

Ejemplo de una aplicación de la técnica de enderezado semi-automático, CS Easy 5-15.0 LE Foto: Witels-Albert GmbH

# Enderezado semi-automático

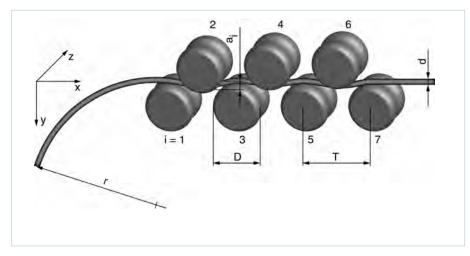
Motivos: La perspectiva global señala para las empresas en competencia márgenes de acción similares y con variables idénticas cuyos valores, sin embargo, pueden variar localmente. Citemos como ejemplo los costes del trabajo, de la energía y de las materias primas.

Si estudiamos la cadena de los procesos en la industria del alambre, veremos que el proceso de enderezado mediante rodillos es uno de los más importantes en la producción. Tanto al fabricar como al transformar alambre, el proceso de enderezado establece los valores de las variables técnicas y comerciales que deciden el éxito o el fracaso económico. Si, por

ejemplo, no se consiguen las condiciones geométricas de suministro que prescribe la norma EN 10218-2, es seguro que no habrá éxito financiero. Hay que añadir que, además de las condiciones de suministro geométricas, frecuentemente otras informaciones y propiedades reclaman mucha atención y son de gran importancia para el proceso de elaboración y

transformación que sigue al enderezado. Por estas circunstancias, el proceso de enderezado ha de convertirse también en un proceso de fabricación que permita identificar las propiedades del material de trabajo en todo su largo y que, al mismo tiempo, esté en condiciones de ajustar de manera constante las características determinadas del material.

Valance determinedes son la lárica



Fuzzy para el número de rodillos n		
Δr [mm]	Rp [MPa]	n[-]
0	1000	5
60	1000	7
100	1000	9
100	2000	11
160	2000	13

Esquema del proceso de enderezado con rodillos de parámetro con base determinada

Si se analizan soluciones insulares en la práctica [1, 2] llama también la atención que, de las características antes mencionadas, solamente se ha conseguido la seguridad de los datos de ajuste. Las restantes características no se aprovechan en la práctica en relación con la técnica de enderezado semi-automático. Se teme la innovación, que viene a ser creatividad convertida en realidad [3], a pesar de que amenazan desventajas en la competitividad. Hay un déficit de innovación porque los responsables quieren evitar las inversiones que creen altas.

## El proceso de enderezado por rodillos

La necesidad del enderezado se deriva primeramente de la intención de modificar o de eliminar curvaturas en el material a procesar que se indujeron por procesos térmicos o mecánicos de manera voluntaria o involuntaria. En segundo término, el proceso de enderezado influye en los datos mecánicos del material de trabajo. El enderezador dispone de rodillos de enderezado dispuestos en dos filas de manera alternada. Según sea la posición ai de los rodillos ajustables, el material durante su paso por el enderezador sufre las deformaciones elastico-plásticas que dan base a la modificación de los valores geométricos y mecánicos del material procesado. La segunda imagen documenta algunos valores del material y del enderezador para enderezar un alambre de diámetro d. Cada dispositivo enderezador dispone de una gama de enderezado específica que queda fijada por la separación T (separación entre rodillos) y por el diámetro de los rodillos D. Por adaptación a dichos datos, la gama de enderezado  $\Delta$  tiene un límite permisible para las dimensiones de la sección máxima y mínima del material que ha de enderezarse. Para alambres redondos son importantes los diámetros mínimos d min y máximo d $_{\rm max}$ .

$$d_{\min} \le \Delta \le d_{\max}$$
 Ecuación 1

El número n de rodillos de enderezado necesarios varía en dependencia del límite elástico R  $_p$  y del radio de curvatura  $\Delta r$  en el que se incluyen los radios máximo (rd  $_{max}$ ) y mínimo ( $r_{min}$ ).

$$\Delta r = \begin{vmatrix} r_{\text{max}} - r_{\text{min}} \end{vmatrix}$$
 Ecuación 2

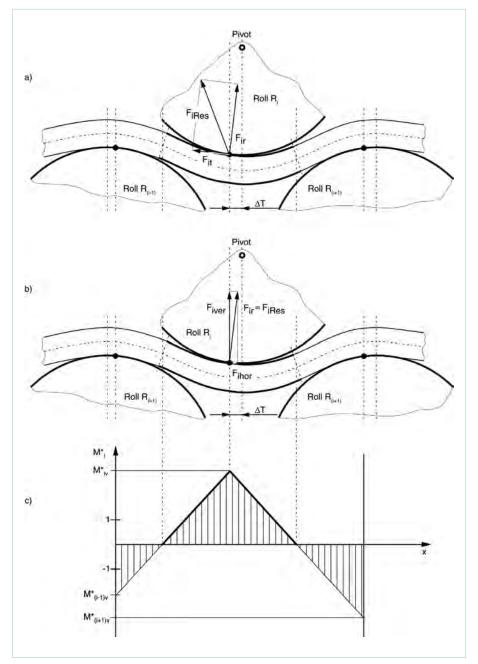
Como regla básica se considera que con un mayor límite elástico y mayor gama de radio de curvatura se necesita un mayor número de rodillos para conseguir una alta calidad del producto acabado.

El número de rodillos n se determina sirviéndose de la lógica fuzzy. En un sistema fuzzy se integran conocimientos teóricos, entre otros, ganados empíricamente y formulados verbalmente. La base de los conocimientos se compone de términos lingüisticos (funciones de pertinencia) de las magnitudes de entrada y salida, de la base de regulación y del mecanismo de interferencia y de defuzzyficación [5]. Mediante la base de regulación están interconectadas la magnitud de entrada gama del radio de curvatura  $\Delta r$  y el límite elástico  $R_p$  con la magnitud de salida número n de rodillos.

Basándose en un mecanismo de inferencia apropiado y en un método específico de defuzzyficación se consigue finalmente un comportamiento específico de transmisión. Así puede generarse en cualquier momento para un grupo de magnitudes de entrada «agudas» una magnitud «aguda» de salida. La tabla muestra, para algunos valores discretos de las magnitudes de entrada, los valores deducidos correspondientes para el número de rodillos n.

# Potencia necesaria para la conformación

Para conformar un material mediante rodillos se necesita una determinada potencia. Además de los valores del enderezado y del material a procesar, la potencia depende del modo de regular los rodillos y de la velocidad con que se haga. La forma ventajosa de un ajuste individual puede ser por translación o por una rotación en for-



Fuerzas de reacción  $F_{ir}y \ F_{it}$ , resultante de enderezado  $F_{iRes}$ , sus componentes  $F_{iver} \ y \ F_{ihor} \ y$  evolución del momento de flexión referido  $M^*_{i=f(x)}$ 

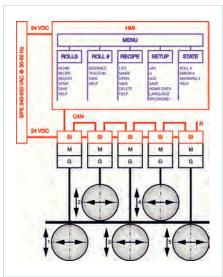
ma de translación. Con frecuencia se ven los llamados tornillos de movimiento o mecanismos de cabezal que en forma de engranaje con buena auto-retención transforman un momento par  $M_{iG}$  en una fuerza de incidencia  $F_{iA}.$  Valores característicos de un tal engranaje son el diámetro del flanco de rosca  $d_{iF},$  el ángulo medio de paso  $\alpha_{im}$  y el ángulo de fricción  $\rho^\prime_{i}.$  Con la velocidad angular  $\omega_{iG}$  y el número de revoluciones del cabezal  $n_{iG}$  se obtiene, mediante la ecuación 3, la poten-

cia mínima P i necesaria para ajustar un rodillo i

$$P_{i} = F_{iA} \cdot tan(\alpha_{im} + \rho'_{i}) \cdot \frac{d_{iF}}{2} \cdot \frac{\pi \cdot n_{iG}}{30}$$

Ecuación 3

La fuerza F  $_{iA}$  depende de la conformación del material procesado en la zona de influencia del rodillo i que ha de posicionarse y corresponde a la cuantía de la fuerza de enderezado  $|F_{iR}|$  (ecuación 4) que está en correla-



Esquema de la técnica de enderezado semiautomático con los sistemas parciales de mecánica, electricidad y programa electrónico

ción con las fuerzas reactivas en el punto de contacto del material procesado con el rodillo.

$$F_{iA} = |F_{iR}|$$
 Ecuación 4

Observando el caso casi-estático en el plano x-y nos permitimos despreciar las fuerzas externas y la fuerza tangencial de reacción Fit, de manera que la fuerza de reacción radial en el rodillo corresponde a la fuerza de enderezado resultante (fig. 3 a). Si además no se considera la separación que se ha modificado en  $\Delta T$ , entonces la fuerza de enderezado F  $_{iR}$  solamente representa la componente vertical de la fuerza de enderezado resultante F  $_{i-ver}$  (ecuación 5, fig. 3 b).

$$F_{iR} = |F_{iver}|$$
 Ecuación 5

Consideraciones del equilibrio, teniendo en cuenta los momentos de flexión en los rodillos (fig. 3 c), y las separaciones nos llevan a calcular la fuerza de enderezado |F\* iR| según la ecuación 6.

$$\begin{vmatrix} F^*_{iR} | = |M^*_{(i-I)v}| + |2 \cdot M^*_{iv}| + \\ M^*_{(i+I)v}| \end{vmatrix}$$
 Ecuación 6

El uso de magnitudes relativas y sin dimensión, que marcamos con un asterisco, simplifica el cálculo [6].

Para la fuerza de incidencia  $F_{iA}$  (ecuación 4) y la cuantía de la fuerza de enderezado natural  $|F_{iR}|$  rige la ecuación 7

$$\left|F_{iR}\right| = \binom{Rp \cdot \pi \cdot d^3}{\left|F^*_{iR}\right|} \operatorname{Ecuación} 7$$

Las relaciones comentadas muestran que el cálculo de la necesidad de potencia presupone determinar los momentos de flexión M  $*_{(i-1)v}$ , M\*  $_{iv}$  e M\*<sub>(i+1)v</sub>. Mediante la simulación del proceso de enderezado [6] resulta posible determinar numéricamente las características de la curvatura de los momentos de flexión calculando iterativamente el desarrollo del momento de flexión  $M^* = f(x)$  (fig. 3 c) y de la curvatura  $k^* = f(x)$ , así como la línea de flexión del material y = f(x), teniendo en cuenta la correspondiente posición de los rodillos. Conociendo la evolución del momento de flexión se conocen también los mometos de flexión relacionados para calcular la potencia necesaria.

# El concepto

La motivación ha formulado importantes características de los procesos avanzados de fabricación. Los enderezadores convencionales no poseen estas características. Su estructura es estática, es decir, al usuario no se le ofrece la posibilidad de utilizar dispositivos para elaborar geometrías de secciones alternativas o de otros materiales. En vez de herramientas simples para ajustar los rodillos, en los enderezadores semi-automáticos desarrollados se emplean accionamientos compuestos de motor y engranaje que actúan conjuntamente con componentes de la técnica de automatización y con programas electrónicos y que al mismo tiempo calculan y ajustan las posiciones-meta de los rodillos teniendo en cuenta la calidad final prevista para el producto.

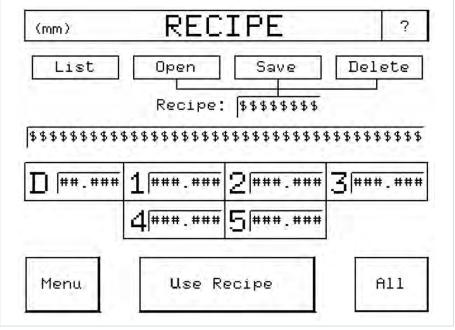
El concepto del enderezado semi-automático desarrollado abarca tres sistema parciales. Los sistemas parciales: mecánico, eléctrico y programa electrónico, están simplificados, es decir, se ha minimizado el número de componentes.

#### El sistema mecánico

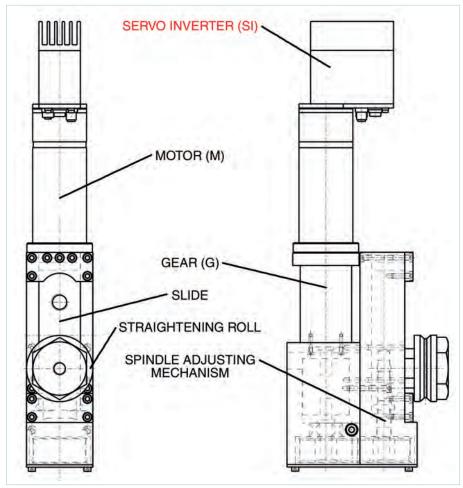
El flujo de fuerzas en el sistema mecánico abarca el servomotor (M), el engranaje planetario (G) el mecanismo de regulación para el cabezal, corredera inclusive, el eje del rodillo y el rodillo. El hecho de que todos los elementos estén reunidos en un módulo es revolucionario. Gracias a la estructura modular se tiene la posibilidad de fabricar de manera rápida y eficiente los aparatos enderezadores con un diseño específico para cada cliente, pero teniendo en cuenta las condiciones que la producción en masa pone en cuanto al cálculo de los precios (mass customization = mass production + customization) [7]. A petición del cliente se pueden fabricar de manera económica y a corto plazo, por ejemplo, enderezadores con un número específico de rodillos n o con una separación específica T. En los enderezadores semi-automáticos desarrollados se proyecta de manera óptima la separación T utilizando por principio la simulación de procesos [6], con la intención de llevar al máximo el campo de enderezado (ecuación 1). La calidad del producto final que

desea el cliente y las características del material se integran en el proceso para optimar la separación T.

Otra ventaja del sistema modular es que los módulos equipados con un accionamiento pueden acoplarse a otros módulos cuyo rodillo no sea regulable. Esta variante contribuye, manteniendo el perfil de funciones, a disminuir costes de inversión. Como alternativa, la estrategia de mass customization de la técnica de enderezado semi-automático ofrece al usuario la posibilidad de fabricar para el cliente específico también productos en pequeñas cantidades respetando el método de mass customization. Esto se consigue sin problemas si la técnica del enderezado permite el ajuste de diversas separaciones T. De esta manera, el usuario puede ajustar específicamente las separaciones de rodillos en el lugar de trabajo y adaptarlas así perfectamente p.ej. a la elaboración de determinados materiales o secciones (alambre, tubos, etc.). En este sentido recordamos los resultados teóricos y prácticos obtenidos que comprueban la influencia significante de la separación T en la calidad del producto acabado y la exactitud necesaria en el ajuste de los rodillos [8]. A excepción del motor y del engranaje, el sistema parcial mecánico está colocado en un cuerpo de precisión divisible. Así se



Pantalla de mando para el posicionamiento sincrónico de los rodillos



Sistema mecánico en estructura modular

consigue una gran densidad de potencia. La necesidad de potencia para la conformación del material y el posicionamiento de los rodillos está calculada aprovechando las reglas importantes en el caso y permite trabajar, en el primer modelo, una gran gama de espesores (entre 5,0 mm y 15,0 mm).

Con objeto de conseguir una gran exactitud al posicionar, se ofrece la posibilidad de regular la tensión previa del mecanismo de ajuste del cabezal. La corredera tiene dos taladros roscados para emplazar por lo menos un eje de rodillo. Los ejes de rodillo y los rodillos pueden diseñarse según desee el cliente.

# Sistema parcial eléctrico

Los sistemas de posicionamiento clásicos tienen un mando industrial, convertidores y sensores integrados en mandos preconectados centrales o decentrales. También son clásicos los cableados para comunicación serial y

distribución de energía que parten en estrella desde el mando. Estos diseños discretos exigen intensos planeamientos del cableado y esfuerzos en la realización, lo que rápidamente se transforma en costes importantes.

Para la técnica de enderezado semi-automático se ha realizado un sistema parcial eléctrico alternativo que consiste simplemente de servoconvertidores y de una HMI (human machine interface) en forma de pantalla tactil. A cada módulo corresponde un servoconvertidor que se comunica con la HMI preconectada a través de un bus de datos CAN, siendo la comunicación lineal y no en estrella. Como variante puede trabajarse con un complejo de módulos consistente en un máximo de 32 módulos individuales. La ener gía está or ganizada de tal forma que los rodillos de los 32 módulos pueden posicionarse de manera sincrónica.

La estructura modular y la topología permiten realizar un plug & play real.

Por eso es posible cambiar un mecanismo, incluyendo el servoconvertidor, sin trabajo adicional de puesta en marcha, dado que todos los ajustes de la comunicación e inicializaciones de los nuevos componentes están hechos ya en fábrica.

La técnica de enderezado semi-automático prescinde de iniciadores y de sensores para detectar las posiciones finales o para la referenciación («homing»), ya que las rutinas inteligentes del sistema parcial del programa se encargan de manera fiable de ese cometido. El no necesitar un mando preferente, por ejemplo en forma de un SPS o de un ordenador, contribuye a reducir el número de componentes. La HMI, programa y servoconvertidor inclusives, actúa de manera alternativa.

# Sistema parcial programa electrónico

El programa electrónico implementado en la HMI rige la comunicación con el convertidor de un módulo y con los servoconvertidores, si se utilizan varios servoconveridores. El programa electrónico reproduce todas las rutinas que son de importancia para la técnica de enderezado semi-automático. Como ejemplo se documenta en la figura la presentación del mando de una rutina para el posicionamiento sincronizado de rodillos (RECIPE) que emplea los llamados bloques de datos de ajuste o recetas. Allí se encuentran para cada módulo los valores de posicionamiento para ajustar y el diámetro del alambre. El usuario puede en cualquier momento seleccionar directamente en la HMI los bloques de datos, crearlos, editarlos o borrarlos. Una vez seleccionado un bloque de datos, el paso siguiente es enviar al convertidor los ajustes almacenados en él. Así, por ejemplo, puede ajustarse en un momento la línea cero para un diámetro específico, ejecutar una apertura rápida o asegurar un ajuste básico para un material específico. El ajuste de los rodillos para producir material recto se calcula mediante el programa SimDATA [9] que se basa en el proceso de enderezado [6]. En cuanto programa sencillo, SimDATA se sirve de bibliotecas de aparatos de código binario que contienen la información

sobre la posición de los rodillos para fabricar una calidad de producto definida. Disponer del programa SimDA TA significa otra condición más del proceso de fabricación avanzado, dado que se tienen datos de ajuste de la técnica de enderezado semi-automático ya antes de iniciar el proceso.

### Resumen

Se determina la necesidad de potencia para la conformación del material partiendo del principio efectivo y de las magnitudes características principales para el proceso de enderezado. El cálculo de la necesidad de potencia se facilita con un programa de simulación que reproduce virtualmente el proceso de enderezado. La base de la simulación es un modelo teórico de la conformación elástico-plástica alternante de un material a procesar y de la relación entre el momento de flexión y de la curvatura en las operaciones de flexión. Se comenta el concepto de una nueva técnica de enderezado semi-automático subdividida en sistemas parciales de mecánica, electricidad y programa electrónico con los que es posible realizar procesos de enderezado que tienen las características de un proceso de fabricación avanzado. Características de esa técnica de enderezado semi-automático son: la estructura modular , la reducción del número de componentes, una interfase sencilla de manejar para el usuario y la posibilidad de disponer de los datos del proceso y del ajuste ya antes de iniciar el proceso.

Gracias a la flexibilidad al diseñar y al ajustar las magnitudes características principales, tales como número de rodillos y separación de los rodillos, resulta posible fabricar económicamente productos especiales para un cliente y en cantidades reducidas.

#### **Bibliografía**

- [1] Schneidereit, H.; Schilling, M.: Richtapparat mit elektronischer Positioniersteuerung. Draht, 48 (1997) 2, S. 18-19
- [2] Hübner, R.-T.: Moderne Richtmaschinen.

Draht, 50 (1999) 5, S, 26-27

- [3] Linneweh, K.: Mut zur Muße Innovation als persönliche Herausforderung. www.linneweh.com, Vortrag vor der TÜV Rheinland Group, (2005)
- [4] Paech, M.: Rollenrichtprozeß und Peripherie. Draht, 52 (2001) 3, S. 47-50
- [5] Kahlert, J.: Fuzzy Control für Ingenieure. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, (1995)
- [6] Guericke, W.; Paech, M.; Albert, E.: Simulation des Richtens von Draht. Draht, 47 (1996) 1/2. S. 23-29
- [7] Pine II, J. B.: Mass Customization: The New Frontier in Business Competition. Boston, Havard Business School Press (1993)
- [8] Paech, M.: Maßgeschneiderte Richtapparate. Draht, 53 (2002) 4, S. 18-20
- [9] Paech, M.: Positionierung von Richtrollen. Draht, 52 (2002) 2, S. 41-42

El Dipl.-Ing. Marcus Paech, autor del presente artículo, es Director técnico de Witels-Albert GmbH.

#### Witels-Albert GmbH

Malteserstraße 151-159 D-12277 Berlin Germania Tel.: +49 30 723 988 0

Fax: +49 30 723 988 88 E-Mail: info@witels-albert.com Internet: http://www.witels-albert.com