Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
TECOSIM GmbH	03EE3028B
Vorhabensbezeichnung: Verbundvorhaben: FANFOLD - Schnelle maschinell angelernte nichtlineare Rotorblattanalyse Teilvorhaben: Programmtechnische Implementierung der angelernten nichtlinearen Rotorblattanalyse und deren Übertragung auf die Skala von WEA-Rotorblättern	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2020 bis 31.08.2024	

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03EE3028B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Im Projekt FANFOLD erarbeiteten die Leibniz Universität Hannover, Institut für Statik und Dynamik (LUH-ISD), und die TECOSIM GmbH eine neuartige kosteneffiziente nichtlineare Strukturanalysemethode für große Faserverbundstrukturen, insbesondere für Rotorblätter von WEA, die auch Auskunft über die fortschreitenden Degradationen der Struktureigenschaften geben kann. Das LUH-ISD sollte ein neuartiges FE-Reduktionsmodell für Faserverbundlaminate für die Blattsimulation entwickeln. Der Beitrag von TECOSIM zum Projekt bestand darin, die Eingabedaten für das nichtlineare quasi-orthotrope Materialmodell des neuen Reduktionsmodells in Form von Last-Verschiebungskurven charakteristischer Beanspruchungen der Struktur durch maschinelles Lernen zu generieren. Außerdem sollte TECOSIM versuchen den neuen Reduktionsansatz in die Software-technische Anwendung zu bringen und für Simulationen auf der Skala ganzer Rotorblätter von WEA nutzbar zu machen.

Die Firma TECOSIM besitzt fundierte Erfahrung in der strukturellen Auslegung von Komponenten von Windenergieanlagen mit Finite-Element-Methoden (FEM). Außerdem bestehen Kenntnisse zu strukturmechanischen Nachweisverfahren für Faserverbundmaterialien, die momentan noch sehr rechenintensiv und damit zeitaufwändig sind. Im Projekt sollten diese Erfahrungen hinsichtlich schneller Analyseverfahren auch für größere WEA erweitert werden. Hierbei sollten moderne Methoden des Maschinellen Lernens zum Einsatz kommen. Zum Projektende wurde der Nachweis der Anwendbarkeit der Strukturanalysemethode auf eine aktuelle Problemstellung im Kontext der Dimensionierung bzw. Zertifizierung eines Rotorblattes für WEA angestrebt.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima (BMWK) im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung gefördert und vom Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, betreut.

Projektpartner waren:

- Leibniz Universität Hannover, ForWind – Institut für Statik und Dynamik (ISD)
- TECOSIM GmbH

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Vorhabenspartner bestand ein gemeinsamer Arbeitsplan, in dem die Firma TECOSIM GmbH bei den folgenden Arbeitspaketen mitwirkte (Kurzfassung):

Arbeitspakete / Jahr / Monate	Projektlaufzeit von 12 Quartalen												PM
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Teilvorhaben TECOSIM GmbH													
AP 1 Projektmanagement	◆	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◆	
AP 2 Referenzmodellbildung	◆	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◆	
AP 2.1 Klassifizierung von Schadensereignissen	X	X											1,0
AP 2.2 Referenzmodell einer Subkomponente		X	X	X	X	X							2,0
AP 2.3 Simulationsbenchmark										X	X	X	1,0
AP 3 Schnelle nichtlineare Strukturanalyse		◆	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◆	
AP 3.1 Entwicklung Reduktionsmodell			X	X	X	X	X	X	X	X			1,5
AP 3.2 Homogenisierung						X	X	X					1,0
AP 3.3 Simulation und Validierung Referenzmodell									X	X	X	X	1,0
AP 4 Charakterisierung durch maschinelles Lernen	◆	—	—	—	—	—	—	—	—	◆			
AP 4.1 Methodenentwicklung	X	X	X	X	X	X							7,5
AP 4.2 Erzeugen von Trainingsdatensätzen					X	X	X	X					6,0
AP 4.3 Validieren der Charakterisierungsmethode								X	X	X			3,0
AP 5 Experimentelle Untersuchungen			◆	—	—	—	—	—	—	—	—	◆	
AP 5.1 Charakterisierungsexperimente				X	X	X	X						0,5
AP 5.2 Ermittlung von Trainingsdaten					X	X	X	X					1,0
AP 5.3 Validierungsexperimente							X	X	X	X	X		0,5
AP 6 Rotorblatt-Gesamtsimulation									◆	—	—	◆	
AP 6.1 Schnelle nichtlineare Rotorblattanalyse										X	X	X	6,1
Summe der Personenmonate													**32,1**

Tabelle 1: Zeitplan, Arbeitspakete und -teilpakete mit Beteiligung von TECOSIM (PM = Personenmonat)

Im Projekt hat TECOSIM einen Modellgenerator für eine parametrisierte Sandwichstruktur und einen automatisierten Analyseprozess von verschiedenen Parameterkombinationen entwickelt, um Referenzmodelle von Subkomponenten zu erzeugen und Effekte von Delaminationen berücksichtigen zu können. Abweichend von der ursprünglichen Planung, mittels maschinellen Lernens die Charakterisierungsdaten von FKV-Werkstoffen (Faser-Kunststoff-Verbund; auch faserverstärkter Kunststoff oder Faserverbundkunststoff) in Form von charakteristischen Last-Verschiebungskurven zu extrahieren, können diese Daten nun mit dem neu entwickelten Software-Tool zum Generieren von Last-Verschiebungskurven auf Basis der klassischen Laminattheorie erzeugt werden. Das maschinelle Lernen wurde im Vorhaben für die Beschreibung des Schadensfortschritts von Delaminationen eingesetzt.

Im Projektverlauf traten Verzögerungen durch Mitarbeiterwechsel sowie durch einen zeitlichen Mehraufwand aufgrund der aufwendiger als erwartet ausgefallenen Recherche und Bewertung der Schadensfälle auf. Daher wurde die Laufzeit kostenneutral um ein Jahr verlängert. Ansonsten folgte der Ablauf des Vorhabens im Wesentlichen der ursprünglichen Planung.

I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Als wichtige Vorarbeit kann das Projekt „Entwicklung einer Toolbox zur FEM-implementierten Lebensdauervorhersage endlosfaserverstärkter thermoplastischer Verbundwerkstoffe – Life-Tool“ angeführt werden, das TECOSIM in Kooperation mit der TU Kaiserslautern durchgeführt hat. Es wurde im ZIM-Programm unter dem Aktenzeichen ZF4233001RR6 gefördert. Die Motivation für das Projekt bestand in der wachsenden Bedeutung, die faserverstärkte Kunststoffe in vielen Industriebereichen gewinnen. Anforderungen an die Zuverlässigkeit und den Leichtbau erfordern eine zuverlässige und differenzierte Aussage über die zu erwartende Bauteillebensdauer. Hierzu existieren jedoch derzeit keine in der täglichen Konstruktionspraxis ohne weitreichende Detailkenntnisse einsetzbaren Tools zur Kennwertermittlung und Auslegung. Projektziel war daher eine technische Dienstleistung auf Basis eines Berechnungswerkzeuges zu entwickeln, die anhand von Spannungsanalysen und Lastkollektiven die zu erwartende Lebensdauer eines einfachen Bauteils aus endlosfaserverstärkten Kunststoffen – speziell Thermoplasten - vorhersagt. Gleichzeitig sollten kritische Bereiche am Bauteil angezeigt werden. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse zum Versagensverhalten von FKV sind in das FANFOLD-Projekt eingeflossen, um eine schnelle, nichtlineare Analyse von Rotorblättern unter Berücksichtigung maschinell angelernter Materialdaten zu realisieren.

Ferner hat TECOSIM ein Rotorblattmodell, welches im Forschungsprojekt HANNAH optimiert wurde, zur Ableitung verschiedener Blattmodelle verwendet. Das Verbundvorhaben: HANNAH - Herausforderungen der industriellen Anwendung von nanomodifizierten und hybriden Werkstoffsystemen im Rotorblattleichtbau – wurde im 6. Energieforschungsprogramm unter dem Förderkennzeichen 0324345E gefördert.

Im Vorhaben wurden für eine Recherche zur Klassifizierung von Schadensereignissen an Rotorblattstrukturen die folgenden Quellen benutzt:

- Sandia Report DAND 2013 – 3197 „Blade Reliability Collaborative Collection of Defect, Damage and Repair Data”
- „Ciang_2008-Structural_health_monitoring_for_a_wind_turbine_system-a_re-view_of_damage_dection_methods “
- „Dolati_et.al. _2014-_Experimental_Investigation_Into_Glass_fibere“
- „Fiore_2016Simulation_of_Damage_Progression_on_Wind_Turbine_Blades_-Subject_to_Particle_Erosion“
- „Keegan_2012-Modelling_Rain_Drop_Impact_of_Offshore_Wind_Turbine_Blades “

Schutzrechte, die dem Vorhaben entgegenstanden, waren nicht bekannt.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Abwicklung des Teilvorhabens (Antragstellung, Berichtswesen, Kostenermittlungen und Zahlungsanforderungen bis hin zum Verwendungsnachweis) wurde vom Ingenieurbüro Mager, Innovations- und Förderberatung, Dr.-Ing. Klaus Mager (klaus.mager@t-online.de), Bad Dürrheim, unterstützt.

II Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung, erzieltes Ergebnis, Abgleich mit der Zielsetzung

Um mehr Leistung zu generieren, werden die Rotorblätter moderner Windenergieanlagen (WEA) immer länger ausgeführt. Mit der Größe der Rotorblätter steigen die statischen und die dynamischen Lasten an den Blättern. Damit das Eigengewicht beherrschbar bleibt, werden die Rotoren aus Verbundmaterialien (Faser-Kunststoff-Verbund, FKV) ausgeführt. Die zunehmende Größe der Blätter führt aber auch konventionelle Auslegungs- und Nachweismethoden an ihre Grenzen, gerade wenn in den riesigen Berechnungsmodellen noch Schädigungsprozesse und Imperfektionen berücksichtigt werden sollen. Während der bis zu 20 Jahren oder noch länger währenden Betriebszeit einer WEA müssen die Blätter aufgrund der sich ständig ändernden Windgeschwindigkeit und -richtung millionenfache Lastwechsel aushalten. Daher bestand das Vorhabenziel darin, eine schnelle nichtlineare Strukturanalyse für große Rotorblätter von WEA aus Verbundfaserstrukturen zu entwickeln, die auch Auskunft über die fortschreitenden Degradationen der Struktureigenschaften geben kann.

Bei WEA treten fertigungsbedingte Imperfektionen auf:

- Fehler im Faserverbund können in Form von abweichenden Faserorientierungen oder Faservolumengehalten bestehen. Erste können schon beim Einlegen der trockenen Fasern entstehen oder während der Matrixmaterialinjektion durch Aufschwimmen der Fasern. Letztere Fertigungsfehler passieren beim Eintrag des Matrixmaterials in den trockenen Faserstapel, wenn mehr oder weniger als die geplante Menge an Matrixmaterial im Bauteil verbleibt.
- Weitere Fertigungsfehler von FKV sind Einschlüsse von Luft oder Fremdmaterialien. Beides kommt beim Ablegen der Fasermatten in den Verbund. Die Luft entweicht im Normalfall, es kann aber bei einigen Fertigungsaufbauten dazu kommen, dass die Wege für die Luft zu weit sind und die Luft nicht entweicht bevor das flüssige Matrixmaterial sich verfestigt hat und eine weitere Bewegung der Luftblasen verhindert. Darüber hinaus kann es an den Stoßstellen der Fasermatten zu Lücken oder Überlappungen kommen. Ondulationen bilden eine weitere Gruppe von Fertigungsfehlern, die vor allem im Bereich der Gurte sehr unvorteilhaft für die Beanspruchungen im Laminat und damit auch die Lebensdauer des Rotorblattes sein können.
- Beim Fügen von Bauteilen, die unabhängig voneinander gefertigt wurden, können Verklebefehler auftreten. Zum einen können auch hier Fremdkörper oder Luft eingeschlossen werden. Zum anderen kann es zum sogenannten „kiss bond" oder „kissing bonds" kommen. Dabei bilden sich nur unzureichende Adhäsionskräfte zwischen Klebstoff und Bauteiloberfläche aus.

Solche Imperfektionen können – wie auch Windbelastungen – Mikrorisse verursachen. Akkumulierte Mikrorisse infolge von Einzellasten oder Ermüdung führen im Laufe der Zeit zu Materialversagen.

Im Vorhaben sollten dokumentierte Schäden an Rotorblattstrukturen betrachtet werden. Die Schäden und Imperfektionen waren nach ihren strukturmechanischen Schadensursachen zu klassifizieren mit dem Ziel, sie in einer schnellen, nichtlinearen FE-Analyse für die Gesamtsimulation des FKV-Rotorblattes berücksichtigen zu können.

Ein Ziel des Teilvorhabens des LUH-ISD war die Entwicklung eines neuartigen Reduktionsmodells für Faserverbundlaminate für die Blattsimulation mit der Finiten-Element-Methode (FEM). Es sollte ein quasi-orthotropes Materialverhalten aufweisen. TECOSIM sollte die Eingabedaten für das nichtlineare quasi-orthotrope Materialgesetz des neuen Reduktionsmodells in Form von Last-Verschiebungskurven charakteristischer Beanspruchungen der Struktur durch maschinelles Lernen generieren. Außerdem bestand seitens TECOSIM das technische Ziel, diesen neuen Reduktionsansatz in die Software-technische Anwendung zu bringen und es für Simulationen auf der Skala ganzer Rotorblätter von WEA nutzbar zu machen.

Zur Betrachtung des Degradationsverhaltens müsste gemäß dem Stand der Technik eine Vielzahl von sehr rechenzeitintensiven Berechnungsläufen hintereinandergeschaltet werden, wobei von einem zum nächsten die Festigkeiten und Steifigkeiten abgemindert werden, um die Degradation der Materialeigenschaften abzubilden. Dieser Ansatz ist technisch möglich, aber aufgrund des Rechenaufwandes nicht praktikabel. Der neue Ansatz sollte eine solche progressive Materialdegradation bereits beinhalten, so dass sich die Fatigue-Rechnungen auf ein praxisgerechtes Maß reduzieren lassen. TECOSIM sollte das zu entwickelnde Reduktionsmodell in den Nachweisprozess integrieren, zum einen über den Weg von Benutzer-definierten Materialien, wie es z.B. im CAE-Tool Abaqus programmiert werden kann. Zum anderen sollte TECOSIM die Übertragung auf den Rotorblattmaßstab vornehmen. Dazu waren Laufzeit- oder Speicherprobleme zu behandeln. Es sollte ein sog. Reduktionsmodell mit beschleunigter Auslegungszeit entstehen. Das Reduktionsmodell war beim LUH-ISD zu Forschungs- und Entwicklungszwecken auf kleinere Modelle, z.B. von Platten, anzuwenden, wohingegen TECOSIM damit das ganze Rotorblatt simulieren wollte.

Die beschleunigte Auslegung sollte im Vorhaben zunächst an kleinen Strukturen und Probekörpern entwickelt werden. Simulationsseitig sollten dafür Modelle von Komponenten und Subkomponenten entstehen. Erst die Übertragung der Erkenntnisse auf die Makroskala realer Strukturen von WEA-Rotorblättern sollte zeigen, wie hoch die Einsparung an Berechnungszeit durch das neue Verfahren wirklich ist. Ein wichtiges Arbeitsziel für TECOSIM war eine deutliche Reduzierung bei der Rotorblattauslegung.

Durch die ganzheitliche Betrachtung des gesamten Rotorblattes durch Einbezug nichtlinearer Schädigungsprozesse in die Strukturauslegung sollte es möglich werden, in der Auslegung weniger konservative Abminderungsfaktoren zugrunde legen zu können. Dies käme einer Verringerung des Materialeinsatzes oder höheren Spannweiten zugute. Darüber hinaus sollte durch den Einsatz des maschinellen Lernens zur Ermittlung der nichtlinearen Materialeigenschaften sowohl die Anzahl der durchzuführenden Materialqualifizierungstests reduziert, als auch die Komplexität dieser Tests verringert werden. Dadurch könnten Entwicklungskosten bei gleichbleibender oder sogar gesteigerter Aussagekraft der gewonnenen Materialeigenschaften gesenkt werden, da diese nach dem neuen Ansatz auch Fertigungsimperfektionen direkt berücksichtigen.

II.1.1 Klassifizierung von Schadensereignissen an Rotorblattstrukturen

In diesem Abschnitt werden die Arbeiten zu den Arbeitspaketen 2.1 zusammengefasst.

Zu Beginn der Referenzmodellbildung von Subkomponenten wurde eine Datenbasis von Schadensereignissen an WEA-Rotorblättern erarbeitet. Typische Fehlerfälle sind:

- Erosion (durch Regen, Hagel usw.)

- Blitzschlag
- Laminatbruch (in Haut oder Gurt)
- Ablösung/Auftrennung von verschiedenen Strukturkomponenten (Versagen von Klebenähten, was vor allem an der Hinterkante auftritt)
- Delamination

Ein Beispiel für einen Schaden an der Hinterkante eines Rotorblattes zeigt Abbildung 1. Ab dem Übergang in das Sandwich-Material nimmt der Schaden einen geraden Verlauf. Auf der Innenhaut des Sandwich-Materials ist der Riss nicht zu sehen.

Abbildung 1: „ZickZack"-Schaden an der Hinterkante eines Rotorblattes

Delaminationen zählen zu den typischen Fehlerfällen, wobei Schäden zu unterscheiden sind, die im Laminat auftreten oder in einem Versagen der Klebschicht (adhäsives/kohäsives Klebschichtversagen) bestehen. Im Projekt wurden Delaminationen im Laminat berücksichtigt, während Schäden in der Verklebung nicht betrachtet wurden.

Die Schäden wurden nach ihren strukturmechanischen Schadensursachen und Auswirkungen klassifiziert. Die Fehlerfälle Erosion und Blitzschlag wurden in der zu entwickelnde Methode nicht berücksichtigt, da sie keine last- oder materialbedingten Ursachen haben. Ein Laminatbruch und ein sich ausbreitender Schaden an der Hinterkante sowie eine Delamination können die folgenden Ursachen haben:

- Unterdimensionierung (außer für Delamination)
- Produktionsfehler
- Transportschäden

Allerdings sind die realen Ursachen eher nebensächlich, da sie schwer zu verhindern sind. Aus diesem Grund sollten diese zwei Schadensszenarien Laminatbruch und Delamination mit der neuen Methode abbildbar sein.

Sofern der Schaden der Verklebung auf eine Delamination im Grundlaminat zurückzuführen ist, kann dieser mit dem Reduktionsmodell direkt berücksichtigt werden. Wenn die Verklebung innerhalb der Klebeschicht versagt, kann dies nicht direkt in der Reduktionsmethodik abgebildet werden. Hier soll versucht werden, einen Ansatz für die Berücksichtigung der Klebenaht zu benutzen, welcher den Geschwindigkeitsvorteil der Reduktionsmethodik nicht negativ beeinflusst.

In der am ISD entwickelten Methode ist aktuell noch kein Schadensszenario direkt implementiert. Auf Grund der Verzögerungen durch Personalwechsel und weiterer Schwierigkeiten wurde sich zunächst auf die Reduktionsmethodik konzentriert. Allerdings ist die Implementierung des Laminatbruchs fest vorgesehen, und „einfach" umsetzbar. Allerdings ist nicht genau klar, wann das Erfolgen wird.
Für die Berücksichtigung der Delaminationen wurde der Ansatz gestartet, dass dieser über ein mL-Modell implementiert werden könnte, welches in Abschnitt II.1.5 näher erläutert wird. Da der homogenisierte Ansatz keinerlei Informationen über den Schichtaufbau mehr enthält, ist diese Berücksichtigung um einiges schwieriger als das Laminatversagen.

II.1.2 Referenzmodell einer Subkomponente, Experimente und Validierung

In diesem Abschnitt werden die Arbeiten zu den Arbeitspaketen 2.2 und 5.3 zusammengefasst.

Es sollte eine Referenzstruktur für einen Subkomponententest definiert werden, die zum einen im Experiment einen in WEA-Rotorblättern relevanten Schadensfall abbildet und die sich zum anderen für die Validierung eignet. Dazu wurden zwei grundsätzliche Tests geplant, die entweder eine detaillierte Subkomponente darstellen, oder eine Ersatzstruktur, welche die gleichen Schadensmechanismen zeigt.

Als Referenzstruktur sollte zunächst eine Rotorblatthinterkante dienen. Diese Struktur wurde recht schnell im Projekt aber als zu komplex angesehen, um damit eine neue Berechnungsmethode zu validieren. Rotorblatthinterkanten, wie sie im mittleren Bild der unteren Reihe auf Abbildung 1 zu sehen sind bestehen aus verschiedenen Sandwichbereichen, monolithischen Laminatbereichen und Verklebungen. Einen Test zu entwickeln, der ein oder mehrere spezielle Schadensereignisse zeigt wurde als unrealistisch eingeschätzt. Daher wurden Einzelkomponenten erdacht, an denen zunächst einzelne Aspekte des Strukturverhaltens validiert werden können. Wenn diese einzeln funktionieren, könnten in zukünftigen Arbeiten komplexere Strukturen untersucht werden. Anstelle der Rotorblatthinterkante wurde von zwei anderen Subkomponenten ausgegangen. Eine Komponente sollte aus einem monolithischen Laminat bestehen, um das Laminatversagen des neuen Reduktionsmodells zu validieren. Hier wurde auf einen Standard-Open-Hole Versuch zurückgegriffen. Eine zweite Komponente soll einen Sandwichaufbau enthalten, wie er in den flächigen Bereichen des Rotorblatts zu finden ist. TECOSIM hat sich im Projekt auf die Auslegung der Sandwichversuche konzentriert, da diese für die Validierung des Simulationsmodells als Grundlage des mL-Modells für Delaminationen ein wichtiger Baustein war.

Ist die Deckschicht eines Sandwiches lokal delaminiert, beispielsweise auf Grund eines Blitzschlags, führt dies unter Druckbelastung zu lokalem Beulen und infolgedessen auch zu einem zunächst unkritischen Anwachsen der Delamination. Für die Abbildung dieses Effektes wurden im Projekt Ideen entwickelt, allerdings noch nicht ins Reduktionsmodell integriert. Wie sich ein Element mit Delamination definierter Größe verhält, soll über ein mL-Modell berücksichtigt werden. Für das Wachstum von Delaminationen und auch das Zusammenwirken von mehreren delaminierten Elementen gibt es aktuell aber noch keine Lösungsansätze.

Um das mL-Modell zu erstellen, sollte keine aufwendige Versuchsreihe, sondern Simulationen durchgeführt werden. Die verwendete Simulationsmethodik sollte anhand von Subkomponententests validiert werden. Um die besten bzw. aussagekräftigsten Konfigurationen zu finden hat TECOSIM eine Analyse zur Auswirkung von Schäden (Effects of Defects Analyse) durchgeführt, um die kritischen Kombinationen von Delaminationsgröße und Drucklast für gegebene Sandwichstrukturen zu finden. Hierfür wurde ein Modellgenerator für eine parametrisierte Sandwichstruktur erstellt. Folgende Parameter wurden vorgesehen:

- Abmessungen des Sandwiches
- Laminataufbau der Deckschicht
- Dicke des Sandwichkerns
- Material für Deckschichtlaminat und Sandwichkern
- Größe und Ort einer Delamination zwischen Deckschicht und Sandwichkerns

Der Modellgenerator wurde zunächst als modeFrontier-Prozess zur automatisierten Analyse von verschiedenen Parameterkombinationen aufgebaut (Abbildung 2). Im späteren Verlauf wurde das Tool auf pSeven geändert.

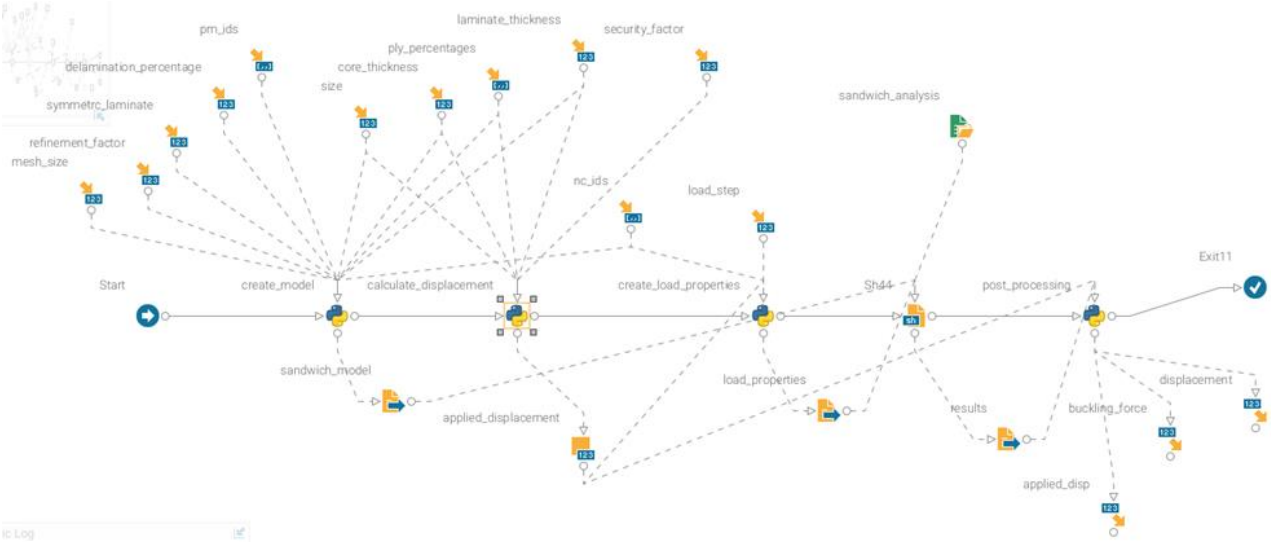


Abbildung 2: Simulationsprozess für die Parameteruntersuchungen

Um nichtlineare Rechnungen effizient zu starten, muss ein Lastinkrement gewählt werden, welches klein genug ist, dass der erste Beul-Mode auch getroffen wird. Zugleich muss es groß genug sein, dass nicht zu viel Rechenzeit in einem uninteressanten Bereich verloren geht. Für diesen Zweck wurde mittels einer analytischen Beulformel die Beullast bestimmt, die zunächst unbekannt ist. Es zeigte sich aber, dass dieser Wert oftmals stark abweicht. Aus diesem Grund wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um

herauszufinden, um welchen Faktor der analytisch bestimmte Wert vom linearen Beulwert abweicht. Diese Abweichung wurde mit ca. 0,5 bestimmt. Infolgedessen muss der analytisch bestimmte Wert mit diesem Faktor multipliziert werden, um hinreichend gute Startwerte für die nichtlineare Beulrechnung zu erhalten.

Der Parameterraum für die Subkomponententests (Abmessungen und Material des Sandwiches sowie Größe und Ort einer Delamination) wurde mit dem Projektpartner ISD hinsichtlich von Abmessungen der Proben und Schäden festgelegt. Da das ISD die Subkomponententest gefertigt und auch getestet hat musste zunächst festgelegt werden, welche Materialien gekauft werden konnten, welche Probengrößen gefertigt werden können und welche Kräfte auf den zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen erzeugt werden können, damit die Parameterstudie auch Anwendung finden kann.

Für die in der Simulation einzusetzenden Materialmodelle wurden Materialkarten erstellt. Dazu wurden Werkstoffe ausgewählt und Materialkennwerte ermittelt. Die Kooperationspartner wählten das Material Seatex E-Glasfaser mit RIMR035c-Harz aus, das auch in der Rotorblattproduktion in großem Umfang eingesetzt wird. Für die Seatex E-Glasfaser mit RIMR035c-Harz wurden Eigenschaften für die Materialkarten bestimmt bzw. der Literatur entnommen. Darüber hinaus wurde als Kernwerkstoff Rohacell 110S gewählt. Auch diese kommt in der Windindustrie zum Einsatz.

Mit dem Modellgenerator wurden Parameteruntersuchungen hinsichtlich Effekten von Delaminationen durchgeführt, mit der die Komponententests, welche am ISD geplant waren, ausgelegt werden konnten. Dazu wurden mit dem Modellgenerator verschiedene Plattengrößen und Kerndicken ausprobiert, um ein Beulverhalten zu erzielen, welches innerhalb der Parameter der geplanten Prüfmaschine liegt. Anschließend wurde eine Parameterstudie mit verschiedenen Schadensgrößen durchgeführt, wobei der Schaden in seiner Breite zwischen 1/3 und 1/1 der Probenbreite und in seiner Höhe zwischen 20 – 100 mm variiert wurde (Abbildung 3). Im delaminierten Bereich wurden die Elemente der Deckschichten durch die Verwendung duplizierter Knoten von den Kernelementen abgetrennt. Simuliert wurde ein Lastfall mit einer seitlich aufgebrachten Kraft. Um die Versuchsvorrichtung einfach zu halten, sollte ein einachsiger Spannungszustand im Test nachgestellt werden und die unbelasteten Ränder sollten frei bleiben. Dieser einfachere Versuchsaufbau sollte auch dazu dienen Test und Simulation besser abgleichen zu können. Bei komplexen Versuchen können erfahrungsgemäß auch komplexe Versagensmechanismen auftreten, die dann einen Abgleich zwischen Versuch und Simulation erschweren.

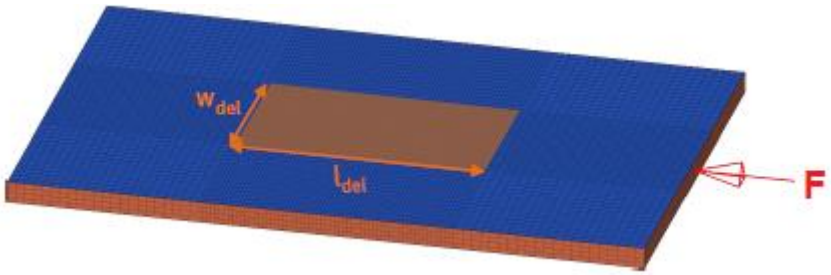


Abbildung 3: Parameterstudien an Platten zur Untersuchung des Effektes von Delaminationen, die im Zentrum der Platten auf einer Seite eingebracht sind

Die Studie wurde noch erweitert, um zu untersuchen, inwieweit die Schadensform einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dazu wurde das Modell modifiziert, um neben rechteckigen auch ellipsoide Schadensformen zu ermöglichen. Es zeigte sich, dass die Form weitgehend unbedeutend ist, sondern dass hauptsächlich die Flächengröße der Delamination die Beullast bestimmt (siehe Abbildung 4 bis Abbildung 6).

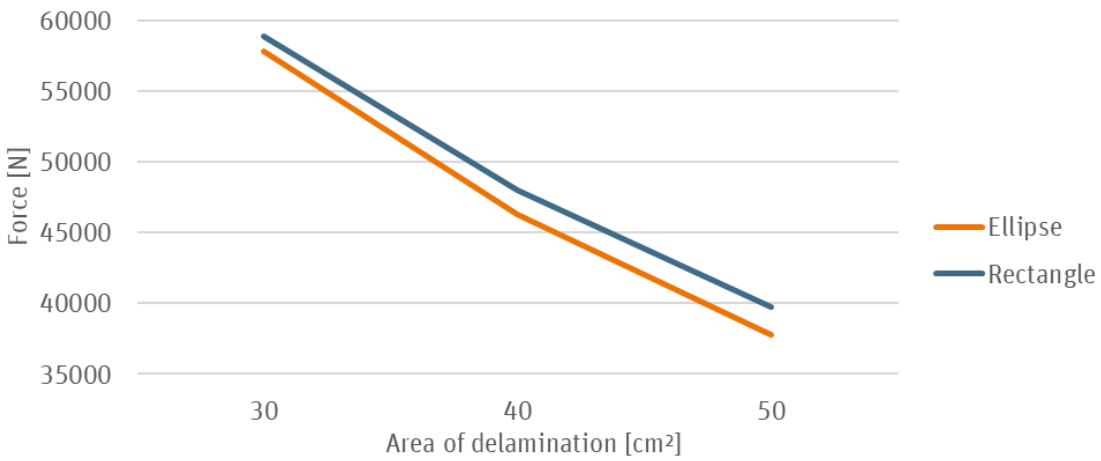


Abbildung 4: Abhängigkeit der Beullast von der Flächengröße der Delamination für rechteckige und ellipsoide Schadensformen (Länge zu Breite 1:1)

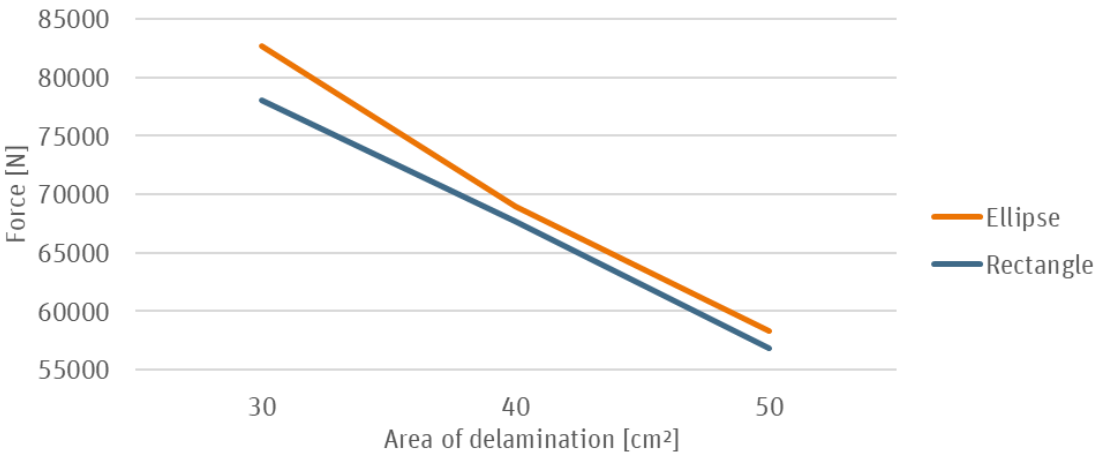


Abbildung 5: Abhängigkeit der Beullast von der Flächengröße der Delamination für rechteckige und ellipsoide Schadensformen (Länge zu Breite 1:5)

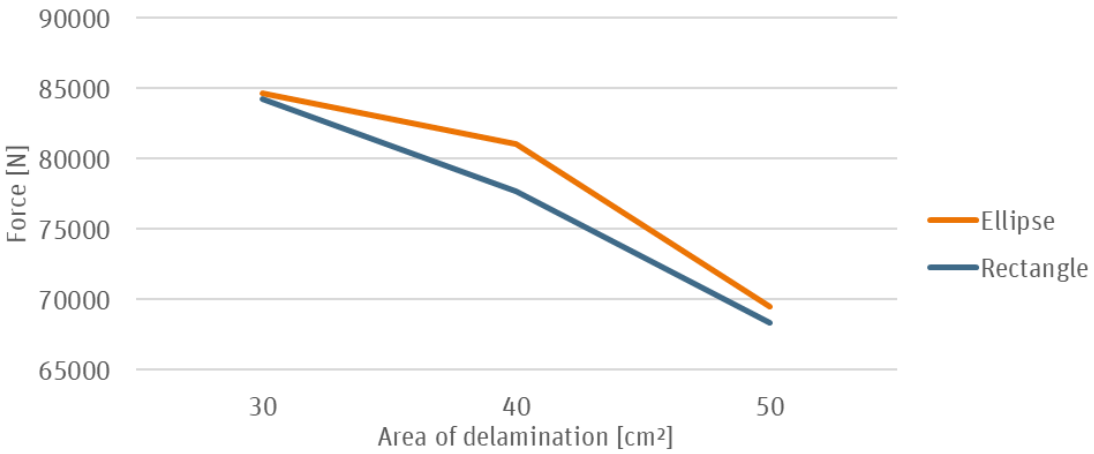


Abbildung 6: Abhängigkeit der Beullast von der Flächengröße der Delamination für rechteckige und ellipsoide Schadensformen (Länge zu Breite 3:1)

Bei den simulierten Konfigurationen waren höchstens 6 % Abweichung bei der Beulkraft zu beobachten. Die Abweichungen der Beulkraft treten in beiden Richtungen auf und scheinen unabhängig zu sein von der Abweichung der Größe des delaminierten Bereichs. Da die Abweichungen im Vergleich zu den zu erwartenden Fertigungsfehlern relativ gering waren, war es ausreichend, die Tests mit einer Form der Delamination durchzuführen. Aufgrund des einfacheren Herstellungsverfahrens wurde die rechteckige Form verwendet werden.

Nach Abschluss der Untersuchung und Durchsprache der Ergebnisse haben sich die Kooperationspartner auf eine Probengeometrie von 200 x 300 mm mit einer Kerndicke von 10 mm und einem Decklagenaufbau von ±45° geeinigt.

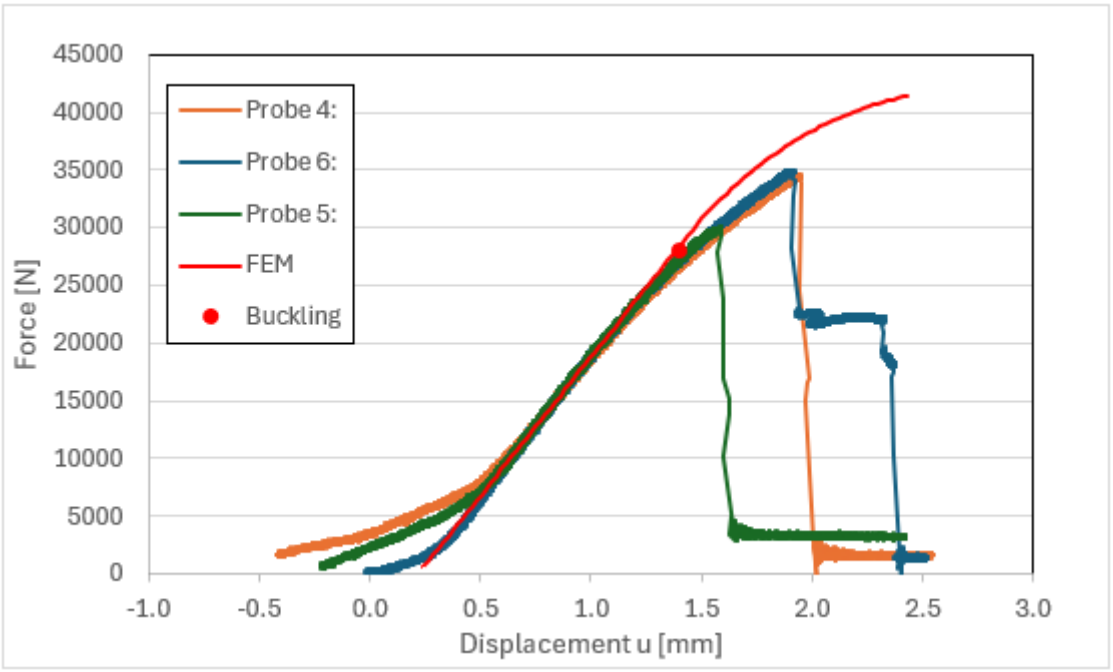
Die Versuche konnten leider erst sehr spät im Projekt vom Projektpartner ISD durchgeführt werden und wurden anschließend bei TECOSIM ausgewertet (Siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Beulwertvergleich der Subkomponentenversuche an der Delaminationssubkomponente

Konfiguration	**Versuche**	**Simulation**	**Abweichung**
Ohne Delamination	Proben 1-3: 41,37 kN	71,57 kN	+73.0%
W 65mm x H 40mm	Proben 7-9: 49,58 kN	45,67 kN	-7.9 %
W 200mm x H 40mm	Proben 4-6: 33,27 kN	29,54 kN	-11.2 %

Dabei stellte sich zunächst heraus, dass die Versuche ohne Delamination keine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen zeigten. Dazu kam, dass bei diesen Proben der ermittelte Beulwert kleiner war als bei den Proben mit kleiner Delamination. Da diese Proben unabhängig von den anderen 6 Proben gefertigt wurden, kann hier eine Fertigungsabweichung nicht ausgeschlossen werden. Da aber keine stichhaltige Erklärung dafür gefunden werden konnte, wurde auf eine weitere Auswertung dieser Probenreihe verzichtet. Allerdings zeigten die beiden Varianten mit künstlich eingebrachten Delaminationen sehr gute Übereinstimmungen mit den Simulationsergebnissen und das war an dieser Stelle das viel wichtigere Ergebnis.

Die Abweichungen zwischen Simulation und Versuch kann mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren, Fertigungsabweichungen und der Bestimmung des Beulpunktes erklärt werden. Während die Proben der Charakterisierungsexperimente für das Saertexmaterial mit 51-55% Faservolumengehalt (FVG) (Mittelwert 53%) gefertigt wurden, wiesen die Proben für die Delaminationsversuche FVGs von 42-44% (Mittelwert 43%) auf. Dies zeigt, dass allein das Fertigen von FVK mit vergleichbaren Eigenschaften eine Herausforderung für sich ist. Darüber hinaus ist aber auch die Bestimmung des Beulpunktes in Realität nicht so ohne weiteres möglich. In Abbildung 7 sind die Kraftwegkurven für die Proben mit der großen Delamination und die dazugehörigen Simulationsergebnisse dargestellt. Während in der linearen Beulanalyse ein Wert berechnet wird, für den die Struktur den ersten Beulmode annimmt, ist in Realität oder auch der nichtlinearen Analyse zunächst nichts zu sehen. Erst wenn man die Simulationsergebnisse etwas anders auswertet und die Steifigkeit berechnet dF/du, zeigt sich ab wann die Probe Steifigkeit verliert, was ein Indiz für das Ausbeulen ist. Hier wurde ein Steifigkeitsabfall um 1% von der initialen Steifigkeit als Maß herangezogen.



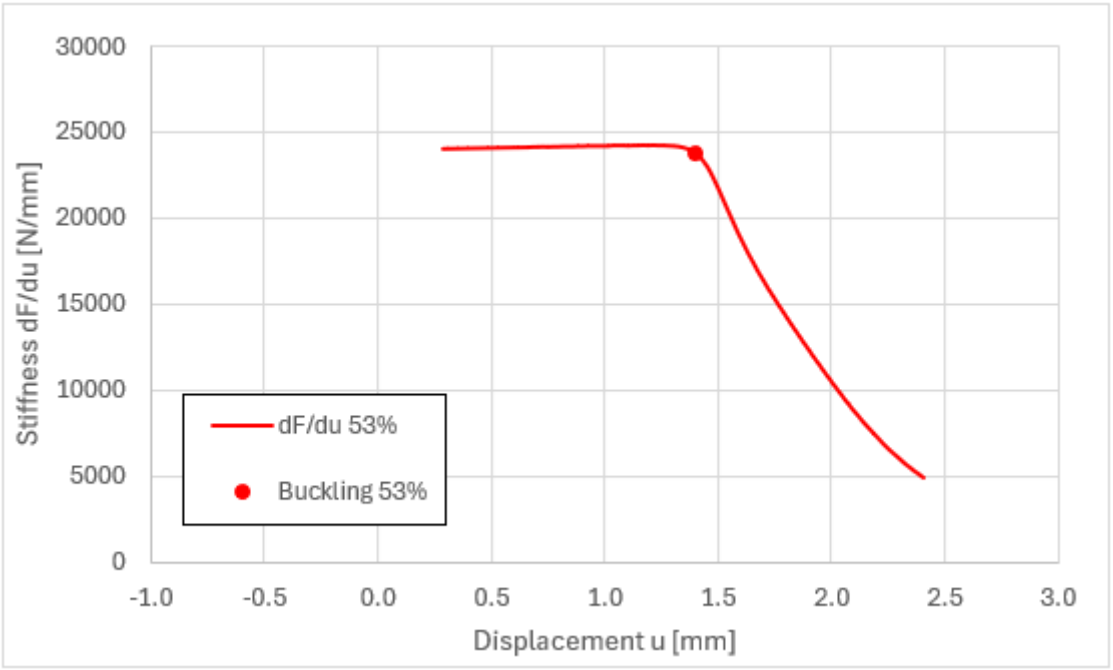


Abbildung 7: Vergleich der Versuche mit der 200x40mm Delamination mit den nichtlinearen Simulationsergebnissen

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit den nicht-linearen Versuchsergebnissen zeigt auch, dass die Simulation etwas zu steif ist. Während die Simulationskurve zu Beginn eher unter den Versuchen liegt, steigt sie ab 1.5mm Verformung über das Lastniveau der Versuche. Dieser Unterschied lässt sich gut mit den unterschiedlichen Faservolumengehalten erklären. Es wurde anhand der Mischungsregel versucht die Materialkennwerte auf den niedrigeren FVG von 43% in den Delaminationsproben umzurechnen. Aber diese damit ermittelte Last Verschiebungskurve zeigt eine zu geringe Steifigkeit.

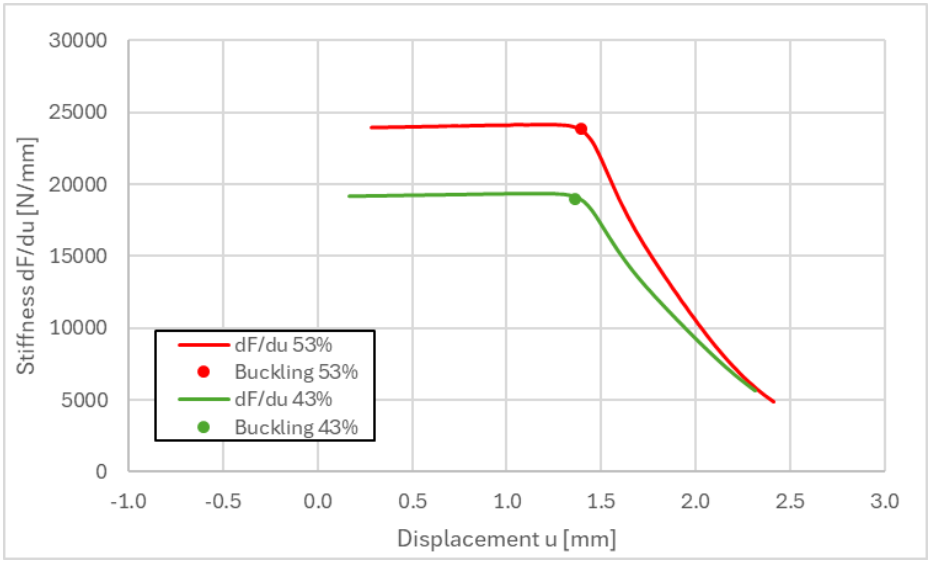


Abbildung 8: Vergleich der nichtlinearen Simulationsergebnissen mit 53% (original) und 43% FVG

Während der Ansatz den Steifigkeitsabfall zu nutzen, um den Beulpunkt zu bestimmen für die Simulationsergebnisse recht einfach anzuwenden ist, funktioniert er für die Versuchsergebnisse nicht ohne weiteres. Da die Versuchsergebnisse lokal sehr schwanken, müssen diese noch gefiltert werden, bevor sie weiterverarbeitet werden können. Da die Versuchsergebnisse aber erst nach offiziellem Projektende zur Verfügung gestellt werden konnten, war nicht mehr die Zeit diese Arbeiten auf Seiten von TECOSIM durchzuführen. Deshalb wird für die Versuche weiterhin der Beulwert mit dem maximalen Kraftwert der Versuche angegeben. Hier wäre es sicher interessant, wenn die Filterung erfolgreich ist, die Daten noch zusammenzuführen.

II.1.3 Reduktionsmodell und Charakterisierungsexperimente

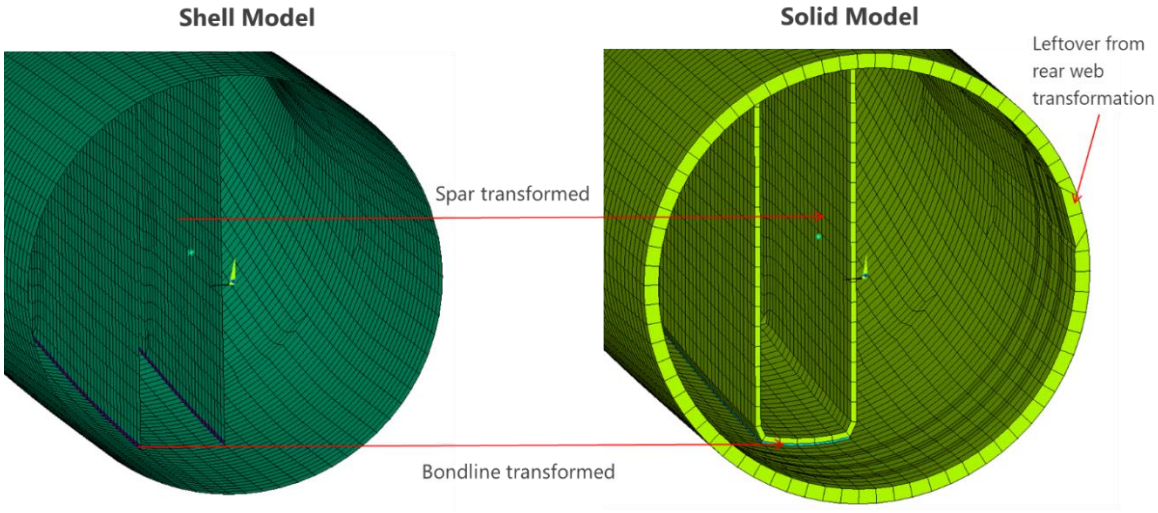
In diesem Abschnitt werden die Arbeiten zu den Arbeitspaketen 2.3, 3.1, 3.3, 5.1 und 6.1 zusammengefasst.

Bei der Entwicklung und Simulation mit der Reduktionsmethodik war TECOSIM überwiegend ein stiller Partner, da die Arbeiten beim ISD stattfanden. Allerdings waren die Diskussionen über die Methodik für die eigenen Arbeiten sehr wichtig, um die Methoden so zu entwickeln, dass wenn sie in die Reduktionsmethodik integriert werden, auch einfach implementiert werden können und sinnvolle Schnittstellen aufweisen.

Die Entwicklung des neuen, schnellen Strukturmodellansatzes für Rotorblätter sollte auf einem Reduktionsmodell basieren, das ein quasi-orthotropes Materialverhalten aufweist. Schichtversagen und Delamination sollten Teil des Reduktionsmodells sein. Die Effizienz des neuen Verfahrens war auch mit dem notwendigen Detaillierungsgrad der Modellbildung von Schädigungen verknüpft. Vom ISD wurde für das zu entwickelnde Reduktionsmodell für die Gesamtstruktur ein Detailierungsgrad festgelegt. Die weitere Entwicklung sah vor, dass vom ISD die homogenisierten, nichtlinearen Eigenschaften mittels nichtlinearer Last-Verschiebungskurven berücksichtigt werden. Diese können mittels aufwendiger Simulationen, anhand von Repräsentativen Volumen Elementen (RVE - Strukturausschnitt mit periodischen Randbedingungen) oder mit dem von TECOSIM entwickelten schichtbasierten analytischen Python-Tool erstellt werden (Siehe Abschnitt II.1.4) wobei bis zum Ende des Projektes am Reduktionsmodell gearbeitet wurde und der Vergleich der Ergebnisse basierend auf beiden Homogenisierungsvarianten noch nicht durchgeführt werden konnte.

Dann war geplant, dass TECOSIM das Reduktionsmodell in die Gesamtsimulation des Rotorblattes bzw. für die Verwendung in der ANSYS-Umgebung einbaut. Im Verlauf des Vorhabens hat es sich allerdings als sehr aufwendig bzw. unmöglich erwiesen, das Reduktionsmodell in die ANSYS-Umgebung einzubinden. Denn hierbei hätte es sich um eine Neuentwicklung eines Elementes in ANSYS gehandelt, vergleichbar zu den Aktivitäten bzw. Umfängen des ISDs für ABAQUS, und nicht - wie initial angenommen – um die Entwicklung eines Add-On-Skriptes, welches die Funktionalität bei ANSYS einbindet. Auch das ISD hat seinen Plan mehrfach geändert und entwickelte zunächst eine User-Material, dann ein User-Element und musste aber wieder zurück zu einem User-Material wechseln.

Um das Reduktionsmodell dennoch auf Rotorblattebene testen zu können und einen sinnvollen Ausgleich für die geplanten Arbeiten der Integration der Reduktionsmethodik in ANSYS zu haben, hat TECOSIM ein vorhandenes Rotorblattmodell von ANSYS in ABAQUS konvertiert. Dieses war auch ursprünglich als Basis für die Tests der Reduktionsmethodik auf Rotorblattlevel bei ANSYS geplant. Mit dem zu Abaqus konvertierten Modell kann beim ISD der Einsatz der Reduktionsmethodik getestet werden. Das Blattmodell basiert auf dem Rotorblattmodell, welches im Forschungsprojekt HANNAH (FKZ 0324345E) optimiert wurde. Das initiale Rotorblatt-FE-Modell wurde vom damaligen Forschungspartner Fraunhofer IWES zur Verfügung gestellt. Aus dem finalen Rotorblattmodell wurden zwei weitere Blattmodelle abgeleitet.
Da die Reduktionsmethodik auf Elementen erster Ordnung basiert, mussten die vorhandenen Elemente zweiter Ordnung zunächst konvertiert werden. Darüber hinaus baut die aktuell beim ISD entwickelte Reduktionsmethodik auf SOLID-Elementen auf, das Rotorblatt hingegen ist ursprünglich aus Schalenelementen aufgebaut. Deshalb wurden Ansätze entwickelt, welche die abschnittsweise Konvertierung der Schalen in SOLID-Elemente ermöglicht. Diese Konvertierungen wurden in ANSYS durchgeführt (mit Unterstützung von Python). In Abbildung 9 sind die Modellierungsunterschiede für zwei ausgewählte Schnitte des Blattes dargestellt.



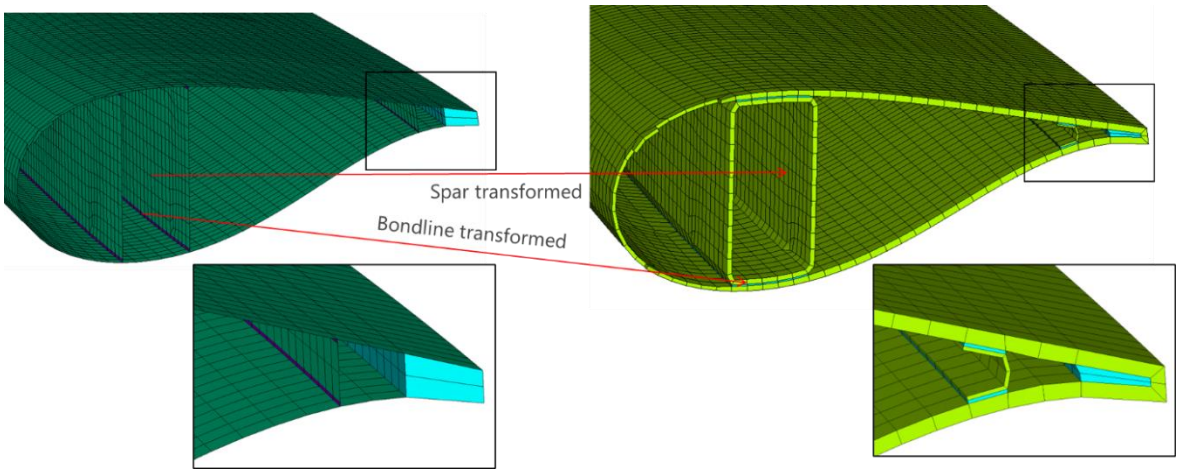


Abbildung 9: Rotorblatttransformation von Schalen- zu Solid-Elementen (oben Wurzelbereich, unten-Schnitt bei 25m Spannweite)

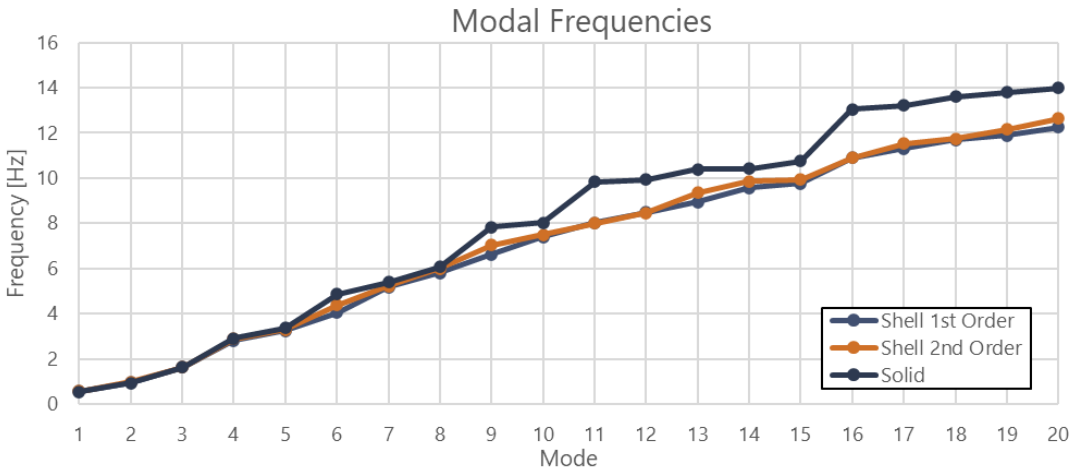


Abbildung 10: Vergleich der Eigenfrequenzen der drei ANSYS-Modellvarianten

Ein Vergleich des Strukturverhaltens der drei Modellvarianten auf Basis von Modalanalysen (Abbildung 10) zeigte sehr geringe Unterschiede in den unteren Moden (1-5 und 7-8). Mode 6 ist der erste Torsionsmode. Hier macht sich vor allem die andere Berücksichtigung der Gurte im Solid-Modell im Vergleich zu den Schalenmodellen bemerkbar. Auch bei den statischen Lastfällen zeigte sich ein etwas steiferes Verhalten des Solid-Modells im Vergleich zum Schalenmodell (Siehe Tabelle 3 für die Spalten ANSYS - Shell und ANSYS - Solid). Im Großen und Ganzen zeigen beide Modellvarianten aber sehr gut übereinstimmendes Verhalten.

Anschließend wurden sowohl das Schalenmodell erster Ordnung als auch das SOLID-Modell in ABAQUS konvertiert, da es angedacht ist, die Reduktionsmethodik auf Schalenelemente zu erweitern und somit eine gemeinsame Entwicklungsbasis bereitgestellt werden konnte. Ein Vergleich der Ergebnisse in ABAQUS und ANSYS kann (Tabelle 3) entnommen werden.

Tabelle 3: Vergleich der Blattspitzenverformung für drei ausgewählte statische Lastfälle für die FE-Modelle erster Ordnung (ANSYS und ABAQUS)

	Ansys - Shell	Abaqus - Shell	Ansys - Solid	Abaqus Solid
LC 1	4001.7 mm	3986.5 mm (-15.2 mm / -0.4%)	3881.9 mm (-119.8 mm / -3.0%)	3878.5 mm (-3.4mm / -0.1%)
LC 2	11670.4 mm	11631.3 mm (-39.1 mm / -0.3%)	11338.6 mm (-331.8 mm / -2.8%)	11329.3 mm (-9.3 mm / -0.1%)
LC 3	1706.3 mm	1697.4 mm (-8.9 mm / -0.5%)	1719.6 mm (13.3 mm / 0.8%)	1718.8 mm (-0.8 mm / -0.05%)

II.1.4 Homogenisierung

In diesem Abschnitt werden die Arbeiten zu den Arbeitspaketen 3.2 zusammengefasst.

Die Homogenisierung ist ein notwendiger Schritt, um vom schichtweisen und rechenintensiven Ansatz wegzukommen. Zweck der Homogenisierung ist die Ermittlung der nichtlinearen Eigenschaften des Gesamtlaminats, welches sich als Einzelschicht so verhält, wie die Kombination aller Einzelschichten, quasi „verschmierter" Laminateigenschaften. Ursprünglich war geplant, dieses Laminatverhalten per mL-Modellen zu ermitteln, die auf Basis von wenigen Laminatversuchen trainiert werden. Dieser Ansatz hat sich aber als nicht zielführend herausgestellt. Eine Alternativmethode ist die Erzeugung des homogenisierten Laminatverhaltens auf Basis von Repräsentativen Volumen Elementen (RVE - Strukturausschnitt mit periodischen Randbedingungen) mit Kontinuums-Schädigungsmodell. Dieses war beim Projektpartner ISD grundsätzlich vorhanden, musste aber noch überarbeitet werden. Sie wurde auch als Grundlage für das neue Reduktionsmodell herangezogen. Da in einem frühen Stadium des Projektes von TECOSIM noch davon ausgegangen wurde, dass die mit der RVE-Methode erzeugten Daten als Grundlage für das mL-Modell dienen sollten und diese RVE-Methode noch nicht vollständig lief, wurde eine Alternative bei TECOSIM entwickelt, wie man die homogenisierten Daten vereinfacht erstellen könnte. Dazu hat TECOSIM eine Methode auf Basis der klassischen Laminattheorie in der Programmiersprache Python entwickelt mit der die homogenisierten, nichtlinearen Eigenschaften ebenfalls erstellt werden können. Zunächst war nicht klar, welche Güte die so erzeugten Last-Verschiebungskurven im Vergleich der RVE-Methode haben würden, aber da sie aktuell sehr vielversprechend aussehen, soll auf jeden Fall untersucht werden, inwieweit sich dieses Tool eignet, die aufwendigere RVE-Methode zu ersetzen, um die homogenisierten Lastverschiebungskurven zu erstellen. Wenn beide Methoden vergleichbare Ergebnisse liefern, lässt sich der von TECOSIM entwickelte Ansatz nutzen, um Modell im aktuellen schichtbasierten Ansatz für die neue Methode sehr schnell zu konvertieren, in dem für jeden Laminataufbau im Modell automatisiert und in kürzester Zeit eine Materialkarte erstellt wird.

Der Ansatz nutzt ebenso wie die detaillierten schichtbasierten Kontinuumsmodelle des RVE-Ansatzes die nichtlinearen Last-Verschiebungskurven der Einzelschicht als Grundlage und bildet daraus schrittweise die homogenisierten Kurven für den Verbund. Abbildung 11 zeigt die Eingangsgrößen, für die Einzelschicht.

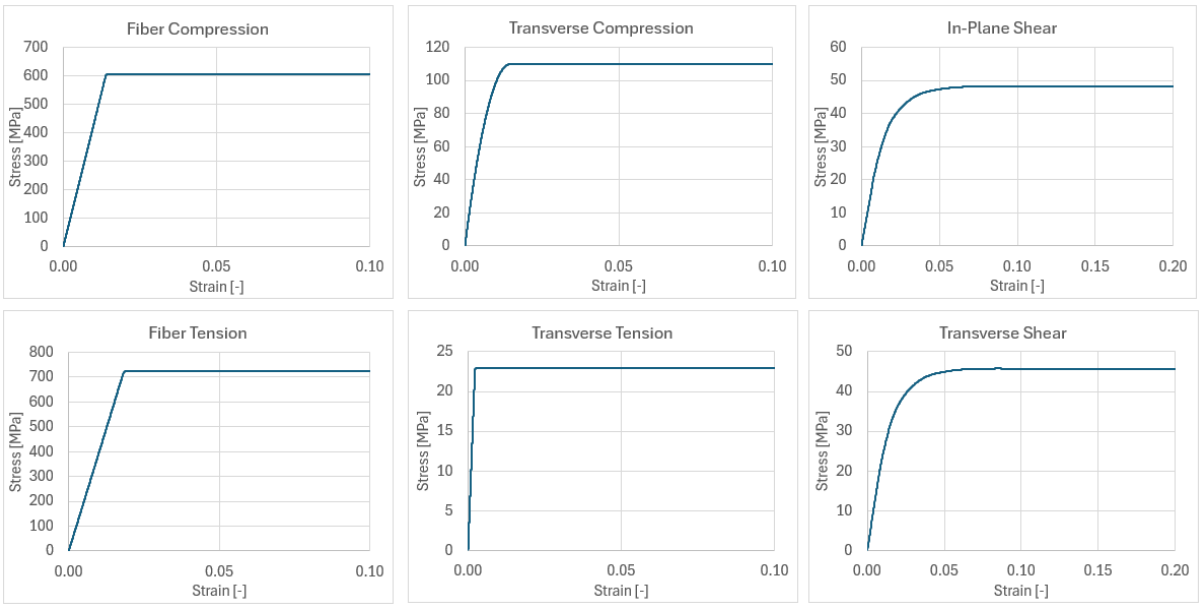


Abbildung 11: Last-Verschiebungskurven des Schichtmaterials als Eingangsgrößen (Druck, Spannung und Scherung) für das Saertex Material

Das Modell wurde getestet, um dessen Ergebnisse mit denen von detaillierten schichtbasierten Kontinuumsmodellen zu vergleichen. Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die Last-Verschiebungskurven für zwei verschiedene Laminataufbauten für die 9 verschiedenen Lastrichtungen (Zug/Druck/Schub).

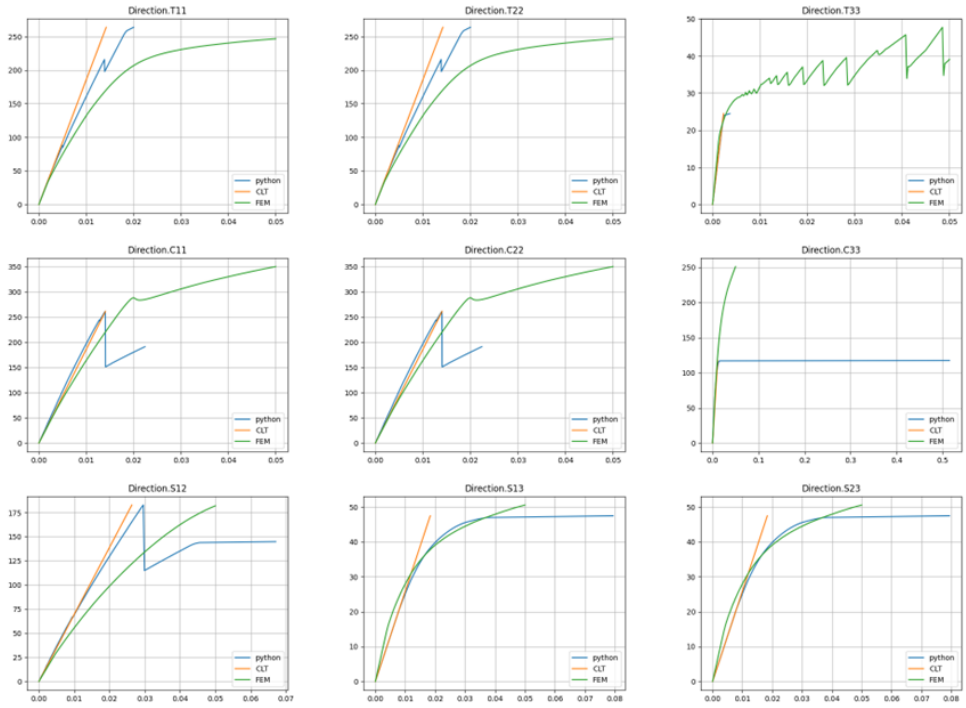


Abbildung 12: Zug- (obere Reihe), Druck- (mittlere Reihe) und Scherverläufe (untere Reihe) für das Saertex Material im Vergleich Python-Tool vs. CLT vs. FEM(RVE) (Output 25% 0° / 50% ±45° / 25% 90°)

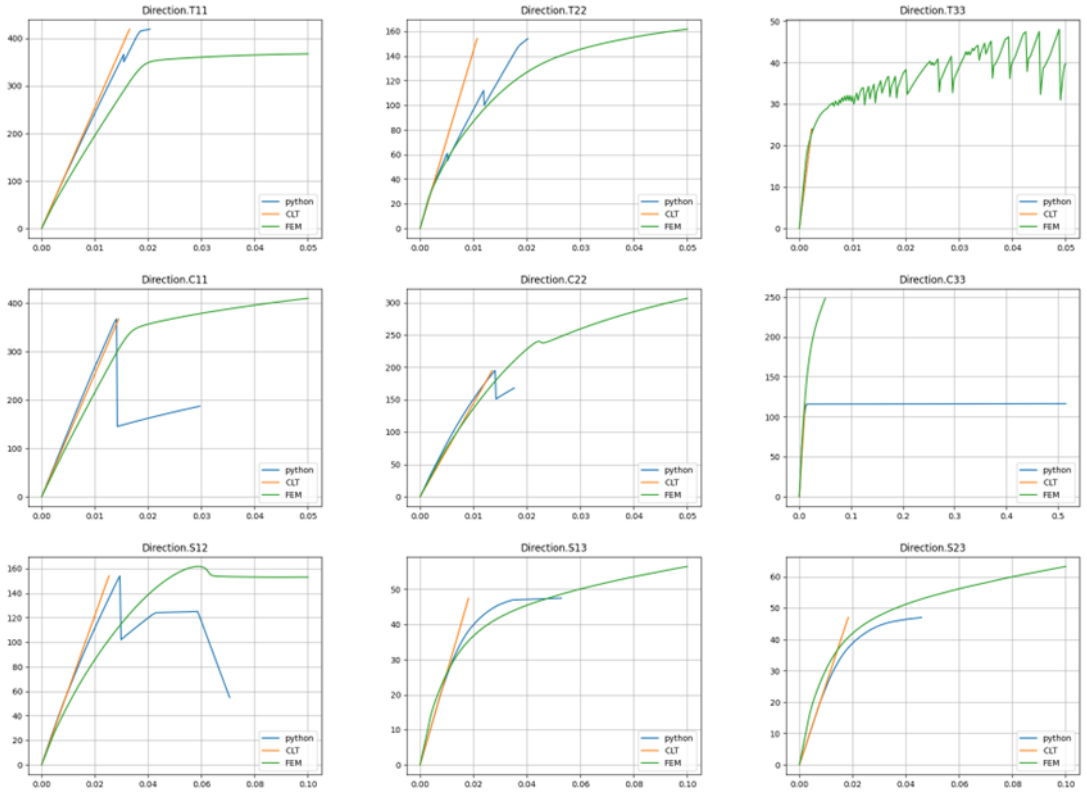


Abbildung 13: Zug- (obere Reihe), Druck- (mittlere Reihe) und Scherverläufe (untere Reihe) für das Saertex Material im Vergleich Python-Tool vs. CLT vs. FEM(RVE) (Output 50% 0° / 40% ±45° / 10% 90°)

Einige Lastrichtungen zeigen gute bis sehr gute Übereinstimmungen, während andere größere Abweichungen aufweisen. Die Abweichungen lassen sich überwiegend mit den verschieden Berechnungsansätzen begründen. Darüber hinaus wird im RVE-Ansatz aktuell noch kein Versagenskriterium berücksichtigt, während das Python-Programm mit dem Maximaldehnung-Versagenskriterium arbeitet. Andere Versagenskriterien könnten aber ebenfalls integriert werden. Das ISD wird die Ergebnisse, ihrer Reduktionsmethodik sowohl mittels RVE-homogenisierter als auch Python-homogenisierter Laminateigenschaften testen und die Ergebnisse gegenüberstellen.

Um die Nutzbarkeit des von TECOSIM entwickelten Ansatzes zu erhöhen und es Nutzern zu erlauben, zu untersuchen, wie sich unterschiedliche Orientierungsanteile auf die Eigenschaften des Laminats auswirken wurde eine kleine Benutzeroberfläche geschaffen, welche die verschiedenen Module zur Berechnung und Ausgabe kombiniert (Siehe Abbildung 14). Es erlaubt auch schnell zwischen verschiedenen Lagenmaterialien zu wechseln. Aktuell sind des SAERTEX-Windkraft-GFK, das 92145-Luftfahrt-GFK und das IM7 Luftfahrt-CFK implementiert, da hierzu vom ISD die Lageneigenschaften in vergleichbarem Format zur Verfügung gestellt wurden. Darüber hinaus wurde in dieses Programm auch die Export-Schnittstelle integriert, welche es ermöglicht, die Daten so herauszuschreiben, dass sie direkt in der Reduktionsmethodik vom ISD angewendet werden können.

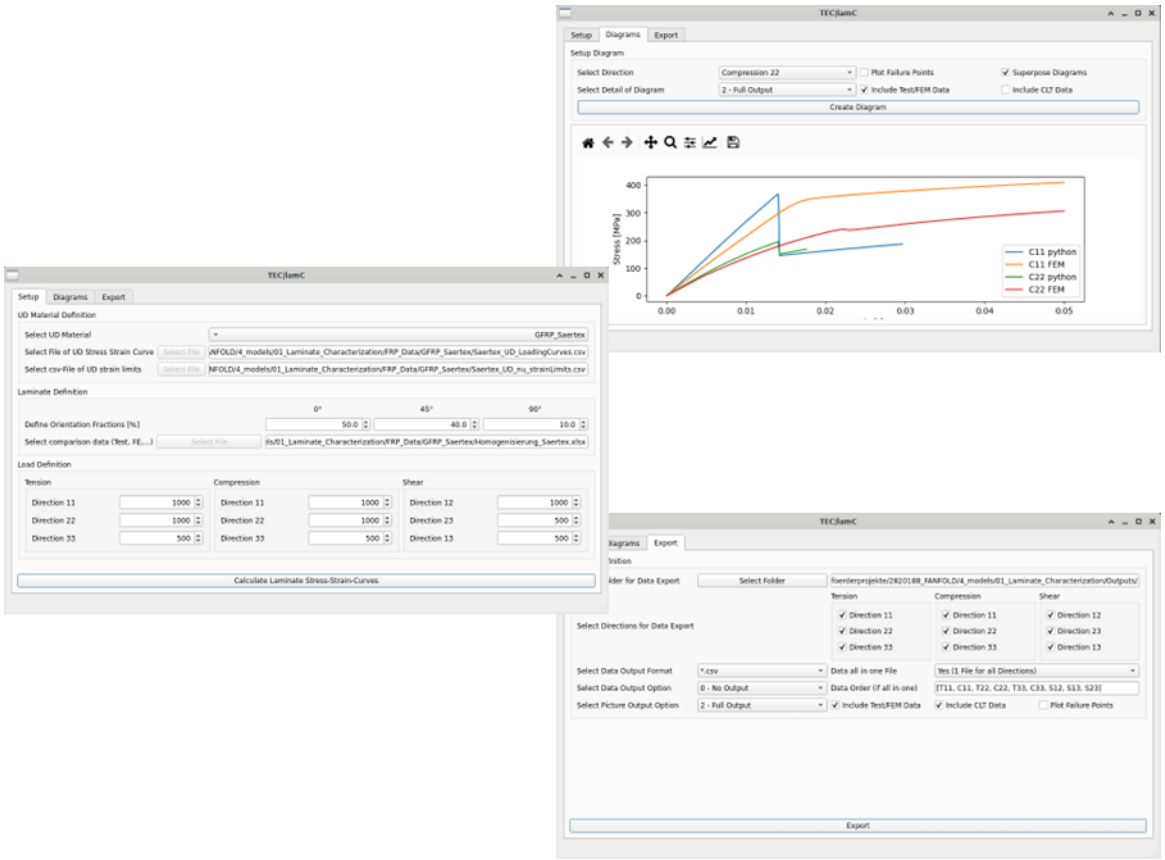


Abbildung 14: GUI für Python Tool zur Laminathomogenisierung

Darüber hinaus soll diese Oberfläche auch dazu dienen Funktionalitäten wie die Erzeugung von CAE-Materialkarten direkt zu ermöglichen. Auch wenn dann nicht die Reduktionsmethodik vom ISD genutzt werden kann, erlaubt diese Erweiterung doch auch die homogenisierten Laminate zu benutzen, ohne die Schichten berücksichtigen zu müssen. Hier will TECOSIM in den Austausch mit potenziellen Nutzern und Kunden gehen, um zu sehen, inwieweit hier Bedarf besteht.

II.1.5 Entwicklung einer geeigneten Methode des maschinellen Lernens für das Reduktionsmodell

In diesem Abschnitt werden die Arbeiten zu den Arbeitspaketen 4.1, 4.2, 4.3 und 5.2 zusammengefasst.

Ursprünglich war es geplant im Projekt FANFOLD die für die Charakterisierung von FKV umfangreichen Prüfungen, welche in der Durchführung aufwendig und kostenintensiv sind, durch den Einsatz des maschinellen Lernens (mL) auf einige wenige einfache Versuche zu reduzieren. Zur Vorbereitung des maschinellen Lernens sollten Dummy-Testdaten auf Basis von Last-Verschiebungskurven einer unidirektionalen (UD) Schicht und der klassischen Laminattheorie zum Evaluieren der verschiedenen angedachten mL-Modelle generiert werden (Siehe auch Abschnitt II.1.4). Damit sollten mL-Verfahren auf ihre Tauglichkeit zur Charakterisierung von FKV-Werkstoffen getestet werden. Für das maschinelle Lernen wurden folgende Struktureigenschaften als Merkmale (Features) festgelegt, die als Input für das mL-Modell dienen sollten:

- Lagenaufbau (prozentualer Anteil der Orientierungen)
- Materialauswahl (GFK/CFK)

Es wurde angestrebt, so wenige Merkmale wie möglich zu verwenden. Allerdings musste die Güte der Zielgrößen berücksichtigt werden, die durch die Berücksichtigung einer höheren Anzahl von Merkmalen möglicherweise gesteigert werden, könnte, um eine gute Vorhersage der Last-Verschiebungskurzen zu erzielen. Als Zielgrößen (Target) waren die Last-Verschiebungskurven des Gesamtlaminats geplant, wobei jede Kurve mit vier Parametern dargestellt werden sollte, um sowohl den linearen, als auch den nichtlinearen Teil eindeutig beschreiben zu können. Allerdings erschien es im weiteren Verlauf des Vorhabens immer fraglicher, inwieweit mL-Verfahren auf diesem Gebiet Vorteile bieten bzw. zu guten Ergebnissen führen können, insbesondere da hier erst Daten mit hohem Aufwand in Experimenten oder FE-Rechnungen mit einem Kontinuumsschädigungsmodell hätten produziert werden müssen. Darüber hinaus lieferte das Tool zum Generieren von Last-Verschiebungskurven (Siehe Abschnitt II.1.4) auf Basis der klassischen Laminattheorie vielversprechende Ergebnisse. Daher erschien es sinnvoller, das Tool weiterzuentwickeln und damit die benötigten Last-Verschiebungskurven direkt, ohne den Umweg des mL zu generieren. Falls diese Kurven nicht hinreichend sind steht immer noch der Weg mit dem Kontinuumsschädigungsmodell offen, um die homogenisierten Lastverschiebungskurven zu bestimmen.

Für eine Anwendung des maschinellen Lernens in der Reduktionsmethodik hat sich dann aber ein anderer Bereich herauskristallisiert. Wenn mit verschmierten Laminaten gearbeitet wird, geht jegliche Information verloren, was zwischen Schichtebenen passiert. Das maschinelle Lernen kann ein Ersatzmodell liefern, auf welches das Reduktionsmodell zugreift, wenn Delaminationen vorhanden sind. Dabei wird ein mL-Modell auf Basis von Delaminationssimulationen trainiert, um dem Reduktionsmodell ein Modell zur Verfügung zu stellen, wie es sich beim Auftreten von Delaminationen verhalten soll. Abzubildende Größen sind dabei eine variable Größe der Delamination, eine variable auf die Struktur wirkende Last, ein variabler Lagenaufbau usw. Als Antwort auf die aktuelle Last (Normallasten und Schublasten) liefert das mL-Modell zurück, wie sich eine Einheitszelle bzw. ein Strukturabschnitt verhält und welche Verformung vorliegt. Diese Information kann das Reduktionsmodell nutzen, um lokales Beulen intern abzubilden (z.B. lokale Steifigkeitsreduktion). Möglicherweise ist es mit dem Modell auch möglich zu testen ob Delaminationen wachsen. Dazu könnte man das Modell mit der aktuellen und größeren Delaminationen laufen lassen und für den aktuellen Lastzustand vergleichen, wo sich das lokale Element auf der Last Verschiebungskurve befindet. Wenn es auf Grund der neuen Delaminationsgröße bei niedrigerer Last die gleiche Verschiebung aufweist, kann das ein Indiz dafür sein, dass die Delamination wächst. Dieser Ansatz ist aktuell aber noch rein theoretischer Natur und weder mit Testdaten noch Simulationsdaten abgeglichen. Hierfür wäre ein Simulationsmodell nötig, welches wachsende Delaminationen hinreichend genau abbilden kann, um zu Vergleichen, ob sich der oben skizzierte Ansatz wirklich umsetzen lässt.

Um das mL-Modell trainieren zu können war es nötig Last-Verschiebungskurven von delaminierten Sandwichplatten zu haben. Da Versuche sehr teuer und aufwendig sind, sollte dieses Training auf Simulationsdaten basieren. Dafür wurde der Modellgenerator weiterentwickelt, der auch schon für die Parameteruntersuchung der Subkomponente erstellt wurde (Siehe Abschnitt II.1.2). Die größte Herausforderung bestand hierbei in der Idealisierung der Randbedingungen. Diese sollte die gleichzeitige Aufbringung von Normallasten und Schublasten ermöglichen. Da gleichzeitig das repräsentative Schalenelement aber auch gelagert werden muss, wurden hier mehrere Varianten ausprobiert.

Zunächst wurde der in Abbildung 15 gezeigte Ansatz favorisiert. An jeder Kante wurden Starre Körper (numerische Elemente mit unendlich hoher Steifigkeit) eingesetzt, um die Ränder eben zu halten und die Lasten gleichmäßig zu verteilen. Die Last wurde als Verschiebung an den Mitten der Kanten

aufgebracht. Um die Singularitäten in den Ecken auf Grund der starren Körper am Rand zu vermeiden, wurden diese ausgeschnitten.

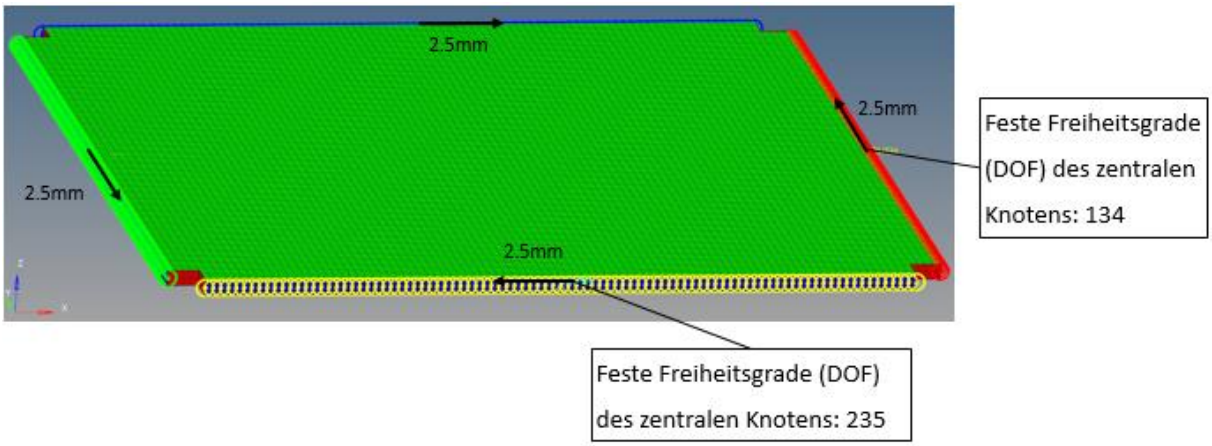


Abbildung 15: Idealisierung der Randbedingungen für einen repräsentativen Rotorblattschalenausschnitt (Hier: Aufbringen der Scherlast, alle vier Seiten beweglich)

Mit dieser Modellvariante wurden auch die ersten Simulationen durchgeführt. Allerdings zeigte sich bald, dass die starren Körper am Rand auch den eingeleiteten Kräften entgegenwirken und eine gleichmäßige Lasteinleitung nicht möglich war. Daraufhin wurde das Modell weiterentwickelt. Die starren Körper wurden über die Höhe eingebracht und die Koppelknoten der starren Körper mit aufeinander aufbauenden Koppelgleichungen entlang des Randes versehen. Damit werden ähnliche Eigenschaften wie im ursprünglichen Modell für die gleichmäßige Lasteinleitung am Rand ermöglicht, allerdings ohne dabei die Ränder in Längsrichtung zu versteifen. In dieser Variante ist es auch nicht mehr nötig, die Ecken auszusparen und die Lasteinleitungsknoten wanderten von der Mitte des Randes zu den Ecken, wie in Abbildung 16 zu sehen.

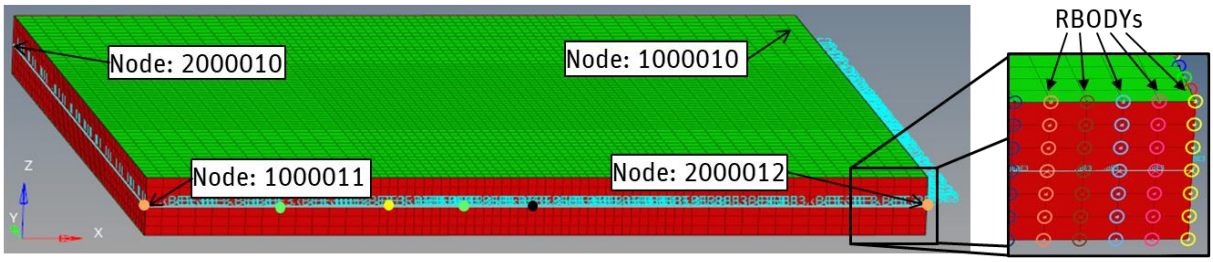


Abbildung 16: Modellbild für einen repräsentativen Rotorblattschalenausschnitt mit verbesserten Randbedingungen

Ein Vergleich der beiden Modellvarianten zeigte, dass die zweite Modellvariante für die verschiedenen Lastszenarien realistischere Ergebnisse liefert.

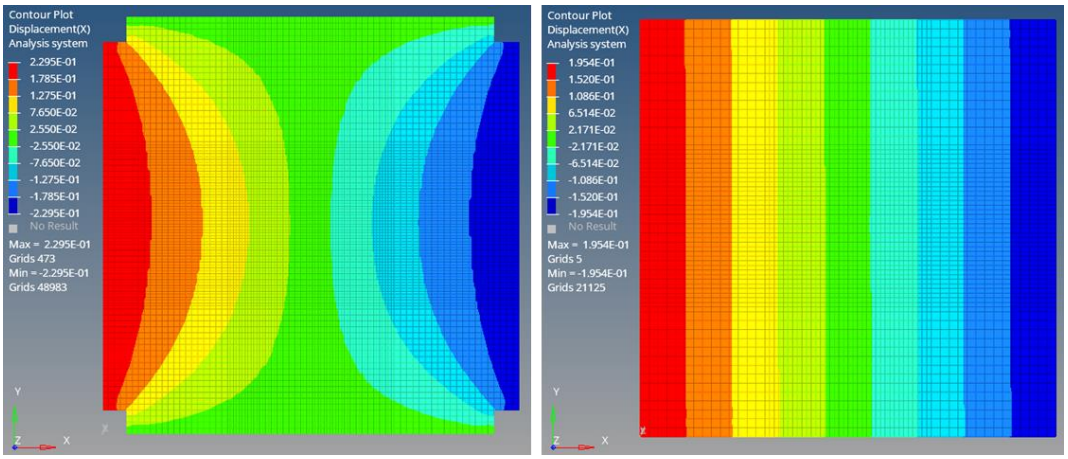


Abbildung 17: Vergleich der Verschiebungen für einen repräsentativen Rotorblattschalenausschnitt unter Normallast (X) mit verbesserten Randbedingungen

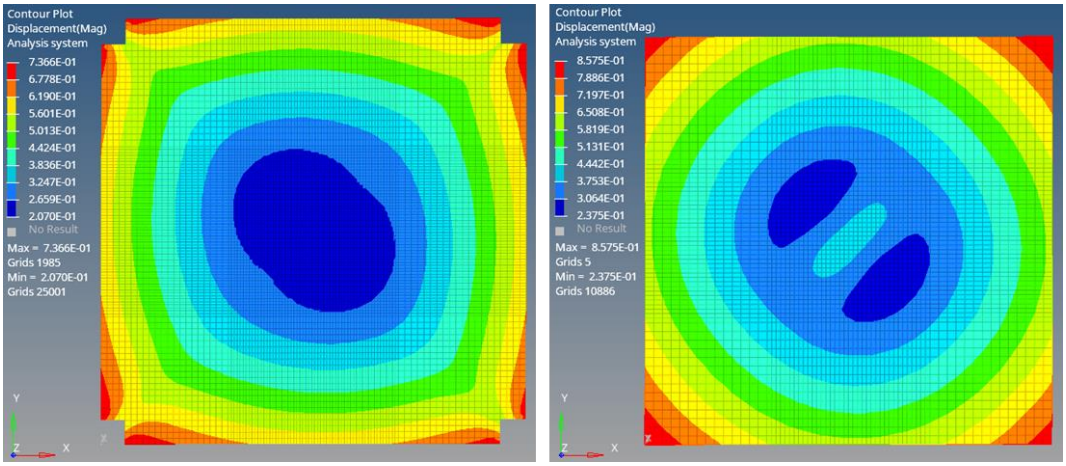


Abbildung 18: Vergleich der Verschiebungen für einen repräsentativen Rotorblattschalenausschnitt unter Schublast mit verbesserten Randbedingungen

Der Vergleich zeigt, dass die Beanspruchung des repräsentativen Schalenausschnitts mit den verbesserten Randbedingungen viel homogener ist als bei der ursprünglichen Variante der Randbedingungen.

Um Parameterstudien mit diesem Modell durchzuführen, wurden zwei Prozesse in der Prozess Integrations- und Design Optimierungs-(PIDO) -Software pSeven aufgebaut.

Der erste Prozess erlaubt es eine Strukturvariante zu berechnen und die Ergebnisse auszuwerten (Siehe Abbildung 19).

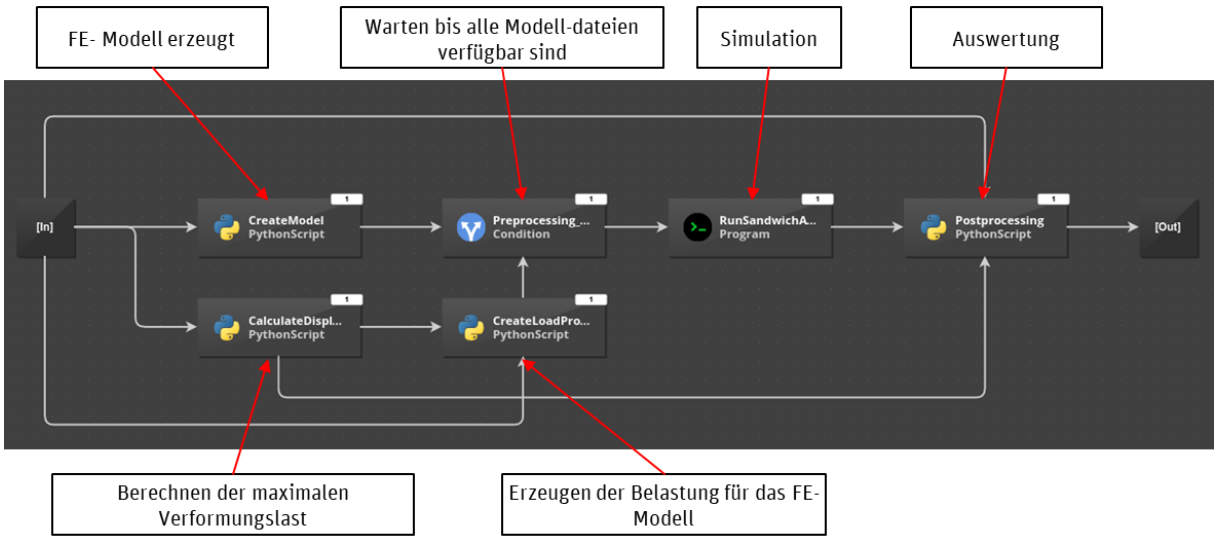


Abbildung 19: Prozess zur Berechnung einer Strukturvariante des Delaminationsmodells

Als Eingangsgrößen werden diesem Prozess alle Parameter gegeben, damit die Strukturvariante erzeugt werden kann, aber auch definiert, wo die Daten abgelegt werden sollen. In der Auswertung wurde darauf verzichtet schon bestimmte Features für das maschinelle Lernen zu berechnen, sondern die Rohdaten der Simulation herausgeschrieben. Das sind die Verformungen, Kräfte und Momente an jedem Lasteinleitungspunkt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da zum Zeitpunkt der ersten Läufe noch gar nicht klar war, welche Features für das maschinelle Lernen sinnvoll und notwendig sind. Darüber hinaus können die Daten so auch für andere Untersuchungen herangezogen werden und Fehler in der Bestimmung von Features können korrigiert werden, ohne dass die gesamte Parameterstudie wiederholt werden muss.

Um die Berechnung einer Strukturvariante herum, wurde ein weiterer Prozess aufgebaut, der die Durchführung der Parameterstudie erlaubt (Siehe Abbildung 20).

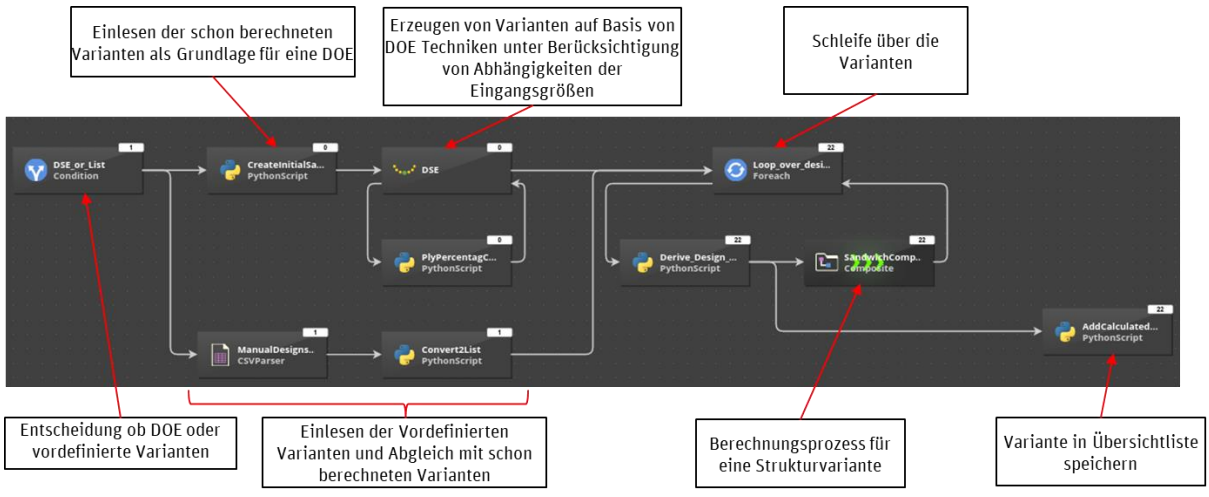


Abbildung 20: Prozess zur Durchführung der Parameterstudie

Dieser Prozess erlaubt sowohl die in pSeven eingebauten DOE-Techniken zu verwenden, als auch eine vordefinierte Liste mit Varianten zu berechnen. Darüber hinaus werden alle berechneten Varianten zentral abgespeichert, um zu verhindern, dass diese Varianten versehentlich nochmal berechnet werden.

Diese Funktionalität war wichtig, da die Berechnung einer Strukturvariante zwischen 10 und 30 Minuten dauert und die gesamte Parameterstudie in verschiedenen Phasen unterteilt wurde. Da jeder Teil-Run für sich alleinsteht, kann hier entweder leicht vergessen werden, eine neue Liste zu übergeben oder pSeven hat keinen Überblick mehr welche Varianten schon berechnet wurden. Mit dem so entwickelten Gesamtprozess wurde die Parameterstudie mit folgenden Parametern gestartet.

		Untere Grenze	Obere Grenze	Schrittgröße Training	Varianten-anzahl	Schrittgröße (Tool)	Varianten-anzahl
1	Kerndicke [mm]	10.0	40.0	10.0	4	1.0	31
2	Delaminationsgröße x-Ausdehnung [mm]	0.0	300.0	100.0	4	1.0	301
3	Delaminationsgröße y-Ausdehnung [mm]	0.0	300.0	100.0		1.0	
4	Decklagenlaminatdicke [mm]	2.0	4.0	2.0	2	0.1	21
5	0° Lagen-Anteil im Laminat [%]	0.0	0.0	0.0	1	0.0	1
6	±45° Lagen-Anteil im Laminat [%]	100.0	100.0	0.0	1	0.0	1
7	90° Lagen-Anteil im Laminat [%]	0.0	0.0	0.0	1	0.0	1
8	Lastanteil in x-Richtung [%]	-100.0	100.0	50.0	(5)	1.0	201
9	Lastanteil in y-Richtung [%]	-100.0	100.0	50.0	(5)	1.0	201
10	Lastanteil in xy-Richtung [%]	0.0	100.0	50.0	3	1.0	101
					2400-128*		8E11

Tabelle 4: Parameter für das Training von mL-Modellen
(Statt der 75 sich ergebenen Varianten der Lastanteilkombinationen (Zeilen 8-10) wurden nur 71 gerechnet.)*

Dadurch wurden 2272 Trainingsdatensätze erzeugt. In der gezeigten Tabelle ist in den letzten beiden Spalten auch angegeben, was eine andere Schrittgröße in Varianten bedeutet. Diese Variantenanzahl, von ca. 800 Milliarden, ist die, welche mit dem mL-Tool abrufbar sind. Wobei es sich bei allen Parametern um kontinuierliche Parameter handelt, die auch in viel feineren Schritten gewählt werden könnten, was zu einer noch größeren Anzahl an möglichen Varianten führt.

Nachdem der Prozess zur Durchführung der Parameterstudie aufgebaut war, wurden diese angestoßen und der Grundstein für die Trainingsdaten war gelegt. Es wurden also die für das mL-Training notwendigen Daten nicht wie ursprünglich per Experiment ermittelt, sondern mittels Simulation. Das Simulationsmodell wurde aber mittels Experiments validiert, dass es zuverlässige Ergebnisse liefert.

Parallel wurde sich um das mL-Modell zur Vorhersage des Delaminationsverhaltens gekümmert. Um das Verhalten der Struktur beim Auftreten von Delaminationen mittels maschinellen Lernens abzubilden, erschienen neuronale Netze als mL-Modell geeignet. Da es sich beim Strukturverhalten von Schalen mit Delaminationen um ein nichtlineares Verhalten handelt, musste davon ausgegangen werden, dass es im Parameterraum mehrere zulässige Bereiche gibt. Beispielhaft zeigt Abbildung 21 zwei Gültigkeitsbereiche im Zusammenhang zwischen Blechstärke und kritischer Spannung beim Beulen von Schalen (abhängig vom Verhältnis Länge/Breite). Dieses Verhalten lässt sich mit neuronalen Netzen besser abbilden als mit Response-Surface-Methoden oder Ähnlichem. Dies zeigt der in Abbildung 22 angegebene Vergleich der Fehler verschiedener mL-Verfahren für das Beispiel der beulenden Platte. Welches eine stark vereinfachte Problemstellung ist, im Vergleich zum Beulen delaminierter Sandwichschalen, aber vergleichbar Charakteristika ausweisen sollte. Die neuronalen Netze dominieren diese Gegenüberstellung, weil sie am besten mit dem geteilten Parameterbereich umgehen können.

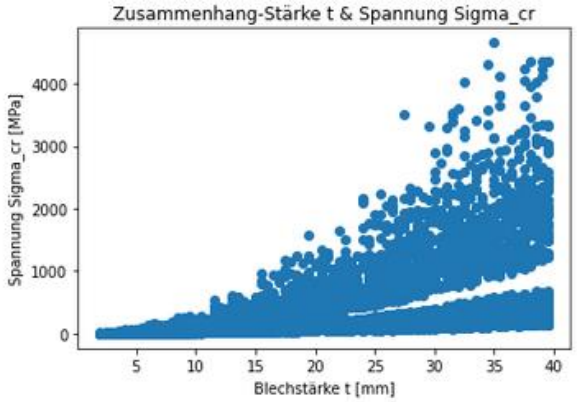
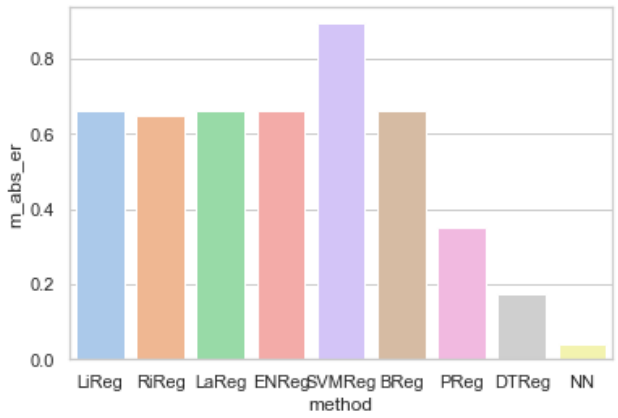


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Blechstärke und kritischer Spannung beim Beulen



mL-Verfahren:

- Linear Regression (LiReg)
- Rigid Regression (RiReg)
- Lasso Regression (LaReg)
- Elastic Net Regression (ENReg)
- Support Vector Machine Regression (SVMReg)
- Bayesian Regression (BReg)
- Polynomial Regression (PReg)
- Decision Tree Regression (DTReg)
- Neural Network (NN) (5 Layer – 4/8/7/5/1)

Abbildung 22: Vergleich der Fehler (links: mittlerer absoluter Fehler in Prozent) verschiedener mL-Verfahren (rechts) für die Vorhersage des Beulverhaltens von Platten

Auf Basis dieser Entscheidungen wurde dann untersucht, welche Parameter bzw. Features vorhergesagt werden müssen, um eine gute Übereinstimmung für die Lastverschiebungskurven zu erzielen. Nach Untersuchung vieler verschiedener Lastverschiebungskurven aus der Parameterstudie haben sich die Beschreibung der Kurven mittels bilinearen Ansatzes und folgenden 7 Parametern als zielführend für eine Lastverschiebungskurve herausgestellt:

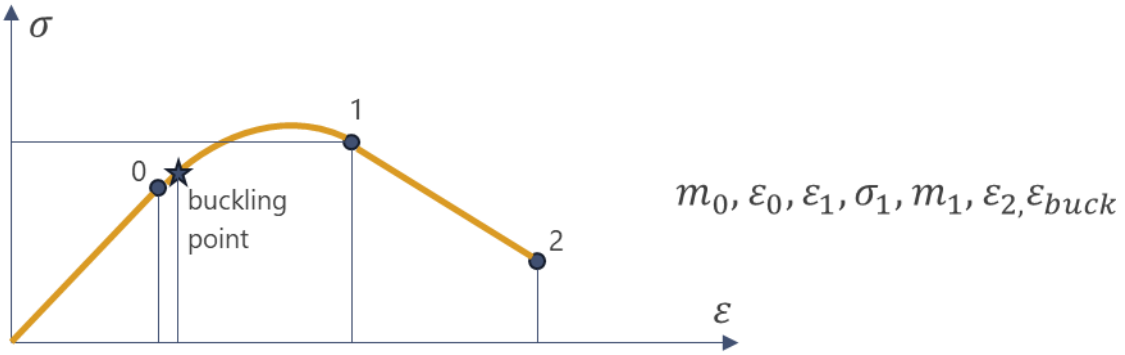


Abbildung 23: Bilinearer Ansatz auf Basis von 7 Parametern zur Vorhersage von Lastverschiebungskurven

Dabei ist m0 der Anfangsanstieg (Anfangssteifigkeit), e0 die Dehnung des Endpunkts des ursprünglichen linearen Strukturverhaltens, e1 und s1 der Startpunkt des zweiten linearen Bereiches, m1 der Anstieg bzw. die Steifigkeit des zweiten linearen Bereiches und e2 die Dehnung des Endpunktes der Kurve. Darüber hinaus wird noch die Dehnung vorhergesagt bei dem Beulen auftritt. Da die Struktur in 3 Richtungen beansprucht wird, müssen zusammen 21 Parameter vorhergesagt werden. Zusätzlich wurde auch eine Klassifikation eingeführt, ob Beulen auftritt oder nicht.

Nachdem diese Parameter definiert wurden, wurde ein Pythonprozess geschrieben, der aus den Ergebnisdaten der Parameterstudie die Trainingsparameter bestimmt. Um zu testen, ob diese Parameter auch zu Kurven führen, die eine gute Übereinstimmung mit den Originalkurven aufweisen, wurden im Prozess auch Diagramme erzeugt, die für alle Richtungen sowohl die Originalkurven also auch die bilinearen Ersatzkurven zeigen. Im Folgenden sind Beispielkurven für 2 ausgewählte Datensätze gezeigt

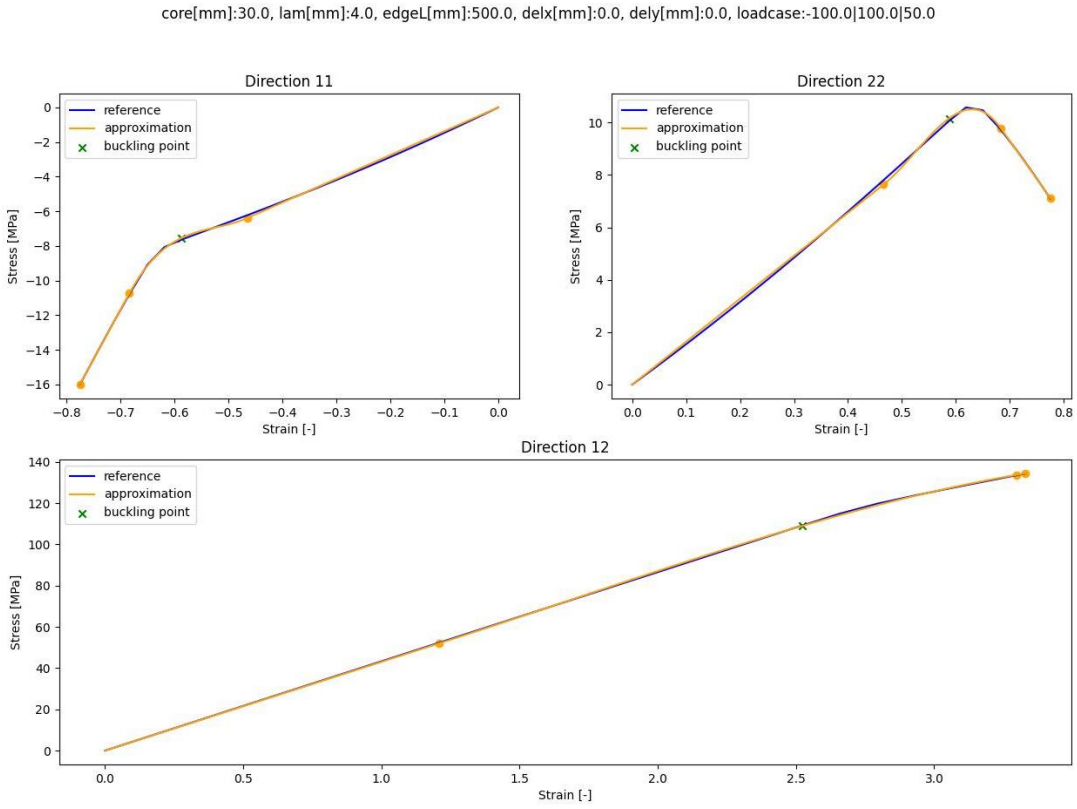


Abbildung 24: Gegenüberstellung von Original und bilinearer Kurve für Datensatz 1290

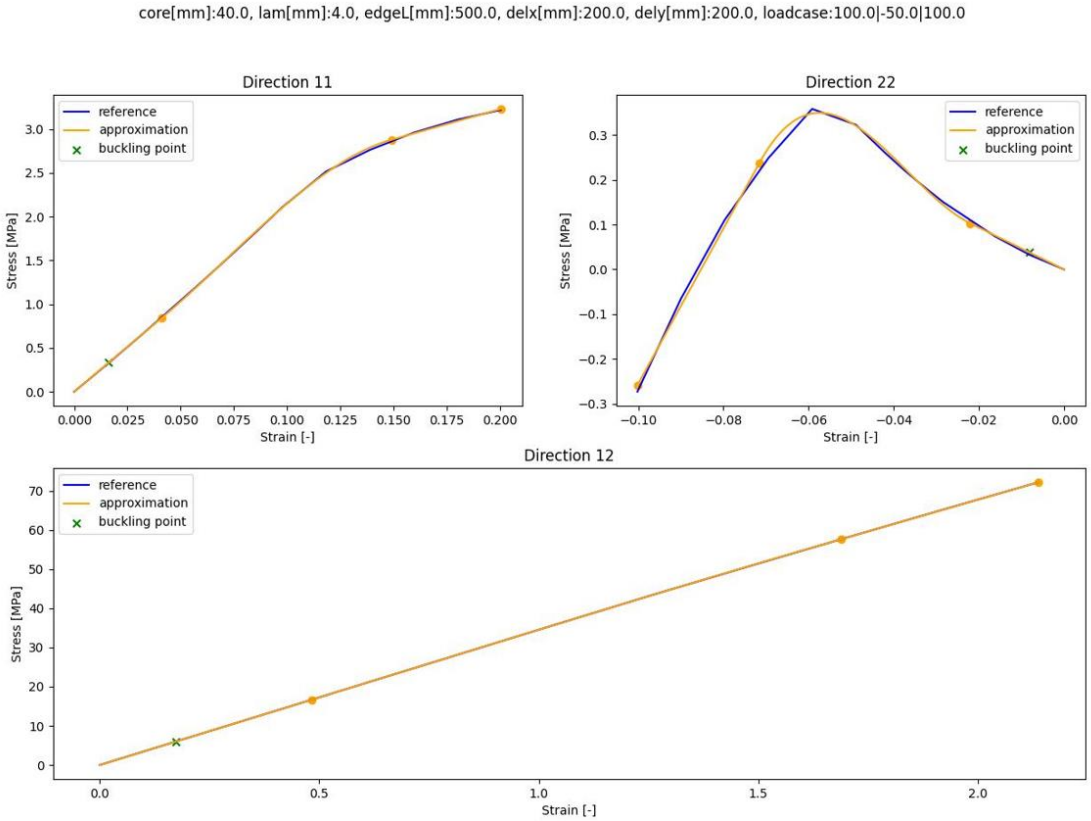


Abbildung 25: Gegenüberstellung von Original und bilinearer Kurve für Datensatz 1906

Dabei ist anzumerken, dass die Approximationskurven sehr gut übereinstimmen würden, wenn das ml sehr gute vorhersagen für alle Parameter liefern kann.

Nachdem die Trainingsdaten erzeugt wurden, konnte das Training beginnen. Im Verlauf des Projektes wurden verschiedene Methoden ausprobiert. Nachdem zu Beginn ein Sequentielles Neuronales Netz bevorzugt wurde, konnte im weiteren Verlauf mit einem MLP-NN (Multi-Layer-Perceptron-Neural-Network / Feed-Forward Neural Network) bessere Ergebnisse erzeugt werden. Die Auswahl und das Setup des mL-Modells ist dabei sehr wesentlich für die Vorhersagegüte. Deshalb wurde noch ein weiterer Weg beschritten. Im PIDO-Tool pSeven gibt es ebenfalls die Möglichkeit mL-Modelle zu erzeugen und zu exportieren. Ein Vorteil hier ist, dass das Tool sich um die Auswahl des genauen Verfahrens und auch das Setup kümmert. Dies ist eine erhebliche Erleichterung, wenn man viele verschiedene Parameter hat, für die man mL-Modelle braucht. Darüber hinaus bietet es viele Werkezuge, um die Trainingsdaten aber auch die erzeugten Modelle zu analysieren.
Nachdem die verschiedenen mL-Modelle erzeugt wurden, wurden ihre Vorhersagen mit den Trainingsdaten verglichen und der mittlere absolute Fehler berechnet, um die Vorhersagegüte bewerten zu können (Siehe Abbildung 26).

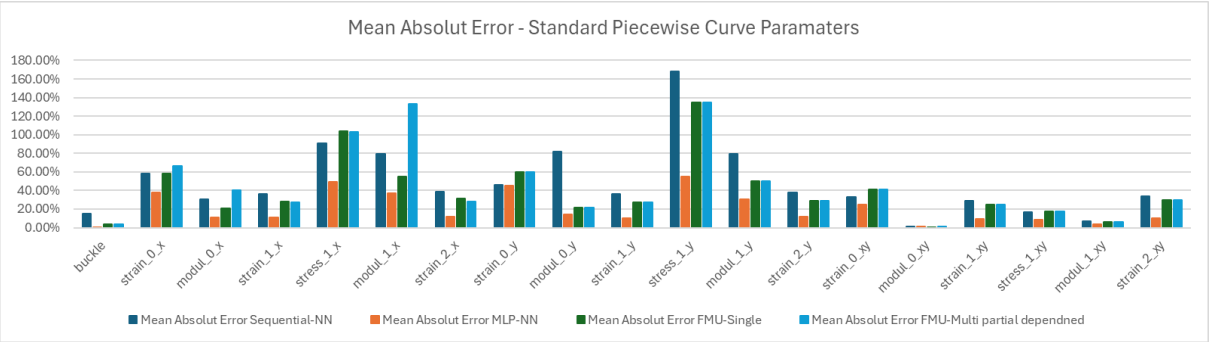


Abbildung 26: Vergleich der mL-Modelle anhand des mittleren absoluten Fehlers

Es zeigt sich, dass das MLP-NN gute Vorhersagen liefern kann, aber auch die beiden FMU-Modelle recht gut sind. FMU ist hier allerdings nicht das verwendete mL-Verfahren, sondern das Export-Format, welches in pSeven benutzt wurde, um das mL-Modell auch außerhalb von pSeven nutzbar zu machen. Der genaue Algorithmus ist hier nicht bekannt, da pSeven die Entscheidung überlassen wurde, das beste Modell für die Trainingsdaten auszuwählen. Der Unterschied zwischen dem Single-FMU und Multi-FMU Modell besteht darin, dass bei Single für jeden Parameter ein Modell erzeugt wurde, wohingegen das Multi-Modell alle Parameter einer Kurve gleichzeitig erzeugt. Das hat sowohl in der Vorhersagezeit Vorteile, aber auch beim Training, da hier abhängige Parameter berücksichtigt werden können.
Vor allem die Vorhersage, ob das Schalenelement beult oder nicht kann sowohl mit dem MLP-NN als auch den beiden FMU Modell sehr gut bis gut vorhergesagt werden. Hier liegt der Fehler für das MLP-NN mit unter 0,79% sehr niedrig, aber auch die FMU Modelle mit 3,83 bzw. 3,52% zeigen recht gute Ergebnisse. Auch der Anfangsanstieg der Kurve kann noch recht gut vorhergesagt werden, vor allem mit dem MLP-NN (10,68%). Es zeigt sich aber auch, dass für diese Kurven, die mehrere Parameter vorhergesagt werden müssen. Da diese aber aufeinander aufbauen, kann ein mittlerer Fehler am Anfang auch zu einer größeren Abweichung der Kurve später führen. Hier muss noch Arbeit investiert werden, um ein robusteres Verhalten zu erzielen. Nichtsdestotrotz sind die Ergebnisse vielversprechend. Allerdings hat die Auswertung der Validierungsversuche (Siehe Abschnitt II.1.2) am Ende des Projekts gezeigt, dass der Nachbeulbereich mit dem aktuellen Modell gar nicht richtig abgebildet werden kann, da hier das Wachstum der Delamination nicht berücksichtigt werden kann. Deshalb wurde noch ein vereinfachter Kurvenansatz implementiert, der die Kurve kurz nach dem Beulen abschneidet und keine weitere Lastaufnahme erlaubt (Steifigkeit=0).

Um die mL-Modelle und alle Funktionen/Optionen besser nutzbar zu machen, wurde auch für diese Anwendung, ähnlich wie auch schon bei der Homogenisierung ein Benutzerinterface (GUI) entwickelt, welches es erlaubt, schnell zwischen den Modellen umzuschalten aber auch die Eingabeparameter leicht zu ändern.

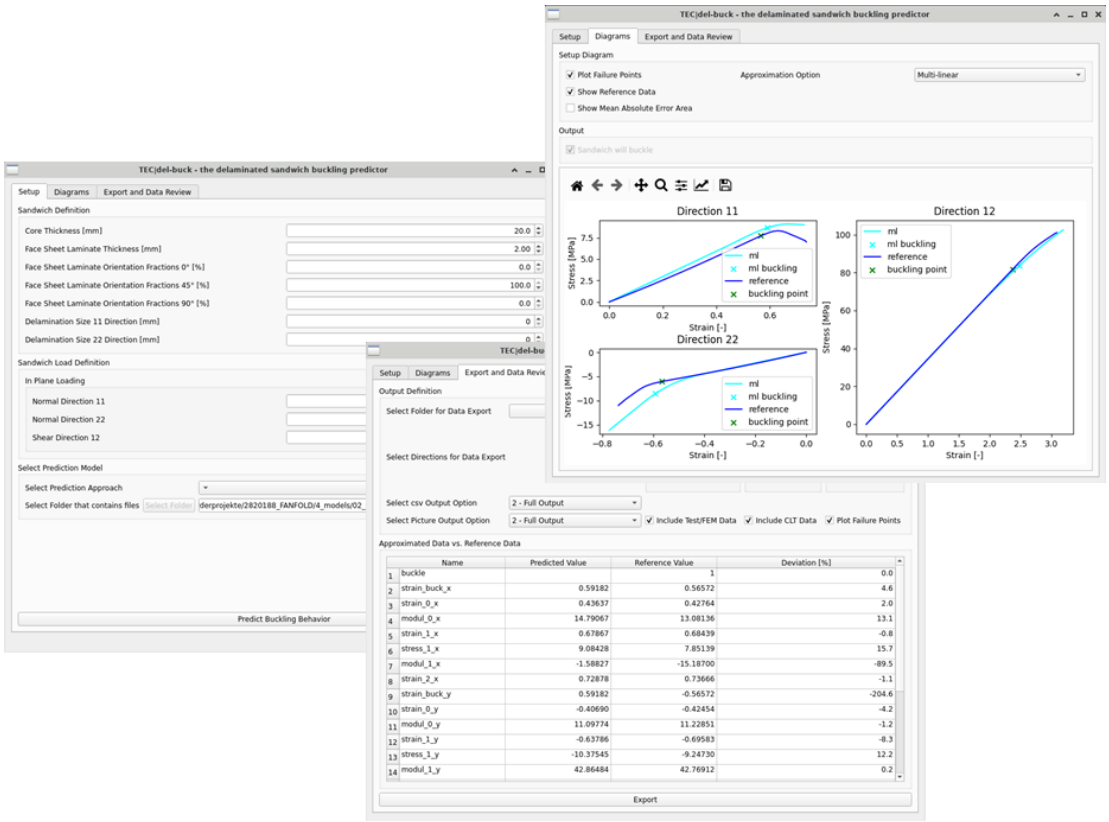


Abbildung 27: GUI für Python Tool zur Vorhersage von Lastverschiebungskurven delaminierter Sandwichschalen

Die Benutzeroberfläche bietet 3 Ansichten. Auf der ersten Ansicht wählt man die Parameter und das Vorhersagemodell. Auf der zweiten Seite kann man sich die vorhergesagten Lastverschiebungskurven anschauen und zwischen einer vereinfachten Variante und der Bi-Linearen Kurven-Variante wählen. Vereinfacht bedeutet hier, dass ein Nachbeulverhalten ohne zusätzliche Lastaufnahme angenommen wird. Die Schale würde bei steigender Verformung keine zusätzliche Last aufnehmen (Steifigkeit=0). Auf der letzten Seite lassen sich die vorhergesagten Zahlenwerte näher anschauen. Die Benutzeroberfläche bietet auch die Möglichkeit verfügbare Test oder Simulationsdaten parallel anzuzeigen (Siehe Abbildung 27, dunkelblaue Kurven). So dass man leicht überprüfen kann, wie gut die Vorhersage für Validierungsdatensätze ist.

Ursprünglich war geplant, auch den Lagenaufbau zu variieren. Allerdings konnte bereits mit den vorliegenden Trainingsdaten viele Untersuchungen angestellt werden. Der Prozess zur Erzeugung neuer Trainingsdaten ist verfügbar und kann jederzeit für weitere Laminataufbauten gestartet werden. Allerdings wurde der Wissensgewinn nicht als höher erachtet, sondern nur der Rechenaufwand zur Erstellung dieser Trainingsdaten, um die Modelle zu trainieren, wäre gestiegen. Außerdem wäre es noch schwerer gewesen zu ermitteln, welche Trainingsstrategie bessere Ergebnisse liefert. Für die Delaminationsabmessungen wurden nur quadratische Varianten berücksichtigt. Auch hier sind zusätzliche Varianten denkbar, um den Parameterraum zu erweitern.

Die Einbettung der mL-Modelle in die Reduktionsmethodik gibt es aktuell nur in der Theorie. Auch hier könnte der pSeven Ansatz erfolgversprechend sein, da pSeven seine Modelle auch als C-Code exportiert werden kann, welcher sich leichte direkt in die User-Materials oder auch User-Elements vom ISD

integrieren lassen würde. Da das ISD aktuell aber noch keine Schnittstelle definiert hat, wurde auf weitere Untersuchungen zum Export der Daten verzichtet. Aktuell ist die Idee der Einbettung folgendermaßen:

Das Element kennt seine Eigenschaften. Dazu zählt normalerweise der Lagenaufbau. Im Reduktionsmodell gibt es diesen Lagenaufbau nicht mehr, da dieser verschmiert wurde, aber hinter den nicht-linearen homogenisierten Eigenschaften verbirgt sich ein Lagenaufbau. Hier könnte man z.B. über Meta-Informationen nachdenken, oder die Information des Lagenaufbaus in den Daten der homogenisierten Eigenschaften einbetten. Darüber hinaus muss das Element wissen, ob es delaminiert ist und wie groß seine Delamination ist. Dies wird sehr wahrscheinlich ein intensiver Forschungspunkt werden. Da es auch sein kann, dass mehrere benachbarte Elemente delaminiert sind und die Elemente hier miteinander kommunizieren müssen. Für die Idee wird aber angenommen, dass das Element eine Information über die Größe seiner Delamination besitzt. Das Element kennt zusätzlich seine aktuelle Last, womit alle Größen verfügbar sind, um das aktuell im Projekt trainierte mL-Modell anzufragen, wie es sich unter Last verhält. Das mL-Modell liefert die Last-verschiebungskurve zurück und das Element schaut nach, wo es sich gerade auf dieser Kurve befindet, und passt entsprechend der Steifigkeiten an. So viel zur Idee des Zusammenspiels zwischen mL-Modell und Reduktionsansatz. Diese Idee kann man auch noch weiterdenken, dass es auch noch ein Modell gibt, welches sich mit dem Wachstum der Delamination beschäftigt, welches noch zusätzlich oben drüber gestülpt wird. Im ersten Ansatz wäre es aber sehr interessant den zuerst skizierten Ansatz weiter zu verfolgen.

II.1.10 Fazit

Das Vorhaben FANFOLD wurde erfolgreich abgeschlossen. Aus der Sicht von TECOSIM stellen die Methode zur Erstellung homogenisierter Last-Verschiebungskurven von Laminaten und der Prozess zur Erstellung von mL-Modellen zur Vorhersage des Versagens von FKV-Sandwich-Strukturen die beiden wichtigsten Ergebnisse dar.

Auch das Ziel, die Eingabedaten für das nichtlineare quasi-orthotrope Materialgesetz des neuen Reduktionsmodells in Form von Last-Verschiebungskurven charakteristischer Beanspruchungen der Struktur zu generieren, wurde erreicht. Die nichtlinearen Kurven können erstellt und für das Reduktionsmodell herausgeschrieben werden. Es soll eine Gegenüberstellung gemacht werden, bei dem die Last-Verschiebungskurven aus dem rechenintensiven ISD-Würfelpark mit dem von TECOSIM entwickelten Ansatz in Open-Hole-Proben gegenübergestellt werden sollen.

TECOSIM hat sich im Projekt dagegen entschieden, den neuen Reduktionsansatz in die Software-technische Anwendung zu bringen, da es bedeutet hätte, in ANSYS die Reduktionsmethode einzubauen. Deshalb wurde entschieden, die ANSYS-Modelle in ABAQUS zu übersetzen. In diesem CAE-Programm wurde auch die Reduktionsmethode des ISD entwickelt.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Verwendungsnachweis des Teilvorhabens der TECOSIM GmbH beinhaltet die Positionen Personalkosten, die für Modellaufbau und Simulationen sowie die Entwicklung automatisierter Prozessketten angefallen sind, Reisekosten für Besprechungen sowie sonstige Kosten zur Nutzung der On-Demand-Mietlizenz für die CAE-Software ANSYS.

Abweichungen von der Gesamtvorkalkulation traten insofern auf, als dass etwas mehr Personalkosten und etwas weniger sonstige Kosten angefallen sind als ursprünglich geplant.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit ergab sich aus der Arbeitsplanung. Die geleistete Arbeit war zum Erreichen der Ergebnisse notwendig.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Projekt hat TECOSIM einen Modellgenerator für eine parametrisierte Sandwich-Struktur und einen automatisierten Analyseprozess zur Berechnung von Parameterkombinationen entwickelt, um die Effekte von Delaminationen auf die Tragfähigkeit untersuchen zu können. Darüber hinaus wurde dieser Prozess genutzt, um Trainingsdaten für das Machine-Learning zu erstellen. Diese Ergebnisse sind sowohl im Umfeld der Windenergieerzeugung, als auch in weiteren Themengebieten, in denen FKV-Werkstoffe genutzt werden, verwertbar.

TECOSIM möchte sowohl mit dem Ansatz mit homogenisierten Laminaten größere Strukturen zu rechnen an potenzielle Kunden herantreten. Dazu ist es nötig, dass Python Tool, um die Fähigkeit zu erweitern Materialkarten für die in Frage kommenden Solver direkt zu erzeugen. Damit ist es denkbar die Lastumlagerungen in komplexen FVK-Strukturen zu berücksichtigen, ohne ein komplexes

schichtbasiertes Versagensmodell zu verwenden. Darüber hinaus soll auch der Einsatz von mL-Modellen im Auslegungsprozess als Ersatz für komplexe Detailsimulationen mit potenziellen Kunden besprochen werden.

II.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Fortschritte durch Dritte in Deutschland oder Europa sind nicht bekannt geworden.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Ein geeignetes Informationsforum sind Messen zur Windenergie, wie z.B. die internationale Windenergie-Fachmesse WindEnergy, die zweijährlich in Hamburg stattfindet.

Darüber hinaus wird von TECOSIM Vertriebsmaterial zu den beiden Themen, Struktursimulation mit homogenisierten Laminaten und