

**Submission to the
FEMFAT Academic Fatigue Research Award 2019**

Title:

Effects of defects
and damage localization
in carbon fiber
reinforced polymer
lightweight structures

Doctoral Thesis

Submitted by
Susanne Dorothee Nonn

Submitted at
Institute of Structural Lightweight Design
Johannes Kepler University Linz

Supervisor and First Examiner
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Schagerl

Second Examiner
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.Mont. Gerald Pinter

Curriculum Vitae

Personal Details

Name: Susanne Dorothee Nonn
née Hörrmann
Date and Place of Birth: August 29, 1988 in Karlsruhe
Nationality: German
Marital Status: Married



Education

- 2018 Doktorin der technischen Wissenschaften – Johannes Kepler University Linz
Dissertation: *“Effects of defects and damage localization in carbon fiber reinforced polymer lightweight structures”*
- 2014 – 2018 Doctorate Program in Engineering Sciences, Mechatronics, supervised by Prof. Martin Schagerl - Institute of Structural Lightweight Design, Johannes Kepler University Linz
- 2013 Diplomingenieurin (equiv. M.Sc.) in Aerospace Engineering – University of Stuttgart
Diploma Thesis in cooperation with Airbus Group Innovations, Ottobrunn
“Design of innovative load introductions to CFRP multi spar flaps for commercial aircrafts”
- 2008 – 2013 Diploma study in Aerospace Engineering – University of Stuttgart
Majors: Lightweight Design & Aircraft Propulsion Systems and Turbo Engines
- 2008 Abitur – Gymnasium Neuenbürg

Professional Experience

- Since 2018 Tests & Structural Engineering – Large Space Structures GmbH, Eching
- 2014 – 2018 Project Staff Member – Christian Doppler Laboratory for Structural Strength Control of Lightweight Constructions, Johannes Kepler University Linz
- 2011 – 2012 Student Assistant – Institute of Aircraft Design, University of Stuttgart
- 2010 – 2011 Intern – Liebherr Aerospace GmbH, Lindenberg im Allgäu

List of Publications

Journal Papers

- [1] S. Nonn, C. Kralovec, M. Schagerl, *Damage mechanisms under static and fatigue loading at locally compacted regions in a high pressure resin transfer molded carbon fiber non-crimp fabric*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 115 (2018) 57–65.
- [2] S. Nonn, M. Schagerl, Y. Zhao, S. Gschossmann, C. Kralovec, *Application of electrical impedance tomography to an anisotropic carbon fiber-reinforced polymer composite laminate for damage localization*, Composites Science and Technology 160 (2018) 231–236.
- [3] S. Hörrmann, A. Adumitroaie, C. Viechtbauer, M. Schagerl, *The effect of fiber waviness on the fatigue life of CFRP materials*, International Journal of Fatigue 90 (2016) 139–147.
- [4] S. Hörrmann, A. Adumitroaie, M. Schagerl, *The effect of ply folds as manufacturing defect on the fatigue life of CFRP materials*, Frattura ed Integrità Strutturale 38 (2016) 76–81.

Conference Articles

- [5] S. Hörrmann, A. Adumitroaie, C. Kralovec, M. Schagerl, *The influence of resin starved area manufacturing imperfections on the mechanical performance of non-crimp fabric CFRP laminate*, Proceedings of the 21st International Conference on Composite Materials, Xi'an, China, 2017.
- [6] S. Hörrmann, M. Schagerl, M. Cichocki, C. Kralovec, *Direkte Messung des elektrischen Widerstands zur Schadensdetektion in anisotropen CFK Laminaten*, in: M. Wiedemann, T. Melz (Eds.), *Smarte Strukturen und Systeme: Tagungsband des 4SMARTS-Symposiums*, Braunschweig Shaker Verlag, 2017, pp. 39–49.
- [7] S. Hörrmann, A. Adumitroaie, M. Schagerl, *Through-thickness fatigue behavior of non-crimp fabrics featuring manufacturing defects*, Procedia Structural Integrity 2 (2016) 158–165.
- [8] S. Hörrmann, C. Viechtbauer, A. Adumitroaie, M. Schagerl, *The effect of fiber waviness as manufacturing defect on the fatigue life of CFRP materials*, Proceedings of the 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, Denmark, 2015.
- [9] L. Retschitzegger, A. Adumitroaie, S. Hörrmann, M. Schagerl, *Using X-FEM for progressive damage simulation of laminated composites featuring manufacturing imperfections*, Key Engineering Materials 713 (2016) 139–142.
- [10] M. Schagerl, C. Viechtbauer, S. Hörrmann, *On the monitoring and implications of growing damages caused by manufacturing defects in composite structures*, Journal of Physics: Conference Series 628 (2015) 012096.

Extended abstract

Motivation

Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) are increasingly used in the aerospace and automotive industry due to their high lightweight potential. Their high stiffness and strength to weight ratio and the possibility of placing the carbon fiber reinforcement along the load paths of structures is advantageous in comparison to traditional isotropic materials.

Recent examples of aircraft and automotive industry are the modern civil aircrafts Boeing 787 and A350 XWB or the electric cars BMW i3 and i8, where a large percentage of metal structures are substituted through CFRP structures. Therefore, new automated manufacturing processes were developed and lots of knowledge on the new technologies was built up.

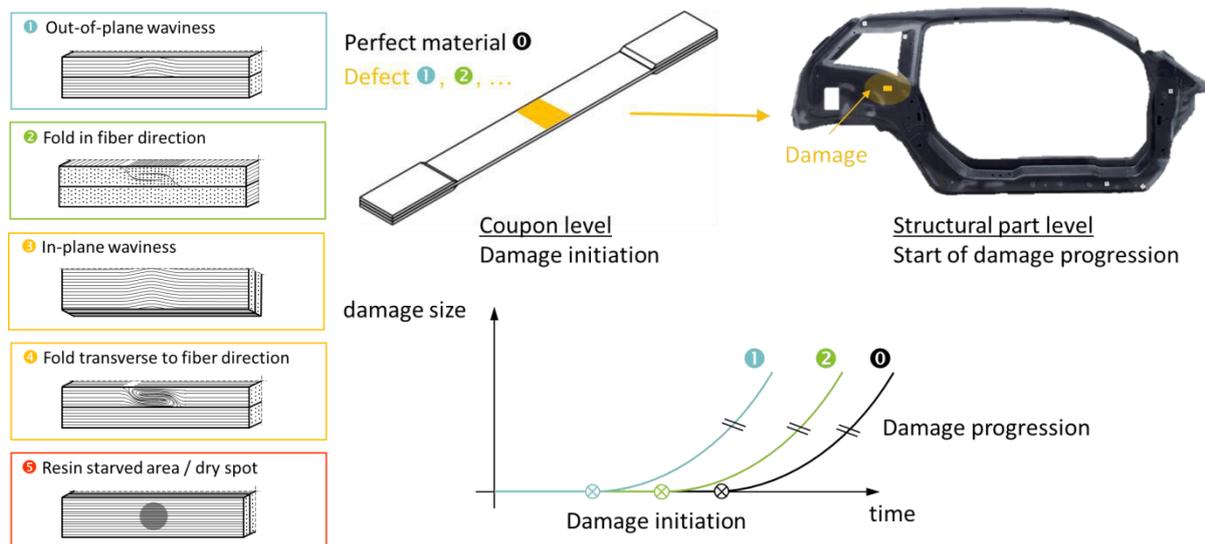


Figure 1: Typical manufacturing defects in CFRP materials and their influence on damage initiation under fatigue loading

However, new kinds of material variability arise due to new processes and are classified as defects in a first attempt. Such defects might initiate complex damage modes during service life due to the interaction between carbon fibers and epoxy resin. Safe operation has to be guaranteed. Therefore, a profound understanding of defects and damage progression and their detection is necessary. Defects and damages have to be considered also in the design stage, otherwise parts with defects have to be classified as rejects. Especially the current fatigue design of CFRP is conservative, e.g. the Safe Life Flaw Tolerant design in the aerospace sector.

Fatigue life prognosis

The result of the lightweight design process should be an optimized structure meeting the specifications. The fatigue design is a crucial component of this process. Fatigue tests of

structures are lengthy and expensive and are conducted only at the end of the design process for the final proof of the design. At this design state, it is only validated that the specifications are met. Optimization is not possible any more. Therefore, a profound fatigue life prognosis in early design states is necessary to achieve an optimized fatigue design. Such a fatigue life prognosis is usually based on fatigue test data of coupon specimens and numerical simulations. The fatigue life prognosis for metallic components is well established and also included in commercial software tools as e.g. FEMFAT. A huge test database with SN (Wöhler) curves for different materials and load ratios is available. Methodologies to account for multiple influence factors were developed. The constant life diagram (Haigh, Goodman diagram) describes the influence of load ratios on the fatigue life by quantifying the interaction of stress amplitude and mean stress. Operating loads are described by rainflow counting and linear damage accumulation is accounted for according to Palmgren-Miner. Influences of temperature, surface roughness, plasticity, etc. are well understood.

In the case of composites the different interacting damage mechanisms on microscopic scale have to be taken into account, which makes fatigue life prognosis much more complicated [11]. Fatigue life prognosis of FRPs was implemented recently also in commercial software tools, e.g. FEMFAT Laminate predicts first ply failure based on SN curves of UD plies for different loading directions and static failure criteria [12]. Most methods are based on SN curves and constant life diagrams, which were adapted for composites. Therefore, extensive test campaigns are necessary. However, they show higher scatter than metals and are only valid for specific combinations of constituents and layups or fiber architectures. The effects of manufacturing defects are usually not considered in such fatigue life prognosis tools and should be incorporated as the initial material state [13]. Therefore, their influence on the macroscopic scale has to be quantified taking into account the damage processes on the microscopic scale that initiate damages.

Methodology

The approach of this thesis is to investigate common manufacturing defects of high-pressure resin transfer molded non-crimp fabrics (NCF), to understand the damage mechanisms initiated by each defect and to quantify the detrimental effect on static and fatigue strength. Therefore, coupons with artificially introduced manufacturing defects are tested under different static and fatigue load cases, different R-values and material orientations and validated with numerical simulations. Non-destructive testing and monitoring of the stiffness evolution using strain gages, extensometers, digital image correlation (DIC) and cameras allow an in-depth understanding of the damage processes. Some typical manufacturing defects are schematically shown in Figure 1. The investigated defects are an out-of-plane fiber waviness, a fold in fiber direction and a locally compacted region. In-plane tension and compression tests and out-of-plane delamination tests are performed using in-house designed test rigs. It should be noted, that failure on coupon level means only the point of damage initiation on structural part level, as shown in Figure 1. For laminated composites it might be also considered as local first ply failure.

Effects of Defects

The results of these investigations were published in several journal publications and conference proceedings. The most important results are presented here.

It was found that the fiber waviness has the most detrimental effect on the compressive load cases in fiber direction. Static strength and fatigue life are accordingly decreased depending on the defect angle [3]. In Figure 2 fracture patterns for different defect angles are shown including mainly kink bands and delamination. The differences between the different defect angles can be observed directly.

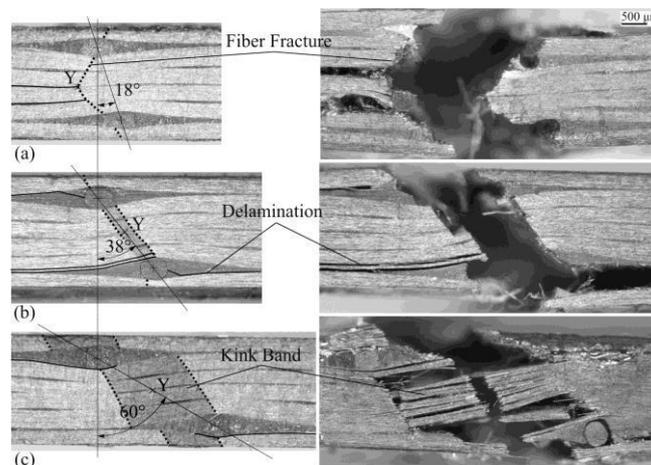


Figure 2: Fracture patterns under cyclic compression; left: pristine condition showing defect angles and further failure locations; right: after failure

These damage mechanisms were simulated with non-linear finite element analysis, whereby it was possible to simulate the kink banding as well as the delamination processes [9].

Figure 3 shows the correlation of the defect angle to the fatigue life. The slope related parameter k is assumed to be constant. It was found that the fatigue experimental data suggests a quadratic dependence of the fatigue strength on the defect angle α , featuring a minimum at $\alpha=45^\circ$.

$$\sigma_{max,e} = c_1 + c_2(\alpha - 45^\circ)^2$$

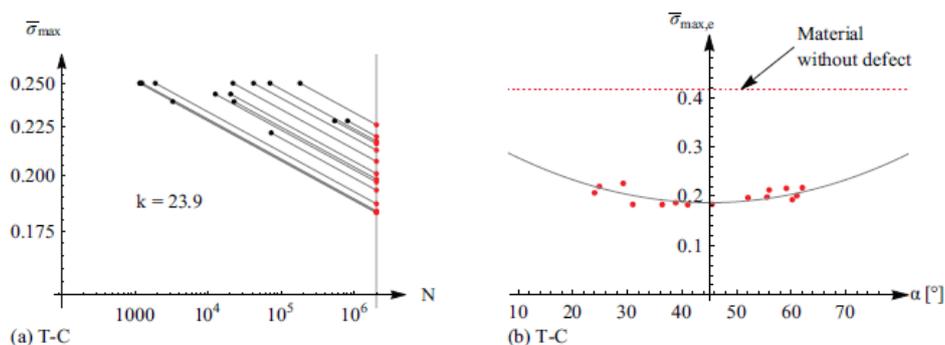


Figure 3: Fatigue life data: (a) Calculated endurance limits of T-C specimens; (b) Correlation of T-C endurance limit to the defect angle α

The ply fold in fiber direction is usually the site of damage initiation for the in-plane load cases; however, the detrimental effect is minimal [4]. Loaded in through-thickness direction, a knock-down of 10% was observed [7].

The locally compacted region is a feature purposely introduced in large composite shell structures to avoid fiber wash-out. It was tested under tension static and fatigue load cases. Fiber waviness at the edges and central resin starved areas show complex damage modes and lead to higher knock-down factors of up to 36% [1].

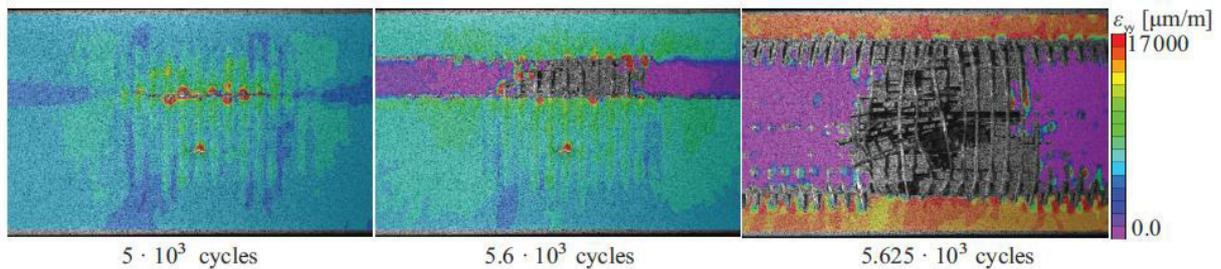


Figure 4: Fatigue fracture process at different numbers of cycles. Strain distribution in longitudinal direction is measured by DIC

In Figure 4 the fatigue fracture process at different numbers of cycles is shown. It starts with longitudinal splitting and fracture of single fibers within the compacted region. The neighboring fibers progressively fail by transverse fracture. Broken fibers are unloaded on their complete length and the strain is going back to zero. Finally, all fibers within the compacted region are broken.

Beside the effects of defects, the potential of a Structural Health Monitoring method for damage localization in CFRP structures is experimentally and numerically evaluated. The direct resistance measurement of CFRP was proposed to detect and localize damages. First, the resistance change of the same NCF material was measured and drilled holes were successfully detected [6]. Second, an anisotropic CFRP plate was equipped with electrodes and the potential for damage localization could successfully be demonstrated [2].

References

- [11] B. Harris, *A historical review of the fatigue behavior of fibre-reinforced plastics*, in: B. Harris (Ed.), *fatigue in composites*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2003, pp. 3–35.
- [12] M. Orth, M. Butz, C. Gaier, *Betriebsfestigkeitsanalyse von CFK-Bauteilen mit statischen Versagenskriterien*, *Materials Testing* 56 (2014) 559–566.
- [13] R. Talreja, *Incorporating manufacturing defects in damage and failure analysis*, in: R. Talreja, J. Varna (Eds.), *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2016, pp. 377–390.

Attachments

- Doctorate certificate
- Evaluation of the PhD-thesis by Prof. Martin Schagerl, Institute of Structural Lightweight Design, Johannes Kepler University Linz
- Evaluation of the PhD-thesis by Prof. Gerald Pinter, Chair of Materials Science and Testing of Polymers, Montanuniversität Leoben

JOHANNES KEPLER UNIVERSITÄT LINZ
Der Vizerektor für Lehre und Studierende

Bescheid

Spruch:

Gemäß § 87 des Bundesgesetzes über die Organisation der Universitäten
und ihre Studien, BGBl. I Nr. 120/2002, idgF, wird

Frau

Dipl.-Ing.

Susanne Dorothee NONN

geboren am 29. August 1988

(Matrikelnummer: 01358133 / Staatsangehörigkeit: Deutschland)

im Doktoratsstudium

Technische Wissenschaften

(Studienabschluss: 11. September 2018)

der akademische Grad

Doktorin der technischen Wissenschaften

(Doctor technicae - Dr.techn.)

verliehen.

Republik Österreich

Begründung:

Alle im betreffenden Curriculum vorgeschriebenen Prüfungen und wissenschaftlichen Arbeiten wurden positiv beurteilt.

Rechtsmittelbelehrung:

Gegen diesen Bescheid kann innerhalb von vier Wochen ab Zustellung Beschwerde gemäß Art. 130 Abs. 1 Z 1 B-VG an das Bundesverwaltungsgericht erhoben werden. Die Beschwerde ist schriftlich beim Vizerektor für Lehre und Studierende im Wege über den Prüfungs- und Anerkennungsservice einzubringen und hat die Bezeichnung des angefochtenen Bescheides und der belangten Behörde, die Gründe, auf die sich die Behauptung der Rechtswidrigkeit stützt, das Begehren sowie die Angaben, die erforderlich sind, um zu beurteilen, ob die Beschwerde rechtzeitig eingebracht ist, zu enthalten.

Der Vizerektor für Lehre und Studierende

Ausstellungsdatum:

Linz, am 13. September 2018

(Univ.-Prof. Dr. Andreas Janko)



ABSCHLUSSZEUGNIS

Doktoratsstudium Technische Wissenschaften

Kennzeichnung des Studiums			Matrikelnummer	
K	796	700	481	01358133

Vorname(n), Familienname Dipl.-Ing. Susanne Dorothee Nonn	Geburtsdatum 29.08.1988
---	-----------------------------------

Prüfungsfach	PrüferIn	ECTS Punkte	Datum	Beurteilung
Komplementäre Lehrveranstaltungen	Mehrere PrüferInnen	10.50	26.03.2018	sehr gut
Dissertationsfach: Mechatronik	Rudolf Scheidl, Philipp Gittler, Martin Schagerl, Gerald Pinter	29.00	11.09.2018	sehr gut
Rigorosum		----	11.09.2018	mit Auszeichnung bestanden

Dissertation	BetreuerIn	ECTS Punkte	Datum	Beurteilung
Effects of defects and damage localization in carbon fiber reinforced polymer lightweight structures	Martin Schagerl, Gerald Pinter	140.50	31.08.2018	sehr gut

Doktoratsstudium abgeschlossen am: 11.09.2018	AusstellerIn Univ.-Prof. Dr. Andreas Janko	 <p>(Doris Wegscheider) Leitung Prüfungs- und Anerkennungsservice</p>
--	---	--

An das
Prüfungs- und Anerkennungsservice
Johannes Kepler Universität Linz

Univ.-Prof. DI Dr.
Martin Schagerl
Vorstand Institut für
Konstruktiven Leichtbau
Leitung CD-Labor für
Structural Strength Control of
Lightweight Constructions

T +43 732 2468 6661
F +43 732 2468 6662
martin.schagerl@jku.at

Linz, 18. August 2018

Sekretariat:
Angelika Mayrhofer
DW 6660
angelika.mayrhofer@jku.at

Gutachten über die Dissertation
**Effects of defects and damage localization
in carbon fiber reinforced polymer lightweight structures**
eingereicht von Dipl.-Ing.ⁱⁿ Susanne Dorothee Nonn

Die Dissertation von Frau Dipl.-Ing.ⁱⁿ Susanne Dorothee Nonn (geb. Hörrmann) ist in Form einer kumulativen Arbeit verfasst und besteht aus sechs ausgewählten wissenschaftlichen Beiträgen. Diese Texte sind bereits in hochkarätigen Journalen oder Konferenzbänden erschienen, bzw. befinden sich in einem Fall noch im Begutachtungsprozess. Zur Motivation ist ein einführendes Kapitel vorangestellt, das in englischer Sprache abgefasst ist und in dem die behandelten Themen beschrieben, die Problemstellungen erörtert und die wichtigsten Ergebnisse zusammenfasst werden. Die Dissertation schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen, die in Fortsetzung bearbeitet werden sollten.

Im einleitenden Kapitel 1 erklärt Frau Nonn in schlüssiger Form die Zusammenhänge von Materialdefekten, Strukturschädigung und Inspektion und deren Bedeutung in modernen Leichtbauanwendungen. Mit Beispielen aus dem Flugzeug- und Automobilbau wird das ständige streben nach Gewichtersparnis illustriert. Dieses Bestreben führte gerade in den letzten Jahren zum intensiven Einsatz von Hochleistungswerkstoffen, wie Kohlenstofffaser-verstärkte Kunststoffe (CFK). Wie von Frau Nonn kompakt dargestellt, zeigen diese Verbundwerkstoffe im Vergleich zu Metallen ein äußerst komplexes Schädigungsverhalten. Im Fachgebiet des Leichtbaus erfordert

diese Eigenschaft die Entwicklung spezieller Auslegungskonzepte. Eines der bedeutendsten Konzepte, die sogenannte schadenstolerante Auslegung („damage tolerance“, DT) kommt zurzeit nur für metallische Werkstoffe umfassend zur Anwendung. Wie bei Metallen spielt die Belastungsgeschichte auch bei Verbundwerkstoffen eine wichtige Rolle. Allerdings muss die Empfindlichkeit gegenüber Lastspitzen oder Ermüdungslasten anders eingeordnet werden. Typische Ursachen für Schädigung in Verbundwerkstoffen sind einerseits Schläge, auf die vor allem Lamine sehr empfindlich reagieren, oder Fertigungsdefekte, die wegen der technisch aufwändigen Herstellverfahren oft unvermeidbar sind. Aufgrund dieses umfangreichen Problemfeldes ist es nachvollziehbar, dass sich Frau Nonn in ihrer Arbeit auf spezielle Anwendungsfälle fokussiert, wobei diese Anwendungsfälle mit Firmenpartnern abgesprochen und damit von großer praktischer Relevanz sind. Die Dissertation beschäftigt sich daher im ersten Teil speziell mit einem textilen Gelege („Non-Crimp Fabric“, NCF), das im Hochdruck-Harzinjektionsverfahren hergestellt wird. Untersucht wird der Schadenseintritt unter zyklischer Belastung (Ermüdungsverhalten) an drei unterschiedlichen und häufig auftretenden Fertigungsfehlern. Im zweiten Teil ihrer Dissertation widmet sich Frau Nonn einer, aus Sicht des Leichtbaus unmittelbar folgenden, grundlegenden Fragestellung: der (rechtzeitigen) Erkennung von Schäden in Verbundbauteilen. Da Schäden in Verbundwerkstoffen oft äußerlich durch Sichtprüfung kaum erkennbar sind, sind zerstörungsfreie Prüfverfahren („Non-destructive Testing“, NDT) wie Ultraschalltests heute Standard. Diese Verfahren sind im Laborbetrieb und lokal gut anwendbar, für eine globale Prüfung oder zumindest Überwachung von großen Strukturen aber oft viel zu aufwändig. Ein zurzeit intensiv beforschter Ansatz ist hier die automatische Strukturzustandsüberwachung („Structural Health Monitoring“, SHM), bei der am Bauteil aufgebrachte Sensornetzwerke während des Betriebs auftretende Schäden detektieren, lokalisieren, quantifizieren und qualifizieren. Unter den zahlreichen Methoden, die zurzeit in der Literatur diskutiert werden, wählte Frau Nonn mit der elektrischen Impedanz-Tomographie (EIT) eine wissenschaftlich sehr anspruchsvolle SHM-Methode für ihre Untersuchungen.

Der Kollektion der Arbeiten beginnt in Kapitel 2 mit der Analyse von Faserwelligkeiten in Laminat-Dickenrichtung. Faserwelligkeiten sind ein sehr häufiger Fertigungsdefekt, der etwa durch Drapierfehler oder durch den Harzdruck bei Injektion verursacht werden kann. Der von Frau Nonn vorgelegte Beitrag umfasst alle drei Aspekte einer vollständigen strukturmechanischen Untersuchung: (i) die Durchführung von Experimenten, inklusive Spezifikation des Testaufbaus und der Messmethoden, (ii) numerische Untersuchungen mit nichtlinearen Finite Elemente Methoden zum tieferen Verständnis der experimentellen Beobachtungen und (iii) analytische Überlegungen, aus denen eine klare strukturmechanische Bewertungsmethode für diesen Fertigungsdefekt abgeleitet wird. Die hervorragende Arbeit ist im International Journal of Fatigue erschienen. Der Impact Factor dieses Journals hat zurzeit den hohen Wert von 3,13.

Kapitel 3 untersucht mit Falten in Faserrichtung einen weiteren Fertigungsdefekt. Diese überlappenden Faserverwerfungen können etwa durch zu große Drapierwinkel entstehen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind daher aus praktischer Sicht höchst relevant. Wie im vorangegangenen Kapitel wird dieser Defekt experimentell untersucht. Numerische Untersuchungen mit Finite

Elemente wurden zwar ebenfalls durchgeführt. Die Ergebnisse werden in dieser Arbeit allerdings nur kurz erwähnt. Es werden Wöhlerlinien für unterschiedliche Lastverhältnisse abgeleitet und mit einem gefundenen geometrischen Parameter, der die Ausprägung des Defektes charakterisiert, korreliert. Besondere Sorgfalt legt Frau Nonn daher auf die Analyse von Computer-Tomographie-Bildern, mit denen erst die Skizzierung der Defektgeometrie gelingt.

Kapitel 4 widmet sich der Herausforderung, die Festigkeitswerte des im vorangegangenen Kapitel behandelten, defektbehafteten Laminats in Dickenrichtung zu bestimmen. Geschichtete Verbundwerkstoffe sind naturgemäß sehr empfindlich auf Schälspannungen und deren Betrachtung daher ein wesentlicher Bestandteil der Festigkeitsbewertung. Es ist allerdings keine versuchstechnische Standardaufgabe, Festigkeitswerte in Dickenrichtung experimentell zu bestimmen – vor allem unter zyklischen Ermüdungslasten. In Zusammenarbeit mit dem Techniker unseres Instituts hat Frau Nonn einen Versuchsaufbau konstruiert, der diese Aufgabe erfüllt. Dies schloss auch den Bau von Vorrichtungen für die Probenvorbereitung ein.

Um ein Verrutschen des Laminats während des Harzinjektionsvorgang zu verhindern, wird in manchen Fertigungswerkzeugen das Gelege an bestimmten Stellen mit Stempeln festgehalten. Der Fixierungsdruck verdichtet dort das Laminat lokal, das an dieser Stelle auch mit weniger Matrixmaterial durchtränkt ist. Im schlechtesten Fall kommt es zur Ausbildung einer trockenen Stelle. Grundsätzlich ist dies eine bemerkenswerte Situation: Eine Maßnahme zur Vermeidung von Fertigungsdefekten führt wiederum zu einer Unvollkommenheit im Laminataufbau. Der Artikel in Kapitel 5 bewertet die Festigkeit solcher Stellen. Der Stempeldruck ist nur auf einer Seite. Frau Nonn musste in ihrer Arbeit also mit unsymmetrischen Probekörpern umgehen, die sich etwa bei Zugbeanspruchung biegen. Die Bewertung gelang wieder in einer umfassenden Kombination aus experimenteller Messung (u.a. Verformungsmessung mit digitaler Bildkorrelation), numerischer Finite Elemente Simulation und analytischen Überlegungen. Durch gezielte Untersuchung von Probekörper unterschiedlicher Geometrie konnten die unterschiedlichen, fortschreitenden Bruchvorgänge während der zyklischen Ermüdungsbelastung ausgewertet und verstanden werden. Die umfassende Arbeit wurde im Journal Composites Part A: Applied Science and Manufacturing eingereicht und wurde von den Gutachtern mit Überarbeitungscommentaren für eine Veröffentlichung vorgeschlagen. Die wiedereingereichte Überarbeitung ist momentan in Begutachtung. Der Impact Factor dieses Journals hat zurzeit den hohen Wert von 4,51.

In den beiden folgenden Kapiteln ihrer Dissertation wendet sich Frau Nonn dem weiterführenden Thema der Schadensdetektion in Faserverbundwerkstoffen mit messtechnischen Methoden zu. Eingegliedert in ein Forschungsprojekt an unserem Institut beschäftigt sich dieser Teil der Arbeit mit dem modernen Ansatz der Bauteil-integrierten Strukturzustandsüberwachung („Structural Health Monitoring“, SHM) und dabei mit der Methode der elektrischen Impedanz-Tomographie (EIT). Da Kohlenstoff ein guter elektrischer Leiter ist, sind auch Kohlenstofffaser-verstärkte Kunststoffe elektrisch leitend. Die Leitfähigkeit ändert sich daher, wenn etwa Fasern durchtrennt werden. Umgekehrt kann aus einer Änderung der Leitfähigkeit auf eine Schädigung geschlossen werden. Frau Nonn analysiert dazu in Kapitel 5 (ein Beitrag zum Symposium für Smarte Strukturen

und Systeme 4SMARTS 2017) ein sehr anschauliches Demonstrationsbeispiel. In einer unidirektionalen Probe wird ein Loch unterschiedlicher Größe (auf)gebohrt und dessen Durchmesser mit der Leitfähigkeit der Probe korreliert. Die experimentellen Ergebnisse können mit Finite Elemente Analysen sehr gut nachvollzogen werden und zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Schädigung und Leitfähigkeit. Auf dieses eindimensionale Beispiel folgt in Kapitel 6 die Verallgemeinerung auf eine flächige Messung an einer Platte. An den Rändern der Platte werden Elektroden angebracht und danach systematisch an zwei Elektroden Strom eingeleitet und das Potentialgefälle zwischen allen Elektroden gemessen. Die numerische Rückrechnung (Tomographie) der Leitfähigkeitsverteilung in der Plattenfläche erfolgt mithilfe eines Open-Source Programms. Für diese Messung konnte Frau Nonn auf den von anderen Forscherinnen am Institut entwickelten Messaufbau zurückgreifen. Die Diskussion und Interpretation der Messergebnisse erweist sich allerdings als äußerst anspruchsvoll. Durch den anisotropen Lagenaufbau der Versuchsplatte ist die Leitfähigkeit des Materials ebenfalls anisotrop. Das Ergebnis der Rückrechnung (die aus mathematischen Gründen nur für isotrope Materialien eindeutig funktioniert) ist nur durch sorgfältige numerische Nachrechnung mit Finite Elemente Modellen nachvollziehbar. Die Modellbildung muss dabei sehr detailliert sein. Etwa konnte Frau Nonn zeigen, dass auch die Stromflüsse zwischen den Schichten in Dickenrichtung berücksichtigt werden müssen. Die hervorragende Arbeit ist im International Journal Composites Science and Technology erschienen. Der Impact Factor dieses Journals hat zurzeit den hohen Wert von 5,16.

Frau Dipl.-Ing.ⁱⁿ Susanne Dorothee Nonn hat im Rahmen ihrer Dissertation eine aktuelle, anspruchsvolle und wissenschaftliche Aufgabenstellung des modernen Leichtbaus behandelt und einen wesentlichen Beitrag zur Erweiterung des aktuellen Wissensstandes im Bereich des Werkstoff- und Verbundleichtbaus und des Structural Health Monitoring vorgelegt. Die Dissertation ist sorgfältig und wissenschaftlich korrekt durchgeführt. Die aus der Literatur übernommenen Ansätze sind klar durch Zitate belegt. Darüber hinaus sind wesentliche Teile der Arbeit im Rahmen von Peer-Review Verfahren von hochkarätigen Fachzeitschriften bereits begutachtet worden. Frau Nonn hat mit dieser Arbeit ihre Fähigkeit zu selbständiger wissenschaftlicher Arbeit vollständig unter Beweis gestellt. Ich empfehle daher die Zulassung von Frau Dipl.-Ing.ⁱⁿ Susanne Dorothee Nonn zum Rigorosum und beurteile die vorgelegte Dissertation mit

„Sehr Gut (1)“.

Martin Schagerl

Martin Schagerl

Gutachten
über die Dissertation

"Effects of defects and damage localization in carbon fiber reinforced polymer lightweight structures"

vorgelegt von

Frau Susanne Dorothee Nonn

Der durch das hohe Maß an CO₂ Emissionen eingeleitete Klimawandel ist eine der größten globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Möglichkeiten um die notwendige Reduktion der Emissionen zu erzielen sind, unter anderem, die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am weltweiten Gesamtenergieverbrauch oder ein Umdenken in emissionsstarken Industriezweigen, wie beispielsweise im Transportwesen. Im Bereich der Transportindustrie, allen voran in der Flugzeug- und Automobilindustrie, wurden in den letzten Jahren bahnbrechende Entwicklungen erzielt. Flugzeuge in bis dato unbekannter Größe revolutionieren den Personenflugverkehr und neuartige Antriebskonzepte bieten im Automobilbau Alternativen zu fossilen Brennstoffen. Um derartige Neuentwicklungen so ressourceneffizient wie möglich zu gestalten, ist die Reduktion des bewegten Gesamtgewichtes eine essentielle Voraussetzung. Faserverbundwerkstoffe bieten für derartige Leichtbauanwendungen einzigartige Eigenschaften. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffverbunde (CFK) zählen heute zu den am weitesten verbreiteten Verbundwerkstoffen und besitzen herausragende Kennwerte bei gleichzeitig niedrigem Gewicht.

Ein wesentlicher zusätzlicher Vorteil, den die Einführung von CFK auch für tragende Komponenten brachte, ist ihre im Vergleich zu Metallen deutlich höhere Toleranz gegenüber Ermüdungsbelastung. In den 1970er Jahren wurden Untersuchungen von der Luftfahrtindustrie mit unidirektional verstärktem CFK unter zyklischer Last in Faserrichtung durchgeführt und eine überragende Ermüdungsfestigkeit gefunden. Auf diesen Studien basierte über lange Zeit die Vorstellung, dass Bauteile aus derartigen Materialien keine Einschränkungen hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit aufweisen. Die Anhebung der „design strains“ auch in Luftfahrtanwendungen hat in den letzten Jahren aber dazu geführt, dass Ermüdungsversagen bei der Auslegung berücksichtigt werden muss.

Die Schädigung, die sich in CFK mit unterschiedlichen mehrdimensionalen Faseranordnungen unter Ermüdungsbelastung ergibt, kann verschiedene Formen annehmen: Matrix Risse, Faser-Versagen, Faser-Matrix Ablösung, Delamination, etc. Welche der Mechanismen zum Tragen kommen hängt von den Randbedingungen der Belastung, der Konstruktion des Bauteiles und dem Aufbau des Materials ab. Aufgrund der Komplexität der Versagensmechanismen weisen die existierenden Methoden zur Lebensdauervorhersage von polymeren Faserverbundwerkstoffen noch bedeutende Defizite auf, was hohe Sicherheitsfaktoren beim Design von Bauteilen nach sich zieht. Zudem sind die Einflüsse von verarbeitungsbedingten Inhomogenitäten und Defekten in den Modellen kaum abgebildet, was dazu führt, dass faserverstärkte Strukturen für hohe Lastspielzahlen oft erheblich überdimensioniert und daher schwerer und teurer als nötig sind.

Fr. Nonn hat sich in ihrer Dissertation daher mit der Identifizierung von typischen Verarbeitungs-Defekten in Faser-Verbund-Strukturen und deren Auswirkungen auf die Entwicklung von Schädigung im Laufe der Anwendung auseinandergesetzt. Dabei beruhen ihre Arbeiten auf dem Grundprinzip der „Strukturellen Kontrolle der Festigkeit“ unter Berücksichtigen von online Methoden der Schädigungsüberwachung über die gesamte Lebensdauer des Bauteiles.

Die Dissertation besteht aus einem einleitenden Kapitel mit einer kompakten Darstellung der Grundlagen, der Motivation und der Struktur der Dissertation, gefolgt von der originalgetreuen Abbildung von 6 Publikationen und einer Schlussfolgerung und Ausblick. 2 Papers wurden in referierten Journalen publiziert, eines befindet sich im Review-Prozess und drei weitere wurden in den referierten Proceedings renommierter Tagungen veröffentlicht. Frau Nonn ist in allen 6 Publikationen als Erstautorin genannt, was insgesamt ihren wesentlichen Beitrag sowohl in wissenschaftlicher Hinsicht aber auch was das Schreiben der Manuskripte betrifft, unterstreicht.

In den ersten vier Publikationen geht Frau Nonn auf die Auswirkungen von typischen Verarbeitungsdefekten (Faser-Welligkeit in Dickenrichtung, Falte einer CFK-Lage in Faserrichtung, lokal komprimierter Bereich), die beim Hochdruck-Harzinjektionsverfahren von Non-Crimp Fabrics (NCF) auftreten, ein. Dabei wurden Zug- und Druckversuche innerhalb der Laminebene und Delaminationsversuche in Dickenrichtung unter quasi-statischen und zyklischen Lasten durchgeführt, wozu spezifische Lasteinleitungsvorrichtungen entwickelt und angewendet wurden. Schadensinitiierung und -fortschritt wurden mittels Dehnungsmessstreifen, Extensometern, digitaler Bildkorrelation (DIC) und optischen Kameras überwacht. Zudem wurde die lokale Lastsituation in den Proben mit den Defekten über Finite Elemente (FEM) Simulation berechnet und in die Auswertungen miteinbezogen. Es zeigte sich, dass die gewählten Tests geeignet waren die Auswirkungen der Verarbeitungsdefekte auf die quasi-statischen und zyklischen Kennwerte zu erfassen, wobei aber eine große Streuung der Resultate aufgrund der Unregelmäßigkeit der Defekte auftrat. In den abschließenden 2 Publikationen widmete sich Fr. Nonn einer zerstörungsfreien Methodik zur Lokalisierung von Schäden. Dabei wurde die direkte Widerstandsmessung in CFK vorgeschlagen und auch erfolgreich eingesetzt.

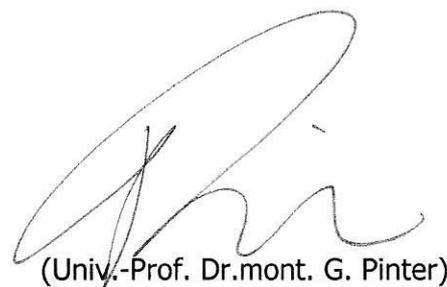
Insgesamt kann festgestellt werden, dass es sich bei der Dissertation von Frau Nonn um eine äußerst umfangreiche Arbeit mit hohem Innovationsanteil handelt. Methodisch ist die Arbeit von einem außerordentlich hohen wissenschaftlich-technischen Niveau. Sie enthält sowohl Elemente der experimentellen Entwicklung und Durchführung von hohem Schwierigkeitsgrad und von großer Breite, als auch theoretische Aspekte aus dem Bereich der numerischen Simulation von Faserverbundwerkstoffen. Frau Nonn ist es gelungen die Publikationen so zu gestalten und zu gruppieren, dass die schriftliche Abfassung der Dissertation eine stimmige Darstellung der Ergebnisse ergibt. Die Arbeit ist klar gegliedert und strukturiert, stilistisch gut geschrieben und sorgfältig und sauber ausgearbeitet. Bei der Interpretation und Diskussion der Ergebnisse nimmt Frau Nonn angemessenen Bezug auf die existierende Literatur. Zudem versteht es die Kandidatin sehr gut, den Neuigkeitscharakter ihrer Arbeit darzustellen.

Da Frau Nonn die ihr gestellte Problemstellung in hervorragender Weise gelöst hat, und die Arbeit auch voll der Gesamtzielsetzung sowie sonstiger Anforderungen an eine Dissertation entspricht, wird sie vom Zweitbegutachter und Unterzeichner mit

Sehr Gut (1)

beurteilt. Damit ist die Kandidatin uneingeschränkt zum Rigorosum zuzulassen.

Leoben, 31.08.2018



(Univ.-Prof. Dr. mont. G. Pinter)