

Rollenrichtprozess und Peripherie

Marcus Paech

Die Herstellung von qualitativ hochwertigen Drahtprodukten erfordert definierte Eigenschaften des Drahtes, die durch einen Richtvorgang eingestellt werden können. Um den Richtprozess zu optimieren, muss das Richtgut und seine Herstellungsgeschichte analysiert werden. Dieser Aufsatz beschreibt Analysemöglichkeiten und Vorgehensweisen, um den Richtprozess so anzuwenden, dass anschließend eine definierte Drahtqualität vorliegt.

Neben dem Abspulen, Führen, Transportieren und Ver- bzw. Bearbeiten von einem oder mehreren drahtförmigen Prozessmaterialien fristet der Rollenrichtprozess oft ein Schattendasein (Bild 1). Zunehmend zeigt sich jedoch, dass seiner Gestaltung und optimalen Integration eine wichtige Bedeutung zukommt. Zu der klassischen Aufgabe ein gerades oder definiert gekrümmtes Prozessmaterial zu erzeugen treten Zielsetzungen wie die Identifikation von Eigenschaften des Prozessmaterials sowie die Einstellung einer determinierten Werkstoffcharakteristik hinzu. Identifizierte Daten oder spezifisch eingestellte Eigenschaften sind dann bei der Optimierung nachfolgender Ver- und Bearbeitungsprozesse nutzbar.

Hängt die Gestaltung eines Richtprozesses vorrangig von den Drahteigenschaften wie Geometrie des Querschnitts, Dehngrenze, Elastizitätsmodul, Ausgangskrümmung sowie Helix ab [1, 2], so folgt die Integration in eine Fertigungslinie in Abhängigkeit der Peripherie bzw. der vor- und nachgelagerten Prozesse, Maschinen und Einrichtungen. Ansätze und erste

Vorschläge zur Integration finden sich bereits in [3], die aufgegriffen und mit der Zielsetzung, eine hohe Fertigproduktqualität am Ende einer technologischen Linie zu erreichen, weiterentwickelt werden. Besondere Berücksichtigung findet dabei eine ganzheitliche Denk- und Handlungsweise, die auch eine Identifikation mit einschließt.

Identifikation der Richtgutherstellung

Die Bestimmung der Richtgutherstellung berücksichtigt die Ermittlung und Identifikation der Prozesse, die an der Richtgutherstellung beteiligt sind. Dabei ist eine Beschränkung auf ein Maß sinnvoll, das insbesondere diejenigen Verformungsprozesse einbezieht, die dem Richtprozess vorgeordnet sind. Dazu gehören z. B. das Walzen, Ziehen, Aufspulen, Abspulen sowie Umlenken. Jeder Prozess für sich beeinflusst das Prozessmaterial auf die ihm eigene und spezifische Art und Weise, was sich letztendlich in den Spannungen, die innerhalb des Richtguts entstehen bzw. verbleiben, ausdrückt. Die Art der unter Last

entstehenden Spannung wird nach der Art der Belastung charakterisiert. So folgen z. B. aus Zugkräften (Ziehen, Aufspulen, Abspulen) Zugspannungen und aus Biegekräften (Umlenken) Biegespannungen. Bild 2 dokumentiert exemplarisch eine idealisierte Dehnungs- und Spannungsverteilung bei der Biegung eines Prozessmaterials.

Grundsätzlich sollten die jeweils an der Herstellung des Richtguts beteiligten Prozesse kritisch betrachtet werden. Wird davon ausgegangen, dass sie geeignet sind, müssen Aspekte wie der Umformgrad, Verformungen, die Werkzeuggeometrie und auch die Werkstoffgüte diskutiert und gegebenenfalls einer Modifikation unterzogen werden. Ein Nachdenken und die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse sind in der Regel preiswerter, als die Auseinandersetzung mit nicht gewünschten Folgen an nachgeordneter Stelle.

Oft genügt bereits eine Betrachtung der stattfindenden Verformungen

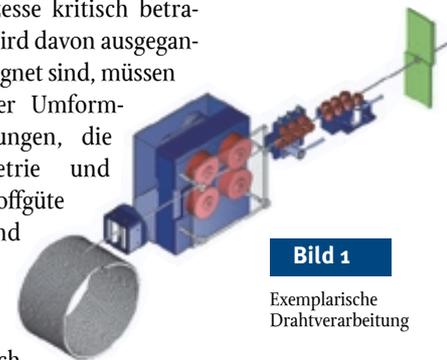


Bild 1

Exemplarische Drahtverarbeitung

Bild 2

Idealisierte Dehnungs- und Spannungsverteilung bei der Biegung von Prozessmaterial

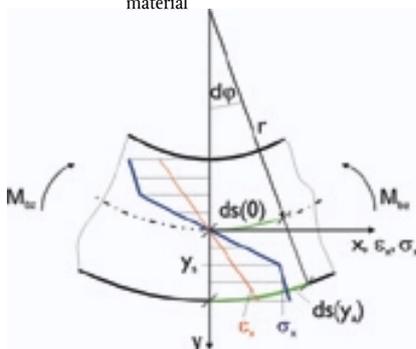


Bild 3

Identifikation der Überhöhung f über die Messlänge l

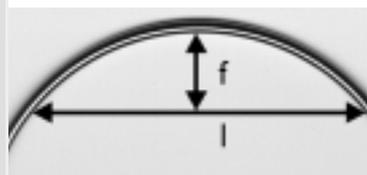


Bild 4

Gemessene Formkurve $y(x)$ und resultierender Krümmungsverlauf $k(x)$ eines Drahtabschnittes

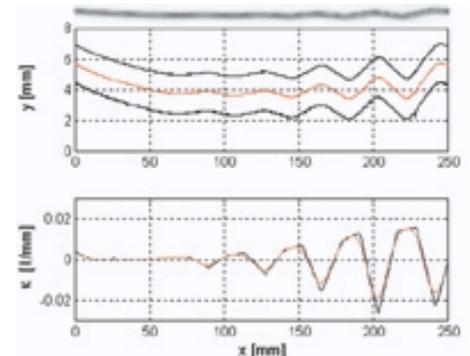
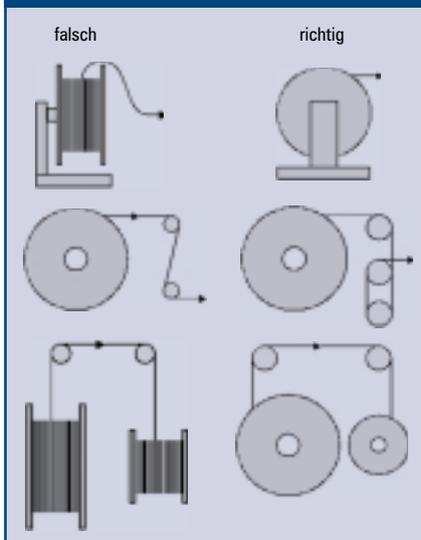


Tabelle 1: Beispiele für die Vermeidung von Fehlern während des Abspulens



während des Abspulens eines Prozessmaterials. Nicht einheitliche Richtungsänderungen des Materials, zudem mit zu gering im Durchmesser bemessenen Umlenkrollen, führen zu einer resultierenden Spannung im Prozessmaterial, die nicht konstant und für alle nachfolgenden Prozesse unvorteilhaft ist. Tabelle 1 verdeutlicht Beispiele für Fehler während des Abspulens und gibt Anregungen, die einer konstanten und positiven Fertigproduktqualität dienen. Neben der Realisierung einer Umlenkrichtung konform zur primären Krümmung des Prozessmaterials auf der Spule, ist die richtige Bemessung des Umlenkrollendurchmessers zur Sicherstellung elastischer Umlenkung von hoher Bedeutung. Seine Ermittlung ist von den Parametern Krümmungsradius r , Querschnittshöhe des Prozessmaterials (bei Runddrähten Drahtdurchmesser d), Dehngrenze R_p und Elastizitätsmodul E abhängig.

Die Gleichungen 1 und 2 dienen der Berechnung des minimalen D_{\min} sowie maximalen Umlenkrollendurchmessers D_{\max} .

$$D_{\min} = 2 \cdot \left[\frac{d \cdot E \cdot r}{d \cdot E + 2 \cdot R_p \cdot r} \right] \quad \text{Gl. 1}$$

$$D_{\max} = 2 \cdot \left[\frac{d \cdot E \cdot r}{d \cdot E - 2 \cdot R_p \cdot r} \right] \quad \text{Gl. 2}$$

Identifikation des Richtguts und Anforderungen an das Endprodukt

Die Analyse des Richtguts und die Definition von Anforderungen an das Endprodukt sind gleichzusetzen mit der Identifikation bzw. Festlegung von Eigenschaften des Prozessmaterials vor und nach einem Richtprozess. Eine Charakterisierung ist in Abhängigkeit zu den relevanten geometrischen Parametern und den Werkstoffdaten erforderlich. Die geometrischen Parameter sind nachfolgend zusammengefasst:

- Querschnittsgeometrie
- Krümmung bzw. Krümmungsradius
- Krümmungsbereich
- Helix

Eine Bestimmung der Querschnittsgeometrie, z. B. des Drahtdurchmessers, fällt in der Regel leicht. Aussagen zu den verbleibenden Parametern können oft nicht gemacht werden. Als Minimalforderung für die Gestaltung und Integration eines Richtprozesses gilt die Ermittlung der Krümmung bzw. des Krümmungsradius in Bezug auf eine Dimension. Wird, wie in Bild 3 gezeigt, über der Messlänge l die Überhöhung f des Prozessmaterials gemessen, kann mit Gleichung 3 der Krümmungsradius r

berechnet werden. Gleichung 3 drückt darüber hinaus aus, dass die Krümmung κ der reziproke Wert des Krümmungsradius r ist.

$$r = \frac{1}{\kappa} = \frac{f^2 + \left(\frac{l^2}{4}\right)}{2 \cdot f} \quad \text{Gl. 3}$$

Einer primären Krümmung mit dem Radius r ist häufig eine sekundäre Krümmung kleineren Radius überlagert. Damit sind über die Länge des Prozessmaterials wechselnde Krümmungen vorhanden, deren Bestimmung nur über die exakte Erfassung der Formkurve des Prozessmaterials und die Nutzung der Gleichung 4 gelingt. Der Verlauf der Krümmung κ über die Länge x ergibt sich bei Einbeziehung der 1. und 2. Ableitung der Formkurve $y(x)$.

$$\kappa(x) = \frac{y''(x)}{\sqrt{(1 + y'(x)^2)^3}} \quad \text{Gl. 4}$$

Witels-Albert verfügt über Messplätze, die eine automatisierte Messung von Formkurven $y(x)$ ermöglichen. Bei Runddrähten bis zu 3,0 mm Durchmesser wird beispielsweise die Bildverarbeitung genutzt. Bild 4 repräsentiert die Formkurve sowie den charakteristischen Krümmungsverlauf $\kappa(x)$ für einen Drahtabschnitt. Der Betrag der Differenz zwischen der maximalen Krümmung κ_{\max} und der minimalen Krümmung κ_{\min} ergibt den sogenannten Krümmungsbereich $\Delta\kappa$ (Gleichung 5).

$$\Delta\kappa = |\kappa_{\max} - \kappa_{\min}| = \left| \frac{1}{r_{\min}} - \frac{1}{r_{\max}} \right| \quad \text{Gl. 5}$$

Bild 5

Fuzzy-System zur Ermittlung der erforderlichen Anzahl von Richtrollen n

Ü: Rollen
25 Regeln

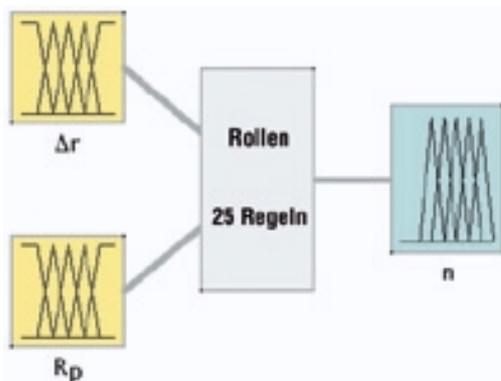
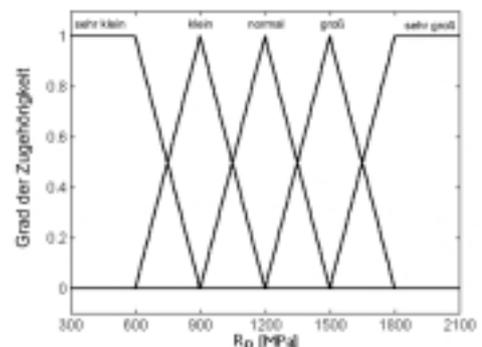


Bild 6

Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgröße Dehngrenze R_p

Ü: Kopfzeile
Grafik: sehr klein, klein, normal, groß, sehr groß
y-Achse: Grad der Zugehörigkeit



Bei einer Krümmung in der zweiten Dimension besitzt das Prozessmaterial eine Helix, die in Anlehnung an eine Schraubenlinie durch einen Radius r sowie eine Steigung P gekennzeichnet ist.

Für das Richten von Prozessmaterialien sowie für Prozesse, die dem Richtprozess nachgeordnet sind, interessieren vorzugsweise die Werkstoffdaten

- Elastizitätsmodul,
- Streck- bzw. Dehngrenze,
- Zugfestigkeit,
- Verfestigungsmodul und
- Eigenspannungspotential.

Bis auf das Eigenspannungspotential lassen sich alle genannten Daten in ausreichender Genauigkeit z. B. mit Hilfe des Zugversuchs gemäß DIN EN 10002 bestimmen. Zu bemerken ist, dass die Kenntnis der Zugfestigkeit für die Gestaltung eines Richtprozesses von untergeordneter Bedeutung ist. Die Ursache liegt in der für die Erreichung einer bleibenden Formänderung durch Richten notwendigen Voraussetzung, das Prozessmaterial bei Beibehaltung der Querschnittsfläche elastisch-plastisch zu verformen. Relevanter Kennwert einer derartigen elastisch-plastischen Verformung ist die Streck- bzw. Dehngrenze und nicht die Zugfestigkeit, da ab diesem Grenzwert in der Regel die Verformung von einer Veränderung der Querschnittsfläche begleitet wird, die zum Versagen durch Bruch führt.

Das Eigenspannungspotential eines Prozessmaterials steht in Beziehung zur äußeren Form. Ohne das Wirken äußerer Kräfte und Momente besteht die Formkurve eines Prozessmaterials weiter, da die Summe der eigenen

Kräfte und Momente untereinander im Gleichgewicht ist. Ändern sich Parameter wie die Krümmung oder die Helix über die Länge des Prozessmaterials, variieren auch die Eigenspannungen. Durch das Richten werden die Eigenspannungen verändert, wobei der im ungerichteten Prozessmaterial vorhandene Spannungszustand schon nach wenigen elastisch-plastischen Verformungen ausgelöscht ist [4]. Was die Identifikation von Eigenspannungen betrifft, sind zueinander konkurrierende Prinzipien nutzbar. Leider liefern mechanische, röntgenographische, magnetische, Neutronenstrahl- und Ultraschallverfahren im Vergleich quantitativ differenzierte Ergebnisse, so dass auf ein Verfahren zurückgegriffen werden sollte, um qualitative Aussagen abzuleiten.

Gestaltung des Richtprozesses

Die Gestaltung des Richtprozesses drückt sich im jeweiligen Richtsystem aus, das als eine Kombination von Richtapparaten definiert ist, die in Anpassung an die wechselnden Eigenschaften des einlaufenden Prozessmaterials konstante Eigenschaften erzeugen. Jeder Richtapparat wie auch jedes Richtsystem verfügt über einen spezifischen Richtbereich, der durch die Teilung (Abstand zwischen den Richtrollen) und den Durchmesser der Richtrollen vorgeschrieben wird. In Anpassung an diese Daten besitzt der Richtbereich Δ eine zulässige Grenze für die minimal und die maximal zu richtende Querschnittsabmessung des Prozessmaterials. Für Runddrähte sind der minimale Drahtdurchmesser

er d_{\min} und der maximale Drahtdurchmesser d_{\max} relevant (Gleichung 6).

$$d_{\min} \leq \Delta \leq d_{\max} \quad \text{Gl. 6}$$

Ist unter Berücksichtigung der Abmessungen des Prozessmaterials der Richtbereich festgelegt, gilt es, eine Entscheidung zur Anzahl der Richtrollen zu treffen. Bereits in [2] wurde versucht, in Abhängigkeit des Krümmungsbereiches $\Delta\kappa$ und des Bereiches der Dehngrenze ΔR_p eines Prozessmaterials eine Empfehlung zur Berechnung der erforderlichen Rollenanzahl für einen Richtapparat zu geben. Die eingeschränkte Gültigkeit der in [2] dokumentierten Vorschrift für die Berechnung der Rollenanzahl gab Anlass zu neuen Untersuchungen, die zeigen, dass statt des Bereiches der Dehngrenze ΔR_p die absolute Größe der Dehngrenze R_p berücksichtigt werden sollte. Anstelle einer scharfen Berechnungsvorschrift mit eingeschränktem Gültigkeitsbereich kommt im neuen Ansatz die Fuzzy-Logik zum Einsatz, die eine Wissensbasis nutzt, welche aus den linguistischen Termen (Zugehörigkeitsfunktionen) der Ein- und Ausgangsgrößen, der Regelbasis sowie dem Inferenz- und Defuzzifizierungsmechanismus besteht. Das in ein Fuzzy-System (Bild 5) eingebrachte Wissen resultiert aus empirisch gewonnenen sowie in verbaler Form formulierten Gesetzmäßigkeiten und stützt sich auf Ergebnisse des praktischen Einsatzes der virtuellen Abbildung des Richtprozesses [5].

Über die aus 25 Regeln bestehende Regelbasis sind die Eingangsgrößen Δr und R_p mit der Ausgangsgröße n , die die Anzahl der Richtrollen

Bild 7

Korrelation zwischen den Eingangsgrößen und der Anzahl der Richtrollen n

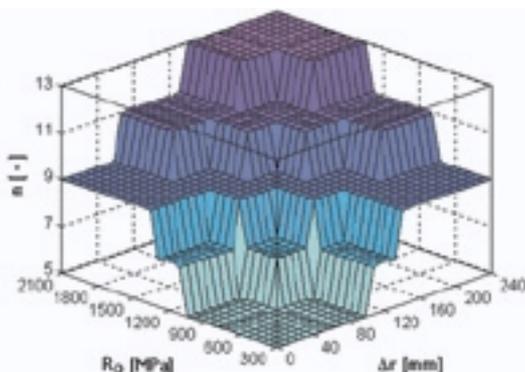
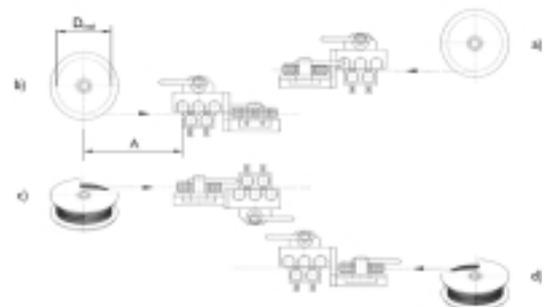


Bild 8

Verschiedene Möglichkeiten der Anordnung eines Richtapparates bzw. -systems



repräsentiert, verknüpft. Ein scharfer Wert für die Eingangsgröße Bereich des Krümmungsradius Δr kann nach Gleichung 7 ermittelt werden. Die Variablen r_{\max} und r_{\min} sind der nach Gleichung 3 bestimmte maximale bzw. minimale Krümmungsradius.

$$\Delta r = |r_{\max} - r_{\min}| \quad \text{Gl. 7}$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Eingangsgröße Dehngrenze R_p ist mit Bild 6 festgelegt. Die Unschärfe zeigt sich dadurch, dass die jeweiligen Mengen der Größen ineinander übergehen. So wird eine Dehngrenze $R_p = 800 \text{ MPa}$ zu 33 % (Zugehörigkeitsgrad $\mu = 0,33$) der Menge *very_small* und zu 67 % (Zugehörigkeitsgrad $\mu = 0,67$) der Menge *small* zugeordnet.

Der Einsatz eines geeigneten Inferenzmechanismus sowie einer spezifischen Defuzzifizierungsmethode ergibt ein spezifisches Übertragungsverhalten gemäß Bild 7. Damit kann für einen Satz scharfer Eingangsgrößen eine scharfe Ausgangsgröße generiert werden. Die Tabelle 2 vermittelt für einige diskrete Werte der Eingangsgrößen Dehngrenze R_p und Bereich des Krümmungsradius Δr abgeleitete Werte für die Anzahl der Richtrollen n .

Tabelle 2: Mit Fuzzy-Logik ermittelte Werte für die Anzahl der Richtrollen n

| Bereich d. Ausgangs- krümmungsradius Δr [mm] | Dehngrenze R_p [MPa] | Anzahl der Richtrollen n [-] |
|--|---------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 1000 | 5 |
| 60 | 1000 | 7 |
| 100 | 1000 | 9 |
| 100 | 2000 | 11 |
| 160 | 2000 | 13 |

Neben dem Richtbereich und der Anzahl der Richtrollen bestimmt die Art und Weise der Positionierung der Richtrollen maßgeblich den Richtprozess, da über die Positionen der Richtrollen die Biegeoperationen und damit u. a. die Restkrümmung beeinflusst werden. Witels-Albert hat dazu verschiedene Technologiestufen entwickelt, die sich durch den Grad der Automatisierung unterscheiden [5, 6, 7].

Integration des Richtprozesses

Obwohl die einem Richtprozess vor- und nachgelagerten Prozesse sehr

vielfältig sein können, so lassen sich doch übergreifend für alle Varianten wesentliche Regeln zur Integration ableiten.

Zunächst sei die Sicherstellung der Nulllinie, wie sie z. B. auch in Bild 8a zum Ausdruck kommt, erwähnt. Der Terminus Nulllinie drückt aus, dass die an den Prozessen einer Verarbeitungslinie beteiligten Werkzeuge in Bezug zu definierten geometrischen Randbedingungen so positioniert sind, dass ein Prozessmaterial spezifischer Abmessung lediglich berührt wird, d. h. keine Verformungen in den Einflussbereichen der Werkzeuge stattfinden. Davon ausgeschlossen sind nicht vermeidbare Unterbrechungen z. B. in Gestalt von Umlenkungen des Prozessmaterials. Die Positionierung der Werkzeuge, auch die eines Richtapparates bzw. -systems, muss immer ausgehend von der Nulllinie definiert erfolgen, so dass jederzeit beliebige Werkzeugpositionen reproduzierbar eingestellt werden können.

Auch bei Sicherstellung der Nulllinie folgen theoretisch unendlich viele weitere Möglichkeiten der Applikation eines Richtapparates bzw. -systems, da sowohl eine Rotation um die Nulllinie, eine Rotation um den Normalenvektor zur Nulllinie als auch eine Verschiebung in Richtung des Prozessmaterials denkbar ist.

Durch die wechselseitige Anordnung der Rollen eines Richtapparates in einer Ebene und die Zielsetzung bei n Richtrollen ($n-2$) wirksame Biegeoperationen zu realisieren, ergibt sich unter Einbeziehung der Krümmung des einlaufenden Prozessmaterials eine erste Zwangsbedingung, die die

genannten Rotationen auf jeweils einen Winkel einschränkt. Wird diese Zwangsbedingung berücksichtigt, ergeben sich insgesamt acht verschiedene Möglichkeiten der Anordnung eines Richtapparates bzw. -systems. Bild 8 veranschaulicht vier davon. Demnach muss eine Applikation so erfolgen, dass die Achse der ersten in Transportrichtung des Prozessmaterials angeordneten Richtrolle zur Achse der beispielsweise vorgelagerten Spule oder Umlenkrolle parallel ist sowie beide Achsen sich in Bezug zur Nulllinie auf derselben Seite befinden. Anstelle einer vorgelagerten Spule oder Umlenkrolle kann ein in adäquater Weise gekrümmtes Prozessmaterial treten.

Die exakte Anordnung des Richtprozesses in Richtung des Prozessmaterials folgt aus einer zweiten Zwangsbedingung, die den Abstand A (Gleichung 8) zu einem dem Richtprozess vorgelagerten Prozess definiert.

$$A \leq \pi \cdot D_{\text{Spule}} \quad \text{Gl. 8}$$

Eine Einhaltung des in Bild 8b gekennzeichneten Abstandes A hat zur Folge, dass sich dauerhaft eine konstante Richtqualität einstellt. Wird der Abstand A , der unter Berücksichtigung des Durchmessers der Spule D_{Spule} ermittelt wird, nicht respektiert, hat das noch nicht von seiner Krümmung befreite Prozessmaterial sowohl vor als auch im Richtapparat bzw. -system die Möglichkeit, sich zu verdrehen. Die Momentenvektoren der stattfindenden Biegeoperationen sind stochastisch ausgerichtet und führen zu nachteiligen Verformungen sowie

Literatur

[1] Li, Y.: Das Prinzip der Parameterbestimmung des Richtapparates. Draht und Kabel Panorama, Februar/März/April (1996), S. 76-77
 [2] Schneiderei, H.; Schilling, M.: Bestimmung der Mindestrollenanzahl bei Drahtrichtapparaten. Draht, 47 (1996) 7/8, S. 398-400
 [3] Albert, E.; Schilling, M.: Qualitätsverbesserung in der Drahtverarbeitung. Draht, 49 (1998) 1/98, S. 36-38
 [4] Maag, A.; Neuschütz, E.: Einfluss der Richtparameter auf die Anlagenbelastung und die Produktqualität beim Richten warmgewalzter Profile. Stahl und Eisen, 110 (1990) 2, S. 89-99
 [5] Guericke, W.; Paech, M.; Albert, E.: Simulation des Richtens von Draht. Draht, 47 (1996) 1/2, S. 23-29
 [6] Schneiderei, H.; Schilling, M.: Richtapparat mit elektronischer Positioniersteuerung. Draht, 48 (1997) 2, S. 18-19

[7] Paech, M.: Innovative Richttechnik. Draht, 50 (1999) 2, S. 46-51
 [8] E. Albert; M. Schilling; M. Paech: „We do it straight“ – Wire Straightening. Witels Apparate-Maschinen Albert GmbH, 12277 Berlin, Malteserstraße 151-159, Germany
 [9] N. N.: Willy Wire Fragebogen. Witels Apparate-Maschinen Albert GmbH, 12277 Berlin, Malteserstraße 151-159, Germany

Autor

■ Marcus Paech ist Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung bei Witels Apparate-Maschinen Albert GmbH, D-12277 Berlin.

zu einer variablen und schlechten Richtqualität.

Schlussfolgerungen

Die optimale Gestaltung und Integration eines Richtprozesses setzt eine Identifikation der Richtgutherstellung und des Richtguts voraus. Gleichmaßen sind die Anforderungen an das Endprodukt zu definieren und entsprechend zu berücksichtigen. Die Möglichkeiten zur Identifikation sind objektiv und entwickelt, so dass eine Nutzung in der täglichen Praxis der Drahtindustrie zum Standard gehören sollte. Für die Gestaltung und Integration von Richtprozessen liegen klare Richtlinien vor, die sich u. a. auf die Anwendung zeitgemäßer Methoden und Verfahren stützen. Identifikation, Gestaltung und Integration sind durch eine übergreifende Denkweise, die die zum Richtprozess peripheren Prozesse einbezieht, geprägt.

Zur breiten Umsetzung der Erkenntnisse übergreifender Denkweise hat Witels-Albert ein Buch herausgegeben [8] sowie einen Fragebogen [9] entwickelt, der Unterstützung bei der Identifikation, Gestaltung sowie Integration von Richtprozessen vermittelt. Darüber hinaus bietet das Unternehmen Produkte an, die den Richtprozess mit vor- und nachgelagerten Prozessen optimal verknüpfen sowie Integrationsvarianten repräsentieren, bei denen der Stand der Erkenntnisse umgesetzt ist.