

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

V. Geinitz / P. Beyer / H.-J. Schorcht

Anwendung der statistischen Versuchsmethodik zur Analyse des Federwindeprozesses

ABSTRACT

Die geometrischen Eigenschaften der Schraubendruckfeder werden maßgeblich während des Windeprozesses festgelegt, bei dem der Federdraht zur Schraubendruckfeder umgeformt wird. Der Federwindeprozess hängt vom Zusammenwirken vieler Faktoren ab, so dass eine ganzheitlich beschreibende Theorie des Umformprozesses bisher nicht existiert. Dieser Beitrag stellt die Anwendung der statistischen Versuchsmethodik als einem sehr wirksamen Werkzeug zur rationellen und systematischen Untersuchung vielparametrischer Prozesse vor. Hintergrund dieser Untersuchungen war nicht in erster Linie die Steigerung von Qualitätskennziffern, sondern das Auffinden von Zusammenhängen zwischen den Einstellungen der Windwerkzeuge und den daraus resultierenden Federgeometrieparametern.

Mittels statistischer Versuchsmethodik wurden Versuche geplant, durchgeführt und ausgewertet, die einen Beitrag zur Analyse dieses Federwindeprozesses leisten.

Herstellung von Schraubendruckfedern

Schraubendruckfedern gehören zu den sehr häufig verwendeten Konstruktionselementen. Sie werden auf Federwindemaschinen hergestellt, die überwiegend auf dem Zwei-Finger-Windesystem basieren (Bild 1).

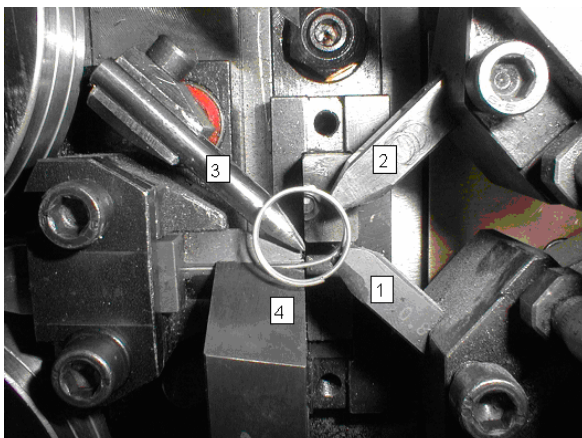


Bild 1: Windwerkzeuge bei der Federfertigung mit dem Zwei-Finger-Windesystem

- 1 - unterer Windefinger
- 2 - oberer Windefinger
- 3 - Steigungsfinger
- 4 - Steigungskeil

Die zur Drahtformung und -trennung erforderlichen Werkzeuge verfügen über die im Bild 2 [1] dargestellten und in Tabelle 1 [1] erläuterten Bewegungsmöglichkeiten, die die Komplexität dieses Umformprozesses noch einmal verdeutlichen.

Tabelle 1: Koordinatensysteme der Windewerkzeuge und ihre Berührungspunkte mit dem Draht

Werkzeug	Bewegungsmöglichkeit (Bild 2)
Drahtführung	Verschiebung in Richtung e_{11}
Unterer Windestift	Verschiebung in Richtung e_{21} und e_{22} , Rotation in Richtung φ_{21} und φ_{23} , Variation des Anlagepunktes P_2 in Richtung z-Achse, realisiert durch Rotation in Richtung φ_{22}
Oberer Windestift	Verschiebung in Richtung e_{31} und e_{32} , Rotation in Richtung φ_{31} und φ_{33} , Variation des Anlagepunktes P_3 in Richtung z-Achse, realisiert durch Rotation in Richtung φ_{32}
Steigungsfinger	Verschiebung in Richtung e_{43}
Steigungskeil	Verschiebung in Richtung e_{52} , Rotation in Richtung φ_{51}
Abschneidemesser	Verschiebung in Richtung e_{72} , Rotation in Richtung φ_{71}
Abschneidedorn	Verschiebung in Richtung e_{82} und e_{83}

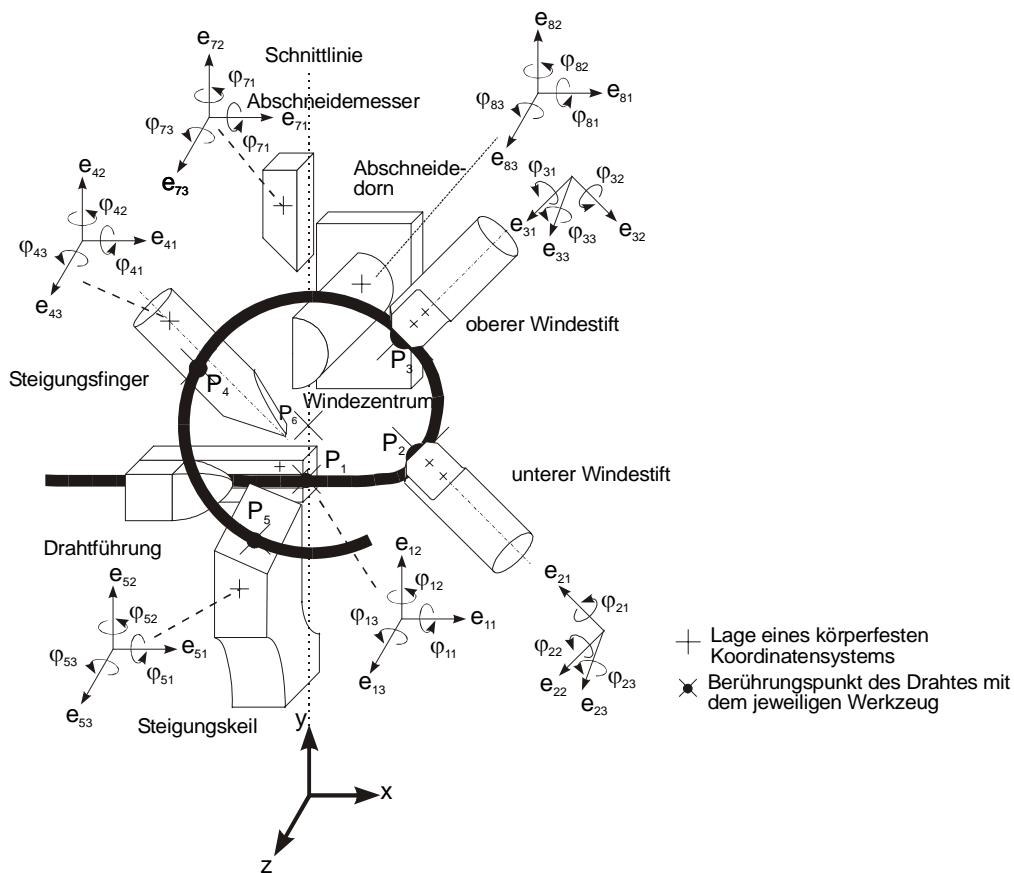


Bild 2: Koordinatensysteme der Windewerkzeuge und ihre Berührungspunkte mit dem Draht

Prinzipielle Vorgehensweise

Die Schraubenfeder, die während des Federwindeprozesses entsteht, wird als Rohfeder bezeichnet und alle Parameter, die zur Beschreibung ihrer geometrischen und funktionellen Eigenschaften benötigt werden, sind Zielgrößen des Prozesses Federwinden. Außer den an der Feder messbaren Zielgrößen muß eine weitere in den Untersuchungen berücksichtigt werden, nämlich die horizontale Lage des Windezentrum (Mittelpunkt der gerade gewundenen Federwindung). Weil ein ordnungsgemäßes Trennen der Schraubenfeder vom restlichen Draht durch Abschneidmesser und Abschneidedorn nur möglich ist, wenn der Mittelpunkt der Federwindung auf der Schnittlinie liegt, die durch Messer und Dorn gebildet wird (Bild 2), ist die durch die Lage der Windewerkzeuge bestimmte Lage des Windezentrum eine wesentliche Zielgröße für die Untersuchungen zum Windeprozess. Ziel der Untersuchungen ist es, kausale Zusammenhänge (Ursache-Wirkung-Beziehung) zwischen einzelnen Maschinenparametern als Einflußgrößen einerseits und bestimmten daraus resultierenden Schraubenfederparametern als Zielgrößen andererseits aufzustellen. Dabei ist es wichtig, alle Einfluss- und Zielgrößen des Systems Federwinden zu kennen und signifikante Einflußgrößen von nicht signifikanten zu trennen [7].

Die Eingrenzung auf wesentliche zu untersuchende Einflussgrößen (Haupteinflussgrößen) ist der aufwendigste Teil der Versuchsplanung und -durchführung, weil damit Ergebnis und Effektivität der Untersuchungen maßgeblich beeinflusst werden (4. in Tabelle 2). Auf der Grundlage von Vorüberlegungen, Expertenbefragungen und Vorversuchen wurden als wichtigste Zielgrößen (Hauptzielgrößen) für die Analyse des Windeprozesses die Lage des Windezentrum, der Windungsdurchmesser D sowie die Steigung m im Federmittelteil bzw. die Federlänge L_0 ermittelt. Zusammen mit dem Drahtdurchmesser d bestimmen sie maßgeblich Lage und Anstieg der Federkennlinie. Außerdem werden die Streuungen dieser Größen untersucht, die Aussagen über die Stabilität der Fertigung zulassen.

Im Ergebnis der Untersuchungen erhält man die Ursache-Wirkung-Beziehung (Übertragungsfunktion) zwischen den Eingangsgrößen und den Zielgrößen des Systems. Darüber hinaus gestattet die Versuchsplanung, Wechselwirkungen zwischen mehreren Einflußgrößen aufzudecken, die bei isolierter Betrachtung jeder Einflußgröße verborgen bleiben [6].

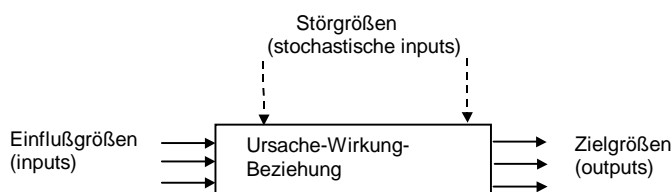


Bild 3: Zielgrößenveränderung durch Einfluss- und Störgrößen [4]

Man unterscheidet zwischen

- gezielt einstellbaren (variablen) Einflussgrößen, die in der Versuchsmethodik auch Einflussfaktor genannt werden,
- konstanten bzw. gezielt konstant gehaltenen Einflussgrößen und
- zufällig wirkenden Einflussgrößen, den Störgrößen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Vorgehensweise der Versuchsmethodik [1]

	Überlegungen	Aufgaben
1.	Welche Qualitätsmerkmale sind zu untersuchen?	Feststellen der Zielgrößen
2.	Welche Variablen beeinflussen die Zielgrößen?	Feststellen der Einflußgrößen (Hauptwirkungen, aber auch Wechselwirkungen mehrerer Einflußgrößen)
3.	Welcher Art sind die Einflußgrößen?	Unterscheiden von systematischen (gezielt einstellbaren) und zufälligen Einflußgrößen
4.	Welche Einflußgrößen haben voraussichtlich einen besonders starken Durchgriff auf welche Zielgrößen? (nach dem Pareto-Prinzip lassen sich Zielgrößen zu 80-90% in Abhängigkeit von 3-5 Einflußgrößen beschreiben) Ziel: Eingrenzung auf Haupteinflußgrößen	Auswahl der für die Versuche wesentlichen Einflußgrößen als Einflußfaktoren und Festlegen der Faktorstufen, auf denen sie während der Versuchsreihe variiert werden
5.	Können die verbleibenden Einflußgrößen für alle Versuche konstant gehalten werden? Ziel: Versuchsstreuung reduzieren, Empfindlichkeit erhöhen	Festlegen des konstant zu haltenden Niveaus für die verbliebenen Einflußgrößen (kontrollierte konstante Einflußgrößen), Definieren eines Arbeitspunktes
6.	Welche Versuchsart ist zweckmäßig? (vollständiger faktorieller Versuch, etc.)	Auswahl der Versuchsart, Modellbildung
7.	Auswertung der Versuche und Interpretation der Ergebnisse	Aufstellen der Ursache-Wirkung-Beziehung zwischen den Einfluß- und Zielgrößen
8.	Durchführung und Auswertung eines Versuches zur Bestätigung	Test der Ursache-Wirkung-Beziehung mit nicht zur Parameterschätzung oder zum Signifikanztest verwendeten Versuchspunkten

Bei der Versuchsplanung werden für die Einflussfaktoren bestimmte Einstellwerte, so genannte Stufen, festgelegt, wobei der Versuchsbereich durch die oberen und unteren Stufen der Faktoren begrenzt wird. Die für einen Versuch festgelegten Stufen aller variablen Einflußgrößen (Stufenkombination) bilden zusammen mit den festen Werten der konstanten Einflußgrößen den Versuchspunkt. Ein Versuchsplan umfaßt eine Reihe von Versuchspunkten, d.h. Stufenkombinationen, der gleichen Einflußgrößen [4]. Die Festlegung der Faktorstufen beeinflusst das Untersuchungsergebnis erheblich. Meist werden nur der obere und untere Grenzwert einer einstellbaren Einflußgröße durch apparative Gegebenheiten oder Werkstoffkennwerte o.ä. vorgegeben.

Die Festlegung von zwei Stufen ist gleichbedeutend mit einer Linearisierung, die in erster Näherung

durchaus zulässig ist.

Die zur Planung der Experimente notwendigen Überlegungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Das Ergebnis der Versuchsauswertung kann erstens darin bestehen, festzustellen, ob die betrachtete Zielgröße tatsächlich von allen variierten Einflussgrößen oder nur von einer Teilmenge abhängt, was letztendlich durch Signifikanztests ermittelt werden kann. Für die Parameter, die die Zielgröße nicht beeinflussen, können in Hinblick auf andere Optimierungskriterien günstige Werte eingestellt werden.

Zum zweiten kann es erforderlich sein, den quantitativen Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgrößen näherungsweise zu bestimmen, was auf ein Schätzproblem für die unbekannt Funktion hinausläuft [3]. Dieses Schätzproblem kann z.B. durch lineare Regression oder mehrfach lineare Regression gelöst werden.

Anwendung der statistischen Versuchsmethodik auf den Federwindeprozess

Da aufgrund von Expertenbefragungen und Vorversuchen Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen und nicht lineare Zusammenhänge mit den Zielgrößen zu erwarten waren, wurden drei Stufen für jede Einflussgröße festgelegt und beispielhaft für die Beeinflussung des Federdurchmessers und der Lage des Windezentrams ein vollständiger 3^4 -Versuch geplant. Voraussetzung für die Durchführung des 3^4 -Versuches war das Anbringen von Messsystemen zur Erfassung jeder Windewerkzeugeinstellung und zur Vermessung der Lage des Windezentrams sowie des Federdurchmessers.

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen und Expertenbefragungen zeigen deutlich, dass zwischen verschiedenen Einflussgrößen Wechselwirkungen auftreten und ihre Wirkungen auf die Zielgrößen nichtlinear sind. Um das in den Untersuchungen mit berücksichtigen zu können, ist als Versuchsart nur ein vollständiger faktorieller Versuch mit wenigstens drei verschiedenen Faktorstufen möglich (Punkt 6. in Tabelle 2).

Ziel der Experimente ist die Ermittlung der Übertragungsfunktionen zwischen den Hauptzielgrößen und den Haupteinflussgrößen, wobei die restlichen Einflussgrößen möglichst konstant zu halten sind.

Tabelle 3: Einstellmöglichkeiten der Windestifte und der Drahtführung an der Federwindmaschine UFM8

Einstellmöglichkeit		Messpunkt	Messmittel	Funktion	Hauptwirkung auf
Drahtzuführung					
1.	Position des Drahtaustrittspunktes aus der Drahtführung	P_1	Bildverarbeitung	Gegenlager für die Umformung	Federdurchmesser
beide Windestifte					
2.	Gemeinsames Verschieben der beiden Windestifte über einen Hebel entlang ihrer Führungen (VA)	P_2, P_3	Bildverarbeitung	Motorische Einstellung des Federdurchmessers	Federdurchmesser
unterer Windestift					
3.	Verdrehen (Rotation um die Stiftachse)	φ_{21}	Hülse mit Skala	Einstellen günstiger Reibungsverhältnisse, Anpassen der Lage der Nut an den Steigungsverlauf	Federsteigung
4.	Kippen (Rotation senkrecht zu Stiftachse und Windeebene)	φ_{22}	faseroptischer Sensor	Vorspannung	Federsteigung
5.	(Alleinige) Verschiebung entlang der Führungsbahn (VD) ¹	P_2	Bildverarbeitung	tangentiale Anlage der Nut am Federdraht, x-Koordinate des Windezentriums verschieben	Federdurchmesser
6.	Verschiebung entlang der Stiftachse (VC)	P_2	Bildverarbeitung	x-Koordinate des Windezentriums verschieben	Federdurchmesser
oberer Windestift					
7.	Verdrehen (Rotation um die Stiftachse)	φ_{31}	Hülse mit Skala	Einstellen günstiger Reibungsverhältnisse	Federsteigung
8.	Kippen (Rotation senkrecht zu Stiftachse und Windeebene)	φ_{32}	faseroptischer Sensor	Erzeugen der Vorspannung für die Endwindung	Federsteigung
9.	Schwenken (RB, Rotation senkrecht zur Stiftachse in der Windeebene)	P_3	Bildverarbeitung	Tangentiale Anlage der Nut am Federdraht	Federdurchmesser

¹ Diese Verstellmöglichkeit wurde an weiterentwickelten Windemaschinen durch die Bewegungsmöglichkeit in Richtung φ_{23} ersetzt.

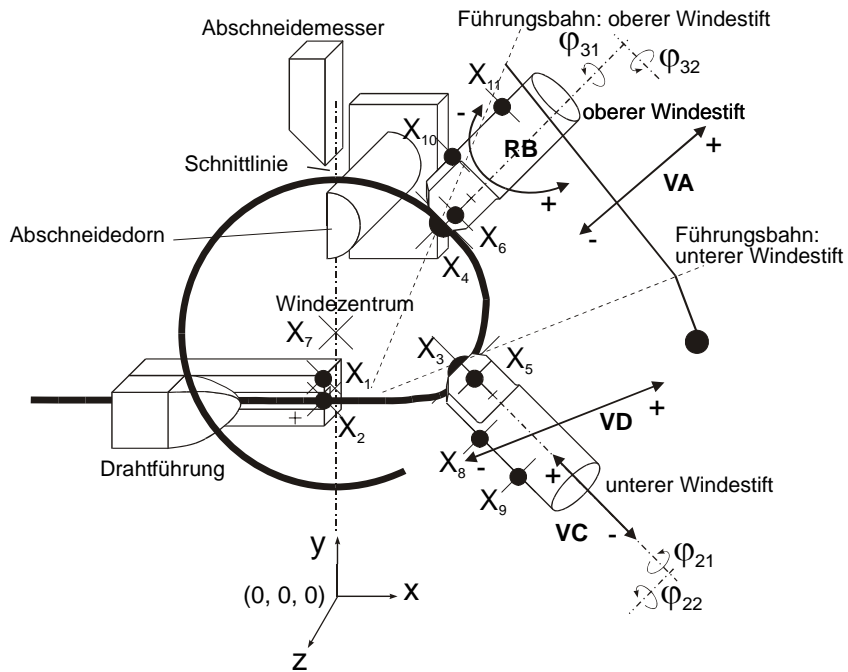
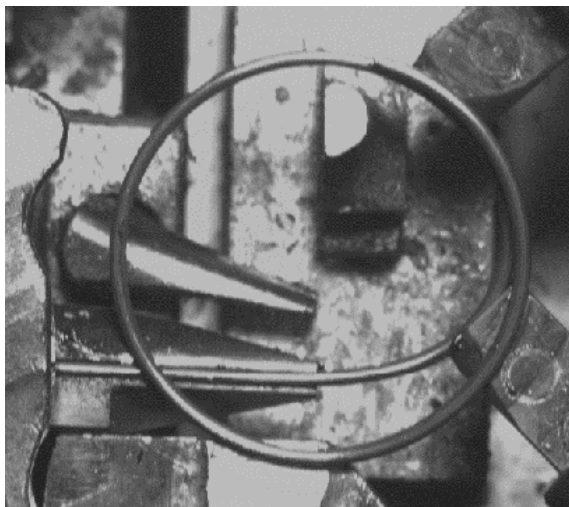


Bild 4: Messpunkte für die optische Bestimmung der Windewerkzeugpositionen [1]

Tabelle 4: Einflussgrößen auf den Federdurchmesser und die Lage des Windezentrums

Einflussgröße (Einstellmöglichkeit)		Nr. aus Tab. 2	Verstellbereich
Die über einen Hebel gekoppelte Verschiebung der beiden Windestifte entlang ihrer Führungsbahnen	VA	2	$\pm 4 \text{ mm} = \pm 4 \text{ Umdr.}$
Schwenken des oberen Windestiftes in der Windeebene	RB	9	$\pm 2^\circ$
Verschieben des unteren Windestiftes entlang seiner Stiftachse	VC	6	$\pm 0,3 \text{ mm}$
Alleiniges Verschieben des unteren Stiftes entlang seiner Führungsbahn	VD	5	$\pm 1,6 \text{ mm}$



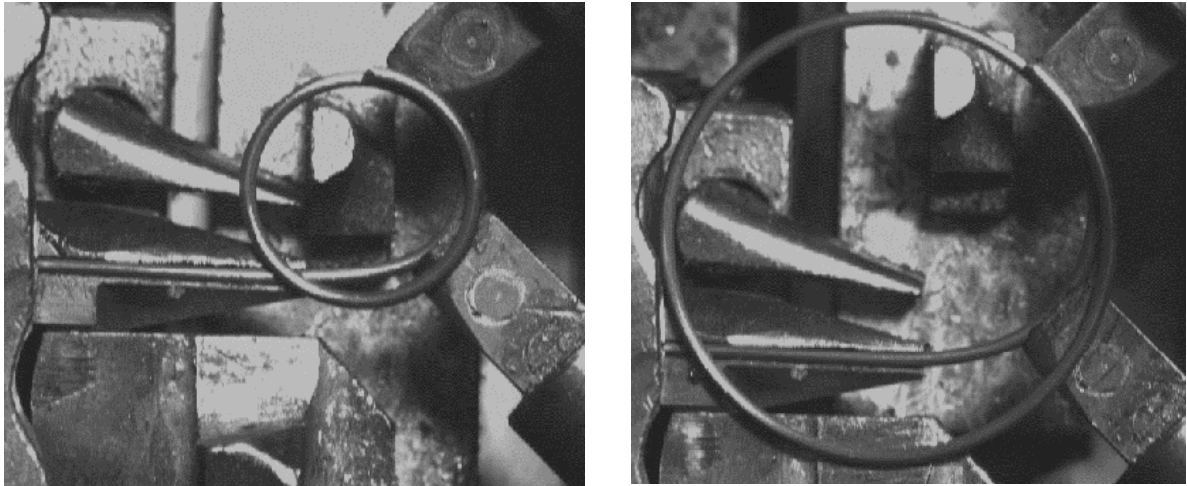


Bild 5: Beispiele von den Windwerkzeugeinstellungen während des vollständigen Versuches, die mittels Bildverarbeitung ausgewertet wurden [2]

Mit jeder der $3^4 = 81$ verschiedenen Windestifeinrichtungen wurden jeweils drei Federn gefertigt und deren Federaußendurchmesser gemessen. Zum Feststellen der Positionen der Windwerkzeuge und der Lage des Windezentriums wurden mittels CCD-Kamera Bilder von der Windezone aufgenommen (Bild 5) und mit einem Bildverarbeitungssystem vermessen. Da sich unterschiedliche Drahtmaterialien, wie in Vorversuchen getestet, nicht signifikant auf den Umformprozess auswirken, wurde der vollständige Versuch nur mit einem Werkstoff (patentiert gezogen Sorte D, $d = 0,8$ mm) durchgeführt [2].

Die Ergebnisse des vollständigen faktoriellen Versuches werden zur Modellbildung [Parameterschätzung 3, 4, 5] herangezogen. Mittels Regression werden die Parameter des Modells geschätzt und die Modellgleichungen für den Zusammenhang zwischen dem Federaußendurchmesser (D_e in mm) und den Verschiebungen der Windestife und zur Berechnung der horizontalen Lage des Windezentriums an der UFM 8 ($x(X_7)$ in mm) aufgestellt sowie das jeweilige Bestimmtheitsmaß der Regression und die Standardabweichung des Schätzwertes ermittelt.

Als Modellgleichung für den Zusammenhang zwischen dem Federaußendurchmesser und den Verstellungen der Windestife erhält man

$$D_e = 14,82 + 2,22 \cdot (VA)^2 + 3,86 \cdot VA - 0,855 \cdot VD - 1,53 \cdot VA \cdot VD + 1,16 \cdot VA \cdot VC \quad . \quad (1)$$

Bestimmtheitsmaß der Regression: 0,994	Standardfehler des Schätzwertes: 0,4 mm
----------------------------------------	-----------------------------------------

Die ermittelten Koeffizienten ergeben sich unter Berücksichtigung der an der UFM 8 festgelegten Bezugspunkte und Skalierungen für die jeweiligen normierten Einstellparameter (VA , VC , VD in Skalenteilen) sowie für den verwendeten Drahtdurchmesser mit $d = 0,8$ mm. Mit Gleichung (1) ist es möglich, den Federaußendurchmesser für eine beliebige, innerhalb der festgelegten Versuchsgrenzen liegende Windwerkzeugstellung an der UFM 8 auf $\pm 0,4$ mm vorherzusagen. Das Be-

stimmtheitsmaß von 0,994 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität. Neben dem Bestimmtheitsmaß und der Standardabweichung des Schätzwertes beinhaltet die Regressionsstatistik den berechneten F-Wert und den Freiheitsgrad der Regression. Mit diesen beiden Werten ist es möglich, über den jeweiligen kritischen F-Wert aus einer entsprechenden statistischen Tabelle das Konfidenzniveau der ermittelten Koeffizienten der Einflussgrößen VA , VC , VD sowie der Zweifach-Wechselwirkungen $VA \cdot VC$, $VA \cdot VD$ und damit des gesamten Modells zu beurteilen. Entsprechend dieser Tabelle sind mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 99,9 % die hier ermittelten Einflussgrößen und Zweifach-Wechselwirkungen signifikant [9].

Zur Berechnung der horizontalen Lage des Windezentrams $x(X_7)$ wurde folgende Modellgleichung ermittelt:

$$x(X_7) = -0,50 - 0,74 \cdot (VA)^2 + 0,99 \cdot VD + 0,82 \cdot VA \cdot VD - 0,39 \cdot (VC)^2 - 0,38 \cdot VA \cdot VC \quad (2)$$

Bestimmtheitsmaß der Regression: 0,978	Standardfehler des Schätzwertes: 0,2 mm
----------------------------------------	-----------------------------------------

Mit Gleichung (2) ist es möglich, die x -Koordinate des Windezentrams in Abhängigkeit von den Verschiebungen VA , VC und VD auf $\pm 0,2$ mm im voraus zu bestimmen.

Diese Modellgleichungen wurden auf Reproduzierbarkeit getestet. Ihre Gültigkeit wurde an Versuchspunkten überprüft und bestätigt, die frei gewählt und nicht zur Modellschätzung herangezogen wurden. Dazu wurden aus dem gleichen Draht wiederum Federn hergestellt und ausgemessen.

Allgemeingültige Schlussfolgerungen aus dem vollständigen Versuch

Wesentlicher als die zahlenmäßige Betrachtung der Modellgleichungen sind die allgemeingültigen Aussagen, die sich aus ihnen ableiten lassen:

- Aufstellen der globalen Übertragungsfunktionen für den Zusammenhang zwischen dem Federdurchmesser und den Verschiebungen der Windestifte,
- Rückschlüsse für einen zielgerichteten Einrichtalgorithmus der Windewerkzeuge,
- Anforderungen an die maschinentechnische Umsetzung der einzelnen Einstellmöglichkeiten (Feinfühligkeit, Reproduzierbarkeit).

Nicht jede Einstellmöglichkeit muss motorisch oder mit der selben Feinfühligkeit, die sich aus dem Verhältnis von Verstellweg zu Funktionsweg ergibt, verwirklicht sein.

In Tabelle 5 sind die Auswirkungen der vier untersuchten Einflussgrößen auf die Zielgrößen Federdurchmesser und horizontale Lage des Windezentrams zusammengefasst. Die Einstellrichtungen der Windestifte orientieren sich dabei an den in Bild 4 enthaltenen Pfeilen.

Tabelle 5: Wirkungsrichtung der Einflussgrößen auf den Federdurchmesser und die x-Koordinate des Windezentrums

Einflussgröße	Einstellrichtung	Der Federdurchmesser wird dadurch...	Die x-Koordinate des Windezentrums verschiebt sich dadurch in...
Gemeinsames Verschieben der Windestifte VA	in positiver Richtung ($VA+$):	...größer.	...Richtung der Einzugsrollen (nach -x).
	in negativer Richtung ($VA-$):	...kleiner.	...Richtung der Windestifte (nach +x).
Schwenken des oberen Windestiftes in der Windeebene (RB)	in positiver / negativer Richtung	...unbestimmt verändert.	...unbestimmte Richtung.
Verschieben des unteren Windestiftes entlang der Stiftachse	in positiver Richtung ($VC+$):	...größer.	...Richtung der Einzugsrollen (nach -x).
	in negativer Richtung ($VC-$):	...kleiner.	...Richtung der Windestifte (nach +x).
Verschieben des unteren Windestiftes entlang seiner Führungsbahn (VD)	in positiver Richtung ($VD+$):	...kleiner.	...Richtung der Windestifte (nach +x).
	in negativer Richtung ($VD-$):	...größer.	...Richtung der Einzugsrollen (nach -x).

Die Parameterschätzung wird mit normierten Größen durchgeführt. Das bedeutet, dass die Werte der realisierten Einstellungen pro Verstellmöglichkeit auf die Verstellbereichsgrenzen bezogen werden. Der in die Parameterschätzung eingehende Einstellbereich jeder Verstellgröße variiert damit von -1 bis $+1$. Deshalb können die ermittelten Koeffizienten unmittelbar miteinander verglichen und damit zur Wichtung der einzelnen Einflussgrößen verwendet werden.

Die Auswertung von Gleichung (1) ergibt, daß der **Federdurchmesser** wie erwartet hauptsächlich von der gemeinsamen Verstellung VA der beiden Windestifte bestimmt wird. Das bedeutet, daß der Parameter VA mit einer großen Feinfühligkeit eingestellt werden muß, da bereits geringe Veränderungen dieses Parameters zu merklichen Änderungen des Federdurchmessers führen. Das erklärt auch z.T. die Schwierigkeit, reproduzierbare Windestifteinstellungen für Wiederholaufträge zu realisieren.

Die Verschiebung VD des unteren Windestiftes entlang seiner Führungsbahn, die zur tangentialen Einstellung der Windestiftnut an den Federdraht genutzt wird, verändert aber den Windungsdurchmesser ebenfalls merklich. Die Feinfühligkeit der zur Zeit üblichen maschinentechnischen Umsetzung dieser Einstellmöglichkeit durch Verspannen der Windestiftaufnahme mittels zweier Schrauben wird der Bedeutung dieses Parameters jedoch nicht gerecht.

Auch eine Verschiebung VC des unteren Windestiftes entlang seiner Stiftachse, mit der die x-Koordinate des Windezentrums hauptsächlich eingestellt wird, wirkt sich auf den Federdurchmesser aus. Insgesamt betrachtet, handelt es sich also bei der Windewerkzeugeinstellung um sogenann-

te gekoppelte Justierkreise. Das ist auch der Grund, weshalb die Einrichtung der Windwerkzeuge an der Federwindmaschine so zeitaufwendig ist.

Das gemeinsame Verstellen der Windestifte VA geht in die Modellgleichung quadratisch ein. Ursache dafür ist die Auffederung der hergestellten Federwindung (Rückfederung), die bei der Fertigung einer Feder mit großem Federdurchmesser größer ist als bei Federn kleinen Federdurchmessers [8]. Die Wirkung der Einstellmöglichkeiten VC und VD auf den Federdurchmesser ist außerdem vom aktuellen Wert von VA abhängig, denn es treten gemäß Gl. (1) Zweifach-Wechselwirkungen $VA \cdot VC$ und $VA \cdot VD$ auf.

Die Auswertung von Gl. (2) führt zu dem Ergebnis, daß die **x-Koordinate des Windeentrums** in besonderer Weise von den Zustellbewegungen VC und VD beeinflußt wird. Der untersuchte Verstellbereich für VC war bei den Experimenten mit $\pm 0,3$ mm zwar sehr klein, trotzdem führen diese Verschiebungen zu signifikanten Veränderungen des Windeentrums und im Zusammenhang mit der Windestiftstellung auch zu Federdurchmesseränderungen. Deshalb ist es folgerichtig, daß an neueren Windmaschinen die Einstellung dieses Parameters über Feinstellschrauben deutlich genauer und feinfühlicher erfolgen kann. Mit dem untersuchten deutlich größeren Verstellbereich für VD ist die Beeinflussung der horizontalen Lage des Windeentrums wesentlich feinfühlicher möglich.

Um die Werkzeugeinrichtung an der Windmaschine zu vereinfachen, müßten die genannten Justierkreise entkoppelt werden, so daß jede Zielgröße nur von einer unabhängigen Einflußgröße bestimmt wird. Dazu sind neue technische Lösungen erforderlich.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Geinitz, V.: Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern. Dissertation TU Ilmenau 2005
- [2] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; u.a.: Ausschußminimierung in der Schraubenfederfertigung. Abschlußbericht zum gleichnamigen AiF-Forschungsthema 10092B, TU Ilmenau 1996
- [3] Bandemer, H.; Bellmann, A.: Statistische Versuchsplanung. 4. Auflage, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig 1994
- [4] Scheffler, E.: Statistische Versuchsplanung und -auswertung. 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart 1997
- [5] Wernstedt, J.: Experimentelle Prozeßanalyse. 1. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, 1989
- [6] Pegel, B.: Empirische Modellbildung und Versuchsplanung. Beiträge zur Forschungstechnologie Heft 7, Akademie-Verlag Berlin 1980
- [7] Krottmaier, J.: Versuchsplanung. Der Weg zur Qualität des Jahres 2000. 2. überarbeitete Auflage, Verlag Industrielle Organisation Zürich, Verlag TÜV Rheinland 1991
- [8] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; u.a.: Technologien zur Weiterentwicklung der Qualität und Verarbeitbarkeit von Federdraht durch Kenntnis seines Umformverhaltens. Abschlußbericht zum gleichnamigen AiF-Forschungsthema 11517B, TU Ilmenau 2001
- [9] Klein, B.: Versuchsplanung - DoE. Oldenbourg Verlag München Wien 2004

Autorenangabe(n):

Dr.-Ing. Veronika Geinitz

Dipl.-Ing. Peter Beyer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Schorcht

TU Ilmenau,

Fachgebiete Rechneranwendung im Maschinenbau und Maschinenelemente,

PF 100565

98684 Ilmenau

Tel.: (03677) 4690 43

Fax: (03677) 4690 62

E-mail: veronika.geinitz@tu-ilmenau.de, peter.beyer@tu-ilmenau.de, hans-juergen.schorcht@tu-ilmenau.de