## Regelung der Oberflächenrauheit im Nachwalzen auf Basis datengetriebener Modelle

C. Schulte\*<sup>1</sup>, X. Li<sup>2</sup>, D. Abel<sup>1</sup>, G. Hirt<sup>2</sup>

#### Abstract

Um den steigenden Anforderungen der Stahloberflächen beim Kaltwalzen nachzukommen, werden neue modellbasierte und datengestützte Regelungskonzepte benötigt. Hierzu werden zwei nichtlineare, online-lernfähige Prozessmodelle eingeführt, die die Gerüstauffederung und das Abprägeverhalten der rauen Arbeitswalzen beschreiben sollen. In einem abschließenden Walz-Experiment konnte die robuste Modellidentifikation, Störgrößenkompensation und hervorragende Trajektorienfolge nachgewiesen werden.

#### *Control of Surface Roughness in Temper Rolling based on Data-driven Models*

To meet the rising requirements of steel surfaces during cold rolling, new model-based and data-driven control strategies are needed. For this purpose, two nonlinear, online-learning process models are introduced to describe the stand deflection and the imprinting characteristics of the rough work rolls. In a final rolling experiment the robust model identification, disturbance compensation and excellent trajectory tracking could be demonstrated.

#### 1 Einleitung

Die Anforderungen an hochwertige, kaltgewalzte Metallbänder gehen über eine hohe geometrische Genauigkeit und hervorragende mechanische Eigenschaften hinaus. Eine der wichtigsten Eigenschaften des Bandes ist dabei die Oberflächenrauheit, welche die späteren Produkteigenschaften maßgeblich bestimmt. So korreliert die Oberflächenrauheit beispielsweise mit den tribologischen Charakteristika während der Blechumformung [1] oder dem resultierenden Lackglanz [2]. Zwecks Einstellung der Oberflächenrauheit wird das konventionelle Kaltwalzen um den Prozessschritt des Nachwalzens erweitert. Hierbei kommen texturierte Arbeitswalzen zur Abprägung des gewünschten Rauheitsprofils zum Einsatz. Im Gegensatz zu den vorherigen Umformschritten werden nur geringe Walzkräfte aufgebracht, die zu Nichtlinearitäten im Walzgerüst führen können.

Der Abprägegrad charakterisiert die Effizienz der Abprägung und erreicht 100 %, wenn die Rauheit des auslaufenden Bandes mit der Walzenrauheit übereinstimmt. Das Abprägeverhalten zwischen Walze und Band ist dabei von einer Vielzahl unterschiedlicher Prozessparameter abhängig, die zudem in Wechselwirkung zueinanderstehen: z.B. die Spitzdruckspannung im Walzspalt [2], der Walzendurchmesser [3] oder die Schmierung [4]. Aus der industriellen Praxis ist bekannt, dass ein höherer Bandzug beim Nachwalzen

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Institut für Regelungstechnik (IRT) der RWTH Aachen University, Aachen

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der RWTH Aachen, Aachen

zu einer geringeren Abprägung führt [5]. Der Effekt wurde in eigenen Vorarbeiten auf Basis Finite-Elemente-Simulationen (FE-Simulation) bestätigt [6]. Neben dem Einsatz eines Tandem-Walzwerks [7] stellt der Bandzug daher eine alternative Stellgröße dar, welche zur Einstellung der Oberflächenrauheit genutzt werden kann. Vorteilhaft ist zudem, dass eine Manipulation des Bandzuges keine zusätzliche Höhenabnahme im Prozess benötigt, wie es bei einer Stichplanoptimierung zweier Walzgerüste der Fall ist [7].

Um den Verschleiß der Arbeitswalzen auszugleichen, ist eine Regelung der Bandrauheit nötig. Zur Überwachung der Rauheit im Prozess werden in der Literatur modellbasierte Ansätze vorgestellt, um die Notwendigkeit eines dedizierten Sensors zu umgehen. Dabei können zwei Verfahren zur Modellsynthese unterschieden werden. Einerseits wurden heuristische Abprägemodelle entwickelt, welche offline auf Basis von Messungen eines taktilen Rauheitssensors [7] oder eines Mikroskops [8] bestimmt wurden. Andererseits kommen FE-Simulationen zum Einsatz, welche die Oberflächenrauheit auf Basis der Arbeitswalzenrauheit, Walzenradius und Walzkraft im Walzenspalt vorhersagen, vgl. [7, 9, 10]. In [7] dient die prädizierte Walzkraft einer unterlagerten Walzkraftregelung als Führungsgröße. Als Stellgröße werden die Walzspalthöhen zweier aufeinanderfolgender Walzgerüste genutzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenrauheit Ra in 65 % der Zeit in einem Toleranzband von  $\pm 0.05 \,\mu\text{m}$  um die Referenz von 0.42  $\mu\text{m}$  liegt. Bozhkov et al. [9] konnten durch die Verwendung einer rechenintensiven, modellbasierten Prädiktion der Mittenrauheit Ra einen mittleren Rauheitsfehler von 7 % erreichen. Alle vorgestellten Ansätze haben jedoch den Nachteil, dass die Messung der Rauheit lediglich zur Offline-Modellidentifikation bestimmt wird. Eine Online-Messung und Rückführung im Kontext eines Steuerungssystems erfolgt nicht. Somit ist das Steuerungssystem nicht in der Lage, auf Prozessstörungen oder den Verschleiß der Arbeitswalzen zu reagieren, welche eine Adaption der identifizierten Modelle erfordern.

#### Prozess:

Betrachtet wird eine Walzanlage mit einem Walzgerüst, die in <u>Bild 1</u> dargestellt ist. Im Prozess wird ein dünnes, langes Stahlband durch zwei Arbeitswalzen umgeformt, um die Banddicke zu reduzieren. Als Nachwalzen wird dabei der letzte Kaltumformschritt bezeichnet, der den größten Einfluss auf die Oberflächenqualität hat.



**<u>Bild 1:</u>** Walzanlage mit Dicken-, Breiten- Kraft- und Rauheitssensoren, sowie Drehgeber für die Geschwindigkeitsmessung, vgl. [11]

Das verwendete Walzenpaar wurde zuvor mittels Sandstrahlen so behandelt, dass sie eine definierte Oberflächenmittenrauheit besitzt. Im Prozess werden die Banddicke und –breite vor und hinter dem Gerüst aufgezeichnet. Zusätzlich sind Drehgeber im Messaufbau integriert, welche die Bandgeschwindigkeit am Einlauf  $v_0$  und Ausgang  $v_1$  aufzeichnet. Am Ausgang des Prozesses ist ein kontaktloser Rauheitssensor der Firma AMEPA, Würselen, Deutschland positioniert, der  $l_2 = 1$  m vom Prozess entfernt ist. Auch die Messung der Bandgeometrie hat eine räumliche Trennung zum Walzgerüst. So wird die einlaufende Geometrie um  $t_0 = l_0/v_0$  zu früh und die auslaufende Geometrie um  $t_1 = l_1/v_1$  verspätet gemessen.

Der Umformprozess wird über drei Modelle beschrieben. Materialseitig ist die nötige Walzkraft *F* mithilfe des Walzmodells zu beschreiben, die aus der einlaufenden und auslaufenden Banddicke  $h_0$  bzw.  $h_1$ , sowie der Bandbreite *w* und den Materialeigenschaften  $\Theta_s$  resultiert. Für weitere Informationen zum Walzmodell wird auf [11-13] verwiesen:

$$F = f(h_0, w, h_1, \boldsymbol{\Theta}_{\mathrm{S}})$$

(1)

Der Walzspalt federt durch die Walzkraft *F* auf, wodurch der Abstand zwischen den Arbeitswalzen *s* im belasteten Fall  $\hat{s} > s$  größer wird. Diese Wirkung wird durch das Gerüstmodell beschrieben und ist schematisch in <u>Bild 2</u> dargestellt. Unter Vernachlässigung der elastischen Auffederung des Materials im Auslauf kann angenommen werden, dass der Abstand der Arbeitswalzen im belasteten Zustand  $\hat{s}$  gleich der auslaufenden Banddicke  $h_1$  ist. Die Gerüstkennlinie beschreibt dabei die Gerüstauffederung  $\Delta s$  als Funktion der Walzkraft *F*, siehe Kapitel 2.1:

$$\Delta s = \hat{s} - s = f(F, \Theta_M)$$
(2)
$$h_0 = f(F, \Theta_M) = h_0 = h_0 = h_0 = h_0$$
(3)
$$h_0 = h_0 = h_0 = h_0 = h_0$$
(4)
$$h_0 = h_0 = h_0 = h_0$$
(5)
$$h_0 = h_0 = h_0$$
(6)
$$H_1 \approx \hat{s}$$
(7)
$$H_1 \approx \hat{s}$$
(7)
$$H_1 \approx \hat{s}$$
(8)
$$H_1 \approx \hat{s}$$
(9)
$$H_1 \approx \hat{s}$$

**Bild 2:** Auffederung des Walzgerüsts durch die Walzkraft *F*, vgl. [12].

Schließlich ist ein Modell erforderlich, welches das Abprägeverhalten der rauen Walzenoberfläche auf das Metallband beschreibt. Untersuchungen zeigen, dass sowohl die Walzkraft *F*, die einlaufende Bandbreite *w* als auch Prozessparameter  $\Theta_{I}$  einen Einfluss auf die Rauheitsübertragung haben [13]. Bei weiteren Prozessgrößen, wie dem Bandzug oder der Zustelldynamiken ist es ausreichend, den Einfluss indirekt über die Änderung der Walzkraft *F* zu betrachten, siehe Kapitel 2.2:

$$Ra = f(F, w, \boldsymbol{\Theta}_{\mathrm{I}}) \tag{3}$$

#### Regelkonzept:

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein neues Regelungskonzept vorgestellt, welches einen berührungslosen Rauheitssensor [14] sowie eine modellbasierte Regelung basierend auf den drei vorgestellten Prozessmodellen (<u>Gleichung 1 bis 3</u> umfasst, siehe <u>Bild 3</u>.

Im Unterschied zum Stand der Technik werden die verwendeten Prozessmodelle Online durch die Rückführung synchronisierter Messdaten adaptiert. Die Regelung auf datengetriebenen Modellen erlaubt es im Speziellen, auf Störungen oder Alterungseffekte der Walze zu reagieren. Die verwendete Walzanlage verfügt hierzu über eine hochpräzise Geometriemessung sowie eine piezoelektronische Walzspaltansteuerung. Letztere erlaubt zusammen mit einem konventionellen Spindelantrieb die hochdynamische Zustellung des Walzspalts im Submikrometerbereich.



**<u>Bild 3:</u>** Reglerstruktur der Rauheitsregelung basierend auf drei Prozessmodellen (Abpräge-, Walz- und Gerüstmodell) vgl. [13]

#### Vorausgehende Arbeiten:

Dieser Beitrag baut auf einer hochpräzisen Regelung zur Einstellung vordefinierter Dickenreferenzen beim Kaltwalzen auf [11, 15]. Wehr et al. [11] entwickelten einen Regelalgorithmus, der eine hochpräzise Regelung der Banddicke ermöglicht, indem sie ein nichtlineares Walzmodell des Kaltwalzprozesses mit einem linearen Gerüstmodell kombinierten. Das nichtlineare Walzmodell wurde mithilfe der Gaußschen Prozessregression ermittelt und Onlineadaptiert. Als initiale Schätzung (Prior) wird ein Walzkraftmodell nach Alexander [16] verwendet, dessen Prozessparameter offline identifiziert wurden. Um den Kalibrierungsaufwand nach dem Umbau des Walzgerüstes zu reduzieren und um auf Prozessänderungen reagieren zu können, wurde eine Parameteridentifikation mithilfe eines rekursiven Least-Squares-Algorithmus (RLS) umgesetzt. Dennoch ist das vorgestellte lineare Gerüstmodell nicht für kleine Höhenabnahmen geeignet, wie sie beim Nachwalzen üblich sind. Des Weiteren ist die RLS anfällig für Mess- und Synchronisationsfehler.

Um eine Prädiktion der Gerüstauffederung bei kleinen Umformkräften zu ermöglichen und um unabhängig von Mess- und Synchronisationsfehlern zu sein, wird in diesem Beitrag ein nichtlineares Gerüstmodell präsentiert, welches durch die Kombination des Iteratively Reweighted Least-Squares (IRLS)-Verfahren und der Gauß-Prozess-Regression (GPR) berechnet wird. Dies ermöglicht eine robuste Prädiktion der Gerüstauffederung unabhängig von Mess- und Synchronisationsfehlern.

Zweiter zentraler Aspekt dieses Beitrags ist das Abprägemodell, welches den Zusammenhang zwischen der entstehenden Bandrauheit Ra und der Walzkraft im Walzspalt beschreibt und zur Regelung der Oberflächenrauheit benötigt wird. Hierzu wird die Finite-Elemente-Methode verwendet, um die notwendige Struktur und initiale Parameter des Abprägemodells zu ermitteln. Damit der Verschleiß der Arbeitswalze kompensiert werden kann, wird das Abprägemodell zur Laufzeit adaptiert. Hierzu werden die Messdaten Online synchronisiert, um die räumliche Trennung zwischen Mess- und Prozessort zu kompensieren. Zusätzlich werden die Daten phasenverzugsfrei gefiltert und es wird eine Datenvorauswahl umgesetzt, um die Echtzeitfähigkeit zu garantieren.

In Kapitel 2 werden das Prozessmodell für die Gerüstkennlinie und das Abprägemodell beim Nachwalzen vorgestellt. Anschließend wird das Vorgehen zur Online-Identifikation der beiden Prozessmodelle vorgestellt. Schließlich wird die vorgestellte Rauheitsregelung experimentell an einer Walzanlage validiert, siehe Abschnitt 4.

#### 2 Prozessmodellierung und Regelung

#### 2.1 Gerüstkennlinie

Diese Ausführungen folgen Vorarbeiten, die in [17] veröffentlicht wurden. Um die Gerüstkennlinie auch bei kleinen Umformkräften abzubilden, wurde ein heuristisches Modell (siehe <u>Gleichung</u> 4) entwickelt, welches das progressive Verhalten abbildet. Die ermittelte Funktion besteht aus drei Abschnitten, welche die Gerüstkennlinie beschreiben sollen. Zuerst einen konstanten Abschnitt (F = konst.), der den Walzspalt im geöffneten Zustand ohne Kontakt der Walzen mit dem Material abbildet. Als zweites wird ein polynomialer Verlauf gefittet, der den Übergang zwischen dem konstanten und der anschließenden linearen Regressionsgrade beschreibt, wodurch das progressive Verhalten des Walzgerüsts abgebildet werden kann. Der lineare Anteil der Kennlinie setzt ab einer Grenzkraft  $F_{lim}$ ein und ist für die meisten Walzprozesse gültig. Für den Arbeitspunkt des Nachwalzens ist dies hingegen nicht immer erfüllt.

$$F = f_{\rm M}(\Delta s) = \begin{cases} F_{\rm calib} & \Delta s \le \Delta s_{\rm lim,1} \\ F_{\rm calib} + \Theta_c \cdot \left(\Delta s - \Delta s_{\rm lim,1}\right)^e & \text{ansonsten} \\ F_{\rm lim} + \Theta_m \cdot \left(\Delta s - \Delta s_{\rm lim,2}\right) & \Delta s \ge \Delta s_{\rm lim,2} \end{cases}$$
(4)

Die Gerüstkennlinie besitzt vier Parameter  $\Theta_M = \{F_{\text{lim}}, F_{\text{calib}}, \theta_{\text{m}}, e\}$ , die in Abhängigkeit des verwendeten Walzgerüsts zu bestimmen sind. Die Bedeu-

$$\Delta s_{\lim,1} = \left( (F_{\text{calib}} - F_{\text{lim}}) \cdot e + \theta_{\text{m}} \cdot \Delta s_{\lim,2} \right) \cdot \theta_{\text{m}}^{-1}$$
(5)

$$\Theta_c = -(F_{\text{calib}} - F_{\text{lim}}) \cdot \left(\Delta s_{\text{lim},2} - \Delta s_{\text{lim},1}\right)^{-e}$$
(6)

**Tabelle 1:**Anfangsparameter des initialen Gerüstmodells  $\boldsymbol{\Theta}_{M}$ , die im IRLS-<br/>Algorithmus verwendet werden, vgl. <u>Gleichung 4</u>

Variable	Wert	Beschreibung
F <sub>lim</sub>	15 kN	Grenzkraft für lineare Kennlinie
<i>F</i> <sub>calib</sub>	0,2 kN	Offsetkraft durch den Kalibriervorgang
$\theta_{ m m}$	128 kN mm <sup>-1</sup>	Gerüststeifigkeit
е	2,105	Grad der Nichtlinearität des Modells

#### 2.2 Abprägemodell

Diese Ausführungen folgen Vorarbeiten, die in [6, 13] veröffentlicht wurden. Die Abprägung wird durch ein datengetriebenes Metamodell (hier: Abprägemodell) beschrieben, welches auf das Ergebnis einer Reihe von FE-Simulationen des Nachwalzens basiert. Um die Abprägung beim Nachwalzen zu untersuchen, wird der Nachwalzprozess zuerst mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) modelliert. Wegen des extremen Skalenunterschieds wird eine Mehrskalenmodellierung eingesetzt, um einen zu hohen Rechen- und Zeitaufwand der Simulation zu vermeiden [6]. Wie in Bild 4 dargestellt, wird der Walzprozess mit Walzendurchmesser, Höhenabnahme und Bandzug auf der Makroebene vorgegeben. Die lokale Kinematik zwischen der Walze und dem Walzgut sowie der Spannungsverlauf im Walzspalt werden aus dem makroskopischen Modell extrahiert und als Randbedingung auf ein mesoskopische Modell angewendet. So kann die Oberflächenrauheit auf der mesoskopischen Skala modelliert und Ergebnisse der Abprägung extrahiert werden. Die FE-Modelle werden in Abaqus 6.12 mit einem selbst entwickelten Automatisierungsskript erstellt und anschließend simuliert.



### **<u>Bild 4:</u>** Konzept der Mehrskalenmodellierung mit relevanten Inputs und Outputs

Im isothermen rein mechanischen makroskopischen Modell wird nur der zentrale Bereich des Walzgutes in Querrichtung (TD) modelliert. Außerdem werden für den Walzvorgang ebene Formänderungen angenommen, sodass die die Breitung vernachlässigt und der Prozess in 2D abgebildet werden kann. Wie in <u>Bild 5</u> (links) dargestellt, wird nur die Hälfte des Prozesses modelliert und eine Symmetrieebene im Kern des Walzgutes eingeführt. Die Walze wird als starrer Körper definiert. Zur genauen Vorhersage der Walzkraft im FE-Modell ist die Abplattung der Walze zu berücksichtigen. Dies wird erreicht, indem der abgeplatteten Walzenradius R' im Voraus durch das analytische Walzmodell von Bland und Ford [18] geschätzt wird. Dieses berücksichtigt neben der Kaltverfestigung, auch die Walzenabplattung, den Bandzug sowie die elastischen Zonen am Ein- und Ausgang des Walzspalts. In der FE-Simulation wird anstelle des eigentlichen Walzradius ein individueller walzkraftabhängiger abgeplatteter Walzradius R' aus dem Bland&Ford-Modell verwendet. Die Bandzüge  $Z_0$  und  $Z_1$  am Ein- bzw. Auslauf werden durch die Aufbringung konzentrierter Kräfte auf Referenzpunkte modelliert, welche mit den jeweiligen Oberflächen der Band-Enden über eine Kontinuumsverteilung gekoppelt sind.



# **Bild 5:** makroskopisches Walzmodell mit Berücksichtigung der Bandzüge (links) und Aufbau des mesoskopischen Abprägemodells mit Randbedingungen (rechts)

Die Kinematik, d. h. die relative Bewegung von Punkten auf der Oberfläche der Arbeitswalze in der Umformzone, wird bestimmt und in eine relative Geschwindigkeit in Walzrichtung (WR)  $\Delta v_{WR}$ , eine absolute Geschwindigkeit in Normalrichtung (NR)  $v_{NR}$ , und den Drehwinkel  $\alpha$  umgerechnet. Zusätzlich wird die Entwicklung der Spannungskomponente in WR  $S_{WR}$  auf dem zentralen Element des Werkstückabschnitts extrahiert. Die Kinematik sowie die bestimmte Spannung werden als Randbedingungen im mesoskopischen Modell verwendet.

Die Abprägung wird mittels eines mesoskopischen Submodells bestimmt. Wie in <u>Bild 5</u> (rechts) dargestellt, wird das Band erneut mit der Annahme einer Symmetrieebene in der Bandmitte modelliert. Die einlaufende Oberfläche des Bandes (links) wird in WR fixiert. Die aus der makroskopischen Simulation erhaltene Spannung  $S_{WR}$  wird auf die auslaufende Oberfläche (rechts) angewendet. Die Mittenrauheit  $Ra_{Walze}$  und die Spitzenzahl  $RPc_{Walze}$  auf der Oberfläche der Arbeitswalze und auch des Walzguts vor dem Nachwalzen wurden jeweils durch eine Sinuskurve mit unterschiedlichen Amplituden und Wellenlängen modelliert. Nach der Simulation wird die resultierende Oberflächenrauheit Ra bestimmt.

Aus den Ergebnissen der Mehrskalensimulation für variierende Höhenabnahmen und Bandzüge wird die Korrelation zwischen Oberflächenrauheit des auslaufenden Bandes Ra und spezifischer Walzkraft F' = F/w ermittelt. Für die Verwendung innerhalb eines Reglers wird hierauf aufbauend ein initiales Abprägemodell bestimmt, das auf einer skalierten Sigmoidfunktion basiert. Neben der initialen Rauheit des Bandes  $Ra_0$  sowie der Rauheit der Arbeitswalze  $Ra_{Walze}$  geht auch die spezifische Walzkraft  $F'_{90}$ , bei der 90 % der Walzenrauheit eingeprägt werden als Prozessparameter  $\Theta_1$  in das Modell ein:

$$Ra = f(F, w, \boldsymbol{\Theta}_{I}) = Ra_{0} + \frac{1}{1 - e^{-x}} \cdot \frac{Ra_{Walze}}{Ra_{0}}$$
(7)

$$x = \left(\frac{9}{4} \frac{F}{w F'_{90}} - \frac{5}{4}\right) \cdot \ln(9)$$
(8)

<u>Gleichung 8</u> skaliert die spezifische Walzkraft  $F' \in [\frac{1}{9}F'_{90}, F'_{90}]$  linear zu  $x \in [-\log(9), \log(9)]$ , so dass  $\frac{1}{1-e^{-x}} \in [0,1,0,9]$  gilt. Die Parameter in <u>Tabelle 2</u> wurden anhand von Vorversuchen ermittelt.

Variable	Wert	Beschreibung
<i>Ra</i> <sub>Walze</sub>	3 µm	Oberflächenrauheit der Arbeitswalze
Ra <sub>0</sub>	0,5 μm	Oberflächenrauheit des einlaufenden Bandes
F' <sub>90</sub>	1,3 kN mm <sup>-1</sup>	spezifische Walzkraft für 90 %-ige Abprägung

**Tabelle 2:** Parameter  $\Theta_{I}$  des initialen Abprägemodells, siehe <u>Gleichung 7</u>

#### 3 Online-Identifikation der Prozessmodelle

Die zur Online-Adaption des Gerüst- und Abprägemodells verwendete Methodik muss nichtlineare Systeme identifizieren können und mit nicht-normalverteiltem Messrauschen (durch z.B. Ausreißer hervorgerufen) zurechtkommen. Bereits aus vorhergehenden Veröffentlichungen konnte gezeigt werden, dass hierzu eine Kombination aus Gauß-Prozess-Regression (GPR) und Iteratively Reweighted Least-Squares (IRLS) geeignet ist [17]. Detaillierte Ausführungen zur GPR finden sich beispielsweise in [17, 19]. Für ergänzende Informationen zur IRLS-Parameterschätzung sei auf [20, 21] verwiesen.

Da das erstellte Gerüstmodell  $f_M$  aus <u>Gleichung 4</u> streng monoton steigend und damit für  $F \in [F_{calib}, \infty]$  invertierbar ist, kann der Parameter  $\Delta s_{lim,2}$  (siehe <u>Gleichung 4</u>) über den IRLS-Algorithmus Online bestimmt werden. Der geschätzte Modellausgang *Y* entspricht dabei dem Fehler zwischen der gemessenen und der mittels des Modells geschätzten Gerüstauffederung:

$$Y = \Delta s_{\text{mess}} - \Delta s_{\text{modell}} = \Delta s - f_{\text{M}}^{-1}(F)$$
(9)

Der so identifizierte Parameter des IRLS-Algorithmus ist die Verschiebung der Kennlinie entlang der  $\Delta s$ -Achse  $\Delta s_{\lim,2}$ . Anschließend kann das identifizierte Modell als initiale Schätzung in der GPR verwendet werden, um eine gute Extrapolation der GPR bei geringer Datenpunkten sicherzustellen. Weiterhin kommt hinzu, dass der IRLS-Algorithmus Ausreißer im Vergleich zu anderen Messpunkten niedriger gewichtet. Diese Eigenschaft kann in der GPR genutzt werden, um jedem Messpunkt eine eigene Messunsicherheit zu

zuordnen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die GPR eine robuste Lösung ermittelt, die von Ausreißern unbeeinflusst ist.

Ein äquivalenter Ansatz wird zur Identifikation des Abprägemodells verwendet. Hierbei kann im ersten Schritt mithilfe der IRLS-Parameteridentifikation die Oberflächenrauheit der Arbeitswalze  $Ra_{Walze}$  und die Oberflächenrauheit des Bandes  $Ra_0$  identifiziert werden. Anschließend wird diese initiale Schätzung und die Messunsicherheit jedes Punktes der GPR zur Verfügung gestellt, äquivalent zur Schätzung der Gerüstkennlinie. Für weitere Informationen wird auf [13] verwiesen.

#### 4 Experimentelle Validierung der Rauheitsregelung

Experimentelle Ergebnisse der Gerüstkennlinienschätzung sind in <u>Bild 6</u> zu sehen. Zur unabhängigen Validierung des Gerüstmodells wurde ein Versuch zur Dickenregelung beim Nachwalzen durchgeführt. Im linken Diagramm sind die Ergebnisse dargestellt, in denen Höhenabnahmen zwischen 1 % und 4 % eingeregelt wurden. Die aufgezeichneten Messdaten wurden Online synchronisiert und phasenverzugsfrei gefiltert, um die Totzeiten im System zu kompensieren sowie den Einfluss von Messrauschen zu minimieren. Anschließend wurde eine Datenvorauswahl ausgeführt, welche die Messdaten basierend auf ihrem Neuheitswert und ihrer Relevanz vorsortiert, siehe [13]. Im rechten Diagramm ist die auf Basis der Messdaten sowie unter Verwendung von IRLS-Algorithmus und GPR geschätzte Gerüstkennlinie dargestellt. Ein Messfehler, der in beiden Diagrammen mit A gekennzeichnet wurde, konnte in der Identifikation erfolgreich unterdrückt werden. Insgesamt regressiert die gewonnene Kennlinie die Messpunkte mit einer mittleren Abweichung von 0,25 kN.



**<u>Bild 6:</u>** Experimentelle Validierung der mithilfe von IRLS und GPR Onlineidentifizierten Gerüstkennlinie, vgl. [17]

Die Validierung des Reglerkonzepts erfolgt an einer Dressierwalzanlage der Firma Bühler Redex GmbH, Pforzheim, Deutschland. Die Arbeitswalzen wurden mittels Sandstrahlen vorbehandelt, um eine initiale Rauheit von 3  $\mu$ m zu erhalten. Da die verwendete Arbeitswalze nicht gehärtet wurde, kommt es zu Verschleißprozessen, so dass die Mittenrauheit während des Experiments zwischen 2,5  $\mu$ m und 3  $\mu$ m lag. Als Walzband wurde die Kupferverbindung E-Cu58 mit einem Querschnitt von 10,1 mm × 1,55 mm verwendet.

Im Experiment wird eine stufenförmige Referenztrajektorie für die Ziel-Rauheit  $Ra_{soll}$  festgelegt, die Werte zwischen 1 µm und 3 µm einnehmen. Ziel ist der Nachweis der Steuerbarkeit in Hinsicht auf die Bandmittenrauheit. Hier zeigt sich die Wirksamkeit der Online-Modellidentifikation und der hochdynamischen Trajektorienfolge, da der modellbasierte Regler keine direkte Rückkopplung vom zeitverzögerten Rauheitssensor benötigt, um die Soll-Walzspalthöhe *s* zu berechnen.

In <u>Bild 6</u> (links) sind die Verläufe der gemessenen sowie vorgegebenen Bandmittenrauheit *Ra* bzw. *Ra*<sub>soll</sub> abgebildet. Zusätzlich sind die gemessene und die geschätzte Walzkraft *F* bzw. *F*<sub>est</sub> in der unteren Hälfte des Diagramms dargestellt. Zwecks einer besseren Einordnung der Ergebnisse, wurden alle dargestellten Signale basierend auf ihrer Sensorposition zur Bandlänge synchronisiert. Es ist zu sehen, dass die geschätzte Walzkraft für die ersten 3 m von der gemessenen Walzkraft abweicht. Dies liegt daran, dass das initiale Walz- und Gerüstmodell von der Realität abweicht. Nach 3 m gewalztem Band sind hingegen genügend Messpunkte für die Online-Identifikation verfügbar. Nach Adaption der Modelle ist entlang des restlichen Versuchs keine relevante Abweichung festzustellen. Jedoch verbleiben eine mittlere Abweichung der Rauheit *Ra* von 0,28 µm, welche auf das Messrauschen und einer Exzentrizität der Arbeitswalzen zurückzuführen sind [13].



**Bild 7:** Validierungsergebnisse der Rauheitsregelung und Online-Identifikation des Abprägemodells, vgl. [13]

Das zuletzt bestimmte Abprägemodell aus dem Experiment ist rechts in <u>Bild 7</u> dargestellt. Bemerkenswert ist, dass die Identifikation trotz des erheblichen Messrauschens eine vernünftige Repräsentation des Abprägemodells erreicht. Zum anderen ist ein Verschleiß der Arbeitswalzen zu beobachten, der sich in den reduzierten Mittenrauheiten bei hohen spezifischen Walzkräften  $F' > 1,5 \text{ kNmm}^{-1}$  niederschlägt. In Vorversuchen konnte hier eine Rauheit von 3 µm gemessen werden. Dies untermauert die Notwendigkeit einer Online-Identifikation und zeitvariablen Modellierung des Abprägeverhaltens. Abschließend seien die Ergebnisse ab einer Bandlänge von 13,5 m (grauschraffierter Bereich rechts) genauer betrachtet. Die vorgegebene Mittenrauheit von  $Ra_{soll} = 3 \mu m$  konnte hier aufgrund der verschlissenen Arbeitswalze

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurde ein Ansatz zur modellbasierten Regelung der Oberflächenrauheit vorgestellt, der Prozessstörungen wie Walzenverschleiß, Eigenschaftsänderungen des Materials oder fehlerhafte Gerüstkalibrierungen ausgleichen kann. Dafür wurden zwei Modellansätze für das Abpräge- bzw. des Gerüstverhaltens vorgestellt, die Online-identifiziert werden. Hierzu wurde eine Methodik verwendet, die die Vorteile einer robusten, linearen Parameterschätzung (IRLS) und einer nichtlinearen, probabilistischen Blackbox-Identifikation (GPR) kombiniert.

Abschließend wurden zwei Experimente an einer Walzanlage durchgeführt, um die Online-Identifikation zu validieren, wodurch die Stärken dieses Ansatzes; die Prozessüberwachung, die sehr gute Trajektorienfolgung und Störgrößenkompensation hervorkamen.

Weiterführend sollten Regelungskonzepte untersucht werden, in denen die Oberflächenrauheit bei konstanter Werkstückgeometrie geregelt werden kann. Als Erweiterung kann untersucht werden, ob es durch eine zeitvariante Identifikation des Abprägemodells möglich ist, den Verschleiß der Arbeitswalzen zu messen und den Zeitpunkt des Walzenwechsels vorherzusagen.

#### 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), die sie im Rahmen des Forschungsprojekts SPP2183 (Nr. 402694744) "Eigenschaftsgeregelte Umformprozesse" und dem Programm "Regelung der Oberflächenrauheit als Eigenschaft flachgewalzter Halbzeuge durch Entwicklung eines neuartigen Regelungskonzepts basierend auf Online-Messungen der Bandoberfläche" erhalten haben.

#### 7 Literatur

- W. C. Emmens, "The influence of surface roughness on friction," in Proceeding 15th Congress of International Deep Drawing Research Group (IDDRG), 1988, pp. 63–70
- [2] H. Kijima, "Influence of roll radius on contact condition and material deformation in skin-pass rolling of steel strip," Journal of Materials Processing Technology, vol. 213, no. 10, pp. 1764–1771, 2013
- [3] H. Kijima, "Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip," Journal of Materials Processing Technology, vol. 214, no. 5, pp. 1111–1119, 2014
- [4] B. Çolak and N. Kurgan, "An experimental investigation into roughness transfer in skin-pass rolling of steel strips," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 96, no. 9, pp. 3321–3330, 2018
- [5] O. Wiklund, F. Sandberg, and J. G. Lenard, "Modelling and control of temper rolling and skin pass rolling," Metal forming science and practice, pp. 313–343, 2002

- [6] X. Li, C. Schulte, D. Abel, M. Teller, G. Hirt, and J. Lohmar, "Modeling and exploiting the strip tension influence on surface imprinting during temper rolling of cold-rolled steel," Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, vol. 3, p. 100045, 2021, doi: 10.1016/j.aime.2021.100045
- [7] R. Li, Q. Zhang, X. Zhang, M. Yu, and B. Wang, "Control method for steel strip roughness in Two-stand temper mill rolling," Chin. J. Mech. Eng., vol. 28, no. 3, pp. 573–579, 2015, doi: 10.3901/CJME.2015.0310.027
- [8] H. Kijima and N. Bay, "Skin-pass rolling I—Studies on roughness transfer and elongation under pure normal loading," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, 12-13, pp. 1313–1317, 2008, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.06.005
- [9] A. I. Bozhkov, D. A. Kovalev, M. E. Orekhov, S. S. Degtev, and V. V. Chereshnev, "Controlling the Surface Roughness of Cold-Rolled Strip. Part 3," Steel Transl., vol. 47, no. 12, pp. 820–823, 2017, doi: 10.3103/S0967091217120038
- [10] B. Ma, A. K. Tieu, C. Lu, and Z. Jiang, "An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling," Journal of Materials Processing Tech, 125-126, Complete, pp. 657–663, 2002
- [11] M. Wehr, D. Stenger, S. Schätzler, R. Beyer, D. Abel, and G. Hirt, "Online Model Adaptation in Cold Rolling for Improvement of Thickness Precision," 21st IFAC World Congress, 2020
- [12] R. Kopp and H. Wiegels, Einführung in die Umformtechnik. (in german), 2nd ed. Aachen: Verl. Mainz, 1999
- [13] C. Schulte, X. Li, D. Abel, and G. Hirt, "Model-based Control of the Strip Roughness in Cold Rolling," IFAC-PapersOnLine, vol. 54, no. 11, pp. 109–114, 2021
- [14] W. Bilstein, "Industrial online surface roughness measurement of strip," Millenium Steel, vol. 16, pp. 150–155, 2014
- [15] S. Stockert, M. Wehr, J. Lohmar, G. Hirt, and D. Abel, "Improving the thickness accuracy of cold rolled narrow strip by piezoelectric roll gap control at high rolling speed," CIRP Annals, vol. 67, no. 1, pp. 313–316, 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.107
- [16] J. M. Alexander, "On the Theory of Rolling," Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 326, no. 1567, pp. 535–563, 1972, doi: 10.1098/rspa.1972.0025
- [17] C. Schulte, X. Li, D. Abel, and G. Hirt, "High Precision Thickness Control in a Cold Rolling Mill using a Non-Linear Roll Stand Deflection Model," in 2021 European Control Conference (ECC), 2021
- [18] D. R. Bland and H. Ford, "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 159, no. 1, pp. 144–163, 1948, doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1948\_159\_015\_02
- [19] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, Gaussian processes for machine learning, 3rd ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2008

- [20] P. J. Huber, "Robust Estimation of a Location Parameter," Ann. Math. Statist., vol. 35, no. 1, pp. 73–101, 1964, doi: 10.1214/AOMS/1177703732
- [21] P. J. Huber and E. M. Ronchetti, Robust Statistics, 2nd ed. s.l.: Wiley, 2011.