

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

Janna Hofmann

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-
Nadelwickelns zur Implementierung einer
trajektorienbasierten Drahtzugkraftregelung**

Band 240



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

Janna Hofmann

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns
zur Implementierung einer trajektorienbasierten
Drahtzugkraftregelung**

Band 240

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur
Implementierung einer trajektorienbasierten
Drahtzugkraftregelung**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Janna Hofmann

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 18. September 2020
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

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 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7778-0

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 • E-Mail: 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 der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin 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. Das mir entgegengebrachte Vertrauen habe ich stets als höchste Wertschätzung empfunden und jede fachliche Diskussion hat meine Arbeit täglich weiter verbessert. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke möchte ich für die Übernahme des Ko-Referats danken und die wissenschaftliche Plattform, die mir die von seinem Lehrstuhl jährlich veranstaltete EDCP jedes Jahr gegeben hat. Außerdem gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Jivka Ovtcharova für die Übernahme des Vorsitzes meiner Prüfung.

Ein großer Dank gilt den Konsortien des BMWi Projektes ProLemo sowie des BMBF Projektes NeWire, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc und seinen Kollegen der Firma Aumann durch deren technische Unterstützung die Arbeiten an der Wickelmaschine erleichtert wurden.

Allen Kolleginnen und Kollegen sowie Ehemaligen des wbk, aber insbesondere des Bereiches Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung möchte ich für die kollegiale und gleichzeitig freundschaftliche Zusammenarbeit danken. Hervorzuheben ist meine Gruppe Elektromobilität, deren Leitung ich übernehmen durfte und die es mir ermöglicht hat, Gruppenleitung und Promotion bewerkstelligen zu können. Ein weiterer großer Dank gilt den Sekretariaten, den Service-Centern IT und Personal und ganz besonders dem Service-Center Technik, die mich bei allen Arbeiten am wbk unterstützt haben und dank deren Arbeit die Prozesse im Hintergrund nahtlos abgelaufen sind. Meinen Studierenden, insbesondere Alexander und Manuel möchte ich für die Unterstützung durch eure Abschlussarbeiten danken.

Meinen Freunden und Kollegen Sven, Marius, Benedikt, Philipp und Sven möchte ich für die zahlreichen Stunden am und außerhalb des wbk danken, die euretwegen besonders waren. Felix, Marius und Florian möchte ich im Speziellen für die Zeit danken, die sie der Korrektur meiner Arbeit gewidmet haben.

Auch meiner Familie möchte ich einen ganz besonderen Dank zukommen lassen. Meine Eltern Marlis und Reinhard und mein Bruder Till haben mich mein ganzes Leben begleitet, unterstützt und mich zum richtigen Zeitpunkt gefördert, gefordert und losgelassen. Ihr habt mir alles gegeben, damit ich der Mensch sein kann, der ich sein möchte.

Meinen abschließenden und allergrößten Dank möchte ich meinem Kollegen, Freund und vor allem Lebenspartner Paul aussprechen. Deine Liebe, dein Lachen und deine positive Energie haben einen großen Anteil an dieser Arbeit. Worte schaffen es kaum, meine Dankbarkeit und Liebe auszudrücken.

Karlsruhe, im September 2020

Janna Hofmann

Abstract

Since the so called “Diesel Gate” in 2015, electric mobility is no longer a future trend but faces today's production plants in Germany with new challenges. As the electric drive is a key component of electric cars, new production technologies are developed to meet the challenges of the high performance requirements of the car manufacturers. The five axis needle winding systems NWS/S developed by Aumann Espelkamp GmbH is one of these new developments in production technologies. It is a highly flexible winding system which is suitable for prototyping and small series production. By overcoming the current disadvantages it has the chance to be applicable for mass production.

The goal of this thesis is to gain a deeper understanding of the five-axis needle winding process. Therefore the question whether a trajectory-based tensile force control can be implemented by means of a process-modelling will be answered.

For this purpose the necessary fundamentals as well as the current state of research and technology are to be shown first. By pointing out the deficits of the five-axis needle winding process the goal of the thesis is defined by five research questions. An approach is shown to solve the questions asked.

Following a methodical procedure, first a parametric, analytical modeling of the winding trajectory is developed.

Second, a numerical process model to determine the tensile force is set up. It combines the finite elements and multi-body simulation and is implemented in COMSOL Multiphysics. Building up on this, an analytical model of the geometric relationships of the machine parts will be established and validated. With this model, the necessary angle of rotation of the brake wheel for conveying the required amount of wire can be determined independent of the stator and winding tool geometry.

Afterwards the implementation of the trajectory based tensile force control will be implemented by the means of a CAE-process chain.

In the final chapter the validation of the implementation will be done by comparing the trajectory based tensile force control with a torque control of the servo-brake. The scientific results are systematically evaluated and discussed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung und Technik	4
2.1 Statorfertigung	4
2.1.1 Prozesskette Statorfertigung	4
2.1.2 Leistungsmerkmale eines Stators	7
2.1.3 Verfahren zur Herstellung von verteilten Wicklungen	12
2.1.4 Aumann Nadelwickelsystem NWS/S	16
2.2 Prozessbeschreibung von Wickelverfahren	20
2.2.1 Runddrahtwickelverfahren	20
2.2.2 Nadelwickelverfahren	22
2.3 Drahtzugkraft als prozessbestimmender Parameter der Direktbewicklung	24
2.3.1 Grundlagen der Drahtzugkraftregelung	24
2.3.2 Optimierung von Drahtzugkraftregelungssystemen	26
2.3.3 Ansatz der trajektorienbasierten Drahtzugkraftregelung	29
2.4 Bewertung des Stands der Forschung und Technik	34
3 Zielsetzung, Lösungsansatz und Vorgehensweise	38
3.1 Zielsetzung	38
3.2 Lösungsansatz	40
3.3 Vorgehensweise	41
4 Systemanalyse	43
4.1 Systembeschreibung	44
4.2 Analytische Beschreibung der Wickeltrajektorie	47
4.2.1 Definition des internen Koordinatensystems	48
4.2.2 Parametrierung des analytischen Modells	49

4.3	Analyse der Drahtzugkraft entlang der Wickeltrajektorie	55
4.3.1	Auswahl der Sensorik und Integration in den Messaufbau	55
4.3.2	Datenaufnahme und Integration in die Steuerung	57
4.3.3	Auswertung der Drahtzugkraft beim Fünf-Achs-Nadelwickeln	58
4.4	Zusammenfassung der Systemanalyse	61
5	Prozessmodellierung	62
5.1	Numerische Prozessmodellierung	64
5.1.1	Aufbau des Simulationsmodells	64
5.1.2	Simulation der Lagerkraft bei konstanter Drahtzugkraft	76
5.1.3	Zusammenfassung der numerischen Prozessmodellierung	82
5.2	Analytische Prozessmodellierung	82
5.2.1	Analytische Modellierung der freien Drahtlänge	82
5.2.2	Modellierung der zur Verfügung zu stellenden Drahtmenge	90
5.2.3	Anpassung der analytischen Modellierung an eine zweite Statorgeometrie	96
5.2.4	Ergebnis der analytischen Modellierung	98
5.2.5	Zusammenfassung der analytischen Prozessmodellierung	104
6	Implementierung der trajektorienbasierten Drahtzugkraftregelung mithilfe einer durchgehenden CAE-Prozesskette	105
6.1	Implementierung der virtuellen Leitachse	107
6.1.1	Analyse der Steuerungsarchitektur	107
6.1.2	Beschreibung der virtuellen Leitachse	110
6.1.3	Berechnung der virtuellen Leitachse	111
6.1.4	Implementierung und Validierung der virtuellen Leitachse	116
6.1.5	Zusammenfassung der Implementierung der virtuellen Leitachse	117
6.2	Implementierung der Lageregelung des Bremsrades	117
6.2.1	Grundlagen und Grundbegriffe	118
6.2.2	Parametrierung der Betriebsart elektronische Kurvenscheibe	121
6.2.3	Experimentelle Bestimmung der variablen Parameter	123
6.2.4	Zusammenfassung der Implementierung der Lageregelung	128
6.3	Aufbau einer CAE-Prozesskette	128

6.3.1	Grundlagen und Grundbegriffe	128
6.3.2	Implementierung der CAE-Prozesskette	133
6.3.3	Validierung der MATLAB-Schnittstelle	145
6.3.4	Zusammenfassung des Aufbaus der CAE-Prozesskette	151
6.4	Zusammenfassung der Implementierung der trajektorienbasierten Drahtzugkraftregelung mithilfe einer durchgehenden CAE-Prozesskette	151
7	Validierung der Implementierung und Potenzialanalyse	152
7.1	Experimentelle Validierung der trajektorienbasierten Drahtzugkraftregelung	152
7.2	Bewertung der trajektorienbasierten Drahtzugkraftregelung	155
8	Zusammenfassung und Ausblick	159
8.1	Zusammenfassung	159
8.2	Ausblick	160
	Literaturverzeichnis	162
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	VIII
	Quelltextverzeichnis	X
	Anhang	XI

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOM	Document Object Model
FEM	Finite Elemente Methode
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MKS	Mehrkörpersimulation
NC	Numerical Control
NWS/S	Nadelwickelsystem/Starkdraht
STL	Standard Triangulation Language
wbk	Institut für Produktionstechnik
XML	Extensible Markup Language

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
a	Laufvariable zur Berechnung des Wertes der virtuellen Achse	
$A_{\text{Draht,Cu}}$	Kupferquerschnittsfläche	mm^2
$A_{\text{Draht,ges}}$	Drahtquerschnittsfläche	mm^2
A_{Nut}	Nutquerschnittsfläche	mm^2
$A_{\text{Nut,iso}}$	Nutquerschnittsfläche der isolierten Nut	mm^2
d	Drahtdurchmesser inklusive Isolation	mm
d_{CD}	Abstand zwischen Stützpunkt C und Stützpunkt D	mm
d_{Cu}	Drahtdurchmesser ohne Isolation	mm
d_{iB}	Abstand der Berührungspunkte zwischen Rolle i und Bremsrad	mm
d_{ik}	Abstand der Berührungspunkte zwischen Rolle i und Rolle k	mm
d_{oi}	Abstand zwischen Stützpunkt D und Berührungspunkt der i-ten Rolle	mm
D_x	Tiefe der Nadeldüse	mm
D_z	halbe Breite der Nadeldüse	mm
I	Stärke des Spulenstroms	A
k_{el}	Elektrischer Füllfaktor	
k_{mech}	Mechanischer Füllfaktor	
l	Leiterlänge	mm
$l_{\text{abh,i}}$	von Q abhängiger Teil der Rollen-Drahtlänge beim i-ten Drahtverlauf	mm
l_{unabh}	von Q unabhängiger Teil der Rollen-Drahtlänge	mm
n	Anzahl an Windungen	
\vec{N}_d	Normalenvektor eines Dreiecks	

N_x	Abstand zwischen Nadel- und Nadelträger-Koordinatensystem in x-Richtung	<i>mm</i>
N_z	Abstand zwischen Nadel- und Nadelträger-Koordinatensystem in z-Richtung	<i>mm</i>
P_1	Eingangsleistung	<i>W</i>
P_2	Verfügbare Leistung	<i>W</i>
P_δ	Luftspaltleistung	<i>W</i>
P_{Cu}	Kupferverluste einer Windung	
$P_{ende,a}$	Finale Position des Nadelarms im Maschinenkoordinatensystem	
P_i	Punkt 1-7 zur Bestimmung der Werkzeug-Parameter	
P_{ist}	Aktuelle Position des Nadelarms im Maschinenkoordinatensystem	
P_m	Punkt zum Bestimmen der inneren Werkzeugtiefe	
$P_{O,dpr}$	Durchfahrpunkt Rückseite	<i>mm</i>
$P_{O,dpv}$	Durchfahrpunkt Verschaltungsseite	<i>mm</i>
$P_{O,spr,e}$	Sicherpunkt Rückseite	<i>mm</i>
$P_{O,spv,e}$	Sicherpunkt Verschaltungsseite	<i>mm</i>
$P_{O,vpr,e}$	Verlegungspunkt Rückseite	<i>mm</i>
$P_{O,vpv,e}$	Verlegungspunkt Verschaltungsseite	<i>mm</i>
$P_{O,zpr}$	Zwischenpunkt Rückseite	<i>mm</i>
$P_{O,zpv}$	Zwischenpunkt Verschaltungsseite	<i>mm</i>
P_x	Aktueller Wert der x-Maschinenachse	<i>mm</i>
P_y	Aktueller Wert der y-Maschinenachse	<i>mm</i>
P_z	Aktueller Wert der z-Maschinenachse	<i>mm</i>
$Pos_{N,A}$	Position des Nadelstützpunktes A	<i>mm</i>
$Pos_{N,B}$	Position des Nadelstützpunktes B	<i>mm</i>
$Pos_{N,C}$	Position des Nadelstützpunktes C	<i>mm</i>

Q	Winkel der Nadelträgerrotationsachse	<i>rad</i>
Q_{dpr}	Winkel der Q-Maschinenachse am Durchfahrpunkt Rückseite	<i>rad</i>
Q_{dpv}	Winkel der Q-Maschinenachse am Durchfahrpunkt Verschaltungsseite	<i>rad</i>
Q_{spr}	Winkel der Q-Maschinenachse am Sicherpunkt Rückseite	<i>rad</i>
Q_{spv}	Winkel der Q-Maschinenachse am Sicherpunkt Verschaltungsseite	<i>rad</i>
Q_{sv}	Winkel der Q-Maschinenachse am Startpunkt Verschaltungsseite	<i>rad</i>
Q_{vpr}	Winkel der Q-Maschinenachse am Verlegungspunkt Rückseite	<i>rad</i>
Q_{vpv}	Winkel der Q-Maschinenachse am Verlegungspunkt Verschaltungsseite	<i>rad</i>
Q_{zpr}	Winkel der Q-Maschinenachse am Zwischenpunkt Rückseite	<i>rad</i>
Q_{zpv}	Winkel der Q-Maschinenachse am Zwischenpunkt Verschaltungsseite	<i>rad</i>
\mathbb{R}	Parameterraum der reellen Zahlen	
\vec{R}	Richtungsvektor eines Dreiecks	
R	Aktueller Winkel der Statorrotationsachse	<i>rad</i>
r_B	Radius des Bremsrades	<i>mm</i>
R_{Cu}	Wicklungswiderstand	Ω
R_i	i-ter Rotationswinkel des Stators	<i>rad</i>
r_i	Radius der i-ten Rolle	<i>mm</i>
r_k	Radius der k-ten Rolle	<i>mm</i>
$Stp_{N,dyn}$	Position des dynamischen Nadelstützpunktes	<i>mm</i>
$Stp_{St,Hilf}$	Position eines Statorstützpunktes im Hilfskoordinatensystem	<i>mm</i>
$Stp_{St,int}$	Position eines Statorstützpunktes im internen Koordinatensystem	<i>mm</i>
$Stp_{St,R}$	Radialer Abstand auf der Nutsymmetrieachse zur Rotationsachse des Stators	<i>mm</i>
$Stp_{St,x}$	x-Koordinate eines Statorstützpunktes	<i>mm</i>

$Stp_{St,y}$	orthogonaler Abstand eines Statorstützpunktes von der Nutsymmetrieachse	<i>mm</i>
$Stp_{W,int}$	Position eines Werkzeugstützpunktes im internen Koordinatensystem	<i>mm</i>
$Stp_{W,R}$	radialer Abstand auf der Werkzeugsymmetrieachse zur Rotationsachse des Stators	<i>mm</i>
$Stp_{W,x}$	x-Koordinate eines Werkzeug-Stützpunktes	<i>mm</i>
$Stp_{W,y}$	orthogonaler Abstand eines Werkzeug-Stützpunktes von der Werkzeugsymmetrieachse	<i>mm</i>
int_T^{Na}	Transformationsmatrix vom internen Koordinatensystem in das Nadelkoordinatensystem	
int_T^{NT}	Transformationsmatrix vom internen Koordinatensystem in das Nadelträgerkoordinatensystem	
NT_T^{Na}	Transformationsmatrix vom Nadelträgerkoordinatensystem in das Nadelkoordinatensystem	
V_a	Sicherheitsabstand zwischen x-Achse und Statorinneren	<i>mm</i>
V_{Cu}	Kupferverluste	
V_{Fe}	Eisenverluste	
V_R	Reibungsverluste	
V_Z	Zusatzverluste	
W_b	Werkzeugbreite gesamt	<i>mm</i>
$W_{b,1-6}$	Werkzeugbreite 1-6	<i>mm</i>
$W_{t,\alpha}$	äußere Werkzeugtiefe	<i>mm</i>
$W_{t,1-6}$	Werkzeugtiefe 1-6	<i>mm</i>
$W_{t,i}$	innere Werkzeugtiefe	<i>mm</i>
x_B	x-Koordinate des Bremsradmittelpunktes im internen Koordinatensystem	<i>mm</i>
x_{int}	x-Achse des internen Koordinatensystems	
x_i	x-Koordinate des i-ten Rollenmittelpunktes im Rollen-Koordinatensystem	<i>mm</i>
x_k	x-Koordinate des k-ten Rollenmittelpunktes im Rollen-Koordinatensystem	<i>mm</i>

x_{Na}	x-Achse des Nadel-Koordinatensystems	
x_{NT}	x-Achse des Nadelträger-Koordinatensystems	
x_0	x-Koordinate des Stützpunktes D	<i>mm</i>
x_{0i}	x-Koordinate des Stützpunktes D sowie der Rollen eins und zwei bei Q=0	<i>mm</i>
y_B	y-Koordinate des Bremsradmittelpunktes im internen Koordinatensystem	<i>mm</i>
z_B	z-Koordinate des Bremsradmittelpunktes im internen Koordinatensystem	<i>mm</i>
z_i	z-Koordinate des i-ten Rollenmittelpunktes im Rollen-Koordinatensystem	<i>mm</i>
z_{int}	z-Achse des internen Koordinatensystems	
z_k	z-Koordinate des k-ten Rollenmittelpunktes im Rollen-Koordinatensystem	<i>mm</i>
z_{Na}	z-Achse des Nadel-Koordinatensystems	
z_{NT}	z-Achse des Nadelträger-Koordinatensystems	
z_0	z-Koordinate des Stützpunktes D	<i>mm</i>
z_{0i}	z-Koordinate des Stützpunktes D sowie der Rollen eins und zwei bei Q=0	<i>mm</i>

Griechische Symbole

β	Drehwinkel der Nut-Symmetrieachse	<i>rad</i>
γ	Auslaufwinkel des Drahtes aus dem Sensor bei der Justierung	<i>rad</i>
γ_{1B}	Berührungswinkel 1 des Bremsrades	<i>rad</i>
γ_{2B}	Berührungswinkel 2 des Bremsrades	<i>rad</i>
γ_{1i}	Berührungswinkel 1 der Rolle i	<i>rad</i>
γ_{2i}	Berührungswinkel 2 der Rolle i	<i>rad</i>
ρ	Spezifischer elektrischer Widerstand des Materials	$\mu\Omega \cdot m$
τ	Variable zur Bestimmung der Position des dynamischen Nadelstützpunktes	
ω	Trajektorienparameter zur Parametrierung der virtuellen Leitachse	

$\Delta\omega$	Abstand zwischen zwei Werten des Trajektorienparameters ω
ω_{Schritt}	Schrittvariable zur Berechnung von ω
$\omega_{\text{undefiniert}}$	Parameterwert, für den die virtuelle Achse nicht definiert ist
