

Zugkraftbedarf für das Richten von Draht mit Rollenrichtapparaten

Marcus Paech

Verfügbare Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Zugkraftbedarfs für das Richten mit Rollenrichtsystemen liefern im Vergleich mit Messergebnissen nur grobe, nicht mehr zeitgemäße Näherungen. Ausgehend von einem Anforderungsprofil wird ein neues Modell zur Berechnung des Zugkraftbedarfs erarbeitet. Es berücksichtigt erstmals die geometrischen Randbedingungen des Richtapparats sowie die Eigenschaften des Richtguts. Wesentliche Inhalte des Modells sind die numerische Bestimmung von Biegemoment-Krümmungs-Kurven und die Ermittlung der plastischen Verformungsarbeit, die mit dem Zugkraftbedarf korreliert. Exemplarisch durchgeführte Rechnungen mit dem neuen Modell zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit Messwerten.

Konventionelle und innovative Techniken [1, 2] zum Richten von Draht haben einen sehr großen Einsatzbereich, der sich von den Drahtwalzwerken über die Drahtziehereien bis hin zu den Verarbeitern erstreckt. Dabei gibt es für die Verarbeitung von Draht quasi unendlich viele Möglichkeiten. Richtapparate werden sowohl als autarke Werkzeuge in übergeordneten Prozessen sowie als Elemente in Maschinen mit unterschiedlicher Zielsetzung eingesetzt. Neben der Produktion von geradem Draht wird vielfach die Herstellung einer definierten Restkrümmung gewünscht.

Wie auch immer sich spezifische Einsatzfälle gestalten, das Erfordernis zum Transport des Richtgutes relativ zum Richtapparat ist ihnen allen gemein. Für die Gestaltung von Prozessen sowie für eine ausgewogene Projektierung und Konstruktion von Maschinen ist es unabdingbar, die zum Transport des Richtgutes notwendigen Zugkräfte genau zu kennen, da sie dominanten Einfluss auf erreichbare Prozessgeschwindigkeiten bzw. die zu installierende Antriebsleistung haben. Positiver Effekt ist zugleich die damit mögliche Optimierung des einheitsbezogenen Energieverbrauchs, wie sie

die Normen für Umweltmanagementsysteme, z. B. die ISO 14000 ff, zum Inhalt haben.

Analyse

Der Notwendigkeit des Wissens um die Zugkräfte steht bei ihrer Ermittlung ein Stand der Technik gegenüber, der sich auf wenige spezifische und teure Richtversuche und Messungen beschränkt oder der mit Berechnungen nur grobe Näherungen für die Zugkräfte liefert. So ist beispielsweise in [3] die rechnerische Ermittlung der größten Kraft für das Durchziehen eines Drahtes durch ei-

Bild 1

Vergleich des berechneten Zugkraftbedarfs nach [3] und [4] mit Messwerten

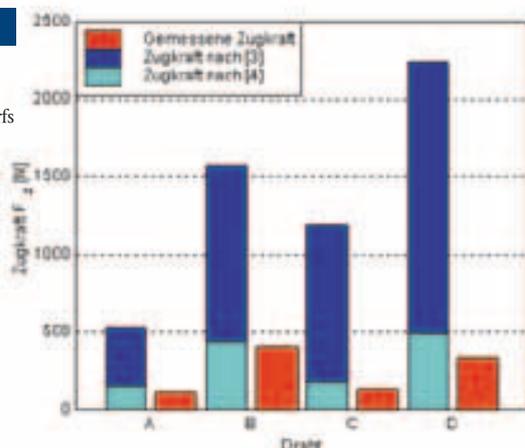
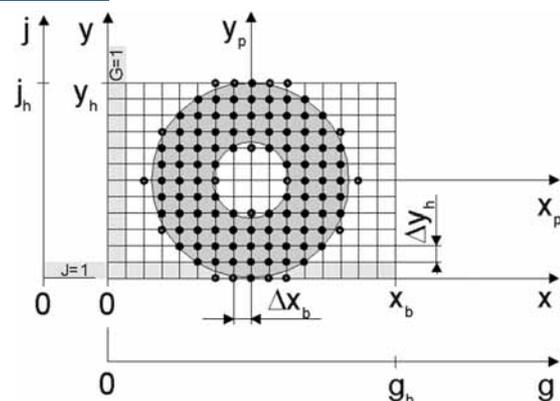


Bild 2

Einteilung des Querschnitts in Elemente



nen Rollenrichtapparat mit n Rollen dokumentiert. Danach werden für alle (n-1) stattfindenden Biegeoperationen jeweils Ausgangs- und Restkrümmungen vorausgesetzt, deren Beträge dem reziproken Wert des Rollenradius entsprechen. Die Lösung gilt für Runddrähte mit einem ideal elastisch-plastischen Werkstoffverhalten, welches jedoch für die in der Praxis verwendeten Drähte kaum relevant ist. Eine Ergänzung von [3] findet sich in [4]. Für die Krümmung des Richtguts im Einflussbereich einer biegewirksamen Rolle ist hier eine Annäherung durch einen Kreisbogen eingeführt worden. Die Teilung sowie die Anstellungen der Rollen finden erstmalig Berücksichtigung, wenn auch nur eine Parallelanstellung, bei der alle Rollen in Bezug zur drahtspezifischen Nulllinie gleiche Zustellwerte besitzen, zulässig ist.

Bild 1 vergleicht die Berechnungsergebnisse für Zugkräfte nach [3] und [4] für das Richten von ausgewählten Drähten auf einem Rollenrichtapparat mit Messergebnissen. Die Tabelle 1 und 2 informieren über verwendete Parameter des Apparats und Eigenschaften der Drähte. Durch die Vergrößerung des Krümmungsradius in den Einflussbereichen der biegewirksamen Rollen nach [4] reduzieren sich die berechneten Ergebnisse für die Zugkraft im Verhältnis zu den Resultaten nach [3] erheblich. Den relativen Fehler aller Rechenergebnisse in Bezug zu den Messergebnissen gibt Tabelle 2 wieder. Die Zugkräfte werden auch nach [4]

grundsätzlich überschätzt, wobei insbesondere bei den Drähten A, D und E zu große Abweichungen auftreten. Eine Ermittlung des Zugkraftbedarfs nach [3] ist grundsätzlich nicht empfehlenswert.

Anforderungen

Die kurze Analyse der bestehenden Möglichkeiten zur Berechnung der Zugkraft verdeutlicht, dass eine fort-

Tabelle 1: Parameter des Richtsystems

Parameter	Wert
Richtsystem	RB 11-3 CS
Rollenanzahl n	11
Richtrollenaußendurchmesser D _A [mm]	31
Einstichbreite Rollenprofilierung B [mm]	3,2
Einstichwinkel Rollenprofilierung α [°]	90
Rollenteilung T [mm]	19

schrittliche und insbesondere im Vergleich zu Messungen zeitsparende sowie kostengünstige Lösung erforderlich ist, die über folgende Eigenschaften verfügen muss:

- Die Berechnung der Zugkraft ist für beliebige Richtapparate zu ermöglichen, wobei die geometrischen Randbedingungen wie die Rollenanzahl, der Rollendurchmesser, die Rollenprofilierung, die Teilung und die Anstellungen zu berücksichtigen sind.
- Unabhängig von der Anstellart sind Rechenergebnisse zu erreichen, die bezogen auf die zuzuordnenden Messwerte einen relativen

Fehler im Bereich von $-10\% \leq \epsilon_r \leq 10\%$ besitzen.

- Der Ausgangskrümmungsbereich sowie die gewünschte Restkrümmung sind in den Lösungsansatz einzubeziehen.
- Jede Biegeoperation wird entscheidend durch das Verformungsverhalten des spezifischen Werkstoffs beeinflusst, so dass ein taugliches Werkstoffmodell zu integrieren ist.
- Eine exakte Bestimmung der Biege-

Tabelle 2: Parameter ausgewählter Drähte und relativer Fehler bei der Zugkraftberechnung

Draht		A	B	C	D
Drahtdurchmesser d [mm]		1,55	2,00	1,5	1,9
Dehngrenze R _p [MPa]		725	1000	2110	1800
Elastizitätsmodul E [MPa]		190190	181380	199880	188720
Ausgangskrümmung κ* _a [-]		-0,7	-0,6	-0,26	-0,33
Relativer Fehler ε _r für Zugkraft nach [3] [%]		366	293	755	559
Relativer Fehler ε _r für Zugkraft nach [4] [%]		33	9	33	44

linie des Richtguts, die mit dem Krümmungsverlauf korreliert, ist wichtige Voraussetzung für die Zugkraftberechnung, da ansonsten die genauen Momente an den biegewirksamen Rollen nicht zu identifizieren sind.

- Angepasst an die unterschiedlichen Querschnitte von Richtgut muss die Zugkraftberechnung nicht nur für Runddraht, sondern für beliebige Querschnitte möglich sein.

Modellbeschreibung

Zentrales Element des Modells zur Zugkraftberechnung von Witel's-Al-

Bild 3

Approximation des Werkstoffverhaltens bei Wechselverformung

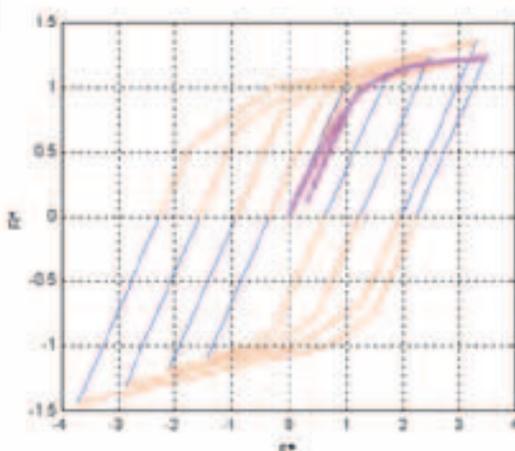
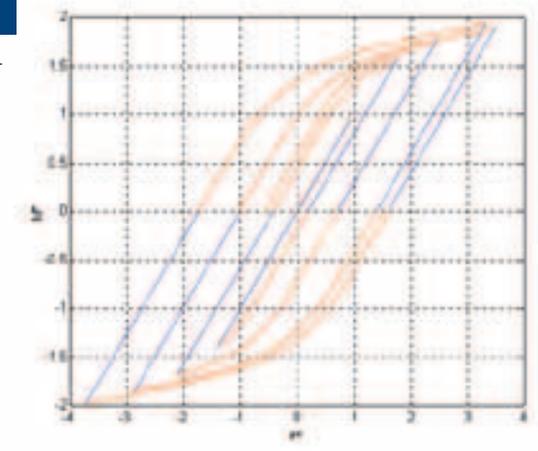


Bild 4

Biegemoment-Krümmungskurven



bert ist mit Blick auf das vorgegebene Anforderungsprofil die Beobachtung eines Drahtabschnitts während des Durchlaufs durch die versetzt angeordneten Rollen eines Richtapparats. Wechselbiegungen unterworfen, verändert sich in Richtung des Auslaufs von Rolle zu Rolle die Krümmung des Drahtabschnitts. Jeder Krümmung ist ein Biegemoment zugeordnet. Der Zusammenhang zwischen Biegemoment und Krümmung wird durch den Werkstoff sowie die Querschnittsgeometrie des Richtguts und durch die jeweiligen geometrischen Randbedingungen bestimmt. Aus dem modellierten Zusammenhang zwischen Biegemoment und Krümmung für jede Biegung folgt die plastische Verformungsarbeit, die maßgebend für die zum Transport des Richtguts notwendige Zugkraft ist. Durch Massenträgheitskräfte und -momente verursachte dynamische Anteile sowie die Anteile der Reibung sind klein und werden dementsprechend vernachlässigt.

Biegemomente und Krümmungen

Im Einflussbereich einer Richtrolle findet eine Biegeoperation i statt, bei der der Drahtabschnitt belastet und entlastet wird. Die Belastung kann eine elastische oder eine elastisch-plastische Verformung zur Folge haben und ist durch den Anfangszustand $[i0]$ sowie durch das Beanspruchungsmaximum $[iv]$ gekennzeichnet. Auf die Belastung folgt ausgehend vom Beanspruchungsmaxi-

mum $[iv]$ die Entlastung bis zum Endzustand $[(i+1)0]$, der gleichzeitig den Anfangszustand der folgenden Biegeoperation repräsentiert. Vom Beginn der Belastung bis zum Ende der Entlastung ändern sich charakteristische Größen des Drahtabschnitts wie Dehnung, Spannung, Krümmung und Biegemoment. Eine Biegemoment-Krümmungs-Kurve für eine Biegeoperation i ist die eindeutige Abbildung der Krümmung κ_i auf dem Biegemoment M_i (Gleichung 1).

$$M_i = f(\kappa_i) \quad \text{Gl. 1}$$

Um Biegemoment-Krümmungs-Kurven für alle Biegungen i numerisch generieren zu können, muss die jeweilige Krümmung des Beanspruchungsmaximums bekannt sein. In [5] wird über einen Algorithmus zur Berechnung der Biegelinie des Richtguts zwischen den einzelnen Richtrollen berichtet, der bei Vorgabe der bezogenen Ausgangskrümmung $\kappa^*_{ia} = \kappa^*_{i0}$ des Richtguts gleichzeitig die bezogenen anstellbedingten Krümmungen κ^*_{iv} für die Beanspruchungsmaxima liefert.

Vorteil der Verwendung von bezogenen Größen, die jeweils durch einen Stern gekennzeichnet sind, ist, dass sich die Modellierung vereinfacht. Gleichung 2 gibt beispielsweise wieder, dass die bezogene Krümmung κ^*_{iv} der bezogenen Dehnung der Außenfaser des Richtguts ε^*_{iav} entspricht. Aus der bezogenen Krümmung bzw. Dehnung kann mit der Dehngrenze R_p und dem Elastizitätsmodul E die Dehnung der

Außenfaser ε_{iav} in der nicht bezogenen Darstellung berechnet werden. Mit der Querschnittshöhe H lässt sich jederzeit der mit der Dehnung ε^*_{iv} korrelierende Krümmungsradius r_{iv} ableiten.

$$\begin{aligned} \kappa^*_{iv} &= \varepsilon^*_{iv} = \varepsilon^*_{iav} = \\ &= \frac{E \cdot \varepsilon_{iav}}{R_p} = \frac{E \cdot H}{2 \cdot R_p \cdot r_{iv}} \quad \text{Gl. 2} \end{aligned}$$

Die Berechnung einer Biegemoment-Krümmungs-Kurve setzt die Diskretisierung der bezogenen Krümmung κ^*_i für die Belastung und die Entlastung einer Biegeoperation i voraus. Für jede diskrete Krümmung κ^*_{id} ist ein diskreter Wert für das Biegemoment M^*_{id} zu berechnen. Um dies für beliebige Querschnitte zu ermöglichen, wird der Querschnitt des jeweiligen Drahtabschnitts in Elemente eingeteilt (Bild 2). Das sich über den Querschnitt erstreckende Raster verfügt über Schichtlinien j und Spaltenlinien g . Jedes durch die Rasterung entstehende Element wird durch die Schicht und die Spalte identifiziert und besitzt eine spezifische Elementfläche. Liegen die Schnittpunkte der Schichtlinien j und der Spaltenlinien g im Querschnitt, entstehen Knoten. Elemente des Querschnitts werden durch mindestens drei Knoten begrenzt, wobei für eine Schichtlinie j maximal n_j Knoten und für eine Spaltenlinie g maximal n_g Knoten existieren. Die Anzahl der Knoten in j - und g -Richtung wird vom jeweiligen Querschnitt bestimmt.

Für alle Knoten wird ausgehend vom aktuellen Wert der Dehnung

Tabelle 3: Berechnung des Gesamtzugkraftbedarfs F_{ZR}

Berechnete Zugkraft F_{ZR} [N]	A			B			C			D		
	κ^*_{iv} [-]	a_i [mm]	F_{ZR} [N]	κ^*_{iv} [-]	a_i [mm]	F_{ZR} [N]	κ^*_{iv} [-]	a_i [mm]	F_{ZR} [N]	κ^*_{iv} [-]	a_i [mm]	F_{ZR} [N]
1	3,91	1,785	6,04	3,99	2,117	19,53	1,56	1,632	4,31	1,93	1,581	10,89
2	-4,23	0,000	9,99	-4,26	0,000	31,86	-1,79	0,000	4,76	-2,21	0,000	14,57
3	3,86	1,005	9,77	3,79	1,226	28,91	1,87	1,483	7,98	2,19	1,262	18,11
4	-3,36	0,000	7,89	-3,29	0,000	22,25	-1,85	0,000	7,55	-2,07	0,000	15,20
5	2,88	0,654	5,83	2,83	0,828	16,16	1,81	1,400	7,09	1,94	1,094	12,00
6	-2,41	0,000	3,92	-2,41	0,000	10,94	-1,77	0,000	6,32	-1,82	0,000	9,14
7	1,94	0,443	2,10	2,01	0,589	6,43	1,72	1,343	5,47	1,71	0,982	6,76
8	-1,48	0,000	0,64	-1,63	0,000	2,72	-1,64	0,000	4,47	-1,56	0,000	4,28
9	0,91	0,298	0,00	1,06	0,426	0,10	1,29	1,299	1,35	1,18	0,900	0,62
F_{ZR} [N]	46,2			138,9			49,3			91,6		

Tabelle 4: Messung des Gesamtzugkraftbedarfs

Gemessene Zugkraft F_{ZMv} [N]	A	B	C	D
Versuch v				
1	45	131	50	91
2	43	132	50	91
3	44	133	51	92
4	45	133	50	90
5	45	134	51	93
$\bar{F}_{ZM} \pm S_{\bar{F}}$ [N]	44,4 ± 0,4	132,6 ± 0,6	50,4 ± 0,3	91,4 ± 0,6

ε^*_{id} , der aus der diskreten Krümmung κ^*_{id} resultiert, mit Hilfe eines Werkstoffmodells die Spannung ermittelt. Das zur Berechnung des Zugkraftbedarfs genutzte Werkstoffmodell berücksichtigt die ungleichmäßige Aufweitung der Spannungs-Dehnungs-Charakteristik bei unterschiedlichen Richtungen der Hauptspannungsachsen (Wechselverformung), die auch als *Bauschinger-Effekt* bezeichnet wird.

Die Modellierung des Zusammenhangs zwischen Spannung und Dehnung für eine Schicht eines Drahtabschnitts (Außenfaser) zeigt Bild 3. Die bezogenen Messwerte einer exemplarischen Erstbeanspruchung des Drahts B (Tabelle 2), durch einen Zugversuch in Übereinstimmung mit DIN EN 10002 ermittelt, sind in Bild 3 durch Kreuze gekennzeichnet.

Auf die Ermittlung der Knotenspannungen unter Verwendung des Werkstoffmodells folgt die Berechnung der bezogenen Schichtspannung $R^*_{id}(J)$, wobei die Spannungen an den Knoten zweier benachbarter Schichtlinien gemittelt werden. Nach

Multiplikation mit der Schichtfläche $A^*(J)$, gebildet aus der Summe der einzelnen Elementfüllgrade, ergibt sich die Kraft einer Schicht $F^*_{id}(J)$ (Gleichung 3).

$$F^*_{id}(J) = A^*(J) \cdot R^*_{id}(J) \quad \text{Gl. 3}$$

Wird die Schichtkraft $F^*_{id}(J)$ mit dem Abstand zur ungelängten Faser des Querschnitts $y_1(J)$ multipliziert, folgt das Schichtmoment $M^*_{id}(J)$ (Gleichung 4).

$$M^*_{id}(J) = F^*_{id}(J) \cdot y_1(J) \quad \text{Gl. 4}$$

Das Gesamtbiegemoment für die diskrete Krümmung κ^*_{id} ergibt sich aus der Summe der Schichtmomente über den Querschnitt (Gleichung 5).

$$M^*_{id} = \sum_{J=1}^{J=h} M^*_{id}(J) \quad \text{Gl. 5}$$

Erreicht die diskrete Krümmung κ^*_{id} der Außenfaser die anstellbedingte Krümmung κ^*_{iv} , ist das Beanspruchungsmaximum mit dem Moment M^*_{iv} erreicht und es beginnt die Entlastung des Drahtabschnitts. Es wird angenommen, dass alle Schichten des Drahtabschnitts elastisch in den lastfreien Zustand zurückfedern, wobei das aufgeprägte Schichtmoment $M^*_{id}(J)$ jeweils als Rückfederungsmoment frei wird. Die Krümmung des Drahtabschnitts am Ende einer Biegung i wird mit Gleichung 6 berechnet.

$$\kappa^*_{i(i+1)0} = \kappa^*_{iv} - M^*_{iv} \quad \text{Gl. 6}$$

Als Beispiel sind in Bild 4 berechnete Biegemoment-Krümmungskurven für im Richtapparat gemäß Tabelle 1 stattfindende Biegungen des Drahts B dokumentiert. Die bezogene Ausgangskrümmung κ^*_a wird durch die Verformungen an den biegewirksamen Rollen zur Restkrümmung $\kappa^*_r = 0$ reduziert.

Plastische Verformungsarbeit und Zugkraftbedarf

Die Verformungsarbeit, die bei einer Biegung i des Drahtabschnitts der Länge dx geleistet wird, entspricht der Wirkung des Moments M_i über den Biegedrehwinkel $d\varphi_i$. Mit

$$d\varphi_i = dx \cdot d\kappa_i \quad \text{Gl. 7}$$

folgt für die Verformungsarbeit

$$\begin{aligned} dW_i &= W^*_i \cdot dW_p = \\ &= dx \cdot \int_{\kappa_i = \kappa_{i0}}^{\kappa_i = \kappa_{iv}} M_i(\kappa_i) d\kappa_i \quad \text{Gl. 8} \end{aligned}$$

Wird als Bezugswert für die Verformungsarbeit dW_i am Drahtabschnitt Gleichung 9 verwendet, berechnet sich die bezogene Verformungsarbeit nach Gleichung 10.

$$dW_p = M_p \cdot \kappa_p \cdot dx \quad \text{Gl. 9}$$

$$W^*_i = \int_{\kappa^*_i = \kappa^*_{i0}}^{\kappa^*_i = \kappa^*_{iv}} M^*_i(\kappa^*_i) d\kappa^*_i \quad \text{Gl. 10}$$

Wie die Biegung setzt sich die Verformungsarbeit aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen. Nur die Arbeit für die plastische Verformung korreliert mit dem Zugkraftbedarf, wohingegen der elastische Anteil einem Arbeitsvorrat bzw. einer Energie entspricht, die in das System zurückfließt. Demnach ist der elastische Anteil von der Verformungsarbeit zu subtrahieren, um den plastischen Anteil zu erhalten (Gleichung 11).

$$\begin{aligned} W^*_{ipl} &= W^*_i - W^*_{iel} = \\ &= W^*_i - \frac{M^*_{iv}{}^2}{2} \quad \text{Gl. 11} \end{aligned}$$

Aus der Energiebilanz gemäß Gleichung 12

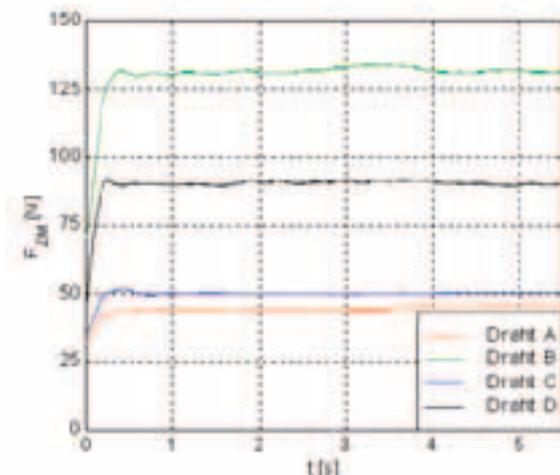
$$\begin{aligned} F_{iz} \cdot dx &= dW_{ipl} = W^*_{ipl} \cdot dW_p = \\ &= \int_{\kappa^*_i = \kappa^*_{i0}}^{\kappa^*_i = \kappa^*_{iv}} M^*_i(\kappa^*_i) d\kappa^*_i - \\ &\quad - \frac{M^*_{iv}{}^2}{2} \cdot M_p \cdot \kappa_p \cdot dx \quad \text{Gl. 12} \end{aligned}$$

folgt der Gesamtzugkraftbedarf der für das Richten des Drahtabschnitts im Rollenrichtapparat mit n Rollen erforderlich ist (Gleichung 13).

$$F_z = M_p \cdot \kappa_p \cdot \sum_{i=1}^n \left[\int_{\kappa^*_i = \kappa^*_{i0}}^{\kappa^*_i = \kappa^*_{iv}} M^*_i(\kappa^*_i) d\kappa^*_i - \frac{M^*_{iv}{}^2}{2} \right] \quad \text{Gl. 13}$$

Bild 5

Gemessene Zugkräfte



Für den Kreisquerschnitt ist das Produkt der Bezugswerte für Biegemoment und Krümmung nach Gleichung 14 definiert.

$$M_p \cdot \kappa_p = \frac{R_p^2 \cdot \pi \cdot d^2}{16 \cdot E} \quad \text{Gl. 14}$$

Verifikation

Für die ausgewählten Drähte sowie für den Richtapparat (Tabellen 1 und 2) werden Simulationsrechnungen [5] durchgeführt. Die ermittelten bezogenen anstellbedingten Krümmungen des Richtgutes κ_{iv}^* sowie die Anstellungen a_i sind für die stattfindenden Biegungen i in der Tabelle 3 zusammengefasst. Der Gesamtzugkraftbedarf F_{ZR} ergibt sich aus der Addition der in der Tabelle 3 dokumentierten Anteile für die Zugkraft F_{iZR} der jeweiligen Biegeoperationen, die unter Nutzung des vorgestellten Modells berechnet wurden.

Die Verifikation der Berechnungsergebnisse erfolgt durch den Vergleich mit gemessenen Zugkräften. Dazu werden am Richtapparat die simulierten Anstellungen a_i [5] ausgehend von der jeweiligen drahtspezifischen Nulllinie eingestellt und über einen Sensor die Gesamtzugkraft messtechnisch ermittelt. Für jeden ausgewählten Draht werden 5 Versuche durchgeführt. Bild 5 zeigt charakteristische Zugkraft-Zeit-Verläufe für exemplarisch ausgewählte Datensätze der Drähte. Das Niveau der Zugkraft ergibt sich durch die Auswertung eines Zugkraft-Zeit-Verlaufs in Anlehnung an den Standard ANSI/IEEE 194-1977. Tabelle 4 fasst die so bestimmten Zugkräfte F_{ZM} der Versuche zusammen und informiert über die Mittelwerte und zugehörige Standardfehler der Gesamtzugkraft.

Literatur

- [1] Schneiderei, H.; Schilling, M.: Richtapparat mit elektronischer Positioniersteuerung. DRAHT 48 (1997) 2, S. 18-19
- [2] Paech, M.: Innovative Richttechnik. DRAHT 50 (1999) 2, S. 46-51
- [3] Pawelski, O.; Kaiser, G.: Untersuchungen über das Richten von Stahldraht mit einem Rollenrichtapparat. Stahl und Eisen, 92 (1972) 24, S. 1215-1223
- [4] Ruppig, D.; Rastegar, Y.: Untersuchungen zu den axialen Zugbelastungen von Stahldrähten beim Richten im Vielrollen-Richtapparat und zu Rollenzustellungen. DRAHT 37 (1986) 3, S. 165-168

Die Güte des Modells zur Ermittlung des Zugkraftbedarfs drückt sich durch den relativen Fehler ϵ_r der Rechenergebnisse in bezug auf die Messergebnisse aus, der beim Draht A mit $\epsilon_r = 4\%$, beim Draht B mit $\epsilon_r = 5\%$, beim Draht C mit $\epsilon_r = -2\%$ und beim Draht D mit $\epsilon_r = 0\%$ bestimmt ist.

Zusammenfassung

Die verfügbaren Berechnungsvorschriften [3, 4] zur Ermittlung des Zugkraftbedarfs für das Richten mit Rollenrichtsystemen liefern im Vergleich mit Messergebnissen grobe Näherungen. Im Hinblick auf eine optimierte Projektierung und Konstruktion wird ausgehend von einem entwickelten Anforderungsprofil ein neues Modell zur Berechnung des Zugkraftbedarfs erarbeitet. Es berücksichtigt erstmals alle relevanten geometrischen Randbedingungen des Richtapparats sowie die Eigenschaften des Richtguts wie Geometrie- und Werkstoffdaten, wobei die Anstellungen beliebig und unabhängig von der Anstellart sein können. Wesentliche Inhalte des Modells sind die numerische Bestimmung von Biegemoment-Krümmungs-Kurven für die im Richtapparat stattfindenden Biegungen und die damit mögliche Ermittlung der plastischen Verformungsarbeit, die gemäß der Energiebilanz mit dem Zugkraftbedarf korreliert. Für exemplarisch ausgewählte Drähte durchgeführte Rechnungen unter Verwendung des neuen Modells zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit Messwerten, so dass zukünftig ein Einsatz des Modells in der Drahtindustrie möglich ist.

- [5] Guericke, W.; Paech, M.; Albert, E.: Simulation des Richtens von Draht. DRAHT 47 (1996) 1/2, S. 23-29

Autor

- Marcus Paech ist Manager für Forschung und Entwicklung der Witel Apparate-Maschinen Albert GmbH & Co. KG, D-12277 Berlin.