

Von Schwärmen lernen: Mini-Sensoren zur Schichtdickenmessung im industriellen Umfeld

Von Schwärmen lernen: Mini-Sensoren zur Schichtdickenmessung im industriellen Umfeld, Dipl.-Physiker Georg Nelke, OptiSense Gesellschaft für Optische Prozessmesstechnik GmbH & Co. KG, Haltern am See, Deutschland, Nelke@optisense.com

Kurzfassung

Schichtdickenmessung im industriellen Umfeld soll zukünftig mit hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit bei höchster Stabilität erfolgen. Idealerweise können die Prüfsysteme zudem berührungslos, zerstörungsfrei und in Bewegung messen. In diesem Vortrag werden neuartige Sensorkonzepte vorgestellt, die den oben skizzierten Anforderungen umfassender Qualitätskontrollen gerecht werden. Der Fokus liegt auf einem RAIS-(Redundant Array of Independent Sensors) Sensorsystem, bei dem eine große Anzahl miniaturisierter Sensoren im Verbund wie ein einziges großes Ganzes arbeitet. Der Ausfall einzelner Sensoren bleibt ohne Auswirkung. Die RAIS-Lösung bietet nicht nur deutlich umfangreichere und damit bessere Messergebnisse. Der Schwarm-Sensorverbund sorgt auch dafür, dass Daten nicht verloren gehen und die Messstation permanent verfügbar bleibt. Weiterhin erfahren Sie im Vortrag, wie modernste Sensoren und Datenverarbeitungskomponenten ineinandergreifen, um Anpassungen der Applikationen zu minimieren und intelligente, effiziente IIOT-Sensoren zu integrieren.

Abstract

In the future, coating thickness measurement in the industrial environment should take place at high speed and accuracy with maximum stability. Ideally, the inspection systems will also be able to measure without contact, non-destructively and in motion. In this presentation, novel sensor concepts will be introduced that meet the requirements of comprehensive quality control as outlined above. The focus is on a RAIS (Redundant Array of Independent Sensors) sensor system, in which a large number of miniaturized sensors work together as a single large whole. The failure of individual sensors has no effect. The RAIS solution not only offers significantly more comprehensive and thus better measurement results. The swarm sensor network also ensures that data is not lost and that the measuring station remains permanently available. Furthermore, you will learn in the presentation how state-of-the-art sensors and data processing components interlock to minimize application processes and integrate intelligent, efficient IIOT sensors.

1 Einleitung

Wenn neue Messaufgaben für Beschichtungsanwendungen in der Großserienfertigung geplant werden, möchten die Kunden häufig die volle Kontrolle über ihren Prozess für alle zu prüfenden Teile haben und bei diesen Teilen eine 100%ige Abdeckung der Messungen erreichen. Mehr oder weniger ist dieser doppelt sichere Weg nur der Versuch, "sicher" zu sein, dass alle Teile "richtig" beschichtet sind und die Qualität "gut" ist. Aber bei diesem Ansatz sind die Herausforderungen hinsichtlich der Komplexität der Messgeräte, des Roboteraufbaus und der Produktionsfläche für die Messstation unglaublich groß. Außerdem überfordert die Notwendigkeit, alle potenziellen Daten auf eine KPI-Zahl zu bringen, die ein "grünes Lächeln" auf dem großen Produktions-Dashboard Monitor unter dem Dach der Produktionshalle auslöst, oft selbst die besten Data-Mining-Experten im Team, sofern sie einen haben. Da jeder weiß, dass während der Produktion "einige" Schwankungen auftreten können, wird in einem zweiten Schritt das Zauberwort des "geschlossenen Regelkreises" am Diskussionstisch herumgereicht, um die restlichen Bedenken wegzuwischen. Dies ist ein menschlich verständliches Ziel, das aber nichts mit den begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen zu tun hat. Und was noch

schlimmer ist: Sensoren und Messstationen haben keinen ROI, wenn sie die endgültige Anforderung nicht erreichen: Nach all den Anstrengungen und der Arbeit muss sich am Ende jemand mit den aggregierten Daten befassen, um Maßnahmen anzustoßen, die die Qualität erhöhen oder zumindest stabilisieren, die erste Durchlaufzeit erhöhen und hoffentlich die Produktionskosten senken. Wenn dies nicht der Fall ist, wird Geld verschwendet und man hat eine Menge Nerven verloren.

1.1 Die Rolle der Schichtdicke bei Lackierapplikationen

Was sind die Hauptziele bei der Überwachung der Schichtdicke? Zunächst einmal muss sichergestellt werden, dass die gemessenen Werte innerhalb des zulässigen Anwendungsbereichs liegen (Toleranz genannt).

Beispiel: Angenommen eine Prozess toleranz von $T < 20 \mu\text{m} @ C_p \geq 1.33$ sollte die maximale Standardabweichung $\sigma \leq T / (6 C_p) = 2.5 \mu\text{m} \approx 0.1 \text{ mil}$ betragen. In der Regel werden die Grenzwerte nicht durch die Schichtdicke selbst bestimmt, sondern durch eine vorrangige Messgröße, die durch ein komplexeres System gemessen werden müsste und meist für den späteren Kunden relevant ist.

Also, die Frage: "Wozu dient die Messung der Schichtdicke?" sollte demnach anders lauten: "Ist es nicht einfacher und stabiler, die Schichtdicke innerhalb des Prozesses zu messen, wenn man die Abhängigkeit vom Leitparameter kennt?" Die einfache Antwort lautet meist: "JA"

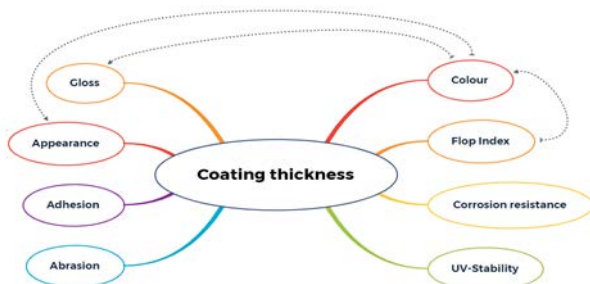


Bild 1 die zentrale Rolle im Beschichtungsprozess

2 Inline setup

2.1 Detaillierte Geometrien vs. "Mittelwert"-Messungen

Da die Geometrien des täglichen Gebrauchs durch moderne 3D-Produktionsverfahren - nicht nur im Falle eines 3D-Druckers - immer komplexer werden, muss dieses "billige" Substrat beschichtet werden, um das endgültige Oberflächenverhalten zu erhalten. Das Aufbringen einer dünnen Schicht auf eine komplexe Geometrie führt jedoch mehr oder weniger zu "Hügeln und Tälern" auf diesem Produkt. Probleme bei beschichteten Bauteilen im Gebrauch entstehen typischerweise durch exponierte Bereiche mit kleinem Biegeradius und nicht durch die ebene Fläche dazwischen.



Bild 2 Kritische Beschichtungs- und Messbereiche

Beispiele:

- Karosserie: A/B/C-Säule, Vorderseite der Motorhaube, Schiebedachöffnung, Schweller, Kotflügel, ...
- Dichtungssysteme: Dichtungslippen, Fensterkanäle, ...
- Schutzbeschichtungen: Schweißnähte

Die Ermittlung von "Mittelwerten" aus der Mitte dieser mehr oder weniger flachen Bereiche, wie z. B. der Mitte einer Vordertür oder einer Motorhaube, kann zu sehr stabilen Werten führen, gibt dem Bediener aber nicht das Wissen über die wirklich kritischen Teile. Eine einfache statistische Zahl sagt uns, dass ein normaler "fähiger" Prozess nur mit einem Messgerät gesteuert werden kann, dass eine

Standardabweichung von maximal 1/8 des Toleranzfensters aufweist. Oft sind Inline-Sensoren in rauen Umgebungen in der Lage, eine Reproduzierbarkeit von 5 % zu erreichen. Was aber, wenn man nicht weiß, was an den wirklich kritischen Stellen passiert? Unserer Erfahrung nach liegen die Schwankungen über das gesamte beschichtete Teil oft um mehr als einen Faktor zwei voneinander entfernt.

2.2 Multi-Sensor Layout vs. Roboterautomatisierung

Die technische Lösung für dieses Problem der Beschichtungsverteilung ist häufig ein schneller Roboter, der sich so schnell wie möglich zu allen interessanten Bereichen auf dem Teil bewegt. Dies führt jedoch zu einem sehr komplexen Aufbau, der viel Platz, Zeit und Programmierressourcen beansprucht, da beschichtete Teile in immer kürzerer Zeit geliftet werden müssen. Und nicht zu vergessen: Dies ist keine produktive Station, so dass sich der Aufwand und die Zeit des Fertigungsteams in erster Linie auf die Produktion konzentriert! Wäre es also nicht einfacher, einen mehr oder weniger statischen Aufbau mit mehreren oder einer Reihe von Sensoren zu haben, die jeweils auf den interessierenden Punkt / Bereich ausgerichtet sind?



Bild 3 Multi Sensor Layout

Typische Anwendungsfelder des Aufbaus:

- Extrem hohe Taktraten der Teile bei gleichzeitig
 - geringer Anzahl von Produktvarianten pro Produktionslinie
 - Ein Sensor pro Applikator, um sicher zu gehen, dass kein selektiver Fehler oder Drift übersehen wird
- Bei Array-Sensoren, die typischerweise wesentlich teurer sind, ist der höhere Aufwand zur Realisierung der dynamischen ROI-Auswahl der Prüfpunkte und der damit verbundene numerische Aufwand zu berücksichtigen.

3 Online setup

3.1 Pick and Place Roboter und Schichtdickensensoren

Bei sehr hohen Produktionstaktraten in Verbindung mit einer undefinierten Positionierung der Teile aufgrund der

Fördertechnik - hängende Teile, Ketten mit nicht konstanter Geschwindigkeit, Trommelbeschichtung - ist es oft nicht möglich, die genaue Messposition zu treffen. Berührungslose Verfahren, die eine bestimmte Zeit für die Messung benötigen, aber über einen Geschwindigkeits- oder Abstandsausgleichsmechanismus verfügen, mitteln die gesammelten Daten immer noch über einen viel breiteren Bereich. Dies führt zu undefinierten Messbedingungen, wenn es um die anschließende Datenauswertung und Analyse geht. Aber, wie bereits erwähnt, ist das eigentliche Ziel, die kritischen, typischerweise kleinen Punkte zu finden.

3.2 Veränderung des Inertialsystems: Produktion vs. Messung

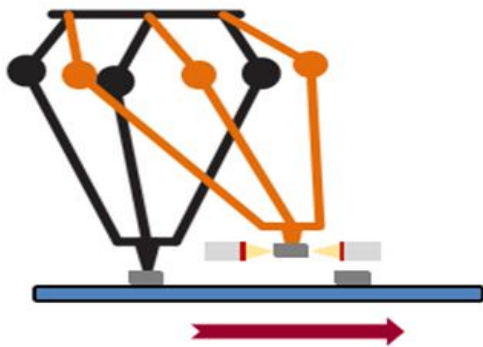


Bild 4 Pick-and-place zum Inertialsystem

In den oben beschriebenen "rauen Umgebungsfällen" ist es gleichzeitig statistisch nicht notwendig, eine 100%ige Kontrolle aller Teile zu haben und es ist konsequenter und einfacher, das Teil oder den Sensor nur für den Zeitraum der Messung kurzzeitig gegen ein anderes "Inertialsystem" auszutauschen. Die Entscheidung, ein Teil oder einen Sensor zu bewegen, sollte sich an der Gewichts Differenz zwischen Teil und Sensor und der erreichbaren Stabilität der so entstehenden "Kurzzeitmessblase" orientieren.

Unterstützende Techniken sind die sehr schnellen und flexiblen "Pick and Place"-Roboter, die eine extrem geringe "Effektor Masse" haben und oft nahtlos mit adaptiven Kamerasystemen zusammenarbeiten.

3.3 Messungen mit hoher Komplexität vs. Referenzpunktkonzept

Bei einem Wechsel des Trägheitsmesssystems im Falle von Produktionsproblemen oder bei der Inbetriebnahme eines neuen Produkts oder einer neuen Linie könnte ein noch komplexeres Messprogramm von der Offline-Station ausgeführt werden. Dies wäre natürlich zeitaufwändiger, würde aber auch tiefere Informationen über die Schichtverteilung liefern. Danach, bei voller Produktion, reicht ein weniger komplexes Messprogramm aus, das mit der gleichen Sensoranordnung gemessen werden kann. Dieses Programm könnte auf ein "Referenzpunkt"-Szenario reduziert werden. Aber ein Konzept, das nur einen oder zwei Referenzpunkte berücksichtigt, ist oft sehr riskant und

"suggeriert" eine Prozessstabilität, die bei genauerer Betrachtung nicht gegeben ist.

4 Besondere Anforderungen für In-line Schichtsensoren – Temperatur und Luftfeuchtigkeit

4.1 Viskosität des Beschichtungsmaterials

- Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in der Spritzkabine, sowie Sprühdruk > Beschichtungstropfen Austrocknung während des Fluges
- Substrattemperatur vor und nach dem Beschichtungsvorgang
- Restfeuchte im Zwischenofen > Restfeuchte, Ausdampfen der Schicht
- Endaushärtung Haftung, Glanz, Farbe

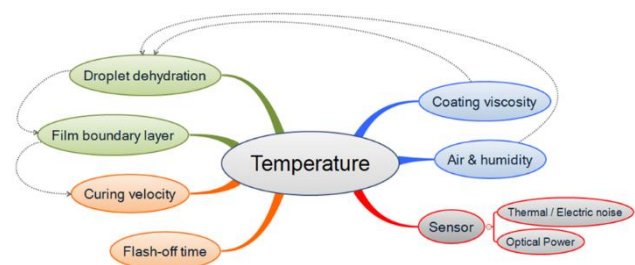


Bild 5 Temperaturabhängigkeiten

Auch wenn die Temperatur also nur eine flüchtige Zustandsinformation ist und nicht nachträglich am Endprodukt "qualitätsgeprüft" werden kann, so bietet sie doch eine Vielzahl von Möglichkeiten, den gesamten Beschichtungsprozess und selbst geringe Schwankungen zu verstehen. Da diese Größe sehr kostengünstig gemessen werden kann, sollte jede Analyse von Prozessstörungen hier ansetzen.

4.2 Nass- / Pulver und Quasi Trockenmessungen

Moderne (optische) ZfP-Messverfahren können auch an "nicht ausgehärtetem" Beschichtungsmaterial durchgeführt werden. Der Vorteil, sehr früh im Prozess zu sein, muss oft mit komplizierten Applikationsverfahren bezahlt werden. „Applikation“ ist mehr oder weniger das falsche Wort, da man erst dann von einer „Vorhersage“ der zu erwartenden Schichtdicke sprechen kann, wenn der gesamte Beschichtungsprozess abgeschlossen ist und die Teile von der Qualitätsabteilung kontrolliert werden. Die Messung von nicht ausgehärtetem Beschichtungsmaterial hängt von einer Vielzahl von Einflussparametern ab. Die meisten von ihnen sind jedoch nahezu stabil, wenn man einen gut eingestellten Applikationsprozess auf Zeitskalen von 15 bis 60 Minuten betrachtet. Die Erfahrung zeigt, dass die direkte Applikation von Inline- und Online-Sensoren eine nie endende Aufgabe darstellt.

4.3 Was ist die Alternative?

Im Rahmen der sekundären Datenspeicherung und der direkt im Datenbankkern durchgeführten Data-Mining-Techniken werden auch die stichprobenartigen Endprüfungsergebnisse der Qualitätsabteilung in dieses System eingespeist, und die Vorhersage des Inline-/Online-Sensors könnte dynamisch durchgeführt werden.

Eine typische Methode ist der Vergleich zweier statistischer reiner Verteilungsfunktionen und die Berechnung der linearen Applikation zwischen diesen beiden Datensätzen.

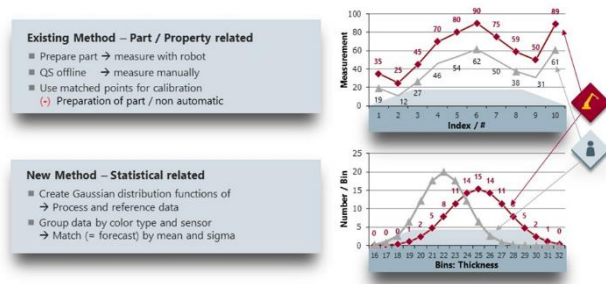


Bild 6 Statistische Applikation

Dies führt natürlich zu einer Zeitverzögerung von typischerweise etwa einer Stunde, aber diese Methode ist genauer und erfordert keine zusätzlichen Anpassungen der Applikationsprogramme in der Spritzkabine. Diejenigen, die mit dieser Art von Arbeit zu tun hatten, wissen genau, dass dies extrem zeitaufwendig ist. Mehr oder weniger lässt man die Anlage einfach laufen und das Verfahren kalibriert sich selbst, auch wenn Änderungen auftreten wie:

- Neue Farben
- Viskositätsänderung
- Messprogramm / Applikation

4.4 Schritt für Schritt Konzepte vs. Gesamtschichtdicke

Wenn man sich auf schrittweise Inline-Messungen konzentriert, d. h. nur die letzte Beschichtung oder den gesamten Schichtaufbau misst, kann man die Ergebnisse dieses Prozessschritts direkt sehen, was für den verantwortlichen Prozessinhaber der wichtigste Schritt ist, den er sehen möchte (Betriebsdaten). Ein anderer Ansatz ist die Messung aller Daten nach dem gesamten Prozess durch eine schichtauflösende Technik wie Ultraschall oder heutzutage Terahertz-Techniken. Im Prinzip werden die meisten der oben genannten Einflüsse der Prozessparameter (...Temperaturen...) mehr oder weniger eliminiert, aber Mehrschichtmesssysteme benötigen sehr zeitaufwendige Kalibrierverfahren. Der eigentliche Nachteil dieses Aufbaus ist die anhaltende zeitliche Verschiebung der Messungen im Zusammenhang mit der Produktion. Man erhält die Daten, wenn alles feststeht und passiert ist, einschließlich der Fehler. Alle Teile zwischen Beschichtung und Messung müssen prinzipiell blockiert werden, da man nicht weiß, was als nächstes kommt. Das lässt sich an einem bekannten Beispiel erklären:

Stellen Sie sich vor, Sie hätten keine Wettervorhersage und würden Ihre nächsten Outdoor-Aktivitäten nur anhand historischer Daten steuern. Das ist heutzutage absolut inakzeptabel, da alle Smartphone-Apps den nächsten Regen, Wind oder die nächste Sonne auf einer 5-Minuten-Skala berechnen. Ja, Sie haben Recht: Manchmal ist das Vorhersagemodell nicht perfekt kalibriert, aber jeder akzeptiert diese Einschränkung und genießt das Leben, indem er diese Dienste nutzt.

5 Optische Sensor Layouts

5.1 Messbedarf

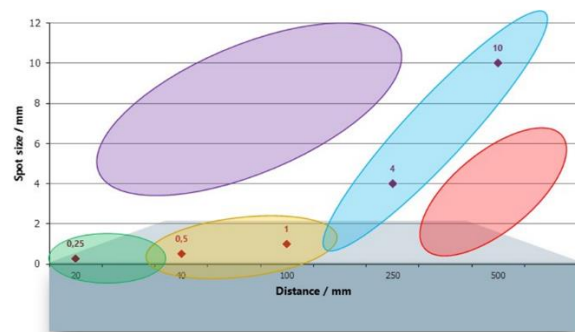


Bild 7 Geometrische Anwendungsbereiche von photothermischen Sensoren

Sehr oft haben Kunden relativ unterschiedliche Bedürfnisse, wenn es um die Messung der Schichtdicke geht:

- kleine Teile mit extrem kleinem Biegeradius und damit kleinen Messflecken ($\varnothing < 0,25$ mm) und Interesse an noch so kleinen Unregelmäßigkeiten,
- große Teile mit einer großen Menge an Beschichtungsmaterial und großen Messflecken ($\varnothing > 5$ mm) zur Mittelwertbildung bei rauen Oberflächen und
- schnell bewegtem Material bei Bandbeschichtungsanwendungen.

Neben diesen geometrischen Randbedingungen ändern sich oft auch der gewünschte Arbeitsabstand und der Platzbedarf erheblich. Normalerweise wollen die Kunden aber alles gleichzeitig haben:

- einen großen Arbeitsabstand bei geringem Platzbedarf für den Sensoraufbau,
- eine breite Akzeptanz bei Abstandsvariationen, gleichzeitig aber auch
- sehr hohe räumliche Auflösung und
- relative Geschwindigkeitsakzeptanz.

Ein großer Vorteil optischer Verfahren ist typischerweise die Skalierbarkeit der Geräte. Dennoch ist es notwendig zu entscheiden, in welchem Maßstab die anstehende Aufgabe bearbeitet werden soll. Wenn man dies tut, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass man die richtige Lösung findet. Das bedeutet nicht automatisch, dass große Teile auch große Sensoren mit langen Arbeitsabständen und großen Messbereichen benötigen. Die typischen Prozessunregelmäßigkeiten, die kontrolliert werden müssen, sollten den Auswahlprozess vorantreiben.

5.2 Langfristiges Verhalten und Ersatzteile

Die meisten optischen NDT-Sensoren sind in vollautomatische Anlagen integriert. Dies führt zu einer sehr hohen Belastung der Sendeoptiken und insbesondere der integrierten Lichtquellen. Da normale Produktionslinien oft 20 Stunden an 300 Tagen im Jahr laufen, summiert sich dies auf mindestens mehr als 6.000 Stunden pro Jahr. Diese Belastungen können nur mit modernsten Halbleiterlichtquellen wie LEDs oder Lasern erreicht werden. Diese Arten von Lichtquellen haben weiterhin sehr hohe Quanteneffizienzen, so dass eine passive Kühlung oft kein Problem darstellt. Der Bedarf an neuen emittierenden Wellenlängen und Leistungen zur Optimierung der verschiedenen Messaufgaben steigt von Tag zu Tag. Und nicht zuletzt ist die Steuerung der optischen Leistung zur Kompensation auch geringer Alterungserscheinungen absoluter Standard.

Im Falle eines Sensorausfalls, insbesondere bei einer Multisensorkonfiguration, ist der Austausch eines Ersatzteils ohne neue Applikation für alle Kunden selbstverständlich. Dies scheint für den Kunden klar zu sein, ist aber für alle Sensoranbieter nicht ganz einfach und geht oft mit einer höheren Anzahl von Standardsensoren inklusive einer gut durchgeführten Werksapplikation einher.

Das bedeutet: Die Wahl eines hochspezialisierten High-End-Sensors, der in kleinen Losgrößen gefertigt wird, ist oft ein Flaschenhals, wenn es um langfristige Unterstützung und zusätzlichen Service geht.

5.3 Array Sensoren vs. Schwarmkonzept

Die oben genannten Einschränkungen für Ersatzteile könnten in der folgenden Überlegung enden:

Stellen Sie sich vor, Sie haben eine große Fläche, die vermessen werden muss. Natürlich würden Sie gerne einen High-End-Array-/Kamerasensor wählen, da Sie alle Informationen auf einen Blick erhalten. Dieser Sensor wird wahrscheinlich viel teurer sein, da es sich um eine aktive Tiefenauf Lösungsmessung handelt, die viel optische Leistung benötigt. Wir haben auch schon gelernt, dass eine Messung der gesamten Komplexität normalerweise nur bei der Entwicklung eines neuen Prozesses oder der Änderung der Teilegeometrie erforderlich ist. Danach sind die "richtigen" Referenzpunkte die, die in der Beschichtungsanlage kontrolliert werden müssen. Diese Punkte oder Bereiche sind aber oft nicht mit einer Kamera-/Sensorposition erreichbar. Der einfachste Anwendungsfall ist ein Teil, das von der Vorder- und Rückseite gemessen werden muss. Zusammen mit den Aspekten der Langzeitstabilität und des Ersatzteilbedarfs besteht ein weiterer Ansatz darin, eine große Anzahl von "einfachen" Standardsensoren an der "richtigen" Position auf dem Teil zu platzieren. Dies führt zu einem Schwarm von einfachen Sensoren, die ihre Arbeit extrem schnell erledigen - weil sie so viele sind, wie Ameisen - und im Falle des Ausfalls eines Sensors wird die Produktion fortgesetzt und das Ersatzteil wird einige Stunden später eingebaut.

Und hier kommen wir wieder auf das zurück, was wir ohnehin tun müssen (siehe Kapitel SPS und Datenspeicherung). Alle Sensoren müssen an eine Datenerfassungssteuerung angeschlossen werden, die in der Lage ist, mit einer variablen und hohen Anzahl von Sensoren zu arbeiten. Die Sensoren selbst müssen mit Hot-Plug-Funktionen ausgestattet sein.

6 Zusammenfassung

Optische Sensoren, insbesondere für Schichtdickenanwendungen, sind in immer mehr Szenarien im Kommen, da sie schnell und langlebig sind, ohne die zu prüfende Oberfläche zu "berühren". Darüber hinaus bietet die Schichtdicke oft einen einfachen Zugang zu noch komplexeren Schichtparametern, die inline nicht oder nur sehr aufwändig zu prüfen sind. Neben der technischen Prüfung, um ein neues opto-physikalisches Verfahren für die gewünschte Schichtdicke an der gewünschten Stelle on- oder inline abzusichern, muss die Priorität bei der Planung auf die verwertbaren Daten am Ende des Projektes gelegt werden. High-End-Array-/Kamerasensor benötigen wegen der Tiefenauf Lösung eine hohe optische Leistung, was sich am Ende auf die Kosten der Sensoren auswirkt. Die Vor- und Nachteile sind in Hinblick auf Kosten, Ausfallsicherheit und Ersatzteilverfügbarkeit im Vergleich zu Standardsensoren sorgfältig abzuwägen. Wenn eine Investition in Messtechnik nicht in der Lage ist, wirklich detaillierte Informationen über die Prozessstabilität auch für die Langzeitbeobachtung zu liefern, wird sie keinen ROI erzeugen. Für aktuelle und zukünftige Anlagen ist die geeignete datengetriebene Lösung ein gleichwertiger Teil des Planungsprozesses. Das Steuergerät der Sensoren muss einerseits den Anforderungen von Big Data gerecht werden und sich andererseits nahtlos in die SPS-Kommunikation der Maschinenwelt integrieren.

7 Literatur

- [1] Simon Haykin: Handbook on Array Processing and Sensor Networks, Wiley IEEE Press, 2010.
- [2] Marus Wolff, Sensor-Technologien: Band 1: Position, Entfernung, Verschiebung, Schichtdicke, De Gruyter Studium, Oldenburg, 2016.
- [3] Georg Nelke: Vergleich zweier Schichtdickenmesssysteme in der praktischen Anwendung, beam-Verlag, meditronic-journal, Marburg, 2022.