

This document contains a post-print version of the paper

Modellbasierte Optimierung und Regelung der Produktkontur beim Warmwalzen

authored by **F. Schausberger, A. Steinboeck, and A. Kugi**
and published in *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*.

The content of this post-print version is identical to the published paper but without the publisher's final layout or copy editing. Please, scroll down for the article.

Cite this article as:

F. Schausberger, A. Steinboeck, and A. Kugi, "Modellbasierte optimierung und regelung der produktkontur beim warmwalzen", *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 132, no. 4–5, pp. 221–229, 2015. DOI: [10.1007/s00502-015-0309-2](https://doi.org/10.1007/s00502-015-0309-2)

BibTex entry:

```
@Article{Schausberger15d,  
  Title = {Modellbasierte Optimierung und Regelung der Produktkontur beim Warmwalzen},  
  Author = {Schausberger, F. and Steinboeck, A. and Kugi, A.},  
  Journal = {e & i Elektrotechnik und Informationstechnik},  
  Pages = {221--229},  
  Volume = {132},  
  Year = {2015},  
  Number = {4--5},  
  Doi = {10.1007/s00502-015-0309-2},  
}
```

Link to original paper:

<http://dx.doi.org/10.1007/s00502-015-0309-2>

Read more ACIN papers or get this document:

<http://www.acin.tuwien.ac.at/literature>

Contact:

Automation and Control Institute (ACIN)
TU Wien
Gusshausstrasse 27-29/E376
1040 Vienna, Austria

Internet: www.acin.tuwien.ac.at
E-mail: office@acin.tuwien.ac.at
Phone: +43 1 58801 37601
Fax: +43 1 58801 37699

Modellbasierte Optimierung und Regelung der Produktkontur beim Warmwalzen

F. Schausberger, A. Steinboeck, A. Kugi IEEE, OVE, VDE

In diesem Beitrag wird ein optimierungsbasiertes Verfahren zur Beseitigung von Abweichungen der Produktkontur beim Warmwalzen vorgestellt. Zunächst wird eine Methode zur Schätzung der Kontur und der Bewegung der Walztafel während des Walzvorganges diskutiert. Anschließend wird ein mathematisches Modell zur Prädiktion der Walztafelkontur präsentiert. Eine Validierung der Konturschätzung und des Modells der Konturentwicklung erfolgen anhand von Messungen aus dem normalen Produktionsprozess. Beide Verfahren werden in einem optimierungsbasierten Ansatz zur Reduktion vorhandener Konturfehler kombiniert. Die Ergebnisse der Simulation eines Walzvorgangs zeigen die prinzipielle Funktionalität der vorgeschlagenen Methode.

Schlüsselwörter: Warmwalzen; Säbelmodellierung; Konturmessung; Regelungsentwurf; unbeschränkte Optimierungsprobleme

Modell-based optimization and control of the contour of heavy plates in hot rolling.

This paper deals with the optimization-based compensation of shape defects of the contour of heavy plates in the hot rolling process. In the first part, a method to estimate the contour and the movement of a plate during the roll pass is presented. Furthermore, a mathematical model of the contour evolution is discussed. Both approaches are validated using measurements of a heavy plate mill. The contour estimation and the model of the contour evolution are used in an optimization-based approach to curb occurring contour errors. Moreover, simulation results demonstrate that the proposed method works effectively.

Keywords: hot rolling; camber modelling; contour measurement; feedback control; unconstrained optimization

Eingegangen am 17. März 2015, angenommen am 27. April 2015
© Springer Verlag Wien 2015

1. Einleitung und Problemstellung

An Reversierwalzgerüsten werden Walztafeln in aufeinanderfolgenden Stichen auf eine bestimmte Enddicke ausgewalzt, siehe Abb. 1. Der Begriff Stich bezeichnet dabei eine einzelne Dickenreduktion der Walztafel, welche abwechselnd in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung erfolgt. Die erzielte Qualität der Walztafel wird hauptsächlich durch die Materialeigenschaften und die erreichten Toleranzen bezüglich der Dicke und Form bestimmt. Die steigenden Anforderungen an gewalzte Produkte erfordern eine stetige Verbesserung dieser Qualitätsmerkmale.

Beim Walzen können aufgrund der plastischen Verformung im Walzspalt neben der gewünschten Dickenreduktion auch Abweichungen der Kontur von der gewünschten rechteckigen Form entstehen. Ein häufig auftretender Formfehler ist in Abb. 1 zu sehen.

Bei der hier auftretenden Säbelbildung krümmt sich die Walztafel beim Verlassen des Walzspaltes um deren Hochachse. Eine Ursache für dieses Verhalten können asymmetrische Verhältnisse quer zur Walzrichtung sein. Dazu zählen sowohl asymmetrische Einlauf- und Auslaufdickenprofile als auch Inhomogenitäten der Walztafeltemperatur in Querrichtung. Die negativen Auswirkungen von Konturfehlern reichen von verringerter Produktqualität bis hin zur Beschädigung von nachgelagerten Anlagenteilen. Daher sollen solche Fehler der Kontur vermieden oder zumindest verringert werden.

Erschwerend kommt bei der Säbelvermeidung hinzu, dass die asymmetrischen Verhältnisse während des Stiches im Vorhinein unbekannt sind und damit nicht vorab korrigiert werden können. Deshalb ist es eine gebräuchliche Methode, erst beim tatsächlichen Auftreten von Konturfehlern entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Dazu ist eine Messung der Kontur der Walztafel notwendig. Ansätze für Messsysteme und Algorithmen zur Verarbeitung

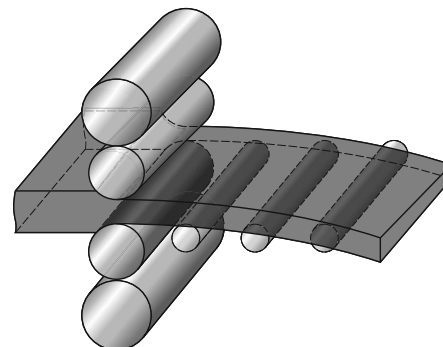


Abb. 1. Schematische Darstellung eines Quarto-Reversiergerüsts und Walztafel mit Konturfehler

der Messdaten sind unter anderem in [6, 13, 15] zu finden. Insbesondere bei bereits vor dem Stich gekrümmten Walztafeln kann ein außermittiges Durchlaufen während der Walzung auftreten. Der außermittige Durchlauf führt zu asymmetrischen Walzkräften und

Schausberger, Florian, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29 / E376, 1040 Wien, Österreich (E-Mail: schausberger@acin.tuwien.ac.at); **Steinboeck, Andreas**, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29 / E376, 1040 Wien, Österreich; **Kugi, Andreas**, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29 / E376, 1040 Wien, Österreich

daher zur asymmetrischen Ausbildung des Walzspaltes, welche wiederum zur Säbelbildung führt. Daher ist es notwendig, neben der Kontur auch die Bewegung der Walztafel während des Stiches zu erfassen.

Zusätzlich ist ein tiefgehendes Verständnis der Vorgänge im Walzspalt notwendig, um die notwendigen Stelleingriffe am Walzgerüst zur Beseitigung eines auftretenden Säbels bestimmen zu können. Hierzu können mathematische Modelle der Umformvorgänge im Walzspalt herangezogen werden [1, 3, 4, 7, 12, 14]. Die in der Literatur zu findende Bandbreite an Modellen der Konturentwicklung mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und variierendem Berechnungsaufwand ist groß. Beginnend bei einfachen Modellen aufbauend auf den Kontinuitätsgesetzen während des Walzprozesses reicht die Palette bis hin zu Finite-Elemente-Methode (FEM) Simulationen mit komplexen Modellen des Walztafelmaterials und der strukturellen Eigenschaften des Walzgerüsts. Vor allem die Modellierungsansätze basierend auf FEM erfreuen sich aufgrund der stetig steigenden Leistung heutiger Rechner immer größerer Beliebtheit. Die hierbei erzielten Genauigkeiten der Simulationsergebnisse sind mit denen der einfachen Modelle nicht zu vergleichen. FEM Simulationen eignen sich daher gut zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren (z. B. Schliff der Walzen, Konstruktion des Gerüsts, Material der Walztafel) auf die Säbelbildung. Jedoch sind die dazu notwendigen Rechenzeiten entsprechend groß. Daher sind diese Berechnungsmethoden für die Anwendung in echtzeitfähigen modellbasierten Steuerungs- und Regelungsmethoden zur Säbelreduktion nur bedingt geeignet.

Aus den oben genannten Gründen ist es notwendig, das Problem der Säbelbildung mit einem gesamtheitlichen Ansatz zu lösen. Diese Vorgehensweise umfasst die Konzipierung einer geeigneten Messmethode zur Ermittlung der Kontur und der Bewegung der Walztafel während des Stiches. Des Weiteren ist die Erstellung eines maßgeschneiderten mathematischen Modells der Säbelbildung notwendig, welches als Grundlage für den modellbasierten Reglerentwurf dient. Hierbei muss ein Kompromiss zwischen ausreichender Genauigkeit und geringem Rechenaufwand gefunden werden.

Zu Beginn wird in Abschn. 2 die in [11] diskutierte Methode zur Ermittlung der Walztafelkontur und deren Bewegung zusammengefasst. Dabei werden die von einer Infrarotkamera aufgenommenen Bilder in einem optimierungsbasierten Ansatz verarbeitet. Das mathematische Modell der Säbelbildung aus [10] wird in Abschn. 3 diskutiert. Dieses ermöglicht die Bestimmung der Kontur nach einem Stich anhand des Einlauf- und Auslaufdickenprofils der Walztafel und der Kontur vor der Walzung. Das mathematische Modell bildet die Basis für die im darauf folgenden Abschn. 4 gezeigte Regelungsstrategie zur Verminderung von Konturdefekten. Der verwendete Ansatz ermöglicht die Berechnung der notwendigen Anstellung des Gerüsts im nächsten Stich zur optimalen Kompensation vorhandener Säbel. Die Regelung erfolgt somit von Stich zu Stich. Die vorgestellte Regelungsmethode ist in grafischer Form in Abb. 2 dargestellt.

2. Ermittlung der Walztafelkontur

Die Bestimmung der Kontur der Walztafel stellt einen der zentralen Punkte in der vorgestellten Regelungsstrategie dar. Dabei ist sowohl die Kenntnis der Längskanten als auch des Kopf- und Fußendes von Bedeutung. Als Kopfende wird jene der beiden Stirnkanten der Walztafel bezeichnet, die als erste den Walzspalt während des Stiches passiert. Die am Ende des Stiches aus dem Walzspalt auslaufende Kante trägt den Namen Fußende.

Eine einfache Bestimmung der Walztafelkontur wäre dann möglich, wenn auf dem Kamerabild die gesamte Walztafel nach dem

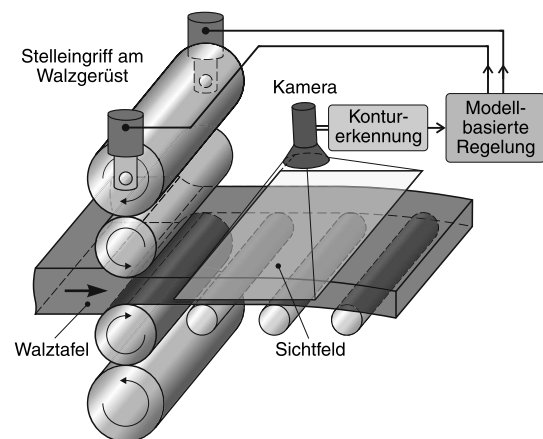


Abb. 2. Blockdiagramm der Regelungsstrategie zur Reduktion vorhandener Säbel

Stich abgebildet ist. Dann wäre lediglich eine Detektion der Kanten der Walztafel im betrachteten Bild notwendig. Jedoch ist dieser Ansatz am betrachteten Walzgerüst der AG der Dillinger Hüttenwerke am Standort Dillingen/Saar, Deutschland aufgrund folgender Gegebenheiten nicht anwendbar:

- Die Kontur der Walztafel ist teilweise durch andere Anlagenteile überdeckt.
- Die Messung der Kontur soll bereits während des Stiches erfolgen.
- Vor allem bei langen Walztafeln unterscheidet sich das Format der aufzunehmenden Walztafel stark vom Kameraformat. Dies führt zu einer geringen örtlichen Auflösung in Breitenrichtung der Walztafel.

Aus den folgenden Gründen soll die Messung der Kontur möglichst nahe am Gerüst, d. h. kurz nach dem Verlassen des Walzspaltes, erfolgen:

- Auch die Form kurzer Walztafeln soll messbar sein.
- Die Zeitspanne zwischen der Entstehung der Kontur im Walzspalt und deren Messung soll möglichst kurz sein, da sie sich als Totzeit negativ auf das Regelverhalten auswirkt.

Daher erfolgt die Ermittlung der Walztafelkontur während des Stiches in der Nähe des Gerüsts unter Zuhilfenahme mehrerer überlappender Bilder der Walztafel. Montagepositionen in der Nähe des Walzspaltes sind meist mit widrigen Umgebungsbedingungen für Sensoren verbunden. Unter anderem stellen Staub, Wasserdampf und Hitze die Robustheit der Messeinrichtung auf die Probe. Abhilfe schafft in diesem Fall die Verwendung einer Kamera zur Messung der Kontur. Diese kann in sicherer Distanz zum Walzspalt an der Hallendecke montiert werden und gleichzeitig kann sie die Walztafel möglichst nahe am Walzspalt erfassen. Zusätzlich bietet dieser Befestigungsort eine Entkopplung gegenüber Schwingungen des Walzgerüsts, welche besonders zu Beginn des Stiches angeregt werden.

Gebräuchlich ist hierbei die Verwendung von Standard-CCD-Kameras. Zusätzliche Lichtquellen zur Ausleuchtung sind aufgrund der während der Walzung rot glühenden Walztafel nicht notwendig. Jedoch ergeben sich Nachteile beim Vorhandensein störender Einflüsse wie Dampfwolken oder externe Lichtquellen, etwa bei Einstrahlung von Tageslicht [6]. In diesem Fall sind Infrarotkameras von Vorteil, da diese solchen Störungen nicht ausgesetzt sind. Insbesondere kann mit Hilfe solcher Kameras die Walztafelkontur auch durch

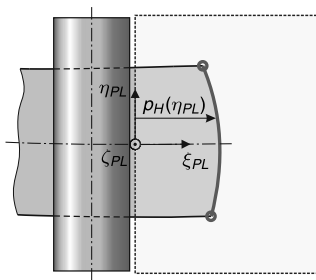


Abb. 5. Parametrierung des Kopfendes der Walztafel zu Beginn der Schätzung

2.2.1 Parametrierung des Kopfendes der Walztafel

Die Schätzung der Kontur beginnt sobald das Kopfende im Sichtfeld der Kamera das erste Mal zu sehen ist. Dabei wird das Kopfende einmalig durch das Polynom

$$p_H(\eta_{PL}) = \sum_{i=0}^{N_H} c_{H,i} \eta_{PL}^i \quad (3)$$

im walztafel festen Koordinatensystem $(\xi_{PL}, \eta_{PL}, \zeta_{PL})$ parametrisiert, siehe Abb. 5.

Die Koeffizienten $c_{H,i}$ des Polynoms (3) mit Grad N_H werden mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Die Bewegung des so parametrisierten Kopfendes wird in weiterer Folge zur Schätzung der Walztafelgeschwindigkeit v_{PL} verwendet.

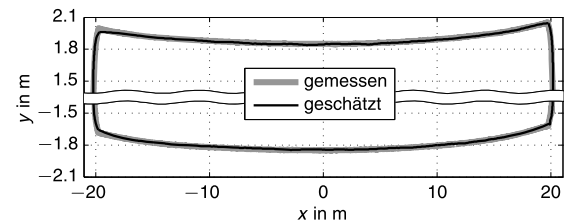
2.2.2 Optimierungsproblem mit Kopfende im Sichtfeld der Kamera
Sofern sich ein Kopfende im Sichtbereich der Kamera befindet, kann zusätzlich zur Kontur die Geschwindigkeit v_{PL} der Walztafel geschätzt werden. Dazu wird der Fehler zwischen der Parametrierung (3) und dem detektierten Kopfende unter Einhaltung der dynamischen Nebenbedingung (1) minimiert. Analog dazu ergeben sich die Koeffizienten der Parametrierung der Längskanten durch Minimierung des Fehlers zwischen (2) und den detektierten Kanten. Dieser Ansatz führt auf ein statisches Optimierungsproblem zur Schätzung der Koeffizienten $c_{L,i}$ des Längspolynoms und der Bewegung der Walztafel beschrieben durch v_{PL} und ω . Dazu muss das dynamische System (1) mit einer zur Bildwiederholrate der Kamera passenden Abtastzeit T_s diskretisiert werden. Mit der Annahme $\omega = \text{konst.}$ während eines Abtastschrittes $t_k \leq t < t_k + T_s$ lässt sich die analytische Lösung des Systems (1) und damit das Abtastsystem berechnen.

2.2.3 Optimierungsproblem ohne Kopfende im Sichtfeld der Kamera

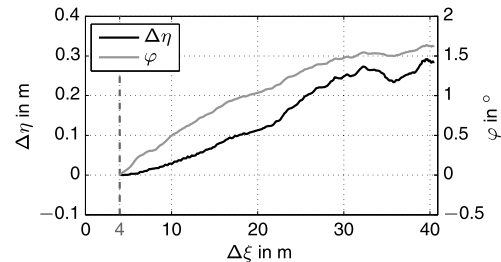
Ist das Kopfende nicht mehr im Sichtfeld der Kamera enthalten, so ist mit der vorgestellten Methode keine Schätzung der Walztafelgeschwindigkeit mehr möglich. Daher wird, nachdem das Kopfende das Sichtfeld verlassen hat, die Geschwindigkeit v_{PL} nicht mehr geschätzt, sondern auf den zuletzt ermittelten Wert gesetzt. Nachdem die gesamte Walztafel den Walzspalt verlassen hat, wird die geschätzte Kontur durch Hinzufügen des Fußendes vervollständigt.

2.3 Lösung des Optimierungsproblems

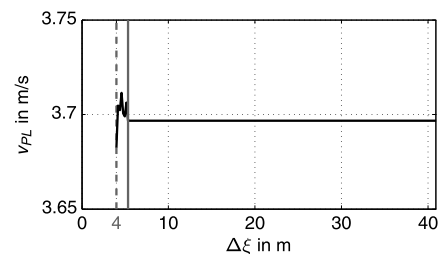
Zur Lösung des statischen Optimierungsproblems bieten sich unterschiedliche numerische Methoden an. Konkret wird hier die Quasi-Newton-Methode mit BFGS-Korrektur der Hessematrix verwendet [8]. Dieses iterative Verfahren weist für das vorliegende Optimierungsproblem gute Konvergenzeigenschaften bei moderatem



(a) Gemessene und geschätzte Kontur einer Walztafel



(b) Position und Orientierung des walztafel festen Koordinatensystems



(c) Geschätzte Geschwindigkeit der Walztafel

Abb. 6. Messungen und Schätzergebnisse für eine Walztafel

Berechnungsaufwand auf, wodurch eine schnelle Lösung des Problems ermöglicht wird.

2.4 Validierung der Konturschätzung

Im Folgenden soll die vorgestellte Methode zur Schätzung der Walztafelkontur anhand einer gemessenen Walztafel validiert werden. Die zur Konturschätzung verwendete Infrarotkamera ist an der Hallendecke hinter dem Fertigerüst der Dillinger Hüttenwerke montiert. Dadurch ergeben sich ein Abstand von 25 m zwischen Kamera und Walztafel und eine Pixelkantenlänge von 9.6 mm. Die Bildwiederholrate der Kamera beträgt 30 Bilder/s bei einer Bildgröße von 659×494 Pixel. Dieselben Parameter wie in [11] wurden für die Validierung verwendet. Als Vergleichsmessung werden die Daten einer Konturvermessungsanlage (KVA) am Ende der Produktionslinie herangezogen. Diese dient zur Bestimmung der Walztafelkonture nach der Walzung und kann aufgrund der großen Entfernung zum Fertigerüst nicht für die Schätzung der Kontur während des Stiches herangezogen werden. In Abb. 6(a) sind die anhand der vorgestellten Methode geschätzte und die durch die KVA gemessene Kontur einer Walztafel abgebildet. Die geschätzte Kontur wurde so verschoben und rotiert, dass eine möglichst gute Übereinstimmung mit der gemessenen Kontur im Koordinatensystem (x, y) der KVA resultiert. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Konturen in Querrichtung, mit einer maximalen Abweichung von unter einem Zentimeter, zu erkennen. Ebenso wurde die Länge der Walztafel gut geschätzt. Dieses Ergebnis deutet auf eine genaue Schät-

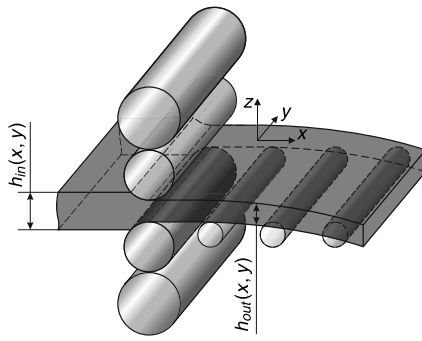


Abb. 7. Plastische Deformation der Walztafel während der Walzung

zung der Walztafelgeschwindigkeit hin. In den Abb. 6(b) und 6(c) sind die Verläufe von $\Delta\eta$, φ und v_{PL} gezeigt. Die Darstellung startet erst bei $\Delta\xi = \xi_0 = 4$ m, weil das Sichtfeld der Kamera in Längsrichtung bei ξ_0 im ortsfesten Koordinatensystem (ξ, η, ζ) beginnt.

In Abb. 6(c) sind die Bereiche mit und ohne Kopfende im Sichtfeld durch die graue durchgezogene Linie voneinander getrennt. Im Bereich rechts der Linie ist eine Schätzung der Walztafelgeschwindigkeit nicht mehr möglich, weshalb diese konstant gehalten wird.

3. Mathematisches Modell der Konturentwicklung in einem Walzstich

Zur effektiven Beseitigung von Formfehlern ist neben der Messung der Walztafelkontur ein tiefgreifendes Verständnis der Verhältnisse im Walzspalt, die zum Entstehen von Konturfehlern führen, notwendig. Das in [10] präsentierte mathematische Modell wird hierbei zur Prädiktion der Kontur nach dem Stich zufolge der Verhältnisse im Walzspalt verwendet.

3.1 Modellierung der Konturentwicklung

Der plastische Umformvorgang während eines Stiches ist in Abb. 7 schematisch dargestellt. Zu dessen Beschreibung wird ein materialfestes kartesisches Koordinatensystem (x, y, z) herangezogen.

Es werden die folgenden Annahmen bezüglich der Verhältnisse im bzw. nach dem Walzspalt getroffen:

- Eine allfällige Breitung der Walztafel wird vernachlässigt.
- Nach dem Verlassen des Walzspaltes tritt keine (weitere) plastische Verformung auf.

Den Ausgangspunkt des mathematischen Modells der Konturentwicklung bilden das Profil der Einlaufdicke $h_{in}(x, y)$ und der Auslaufdicke $h_{out}(x, y)$ der Walztafel. Dabei sind x und y als Lagrangesche Koordinaten, d. h., materialfest, anzusehen.

Die durch den Stich aufgebraachte plastische Dehnung in Längsrichtung ergibt sich zu

$$\epsilon_{xx}^{pl} = \frac{h_{in}(x, y)}{h_{out}(x, y)} - 1. \quad (4)$$

Das dreidimensionale Problem kann unter der Annahme homogener Verhältnisse in Dickenrichtung in guter Näherung als zweidimensionales Problem angesehen werden. Dadurch vereinfachen sich die Berechnungen der Dehnungen und der Eigenspannungen erheblich und es kann in den Berechnungen von einem ebenen Spannungszustand ausgegangen werden. Motiviert ist diese Annahme durch die Spannungsfreiheit der Oberfläche der Walztafel und dem großen Verhältnis von Länge zu Dicke der Walztafel.

Die Gleichgewichtsbedingungen unter der Vernachlässigung von Volumskräften ergeben sich für den betrachteten zweidimensionalen Fall in der Form [9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

mit den Normalspannungen σ_{xx} und σ_{yy} in Längs- und Querrichtung und der Schubspannung σ_{xy} . Für die Walztafel wird ein linear-elastisches Materialverhalten charakterisiert durch die elastischen Verzerrungen

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx}^{el} &= \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}), \\ \epsilon_{yy}^{el} &= \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}), \end{aligned} \quad (6)$$

und

$$\epsilon_{xy}^{el} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy} \quad (7)$$

verwendet. Hierbei wird der Elastizitätsmodul mit E , der Schubmodul mit G und die Querkontraktionszahl mit ν bezeichnet. Durch diese konstitutiven Gleichungen werden die Spannungen aus (5) mit den elastischen Dehnungen ϵ_{xx}^{el} , ϵ_{yy}^{el} und ϵ_{xy}^{el} verknüpft. Die Gesamtdehnungen ergeben sich durch Addition der elastischen und plastischen Dehnungen zu

$$\epsilon_A = \epsilon_A^{pl} + \epsilon_A^{el} \quad \forall A \in \{xx, yy, xy\}. \quad (8)$$

Zusätzlich muss die sogenannte Kompatibilitätsbedingung [9]

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (9)$$

von den Dehnungen erfüllt werden, um aus ihnen ein zulässiges Verschiebungsfeld berechnen zu können. Durch Einsetzen von (6) und (7) in (8) unter in weiterer Folge in (9) lässt sich das vorliegende mechanische Problem mit $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ in der Form

$$\frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial y^2} = -E \left(\frac{\partial^2 \epsilon_{xx}^{pl}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{yy}^{pl}}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{xy}^{pl}}{\partial x \partial y} \right) \quad (10)$$

darstellen. Zur Lösung von (10) wird die Airysche Spannungsfunktion $F(x, y)$ verwendet, welche die Bedingungen

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}, \quad \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \quad (11)$$

und damit automatisch die Gleichgewichtsbedingungen (5) erfüllt. Mit Hilfe von $F(x, y)$ kann (10) als Differentialgleichung 4. Ordnung, d. h.

$$\Delta \Delta F(x, y) = -E \left(\frac{\partial^2 \epsilon_{xx}^{pl}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{yy}^{pl}}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{xy}^{pl}}{\partial x \partial y} \right) \quad (12)$$

angeschrieben werden, wobei $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ den Laplace-Operator bezeichnet. Gleichung (12) wird als erweiterte biharmonische Gleichung bezeichnet.

Ist die Lösung von (12) bekannt, können die Eigenspannungen aus (11) berechnet werden. Die Verschiebungen zwischen der Kontur der Walztafel vor und nach dem Stich ergeben sich aus der Integration der Dehnungen zufolge (8). Zusätzlich zur Erfüllung von (12) muss eine zulässige Lösung $F(x, y)$ den Randbedingungen genügen damit im betrachteten Fall die Spannungsfreiheit des Randes der Walztafel sichergestellt wird.

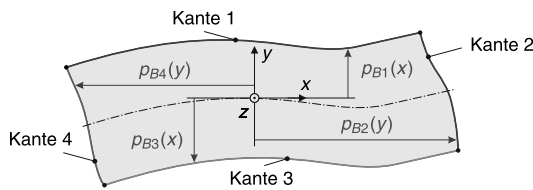


Abb. 8. Parametrierung der Walztafelkanten durch Polynome

3.2 Lösung der biharmonischen Gleichung

Zur Lösung der biharmonischen Gleichung werden Potenzreihen verwendet [10]. Die Linearität von (12) bietet den Lösungsansatz

$$F = F_{hom} + F_{part} \quad (13)$$

mit der homogenen Lösung F_{hom} und der partikulären Lösung F_{part} an. Dabei erfüllt F_{hom} die zugehörige homogene Gleichung von (12). F_{part} stellt eine Lösung der erweiterten biharmonischen Gleichung dar, erfüllt jedoch nicht notwendigerweise die Randbedingungen. Deshalb wird die homogene Lösung F_{hom} zur Erfüllung der Randbedingungen herangezogen. Aufgrund der Vernachlässigung der Breitung wird nur die plastische Dehnung in Längsrichtung berücksichtigt, d. h. $\epsilon_{yy}^{pl} = \epsilon_{xy}^{pl} = 0$. Die plastische Dehnung ϵ_{xx}^{pl} wird durch ein zweidimensionales Polynom in der Form

$$\epsilon_{xx}^{pl} = \sum_{i=0}^{P_x} \sum_{k=0}^{P_y} c_{i,k} x^i y^k, \quad (14)$$

mit den Koeffizienten $c_{i,k}$ und den Polynomgraden P_x und P_y in Längs- und Querrichtung parametrisiert. Die partikuläre Lösung F_{part} lässt sich ebenso als Reihe formulieren. Die Summanden von F_{part} können aufgrund der Linearität von (12) durch Einsetzen der Terme aus (14) in (12) einzeln bestimmt werden. Um sicherzustellen, dass mit F_{hom} die Randbedingungen erfüllt werden, benötigt man Ableitungen der Parametrierung der Ränder.

Deshalb ist es zweckmäßig, die Ränder der Walztafel mit Polynomen zu parametrieren, was in Abb. 8 dargestellt ist. Aufgrund der Schätzung auf einem bewegten Horizont ist das Ergebnis der Konturschätzung aus Abschn. 2 eine Polynomschar. Jedes dieser Polynome ist für einen bestimmten Bereich der Walztafelkante gültig. Um die notwendige Parametrierung der Kante anhand eines einzelnen Polynoms zu erhalten, werden die einzelnen Polynome der Schar an äquidistanten Punkten ausgewertet. Aus den Funktionswerten an diesen Stellen erhält man mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die Parametrierung anhand des Randpolynoms.

3.3 Validierung des mathematischen Modells der Konturentwicklung

Zur Validierung des mathematischen Modells der Konturentwicklung werden für die Walztafel aus Abschn. 2.4 die gemessene und die simulierte Kontur verglichen. Dazu sind das Einlauf- und Auslauf-dickenprofil der Walztafel für den zu simulierenden Stich notwendig.

An der betrachteten Anlage ist nach dem Reversiergerüst eine Dickenmessanlage (DMA) zur Kontrolle der erzielten Dicken der Walztafeln installiert. Eine Messung kann deshalb nur bei jedem zweiten Stich erfolgen. Daher wird die Konturentwicklung über zwei Stiche hinweg betrachtet. Die Dicke wird an den Punkten $x \in \{-1.3, 0, 1.3\}$ m quer zur Walzrichtung gemessen, woraus sich drei Dickenprofile in Längsrichtung ergeben.

Die Messspuren der Einlauf- und Auslaufdicke der betrachteten Stiche 29 und 30 sind in Abb. 9 dargestellt. Für die Berechnung finden die Parameter aus [10] Anwendung. Die Bestimmung der Polynomkoeffizienten in (14) erfolgt anhand der Methode der kleinsten

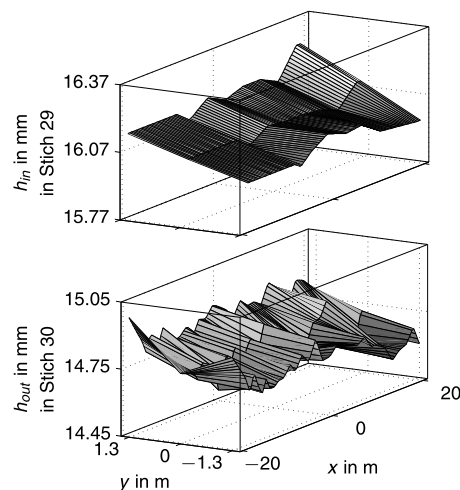


Abb. 9. Gemessene Einlauf- und Auslaufdicke

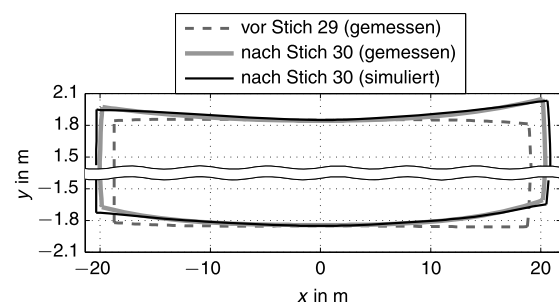


Abb. 10. Gemessene und simulierte Kontur der Walztafel

Fehlerquadrate. Ein Vergleich zwischen der gemessenen und der simulierten Kontur der betrachteten Walztafel ist anhand von Abb. 10 möglich.

Hierbei lässt sich eine gute Übereinstimmung im verwertbaren mittleren Bereich der Walztafel feststellen. Am später wegzuschneidenden Kopf- und Fußende zeigen sich tolerierbare Abweichungen.

4. Reduktion vorhandener Konturfehler

Die in Abschn. 2 und 3 vorgestellten Verfahren werden in diesem Abschnitt zu einem optimierungsbasierten Ansatz zur Reduktion vorhandener Konturfehler vereint. Dazu wird die Kontur nach einem Stich mittels des vorgestellten Konturschätzers ermittelt. Anhand dieser Kontur wird unter Zuhilfenahme des mathematischen Modells der Konturentwicklung die notwendige Anstellung des Gerüsts für den nächsten Stich zur optimalen Beseitigung eines vorhandenen Säbels berechnet.

4.1 Parametrierung der Ein- und Auslaufdicke

Die Regelung des Walzspaltes am Fertigerüst erfolgt über die Anstellzylinder (siehe Abb. 2) und wird auch als AGC-Regelung (automatic gauge control) bezeichnet, siehe z. B. [5]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der vorgegebene Sollverlauf des Walzspaltes exakt vom Gerüst umgesetzt wird. Das verwendete Automatisierungssystem erlaubt die Vorgabe der mittleren Dicke, der Asymmetrie und der Bombierung des Querprofils an Stützstellen entlang der Walztafellänge. Zwischen den Stützstellen erfolgt eine lineare Interpolation.

Zweckmäßigerweise wird das Auslaufdickenprofil daher in der Form

$$h_{out}(x, y) = \bar{h}_i^{out} + \frac{\bar{h}_{i+1}^{out} - \bar{h}_i^{out}}{x_{i+1} - x_i}(x - x_i) + y \left[\Delta h_i^{out} + \frac{\Delta h_{i+1}^{out} - \Delta h_i^{out}}{x_{i+1} - x_i}(x - x_i) \right], \quad x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad (15)$$

mit den Stützstellen x_i , $i = 1, \dots, N_P$ angesetzt. Der Verlauf der Mittendicke $h_{out}(x, 0)$ kann durch die Wahl der Stützwerte $\bar{h}_i^{out}$ bzw. die Asymmetrie durch die Wahl von Δh_i^{out} beeinflusst werden. Der Verlauf der Bombierung ist in (15) unberücksichtigt, da diese keine Auswirkung auf die Säbelbildung hat. Analog zur Auslaufdicke ergibt sich die Einlaufdicke gemäß (15) unter Verwendung der Stützwerte $\bar{h}_i^{in}$ und Δh_i^{in} .

4.2 Approximation der plastischen Dehnung

Das mathematische Modell der Konturentwicklung aus Abschn. 3 benötigt als eine der Eingangsgrößen die im Walzspalt aufgebrauchte plastische Dehnung ϵ_{xx}^p in der polynomialen Formulierung (14). Daher muss die wirkliche plastische Dehnung ϵ_{xx}^p gemäß (4) und (15) durch ein zweidimensionales Polynom approximiert werden. Hierzu wird gefordert, dass das gewichtete Residuum

$$\mathcal{R} = \left(\frac{h_{in}(x, y)}{h_{out}(x, y)} - 1 \right) - \underbrace{\sum_{i=0}^{P_x} \sum_{k=0}^{P_y} c_{i,k} x^i y^k}_{\mathbf{w}^T(x, y) \mathbf{c}} \quad (16)$$

im integralen Sinne identisch null ist, d. h.

$$\iint_{\Omega} \lambda(x, y) \mathcal{R} \, dx \, dy = 0. \quad (17)$$

Dabei wird das Flächenintegral über die in Abb. 8 dargestellte Fläche Ω mit der Gewichtungsfunktion $\lambda(x, y)$ gebildet. Im Vektor $\mathbf{c}$ sind die Koeffizienten $c_{i,k}$ und im Vektor der Ansatzfunktionen $\mathbf{w}(x, y)$ die zugehörigen Terme $x^i y^k$ angeordnet. Nun wird gefordert, dass (17) unter Verwendung jeder in $\mathbf{w}(x, y)$ enthaltenen Ansatzfunktion als Gewichtungsfunktion $\lambda(x, y)$ erfüllt ist.

Aus diesem Ansatz resultiert das lineare Gleichungssystem

$$\mathbf{A} \mathbf{c} = \mathbf{b}, \quad (18)$$

aus dem der Koeffizientenvektor $\mathbf{c}$ bestimmt wird. Die Koeffizientenmatrix berechnet sich zu

$$\mathbf{A} = \iint_{\Omega} \mathbf{w} \mathbf{w}^T \, dx \, dy \quad (19)$$

und der Lastvektor ergibt sich in der Form

$$\mathbf{b} = \iint_{\Omega} \left(\frac{h_{in}(x, y)}{h_{out}(x, y)} - 1 \right) \mathbf{w} \, dx \, dy. \quad (20)$$

4.3 Optimale Korrektur vorhandener Konturfehler

Im Folgenden soll die Asymmetrie der Auslaufdicke Δh_i^{out} , $i = 1, \dots, N_P + 1$ zur Korrektur von Konturfehlern herangezogen werden. Des Weiteren gilt es die Stützwerte $\bar{h}_i^{out}$ in (15) zu wählen. Die produzierten Walztafeln unterliegen engen Toleranzen bezüglich der mittleren Dicke. Daher ist es naheliegend, eine konstante Mittendicke in Walztafellausrichtung vorzugeben und entsprechend der Solldicke $\bar{h}_i^{out} = h_{des}^{out}$ zu wählen. Das Einlaufdickenprofil $h_{in}(x, y)$ wird als bekannt vorausgesetzt.

Die Grundidee zur Korrektur vorhandener Konturfehler besteht nun darin, die Stützwerte Δh_i^{out} so zu berechnen, dass die simulierte Kontur möglichst gut mit einer vorgegebenen Sollkontur übereinstimmt. Im Allgemeinen ist diese Sollkontur ein Rechteck. Als Maß

Tab. 1. In der Simulation verwendete Parameter

Parameter	Wert
P_x	20
P_y	4
N_P	14
N_{PB}	4
N_{CL}	100

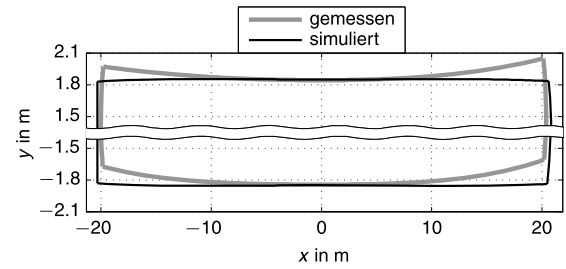


Abb. 11. Gemessene Kontur ohne Korrektur und simulierte Kontur unter Anwendung der optimalen Korrektur von Konturfehlern

für die Konturentwicklung wird eine virtuelle Mittellinie der Walztafel berechnet. Diese ergibt sich aufgrund der Parametrierung der Ränder (siehe Abb. 8) in der Form

$$\delta(x) = \frac{\rho_{B1}(x) + \rho_{B3}(x)}{2}, \quad (21)$$

mit den Polynomen $\rho_{B1}(x)$ und $\rho_{B3}(x)$ der Längsränder vom Grad N_{PB} .

Zur Prädiktion der Kontur wird das mathematische Modell aus Abschn. 3 herangezogen. Die optimale Korrektur kann anhand des Optimierungsproblems

$$\min_{\Delta \mathbf{h} \in \mathbb{R}^{N_P+1}} \sum_{k=1}^{N_{CL}} (\delta_{sim}(x_k) - \delta_{des}(x_k))^2, \quad (22)$$

mit der präzidierten Mittellinie δ_{sim} und dem Sollverlauf der Mittellinie δ_{des} gefunden werden. Als Optimierungsvariable dient der Vektor $\Delta \mathbf{h} = [\Delta h_1^{out} \, \Delta h_2^{out} \, \dots \, \Delta h_{N_P+1}^{out}]^T$ (vgl. (15)) und es werden N_{CL} äquidistant verteilte Punkte der Mittellinie verwendet. Das statische Optimierungsproblem (22) lässt sich unter Zuhilfenahme numerischer Methoden lösen, siehe z. B. [8]. Für das vorliegende Problem wird das Gauß-Newton Verfahren herangezogen, da dieses eine gute Konvergenz bei moderatem Berechnungsaufwand aufweist und dadurch kurze Optimierungszeiten erzielt werden können.

4.4 Simulationsergebnisse

Im Folgenden soll untersucht werden, welche Asymmetrie in den Stichen 29 und 30 auf die Walztafel aus Abschn. 3.3 aufgebracht hätte werden müssen, um eine gerade Mittellinie (d. h. $\delta_{des} = 0$) des Endproduktes mit Solldicke $h_{des}^{out} = 14.8$ mm zu erzeugen. Aufgrund der fehlenden Messungen der Dicke und der Kontur nach Stich 29 werden die Umformvorgänge der Stiche 29 und 30 als einzelner Stich angesehen. Die in den folgenden Berechnungen verwendeten Parameter sind in Tab. 1 aufgelistet.

Die gemessene Kontur und die durch Anwendung der optimierungsbasierten Korrektur in der Simulation berechnete Kontur nach Stich 30 sind in Abb. 11 dargestellt. Hierbei kann (laut Simulation) eine nahezu vollständige Korrektur des Formfehlers erreicht werden.

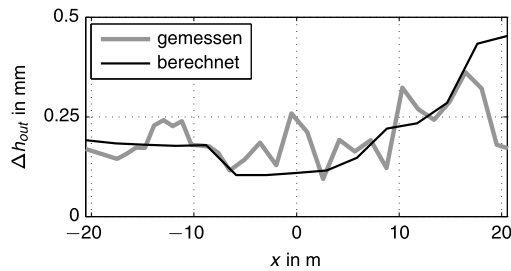


Abb. 12. Gemessene und durch die Optimierung bestimmte absolute Asymmetrie der Auslaufdicke für $b = 3.7$ m

Von Interesse ist die dazu notwendige Dickenasymmetrie der Walztafel. Ein hierbei gebräuchliches Maß stellt die absolute Asymmetrie der Auslaufdicke

$$\begin{aligned}\Delta h_{out}(x) &= h_{out}(x, b/2) - h_{out}(x, -b/2) \\ &= b \left[\Delta h_i^{out} + \frac{\Delta h_{i+1}^{out} - \Delta h_i^{out}}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i) \right], \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}\end{aligned}\quad (23)$$

unter der Verwendung der Walztafelbreite b dar. In Abb. 12 ist die zur Erzielung einer geraden Mittellinie notwendige absolute Asymmetrie für die betrachtete Walztafel dargestellt. Zu Vergleichszwecken ist auch die gemessene Asymmetrie nach dem betrachteten Stich abgebildet. Da die gemessenen Dickenprofile nicht am Rand der Walztafel liegen, muss zur Bestimmung der gemessenen absoluten Asymmetrie eine Extrapolation erfolgen. D. h. die absolute Asymmetrie wird für die Breitenkoordinate der Messspuren berechnet und entsprechend der wirklichen Breite der Walztafel skaliert.

Das Bild zeigt, dass nur eine geringfügige Änderung der Dickenasymmetrie für die Erzielung der gewünschten Konturform notwendig gewesen wäre. Daraus lässt sich ableiten, dass die Sensitivität der Kontur bezüglich der Dickenasymmetrie groß ist, insbesondere für lange und dünne Walztafeln.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur optimalen Korrektur von Formfehlern beim reversierenden Warmwalzen vorgestellt. Zu Beginn wurde ein existierendes Verfahren für die Messung der Walztafelkontur beschrieben. Dabei werden mehrere aufeinanderfolgende Thermografiebilder der Walztafel zur systematischen Schätzung der Kontur und der Bewegung der Walztafel herangezogen. Eine Validierung anhand von Messdaten demonstriert die erzielbare Genauigkeit der Konturschätzung. Anschließend wurde ein mathematisches Modell der Konturentwicklung beim Warmwalzen präsentiert. Es ermöglicht die Prädiktion der Kontur nach einem Stich anhand der Einlauf- und Auslaufdicke und der Kontur vor dem Stich. Der Vergleich von Messungen mit Simulationsergebnissen für eine Walztafel zeigt eine gute Übereinstimmung. Die präsentierte Variante zur Konturschätzung und das Modell der Konturentwicklung wurden anschließend in einem optimierungsbasierten Ansatz zur Berechnung der notwendigen Asymmetrie für die Beseitigung vorhandener Konturfehler genutzt.

Die vorgestellte Methode zur Schätzung der Kontur einer Walztafel ermöglicht eine präzise Bestimmung der Walztafelkontur. Durch das mathematische Modell der Konturentwicklung kann eine genaue Abbildung der Verhältnisse im Walzspalt im Hinblick auf die resultierende Kontur erreicht werden. Deshalb stellt die Kombination der Konturschätzung und des Modells zur Säbelbildung einen vielversprechenden Ansatz zur Beseitigung vorhandener Säbel dar. Weiterführende Schritte sind die Erweiterung des Optimierungsproblems zur gezielten Berücksichtigung von Systembeschränkungen, wie zum Beispiel der maximal erlaubten Asymmetrie oder der zulässigen Änderungsrate der Gerüstanstellung. Die Implementierung und Inbetriebnahme der gezeigten Verfahren am betrachteten Walzgerüst sind Gegenstand gegenwärtiger Arbeiten.

Danksagung

Der zweite Autor dankt der Österreichischen Akademie der Wissenschaften für die finanzielle Unterstützung in Form eines APART-Stipendiums am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität Wien. Die Autoren danken der AG der Dillinger Hüttenwerke für die finanzielle Unterstützung und die Bereitstellung von Messdaten.

Literatur

- Biggs, D. L., Hardy, S. J., Brown, K. J. (1998): Finite element modelling of camber development during hot rolling of strip steel. *Ironmak. Steelmak.*, 25(1), 81–89.
- Canny, J. (1986): A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 8, 679–698.
- Dixon, A., Yuen, D. (2013): Mathematical analysis of the effects of width-wise asymmetric rolling conditions on head-end wedge, camber and off-centre. In *Rolling 2013 – 9th int. rolling conference and the 6th European rolling conference*, Venedig, Italien.
- Ishikawa, T., Tozawa, Y., Nishizawa, J. (1988): Fundamental study on snaking in strip rolling. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 28(6), 485–490.
- Kugi, A., Haas, W., Schlacher, K., Aistleitner, K., Frank, H. M., Rigler, W. (2000): Active compensation of roll eccentricity in rolling Mills. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 36(2), 625–632.
- Montague, R. J., Watton, J., Brown, K. J. (2005): A machine vision measurement of slab camber in hot strip rolling. *J. Mater. Process. Technol.*, 168, 172–180.
- Nilsson, A. (1998): FE simulations of camber in hot strip rolling. *J. Mater. Process. Technol.*, 80–81, 325–329.
- Nocedal, J., Wright, S. J. (2006): Numerical optimization. New York: Springer.
- Sadd, M. H. (2009): Elasticity, theory, applications and numerics. Burlington: Academic Press.
- Schausberger, F., Steinboeck, A., Kugi, A. (2015): Mathematical modeling of the contour evolution of heavy plates in hot rolling. *Appl. Math. Model.*, 39, 4534–4547.
- Schausberger, F., Steinboeck, A., Kugi, A. (2015): Optimization-based estimator for the contour and movement of heavy plates in hot rolling. *J. Process Control*, 29, 23–32.
- Shiraishi, T., Ibata, H., Mizuta, A., Nomura, S., Yoneda, E., Hirata, K. (1991): Relation between camber and wedge in flat rolling under restrictions of lateral movement. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 31(6), 583–587.
- Tanaka, Y., Omori, K., Miyake, T., Nishizaki, K., Inoue, M., Tezuka, S. (1987): Camber control techniques in plate rolling. Technischer Report, Kawasaki Steel, URL: http://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/ksc_giho/no.16/e16-012-020.pdf. (Stand: 23.02.2015).
- Trull, M., McDonald, D., Richardson, A., Farrugia, D. C. J. (2006): Advanced finite element modelling of plate rolling operations. *J. Mater. Process. Technol.*, 177, 513–516.
- Yoo, J. W., Kong, N. W., Song, J., Park, P. G. (2010): Camber detection algorithm using the image stitching technique in hot-rolling process. In *International conference robotics*, Phuket, Thailand (S. 74–77).

Autoren

**Florian Schausberger**

schloss 2011 das Diplomstudium Mechatronik an der Johannes Kepler Universität in Linz ab. Seit 2012 ist er Projektassistent am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der TU Wien. Seine Forschungsinteressen umfassen die physikalische Modellierung nichtlinearer Systeme und den optimierungsbasierten Beobachter- und Reglerentwurf mit Fokus auf Walzwerksautomatisierung.

**Andreas Steinboeck**

schloss im Jahr 2005 das Masterstudium Mechatronics an der Loughborough University, Loughborough (UK) ab, im Jahr 2007 das Diplomstudium Mechatronik an der Johannes Kepler Universität Linz und im Jahr 2011 das Doktoratsstudium an der TU Wien. Seit 2007 ist er Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der TU Wien. Seit 2013 ist er APART-

Stipendiat der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Seine Forschungsinteressen umfassen numerische Methoden, mechanische Strukturen, Stabilitätsanalyse, Modellierung, Identifikation, Optimierung und Regelung von nichtlinearen dynamischen Systemen sowie Anwendungen bei kontinuierlichen Produktionsprozessen und in der Walzwerks- und Stahlindustrie.

**Andreas Kugi**

schloss 1992 das Studium der Elektrotechnik an der TU Graz ab, promovierte 1995 und habilitierte sich im Jahr 2000 für das Fach Regelungstechnik und Regelungstheorie an der Johannes Kepler Universität Linz. Von 2002 bis 2007 war er Ordinarius für Systemtheorie und Regelungstechnik an der Universität des Saarlandes und seit Juni 2007 ist er Professor für Komplexe Dynamische Systeme an der TU

Wien sowie Vorstand des Instituts für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN).

Neben zahlreichen weiteren Aktivitäten in Wissenschaft und Forschung ist Andreas Kugi wirkliches Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Editor-in-Chief des IFAC Journals Control Engineering Practice, Mitglied der Fachkommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie im Vorstand des OVE. Seine Hauptarbeitsgebiete umfassen die Modellierung, Simulation, Analyse, Optimierung und Regelung nichtlinearer sowie verteilt-parametrischer komplexer dynamischer Systeme mit Anwendungen in der hydraulischen, pneumatischen und elektrischen Aktorik, der Automobilindustrie, der Walzwerks- und Stahlindustrie sowie für formveränderliche Strukturen und mikromechanische Systeme.