,
 M.Sc. Hannes Schmiedeke



Steuerbares tribologisches Verhalten zwischen zwei Körpern

Reibung stellt einen Bewegungswiderstand zwischen bewegten und ruhenden kontaktierenden Oberflächen von zahlreichen Maschinenelementen dar. Reibung ist häufig unerwünscht, denn sie verschlechtert den Wirkungsgrad von Maschinenelementen (z.B. von Gleit- und Wälzlagern, Zahnrad- und Kettengetrieben, Kolbenring/Zylinder-Paarungen), Maschinen und Anlagen und erhöht damit den Energiebedarf. Andererseits wird bei vielen technischen Anwendungen eine hohe Reibung angestrebt, z.B. in Bremsen, Kupplungen, Kegelsitzen und Pressverbindungen. Reibung ist sowohl von den geometrie- oder stoffspezifischen Eigenschaften der am Reibungsvorgang beteiligten Elemente, wie z.B. von äußeren Abmessungen, Oberflächenrauheiten, Wärmeleitfähigkeit, Härte, Streckgrenze, Dichte oder Gefüge als auch vom Belastungskollektiv (Belastung, Geschwindigkeiten, Temperatur, Bewegungsart usw.) abhängig und ist deshalb eine Systemeigenschaft. Schon wenn eine Einflussgröße des tribotechnischen Systems modifiziert wird, kann sich das Reibungsverhalten des Systems verändern.

Schmierung wird eingesetzt, um Reibung zu verringern und Verschleiß zu reduzieren oder ganz zu vermeiden. Für das Reibungsverhalten und die Tragfähigkeit von geschmierten Tribokontakten spielt neben dem Belastungskollektiv und den Schmierstoffeigenschaften vor allem die Geometrie des Schmierpaltes eine entscheidende Rolle. Bei trocken laufenden Tribokontakten sind die Werkstoffeigenschaften, das Belastungskollektiv sowie die Makro- und Mikrogeometrie der Reibfläche für das Reibungsverhalten und die sich einstellende Pressung entscheidend.

Unsere Forschung verfolgt als neuen Ansatz, die Reibung bei geschmierten und ungeschmierten Gleitlagern aktiv durch den Einsatz von aktiven Funktionswerkstoffen zu beeinflussen, und zwar primär durch Änderungen der Schmierpalt- bzw. Reibflächengeometrie im Betrieb. Gleitlager mit Reibpaarungen, deren Eigenschaften gezielt verändert werden können, eröffnen neue Anwendungsspektren in diversen Bereichen des Maschinenbaus.

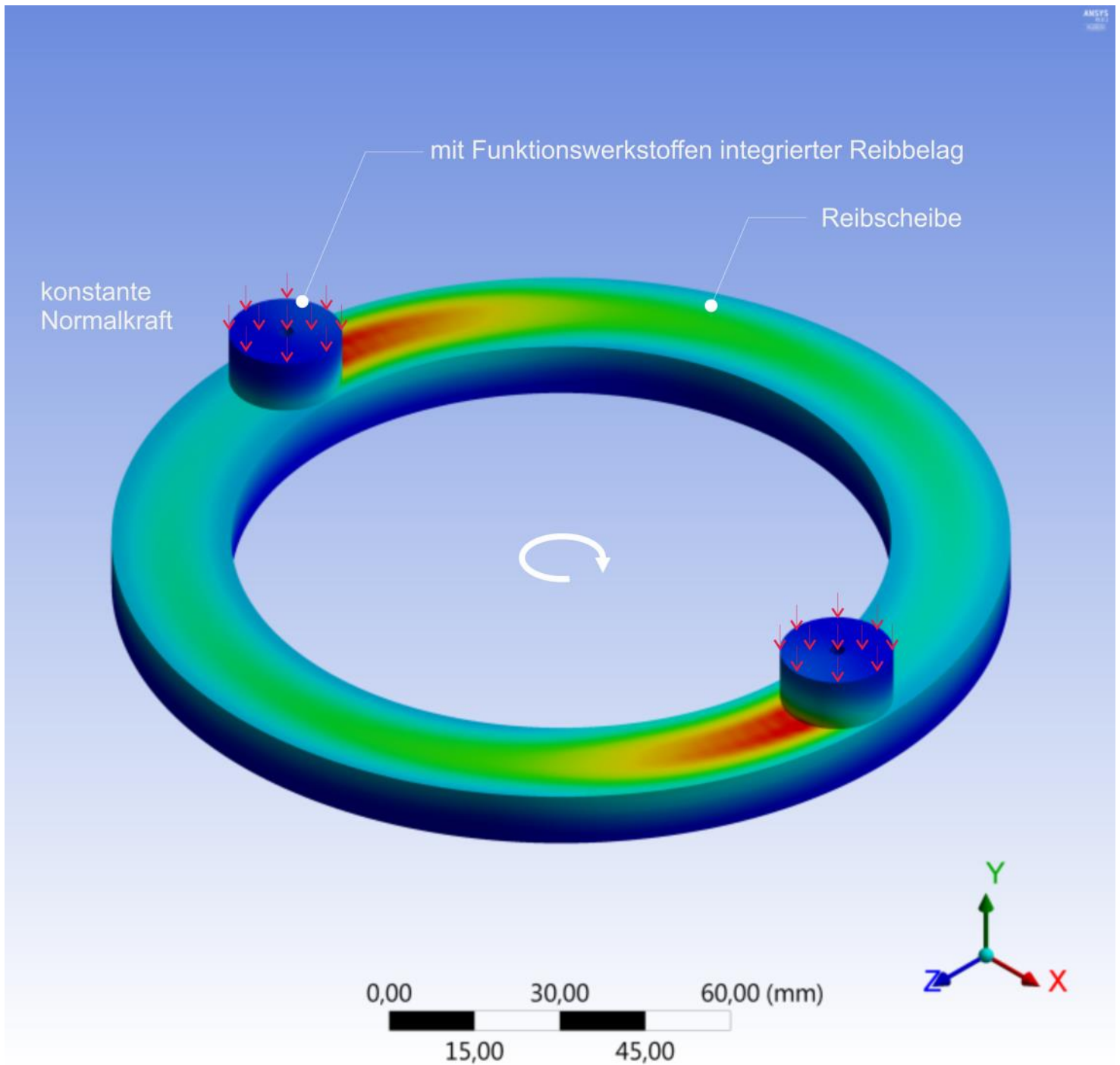
Beim geschmierten Axialgleitlager wird das tribologische Verhalten bei unterschiedlichen Betriebsparametern (hohe Drehzahl/niedrige Drehzahl, verschiedene Lasten) mit verschiedenen Spaltgeometrien untersucht, um die optimale Spaltkontur für den jeweiligen Betriebspunkt zu finden. Bei hohen Drehzahlen wird die Spaltkontur dahingehend optimiert, dass eine möglichst geringe Reibung im Lager auftritt. Bei niedriger Drehzahl hingegen wird die Spaltkontur so eingestellt, dass eine möglichst hohe Tragkraft erreicht wird, um so den Übergang von der Mischreibung zur Flüssigkeitsreibung zu möglichst geringen Drehzahlen zu verschieben.

Bei ungeschmierten Kontakten kann es bei einer konstanten Belastung mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit zu einem Abfall der Reibungszahl bzw. des Reibungsmomentes kommen. Dieser Abfall der Reibung ist in der Regel unerwünscht, da er beispielsweise bei einer Bremse zu Reibschwingungen des Gesamtsystems führen kann. Im untersuchten System (siehe Abbildung) werden verschiedene Gleitwerkstoffe einzeln oder zusammen in Kontakt gebracht, wodurch das Gesamtreibungsmoment aus der Addition der Reibungsmomente der Einzelpaarungen resultiert. Zusätzlich zum Zuschalten oder Abschalten einzelner Paarungen können die Aktorkräfte variiert werden. Dabei besteht eine Abhängigkeit zwischen den Aktorkräften, da die Summe der Aktorkräfte der Einzelpaarungen mit der äußeren Belastung im Gleichgewicht steht. Variationsparameter sind dabei die Gleitwerkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften, die Pressungen, die jeweils in der Reibfläche eingestellt werden, die Zuordnung der einzelnen Körper und die Geometrie der Körper.

Unsere Arbeit soll systematisch die Grundlagen solcher aktiver Gleitlager erforschen. Dazu sollen geeignete Mechanismen und Konzepte erarbeitet werden, die es gestatten, durch Stelleingriff den Reibkontakt derart zu beeinflussen, dass sich gewünschte tribologische Eigenschaften einstellen. Untersucht werden sollen sowohl geschmierte als auch ungeschmierte Lager.

Ausgewählte Lösungsansätze werden konstruktiv realisiert. Auf experimenteller sowie simulativer Ebene soll der Funktionsnachweis erbracht werden. Dabei werden die aktiven Tribosysteme hinsichtlich erzielbarer tribologischer Eigenschaften wie Reibung, Tragfähigkeit und Erwärmung und deren Abhängigkeiten untersucht.

Durch die Simulation der tribologischen Systeme soll ein vertieftes Verständnis der experimentell beobachteten Phänomene erreicht werden. Die zu entwickelnden Modelle werden danach verwendet, um durch gezielte Ansteuerung gewünschte Reibwerte einstellen zu können.

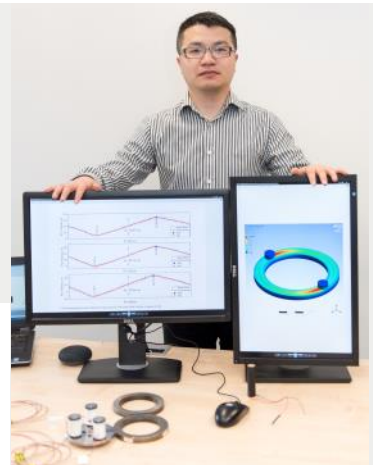


Tribologisches Verhalten und Aufteilung der Reibungswärme zwischen 2 mit Funktionswerkstoffen integrierten Reibbelägen und einer drehenden Reibscheibe unter der Wirkung einer konstanten Normalkraft

Gefördert durch

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Autor des Beitrags: M.Sc. Zhenwei Miao



Aktive Reduktion der Schalleinstrahlung in Innenräume

Akustik von Fahrgastkabinen

Lärm in der Fahrgastkabine von beispielsweise Autos oder Flugzeugen ist ein erhebliches Komfortproblem. Die Hauptquelle dieses Lärms sind schwingende Flächen der jeweiligen Außenhaut, angeregt zum Beispiel durch Unebenheiten der Fahrbahn im Auto oder Luftwirbel auf der Außenhaut beim Flugzeug. Diese schwingenden flächigen Strukturen wirken dann wie Lautsprechermembranen und strahlen Schall in den Innenraum ab.

Die Abstrahlung hoher Frequenzen lässt sich gut durch passive Methoden wie die Erhöhung von Dämpfung oder Masse unterdrücken. Für eine Minderung der Abstrahlung tiefer Frequenzen hingegen sind die erforderlichen Zusatzmassen oft nicht mehr vertretbar, insbesondere bei Leichtbauanwendungen. Hier lohnt sich die Erwägung aktiver Maßnahmen.

Neben der Wahl und Platzierung von geeigneter Aktuatorik und Sensorik besteht die Herausforderung bei der Auslegung eines aktiven Systems vor allem im Entwurf des Reglers. Hierzu wird ein geeignetes mathematisches Modell der Schallabstrahlung flächiger Strukturen benötigt. In der Fachliteratur liegen hierzu umfangreiche Erkenntnisse vor. Diese beschreiben jedoch hauptsächlich eine Energieabgabe der Struktur in das akustische Fernfeld. Auf diesen Erkenntnissen beruht auch ein Großteil der Ansätze zur aktiven Reduktion der Schallabstrahlung. Tatsächlich steht die strukturelle Vibration jedoch in Interaktion mit dem internen akustischen Medium. Es findet dabei ein ständiger Energieaustausch zwischen schwingender Struktur und schwingendem Medium im Innenraum statt.

Ordnungsreduzierte Regelung

Das dynamische Verhalten mechanischer Systeme lässt sich mit Hilfe von inneren und äußeren Kräften anhand von Differentialgleichungen darstellen. Für komplexe Strukturen entsteht ein System gekoppelter Differentialgleichungen. Ein gängiger Ansatz zur mathematischen Abbildung eines solchen Systems für die Auslegung eines Reglers ist die Beschreibung durch modale Größen. Ziel ist hierbei, das mechanische System mit Hilfe eines Satzes entkoppelter Differentialgleichungen zu beschreiben.

Für ein numerisches Modell erfolgt die Entkopplung anhand einer Eigenwertzerlegung. Das Verhalten des entkoppelten Systems wird dann als Überlagerung des Verhaltens mehrerer unabhängiger Einfreiheitsgrad-Systeme beschrieben. Die Transformation zwischen modalen und physikalischen Koordinaten erfolgt anhand der fundamentalen Schwingformen, den Eigenformen oder Moden

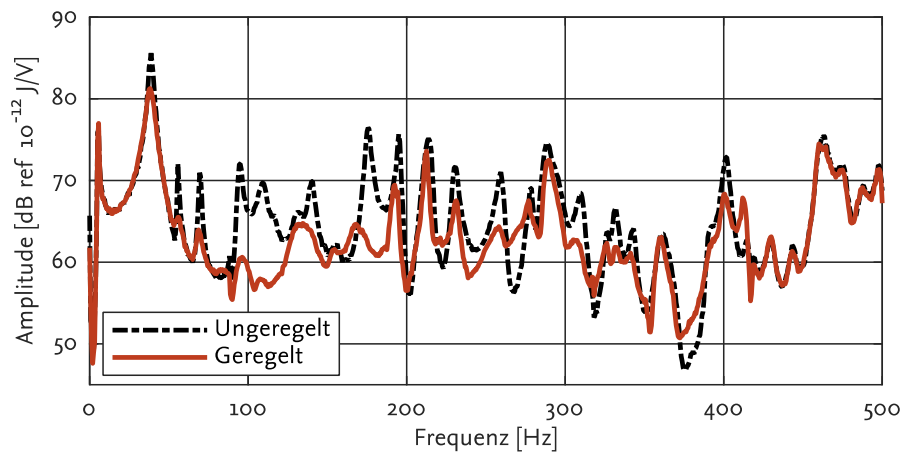
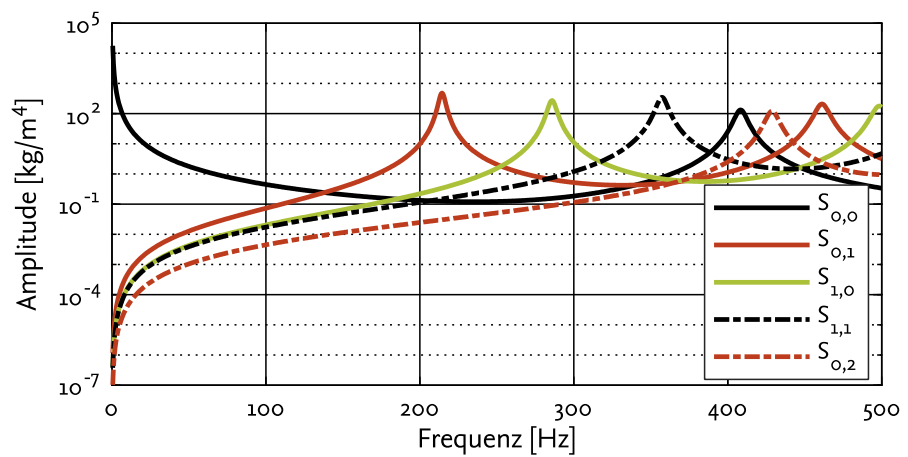
des Systems. Für reale Strukturen sind diese Moden aus Messungen zu bestimmen.

Der Vorteil der modalen Betrachtung eines Systems liegt darin, dass oft bereits wenige Sätze modaler Parameter genügen, um das betrachtete System im interessierenden Frequenzbereich ausreichend genau zu beschreiben. Für den Regler kann dann ein Modell mit erheblich reduzierter Ordnung verwendet werden.

Frequenzunabhängige Schallstrahlungseigenformen

Ein solches Vorgehen ist für die Beschreibung und Regelung von Strukturschwingungen Stand der Technik. Sollen hingegen nicht die Strukturschwingungen, sondern der abgestrahlte Schall reduziert werden, müssen auch Fluid und Koppelmechanismen betrachtet werden. Für die in der Literatur überwiegend betrachtete Abstrahlung in das akustische Fernfeld führt dies jedoch zu frequenzabhängigen Moden der Abstrahlung und somit einer für einen Regler nicht mehr handhabbaren Modellgröße.

Die zentrale Hypothese der Forschung am iAF zu diesem Thema ist, dass diese Moden für eine Abstrahlung des Schalls in einen Innenraum frequenzunabhängig sind, was eine Regelung erst ermöglicht. Diese Hypothese wird anhand einfacher Geometrien analytisch, numerisch und experimentell untersucht.



Oben Links: Strukturmessung mittels Laser-Vibrometer
 Oben Rechts: Schalldruckmessung mittels Mikrofonarray
 Mitte: Dekomposition in Schallstrahlungsmoden
 Unten: Globale Reduktion der Schalleinstrahlung

Abbildungen aus: Hesse, Christian (2016): Aktive Reduktion der Schalleinstrahlung in Kavitäten, Dissertation TU Braunschweig

Gefördert durch



Autor des Beitrags: M.Sc. Bernd-Christian Hölscher



Formvariable, druckaktuierte Zellstrukturen

Hintergrund

Formvariable Strukturen sind in der Lage, definierte geometrische Veränderungen vorzunehmen und damit ihre äußere Form unterschiedlichen Anforderungen anzupassen. Die Möglichkeit, die Form einer Struktur zu kontrollieren und somit die Wechselwirkung von Struktur und Umgebung zu beeinflussen, ermöglicht die Verbesserung bestehender kinematischer Konzepte und führt zu völlig neuen Funktionalitäten. In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze, welche von der Kombination flexibler Oberflächen mit mechanischer Aktorik bis hin zu thermomechanischen Wandlern auf Materialebene wie Formgedächtnislegierungen reichen. Die Herausforderung aller dieser Ansätze besteht in den widersprüchlichen Anforderungen nach möglichst geringen Stellkräften, aber hohen Stellwegen und der Notwendigkeit von hohen Widerständen gegen äußere Kräfte wie z.B. Manöverlasten. Ein Blick in die Botanik liefert dabei neue Impulse: Nastische Pflanzen, wie die Venusfliegenfalle (*Dionaea muscipula*) oder die Mimose (*Mimosa pudica*), sind in der Lage, schnelle und kräftige Bewegungen auszuführen, um Insekten zu fangen oder ihre Blätter bei Berührung innerhalb von Millisekunden einzuklappen. Die Bewegung beruht allein auf der Geometrie der Pflanzenzellen, der Elastizität ihrer Zellwände sowie der Änderung des Turgors, d.h. des Drucks des Zellsafts auf die Zellwand. Damit sind für die Bewegung weder Muskeln noch diskrete Gelenke erforderlich.

Forschungsansatz

Die druckaktuierten formvariablen Zellstrukturen (engl.: Pressurized Actuated Cellular Structures, kurz PACS) stellen die technische Umsetzung der Pflanzenbewegung dar. Durch das Wirkprinzip Steifigkeit durch Druck wird der oben genannte Widerspruch von Stellkräften zu äußeren Lasten aufgehoben, was eine hohe Energieeffizienz ermöglicht. Die Kombination von Funktionsoberfläche und Aktorik führt zu einer Reduzierung der Bauteilkomplexität und Gewichtsparnis gegenüber herkömmlichen Systemen. Ein weiteres herausragendes Merkmal ist die nahezu unbegrenzte Formenvielfalt und vor allem die Möglichkeit, sehr große Verformungen zu realisieren. Die theoretischen Grundlagen basieren dabei auf polygonalen Zellstrukturen ungleicher Seitenlängen. Die Gesamtverformung ergibt sich dabei als Kombination der Verformungen der Einzelzellen.

Technische Umsetzung

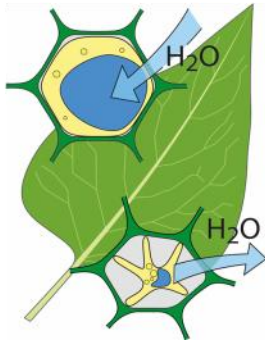
Zur Realisierung des Konzeptes ist aufgrund der multiplen Abhängigkeiten der einzelnen Prozessschritte voneinander eine ganzheitliche Betrachtungsweise erforderlich.

Dazu wird zunächst die Formfindung für die spezifische Anwendung auf der Basis eines zweidimensionalen Fachwerkmodells durchgeführt. Dies geschieht durch die Optimierung der Zellseitenlängen. Auf Grundlage der daraus resultierenden formoptimierten Fachwerkgeometrie erfolgt die Simulation und Charakterisierung des druck- und lastabhängigen Verhaltens der Struktur. Anschließend wird eine zweidimensionale Querschnittsgeometrie erstellt. Diese soll die zugrunde liegenden Fachwerkmodellannahmen in ein detailliertes Konstruktionsmodell überführen und dient außerdem der Kontrolle und Minimierung der strukturellen Beanspruchungen, speziell in den Festkörpergelenken. Diese haben als das am stärksten belastete Bauteil den größten Einfluss auf die Verformungsgenauigkeit und Belastbarkeit der Struktur.

Auch das Dichtungs- und Bedruckungssystem, besonders der axiale druckdichte Verschluss der Zellstruktur, die Gestaltung des Fluidflusses und das Fertigungs- und Montagekonzept wirken sich intensiv auf die Gesamteigenschaften von PACS aus.

Aktuelle Forschung

Unsere Forschung an den PACS wird vor allem im Rahmen eines Projektes in Zusammenarbeit mit der TU Dresden und dem DLR Braunschweig vorangetrieben. Die wichtigsten Themen sind dabei die Entwicklung von FVK-Fertigungsmethoden für PACS sowie die Charakterisierung und Entwicklung neuer Optimierungsmethoden für Festkörpergelenke aus FVK.

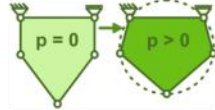


PACS – Nachbildung

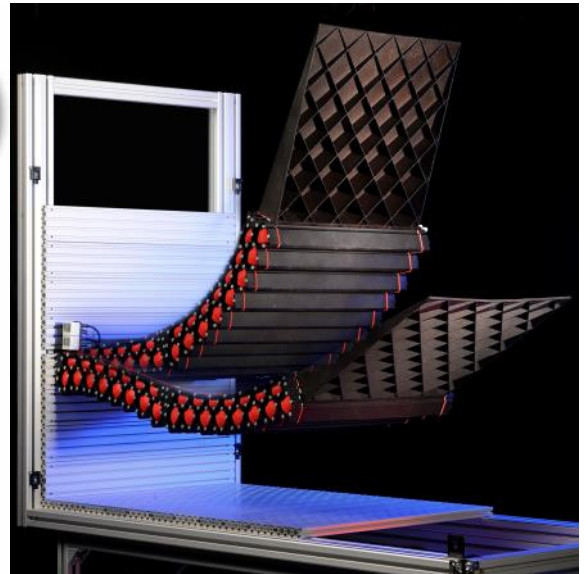
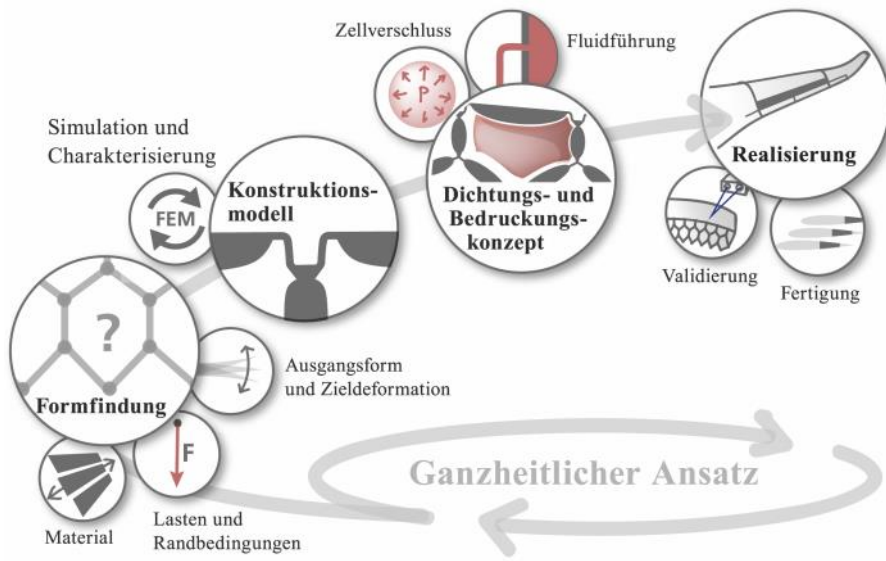
Formzustand 1:
„Offenes Fangblatt“

Formzustand 2:
„Geschlossenes Fangblatt“

Funktions-
prinzip
Einzelzelle:



Druckreservoir
Zellreihe 1 & 2



Oben links: Venusfliegenfalle (*Dionaea muscipula*) [nach Webb, Pagitz]

Oben rechts: Nachbildung des biologischen Vorbilds durch PACS

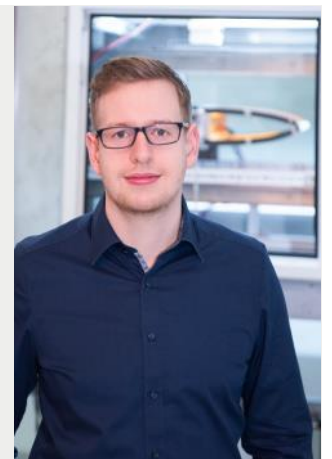
Unten links: Ganzheitlicher Entwicklungsansatz

Unten rechts: Zweireihiger PACS-Demonstrator

Gefördert durch



Autoren des Beitrags:
M.Eng. Johannes Boblenz, M.Sc. Patrick Meyer



Raumfahrtforschung am iAF: DLR Space Structures Lab

In der Raumfahrt ist es von grundlegender Bedeutung Masse und Volumen, vor allem beim Start von der Erde aus oder zum Zurücklegen sehr großer Entfernungen, einzusparen. Um dies zu erreichen werden für zukünftige Missionen fortschrittliche, sehr leichte und entfaltbare Raumfahrzeuge und -strukturen entwickelt.

Fortschrittliche Raumfahrtanwendungen

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelt solche fortschrittlichen und ultraleichten Raumfahrtssysteme. Speziell das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR (DLR-FA) entwickelt, baut und testet aktuell im Rahmen unterschiedlicher Forschungsprojekte ultraleichte und entfaltbare Weltraumstrukturen für Satelliten und Technologiedemonstratoren. Diese Projekte adressieren dabei Anwendungen wie: Bremssegel (De-Orbit Sails) zur gezielten Absenkung und Wiedereintritt von abgeschalteten Satelliten; entfaltbare photovoltaische Anlagen zur Energiegewinnung im All; Sonnensegel (Solar Sails) bis zu 100 m x 100 m Fläche, die einen treibstofflosen Antrieb durch Sonnenlicht ermöglichen; sowie ultraleichte Membran-Antennen oder Instrumentenhalter. Alle Anwendungen nutzen extrem effiziente, aufrollbare und dabei ultraleichte CFK-Masten, sogenannte Booms, als Hauptstrukturkomponenten. Diese haben die Aufgabe die funktionalen Membranen, wie Segel oder Substratflächen, aufzuspannen. Je nach Last können die verwendeten Masten zwischen 24 g/m und 67 g/m wiegen und ein Vielfaches ihres Gewichts tragen. Ihre Länge kann derzeit zwischen 2 m und 14 m betragen und in Zukunft weitaus größere Längen aufweisen. Zum Entfalten der aufrollbaren Masten werden zudem motorisierte Entfaltungsmechanismen entwickelt und zusammen mit den Masten getestet und qualifiziert.

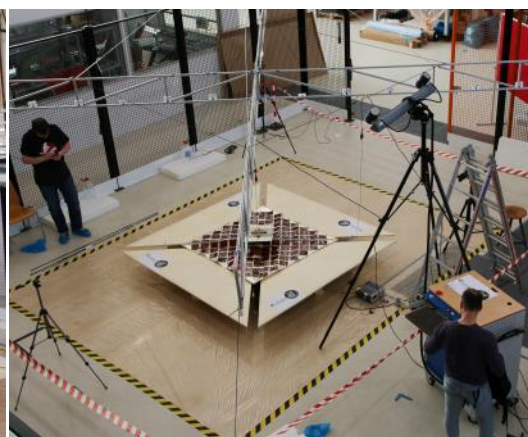
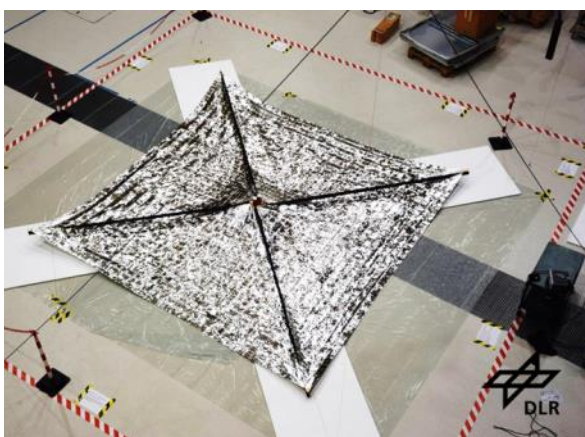
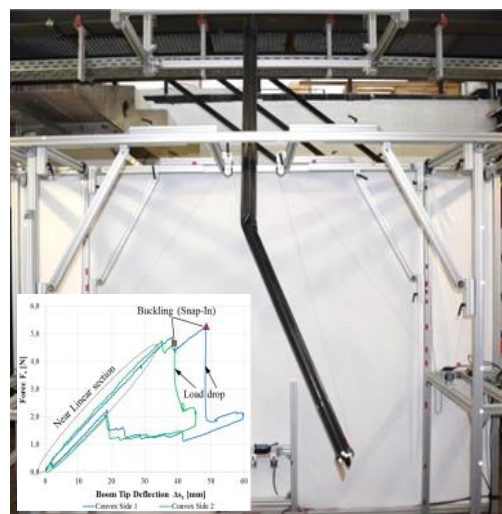
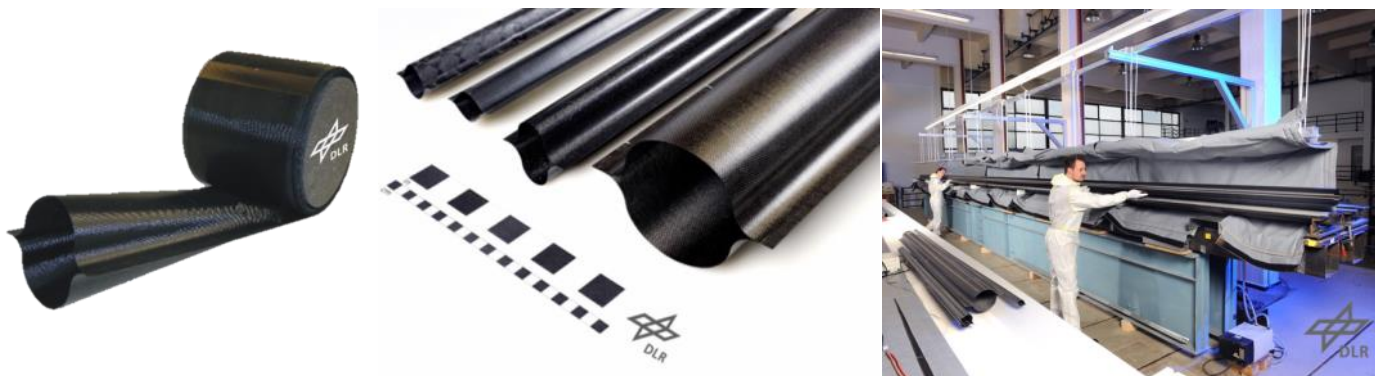
Raumfahrtforschung am iAF

In den derzeit laufenden Projekten entwickelt das DLR-FA dabei Gesamtstrukturkonzepte, passende entfaltbare und aufrollbare Schalenmasten (Booms) aus Faserverbundkunststoffen und die dazugehörigen Entfaltungsmechanismen. Fertigung und Versuche dieser fortschrittlichen Hardware finden dabei am *DLR Space Structures Lab @ Uni*, in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Adaptronik und Funktionsintegration – iAF der TU Braunschweig, statt. Das iAF unterstützt die Forschung des DLR hierbei im Rahmen der Initiative *DLR @ Uni*, indem es die benötigte Fläche und Infrastruktur, sowie seine Expertise zu Adaptronik und Messtechnik zur Verfügung stellt. Ein weiterer essentieller Bestandteil dieser Initiative ist der Austausch zwischen Forschung und Lehre. Hierbei werden vor allem studentische Arbeiten von Studierenden der TU Braun-

schweig durch DLR Mitarbeiter betreut, oder die Fertigungs- und Versuchseinrichtungen des DLR als praktischer Rahmen erfolgreich in die Lehre des iAF, z.B. in der Vorlesung „Forschungsseminar Adaptronik und Funktionsintegration“, eingebunden.

Praxis und Forschung am *DLR Space Structures Lab @ Uni*

Im *DLR Space Structures Lab @ Uni* wird als ein Arbeitsschwerpunkt die Fertigung der aufrollbaren CFK-Booms in diversen Querschnittsgrößen und Längen, für verschiedene Raumfahrtanwendungen durchgeführt. Die Abbildungen zeigen die aufrollbaren CFK-Booms verschiedener Größen und deren Fertigung. Ein weiterer Schwerpunkt ist das Testen von Booms zur mechanischen Charakterisierung mit realistischen und idealen Anbindungen zum Raumfahrzeug. Dabei wird die Lasteinleitung der funktionellen Membran im Boom-Prüfstand simuliert. Dieser reicht von der Hallendecke bis in die untere Etage, sodass Boomlängen von bis zu 13,5 m getestet werden können. Dabei hängt der Boom vertikal im Boom-Prüfstand, wobei die herunterhängende Boomspitze unter einem Angriffswinkel ausgelenkt wird. Gleichzeitig werden Kräfte und Auslenkungen sowie Rotationen der Boomspitze gemessen und hiermit das Knick-/Beulverhalten bestimmt. Ein dritter Arbeitsschwerpunkt sind Funktionstests von Entfaltungsmechanismen in Verbindung mit Booms und Membranen als System in Bodenversuchen. Hierbei werden ebenfalls angreifende Kräfte, Auslenkungen, Rotationen sowie Momente oder Steuerspannungen von Motoren gemessen und somit das Zusammenspiel aller Subsysteme getestet und analysiert. Dabei wurden und werden in DLR-internen, sowie in Projekten des DLR mit anderen Agenturen wie der ESA, NASA oder Industriepartnern entfaltbare Booms und Entfaltungsmechanismen als Struktursysteme für verschiedenste, ultra-leichte Raumfahrtanwendungen entwickelt, gebaut und getestet. Die Abbildungen zeigen Entfaltungsversuche von Sub- und kompletten Systemen für entfaltbare Raumfahrtanwendungen.



Oben: Aufrollbare CFK-Booms (*links*), verschiedener Größen (*Mitte*), und deren Fertigung für Ultra-leichte Raumfahrtanwendungen (*rechts*)

Mitte: Mechanische Charakterisierung von entfaltbaren CFK-Masten mit bis zu 13,5 m Länge, im Boom-Prüfstand des DLR, am iAF

Unten: Entfaltungsversuche von Sub- und kompletten Systemen für entfaltbare Raumfahrtanwendungen (*links*: Bodenentfaltung des 4 m x 4 m Bremssegels DeorbitSail; *rechts*: Bodenentfaltung des Photovoltaik-Segels GoSolar)

Autoren des Beitrags:

Dipl.-Ing. Martin E. Zander (Foto), Dipl.-Ing. Martin Hillebrandt,
Dr.-Ing. Marco Straubel, Dipl.-Ing. Sebastian Meyer, M.Sc. Martin Richter



Neues Lehrbuch: Adaptronik

Prinzipie - Funktionswerkstoffe - Funktionselemente - Zielfelder mit Forschungsbeispielen

[Interdisziplinäre und systematische Darstellung der Adaptronik](#)

[Integriert viele Beispiele aus der aktuellen Forschung](#)

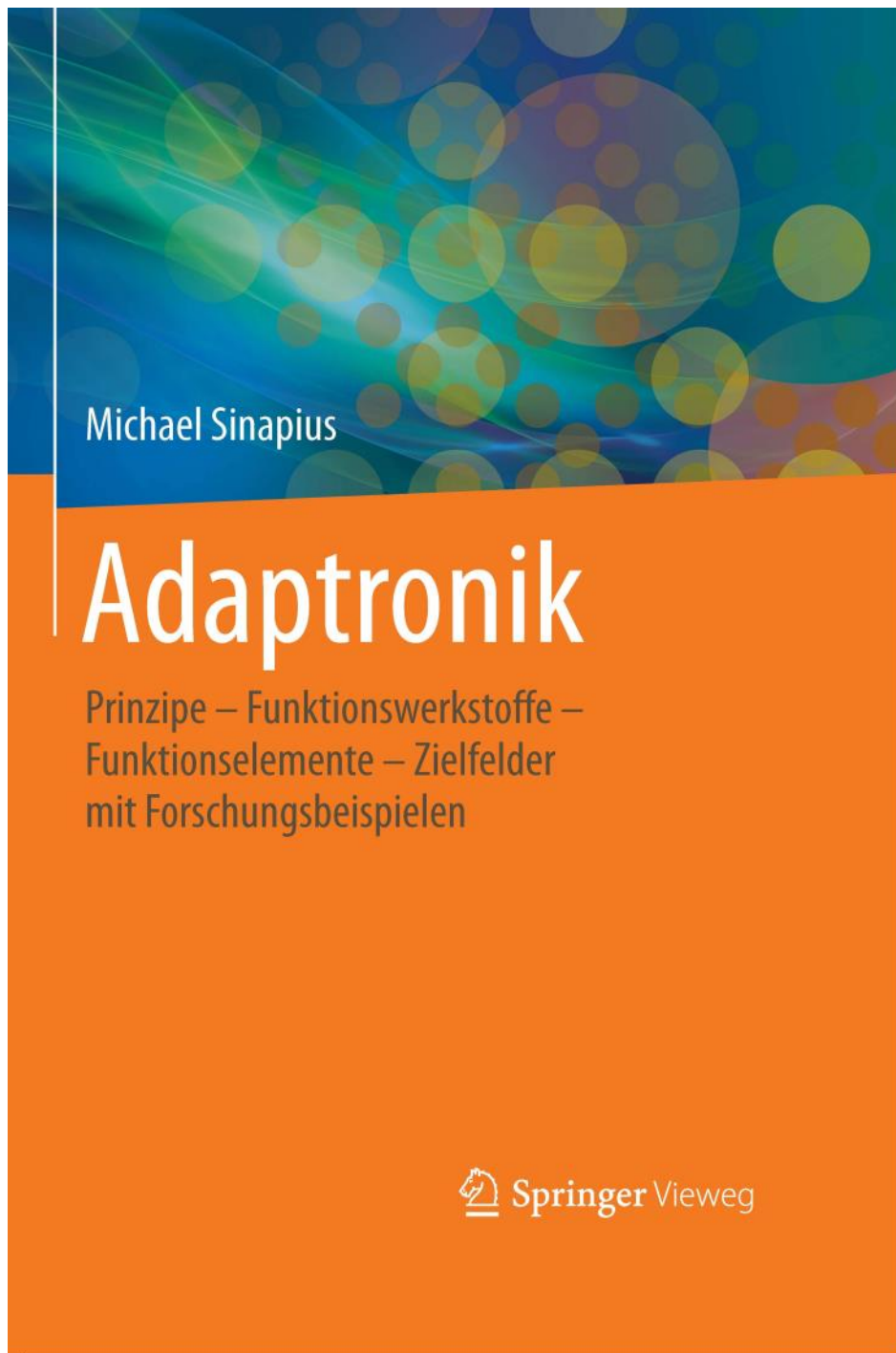
Seit den achtziger Jahren forschen Wissenschaftler an adaptiven Strukturen für Materialien, für multifunktionale Elemente oder sogar für vollständige Systeme. Dabei ist die Adaptronik (englisch: smart materials, smart structures, smart systems) ein Fachgebiet von ausgeprägter Interdisziplinarität. Das Buch bietet daher eine interdisziplinäre Betrachtung von adaptronischen Systemen, Werkstoffen und Funktionselementen und ihren Anwendungen. Der Lehrstoff integriert verschiedene ingenieurwissenschaftliche Disziplinen, von Elektro- und Informationstechnik über Fertigungs- und Regelungstechnik bis zu Werkstofftechnik und Strukturmechanik – um nur einige der relevanten Fachgebiete zu nennen. Ausgehend von den grundlegenden Prinzipien und Varianten adaptronischer Systeme und Funktionswerkstoffe werden in dem Lehrbuch die unterschiedlichen Bauweisen von Funktionselementen erläutert.

Darauf aufbauend lernen Leser, wie diese Kenntnisse auf die aktive Formkontrolle, die aktive Vibrationskontrolle und die aktive Vibroakustik anzuwenden sind. Für jedes dieser Themenfelder stellt der Autor aktuelle Beispiele aus der Forschung vor, diskutiert Forschungsergebnisse und zukünftige Forschungsfragen. Jedes der neun Kapitel schließt mit Hinweisen auf weiterführende Literatur. Ein Verzeichnis der verwendeten mathematischen Symbole und ein Stichwortverzeichnis erleichtern Lesern das Lernen. Das Buch wendet sich an Masterstudierende in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen wie Maschinenbau, Luft- und Raumfahrttechnik,

Mechatronik, Kraftfahrzeugtechnik sowie verwandte Studiengänge. Praktikern in der Industrie, die sich in das Gebiet der Adaptronik einarbeiten wollen, bietet das Buch auf 474 Seiten einen umfassenden Überblick und es dient zugleich als ein zuverlässiges Nachschlagewerk.

Aus dem Inhaltsverzeichnis:

- 1 Einführung
- 2 Prinzipie der Adaptronik
- 3 Funktionswerkstoffe
- 4 Adaptronische Funktionselemente
- 5 Aktive Formkontrolle
- 6 Aktive Vibrationskontrolle
- 7 Regelung adaptiver Strukturen
- 8 Aktive Schallbeeinflussung
- 9 Integrierte Bauteilüberwachung



Neues Lehrbuch zur Adaptronik im Springer Verlag
Erscheinungstermin: 10. Juli 2018



Promotionen am iAF 2017

Dr.-Ing. Veatriki Papantoni

Towards active structural psychoacoustic control

Die Dissertation befasst sich mit der Reduktion der Schallabstrahlung schwingender Strukturen hinsichtlich psychoakustischer Größen. Psychoakustische Größen bieten eine bessere Darstellung der subjektiven Empfindung von Schall im Vergleich zu physikalischen Schallgrößen wie die Schallleistung. Die Dissertation stellt heraus, dass die Erweiterung aktiver Systeme zur Schallbeeinflussung durch eine Aktuatorplatzierungsmethodik nach psychoakustischen Kriterien die gezielte Beeinflussung psychoakustischer Größen erlaubt.

Dr.-Ing. Thomas Haase:

Optimale Platzierung von Sensorik und Aktuatorik für aktive Steuerungssysteme

Aktive Steuerungssysteme werden dazu verwendet Vibrationen und Lärm zu reduzieren. Ein wesentlicher Einflussfaktor der Leistungsfähigkeit ist die Platzierung der Sensoren und Aktuatoren. Bisherige Untersuchungen vernachlässigen die Randbedingungen einer Steuerung, wie z.B. die Kausalitätsbedingung, die Filtergewichte und die Signalverarbeitungslaufzeiten, was in vielen Fällen zu einer großen Diskrepanz von Simulation und Experiment führt. Die Dissertation zeigt, dass die Steuerungsrandbedingungen einen Einfluss auf die Aktuatorplatzierung haben und somit die vorgestellte Gesamtsystemmodellierung zur Auslegung und Optimierung aktiver Steuerungssysteme geeignet ist.

Dr.-Ing. Thomas Weser:

Steigerung der faserverparallelen Druckfestigkeit pultrudierter Profile

Durch ihre herausragenden gewichtsspezifischen Eigenschaften, wie Festigkeit und Steifigkeit haben Faserverbundkunststoffe (FVK) ein erhebliches Potential für den Einsatz in Fahrzeugkonstruktionen. Unter Druckbelastung versagen FVK jedoch katastrophal. Dadurch sind sie für den Einsatz als sicherheitsrelevante Bauteile nicht geeignet. Eine Möglichkeit zur Vermeidung katastrophalen Bauteilversagens ist die Einbringung einer gezielten Materialschwächung, die ein sukzessives und damit reproduzierbares Versagenverhalten initiiert. Die in der Dissertation untersuchten neuartigen Profile weisen eine dreifach höhere Druckfestigkeit bei reproduzierbarem Versagen auf.

Dr.-Ing. Matthias Grote

Das zellulare Formwerkzeug

Der Kerngedanke des zellularen Formwerkzeugs besteht darin, die im Fertigungsprozess auftretenden Anforderungen und auch einzelne Produktionsschritte dezentralisiert in einer Vielzahl gleichförmiger Werkzeugelemente zu adressieren. Die Ausformung des Bauteils erfolgt nicht durch ein großes, komplexes Formwerkzeug, sondern durch das Zusammenspiel einer Vielzahl einzelner Formwerkzeuge. Hierbei können sich analog zu biologischen Zellen oder auch zu Superorganismen über Ähnlichkeiten und Spezialisierungen definierte Elementfamilien ausbilden.



Dr.-Ing. Papantoni Dr.-Ing. Haase

Dr.-Ing. Weser Dr.-Ing. Grote

Autoren des Beitrags:

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius,



Promotionen am iAF 2017

Dr.-Ing. Regina Khakimova

Ply topology based design concept for composite truncated cones manufactured by tape laying

Dünnwandige Verbundkegel sind ein elementar in der Luft- und besonders der Raumfahrt. Ihre Herstellung ist aufgrund des sich entlang der Höhe der Schale ändernden Radius herausfordernd. Im Rahmen der Dissertation wird eine Entwurfsmethode für konische Kompositeschalen entwickelt und validiert, welche die Fertigungseffekte der automatisierten Faserablage berücksichtigt. Dafür werden spezielle „Ply-pieces“ eingeführt, um die Qualität bezüglich der Faserwinkelabweichung mit verschiedenen Auswerteparametern zu beurteilen. In der Dimensionierung wird die Imperfektionsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Faserwinkel berücksichtigt. Die entwickelte Entwurfsmethode wird mittels Test-Strukturen validiert und die Vorteile und Grenzen diskutiert.

Dr.-Ing. Daniel Stefaniak::

Improving Residual Strength of Unidirectionally Reinforced Plastic Laminates by Metal Layering

Bei Faserverbundwerkstoffen erfolgt die Anpassung der Materialeigenschaften mit Hilfe der gezielten Ausrichtung der Fasern in Hauptlastrichtung. Bei einachsiger Belastung wäre eine solche Ausrichtung zwar wünschenswert, erhöht jedoch die Empfindlichkeit des Laminats gegenüber Schäden drastisch. Für einachsige Lastfälle schlägt die Dissertation als neues Materialsystem UD-CFK-Stahl laminate vor. Die Laminatschichten bestehen aus einem Schichtaufbau von CFK und Stahlfolien. Die Dissertation zeigt theoretisch und experimentell, dass bei Verwendung von weniger als 12% Stahl eine höhere spezifische Steifigkeit als mit der CFK-Referenz erreicht werden kann.

Dr.-Ing. Björn Timo Kletz:

Aktive Schwingungsberuhigung mit reflektierenden und isolierenden Verbindungselementen in mehrfach angeregten Strukturen

Die Dissertation stellt neuartige IC²-Regler und aktive Verbindungselemente vor, die kombiniert Systemeigenschaften realisieren, die bisher als unvereinbar galten. Zum Schutze eines empfindlichen Bauteils vor Schwingungen sind damit Systemeinstellungen in der aktiven Vibrationskontrolle erreichbar, bei denen eine Struktur gleichzeitig sehr weich als auch sehr steif gelagert wirkt.

Dr.-Ing. Andreas Henneberg

Prinzipien der automatisierten Ablage für unidirektionale, konsolidierte Kohlenstofffaserbänder

Die Dissertation stellt ein neues Fertigungskonzept vor, das auf der Verarbeitung unidirektionaler und bereits konsolidierter Kohlenstofffaserbänder beruht. Sie untersucht die Prinzipien des automatisierten Laminiertens der ausgehärteten Bänder. Dazu gehören Grundsatzbetrachtungen ihrer Führung, des Schneidens, des Kompaktierens und schließlich des Positionierens. Für die Verklebung der konsolidierten Bänder werden unterschiedliche Klebstoffsysteme und Oberflächenvorbereitungen verglichen und Ergebnisse der mechanischen Prüfung unterschiedlich verklebter Proben vorgestellt.



Dr.-Ing. Khakimova

Dr.-Ing. Kletz

Dr.-Ing. Stefaniak

Dr.-Ing. Henneberg

Autoren des Beitrags:

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius,



Promotionen am iAF 2017

Dr. Ing. Arne Hindersmann

Beitrag zur Simulation und Verbesserung der Vakuum-differenzdruckinfusion

Die Infusion von flächigen Faserverbundbauteilen mit Harz kann durch nicht vollständige Durchtränkung wie auch durch Lufteinschlüsse misslingen. Infusionskanäle müssen darum geeignet auf dem Bauteil platziert werden. Die Vakuumdifferenzdruck-Infusion bietet die Möglichkeit, Infusionskanäle auf einem Bauteil oberhalb der Vakuumfolie anzuordnen, wodurch sie einerseits wiederverwendbar werden. Andererseits kann mittels gezielter Differenzdrucksteuerung die erforderliche Permeabilität gesteuert und ein bleibender Abdruck der Kanäle auf dem Bauteil vermieden werden. Die Dissertation stellt dafür die erforderlichen Grundlagen für die Dimensionierung der Kanalgeometrie wie auch für die geeignete Wahl des Prozessfensters bereit.

Dr.-Ing. Lennart Weiß

Initial Design of Crashworthy Composite Structures

Die Dimensionierung eines Flugzeugrumpfs erfolgt bislang zunächst statisch und anschließend wird die Crashlast-Tragfähigkeit betrachtet. Dieses sequentielle Vorgehen erlaubt keine optimale Auslegung. Es liegt ein Zielkonflikt vor: die Statik zielt auf geringe, Crash dagegen auf hohe Verformungsfähigkeit. Die Dissertation stellt eine evolutionären Mehrzieloptimierung zur topologischen Optimierung der Struktur hinsichtlich maximaler Aufnahmefähigkeit von Energie und statischem Tragverhalten vor. Anschließend prüfte er am Beispiel eines Spantes, ob sich die charakteristischen Antworten von Crash-absorbierenden Elementen durch eine geeignete Dimensionierung im Vorentwurf erzeugen lassen.

Dr.-Ing. Johannes Rehbein

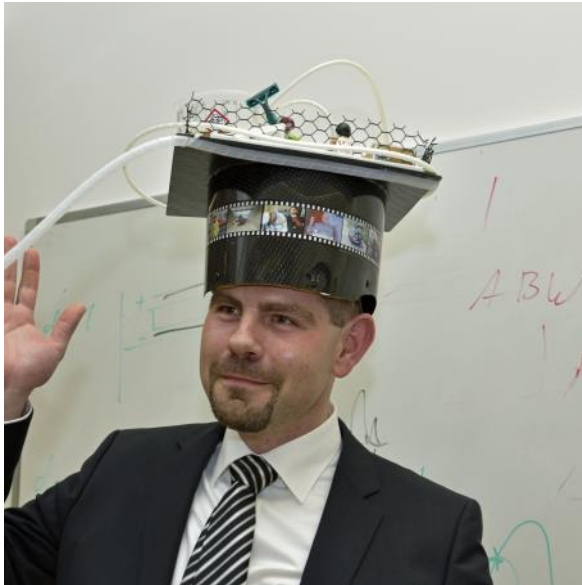
Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit von NCF-verstärkten CFK für eine höhere Schadensresistenz gegenüber Blitzschlag

Die elektrische Leitfähigkeit von Faserverbunden ist insbesondere in Dickenrichtung durch das die Fasern umgebende Harz sehr gering. Für den Blitzschutz sind daher zusätzliche metallische Netze auf der Außenseite eines Flugzeugrumpfes aus CFK aufgebracht. Um das so verursachte Mehrgewicht zu reduzieren, untersucht die Dissertation Maßnahmen, wie die Leitfähigkeit von CFK-Strukturen in Dickenrichtung erhöht werden kann. Er untersuchte hierfür umfassend die Nutzung der zur Fixierung der zunächst trockenen NCF-Einzellagen des CFKs verwendeten Nähfäden, indem er sie metallisierte. Herr Rehbein stellt eine signifikante Verbesserung feststellen durch die Art der Metallisierung und der Vernäherung der Einzellagen fest.

Dr.-Ing. Niko Liebers

Ultraschallsensorgeführte Infusions- und Aushärteprozesse für Faserverbundkunststoffe

Die Herstellung von Faserverbundbauteilen in Infusionsverfahren birgt viele Unsicherheiten: Kommt das Harz überall im Bauteil an? Kommt es durch lokales Voreilen der Harzfront zu Lufteinschlüssen? Wann beginnt das Harz zu gelieren? Welche Bauteildicke resultiert bei offenen Formwerkzeugen? Ultraschallsensoren können mittels Durchschallung des Bauteils Fließfront und Vernetzungsgrad des infundierten Harzes messen. Allerdings sind die Impedanzunterschiede sehr groß und damit die Antwortsignale sehr gering, was den Einsatz kommerzieller Sensoren erschwert. Die Dissertation untersucht den Einsatzmöglichkeiten von Piezosensoren, die direkt am Formwerkzeug angebracht sind, im Durchschallungs- wie im Impuls-Echo-Verfahren. Es gelingt, eine Korrelation von Schallaufzeiten und Vernetzungsgrad des Harzes und eine Fließfrontkontrolle im Durchschallungsverfahren zu validieren.



Dr.-Ing. Hindersmann

Dr.-Ing. Weiß

Dr.-Ing. Rehbein

Dr.-Ing. Niko Liebers

Autor des Beitrags:

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann



Lehrveranstaltungen des iAF für das Wintersemester 2018/19

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann

Adaptiver Leichtbau

Masterstudium

Die Studierenden erwerben Kenntnis der Anwendungsmöglichkeiten von Funktionswerkstoffen im adaptiven Leichtbau. Sie sind in der Lage, einfache direkte und Anwendungen in Stabtragwerken selbst zu dimensionieren und den Energiebedarf der Adaption zu bestimmen. Die Studierenden vertiefen ihre Kenntnisse auf dem Gebiet der Leichtbaustatik und der Bestimmung der Eigenschaften von anisotropen Strukturen mit Integration von adaptiven Elementen.

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Aktive Vibrationskontrolle

Masterstudium

Die Studierenden lernen wichtige Schwingungsphänomene im Maschinenbau und Methoden der aktiven Vibrationskontrolle kennen. Dabei spielen Funktionswerkstoffe und ihre strukturintegrierten Sensoren und Aktoren – ganz nach dem Vorbild der Natur als Nerven und Muskeln - eine wesentliche Rolle.

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Aktive Vibroakustik

Masterstudium

Die Studierenden lernen wichtige Grundlagen der Vibroakustik, also schallabstrahender Bauteile im Maschinenbau und Methoden der aktiven Vibroakustik kennen. Dabei spielen Funktionswerkstoffe und strukturintegrierte Sensoren und Aktoren eine wesentliche Rolle.

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Faserverbundfertigung

Masterstudium

Das Modul Faserverbundfertigung findet praxisnah im Fertigungslabor des Instituts für Adaptronik und Funktionsintegration statt. Die Studierenden trainieren anhand des interdisziplinären Forschungsgebietes Funktionsintegration im Leichtbau interdisziplinäres Denken. Funktionsintegration im Leichtbau verknüpft werkstoffwissenschaftliche mit fertigungsrelevanten Fähigkeiten.

Dr.-Ing. Henning Schlums

Rotordynamik

Masterstudium

Die Studierenden sind in der Lage wälz- und gleitgelagerte Rotoren aus dem Maschinenbau oder der Antriebstechnik anhand geeigneter Modelle in rotordynamischer Hinsicht betriebssicher auszulegen sowie die Ursachen konkreter rotordynamischer Probleme zu erkennen und konstruktiv zu beseitigen.

Dr.-Ing. Naser Al Natsheh

Simulation adaptronischer Systeme mit MATLAB/Simulink (Masterstudium)

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Technikbewertung

Masterstudium

Die Studierenden in der Lage werden befähigt, selbstständig und sicher mit dem Programm MATLAB/SIMULINK umzugehen und damit einfache Aufgaben aus den Bereichen der Adaptronik, der Strukturodynamik, der Signalverarbeitung und der Regelungstechnik zu bearbeiten. Die Lehrveranstaltung wird auch im SS angeboten.

Die interaktive Lehrveranstaltung weckt bei den Studierenden als spätere verantwortliche Entwickler ein Verständnis für Begriffe, Methoden und Werte für Bewertungen technischer Systeme. Sie bezieht nicht nur die Werte Funktionsfähigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ein, sondern auch Gesundheit, Umweltqualität, Persönlichkeitsentfaltung und Gesellschaftsqualität. Ein Überblick zu Methoden und Institutionen erleichtert die Organisation von Bewertungen.

Dr.-Ing. Henning Schlums

Writing / B-Writing

Masterstudium / Bachelorstudium

Kernbestandteile des Studiums sind das Schreiben von wissenschaftlichen Arbeiten und das Halten von Vorträgen. Die Kurse vermitteln, wie gute wissenschaftliche Texte verfasst sowie Vorträge erstellt und gehalten werden. Die Studierenden lernen die unterschiedlichen Anforderungen an die verschiedenen wissenschaftlichen Textarten und die Herangehensweise zu deren Erstellung kennen.



Oben: Lernen im Adaptroniklabor

Untern: Lernen im Rechnerlabor

Autor des Beitrags:
Dr.-Ing. Naser Al Natsheh



Lehrveranstaltungen des iAF für das Sommersemester 2019

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius Adaptronik—Studierwerkstatt Masterstudium	Die Studierenden lernen und trainieren anhand des interdisziplinären Forschungsgebietes Adaptronik interdisziplinäres Denken in den Ingenieurwissenschaften, wie es für den Ingenieurberuf typisch ist. Adaptronik verknüpft werkstoffwissenschaftliche, mechanische, elektrotechnische und regelungstechnische Kenntnisse und Fähigkeiten.
Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne Additive Layer Manufacturing Masterstudium	Die Studierenden lernen die Möglichkeiten und Arten des Additive Layer Manufacturing (ALM) kennen und sind nach der Teilnahme an den ALM-Lehrveranstaltungen in der Lage, bei der Entwicklung von Bauteilen die durch das jeweilige ALM-Verfahren gestellten Anforderungen zu berücksichtigen und eine fertigungsgerechte Gestaltung zu realisieren.
Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius Experimentelle Modalanalyse Masterstudium	Experimentelle Modalanalyse bezeichnet Verfahren der experimentellen Identifikation von Schwingungseigenschaften von Bauteilen. Die Studierenden lernen die angewendeten Verfahren in ihren mechanischen und mathematischen Grundlagen, ihre Anwendungsbereiche kennen. Sie sammeln im Labor praktische Erfahrungen und Teststrategien für Schwingungsversuche.
Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius Grundlagen des Konstruierens Bachelorstudium	Die Studierenden erlangen die Fähigkeit, Technische Zeichnungen zu lesen, Maschinenelemente funktionsgerecht anwenden, gestalten und festigkeitgerecht bemessen. Sie sind in der Lage, Maschinen von begrenzter Komplexität zu konstruieren.
Prof. Dr. Ing. Martin Wiedemann Prinzipien der Adaptronik Bachelorstudium	Die Studierenden erwerben Kenntnis der Prinzipien multifunktionaler Materialien sowie ihrer Anwendung. Ausgehend von experimentellen Untersuchungen, der Diskussion der Ergebnisse und durch eine anschließende Modellbildung haben sie die Kenntnisse für eine Integration und Umsetzungen von adaptronischen Konzepten in mechanischen Strukturen.
Dr.-Ing. Naser Al Natsheh Schwingungsmesstechnik Masterstudium	Die Studierenden erlangen fundierte Kenntnisse sowohl über die Messkette als auch über die wichtigsten Sensorprinzipien und Sensoren zur Messung schwingungstechnischer Größen. Die Studierenden sind in der Lage geeignete Messverfahren zur Lösung typischer schwingungstechnischer Aufgabenstellungen auszuwählen und zu bewerten. Die Lehrveranstaltung wird auch im WS in englischer Sprache angeboten.
Dr.-Ing. Naser Al Natsheh Multisziplinäre Simulation der Adaptronik mit MATLAB / Simulink Masterstudium	Die Studierenden werden in die Lage versetzt, selbstständig und sicher multidisziplinäre Modellierungen aus dem Gebiet der Adaptronik und der Strukturdynamik umzusetzen und ingenieurmäßige Simulationstechniken mit MATLAB/Simulink zu implementieren und Hardware-in-the-loop-Simulationen durchzuführen. Dazu gehören sowohl die Ansteuerung als auch die Regelung externer Hardware wie Aktoren und Sensoren.



Oben: Fertigungsexperimente im Fertigungslabor
Unten: Laborexperimente in kleinen Gruppen

Autor des Beitrags:
Dr.-Ing. Naser Al Natsheh



Veröffentlichungen des iAF in Fachzeitschriften 2017/18

R. Lammering, U. Gabbert, M. Sinapius, T. Schuster, P. Wierach (Eds.) (2017): Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites. Springer, Cham, mit

Chapter 5: **Raddatz, F., Szewieczek, A., Sinapius, M.:** Experimental Methods

Chapter 10: **Heintze, C., Duczek, S., Sinapius, M.:** A Minimal Model for Fast Approximation of Lamb Wave Propagation in Complex Aircraft Parts

Chapter 14: **Raddatz, F., Sinapius, M.:** Time-of-Flight Calculation in Complex Structures

Chapter 17: **Schmidt, D., Sinapius, M.:** Mode Selective Actuator-Sensor-Systems

Chapter 18: **Szewieczek, A., Sinapius, M.:** Virtual Sensors for SHM

Jux, M., Finke, B., Schilde, C., Mahrholz, Th., Sinapius, M., Kwade, A. (2017): Effects of Al(OH)O nanoparticle agglomerate size in epoxy resin on tension, bending and fracture properties. *Journal of Nanoparticle Research*, 19 (4), Seite 139 ff.

Hesse, C., Vivar Perez, J.M., Sinapius, M. (2017): Frequency-independent radiation modes of interior sound radiation: An analytical study, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 392, S. 31-40.

Geier, S., Mahrholz, Th., Wierach, P., Sinapius, M. (2017): Experimental Investigations of Actuators Based on Carbon Nanotube Architectures. In A. L. Araujo, C. A. Mota Soares (Hrsg.): *Smart Structures and Materials*, S. 67 - 95, Springer

M. Endres, M., Sommerwerk, H., Mendig, C., Sinapius, M., Horst, P. (2017): Experimental study of two electro-mechanical de-icing systems applied on a wing section tested in an icing wind tunnel, *CEAS Aeronaut J* (2017) 8:429–439.

Heinze, C., Duczek, S., Sinapius, M., Wierach, P. (2017): A minimal model-based approach for the fast approximation of wave propagation in complex structures. *Structural Health Monitoring*, Vol. 16(5), S. 568–582.

Pommer, C., Sinapius, M. (2018): A Novel Approach to Monitoring the Curing of Epoxy in Closed Tools by Use of Ultrasonic Spectroscopy. *Sensors* 2018, Vol. 18 (1).

Prussak, R., Stefaniak, D., Hühne, C., Sinapius, M. (2018): Evaluation of residual stress development in FRP-metal hybrids using fiber Bragg grating sensors, *Production Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0793-4>.

Jux, M., Fankhänel, J., Daum, B., Mahrholz, T., Sinapius, M., Rolfes, R. (2018): Mechanical properties of epoxy/boehmite nanocomposites in dependency of mass fraction and surface modification - An experimental and numerical approach, *Polymer* 141 pp. 34-45, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.02.059>.

Geier, S., Mahrholz, T., Wierach, P. und Sinapius, M. (2018): Morphology- and Ion Size-Induced Actuation of Carbon Nanotube Architectures, *Int'l J. of Smart and Nano Materials*, Vol 9, No 2, pp. 111-134

Estevam Schmiedt, R., Qian, S., Behr, C. Hecht, L., Dietzel, A., Sinapius, M. (2018): Flexible sensors on polyimide fabricated by femto-second laser for integration in fiber reinforced polymers, *J. of Flexible and Printed Electronics*, DOI 10.1088/2058-8585/aabe45

