

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Marius Dackweiler

**Modellierung des Fügewickelprozesses  
zur Herstellung von leichten  
Fachwerkstrukturen**

Band 235



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Marius Dackweiler

## **Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Band 235



# **Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der KIT- Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

Marius Dackweiler, M.Sc.  
aus Bergheim

Tag der mündlichen Prüfung: 20.05.2020  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Korreferent: Prof. Prof. hon. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7517-5

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als „Wertschöpfungspartner“ einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferent, die vielen konstruktiven Diskussionen und das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die immer motivierenden und aufmunternden Worte während meiner Arbeit am Institut. Weiter danke ich Herrn Prof. Prof. hon. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald für sein großes Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie für die herzliche Gastfreundschaft am Polymer Engineering Center (PEC) in Madison und die wissenschaftlichen Diskussionen während meines dortigen Forschungsaufenthaltes. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dem Karlsruher House of Young Scientists (KHYS) danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der University of Wisconsin in Madison sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts „Modellierung des Faserfugewickels zum Verbinden von Leichtbauprofilen“, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit überwiegend entstanden ist.

Allen Kolleginnen und Kollegen sowie Ehemaligen am wbk, insbesondere im Bereich „Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung“, danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut, die kollegiale Zusammenarbeit und die vielen gemeinsamen Stunden außerhalb des Arbeitsalltags. Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Sekretariaten, allen Service-Centern und insbesondere der Werkstatt für die Unterstützung sowie die freundschaftliche und gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am Institut danken. Gleiches gilt für alle Studierende, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen meiner wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben. Meinen Kollegen und Freunden Sven Coutandin und Janna Hofmann sowie meinem Bruder Jonas möchte ich einen besonderen Dank für die fachliche Korrektur der Dissertation aussprechen.

Abschließend möchte ich meinen ganz besonderen Dank meiner Familie zukommen lassen, die mich in all den Jahren bedingungslos unterstützt und stets den notwendigen Rückhalt gegeben hat. Ich danke daher vor allem meinen Eltern Petra und Günter, die mir das Studium und die anschließende Promotion erst ermöglicht haben, sowie meiner Großmutter Helga und meinen Geschwistern Thomas, Alexandra und Jonas.

Karlsruhe, im Mai 2020

Marius Dackweiler



## Abstract

Changing ecological awareness and legal conditions lead to an increased use of lightweight components made of fibre composites in industrial applications. Therefore, this thesis focuses on a novel process for joining profiles made of such composite materials. First, fundamental investigations on the process with a winding ring, guided by a vertical articulated robot, were conducted in (Schädel 2014). Based on this study, the aim of this thesis is to model the wound joint and its associated kinematics to increase the flexibility and reproducibility of the process.

According to the state of the art, winding for joining hollow profiles differs from existing joining techniques due to its high lightweight potential and design freedom. To fully utilize this potential, however, a complete modeling of winding paths as well as the movements in the process is necessary. Approaches for this have already been presented, though they mainly refer to the fiber winding with a rotating mandrel and to simple, rotationally symmetrical geometries.

In order to compensate the existing deficits and to achieve the goal of modeling the joining process, a modular approach is presented. This consists of single modules for modelling the windings, the methodology for the simulation of mechanical load capacity, the kinematic modelling as well as model validation. First, the variables relevant for the model are identified, with the variance of winding patterns determined by manual winding tests. The friction of the fibers when deposited on the profile surface is investigated as it is an important parameter in the modelling process. Modelling the winding paths requires first a mathematical description of the surfaces for both profiles. On this basis, the winding paths on the longitudinal profile are generated using a stepwise algorithm for non-geodetic curves. These curves are continued tangentially in the transition area between both profiles and modelled on the longitudinal profile using a cubic function. An iterative algorithm optimizes the curve with respect to the maximum slip angle in order to avoid fiber slippage. In addition, the methodology developed for the structure of a FEM simulation allows qualitative statements with material parameters to be determined in the future about the load-bearing capacity of the joint. Modeling the movements during the process is based on the geometries of the robot and winding ring. Together with the points of the modelled winding pattern and the geometry parameters of the profiles, the individual joint positions and the rotor position of the winding ring can be determined for each step using inverse kinematics. An iterative algorithm for collision avoidance of the winding ring with the profiles is applied in each calculation step.

The winding unit is redesigned and assembled in a prototype with a new drive and bearing concept for the rotor and a self-regulating roving pre-tensioning module. The control commands required for the movements are automatically derived from existing models. Model validation is carried out by experimental winding tests with different profiles (DoE). The joints are evaluated by a comparison of the position of the individual windings and the nominal positions from the modelling.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Mathematische Grundlagen und Grundbegriffe	4
2.1.1 Kurven	4
2.1.2 Flächen	6
2.1.3 Flächenkurven	7
2.1.4 Geodätische Linien	8
2.1.5 Rotationsmatrix, orthogonale Projektion und Spiegelung	9
2.2 Verbindungstechniken für Leichtbauprofile	9
2.3 Faserwickeln	12
2.3.1 Faserwickeln mit rotierendem Dorn	13
2.3.2 Faserwickeln mit rotierender Kinematik	15
2.3.3 Faserwickeln als Fügeverfahren	16
2.3.4 Randbedingungen und Eigenschaften beim Faserwickeln	17
2.3.5 Modellierung und Optimierung von Wickelpfaden	19
2.4 Bewegungssimulation und Bahnplanung	24
2.4.1 Roboterkinematik	24
2.4.2 Bahnplanung	27
2.5 Bewertung des Stands der Forschung und Technik	30
2.5.1 Zusammenfassung	30
2.5.2 Vorteile und Defizite des Fügewickelverfahrens	31
<b>3 Zielsetzung, Lösungsansatz und Vorgehensweise</b>	<b>34</b>
3.1 Zielsetzung	34
3.2 Lösungsansatz	35

---

3.3	Vorgehensweise	37
<b>4</b>	<b>Charakterisierung</b>	<b>40</b>
4.1	Systemgrenze und Einflussgrößen	40
4.1.1	Systemgrenze	40
4.1.2	Einflussgrößen	42
4.2	Systematik von Wickelmustern	45
4.3	Rutschgrenze beim Faserwickeln	50
4.3.1	Methoden zur Untersuchung des Reibverhaltens	51
4.3.2	Experimentelle Untersuchung des Reibverhaltens	54
<b>5</b>	<b>Modellierung</b>	<b>65</b>
5.1	Modellannahmen	65
5.2	Oberflächengeometrie	66
5.3	Wickelpfade	70
5.3.1	Wickelpfade auf dem Flansch des Querprofils	71
5.3.2	Wickelpfade im Übergang von Quer- zu Längsprofil	77
5.3.3	Wickelpfade auf dem Längsprofil	79
5.3.4	Optimierung der Wickelpfade hinsichtlich der Rutschneigung	80
5.3.5	Wickelmuster	85
5.4	Methodik zur FEM-Simulation der Wickelverbindung	87
5.4.1	Aufbau des FEM-Simulationsmodells	88
5.4.2	Simulative Optimierung der Fügeverbindung	92
5.5	Kinematik	94
5.5.1	Geometrie der Wickeleinheit	94
5.5.2	Geometrie des Vertikal-Knickarm-Roboters mit zusätzlicher Drehachse	99
5.5.3	Trajektorie des Fadenauges	102
5.5.4	Kollisionsbedingungen	103
5.5.5	Modellaufbau und Simulationsablauf	106
<b>6</b>	<b>Wickeleinheit und Prozesssteuerung</b>	<b>112</b>
6.1	Weiterentwicklung und Konstruktion der Wickeleinheit	112

---

6.1.1	Systemanalyse und Anforderungsliste	113
6.1.2	Systemstruktur und Teillösungen	115
6.1.3	Realisierung	118
6.2	Prozesssteuerung	123
6.2.1	Steuerungskonzept	123
6.2.2	Synchronisation der Bewegungen	125
<b>7</b>	<b>Validierung und Bewertung</b>	<b>128</b>
7.1	Herstellung von Fügeverbindungen	128
7.2	Messstrategie und Auswertung	133
7.3	Diskussion der Ergebnisse	141
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>150</b>
8.1	Zusammenfassung	150
8.2	Ausblick	152
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>154</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
	<b>Anhang</b>	<b>X</b>