Neuer Profil- und Planheitsrechner optimiert das Warmwalzen bei ArcelorMittal

Ein Überblicksbeitrag über Strategien, Modelltheorie und Umsetzung

AUTOREN: Jonas Kämper (Mathweis Engineering GmbH), Dr. Markus Finck (Allpccloud GmbH), Dietrich Mathweis (Mathweis Engineering GmbH), Roland Feichtinger, Florian Steinecker (beide pa-innovations GmbH), Dr. Nils Naumann, Uwe Koschack, Eric Kohl (ArcelorMittal Eisenhüttenstadt); *info@mathweis-engineering.de, markus.finck@allpccloud.de, florian.Steinecker@pa-innovations.com*

DARUM GEHT'S: Die Kooperationspartner Mathweis Engineering GmbH, allpccloud GmbH und pa-innovations GmbH arbeiten seit vielen Jahren an der Entwicklung hochleistungsfähiger Walzmodelle und Level-2-Systeme. Im Rahmen der schrittweisen Modernisierung des Level 2 der Warmbreitbandstraße von ArcelorMittal in Eisenhüttenstadt wurde der Profil- und Planheitsrechner (PFC – Profile and Flatness Calculator) auf den neuesten Stand gebracht, in die bestehende Automation integriert und in Betrieb genommen.

Für Profil- und Planheitsberechnungen bieten wir FEM-basierte onlinefähige Prozessmodelle zur Berechnung von Gerüstverformungen und plastisch-elastischen Bandverformungen im Walzspalt. Im Warmwalzbereich wurde dadurch die Berechnung der querflussbedingten Generierung und Einstellung von Bandprofilen unter Berücksichtigung der Bandplanheit maßgeblich weiterentwickelt.

Die Warmbreitbandstraße von ArcelorMittal Eisenhüttenstadt wurde mit einem solchen System ausgerüstet. Da es sich hier um eine 5-gerüstige Warmbreitbandstraße handelt, besteht gegenüber beispielsweise 7-gerüstigen Anlagen in erhöhtem Maß die Aufgabenstellung, die Grenzen der Profilgenerierung bzw. des möglichen Materialquerfluss optimal auszunutzen, um den Anforderungen von Zielprofil und Bandplanheit gerecht werden zu können. Dabei wurde der in der bestehenden Automation vorhandene PFC im laufenden Betrieb ersetzt und gleichzeitig auf eine andere Betriebssystem-Plattform (Linux) umgestellt. Neben der Modernisierung der Rechnerinfrastruktur erfolgte auch die prozesstechnische Optimierung, die durch die ständig steigenden Kundenanforderungen und den stetig wachsenden Anteil anspruchsvoller Stahlgüten, z.B. Siliziumlegierungen, erforderlich wurde.

Einleitung

Seit vielen Jahren ist im Bereich des Warmwalzens die Tendenz zu anspruchsvolleren Stahlgüten in Kombination mit geringeren Enddicken ungebrochen. Level-2-Systeme mit den darin enthaltenen physikalischen Modellkernen helfen dabei, diesem Trend gerecht zu werden. Basis dafür ist zunächst die präzise Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfs im Stichplanmodell (PSC). Die Aufgabe des PFCs besteht nun darin, eine geeignete Konfiguration der Planheitsstellglieder (in der Regel Arbeitswalzenbiegung und -verschiebung) zu berechnen (**Abbildung 1**). Dieses Stellglieder-Setup berücksichtigt in bisherigen Ansätzen die elastische Walzenbiegung, den thermischen Zustand und den Verschleiß des jeweiligen Walzgerüsts. Darüber hinaus müssen jedoch die umformtechnisch bedingten Effekte der Profilgenerierung hinreichend präzise modelliert werden. Der mögliche Materialquerfluss im Walzspalt beschreibt dabei die umformtechnische Grenze der jeweiligen Profiländerung innerhalb der Planheitsgrenzen. Der physikalisch mögliche Querfluss wurde bereits in der Vergangenheit von Shohet/Townsend als Funktion des Bandbreiten- zu Banddickenverhältnisses beschrieben. Um die Möglichkeiten der

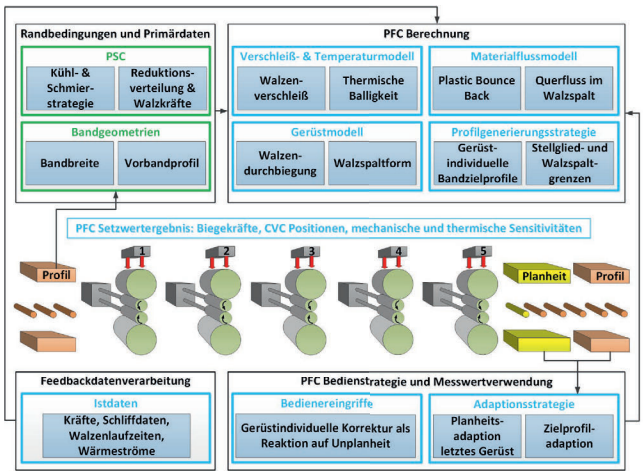

Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Level-2-Systems und des PFCs

Profilgenerierung voll auszuschöpfen, geht die hier vorgestellte Lösung weit darüber hinaus. Es wurde mittels 3D-FEM der sogenannte Plastic Bounce Back-(PBB-)Effekt beschrieben, quantifiziert und anschließend als Modellkomponente in den PFC integriert. Der PBB-Effekt beschreibt die Diskrepanz zwischen dem Walzspaltprofil und dem Bandauslaufprofil des jeweiligen Gerüsts als Funktion multipler Prozessgrößen.

FEM-Berechnungsansätze

Primäre Aufgabe eines PFC ist es, auf Basis der aktuellen Walzaufgabe und des Anlagenzustandes Setzwerte für die Planheitsstellglieder der Walzstraße zu generieren. Parallel dazu werden Sensitivitäten berechnet, mit deren Hilfe reale, prozessbedingte Abweichungen vom berechneten Arbeitspunkt innerhalb eines Toleranzbereiches kompensiert werden.

Zu diesem Zweck umfasst der PFC einen FEM-basierten Berechnungskern, der den elastischen Walzensatz aller fünf Gerüste abbildet. Unter Berücksichtigung aller relevanten Prozessparameter wird die elastische Verformung des Walzensatzes und damit das Walzspaltprofil zwischen den Arbeitswalzen berechnet und durch Anpassung der Planheitsstellglieder gezielt eingestellt. Störgrößen sind dabei der aktuelle thermische Zustand des Walzensatzes sowie

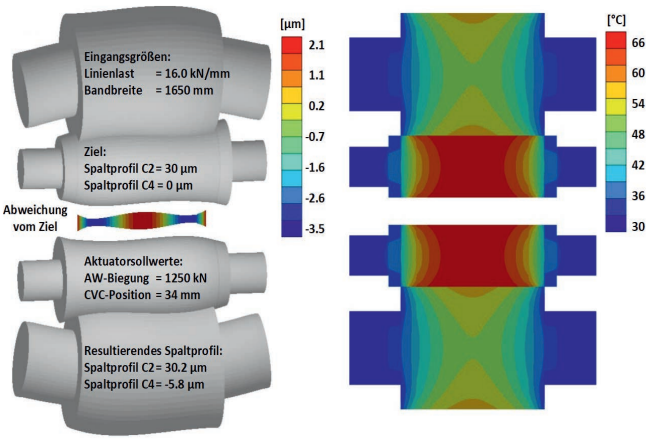

Abbildung 2: Berechnung Verformung und Temperaturverteilung in einem Walzensatz

der Verschleiß der Arbeitswalzen. Beide Größen werden in einem separaten Prozess, dem TCW (Thermal crown and wear) simultan mitberechnet **(Abbildung 2)**.

Die Entwicklung des Bandprofils durch plastische Umformung in den Walzspalten hat signifikanten Einfluss auf die bandbreitenbezogenen Lastverteilungen und die einzustellenden Zielprofile. Beide Größen sind messtechnisch, wenn überhaupt, nur schwierig zu erfassen. Daher wurde ein FEM-Modell entwickelt, das den Umformvorgang im Walzspalt in 3D berechnen kann.

Eine Neuentwicklung schien deshalb gerechtfertigt, weil uns bekannte Berechnungssysteme Schwierigkeiten haben, die Vorschubbewegung des Walzgutes im Walzspalt optimal abzubilden. Wir lösen dieses Problem durch Einführung einer Transportgleichung für die plastischen Dehnungen im Walzgut (Arbitrary Lagrange-Eulerian – ALE). Dies ermöglicht die Verwendung eines ortsfesten Rechengitters; die Notwendigkeit, dieses Gitter durch den Walzspalt zu bewegen, entfällt. Darüber hinaus bieten moderne GPU-Prozessoren die Möglichkeit, nichtlineare FEM-Problemstellungen mit bisher nicht gekannter Berechnungsperformance zu bearbeiten.

Im Folgenden werden die für den PFC besonders relevanten Ergebnisse dieses Modells anhand eines Beispielbandes gezeigt (Bandbreite: 1 650 mm, Dicke ein: 25 mm, Dicke aus: 12 mm, Streckgrenze: 100 N/mm², Profilüberhöhung Eintritt: 0,1 mm, Reibkoeffizient 0,25). In Abbildung 3 ist die resultierende Lastverteilung im Walzspalt dargestellt. Deutlich erkennbar ist das durch das Eintrittsprofil bedingte Lastmaximum in der Bandmitte sowie der Lastabfall außerhalb der beiden lokalen Maxima an der Bandkante. Diese Verteilung ist qualitativ aus der Literatur bekannt und wurde z.B. in Grundlagen des Bandwalzens (1973 Weber) experimentell ermittelt. Verglichen mit einer konstanten Linienlast bei ansonsten gleicher Breite und Summenkraft verursacht sie eine signifikant stärkere Auffederung des Walzensatzes, was mit einer stärkeren Arbeitswalzenbiegung oder einer größeren Arbeitswalzenballigkeit kompensiert werden muss.

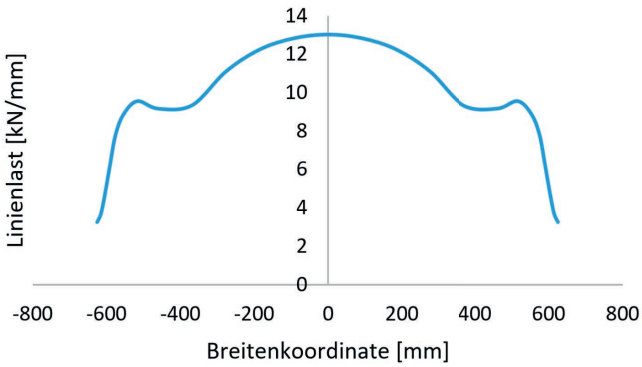

Abbildung 3: Linienlastverteilung über Bandbreite im Walzspalt

Der Zusammenhang zwischen Eintritts- und Austrittsprofil (Bandmittenüberhöhung) und das in der Konsequenz einzustellende Walzspaltprofil ist beispielhaft in **Abbildung 4** dargestellt. Im untersuchten Fall verringert sich das Eintrittsprofil von 0,1 mm Mittenüberhöhung auf ca. 0,05 mm. Die Arbeitswalzen wurden, anders als im PFC selbst, in der 3D-Rechnung als biegesteif und perfekt zylindrisch modelliert, entsprechen also einer Profilüberhöhung von 0 mm.

Die oft getroffene Annahme, dass das Bandaustrittsprofil mit dem Walzspaltprofil identisch ist, trifft also nicht zu. Selbst bei einem hypothetischen Eintrittsprofil von 0 mm und einem Walzspaltprofil von 0 mm stellt sich

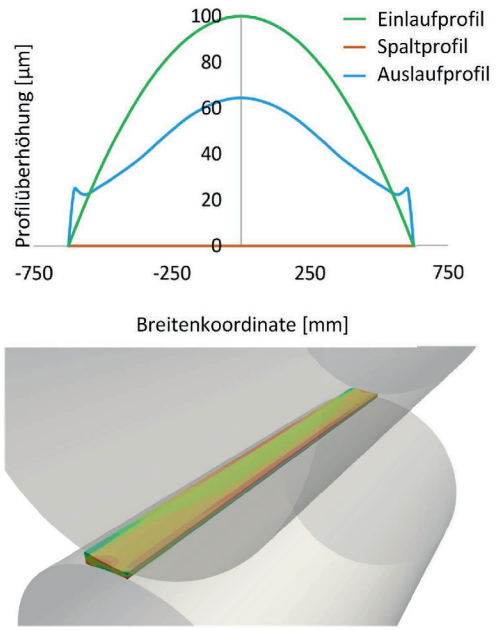

Abbildung 4: Bandprofilveränderung im Walzspalt (Band eintritt/Austritt)

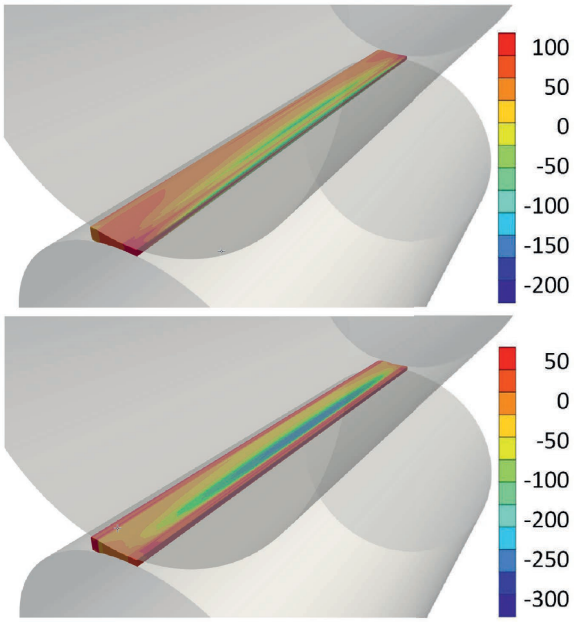

Abbildung 5: Spannungsverteilung [N/mm²] im Band (oben: Vertikalspannungen, unten: Längsspannungen)

am Bandaustritt eine Profilüberhöhung ein, die in Realität z.B. durch verstärkte Arbeitswalzenbiegung berücksichtigt werden muss, damit das fertige Warmband innerhalb der gewünschten Zielprofiltoleranz liegt.

Ursache für dieses Verhalten ist der Spannungszustand des Walzgutes im Kantenbereich, der deutlich von der Bandmitte abweicht. Das Material kann an der Bandkante ungehindert in Breitenrichtung fließen (Querfluss), da dort die Spannung in Breitenrichtung 0 ist. Im Gegensatz dazu fließt das Material in Bandmitte fast ausschließlich in Längsrichtung. Dies resultiert in einer im Vergleich zur Bandmitte leicht verkürzten Bandkante und als Konsequenz einer dort lokalisierten Zugspannungskonzentration (**Abbildung 5, unteres Bild**).

Aus Gründen des Kräftegleichgewichts folgt daraus eine Verschiebung der Längsspannung in den Druckbereich in Bandmitte. Dieser Druck verursacht eine plastische Aufstauchung der Bandmitte und damit eine lokale Erhöhung der Banddicke. Relativ dazu resultiert die Zugspannung an der Bandkante in eine Längung und damit eine tendenziell geringere Banddicke. Die durch den Querfluss verursachten Differenzen in der breitenabhängigen Bandlängung werden also durch lokale Dickenänderungen im Band teilweise kompensiert.

Zur Berücksichtigung dieser Effekte in der Anlagenanwendung wurde ein heuristisches Modell entwickelt und in die Automation integriert. Um damit eine allgemeingültige Vorhersage von Linienlastverteilung und Plastic Bounce Back zu erzielen, ist es erforderlich, vorab zunächst eine große Anzahl von Parametervariationen zu simulieren und anschließend im Praxisbetrieb zu adaptieren.

Realisierung des neuen PFC im Anlagenbetrieb

Der grundlegende Ansatz alle relevanten Teile des Gesamtprozesses physikalisch zu beschreiben, bringt sowohl im Onlinebetrieb, aber auch hinsichtlich nachträglicher Analyse und Prozesstransparenz signifikante Vorteile mit sich.

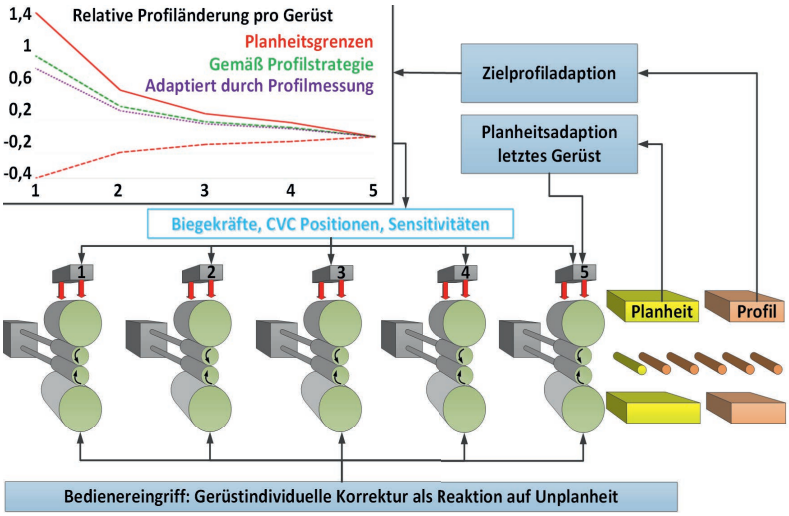

Abbildung 6: Skizze Bedienkonzept

Es wird die notwendige Bandprofiländerung auf die Gerüste derart aufgeteilt, dass

- der Materialquerfluss im Walzspalt bezüglich Einhaltung der Planheitsgrenzen berücksichtigt wird und
- eine Vergleichmäßigung und Minimierung des Querflusses erfolgt.

Es werden die gerüstweisen Randbedingungen

- thermische und verschleißbedingte Walzenkonturen
- mechanische Stellgliedgrenzen und Kompensationsgrenzen

in Abhängigkeit des Anlagenzustandes berücksichtigt und das einstellbare Bandprofil gegebenenfalls begrenzt. Iterativ wird so jede Setup-Anfrage bearbeitet und die für diesen Walzfall ideale Profilverteilung sowie die dazu passenden Sollwerte für die Aktuatoren werden berechnet.

Der Ansatz ermöglicht außerdem eine differenzierte Betrachtung bei der Korrektur von Profil und Planheit in Online-Betrieb. Korrekturen aufgrund von gemessenen Abweichungen des Bandprofils werden im Sinne der gerüstabhängigen Planheitsgrenzen gleichmäßig nach Profiländerungspotenzial auf die Gerüste aufgeteilt, sodass die Korrektur eines einzelnen Gerüsts ausschließlich zur Einstellung der Planheit genutzt wird. Das vereinfacht die Handhabung durch die Bediener maßgeblich **(Abbildung 6)**.

Da die meisten Warmbreitbandstraßen im Dauerbetrieb laufen und im Regelbetrieb täglich mehrere hundert Bänder produzieren, spielt einfache und schnelle Prozesstransparenz für den Kunden eine wichtige Rolle **(Abbildung 7)**. Deshalb werden die berechneten Setups und die dazugehörigen Anlagenzustände so gespeichert, dass sie später sowohl statisch als auch im Detail anhand des dazugehörenden HMI nachvollzogen und gegebenenfalls nachgerechnet werden können. Ein morgendlicher Blick auf die vergangene Produktion reicht aus, um die Profilgüte im Mittel zu erkennen und sich dann auffällige Bänder bis ins Detail anzusehen.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem neuen Profil- und Planheitscomputer PFC ist es gelungen, ein physikalisch basiertes Modell zu entwickeln, das eine signifikante Prozessoptimierung erlaubt. Durch konsequentes Ausnutzen prozesstechnologischer Grenzen bei der Profilgenerierung und Planheitseinstellung wird eine Optimierung von Qualität und Durchsatz ermöglicht. Dies wird aufgrund einer FEM-basierten Präzision in der umformtechnologischen Materialflussbeschreibung (Plastic Bounce Back-Effekt) sowie durch ein an der Walzpraxis orientiertes, modernes Bedien- und Adaptionskonzept erreicht. Dabei wird besonderer Wert auf Prozesstransparenz und Kundenorientierung gelegt.

Der PFC eignet sich neben der Anwendung in Neuanlagen insbesondere für die maßgeschneiderte Anlagenerneuerung (Retrofit). Das System kann separat oder im Kontext einer Level-2-Gesamtlösung auf unterschiedlichen Plattformen implementiert werden (z.B. Windows und Linux).

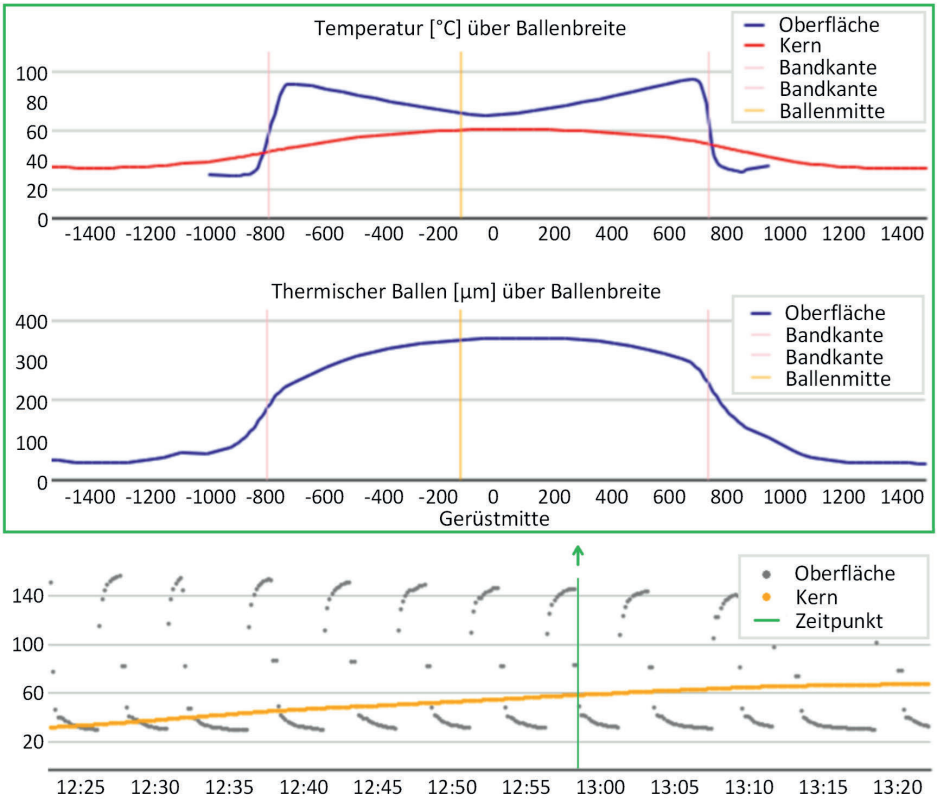

Abbildung 7: Transparenter Prozess am Beispiel lokal detaillierter Temperaturberechnung (oben) zu einem ausgewählten Zeitpunkt (unten)