



Automatische Regelung von Lackbeschichtungsanlagen

Broschüren zu anderen Produkten finden Sie auch im Downloadbereich unserer Internetseite www.ims-gmbh.de.

IMS Messsysteme GmbH
Dieselstraße 55
42579 Heiligenhaus
Deutschland

Telefon: +49 2056 975-0
Telefax: +49 2056 975-140
E-Mail: info@ims-gmbh.de
Internet: www.ims-gmbh.de

© IMS Messsysteme GmbH, Heiligenhaus
Alle Rechte vorbehalten. Die Dokumentation ist in allen Teilen urheberrechtlich geschützt.
Jede Weitergabe und Vervielfältigung bedarf der schriftlichen Zustimmung der IMS Messsysteme GmbH.
Alle in diesem Dokument enthaltenen Firmen- und Produktbezeichnungen können eingetragene Marken sein.

Ein System zur automatischen Regelung von Lackbeschichtungsanlagen

Andreas Wolff, Mohieddine Jelali, Ulrich Müller, Michael Henkes, Horst Krauthäuser, Guido Stallknecht

Oberflächenveredelung hat einen hohen Stellenwert in der Metallverarbeitungsindustrie. Feuerverzinkte Bänder werden auf beiden Seiten mit einem oder mehreren Lackschichten versehen, um dem Band die gewünschten Eigenschaften (z.B. Farbe und Korrosionswiderstand) zu verleihen. Diese werden anschließend zu Waschmaschinen, Schaltschränken, Autoteilen usw. weiterverarbeitet. Dies stellt besondere Anforderungen an die verwendeten Lacke hinsichtlich Haftungseigenschaften auf dem verzinkten Band, Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse und farbliches Aussehen. Neben anderen Parametern ist die Gleichmäßigkeit der Lackschichtdicke über der Länge und der Breite des Bandes eine bestimmende Größe.

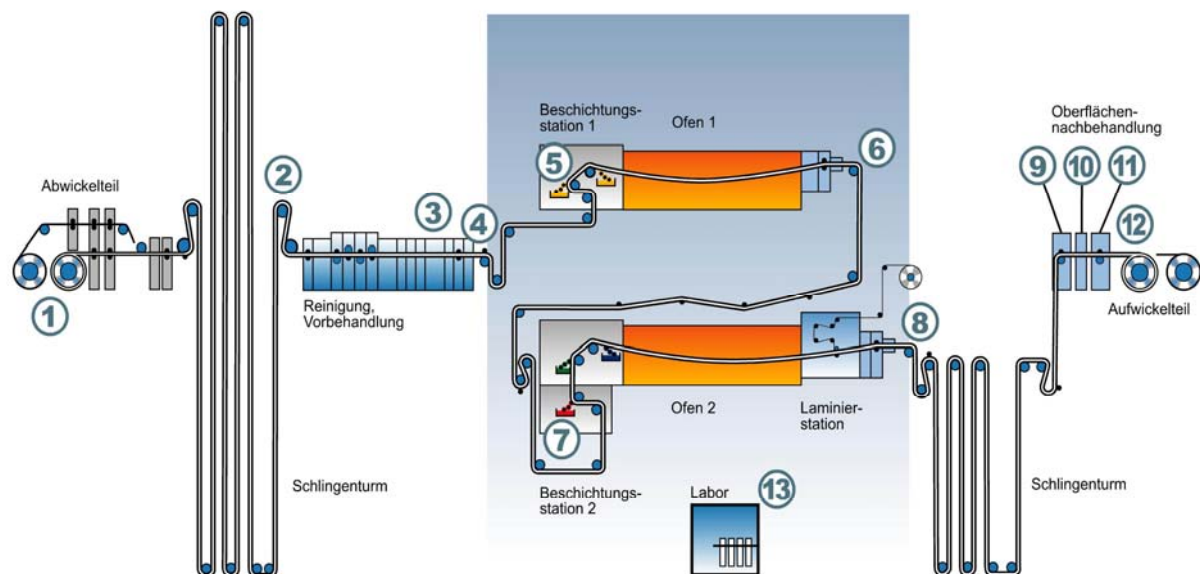
In diesem Beitrag wird ein automatisches Regel-system für Lackbeschichtungsanlagen vorgestellt. Es wird gezeigt, wie durch diese verbesserte Regelung eine erhebliche Reduzierung der Lackschichtdickenschwankungen gegenüber dem Handbetrieb und damit eine deutliche Senkung des Lackverbrauchs erreicht werden kann. Ein kurzer Überblick über die Technologie der

Bandbeschichtung und eine Beschreibung der verwendeten, mathematischen Prozessmodelle sind ebenfalls Bestandteile des Artikels.

Eine wichtige Maßnahme zur besseren Nutzung der Potentiale von Produktionsanlagen ist die Optimierung der Regel- und Automatisierungssysteme. Diese zielt auf die Vergrößerung der Produktanteile, die in immer schmäler anzusetzenden Toleranzbändern liegen. Die Erhöhung des Durchsatzes und die Einsparung von Energie- und Materialverbrauch werden ebenfalls optimiert und tragen damit zur Kostenreduzierung bei.

Am Beispiel der Bandbeschichtung soll gezeigt werden, wie durch eine verbesserte (modellbasierte) Regelung eine erhebliche Reduzierung der Lackschichtdickenschwankungen gegenüber dem Handbetrieb und damit eine deutliche Senkung des Lackverbrauchs erreicht werden kann. Der Beitrag enthält ebenfalls einen Überblick über die Technologie der Bandbeschichtung und eine Beschreibung der verwendeten mathematischen Prozessmodelle.

Bild 1. Aufbau einer Lackbeschichtungsanlage



Industrielle Bandbeschichtung

Prozessbeschreibung. Unter dem Begriff „colour coating“ ist in Bandbehandlungsanlagen das Auftragen organischer Schutzschichten auf Metallband zu verstehen, siehe **Bild 1**. Dazu wird das Band gereinigt und nichtmetallisch zwischenschichtet. Anschließend werden die Beschichtungsstoffe in flüssiger oder fester Form ein- oder mehrmals aufgetragen und eingebrannt. Es können weitere Behandlungsschritte, wie Prägen, Bedrucken und Aufbringen von Schutz- und Gleitfolien, folgen.

Ausgehend vom kaltgewalzten, vielfach metallisch oberflächenveredelten Band entsteht in nur wenigen Minuten ein beschichtetes Halbzeug. Dieses kann als Band in seiner ursprünglichen Breite aufgehaspelt bzw. in mehrere schmalere Bänder aufgespalten oder zu Blechtafeln gewünschter Länge geschnitten und gestapelt werden.

Als Trägermaterialien kommen grundsätzlich alle metallisch oberflächenveredelten Stahlbänder (elektrolytisch verzinkt bzw. verzinkt, verchromt feuerverzinkt, feuer-aluminiert) sowie Aluminiumbänder zum Einsatz. Organische Beschichtungsstoffe sind thermoplastische und wärmehärtende (vernetzte, duoplastische) Lacke in Form von Lösungen oder Dispersionen sowie thermoplastische Folien; siehe hierzu auch [1].

Einsatzgebiete. Oberflächenveredelung hat einen hohen Stellenwert in der Metallverarbeitungsindustrie. Lackierte Bänder werden in vielen Bereichen eingesetzt, wie z.B. in der Automobilindustrie (Karosserie), im Haushalt (Waschmaschinen, Schaltschränke), in der Bauindustrie und in Verpackungsanwendungen.

Beschichtungsmessung. Das verwendete Beschichtungsmesssystem (**Bild 2**, s. auch [2]) erfasst die einzelnen Beschichtungsauflagen. Dazu ist die Messung der Sättigungswerte des Trägermaterials und des Beschichtungsmaterials erforderlich. Für das in **Bild 3** dargestellte Beispiel werden für die Bandoberflächenseite folgende messtechnische Einrichtungen eingesetzt:

- Basismessung für Basismaterial Stahl und verzinktes Stahlblech
- Messung der Vorbehandlungsschicht (z.B. Chromat)
- Messung der Grundbeschichtung
- Messung der Deckbeschichtung

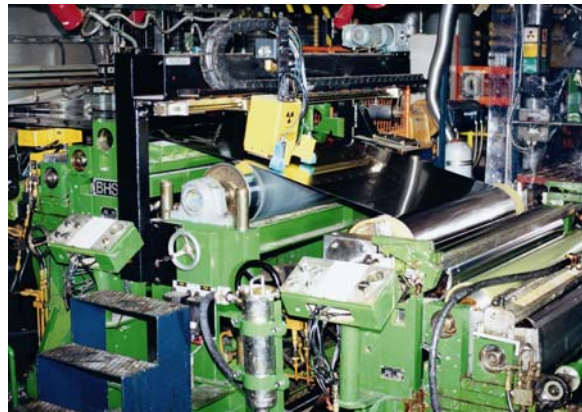


Bild 2. Coil-Coating Anlage – Traversierender Messkopf

Um dies zu verdeutlichen, ist der Signalverlauf für die Mehrschichtmessung in **Bild 4** dargestellt. Die einzelnen Messstufen benötigen zur Festlegung des Trägermaterials die Daten der vorhergehenden Messung sowie den Sättigungswert des Schichtwerkstoffes.

Der Sättigungswert des Schichtwerkstoffes wird materialabhängig mit der Testmessstelle (Labormesssystem) unmittelbar vor dem Einsatz in der Beschichtungsanlage ermittelt. Er wird im nassen (Nasskennziffer) und im trockenen Zustand (Trockenkennziffer) gemessen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Trockenkennziffer aus der Nasskennziffer zu errechnen.

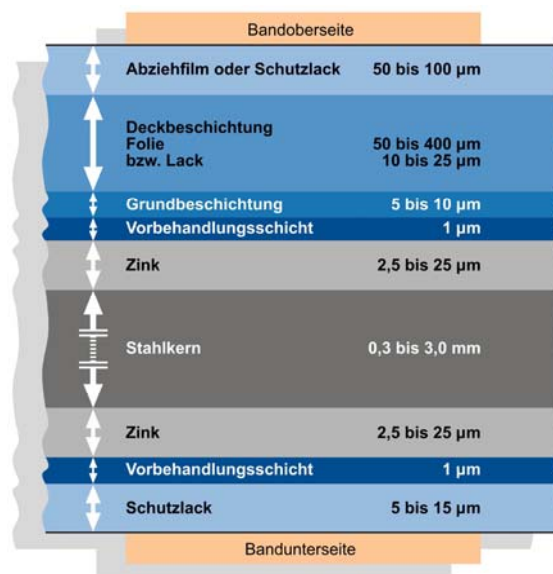


Bild 3. Schematischer Aufbau einer Schichtfolge bei verzinktem Stahlband

Das Auflagegewicht kann im plastischen oder ausgehärteten Zustand an der Bandober- und unterseite bestimmt werden. Die Nassmessstellen werden unmittelbar hinter dem Coater eingesetzt und liefern Messwerte für die schnelle Auflagerelung. Trockenmessstellen befinden sich hinter dem jeweiligen Trockenofen. Die Grundbeschichtung und die Deckschichtung werden separat voneinander gemessen. Auf Grund des kleinen Abstandes zwischen Messgut und Messkopf für die Grund- bzw. Deckschichtmessung (ca. 20 mm) ist im Messsystem eine Heftnahtverfolgung integriert.

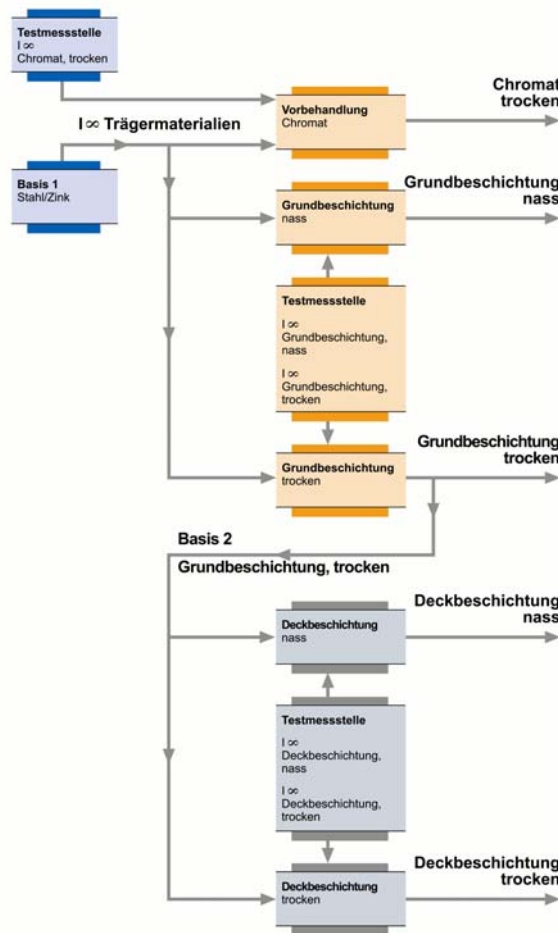


Bild 4. Signalverlauf – Mehrschichtmessung

Praxis der Steuerung und Regelung. Die Durchsicht der Literatur hat ergeben, dass wenig über die Regelung von Lackbeschichtungsprozessen berichtet wird. Die meisten Anlagen werden noch per Handbetrieb gefahren, oder es werden einfache PI-Regler verwendet, die aufgrund der Komplexität und der dominierenden Totzeiten des

Prozesses zu unbefriedigenden Ergebnissen führen. In [3] wird von einem computer-basierten Presetting gesprochen, das aber nicht näher erläutert wird. Jedenfalls scheint die automatische Regelung der Lackschichtdicke noch nicht fortgeschritten, geschweige denn Standard zu sein.

Mathematische Prozessmodellierung

Modell Coater. Das verwendete Mehrwalzenbeschichtungssystem für die Bandoberseite und -unterseite (Bild 5) wird im sog. „Reverse-Modus“ betrieben, siehe [4]. Dabei wird durch die Schöpfwalze R_2 ein Volumenstrom Q_0 aus dem Lackbad transportiert. Dieser wird durch die Andrückkraft (Normalkraft) F_{n12} der Dosierwalze (Messrolle) R_1 gegen die Schöpfwalze R_2 in einen Volumenstrom Q_1 und Q_2 aufgeteilt, wobei der Volumenstrom Q_1 durch eine Klinge abgestreift wird und wieder in das Farbbad zurückgelangt. Die Andrückkraft F_{n12} ist nicht identisch mit der durch die Kraftmessdosen in den hydraulischen Stellantrieben gemessenen Kolbenkraft F_k . Sie hängt vielmehr sowohl von den Walzenpositionen untereinander als auch von den Walzendurchmessern R_1 und R_2 sowie den Reibverhältnissen zwischen der Dosierwalze und der Schöpfwalze ab. Genauer betrachtet teilt sich der Volumenstrom Q_2 durch Einwirkung der Andrückkraft F_{n23} zwischen Schöpfwalze und Auftragswalze in einen Volumenstrom Q_{2n} und Q_3 auf. Der Volumenstrom Q_{2n} wird für die weiteren Betrachtungen zunächst vernachlässigt. Infolgedessen wird in erster Näherung Q_2 vollständig durch die Auftragswalze R_3 aufgenommen und auf das durch die Transportwalze mitgeführte Metallband vollständig aufgetragen. Die Lackschichtdicke hängt somit von den Kräften zwischen den Walzen, der Drehrichtung und den Drehgeschwindigkeiten der Walzen, der Viskosität, der Dichte und der Temperatur der verwendeten Farbe ab.

Vom verfahrenstechnischen Standpunkt aus betrachtet, ist die Andrückkraft zwischen Dosierwalze und Schöpfwalze (oder die Position der Dosierwalze) die geeignete Stellgröße für die Lackschichtdickenregelung. Störungen, die durch die Strömungsbedingungen zwischen Dosierwalze und Schöpfwalze hervorgerufen werden, können durch die Schöpf- und Auftragswalze ausgeglichen werden. Ferner werden die Strömungsbedingungen zwischen Auftragswalze und Band konstant gehalten, wodurch ein gleichmäßigeres Lackschichtdickenprofil erreicht wird.

R_1 : Dosierwalze
 R_2 : Schöpfwalze
 R_3 : Auftragswalze
 R_4 : Transportwalze

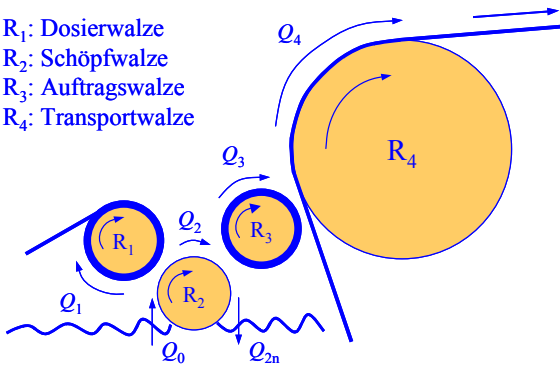


Bild 5. Aufbau eines Vier-Walzen-Coaters im Reverse Betriebsmodus

Nach Kenntnisstand der Autoren gab es zum Zeitpunkt der Projektierung der Anlage kein Modell, das die nichtlineare Dynamik eines im Reverse-Modus betriebenen Beschichtungssystems beschreibt. Daher wurde ein datenbasiertes Modell entwickelt. Hierzu wurden Daten über etwa einen Monat aufgenommen und analysiert.

Datenbasierte Analyse der Einflussgrößen. Zuerst wurden die Querprofile durch eine Gramzerlegung in die folgenden unabhängigen Komponenten zerlegt:

- Mittelwert (g_0),
- Schräglage (g_1) und
- Crown (g_2)

Um einen genaueren Einblick in die Abhängigkeiten der einzelnen Profilkomponenten von den Anlagenparametern zu bekommen, wurden die Daten weiter untersucht. Um mit dem immensen Datenaufkommen zurecht zu kommen, wurde das vom BFI entwickelte Softwarewerkzeug **DATATools** [5] verwendet. Mit diesem Werkzeug ist eine schnelle, systematische und gut dokumentierbare Analyse von Daten möglich. Zunächst mussten die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Lackschichtdicke ermittelt werden. Lineare Korrelationsuntersuchungen führten zu keinem Ergebnis. Deshalb wurde auf erweiterte Untersuchungsverfahren zurückgegriffen. Hierzu bietet **DATATools** eine nichtlineare Korrelationsanalyse basierend auf Kohonen Selforganising Maps (SOMs) an. Man erhält eine Rangfolge der wichtigsten Einflussgrößen auf die Lackschichtdicke:

- Andrückkraft der Schöpfwalze
- Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen den einzelnen Walzen
- Dichte des Lacks
- Viskosität des Lacks.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde ein vereinfachtes regelungstechnisches Modell entwickelt.

Vereinfachtes Modell für die Regelung.

Aufgrund obiger Überlegungen kann gezeigt werden, dass die Schräglage des Lackschichtprofils von der Differenz zwischen Andrückkraft der Schöpfwalze an der Bedienseite $F_{m,b}$ und der Antriebsseite $F_{m,a}$ abhängt. Der Mittelwert des Lackschichtprofils hängt von der Summe der beiden Andrückkräfte ab, ebenso die Crownkomponente, siehe **Bild 6**. Für die weitergehende Modellierung wird die Crownkomponente vernachlässigt, da sie sich auf Grund fehlender zusätzlicher Stellglieder nicht unabhängig vom Mittelwert einstellen lässt. Dadurch ergibt sich folgender Modellansatz zwischen Anstellkraft und Lackschichtdicke (gemessen an der Nassmessstelle):

$$g_0(k) = K_{g_0} F_{\Sigma}(k-1) + f_{g_0} \quad (1)$$

$$g_1(k) = K_{g_1} F_{\delta}(k-1) + f_{g_1}$$

mit

$$F_{\Sigma}(k) = 1/2 (F_{m,b}(k) + F_{m,a}(k)) \quad (2)$$

$$F_{\delta}(k) = 1/2 (F_{m,b}(k) - F_{m,a}(k))$$

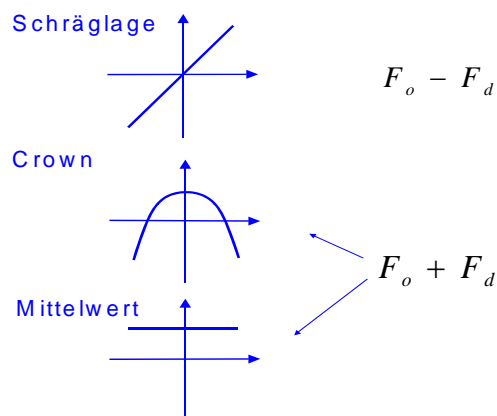


Bild 6. Zerlegung des Lackquerprofils in unabhängige Komponenten

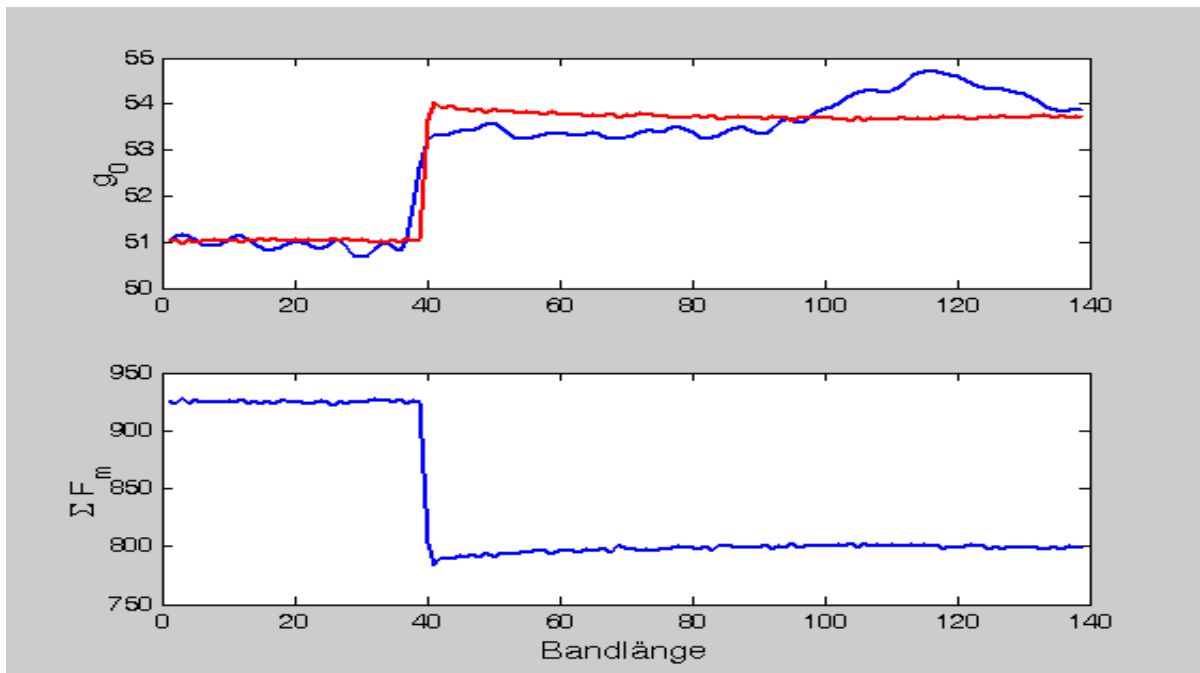


Bild 7. Sprungversuch zur Parameterbestimmung

Zur Bestimmung der Modellparameter wurden über Monate hinweg Daten aufgenommen. Jedes mal, wenn der Anlagenfahrer die Lackschichtdicke von Hand korrigieren muss, treten sprungförmige Stellgrößen- und Lackschichtdickenänderungen auf, wie sie in Bild 7 zu sehen sind.

Diese wurden zur Bestimmung der Modellparameter herangezogen. Für den im Bild 7 gezeigten Fall ergaben sich die Parameter

$$K_{g_0} = -0,0216 \frac{\mu\text{m}}{\text{N}} \quad f_{g_0} = 70 \mu\text{m} \quad (3)$$

Die Parameter lagen für alle untersuchten Fälle in den Intervallen

$$\begin{aligned} K_{g_0} &= [-0,024 \quad -0,001] \mu\text{m}/\text{N} \\ K_{g_1} &= [-0,029 \quad -0,004] \mu\text{m}/\text{N} \end{aligned} \quad (4)$$

Aufgrund der großen Parameterschwankungen ist eine Regelung mit festen Parametern ungeeignet, um die vom Kunden vorgeschriebene Regelgüte zu erzielen.

Modell Trocknungsöfen. Der hinter dem Coater nachgeschaltete Ofen lässt sich näherungsweise als eine Totzeitstrecke beschreiben

$$\begin{aligned} g_{t,0}(k) &= K_{t,g} g_{0,c}(k - T_t) \\ g_{t,1}(k) &= K_{t,g} g_{1,c}(k - T_t) \end{aligned} \quad (5)$$

wobei die Totzeit, d.h. die Transportzeit von der Nassmessstelle zur Trockenmessstelle, von der Bandgeschwindigkeit abhängt:

$$T_t = \frac{L}{v(t)} \quad (6)$$

Die Reduktion von Nassschichtdicke zur Trockenschichtdicke (Nass-Trocken-Faktor) hängt sowohl von der Dichte des nassen und des trockenen Lacks als auch von seinem Feststoffanteil ab:

$$K_{g,t} = \frac{\sigma_{\text{nass}} \eta_{\text{solid}}}{\sigma_{\text{trocken}} 100} \quad (7)$$

Diese Werte sind vorab durch Laboruntersuchungen bekannt und können im allgemeinen als sichere Parameter angenommen werden, so dass bei diesem Teilmodell keine Modellunsicherheiten auftreten.

Aufbauend auf den in diesem Abschnitt entwickelten Modellen wird nun ein Regler entworfen.

Moderne Lackschichtdickenregelung

Reglerstruktur. Aufgrund der zeitabhängigen Totzeit zwischen der Trockenschichtmessung und der Nassschichtmessung wurde eine Mehrgrößenkaskadenregelung basierend auf dem Internal Modell Control Prinzip nach Morari [6] entwickelt. Die Regelungsstruktur ist in **Bild 8** [7; 8] dargestellt.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Betriebsbedingungen (Lacksorte, Verschleiß) werden die Reglerverstärkungen mit Hilfe eines robusten Gain-Scheduling-Verfahrens (d.h. einer Verstärkungsumschaltungsstrategie) adaptiert. Da sich zusätzlich die Prozessverstärkung während des Betriebs einer Lacksorte ändert, muss der Regler diesbezüglich unempfindlich (robust) sein. Deshalb wurde der Regler so entworfen, dass er auch bei bis zu 30% Parameterfehler kein Überschwingen aufweist und gleichzeitig eine Mindesteinschwingzeit unterschreitet.

Die Verstärkungen wurden anhand von aufgenommenen Daten zuvor ermittelt und in Tabellen abgelegt. Lacke, die nicht in der Tabelle eingetragen sind, können durch einfache Vorversuche bestimmt werden.

Funktionsweise. Um die Regelungsaufgabe zu vereinfachen, fährt der Anlagenfahrer das Beschichtungssystem in die Nähe des gewünschten Arbeitspunktes. Der Anlagenfahrer wählt die Walzengeschwindigkeit und Kräfte zwischen den Walzen, um eine gute Lackoberfläche zu erzielen. Der Regler zieht dann das Beschichtungssystem in den Arbeitspunkt und stabilisiert es gegen Störungen, die durch sich ändernde Walzengeschwindigkeiten, Temperatur und Viskosität der Farbe verursacht werden. Ebenso kümmert sich der Regler um die gewünschten Sollwertänderungen in der Lackschichtdicke.

Vorteile. Wesentliche Vorteile der Regelung sind:

- Explizite Totzeitkompensation
- Modularer Aufbau (Möglichkeit zur sukzessiven Inbetriebnahme der Komponenten)
- Möglichkeit zur einfachen Nachstellung der Mehrgrößenregelung durch den Anlagenfahrer anhand eines einzigen Parameters
- Einfache sprungfreie Umschaltung zwischen den drei Regelungsmodi: nur mit Nassmessstelle, mit Nass- und Trockenmessstelle und nur mit Trockenmessstelle

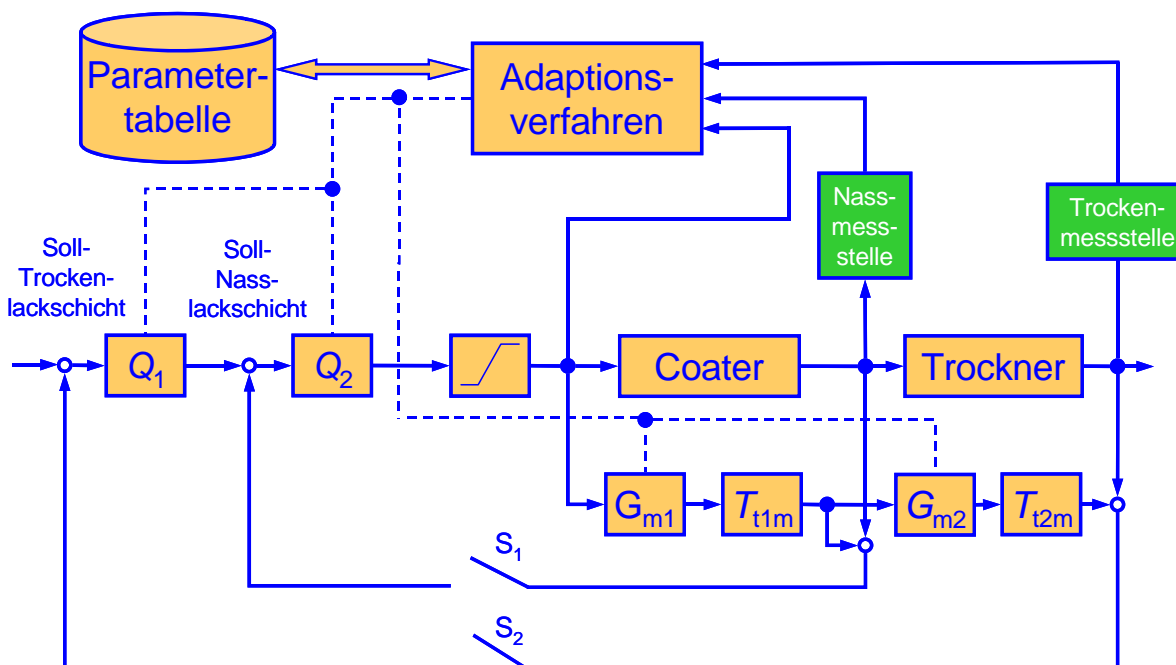
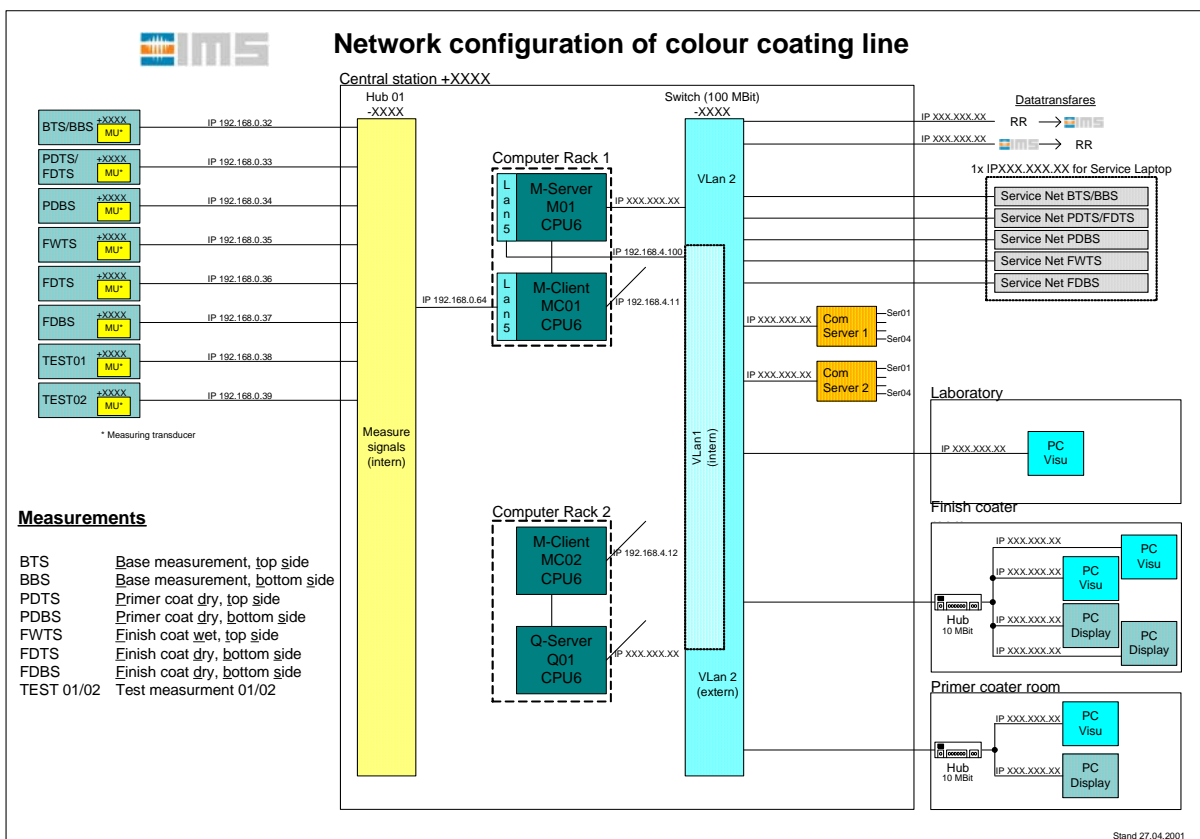


Bild 8. Gewählte Regelungsstruktur

Automatisierungssystem. Das Regelungskonzept wurde auf dem Automatisierungssystem MEVInet der Firma IMS Messsysteme GmbH unter LogiCAD/32 realisiert, siehe **Bild 9**. MEVInet ist ein standardisiertes System zur Anlagenautomatisierung für die Bereiche Messen, Steuern, Regeln, Visualisieren und Qualitätsmanagement. Folgende Hauptmerkmale wurden bei der Entwicklung des Systems berücksichtigt:

- Größtmögliche Transparenz der Hard- und Software (Modularer Aufbau, Mehrprozessorsystem)
- Einsatz von Standardbetriebssystemen (Window NT, CE)
- Graphische Konfiguration der Mess-, Steuer- und Regelungsfunktionen (IEC 1131-3)
- Standardisierte Kommunikation zwischen den Einzelsystemen (Ethernet, TCP/IP, InterBus-S, Fire Wire)
- Dem Prozessor angepasste Reaktionszeiten in den einzelnen Ebenen
- Fernwartung

Bild 9. MEVInet-Komponenten in einer Lackbeschichtungsanlage



Erste Betriebserfahrungen

Die hervorragenden Ergebnisse der Regelung sind exemplarisch in **Bild 10** gezeigt. Die mittlere trockene Schichtdicke $g_{0,t}$ und die Schrägelage $g_{1,t}$ sind über die Bandlänge aufgetragen. Zusätzlich sind die Andrückkraft an der Bedienseite $F_{m,b}$ und an der Antriebsseite $F_{m,o}$ der Dosierwalze dargestellt. Der Sollwert der mittleren Schichtdicke $g_{0,t}$ ändert sich dabei an den Bandpositionen $l_1 = 100$ m, $l_2 = 950$ m und $l_4 = 2600$ m.

Zwischen den Bandpositionen $l_2 = 1000$ m und $l_3 = 2000$ m erhöht sich aufgrund der hohen Andrückkräfte der Dosierwalze die Temperatur des Lackes. Das hat Einfluss auf das Strömungsverhalten des Lackes zwischen den Walzen und dadurch auch auf die Dicke der Farbe. Dies führt zu einer Verstellung der Dosierwalze, um die Lackschichtdicke konstant zu halten.

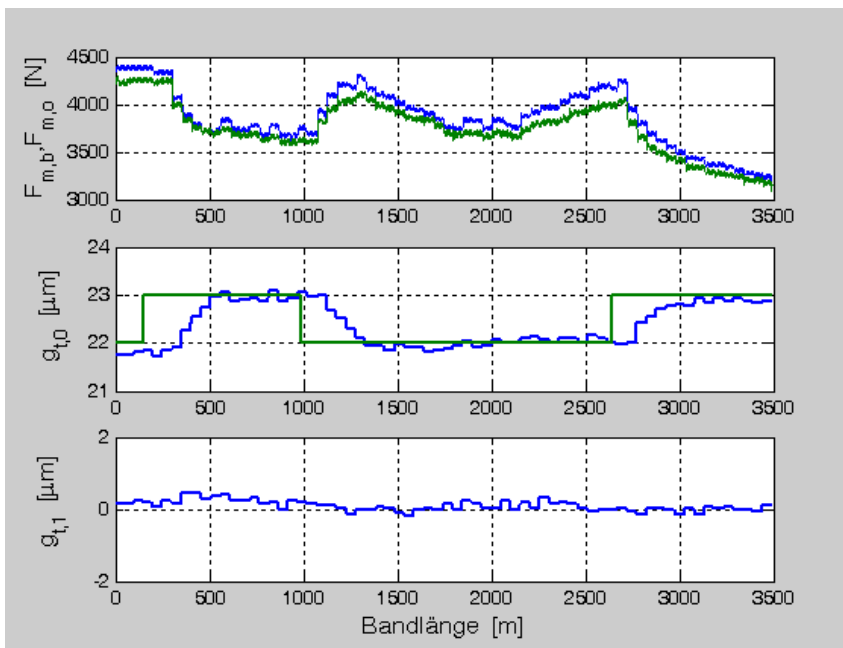
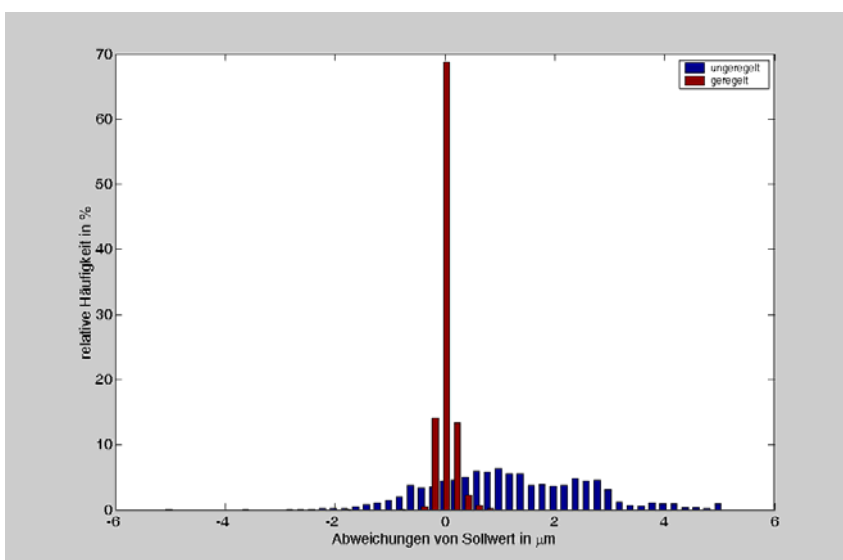


Bild 10. Typische Ergebnisse der Regelung

Durch Hinzugeben von frischem kaltem Lack kühlt die Farbe ab der Bandposition l_3 wieder ab. Durch die Regelung konnte im Vergleich zum unregulierten Zustand der Anlage die Sollwertabweichung der mittleren trockenen Lackschichtdicke von $-2 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ auf ein Intervall von $\pm 0,3 \mu\text{m}$ eingeschränkt werden, siehe **Bild 11**.

Zusammen mit der Installation des Schichtdickemesssystems und der Regelung können insgesamt 10 % der Kosten für Farbe pro Jahr beim Kunden gespart werden. Dies bedeutet für den Kunden ein „Return on Investment“ von ca. 12 Monaten, was ein hervorragendes Ergebnis ist.



Fazit

In diesem Beitrag wurde ein automatisches Mess- und Regelsystem für Farbbeschichtungsanlagen vorgestellt, das von IMS und BFI entwickelt, zum Patent angemeldet [7] und bereits bei einem Anlagenbetreiber installiert und in Betrieb genommen wurde. Erste Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass folgende Nutzeffekte für den Kunden nachweisbar sind:

- Gleichmäßige Lackauftragung durch genaue Messung und moderne Regelung der Lack-schichtdicke für das gesamte Produktspektrum
- Integrierte Qualitätsmessung und Prozessregelung in einem Automatisierungssystem
- Erhebliche Reduzierung von Energie- und Materialverbrauch
- Kosteneinsparungen von ca. 10% durch zuverlässige Messungen und automatische Regelungen
- Reduzierte Laborkosten durch verminderte Anzahl von Kontrollmessungen

Autoren

- Dipl.-Ing. Andreas Wolff, wiss. Angestellter und Projektleiter
- Dr.-Ing. Mohieddine Jelali, wiss. Angestellter und Projektleiter
- Dr.-Ing. Ulrich Müller, stellv. Abteilungsleiter, Abteilung Anlagen- und Systemtechnik, Betriebsforschungsinstitut VDEh-Institut für angewandte Forschung GmbH, Düsseldorf
- Dipl.-Ing. Michael Henkes, Abteilung Systemtechnik Kaltband, IMS Messsysteme GmbH
- Dipl.-Ing. Horst Krauthäuser, Abteilung Systemtechnik Kaltband, IMS Messsysteme GmbH
- Dipl.-Ing. Guido Stallknecht, Projektleiter, Abteilung Vertrieb Kaltband, IMS Messsysteme GmbH

Quellen

- [1] Schumacher, B., Filthaut, C., Müschenborn, W., Piehl, C., Schinkinger, B., Schwerdt, C.: Entwicklungstendenzen bei der Oberflächenveredelung von Feinblech, *stahl und eisen* 122 (2002), S. 41/46
- [2] Boguslawsky, K., Schnepfer, W.: Einsatzmöglichkeiten und technische Entwicklungen von Coatersystemen, *stahl und eisen* 122 (2002), S. 49/52
- [3] VOEST-ALPINE Industrieanlagenbau: Flexible Solutions for Color-Coating Lines, Broschüre, 2003
- [4] Kistler, S.F., Schweizer, P.: Liquid Film Coating, Chapman & Hall, 1997
- [5] Peters, H., Heckenthaler, T., Link, N.: Application of data mining methods to find correlations between quality data and process variables, *Proc. IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, 2001*, S. 141/146
- [6] Morari, M., Zafriou, E.: Robust Process Control, Prentice-Hall, 1989
- [7] Jelali, M., Müller, U., Wolff, A., Fackert, R.: Adaptive Regelung von Mehrrollen-Lackbeschichtungssystemen für Metallbänder, Internationale Patentanmeldung, BFI+IMS, 2003
- [8] Wolff, A., Gorgels, F., Jelali, M., Lathe, R., Mücke, G., Müller, U., Ungerer, W.: State of the Art and future trends in metal processing control, *Proc. METEC Congress, 2003*, S. 393/402