

ARENA 2036

Jörg Dittmann
Peter Middendorf *Hrsg.*

Der digitale Prototyp

Ganzheitlicher digitaler Prototyp im
Leichtbau für die Großserienproduktion

ARENA2036

 Springer Vieweg

ARENA2036

Reihe herausgegeben von

ARENA2036 e.V.

Stuttgart, Deutschland

Die Buchreihe dokumentiert die Ergebnisse eines ambitionierten Forschungsprojektes im Automobilbau. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer nachhaltigen Industrie 4.0 und die Realisierung eines Technologiewandels, der individuelle Mobilität mit niedrigem Energieverbrauch basierend auf neuartigen Produktionskonzepten realisiert. Den Schlüssel liefern wandlungsfähige Produktionsformen für den intelligenten, funktionsintegrierten, multimaterialen Leichtbau. Nachhaltigkeit, Sicherheit, Komfort, Individualität und Innovation werden als Einheit gedacht. Wissenschaftler verschiedener Disziplinen arbeiten mit Experten und Entscheidungsträgern aus der Wirtschaft auf Augenhöhe zusammen. Gemeinsam arbeiten sie unter einem Dach und entwickeln das Automobil der Zukunft in der Industrie 4.0.

Weitere Bände in dieser Reihe: <http://www.springer.com/series/16199>

Jörg Dittmann • Peter Middendorf
Hrsg.

Der digitale Prototyp

Ganzheitlicher digitaler Prototyp im
Leichtbau für die Großserienproduktion

Hrsg.

Jörg Dittmann 
Institut für Flugzeugbau
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Peter Middendorf 
Institut für Flugzeugbau
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

ISSN 2524-7247

ARENA2036

ISBN 978-3-662-58956-4

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58957-1>

ISSN 2524-7255 (electronic)

ISBN 978-3-662-58957-1 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Inhaltsverzeichnis

1	Der Forschungscampus ARENA2036	1
	Jörg Dittmann und Peter Middendorf	
2	Der Digitale Prototyp	3
	Jörg Dittmann und Peter Middendorf	
2.1	Die digitale Prozesskette	4
2.2	Bedeutung für die Industrie 4.0	5
	Literatur.	6
3	Materialmodellierung und virtuelles Testen	7
	Mathieu Vinot, Martin Holzapfel und Nathalie Toso	
3.1	Modellierung der Textilarchitektur unter Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen.	7
3.2	Simulation des Kompaktierungsvorganges	10
3.3	Ermittlung der Lamineigenschaften für die Struktursimulation	10
	Literatur.	20
4	Integration der Prozesssimulation in den Digitalen Prototyp	21
	Jörg Dittmann, Patrick Böhrer, Florian Fritz, Andreas Pau, Norbert Dölle, Mathieu Imbert, Albrecht Dinkelmann, Hermann Finckh, Götz T. Gresser und Peter Middendorf	
4.1	Technisches Flechten	22
4.2	Der Drapierprozess	34
4.3	Multiaxialwebtechnologie – Open Reed Weaving.	51
4.4	Virtuelle Infiltration von textilen Faserhalbzeugen	68
	Literatur.	82
5	Mapping – Übertragung der Ergebnisse der Prozesssimulation auf die Struktursimulation	83
	Christian Liebold und André Haufe	
5.1	Genereller Programmablauf.	84
5.2	Ansatz des nächsten Nachbarn.	86

5.3	Zusätzliche Berücksichtigung von Suchradien	87
5.4	Berücksichtigung der Faserondulation	87
5.5	Detektieren von repräsentativen Volumenelementen	89
5.6	Eindeutigkeit der Übertragungen	91
6	Simulation von textilbasierten Faserverbundbauteilen unter statischer und dynamischer Beanspruchung	95
	Mathieu Vinot, Martin Holzapfel, Nathalie Toso, Andreas Pau und Norbert Dölle	
6.1	Stand der Technik und Übertragungsansätze	96
6.2	Analyse der Simulationsansätze an Couponproben	99
6.3	Untersuchung des Energieabsorptionspotenzials an Prinzipproben	102
6.4	Nutzen der Prozesskette für die Struktursimulation	106
6.5	Auslegung von großflächigen Faserverbundstrukturen im Gesamtfahrzeug	112
	Literatur	121
7	Die CAM-Schnittstelle	123
	Jörg Dittmann, Patrick Böhler, Joachim Greiner und Peter Middendorf	
7.1	CAM-Flecht-Schnittstelle	124
7.2	Infiltration	127
	Literatur	128
8	Ein Container zum Simulationsdatenaustausch – der Digitale Prototyp ...	129
	Christian Liebold und André Haufe	
8.1	Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Datencontainers und Entscheidungsfindung	129
8.2	Realisierung eines Austauschdatenformates im Digitalen Prototyp	131
9	Zusammenfassung und Ausblick in die Zukunft	137
	Jörg Dittmann und Peter Middendorf	
	Anhang	139
	Stichwortverzeichnis	145



Der Forschungscampus ARENA2036

1

Jörg Dittmann und Peter Middendorf

Der Forschungscampus ARENA2036 ist ein neuer, langfristiger Projektansatz, der vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF; Forschungscampus ARENA2036) finanziert wird. Er ist einer der neun großen wissenschaftlichen Campi in Deutschland und ist der einzige, der direkt in die Hauptphase (Phase 1) gestartet ist. Die ARENA2036 befindet sich in Baden-Württemberg (Deutschland), ist seit 2013 Teil der Universität Stuttgart und besitzt seit Dezember 2016 sein eigenes Gebäude auf dem Universitätscampus. ARENA2036 ist ein Akronym für „Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles“ und die Datierung 2036 entspricht dem 150. Jahrestag des Automobils. Die ARENA2036 startete 2013 mit vier öffentlich geförderten Startprojekten und hat mittlerweile ca. 90 unterschiedliche – sowohl öffentlich gefördert, als auch drittmittelfinanziert – Projekte initiiert, über 30 unterschiedliche Partner aus Industrie und Forschung und mehr als 100 Mitarbeiter unter ihrem Dach. Das große Ziel der Forschungscampi ist es, die Industrie und die wissenschaftlichen Institute zum gemeinsamen Forschen zu animieren. Forschung soll in einem Gebäude und unter einem Dach praktiziert werden.

Die Förderung der Forschungscampi ist vom BMBF in drei Phasen, von je fünf Jahren unterteilt.

- Phase 1 (2013–2018) – Startprojekte: DigitPro, Leifu, ForschFab, KHoch3
- Phase 2 (2018–2023) – Startprojekte: Digitaler Fingerabdruck, FlexCar, Fluide Produktion, InnoHub
- Phase 3 (2023–2028) – t.b.d.

J. Dittmann (✉) · P. Middendorf
Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland
E-Mail: dittmann@ifb.uni-stuttgart.de; middendorf@ifb.uni-stuttgart.de

Während dieser Forschungsphasen werden die Projekte an Plenartreffen, wo alle Partner ihren Forschungsfortschritt vorstellen und Meilensteine beschlossen werden, durch den Projektträger und die Partner evaluiert. Durch diese Evaluierung ist auch bei einer langen Förderung die Qualität der Forschungsinhalte gesichert. Nach Abschluss dieser drei öffentlich geförderten Phasen sollen sich die Forschungscampi selbst finanzieren und durch die Beantragung weiterer Förderprojekte auf dem jeweiligen Universitätscampus etablieren.

Die ARENA2036 startete mit den Projekten DigitPro (Ganzheitlicher digitaler Prototyp im Leichtbau für die Großserienproduktion), LeiFu (Intelligenter Leichtbau durch Funktionsintegration), ForschFab (Forschungsfabrik: Produktion der Zukunft) und KHoch3 (Kreativität-Kooperation-Kompetenz Transfer) in die erste Förderphase. Hierbei beschäftigt sich das Projekt DigitPro mit der digitalen Herstellungsprozesskette und versucht, den Transfer der Simulationsdaten zwischen den einzelnen Simulationsprogrammen zu erleichtern. Zwei weitere Hauptziele sind die Reduzierung der Entwicklungszeit eines Zielbauteils um 50 % und die Reduzierung des Gewichts um 10 %. Das Projekt Leifu versucht durch die Integration von unterschiedlichen Funktionen (Klimatisierung, elektrisches Laden, etc.) und Sensoren, Bauteile im Automobil der Zukunft intelligenter und multifunktionaler zu gestalten und dadurch die höheren Produktionskosten der Leichtbaumaterialien zu nivellieren. Das Projekt ForschFab befasst sich mit der Struktur und dem Aufbau neuartiger Produktionsfabriken. Hierbei steht der Fokus auf mobilen Fertigungsstätten, adaptiven Materialflüssen und automatisierten Produktionsabläufen. Um die unterschiedlichen Forschungswelten, der Industrie und der Institute, bestmöglich miteinander zu verschmelzen, Kommunikationsprobleme und Missverständnisse vorzubeugen, wurde das Projekt KHoch3, als viertes nicht-technisches Startprojekt, ins Leben gerufen. Ziel von KHoch3 war es die unterschiedlichen Kommunikationsansätze und Arbeitsweisen zu analysieren und Empfehlungen, Lösungsansätze und Workshops den Partnern zur Verfügung zu stellen, um Kommunikationsprobleme erst gar nicht entstehen zu lassen.



Jörg Dittmann und Peter Middendorf

Das Projekt DigitPro – „Ganzheitlicher digitaler Prototyp im Leichtbau für die Großserienproduktion“ wurde im Rahmen der ARENA2036 als eines der ersten Startprojekte des neuen Forschungscampus ins Leben gerufen. Das Projekt startete im Juli 2013 und endete im Juni 2018.

Der Digitale Prototyp stellt das Bindeglied zwischen klassischen Ingenieurstätigkeiten und der Industrie 4.0 dar. Bauteilauslegungen und Prozesssimulationen werden vor der realen Fertigung durchgeführt und optimiert. Dies führt zu kürzeren Entwicklungszeiten und schont Ressourcen. Eine integrierte CAM-Schnittstelle ermöglicht den Datenübertrag an ausführende Produktionseinheiten wie Roboter, Flechtmaschinen oder Injektionspressen. Zusätzlich dient der Digitale Prototyp als Fertigungsprotokoll in dem alle anfallenden Daten erhoben und für spätere Optimierungsschleifen oder Qualitätssicherungsmaßnahmen (QSM) abgespeichert werden können.

Hierbei werden die notwendigen Schritte zur Realisierung eines Digitalen Prototyps, aufgezeigt, sowie Forschungsergebnisse der einzelnen Disziplinen (virtuelle Materialmodellierung, Prozesssimulation, Validierung und CAM-Schnittstelle) im Detail erläutert.

Fünf Partner (Daimler AG, DYNAMore GmbH, DITF Denkendorf, DLR BK Stuttgart, Universität Stuttgart-Institut für Flugzeugbau) formten ein Konsortium, welches sich zur Aufgabe machte die Digitalisierung in der Prozesstechnik/-Simulation zu etablieren. Hierbei engagierten sich das Institut für Flugzeugbau im Bereich der technischen Flechttechnik, Infiltration und CAM-Schnittstelle, das ITV Denkendorf im Bereich der Open-Reed-Web-Technik, die Daimler AG im Bereich der statischen & dynamischen Auslegung von CFK-Bauteilen, das DLR BK Stuttgart im virtuellen & experimentellen Testen der Strukturen und die DYNAMore GmbH im Bereich der Datenstrukturen und Datenweitergabe. Die

J. Dittmann (✉) · P. Middendorf
Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland
E-Mail: dittmann@ifb.uni-stuttgart.de; middendorf@ifb.uni-stuttgart.de

CAM-Schnittstelle und das HDF5-Format dienten zusätzlich als Aufsetzer für den Projektantrag der 2. Phase (Projekt Digitaler Fingerabdruck). Hier wurde das Potenzial erkannt und für neue Fertigungstechnologien erweitert.

Hauptziele des Digitalen Prototyps waren:

- Erweiterung der Prozesskette auf Computer Aided Manufacturing (CAM) und die Einbindung in ein neuartiges Konzept eines digitalen Prototyps
- Die Nutzung der Fertigungssimulation zur Steuerung der Fertigungsprozesse mit Validierung an zwei Beispielen:
 - Flechten von Hohlbauteilen
 - Herstellung von lastpfadoptimierten Geweben als flächige Halbzeuge mit der Multiaxialwebtechnologie Open Reed Weaving (ORW)
- Die Datenrückführung aller Prozessparameter in den digitalen Prototyp und die Möglichkeit zur
- Optimierung des Bauteils mit lastflussgerechtem und crashtauglichem Design unter Berücksichtigung der spezifischen Fertigungsrestriktionen.

Da am Anfang noch kein Gebäude zur Verfügung stand bzw. noch nicht fertiggestellt war, fanden die regelmäßigen Arbeitsmeetings in Gebäuden der Universität Stuttgart statt. Die Nähe dieser Gebäude zu den Partnerunternehmen begünstigte die Projektmeetings, da Details für die Simulation direkt an der Flechtmaschine mit den Partnern besprochen werden konnten und Roboterplanungen direkt getestet wurden. Für den späteren Demonstratoraufbau wurden weiterhin die Ressourcen der Universität genutzt, da hierfür das Infiltrationslabor, dessen Ausstattung und die Montage-Freiflächen verwendet wurden. Die vorläufige Einquartierung in universitären Gebäuden hatte keinen Einfluss auf die Teilnahme an Meetings oder den wissenschaftlichen Fortschritt innerhalb des Projektes, jedoch wurde der Großteil der Mitarbeiter, durch fehlende Räumlichkeiten daran gehindert den Forschungscampus als solches zu leben und jeden Tag darin zu arbeiten. Der Umzug im Dezember 2016 in das neue ARENA2036-Gebäude verbesserte diesen Sachverhalt und mit jedem Tag kamen mehr und mehr Mitarbeiter hinzu, welche ihren Hauptarbeitsplatz in die ARENA2036 verlegten. Das Ziel war, bereits recht früh Motivation und Engagement zu zeigen und mit vor Ort sitzenden Mitarbeitern in der ARENA2036 in Vollzeit zu arbeiten. Dieses Vorhaben konnte umgesetzt und mit dem Umzug in das neue Gebäude realisiert werden.

2.1 Die digitale Prozesskette

Die Möglichkeit, aus textilen Halbzeugen hochintegrierte, strukturelle Bauteile herstellen zu können, erfordert zugleich Werkzeuge, die eine Simulation solcher komplexer Strukturen erlauben. Dies ist extrem wichtig, da hinter Entwicklungen von Leichtbaufaserverbundstrukturen vor allem im Automobilbau geringe Entwicklungszeiten und hoher Kostendruck

stehen. Der Anspruch an die Simulation von Faserverbundstrukturen ist dabei nicht geringer als bei Metallstrukturen. Faserverbundstrukturen sind jedoch, anders als Metalle, anisotrope Werkstoffe, deren Eigenschaften maßgeblich durch den textilen Lagenaufbau und den Fertigungsprozess geprägt werden. Einzelne Fertigungsschritte können die Struktur derart verändern, dass ihre Einflüsse auf die Struktureigenschaften im Auslegungsprozess berücksichtigt werden müssen. Zahlreiche Prozessparameter können über Qualität, Herstellbarkeit und Kosten entscheiden.

In den letzten zwei Dekaden sind Simulationstechniken auf Basis der Finite-Elemente-Methode für unterschiedliche Fertigungsprozesse entwickelt und zum Teil gekoppelt worden. Der Ansatz dabei ist, eine geschlossene Simulationsprozesskette zu etablieren, die ausgehend von der Ermittlung von Werkstoffkennwerten über Prozessschritte wie Drapieren, Flechten und Harzinfusion den Auslegungs- und Fertigungsprozess unterstützt.

Eine große Bedeutung erhält die Simulationsprozesskette im Hinblick auf Entwicklungszeiten und Kostenabschätzungen von Bauteilen. Die Simulation der Fertigungsprozesse von Faserverbundstrukturen ist bei der Planung von Werkzeugen und Prozessschritten für die Großserienproduktion nicht mehr wegzudenken.

Allerdings existierte am Anfang des Projektes keine Prozesskette, welche die ambitionierten Anforderungen und Ziele erfüllen konnte. Diese Ziele waren vor allem die Durchgängigkeit der Daten, der einfache Datenzugang für alle Projektpartner, die Verknüpfung der unterschiedlichen Simulationsprogramme und eine Dokumentation aller Prozessschritte um eine Nachvollziehbarkeit bei der Entwicklung zu ermöglichen. Dies soll nachfolgend anhand der ausgewählten Prozesse dargelegt werden. Zudem werden die Herausforderungen an die Werkstoffcharakterisierung und eine neue CAM-Schnittstelle zur realen Fertigung des Umflechtprozesses, beschrieben.

2.2 Bedeutung für die Industrie 4.0

Die zunehmende Digitalisierung unseres Lebens macht auch vor der Industrie und der Entwicklung neuer Ideen keinen Halt. Wurden in den 80er-Jahren einfache 2D Simulationen zur statischen Auslegung von Bauteilen verwendet. Verwendet werden nun die kompletten Produktionsschritte von der Materialauswahl hin zu hochkomplexen Fertigungstechnologien abgebildet und diese direkt mit der realen Fertigung verschaltet. Langwierige, monotone und gefährliche Produktionsschritte werden automatisiert und an Roboter ausgelagert. Der Mensch bekommt eine neue Rolle in der Produktion der Zukunft. Er observiert, plant und kontrolliert Produktionsschritte virtuell und lässt die eigentliche Fertigung von Robotern ausführen.

Im Digitalen Prototyp werden schon heute alle Geometriedaten und Simulationsergebnisse (statische Auslegung, Prozesssimulationen, Optimierung, etc.) eines Bauteils bzw. einer Baugruppe gespeichert [1]. Dadurch wird die Entwicklungshistorie eines Bauteils transparenter und Simulationsdaten gehen nicht verloren. Hierzu werden einzelne Simulationsergebnisse in Unterkategorien gespeichert und mit Zeitstempel, Versionsnummer und

Benutzerinformation versehen. Ein in DigitPro entwickeltes Programm erlaubt es Daten im Digitalen Prototyp abzulegen, zu extrahieren oder Ergebnisse von einem Simulationsprogramm, durch Mapping einem anderen Programm zur Verfügung zu stellen. Dies beschleunigt den Datentransfer, wie er in jedem Unternehmen auftritt und verbessert die Nachverfolgung.

In Zukunft können auch nachträglich alle Prozessparameter, die in der Fertigung aufgetreten sind, nachverfolgt und bewertet werden. Hierzu werden im Bauteil Sensoren integriert, welche zum Beispiel Heizraten, Transportbeschleunigungen und Lagerzeiten messen und diese im Digitalen Prototyp ablegen. Hierdurch werden Qualitätskontrollen erleichtert und eine Ausmusterung defekter Bauteile beschleunigt. Das Nachfolgeprojekt, Digitaler Fingerabdruck, wird hier neue Maßstäbe setzen und sogar die Verwertung von In-Servicedaten mit einbinden.

Das Schlagwort Industrie 4.0 wurde durch die stetige Vernetzung neuer Technologien in der Produktion geprägt und bezeichnet die 4. technologiegetriebene Revolution. Waren bislang der Einsatz von Elektronik und intelligenten Computersystemen für einen hohen Grad an Automatisierung verantwortlich, so ermöglichen intelligente Objekte und das Internet der Dinge (IOT) heute die marktseitig zunehmend geforderte Individualisierung [2].

Produktionsvorgänge werden in Zukunft nicht mehr bis ins letzte Detail an bestimmten Standorten festgeschrieben sein. Bauteile, Material und Fertigungsstationen finden sich in der Fabrik der Zukunft von alleine und bewegen sich mit Hilfe von mobilen Transportern, die sie selbst anfordern, zur nächsten Fertigungsstation weiter.

Dies ermöglicht eine flexiblere Produktion, mit der langwierige Umbauten der Fabriken entfallen und so schneller auf Bedürfnisse der Zulieferer, Hersteller und Kunden eingegangen werden kann. Eine Personalisierung des Produkts ist so einfacher umzusetzen und die große Anzahl an verschiedenen Derivaten kann einfacher gehandhabt werden.

Literatur

1. Prozesssimulation als Basis der Industrie 4.0(2016). In: Lightweight Design 6, Springer
2. Handbuch Industrie 4.0, Gunther Reinhart, Carls Hanser, München 2017, ISBN: 978-3-446-44642-7



Mathieu Vinot, Martin Holzapfel und Nathalie Toso

Textilbasierte Verbundwerkstoffe wie Gewebe oder Geflechte zeichnen sich durch ihre komplexe Faserbündelarchitektur aus und erfordern für die Materialcharakterisierung einen hohen experimentellen Aufwand. Die Fertigungsrandbedingungen spielen dabei eine maßgebende Rolle und beeinflussen direkt die Faserarchitektur, welche eine Rückwirkung auf die Materialkennwerte hat. Zum Beispiel nehmen die Kennwerte außerhalb der Ebene bei erhöhter Faserwelligkeit auf Kosten von reduzierten intralaminaren Kennwerten zu. Ein Verständnis dieser komplexen Zusammenhänge kann insofern hauptsächlich durch numerische Untersuchungen gewonnen werden. In DigitPro wird ein numerischer Ansatz zur virtuellen Ermittlung der Materialeigenschaften auf mesoskopischer Ebene entwickelt, auf welchem die Textilarchitektur detailliert abgebildet und mit Finite-Elemente-Methoden simuliert wird. Anhand von Beispielen werden die Vorteile solcher Simulationsmethodiken in den nächsten Abschnitten erläutert.

3.1 Modellierung der Textilarchitektur unter Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen

In diesem Kapitel wird die Modellierung unterschiedlicher textiler Fasermaterialien auf unterschiedlichen Skalen und deren Übertrag auf die Struktursimulation im Detail erläutert. Ziel dabei ist es, die Faserarchitektur so genau wie möglich abzubilden um ein realistisches Verhalten während der Belastung vorherzusagen.

M. Vinot (✉) · M. Holzapfel · N. Toso
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Bauweisen und
Strukturtechnologie, Stuttgart, Deutschland
E-Mail: mathieu.vinot@dlr.de; martin.holzapfel@dlr.de; Nathalie.toso@dlr.de

3.1.1 Vorgehensweise und Prinzip der Einheitszelle

Für die Generierung der Textilarchitektur wird die quelloffene Software TexGen® verwendet [1]. Die Faserbündel werden durch eine Punktwolke abgebildet, welche den Punktkoordinaten einer B-Spline entspricht. Für gewobene bzw. geflochtene Textilien werden die Punktkoordinaten mit analytischen Formeln aus [2] berechnet. Unter Eingabe einer Querschnittsgeometrie wird die dreidimensionale Geometrie der Faserbündel generiert (Abb. 3.1) und automatisch mit Tetraeder-Elementen vernetzt. Im realen Textil sind die unterschiedlichen Lagen nicht direkt aufeinander, sondern mit einem Versatz gestapelt. Dieser Versatz führt zum sogenannten Verdichtungseffekt (engl. nesting), durch welches die Anzahl und Größe der reinen Matrixzonen (Reinharzgebiete) im infiltrierten Textil reduziert und der Faservolumengehalt erhöht werden. Dieser Effekt wird im numerischen Modell abgebildet, indem die Lagen stochastisch in der Ebene versetzt werden. Die Verdichtung wird mit dem Nesting-Faktor η gemessen (Gl. 3.1).

$$\eta = \frac{\text{Anzahl der Lagen} \cdot \text{Dicke einer Einzellage}}{\text{Dicke des Laminats}} \quad (3.1)$$

Aus diesem Schritt entsteht das virtuelle, ideale Textil, welches im nächsten Schritt bearbeitet wird. Damit die Fertigungseinflüsse berücksichtigt werden, wird im Fall von Geflechtes die Fadenbreite in Abhängigkeit von Fertigungsparametern, wie dem Kerndurchmesser D , der Spulenanzahl η und der Flechtwinkel θ berechnet (Gl. 3.2). Die Dicke des Faserbündels resultiert aus der Anzahl der Filamente und ist umgekehrt proportional zur Faserbündelbreite. Abb. 3.2 zeigt das experimentell bestimmte Prozessfenster und die entsprechenden numerisch erzeugten Geflechtarchitekturen. In beiden Fällen führt eine Erhöhung des Flechtwinkels, bzw. eine Abnahme des Kerndurchmessers zu erhöhter Kompaktierung des Geflechts in der Ebene. Bei großen Kerndurchmessern und kleinen Flechtwinkeln reduziert sich der Bedeckungsgrad im Geflecht und Reinharzgebiete entstehen im Laminat.

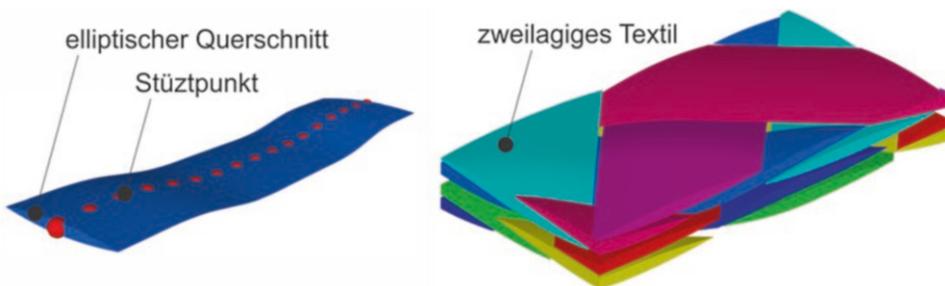


Abb. 3.1 Generierung der Faserbündelgeometrie mit der Software TexGen®